

3D 打印技术

主编：吴姚莎 陈慧挺

副主编：曾佳 王丽荣

目 录

第一章 3D 打印概述.....	5
1.1 3D 打印技术简介.....	5
1.2 3D 打印技术分类	5
1.3 3D 打印的原理.....	8
1.3.1 熔融沉积成型原理	8
1.3.2 选择性激光烧结原理	9
1.3.3 光固化成型原理	10
1.3.4 分层实体制造增材制造技术	11
1.5 3D 打印技术优势	12
1.6 3D 打印的应用.....	12
1.7 国内外 3D 打印技术现状	15
1.8 3D 打印材料要求及分类	16
1.8.1 金属材料	17
第二章 3D 打印金属材料.....	22
2.1 粉末床熔融金属 3D 打印工艺	22
2.2 直接能量沉积工艺	23
2.3 其他金属 3D 打印工艺	24
2.4 金属粉末的制备	25
2.5 一种金属粉末生产的代替方法	27
2.6 金属 3D 打印的未来	35
第三章 3D 打印高分子材料	39

3.1 高分子材料的优势	39
3.2 高分子材料的特性	40
3.3 聚乳酸材料	41
3.4 ABS 丝材.....	43
3.5 聚苯砜丝材	44
3.6 聚碳酸酯丝材	44
第四章 3D 打印光敏树脂材料	54
4.1 光固化 3D 打印技术简介	54
4.1.1 喷射型光固化 3D 打印	54
4.1.2 激光固化快速成形 3D 打印	55
4.1.3 连续液体界面制造 3D 打印	56
4.2 光敏树脂的组成	57
4.2.1 预聚物	58
4.2.2 活性稀释剂	60
4.2.3 光引发剂	62
4.2.4 其它助剂	66
第五章 3D 打印无机非金属材料	69
5.1 陶瓷 3D 打印材料.....	69
第六章 3D 打印生物材料.....	77
6.1 医用金属材料	80
6.2 医用无机非金属材料	82
6.3 医用高分子材料	84

6.5 细胞参与的生物 3D 打印材料	87
第七章 新型 3D 打印材料.....	92
7.1 金属 3D 打印典型应用	92
7.1.1 航空航天应用	93
7.1.2 汽车行业应用	94
7.2 光敏树脂 3D 打印典型应用	96
7.2.1 工业应用	97
7.2.2 建筑行业应用	98
7.2.3 教育行业应用	99

第一章 3D 打印概述

1.1 3D 打印技术简介

3d 打印也称增材制造 (additive manufacturing, AM)，是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术。3d 打印机则出现在上世纪 90 年代中期，即一种利用光固化和纸层叠等技术的快速成型装置。它与普通打印机工作原理基本相同，打印机内装有液体或粉末等“印材料”，与电脑连接后，通过电脑控制把“打印材料”一层层叠加起来，最终把计算机上的蓝图变成实物。其技术的出现，被认为是“一项将要改变世界的技术”，引起全世界的关注。随着科技的不断进步，新材料的不断研制成功，3D 打印应用领域不断展开，使得其不再局限于制造领域，引领了社会变革的潮流。

1.2 3D 打印技术分类

3D 打印技术有着巨大的市场应用前景，近年来在世界范围内逐渐成为研究热点，在许多国家的工业制造中得到了广泛的应用，催生出一个全新的技术领域。作为一种快捷简便的成型技术，在产品原型设计、模具的制造和艺术创作生产、珠宝精细制作等领域都有涉及，3D 打印在这些领域的发展用于替代一些传统的复杂精加工工艺。此外，近年来 3D 打印技术备受关注，飞速发展，逐渐适用于航空航天、医学、工业、电子加工等领域。为新时代创新发展开拓了广阔的空间。

当前该技术的研究集中在打印成本的降低，打印精度的提高，打印出产品的强度、刚度的增强，打印时间的缩短四个方面。

目前的 3D 打印技术主要可以分为以下几种类别：熔融沉积快速成型（Fused Deposition Modeling），简称为 FDM、选区激光烧结（Selective Laser Sintering），简称为 SLS、立体光刻/光固化快速成型（Stereo Lithography Apparatus），简称 SLA、三维粉末粘接（Three Dimensional Printing and Gluing），简称为 3DPG、激光选区熔融成型（Selective Laser Melting,）简称为 SLM、分层实体制造(Laminated Object Manufacturing) 简称 LOM、电子束选区熔化（Electron Beam Melting），简称为 EBM、电子束熔丝沉积成形（Electron Beam Freeform Fabrication）简称为 EBF、金属激光熔融沉积（Laser Direct Melting Deposition）简称为 LDMD。

1) 熔融沉积快速成型（FDM）是将预先制备好的丝状的热塑性高分子材料在一定温度下熔融，施加压力使其通过具有一定口径的喷头挤压出来层层堆积并冷却固化。所采用的热塑性高分子材料包括丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（ABS）、聚碳酸酯（PC）、聚砜（PSF），聚乳酸（PLA）等。成型时，首先在喷头中加热使丝状高分子材料熔融具有流动性，再加压使其从喷嘴挤出，随着打印机控制喷头的矢量移动，熔融的高分子在基座上逐渐涂覆堆积，并在空气中冷却进而达到快速固化的目的。经过多次循环，反复打印得到三维产品。FDM 的整个系统构造原理简单和操作摆脱繁琐复杂的工艺，设备维护成本较低，系统安全系数高。 所采用的打印材料通常是绿色环保的高分子

聚合物，可在多种环境中安装使用，成型工艺简洁干净，操作方便不产生废料。

2) 光固化快速成型（SLA）方法[24]是目前 3D 打印快速成型技术中最引人瞩目的一种方法，关于 SLA 的研究较为系统细致，技术最为成熟。SLA 技术具有成型速度快、原型精度高等优势而且非常适合制作精度要求较高，结构复杂的模型的制造。SLA 所采用的打印原料一般为液态的光敏树脂，成型原理是通过一定波长的光源辐照，引发打印原料中的化学交联反应进而使其快速凝固，逐层堆叠得到最终的固化打印件。其中打印原料的性能，打印件固化程度的好坏对成型零件的力学强度，稳定性具有直接影响，一定程度上制约着 SLA 技术的发展前景。

3) 分层实体制造技术（LOM）的原料是通常是片状或薄膜材料，例如常见的纤维素纸、金属箔（铜箔、铝箔等）、高分子膜等。成型时，首先用热熔胶涂敷在原材料表面，根据所需模型的每个截面进行切割并层层粘接，进而实现打印件的立体成型。该方法具有成型速度快，适合大尺寸零件的成型的优点，缺点在于原材料浪费较为严重，打印件的表面质量较差。

4) 电子束选区熔化（EBM）与以上几种打印技术的最大不同在于成型过程处于真空环境下，并以金属粉末为材料源，采用电子束为能量源，将金属粉末在粉末床上不断地均匀铺展的同时用高能电子束扫描加热使其熔融，熔融的金属液体相互汇聚凝固，反复重复这一过程实现完整金属部件的打印。这是目前少数可用于金属零件成型加工

的 3D 打印技术，并且制备出的金属零件结构精细、综合性能良好，然而组成打印设备的粉末床和真空腔室的尺寸限制着金属打印件的尺寸。

5) 激光选区熔化成形技术 (SLM) [27] 的成型原理与电子束选区熔化成形技术类似，同样是基于金属粉末在粉末床上铺展和熔融，不同之处在于采用激光束代替了电子束，由于激光高精度高能量的特性，通过这种打印技术同可以打印出结构更为复杂、性能更为优异、表面形貌良好的金属零件，但目前这种技术的缺点是无法成形出大尺寸的零件。

6) 金属激光熔融沉积成形技术 (LDMD) 与 SLM 技术类似，采用高能激光束为热源，采用自动送粉设备将金属粉末准确地输送到激光在成形表面上所形成的熔池中。随着激光束的矢量移动，实现粉末的不间断熔融和固化，进而得到打印的金属模型。相比于 EBM 和 SLM，LDMD 的优势在于可以制备大尺寸金属部件，但缺点在于成型精度较差，无法制备具有复杂结构的零件。

7) 电子束熔丝沉积成形技术 (EBF) 是采用电子束为加热源热源为电子束，预制的金属丝为原材料，为了避免金属的氧化，同样需要在真空环境下操作。成型时，通过送丝装置将金属丝按照一定轨迹送入熔池，熔融后固化。该方法成型效率高，成型后的零件内部质量好，但精度较差，对原材料的塑性要求较高。

1.3 3D 打印的原理

1.3.1 熔融沉积成型原理

熔融沉积成型是发展最早，应用最广，技术最为成熟的 3D 打印技术，优点在于打印系统构造简单、操作简便、成本低廉、适用于多种材料的打印、原材料利用率较高。熔融沉积成型的工作原理如图 1-1 所示。送丝系统将打印丝材送入打印喷头内加热熔融，通过加压使熔融的材料通过一定直径的喷头挤压出来，随着计算机程序控制喷头在三维方向上进行矢量运动，挤出的物料在工作台上进行选择性沉积，物料经过空气快速冷却固化，逐层粘接形成立体三维结构。

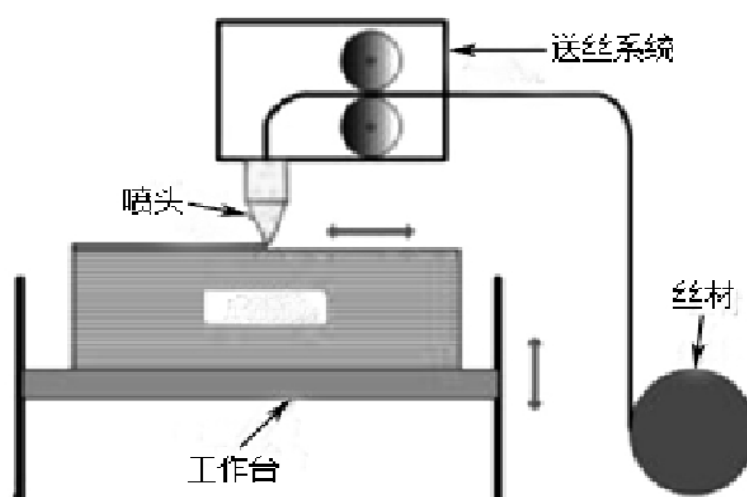


图 1-1 熔融沉积成型原理

1.3.2 选择性激光烧结原理

SLS 技术的原理为分层叠加，在计算机程序的调控下，利用高能激光将金属粉末材料熔融烧结、实现逐层堆积成形。该技术的原理如图 1-2 所示。首先，采用计算机软件绘制要打印的样品的三维实体模型，导出文件。打印时对粉料预热，当原材料的温度达到设定值后，通过粉缸的上升将带动粉末原料均匀铺展在工作台上，操作计算机软件控制设定功率的激光束使其按照一定的速度和轨迹运动对粉末截面进行层层扫描。在高能激光的扫描下，粉末原料熔融后烧结，

尚未接触激光的粉末作为与下一层粉末的支承层。待各个层次的粉末都烧结以后，工作台将根据粉末层的厚度依次下降，实现逐层烧结，整个过程不断地循环，直到获得最终的打印部件即可。

相比其他传统的成型技术，SLS 将金属部件的加工从刀具、压具、模具等器材中解放出来，并可以轻松实现具有复杂内部结构零件的快速成型，制造难度和成型周期远远小于传统工艺。此外，可用于 SLS 技术的原材料范围广泛，只要是经过高温可以熔融粘结的粉体材料均可用于 SLS 成型。并且 SLS 工艺简单、材料高效率利用。

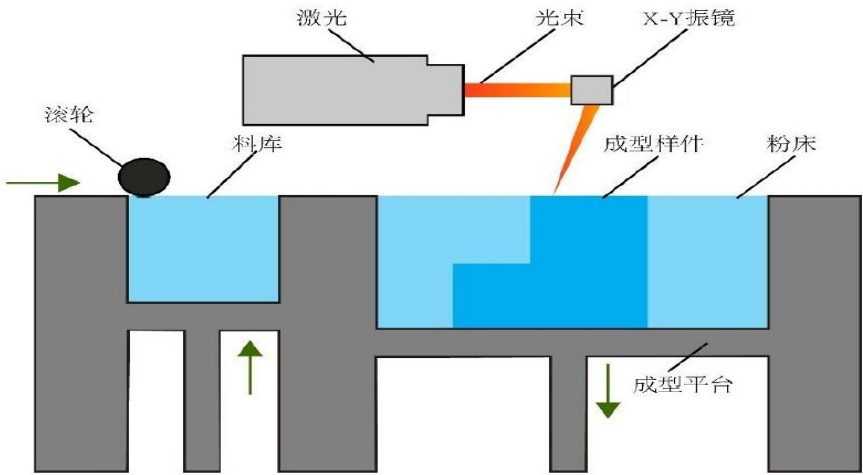


图 1-2 激光烧结原理

1.3.3 光固化成型原理

光固化 3D 打印技术是通过向原料中引入光引发剂，在材料打印的过程中通过紫外光等特定波长的光照使材料迅速固化成型，具有成型速度快、精度高，非常适合制作精度要求高，结构复杂的原型的优势。而且就发展来看，光固化成型技术相对成熟，应用广泛，无疑是最具发展潜力的一种 3D 打印技术。但目前的光固化 3D 打印也存在一些缺点，例如打印产物韧性较差，可打印的树脂种类较少。图

1-3 为光固化 3D 打印成型的原理图。用特定波长的紫外光辐照液态光敏树脂，激发引发剂发生自由基反应进而交联固化，层层堆叠得到三维实体。

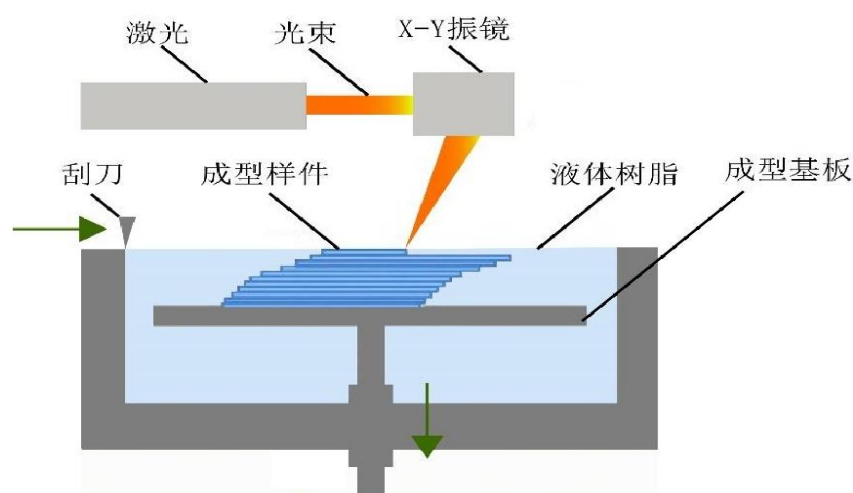


图 1-3 光固化成型原理

1.3.4 分层实体制造增材制造技术

分层实体制造增材制造技术（LOM, Laminated Object Manufacturing）自 199 年被提出以来已经得到了快速的发展。其基本工作原理是将纸板、薄膜等耗材通过热熔胶黏在一起，通过计算机采集的三维模型的切片信息控制激光切割系统将工作台上的耗材进行三维模型轮廓的切割，并将非轮廓区域切成微小的网格以方便后续废料的处理，在一层轮廓切割完成之后继续粘结新的耗材进行三维模型轮廓的切割，重复上述过程直至制件加工完成。LOM 技术相比于其它增材制造技术具有加工制件翘曲变形小、尺寸精度高等优点。图 1-4 为分层实体制造技术加工原理图。

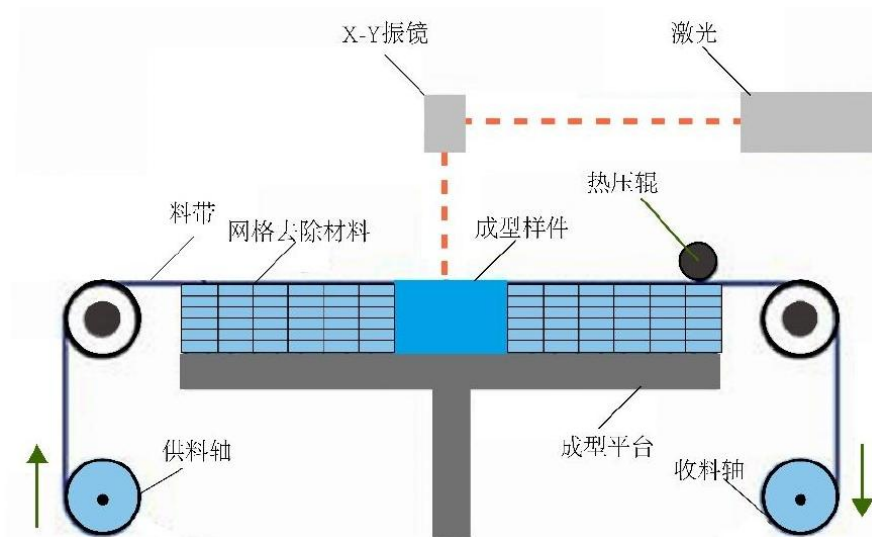


图 1-4 LOM 增材制造技术加工原理图

1.5 3D 打印技术优势

3D 打印技术相比于传统的减材和等材制造具有如下的技术优势：

1. 成型速度快，制造周期短。增材制造技术不需要机床模具，而是借助于计算机辅助设计技术快速对零部件进行建模，该技术尤其是在新产品开发方面比传统的制造工艺方法快十几倍。

2. 可加工复杂度更高的零部件，不受设备的限制。该技术是将复杂的 3D 实体模型转换为 2D 截面，进而通过设备进行打印制造，这对于制造内腔复杂，或者多孔结构的零部件尤其适合。

3. 操作简单、工作环境更为舒适安全。

4. 材料利用率高，可备选材料多，更能满足对不同材料零部件的需求。3D 打印材料一般为热塑性材料如塑料、蜡、金属粉末、陶瓷粉末等。

1.6 3D 打印的应用

由于 3D 打印成本低廉，设计简便，原料利用率高等明显的优点，经问世以来，逐渐应用于多个传统制造领域。常见的塑料，金属，陶瓷等材料均可以实现 3D 打印成型。尤其是对于具有复杂精细结构，采用传统制造技术很难或不可能实现制造的零件，应用 3D 打印可以提升制造效率，降低其制备成本。甚至在高端领域如航空航天，都已经实现用 3D 打印制备一些金属零部件，包括航空镁钛合金和其他一些高温合金等，证明了 3D 打印技术的可靠性。然而这些应用的成本较高，目前难以在民用领域推广。相对于打印难度较大的金属材料，热塑性的聚合物材料更易于加工，因此目前使用最多的 3D 打印材料均为 PLA，ABS 等热塑性高分子。近 20 年来，3D 打印技术飞速发展，逐渐应用于产品原型设计、模具制造，医疗器械、珠宝制作等传统制造业领域，逐渐替代了传统加工工艺。在各行各业上在不断取得进步，如图 1-5 所示，从市场份额分布百分比来看，在汽车及零配件领域 3D 打印技术的应用占 35%，在消费品电子领域到达 20.2%，在航空航天占 15.7%，在机器商业领域占 9.2%，在医疗牙科领域占 9.8%，在科研技术领域占 7.6%。

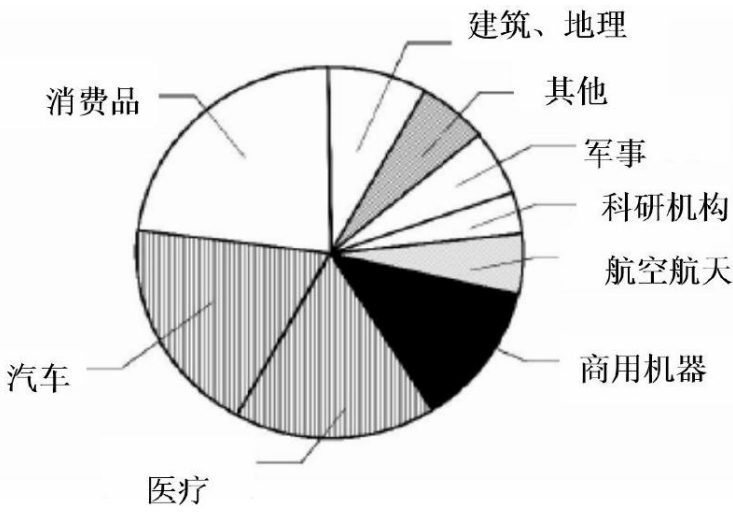


图 1-5 3D 打印在各领域发展状况

在医学领域，3D 打印可以替代传统的技术实现骨骼，牙齿，心脏支架等的快速精确成型。陈鹏等利用三维可视颌骨数字化重建及 3D 打印技术制作各种骨骼模型，制备出的上下颌骨缺损修复体模型机，通过体外重建颌骨缺损的模型来模拟外科操作手术，可以深入对颌骨等病变治疗原则的理解。SH Won 等采用 3D 打印技术实施了置换手术，这种髋关节置换手术更加精准，手术时间大大缩短。S Bose 等采用 3D 打印技术，研究了磷酸三钙对骨缺陷方面的修复应用。此外，3D 打印也可以用于前沿的分子生物学研究，例如蛋白质结构的解析，人体内的蛋白质种类繁多，结构极其复杂，目前科学家可以采用冷冻电镜等方法解析出蛋白质分子三维立体结构，再借助于 3D 打印，可直接制备出蛋白质立体模型，更直观的展现蛋白质结构，为蛋白质的结构认知提供了新的途径。

在航空航天领域，3D 打印技术已经成为一种关键技术，可以极大地提高飞行器设计和制造效率。目前，3D 打印技术已经用于导弹、飞行器、航天器、卫星的零部件制造。例如，欧洲空中客车公司已经采用 3D 打印制备出上千个飞机零件，将其用于大飞机制造上。此外，3D 打印技术甚至可以用来设计生产航空发动机这种极其精密的仪器的零部件。例如英国罗·罗公司就采用 3D 打印技术制造了部分用于生产 Trent XWB-97 发动机的钛合金零件。采用 3D 打印技术在航空航天领域，一方面可以通过简便的结构设计使零件更加轻量化，另一方面极大地提高了生产效率，因此具有良好的发展前景。

在建筑领域，3D 打印已经可以实现混凝土砂浆的打印成型。美国航空航天局联合南加州大学共同开发的新型 3D 打印“轮廓工艺”，采用这种技术，可以在一天之内建造出约为两层的建筑，面积可达 232 m²。这一革命性的技术极大地提高了建筑效率。目前可用于 3D 打印建筑的基材包括玻纤增强石膏和玻璃纤维增强砂浆。遗憾的是传统的水泥砂浆并不适合这种 3D 打印，未来需要开发和改进更好的混凝土基材，以满足这种打印需求。

总之，3D 打印已经渗透到越来越多的制造领域，正在逐步颠覆传统的制造观念，正在为未来实现真正的“绿色制造”打下坚实的基础。

1.7 国内外 3D 打印技术现状

目前，国外 3D 打印技术已经得到了广泛应用，主要涵盖航空航天、汽车制造、医疗、工业产品设计、生物科技等各个产业领域，且在各类产品的智能制造方面占有较高的比例。

自 1986 年 Hull 发明第一台 3D 打印机以来，国外关于 3D 打印技术的研究与开发取得了较大成果。2000 年美国 Zcorp 公司与日本 Rilcen Institute 联合研制出彩色打印机。2010 年美国 Organoxo 公司联合澳大利亚 Invetech 公司合作，试以活体细胞为原材料打印人体组织器官，是 3D 打印技术在医疗产品领域的重大突破性进展。2015 年，澳大利亚莫纳什大学通过激光选区熔化成形方式打印了世界上第一个全金属航空发动机。为解决疫情防控中应急物资短缺的难题，美国、意大利等国纷纷利用 3D 打印机生产呼吸机配件、个人防护面罩，甚

至还创建了在线论坛，用于政府、医院、非政府组织发布需求，以及业内人士分享经验等。3D 打印在全球疫情防控中发挥的作用，反映出这项技术普及度的提高和应用领域的扩展。根据 2020 年 3 月赛迪顾问发布的《2019 年全球及中国 3D 打印行业数据》，2019 年，全球 3D 打印产业规模达 119.56 亿美元，增长率为 29.9%，同比增长增加 4.5%。

美国仍是全球 3D 打印市场最大市场。2019 年美国产业规模占全球比重 40.4%，德国仅次于美国，中国位居第三。

作为 3D 打印起步较晚的中国，近几年，抓紧自主创新和研发，虽然和国外的技术还有一定差距，但也一步步朝着精细化和专业发展。当然，国内巨大的市场潜能，也吸引了不少国外 3D 打印行业巨头的目光和投资，进一步推动了中国 3D 打印产业的发展。

1.8 3D 打印材料要求及分类

3D 打印（增材制造）是对传统制造模式的颠覆和完善，其产品性能主要取决于粉体材料的性能。从某种意义上说，3D 打印最关键的不是制造，而是材料研发，即材料的发展决定着 3D 打印能否有更广泛的应用。3D 打印对原材料的要求比较苛刻，满足制备工艺的适用性要求所选的材料需要以粉末或丝棒形态提供。对于粉体材料，除表面质量控制外，一般要求粉末要具有高球形度，以保持良好的流动性。目前全国乃至全球增材制造市场呈现蓬勃发展的趋势。据 IDC（International Data Corporation）预测，按照全球增材制造产业在 2016-2020 年之间保持的 22.3% 年复合增长率计算，全球增材制造产值可望在 2025 年全球增材制造产业可能产生高达 2000-5000 亿

美元经济效益，届时增材制造专用粉体材料也将得到更广泛地使用，产业化前景光明。

目前，3D 打印材料主要包括金属材料、陶瓷材料、聚合物材料和各种复合材料等。下面将对各种材料进行概述，具体详情后文会一一详细介绍。

1.8.1 金属材料

作为金属 3D 打印核心技术之一，3D 打印用金属粉应同时具备粒径分布适中、球形度高、流动性好、松装密度高及优异的可塑性和可焊性等要求。目前金属 3D 打印粉体的制备方法主要包括气雾法、水雾法和等离子球化法。其中，气雾法制备成本低、粉体球形度较高、粒径可控等优点，成为市场粉体制备主流工艺。等离子球化法制备的粉体球形度高（95 % 以上）、氧含量低，但设备价格昂贵且出粉效率低，主要适合难熔合金和高活性金属打印粉制备。

目前常用的金属打印材料主要包括铁基合金、钛及钛基合金、镍基合金、钴铬合金、铝合金、铜合金及其它贵金属等。

铁基合金是 3D 打印金属材料中研究较早、较深入的一类合金。对铁基材料而言，因具资源丰富、价格低廉等特点，广泛应用于各类工业制造和居民生活。较常见的 3D 打印用铁基合金有工具钢、不锈钢、高速钢和模具钢等。铁基合金使用成本较低、硬度高、韧性好，同时具有良好的机械加工性，特别适合于模具制造。3D 打印随形水道模具是铁基合金的一大应用，传统工艺异形水道难以加工，而 3D 打印可以控制冷却流道的布置与型腔的几何形状基本一致，能提升温度场的均匀性，有效降低产品缺陷并提高模具寿命。德国 Dresden 大

学采用激光 3D 打印直接制备 FeCrMoVC 刀模具,该模具具有致密度高、无裂纹,与传统工艺相比,其开模时间大大减少。

铝合金因具有良好的高温性能、高的比强度及低的热膨胀系数等优势,在航空航天、石油化工及汽车工业领域等有着广泛的应用前景。铝合金材料的种类很多,目前应用于 SLM 成形的常见体系有 Al-Cu-Mg、Al-Mg-Sc-(Zr)、Al-Zn-Mg、Al-Si 等。英国 Nottingham 大学的 Aboulkhair 等人通过改变扫描间距、扫描速度及扫描策略等加工工艺参数,在激光功率 100 W 的情况下,他们获得了致密度高达 99.8% 的 AlSi10Mg 打印件。Kruth 等人通过打印纳米 TiB_2 修饰 AlSi10Mg 的铝合金复合材料,制备了纳米级 $\text{TiB}_2/\text{AlSi10Mg}$ 复合材料,其拉伸断裂强度可和高强铝合金材料 7075Al 媲美。

钛合金因具有低密度、高强度、优异的耐腐蚀性能和耐高温性能,同时还能与生物具有良好的相容性,被广泛应用于航空航天、医疗器械、化工和运动器材等行业。第四军医大学西京医院郭征教授团队采用 3D 打印钛合金骨盆肿瘤假体植入术,使患者巨大肿瘤切除后的缺失骨盆得到精细化完美重建,解决了复杂部位骨肿瘤切除后骨缺损个体化重建的临床难题。西北工业大学黄卫东教授团队成功利用 3D 打印制造 3 米长用于国产 C919 飞机上的钛合金中央翼缘条。北京航空航天大学王华明教授团队采用激光熔融沉积技术制备出 TC4 钛合金结构件,其室温及高温拉伸、高温蠕变等力学性能均远超传统锻件。美国奥斯汀大学采用 INCONEL625 超级合金和 Ti-6Al-4 合金成功制造出 F1 战斗机和 AIM-9 导弹的金属零部件。

钴铬合金具有良好的生物相容性、高温力学性能和抗腐蚀性能，主要分为 CoCrW 和 CoCrMo 两大类合金，其合金零部件，有着强度高、尺寸精确等优点。目前多作为医用材料使用，其在用于牙科植入体和骨科植入体的制造等个性化定制方面具有巨大的应用价值。

以铜、镍等原料的金属 3D 打印将会得到更大的发展。Ren 等人以铜粉为原料，一种包括石蜡、低密度聚乙烯、硬脂酸(PW-LDPE-SA)热塑性有机粘结剂体系，得到烧结体的最高硬度样品与工业纯铜材料的平均硬度非常接近。更加说明了其在 3D 打印中的可行性。而镍合金则主要应用于零部件的修复领域。

镁合金因其阻尼特性和高强度等优良性能，在航空器、汽车等领域得到了广泛的应用。甚至其强度与人骨相当，在外科手术中更有应用前景，在 SLM 成形镁合金中降低热影响区和氧化的影响有着重要意义。

1.8.2 高分子材料

高分子化合物又称高聚物，是一类由数量众多的一种或多种结构单元通过共价键结合而成的化合物。高分子材料是指以高分子化合物为基础的材料。其中，用于 3D 打印的高分子材料主要是热塑性聚合物及其复合材料。根据组织结构，又将其分为结晶聚合物和非结晶聚合物两种。

非结晶聚合物通常用于制备高精度、一般强度的零部件。可用于 3D 打印的非结晶聚合物主要包括聚碳酸酯、聚苯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯等。美国 DTM 全球首次将聚碳酸酯成形熔模铸件，但其力学

性能较差，可作用性能较差。针对此情况，EOS 公司和 3D Systems 公司推出了以聚苯乙烯为基体的复合粉末。该材料与聚碳酸酯相比，成形温度更低、形变更小、成形质量更加优良，更适合熔模铸造工艺。史玉升团队先后通过浸渗环氧树脂的后处理方法和制备聚苯乙烯/尼龙复合材料来提高聚苯乙烯制件的强度，最终制件性能可满足一般功能件的使用要求。

结晶聚合物具有优异的力学性能，常被用于制备高强度零部件，尼龙是其典型代表。其经激光烧结后，可获得高致密度的制件，力学性能突出，可直接用于功能件，受到科研人员和制造厂商的广泛关注。Tontowi 等先后对尼龙体系进行了系统研究，结果表明尼龙是目前 3D 打印技术直接制备塑料功能件的最佳材料。此外，通过制备尼龙复合材料再进行 3D 打印，可获得性能更优的制品，满足不同场合、用途对塑料功能件性能的需求。

另外，可制备任意结构、个性化定制的特点，使 3D 打印技术与生物医学领域需求相匹配。因此，一些具有生物活性或生物相容性的高分子复合材料可直接用于 3D 打印，如羟基磷灰石与具有生物相容性的热塑性高分子材料（聚乙烯醇、聚乙烯和左旋聚乳酸）复合。

1.8.3 陶瓷材料

陶瓷材料是指用天然或合成化合物经过成形和高温烧结制成的一类无机非金属材料。与金属材料和高分子材料相比，它不仅具有优异的力学性能如高熔点、高硬度、高耐磨性等，还在电学、热学、光学、生物相容性等方面性能突出，其既可用作结构材料、刀具材料，

又可作为功能材料。在工业制造、航空航天、生物医疗等领域有着广泛应用。但其高脆性限制了其在 3D 打印中的应用。现阶段，只有少量的陶瓷材料可用于 3D 打印，如三氧化二铝、多孔氮化硅、磷酸三钙等。Liu 等通过 PVA 覆膜 Al_2O_3 陶瓷颗粒增加润滑性，制备出 PVA-陶瓷-环氧树脂复合粉末，通过 SLS 断口形貌发现经过覆膜的陶瓷颗粒仍然呈球形，且同为高分子的环氧树脂与 PVA 粘结牢固。美国 HRL 实验室人员使用 3D 打印方法制造出的超强陶瓷材料不仅可拥有复杂的形状，还能耐受超过 1700°C 的高温，未来有望在航空航天和微机电领域大显身手。研究人员认为，这种超强、耐高温的陶瓷有望用于制造喷气发动机和极超音速飞机上的大型零件、微机电系统（如微型传感器）内的复杂部件等诸多领域。美国 Soligen Technology 公司利用粘结材料 3DP 技术，打印陶瓷及金属粉末，并在高温条件下对制件渗入金属，以提高致密化，用于制造铸造用的陶瓷壳体 and 芯子。

第二章 3D 打印金属材料

3D 打印技术是一种新型的打印技术，其突出优点在于无需机械加工或任何模具，就能直接从计算机图形数据中生成任何形状的零件，从而极大地缩短产品的研制周期，提高生产率和降低生产成本。3D 打印金属粉末作为金属零件 3D 打印重要的原材料，其制备方法备受人们关注，3D 打印金属粉末作为金属零件 3D 打印产业链重要的一环，也是其价值所在。

目前，金属 3D 打印技术主要有选择性激光烧结成形（SLS）、电子束熔融成形（EBM）、选择性激光熔化成形（SLM）和激光近净成形（LENS）。其中选择性激光熔化成形作为研究的热点，其使用高能激光源，可以熔融多种金属粉末。国外金属 3D 打印机采用的金属粉末一般包括：工具钢、马氏体钢、不锈钢、纯钛及钛合金、铝合金、铜合金、钴铬合金等。

2.1 粉末床熔融金属 3D 打印工艺

直接金属 3D 打印工艺有两大类，也有些非直接工艺或者正在出现的、可能对行业产生深远影响的工艺。不管工艺的形式，金属 3D 打印材料的状态只根据特定工艺的输运形式做调整。

选择性激光融化（Selective Laser Melting: SLM）和直接金属激光烧结（Direct Metal Laser Sintering: DMLS）是粉末床熔融金属 3D 打印工艺的典型代表，它们使用高能热源直接作用在粉末床上。SLM 工艺中粉末是完全融化的，而 DMLS 工艺的粉末只是烧结成整体。

尽管这两种工艺以高能激光为特征，但 Arcam 公司的电子束融化工艺（Electron Beam Melting: EBM）是 SLM 工艺的特殊情况，它使用电子束来融化金属粉末。

粉末床熔融金属 3D 打印工艺加工的零件可以几何结构非常复杂，尽管加工过程中需要支撑结构。这意味着加工内部中空结构可能非常困难，因为内部的支撑需要在打印完成后去除掉。

2.2 直接能量沉积工艺

另外一种主要的金属 3D 打印工艺是直接能量沉积（DED: Directed Energy Deposition），沉积时将金属丝或者粉末送至能量源融化。对于直接能量沉积工艺，可以一次打印多种材料，且多轴系统使得在已有零件上添加材料成为可能（添加特征或者产品修复）。

有些 DED 工艺需要特制的粉末，也有些可使用市场上用于其他传统工艺的粉末。比如，Sciaky 公司的 EBAM 工艺（Electron Beam Additive Manufacturing）使用来自焊接行业的金属丝，采用电子束来快速熔融金属材料。“我们的工艺使用焊丝作为原材料，”Sciaky 公司的全球销售经理 John O’Hara 说：“我们的线材是典型的焊丝，它的供应链已存在几十年了。”

使用焊丝意味着 EBAM 工艺可应用市场上大量的材料。“我们最常用的材料包括钛合金、镍基合金表现出非常优秀的锻造性能。我们工艺独特优势在于，如钼、钽、钨、铌等任意难熔金属均表现出优秀的性能和几何成型能力。”O’Hara 说道。

尽管粉床工艺零件通过处理后致密度可接近 100%，DED 工艺产品的性能更接近锻造件。正如 O'Hare 所说：“Sciaky 公司的金属件几乎是完全致密的，其性能将达到或超越锻造行业的需求。对于任意 3D 打印工艺，结果严重依赖材料和沉积后热处理。这里的完全致密是指，我们能发现的孔（没有什么产品是绝对完美的）是非常微小的，且出现的频率非常低，通常能满足锻件的检测要求。”

DED 工艺的复杂几何造型能力在某种程度上受限，大部分加工是近净成型，需要通过进一步的机加工来得到最终产品。也就是，DED 工艺在几何造型方面有所不足，但胜在加工速度与尺寸。据说，Sciaky 公司制造了当前最大的金属 3D 打印设备。

2.3 其他金属 3D 打印工艺

也有粘结剂喷射加工金属件的方法。像 ExOne 公司的设备将粘结剂材料沉积在金属粉末床上。一旦打印完成，原型件需要在炉内进行烧结，粘结剂会被去掉，零件孔隙可以渗入铜得到最终产品。

Fabrisonic 公司使用一种被称为超声波 3D 打印（UAM: Ultrasonic Additive Manufacturing）的增减材混合技术来熔化金属箔片。这种工艺在 CNC 切割去除多余箔片前，先进行超声波焊接。这种方法使得结合不同类型的金属成为可能，且由于无熔化过程出现，可以把电子器件封装在零件内部而不用担心损坏它们。

Markforged、Desktop Metal、Admatec 等公司正出现的技术也采用了间接成型形式。对于 Markforged 和 Desktop Metal，它们把金属粉末添加在热塑性基质中，采用类似 FDM 工艺的形式进行沉积打印。

打印出的原型件在炉内烧结，会去掉热塑性粘结剂。相反，Admatec把金属粉末与光敏聚合物混合，然后紫外灯照射来逐层固化，原型件也需要在炉内烧结。

XJet 公司开发了一种喷墨金属 3D 打印技术。它们的技术利用打印头喷射金属纳米颗粒墨水，并在加热的成型仓内沉积累计。Desktop Metal 似乎也在开发一种类似的技术，它将在 2018 年发布。

2.4 金属粉末的制备

对于粉末床熔融工艺，通常使用高品质的、昂贵的金属粉末。这些粉末通常采用气雾化或者等离子雾化工艺制备，分别通过感应加热或者等离子火炬来熔化金属。熔化金属液注入雾化仓，被高速气流破碎成小液滴，在下落过程逐渐凝固。

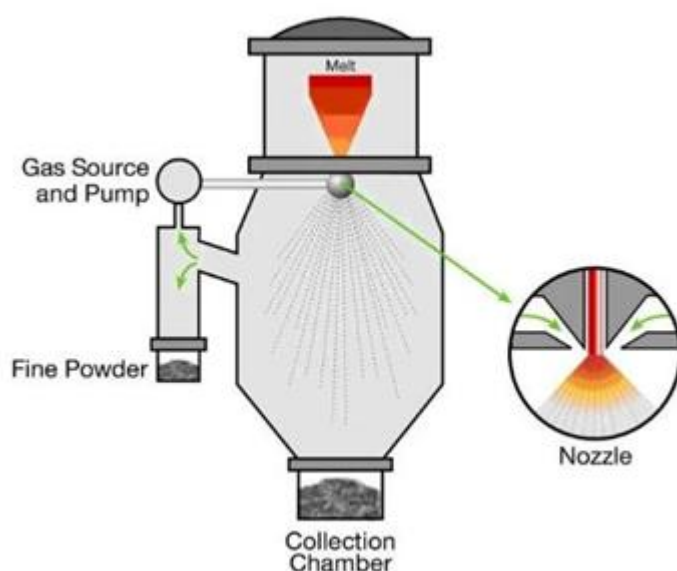


图 2-1 LPW 公司气雾化制粉工艺原理图

LPW Technology 是一家英国企业，它专注于生产与供应金属粉末、3D 打印控制与监测技术。对于不同的 3D 打印工艺，这家公司采用多种工艺生产不同类型的金属粉末。LPW 公司总经理 John

Hunter 认为超过 90%的金属 3D 打印粉末用气雾化工艺制备，等离子方法用来加工更高纯度的粉末，比如钛基合金、镍基合金。

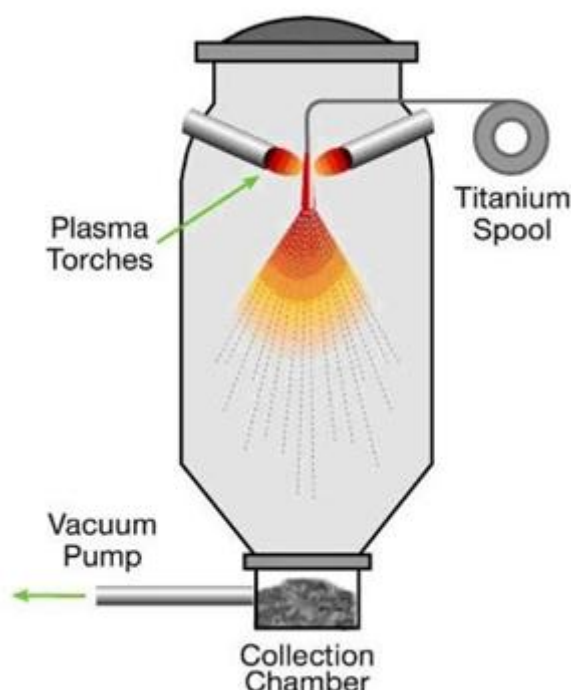


图 2-2 LPW 公司等离子雾化制粉工艺原理图

“等离子雾化工艺制备的粉末球形度更高。气雾化工艺也可以制备球形颗粒，但是不那么理想，” Hunter 说道。这两种工艺都与制备注射成型、热等静压和其它应用粉末的水雾化工艺不同，后者用来生产除 3D 打印以外的大部分金属粉末。然而，水雾化工艺制备的粉末更不规则，使得其难以应用于 3D 打印行业，有一部分原因在于 3D 打印对流动性的要求。

DED 工艺使用更粗的粉末，它的粉末粒径可能会超过 100 微米，EBM 工艺粉末的粒径在 45-100 微米，其他粉末床工艺粉末粒径在 10-45 微米。

由于和粉末床工艺相关的专利数量很多，制造商们通常采用专有的方法在打印过程中铺粉和填充加工平台。一家公司可能采用金属平条来铺粉，依靠重力填充加工区域。另外一家可能用圆柱形滚筒和弹性材料来铺粉，使用活塞送料来填充成型室。

“对于粉末粒度分布（PSD: Particle Size Distribution），LPW 向不同设备制造商销售粉末时也会考虑。我们清楚哪些粉末特征适合不同设备。它们总有些不同，” Hunter 补充道。“有些设备对粉末低流动性不那么敏感。”

基于那个原因，LPW 在向用户（不管是终端用户还是研究室）销售材料时，它会问客户使用什么类型的设备，根据具体机器提供可接受颗粒范围的粉末。

在制粉时我们还需要考虑其他方面因素，包括合金自身的化学组成、密度和孔隙率。最后两个因素对 DED 工艺尤其重要，因为粗粉在制备时会有更大的气体容纳空间，导致粉末内部存在气泡。这会使 3D 打印零件内部孔隙量增加，最终导致裂纹产生，影响产品力学性能。

基于这方面原因，LPW 除了粉末外还提供其他多种服务和产品。这包括记录监测粉末质量的软件和传感器，检测和保存粉末的工具，分析材料和解释粉末相关数据的实验室，咨询服务和粉末生命周期管理。

2.5 一种金属粉末生产的代替方法

除了比较传统的 3D 打印金属粉末生产工艺，还有种电解制备金属粉末的方法，它的典型特征是更节能、粉末产出可控性更高。

电解制粉是一种电化学工艺，它把金属氧化物引入到盐池，通常由熔融氯化钙组成。随着电流通过金属氧化物（作为阴极）和石墨阳极，金属氧化物的氧元素被去掉。最终得到纯净的金属粉末，通过清洁和干燥即可应用。

英国的 Metalysis 公司使用电解法制备金属 3D 打印粉末，它是一家出名的 3D 打印制造商。Metalysis 的 CEO Dion Vaughan 称它的工艺相对于其他粉末制备技术有许多优势。

“对于类似等离子雾化的制粉工艺，你得到的是粒径正态分布的粉末，” Vaughan 说。“如果你在制备 3D 打印粉末，实际上你所需要的粒径范围只是你生产的粉末很窄的一部分。如果你一年能制备 100 吨粉末，但是对特定的 3D 打印工艺（比如 SLM），能用的粉末只有 10 吨。”

电解制粉工艺可以很好地控制这一过程，几乎所有的粉末都可以为特定 3D 打印系统准备。因此，如果一家公司在为 SLM Solutions 公司的 SLM 设备生产粉末，你可以调整工艺参数只制备所需粒径范围的粉末，这对于 EOS 设备或者 DED 系统同样适用。

由于电解法的操作温度在 800-1000°C，所需能量比熔化同等质量的金属少很多。“如果你把我们的工艺与传统钛粉制备工艺相比，比如等离子雾化，我们估计你只需要大约 50% 的能耗，” Vaughan 说道。

能耗的降低对环境比较有利,同时可降低顾客的采购成本。此外,电解法可用来制备很大种类范围的金属粉末,不管其熔点有多高。

Metalysis 现已发展到其第五代技术,它由研发开始,正准备进行扩展其完全成熟的制粉能力的可行性研究。Vaughan 称第五代制粉系统将基于第四代进行拓展, Metalysis 计划在今年完成这一工作。第四代系统可年产 20 吨轻金属粉末和 60 吨重金属粉末,而第五代可年产几百到几千吨高价值金属与合金粉末。通过独特的授权模式可以获取这项技术,它可以根据用户的需求灵活调整。

2.5.1 钛

尽管 Metalysis 公司的工艺可制备多种类型的金属粉末,它最关注的仍然是钛粉的制备。“概括地说,钛是一种非常神奇的金属,”Vaughan 称。“它很轻,但是强度高,耐腐蚀性好。”

最常见的 3D 打印钛粉是钛合金 Ti6Al4V(也被称为 5 级或 Ti64)和 Ti6Al4V ELI(也被称为 23 级或 Ti64ELI)。由于其通用性,5 级钛粉是目前用的最广钛基粉末。这种材料可被焊接,可以通过热处理提高强度,可以承受高达 300 多摄氏度的温度,具有很高的比强度和耐腐蚀性。基于这些原因,5 级钛粉经常被应用于高性能行业,比如航空航天、医疗、船舶和化工。

23 级钛粉的纯度和生物相容性更高,它可以做成线圈和线材,仍能保持高比强度、耐腐蚀性、韧性。这种材料常用于生物医学领域,包括手术器械和植入物。



图 2-3 通过 EBM 3D 打印工艺定制的钛合金颅颌面骨植入物

2.5.2 铝

两种最常见的 3D 打印铝合金粉末是 AlSi12 和 AlSi10Mg。尽管两者都是由铝和一些硅组成，AlSi10Mg 中还包含 Mg 元素。两者都是铸造合金，对于制造薄壁和复杂几何零件非常有用。



图 2-4 世界上第一台 3D 打印铝合金吉他

这些金属以高强度和硬度为特征，可应用于大载荷环境下。低密度和耐热性使得它们成为制造类似摩托车或者航天器内部件的理想

材料。它们也很容易进行后期加工，包括机加工、焊接、喷丸和抛光等。

2.5.3 钢

钢的种类很多，可分为不锈钢、工具钢、马氏体时效钢三大类。马氏体时效钢通过扩展热处理工艺获得高强度和硬度，却不丧失延展性。这意味着打印完成后很容易进行机加工，可进一步硬化。因此，马氏体时效钢可应用于批量化零件和模具。



图 2-5 用 MX3D 公司技术 3D 打印的自行车钢骨架

不锈钢以高耐磨性、耐久性和耐腐蚀出名。因此，这种金属经常应用于刀具、手术器械领域，也适合有耐酸、耐腐蚀要求的零件加工。

与马氏体钢不同，工具钢具有高硬度、耐磨性和变形抵抗力，能够保持锐利边缘，工具钢常用来制造工具和生产模具。工具钢的高耐磨性可满足成型其他材料的需求。一旦用 3D 打印来加工，可将独特的冷却流道加入到零件内部，优化注塑成型工艺。

2.5.4 钴

可 3D 打印的钴铬钼合金有多种，它们常表现出高强度、高硬度、耐腐蚀和高温等性能。钴经常与铬、钨等元素组合来制作重型切割工具或冲模，也与磁性不锈钢一起用于喷气机或燃气轮机零部件。



图 2-6 通过 CE 认证的 3D 打印钴铬金属冠桥

2.5.4 镍

Inconel 718、Inconel 625、HX（都是由镍、铬元素组成）是最常用的 3D 打印镍基合金。这些材料耐高温、抗氧化、耐腐蚀，在高达 1200°C 环境下仍表现出高强度。捏脊合金零件的焊接性能优秀，可通过后期热处理进一步提高强度。这些材料被应用于航空和赛车行业，尤其是有显著高温和氧化风险的环境下，比如燃烧室和风扇。



图 2-7 空客 A320neo 客机 3D 打印镍基合金孔探仪凸台

在高温环境下，尽管 Inconel 625 比 718 的耐腐蚀性和稳定性更高，但后者的强度和传导性是前者的两倍。三种材料中哈氏合金的焊接性能可能是最好的。

粉末制造商 AMA（Additive Metal Alloys）的一位代表曾说过，尽管 AMA 公司制造多种类型粉末，但是镍基合金是 AMA 的一大重点。位于 GE Aviation 俄亥俄州工厂附近，AMA 将航空作为镍基合金的一大市场。

“钛的耐热性没那么强，但是密度小、强度高，也就是比强度非常高，”该代表解释道。“镍基合金密度比较大，但由于其优秀的耐热性能，镍基合金适合在发动机内部工作。

2.5.5 铜

铜在 3D 打印行业的应用并不常见，但仍有一些公司在为粉末床熔融工艺开发铜合金粉末。此外，DED 工艺可能已将铜用于焊接行业。和银相比，铜的美学价值和硬度更高，这种材料可应用于珠宝和工艺品。铜也应用于航空领域。

位于马歇尔太空飞行中心 NASA 材料与工艺实验室和洛克达因公司已把铜合金应用于粉末床熔融系统，并 3D 打印出有特殊冷却流道的火箭发动机部件。



图 2-8 NASA3D 打印第一个全尺寸铜发动机零件

2.5.6 贵金属

可 3D 打印的贵金属包括银、金和铂。这些材料通常比较柔软、光泽度高、化学活泼性低。很多情况下，它们的传导能力也非常好。除了 Concept Laser，Cooksongold 也是为数不多提供金（黄色、粉红色、白色）、铂 3D 打印的公司。这些材料主要用于珠宝和工艺品。

已有几个公司在使用银纳米颗粒墨水在零件上打印电路，如 Voxel8、Nano Dimension。Nano Dimension 重点开发镍基、铜基墨水，它们的导电性更好。银墨水使得 3D 打印电路成为可能，不管是制作 PCB 原型或直接把电子器件集成在 3D 打印对象里。

2.5.7 难熔金属

难熔金属种类比较少，包括铌、钼、钽、钨、铪，它们以极高的耐热性能而出名。它们的熔点都超过 2000°C，化学反应不活泼，密度大，硬度高。

钽有高耐腐蚀性、传导能力非常好，这在电子行业非常有意义。根据洛斯阿拉莫斯国家实验室研究，这种材料 60% 用于真空炉零件和电解电容器。理论上，钽可以提高核微粒的放射性。

纯净钨的熔点比任何元素都高，高达 3422°C。这种金属密度很高，难以加工，但其稳定性适用于耐磨产品，如刀、钻头、磨、锯子等。钨的耐氧化、耐酸碱性能也很好，可用于辐射屏蔽。

Global Tungsten & Powders (GTP) 是为数不多生产钨、碳化钨、钼粉末的公司之一，只销售已成功打印的粉末。GTP 公司研发经理 Rick Morgan 解释了其公司制粉工艺：“GTP 公司是垂直一体化的，它有能力开采钨矿砂，并进行化学提存，可制备钨粉和碳化钨粉，可通过钴喷雾干燥它，可对其球化处理以适应 3D 打印工艺。” Morgan 说道。

ExOne 公司为其粘结剂喷射工艺提供可粘结钨粉。该公司推出该材料来代替铅制造医疗器械和航空零件，因为铅的毒性更高。GTP 的碳化钨钴材料已被 ExOne 公司成功应用，该公司已开发出脱脂/烧结方案来保证致密度。

2.6 金属 3D 打印的未来

SmarTech Markets Publishing 预计 3D 打印金属粉末的市场在 2023 年会达到 9.3 亿美元，并指出其增长受航空领域对大尺寸零件的

需求驱动。根据公司近期对金属粉末的研究报告，SmarTech 高级分析师、3D Printing Business Media 创始人 Davide Sher 提出了些见解，包括哪些材料将得到普遍应用。

“在可见的将来，最常见的金属 3D 打印材料是钢、钛合金、镍合金、钴铬钼合金，” Sher 说：“钛合金在航空领域应用最多，因为成本不再是问题，通过轻量化实现的性能提升将弥补其花费。镍基合金也主要用于航空和国防领域。钛合金也会用于医疗领域（植入物），同样通过性能提升弥补成本。”

Metalysis 公司 CEO Dion Vaughan 同样认为钛合金的需求会增加，该公司的工艺将推动 3D 打印技术的大量应用：“历史上，钛合金的生产受传统方式的制约，它们能量利用率低，成本昂贵，甚至是对当前先进的等离子雾化工艺，” Vaughan 说道：“然而电解法效率更高、成本更低，这会推动金属 3D 打印的普及，并进一步降低粉末成本。”

Vaughan 设想了下粉末生产与制造工艺同地协作的可能性，他将提高整体效率。这对正出现的分布式制造趋势非常重要，这种情况下零件制造离终端用户更近。

Davide Sher 表示，由于主要应用于大牙科行业，钴铬钼合金对产品生产更重要。钢这种最先出现的金属 3D 打印粉末，通常会是大家最常见的选择。铝合金在成本上会低些，它适用于汽车行业零件的加工，未来会出现更大尺寸的 3D 打印零件。贵金属（尤其是铂）的应用比较有趣，但 Sher 认为其应用比较有限。

“送粉工艺 (DED) 近期的快速发展会显著推动粉末需求,” Sher 提到: “目前这些技术不再局限于零件修复, 也会用来打印大尺寸零件。粉末床熔融工艺的加工尺寸和速度也在快速提升, 基本每两年翻一倍。”

Sher 认为金属材料不一定是工业 3D 打印领域的老大, 高性能塑料比如 PEEK、PEKK, 以及碳纤维增强材料可能会代替金属, 因为它们的成本更低。“尤其是航空和医疗领域, 这些材料会占领金属 3D 打印的一部分市场,” Sher 总结道。

在收购 Arcam、Concept Laser 后, GE 组建了 GE Additive, 这佐证了 SmarTech 对 3D 打印增长的预测。对 Arcam 的收购, 使得这家企业巨头同时获得了 3D 打印机制造商和粉末制造商。

LPW 公司的 John Hunter 用这个例子说明行业的垂直整合正在来临。他认为粉末制造商 (包括 LPW) 必须要加大其粉末产能。他在美国的分公司将搬到一个更大的工厂, 来适应粉末生产的需要。LPW 也在增加有关材料回收方面的活动, Hunter 认为这是这个趋势会越来越流行。

他指出粉末用量的增长受 3D 打印终端产品的驱动, 它区别于最早的原型加工应用。“随着越来越多的机器被安装, 粉末市场增长如此之快,” Hunter 说: “不再是加工原型手板, 把打印件用于几个月的测试, 现在很多打印件正用于最终产品上。因此, 这些设备正整日、整周的打印零件。它们现在使用的粉末量比一年前多很多。” Hunter

表达了他对 3D 打印未来的乐观看法，粉末市场的评论仅仅是他的个人观点和观察结论。

换句话说，随着金属 3D 打印被集成到制造供应链来加工终端零件，会消耗掉更多金属粉末，导致更大的粉末制粉量。随着金属 3D 打印的持续发展，可以预期粉末行业会同步增长和发展。

第三章 3D 打印高分子材料

高分子材料因其种类繁多、性能各异，已被广泛应用于各类生产生活中。以其体量计算，早已远超金属材料和陶瓷材料，位居材料行业首位。随着 3D 打印技术的不断发展，越来越多种类的高分子材料被应用其中。其中，尼龙类、ABS 类、PC 类是应用较多的几种高分子材料。此外，部分环氧树脂类高分子材料还可做复合剂参与到其它类材料打印。

3.1 高分子材料的优势

高分子材料在 3D 打印领域具有其它材料无可比拟的优势。

1) 3D 打印作为一种新兴的产品加工手段，其个性化的生产思路必然导致加工手段的多样化，所制备的产品种类、性质各具特色。因此，其对材料的物理、化学性能的要求也千差万别。3D 打印的发展使得有各种满足打印专一性需求的不同物理、化学性能的材料不断出现。而高分子材料本身具有种类繁多、性质各异、可塑性强的特点。通过对不同的聚合物单元结构、单元种类的选择和数量的调节，不同结构单元的共聚及配比，可以轻松获得不同物理、化学性能的粉末化、液态化、丝状化的新型高分子材料，从而实现 3D 打印材料的多样性和专一性功能。

2) 高分子材料具有熔融温度低的优点，且多数高分子熔体属于非牛顿流体，触变性能好，从而极大地满足了 3D 打印中 FDM 打印工艺要求。而 FDM 工艺由于具备不使用激光、设备成本低、维护简单、成型速度快、后处理简单等优点，一直是 3D 打印技术应用推广的主

力，所以用于 FDM 打印工艺的高分子 3D 打印材料也是目前高分子 3D 打印材料研究的重点。此外，高分子 3D 打印材料由于其较低的烧结温度，在 SLS 打印工艺中也具有加工能耗小，设备要求低的优势。

3) 高分子材料具有轻质高强的优点，尤其是部分工程塑料，其机械强度可以媲美部分金属材料，密度却只略大于 1 g/cm^3 ，其较小的自重和高支撑力为打印镂空制品提供了便利。此外，轻质高强的特点也使其成为汽车零部件和运动器件的首选材料。

4) 高分子材料价格便宜，在体积价格方面远胜金属材料，而且可加工性能更好，因此在 3D 打印材料中具有很高的性价比。

上述优势使得高分子材料成为使用最广泛、研究最深入、市场化最便利的一类 3D 打印材料。

3.2 高分子材料的特性

高分子材料在 3D 打印中的应用大多是采用 FDM 技术，根据打印工艺的实际要求，一般需要高分子材料具有以下特性：

1) 良好的触变性。高分子熔体在从打印头中高速喷射出时，只有熔体具备良好的流动性方能顺利、准确地喷射到指定位置；而当熔体材料到达打印位置时，则要求熔体有较高的黏度而无法随意流动，才能保证材料固定在打印位置不会变形、移动。这就要求高分子熔体在高剪切速率时具备较小的黏度，而在低剪切速率时具备较大的黏度，即要求高分子材料必须具备良好的触变性。FDM 技术能够广泛应用

于 ABS 等高分子材料正是由于材料良好的触变性。而普通尼龙等材料则更多使用选择性激光烧结技术(SLS)进行打印。

2) 合适的硬化速度。使用 FDM 技术进行 3D 打印时, 采用熔体打印, 因此高分子材料的硬化速度至关重要。硬化速度太快, 材料容易在喷头附近硬化, 造成喷头阻塞, 损坏设备; 硬化速度太慢, 由于必须在下一层硬化后再进行上一层打印, 因此将严重影响打印效率和制品质量。

3) 较小的热变形性和热收缩率。FDM 工艺和 SLS 工艺均是在高温下加工, 在低温下成型, 且成型过程不像传统高分子加工工艺有模具等束缚定型。高分子材料的热变形性和热收缩率要高于金属和陶瓷材料。因此, 选择热变形性和热收缩率小的材料或在高分子材料中添加玻璃纤维等纤维材料作为 3D 打印材料, 减小制品的热变形性和热收缩率就显得尤为重要。

3.3 聚乳酸材料

PLA(Polylactic Acid)中文名聚乳酸, 是由 Pelouze 在 1845 年最先发现的, 截止至 2013 年世界上生产聚乳酸的生产商有进 20 家。聚乳酸的制备原料主要为植物淀粉, 具有良好的生物相容性、可降解性、易加工性, 制件强度高、延展性好, 该材料已经在生物医用领域、汽车行业、电子行业等得到了广泛的应用, 目前全球最大的聚乳酸制造商为美国 NatureWorks 公司。PLA 聚合物是一种新型可生物降解的热塑性树脂, 相比于物理性质相近的传统树脂具有更加优良的特性, 而且依赖植物为原料而不是石油, PLA 可以在短期之内分解为二氧化

碳和水进入自然界，在通过太阳光合作用变成淀粉，对人体和环境没有危害，是真正的无公害可再生绿色环保材料。

聚乳酸是一种热塑性高分子材料，外观透亮，具有良好的成纤性，可降解性和优异的力学性能，且具有优良的加工性能，可通过传统加工如吹塑、热塑等对其进行加工成型。但其缺点也很明显，比如韧性低，打印出来的制品脆等。

国内外很多学者对 3D 打印聚乳酸做了改性研究，主要分为化学端基改性和物理共混改性。陈卫用 ADR 扩链剂改性聚乳酸，分析了扩链剂含量对聚乳酸热性能、熔体强度、力学性能以及打印性能的影响。得出了扩链剂能提高聚乳酸熔体强度和耐热性能，当扩链剂含量为 0.4% 时，改性聚乳酸的力学性能及综合打印性能最佳。现如今 PLA 以成为 FDM 增材制造技术应用最多的耗材之一，应用 3D 打印技术的优势可实现结构形状更为复杂的 PLA 零部件快速制备。PLA 具有优良的热稳定性，一般用于 FDM 3D 打印的 PLA 丝材加工温度为 195-230℃。

牛超用滑石粉填充 3D 打印用聚乳酸，研究了三种不同目数（800 目、2000 目和 3500 目）滑石粉对聚乳酸结晶度和耐热性能的影响，得出滑石粉能提高聚乳酸的结晶速率和耐热温度，且 2000 目的滑石粉改性聚乳酸具有最高耐热温度和结晶度。

Postiglione 等开发了一种基于液相沉积建模（LDM）的 3D 打印系统，并找到最佳工艺条件和打印窗口，打印聚乳酸/多壁碳纳米管纳米复合物分散体得到导电纳米三维结构材料。Patanwala H S 等

对碳纳米管-聚乳酸复合材料进行 FDM 打印。分析不同质量分数（0.5%、2.5%和 5%）的碳纳米管对复合材料打印件的力学性能影响。结论表明，在碳纳米管含量 5%时 FDM 打印件的杨氏模量提高 30%，但是拉伸强度和总体韧性降低了，并运用数学模型对结论进行了解释。

3.4 ABS 丝材

ABS 树脂是聚丁二烯橡胶与单体丙烯腈和苯乙烯的接枝共聚物，ABS 综合了三者各自的优良性能，在汽车、家用电器、玩具工业等领域有着广泛的应用。作为 3D 打印材料，ABS 具有韧性好、强度较高的特点，但其缺点也很明显，打印制品收缩率较大，易翘曲变形。

Zhong. W. H 等为获得用于 FDM 的高强度和高硬度 ABS 丝材，通过加入几种不同的性能改进剂，包括短玻璃纤维，增塑剂和增容剂来改性 ABS。发现玻璃纤维以降低柔韧性和易打印性为代价显著提高了 ABS 丝材的强度。通过添加少量的增塑剂和增容剂改善了玻璃纤维增强 ABS 丝材的柔韧性和易打印性，打印过程中发现制备的复合丝材与 FDM 设备兼容性良好。

J. Singh 等探讨了 FDM 工艺参数对 ABS 打印制品表面光洁度的影响，并采用化学气相法进行后处理以提高制品的表面光洁度。设计正交实验用于优化打印工艺参数和后处理的工艺参数。研究结果表明打印工艺参数对打印件表面光洁度有着显著影响，但经过后处理，制品表面光洁度几乎不受打印工艺参数的影响。

S Dul, L Fambri 等首次将 4wt% 石墨烯纳米片 (xGnP) 与 ABS 熔融共混加工成 FDM 丝材, 然后将复合丝材沿着三种不同构造方向打印试样。研究表明, xGnP 提高了打印件的热稳定性、弹性模量和动态储存模量, 但降低了拉伸强度, 并比较了 3D 打印件和注塑件的差异, 突出了由打印方向引起的取向效应对综合性能的影响。

3.5 聚苯砒丝材

聚苯砒是所有热塑性材料中强度最高、耐热性最好、抗腐蚀性最强的材料, 应用于航空航天, 交通工具及医疗健康行业等领域。聚苯砒因其优良加工性能和热力学性能, 一般无需改性即可直接加工为 FDM 丝材, 丝材外观效果很好, 打印制品效果优良。但价格昂贵, 打印温度高达 350℃, 对 FDM 设备的加热温度要求很高。

T Martens, L Mears 等开发使用聚苯砒材料来打印旋转对称零件比例模型的铸模, 进行设计验证、选择材料和调试工艺参数, 打印出满足工作温度和工作压力要求的铸模, 并介绍了二次处理表面抛光打印铸模的方法。结果表明使用 FDM 打印聚苯砒丝材作为离心铸造模具是可行的。

Huang B, Masood S H, Nikzad M 等研究了三个主要工艺参数 (光栅角度、填充密度和打印方向) 对 FDM 打印聚苯砒材料的动态力学性能的影响。在三个不同的固定频率 (1Hz, 50Hz 和 100Hz) 下进行动态力学分析, 研究这些工艺参数对聚苯砒打印件阻尼性能的影响, 并采用 Taguchi 方法来优化工艺参数以达到更好的阻尼性能。

3.6 聚碳酸酯丝材

聚碳酸酯是一种高刚性，高透明的工程塑料，因具有良好的光学性能和机械性能，广泛应用于玻璃装配业、汽车工业和电子电器工业。聚碳酸酯丝材的亮度高，光泽性好，打印制品具有很强的韧性和力学性能。但同时其加工温度较高，打印制品对缺口敏感，收缩性也较大，易翘曲变形，很多学者在 ABS 与聚碳酸酯的合金方向上有较深入的研究。

Masood 研究了 FDM 工艺参数（如填充密度，光栅宽度和光栅角度）对聚碳酸酯打印试样拉伸性能的影响。结果表明当填充密度为 100%，光栅宽度为 0.6064mm，光栅角为 45°时，可获得最高的拉伸强度，此时聚碳酸酯打印试样的拉伸强度达到注塑零件的 70%~80%。

K. Cantrell 等首次将数字图像相关技术用于测试 3D 打印聚碳酸酯零件的拉伸和剪切测试，研究了光栅角度和构造方向对聚碳酸酯打印试样的剪切模量和剪切屈服强度的影响。

3.9 尼龙丝材

尼龙分子间存在大量作用力极强的氢键，使其具有良好的力学性能、耐磨性、抗腐蚀性能，是一种较好的 3D 打印材料。由于尼龙是一种结晶性聚合物，分子内应力很大，收缩性强，纯尼龙丝材打印翘曲变形严重，所以改善其翘曲变形是当今工作的重点。

Masood. S. H 等开发了一种基于 FDM 工艺制造模具的新型铁/尼龙复合材料，其目的是降低快速模具的制造成本和时间。通过实验研究了铁与尼龙配比对复合材料热性能的影响，并与快速模具中使用的其他金属/聚合物复合材料进行了比较。结果表明当铁/尼龙含量比为

3: 7 时, 打印件具有最佳热性能。这种复合材料丝材已成功应用于普通的 FDM 打印机中, 可直接快速加工注塑用模具, 这将有效减少注塑模具的制造成本和时间。

Tuan Noraihan Azila Tuan Rahim 等开发了一种羟基磷灰石和氧化锆增强尼龙 12 的复合丝材, 当羟基磷灰石含量为 5wt%、氧化锆含量为 15wt% 时, 复合丝材具有最佳力学性能。并与市面上的 Taulman 618 尼龙丝材性能做对比得出, 复合材料的强度与 Taulman 618 相当, 由于填料的加入使其模量高于 Taulman 618。

Boparai. K. S 等通过优化单螺杆挤出机的工艺参数(如螺杆转速、机筒温度、机头温度), 使用正交实验方法研究了 PA6/Al/Al₂O₃ 复合丝材的拉伸强度和直径偏差, 开发该尼龙丝材作为 ABS 丝材的替代品。基于数学模型和多响应优化技术找出了回归方程, 并计算出当丝材具有最大拉伸强度和最小直径偏差时的最佳参数。并通过实验验证了最佳参数, 结果表明与预测值仅误差 $\pm 4\%$ 。

Dickson A N 等分别用连续碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维来增强尼龙复合材料, 制备成 FDM 丝材。研究了体积分数、纤维类型和纤维取向对尼龙复合材料力学性能的影响。结果表明, 使用碳纤维增强的尼龙丝材力学强度最大, 其拉伸强度高达非增强尼龙的 6.3 倍。

3.10 填充改性用填料简介

尼龙的性能优越, 密度较小, 制品的尺寸稳定性很好, 能耐酸碱及溶剂腐蚀, 可采用多种成型方式如热压、注射和挤出成型等, 在医疗、电子电器、机械设备、汽车、军事及航空航天等领域有非常广泛

的应用。但尼龙材料也有一些缺点，作为一种结晶性高分子材料，尼龙制品成型收缩率大，吸水率也较高，纯尼龙丝材打印翘曲变形较为严重，而填充改性是一种有效减少翘曲形变的手段。目前国内外的一些研究都是围绕用填料填充尼龙来改善其打印收缩性，并且提高力学性能以及其他性能来展开的。采用的填料主要分为无机非金属填料、金属粉末填料和有机刚性填料。

熔融共混改性在聚合物改性技术中应用最广，填料填充聚合物一方面可以大幅度降低材料成本，另一方面还能提高材料的综合性能，已成为开发高性能高分子复合材料的重要手段。工业应用的无机填料种类很多，应用较广的有玻璃纤维、碳酸钙、云母、炭黑、玻璃微珠、滑石粉、碳纤维、蒙脱土、硅灰石、二氧化钛等。其次是金属粉末填料，如铜粉、铁粉、铝粉等，具有提高聚合物的导热导电性能以及力学性能，应用于某些特殊用途中，如航空航天，电子元器件等。应用较少的是有机刚性填料如高抗冲聚苯烯，因其与聚合物同属有机物，加工以及相容性方面会较前两种简单许多。由于固体填料与聚合物采用相对简单的机械搅拌混合法即可使大多数填料分散均匀，因此填充改性技术非常适合制备高性能 FDM 尼龙丝材。在尼龙中加入适当的填料，不仅可降低收缩率、减少翘曲变形，提高 FDM 打印件的成型率和尺寸精度，同时还可提高打印制品的模量、热变形温度等物理机械性能，并可大幅度降低成本。

各种填料因其自身具有不同的物质组成、形状结构、粒径尺寸和物理化学特性等特点，在改性聚合物中产生直接或者间接的影响从而

起到改性作用。根据加工经验而言，球状或规则粒状的填料可提高聚合物加工性能，棒状、长条状等长径比高的填料能有效提高复合材料的力学强度。填料粒径较大时，容易在聚合物中形成缺陷，引起应力集中导致复合材料冲击强度剧烈下降；但粒径太小，聚合物和填料之间分散困难，容易发生团聚导致复合材料力学性能下降。FDM 打印不同于传统塑料的注塑或模压成型工艺，在选择填料时应综合考虑填料对 FDM 丝材的打印工艺和打印制品性能的影响，从而做出合理的选择。选择填料首先应考虑到填料尺寸大小，现在市面上 FDM 打印机喷嘴直径大多为 0.4 mm，若填料尺寸过大，会造成喷嘴堵塞导致打印失败甚至是设备故障，故选择填料时尽量选择尺寸较小的填料。下面介绍本实验所用的四种填料，分别是玻璃微珠、蒙脱土、碳纤维粉和铝粉。

3.10.1 玻璃微珠

玻璃微珠（Glass bead, GB）是一种直径为微米级的玻璃球体，主要组成成分为无机硅酸盐类，综合性能十分优异，在聚合物加工和其他场合得到了广泛应用。玻璃微珠呈球状，具有很好的流动性，对加工设备的损伤和磨耗也很小；膨胀系数小，在树脂中分散性好，各向同性，可有效减少残余应变及减少制品收缩，从而提高制品尺寸稳定性；热稳定性和化学稳定性好；可耐 1300℃ 以上高温、传热性能差，可提高聚合物的阻燃性能和耐高温性能；又因电绝缘性很好，可用于填充高绝缘聚合物从而提高其电阻性能。

为改善玻璃微珠与尼龙的界面结合，常用硅烷偶联剂改性玻璃微珠。硅烷偶联剂耦合机理研究很多，普遍接受的解释是偶联剂在无机物和聚合物之间架桥，从而起到耦合作用。图 3-1 所示是硅烷偶联剂作用于无机填料表面的效果图。

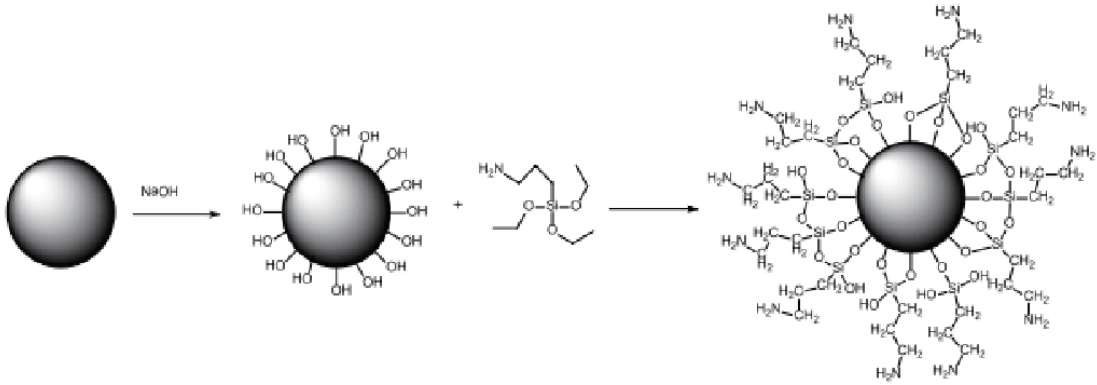


图 3-1 硅烷偶联剂作用无机填料表面示意图

丁雪佳研究了空心玻璃微珠对尼龙 6 的力学性能和熔体粘度等性能的影响，结果表明当空心微珠填加量不超过 20wt%时，尼龙 6 的拉伸强度和冲击强度均随着空心微珠含量的提高而上升，而熔体粘度随着玻璃微珠的加入而下降。孙向东等对空心玻璃微珠填充铸型尼龙进行研究，从玻璃微珠含量、粒径和表面处理等方面对复合材料的影响做了分析。结果表明玻璃微珠含量为 10 wt%时，复合材料热力学性能都有较大提高，玻璃微珠粒径越小复合材料性能提升越好。Long. S 对玻璃微珠增强聚苯硫醚复合材料的摩擦学行为进行了研究，结果表明复合材料的摩擦系数随着玻璃珠直径的下降而减小，特别是具有均匀尺寸和规则形状的玻璃微珠可以显著提高复合材料的摩擦学性能。

3.10.2 蒙脱土

蒙脱土（Montmorillonite, MMT）是一种 2：1 型层状含水铝硅酸盐的土状矿物，主要成分为氧化硅和氧化铝，其化学通式为 $(Al_{2-y}Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ 。图 3-2 是蒙脱土的结构示意图。由于具有分散性、膨胀性、吸水性和便宜易得等特点，蒙脱土被广泛用于填充聚合物，但是在聚合物中直接添加 MMT，两者相容性很差，制备出的复合材料达不到应用要求，因此需要对蒙脱土进行改性处理来增强其与聚合物之间的相容性。

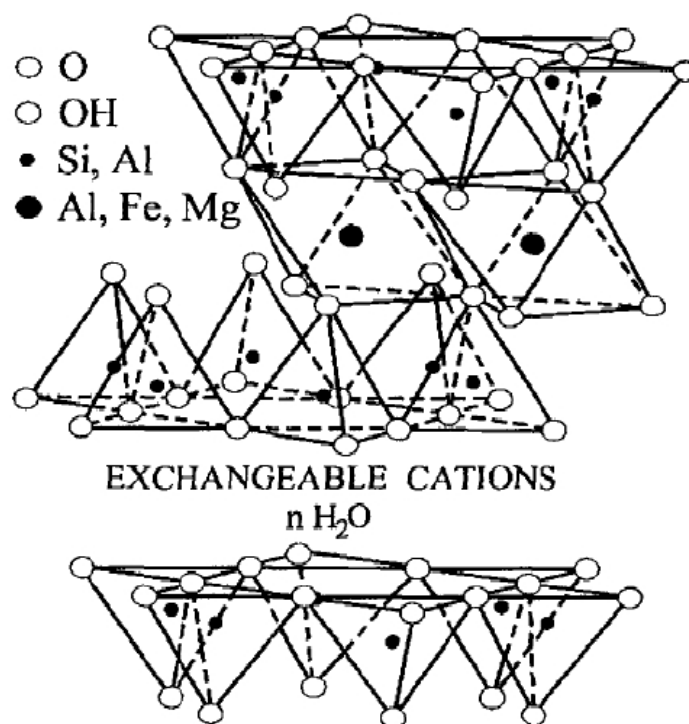


图 3-2 蒙脱土的结构

蒙脱土具有强亲水特性，其在有机相中的分散能力很弱以及对有机基团的附着能力很差，因此应用于聚合物中时必须对蒙脱土进行有机改性。将有机物引入蒙脱土层间，使其具备某些有机基团，不仅使蒙脱土层间膨胀，具有疏水性能，而且可以改变蒙脱土界面极性和物理化学微环境，能与聚合物大分子有效结合形成高性能复合材料。蒙

脱土有机改性方法主要有阳离子表面活性剂改性、阴离子表面活性剂改性、非离子表面活性剂改性、聚合物单体改性以及偶联剂改性等。

李迎春在博士论文中对蒙脱土和 POE-g-MAH/POE 两种改性剂分别和协同增强增韧尼龙 11 复合材料体系的形态结构与性能的关系进行了系统的研究,通过透射电镜等手段对复合材料的结晶性能和增韧机理做了详细的探索和分析。T D Fornes 考察了两种不同产地的钠基蒙脱土对尼龙 6 纳米复合材料形态和性能的影响,对两种蒙脱土分别复合尼龙 6 材料的透射电镜照片的定量分析显示,相比于 Wyoming, Yamagata 纳米复合材料的平均颗粒长度略大,并且蒙脱土片层剥离程度较高,具有更高的颗粒纵横比。结果表明,随着颗粒纵横比的增加,纳米复合材料的刚度和强度更高。

3.10.3 碳纤维

碳纤维(carbon fiber, CF)是碳元素含量在 90%以上的石墨结晶组成的一种多晶无机纤维,是一种适应航空航天等高技术领域发展需要而研究开发出的新型增强材料。碳纤维具有质轻高强、耐酸碱腐蚀性能良好、耐高温、电阻性能优越等一系列优点。传统碳纤维根据长度分为连续碳纤、长碳纤和短碳纤,而 FDM 打印机喷嘴直径一般为 0.4mm,传统碳纤维因长度过长而不适用,因而采用碳纤维粉。碳纤维粉即磨碎碳纤维就是将普通碳纤维经过剪切、磨碎成粉状的微米级圆柱状颗粒,它在性能上除粒径长度较小外与普通碳纤维无异,由于呈粉状其比表面积更大,与聚合物无熔融共混过程中分散更均匀,因而是理想的填充材料。

碳纤维的表面很光滑，无活性基团等特点导致其惰性较大，与聚合物的界面结合力较差，无法与聚合物基体形成有效嵌合，降低了界面强度，因此对碳纤维表面改性是提高碳纤维复合材料综合性能的必要手段。碳纤维表面处理方法主要有化学氧化法、电化学氧化法、等离子体处理法、涂层法、化学接枝法和辐射法等。

Junxiang Wang 和 Mingyuan Gu 研究了碳纤维增强尼龙 1010 复合材料在湿和干燥条件下的摩擦和磨损性能。与干滑动相比，水中的摩擦系数降低。由于碳纤维的增强，复合材料的耐磨性提高了两个数量级，且材料在湿润条件下的摩擦系数小于干燥条件下的。进一步研究表明尼龙 1010 分子间酰胺基的水解并由此导致氢键减少是导致尼龙在水中的高磨损率的重要因素。

Wang Z, Huang X 等研究了 PAN 基碳纤维的电化学氧化和上浆处理对拉伸性能、表面特性和与环氧树脂结合性能的影响。结果表明，电化学氧化使碳纤维的拉伸强度提高了 16.0%，进一步的上浆处理对拉伸强度没有影响。氧化和上浆处理都通过引入含氧官能团显著改善了碳纤维的润湿性和表面能，氧化处理略微增加了碳纤维和环氧树脂的界面剪切强度，进一步的上浆处理将界面剪切强度从 73.6MPa 提高至 81.0MPa。

3.10.4 铝粉

铝粉 (Aluminum powder) 按用途可分为工业铝粉、涂料铝粉、发气铝粉、易燃铝粉等，广泛应用于冶金、化工、装饰、防腐、建筑、农药、烟火、化工催化剂、炸药等行业。铝粉应用于聚合物中一般作

为一种金属填料或颜料，根据其形状可分为片状和球状，根据其粒径大小又可分为多个品级。因铝粉性质活泼易氧化、比表面积大在聚合物中易团聚等特性，工业铝粉在应用前大多需要对其进行改性。

铝粉改性常用方法有机械化学改性、表面化学改性、胶囊改性、氧化改性、包覆及沉淀改性等。本次实验采用两种偶联剂处理铝粉表面，分别是硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂。硅烷偶联剂改性铝粉的机理过程如图 3-3 所示，而钛酸酯偶联剂的作用机理被广泛接受的大致分两种，一种是化学键理论，钛酸酯偶联剂中的烷氧基与铝粉表面结合，形成有机单分子层，这与硅烷偶联剂作用机理类似；另一种是南京大学胡柏星提出的配位理论，他们认为钛酸酯偶联剂起到偶联作用是由于配位键引起，即钛酸酯偶联剂中的 Ti 提供的 sp^3d^2 杂化轨道而填料提供孤对电子从而产生配位化学作用。

闫春泽等因机械混合铝粉与尼龙易发生偏聚影响烧结件性能而提出了通过溶液沉淀法制备尼龙 12 覆膜铝粉，研究了铝粉含量及粒径对选择性激光烧结件性能的影响。闫成勇对铝粉改性填充 ABS 树脂复合材料进行了一系列研究，分析了成型工艺、铝粉含量、钛酸酯偶联剂含量、铝粉粒径等因素对复合材料热力学性能的影响。Gabriel Pinto 等通过对铝粉填充尼龙 6 复合粉末材料的制备和表征，研究了复合材料的导电性、密度、硬度和微观形貌。

第四章 3D 打印光敏树脂材料

光敏性高分子又称感光性高分子,是指在光作用下能迅速发生化学和物理变化的高分子,或者通过高分子或小分子上光敏官能团所引起的光化学反应(如聚合、二聚、异构化和光解等)和相应的物理性质(如溶解度、颜色和导电性等)变化而获得的高分子材料。

光敏树脂,俗称紫外线固化无影胶,或 UV 树脂(胶),主要由聚合物单体与预聚体组成,其中加有光(紫外光)引发剂,或称为光敏剂。在一定波长的紫外光(250 nm~ 300nm) 照射下便会立刻引起聚合反应,完成固态化转换。光敏树脂一般为液态,可用于制作高强度、耐高温、防水材料,用途广泛,收到科研工作者的高度重视。光敏树脂具有节约能源、污染小、固化速度快、生产效率高、适宜流水线生产等优点,近年来得到了快速发展。目前,光敏树脂不仅在木材涂料、金属装饰及印刷工业等方面逐步取代传统涂料,而且在塑料、纸张、地板、电子、油墨、黏合剂等方面有着广泛应用。

4.1 光固化 3D 打印技术简介

光固化 3D 打印即光敏树脂 3D 打印。工作原理是通过相关软件做出所需打印制件 3D 数字模型,将数字模型用分层软件处理,输入打印程序中,打印机根据数据逐层固化得到制件。按出现的时间顺序来分,光固化 3D 打印目前主要有三种。

4.1.1 喷射型光固化 3D 打印

喷射型光固化 3D 打印是三种里面研究相对较早的一种,该种光固化 3D 打印的特点是光敏树脂与紫外光发射器在一个控制箱中,树

脂是从上往下喷射，边喷射边固化。具体过程如下：将光敏树脂装在容器中，通过打印喷头将光敏树脂喷射到指定的升降台上面，激光随着喷头喷射的运动轨迹而运动，对喷射的光敏树脂进行固化，当激光扫描固化树脂过后，升降台按照程序设定的距离下降一定高度，然后喷头再按照程序输出轨迹运动喷射、固化，逐层堆积直到获得所需制件，最后对打印件进行表面处理即可。此种方法由于树脂是高速喷出，如果粘度过低容易飞溅，过高铺平又很困难，难控制，再加上光敏树脂本身的收缩翘曲变形，使得制件的精度较低。其原理如图 4-1 所示。

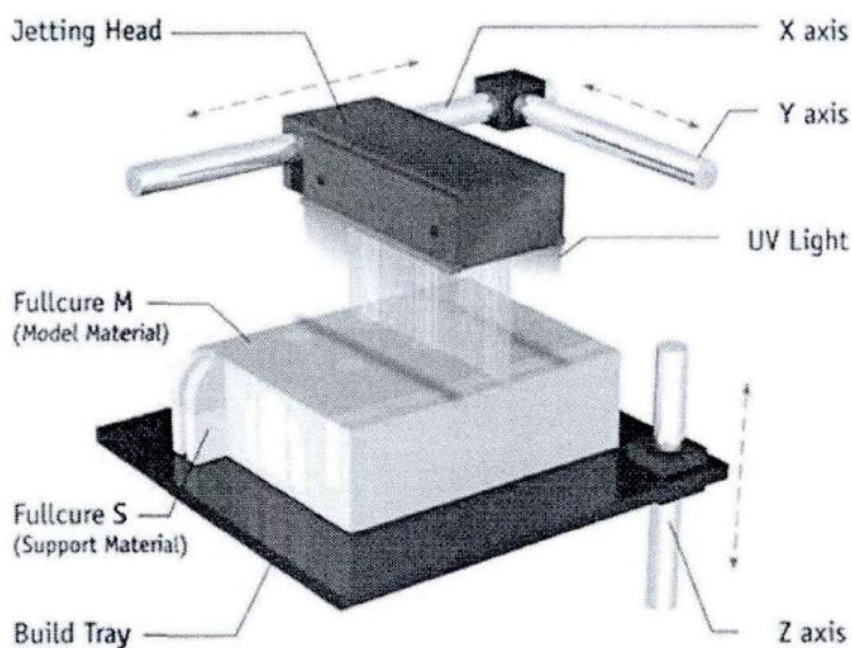


图 4-1 喷射树脂光固化 3D 打印机工作原理

4.1.2 激光固化快速成形 3D 打印

激光固化快速成形 3D 打印（SLA）是近几年比较成熟的一种光固化 3D 打印，技术较为成熟，基本取代了喷射型光固化 3D 打印。该种光固化 3D 打印光敏树脂与激光器在对立方向，激光器在上方扫描，光敏树脂在下方的树脂槽中，扫描一层，树脂槽的平台下降一层，

如此反复。成形过程如下：首先根据零件截面的形状，激光器选择性扫描，在既定截面的相关区域打印光敏树脂材料，并在紫外光的照射下进行固化，然后树脂槽内部升降台沿 Z 轴下降一定高度，接着激光器打印固化下一层，如此逐层打印固化直至工件的完成，最后除去工件表面上残余的光敏树脂即可获得所需的工件。相对于上一代的喷射型光固化 3D 打印，该种打印方式除去了树脂的喷射，且添加了刮平工序，减少了光固化制件的翘曲与变形，可为传统的模具制造起到重大的作用。其工作原理如图 4-2 所示。

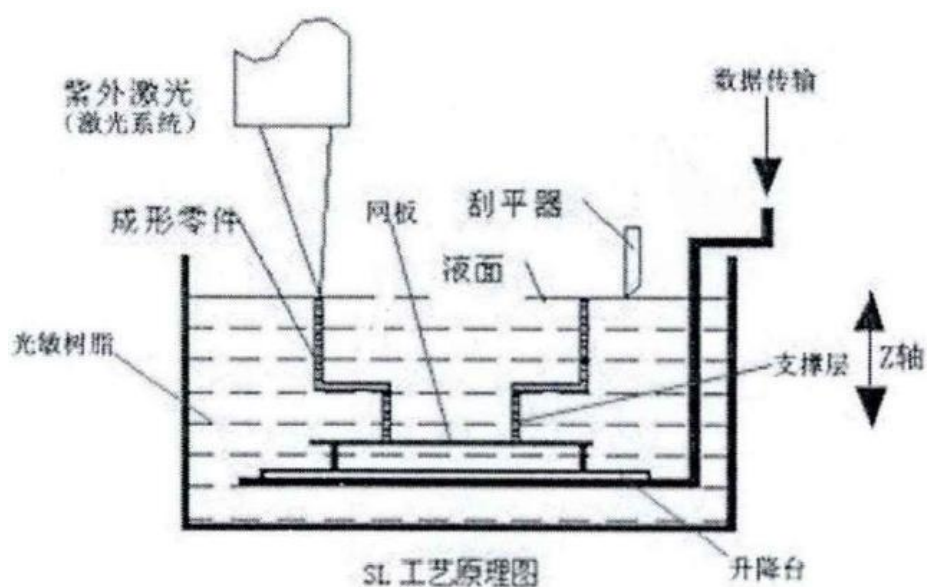


图 4-2 激光固化快速成形 3D 打印工作原理图

4.1.3 连续液体界面制造 3D 打印

第二种是最近由美国北卡罗纳大学的科研人员研发出来的一个新工艺，称之为连续液体界面制造（CLIP），在 2015 年 3 月这种光固化 3D 打印技术还登上了《Science》杂志的封面。这种光固化 3D 打印系统不同上面两种，即：打印、下降、再打印...，它是通过在树脂槽下部有一个投影设备，该投影设备会连续不断的用紫外线从下方

无形的切割物体的剖面，在树脂槽的底部有一个特殊的窗口，该窗口可以透过紫外线与氧气，氧气可以抑制树脂槽底部一层光敏树脂的固化，因而成为固化盲区，这样就可使打印的制品慢慢的往上提升而不会凝固在树脂槽底部，如此反复而成形。这种方法解决了上面两种方法始终不好解决的氧气对于光固化阻聚的问题，省去了刮平工序，速度极大的提升，并且表面更加的光滑，制品性能更加优异。相对于目前的 SLA 技术，连续液体界面制造（CLIP）把打印的速度提升了惊人的 20-100 倍。图 4-3 为连续液体界面制造工作原理。

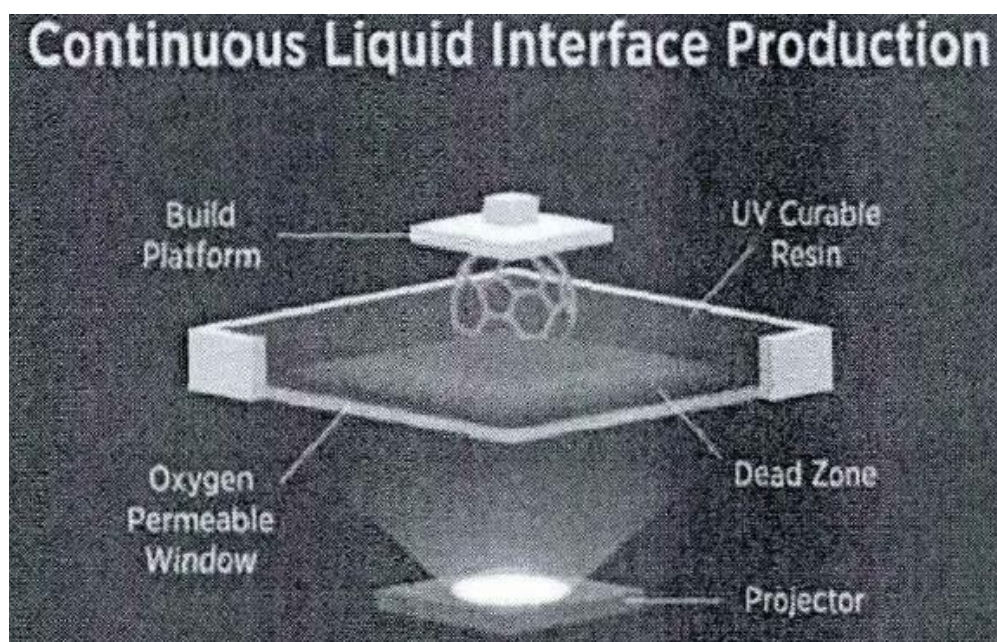


图 4-3 连续液体界面制造工作原理

4.2 光敏树脂的组成

光固化 3D 打印材料即为光敏树脂。光敏树脂，主要是利用激光照射光敏树脂，引起树脂辐射聚合，形成交联聚合物，产生固体材料液态。光敏树脂主要由预聚物、活性稀释剂、光引发剂以及其它添加剂共同组成。

4.2.1 预聚物

预聚物（也称为低聚物）是一种感光性树脂，含有不饱和官能团的低分子聚合物。齐聚物的分子末端都具有可以进行光固化反应的活性基团，主要为不饱和双键和环氧基团等，一经引发聚合，分子量就可从快速上升，迅速固化为固体。在一个光敏树脂配方中，齐聚物一般是用量最大的组分，可占到整个配方比例的 60%-90%，因而在一个光敏树脂配方中，齐聚物是最为基础的组分，决定了光敏树脂物理加工性能以及光固化制品的基本物理化学性能，如树脂粘度、制品硬度、固化制品的收缩变形、断裂伸长率等。因此在光敏树脂配方中，齐聚物的选用是十分重要的。

根据光敏树脂固化机理可以把光固化树脂分为自由基聚合的光敏树脂和阳离子聚合的光敏树脂。光敏树脂中低聚物占主要成分，选择时主要考虑以下方面；粘度（低粘度的低聚物在盛放光敏树脂的容器中，固化一层之后，其树脂可以更好的流向固化产品之上），力学性能，低聚物收缩率，毒性，刺激性，光固化速率，低聚物的玻璃化转变温度。表 4-1 常用 UV 固化预聚物结构和性能。

表 4-1 常用 UV 固化预聚物结构和性能

类型	固化速度	硬度	柔性	耐化学性	抗黄变性	抗张强度
不饱和聚酯	慢	高	不好	不好	不好	高
丙烯酸树脂	快	低	好	不好	极好	低
聚酯丙烯酸酯	可调	中	可调	好	不好	中
聚醚丙烯酸酯	可调	低	好	不好	好	低
环氧丙烯酸酯	快	高	不好	极好	中至不好	高
聚氨酯丙烯酸酯	快	可调	好	好	可调	可调

对于不同的引发反应体系，所选用的齐聚物也都是不相同的。活性基团根据其所处的空间结构的不同，其活性也是各不相同的，常用的树脂基团活性次序为：丙烯酰氧基>甲基丙烯酰氧基>乙烯基>烯丙基。因而，自由基光敏树脂体系常用的低聚物主要为各类丙烯酸树脂，如聚酯丙烯酸树脂、聚氨酯丙烯酸树脂、环氧丙烯酸树脂及乙烯树脂等。阳离子光引发体系由于光引发剂的不同，所选用的齐聚物也是不相同的，阳离子体系的齐聚物具有环氧基团、或乙烯基醚基团，例如环氧树脂、乙烯基醚树脂。

由于齐聚物在光敏树脂中属于主要的成分，决定了固化产物的许多主要的各方面的性能，因此在选定光敏树脂配方中的齐聚物的时候需要考虑很多因素。主要有下方面：

①粘度 粘度可以用来衡量光敏树脂的流动性、可加工性的一个重要指标，适当的粘度可以提高制作速度和制件的精确程度。选用粘度较低的齐聚物，就可以减少活性稀释剂的使用，这样固化产物的固化收缩率可以降低。

②光固化速度 由于使用紫外激光 3D 打印机打印，激光都是短时间内扫描发生反应，必须选用光固化速度快的齐聚物，以满足 3D 打印机的需要。

③物理力学性能 齐聚物作为光敏树脂主体影响着光敏树脂的粘度，加工性能以及光固化制件的硬度、柔韧性、经曲变形、拉伸强度、耐磨性等力学性能，一般光能度高、分子链中含有苯环，硬度强度高、耐磨性高，含有脂肪族碳链，制件韧性好。

④制品的固化收缩率 对于 3D 打印，制件的固化收缩率是一个十分重要的性能指标，若固化收缩率较高，则在打印过程中制件容易变形，既影响制件的形状，也会影响制件的性能。一般光能团越多的齐聚物，固化时交联密度越大，固化制品的收缩率也随之增加。

⑤毒性和刺激性 由于光固化 3D 打印未来是小型化、办公室化，光敏树脂必须具有低毒或无毒化，对于人体无明显刺激性。

4.2.2 活性稀释剂

活性稀释剂又被称为活性单体，是具有可以发生聚合的有机分子，其结构中含有特殊的聚合官能团，活性稀释剂添加到光敏树脂中与光敏树脂经光固化时本身也发生光固化过程，同时，活性稀释剂本身的力学性能也会影响光敏树脂固化产品的性能。活性稀释剂是光敏树脂最主要的一个组成部分，降低预聚物的粘度，使得光敏树脂材料在 3D 打印机上使用。所以，活性稀释剂的选择和添加比例光敏树脂材料也非常重要。

从结构上看，通过自由基引发的活性单体都具有碳碳双键，例如乙烯基、甲基丙烯酰氧基、丙烯基等，因而自由基的活性单体主要是一些丙烯酸酯类的单体。而阳离子光固化体系所用的活性单体大都是具有环氧基或者乙烯基醚的单体。由于乙烯基醚类的活性单体的特殊性（既可用自由基光引发剂引发也可以用阳离子型光引发剂引发），因此可作为两种光固化体系的活性单体。

根据每个活性单体分子所含的可进行反应的基团的多少进行划分，可分为单官能团丙烯酸酯、双官能团丙烯酸酯、多官能团丙烯酸酯。

酸酯等。单官能团活性单体中，每个分子有且仅有一个反应性基团可以参与反应，分子量较小，粘度低，稀释能力强。同时由于单官能团使得光固化速度下降，在常湿条件下单官能团活性单体易挥发，气味大。多官能团的活性单体由于每个分子中都含有两个或两个以上的可反应官能团，单体活性增加，光固化速度增强，粘度小且挥发性较小，气味低。随着活性单体官能度的增加，体系粘度上升，加工成形变得困难，其收缩率也会相应增加，从而影响制品性能。活性单体中可以参加光固化反应的活性基团越多，整个光固化反应体系的光固化速度也就越快，随着活性单体官能度的增加，一方面可增加光固化反应的活性，另外还可同时提升整个体系的交联密度。如果仅仅是单官能度的活性单体，则反应体系只能生成线性聚合物，不能够发生交联。只有当活性单体的官能度 ≥ 2 时，固化体系才能发生交联反应，得到交联聚合物。固化体系的交联程度的高低对于固化产物的力学性能和化学性能有较大影响。表 4-2 为几种活性稀释剂对光固化树脂性能的影响。

表 4-2 几种常见的活性稀释剂对光固化树脂性能的影响

活性单体	丙烯酸-β - 羟乙酯	邻苯二甲酸二 丙烯酸酯	二缩三乙二醇 二丙烯酸酯	双官能度 单体 (D)	丙烯酸异 冰片酯
粘度 (25℃, Pa·s)	20	9	15	25	9
固化时间 (s)	20	40	30	20	50
强度	用力即断	用力即断	不易折断	不易折断	易断

在选择活性单体时需要考虑以下因素：

①活性单体粘度要低，稀释能力要强，以增强树脂可加工性能。

②鉴于 3D 打印前景，活性单体应该具有低毒性、低气味、低挥发、低刺激性。

③要有低的体积收缩率，以防止打印制品的翘曲与变形。

④较高的反应性，光扫描速度较快，要求活性单体必须具有较高的反应性，否则层与层之间粘结性会很差，影响力学性能。

⑤高溶解性，活性单体作为稀释剂，需要能够较好的溶解粘度较高的低聚物以及光引发剂。

4.2.3 光引发剂

光引发剂（Photoinitiator, PI）经紫外光可以产生活性中间体，从而可以使光敏树脂发生辐射交联，使小分子聚合，不同的光引发剂对树脂的固化速率不同，光引发剂在整个光固化产品中的用量小于 3%，而且在光聚合过程中，光引发剂对固化后样品性能并没有影响。吸收波长在紫外光区（250 nm~420 nm）的引发剂称为紫外光引发剂。光引发剂包括自由基型和阳离子型。由于不同的反应机理，自由基型光引发剂可分为裂解型和夺氢型的自由基光引发剂。目前主要的几类光引发剂有：大分子光引发剂、大分子助引发剂、自由基-阳离子混杂光引发剂以及水性光引发剂等新型光引发剂。

1) 阳离子型光引发剂

阳离子型光引发剂引发机理与过程为：紫外光的照射，阳离子型光引发剂生成路易斯酸或者质子酸，进而形成阳离子活性中心，齐聚物和活性稀释剂在活性中也的作用下发生反应。相对于自由基型光引发剂，阳离子型光引发体系有以下优点：受氧阻聚的影响小，但对于

水汽、碱类等物质比较敏感，容易导致阻聚；阳离子光敏树脂大都含有环氧基团，固化时体积收缩小易得到控制；阳离子光固化速度较慢，对光固化环境的温度依赖性较大，打印时紫外光扫描速度过快易导致制品性能下降；由于带正电荷的基团不会发生偶合作用而消失，所阳离子引发剂产生的活性中间体很稳定，可以长时间存在，即使紫外光扫描过后，仍然能够发生反应交联固化。目前常用的阳离子型光引发剂主要有：二芳基碘鎓盐、重氮盐、烷基硫鎓盐、铁芳烃盐等。图4-4为几种常用的阳离子引发剂分子式。

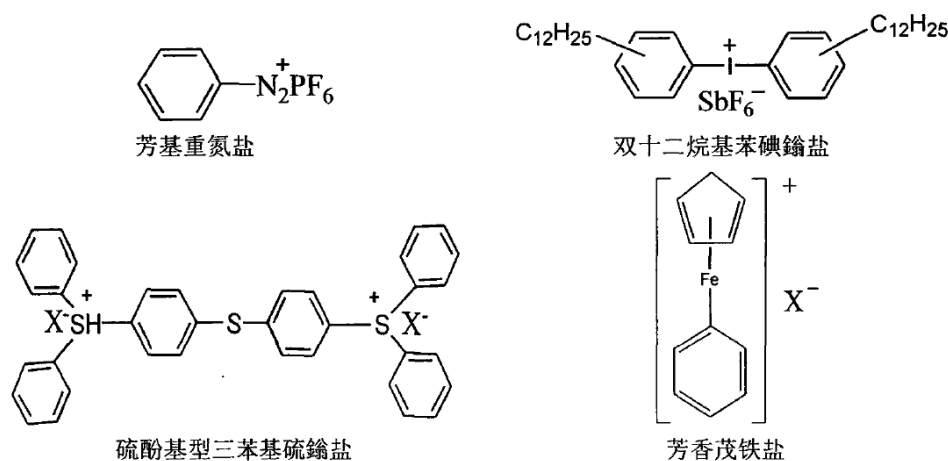


图 4-4 几种典型的阳离子型光引发剂

2) 自由基型光引发剂

自由基型光引发剂在紫外光的作用下产生活性自由基，接着活性自由基引发齐聚物和反应性稀释剂发生反应，单体和齐聚物的双键不断以连锁反应机理迅速聚合加成固化。自由基光引发剂体系优点有固化速度快、成本低、体系粘度小等，其缺点也是很明显的，例如受表面氧的干扰，制件精度有所降低；反应后产生的应力变形大；主要引发双键聚合反应，固化时体积收缩率较大，成形制件翘曲变形大等。

裂解型自由基光引发剂，通常也称为 P I 型光引发剂，这类光引发剂的主要原理是光引发剂分子吸收紫外光光能发生能级跃迁产生激发态，其激发态处于不稳定状态，其中较弱的键发生均裂，生成初级活性自由基，从而引发光敏树脂聚合交联。裂解型自由基光引发剂大多是芳基烷基酮类化合物，图 4-5 为几种裂解型自由基光引发剂。

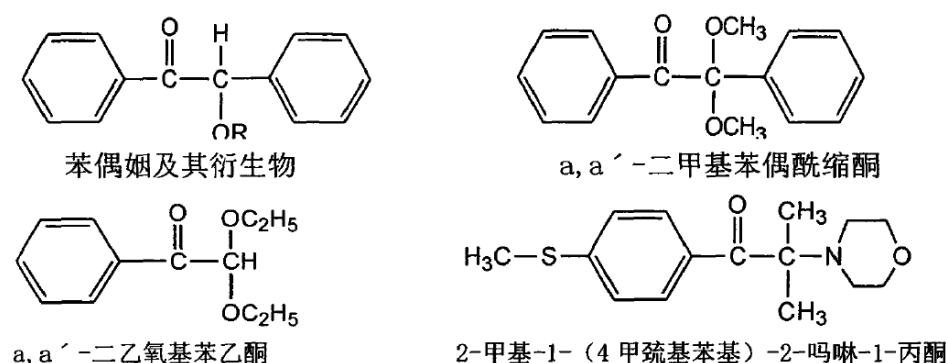


图 4-5 几种常见的裂解型自由基光引发剂

夺氢型自由基光引发剂，通常也称为 P II 型光引发剂，这类光引发剂吸收光能后，经系间窜越至三线激发态，进而从活性单体、低聚物分子上夺取氢原子，使其成为活性自由基引发光敏树脂聚合。不同于裂解型光引发剂的是夺氢型光引发剂需要助引发剂进行配合光固化才能达到好的效果，助引发剂一般为脂肪族叔胺、乙醇类叔胺、叔胺型苯甲酸酯等叔胺类化合物。夺氢型自由基光引发剂都是杂环芳酮类或二苯甲酮类化合物。图 4-6 为典型的夺氢型自由基光引发剂。图 4-7 为夺氢型自由基引发剂的助引发剂。

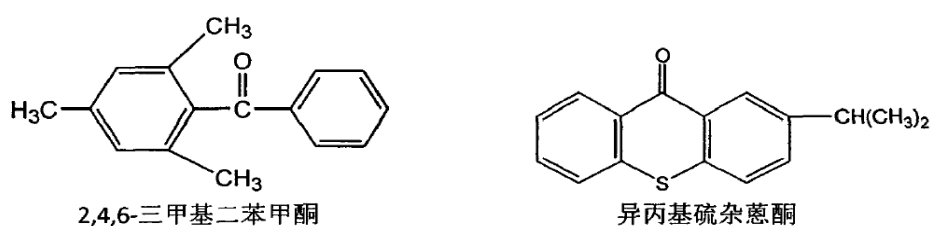


图 4-6 两种典型的夺氢型自由基光引发剂

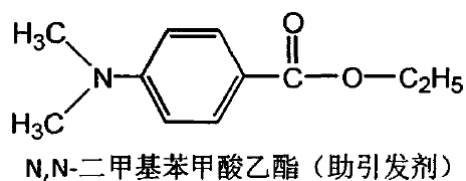


图 4-7 夺氢型自由基引发剂的助引发剂

3) 自由基-阳离子混杂型光引发剂

混杂型光引发剂是既含有能引发自由基聚合的反应，又含有能引发阳离子聚合反应的一类引发剂。由于自由基光引发体系收缩大、翘曲形变大、受氧干扰严重、固化速度快等特点，而阳离子光引发剂体系诱导期长、体积收缩小、受氧阻聚小等特点。因而开发了混杂型光引发剂，这类引发剂结合了自由基引发剂与阳离子型光引发剂，使两者相互补充获得更加稳定可靠的引发体系。如果以混杂型光引发剂引发光敏树脂体系发生反应，整个体系还有可能形成互穿网络的结构，从而可改善制件的力学性能。图 4-8 为 IGM 公司与北京英力科技发展有限公司共同合作研发的含自由基和阳离子双引发基团的混杂光型引发剂 Omnicat 550 和 Omnicat 650。

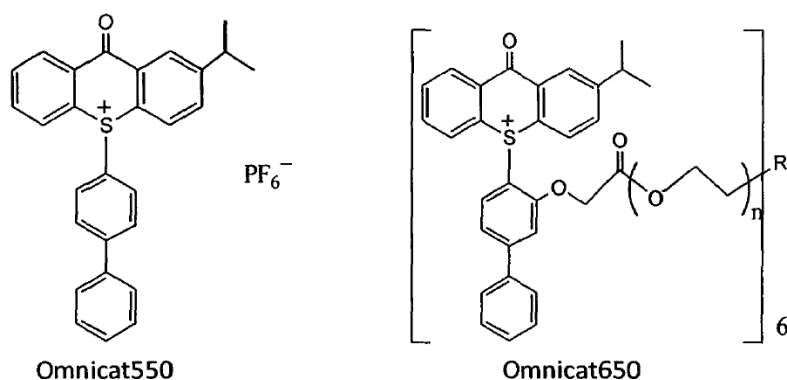


图 4-8 两种混杂型光引发剂

以上三种光固化引发剂体系各有其优缺点,在进行实际应用的时候,应根据生产所需选择适当的引发剂体系。表 4-3 为三种光引发剂的比较。

表 4-3 三种光引发剂的比较

体系	固化速度(相对)	收缩率	引发剂价格
自由基	快	大	低
阳离子	慢	小	高
混杂型	中等	中等	中等

4) 其它种类的光引发剂

除了上述三种常用的光引发剂外,也有一些其他的类型的光引发剂。例如为了改善小分子引发剂的相容性、迁移性、气味等缺点的大分子光引发剂;用水代替活性稀释剂来调节树脂粘度,应用在此体系的水基光引发剂;可以运用可见光作为能量来源,在可见光的波段内引发聚合的可见光引发剂等。

4.2.4 其它助剂

在一个光敏树脂配方中,除了上述的低聚物、活性单体、光引发剂三种核心物质外,还必须含有一些它的助剂,这些助剂在光固化材料配方中虽然不如上面几种重要,但是对于产品最后的品质也十分重要。根据光固化材料使用场合的不同助剂也有所不同。

①颜料:颜料分为无机颜料与有机颜料,无机颜料多为金属氧化物,价格便宜,有较好的耐光性、耐热性以及较强的机械强度,但种类少,光泽偏暗;有机颜料颜色种类齐全,色彩鲜艳明亮,着色力强,分散性好,但是生产工艺复杂,价格较贵。

②填料：填料一般为天然矿物料，来源广泛，化学稳定性好，便宜，能够均匀分散在基体树脂中。常用的填料有蒙脱土、碳酸钙、氢氧化铝、高岭土等，由于它们的折射率与低聚物、活性单体接近，因而在光敏树脂中，这些填料是“透明”的，不会影响光敏树脂吸收紫外光。加入填料主要是降低配方成本，同时也能影响树脂的流变性，应用改性填料，还可以增加填料与基体材料的连接性，增加固化产物的力学性能、耐磨性与耐久性。

③消泡剂：在光敏树脂中加入消泡剂后，能迅速分散成微小的液滴，最后气泡快速铺展，导致分子膜破裂，达到消泡的目的。光敏树脂在配置搅拌混合中会产生气泡，加入的流平剂、润湿剂等也会出现气泡，在打印过程中的刮平、平台下降时也会出现气泡。气泡的存在会使得打印制品变形、形成应力集中点，影响制品的力学性能，因而必须加入消泡剂进行抑制。常用的消泡剂有有机改性化合物、矿物油、低级醇（乙醇、正丁醇等）、有机硅树脂等。

④流平剂：流平剂主要用来提高光敏树脂流动性能，使树脂能够流平的一种助剂。光固化 3D 打印过程中，每一层打印完成后都需要刮平进行下一次的打印，如果流平性不好，刮平后会出现流挂、粗超、高低不平等现象，最后造成制件发生翘曲变形甚至是难以成形，因此光敏树脂液面的平整、光滑、均匀至关重要。

⑤消光剂：任何物体的表面都能或多或少的对光进行反射，这是物体的一种固有特性。当物体表面受到光线照射时，物体会由于表面的光滑程度不同而将光线不同程度向四周散射。光固化 3D 打印中，

紫外光向下在光敏树脂表面扫描，如果光敏树脂的表面光泽度过高，会使得紫外光发生折射，这样会使得当前固化层固化不完全，累计下来会使制件变形、力学性能大幅度降低。消光剂就是能够使光敏树脂表面产生一定的粗糙程度，明显降低树脂表面光泽度的助剂。其折射率应该尽量接近光敏树脂的折射率，这样可以使光敏树脂的透明程度，颜色不受影响。

⑥阻聚剂；由于光敏树脂具有较高反应活性，低聚物与活性单体都是高反应性的丙烯酸脂类，引发剂又极易产生活性种，这样的混合体系极易受到外界的光、热作用而引发反应，导致光敏树脂变质，难长时间的存储，因而需要加入阻聚剂进行调节。阻聚剂就是能够阻止聚合反应发生的试剂，空气中的氧气就是一种很好的阻聚剂，自身是双基自由基，与光敏树脂体系中的自由基结合，生成过氧化自由基，使得引发活性大大的降低，从而起到阻聚的作用，常用的阻聚剂有：酚类、醌类、芳胺类等。

第五章 3D 打印无机非金属材料

无机非金属材料，是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。无机非金属材料的提法是 20 世纪 40 年代以后，随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。无机非金属材料是与有机高分子材料和金属材料并列的三大材料之一。

在晶体结构上,无机非金属的晶体结构远比金属复杂，并且没有自由的电子。具有比金属键和纯共价键更强的离子键和混合键。这种化学键所特有的高键能、高键强赋予这一大类材料以高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度和良好的抗氧化性等基本属性,以及宽广的导电性、隔热性、透光性及良好的铁电性、铁磁性和压电性。

无机非金属材料是 3D 打印材料的重要成员。由于无机非金属材料的熔点远高于金属或者高分子材料，无法直接用激光用激光烧结或热烧结的方法进行加工，因此成形时必须加入粘结剂。3D 打印用无机非金属材料主要包括用于构建骨架的无机粉末和用于塑性的粘结剂两个部分。而两者必须满足一定的条件才可用于 3D 打印。

5.1 陶瓷 3D 打印材料

陶瓷是陶器与瓷器的统称。传统陶瓷又称普通陶瓷，是以粘土等天然硅酸盐为主要原料烧成的制品，现代陶瓷又称新型陶瓷、精细陶瓷或特种陶瓷。常用非硅酸盐类化工原料或人工合成原料，如氧化物（氧化铝、氧化锆、氧化钛等）和非氧化物（氮化硅、碳化硼等）制

造。陶瓷具有优异的绝缘、耐腐蚀、耐高温、硬度高、密度低、耐辐射等诸多优点，已在国民经济各领域得到广泛应用。传统陶瓷制品包括日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、工业美术陶瓷、化工陶瓷、电气陶瓷等，种类繁多，性能各异。随着高新技术工业的兴起，各种新型特种陶瓷也获得较大发展，陶瓷已日趋成为卓越的结构材料和功能材料。它们具有比传统陶瓷更高的耐温性能，力学性能，特殊的电性能和优异的耐化学性能。

陶瓷 3D 打印主要运用的材料按照形态可分为浆材、粉材、丝材、片材。浆材一般由有机物液体和陶瓷粉末混合搅拌制得，主要应用于 DIW 技术、SLA 技术，粉材是陶瓷粉末有机物颗粒的混合粉末或陶瓷粉末，主要应用于 SLM 技术、SLS 技术、3DP 技术，丝材主要是应用于 FDM 技术的热熔性丝状材料，片材指陶瓷材料薄膜，主要用于 LOM 技术。

磷酸三钙陶瓷（TCP）

磷酸三钙陶瓷（TCP）又称磷酸三钙，存在多种晶型转变，主要分为 β -TCP 和 α -TCP。磷酸三钙的化学组成与人骨的矿物相似，与骨组织结合好，无排异反应，是一种良好的骨修复材料。磷酸三钙天然的生物学性能使其多用于医学领域。

氧化铝陶瓷

氧化铝陶瓷是氧化物陶瓷中应用最广、用途最宽、产量最大的陶瓷材料。氧化铝陶瓷具有高抗弯强度、高硬度、优良的抗磨损性等特性，被广泛地应用于制造刀具、磨轮、球阀、轴承等，其中以 Al_2O_3

陶瓷刀具应用最为广泛。传统工艺制备氧化铝陶瓷件工序复杂、生产时间长，3D 打印技术大幅提高了氧化铝陶瓷的生产效率，并降低了生产成本。

陶瓷先驱体

陶瓷先驱体是用化学方法合成的一类聚合物。陶瓷先驱体在惰性气体保护的热处理过程中热解成 SiC, Si₃N₄, BN, AlN, SiOC, SiNC 等陶瓷基复合材料。陶瓷先驱体普遍具有稳定化学性能及优良的力学性能和独特的电学性能，目前许多研究利用几种陶瓷先驱体进行交联或向陶瓷先驱体混入其他化学物质等方法以期获得更卓越的性能。

SiC 陶瓷

SiC 陶瓷又称金刚砂，具有高的抗弯强度、优良的抗氧化性与耐腐蚀性、高的抗磨损以及低的摩擦因数等高温力学性能。SiC 陶瓷在已知陶瓷材料中具有最佳的高温力学性能（强度、抗蠕变性等），其抗氧化性在所有非氧化物陶瓷中也是最好的。

Si₃N₄ 陶瓷

Si₃N₄ 陶瓷具有高强度、低密度、耐高温等特性，是一种优异的高温工程材料。它的强度可以维持到 1200℃ 的高温而不下降，受热后不会熔成融体，一直到 1900℃ 才会分解，并且具有极高的耐腐蚀性，同时也是一种高性能电绝缘材料。

碳硅化钛陶瓷

碳化钛陶瓷的主要成分为碳化钛硅化合物（Ti₃SiC₂），是一种新型陶瓷材料。Ti₃SiC₂ 不仅具有陶瓷的优良性能（较高的熔点、热

稳定性、屈服强度和高温强度及良好的耐腐蚀性和抗氧化性），还兼具了金属的优异性能（常温时具有良好的导热、导电性能）

1、陶瓷 3D 打印技术的发展趋势

陶瓷 3D 打印有诸多优点，例如：复杂的生产程序变得简单化，极大减少了人力和物力的投入，缩短了产品制造的时间，节约了材料，降低了成本，解决结构复杂零件难以加工的问题。目前，陶瓷 3D 打印的市场需求主要包括以下 3 个方面：

1)与传统陶瓷工艺相结合，实现陶瓷制品的快速生产。一般陶瓷制品如日用陶瓷产业，须应对多样化的市场需求，应加快产品的开发、生产速度，满足客户的定制要求。传统陶瓷制造工艺包括注浆成型、压制成型等。传统陶瓷制造工艺周期长，后期再加工工艺繁琐，且在制作特殊形状制品时需要不同的模具，无法同时满足定制客户对于时间及式样的双重需求。陶瓷 3D 打印满足市场发展需要，在陶瓷工业的升级转型中脱颖而出。

2)生物陶瓷制品的制造。生物陶瓷主要应用于医学方面，生物陶瓷特有的可降解性使其主要应用于医用支架等。生物陶瓷 3D 打印将带动高端医疗领域的突破发展。

3)高性能陶瓷功能零件。陶瓷具有优良的化学性能、物理性能和力学性能，例如高强度、高硬度、耐磨、耐高温、耐腐蚀、防潮、良好的绝缘性、一定的抗急冷急热等。高性能陶瓷零件在航空航天、高端武器、船舶、汽车、电子等领域具有良好的应用前景，如可在航天

飞机上应用的耐高温陶瓷片等，陶瓷 3D 打印技术的应用将使陶瓷零件在高精尖领域具有极大的发展前景。

陶瓷 3D 打印的产业化应用还未全面成型，其难点在于实现其高效率、高品质的生产，同时高致密度的大型复杂零件的制造也是其亟待解决的问题；因此对陶瓷 3D 打印设备及材料的研究引起了国内外学者的广泛关注。近年来我国对增材制造的发展愈加重视，实现陶瓷 3D 打印开展大规模产业化应用将是我国乃至世界的发展目标。

国外对于陶瓷 3D 打印的研究较国内成熟许多，尤其是在生物陶瓷制品即医学方面的应用。我国 3D 打印研究起步较晚，经国家政策大力支持，目前我国许多高校成立了实验室并出现了一批生产 3D 打印机的企业，但是针对陶瓷 3D 打印开展大规模产业化应用仍十分困难。

陶瓷 3D 打印的出现对陶瓷产业的影响作用是巨大的，并且对陶瓷应用于航空航天、高端武器、电子等高精尖产业的推动和带来的效益无法估量。根据我国科技部组织制定的《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》，可预见陶瓷 3D 打印光明的发展前景。

5.2 石膏材料

5.2.1 石膏材料简介

石膏为长块状或不规则形纤维状的结晶集合体，大小不一，全体白色至灰白色，大块的石膏上下两面平坦，无光泽及纹理，体重质松，易分成小块。石膏的化学本质是硫酸钙，通常所说的石膏是指生石膏，化学本质是二水硫酸钙（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）。当其再干燥条件下 128°C

是会失去部分结晶水变为 β -半水石膏，其化学本质是 β -半水硫酸钙（ β -CaSO₄·1/2H₂O），如果其在饱和蒸汽压在时会失去部分结晶水变为 α -半水石膏，其化学本质是 α -半水硫酸钙（ α -CaSO₄·1/2H₂O），这两个半水石膏化学式相同，结构不同。它们继续脱去结晶水形成无水石膏，化学本质是无水硫酸钙（CaSO₄）。

二水硫酸钙和无水硫酸钙用途比较广泛，在食品、农业、化工、涂料等多方面都用应用。半水硫酸钙具有较好凝胶性质遇水可固结形成一定强度的材料，其中 β -半水硫酸钙多用于建筑行业， α -半水硫酸钙多用于模具制造等。

5.2.2 硫酸钙（石膏）材料的特点

石膏是以硫酸钙为主要成分的气硬性胶凝材料，由于石膏胶凝材料及其制品有许多优良性质，原料来源丰富，生产能耗低，因而被广泛地应用于土木建筑工程领域。

石膏的微膨胀性使得石膏制品表面光滑饱满，颜色洁白，质地细腻，具有良好的装饰性和加工性，是用来制作雕塑的绝佳材料。石膏材料相对其他诸多材料而言有着诸多优势。

- 1) 精细的颗粒粉末，颗粒直径易于调整。
- 2) 价格相对低，性价比高。
- 3) 安全环保，无毒无害。
- 4) 模型表面：沙粒感、颗粒状。
- 5) 颜色：材料本身为白色，打印模型可实现彩色。
- 6) 典型应用：唯一支持全彩色打印的材料，建筑模型展示。

5.2.3 石膏在 3D 打印中的应用

1、骨折部位支撑保护架

骨折事件本身并不是最悲惨的，最糟糕的是骨折后将要采取的治疗。骨折后一般会在骨折部位打石膏，人们的行动会十分不便。这种保护架可针对每个病人进行个性化设计，并可依据受伤的严重程度设计。此外，这种框架仅仅会保护受伤部位，其他部位则不需要被固定。毕业于新西兰维多利亚大学的学生利用三维打印机创建出一种新型石膏，这种石膏重量较轻，且可进行弯曲。这种保护架可针对每个病人进行个性化设计，并可依据受伤的严重程度设计。此外，这种框架仅仅会保护受伤部位，其他部位则不需要被固定。这种新型石膏的优点在于其轻便耐用的设计，且可以清洗，有助于皮肤“呼吸”。

2、快速成型石膏人偶

克隆就是复制、拷贝和翻倍一个物品。武汉光谷商家引进 3D 色彩人像摄影新技术系统已经开始投入运行，该技术采用专业扫描仪，对人体进行快速立体扫描，在电脑上存储数据，运用高强度复合石膏粉，经过 3D 打印机很快就可以“打”出 15 至 30 厘米不等的“人偶”。

3、骨骼打印

高纯度半水硫酸钙，具有良好的生物相容性、生物可吸收性、骨传导性、快速吸收特性、易加工性和高机械性能等优点，凭借这些优势，最早应用在整形外科或齿科材料中。众多研究结果均表明，硫酸钙基材料可以用作骨修复材料，也是最早应用于组织修复的材料。

3D 打印衣服、鞋子、汉堡等已不是新鲜事了，据国外媒体报道，美国的一名患者成功接受一例具有开创性的手术，用 3D 打印头骨替代 75% 的自身头骨。不仅如此，我们还希望利用 3D 打印为更多的患者修复其他部位的缺失或者受损的骨骼。当然，在选择打印材料的同时，我们推荐选用纯天然、安全环保、无毒无害的硫酸钙（石膏）。

3D 打印机为了适合不同行业的需求，提供“轻盈小巧”和“大尺寸”的多样化选择。已有多款小巧的 3D 打印机，并在不断挑战“轻盈小巧”极限，为未来进入家庭奠定基础。而打印材料的发展也尤为重要，3D 打印全靠有“米”下锅，石膏作为性价比高的打印材料，取材广泛，价廉宜得，毒副作用极小，随着人们研究的深入，石膏在 3D 打印方面的应用将有更广阔的发展前景。

第六章 3D 打印生物材料

生物材料(Biomaterials)是用于与生命系统接触和发生相互作用的,并能对其细胞、组织和器官进行诊断治疗、替换修复或诱导再生的一类天然或人工合成的特殊功能材料,又称生物医用材料。生物材料是材料科学领域中正在发展的多种学科相互交叉渗透的领域,其研究内容涉及材料科学、生命科学、化学、生物学、解剖学、病理学、临床医学、药理学等学科,同时还涉及工程技术和科学管理的范畴。生物材料有人工合成材料和天然材料;有单一材料、复合材料以及活体细胞或天然组织与无生命的材料结合而成的杂化材料。生物材料本身不是药物,其治疗途径是以与生物机体直接结合和相互作用为基本特征。

自 90 年代后期以来,世界生物材料科学和技术迅速发展,即使在当今全球经济低迷的大环境下,生物材料依然保持着每年 13%高速增长,充分体现了其强大的生命力和广阔的发展前景。现代医学正向再生和重建被损坏的人体组织和器官、恢复和增进人体生理功能、个性化和微创治疗等方向发展。传统的无生命的医用金属、高分子、生物陶瓷等常规材料已不能满足医学发展的要求,生物医学材料科学与工程面临着新的机遇与挑战。未来,生物医用材料的市场占有率很有可能将赶上药物。因此,加强生物医用材料的临床应用研究和推广应用,重点发展我国生物医用材料的研究、开发、生产、营销紧密结合的一体化体系是当务之急。实际上,国家当前在生物材料科学基础研究方面已经取得了重大突破进展,走在了世界先进行列,但产业化

水平尚待提高，产业规模小、发展相对滞后，还不能满足全民医疗保健的实际需要。在国家政策、经济的大力支持下，我国生物材料的产业化发展将提速。企业应增强自主创新的能力，进一步解决依靠进口的局面，同时加大出口力度，实现跨越发展，扩大中国生物材料产品在国际上的影响力。

生物材料应用广泛，品种很多，其分类方法也很多。生物材料包括金属材料（如碱金属及其合金等）、无机材料（生物活性陶瓷，羟基磷灰石等）和有机材料三大类。有机材料中主要是高分子集合物材料，高分子材料通常按材料属性分为合成高分子材料（聚氨酯、聚酯、聚乳酸、聚乙醇酸、乳酸乙醇酸共聚物及其他医用合成塑料和橡胶等）、天然高分子材料（如胶原、丝蛋白、纤维素、壳聚糖等）；根据材料的用途，这些材料又可以分为生物惰性（Bioinert）、生物活性（Bioactive）或生物降解（Biodegradable）材料，高分子聚合物中，根据降解产物能否被机体代谢和吸收，降解型高分子又可分为生物可吸收性和生物不可吸收性。根据材料与血液接触后对血液成分、性能的影响状态则分为血液相容性聚合物和血液不相容性。根据材料对机体细胞的亲和性和反映情况，可分为生物相容性和生物不相容性聚合物等。

生物材料主要用在人身上，对其要求十分严格，必须具有四个特性：

(1)生物功能性。因各种生物材料的用途而异，如：作为缓释药物时，药物的缓释性能就是其生物功能性。

(2)生物相容性。可概括为材料和活体之间的相互关系，主要包括血液相容性和组织相容性（无毒性、无致癌性、无热原反应、无免疫排斥反应等）。

(3)化学稳定性。耐生物老化性（特别稳定）或可生物降解性（可控降解）。

(4)可加工性。能够成型、消毒（紫外灭菌、高压煮沸、环氧乙烷气体消毒、酒精消毒等）。

生物材料的性能要求主要包括：生物相容性、力学性能、耐生物老化性能和成形加工性能。其中，生物相容性主要包括血液相容性、组织相容性。材料在人体内要求无不良反应，不引起凝血、溶血现象，活体组织不发生炎症、排拒、致癌等。此外，材料要有合适的强度、硬度、韧性、塑性等力学性能以满足耐磨、耐压、抗冲击、抗疲劳、弯曲等医用要求，在活体内要有较好的化学稳定性，能够长期使用，即在发挥其医疗功能的同时要耐生物腐蚀、耐生物老化。

目前 3D 打印技术被广泛应用到生物医学领域，不仅包括骨骼、牙齿、人造肝脏、人造血管、药品制造等的实体制造，而且在国际上也开始将此技术用于器官模型的制造与手术分析策划，个性化组织工程支架材料和假体植入物的制造，以及细胞或组织打印等方面的应用中。据报道，2013 年 12 月剑桥大学再生医疗研究所开创性地通过 3D 打印技术，用大鼠视网膜的神经节细胞和神经胶质细胞制备得到具有三维结构的人工视网膜。该人工视网膜细胞打印出来后存活率高，并且仍具有分裂生长能力，这一突破性的进展为人类治愈失明带来了希

望。目前已经可以利用 3D 打印技术和仿生材料制备一些无细胞的修复材料，并且已经在临床上有所应用。未来，可以利用 3D 打印技术打印出具有生物活性的人体器官，实现人造器官的临床应用。此外，3D 打印技术可以用于个性化治疗，降低治疗成本，将来开发更多的生物相容性和生物降解材料，与 3D 打印技术相结合可以减轻因材料的不足而对人体产生的伤害。这样一来 3D 打印技术必将引领医疗领域的革命潮流。

6.1 医用金属材料

3D 打印的生物医用材料多为塑料，而金属材料具有比塑料更好的力学强度、导电性以及延展性，使其在硬组织修复研究领域具有天然的优越性。金属的熔融温度比较高，打印的难度较大，所以金属 3D 打印一般采用光固化 3D 打印（SLA）和选择性激光烧结（SLS）方式加工，由金属粉末在紫外光或者高能激光的照射下产生的高温实现金属粉末的熔合，逐层叠加得到所需的部件。目前用于生物医学打印的 SAHOD 料主要有钛合金、钴铬合金、不锈钢和铝合金等。西安第四军医大学西京骨科医院骨肿瘤科郭征教授带领的团队，采用金属 3D 打印技术打印出与患者锁骨和肩胛骨完全一致的钛合金植入假体，并通过手术成功将钛合金假体植入骨肿瘤患者体内，成为世界范围内肩胛带不定形骨重建的首次应用，标志着 3D 打印个体化金属骨骼修复技术的进一步成熟。

与传统个体化植入假体制备技术相比，锁骨、肩胛骨等不定形骨的 3D 打印个体化钛合金植入假体具有更高的匹配性，功能及外形也

更加得到患者和医生的认可；多孔设计石骨及软组织附着长入率高；弹性模量降低，减少应力遮挡并发症；产品质量稳定，精确度可达到 1 mm；制备周期短等优势。目前该技术的缺点就是打印材料昂贵，需要患者承受较大的经济负担，难以实现平民化。中国科学院理化技术研究所利用低熔点金属 3D 打印技术，如液态金属 $\text{Ga}_{67}\text{In}_{20.5}\text{Sn}_{12.5}$ 合金（熔点约为 11°C ），结合微创手术的方式直接在生物体内目标组织处注射成型医疗电子器件进行了创新性的研究。他们先将生物相容的封装材料（如明胶）注射到生物组织内固化形成特定结构，再用工具（如注射针头）在固化的封装区域内刺入并拔出以形成电极区域，最后将导电金属墨水，绝缘型墨水乃至配套的微/纳尺度器件等顺次注射后形成目标电子装置。通过控制微注射器的进针方向、注射部位、注射量、针头移位及速度这样的 3D 打印步骤，可以在目标组织处按预定形状及功能构建出终端器件。他们利用该技术在生物体组织内制备出 3D 液态金属 REID 天线，采用这种生物体内 3D 打印成型技术制作的柔性器件以其较高的顺应性、适形化，以及微创性与低成本特点显示出良好的应用前景，在植入式生物医用电子技术领域具有重要意义。

随着纳米 3D 打印技术的出现和发展，纳米粉末打印材料成为了研究者们热议的话题，金属粉末占据了 3D 打印粉末市场的主要位置。先进的纳米结构粉末对超细的晶体结构要求高，纳米结构粉末可以显著改善打印成品的物理化学力学性能，这些性能的提升将进一步拓宽

其在生物医学领域的应用。然而，因为加工困难、低生产效率和高成本，这些纳米粉末的产业化和商业化的商业化还是非常困难的。

6.2 医用无机非金属材料

无机非金属生物材料主要包括生物陶瓷、生物玻璃、氧化物及磷酸钙陶瓷和医用碳素材料。其中，生物陶瓷具有高硬度、高强度、低密度、耐高温、耐腐蚀等优异性能，在医学骨替代品、植入物，齿科和矫形假体领域有着广泛的应用。但生物陶瓷韧性不高，硬而脆的特点使其加工成形困难，尤其是形状或内部结构复杂陶瓷部件需通过模具来成形，而模具加工价格昂贵且开发周期长，难以满足产品的需求。近年来，针对生物陶瓷制作工艺复杂、成型加工困难的问题，研究者们采用 3D 打印技术来制备生物陶瓷，并取得了长足的进展。

Saijo 等采用磷酸三钙粉末等生物材料制备个性化假体，经处理后术中无需雕刻，可直接植入人体；将 3D 打印引进到美容整形领域，并取得很好的效果。利用 3D 打印技术制造美容整形材料既可以实现客户的各种个性化要求，又能够做到一次性精确成型，减去了传统工艺繁琐的术前雕刻的过程，大大节省了手术时间，因此得到广泛关注。目前主要有磷酸钙、磷酸二正硅酸钙、双相磷酸钙、硅酸钙/ β -磷酸三钙等材质的生物陶瓷。3D 打印陶瓷支架具有促进细胞成骨性分化和血管新生的生物活性功能，羟基磷灰石支架可促进神经鞘干细胞向成骨细胞分化，双相磷酸钙支架中随着 β -磷酸三钙含量的增加，支架的促进细胞成骨性分化的能力增强，硅酸钙 / β -磷酸三钙支架中的硅元素的释放能够促进骨样细胞合成成骨因子，促进细胞成骨性分化。磷

酸二正硅酸钙能够促进血管的增殖和再生。生物陶瓷具有与松质骨相近的抗压强度和良好的骨诱导能力,但是生物陶瓷需要在高温环境下打印成型,打印时不能对支架同步涂层促进骨形成的生物活性分子或抗感染药物,同时其脆性高、韧性差、剪切应力弱。目前对生物陶瓷的 3D 打印研究仅仅局限于硬组织的打印。生物玻璃是内部分子呈无规排列状态的硅酸盐的聚集体,主要含有钠、钙、磷等几种金属离子,在一定配比和化学反应条件下,会生成含有羟基磷酸钙的复合物,具有很高的仿生性,是生物骨组织的主要无机成分。

由于生物玻璃材料具有降解性和生物活性,能够诱导骨组织的再生,因此在骨组织工程的研究领域被作为组织工程支架材料广泛应用,在无机非金属材料领域具有非常广阔的应用前景。研究者曾用生物玻璃材料制备出猴子大腿骨,植入其体内,经一定时间后取出研究,发现再生的猴子骨细胞已长入生物玻璃的网状结构内,且结合非常紧密;并且,经力学实验测试发现这种人造骨比原骨力学性能更优。2011 年,美国华盛顿州立大学的研究人员采用 3D 打印技术将磷酸钙打印出一种像骨骼的结构,可在分解前作为新骨骼细胞生长所需的支架,已在动物身上成功进行了试验,取得了令人满意的结果。生物玻璃良好的生物相容性结合 3D 打印精确成型、快速制造、个性化等诸多优点,必定在组织工程支架材料以及个性化医疗领域取得新的突破。

由于上述的医用陶瓷材料都需要在高温条件下加工成型,所以医用陶瓷材料的 3D 打印加工通常分为两个阶段:

1)陶瓷粉末与熔点较低的粘结剂混合均匀后在激光照射下烧结出所设计的模型,但是此时的模型只是在粘结剂的作用下将陶瓷粉末粘结成型,力学性能较差,无法满足应用要求;

2)在激光烧结后,需要将陶瓷制品放到马弗炉中进行二次烧结。陶瓷粉末的粗细与粘结剂的用量都会影响到陶瓷制品的性能,陶瓷粉末越细越有利于二次烧结时晶粒生长,陶瓷层的质量越好;粘结剂的用量越大,激光烧结过程越容易,但是会造成二次烧结时零件收缩变大,使制品达不到尺寸精度要求。二次烧结过程的温度控制也会对3D打印陶瓷制品的性能产生影响。

6.3 医用高分子材料

近年,生物医用高分子材料可谓异军突起,成为发展最快的生物医学材料。生物医用高分子材料的发展从最开始仅仅利用现成的高聚物到利用合成反应在分子水平上设计合成具有特殊功能的高聚物。目前研究又进入了一个新的阶段,寻找具有主动诱导、刺激人体损伤组织再生修复的一类生物活性材料成为热点。3D打印高分子耗材需要经过特殊处理,还需要加入粘合剂或者光固化剂,且对材料的固化速度、固化收缩率等有很高的要求。不同的打印技术对材料的要求都不相同,但是都需要材料的成型过程快速精确,材料能否快速精确的成型直接关系到打印的成败。由于生物医用材料直接与生物系统作用,除了各种理化性质要求外,生物医学材料必须具有良好的生物相容性,生物医学材料的开发比其他功能材料的开发具有更严格的审核程

序，所以对用于生物医学领域的 3D 打印高分子材料的研究才刚刚起步。

韩国浦项科技大学 Cho 等以 PPF 为原料，通过利用光固化立体印刷技术（SLA）制备的多孔支架具有与人松质骨相似的力学性质，且支架能促进成纤维细胞的黏附与分化。此外，通过将 PPF 支架移植到兔皮下或颅骨缺损部位的实验结果表明，PPF 支架会在动物体内引起温和的软组织和硬组织响应，如移植 2 周后会出现炎性细胞、血管生成和结缔组织形成，第 8 周后炎性细胞密度降低并形成更规则的结缔组织。与传统组织工程支架相比，3D 打印组织工程支架可以随意设计形状、尺寸、孔的结构和孔隙率等，研究者可以根据不同组织的修复要求来选择需要打印出的支架结构。Paulius Danilevicius 等采用激光三维打印技术成功制备了三维多孔的聚乳酸（PLA）组织工程支架，并对支架的孔隙率对细胞粘附、生长、繁殖等生理特性的影响进行了一系列的研究。

研究表明，在制备支架模型的过程中，三维打印技术可以随意制造任意空洞和孔隙率的 PLA 组织工程支架，研究者可以轻易得到所需的模型。之后对各种模型进行一系列细胞生物学特性的表征发现，支架的空洞以及孔隙率对细胞的黏附生长有很大的影响，分析对比各项结果后得出了最适合作为组织工程支架的模型。同时也证明了通过 3D 打印制备的 PLA 支架有望在骨组织工程中得到广泛应用。医用高分子打印材料具有非常优异的加工性能，可适用于多种打印模式，其中应用最多的是熔融沉积打印和紫外光固化打印两种模式。熔

融沉积打印所使用的是热塑性的高分子材料，目前最受研究者青睐的是可降解的脂肪族聚酯类材料，如 PLA、PCL。原材料只需要拉成丝状即可打印，打印材料的制备过程简单，一般不需要添加打印助剂。紫外光固化打印所用的是液体光敏树脂，液态树脂中包含有聚合物单体、预聚体、光（敏化）固化剂、稀释剂等，液态树脂的成分以及光固化度都会影响打印产品的性能，尤其是医疗产品的生物相容性和生物活性。

6.4 复合生物材料

复合材料是指两种以上不同物理结构或者不同化学性质的物质，以微观或宏观形式组合而成的材料；或者是连续相的基体与分散相的增强材料组合的多相材料，这类材料用于人工器官、修复、理疗康复、诊断、检查、治疗疾病等医疗保健领域，并具有良好生物相容性，则称为复合生物材料。FalguniPati 等采用多喷头 3DP 技术成功打印出 PCL/PLA/ β -TCP 复合生物材料支架，并将 HTMSCs 细胞种植于支架，共培养 2 周，使 HTMSCs 细胞生长过程中分泌的细胞外基质附着在支架上，然后进行脱细胞实验去除支架上 HTMSCs 细胞，保留细胞外基质，从而得到 PCL/PLA/ β -TCP/ECM 多组分具有生物活性的复合生物材料支架。该支架中的材料能够很好地取人之长，补己之短，各组分相辅相成，既能达到骨组织工程材料的力学要求，又能够促进生物矿化过程。ECM 中还包含了多种调节骨细胞生长分化的因子，有望成为骨组织工程支架材料研究的新方向。

同时 FalguniPati 等还进行了 3D 脂肪组织工程的研究，第一组以 PCL 为框架，用脱细胞的脂肪组织为墨水在 PCL 框架内打印出具有一定形状和孔洞的三维脱细胞脂肪支架并将其植入小鼠体内；第二组直接用脱细胞的脂肪组织负载目标细胞制成凝胶，通过 3D 打印技术将凝胶打印在事先准备好的 PCL 框架内，在体外培养一段时间后植入小鼠体内。研究表明，利用这两种方法制备的组织工程支架均具有良好的生物相容性且能在小鼠体内培养长出所需的脂肪组织，总的来说，第二组的各项测试数据均优于第一组。由此可见，3D 打印技术可以将多种材料复合打印，各组分之间取长补短，相辅相成，在组织工程领域具有得天独厚的优势。与单一组分的或结构的生物材料相比，复合生物材料的性能具有可调性。由于单一生物材料用 3D 打印制成产品会存在一定的不足，将两种或者两种以上的生物材料有机复合在一起，复合材料的各组分既保持性能的相对独立性，又互相取长补短，优化配置，大大改善了单一材料应用中存在的不足；但是对于理化性质差异较大的两种材料，如何利用打印的方法将它们很好地融合在一起，发挥它们组合的最大优势也是目前研究的热点之一。

6.5 细胞参与的生物 3D 打印材料

作为前期研究，科学家们已经尝试用很多 3D 打印支架与细胞共培养，证明了细胞能够在多种 3D 打印支架上存活，并且比普通二维培养的效果要好。3D 打印的 PCL 支架已经被证明能与多种细胞共培养，这为将细胞与材料混合成“生物墨水”，共同打印出生物组织奠定了良好的基础。但是这仅仅是细胞与材料的二维作用，并没有直接将

细胞置于打印系统中，只能称作是非直接细胞参与的生物 3D 打印。细胞直接参与的生物 3D 打印是一门多学科交叉综合的超级学科，需要利用生物学、医学、材料学、计算机科学、分子生物学、生物化学等多个学科的原理与技术，其中，打印材料的选择是亟需突破的难点之一。水凝胶是由高聚物的三维交联网络结构和介质共同组成的多元体系，作为新型的生物医用材料引起了研究者的广泛关注。医用水凝胶具有良好的生物相容性，其性质组成与细胞外基质相类似，表面粘附蛋白质和细胞的能力弱，基本不影响细胞的正常代谢过程。水凝胶的存在可以进行细胞的保护、细胞间的黏合扩展及器官的构型。

因此，水凝胶成为包裹细胞的首选。医用水凝胶、生物交联剂（法）、活细胞共同组成生物 3D 打印所需的“生物墨水”。美国康奈尔大学的研究人员采用 3D 生物打印技术，利用 I 型胶原蛋白水凝胶与牛耳活细胞组成的“生物墨水”，成功打印出了人体耳廓。无论是功能还是外表，这个耳廓均与正常人的耳廓十分相似。在后续培养过程中，胶原蛋白水凝胶与细胞相互作用良好，且在培养过程中慢慢降解并被细胞自身合成的细胞外基质所替代。接下来，他们将利用患者自身的耳朵细胞，打印人造耳廓并进行移植。这一消息令人对医疗整形行业的未来产生无限的遐想。

医学界目前使用的人造耳廓主要分为两类：

一是由类软骨的人造材料制成，其缺点是质感与人耳差异较大；

二是通过取出患者部分肋部软骨“雕刻”新的耳廓，这种方法不仅会给患者造成不小的肉体伤害，而且其美观及实用程度也严重受制于医生的“雕刻技术”。

3D 生物打印技术制成的人造耳廓，则没有上述之虞。器官 3D 打印是科学家们一直追求的梦想之一，目前器官打印已经被当作概念股炒作上市，吸引了很多眼球，但 3D 打印还处于刚刚起步阶段，还有很多问题需要解决，尤其是复杂器官的 3D 打印存在更为巨大的挑战，材料与调节细胞有序地组合、器官内部血管构建、神经系统构建的生长因子的相容是器官打印最难解决的困难。通过 3D 打印设备将生物相容性细胞、支架材料、生长因子、信号分子等在计算机指令下层层打印，形成有生理功能的活体器官，达到修复或替代的目的，在生物医学领域有着极其广泛的用途和前景。近年来 3D 打印技术发展迅速，已在骨骼、血管、肝脏、乳房构建等方面取得了一些成绩，但离复杂器官的功能实现还有很长一段距离。

3D 打印技术的发展已成为一种新兴技术，其在医学上的应用效果也日益明显。首先，3D 打印技术将有力克服组织损坏与器官衰竭的困难。每个人专属的组织器官都能随时打出，这就相当于为每个人建立了自己的组织器官储备系统。其次，表皮修复、美容应用水平也将进一步提高。随着打印精准度和材质适应性的提高，身体各部分组织将被更加精细地修整与融合，有助于打造出更符合审美的人体特征。最后，当 3D 打印设备逐步普及后，在一些紧急情况下，还可利

用 3D 打印机制作医疗用品，如导管、手术工具等，使之更加个性化，同时减少获取环节和时间，临时解决医疗用品不足的问题。

所以，3D 打印技术未来发展趋势将会在 3D 打印速度的提升，开发更为多样的 3D 打印材料，使 3D 打印机的体积小型化、成本降低，不断拓展其更多行业的应用上体现出来。就目前来看，3D 打印在生物学方面的研究如雨后春笋般，3D 打印技术在制备生物医用材料特别是组织工程支架材料方面已经取得了诸多成就。然而，3D 打印生物医用材料还是一个非常新鲜的领域，各种研究仍处于初始阶段，要想真正实现 3D 打印生物医用材料在临床上的应用还有很长的一段距离，还存在很大的挑战。材料的研究与发展制约着 3D 打印技术的发展，适用于 3D 打印的生物医用材料的研究与开发将成为未来研究热点。3D 打印生物医用材料的研发之所以困难，其主要原因在于临床上对材料的各种性能有极高的要求，材料的选择受到多种因素的制约，既要考虑材料在打印前后的安全性、生物相容性、降解性能、生物响应性等，又要考虑材料能否达到产业化的要求。所以，3D 打印生物医用材料的研发面临巨大的挑战，同样随着 3D 打印技术在程序以及机械方面的快速发展，也出现了很多的机遇。未来研究 3D 打印生物医用材料的重点应该放在：开发更多可打印的生物材料。

理论上讲，所有的材料都可以打印，但实际上现在用于生物学领域的打印材料还屈指可数。有些具有优异性能的材料由于打印前后收缩率大，材料中所含的添加剂对生物体有害，打印后强度下降等原因，无法满足生物材料的使用要求，而被排除在 3D 打印生物材料

行列之外。所以,应该通过各种物理化学改性的方法来克服这些被弃用的材料存在的打印问题,开发出更多性能优异的 3D 打印生物材料。这样既可以增加临床应用上的选择,又可以在一定程度上降低打印费用。组织工程支架材料的研究与开发。3D 打印技术可以任意设计打印产品的空间结构,将 3D 打印的这个优势与组织工程理念相结合,就可以针对特定组织设计最优的组织工程支架。在材料的选择方面,性能越接近细胞外基质的材料越受青睐,因此,需要开发更多可仿生、可降解、具有生物活性的 3D 打印组织工程支架材料。

3D 技术与组织工程的结合将为生物组织与器官的重建开辟崭新的研究领域。“生物墨水”中 3D 打印生物材料的研究与开发。实现组织与器官的原位 3D 打印是科学家们梦寐以求的结果。目前的技术水平仅仅达到了在体外打印有外形无功能的组织与器官,打印材料是其中的难点之一。开发出具有适当力学性能,良好生物相容性,具有生物活性的生物打印材料,将它与活细胞、生物交联剂(法)、信号分子组成“生物墨水”,力争将目前 3D 打印器官存在的诸多问题一一攻破,为实现 3D 打印真正造福人类奠定基础。另外,打印材料与细胞、组织以及血液之间的相容性研究也是重点之一。随着材料学的日益发展,对生物打印材料的要求日渐严苛,打印材料不仅仅要安全无毒,还要起到支架的作用,更要求其具有一定的生物功能,能够保证物质能量自由交换、细胞活性和组织的三维构建。因此,对打印材料的生物相容性的研究是必不可少的。

第七章 新型 3D 打印材料

随着 3D 打印技术和商业应用的发展，大批量、个性化定制将成为重要的生产模式。3D 打印与现代服务业的精密结合，将衍生出新的细分产业和新的商业模式，创造出新的经济增长点。3D 打印技术发展带来的产品技术、制造技术与管理技术的进步使企业具备快速响应市场需求的能力，特别是形成了能适应全球市场上丰富多样的客户群的需求，实现远程定制、异地设计、就地生产和销售的协调化新型生产模式，使生产模式、商业模式等多个方面发生根本性的变化。基于此，列举几类常见的 3D 打印典型应用案例。

7.1 金属 3D 打印典型应用

金属 3D 打印机的问世对传统 CNC 制造加工来说是一大重要补充。随着金属 3D 打印机技术在生产车间的应用中变得越来越普遍，对于金属加工制造相关企业来说，更加注重以实际生产应用为核心价值的导向。正如技术工程师了解哪些零部件最好使用水刀而不是三轴铣刀进行加工一样，现在同样也需要知晓哪些零部件非常适合利用金属 3D 打印机来生产加工。

想了解如何正确使用金属 3D 打印机的第一步是了解金属 3D 打印的基本优势。 以下三大优点是每个成功的金属 3D 打印应用的根源：

设计自由度：具有复杂几何构造的零部件在传统 CNC 加工制造过程中，经常由于其复杂性而带来了很多额外的制造成本。因此，在遇到复杂结构的零件时会因为加工工艺问题被迫修改技术图纸来妥

协,传统制造就只能成为一些简单规则形状的规模化生产方式。然而,在使用金属 3D 打印机后,生产复杂几何构造的零件变为了可能。

无需额外固定工具: 3D 打印零部件无需额外固定夹具。这使得生产制造商能够以最小的开销和精力创建零件,从而大大降低了单个零件的成本,从而实现小批量生产。此外,当辅助工具成本不再是限制因素时,生产制造商可以对外承接更多的工作。

自动化: 大多数传统制造过程中需要有专业工人全程跟踪监控,以确保零件生产过程中不会出现技术故障。例如,传统加工零件时,必须现在 CAM 软件中进行设计修改,然后再发布到车间进行生产。相反的,金属 3D 打印机会自动从三维设计文件中提取数据直接传输到 3D 打印机中制作零件。

7.1.1 航空航天应用

法国航天中心依靠 3D Systems 企业生产制造的第 6 款立即金属 3D 打印机 ProX DMP 320,应用粒子束,在氩气氛围维护下,根据 3D CAD 统计数据,对镍铬合金基超耐热合金 LaserFormNi718 粉末状自上而下熔化,为中小型通讯卫星液体火箭发动机打印出多次重复使用的雾化喷嘴。从而,将 30 好几个零碎构件融合为 1 个一体式构件,另外立即减脂 10%,柴油发动机混和点燃高效率明显提升。

除此之外,在美国宇航局以液体甲烷气体为燃料的火箭发动机检测中,对比减材生产制造加工工艺需要零配件数降低 45%的 3D 打印版增压泵可造成 600 大马力(1 大马力=0.735kW)的驱动力,1min

内向型柴油发动机的燃烧室出示 600gal 半超低温高压液体甲烷气体，用于保证柴油发动机造成超出 10250.83kg 的推力。

在空客 777 装用的 GE90-94B 喷气发动机中，T25 制冷压缩机通道温度感应器的机壳选用 3D 打印增材制造加工工艺，对钴铬合金的超微粒粉末状开展自上而下融化而成，既轻巧又牢固。在国内主干线民用型大型飞机 C919 上，不但装用了独立产权年限的 3D 打印版钛金属中央政府翼缘条（见图 7-1），还要登机门、服务项目门及前后左右客舱门等处装车了 23 项 3D 打印版钛金属零配件（见图 7-1），使机舱门件的生产制造由传统式锻造工艺升级为立即金属增材制造，并处理了钛金属大中型厚壁件的普遍地应力裂开和型面形变等难题。



图 7-1 金属 3D 打印飞机关键零部件

7.1.2 汽车行业应用

在机械制造业内，金属 3D 打印不但被用以轮胎模具的生产制造，还用于生产加工独特传动齿轮旋纽、钥匙链及尾门印字等零配件。

米其林集团公司选用法孚集团公司产品研发的 Fives 5 轴激光器管理中心（图 7-2），开展 MICHELIN CrossClimate+ 轮胎模具的 3D 打印，用于得到全深层 3D 管沟、自锁住管沟和 V 形胎面纹路，进而使子午线橡胶轮胎具备冬天雨雪天气地面不断挪动、夏天干燥地面合理制动

系统及损坏胎面新管沟不断牵引带等优点。这也为山东省豪壮、广东省巨轮等轮胎模具生产制造公司出示了 3D 打印具体实例和最前沿工作经验。Fives 5 轴激光器管理中心及轮胎模具如图所示 7-2 图示。

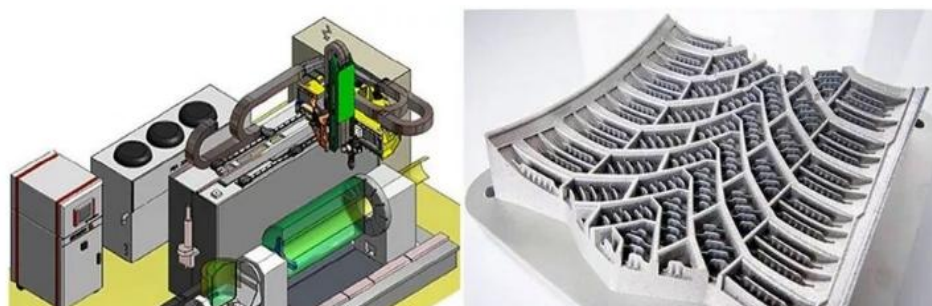


图 7-2 Fives 5 轴激光器管理中心及轮胎模具

吉凯恩等企业选用 hp 惠普出示的金属 3D 打印机加工工艺 HP Metal Jet——三维立体粘合剂喷涌成型，为大众汽车配套设施生产制造了换挡杆、个性定制版钥匙链、柴油发动机指形从动滚轴、方格支撑点式轻量传动齿轮等金属型零配件（见 7-3）。

HP Metal Jet 是在粉末状床边双重铺装薄薄一层层超微粒金属后，热喷墨打印机打印喷嘴穿透该层并喷涌粘合剂——水性高聚物液体剂，粘合剂经毛细相互作用力渗入金属粉（0.5-20 μm ）空隙呈联合分布，并在高温辐照下将粉末状颗粒物熔拼在一起变成固态块，另外有机溶剂一部分蒸发，自上而下打印，直到完毕，取下零部件相结合炉煅烧。HP Metal Jet 出示了 4 倍冗余喷头和 2 倍打印杆，使打印零部件的致相对密度超过 93%，生产率大幅度提高，粘合剂使用量显著降低。



图 7-3 HP 惠普 3D 打印的小车用金属制造

7.2 光敏树脂 3D 打印典型应用

SLA 工艺(光固化) 原理为光谱中能量最高的紫外光产生的活化能, 能够使不饱和聚酯树脂的 C-C 键断裂, 产生自由基从而使树脂固化。当不饱和聚酯树脂中加入光敏剂后, 用紫外线或可见光作能源引发, 能使树脂很快发生交联反应。故 SLA 工艺的材料就是光敏树脂, 需要装满整个材料槽, 主要工作设备是激光器和振镜, 振镜通过计算机控制的偏振把激光器发出的紫外光照射到规定的材料槽液体表面上使其固化, 事先模型被计算机均分成 N 个切片, 每个切片可看作一个二维平面, 固化完一个切片平面网板会带着模型下降到下一个切片平面, 一次类推直至打印完成。

SLA 3D 打印相对于其他 3D 打印工艺有打印形状广泛、成型速度快、精度高、表面光洁度最好的特点, 应用的领域几乎包括了制造领域的各个行业, 在医疗、人体工程、文物保护等行业也得到了越来越广泛的应用。目前主要是应用于新产品开发的设计验证和模拟样品的试制上, 即完成从产品的概念设计→造型设计→结构设计→基本功能评估→模拟样件试制这段开发过程。对某些以塑料结构为主的

产品还可以进行小批量试制，或进行一些物理方面的功能测试、装配验证、实际外观效果审视，甚至将产品小批量组装先行投放市场，达到投石问路的目的。

主要行业的应用状况如下：汽车、摩托车：外形及内饰件的设计、改型、装配试验，发动机、汽缸头试制。家电：各种家电产品的外形与结构设计，装配试验与功能验证，市场宣传，模具制造。通讯产品：产品外形与结构设计，装配试验，功能验证，模具制造。航空、航天：特殊零件的直接制造，叶轮、涡轮、叶片的试制，发动机的试制、装配试验。轻工业：各种产品的设计、验证、装配，市场宣传，玩具、鞋类模具的快速制造。医疗：医疗器械的设计、试产、试用，CT 扫描信息的实物化，手术模拟，人体骨关节的配制。国防：各种武器零部件的设计、装配、试制，特殊零件的直接制作，遥感信息的模型制作。精密铸造：在由于光固化快速成形设备使用的液态树脂是由碳、氢、氧等元素组成的高分子材料，在 700℃ 以上的温度下，可以完全烧蚀，没有任何残留物质，对于失蜡法制造精密铸造模型来说，这是一个非常重要的性能。目前在珠宝行业可代替人工雕蜡过程，可大大提高成型精度和效率。

7.2.1 工业应用

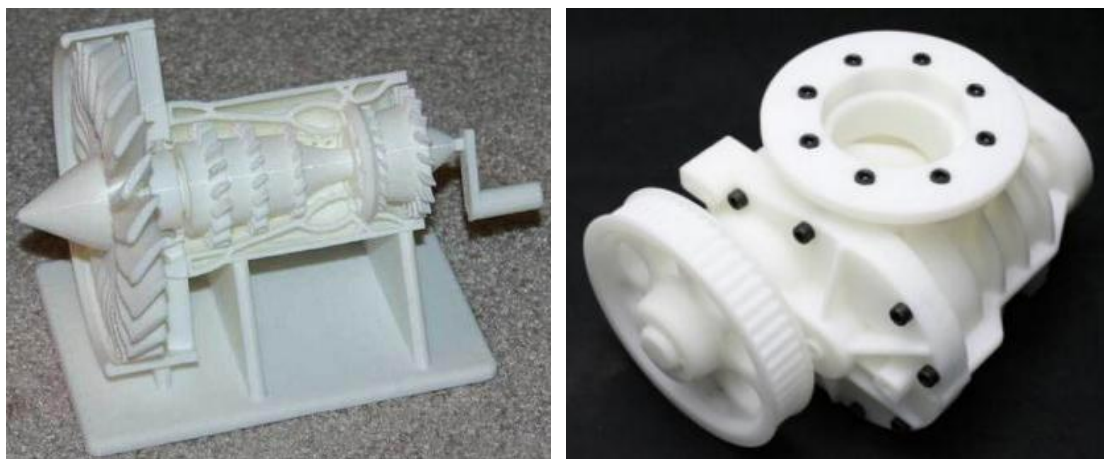


图 7-4 工业零部件 SLA 成形

利用 SLA3D 打印机与传统的精密铸造紧密衔接，可以给工业零部件的产品试制阶段或小批量生产提供无模具生产工艺。因此可设计、制作出更复杂的结构，特别适用于定制化产品和全新型产品。

7.2.2 建筑行业应用



图 7-5 SLA 成形建筑模型

传统的建筑模型的做法一般采用手工制作而成，使用卡纸、KT板、木板、塑料棒、透明胶片、PVC 板喷漆、雕刻楼房部等材料工艺。缺点是工艺复杂，耗时较长，人工成本过高，而且周期长，细节精度低等.....

利用 SLA3D 打印能一步成型，完美呈现设计师的建筑创意，方便省时，还能节省费用，避免了雕刻楼房部件，整体组合等多道程序。花

费的成本只有过去的 30%，节省了超过 60%的时间，而且能避免因人为加工造成的失误，并且能突破传统的加工对形状的要求和限制，很多建筑设计师都利用 3D 打印建筑模型来直观的观察模型。便于展示，通过对 1:1 的实物模型的检查也能及时修改设计。

7.2.3 教育行业应用

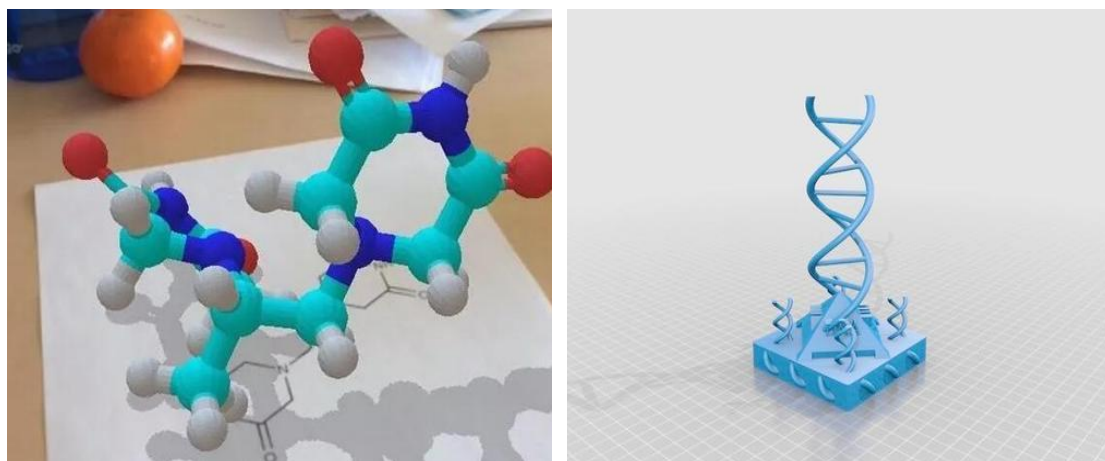


图 7-5 SLA 成形教学用具

教育行业的应用分为 3D 打印技术教学应用、3D 打印教学辅具应用和 3D 打印科技创新项目比赛用品应用。

纯粹的理论学习使学生的大脑僵化，教育需要更多的让孩子们接触，感知和体验未来的新兴技术，培养学生的创新思维能力，使他们更好地适应时代的发展，3D 打印机技术的普及为学校的创新教育提供了新的视角和技术支持，3D 打印高端人才的培养也成为了至关重要的一环。

国家示范性高等职业院校“十三五”规划教材

照明技术与照明设计

主编：刘登飞 熊大章

副主编：盛传新 朱俊 沈燕君

内容简介

本书以照明技术领域实际应用最广泛的典型产品为载体，主要设计了照明技术、照明中常用光学器件、照明光学设计、照明散热系统设计、光源灯具设计、照明光环境设计、照明产品案例等七个教学项目，将照明技术与照明设计必要的基本理论知识（光度学、色度学及照明设计方法）以及应用实例分别融入各教学项目。每个项目遵循“学以致用、理实一体”的原则，按照“产品—技术—设计方法—应用”为主线展开介绍。

本书针对高等职业教育的教学要求，注重知识的实用性和学生的认知规律，对复杂的计算及推导进行了简化，增加了相关照明产品的具体资料和参数等具有实用价值的内容，对实践教学具有指导性和可操作性。

本书可以作为高等职业院校光电技术类专业、照明类专业教材，也可供工程技术人员参考。

目 录

绪论

项目一、照明技术中的基本概念

【任务导入与项目分析】

任务一 辐射度学与光度学

任务二 色度学

任务三 电学特性

任务四 热学特性

【项目小结】

思考与练习

项目二、照明中常用光学器件

【任务导入与项目分析】

任务一 照明中常用透镜

任务二 照明中常用反射器

任务三 反射器透镜组合形式

【项目小结】

思考与练习

项目三、照明光学设计

【任务导入与项目分析】

任务一 全反射透镜设计

任务二 菲涅尔透镜设计

任务三 鳞甲反射器设计

任务四 自由曲面透镜设计

【项目小结】

思考与练习

项目四、照明散热系统设计

【任务导入与项目分析】

任务一 散热基础

任务二 散热途径与材料选择

任务三 散热系统设计

【项目小结】

思考与练习

项目五、光源灯具设计

【任务导入与项目分析】

任务一、Tracepro 简介

任务二、Tracepro 设计实例

【项目小结】

思考与练习

项目六、照明光环境设计

【任务导入与项目分析】

任务一、DIALux 简介及灯光精灵

任务二、室内空间建模

任务三、灯具选择与放置

任务四、灯光场景

【项目小结】

思考与练习

项目七、照明产品设计案例

【任务导入与项目分析】

任务一、国内外著名品牌照明产品

任务二、LED 工作台灯专题案例

【项目小结】

思考与练习

参考文献

绪 论

一、什么是照明

近年来，我国的照明事业不断发展，照明的需求也不断提高。传统的成像光学设计在很多照明应用领域已不适用，非成像光学设计则应运而生。

一直以来，光学设计都被认为仅仅是镜头设计或成像设计。但从近一二十年的发展来看，光学设计已包括了照明设计这个子领域。照明设计主要关注的是光源到目标之间的可见光或辐射的传输问题。

可见光的有效传输在成像系统中是必需的，但是这些系统均受到成像要求的限制。为高效传输光线，照明系统可以忽略“成像约束”。因此，“非成像光学”一词经常出现在照明系统中。按以上所述，光学系统设计大致可分成以下四类。

- 1、成像系统设计。这类设计通常有一定的成像要求，如焦平面相机设计。
- 2、可见光成像系统设计。主要考虑某些集成观察系统的整体成像要求，如望远镜、照相机取景器和显微镜等，这些均是需要人眼来直接面对成像对象的光学系统。
- 3、可见光照明系统设计。可见光照明系统即有一定成像要求并充当光源的光学系统，如显示器、照明设备以及复印机的照明光源等。
- 4、不可见光照明系统设计。该类系统无成像要求，如太阳能集束器、激光泵浦腔以及其他光学传感器应用领域。

上述后面两个系统即属于照明工程领域。成像系统虽也可实现照明要求，但在某些特殊应用情形下，如制版行业中需用到的临界照明和柯勒照明，需要许多基于非成像光学原理的替代方法。本教材重点阐述使光线在光源与目标之间进行有效传输的照明技术，即非成像技术，偶尔也会采用成像原理来改善传输效果。此外，我们对观察者未设置任何要求，但大多数照明光学实际上是默认了观察者是人眼或一个光电成像系统（如相机）。如果忽视必要的可视化和视觉特点将会影响照明系统的性能。从这一点来看，照明设计也有一些主观的因素。

本教材多次交替使用“照明”和“非成像”这两个术语，但严格讲，照明的广义概念包含了非成像和成像两种方法。

本教材主要介绍照明技术光学领域的一些常见的物理量和基本概念，以及照明技术与照明设计相关的光色度分析、光学设计、灯具散热系统设计和照明产品设计案例等等。

二、照明技术的发展

在人类发展史上，从采集天然火源到砖木取火，光源经历了无数的变化。照明的发展见证了人类历史的进步。火在人类历史上扮演着重要的角色，因为它为人类提供食物、温暖和光亮。火的使用伴随着人类文明的巨大进步。在 18 世纪之前，火一直是人类的照明工具，从火炬、动物油灯、植物油灯发展到蜡烛，再到广泛使用的煤油灯。人类从未停止探索新的照明方法。在油灯的使用过程中，灯芯由草芯发展到棉芯，再发展到多股棉芯。大约在公元前三世纪，人们用蜂蜡制作蜡烛。在 18 世纪，人们用石蜡制作蜡烛，机器的使用使得大量生产蜡烛成为可能。在 19 世纪，英国人发明了最初用作路灯的煤气灯。由于它的火焰闪烁，熄灭时会产生有害气体，这盏煤气灯不太安全，室内使用非常危险。然而，经过改进，煤油灯在成千上万的家中取代了煤油灯。这些光源都是依靠燃烧材料的火焰来提供光。18 世纪，电的发明极大地促进了社会的发展，为照明带来了新的机会。1809 年，

英国的戴维·汉弗莱(David Humphrey)发明了弧光灯，利用一种电光源，这种光源是在空气中的电极通电后，将两个接触的碳棒电极分离而产生的。在白炽灯发明之前，它被用于公共场合，是第一个用于实际照明的电光源。但是，由于燃烧时会发出嘶嘶声，而且光线太亮，不适合室内照明。1877年，一位俄国人通过修改弧光的结构发明了电蜡烛，但其性能并没有得到改善。那时，许多科学家开始探索一种新的、安全的、温暖的光源。

经过长时间的试验，美国发明家托马斯·爱迪生于1879年10月21日点燃了世界上第一盏有实用价值的灯。在这一过程中，爱迪生认真总结了以往电灯制造试验的失败，并制定了详细的实验计划。爱迪生试验了多种植物，并决定在竹丝碳化后使用竹丝。电灯泡生产后的可用照明时间增加到1200小时。这种竹线灯的使用时间超过了20年。1906年，爱迪生使用钨丝提高了电灯泡的质量，这就是延用至近期LED照明普及之前一直使用的白炽灯。如图1(a)所示。



(a) 白炽灯

(b) 卤钨灯

图1 常见白炽灯和卤钨灯外形

1959年，卤钨循环理论被发现，帮助发明了卤钨灯。发光效率优于普通白炽灯。如图1(b)所示。

白炽灯的发明照亮了全世界，但从能源利用的角度来看，却存在着严重的缺陷。只有10-20%的能量转化为光，其余的能量以热的形式散失。为了更好地利用能源，科学家们开始了探索新的照明灯具的新旅程。1902年，彼得库珀伊特发明了水银灯，它的光伏效率大大提高，但有明显的缺点。它辐射了大量的紫外线，对人体有害，而且光线太强了。因此，它没有被广泛使用。

1910年，霓虹灯投入使用。这种光源的光是在玻璃管内低压惰性气体的高压场中由冷阴极辉光放电发出的。惰性气体的光谱特性决定了氖的颜色。

汞灯进一步引起了许多科学家的兴趣。他们发现，只要在汞灯管的内壁涂上荧光材料，那么当水银的紫外线投射在上面时，大量有害的紫外线就会被激发成可见光。然而，由于水银的启动装置较差，科学家们在实际操作中遇到了一系列的故障。1936年，乔治·E·英曼(George E. Inman)和其他研究人员利用一种新的启动装置生产了不同于汞灯的荧光灯。这种日光灯的制作方法是：在玻璃管中注入一定量的汞蒸汽，在管壁内涂上荧光粉，并在管的两端各安装一根灯丝作为电极。这光比白炽灯还亮。它有更高的能量转换效率，更大的照明面积，并可以调整成不同的光色，因此它一出来就进入了普通人的家中。由于日光灯的成分与白天类似，所以被称为“日光灯”。

荧光灯中的汞会造成环境污染，因此，照明科学家和制造商开始寻找新的照明光源。在20世纪60年代后期，出现了高压气体放电灯，如高压钠灯和金属卤化物灯。如图2所示。



图 2 高压钠灯外形结构

早在 1907 年，亨利·约瑟夫·朗德在研究碳化硅接触点上的非对称电流路径时，发现 SiC 晶体发出黄光。第一个二极管应该叫做肖特基二极管，而不是 p-n 结二极管。半导体发光原理真正应用于发光二极管(LED)是在 20 世纪 60 年代初开始的。通用电气的 Nick Holonyak Jr.利用气相外延技术并使用 GaAs 开发了第一个商用发红光的 GaAsP LED。当时，产量很低，价格却很高。1968 年，美国孟山都公司成为第一个生产 LED 的商业实体。它开始建立一个工厂来生产低成本的 GaAsP LED，这开启了固态照明的新时代。从 1968 年到 1970 年，销售 LED 灯每隔几个月就会翻一番。在此期间，这家公司与 Hewlett-Packard（惠普，即 HP）公司合作降低了 LED 生产成本，提高了性能。其商业化生产的 GaAsP/GaAs LED 器件成为市场的主导产品。然而，在那个时期，这些发红光 LED 的光效为 0.1 lm/W，远低于平均光效为 15 lm/W 的白炽灯。孟山都公司的技术骨干 M. George Craford 为 LED 的发展做出了巨大贡献。他和他的同事在 1972 年成功开发出了黄光 LED。他们采用的方法是在 GaAs 衬底上生长氮掺杂 GaAsP 激发层。几乎在此期间同时出现了 ZnO 掺杂红光 GaP LED 和 n 掺杂绿光 GaP LED 两种器件，它们都是通过液相外延(LPE)生长的器件。因此，孟山都公司的研究团队采用气相外延法，将氮掺杂到 GaAsP 中，可以生产出发红光、橙光、黄光和绿光的 LED 器件。

1972 年，哈密尔顿公司生产了第一款带有 LED 显示屏的数字手表。20 世纪 70 年代中期，德州仪器公司生产了便携式数字计算器，惠普公司有一个由红光 GaAsP LED 组成的七段数字显示器。然而，当时 LED 显示屏的功耗非常大。因此，对液晶显示屏(LCDs)功耗的需求出现在 20 世纪 70 年代晚期时非常强劲。在 20 世纪 80 年代早期，液晶显示器很快取代了 LED 在计算器和手表上的显示。

生产第一台彩色电视机的公司是美国无线电公司(RCA)，它在 1972 年 7 月采用金属卤化物气相外延生长(MHVPE)和掺镁的 GaN 薄膜获得发射波长为 430 nm 的蓝光、紫外光。20 世纪 80 年代早期的一项重大技术突破是开发出一种发光效率可达 10 lm/W 的 AlGaAs LED。这一技术进步使 LED 应用于户外运动信息显示，以及安装在汽车尾部中央高挂停止灯(CHSML)等照明设备。

从 20 世纪 80 年代末到 2000 年，由于 AlGaInP 材料技术、多量子阱激发区、GaP 透明衬底技术等 LED 新技术的发展，裸芯片(即未封装其他材料的芯片)的尺寸和形状得到了进一步的发展。在 20 世纪 90 年代早期，惠普和东芝成功地开发出了采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术制备 GaAlP LED 器件。特别是在 Craford 等人成功开发出透明衬底技术之后，由于其发光效率高、色域广而得到了广泛的关注和迅速的发展。其发光效率提高到 20 lm/W，超过了白炽灯的发光效率。近年来，倒装结构等技术的应用进一步提高了发光效率。1993 年，中村修二等人在日本日立公司采用双流 MOCVD 技术解决了 p 型 InGaN 材料的退火工艺。随后，他们成功开发出了以蓝宝石为基材的超高亮度蓝光 LED 器件。很快，绿光和蓝绿光 LED 的研究也相继开启。当时，高亮度 GaInN 绿光 LED 在交通信号灯中得到了广泛的应用，但早期 n 掺杂的 GaP 绿光灯由于其发光效率低而受到限制。1996 年，Nichia（日亚化学）公司推出了白光发光二极管，采用了蓝光 LED 芯片，芯片上覆盖了主要由钇铝石榴石(YAG)组成的荧光粉。不久之后，美国的 Cree 公司还采用了以 SiC 为衬底的

InGaN/SiC 结构蓝绿光 LED 器件。经过不断改进，该器件性能与蓝宝石衬底器件相同。近年来，紫外(UV)LED 技术的研究也取得了显著进展，从而为新型白光器件奠定了基础。

随着目前 LED 技术的进步，越来越多的白光 LED 应用已逐渐替代过去的一些传统光源，包括指示器、便携式手电筒、LCD 屏幕背光板、汽车仪表、医疗设备、路灯、室内灯等。据业内人士估测，白光 LED 已经在近 10 年来广泛应用于普通照明领域。如图 3 所示。



图 3 LED 道路照明

二、照明的种类

（一）按照照明功能分类，照明的种类有：正常照明、应急照明、值班照明、警卫照明和障碍照明。其中应急照明包括备用照明、安全照明和疏散照明，其适用原则应符合下列规定：

- 1、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保正常工作或活动继续进行的场所，应装设备用照明；
- 2、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保处于危险之中的人员安全的场所，应装设安全照明；
- 3、当正常照明因故障熄灭后，对需要确保人员安全疏散的出口和通道，应装设疏散照明；
- 4、值班照明宜利用正常照明中能单独控制的一部分或利用应急照明的一部分或全部；
- 5、警卫照明应根据需要，在警卫范围内装设；
- 6、障碍照明的装设，应严格执行所在地区航空或交通部门的有关规定。

（二）按国际照明委员会（CIE）推荐的照明灯具分类，可分为五类：直接型、半直接型、全漫射型（包括水平方向光线很少的直接一间接型）、半间接型和间接型。

1、直接型灯具：此类灯具绝大部分光通量（ 90-100% ）直接投照下方，所以灯具的光通量的利用率最高。

2、半直接型灯具：这类灯具大部分光通量（ 60-90% ）射向下半球空间，少部分射向上方，射向上方的分量将减少照明环境所产生的阴影的硬度并改善其各表面的亮度比。

3、漫射型或直接一间接型灯具：灯具向上向下的光通量几乎相同（各占 40%-

60%)。最常见的是乳白玻璃球形灯罩，其他各种形状漫射透光的封闭灯罩也有类似的配光。这种灯具将光线均匀地投向四面八方，因此光通利用率较低。

4、半间接灯具：灯具向下光通占 10%-40% ，它的向下分量往往只用来产生与天棚相称的亮度，此分量过多或分配不适当也会产生直接或间接眩光等一些缺陷。上面敞口的半透明罩属于这一类。它们主要作为建筑装饰照明，由于大部分光线投向顶棚和上部墙面，增加了室内的间接光，光线更为柔和宜人。

5、间接灯具：灯具的小部分光通（10%以下）向下。设计得好时，全部天棚成为一个照明光源，达到柔和无阴影的照明效果，由于灯具向下光通很少，只要布置合理，直接眩光与反射眩光都很小。此类灯具的光通利用率比前面四种都低。

（三）按防触电保护分类：为了电器安全，灯具所有带电部分必须采用绝缘材料等加以隔离。灯具的这种保护人身安全的措施称为防触电保护。

根据防触电保护方式，照明灯具可分为 0， I ， II 和 III 4 类，每一类灯具的主要性能及其应用情况在表 1 中有详细的说明。

表 1 照明灯具的防触电保护分类

灯具等级	灯具主要性能	应用说明
0 类	保护依赖基本绝缘，在易触及的部分及外壳和带电体间的绝缘	适用安全程度高的场合，且灯具安装、维护方便。如空气干燥、尘埃少、木地板等条件下的吊灯、吸顶灯
I 类	除基本绝缘外，易触及的部分及外壳有接地装置，一旦基本绝缘失效时，不致有危险	用于金属外壳灯具，如投光灯、路灯、庭院灯等，提高安全程度
II 类	除基本绝缘，还有补充绝缘，做成双重绝缘或加强绝缘，提高安全性	绝缘性好，安全程度高，适用与环境差、人经常触摸的灯具，如台灯、手提灯等
III 类	采用特低安全高压（交流有效值 <50V ），且灯内不会产生高于辞职的电压	灯具安全程度最高，用于恶劣环境，如机床工作灯、儿童用灯等

从电气安全角度看，0 类灯具的安全程度最低， I 、 II 类较高， III 类最高。有些国家已不允许生产 0 类灯具，我国目前尚无此规定。在照明设计时，应综合考虑使用场所的环境操作对象、安装和使用位置等因素，选用合适类别的灯具。在使用条件或使用方法恶劣场所应使用 III 类灯具，一般情况下可采用 I 类或 II 类灯具。

（四）按防护 IP（Ingree protection ）分类：按国际电工委员会标准 IEC 529 - 598 和国标 GB 700 - 86 规定，根据水和异物的侵入的防护程度进行分类。如 IP65 ，其中第一位数字即与下表 2 中等级 6 对应，表示完全防尘。而第二位数字与下表 3 中等级 5 对应，表示防止喷水进入，其余依此类推。

表 2 照明灯具 IP 分类防异物等级

特征等级	防护等级	
	简述	防护细节
0	无防护	无特殊防护要求
1	防止大于 50mm 异物进入	防止大面积的物体进入，例如手掌等
2	防止大于 12mm 异物进入	防止手指等物体进入
3	防止大于 2.5mm 异物进入	防止工具、导线等进入
4	防止大于 1.0mm 异物进入	防止导线、条带等进入

5	防止小于 1.0mm 异物进入	不严格防尘，但不允许过量的尘埃进入以致使设备不能满意的工作
6	完全防尘	不准尘埃进入

表 3 照明灯具 IP 分类防水等级和程度

特征等级	防护等级	
	简述	防护细节
0	无防护	无特殊防护要求
1	防止水滴进入	垂直下滴水滴应无害
2	防止倾斜 15° 的水滴	灯具外在正常位置和直到倾斜 150 角时垂直下滴水滴应无害
3	防止洒水进入	与垂直 65° 角处洒下的水应无害
4	防止泼水进入	任意方向对灯具封闭体泼水应无害
5	防止喷水进入	任意方向对灯具封闭体喷水应无害
6	防海浪进入	防止强力喷射的灌水或进入量不损害灯具
7	防浸水	以一定压力和时间将灯具浸在水中时，进入水量不有害于灯具
8	防淹水	在规定的条件下灯具能持续淹没在水中而不受影响

（五）按照明光源发光原理可分为：热辐射光源、气体放电光源和固体发光光源三大类。

1、热辐射光源

热辐射光源是利用电流通过电阻丝发热形成的热辐射发光。主要有：白炽灯和卤钨灯。白炽灯的优点是显色性好，缺点是光效低。而卤钨灯相比较白炽灯光效更高。如图 1 所示。

2、气体电光源

气体电光源分为：低压气体电光源、高压气体电光源和辉光放电光源。

（1）低压气体电光源

低压气体电光源主要有：荧光灯、紧凑型荧光灯和低压钠灯等。如图 4 所示。



图 4 低压气体电光源

荧光灯：利用荧光粉受电子、紫外线或 X 射线照射后发出可见光，其光效比白炽灯高很多。发射谱线较多为紫外光谱，感觉较冷。

紧凑型荧光灯，也称为节能灯，利用三种（440nm 蓝色、545nm 绿色、610nm 红色）不同颜色的稀土荧光粉以适当的比例组合成的灯管，再配镇流器。紧凑型荧光灯优点有：光效高（光效是白炽灯的 5、6 倍）；显色性好（显示指数在 80 以上）；光衰小；发光

稳定，无频闪。缺点是易破碎有汞污染。

低压钠灯：利用低压钠蒸气放电发光的电光源，它玻璃外壳内壁涂有红外线反射膜。
优点：光衰小、发光效率高。缺点：发单色黄光，显色性较差。

（2）高压气体电光源

高压气体电光源（简称 HID）有：高压汞灯、高压钠灯和金属卤化物灯等。如图 5 所示。



图 5 高压气体电光源

高压汞灯：适用于室内外植物照明，发蓝绿光谱最强，所以绿色植物在此光源下色彩更接近白天看到的绿色。

高压钠灯：光效高，多用于道路照明。显指低、启动时间长、燃点温度很高，眩光明显。

金属卤化物灯：综合比较，比高压钠灯更实用，光效和显指都略高于高压钠灯，但二者都是高压气体放电灯，所以启动时间长。

（3）辉光放电光源

辉光放电是指低压气体中显示辉光的气体放电现象，即是稀薄气体中的自持放电(自激导电)现象。由法拉第第一个发现。它包括亚正常辉光和反常辉光两个过渡阶段。辉光放电主要应用于氖稳压管、氦氖激光器等器件的制造。

3、固体发光光源

固体发光是电磁波、电能、机械能及化学能等作用到固体上而被转化为光能的现象。由此可见，固体发光的激发方式有很多种，如：光致发光、阴极射线发光、X 射线及 γ 射线发光、场致发光、高能粒子激发发光、化学发光、生物发光和摩擦发光等，其中，真空阴极射线发光、X 射线及 γ 射线激发发光、高能粒子激发发光中，粒子的能量很高，激发不均匀，它们将产生光电效应、康普顿效应、电子 - 正电子对、二次电子等和发光无关的效应，但经过能量调整，达到发光过程都和光致发光类似。

场致发光又称电致发光，典型代表就是发光二极管（LED），其基本结构是一块电致发光的半导体材料。LED 光源有诸多优点，如：低压供电；节能；面积小；稳定性好；响应时间极短；无污染；色彩丰富。如图 6 所示。早期 LED 有一个最大缺点就是价格昂贵，但是现在技术的不断成熟以及光效和光品质的不断提高，普通照明用 LED 价格昂贵这一问题得到了解决，通用照明 LED 光源得到了广泛应用。因而本教材的照明设计主要是针对 LED 的二次光学设计展开的。

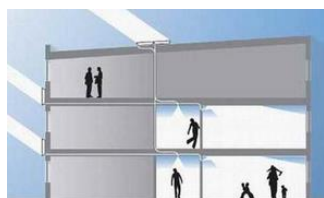


（a）LED 灯珠

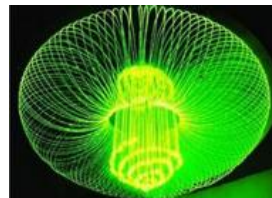
（b）LED 显示屏

图 6 LED 光源及应用

除了以上几大类光源外，还有一种照明光源也是很有特色的，那就是光纤照明系统。光纤照明系统是由光源、反光镜、滤色片及光纤组成，光源通过反射镜后，形成一束近似平行光的光束，滤色片将该光束变成彩色光，彩色光随光纤到达目的地。若光源采集的是太阳光，类似于导光管式阳光导入系统。如图 7（a）所示。若光源经过滤色片得到某些特殊颜色的光还可用于装饰性目的照明用。如图 7（b）所示。



（a）阳光导入系统



（b）光纤照明灯饰系统

图 7 光纤照明系统

光纤照明系统一般采用的光源是高亮度的点光源，反光镜是非球面反光镜，滤色片根据需要采用不同的颜色，光纤传输光由于光纤的弯曲或传输介质对光的吸收导致光能量有不同程度的损耗，所以，光纤照明系统对光的传输距离是有一定限度的，一般最远距离是 30 米左右。

项目一 照明技术中的基本概念

【知识目标】

- 1、了解照明技术中基本概念；
- 2、掌握照明技术中的光度学、色度学、电学、热学的参数特性及单位；
- 3、会利用照明技术中的基本概念进行产品测试。

【技能目标】

- 1、能识别照明产品中光色电参数；
- 2、会计算照明设计中涉及的平均照度等。

【任务导入与项目分析】

如今，人们对照明效果的要求越来越高，照明技术与光学设计的需求越来越大。由于照明技术与照明设计既是理论科学，又是工程技巧。理论和技巧运用不当，将带来很多问题。所以很有必要先介绍有关照明技术中常见的辐射度学、光度学、色度学等一些基本概念、基本量的定义和度量单位，以及有关的基本公式，作为研究照明技术与照明设计中辐射能计算的基础。

辐射度学时一门研究电磁辐射能测量的科学。辐射度学的基本概念和定律适用整个电磁波段的辐射测量，照明技术仅限于电磁辐射光学谱段内辐射能的计算与测量。光学谱段一般是指包括从波长为 0.1nm 左右的 X 射线到约 0.1cm 的极远红外的范围，如图 1 所示。

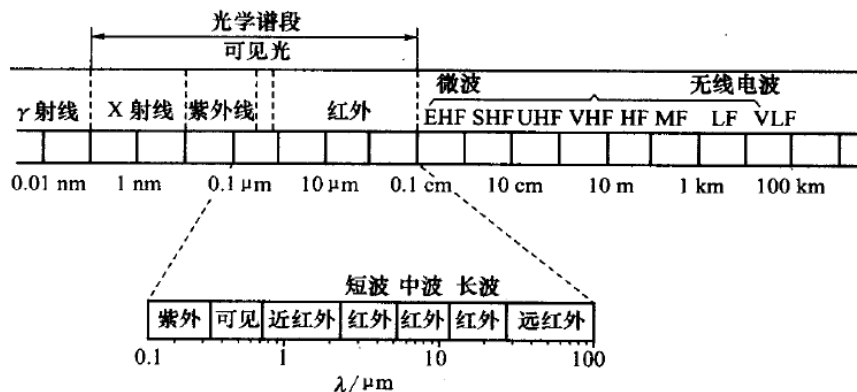


图 1 电磁频谱

使人眼产生总的目视刺激的度量是光度学的研究范畴。光度学除了包括光辐射能的客观度量外，还应考虑人眼视觉的生理和感觉印象等心理因素。

使人眼产生色感刺激的度量是色度学的研究范畴，研究人眼辨认物体的明亮程度、颜色类别和颜色的纯洁度（明度、色调、饱和度），是一门以光学、光化学、视觉生理和视觉心理等学科为基础的综合性科学，也是一门以大量实验为基础的实验性科学，解决对颜色的定量描述和测量问题。

20 世纪初，辐射度学和光度学在许多科学研究和应用领域，如分子物理、光谱化学分析、视觉、照明等，得到了广泛的应用。色度学最早开创与牛顿的颜色环概念。从 1931 年国际照明委员会 CIE 色度学系统建立以来，色度学在工业、农业、科学技术和文化事业等部门获得广泛的应用，指导者彩色电视、彩色摄影、彩色印刷、染料、纺织、造纸、交通

信号和照明技术的发展和应用。

任务一 辐射度学与光度学

发光体实际上是一个电磁波辐射源，光学系统可以看作是辐射能的传输系统，波长在 380-760nm 范围内的电磁波称为“可见光”。研究可见光的测试、计量和计算的学科称为“光度学”，研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科称为“辐射度学”。

可见光是能对人的视觉形成刺激并能被人感受的电磁辐射，因为人们很自然的用视觉受到的刺激程度，即视觉感受来度量可见光。按这种视觉原则建立的表征可见光的量便属于光度学范畴。

光学特性包括描述其发光强弱以及其光强空间分布情况的光度学特性如光通量、发光强度、亮度、光束发散角等，以及描述其颜色（色光 LED）或颜色倾向性（白光 LED）的色度学特性参数如波长或颜色（光谱特性）、色温、显色指数等。

光源的光度学特性主要包括它发出的光的总量多少、它发出的光在某一个特定方向上的强弱、以及它发出的光强随空间的分布情况等。

1 立体角

在开始学习光度学之前，有必要介绍一个光度学中常用的几何量：立体角。在平面几何中，把整个平面以某一点为中心分成 360 度或 2π 弧度，但是，发光体都是在它周围一定空间内辐射能量的，因此有关辐射能量的讨论和计算问题，将是一个立体空间问题。与平面角相似，我们把整个空间以某一点为中心，划分成若干立体角。立体角的定义是一个任意形状的封闭锥面所包含的空间称为立体角。用 Ω 表示，如图 1 所示。

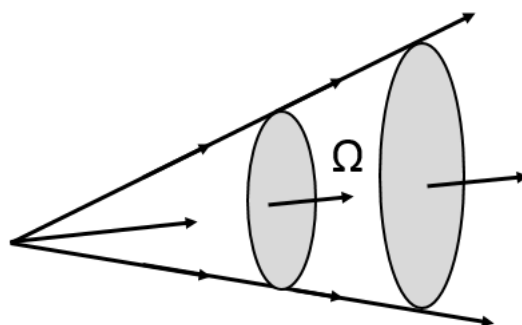


图 1 立体角示意图

立体角的单位：假定以锥顶为球心，以 r 为半径作一圆球，如果锥面在圆球上所截出得到面积等于 r^2 ，则该立体角为一个“球面度”（sr）。

整个球面的面积为 $4\pi r^2$ ，因此对于整个空间有

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

即整个空间等于 4π 球面度。

2 辐射度学与光度学的基本概念

①辐射量与光学量

(1) 辐射量

尽管位于可见光波长范围之外的电磁辐射不能为人眼所感知，但作为一种能量的发射，它依然是客观存在的，不同波长的辐射能够被相应的探测仪器所探测到，而且对人体也是有影响的，有些辐射、特别是高频辐射，对人体有极大的危害、甚至可以致命。因此，对电磁辐射，抛开其波长的差异，应当有一些通用的参数来衡量其辐射的强弱，这些用来衡量电磁辐射强弱的参数就是辐射量。

辐射量包括辐射能、辐射通量、辐射出射度、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等六个。其中主要掌握辐射能和辐射通量。

1) 辐射能 Q_e

辐射能（通常用 Q_e 表示）是以辐射形式发射或传输的电磁波能量。当辐射能被其它物质吸收时，可以转变为其它形式的能量，如热能、电能等。显然，辐射能的量纲就是能量的量纲、其单位是焦耳（ J ）。

2) 辐射通量 Φ_e

辐射通量 Φ_e 又称为辐射功率，是指以辐射形式发射、传播或接收的功率。其定义为单位时间内流过的辐射能量。即：

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (0-1)$$

辐射通量的量纲就是功率的量纲，单位就是瓦特（ W ）。

除了以上两个主要的辐射量之外，还有以下四个辐射量：

辐射出射度：辐射出射度是用来反映物体辐射能力的物理量。其概念为辐射体单位面积向半球面空间发射的辐射通量。

辐射强度：其概念为点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量。

辐射亮度：其概念为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量。

辐射照度：其概念为照射在某面元 dA 上的辐射通量与该面元的面积之比。与以上几个概念不同的是辐射照度是在辐射接收面上定义的概念，而以上几个则是在辐射发射面（或点）上定义的概念。

3) 人眼视见系数

当人眼从一方向上观察一辐射体时，人眼视觉的强弱，不仅取决于辐射体在该方向上的辐射强度，同时还和辐射的波长有关。前面提到，人眼只能对波长在 380–760nm 范围内的电磁波辐射产生视觉，在此波长范围内的电磁波称为可见光。即使在可见光范围内，人眼对不同波长光的视觉敏感度也是不一样的。对黄绿光最敏感，对红光和紫光较差，对可见光以外的红外线和紫外线则全无视觉反应。光度学中，为了表示人眼对不同波长辐射的敏感差别，定义了一个函数 $V(\lambda)$ ，称为“视见函数”（光谱光视效率）。

把对人眼最灵敏的波长 $\lambda = 555\text{nm}$ 的视见函数规定为 1，即 $V(555) = 1$ ，假定人眼同时观察两个位于相同距离上的辐射体 A 和 B，这两个辐射体在观察方向上的辐射强度相等，A 辐射的电磁波波长为 λ ，B 辐射的波长为 555nm，人眼对 A 的视觉强度与人眼对 B 的视觉强度之比，作为 λ 波长的视见函数 $V(\lambda)$ ，显然 $V(\lambda) \leq 1$ 。

不同人在不同的条件下，视见函数略有差异，为统一起见，1971 年国际照明委员会(CIE)在大量测定基础上，规定了视见函数的国际标准。表 1 为明视觉视见函数的国际标准。图 2 为相应的视见函数曲线。

表 1 明视觉视见函数国际标准

光线颜色	波长 (nm)	V_{λ}	光线颜色	波长 (nm)	V_{λ}
紫	400	0.0004	黄	580	0.8700
紫	410	0.0012	黄	590	0.7570
靛	420	0.0040	橙	600	0.6310
靛	430	0.0116	橙	610	0.5030
靛	440	0.0230	橙	620	0.3810
蓝	450	0.0380	橙	630	0.2650
蓝	460	0.0600	橙	640	0.1750
蓝	470	0.0910	橙	650	0.1070
蓝	480	0.1390	红	660	0.0610
蓝	490	0.2080	红	670	0.0320
绿	500	0.3230	红	680	0.0170
绿	510	0.5030	红	690	0.0082
绿	520	0.7100	红	700	0.0041
绿	530	0.8620	红	710	0.0021
黄	540	0.9540	红	720	0.00105
黄	550	0.9950	红	730	0.00052
黄	555	1.0000	红	740	0.00025
黄	560	0.9950	红	750	0.00012
黄	570	0.9520	红	760	0.00006

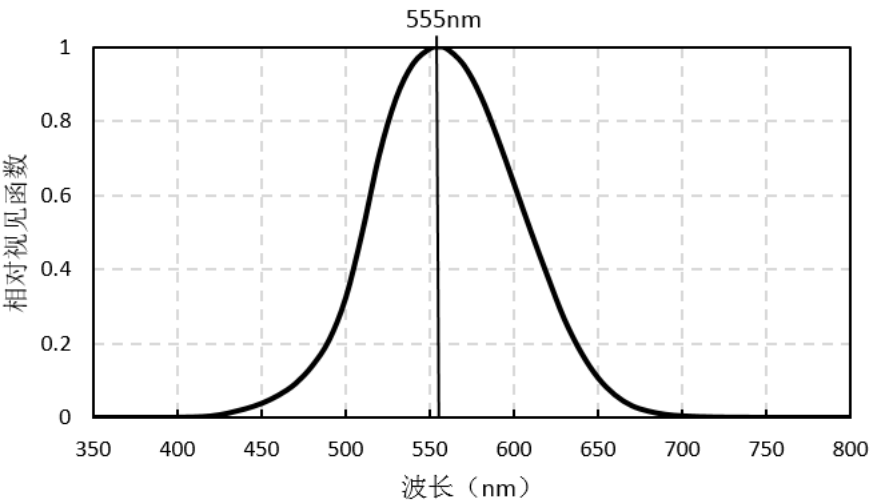


图 2 相对视见系数

有了视见函数，就可以比较两个不同波长的辐射体对人眼产生视觉的强弱。例如人眼同时观察距离相同的两个辐射体 A 和 B，假定 A 和 B 在观察方向的辐射强度相等，辐射体 A 辐射波长 600nm，辐射体 B 辐射波长 500nm，由表可得， $V(600) = 0.631$ ， $V(500) = 0.323$ ，这样辐射体 A 对人眼产生的视觉强度是辐射体 B 对人眼产生的视觉强度的 $0.631/0.323$ 倍，

即近似等于两倍。反之，欲使辐射体 A 和辐射体 B 对人眼产生相同的视觉强度，则辐射强度应该是辐射体 B 辐射强度的一半。

(2) 光学量

由于可见光的波长只占整个电磁波谱中一段很狭窄的范围，如果某一辐射的波段落在这一范围之外，那无论辐射功率如何的大，人眼也是无法感知的。换言之，对于非可见光波段的电磁辐射而言，无论其辐射量的大小如何，其对应的光学量都为零。

因此，为了描述人眼所能够感受到的光辐射的强弱，必须在辐射量的基础上再建立一套参数来描述可见光辐射的强弱，这就是光学量。光学量包括光通量、光出射度、光照度、发光强度、光亮度等。

1) 光通量 Φ_v (单位：流明、即 lm)

光通量 Φ_v 是衡量可见光对人眼的视觉刺激程度的量，光通量的大小就是总的辐射通量中能被人眼感受到的那部分的大小。光通量的量纲与辐射通量一样仍是功率的量纲。但因为人的视觉对光辐射的感受还与光的波长（颜色）有关，所以光通量并不采用通用的功率单位瓦特作为单位，而是采用根据标准光源及正常视力而特殊定制的“流明”作为单位、用符号表示则是 lm。波长为 555 纳米的单色光（黄绿色）每瓦特的辐射通量对应的光通量等于 683 流明，如图 3 所示。

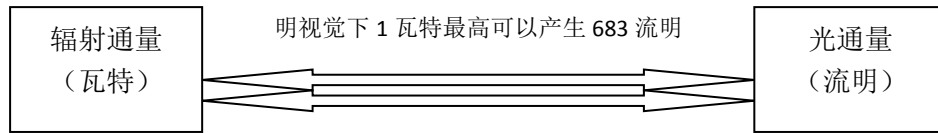


图 3 辐射通量与光通量的关系

由于人眼对不同波长光的相对视见率不同，所以不同波长光的辐射通量相等时，其光通量并不相等。例如，当波长为 555nm 米的绿光与波长为 650nm 米的红光辐射通量相等时，前者的光通量为后者的 10 倍。

光通量是光学量的主要单位之一。由光通量这一主要光学量可以引出以下两个光学量：光出射度、光照度。

2) 光出射度 M_v

光源单位面积发出的光通量称为光源的光出射度，通常用符号表示为 M_v 。即：

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (0-2)$$

光出射度的单位为流明每平方米 (lm/m^2)。

3) 光照度 E_v

被照表面单位面积接受的光通量称为光照度，通常用符号 E_v 表示。即：

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (0-3)$$

光照度和光出射度的区别在于一个是（光源）单位面积发出光通量，另一个是（被照表面）单位面积接受的光通量，显然，光照度和光出射度的应当具有相同的量纲。当用来描述被照表面的光照度时，流明每平方米又被称为勒克斯 (lx)。

4) 发光强度 I_v

点光源在单位立体角内发出的光通量称为**发光强度**。即：

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (0-4)$$

发光强度是用来描述**点光源**发光特性的光学量，引入发光强度的意义是为了描述点光源在某一指定方向上发出光通量能力的大小：在指定方向上的一个很小的立体角元内所包含的光通量值，除以这个立体角元，所得的商即为光源在此方向上的发光强度。

值得注意的是发光强度是国际单位制中的七个基本量之一，也是基本的光学量。发光强度的单位是**坎德拉 (cd)** 又可称“烛光”。根据国际单位制的规定：一个波长为 555nm 的单色光源（黄绿色），在某方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683} \text{ W / sr}$ （式中 *sr* 为立体角的单位：球面弧度，或简称球面度），则该点光源在该方向上的发光强度为 **1 坎德拉**。由于发光强度是国际单位制的基本单位，光通量的单位流明也可以视为从坎德拉中导出：发光强度为 **1cd** 的匀强点光源，在单位立体角内发出的光通量即为 **1lm**。

显然，点光源的发光强度是和发光方向有关的，对于发光强度各向异性的点光源，其总的光通量可用下式求得：

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (0-5)$$

而对于各向同性的点光源，其总的光通量就简单了：如果发光强度为 I_v 则光通量为： $\Phi_v = 4\pi I_v$ 。

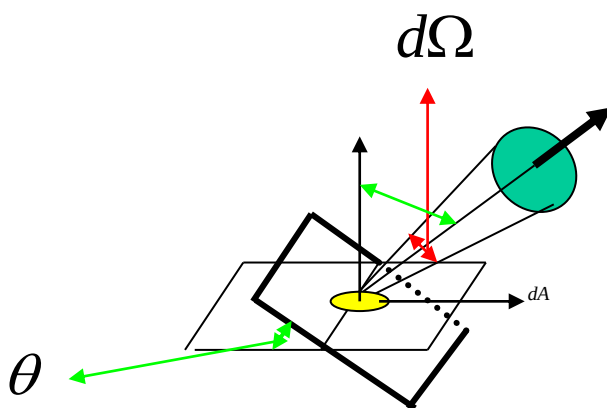


图 4 面元 dA 在 θ 方向上的光亮度示意图

5) 光亮度 L_v

光亮度又简称亮度，是指某发光面元 dA 在某方向 θ 上单位面积的发光强度。根据发光强度和光通量之间的关系，也可以指光源单位面积在某一方向上单位立体角内的光通量。即：

$$L_v = \frac{I_v}{\cos \theta dA} = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta dA d\Omega} \quad (0-6)$$

上式中 θ 是面元 dA 的法线方向与考察方向的夹角。以上公式的说明如图 4 所示：

光亮度的单位是坎德拉每平方米 (cd / m^2)，坎德拉每平方米又称为尼特 (nit)，nit 是旧的光亮度单位名称，现已废除不用。

光亮度虽不是基本的光学量，但却是体现包括光源和被照表面在内的任意发光表面在人眼看上去的表观明暗程度的重要光学量。以下的表 2 列出了常见发光表面的发光亮度：

表 2 常见发光表面的发光亮度

表面名称	光亮度 (cd / m^2)	表面名称	光亮度 (cd / m^2)
在地面上看到太阳表面	$(1.5 \sim 2.0) \times 10^9$	100 瓦白炽钨丝灯	6×10^6

日光下的白纸	2.5×10^4	6 伏汽车头灯	1×10^7
白天晴朗的天空	3×10^3	放映灯	2×10^7
在地面上看到的月亮的表面	$(3 \sim 5) \times 10^3$	卤钨灯	3×10^7
月光下的白纸	3×10^2	超高压球形汞灯	$1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$
蜡烛的火焰	$(5 \sim 6) \times 10^3$	超高压毛细管汞灯	$2 \times 10^7 \sim 1 \times 10^9$

以上各光学量的单位除了本节介绍的标准单位之外，还有非标准的一些单位，如发光强度的单位可用“国际烛光”等，相见相关参考资料。

②光学量和辐射量之间的关系

(1) 光谱光效率函数

具有相同辐射通量而波长不同的可见光分别作用于人眼，人眼感受到的明亮程度即光学量是不同的，这表明人的视觉对不同波长的光具有不同的灵敏度。人眼对不同波长的光的灵敏度是波长的函数，这一函数称为光谱光效率函数（或称光谱光视效率）。实验还表明，在观察视场明暗程度不同的情况下，光谱光效率函数也会稍有不同。这是由于人眼的明视觉和暗视觉是由不同类型的视觉细胞来实现的：

1) 明视觉

在光亮(几个 cd/m^2 以上)条件下，人眼的锥体细胞起作用。

明视觉条件下，锥体细胞能分辨物体的细节，很好地区分不同颜色。

2) 暗视觉

在暗条件下，亮度约在百分之几 cd/m^2 以下时，人眼的杆体细胞起作用。

在暗视觉条件下，杆体细胞能感受微光的刺激，但不能分辨颜色和细节。

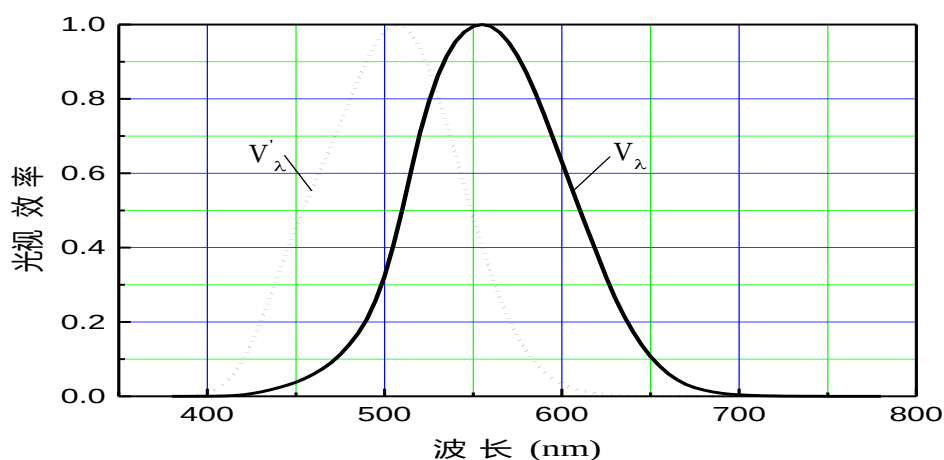


图 4 明视觉和暗视觉情形下的光谱光效率函数

3 朗伯辐射体及其辐射特性

对于磨得很光或镀得很亮的反射镜，当一束光入射到它上面时，反射光具有很好的方向性，即当恰好逆着反射光线的方向观察时，感到十分耀眼，而在偏离不大的角度观察时，就看不到反射光。对于一个表面粗糙的反射体或漫射体，就观察不到上述现象。除了漫反射体以外，对于某些自身发射辐射的辐射源，其辐亮度与方向无关，即辐射源各方向的辐亮度不变，这类辐射源称为朗伯辐射体。

绝对黑体和理想漫反射体是两种典型的朗伯体。在实际问题的分析中，常采用朗伯体作为理想的模型。

朗伯辐射体辐射特性——朗伯余弦定律

朗伯体反射或发射辐射的空间分布可表示为

$$d^2P=Lcos\theta dAd\Omega \tag{0-7}$$

按照朗伯辐射体亮度不随角度变化的定义，得

$$L=\frac{I_0}{dA}=\frac{I_\theta}{dAcos\theta}$$

即
$$I_\theta=I_0cos\theta \tag{0-8}$$

即在理想情况下，朗伯体单位表面积向空间规定方向单位立体角内发射（或发射）的辐射通量和该方向与表面法线方向的夹角θ的余弦成正比——朗伯余弦定律。朗伯体的辐射强度按余弦规律变化，因此，朗伯辐射体又称为余弦辐射体。

任务二 色度学

色度学特性是其光学特性的另一个重要方面，由于 LED 灯具对颜色要求的多样性，有些灯具对颜色的要求比较严格，于是，其色度学特性需要用包含波长（包括峰值波长、主波长、质心波长等次级概念）、色温、显色指数等来综合描述。

一、颜色视觉

颜色科学的一个重要发展是把主观的颜色感知和客观的物理刺激联系起来，建立起高度准确的定量学科——色度学。色度学是对颜色刺激进行测量、计算和评价的科学。

1 颜色辨认与 RGB 颜色空间

人眼可见的光是波长在 380 ~ 760 nm 范围内的电磁波，电磁波的波长超出这一范围人眼将无法感受到的，在这一波长范围内，不同波长的光会引起人眼不同的“颜色”感觉，这就是颜色形成的机理。颜色视觉正常的人在光亮条件下能看到的各种颜色从长波一端向短波一端的顺序是红色、橙色、黄色和紫色。表 3 是各种可见光颜色的波长和光谱的范围。

表 3 可见光颜色波长及光谱范围

颜色	波长（nm）	光谱范围（nm）
红	700	640-750
橙	620	600-640
黄	580	550-600
绿	510	480-550
蓝	470	450-480
紫	420	400-450

事实上，除了这些颜色之外，人眼还可以感受到在可见光波长范围内由波长连续变化而引起的连续变化彩色感受。除此之外，人眼还可以感受到黑色、白色、灰色等无色彩的颜色感受，以及粉红、暗红、土黄等颜色感受。

颜色和波长的关系并不是完全固定的，光谱上除了三点，即 572nm（黄）、503nm（绿）和 478nm（蓝）是不变的颜色外，其他颜色在光强增加时都略向红色或蓝色变化。

①混色与三基色原理

综上所述，不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以来源于不同的光谱组合，人眼只能体会彩色感觉而不能分辨光谱成分。不同光谱成分的光经过混合能给人有相同彩色感觉，单色光可以由几种颜色的混合光来等效，几种颜色的混合光也可以由另外几种颜色的混合光来等效，这一现象称为混色。例如，彩色电视机中的彩色就是通过混色而实现的一种颜色复现过程，而并没有恢复原景物的辐射光谱成分。

在进行混色实验时，人们发现只要选取三种不同颜色的单色光按一定比例混合就可以得到自然界中绝大多数彩色，具有这种特性的三个单色光叫基色光，对应的三种颜色称为**三基色**，由此我们得到重要的三基色原理。

三基色的选取并不是任意的，而是要遵循以下原则。

（1）三基色的选取原则

1）三种颜色必须相互独立，也就是说，其中任意一种基色不能由其他两种颜色混合配出，这样可以配出较多的彩色；

2）自然界中绝大多数彩色都必须能按照三种基色分解；

3）混合色的亮度等于各种基色的亮度之和。

根据以上原则，在实际情况中，通常选取红、绿、蓝三种颜色作为三基色，由此而形成了所谓的 RGB 颜色空间。

（2）相加混色法和相减混色法

把三基色按照不同的比例混合获得彩色的方法称为混色法。混色法有相加混色和相减混色之分。彩色电视系统以及各种类型的计算机监视器等显示屏幕中，使用的是相加混色法。而印刷、美术等行业以及计算机的彩色打印机等输出设备使用的是相减混色法。

1）相加混色法

相加混色一般采用色光混色，色光混色是将三束圆形截面的红、绿、蓝单色光同时投影到屏幕上，呈现一幅品字形三基色圆图。如下图 5 所示：

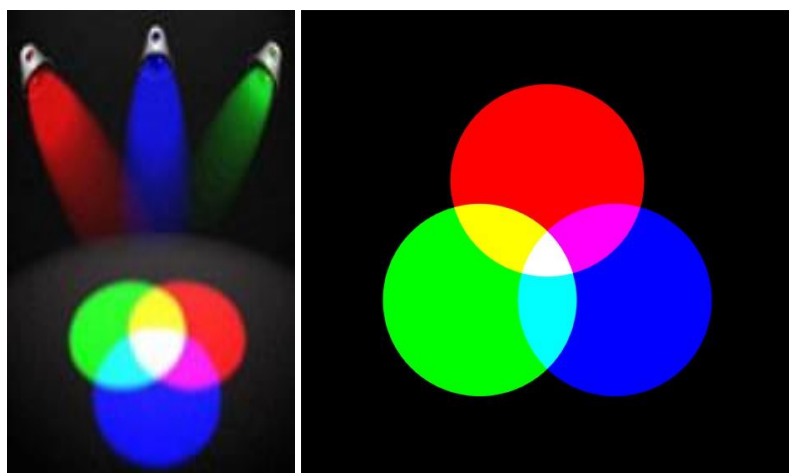


图 5 .相加混色法

由图 5 可见：

红光+绿光=黄光

红光+蓝光=紫光（品红光）

绿光+蓝光=青光

红光+绿光+蓝光=白光

以上各光均是按照基色光等量相加的结果。若改变三基色之间的混合比例，经相加可获得各种颜色的彩色光。

在三基色的相加混色实验中，1853 年，格拉斯曼（H.Grassman）教授总结出如下的相加混色定律，可以作为混色的重要指导思想。

- 补色律：自然界任一颜色都有其补色，它与它的补色按一定比例混合，可以得到白色或灰色。

- 中间律：两个非补色相混合，便产生中间色。其色调决定于两个颜色的相对数量，其饱和度取决于两者在颜色顺序上的远近。

- 代替律：相似色混合仍相似，不管它们的光谱成分是否相同。

- 亮度相加律：混合色光的亮度等于各分色光的亮度之和。

实现相加混色的方法还有空间混色法、时间混色法等。

2) 相减混色法

相减混色法主要用于描述颜料的混色：指不能发光，却能将照来的光吸掉一部分，将剩下的光反射出去的色料的混合。色料不同，吸收色光的波长与亮度的能力也不同。色料混合之后形成的新色料，一般都能增强吸光的能力，削弱反光的亮度。在投照光不变的条件下，新色料的反光能力低于混合前的色料的反光能力的平均数，因此，新色料的明度降低了，纯度也降低了，所以又称为减光混合。

相减混色法中的三原色为黄、青和品红（即某种紫色）。这三种原色分别对相加混色中的三基色蓝、红和绿具有极高的吸收率。因此三原色按不同的比例混合也能得到各种不同的颜色。

②RGB 颜色空间

根据以上相加混色法的思想，把 R（红）、G（绿）、B（蓝）三种基色的光亮度作一定的归一化之后，作为直角坐标系三维空间的三个坐标轴，可以构成一个颜色空间，颜色空间中不同的坐标点就表示了不同的颜色。这样表示颜色的方法即为 RGB 颜色空间，由于 RGB 颜色空间是计算机等数字图像处理仪器设备所采用的表示图像颜色的基本方法，故 RGB 颜色

空间通常也称基础颜色空间。

从理论上，RGB 颜色空间可以表示出任意的颜色。

2 颜色的分类和特性

颜色可分为彩色和非彩色两大类。

非彩色指的是白色、黑色和各种深浅不同的灰色组成的系列，称为白黑系列。

当物体表面对可见光光谱所有波长反射比都在 80%-90%以上时，该物体为白色；其反射比均在 4%以下时，该物体为黑色；介于两者之间的是不同程度的灰色。纯白色的反射比应为 100%，纯黑色的反射比应为 0。在现实生活中没有纯白、纯黑的物体。对发光物体来说，白黑的变化相当于白光的亮度变化，亮度高时人眼感到是白色，亮度很低时感到是灰色，无光时是黑色。非彩色只有明亮度的差异。

彩色是指黑白系列以外的各种颜色。

彩色一般可用明度、色调和饱和度三个特性来描述。也可用其他类似的三种特性表示。

明度：人眼对物体的明暗感觉。发光物体的亮度越高，则明度越高，非发光体反射比越高，明度越高。

色调：彩色彼此相互区分的特性。即红、黄、绿、蓝、紫。不同波长的单色光具有不同的色调。发光物体的色调决定于它的光辐射的光谱组成，非发光物体的色调决定于照明光源的光谱组成和物体本身的光谱反射（透射）的特性。

饱和度：是指彩色的纯洁性。可见光谱中的各种单色光是最饱和的彩色。物体色的饱和度决定于物体反射（透射）特性。如果物体反射光的光谱带很窄，它的饱和度就高。

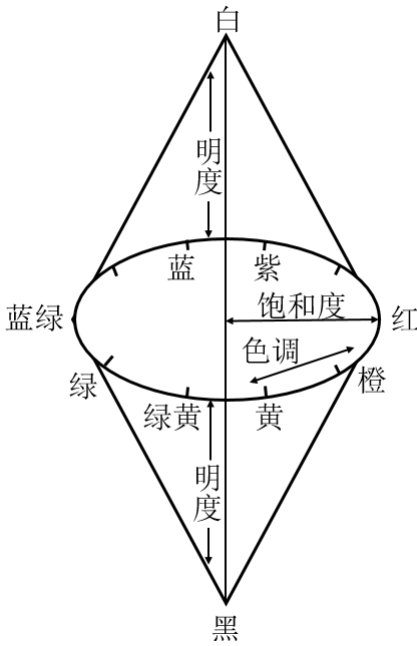


图 6 颜色的三维空间纺锤体示意图

用一个三维空间纺锤体可以将颜色的三个基本特性——明度、色调和饱和度表示出来，如图 6 所示，立体的垂直轴代表白黑系列明度的变化；圆周上的各点代表光谱上各种不同的色调（红、橙、黄、绿、蓝、紫等）；从圆周向圆心过渡表示饱和度逐渐降低。

二、 CIE 标准色度学系统

国际照明委员会(CIE)规定了一套标准色度系统，称为 CIE 标准色度系统，这一系统是近代色度学的基本组成部分，是色度计算的基础，也是彩色复制的理论基础之一。

CIE 标准色度学系统是一种混色系统，是以颜色匹配实验为出发点建立起来的。用组成每种颜色的三原色数量来定量表达颜色。

①颜色匹配

建立 CIE 的标准色度学系统的一个重要原因是为了解决当时在颜色混合和颜色匹配中出现的一些问题。

把两种颜色调节到视觉上相同或相等的过程称为**颜色匹配**。以下的图 6 是颜色匹配的一种实验装置图：

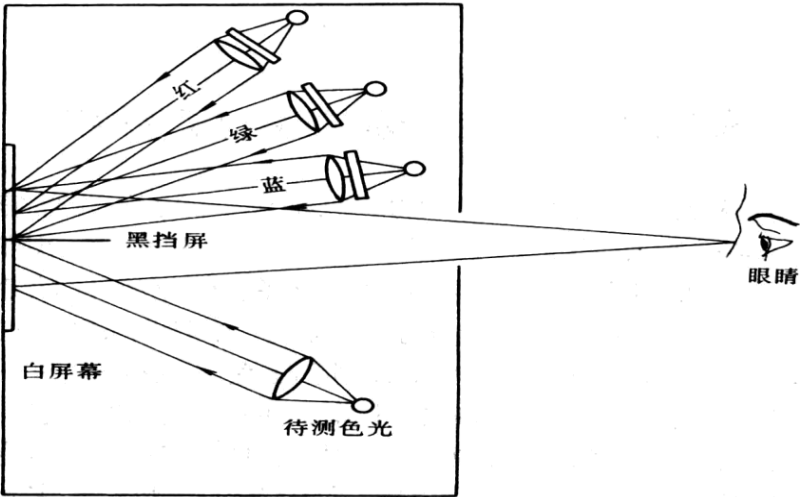


图 6 颜色匹配实验示意图

在以上的颜色匹配实验中，黑挡板下方是被匹配的颜色，即目标颜色，而黑挡板上方则是 RGB 颜色空间中的三基色红、绿和蓝。在实验中，CIE 首先规定了这三种基色光的波长，分别为：700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）然后就用这三种基色光进行不同配比的颜色匹配实验，试图配出在观察者看来和黑挡板下方的目标颜色一致的颜色。

②CIE1931-RGB 系统

CIE 标准色度系统的第一个版本叫做 CIE1931-RGB 系统，是 CIE 在 1931 年发布的。这一色度系统是在类似于以上图 2.9 的实验装置上，以标准色度观察者在 1° -4° 的视场下的基本颜色视觉实验数据为基础而产生的。

在 CIE1931-RGB 系统的实验中，为了确切地描述颜色匹配中三种基色的相对比例，首先必须定出基色单位这样一个概念，即定出多大亮度的基色光为该基色光的“一个单位”。为此，需要提出“等能白光”这样一个概念，即假想的在整个可见光谱范围内光谱辐射能相等的光源的光色，称为等能白色，等能白光的辐射通量谱函数为整个可见光范围内的一条平行于横轴（波长轴）的直线。显然，如果波长分别为 700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）的红、绿蓝光可以作为三基色而混合匹配出任意颜色的话，则此三基色配出等能白色时它们的辐射通量是相等的。由于人眼视觉效率函数依波长变化，三基色的光通量之间的关系如下表 2（这里，取 1 流明红光的光通量作为一个单位）：

表 2 三基色单位亮度的光通量关系表

颜色	红	绿	蓝	混合（等能白）
波长（nm）	700	546.1	435.8	—
单位量流明数	1.0000	4.5907	0.0691	5.6508

采用以上的三基色单位量作为标准,就可通过实验测定出混合配比出任意颜色所需要的三基色的量了。

颜色匹配实验中,当与待测色达到色匹配时所需要的三基色的量,称为**三刺激值**,记作 R、G、B。一种颜色与一组 R、G、B 值相对应, R、G、B 值相同的颜色,颜色感觉必定相同。三基色各自在 R+G+B 总量中的相对比例叫做色度坐标,用小写的符号 r, g, b 来表示。即:

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R+G+B} \\ g = \frac{G}{R+G+B} \\ b = \frac{B}{R+G+B} = 1-r-g \end{cases} \quad (0.9)$$

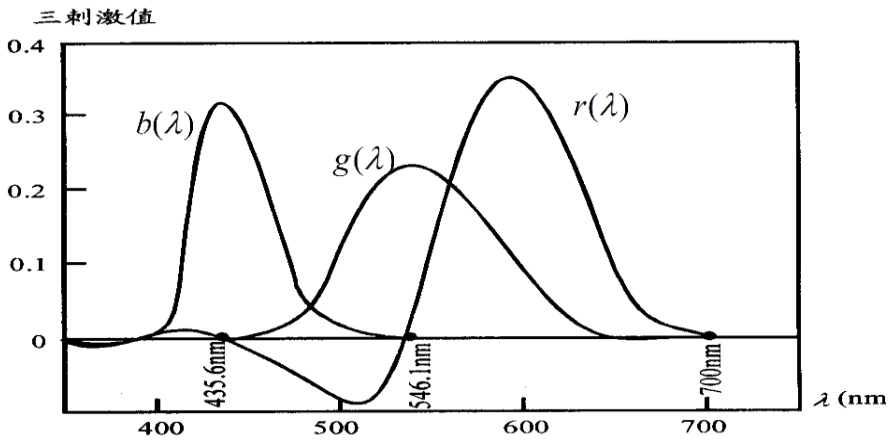


图 7 CIE1931-RGB 色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线

基于 CIE1931-RGB 系统的实验证明:几乎所有的颜色都可以用三原色按某个特定的比例混合而成。如果用上述规定单位量的三原色,在可见光 380nm~780nm 范围内每隔波长间隔 (如 10nm)对等能白色的各个波长进行一系列的颜色匹配实验,可得每一光谱色的三刺激值。实验得出的颜色匹配曲线如图 7 所示,图 2.10 中的 CIE1931-RGB 配光曲线也称为 CIE1931-RGB 标准色度观察者。

从图 7 中可以得到:任一波长的光,都可以由三基色的光按图中的比例匹配而成,但图中曲线表明,如要配出 500nm 附近某一段波长的光,需要的红色基色的光量为负值,即在实验中,要把这一数量的红光照射于被匹配光的一侧(即图 0.5 的黑挡板下方)才行。这对配光的物理意义以及数学计算而言,都是个不太完善的结果。

根据配光的三刺激值色度坐标的公式, r、g、b 三个色度坐标中只有两个是独立的,通常可选取 r、g 分别作为横坐标和纵坐标,可绘制出如上图 0.7 所示的 1931 CIE-RGB 系统色度图。从图 8 中也明显可见,配出许多颜色所需要的红色基色分量的刺激值是负的。

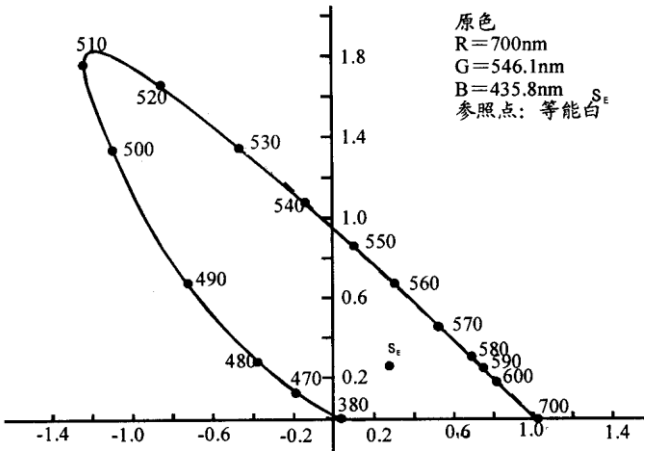


图 8 CIE1931-RGB 系统色度图

③CIE1931-XYZ 标准色度学系统以及其它 CIE 色度学系统

如上所述、CIE1931-RGB 系统存在着一些缺点：在某些场合下，例如被匹配颜色的饱和度很高时，三系数就不能同时取正；而且由于三原色都对混合色的亮度有贡献，当用颜色反方程计算时就很不方便。

因此，希望有一种系统能满足以下的要求：

三刺激值均为正；

某一原色的刺激值，正好代表混合色的亮度，而另外两种原色对混合色的亮度没有贡献；

当三刺激值相等时，混合光仍代表标准（等能）白光。

这样的系统在以实际的光谱色为三原色时是无法从物理上实现的，CIE 通过研究提出了以以下假想色作为逻辑上的三基色的 XYZ 表色系统，即 CIE1931-XYZ 标准色度学系统。

CIE1931-XYZ 标准色度学系统中的三基色 X、Y、Z 实质上是 CIE1931-RGB 色度学系统中三基色 R、G、B 的线性组合。两者之间的转换关系如下式所述：

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \quad (0.10)$$

$$Y = 1.0000R + 4.9507G + 0.0691B \quad (0.11)$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5943B \quad (0.12)$$

根据上式，可得到以下用于描述色品图的三刺激值：

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1-x-y \end{cases} \quad (0.13)$$

由此可得到如下图 9 的 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光谱三刺激值曲线。又称 CIE1931XYZ 标准色度观察者。

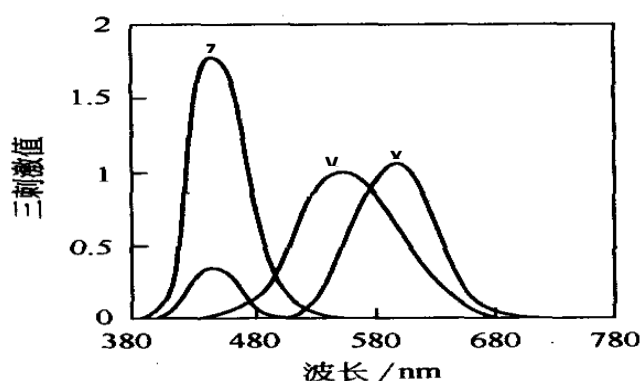


图 9 CIE1931-XYZ 标准色度系统颜色匹配光谱三

从图 9 中可见配光所用的三基色色品坐标 x、y、z 值没有出现负值。由图 0.12 色品坐标的实验数据可以画出以下图 10 所示的 CIE1931XYZ 系统色品图。

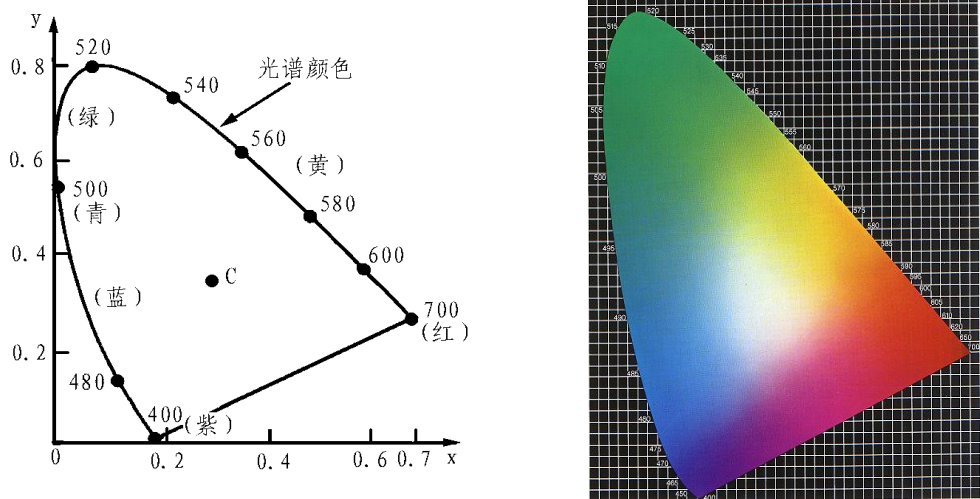


图 10 CIE1931-XYZ 标准色度系统色品图

从以上色品图中可见颜色刺激的值全为正值了。

CIE1931XYZ 标准色度系统是国际上色度计算、颜色测量、和颜色表征的统一标准，是所有测色仪器的设计与制造依据。

三、描述 LED 色度学特性的几个重要概念及其关系

在了解了颜色描述的基本概念之后，以下对描述 LED 色度学特性的几个重要概念及其关系进行介绍和分析。

①光源的波长与颜色

发光的颜色是色光 LED 的一个重要参数，对单色光而言，颜色的差异是由波长的不同而引起的：可见光的波长不同，引起人眼的颜色感觉就不同。

但实际上，任何光源包括 LED，发出的光都不可能是绝对严格的单一波长的单色光，而是发出以某一波长为中心的一定波长范围的光，某一光源发光的相对强弱和波长的函数关系称为该光源的光谱特性，色光光源的光谱特性曲线通常是类似高斯分布（即正态分布）的曲线。光谱特性曲线如图 11 所示：

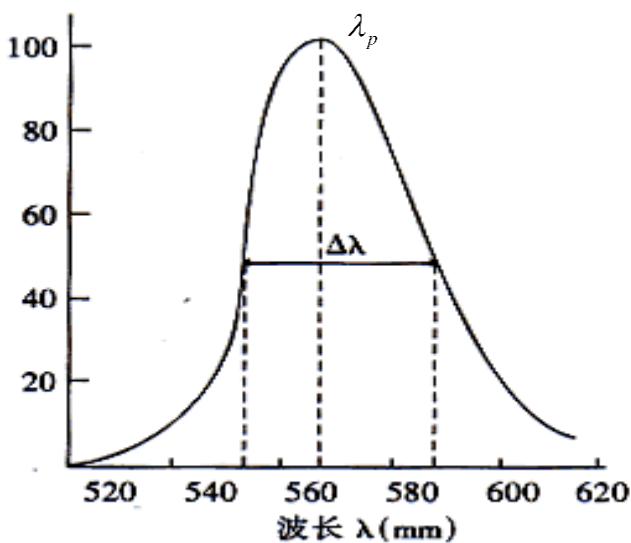


图 11 光源光谱特性曲线（黄绿色光）

图 0.14 是黄绿色光的光谱特性曲线，在图中，可以引出几个常用的光学特性参数：

(1) 峰值波长

图中曲线的最高点对应的波长称为峰值波长：无论什么材料制成的LED，都有一个相对光强度最强处（光输出最大），与之相对应有一个波长，通常叫做峰值波长，用 λ_p 表示。通常峰值波长主要用来描述单色光的颜色特性。

(2) 谱线半宽度

图中的 $\Delta\lambda$ 通常称为谱线的半宽度，指相对光强为峰值波长一半时对应的曲线上两个点的波长间隔。半宽度反映谱线宽窄，是衡量光源单色性好坏的参数，各种单色光LED发光

的谱线半宽度小于40nm，单色性较好。

(3) 主波长

主波长：有的光源发出的光不仅有一个峰值波长；甚至有多多个高低不同峰值，并非单色光。为此描述此光源的色度特性，需要引入主波长的概念。主波长描述的是人眼所能观察到的由此光源发出的光的颜色倾向所对应的单色光的波长。

主波长的概念通常不是用来描述单色光，而是描述多个峰值的色光混合起来所呈现的颜色。例如GaP 材料可发出多个峰值波长，而主波长只有一个，它会随着LED 长期工作，结温升高而主波长偏向长波。

主波长的数值可用如下方法来确定：

用某一光谱色，按一定比例与一个确定的标准照明体（如CIE标准照明体A,B,C或D65）相混合而匹配出样品色，该光谱色的波长就是样品色的主波长。任何一个颜色都可以看作为用某一个光谱色按一定比例与一个参照光源（如CIE标准光源A、B、C等，等能光源E，标准照明体D65等）相混合而匹配出来的颜色，这个光谱色就是颜色的主波长。颜色的主波长相当于人眼观测到的颜色的色调（心理量）。

如果光源的单色性很好，则峰值波长 λ_p 的数值上也就基本上等于主波长。对于蓝光LED 芯片，峰值波长是要比主波长小一点（5nm 左右）。

(4) 色品坐标

如前分析 CIE1931-XYZ 系统是所述，某种颜色在 CIE1931-XYZ 色度图中的色品坐标（或称色度坐标）是描述该颜色的色度特性的重要参量，颜色色品坐标的不同对应着颜色的差异。在实际 LED 封装中的分光等应用场合需要用到色品坐标的概念，此时通常用色度图中 X 和 Y 坐标的至来表示。对于白光 LED 的分光，色品坐标的 X、Y 值均为接近 0.33 的一个数值，表明白光中 X、Y、Z 三个颜色分量的比例接近，根据 X、Y 具体数值的不同，体现出一定的颜色偏向性。

色品坐标还可以用于说明主波长的概念：CIE1931-XYZ 色度图边沿的舌型曲线代表饱和度和为 1 的纯光谱色，假若已知某光的色品坐标电为 A，则从色品坐标图中等能白（0.33，0.33）处引一线段指向 A，再将该线段延长，则延长线和色度图边沿的交点对应的波长则为该色光的主波长。

②光源的色温

色光光源的色度特性用波长来表示，但在LED或其它光源的制造和应用中，白光光源也是非常重要的一种类型。理想的白光是各种波长色光的“均匀”或“等能”的组合，因而无法用波长表示白光的颜色。

实际的白光总带有一点微弱的颜色偏向性，如偏红或偏蓝。由于白光的这种颜色偏向性和单色光的颜色明确性而言，是比较微弱的，所以实际的白光其颜色偏向

性也不用感觉上偏向的那种颜色的波长来表示，而是借助于黑体辐射峰值波长随温度变化的特性，用“色温”这个参数来表示的。黑体辐射随温度变化的特性可用图12表示：

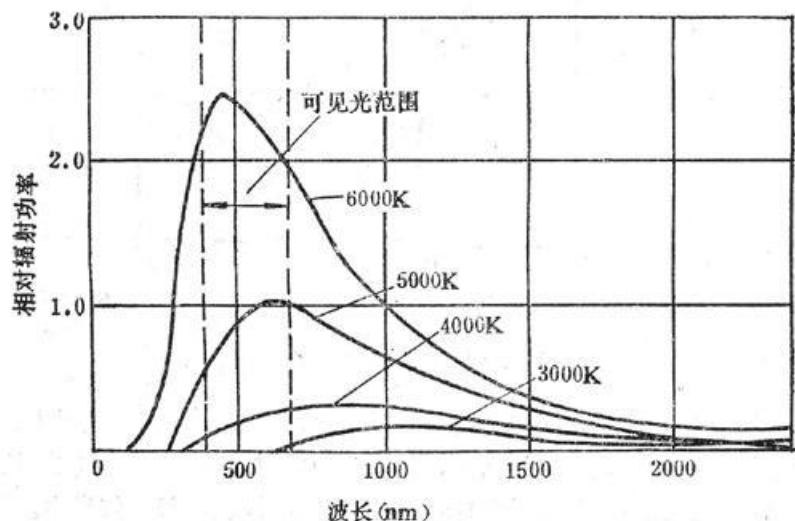


图 12 黑体辐射的温度特性

光源的色温定义如下：如果光源发出的光的颜色与黑体在某一温度下辐射的光颜色相同时，则此时黑体的温度称为该光源的色温。

色温是用来描述白光的颜色偏向性的，单色光的颜色不用色温来描述。

色温计算采用绝对温标，以 K（开尔文）为单位，黑体辐射的 $0\text{K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 做为计算的起点。将黑体加热，随着能量的提高，便会进入可见光的领域。例如，在 2800 K 时，发出的色光和灯泡相同，我们便说灯泡的色温是 2800K 。

光源色温不同，光色也不同。

色温 $< 3300\text{K}$ ：光色为 温暖（带红的白色），稳重的气氛效果；

色温在 $3300\text{--}5000\text{K}$ ：光色为 中间（白），爽快的气氛效果；

色温 $> 5000\text{K}$ ：光色为清凉型（带蓝的白色），冷的气氛效果。

不同色温对应的颜色可用图13表示：

从图中可见，不同的色温对应于不同的颜色，必须强调的是色温是用来描述白光颜色偏向是暖色还是冷色的一个概念，对应于正白的色温表示该颜色恰好位于暖色和冷色的平衡点，即该颜色不偏暖也不偏冷，这个平衡点大概再 5000K 左右。此时，与该色温对应的温度下，黑体辐射的峰值波长会取 555nm 左右的一个数值，该波长对应的单色光颜色为黄绿色。但此时绝对不能说和 5000K 色温对应的颜色为黄绿色，因为色温不是描述单色光色度的参量，色温是描述白光色度特性的参量，它体现了白光中暖色和冷色的平衡程度。

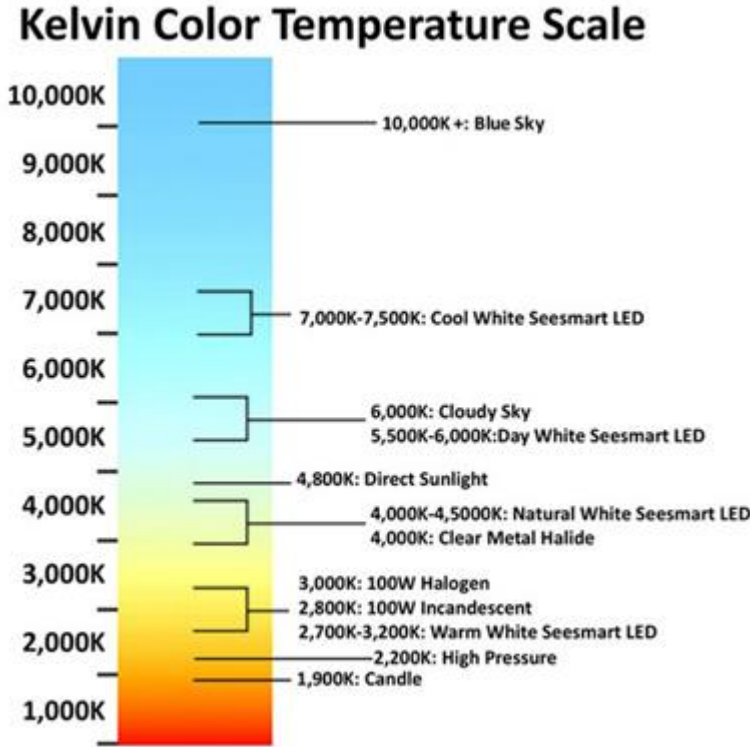


图 13 色温示意图

③光源的显色性

显色性是用于描述白光光源综合色度特性的一个参数。

原则上，人造光源应与自然光源相同，使人的肉眼能正确辨别事物的颜色。

光源对于物体颜色呈现的程度称为显色性，通常用“显色指数（ R_a ）”来描述，它表示物体在某一光源照明下的颜色与基准光（太阳光）照明时颜色的偏离。显色性能较全面反映光源的颜色特性，它描述了事物的真实颜色（其自身的色泽）与某一标准光源下所显示的颜色关系。

R_a 值的确定，是将 DIN6169 标准中定义的 8 种测试颜色加上其它 7 种试样，在标准光源和被测试光源下做比较，色差越小则表明被测光源颜色的显色性越好。 R_a 值为 100 的光源表示，事物在其灯光下显示出来的颜色与在标准光源下一致。代表性试样的选择如下：1 - 8 号：中彩度色：如 深红、深黄、深绿、深蓝等（明度为 6）；9 - 12 号：高彩度的红色、黄色、绿色、蓝色；13 号：白种人女性肤色，14 号：叶绿素，15 号：中国女性肤色（日本女

性肤色)。

显色性是通过与同色温的参考或基准光源(白炽灯或日光)下物体外观颜色的比较。光所发射的光谱内容决定光源的光色,但同样光色可由许多,少数甚至仅仅两个单色的光波组合而成,对各个颜色的显色性亦大不相同。相同光色的光源会有相异的光谱组成,光谱组成较广的光源较有可能提供较佳的显色品质。当光源光谱中很少或缺乏物体在基准光源下所反射的主波时,会使颜色产生明显的色差(color shift)。色差程度愈大,光源对该色的显色性愈差。

实际应用中光源显色指数的要求见表 3:

表 3 不同场合下对光源显色指数的要求。

显指(CRI)	等级	显色性	应用场合
90-100	1A	优良	需要色彩精确对比的场所
80-89	1B		需要色彩正确判断的场所
60-79	2	普通	需要中等显色性的场所
40-59	3		对显色性的要求较低,色差较小的场所
20-39	4	较差	对显色性无具体要求的场所

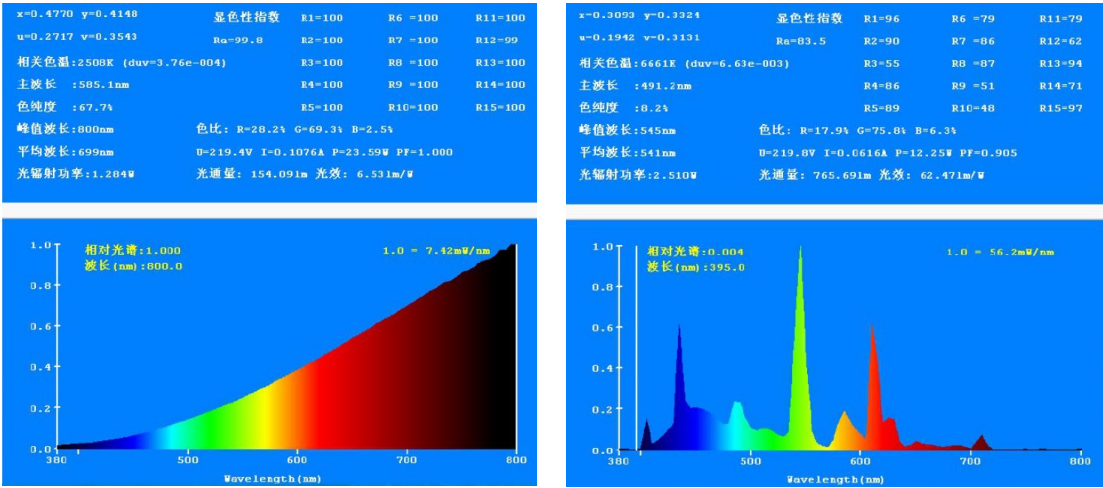
各种不同光源的显色指数如下的表 4:

表 4 各种光源的显色指数

光源	白炽灯	荧光灯	卤钨灯	高压汞灯	高压钠灯	金属卤化物灯
显指	97	75-94	95-99	22-51	20-30	60-65

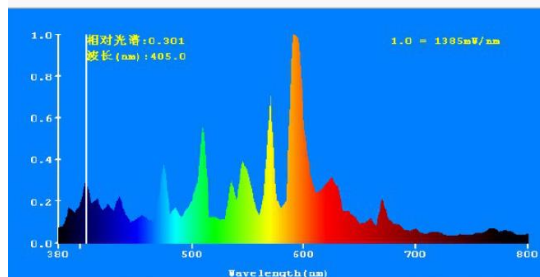
④光源光谱图

利用灯具光色电综合测试仪测试了白炽灯、荧光灯、高压钠灯和不同显示指数 LED 灯等各种不同光源的光色电参数和相应的光谱图,比较如下图 14 所示。

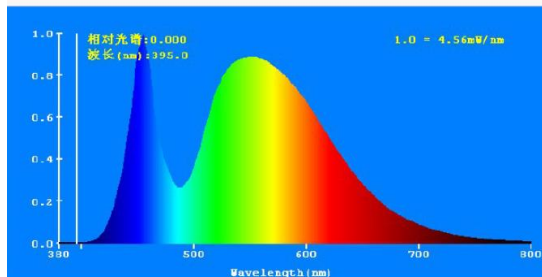
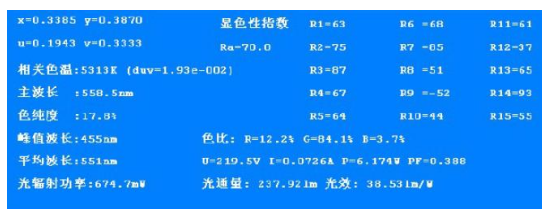


(a) 白炽灯测试参数及光谱图

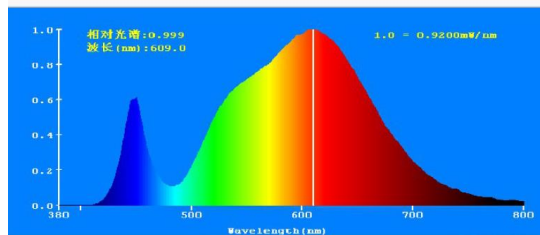
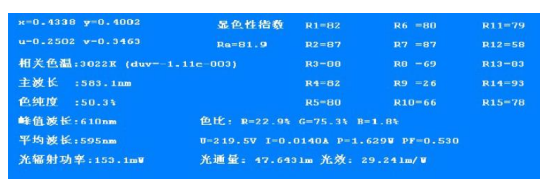
(b) 荧光灯测试参数及光谱图



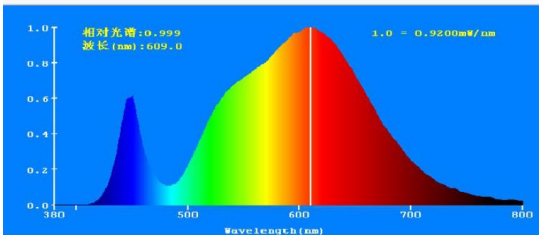
(c) 高压钠灯测试测试机光谱图



(d) LED 灯 (Ra: 70) 测试参数及光谱图



(e) LED 灯 (Ra: 81.9) 测试参数及光谱图



(f) LED 灯 (Ra: 85.7) 测试参数及光谱图

图 14 不同光源测试参数及光谱图对比

从图 14 中的不同光源测试参数及光谱图对比可知，光源的光谱分布决定了光源的显色性，光源的色温和显色性之间没有必然的联系，具有不同光谱分布的光源可能有相同的色温，但显色性可能差别很大。从光谱图外形特点也可反推这是何种光源，例如 LED 的光谱图，都有一个明显的蓝光波峰和一个比较宽的包含绿、黄、红的宽光谱，可见这款 LED 发光原理为 LED 蓝光芯片激发黄色荧光粉所得，这是常用的典型的 LED 封装形式：蓝光芯片+黄色荧光粉。从光谱图也可看出，显示指数的高低与红色光谱占比有很大关系，这可以在 LED 光源封装过程中荧光粉配比实验中提供重要的指导性方向。

任务三 电学特性

固体电光源 LED 是目前广泛使用的节能环保电光源，所以讨论照明技术中的电学特性主要针对 LED 光源的电学特性而言。对于 LED 作为一种 PN 结发光的电光源，显然，其电学特性参数也是非常重要的。LED 的电学特性参数主要是伏安特性（曲线），以及根据对该曲线的分析而提取出来的正向工作电流、正向压降、反向电流、反向压降、功率等。此外，作为一个电光源，显然发光效率也是其重要的联系电、光特性的参数。

①伏安特性曲线

器件的伏安特性是指流过器件的电流和器件两端施加的电压之间的函数关系。伏安特性是一切电阻型电子器件的主要特性，LED 属于这一范畴，因此，伏安特性是 LED 主要的电学特性。LED 的伏安特性曲线如下的图 14 所示：

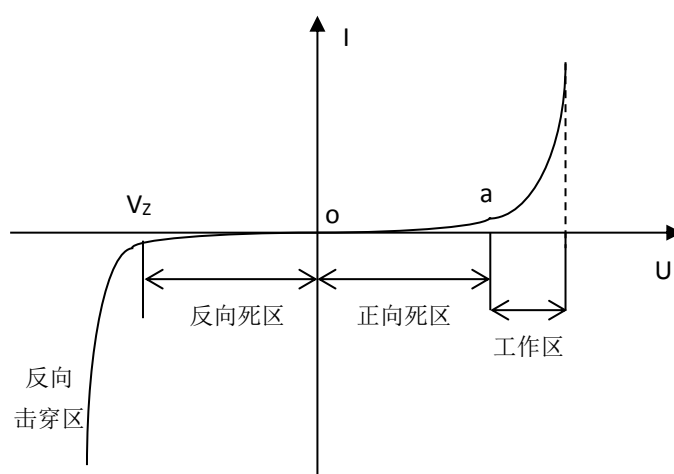


图 14 LED 伏安特性曲线

伏安特性也是表征 LED 芯片 PN 结制备性能主要参数。LED 的伏安特性具有非线性、单向导电的特点，即外加正偏压表现低接触电阻，反之为高接触电阻。

从图 0.17 中可见伏安特性曲线分为四段。

（1）正向死区：这是正向电压太低，LED 还没有开启工作的状态（图 oa 段），a 点对应的 V_a 为开启电压，当 $V < V_a$ ，外加电场尚克服不少因载流子扩散而形成势垒电场，此时 R 很大；开启电压对于不同 LED 其值不同，GaAs 为 1V，红色 GaAsP 为 1.2V，GaP 为 1.8V，GaN 为 2.5V。

（2）正向工作区：这是 LED 正常工作的发光状态，电流 I_f 与外加电压呈指数关系：

实际工作室，一般令处于一个合适的当然，如果正向电压加很高，或者电流很大，LED 也能发光，但是处于超负荷高发热工作状态，寿命将大大缩短。

（3）反向死区： $V < 0$ 时 PN 结加反偏压，这是加上一个较小的反向电压的情形，LED 反向电流很小，处于反向截止状态

（4）反向击穿区： $V < -V_z$ ， V_z 称为反向击穿电压，这是反向加上一个很高的电压的情形，反向电压 V_R 对应 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $V_R < -V_z$ 时，则出现 I_R 突然增加而出现击穿现象。由于所用化合物材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压 V_R 也不同。反向击穿会对 LED 造成损坏。

②几个常用的重要参数

根据 LED 的伏安特性曲线，可以较为全面地分析 LED 的电学特性，在 LED 芯片制造、封装以及不同应用场合的器件选型和设计时，通常需要强调以下几个参数的。

(1) 正向工作电流 I_F (mA)

正向工作电流包括以下几种情形：

1) 额定工作电流 I_F (mA)：LED 在理想的线性工作区域，在此电流下可安全地维持正常的工作状态，一般情况下，小功率 LED 的额定工作电流为 20mA 上下；

2) 最小工作电流 I_{FL} (mA)：LED 在小于此电流工作时，由于超出理想的线性工作区域，将无法保证 LED 的正常工作状态（尤其是在一致性方面）；

3) 最大容许正向电流 I_{FH} (mA)：LED 最大可承受的正向工作电流，在此电流下，LED 仍可正常工作，但发热量剧增，LED 的使用寿命将大大缩短；

4) 最大容许正向脉冲电流 I_{FP} (mA)：LED 最大可承受的一定占空比的正向脉冲电流的高度。

(2) 正向压降 V_F (V)

伏安特性曲线中正向工作电流所对应的电压称为正向压降或正向电压。

正向电压 V_F 是指额定正向电流下器件二端的电压降，这个参数既与材料的禁带宽度有关，同时也标识了 PN 结的体电阻与欧姆接触电阻的高低。 V_F 的大小一定程度上反映了电极制作的优劣。相对于 20 毫安的正向电流，红黄光类 LED 的 V_F 值约为 2 伏，而 GaN 基蓝绿光类 LED 器件的 V_F 值通常大于 3 伏。

(3) 反向电流 I_R (μA)：

LED 在一定的反向偏压（通常取 $V_R=5V$ ）下的反向漏电流。

反向漏电流 I_R 是指给定的反向电压下流过器件的反向电流值，这个值的大小十分敏感于器件的质量。通常在 5 伏的反向电压下，反向漏电流应不大于是 10 微安， I_R 过大表明结特性较差。

反向击穿电压是指当反向电压大于某一值时，反向漏电流会急剧增大，反映了器件反向耐压的特性。对一个具体器件而言，漏电流大小的标准有所不同，在较为严格的情况下，要求在规定电压下，反向漏电流不大于 10 微安。

(4) 反向电压 V_R (V)：

LED 在指定反向电流下所对应的反向电压。

(5) 最大容许反向电压 V_Z (V)：

LED 所能承受的最大反向电压，即反向击穿电压超出此电压使用，将导致 LED 反向击穿。

(6) 耗散功率 P_D (W)：

LED 的耗散功率 $P_D=I_F \cdot V_F$ ，耗散功率既是 LED 消耗的电功率多少。根据耗散功率的大小通常把 LED 划分为小功率和大功率，一般以 0.5W——1W 作为分界线。

(7) 发光效率 η_e

发光效率简称光效，光源的发光效率定义为其光通量与所消耗功率的比值。即：

$$\eta_e = \frac{\Phi_v}{P_D} \quad (0.14)$$

光效的单位是 lm/w（流明每瓦）。

通常白炽灯与荧光灯的光效分别为 15lm/w 与 60lm/w，灯泡的功率越大，光通量越大。对于一个性能较高的 LED 器件，光效为数十 lm/w，实验室水平达到 100lm/w 以上。为使 LED 器件更快地用于照明，必须进一步提高 LED 器件的发光效率，目前，LED 的光效可达 200lm/w。

人类将会迎来一个固态光源全面替代传统光源的新时代。

任务四 热学特性

对于照明技术中，电光源在能量转换时不是百分百将电能全部转换为光能，很大一部分电能转换位热能损耗了，而转换成热能部分如果没有及时疏解将导致热能集聚温度升高影响电光源的性能，尤其是大功率照明电光源。

为了满足照明领域对 LED 高光通量的要求，在优化器件结构、提高发光效率的同时，增加单个 LED 器件的输入功率是最有效直接的方法，但随着功率的增加 LED 会产生大量的热量引起芯片温度的升高，温度升高将影响 LED 量子效率低、寿命减少、颜色漂移等技术指标，所以，在大功率照明中必须了解热学特性，考虑散热问题。

由此可见，除了以上描述 LED 工作瞬时状态的光学和电学特性参数之外，在应用的角度，LED 的使用寿命以及工作状态的稳定性和可靠性等参数，以及与寿命和稳定性密切相关的热学特性，也是非常重要的特性参数。

①LED 的使用寿命与可靠性

LED 与传统光源相比较的一个重要优势就是其使用寿命长：一般而言，LED 的使用寿命在 50,000 小时以上，还有一些生产商宣称其 LED 可以运作 100,000 小时左右。LED 之所以持久，是因为它不会产生灯丝熔断的问题。LED 不会直接停止运作，但它会随着时间的流逝而逐渐退化。理论预测以及实验数据表明，高质量 LED 在经过 50,000 小时的持续运作后，还能维持初始灯光亮度的 60%以上。假定 LED 已达到其额定的使用寿命，实际上它可能还在发光，只不过灯光非常微弱罢了。通常，LED 的寿命结束不是指其不能发光的时间，而是指其光通量（或额定电流）下降到最初使用时一半的时间。

可靠性是在 LED 的工作（发光）期间，其各个主要特性参数保持在额定范围内的几率，这也是衡量 LED 产品优劣的一个重要指标。

②LED 的热学特性

影响 LED 寿命长短的最重要因素是散热的好坏，要想延长 LED 的使用寿命，就必须降低 LED 芯片的温度。对于单个 LED 而言，如果热量集中在尺寸很小的芯片内而不能有效散出，则会导致芯片的温度升高，引起热应力的非均匀分布、芯片发光效率和荧光粉激发效率下降。当温度超过一定值时，器件的失效率将呈指数规律攀升。

（1）结温及其对 LED 性能的影响

结温就是 LED 中 PN 结的温度，这是影响 LED 光学特性、电学特性以及寿命的最重要和最根本的参数。

据分析：元件温度每上升 2℃，可靠性将下降 10%。为了保证器件的寿命，一般要求 PN 结的结温在 110℃以下。而且，随着 PN 结结温的升高，白光 LED 器件的发光波长将发生红移。在 110℃的温度下，波长可以红移 4~9nm，从而导致 YAG 荧光粉吸收率下降，总的发光强度会减少，白光色度变差。在室温附近，温度每升高 1℃，LED 的发光强度会相应减少 1%左右。当器件从环境温度上升到 150℃时，亮度下降多达 35%。当多个 LED 密集排列组成白光照明系统时，热量的耗散问题更严重。因此解决散热问题已成为 LED 应用，尤其是功

率型 LED 应用的首要问题。

（2）降低 LED 结温的途径

LED 的输入功率是元件热效应的唯一来源，能量的一部分变成了辐射光能，其余部分最终均变成了热，从而抬升了元件的温度。显然，减小 LED 温升效应的主要方法，一是设法提高元件的电光转换效率（又称外量子效率），使尽可能多的输入功率转变成光能，另一个重要的途径是设法提高元件的热散失能力，使结温产生的热，通过各种途径散发到周围环境中去。降低结温所采取的主要的途径如下：

- 1) 减少 LED 本身的热阻；
- 2) 良好的二次散热机构；
- 3) 减少 LED 与二次散热机构安装介面之间的热阻；
- 4) 控制额定输入功率；
- 5) 降低环境温度

【项目小结】

近年来辐射度学、光度学和色度学的发展特别迅速。光源的种类日新月异地发展着，其发光效率与颜色得到了很大的改善。在信息技术飞速发展的今天，辐射度量、光度量以及色度量的评价和测量已成为照明技术发展的基础，因此，建立光通量、光强度、照度、亮度、色度等一系列计量标准，提高国防、工业、医疗和照明等领域的有关测试和计量技术的进步，推动我国辐射度、光度以及色度计量的标准化，具有重要意义。

作为一个电光源，电学特性参数也是非常重要的，随着 LED 器件的发光效率不断提高，人类将会迎来一个固态光源全面替代传统光源的新时代。热学特性决定了照明电器的寿命和可靠性，也是不容忽视的。

【思考与练习】

- 1、人眼的锥细胞与杆状细胞的功能比较。
- 2、名称解释
 - （1）光通量
 - （2）照度
 - （3）发光强度
 - （4）显示指数
 - （5）色温
- 3、LED 作为显示器光源有和优点？
- 4、利用 LED 产生白光的方式有哪几种？与一般路灯照明比较，采用 LED 有哪些优缺点？

项目二 照明中常用光学器件

【知识目标】

- 1、掌握照明中常用透镜、反射器及其组合等光学器件特点；
- 2、了解照明中常用光学器件在不同场合中的应用；
- 3、会分析照明光学器件中几何光学传播规律。

【技能目标】

- 1、能利用照明中常用光学器件进行简单的照明设计；
- 2、会选择和应用照明中常用的光学器件。

【任务导入与项目分析】

照明技术中光场分布是通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。

透镜元件和反射元件，已经广泛应用于照明中的各个方面，成为照明设计中不可或缺的一部分。射灯、路灯、自行车灯和汽车车灯等各个方面，都有使用。本项目简要介绍照明中常用的透镜元件和反射元件结构及其各自的光学性能。具体的设计方法在下一个项目中介绍。

任务一 照明中常用透镜

透镜是照明灯具中不可或缺的光学元件，它一般有以下几种材料种类：

（1）硅胶透镜

硅胶是一种高活性吸附材料，属于非晶态物质，其化学分子式为 $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。不溶于水 and 任何溶剂，无毒无味，化学性质稳定，除强碱、氢氟酸外不与任何物质发生反应。各种型号的硅胶因其制造方法不同形成不同的微孔结构。硅胶的化学组份和物理结构，决定了它具有许多其他同类材料难以替代的特点：吸附性高、热稳定性好、化学性质稳定、有较高的机械强度等。因为硅胶耐温高（也可以过回流焊），因此常用直接封装在 LED 芯片上。一般硅胶透镜体积小，直接 3-10mm。

（2）PMMA 透镜

光学级 PMMA（Polymethyl methacrylate 的简称）也称为聚甲基丙烯酸甲酯，俗称有机玻璃或亚克力，是迄今为止合成透明材料中质地最优异、价格比较适宜的品种。PMMA 是目前最优良的高分子透明材料，有极好的透光性能，可见光透过率达到 92%。紫外光会穿透 PMMA，

与聚碳酸酯（PC）相比，PMMA 具有更佳稳定性。PMMA 允许小于 2800nm 波长的红外线通过；存在特殊的有色 PMMA，可以让特定波长的红外光透过，同时阻挡可见光。PMMA 是塑胶类材料，它的优点有：生产效率高（可以通过注塑完成），透光率高（3mm 厚度时穿透率 93% 左右）；它的缺点主要是耐温 70%（热变形温度 90℃）

（3）PC 透镜

光学级 PC（Polycarbonate 的简称）也称聚碳酸酯，属于塑胶类材料，由于聚碳酸酯结构上的特殊性，现已成为五大工程塑料中增长速度最快的通用工程塑料。采用光学级 PC 制作的光学透镜不仅可用于照相机、显微镜、望远镜和光学测试仪器等，还可用于电影投影机透镜、复印机透镜、红外自动调焦投影仪透镜、激光束打印机透镜，以及各种棱镜、多面反射镜等诸多系统，应用范围广。它的优点有：生产效率高（可以通过注塑完成），耐温高（130℃ 以上）；它的缺点主要是透光率稍低（87%）。

（4）玻璃透镜

玻璃是一种无规则结构的非晶态固体，玻璃具有高透过率。玻璃分为两种，冕牌玻璃（K）和火石玻璃（F），其中，K 代表冕牌玻璃，F 代表火石玻璃。冕牌玻璃的特征是其折射率较小而色相系数较大，有 QK、K、PK、BaK、ZK、LaK 等；火石玻璃的特征则相反，其折射率较大而色相系数较小，有 KF、QF、BaF、F、ZF、ZBaF、LaF、TF、AlaF 等。另外，材料的光学均匀性、化学稳定性（折射率大时往往较软，化学稳定性差）、气泡、条纹、内应力等，皆对成像有影响。总之应根据仪器要求挑选不同等级的玻璃。光学玻璃材料，具有透光率高（97%）耐温高耐紫外线等等优点；它的缺点主要是易碎、非球面精度不易实现、生产效率低和成本高等。

1.1 凸透镜和凹透镜

凸透镜和凹透镜在照明光学设计中是应用的最简单透镜形式。凹透镜可以实现对光线的发散；凸透镜可以实现对光线的会聚和发散（会聚之后再发散）。如图 1 所示。

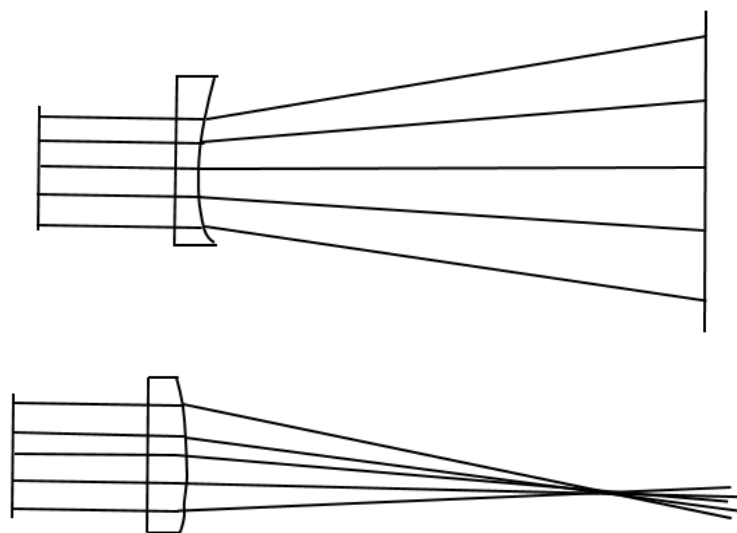


图 1 凹透镜和凸透镜

调整凹透镜和凸透镜与光源的距离或调整透镜的曲率半径，均可以实现对光线出射角度的调整。

以图 1 中凸透镜为例，当其孔径为 D ，曲率半径为 r ，凸透镜折射率为 n 时，其出射光线发散角度为：

$$\theta = 2 \cdot \arctan \frac{(n-1) D}{2 \cdot r} \quad (2.1)$$

凸透镜或凹透镜的阵列组合，可形成复眼透镜。与全反射透镜组合，控制全反射透镜的发光角度。

1.2 棱镜

棱镜可以用来改变光线前进方向，使光线偏折一定的角度。通过切割球面，获得的偏心球面透镜，在偏折光线的同时，也可起到扩散或会聚光线的作用。

光线经棱镜折射后，出射光线向棱镜较厚的一边折射。从图 2 所示的图中，还可以看出，棱镜对不同波长颜色的光线，偏折角度是不同的。对蓝光偏折角度最大，对红光偏折角度最小，这就是著名的牛顿色散实验。根据折射定律分析此现象，可知：同种材料，对于不同波长，其折射率是不同的。

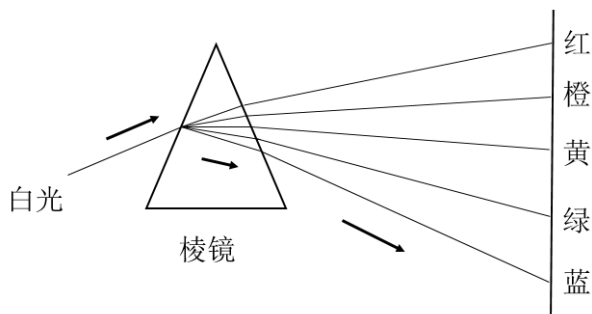


图 2 三棱镜对白光的色散示意图

在照明光学设计中，在需形成非对称光形效果如非对称照度分布或非对称光强分布时，经常采用棱镜以实现此效果。且棱镜的采用，并非一定要用平面棱镜的结构，大多数情况下，均是对光线的偏转和光束角的调整同时进行，即采用偏心的球面透镜或柱面镜，在改变主光线传播方向的同时，改变整个光束发散角度。此种透镜，在警示灯具、自行车灯、汽车车灯等灯具中，均有使用。

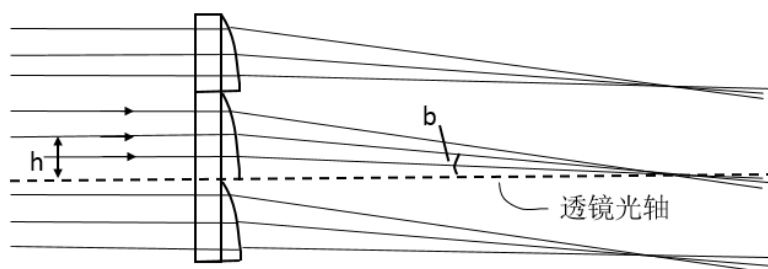


图 3 偏心球面镜

偏转角计算公式：

$$b = at \tan \frac{(n-1)h}{r} \quad (2.2)$$

1.3 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜（Fresnel lens），又称螺纹透镜，是由法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔（Augustin ·Fresnel）发明的，他在 1822 年最初使用这种透镜设计用于建立一个玻璃菲涅尔透镜系统——灯塔透镜。菲涅尔透镜多是由聚烯烃材料注压而成的薄片，也有玻璃制作的，镜片表面一面为光面，另一面刻录了由小到大的同心圆，如图 4 所示，它的纹理是利用光的干涉及衍射和根据相对灵敏度和接收角度要求来设计的，透镜的要求很高，一片优质的透镜必须是表面光洁，纹理清晰，其厚度随用途而变，多在 1mm 左右，特性为面积较大，厚度薄及侦测距离远。

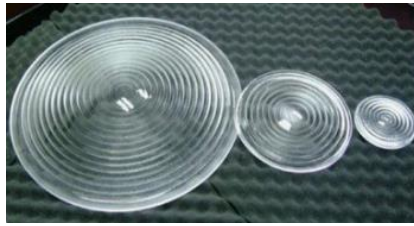


图 4 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜的设计思想是将透镜分成若干个具有不同曲率的环带，使通过每一环带的光线近似会聚在同一像点上。菲涅尔透镜设计原理如图 5 所示，这也是传统透镜到菲涅尔透镜结构的变化过程。菲涅尔透镜的作用主要有两个：一个是聚焦作用；另一个是准直作用。

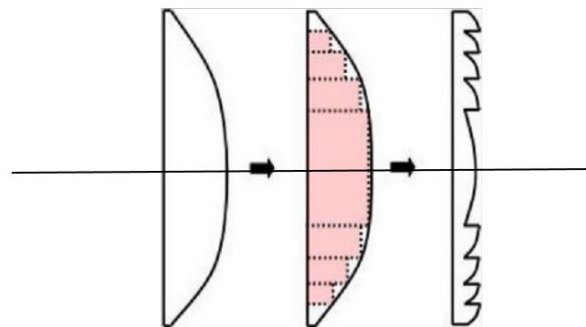


图 5 菲涅尔透镜设计原理图

菲涅尔透镜的分类：

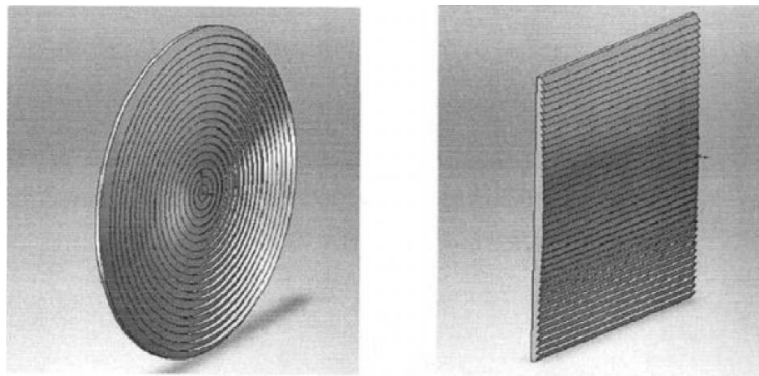
1、从光学设计上来划分，分为正菲涅尔透镜和负菲涅尔透镜。

正菲涅尔透镜：光线从一侧进入，经过菲涅尔透镜在另一侧出来聚焦成一点或以平行光射出，焦点在光线的另一侧，并且是有限共轭。这类透镜通常设计为准直镜（如投影用菲涅尔透镜、放大镜等）以及聚光镜（如太阳能用聚光聚热用菲涅尔透镜等）。

负菲涅尔透镜：和正菲涅尔透镜刚好相反，焦点和光线在同一侧，通常在其表面进行涂层，作为第一反射面使用。

2、从结构上划分，主要有：圆形菲涅尔透镜、菲涅尔透镜阵列、柱状菲涅尔透镜、线性菲涅尔透镜、衍射菲涅尔透镜、菲涅尔反射透镜、菲涅尔光束分离器和菲涅尔棱镜。

圆形菲涅尔透镜和线性菲涅尔透镜如图 6 所示。



(a) 圆形菲涅尔透镜

(b) 线性菲涅尔透镜

图 6 两种不同聚焦方式的平板菲涅尔透镜

在大孔径的照明系统中，常采用菲涅尔透镜(螺纹透镜)来代替单透镜或二次曲面透镜，其优点有：1) 减小透镜的质量和厚度；2) 在一定程度上减小单透镜带来的球差（即不同入射高度的光线，经单透镜球面折射之后，不会聚于同一点的现象）。球差的原理如图 7 所示。

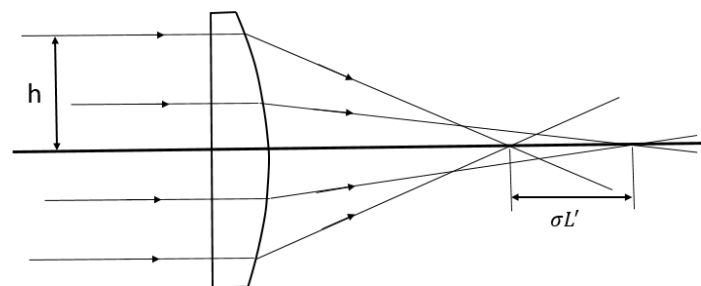


图 7 单透镜球差原理示意图

菲涅尔透镜既可以校正球差，又可以减小透镜的重量和厚度，这在大孔径的照明系统中是非常重要的。基于以上优点，菲涅尔透镜在大孔径照明系统、航空障碍灯、汽车信号灯等灯具中均有大量使用。

菲涅尔透镜设计主要的步骤包括分割环带高度和计算曲率半径，除此之外还有如分角度法和分厚度法等多种菲涅尔透镜设计方法。后面项目会做专门详细的介绍具体设计方法，这里不做赘述。

1.4 全反射透镜

全反射透镜是指一面或多面，运用全反射原理，实现光线收集或分配的透镜元件。全反射透镜广泛应用于照明的各个领域。射灯、准直透镜、航空障碍灯、自行车灯均有使用。

全内反射透镜 (TIR, Total Internal Reflection)，是一种典型的复杂结构光学元件。它一般运用二次曲面，形成全反射面，参与光线的会聚，之后通过复眼透镜或其他透镜形式的组合，最终实现对光线的收集和光通量分配，达到预定的照明效果。如图 8 所示。全内反射透镜原理分为两个部分：中间类似于一个凸透镜，将 LED 小角度光线会聚；边缘利用全反射原理，将 LED 大角度光线转换到所需角度范围内，达到出射均匀的目的。

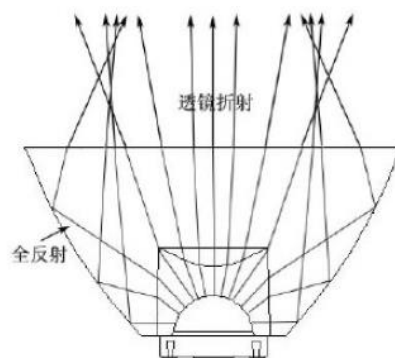


图 8 全内反射透镜

若对全内反射透镜的出光面做某些处理，如将出射介面为平面做成特殊的表面，出射光的角度将发生变化，从而改变光出射均匀性。如图 9-11 所示。也可将其出光介面做成蜂窝状，在透镜的出光面上增加蜂窝阵列，使得出光更加均匀，不需要新的模具，增加出光角度，防止出现芯片镜像，效率将降低 2-3%。如图 12 (a) 和 (b) 对比图所示。

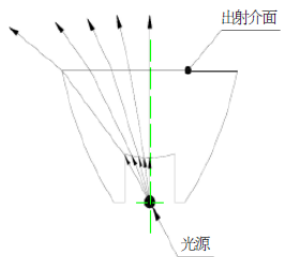


图 9 出射介面为平面

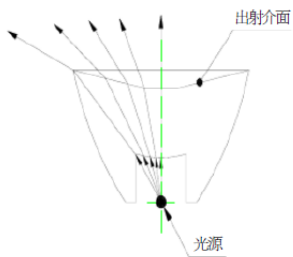


图 10 出射介面为圆锥面

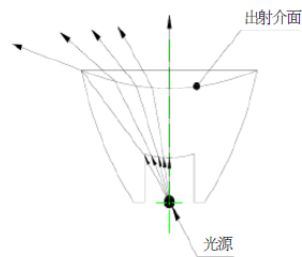
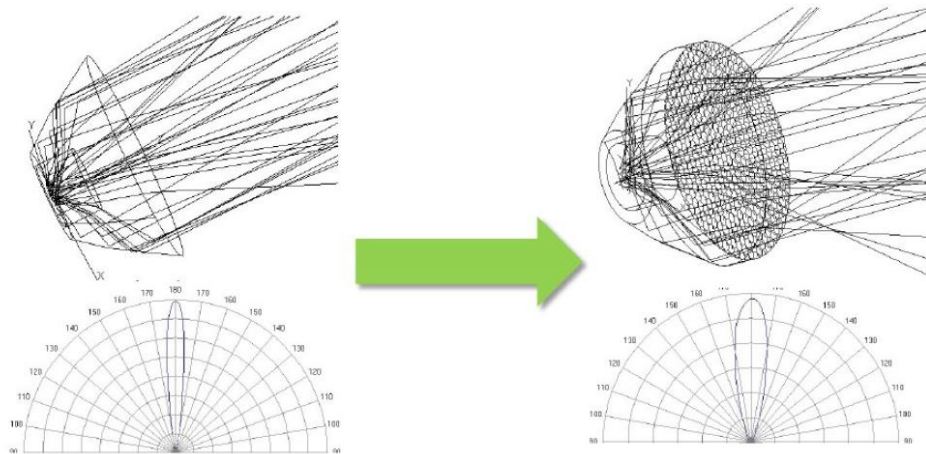


图 11 出射介面为圆弧面



(a) 光束角 15° ，效率 92%

(b) 光束角 25° ，效率 90%

图 12 TIR 蜂窝面出光面与平面出光面光束角和效率对比

1.4 自由曲面透镜

在照明光学设计中，自由曲面透镜的使用也是很常见的。路灯透镜、均匀照明透镜、背光透镜等等，均采用自由曲面实现对光线的有效控制并最终获取符合要求的照度分布或光强分布。

自由曲面透镜设计，后续有专门一项目任务，进行详细介绍其设计方法。

任务二 照明中常用反射器

反射器设计基础理论：

将反射器上任意点（角度 θ ）接收的光源光线反射到与轴线成希望夹角 α 的方向上，换言之，要注定反射器上各区域将光线投射到什么方位，这是设计的第一步。为此，需要下述数据：

1. 光束分布（配光）

用出射光线光强该光线与轴线夹角 α 表示，采用函数式或曲线图都可以；

2. 光源发出光线的光分布（光强分布）

采用从它发出的各条光线与轴线夹角 θ 表示，常用曲线表示，在近似的计算中光源的配光常用余弦分布；

3. 从要求的光束分布的总光通，考虑光源与反射器之间的结构限制等因素确定光源的功率。

计算中遵循光通量的守恒。具体细节如下：

1. 对从光源射向四周空间的光线，要选择合适的角度间隔进行划分，如图 13 所示。

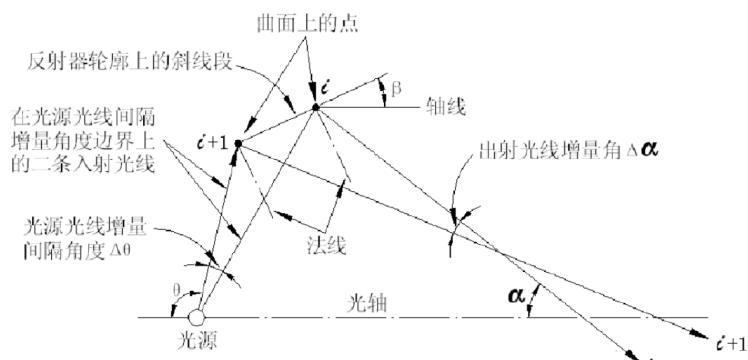


图 13 角度间隔划分

2. 计算在光源光分布和出射光束光分布中各个角度间隔内的立体角；

3. 采用光通增量=光强 $\times$ 立体角增量的公式计算各间隔内的光通，其中光强由光源光分布和出射光束光分布中提供，往往取间隔角度的中值角上的值；

4. 找出光源能提供的光通和光束中需要的光通之差值，得到折换系数，统一二者的差异；

5. 找出光源在某个 θ 角间隔内能提供的光通正好和光束在某个 α 角间隔内需要光通相一致的对应关系，即 $\theta \sim \alpha$ 角内的光线射到 α 角中去的 $\theta \sim \alpha$ 关系。

根据 $\theta \sim \alpha$ 的关系，求出反射器曲面形状，这是计算反射器的第二步。其中包括：

1. 用公式计算光源光线间隔角度中反射面与轴线夹角 β ；

2. 列表写出光源光线间隔角度 θ 和 β 角的正切值；

3. 以光源置放点为原点，光轴（对称轴）为 x 轴，写出从光源发出的各光线间隔角度上光线的方程： $y = \tan \theta x$ ；

4. 设反射器起始于第一点的坐标是 $x_0 y_0$ ，它的斜率为 $\tan \beta_0$ ，则反射器上第一段的折线方程为： $y - y_0 = (x - x_0) \tan \beta$ ；

5. 计算该线段与下一个光线间隔角度的交点 $x_1 y_1$ ，即解下述方程组：

$$\begin{aligned} y_1 - y_0 &= (x_1 - x_0) \tan \beta_0 \\ y_1 &= \tan \theta x_1 \end{aligned}$$

6. 重复过程 5，计算下一个点，不同的是将 x_1y_1 的值作为 x_0, y_0 来处理， β_0 与 $\tan \theta$ 另取新的值；

7. 完成上述全过程就可得到一个需要的反射器曲线。

2.1 二次曲线反射器

二次曲线包括圆、椭圆、抛物线和双曲线。

从圆锥曲线的一个焦点发出的光线，经过圆锥曲线的反射后，得到的反射光线所在的直线，相较于曲线的另一个焦点（抛物线的另一个焦点可看为无穷远点），即：

圆面的光学反射特性：从圆心发出的光线，经圆球表面反射后，仍会聚于圆心；

椭圆面的光学反射特性：从椭圆一个焦点发出的光线，经椭圆表面反射后，会聚于另一个焦点。

抛物面的光学反射特性：从抛物面焦点发出的光线，经抛物面反射后，形成平行光；

双曲面的光学反射特性：从双曲面一个焦点发出的光线，经双曲面反射后，反射光线反向延长线，交于双曲面另一个焦点。

当光源偏离抛物面、椭圆面、双曲面焦点时，光线经反射后，光束发散和会聚情况发生变化。

利用二次曲面反射器的性质，可以实现光线的收集和角度控制，完成光学设计要求不高的一些照明光学设计需求。

2.2 其他反射器设计

简单二次曲面反射器，很难满足越来越高的照明光学设计要求。例如：轨道灯、射灯反射器设计，既要求照度均匀，又要求外形尺寸、轮廓基本不变的情况下，方便实现同一系列灯具，发光角度的改变，比如 16° 到 40° 的变化，此种设计要求可采用如图 14 的鳞甲反射器方案。

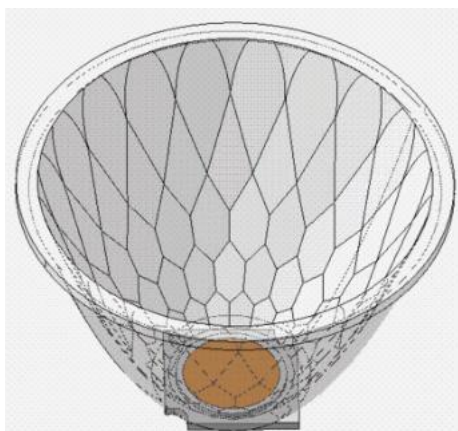


图 14 鳞甲反射器

又如：车灯尾灯的设计，需要形成横向、纵向不同的发光角度，可采用自由曲面反射器实现；车灯前照灯的设计，需要形成非对称的光型要求，也可以采用自由曲面反射器实现。此类反射器的设计较复杂，在后续内容将详细介绍。

2.3 反射器透镜组合形式

反射器与透镜的组合照明系统，也比较常见。

例如，采用全内反射透镜与鳞甲反射器的组合，可提高光通量利用率，并方便在不改变反射器外形尺寸的情况下，修改照明系统的发光角度。

【项目小结】

照明技术中光场分布是通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。

透镜元件和反射元件，已经广泛应用于照明中的各个方面，成为照明设计中不可或缺的一部分。射灯、路灯、自行车灯和汽车车灯等各个方面，都有使用。本项目简要介绍照明中常用的透镜元件和反射元件结构及其各自的光学性能。

【思考与练习】

- 1、照明中常用的光学器件有哪些？
- 2、菲涅尔透镜的设计思想是什么？
- 3、全内反射透镜的特点是什么？
- 4、照明中常用的反射器有哪些？各有什么特点？

项目三 照明光学设计

【知识目标】

- 1、掌握照明中常用光学设计方法；
- 2、了解照明中常用光学器件在不同场合中的应用的的光学设计修正；
- 3、会分析照明光学设计中的照度分布和配光曲线。

【技能目标】

- 1、能利用照明中常用光学器件进行简单的照明设计；
- 2、会选择和应用照明中常用的光学器件。

【任务导入与项目分析】

能源问题是 21 世纪最热门的话题之一，而 LED 在其中扮演着极其重要的角色。为了使 LED 芯片发出的光能够更好地输出，提高 LED 出光效率，得到最大程度地利用，并且在照明区域内满足设计要求，需要对 LED 进行光学系统的设计。其中，在封装过程中的设计被称为一次光学设计，这主要是针对芯片、支架和模粒这三要素的设计，而 LED 之外进行的光学设计被称为二次光学设计，也叫二次配光设计，这也是本项目主要的介绍的内容。

LED 二次光学设计主要考虑的是光通量、光强、照度和亮度，而这些属于非成像光学的研究范围。在非成像光学中，评判系统性能的优劣不再适用于成像光学中的相差理论和成像质量，而是吧光能利用率作为系统的评价标准。如何提高光能利用率也是照明系统的关键问题，如何将 LED 发出的光线最大限度地利用起来并满足照明要求，这就是二次光学设计考虑的范畴。

任务一 全反射透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

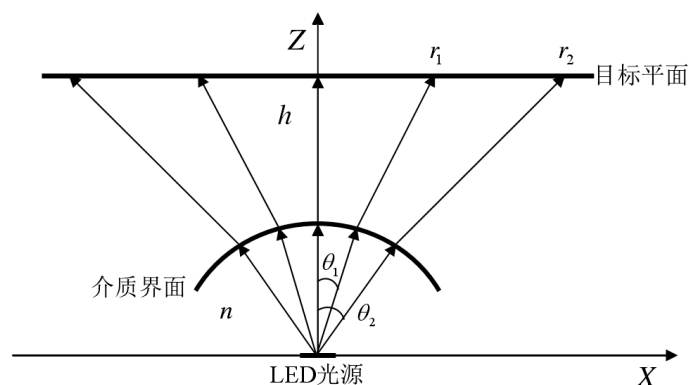


图1 实现照度均匀的透镜设计示意图

1.1 射灯透镜设计

这里以在目标接收平面上实现照度均匀的透镜设计为例，如图1所示。光源位于坐标原点，目标接收面距离原点的高度为 h ，透镜介质的折射率为 n ，光线经过介质界面折射而投射到目标接收面来实现均匀照度的要求。平行于光轴方向（ Z 轴）的出射光线入射到目标接收面的中心，随着出射光线与光轴的夹角逐渐变大，夹角为 θ_1 和 θ_2 的出射光线分别入射到目标接收面上的半径为 r_1 和 r_2 的位置上。因此，合理地分配各光线的走向，即可实现目标接收面上的照度均匀。考虑到与光轴的夹角为 θ_2 的光线入射到目标接收面上半径为 r_2 的位置上，与 Z 轴的夹角小于 θ_2 的光线入射到目标接收面上的位置。因 θ_2 和 r_2 是任选的一条光线，故关系式实际上就决定了光源每条光线的走向。通过能量守恒关系和光的折反射定律就可以得到介质界面的解析式，从而求得满足设计要求的自由曲面。

发光体实际上是一个电磁波辐射源，光学系统可以看作是辐射能的传输系统，波长在380–760nm范围内的电磁波称为“可见光”。研究可见光的测试、计量和计算的学科称为“光度学”，研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科称为“辐射度学”。

可见光是能对人的视觉形成刺激并能被人感受的电磁辐射，因为人们很自然的用视觉受到的刺激程度，即视觉感受来度量可见光。按这种视觉原则建立的表征可见光的量便属于光度学范畴。

光学特性包括描述其发光强弱以及其光强空间分布情况的光度学特性如光通量、发光强度、亮度、光束发散角等，以及描述其颜色（色光LED）或颜色倾向性（白光LED）的色度学特性参数如波长或颜色（光谱特性）、色温、显色指数等。

光源的光度学特性主要包括它发出的光的总量多少、它发出的光在某一个特定方向上的强弱、以及它发出的光强随空间的分布情况等。

全反射透镜是指一面或多面，运用全反射原理，实现光线收集或分配的透镜元件。全反射透镜广泛应用于照明的各个领域。射灯、准直透镜、航空障碍灯、自行车灯均有使用。

全内反射透镜（TIR, Total Internal Reflection），是一种典型的复杂结构光学元件。它一般运用二次曲面，形成全反射面，参与光线的会聚，之后通过复眼透镜或其他透镜形式的组合，最终实现对光线的收集和光通量分配，达到预定的照明效果。如图2所示。全内反射透镜原理分为两个部分：中间类似于一个凸透镜，将LED小角度光线会聚；边缘利用全反射原理，将LED大角度光线转换到所需角度范围内，达到出射均匀的目的。

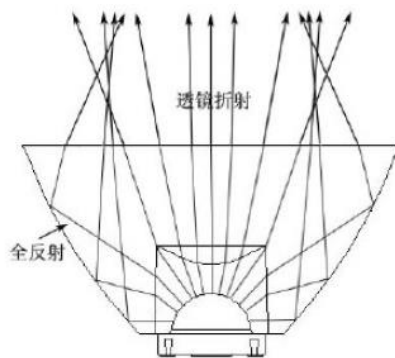


图2 全内反射透镜

若对全内反射透镜的出光面做某些处理，如将出射介面为平面做成特殊的表面，出射光的角度将发生变化，从而改变光出射均匀性。如图 3-5 所示。也可将其出光介面做成蜂窝状，在透镜的出光面上增加蜂窝阵列，使得出光更加均匀，不需要新的模具，增加出光角度，防止出现芯片镜像，效率将降低 2-3%。如图 6 (a) 和 (b) 对比图所示。

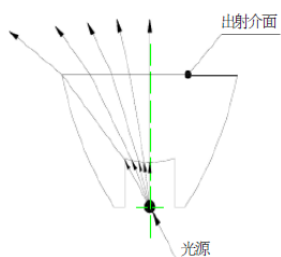


图3 出射介面为平面

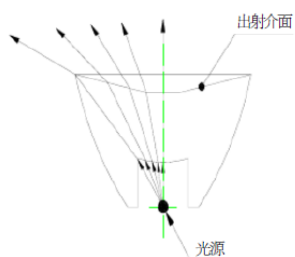


图4 出射介面为圆锥面

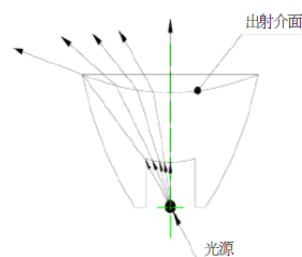
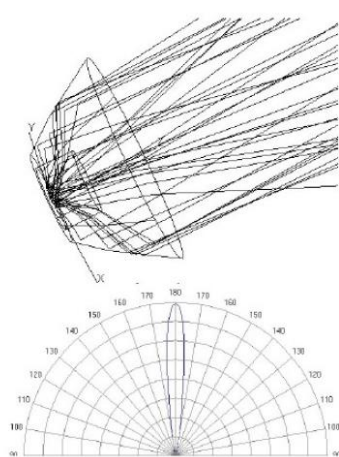
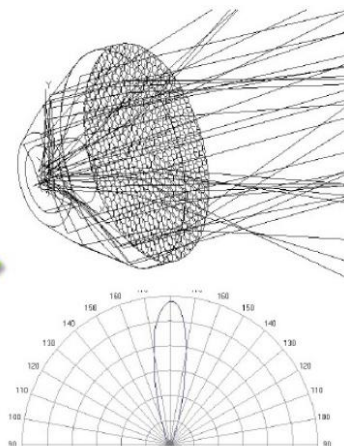


图5 出射介面为圆弧面



(a) 光束角 15°，效率 92%



(b) 光束角 25°，效率 90%

图6 TIR 蜂窝面出光面与平面出光面光束角和效率对比

1.2 自行车前照灯透镜设计

自行车 LED 前照灯配光透镜, 包括 TIR 透镜, 所述 TIR 透镜的中部从后向前依次开有第一通光空腔、及第二通光空腔, 第一通光空腔的后端面正对 TIR 透镜的光源面, TIR 透镜的光源面嵌入安装有 LED 灯珠; 第二通光空腔的前端面开在 TIR 透镜的出光面上, 出光面的轴心与第二通光空腔前端的轴心重合, 出光面上半部分向外凸出形成中心厚边缘薄的外凸半球

面,出光面下半部分向内凹陷形成中心凹陷深边缘薄的内凹半球面。本实用新型采用了凸透镜、凹透镜对光束的会聚和发散作用,并基于棱镜对光束的偏折原理,设计了结构简单、造价低廉的自行车 LED 前照灯配光透镜。

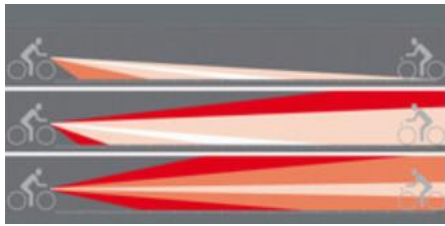


图 7 自行车前照灯

电源接小灯线. 即开小灯时产品点亮. 接雾灯线. 即开雾灯产品点亮. 接发动机线. 即打着火行车灯点亮. 产品特性: 1) 外壳材料: 采用高精密度氧化铝及 6MM 钢化玻璃透镜铸造而成; 2) 外观: 产品的整体外观设计, 表面精细化工艺, 光泽优越等, 适合中档或个性化改装路线车型, 能很好地满足欧美消费者的理念; 3) 散热与功率: 纯铝的散热能力, 仅次于铜, 决定我们的产品设计可以做到很足的功率; 4) 防护等级: 采用纯铝结构, 通过防水硅胶密封, 达到**防护等级 IP68 (3 米水深情况下); 5) 抗震动/抗腐蚀能力: 氧化铝及 6MM 钢化玻璃结构具备很强的抗震动/抗腐蚀能力; 6) 光利用率: 采用 6MM 钢化玻璃, 并经过配光; 采用先进的恒流技术, 出光均匀, 光色饱满, 发光角度, 光色高度保持一致性; 7) 产品执行标准: 欧洲经济委员会 ECE R87 及中国 GB 标准, 汽车昼间行驶灯配光性能; 8) IC 电路的应用: 产品工作时出现过压/低压, 过流, 过热时, 能起到智能调控, 保障产品正常使用
安装指南: a、接后倒车灯(雾灯)并联, 开倒车灯(雾灯)则鹰眼灯开。b、安装位置, 后车牌灯底部。



图 8 自行车前照灯透镜

自行车前照灯 10 米测试面光斑图如图 9 所示。

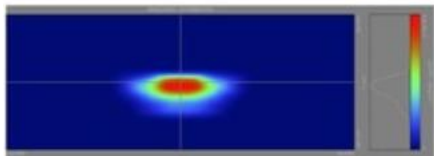


图 9 10m 测试面光斑图

任务二 菲涅尔透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

菲涅尔透镜 (Fresnel lens)，又称螺纹透镜，是由法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔 (Augustin ·Fresnel) 发明的，他在 1822 年最初使用这种透镜设计用于建立一个玻璃菲涅尔透镜系统——灯塔透镜。菲涅尔透镜多是由聚烯烃材料注压而成的薄片，也有玻璃制作的，镜片表面一面为光面，另一面刻录了由小到大的同心圆，如图 4 所示，它的纹理是利用光的干涉及衍射和根据相对灵敏度和接收角度要求来设计的，透镜的要求很高，一片优质的透镜必须是表面光洁，纹理清晰，其厚度随用途而变，多在 1mm 左右，特性为面积较大，厚度薄及侦测距离远。

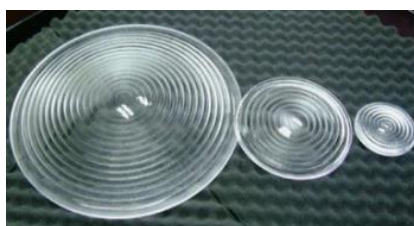


图 10 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜的设计思想是将透镜分成若干个具有不同曲率的环带，使通过每一环带的光线近似会聚在同一像点上。菲涅尔透镜设计原理如图 5 所示，这也是传统透镜到菲涅尔透镜结构的变化过程。菲涅尔透镜的作用主要有两个：一个是聚焦作用；另一个是准直作用。

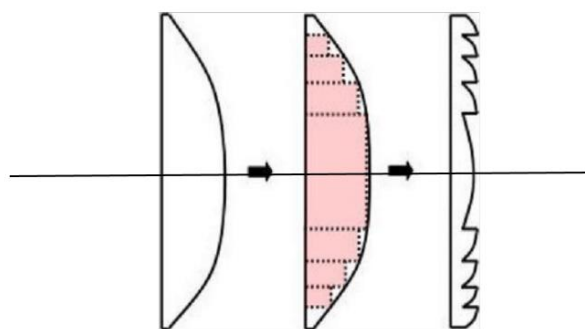


图 11 菲涅尔透镜设计原理图

菲涅尔透镜的分类：

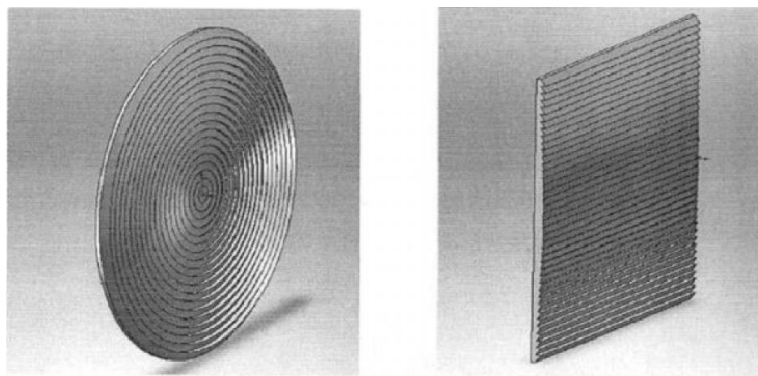
1、从光学设计上来划分，分为正菲涅尔透镜和负菲涅尔透镜。

正菲涅尔透镜：光线从一侧进入，经过菲涅尔透镜在另一侧出来聚焦成一点或以平行光射出，焦点在光线的另一侧，并且是有限共轭。这类透镜通常设计为准直镜（如投影用菲涅尔透镜、放大镜等）以及聚光镜（如太阳能用聚光聚热用菲涅尔透镜等）。

负菲涅尔透镜：和正菲涅尔透镜刚好相反，焦点和光线在同一侧，通常在其表面进行涂层，作为第一反射面使用。

2、从结构上划分，主要有：圆形菲涅尔透镜、菲涅尔透镜阵列、柱状菲涅尔透镜、线性菲涅尔透镜、衍射菲涅尔透镜、菲涅尔反射透镜、菲涅尔光束分离器和菲涅尔棱镜。

圆形菲涅尔透镜和线性菲涅尔透镜如图 6 所示。



(a) 圆形菲涅尔透镜

(b) 线性菲涅尔透镜

图 12 两种不同聚焦方式的平板菲涅尔透镜

在大口径的照明系统中，常采用菲涅尔透镜(螺纹透镜)来代替单透镜或二次曲面透镜，其优点有：1) 减小透镜的质量和厚度；2) 在一定程度上减小单透镜带来的球差（即不同入射高度的光线，经单透镜球面折射之后，不会聚于同一点的现象）。球差的原理如图 7 所示。

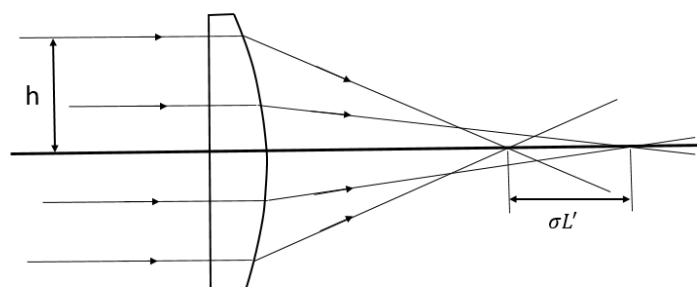


图 13 单透镜球差原理示意图

菲涅尔透镜既可以校正球差，又可以减小透镜的重量和厚度，这在大口径的照明系统中是非常重要的。基于以上优点，菲涅尔透镜在大口径照明系统、航空障碍灯、汽车信号灯等灯具中均有大量使用。

菲涅尔透镜设计主要的步骤包括分割环带高度和计算曲率半径，除此之外还有如分角度法和分厚度法等多种菲涅尔透镜设计方法。

任务三 鳞甲反射器设计

在灯具设计中,特别是开发投光灯、轨道灯等类型灯具时,经常会遇到系列化设计问题。在不修改基本外形结构的情况下,要想获得不同发光角度、照度均匀,提出了一种通过鳞甲片改变出光角度的反射罩设计方案,包括鳞片参数的计算、基面合理分隔方法、实际仿真模拟。

3.1 反射器基面设计

反射罩基面设计主要是针对光源中心与反射罩顶面距离 H 、反射罩出光面开口直径 D ,以及反射曲线的设计,如图14所示。

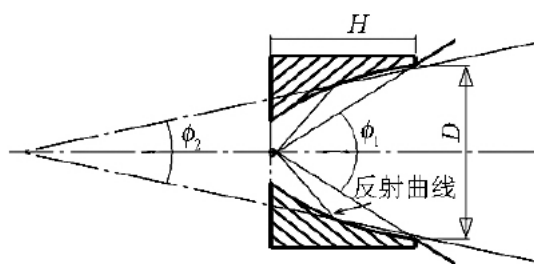


图14 基面设计

其中 H 与 D 共同决定溢散光出光角 ϕ_1 。反射曲线决定光线通过反射后出光角 ϕ_2 。本文设计基于抛物线型反射罩。反射曲线选用抛物线型,光源置于焦点处,反射后出光角度 ϕ_2 近似零度。溢散光出光角度 60° ,保证大部分光线经过鳞甲面反射后不会再次反射,同时溢散光出光角不宜过大,以保证光能利用率。

3.2 鳞甲反射器设计

光源出射光线通过抛物线型基面条件下球面鳞甲反光片反射,出射光线角度改变如图15所示。图中 O 为坐标原点, S 为光源,处于抛物线焦点位置。光源发出任意方向小角度光线入射光线1、入射光线2分别与抛物线母线交于 A 、 B 两点。 SN 为 $\angle ASB$ 的角平分线,出射光线2与 Y 轴平行。出射光线1与出射光线3夹角为 β ,入射光线1与入射光线3夹角为 θ 。3条入射、出射光线的角平分线延长线共同交于 M 点,该点为近似交点, θ 角取值越小,3条延长线越趋于一点。 α 角为入射、出射光线1角平分线与入射、出射光线3角平分线之间的夹角。同一基面下鳞甲片设计由上述角度决定,最终确定 M 点坐标与鳞甲片半径 R 即可。

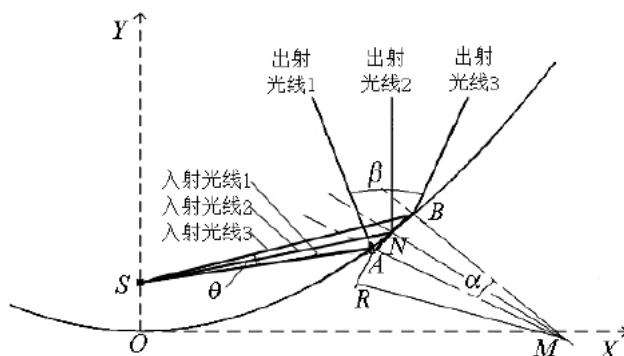


图15 鳞甲片反射

其中 θ 为基面分割角度,以球面作为鳞片面型时采用等角度划分法。 β 为出射光角度,该角度根据设计辐照强度分布要求确定。鳞甲匀光原理与复眼匀光原理相似,可将不均匀宽

光束转化为均匀光斑。图 15 中 θ 角度内的光线，通过鳞甲面反射到整个照明面上，最终照明区域为所有鳞甲面反射照明的叠加。由于 θ 角度很小，可假设每个鳞甲反射照明均匀，则最终叠加照明效果也均匀。因而基面分隔份数越多，光斑照度均匀性越好。但分隔份数过多，会使鳞甲片交界处产生杂光增多，导致光效降低，需要对此特性进行分析，找出光能利用率与匀光效果之间的平衡点。

3.2.1 鳞甲片半径与球心位置计算

图 15 中单个鳞甲片反射光线可由边缘光线计算得出出射光线角度分布。即由 θ 角与 α 角，可确定 β 角，三个角度已知两者即可计算得出第三个角度。鳞甲片反射可简化为球形鳞甲反射点切平面反射光线，不同入射光线简化为同一入射光线与反射面法线夹角不同。两个鳞甲切面夹角即为两条角平分线夹角。

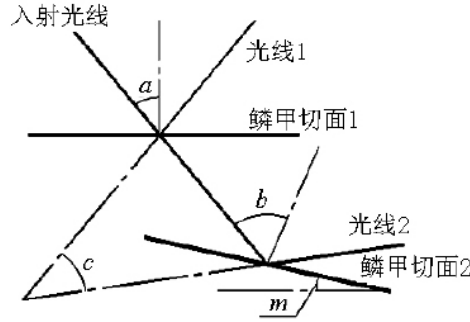


图 16 鳞甲反射简化图

图 16 中 a 为入射光线与鳞甲切面 1 法线夹角； b 为入射光线与鳞甲切面 2 法线夹角； c 角为出射光线夹角； m 角为鳞甲切面夹角。由图 16 可知，鳞甲切面夹角 $m = b - a$ ，又出射光线夹角 $c = 2b - 2a$ ，由此可知 $m = 1/2 c$ ，从而图 15 中 α 、 θ 、 β 角度关系为

$$\alpha = \frac{1}{2} (\beta - \theta) \quad (3.1)$$

如图 15 建立坐标，光源 S 位于抛物线焦点。设图 15 中 A 点坐标为 (x_a, y_a) ，抛物面方程为 $2py = x^2$ ， OA 、 OB 夹角为 θ ，设 B 点坐标为 (x_b, y_b) ，则 AB 两点间距为

$$L = \sqrt{(x_a^2 - x_b^2) + (y_a^2 - y_b^2)} \quad (3.2)$$

图 15 中出射光线 2 仍保持与 Y 轴平行，需保证圆弧在 N 点处与反光罩抛物线相切，同时切面重合，因而实际圆弧球心不在 A 、 B 点处出射光线与入射光线角平分线交点处，但是偏差很小，相较于光源面积对于发散角度影响可以忽略。因此在后续鳞甲面半径与球心位置计算中假设球心位于 N 处入射光 2 与出射光 2 角平分线上，且最终鳞甲面既在 N 点与抛物面相切，同时经过 A 、 B 两点。

根据边缘光线与基面交点 A 、 B 两点间距，角平分线夹角 α ，估算小曲面曲率半径为

$$R = \frac{L}{2\sin\alpha} \quad (3.3)$$

与 B 点坐标同理求得 N 点坐标为 (x_n, y_n) ，设角平分线 NM 所在向量为 $(-1, \frac{p}{x_n})$ ，该向量可由抛物线切线法向量公式求得，设 M 点坐标为 (x_m, y_m) ，则可以求出圆心 M 坐标为 $(\frac{pR}{\sqrt{p^2 + x_n^2}} + x_n, \frac{x_n R}{\sqrt{p^2 + x_n^2}} + y_n)$ 。

3.2.2 鳞甲片圆周切割角度

光线经单个鳞甲片反射，圆周方向与基准面母线方向由于像差的产生，圆周方向照明角度相较母线方向会较小，因而鳞甲片两方向分割角度需要根据模拟仿真调整，找到合适比例。

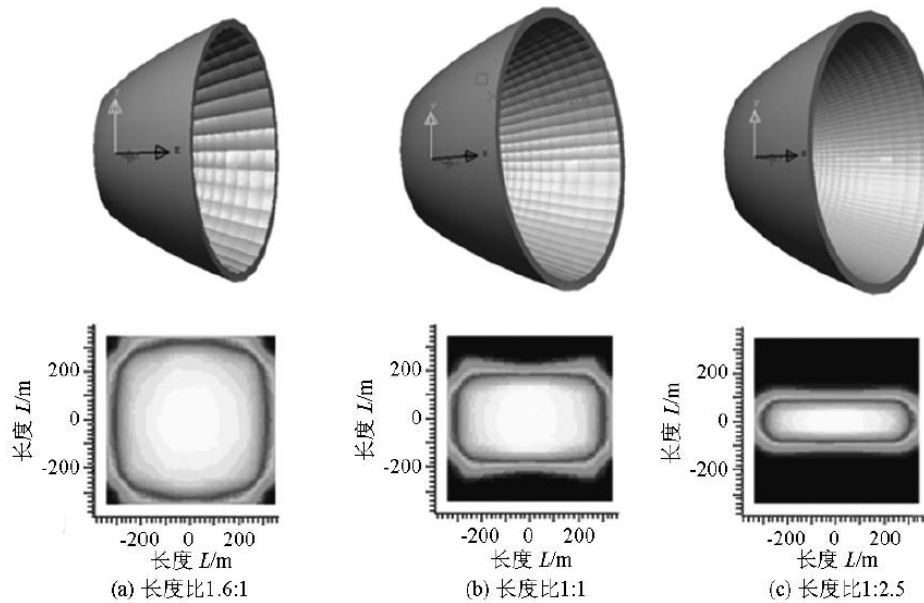


图 17 鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度分隔对比

图 17 中以 20° 匀光鳞甲片反射罩，照目目标 1 m 处半径 700mm 圆形区域为例，采用矩形鳞甲分隔方式。图 17 (a) 鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为 1.6:1，最终照明区域为目标区域，且在区域内基本均匀。图 17 (b) 鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为 1 : 1，照明区域成矩形。图 17 (c) 鳞甲片圆周方向与基面母线方向长度比为 1 : 2 . 5，照明区域为细长矩形。由于同一圆周鳞甲片最终照明为图示单个鳞甲片照明区域围绕目标区域中心旋转一周叠加的照明效果，中右两种圆周分割方式经旋转叠加后，势必造成最终光斑的中心照度增加，边缘照度降低，造成光斑不够均匀。经过仿真验证，该种角度下，一般圆周分割鳞甲长度为母线方向鳞甲片宽度的 1 . 6 倍左右可以得母线圆周两方向到最为对称的照度结果。不同角度下该比值关系需要根据实际情况通过仿真调整比例关系。

3. 2. 3 鳞甲片阵列结构设计

鳞甲反射片的阵列结构同时影响发散角和发光强度分布，采用合理的微结构排布方式可以显著提高匀光效果。本文设计鳞甲结构采用球面结构，常用排布方式有矩形、菱形、六边形等，如图 18 所示。

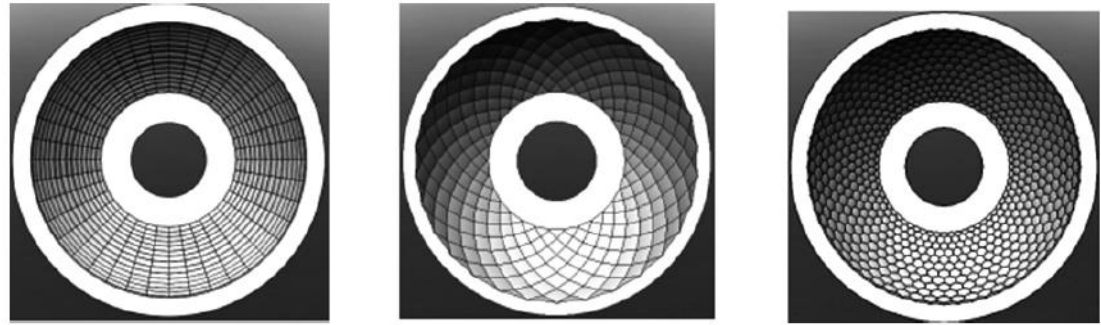


图 18 排列方式

鳞甲反光器出光面为圆形，最终照明区域也为圆形区域。不考虑像差情况下，不同阵列

结构鳞甲片形状与单个鳞甲片反光后照明区域轮廓形状相同，因而鳞甲片越接近圆形，则最终匀光效果越好。

3.3 仿真效果

分别建立三种鳞甲面反射罩，并在出光口径 1000mm 处分别设置 350mm×350mm，750mm×750mm，1200mm×1200mm 接收屏，三种尺寸接收屏分别对应 20°、40°、60° 发散（FWHM）角 1 m处照明尺寸。同时设置远场接收器，最终进行光线追迹，经过鳞甲面反射，照度均匀性显著提高。在图 19 中观察照度图可以发现，随着鳞甲反射罩发散角度

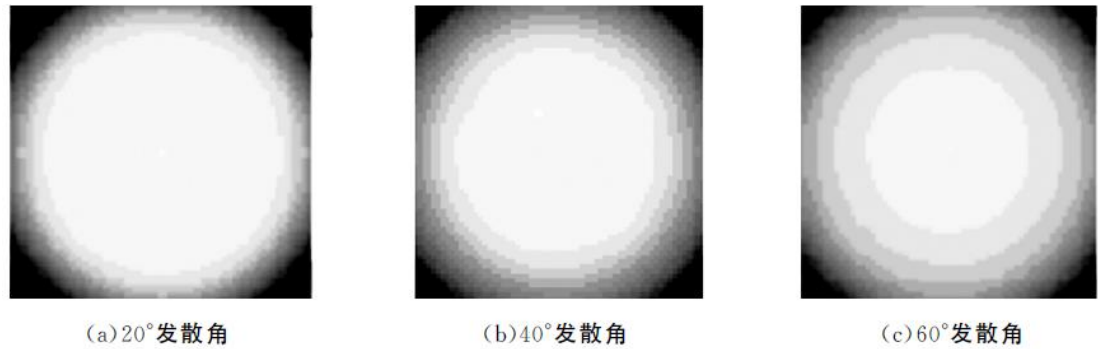


图 19 20°、40°、60° 模拟结果

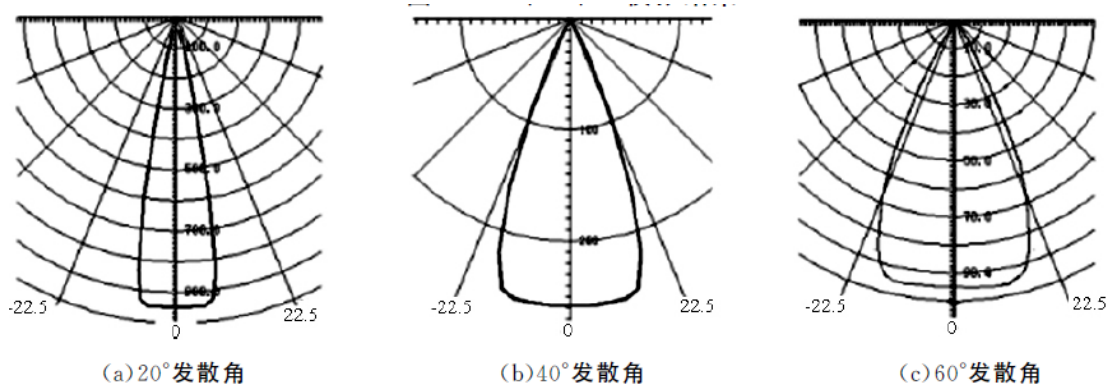


图 20 强度分布

增加，匀光效果逐渐变差。这是由于随角度增加部分光线需经过两次反射才能够从反射罩出光面出射，且大角度下经过单个鳞甲片反射光斑像差增大，照明区域趋近鹅蛋形状，经叠加中心照度较边缘强。图 20 分别为三种发散角对应光强分布，三种角度下匀光效果与光能利用率见表 1。

表 1 系统仿真结果

结果 发散角/(°)	最大光强 I/cd	光通量 Φ/lm	光效 /%	照度均匀 性/%
20	1120	106.55	76.11	89.12
40	260	117.05	83.61	87.44
60	75	126.21	90.18	81.62

合理设计鳞甲结构，配合基面特性，能够更好解决系列产品匀光特性，为解决系列化产品问题以及均匀照明提供了新的解决方案。

任务四 自由曲面透镜设计

任何光源都是有尺寸的，点光源只是针对相对尺寸较小的光源而采取的近似办法，是一种理想化光源。但是，面向点光源的光学设计仍然有其必要的研究意义，是面向扩展光源的光学设计的基础。由于光源的相对尺寸很小，故认为从光源其他部分发出的光与从光源中心射出的光之间的差别可忽略不计。所以，面向点光源的光学二次设计方法其实质就是：只处理从光源中心射出的光线。设计所要完成的任务就是将每一条光线经过折射(或反射)投射到指定方向或指定位置。因此，问题的关键就在于：如何确定每一条光线所要投射的方向或位置来实现所要求的光场分布。

4.1 基于点光源的照度均匀自由曲面透镜设计

1. 提出设计的目标与要求

使用一个朗伯分布的 LED 光源，使光源发出的光经过透镜后折射到距离为 $h=3\text{m}$ 的目标接收面上，形成一个半径为 $3\sqrt{3}\text{ m}$ 的照度分布均匀的圆形光斑，即在 $r \leq 3\sqrt{3}\text{ m}$ 的范围内照度 $E=E_c$ ，而当 $r > 3\sqrt{3}\text{ m}$ 时 $E=0$ 。

2. 编写程序，建立实体模型

根据本项目任务一中提到的设计方法，在 MATLAB 编程软件中编写程序实现算法。设定初始值为透镜高度 $H=15\text{mm}$ ，求出自由曲面在 $X\text{-}Z$ 平面内的曲线的离散点坐标，如图 21 所示。然后将这些离散点坐标导入三维制图软件 SolidWorks 中，拟合成实体模型，如图 22 所示。

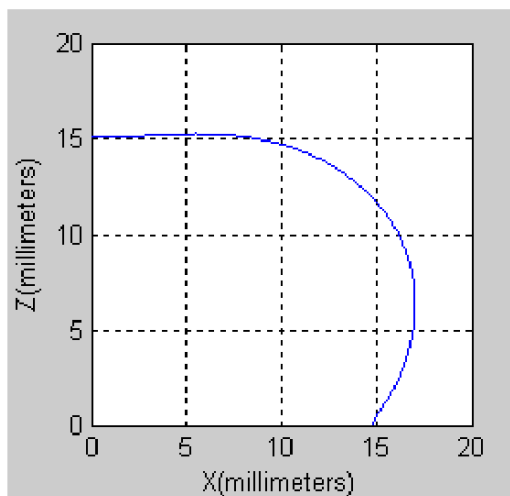


图 21 透镜外形轮廓曲线图

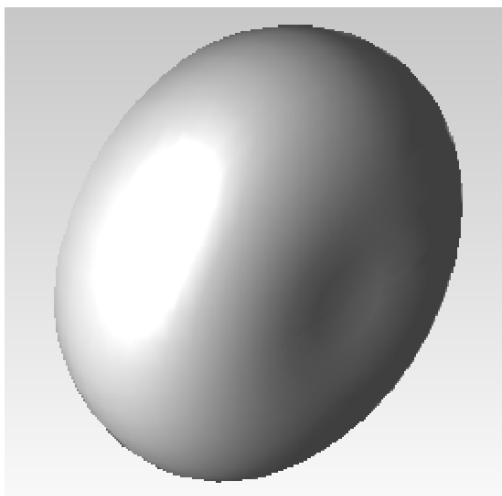


图 22 透镜实体模型

3. 光学仿真，得出模拟效果

将得到的实体模型导入 TracePro 软件中进行光线追迹仿真，得到该模型照明目标面上的照度分布图，如图 23 所示。

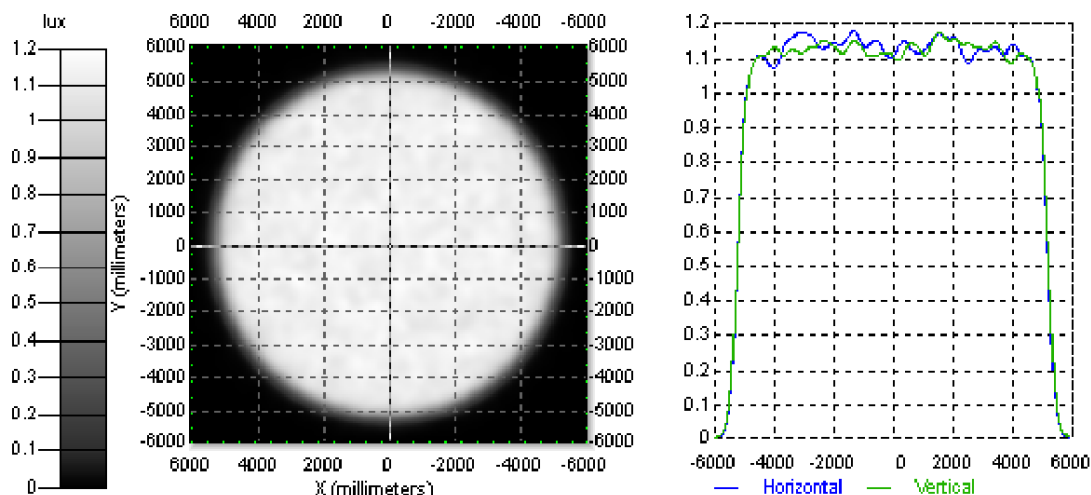


图 23 透镜仿真照度分布图

仿真结果的数据：光源总光通量为 100lm，接收面上半径为 $3\sqrt{3}$ m 的目标照明区域内接收到的光通量为 96.01lm，即光能的利用率为 96.01%；并由照度分布图可见，在目标照明区域内，照度分布的均匀度达到 95%以上。因此，设计的透镜自由曲面是符合设计要求的。

4.2 基于点光源的小角度均匀照明系统设计

1、设计原理

透镜设计的原理如图 24 所示，由于整个系统是关于 Z 轴旋转对称，因此图中只表示出系统剖面的一半。光源位于坐标系的原点，光线接收面距离光源的高度为 h，透镜介质的折射率为 n，光线经过介质界面的折反射后投射到目标接收面上。

设计中，将光源发出的光线分成两部分，与 Z 轴夹角较小的光线经过曲面 1 和曲面 4 后投射到目标接收面上，与 Z 轴夹角较大的光线经过曲面 3、曲面 2 和曲面 4 后投射到目标接收面上。考虑到过多的设计自由度会大大增加系统设计的难度，我们将透镜的顶部曲面 4 设定成一个水平面，将曲面 3 设定成一个竖直面，因此曲面 1 和曲面 2 就是设计的主要对象，这样就有效地降低了系统的复杂度。设计过程中，分别对曲面 1 和曲面 2 进行设计。

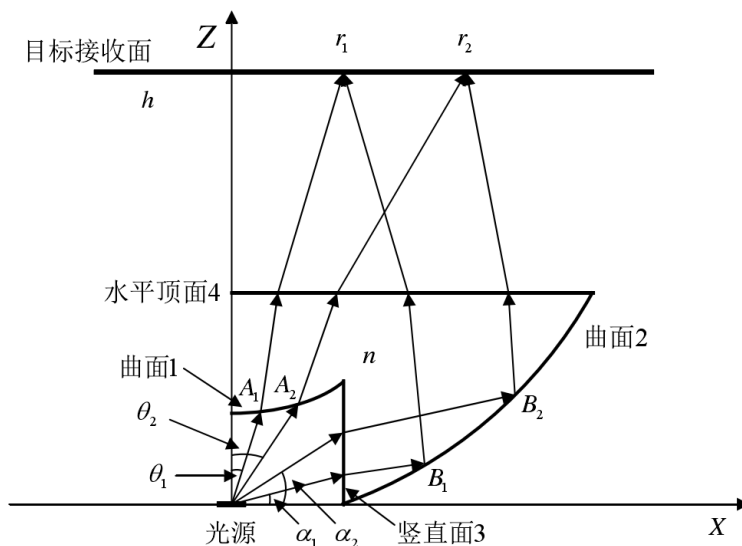


图 24 系统设计的原理示意图

2、编程实现算法，建立实体模型

设计目标：使用一个朗伯分布的 LED 点光源，使光源发出的光经过配光器后投射到距离为 $h=3\text{m}$ 的目标接收面上，形成一个半径为 $r=0.4\text{m}$ 的照度分布均匀的圆形光斑，即实现角度约为 7.5° 的小角度均匀照明。

根据上述的设计原理，并结合步进法的设计方法，在 MATLAB 编程软件中编程实现算法。设定初始值：透镜的高度为 11.9mm ，曲面 1 的初始点为 $(0, 0, 2.7\text{mm})$ ，曲面 2 的初始点为 $(9.10772\text{mm}, 0, 8\text{mm})$ ，求出自由曲面在 X-Z 平面内的曲线的离散点坐标，如图 25、图 26 所示。然后将这些离散点坐标导入三维制图软件 SolidWorks 中，拟合成实体模型，如图 27 所示。

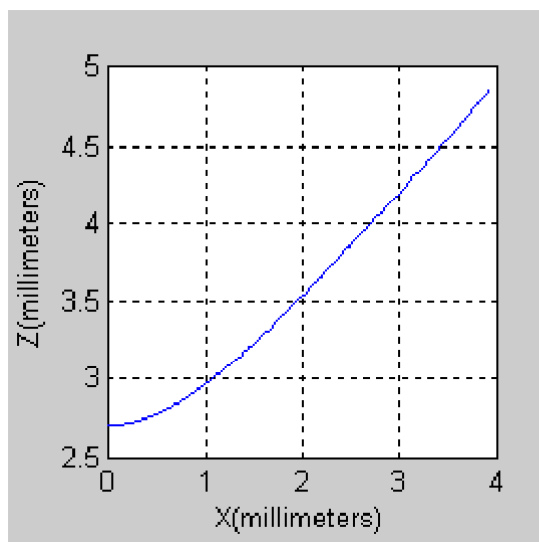


图 25 曲面 1 的剖面曲线图

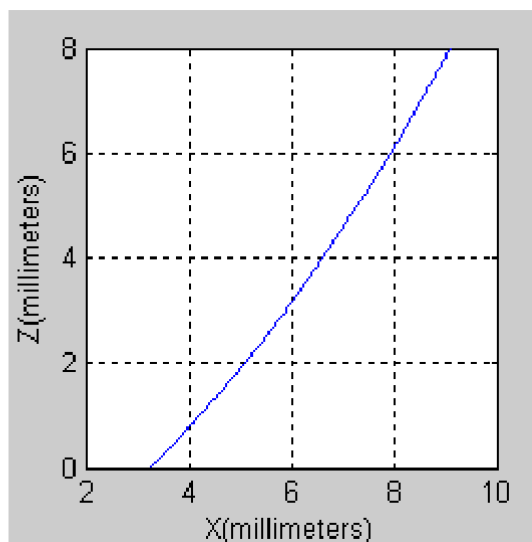


图 26 曲面 2 的剖面曲线图

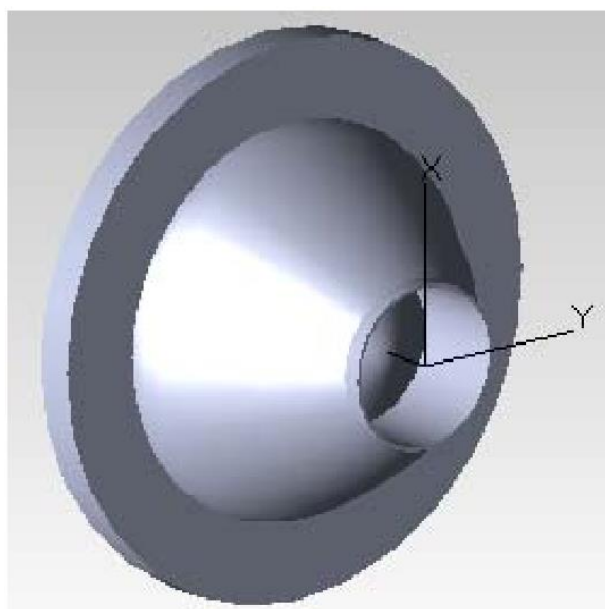


图 27 透镜实体模型

3. 光学仿真，得出模拟效果

将得到的实体模型导入 TracePro 软件中进行光线追迹仿真，得到该光学系统模型的照明目标面上的照度分布，如图 28 所示。

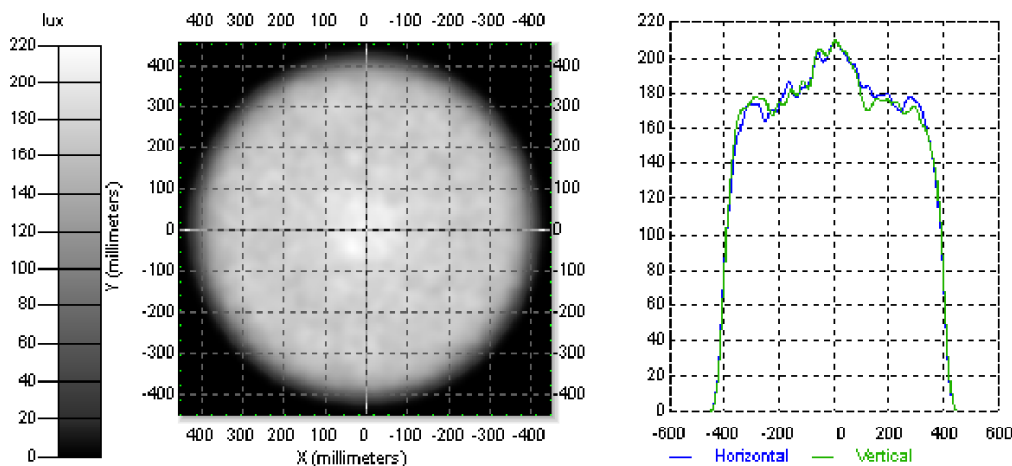


图 28 照明面上的照度分布图

模拟结果数据：光源的总光通量为 100lm，接收面上半径为 0.4m 的目标照明区域内的光通量为 85.428lm，即光能的利用率为 85.428%；由照度分布图可看出，在目标照明区域内，照度分布的均匀度达到 85%以上。应该说，设计的透镜系统是符合小角度均匀照明的设计要求的，达到了预期的设计目标。

4.3 基于点光源的自由曲面光学设计的问题

LED 作为新一代的绿色光源，正在被广泛大量地应用于当代照明领域中，包括路灯、汽车前照灯、景观灯等领域。在二次光学设计过程中将 LED 视为理想点光源，通过相应的能量对应关系能够设计出效果较好的光学配光器模型，这是目前针对单颗 LED 光源所采取的一种普遍的光学设计方法。

现实中，不论什么样的光源都是有尺寸的，而点光源只不过是为了便于光学设计而采用的理想化光源，是基于光源的相对尺寸（相对于配光器件来说）较小的情况下的一种近似。因此，基于点光源的自由曲面光学设计存在的问题就是：当 LED 光源的相对尺寸变大，即 LED 光源的尺寸和配光器的尺寸较为接近，若这时再将 LED 光源近似成点光源来进行二次光学设计，则设计出来的光学模型与预期效果会出现较大的差距。

这里以实现目标接收面上照度均匀的透镜设计为例来说明，LED 光源的尺寸（即直径）与透镜的尺寸（即高度）之间的示意图如图 29 所示。图中 D 表示为 LED 光源的直径， H 表示为透镜的高度。

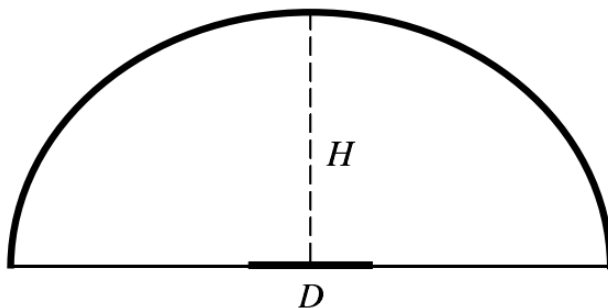


图 29 LED 光源与透镜的尺寸示意图

透镜设计采用基于点光源的照度均匀自由曲面透镜设计，即前面 4.1 节所提到的透镜设计，透镜自由曲面的截面轮廓曲线如图 21 所示，透镜的实体模型如图 22 所示。将基于点光

源的透镜实体模型导入 TracePro 光学软件中，设定不同的透镜与光源的尺寸比 $H:D$ ，然后分别进行光线追迹仿真，查看结果。

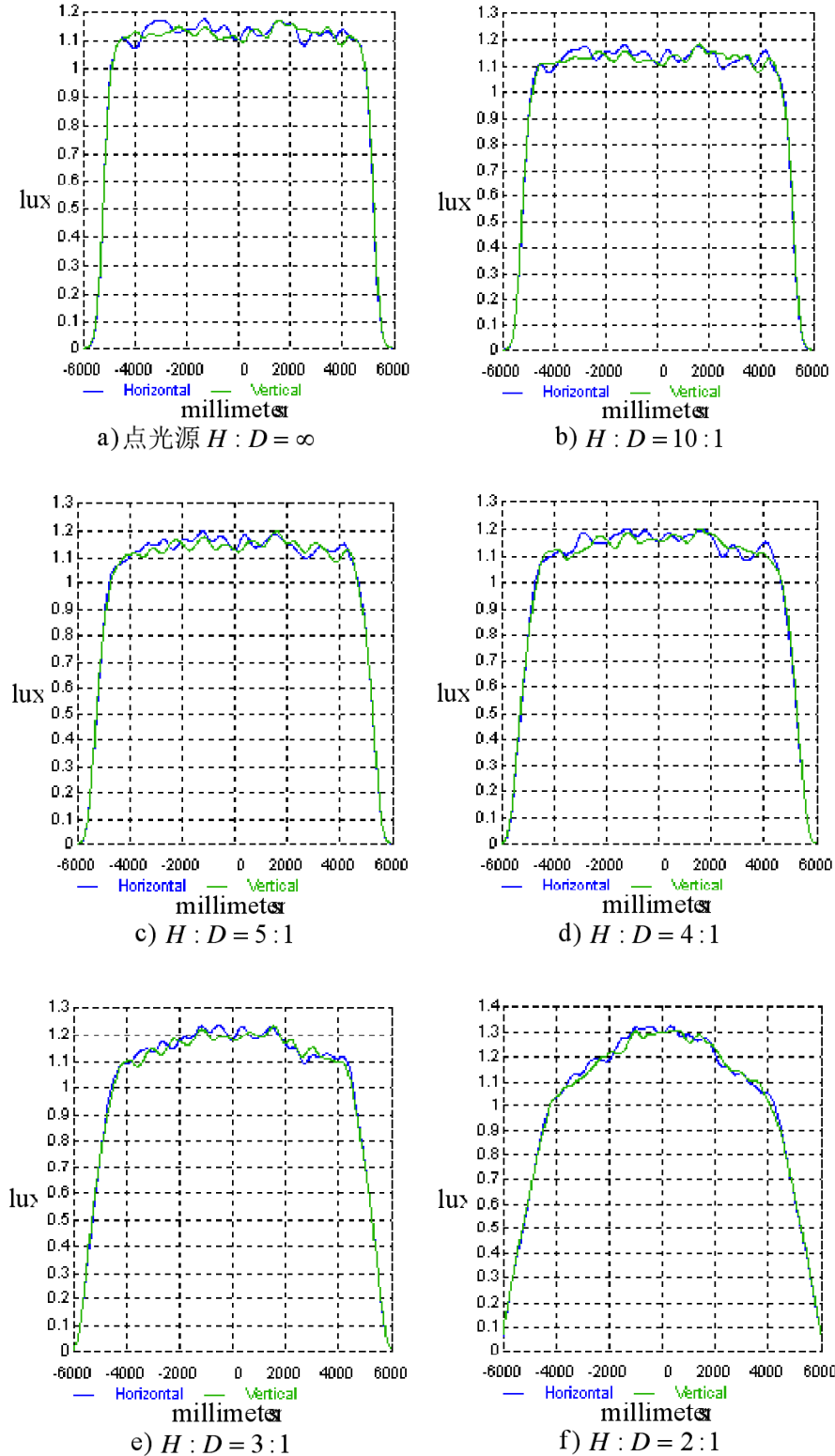


图 30 不同的透镜与光源尺寸比下所得的照度分布曲线图

图 30 为透镜与光源的尺寸比 $H:D$ 分别为 ∞ 、10、5、4、3、2 时所得到的照度分布曲线图。由图可以看出，当 $H:D=5$ 或者更大时，目标照明区域内的照度分布曲线相对比较水平，

即照度均匀度很高，达到均匀照度的要求，故这种情况下可以将 LED 光源视为点光源来处理，其结果的误差是在可允许的范围之内；而当透镜与光源的尺寸比例进一步逐渐接近时，照度分布曲线的水平性就会逐渐下降，比如当 $H:D=4$ 时，由图可见，目标照明区域的边缘地带已出现照度下降的趋势，而当 $H:D=3$ 、 2 时，照度下降的范围从目标区域的边缘延伸到内部，且目标区域外的照度值也变大，光线所投射到的区域已超出了设计所要求的目标照明区域，特别是当 $H:D=2$ 时，产生了比较大的偏差，偏离了最初的设计要求。

由此可见，基于 LED 点光源的光学自由曲面设计是针对 LED 光源的相对尺寸较小时的一种理想化处理方式，当透镜与光源的尺寸比较大时这样的近似处理尚且使用，而当透镜与光源的尺寸比较小时这样的近似处理就会带来误差，偏离设计目标。因此，基于 LED 点光源的二次光学设计方法在面对 LED 扩展光源时是无法直接套用的，必须寻找新的理论来支持 LED 扩展光源的光学设计。

【项目小结】

本项目从光度学基本知识的角度详细介绍了关于 LED 照明光学设计技术，主要就二次光学设计即 LED 配光问题进行了具体阐述，涉及全反射透镜设计、菲涅尔透镜设计、鳞甲反射器设计和自由曲面透镜的设计。当然，照明中二次光学设计涉及的远不止这些设计，本项目也就举这些特例详细介绍和分析 LED 的配光步骤，其他类型的配光设计可以参考这些设计方法，举一反三。

【思考与练习】

- 1、全反射透镜设计的思路是什么？
- 2、射灯透镜设计的步骤是什么？
- 3、导光管的设计原理是什么？
- 4、菲涅尔透镜的设计方法有哪些？各有什么特点？
- 5、简述鳞甲反射器的设计步骤？
- 6、自由曲面透镜的设计原理是什么？设计步骤如何？

四 照明散热系统设计

【知识目标】

- 1、掌握照明中灯具的散热基础知识；
- 2、了解照明中常用散热器件材料；
- 3、会分析应用照明系统中散热部分的设计。

【技能目标】

- 1、能合理选择散热途径和散热材料；
- 2、会散热系统设计。

【任务导入与项目分析】

LED 是一种能够将电能转换成光能的半导体，目前大功率 LED 的电光转换效率仅为 20%-30%，有 70%-80% 的电能转换成了热能。如果热量不能有效地散出去，会引起 LED 芯片结温升高，导致发光波长红移、光衰加剧、寿命缩短等问题。结温过高会导致输出光通量下降，影响光效；结温过高还会使荧光粉效率下降，影响色温。因此散热问题是 LED 照明普及和发展的最大瓶颈，如何提高大功率 LED 的散热能力是实现产业化急需解决的关键技术之一。

任务一 散热基础

散热的目的是控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的工作环境条件下不超过标准及规范所规定的最高温度。最高允许温度的计算应以元器件的应力分析为基础，并且与产品的可靠性要求以及分配给每一个元器件的失效率相一致。

1.1 热量传递的三种基本方式

热量传递一般有三种基本方式：热传导；热对流；热辐射。

1、热传导

热传导是介质内无宏观运动时的传热现象，其在固体、液体和气体中均可发生，但严格而言，只有在固体中才是纯粹的热传导，而流体即使处于静止状态，其中也会由于温度梯度所造成的密度差而产生自然对流，因此，在流体中热对流与热传导同时发生。

物体或系统内的温度差，是热传导的必要条件。或者说，只要介质内或者介质之间存在温度差，就一定会发生传热。热传导速率决定于物体内部温度场的分布情况。

热量从系统的一部分传到另一部分或由一个系统传到另一个系统的现象叫传热。热传导是三种传热模式（热传导、对流、辐射）之一。它是固体中传热的主要方式，在不流动的液体或气体层中层层传递，在流动情况下往往与热对流同时发生。

在导体中，因存在大量的自由电子，在不停地作无规则的热运动。一般晶格震动的能量较小，自由电子在金属晶体中对热的传导起主要作用。所以一般的电导体也是热的良导体，但是也有例外，比如说钻石(Diamond)——事实上，珠宝商可以通过测钻石的导热性来判断钻石的真假。在液体中热传导表现为：液体分子在温度高的区域热运动比较强，由于液体分子之间存在着相互作用，热运动的能量将逐渐向周围层层传递，引起了热传导现象。由于热传导系数小，传导的较慢，它与固体相似；不同于气体，气体分子之间的间距比较大，气体依靠分子的无规则热运动以及分子间的碰撞，在气体内部发生能量迁移，从而形成宏观上的热量传递。如图 1 所示。

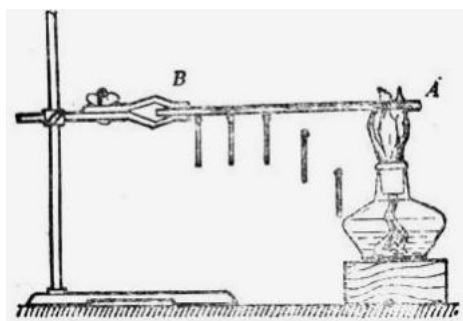


图 1 热传导

2、热对流

热对流是指热量通过流动介质，由空间的一处传播到另一处的现象。火场中通风孔洞面积愈大，热对流的速度愈快；通风孔洞所处位置愈高，热对流速度愈快。热对流是热传播的重要方式，是影响初期火灾发展的最主要因素。影响热传导的主要因素是：温差、导热系数和导热物体的厚度和截面积。导热系数愈大、厚度愈小、传导的热量愈多。如图 2 所示。



图 2 热对流

3、热辐射

物体因自身的温度而具有向外发射能量的本领，这种热传递的方式叫做热辐射。热辐射虽然也是热传递的一种方式，但它和热传导、对流不同。它不依靠媒质把热量直接从一个系统传给另一系统。热辐射以电磁辐射的形式发出能量，温度越高，辐射越强。辐射的波长分布情况也随温度而变，如温度较低时，主要以不可见的红外光进行辐射，在 500℃ 以至更高的温度时，则顺次发射可见光以至紫外辐射。热辐射是远距离传热的主要方式，如太阳的热量就是以热辐射的形式，经过宇宙空间再传给地球的。

热传递的三种基本方式之间的联线与区别如图 3 所示。

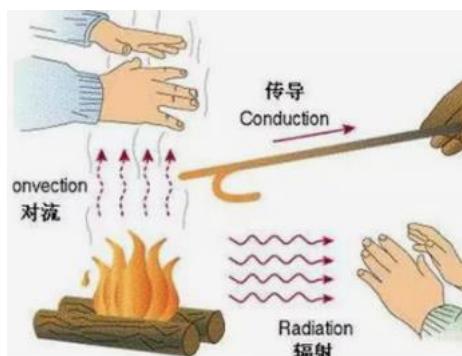


图3 热传递的三种基本方式

1.2 散热设计术语

散热设计中常提到的名词对象有：单板，散热器，风扇，导热界面材料，换热器，热管，均温板，冷板等，下面一一作简单介绍。

1、单板 (PCB, PWB)

PCB (PrintedCircuit Board)，中文直译为印制电路板，又俗称单板，板子等。它是重要的电子部件，电子元器件通过单板互相连接。常说的“走线”、“布线”等，就是元器件之间的信号线如何在单板内部排布。

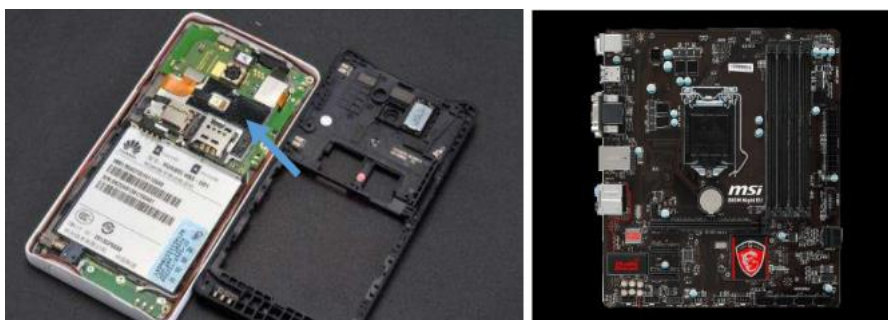


图4 单板

2、散热器 (heatsink, finstack)

通常由铝铜等制成，大多为翅片形状，作用是在一定空间内与外界实现更大的接触面积，同时兼顾对流体产生的阻力。广义上来讲，所有可以把热源的热量吸走，随后散逸到周围环境中的结构件，都可以称为散热器。如图5所示。



图5 散热器

3、风扇，风机 (fan, blower, airmover)

风扇是用来加速空气流动的部件。又称为风机。分为轴流风扇和离心风扇。

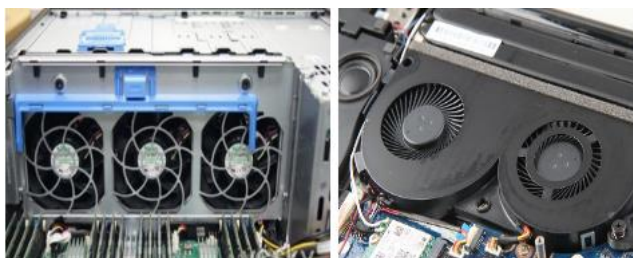


图 6 风扇

4、导热界面材料 (thermal interface material, tim)

刚性固体接触面间会产生细小的缝隙,可以用柔性的介质填充这些缝隙,连接导热路径。如图 7 所示。导热界面材料是这类材料的统称,有导热衬垫 (thermal pad), 导热硅脂 (thermal grease)、导热凝胶 (thermal gel) 等。如图 8 所示。

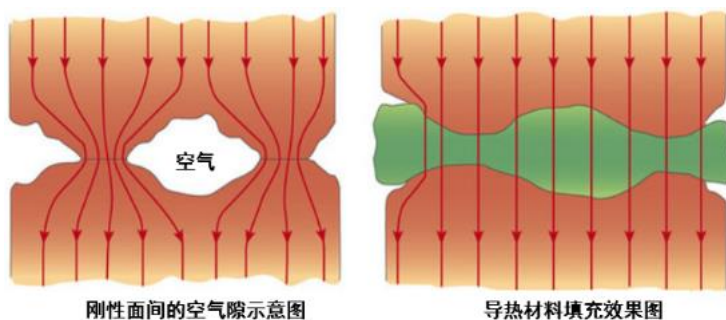


图 7 导热界面



(a) 导热垫片

(b) 导热硅脂

图 8 导热材料

5、换热器 (heat exchanger)

换热器可以认为是散热器的一种。换热器通常不直接冷却热源。如下图所示的电脑 CPU 液冷模块,其中的水排就是典型的换热器。这一换热器直接冷却的不是发热源,而是用来冷却热源的液体工质,即它是间接低冷却热源。如图 9 所示。



图 9 换热器

6、热管和均温板 (heatpipe and vapor chamber)

热管和均温板都是利用相变换热传热效率高这一特点制作出的高传热效率的部件。在高功率密度的场景中，应用广泛。热管可以简单地理解为一根导热系数非常高的管，VC 则可简单地理解为一块导热系数非常高的板。如图 10 所示

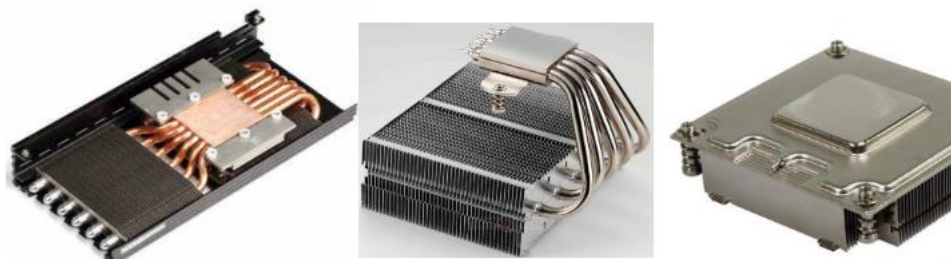


图 10 热管

7、冷板 (coldplate)

冷板一般指液冷设计中装配在发热源上方的、内部有液体工质流过的结构件。消费电子如 CPU, GPU 等，冷板尺寸一般较小，又称为冷头。如图 11 所示。

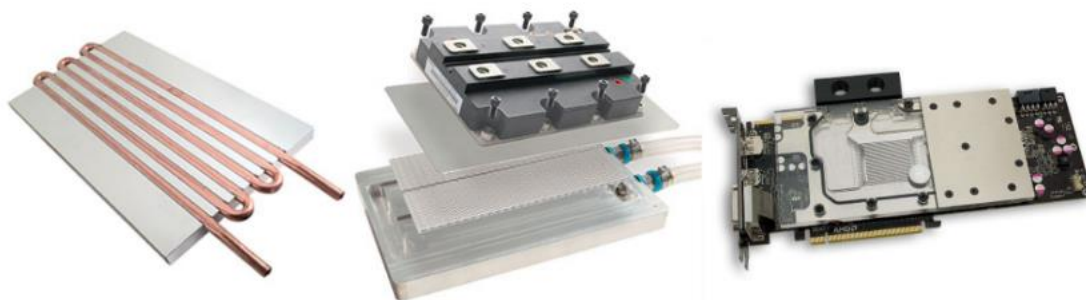


图 11 冷板

任务二 散热途径与材料选择

散热的目的是控制产品内部所有电子元器件的温度,使其在所处的工作环境条件下不超过标准及规范所规定的最高温度。最高允许温度的计算应以元器件的应力分析为基础,并且与产品的可靠性要求以及分配给每一个元器件的失效率相一致。

1.1 照明灯具的散热途径

现在大街上随处可见的 LED 显示屏,还有装饰用的 LED 彩灯以及 LED 车灯,处处可见 LED 灯的身影,LED 已经融入到生活中的每一个角落。依据不同的封装技术,其散热方法亦有所不同,而 LED 各种散热途径方法大致有以下几种:

- (1) 从空气中散热;
- (2) 热能直接由 Systemcircuitboard 导出;
- (3) 经由金线将热能导出;
- (4) 若为共晶及 Flipchip 制程,热能将经由通孔至系统电路板而导出。

一般而言,LED 芯片(Die)以打金线、共晶或覆晶方式连结于其基板上(Substrate of LED Die)而形成一 LED 晶片(chip),而后再将 LED 晶片固定于系统的电路板上(Systemcircuitboard)。因此,LED 可能的散热途径为直接从空气中散热,或经由 LED 晶粒基板至系统电路板再到大气环境。而散热由系统电路板至大气环境的速率取决于整个发光灯具或系统之设计。

然而,现阶段的整个系统之散热瓶颈,多数发生在将热量从 LED 晶粒传导至其基板再到系统电路板为主。此部分的可能散热途径:其一为直接藉由晶粒基板散热至系统电路板,在此散热途径里,其 LED 晶粒基板材料的热散能力即为相当重要的参数。另一方面,LED 所产生的热亦会经由电极金属导线而至系统电路板,一般而言,利用金线方式做电极接合下,散热受金属线本身较细长之几何形状而受限;因此,近来即有共晶(Eutectic)或覆晶(Flipchip)接合方式,此设计大幅减少导线长度,并大幅增加导线截面积,如此一来,藉由 LED 电极导线至系统电路板之散热效率将有效提升。

经由以上散热途径解释,可得知散热基板材料的选择与其 LED 晶粒的封装方式于 LED 热散管理上占了极重要的一环,后段将针对 LED 散热基板做概略说明。以上就是 LED 技术的相关知识,相信随着科学技术的发展,未来的 LED 灯会越来越高效,使用寿命也会由很大的提升,为我们带来更大便利。

1.2 照明灯具的散热材料

LED 作为卤素灯、白炽灯和荧光灯照明系统的替代品,其照明市场的发展将是很可观的。LED 的增长归功于 LED 在适应性、寿命和效率方面优于传统照明形式。LED 有更多的设计自由度,提供非常长的使用寿命,并且也相当高效,能将大部分能量转换成光,从而最大限度地减少散发的热量。

然而,LED 仍然在半导体结处产生明显的热量。这种热量可对 LED 产生不利影响,因此必须进行散热,以确保实现固态照明(SSL)的真正优势。LED 通常通过色温进行分类,市场上有很多不同颜色的变体。

假如 LED 的工作温度发生变化,其色温也会发生变化。例如,白光的温度升高,可导致 LED 发出较暖的 CCT。另外,如果在相同阵列中的 LED 上存在芯片温度的变化,则可能发射一定范围的色温,从而影响终端照明产品的质量和外观。

如表 2 所示,保持 LED 的正确芯片温度不仅可以延长使用寿命,而且还可以产生更多的光;因此,可以只需要少数量的 LED 就可以实现期望的效果。工作温度的升高可能会对 LED 的性能产生负面的影响,但这种影响是可以恢复的。然而,如果超过结温,特别是高于 LED

(120—150℃) 的最高工作温度，则可能会发生不可恢复的影响，导致完全失效。

表 2 CREE XLamp LED 性能与温度的关系

温度(°C)	光通量 (lm)	电压 (V)	功效 (lm/V)
25	196.1	3.237	86.5
60	182.2	3.149	82.7
85	172.3	3.087	79.7

如表 2 所示，CREE XLamp LED 性能随温度的变化而变化。

实际上，工作温度与 LED 的寿命直接相关；温度越高，LED 寿命越短，如图 12 所示。LED 驱动器也是同理，其寿命是由电解电容器的寿命决定。通过计算，可以确定，工作温度每下降 10℃，电容器的寿命增加一倍。因此，确保有效的散热管理可为 LED 阵列提供一致的质量、外观和使用寿命，从而为不断发展的行业开辟进一步应用的机会。

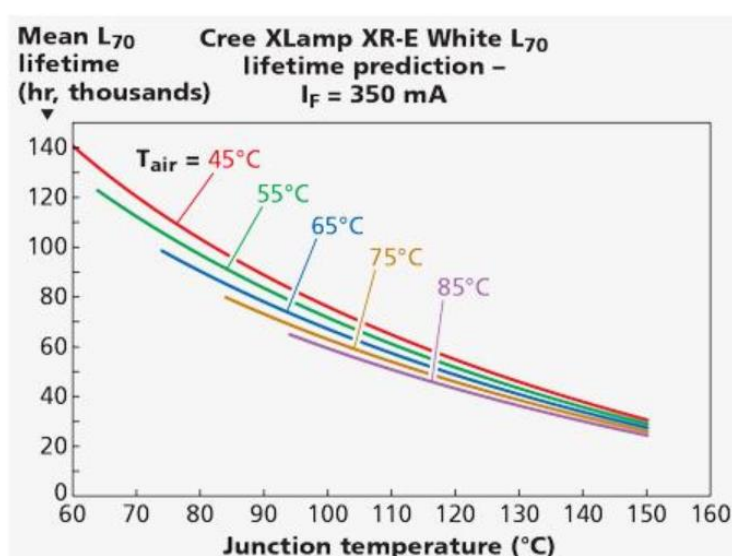


图 12 Cree XLamp LED 在 350 mA 驱动下的结温与寿命间的关系

有许多方法来改善 LED 产品的散热管理，必须选择正确类型的导热材料，以确保实现所需的散热效果。在材料领域，产品范围从提供散热和环境保护的导热封装树脂到用于提高导热效率的导热接口材料。

导热接口材料是设计用于填充器件和散热器之间间隙的化合物，从而降低两者之间边界处的热阻。这种材料会加快热损失，降低设备的工作温度。固化产品也可用作粘合材料。实例包括硅氧烷 RTV（室温硫化）或环氧化合物。材料的选择通常取决于所需的粘合强度或工作温度范围。

导热的另一个选择是使用导热封装树脂。这些产品设计用于提供对设备的保护，同时还让设备内产生的热量散发到周围环境中。在这种情况下，封装树脂变成散热器，并将热能从设备传导出。这些产品可用于 LED 装置上，并且还可以根据所选择的颜色帮助从单元内进行光提取。

封装树脂还包括使用导热填料；然而，可以改变所使用的基础树脂、硬化剂和其它添加剂，以提供广泛的选择，包括环氧树脂、聚氨酯和硅树脂化学品。不同的化学材料将提供一系列的属性，每个都应该考虑到最终的应用需求。

封装材料选择：例如，聚氨酯材料提供优异的柔韧性，特别是在低温下，相对于环氧树

脂类来说是一个主要优点。有机硅树脂也可以在低温下提供这种灵活性，并提供优异的高温性能，超过其他现有的化学成分。有机硅产品通常也更昂贵。

环氧树脂类非常坚固，在各种恶劣环境中提供卓越的保护。它们是具有低热膨胀系数的刚性材料，并且在一些情况下可以在产品中加入一定程度的柔性。封装树脂的加入可以为各种应用产生大量的具有定制性能的产品；因此，建议与相关材料供应商详细讨论应用。

不管选择的散热产品的类型如何，还有一些关键属性也必须考虑。这些可以是相当简单的参数，例如设备的操作温度、电气要求或其他限制条件，如粘度、固化时间等。

其他参数对于设备来说更为重要，而仅仅一个数值可能不足以选定正确的产品。热导率是一个主要的例子。热导率单位为瓦 / 米 · 度 ($W/m \cdot K$)，代表材料的热传导能力。堆积导热率值建立在大多数产品数据表上，可以很好地反映预期的热传导水平，从而可以比较不同的材料。

但是，只依赖堆积导热率值不一定会有最有效的热传递。

热阻的单位是 $K \cdot m^2 / W$ ，是热导率的倒数，它考虑了界面厚度。尽管度量标准取决于接触面和施加的压力，但是可以遵循一些一般规则来确保热阻值最小，从而将传热效率最大化。

例如，相比在界面处使用的传热化合物，金属散热器具有更高的热导率，所以只需要使用薄薄的一层该化合物。在这种情况下，增加厚度只会增加热阻。使用图 3 中的公式，就可以比较出使用 $50 \mu m$ 的热胶和 0.5 毫米厚度的导热垫产生的热阻差异。因此，较低的界面厚度和较高的热导率可以最大程度地改善热传递。

了解热阻公式也是非常必要的，它是选择最佳热材料是所必需的。如图 13 所示。

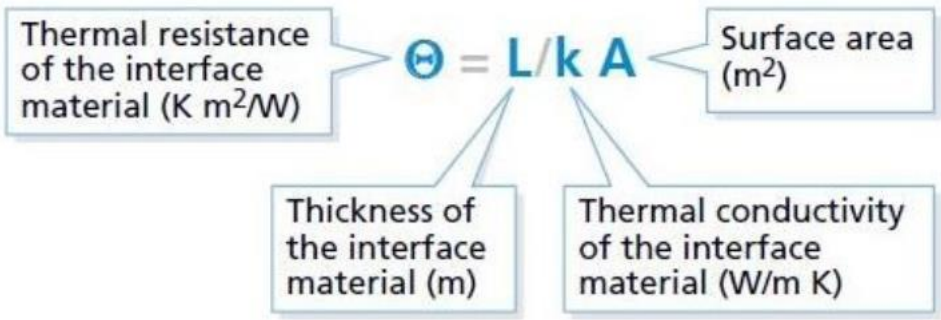


图 13 热阻公式的含义

我们在产品选择中需要考虑另一个重要因素 — 散热管理材料的应用。无论是封装化合物还是界面材料，导热介质中的任何间隙都会导致散热速率的降低。

对于导热封装树脂来说，成功的关键是确保树脂可以在单元周围流动，包括进入任何小间隙。这种均匀的流动有助于去除任何气隙，并确保在整个单元中不产生热量。为了实现这种应用，树脂需要正确的导热性和粘度。通常，随着树脂的导热性增加，粘度也增加。

对于界面材料来说，产品的粘度或应用时可能的最小厚度对热阻有很大的影响。因此，与具有较低堆积导热率、较低粘度的产品相比，高导热性、高粘度的化合物虽然不能均匀地扩散到表面上，但是具有较高的耐热性和较低的散热效率值。为了将传热效率最大化，用户需要解决堆积导热率、接触电阻、应用厚度和工艺。

表 2 突出了需要考虑这些要求。通过测量使用中的发热装置的温度，比较散热的潜在差异。这些结果是基于一名终端用户的工作得出的，其所有产品都是热界面材料，使用相同厚度，使用相同的方法。

表 2 CREE XLamp LED 导热接口材料特性与温度的关系

产品序号	体积传热系数 (W / m ² ·K)	设备温度 (°C)	温度降低 (°C)
没有接口	N/A	30	N/A
1	12.5	22	27
2	1.0	24	20
3	1.4	21	30
4	4.0	23	23

从表中可以清楚地看出，较高体积热导率 12.5 W / m²·K 与较低的 1.4 W / m²·K 相比，不一定会有更有效的散热。这个原因可能是加工方法不适合该产品、该产品不易于应用、或者该产品不是为该特定应用设计的。无论什么原因，它突显了产品应用和产品选择的重要性；通过找到这两个参数的正确平衡，可以实现最大的传热效率。

回顾图 12 “LED 性能与寿命”中的原始数据，并以上述结果为例，可以得出结论：散热管理材料的使用和正确选择很重要。举表 2 中的产品 #2。在测试应用程序中，将工作温度降低了 20%。如果对所讨论的 LED 实现类似的降低百分比，则通过将工作温度从 85°C 降低至 68°C，效率可以大大提高，类似地，寿命从 95000 小时提高到 12 万小时。这是一个很大的改进。

然而，当您把上面的情况与表 2 中的产品 #4 进行比较时，通过降低更多的工作温度，可以将效率提高大于 3%，寿命从 95000 小时增加到 14 万小时。因此，通过选择正确的产品并使用最佳工艺，用产品 #4 代替产品 #2 时，寿命可以进一步提高 15—20%。

随着电子工业的迅速发展，更具体地说在 LED 应用中，材料技术也必须满足越来越高的散热要求。该技术现在也被转移到封装化合物中，为产品提供更高的填料负载，从而提高导热性以及改善流动性。

任务三 散热系统设计

目前大功率 LED 灯主要散热技术有散热片、热管、均温板、辐射涂覆层、导热膏、导热垫片等。散热片是利用扩大的表面积将热对流散发到环境中，影响散热片散热性能的因素有散热片形状、翅片数量、间距、尺寸大小、倾斜角度，散热片的材料以及加工工艺等，也是最常用的散热技术，本文中模型灯具就是采用散热片来散热的。热管是利用冷凝液相的循环变化，将 LED 发出的高热量导出并散发掉。一般情况下热管冷端与散热片配合使用，来达到更好的散热效果。均温板与热管的原理类似，只是热管是一维单向传热，而均温板为面传热，具有二维性，使整个散热器表面温度均匀。辐射涂覆层是在散热器外表面涂覆散热涂料，提高辐射率，使热更有效的辐射出去。而导热膏与导热垫片是为了减小接触热阻。

3.1 热分析工具

热分析软件能够比较真实地模拟系统的热状况，能够在产品设计阶段对其进行热仿真，确定出模型中温度的最高点。如果超过许用温度，需对散热措施进行改进，使其达到使用的要求。这样可减少设计成本、再设计和再生产的费用，提高产品的一次成功率。

目前热分析软件多种多样，主要有 ANSYS、FLUENT、EFD、ICEPAK 及 FloTherm 等。

1) 从操作性上来讲，EFD 嵌入 PRO/E、SW、CATIA 软件中，该软件模型建立比较方便，设置简单，对于工程中的粗略计算比较有用，但是该软件占用系统资源较多，网格不宜划分过多，计算精度也不高。

2) 从适用性上来讲，ICEPAK 嵌入了 ANSYS WB12.1 中，能够处理一般复杂的曲面，模型导入功能得到了相当大的提升，软件操作简单，与 EFD 一样，不需要手动计算流态，可以处理复杂网格，计算速度快。

3) 从电子散热传统来讲，FloTherm 比 ICEPAK 更广，长期占据电子热分析市场，但是该软件处理曲面较难。对于做 LED 灯具设计者来说，模型处理是一个关键问题。

4) 从专业上来讲，ANSYS 和 FLUENT 是学术和论文的首选软件，它们讲求从理论精确计算。ANSYS 软件是基于有限元的方式，计算结果精度高，适用于理论基础较高者使用，可以方便的实现手动编程和优化设计。

基于上述比较，我们一般采用 ANSYS 软件进行热分析。

3.2 大功率 LED 灯的热分析

对一款大功率 LED 灯为模型进行研究，运用 ANSYS 软件对该灯具进行热仿真分析，分析步骤为：建立简化模型、设置边界条件、划分网格并计算。

1、灯具物理模型

选用浙江某 LED 公司研制的一款大功率 LED 隧道灯作为研究模型，如图 14 所示，该灯具由 LED 灯珠、灯盖、皮垫、反光镜、电路板、散热片及电源等组成。



图 14 LED 隧道灯结构外形



图 15 LED 灯珠外形

其中，灯珠如图 15 所示，属于集成式封装结构。每个灯珠封装 9 个 GaN 蓝光芯片，三串三并连接起来，芯片表面涂有荧光粉进行光补偿，用环氧树脂将芯片进封装，并用银胶将其固定于铜热沉上，加装透镜，用金线连接电极。热沉与线路板通过导热硅胶相连，线路板与散热片通过散热片四边上的螺钉固定，为减小接触热阻，线路板与散热片中间层也涂覆导热硅胶。

2、灯具热网络模型

由灯具结构可分析该 LED 灯的散热途径主要有 3 个：

- 1) 芯片—荧光粉层—环氧树脂—透镜—环境；
- 2) 芯片—金线—支架—线路板—导热硅胶—散热片—环境；
- 3) 芯片—银胶—铜热沉—导热硅胶—线路板—导热硅胶—散热片—环境。

由于封装用的环氧树脂热导率只有 $0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ，在这里做绝热处理。另外金线的面积很小，其传热效果微乎其微，所以主要的散热途径为第三个，即芯片发出的热量由热沉、导热硅胶、线路板、导热硅胶传导到散热片上，再由散热片以对流方式进入空气中。

依据上述分析的主要散热途径来对模型进行简化：将 LED 灯珠透镜简化为长方体以减小计算量；将芯片与热沉间的银胶简化为 0.1 mm 的薄板；灯珠与散热片之间的导热硅胶简化为 0.3 mm 的薄板。简化后的结构如图 16 所示，其热网络图如图 17 所示。

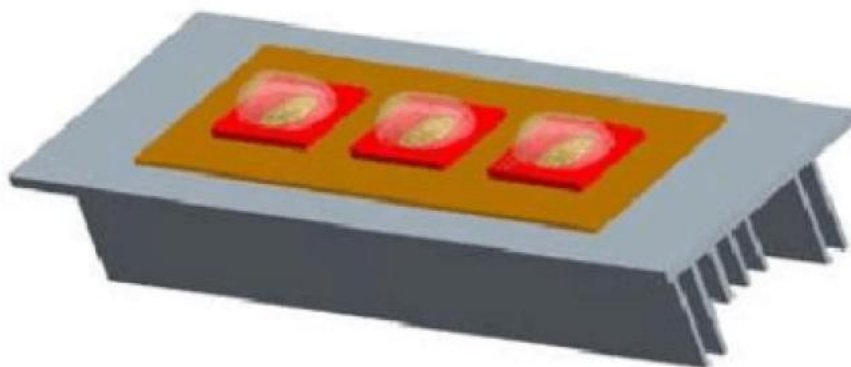


图 16 简化结构

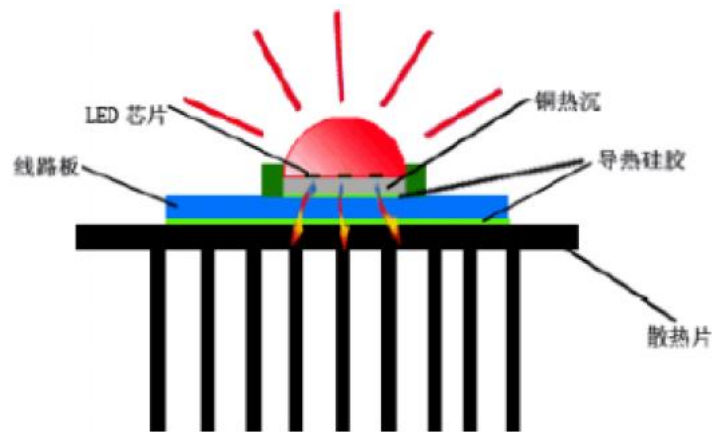


图 17 LED 等热网络图

3、灯具热分析

然后根据灯具的运用场合和实际工作情况来确定边界条件如下：

- 1) 每个芯片功率为 1.5 W，发光效率为 20%，所以每个芯片发热功率为 1.2W，即将每个 source 的 total heat 定义为 1.2 W。
- 2) 该灯具为隧道灯，且最高温度不会超过 100℃，故不考虑太阳辐射。
- 3) 在实际使用过程中，该灯具直接安装在外界空气中，属于自然对流情况，故定义箱体 6 个面均为 opening，并假设环境温度为 25 ℃。

参考实验结果及相关材料手册，确定各材料特性如表 3 所示。

表 3 材料导热系数表（单位：W/(m·k)）

材料	银胶	铜	线路板	导热硅胶	散热片	皮垫	透镜
导热系数	5	340	10	5	230	1	1

最后对该灯具划分网格并进行稳态计算后得到整体温度分布结果如图 18 所示。

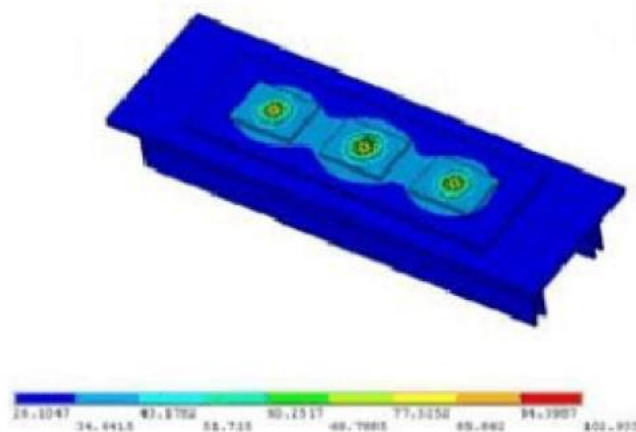


图 18 LED 灯整体温度场分布

图 18 表明灯具最高温度集中在芯片处，且最高温度高达 76.23 ℃，考虑一定的误差，极有可能超过最大允许结温 80 ℃，可见，该 LED 灯具目前的散热情况比较差，有必要对目前散热系统进行改善。分析该灯具温度高的主要原因是：线路板层厚度大且导热性差，另

外散热层太多，产生了导热瓶颈，热量不能很好的传导。

4、改进设计

传统散热技术分为主动式散热和被动式散热，散热片属于被动式散热，即依靠空气自然对流散发热量，而主动式散热包括热管、热电制冷技术、纳米传热技术、微喷散热技术、微通道散热技术、风扇、均温板、冷板等。对灯具散热结构进行改进的思路为：首先考虑可以对线路板进行挖空处理，然后对散热片的尺寸进行优化选择，最后研究了界面材料对散热过程的影响，并设计了其他 3 种方案：在散热片上加装热管、加装风扇、将散热片改用均温板材质。

对以上这些方案的仿真结果进行对比与分析后，提出了可行的建议。

(1) 线路板挖空方案

改进设计应该遵守 LED 散热设计的一般原则：在合理的范围内结构层越少越好，层的厚度越薄越好，层的面积越大越好，材料的导热系数越大越好。对于该 LED 灯，将线路板进行挖空处理，使热沉与散热片直接相连，这样减少了线路板层和导热硅胶层，更有利于热传导。

改进后的热网络模型减少了线路板层和一层导热硅胶。热传导线路为芯片—导热硅胶—铜热沉—导热硅胶—散热片—环境，于是热网络图如图 19 所示。

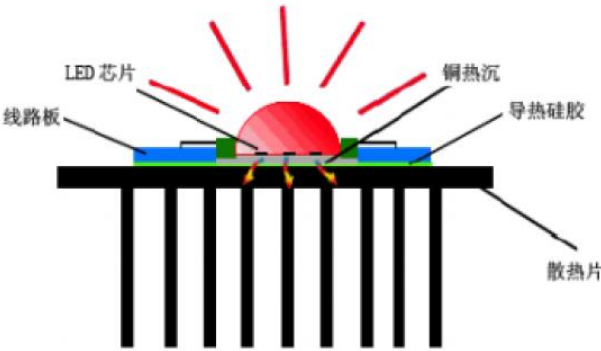


图 19 改进后的 LED 灯热网络图

模拟结果如图 20 至图 24 所示。图 20 为整个 LED 系统的温度分布图，图 21 到图 24 分别为 LED 芯片、铜热沉、导热硅胶及散热片的温度分布。

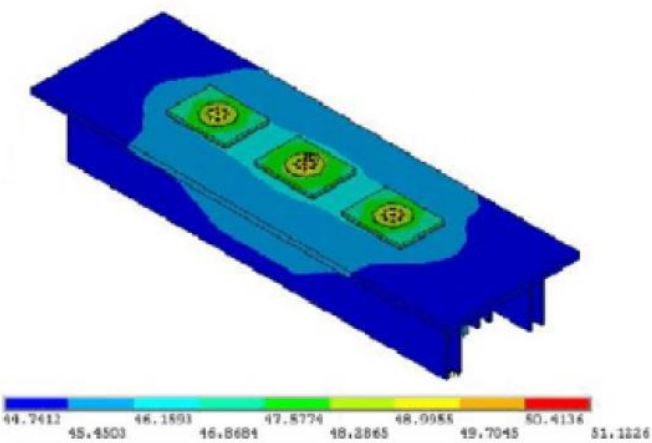


图 20 挖空线路板后的 LED 灯整体温度场分布

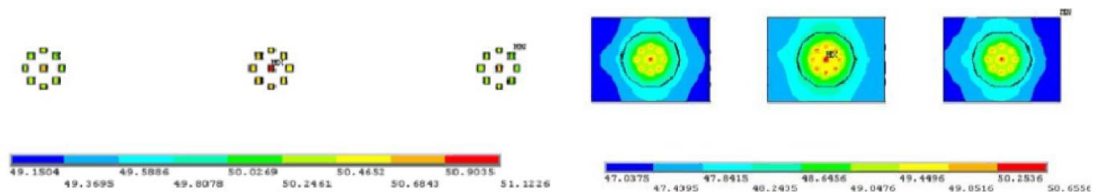


图 21 LED 芯片温度场分布

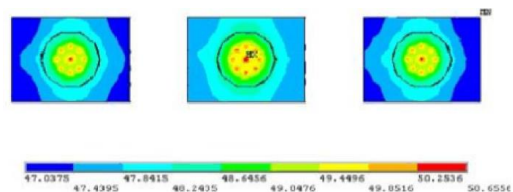


图 22 热沉温度场分布

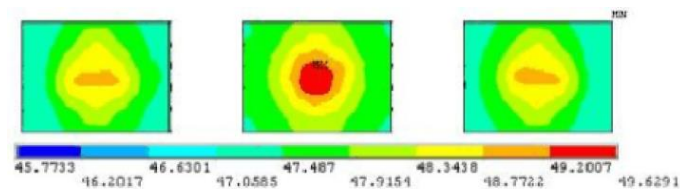


图 23 导热硅胶温度场分布

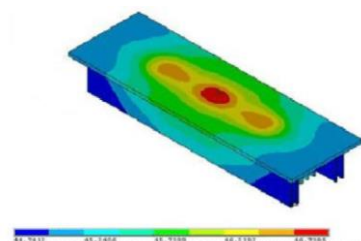


图 24 散热片温度场分布

由于 LED 芯片的布局不一致，与之接触各部分温度分布也不均匀。此外由于各层的温度场分布不均匀，相邻部分的温度会有重叠，所以各层的温度带采用该部分最高温度与最低温度之差。

从仿真结果中可以读取结点温度为 51.1226℃，相比较未改进模型温度降低了很多，且在允许范围之内，说明改进后的散热结构满足了散热要求，证明了改进后散热结构的可行性。

(2) 散热片优化方案

目前，大功率 LED 灯使用最多的散热技术是散热片，散热片是利用较大的散热面积来对流散热。对于散热片而言，形状、加工工艺、尺寸及材料是决定散热性能的几个重要因素。下面主要对散热片的尺寸进行优化。

散热片主要尺寸包括翅片厚度 A、翅片间距 B、翅片高度 H 及散热片底板厚度 C，如图 24 所示。本例中 A=2 mm，B=6 mm，H=40 mm，C=4 mm。

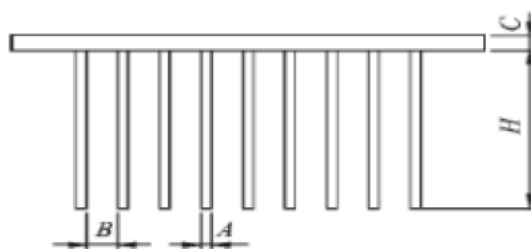


图 24 散热片（翅片）尺寸

运用 ANSYS 参数化设计功能来对该隧道灯的散热片进行尺寸优化，优化流程如下：

1) 首先当 H=40，C=4 时，分别取 A 为 1.5，2，2.5，3，B 为 4.5，5，5.5，6，对 A、B 进行组合以得到 16 组值，仿真计算后得到 16 种情况下的结温，并将同一 A 值下结温与 B 值的关系绘制成曲线，如图 25 所示。

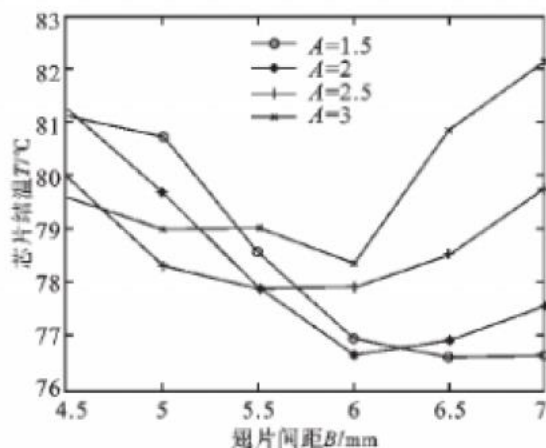


图 25 不同翅片厚度下结温随翅片间距的变化关系

由图 25 可以看出，对于同一个 A 值，4 条曲线有类似的变化趋势，都是随着翅片间距的增大结温先降低后升高，另外从图中还可以看出，当 A=2，B=6 时结温最低。

2) 当 A=2，B=6，H=40 的情况下，取 C 为 3，4，5，6，7，8，9，得到 C 值与结温的关系，绘制成曲线，如图 26 所示。可以看出，随着基板厚度的升高，结温先快速降低，随之变得平缓甚至有略微的升高，且在 C 为 6 时，取得结温的最小值。

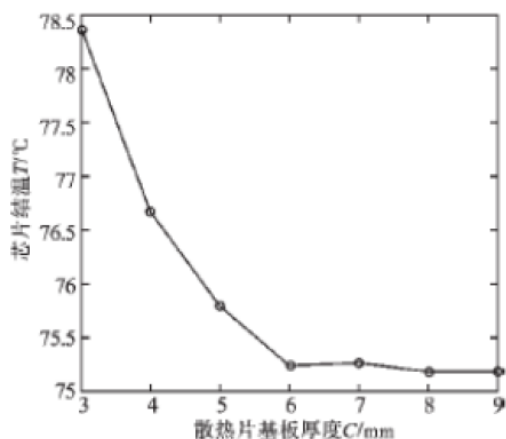


图 26 散热片基板与结温的关系

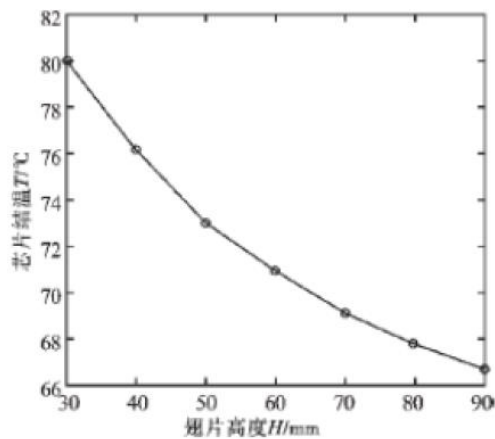


图 27 翅片高度与结温的关系

3) 当 A=2，B=6，C=6 的情况下，分别取 H 值为 30，40，50，60，70，80，90，得到 H 值与结温的变化关系，如图 15 所示。可以看出，随着翅片高度的增大，结温先大幅降低随后变得缓慢，可见适当升高翅片高度对于结温的降低作用很大，另外当 H=60 时为翅片高度和结温的最佳值。

则当 A=2、B=6、C=6、H=60 时散热片的散热效率为最佳，此时结温为 70.97 °C，比优化之前大约降低了 5.35 °C，可见，对散热片进行优化的效果很明显。

(3) 加装热管方案

热管是一种优良的导热元件，外部为铜壁，内部有吸液芯和冷凝液，通过液气两相的循环变化，将 LED 发出的热量导出并散发掉。热管在 LED 上的应用有多种形式，可以将 LED 芯片直接安装在热管吸热端的顶部，也可将其加工成平板式、回路式。热管的特点是能够将热量传输到较远的、容易散热的位置，在实际应用中方便、灵活。

下面设计了散热片加装热管的散热方案，加装热管后结构如图 28 所示，本研究将 2 mm 平板式热管蒸发端穿过芯片底部的热沉，并以工字型弯折，冷端垂直穿插在翅片中，每个芯

片底部加装 1 根热管。设置热管的轴向热导率 $30\,000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，另外两个方向为 $450\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 。

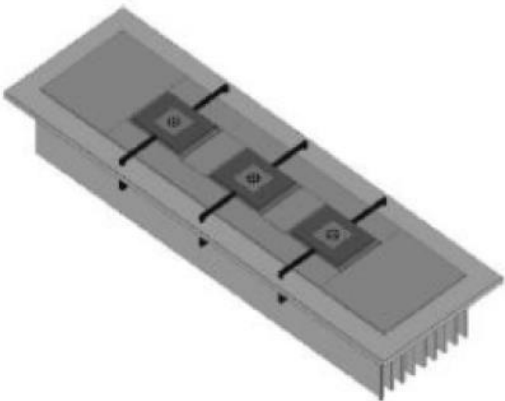


图 28 加装热管后结构

仿真结果显示，加装热管后芯片结温降低了 $2.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可见，加装热管有利于结温的降低，在以后的研究工作中还可以尝试改变热管安装位置或者尺寸来得到更好的散热效果。

（4）界面材料优化方案

热阻是反映阻止热量传递能力的综合参量，等于热流通道上的温度差与耗散功率之比，单位为 K/W 。当热量在物体内部以热传导的方式传递时，遇到的热阻称为导热热阻；当热量流过两个接触固体的交界面时，由于缝隙产生的热阻为接触热阻，在灯具的制造过程中，导热硅胶或银胶等界面材料就是用来降低接触热阻的，但是这些界面材料本身的导热率不高，造成了热传导过程中的瓶颈。针对这一热现象，本研究对芯片与铜底座之间的界面材料进行研究，选择了几种不同导热率的界面材料来模拟热分布，其结果如表 4 所示。

表 4 不同界面材料下的芯片温度

界面材料热导率 $/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k}))$	芯片最高温度 $/^{\circ}\text{C}$	芯片最高温度 $/^{\circ}\text{C}$
2	101.93	69.66
5	49.87	68.26
8	76.23	67.47
10	74.54	66.05

由表 4 数据可知，界面材料导热率稍微增大，结温将会大幅降低，所以提高界面材料导热率对 LED 散热有着非常大的作用，应把更多的精力放在设计和选用更好的界面材料上，从而降低界面材料这一导热瓶颈的影响。

（5）加装风扇方案

风扇属于风冷强制散热，可以较大幅度地提高散热片散热效果。加装风扇方案为：在翅片垂直的端面上分别加装类型为 intake 的轴流风扇，分析结果显示：加装质量流量为 0.01 kg/s 风扇后，芯片最高温度降低了 $9.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；加装 0.02 kg/s 风扇后，降低了 $16.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可见风扇对于 LED 散热具有明显的效果。

从上述数据可以看出，在增强热传导的同时更应该更加注重热对流的影响。但是加装风扇还存在两个问题：① 如何确保风扇寿命和 LED 寿命匹配的问题，一般风扇寿命多为几千小时，而 LED 寿命可长达 5 万小时；② 加装风扇会使灯具显得笨重。如果能够有效地解决上述问题，将风扇很好地运用在 LED 灯具上，也不失为一种很好的选择。

(6) 均温板设计方案

均温板的原理与热管相似，但是热管的传热是一维单向的，而均温板是二维的面传热方式。均温板可以使热量分散，减小扩散热阻。该方案是将散热片用均温板材料来制造，仿真结果显示，均温板的散热效果比较明显，结温降为 71.09 °C，降低了 5.15 °C，另外，散热片在平面方向上的温度非常均匀，可见均温板也是一种好的选择。

这部分内容举例一款大功率 LED 灯进行了热分析与改进设计，并应用 ANSYS 软件对改进前后 LED 灯具进行温度仿真分析，从而优化整个照明散热系统设计。结果显示，要增强 LED 灯具的散热性能可以采取下面 4 种方式：①对线路板挖空处理；②加装风扇来增强强制对流作用；③采用均温板材料或者热管技术；④提高界面材料热导率。

【项目小结】

散热技术是 LED 照明灯具设计的关键技术之一，良好的散热效果是照明灯具性能的保证，只有充分了解 LED 灯具热量产生及传递的路径，散热技术方案的设计才会更有针对性。通过掌握散热材料的热学、光学参数，借助分析模型，从影响热量传递的各个环节上优选最合适的材料；并且可以借助散热仿真软件，模拟分析 LED 灯具的热量分布，节省时间和成本，优化散热设计方案；同时 LED 电源设计、光学设计与散热设计是息息相关的，需要综合考虑。

【思考与练习】

- 1、照明灯具通过热传导、热对流和热辐射三种散热方式如何散发热量？针对不同的散热方式分别由哪些设计要求？
- 2、照明灯具的散热途径或散热通道是什么？
- 3、照明系统散热设计过程中材料如何优选？
- 4、如何在 ANSYS 中查看内部的热应力分布？

项目五 光源灯具设计

【知识目标】

- 1、掌握 Tracepro 光学设计软件；
- 2、掌握利用 Tracepro 进行常见的透镜和反光杯设计；
- 3、会光学设计过程中的照度分析和光强分析。

【技能目标】

- 1、能熟练使用 Tracepro 光学设计软件；
- 2、会优化光学设计方案。

【任务导入与项目分析】

照明技术中光场分布式通过对光线传播方向的控制，最终实现光通量的合理分配，满足照明设计要求的过程。而控制光线的途径，在照明光学设计里，一般均采用光的几何光学传播规律：折射和反射（很少使用物理光学原理）。对光线的折射和反射，离不开透镜元件和反射元件。而这些光学元器件的设计和仿真模拟需要借助于照明设计软件，常用的极易上手的照明设计软件是 Tracepro，它有强大的分析功能，适用于几乎所有的照明系统设计仿真。

任务一 Tracepro 简介

Tracepro 是一套可以做照明系统分析，传统光学分析，辐射度以及光度分析的软件，它也是第一套由符合工业标准的 ACIS 立体模型绘图软件所发展出来的光机软件。它提供了简单易用的图形接口，所以我们能够轻易的检视模型，建立立体对象，以及设定材料特性，表面性质和光源特性。它可以同时开启多个档案来完成编辑。

1.1 Tracepro 的操作界面介绍

安装好 Tracepro 软件后，程序会自动创建多国语言快捷方式，如英文版、简体中文版、繁体中文版、日语和意大利语等。其中 CHS 表示简体中文版，可通过工具下来菜单进行修改。若不选择默认是英文版，将其打开，得到如图 1 所示的操作界面。

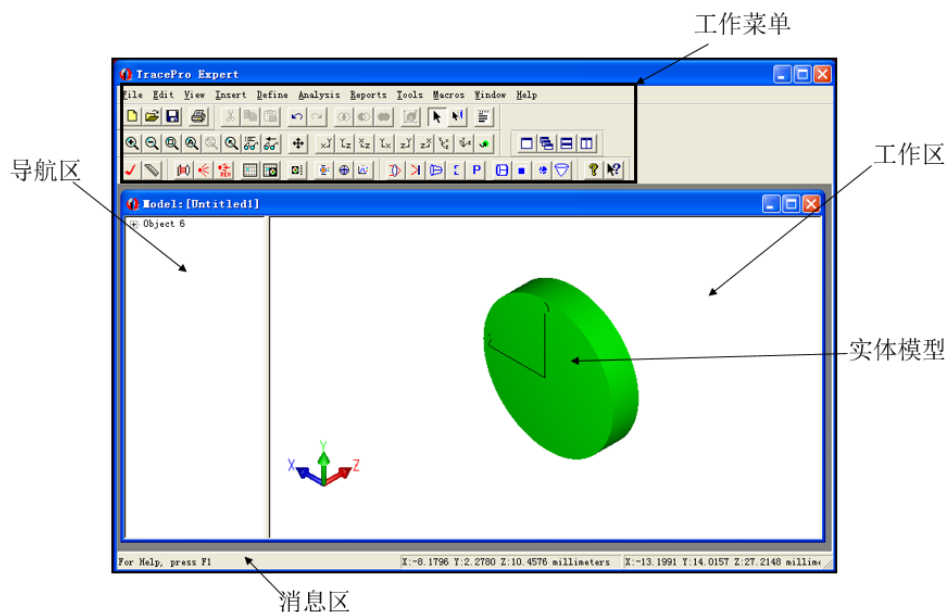
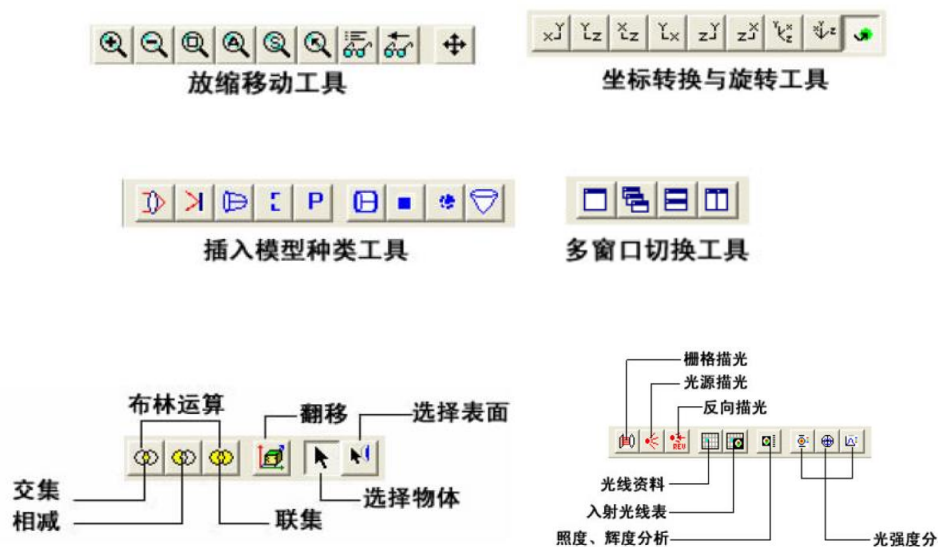


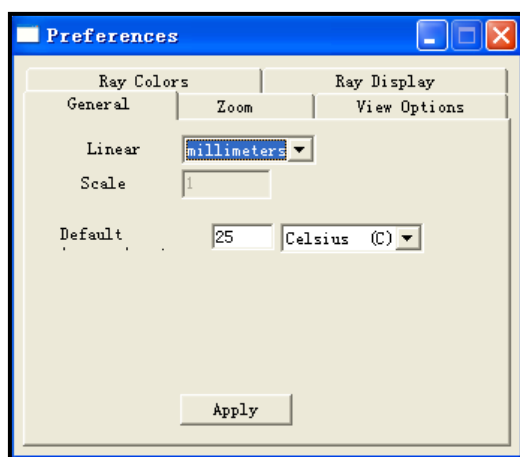
图 1 Tracepro 的操作界面

从图 1 可知，Tracepro 软件的主界面，抓哟分为五个部分：主菜单、快捷菜单按钮栏、系统树导航区、模型视图区域或工作区、坐标状态栏或消息区。

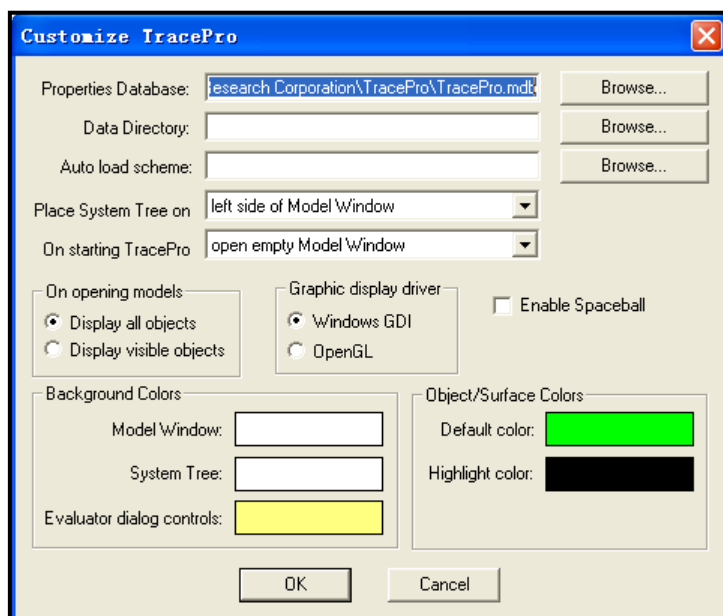
下面对一下常用的快捷按钮做简单介绍。



特性修改路径：View>Preference，此处可以设置 Tracepro 操作界面中显示方面的参数，如界面的显示单位，缩放时的倍率，显示光线的颜色，方式等等。



View>Customize, 此处可以设置 Tracepro 操作界面中运行方面的参数, 如导航区的位置, 模型的显示方式, 模型的颜色, 背景的颜色等等。



1.2 Tracepro 模拟步骤

Tracepro 模拟步骤主要包括: 建立模型、光学特性、光源设定、分析功能。

1、建立模型

建立模型的方法有以下三种:

1) Tracepro 自建模

利用 Tracepro 软件本身的功能建立各种模型面、平面、曲面、球面、非球面体、球体、正方体、椎体和环等。

2) 在专业 3D 设计软件中建模, 然后导入 Tracepro

在 PRO/E、UG、CAD 或 SOLIWORKS 等 3D 专业模型设计软件中将实体建好, 保存为 igs, sat, stp 等格式, 导入 Tracepro 并设置属性后, 就可进行模拟。

3) 光学软件建模

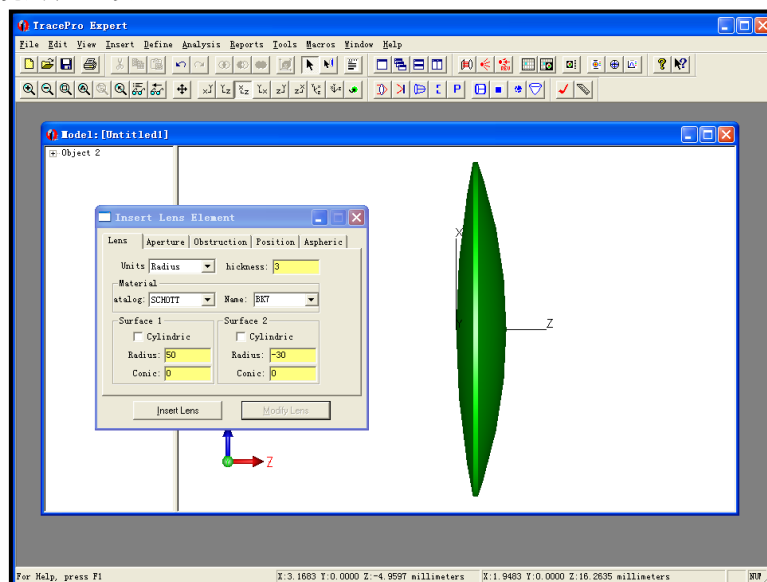
Tracepro 与很多光学模拟软件如 ZEMAX, OSLO, Code V 等是共用的, 所以可以直接用 Tracepro 打开这些软件保存的文档。

首先介绍 Tracepro 软件自建模方法。

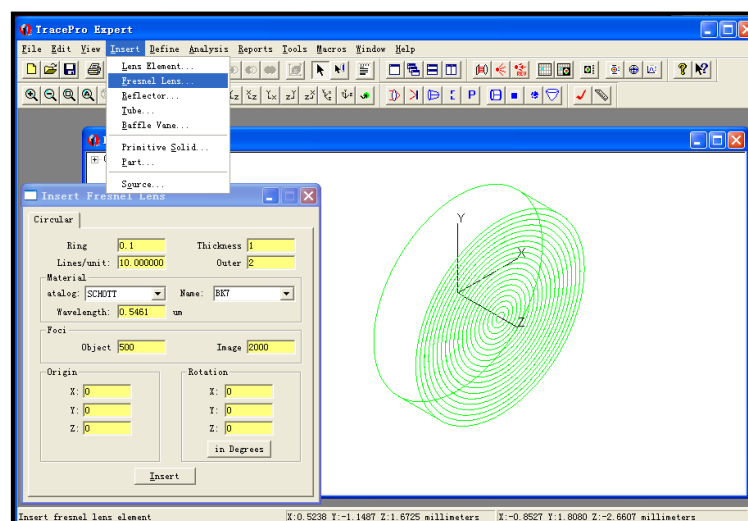
Tracepro 软件本身提供了一个强大的模型库，使用者可以根据自己的需要选择不同的模块来建立模型。其路径就是 :Insert>



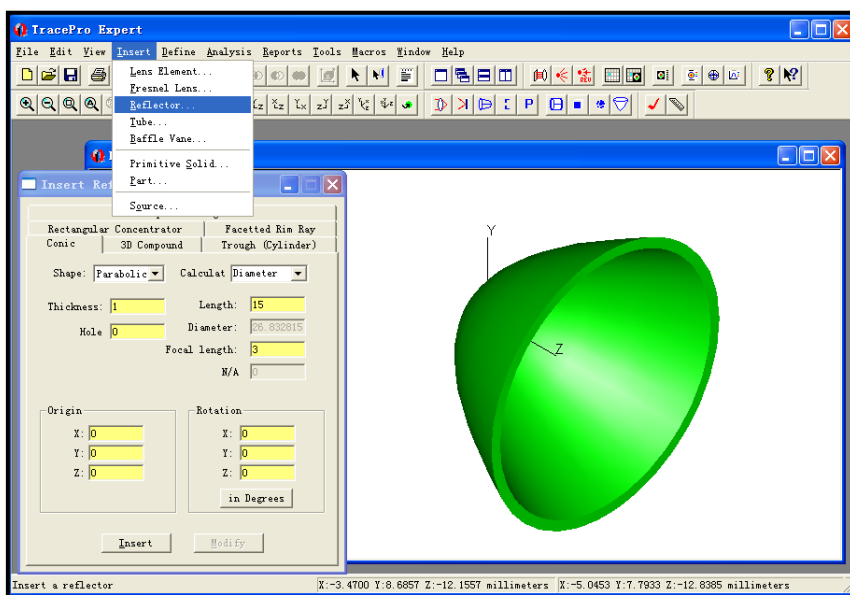
若选择插入透镜，Insert> Lens Element，主要要点：1) 透镜材料选择；2) 透镜参数设置；3) 透镜的位置设置。



也可以在这里选择创建菲涅尔透镜，Insert> Fresnel Lens

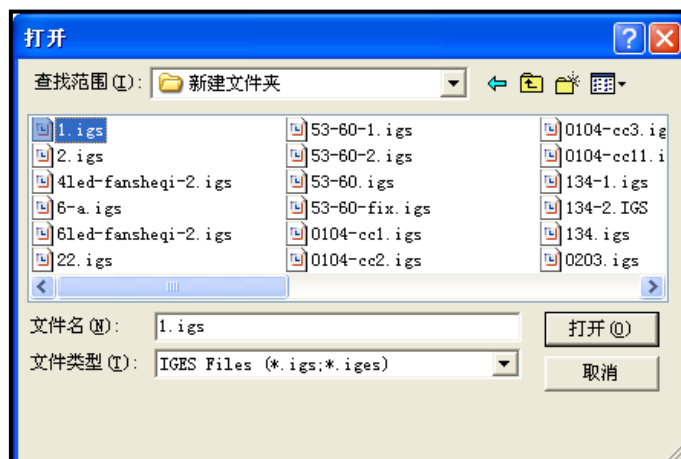


也可以在这里创建反射器，Insert> Reflector

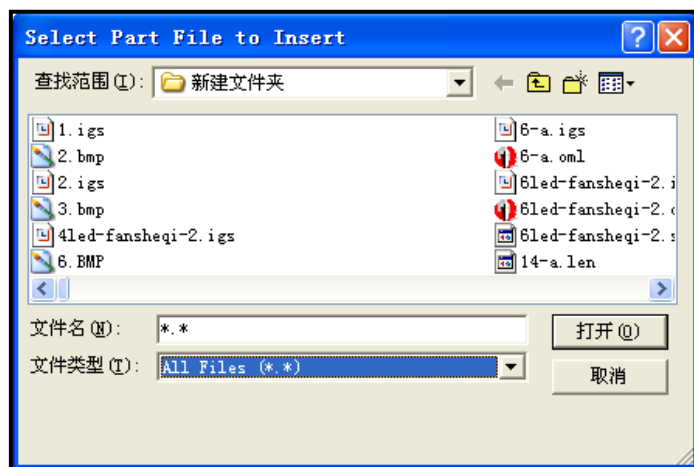


其次，专业 3D 设计软件中建模，然后导入 Tracepro 方法。有两种 3D 模型导入方式：

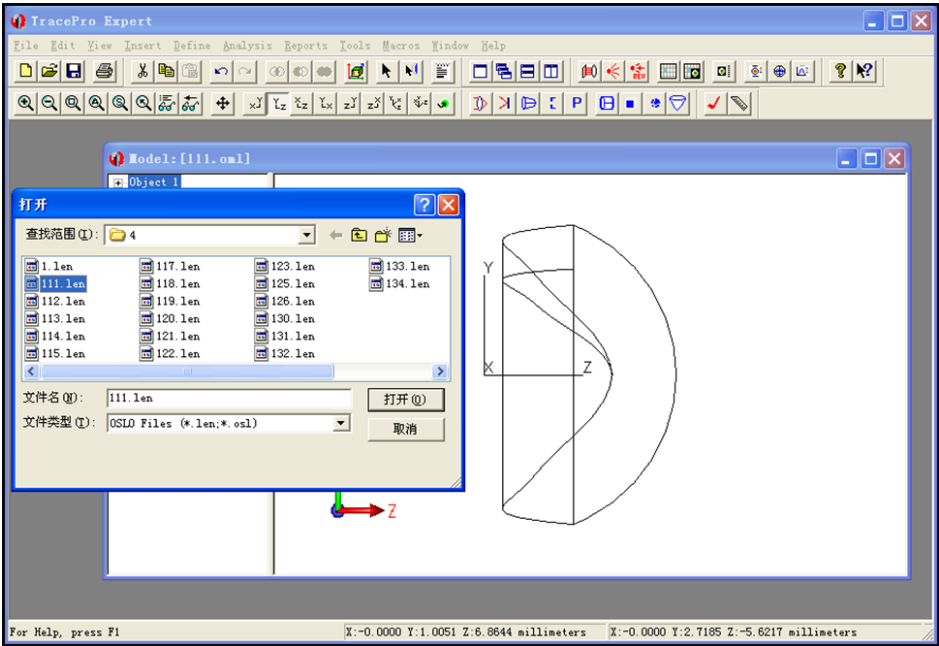
1) File>Open



2) Insert>Part



最后，在光学软件中的建模，Tracepro 可以将其他程序建好的模型，直接读取，简单方便。如图，通过 Tracepro 打开 OSLO 文档。



2、光学特性

Tracepro 的建模后，就要对模型进行属性的设置光学特性在 Tracepro 的模拟中非常重要，模拟的目的是模拟结果与实际更为接近。所以光学特性的定义就是给模拟效果一个好的起始。



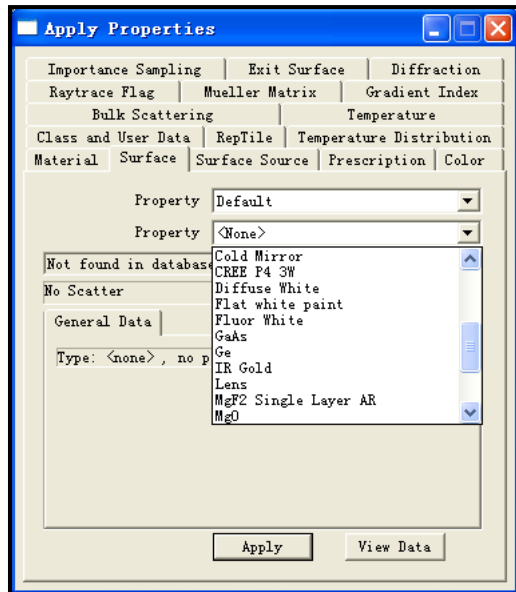
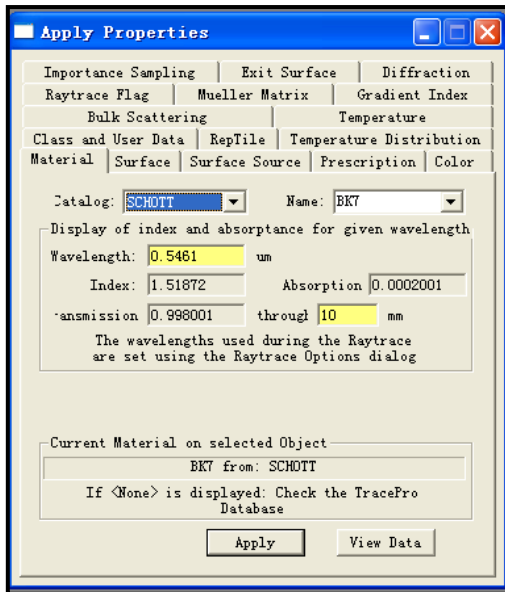
路径：Define>Apply Properties

1) Material 用来定义实体的材料

如图：材料为 BK7 玻璃，材料的名称下面表示出材料的各种光学特性：色散系数，相对波长的折射率，材料的吸收率。而且，也可以通过最下方 View Date 更改材料的这些属性。

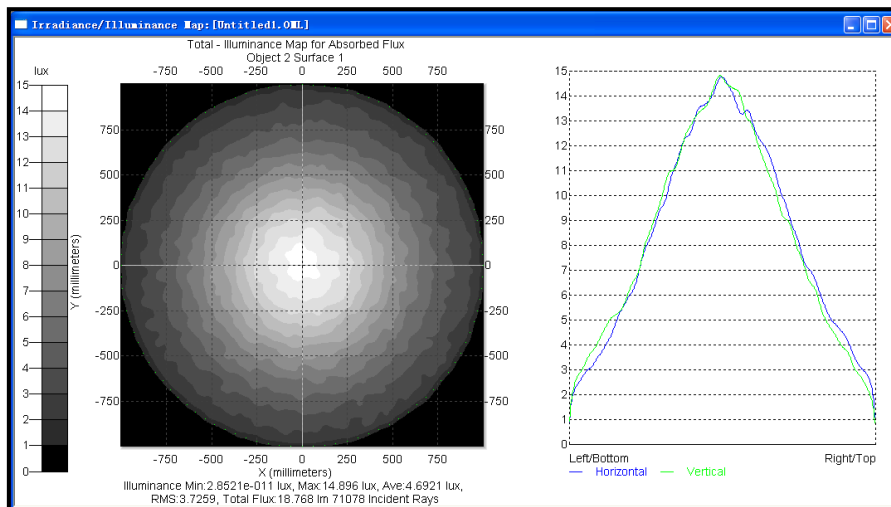
2) Surface 用来定义表面属性

可以在此处对模型的表面进行定义。如：表面被设置为镜面，吸收面，散射面，或者在模型的表面定义一些薄膜，等等。



3、照度分析

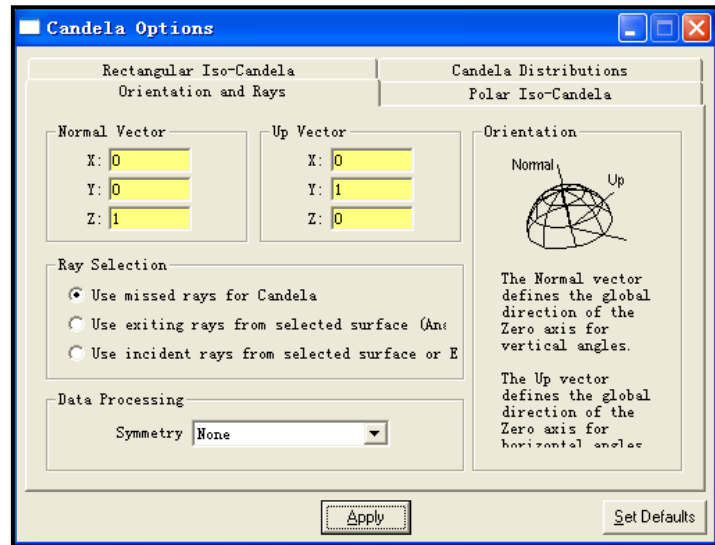
如图，一个 LED 光源投射在 1 米处的光斑照度效果图。在图的下方注明模拟结果：最大照度，平均照度，接受面接受到的光通量参数。



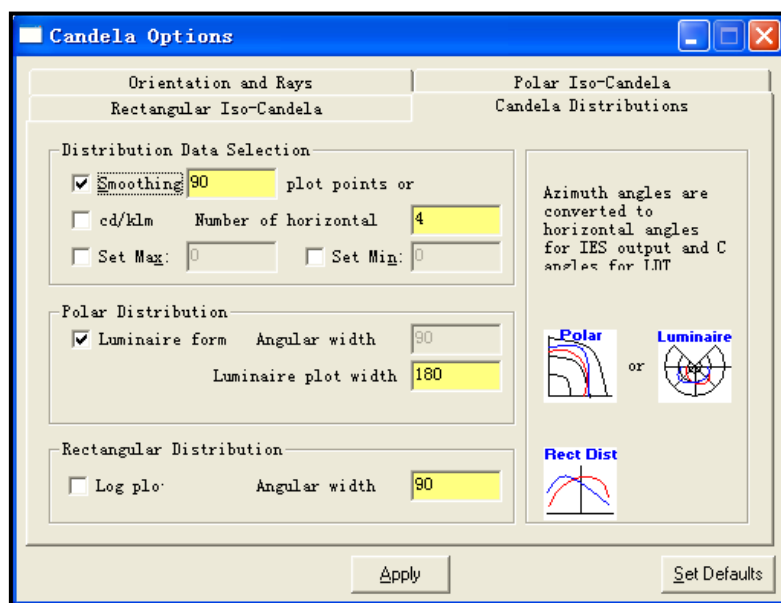
4、光强分析

光强分析参数设置：

方向参数的设置 Normal Vector 主方向光源投射的方向，输入不同的数值，软件会通过坐标自动的计算出该方向。Up Vector 参考方向与主方向垂直。

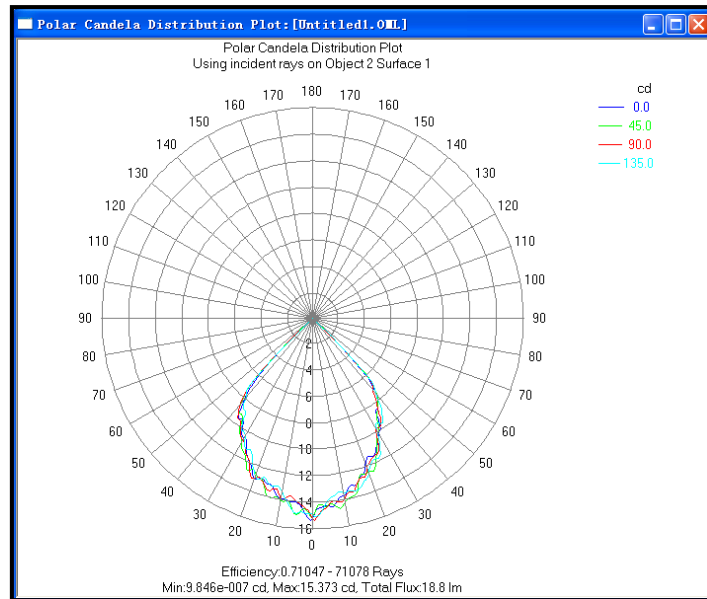


Smoothing 设定光强分析的区间大小，设置的数目却大，分析的区间越小。当数目增大到一定程度时，配光曲线的光强不再变化，此时得到合适的模拟值。

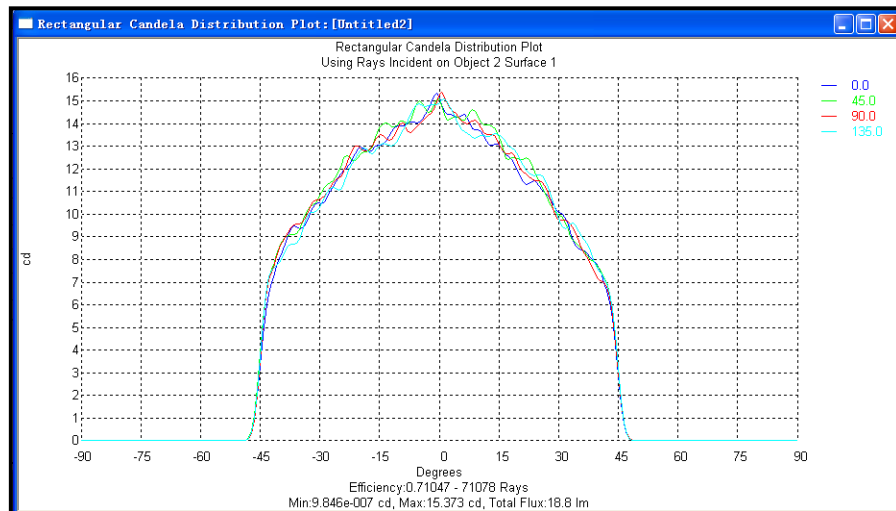


光强分析 极坐标配光曲线

如图，一个 LED 光源的极坐标配光曲线图。在图的下方已注明模拟的结果：效率，接受到的光线数目，最大光强，接受到的光通量。



光强分析 直角坐标配光曲线



任务二 Tracepro 设计实例

Tracepro 设计实例。分析设计要求：

光源：Cree LED Q4 110lm；

光斑要求：1 米处最大光斑直径不于小 1 米，中心光斑直径不于小 0.12 米；

照度要求：1 米处最大照度要达到 4000lux；

透明件：3mm 钢化玻璃；

反光杯尺寸：25*20mm；

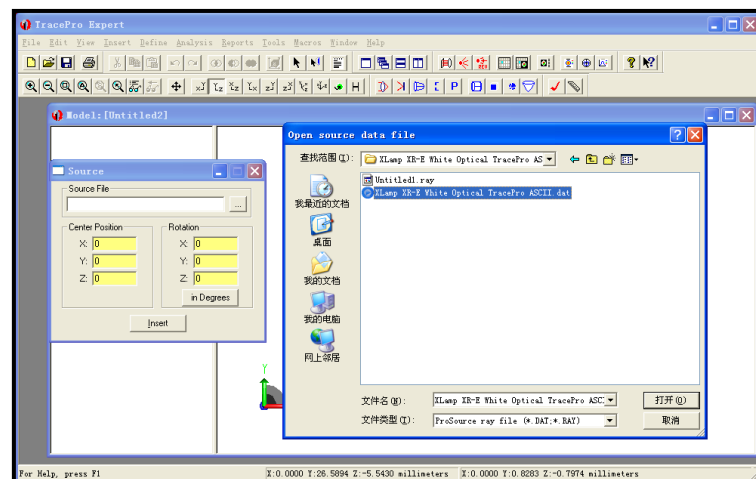
光源：总光通量 110lm，半光强角度 110 度；

配光：截光角不应小于 27 度，半光强角不小于 6 度；

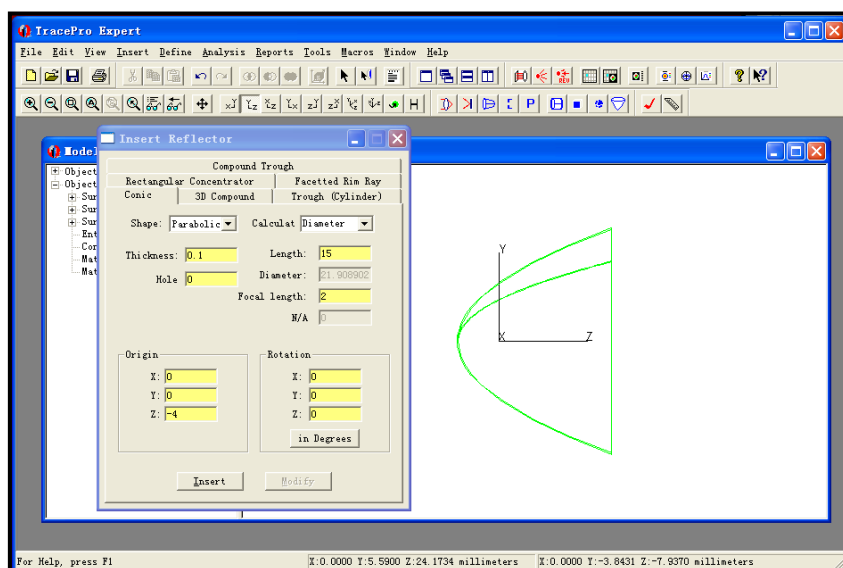
照度 中心光强为 4000cd。

通过分析，可以得出：设计需要一个聚光的反光杯，且反光杯的口径与深度的比值接近于 1。

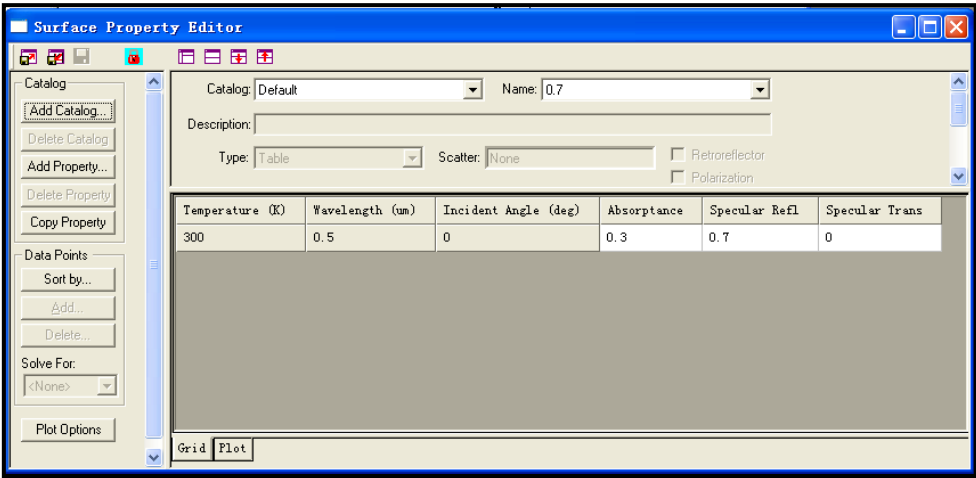
1、导入光源 Insert>source



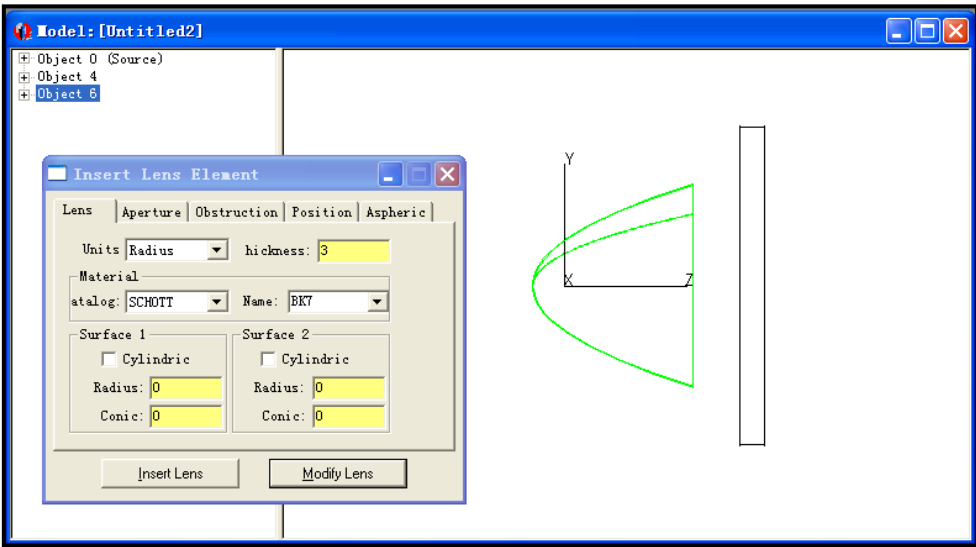
2、建立模型 Insert>Reflector



建立好模型后，需要通过 ApplyProperties 来为模型添加表面属性。点击导航区中模型的名字，然后鼠标右键，选择 ApplyProperties，在 ApplyProperties 中选择 Surface。在 Surface 的下拉表格中有多种反射面模式，可以根据自己的需要选择合适的反射面，也可以点击 View Data，自定义反射面的属性。



反光杯建好后，材料属性也定义完毕，需要根据要求在反光杯的前方添加 3mm 的钢化玻璃。



3、添加一个接受平面

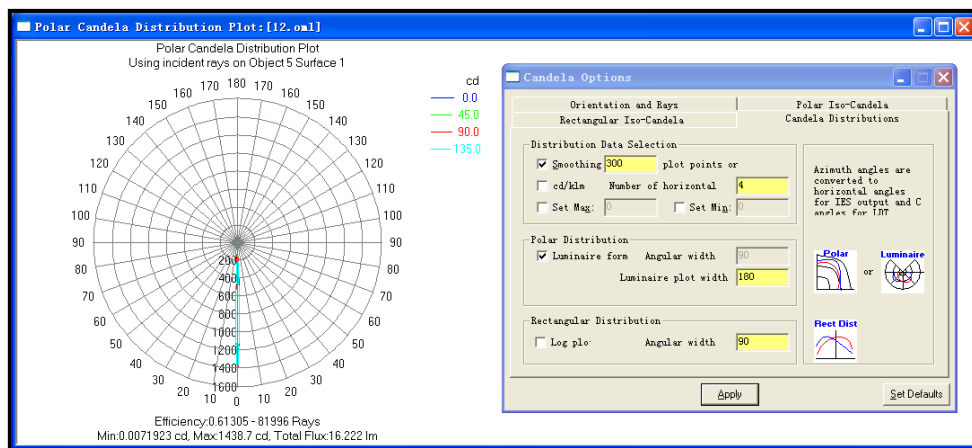
模型添加完毕后，最后需要添加一个接受平面。接受平面可以根据实际需要定义它的大小，位置。模拟完毕后，我们可以从接受平面上得到有效光效，光斑效果等模拟结果。

首先，Insert Primitive Solide，添加接受平面。

其次，将接受平面用过 Apply Properties 中 Surface 定义为 Perfect Absorber。

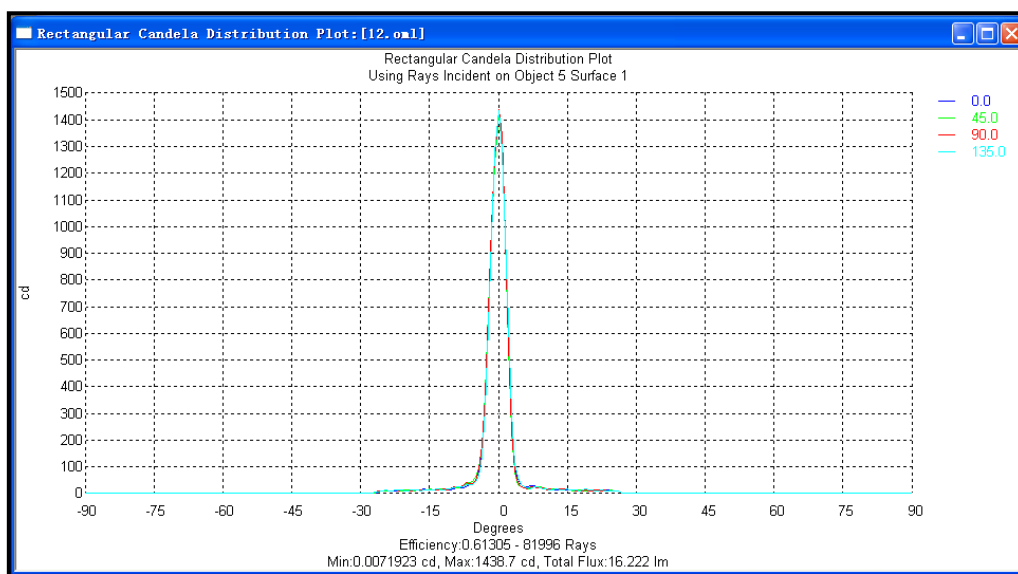
最后，点击 ，开始模拟。

4、查看模拟结果，极坐标配光曲线



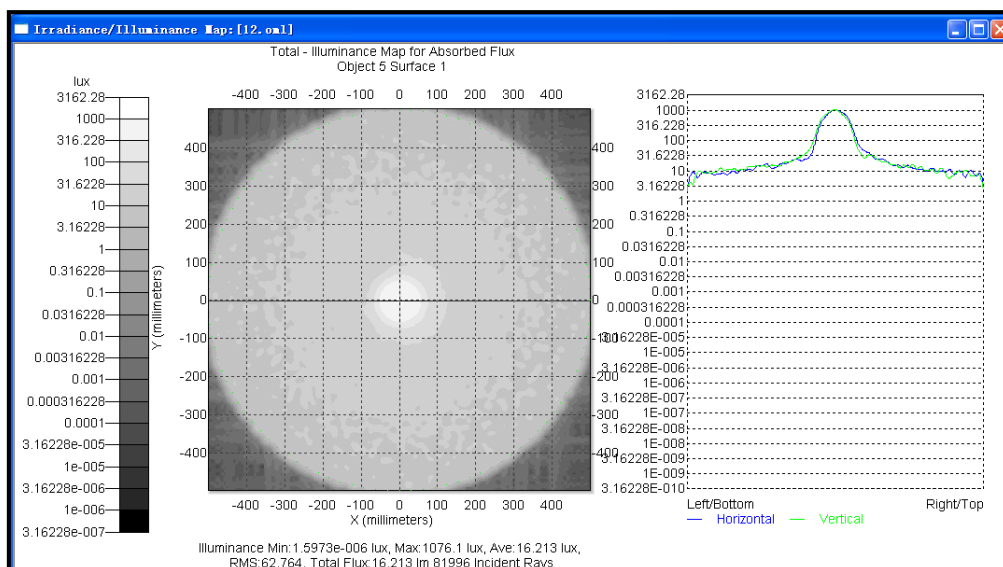
从模拟的结果中可以得出，灯具效率为 61%，最大光强 1438.7cd。

查看模拟结果 ， 直角坐标配光曲线



从模拟的结果中可以得出，半光强角为 6 度。

查看模拟结果 ， 光斑照度



从模拟的结果中可以得出，1 米处光斑的直径略大于 1 米，中心的最大照度为 10761x，

平均照度 16.2lx。

5、分析结果

上述的模拟结果，光源的光通量为 26.4lm。当光源的光通量为 120lm 时，半光强角不变，光斑的大小尺寸不变，中心光强为 6086.8cd，1 米处最大照度为 4552lx。对比设计要求，符合设计需要，设计完毕。

【项目小结】

Tracepro 是一套可以做照明光学系统分析、传统光学分析，辐射度以及光度分析的软件，它也是第一套有符合工业标准的 ACIS 立体模型绘图软件发展出来的光机软件。功能强大的 Tracepro 减轻了光学设计人员的劳动强度，节约了大量的人力资源，缩短了设计周期，还可以开发出更多质量更高的光学产品。

本项目介绍了 Tracepro 软件的基本操作，其模拟仿真的步骤：建立模型、光学特性、光源设定、分析功能。该软件相对其他光学设计软件来说操作比较容易入门。还介绍了运用 Tracepro 软件设计一个案例基本流程就非常清楚了。

【思考与练习】

- 1、Tracepro 光学设计软件模拟仿真的步骤如何？可以举例详细叙述。
- 2、在光学设计软件中构建模型有哪些方法？
- 3、在 Tracepro 光学设计软件进行模拟仿真时如何照度分析和光强分析？
- 4、本项目中介绍了反光杯案例的设计及优化，根据所学知识，请在 Tracepro 中举一透镜案例进行设计及优化？

项目七 照明光环境设计

【项目聚焦】

照明设计又叫灯光设计，灯光是一个较灵活及富有趣味的设计元素，可以成为气氛的催化剂，是一室的焦点及主题所在，也能加强现有装潢的层次感。照明设计分按场景分为为室外照明设计和室内照明设计，其中室内照明是营造环境气氛的基本元素，但是其最主要的功能还是要提供空间照明效果。光作为设计要素之一，室内照明将以人文思想作为设计理念。丰富的照明手段将创造新颖的照明方式，人们的身心 and 视力健康将因优良的照明而获益。照明设计中大量使用 LED 等新技术，新产品，符合国内节能减排的政策。

【知识目标】

- 1、了解照明分类及未来照明设计的趋势；
- 2、掌握照明设计中涉及灯及灯具的照明专业用语：光污染、光辐射、光通量、照度、色温、显色性等；
- 3、掌握照明设计的四大原则：安全性原则、合理性原则、功能性原则、美观性原则。

【技能目标】

- 1、掌握 DIALux 软件基本操作技能；
- 2、利用 DIALux 软件和 DIALux 灯光精灵完成具体室内照明设计任务。

【拓展部分】

利用 DIALux 软件和 DIALux 灯光精灵完成户外照明设计。

【任务导入与项目分析】

照明设计又叫灯光设计，照明设计分按场景分为为室外照明设计和室内照明设计，其中室内照明是营造环境气氛的基本元素，但是其最主要的功能还是要提供空间照明效果。因此，灯光照明不仅仅是延续自然光，而是在建筑装饰中充分利用明与暗的搭配，光与影的组合创造一种舒适、优美的光照环境。于是，人们对室内照明设计越来越重视。本项目通过利用 DIALux 软件进行室内空间照明设计，完成室内空间建模、室内家具与物品置入，室内颜色与材质设置，室内灯具选择与放置，灯光场景设定，引入日光，并输出计算结果。

任务一 DIALux 简介及灯光精灵

一、DIALux 简介

DIALux 是德国 DIAL Gmbh 公司开发的一款针对专业照明设计的软件。可规划，计算和可视化室内与室外区域的照明，从整栋建筑物、各个空间、室外的停车位或道路照明都适用，并适用于所有灯具厂家提供的灯具。DIALux 成了当今市场上最具功效的照明计算软件，它能满足目前所有照明设计及计算的要求。

1、DIALux 软件主要特点

- (1) 可选择国内的灯具库进行精确计算；
- (2) 通过 DIALux 的智慧型计算程序提供正确及可信度高的数据结构，保证设计的准确度；
- (3) 方便、快捷计算出所需的设计方案照明，并输出完整的报表；
- (4) 住宅、商场、厂房、办公室、医院、景观、建筑物、道路等照明工程设计都适用；
- (5) 可轻松、简便地选择不同灯具，轻易地比较不同型式的灯具并快速呈现计算值；
- (6) 可独立建构 3D 的空间，形象、真实地表达设计意图；

2、DIALux 官方网站

官方网站：<http://www.DIAL.DE> 或 <http://www.DIALux.com>

3、DIALux 建议安装插件

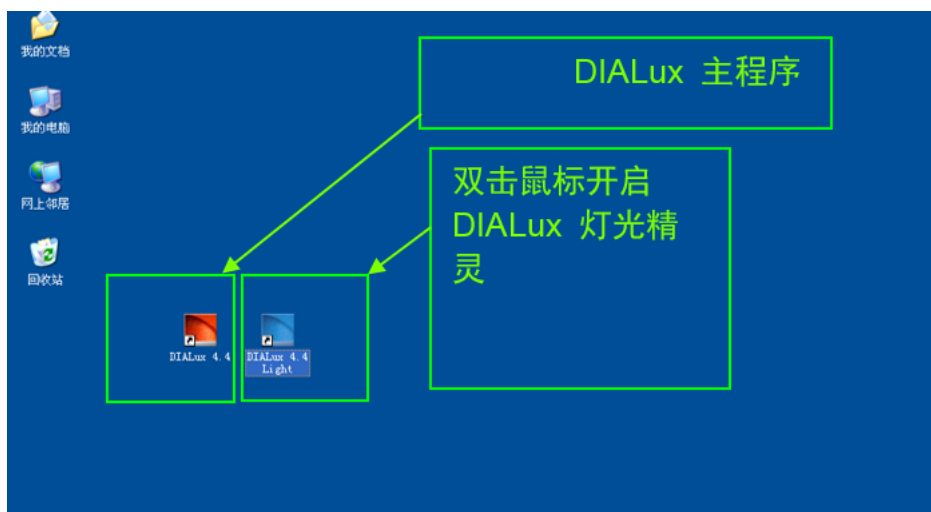
DIALux 建议必装的光源厂家有：OSRAM、PHILIPS、MEGAMAN 等；

建议选装的灯具厂家有：三雄极光、TCL、NVC、SFTLIGHTING、阳光照明等。

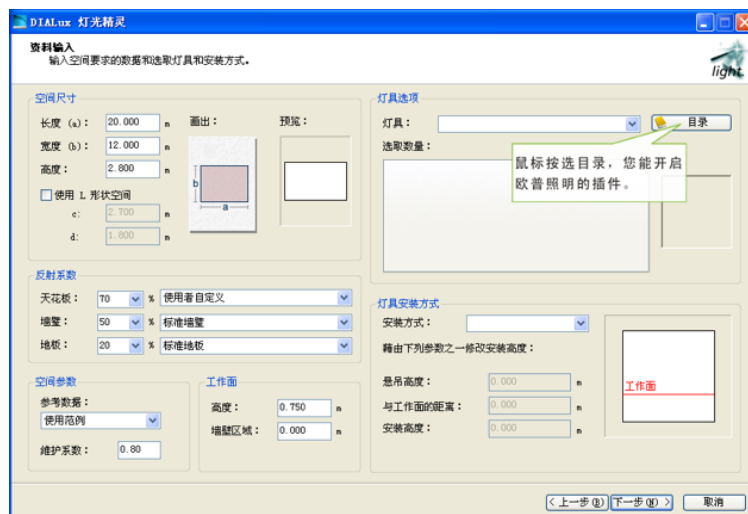
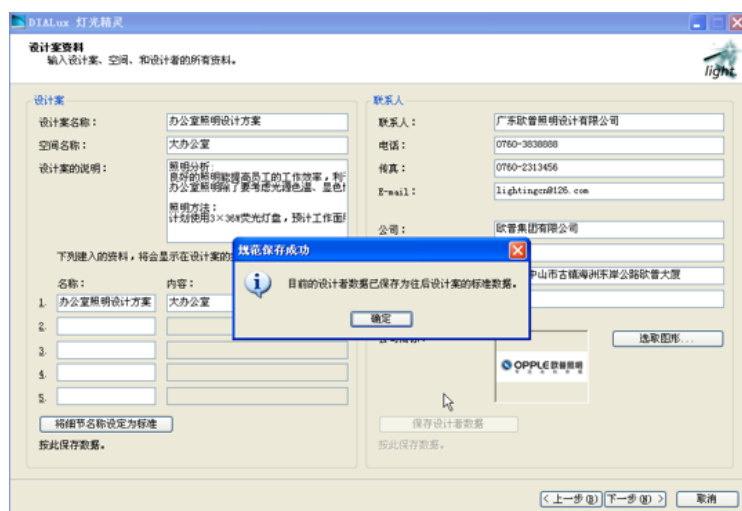
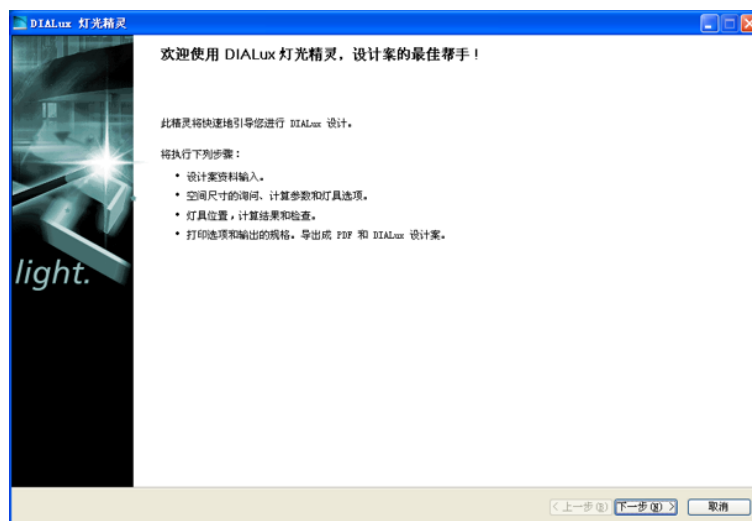
二、灯光精灵

DIALux 精灵是用于快速指引用户进行 DIALux 设计的软件。

1、DIALux 灯光精灵图标及打开方式



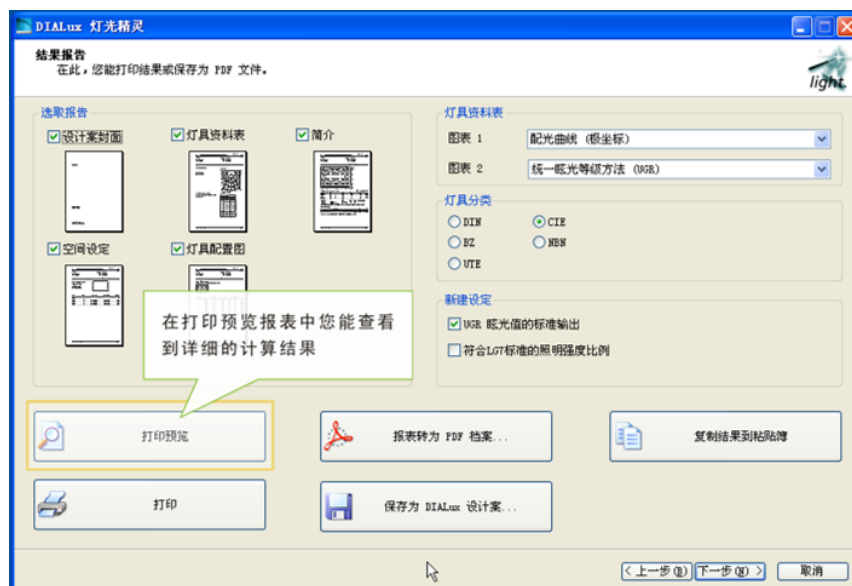
- 2、灯光精灵开启后，屏幕上会弹出一个欢迎画面，并有下一步操作的说明。
若您完成一个窗口的输入后，请按下一步键。
- 3、在设计案的资料窗口，您可输入设计人及客户的数据。这些数据以后都会被打印在报表中。

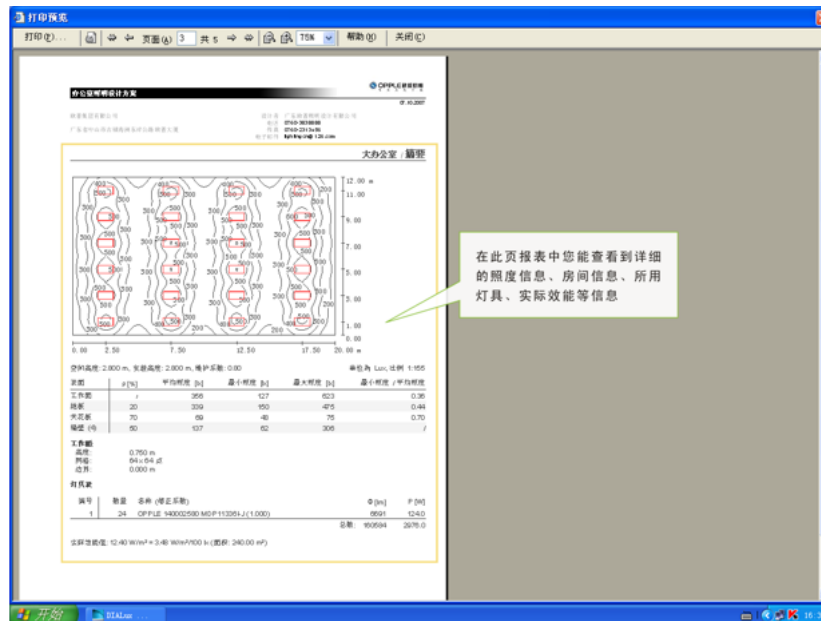


- 4、在数据输入窗口，可以在左侧确定空间的几何形状。一般来讲，DIALux

总是先预设一个长方形的空间。

5、鼠标按选目录，您能开启一家厂商的插件。选取所需灯具，按下插件中的使用键，然后关闭插件。DIALux 这时就将您选的灯具显示在右上角。





任务二 室内空间建模

一、任务要求

建立室内空间：使用 CAD 底图建立一个办公室空间。

二、任务实施

（一）建立办公室空间

- 1、导入 CAD 文件《CAD 3a_Schriever》；
- 2、以图 1 左上角的办公室为底图，沿着下图中的红线（墙内壁）建立办公室空间，注意：CAD 中的单位是“米”；
- 3、输入房间高度：2.8 米；
- 4、反射率、维护系数等其他数值按默认值；
- 5、建立与房间高度相同的窗，并用“沿着线复制”布置两个整面墙壁，注意：在 CAD 中测量窗的尺寸和窗的距离；
- 6、建立门，注意：在 CAD 中测量门的位置和尺寸，门高 2 米；
- 7、保存文件为“任务 3a.dlx”。

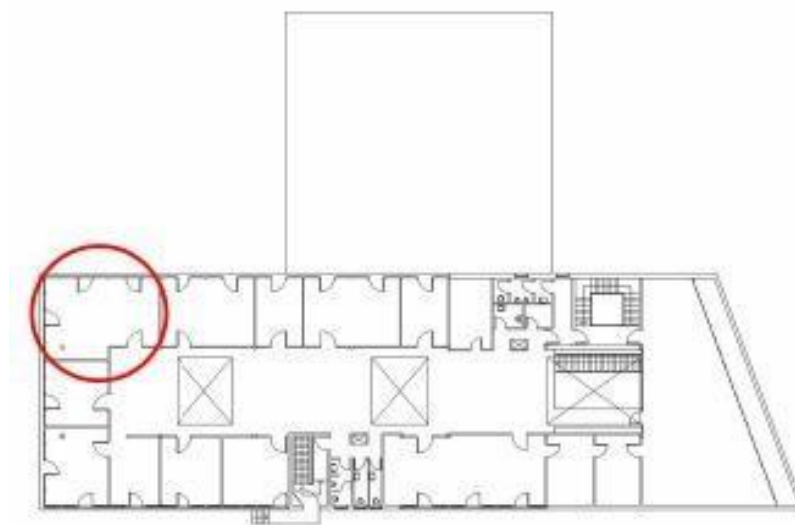


图 1



图 2

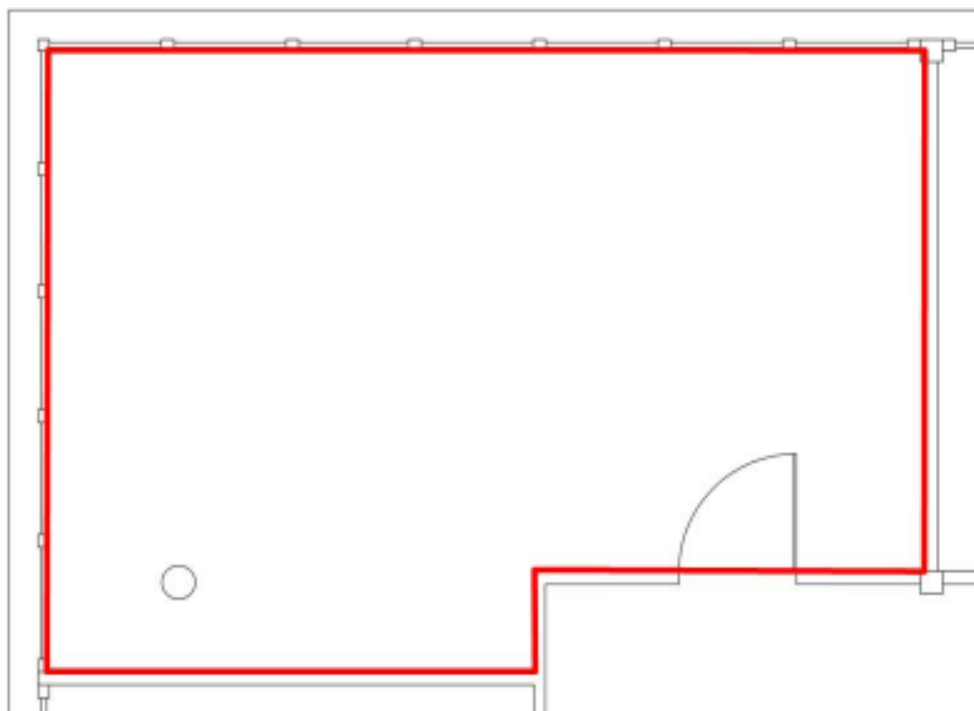


图 3

（二）增加室内空间组件

- 1、在入门的区域加建一块天花板吊顶，吊顶高度 0.2 米；
- 2、在靠窗的区域加建天花横梁，横梁位置对正窗框，高度 0.2 米；
- 3、输入房间高度：2.8 米；
- 4、如图 4，CAD 所示的蓝色圆形处布置一根柱子；
- 5、如下图 5，给落地窗增加横向分格（使用立方体空间组件，水平放置）；

- 6、横条尺寸：5 厘米高，位于 80 厘米和 200 厘米的高度；
- 7、保存文件。

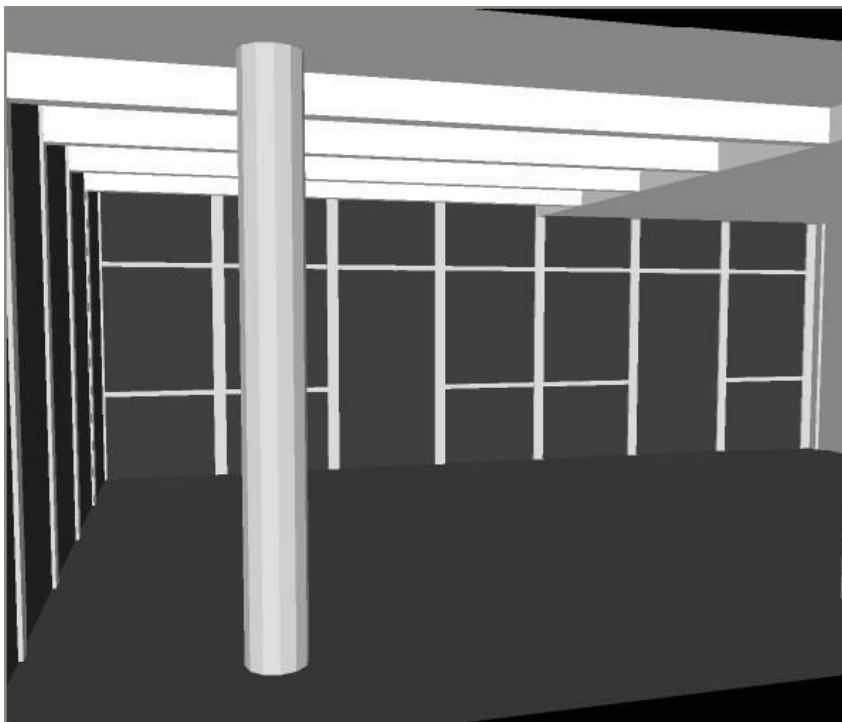


图 4

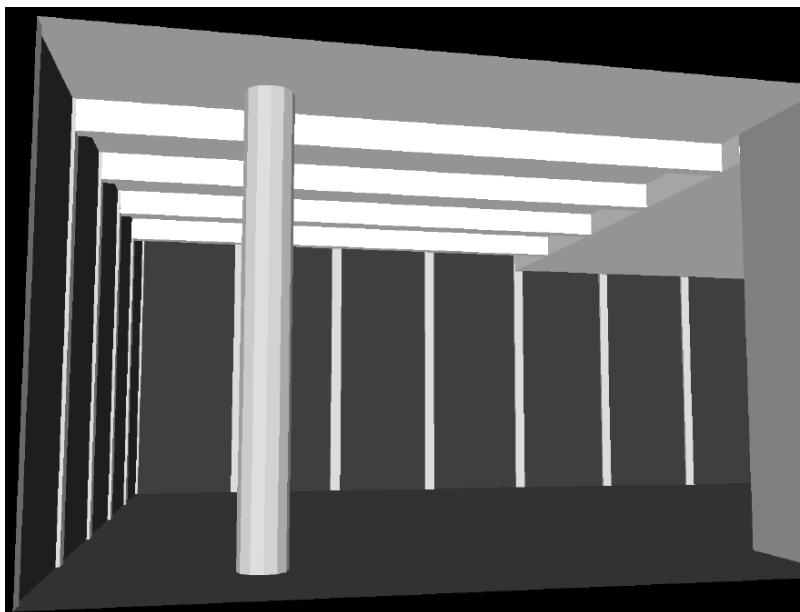


图 5

任务三 室内家具与物品

一、任务要求

室内家具与物品：在室内空间中添加家具与物品

二、任务实施

（一）在室内空间中添加家具

- 1、打开任务 3a 中的办公室文件，或打开“4a_室内家具与物品/Dx”文件夹中的《4a_0.dlx》；
- 2、按下图 6 所示，在房间内增加各个家具；
- 3、在平面图中调整书架的尺寸，并使用“沿着直线复制”功能，添加多个书架；
- 4、添加桌面电话、电脑时，直接将物品拖放至所需的桌面，物品会自动捕捉放置在表面；
- 5、保存文件为“任务 4a.dlx”；



图 6

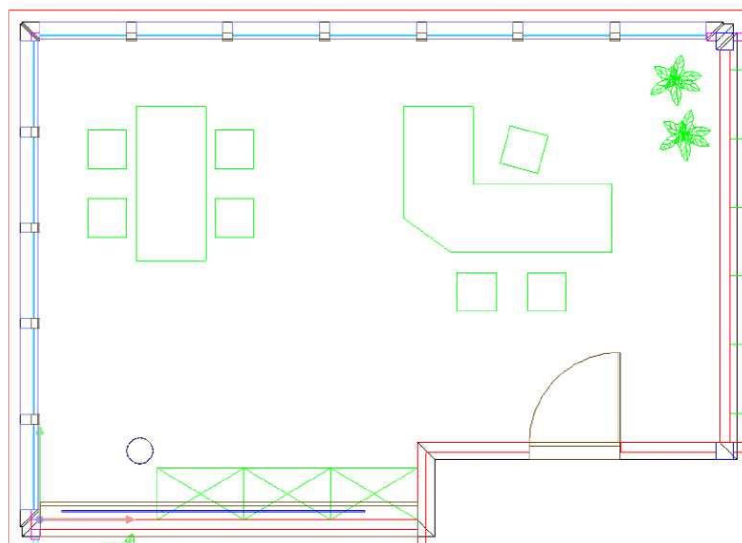


图 7

在室内空间中添加物品：在书架天花板上制作一个吊顶灯槽

1、灯槽长度：与书架处墙身宽度相同（4.35m），

2、灯槽尺寸：宽 0.2m，高 0.2m，前沿挡板高 0.1m，板厚 0.04m；

3、操作方法

方法 1：使用“空间组件”“平面天花板”，建立底板、挡板。

方法 2：使用“标准组件”“立方体”，利用“去除”功能，切掉内部空间及前方开口。

方法 3：使用“标准组件”“挤压体”，直接绘制灯槽剖面、定义高度，再旋转到位。

4、将方法 2 的底板、挡板一并选中（利用 shift）,使用“合并”功能，将其合并为一个家具；

5、在选项卡中调整“原点”设置，以便日后使用（建议将原点设置于最顶部）；

6、使用“导出并保存对象”，将家具保存为 sat 格式的文件；

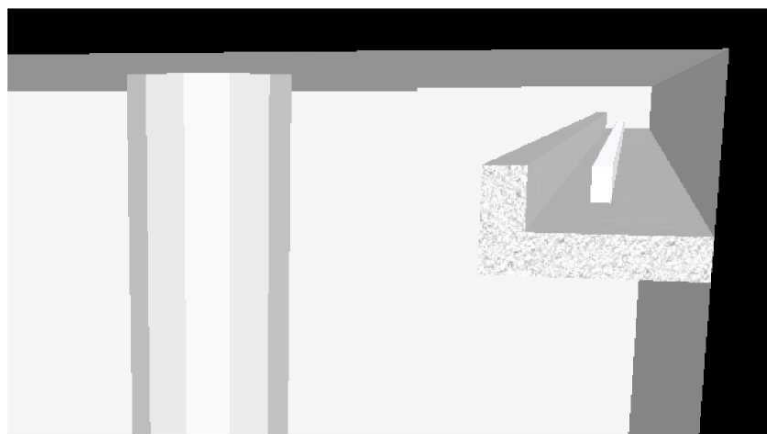


图 8

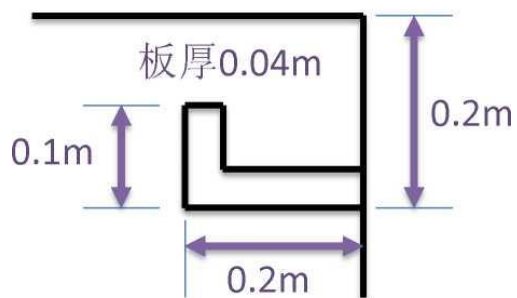


图 9



图 10

任务四 颜色与材质

一、任务要求

室内颜色与材质

二、任务实施

(一) 室内房间墙面、家具赋予材质

- 1、打开任务 4a 中的办公室文件，或打开“5a_室内颜色与材质/Dx”文件夹中的《5a_0.dlx》；
- 2、按下图所示，为房间内各墙面、家具赋予材质；
- 3、拖动材质到需要赋予的表面，注：如只需赋其中一个面，请按住“Shift”键；
- 4、给地板赋予木质或镶嵌地板表面；
- 5、给墙面赋予墙纸表面，注：柱子也会跟着墙改变，可以用 SHIFT 键处理单个表面；
- 6、给门贴上材质，如需改变开门方向，可以在表面属性里修改材质属性为镜像的；

7、保存文件为“任务 5a.dlx”。



图 11

（二）室内房间窗户指定材质

- 1、菜单：文件→导入→材质，在《5a_室内颜色与材质\Pictures Participant》文件夹找到窗的材质“window_fixed.jpg”和“window_to_open.jpg”，按下图贴上窗玻璃；
- 2、调整材质的尺寸与方向，与窗的大小相同。



图 12

（三）制作画板并贴画

- 1、用立方体组件，制作一块画板，尺寸自定；
- 2、将画板移至墙面合适的位置；

3、菜单：文件→导入→材质，在《5a_室内颜色与材质\Pictures Participant》文件夹找到油画，按下图贴上画板【注意使用 SHIFT 键】；

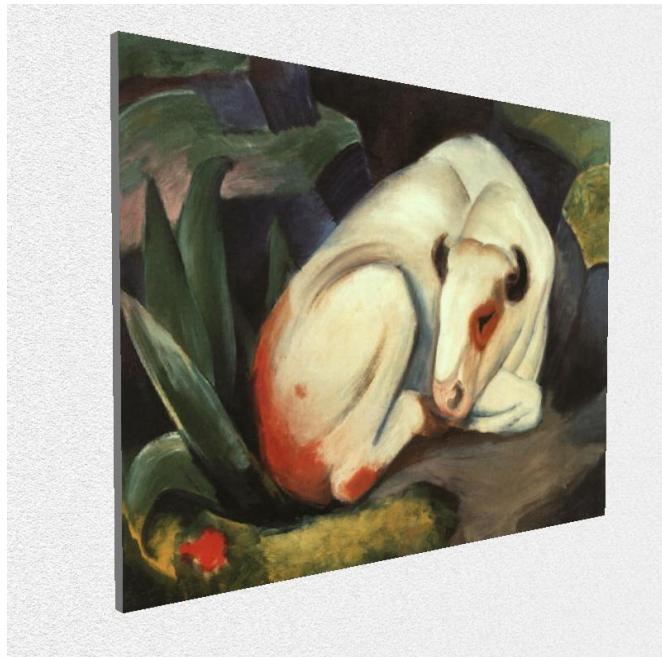


图 13

- 4、调整材质的尺寸与方向，与画板的大小相同；
- 5、同样，可以在办公桌上的电脑显示屏上，贴你喜欢的图案【注意旋转角度、尺寸】。
- 6、用“去除”功能，布尔运算制作如图所示的画框，尺寸自定；
- 7、调整材质的尺寸与方向，可以调整纹理的方向。

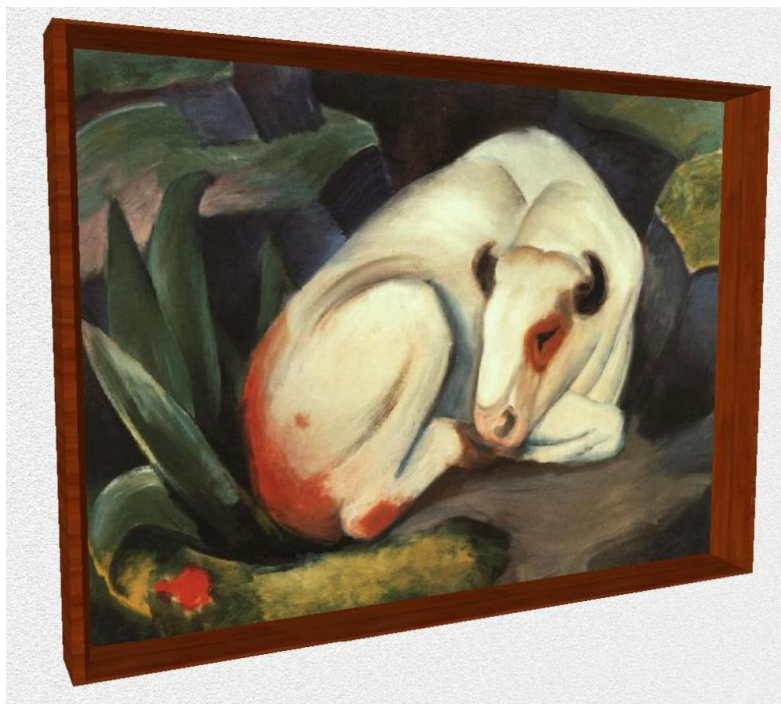


图 14

任务五 灯具选择与放置

一、任务要求

室内灯具选择与放置

二、任务实施

（一）在室内空间中选择灯具

- 1、打开任务 5a 中的办公室文件，或打开“Dx”文件夹中的《6a_0.dlx》；
- 2、按下图所示，为房间布置不同的灯具；
- 3、“单一灯具”布置办公桌和会议桌灯盘，并旋转摆放方向；
- 4、“单一灯具”布置白板射灯，右击灯具→照射点→按 C0-G0 排列，设置灯具的照射点；
- 5、“直线排列”布置窗边射灯和书架射灯，在“旋转角度”中设置整排灯具的照射方向；
- 6、“单一灯具”和“沿着线复制”布置侧墙及植物射灯，逐个设置灯具照射点；【注：有些厂家插件的灯具可使用“可转动灯具部分”选项】
- 7、保存文件为“任务 6a.dlx”。



图 15

（二）学习区域排列和圆形排列

- 1、按下图所示，为房间布置不同的灯具；
- 2、“直线排列”布置照明讲台的射灯；【注意：在立面图中调整灯具高度】
- 3、“直线排列”布置照明黑板的洗墙灯，在“旋转角度”中设置整排灯具的照射方向；
- 4、“区域排列”布置学生座位上空的悬吊灯盘，在“旋转角度”中设置整排灯具的旋转方向，以及每个灯具的旋转方向；【注意：在侧视图中检查角度的旋转是否正确】
- 5、“圆形排列”布置讲台前方的两个扇形排列射灯；【注意：起、止角度的设置】

6、保存文件。

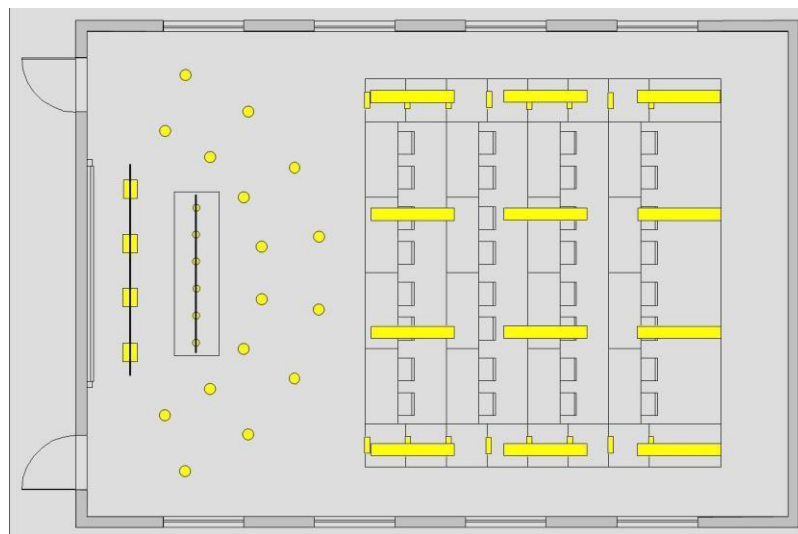


图 16



图 17



图 18

任务六 灯光场景

一、任务要求

室内灯光场景

二、任务实施

(一) 在室内空间中选择灯光

- 1、打开 6a 中完成灯具布置的存盘文件，或打开“Dx”文件夹中 《8a_0.dlx》；
- 2、各组灯具分配到各个控制群；【注意：一个灯不要进两个控制群。】

- 控制群 1：窗
- 控制群 2：白板
- 控制群 3：书架
- 控制群 4：壁柜
- 控制群 5：植物
- 控制群 6：办公桌
- 控制群 7：会议桌

- 3、创建三个灯光场景：工作、会议、休闲；各场景中控制群的调光“模糊值”如下：

工作场景		会议场景		休闲场景	
窗	100%	窗	100%	窗	80%
白板	0	白板	80%	白板	0
书架	100%	书架	50%	书架	80%
壁柜	50%	壁柜	50%	壁柜	80%
植物	80%	植物	0	植物	40%
办公桌	80%	办公桌	10%	办公桌	0
会议桌	30%	会议桌	50%	会议桌	0

计算，查看各场 4、计算，查看各场景效果；

- 5、保存文件。



图 19

(二) 阶梯教室灯光场景

- 1、打开“Dx”文件夹中的《8a_Z1_0.dlx》;
- 2、各组灯具分配到各个控制群;【注意：一个灯不要进两个控制群。】
 控制群 1: 靠左窗一列吊灯
 控制群 2: 靠右窗一列吊灯
 控制群 3: 中间两列吊灯
 控制群 4: 台阶灯
 控制群 5: 讲台射灯
 控制群 6: 黑板灯
 控制群 7: 内圈射灯
 控制群 8: 外圈射灯
 创建三个灯光场景：工作、会议、休闲；各场景中控制群的调光“模糊值”如下：

投影场景		讲课场景		欢迎场景	
左窗吊灯	10%	左窗吊灯	80%	左窗吊灯	80%
右窗吊灯	10%	右窗吊灯	80%	右窗吊灯	80%
中间吊灯	10%	中间吊灯	80%	中间吊灯	0
台阶灯	100%	台阶灯	0	台阶灯	100%
讲台射灯	0	讲台射灯	80%	讲台射灯	60%
黑板灯	0	黑板灯	100%	黑板灯	0
内圈射灯	0	内圈射灯	0	内圈射灯	60%
外圈射灯	50%	外圈射灯	0	外圈射灯	60%

- 4、计算，查看各场景效果;
- 5、保存文件。



图 20

任务七 引入日光及计算结果输出

一、任务要求

引入日光及计算、打印输出

二、任务实施

(一) 在室内空间中选择灯光

1、打开 8a 额外任务已完成的《8a_Z1_0.dlx》;

2、各组灯具已分配到各个控制群;

控制群 1: 靠左窗一系列吊灯

控制群 2: 靠右窗一系列吊灯

控制群 3: 中间两列吊灯

控制群 4: 台阶灯

控制群 5: 讲台射灯

控制群 6: 黑板灯

控制群 7: 内圈射灯

控制群 8: 外圈射灯

3、新建灯光场景: 白天讲课;【注意: “白昼光因子”的设置: 勾上“顾及日光”, 去掉“自然光比率”】

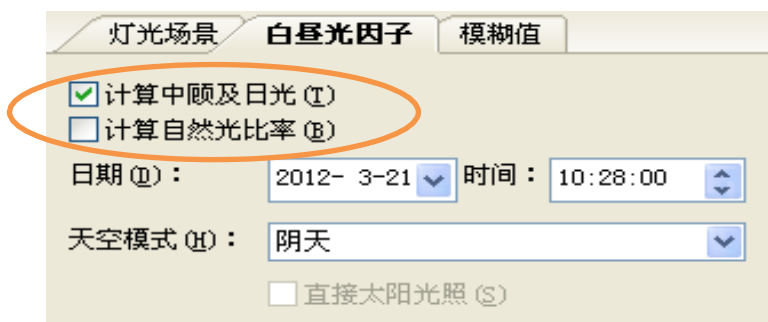


图 21

4、设置地点、北向、时间等;

5、场景中个控制群的调光“模糊值”自行设置, 达到照明效果的同时, 兼顾节能;

6、计算, 查看各场景效果与照度;

7、保存文件。



图 22

（二）会议室日光场景

- 1、打开“Dx”文件夹中的《9_0.dlx》；
- 2、新建灯光场景：日光场景——只看日光，不考虑灯光。【“白昼光因子”的设置：勾上“顾及日光”，勾上“自然光比率”】

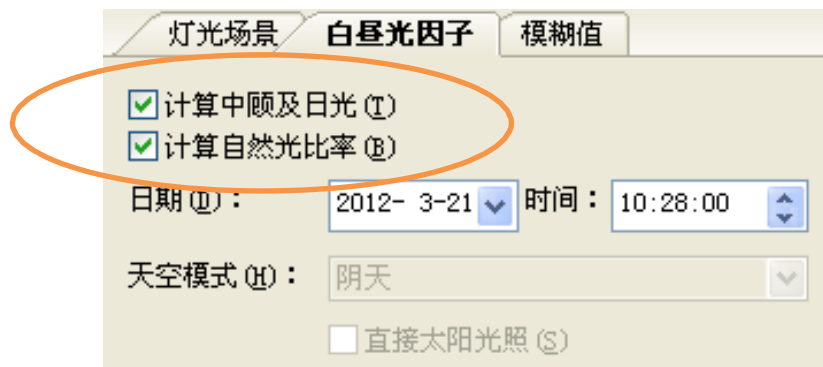


图 23

- 3、设置地点、北向、时间等；
- 4、计算，查看各场景效果；
- 5、保存文件。

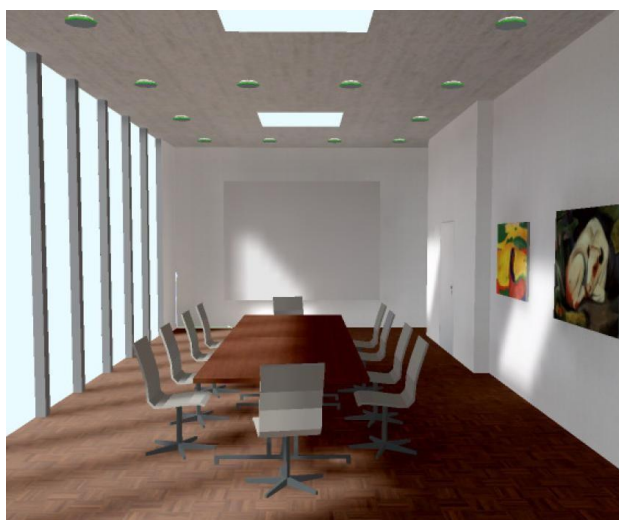


图 24

【项目小结】

本项目介绍了室内照明设计的分类及照明设计趋势等，同时通过利用 DIALux 软件进行室内空间照明设计，完成了室内空间建模、室内家具与物品置入，室内颜色与材质设置，室内灯具选择与放置，灯光场景设定，引入日光，并输出计算结果。

思考与练习九

- 1、简述观演空间光环境的实施策略。
- 2、简述功能性人工照明设计的主要任务。
- 3、简述室内光环境设计的依据。
- 4、简述室内照明设计中灯具选择的依据。
- 5、简述室内光环境设计的未来趋势。
- 6、简述氛围性人工照明设计的主要任务。
- 7、在同样的光照条件下，简述影响人眼对环境中亮度的感知的因素。
- 8、简述灯具控制光线的原理和方式。
- 9、简述漫射照明特点及方式。
- 10、论述住宅中常用的灯具类型及其特点和适用范围。
- 11、论述自然光设计的意义。

项目七 照明产品设计案例

【知识目标】

- 1、了解国内外著名品牌照明产品；
- 2、掌握 LED 工作台灯专题案例；

【技能目标】

- 1、能查找收集国内外著名品牌照明产品；
- 2、会用三维模型软件设计 LED 工作台灯。

【任务导入与项目分析】

人类从来都不会放弃对光明的追求，灯就是光明的使者。原始人类钻木取火，松木为灯，现代社会，科技飞速发展，人类的光明事业变得更加的多姿多彩。黑夜里，灯是曼妙的精灵，透过丰富的光影层次，带给我们无限的甜美与温馨；白天，灯具又幻化为装点空间的神奇画笔，或端庄，或活泼，装扮着我们五彩缤纷的生活。



图 8-1 意大利知名灯饰品牌 FLOS 的灯具设计

任务一 国内外著名品牌照明产品

国际上有许多擅长于做设计研发的灯具品牌，时尚之都意大利就聚集着 flos、artemide、foscarini 等国际知名灯具品牌。

Artemide

被称为灯王的意大利灯具品牌 Artemide 成立于 1960 年，是全球最大的灯具生产厂商之一。Artemide 的灯具多呈现出极简主义的特点，关注人们在生活中和光接触的每个细节，提倡“自由”是生命的核心价值，而“设计”则是展现

独立个体自由度的最佳工具。Artemide 将自己的产品及品牌概念形象的描绘为：“人类之光”（HUMAN LIGHT），富有智慧的光，它可以在人们的日常生活中与人们和谐沟通，这也是 Artemide 的核心设计理念。

在近 60 年的时间里，Artemide 生产的灯具享誉世界，代表作品包括：Tizio（提斯尤）、Tolomeo（托洛梅奥）、Melampo（梅兰珀）、Logico（罗西克）等。

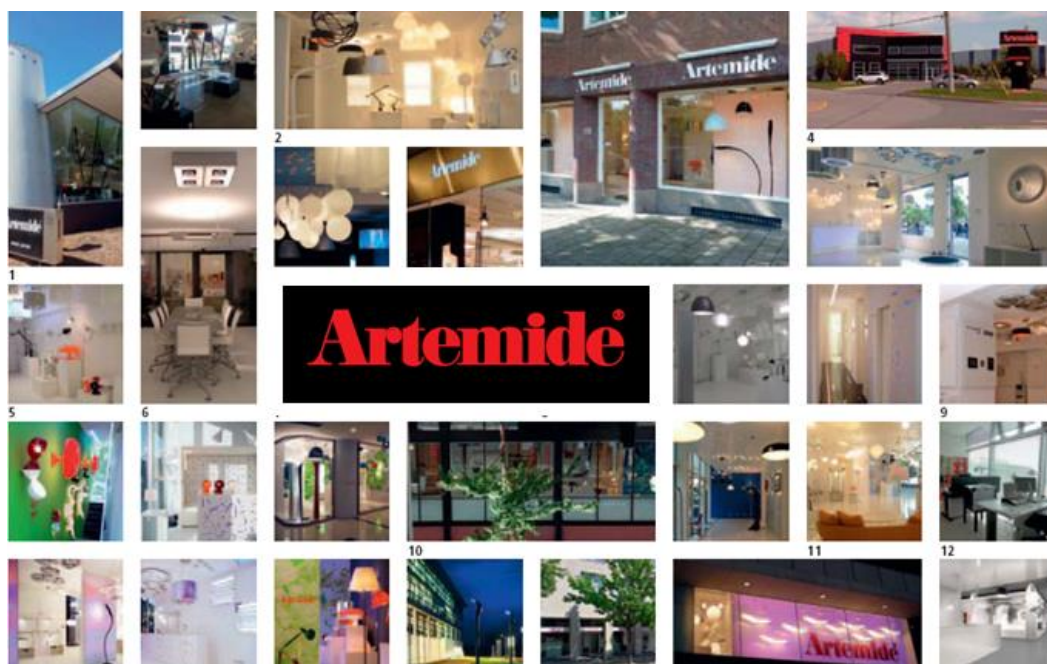


图 8-2 Artemide 网站首页



图 8-3 Tizio 台灯，设计师：Richard Sapper （里查德·萨帕）

Richard Sapper 设计的 Tizio 台灯获得 1979 年的“金圆规”设计大奖，同时也获得纽约现代艺术博物馆的永久收藏。

“在我工作或阅读时，希望光线只投射在面前的书页上，而四周仍保持着幽静和朦胧”，这是设计师设计 Tizio 的初衷，也正是这一构思引导他设计出这款闻名世界的双臂台灯。平衡力学的巧妙运用，使得 Tizio 呈现出多角度的平衡美感。

在它诞生将近 40 年后的今天，Tizio 仍然是“意大利制造”的崇拜物。Tizio 除了具有丰富的象征意义外（有人觉得它象一些水鸟，有人觉得它是一个微型油泵），它的非凡功能也让人惊叹。它有四种运动的可能性：底座平行的转动，第一和第二接头处的垂直转动，灯罩的垂直转动。在任何地方，Tizio 因有一个衡重系统而能永远保持平衡。铝材部件和连接活塞也是导电器，能够通过放在圆柱体底座中的变压器为节能的卤素小灯泡供电，这样就无需任何电线。



图 8-4 Mercury 吊灯

Ross Lovegrove 设计，于 2008 年米兰设计展发表的新品。透过静态的设计，呈现出流动的有机形态，现代感的铝盘似衍生出鹅卵石般大小的水银珠滴，波光流转的浮动于空中，有魔术般的错觉。表现创作一年高瞻远瞩，是非常未来感的一盏灯，再次展现大师擅长有机形态的功力，以轻量、最少材质制作。整盏灯不让人感到生硬冰冷，反而更有生命力，非常适合极简内敛、低调奢华的空间。

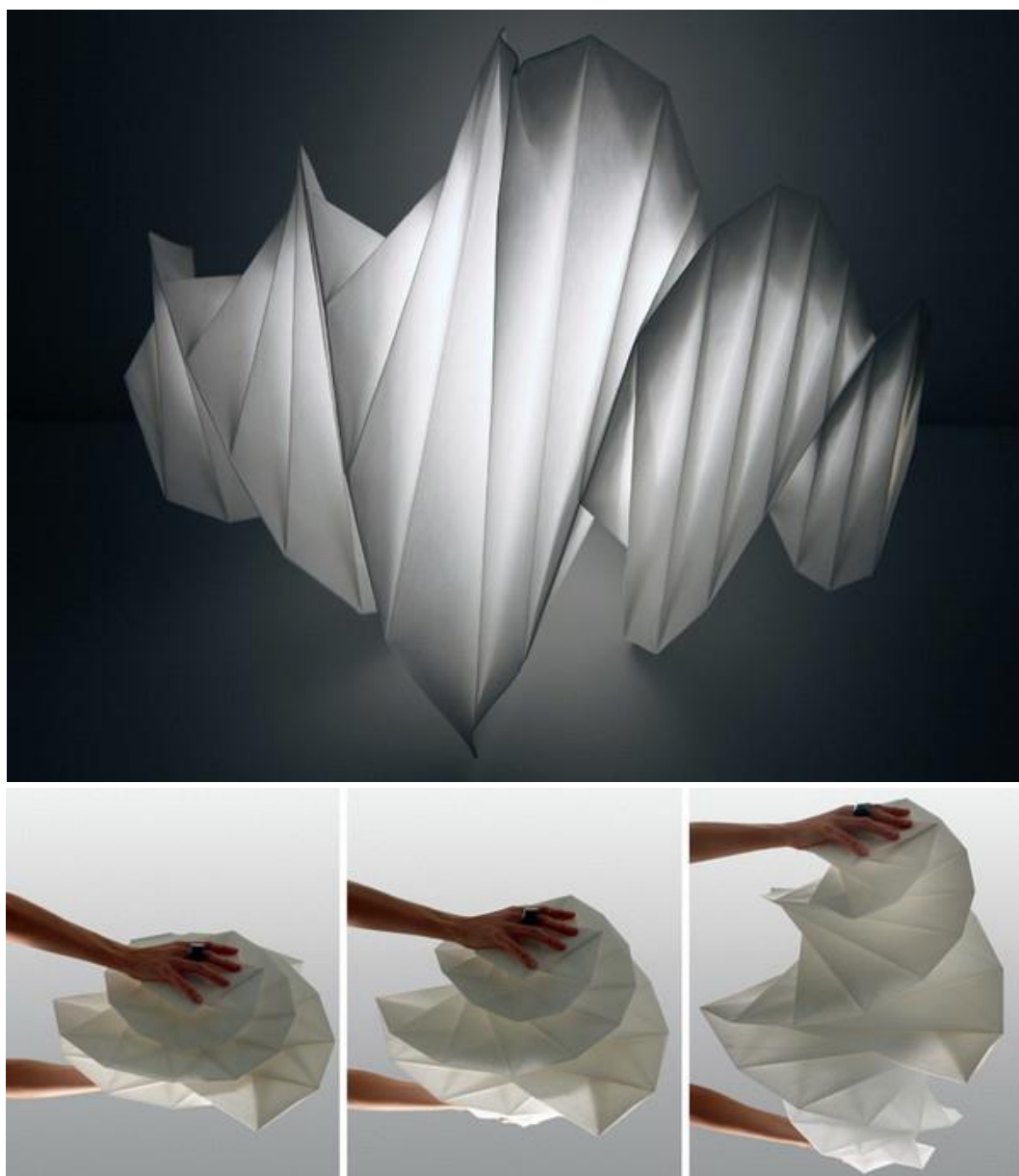


图 8-5 “in-ei” 灯具 日本著名时装设计师三宅一生设计

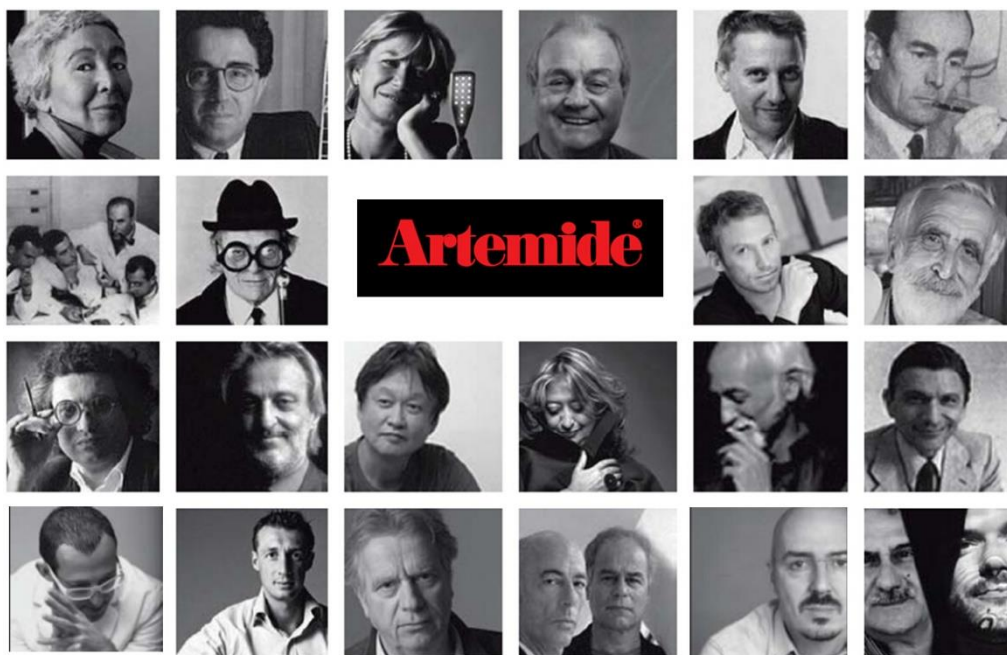


图 8-7 Artemide 旗下设计大师群

日本著名时装设计师三宅一生为意大利灯具品牌 artemide 设计的“in-ei”灯具在 2012 年米兰设计周上展出。这是一款可折叠的灯具，设计师运用了可持续的设计理念。灯具是用特殊的织物材料制作，这些材料是利用可回收利用的 PET 瓶制造的，能有效的节省能源，不仅如此，还可以将碳排放量降低到 80%。

在日语中“in-ei”的意思是“阴影”、“遮蔽”和“细微变化”的意思，这款灯具使用折叠的手法，用 2D 和 3D 的数学原理来确定灯罩的形态和光影范围，展开后就形成了一个大灯罩，通过丰富的层次变化形成有趣的光影效果。

Artemide 旗下拥有众多大师级的设计师，他们把灯具当成空间气氛转换的神奇开关，将纯粹的照明功能巧妙地转化为装饰的主角，进而创造出缤纷而多变的造型。

Ross Lovegrove（洛斯·拉古路夫），当代最著名和最具想象力的设计师之一，原德国青蛙设计公司设计师，曾担任路易威登、杜邦等品牌的设计顾问，空中客车、法国标致和奥林巴斯等知名公司均为其客户。

Ross Lovegrove 的设计灵感来自自然界及未来主义，其作品以揉合自然美态与超新科技的有机设计享负盛名。他充满未来感的产品设计，带动了有机美学的新潮流。流动的线条、耀目的色彩、尖端科技的质料，是 Lovegrove 产品的独特商标，他善于透过新颖的材质和新科技，在形态(form)、材质(materials)和技术(technology)上达到“自然”的平衡。他主张“有机本质(organic essentialism)”的概念，而这种美学和组成元素，也都是源于大自

然并再创造出带有未来科技风格的产品形态。目前，他的作品被美国纽约现代艺术博物馆、巴黎蓬毕杜中心和巴黎设计博物馆等收藏。

Artemide 除了公司内部的设计师，还邀约时下知名的建筑、室内、装置设计大师以及艺术大咖进行跨界合作。



图 8-8 建筑设计大师：扎哈 哈迪德和她设计的灯具



图 1-9 Artemide 的灯具生产过程细节

FLOS

1962 年成立的 FLOS 以其特立独行的设计风格，深受人们的喜爱，其灯具行业的领导地位也一直为人惊叹。FLOS 主要生产现代风格的装饰灯具以及商业照明灯具。该公司建立初始时出品的灯具现在已经成为意大利灯具制造业的经典之作，这些作品包括 Achille Castiglioni 等大牌设计师设计的 Arco、Relemme、Toio 以及 Taccia 系列，至今这些系列仍在批量生产，这也证明了其完美的设计研发能力与制造工艺。FLOS 不断的延续自己的传统，并将其融入新产品的设计制造中，使得 Flos 灯具成为时尚设计与一流加工技术的代名词。该公司产品的超群之处在于其典雅的造型与优美的线条，在它的外观造型上可以看到现代风格与古典风格的融合。FLOS 的许多产品已经成为时尚与经典的典范，因此业界也将 Flos 的设计风格称为“贵族式风格”。

FLOS 的创立者 Arturo Eisenkei 并不是一位设计师的，而是一位灯具制造商。他在当时获得一项在塑料表面喷雾的新技术，于是与设计界著名的 Castiglioni 兄弟档设计师合作创立了 FLOS。

Castiglioni 兄弟档成了 FLOS 早年的当家设计师，抛物线造形的“ARCO”灯是 FLOS 于 1962 年生产的第一批灯具，由当家设计师 Castiglioni 兄弟设计。Achille Castiglioni 1918 年出生于米兰，学建筑出身，同样跨界建筑和产品两大设计领域，所以从他的很多家居产品设计上都能看到建筑观念的影子。Achille Castiglioni 曾经服务过的 ALESSI、FLOS、MOROSO 等家居制造商现在已经成为世界最为顶级的生产制造商，Achille Castiglioni 是陪伴着这些品牌成长起来的。Achille Castiglioni 的设计已经生产销售了几十年，成为经典。

ARCO 灯（抛物线灯）是 FLOS 的经典之作。专为古迹建筑特别设计的 ARCO 在设计之初是为了代替餐厅吊灯。因为意大利有许多建筑都是古迹，屋主不能随意在墙壁或天花板上打洞装灯，于是 Castiglioni 设法让立灯“变高变大”，让灯身变成抛物线状，拉高立灯高度达 2.5 公尺，为稳固重心，大理石底盘基座总重量达 65 公斤。65 公斤的灯具，那一定很难移动吧？若这么想就错了，ARCO 设计的巧思就在此，其基座上有个小洞，刚好是整座灯具的平衡点，只要插入扫把或木条，两个人就可以轻松搬动灯具。



图 8-10 设计大师 Achille



图 8-11 抛物线造形的“ARCO”灯



图 8-12 著名的 SNOOPY 台灯，Castiglioni 设计

Castiglioni 1960 年为 Heisenkeil, Flos 设计了蚕茧吊灯系列。这些灯具最初源于设计师探索出来的一个专利材料，当时属于 Merano 的 Heisenkell 公司，后来经过 FLOS 公司的发展，研发出一种塑料制成的合成纤维替代材料。

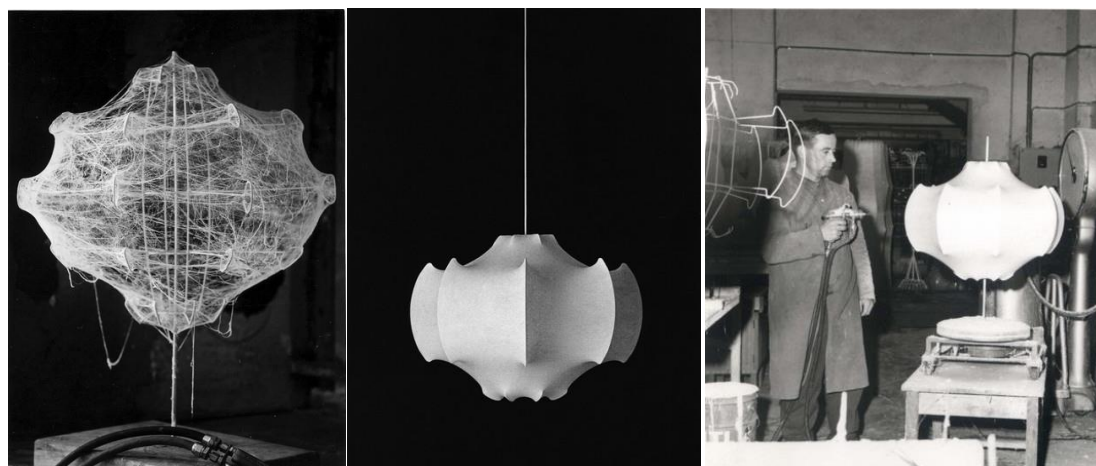


图 8-13 著名的蚕茧系列吊灯，Castiglioni 设计

FLOS 能在国际持续走红的原因，与它能持续网罗才华洋溢的设计师有关。1988 年，法国有鬼才设计师之称的 Philippe Stark 加入 FLOS，从第一支灯 Ará（牛角灯）到之后 ROSY ANGELIS（布丁灯）、Gun（枪灯）等，都获得了市场的好评。Philippe Stark 是一个非凡的传奇人物，集流行明星、疯狂的发明家、浪漫的哲人于一身，或许算得上世界上最负盛名的设计师。他的作品随处可见：从纽约别致的旅馆到 FF4900 邮购商行，从法国总统的私人住宅到欧洲最大的废物处理中心，从全球各地的咖啡馆到家庭中价值数十万的座椅和灯具，甚至包括浴室中的牙刷。用色大胆的荷兰设计师 Marcel Wanders 以及设计师 Marc Newson 等陆续为 FLOS 创造出不少灯具，让 FLOS 能一直保持在灯界的领导地位。



图 8-14 Philippe Stark 设计的灯具



图 8-15 Sky garden 吊灯，Marcel Wanders 设计，Sky garden 吊灯的灵感来自于设计师 Marcel Wanders 的旧家，现代感十足的 Skygarden 吊灯内有石膏浮雕装饰，完美地融合了传统装饰与现代设计

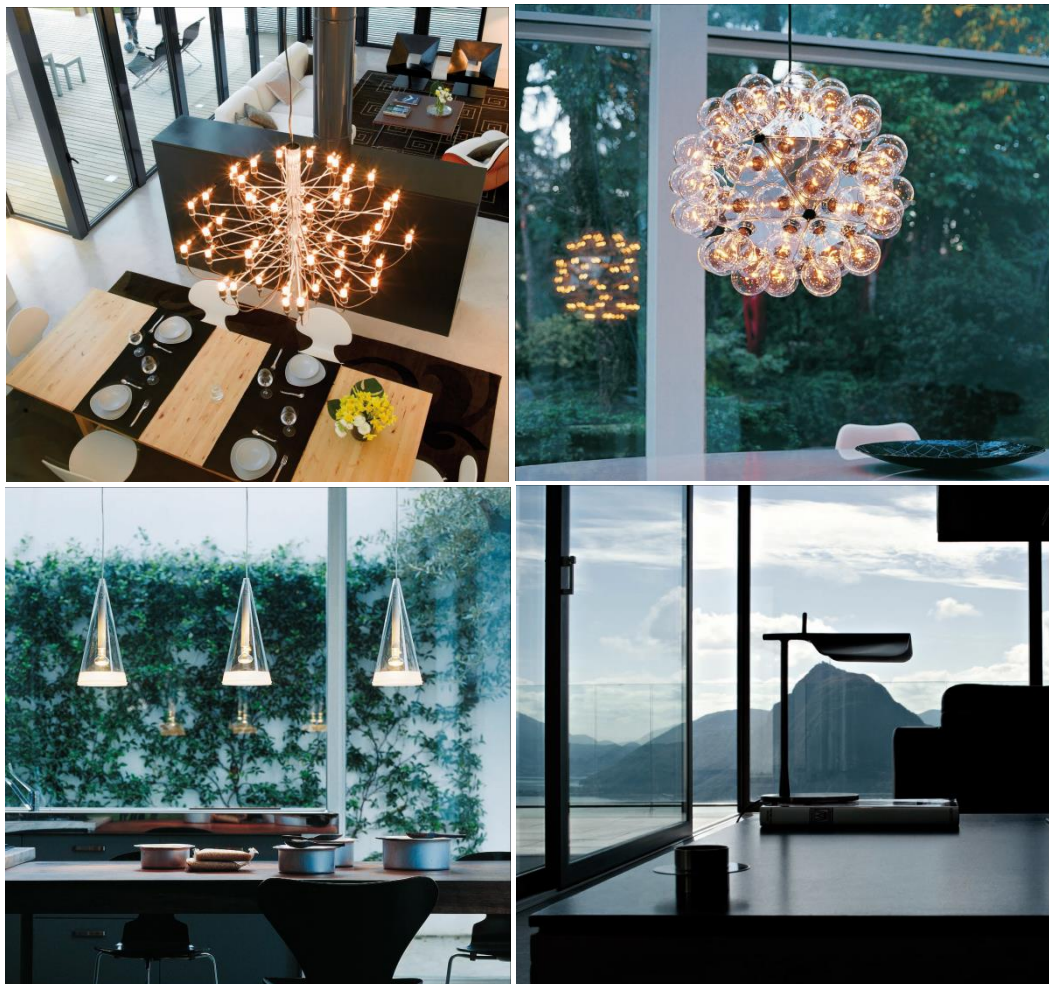


图 8-16 FLOS 的经典灯具设计

Moooi

moooi 的名字来自于荷兰语的“美丽”（mooi），多加了一个字母“o”，意思是再多加一分美丽。最初创办 Moooi 的目的，是为富有创造力的设计师们提供一个具有逻辑性思考的地点，因为工业设计的作品必须经过制造商的技术协调与磨练，才能真正变成可生产的产品，所以，在设计师与制造商之间就需要做非常细致的沟通。于是，“moooi”这样一个探索个别设计与大量制造产品的实验所就应运而生。经过多年的发展，Moooi 品牌已经不仅仅是一个家居用品生产商，它已经成为一种风格的代表，引领着最具创造性的流行时尚。

“我们都是独立的，我们又是一个大家庭。”这是 Moooi 设计师的经典格言。Moooi 的每一位设计师，一直坚持着这种理念，通过个性的创造与世界进行不断的沟通和对话。在 moooi 的设计中，人始终是核心因素，设计师渴望在功能性之外，创造艺术氛围。人的性格、品位、喜好和感情，都完美地展现在每一件产品中。选择不同的产品，可以展示出每一个人内心的不同侧面，每一种选择都是一个全新的自己。不管何时，它都有自己的主张，让使用的人除了享受它的功能性之外，也同时在消费一个观念，一种艺术。

灯光是营造家居气氛的魔术师，也是室内最具魅力的调情师，不同的灯，营造着不同的氛围，却能带来同样的浪漫。一个温馨惬意的家，来源于自身的品味和修养以及对生活的悟性与追求。把握和了解灯具的时效性、代表性的细节处理方式，moooi 的灯具能从各方面满足高雅情调生活的需求。



图 8-17 Raimond lamp, 设计师: Raimond Puts 一个由数学模型组成的完美球体, 微小的 LED 光源散发出如繁星闪烁般的柔和的光芒

moooi 的创办人是马塞尔·万德斯 (Marcel Wanders)。

马塞尔·万德斯 1963 年出生于荷兰, 原本为艺术背景, 1995 年决定成为一名工业设计师。1996 年 Marcel Wanders 因为为 Drog Design 设计的作品“Knotted Chair”开始为人们所熟识。

马塞尔·万德斯 (Marcel Wanders) 的设计其实不算“创新”, 他不会设计出一个你完全看不懂的怪物。他比喻自己的设计风格是将“设计原型”为蓝图, 在原型上变化出惊喜, 产生让人会心一笑的 X 元素。马塞尔·万德斯的设计实用、漂亮且风格多变, 多次获得国际设计奖项, 并在纽约现代艺术博物馆等各大设计展会上频频亮相。



图 8-18 设计师马塞尔·万德斯

这个在自己的网站说“设计已死” (design is dead) 的设计大明星说: “所有该设计的东西已经设计出来了, 当今的设计师很难变出个全新的东西来。我认为最近新的设计就只有 iPod 了。况且新的东西有什么好? 设计师最重要是要设计出人们能认同, 能跟人们沟通的东西来。”

“我要从你们的头脑中盗窃你潜在的意识, 为你编织出一个故事、幻想, 就因为我使用的是你们已经认得的东西, 所以你们的反应将更强烈!”



图 8-19 马塞尔·万德斯设计的灯具



图 8-20 灯具 Heracleum the Big O, 设计师: by Bertjan Pot



图 8-21 灯具 Prop Light Round, 设计师: Bertjan Pot



图 8-22 灯具 Paper Patchwork, 设计师: Studio Job

Qis Design

来自台湾,隶属于明基友达集团旗下的生活设计品牌 QisDesign,自 2009 年诞生以来仅用短短的几年时间,相继推出一系列跨界整合尖端科技与美学设计、令人目眩神迷的 LED 精品灯饰,不仅席卷 45 项各类国际设计大奖,更以华人品牌身份首度受邀参加法国巴黎家饰展、德国法兰克福灯饰展等重大国际展会,也让称霸灯饰业界多年的欧洲品牌俯首称臣。

Qis Design 结合尖端科技与美学设计,融合理性与感性,QisDesign 用想象力创造新的可能性,打破传统的界线,响应消费者内心深处对于美好生活的渴望,为消费者带来惊喜无限的感官盛宴。

Qis Design 来自设计各领域的菁英,由消费者研究、人机界面设计、机构材质研究、工业设计、视觉设计及模型制作等团队所组成。优异的产品设计实力,已获得多项国际设计大奖的肯定,包含德国 Red Dot、德国 iF 及日本 Good Design Award。



图 8-23 Coral 恋滢



图 8-24 The Crystal Light 晶
艳

Coral (恋滢), 设计灵感来自于海中珊瑚, 由一朵朵如花绽放的单元体组

成，LED 光由花心透向花瓣边，营造波光摇曳的梦幻光影。特殊导光设计，将 LED 光导像花瓣边缘，魔幻光影是传统灯泡无法做到的。荣获德国 red dot、日本 G-Mark 多项设计大奖。

The Crystal Light（晶艳），设计灵感来自于矿石结晶，每一单元体有正六边形的钻切构面，绽放如钻石般光芒。结合 LED 低温多彩和磁力相吸原理，让用户可自由串接堆栈灯体，如乐高积木般有趣。遥控器控制两种灯效模式：彩虹模式与单彩模式。该荣获德国 red dot 设计大奖。



图 8-25 BE Light



图 8-26 Coral Reef 环礁

BE Light 的设计灵感来自于折纸艺术，将 2D 转化为 3D 立体的工艺设计。可回收铝为材质，银色款金属发丝处理，黑色款雾面喷漆处理，防刮抗锈环保。桌灯款荣获德国 red dot、iF、日本 G-Mark 设计大奖。立灯款荣获德国 iF 设计大奖。

Coral Reef 环礁，设计灵感来自于海洋中层层迭迭的珊瑚环礁，打造 LED 均匀柔光环片。桌灯款金属质感，手工打造金属脚座，呈现工艺之美。触控金属脚座可四段调亮度。立灯款左右旋转三层环片，自由选择亮灯环数。桌灯款荣获德国 red dot 设计大奖、立灯款荣获德国 red dot 与 iF 设计大奖。

Flamenca 花舞 以佛朗明哥舞裙为设计灵感，Flamenca 在璀璨花榭舞影之间，流露绚丽光彩。LED 照明结合触控科技，轻触银色触控盘即可调整光效。上下双色透明亚克力与律动线条设计，创造赏心悦目视觉飨宴。

Aurelia 海月，以海月水母为设计灵感，圆润透明灯体，如海月水母悠游。LED 照明结合触控科技，桌灯款可触控切换三段调光：全亮、情境与小夜灯。吊灯款可切换开关两段式调光。



图 8-27 Flamenca 花舞

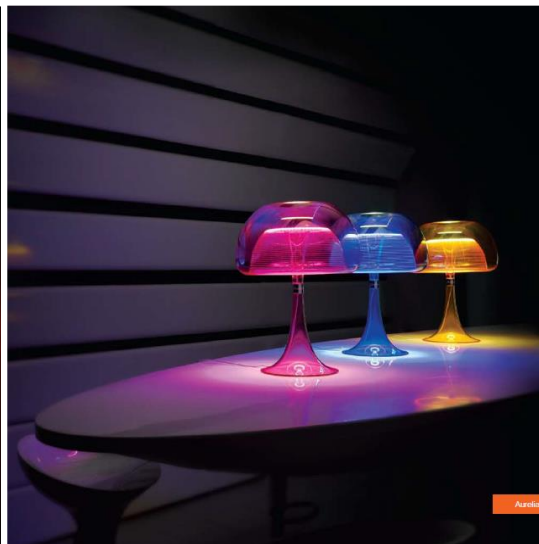


图 8-28 Aurelia 海月

任务二 LED 工作台灯专题案例

第一阶段——产品策划与定位

一 项目介绍

1. 项目背景：

在设计项目设计的初期，需要详细的分析并掌握项目的背景。该项目是受广东省中山市某灯具企业委托，在规定时间内设计一款符合市场需求的 LED 工作台灯设计，要求围绕公司的企业文化及产品开发思路，符合公司的生产及制作工艺，充分运用 LED 技术，在造型时尚美观的基础上，最大化的满足工作照明需求。



8-29 LED 技术分析

2. 项目产品预计上市时间

在灯具设计的初期，同企业负责人进行深入沟通后，要确定产品预计上市的时间。需要结合考虑灯具外观设计的周期，结构设计和光源设计需要的时间，以及灯具手板制作、模具设计及修改、样品生产及测试的时间，这样才能在预计的时间里有条不紊的规划设计流程，在企业要求的时间内提交设计方案。一般灯具外观设计需要 20 天，后期结构设计至样品生产确认需要 40 天，因此产品从策划到上市至少需要两个月的周期。

3. 产品定位

将此次的台灯设计定位在中高端档次。适用于学生群体、热爱看书和学习的工作人士，亦可以作为礼品送给长辈或者朋友。还包括长时间使用电脑的人士，该类群体对灯具的功能要求较高，期望该类 LED 灯具对比普通的台灯能减少眼睛酸痛，提高学习的效率，并保护视力。所以学生、教师和电脑玩家应该是主要考

虑的对象范围。



8-30 消费群体分析

4. 产品上市后的状态

需要预期考虑产品上市后的状态，对销售渠道有一定的认识，因此设计师需要加强与市场人员的沟通。通过分析后得知产品主要针对国内市场主要是大、中小型超市及网上销售渠道。国外市场主要通过环球资源网和阿里巴巴等渠道需找国外的经销商。

5. 产品整体尺寸及基本要点

该产品的各部分参数及基本要点主要有：

底盘直径 200mm 灯头 370mm 灯杆 400mm

包装尺寸 500mm*125mm*260mm

净重 不超过 0.7KG

材料：主要材料选用 ABS、铝材、PC 导光板

（注：实际设计尺寸允许一定的出入，但不能偏差太多）

6. 造型设计及要求

以人性化的设计理念作为灯具设计的出发点，一切从工作照明的角度出发考虑造型的设计。主要体现在灯杆、底盘、调节结构和开关的造型设计，可适

当添加一些辅助功能。如在灯杆正前方可设置电子触摸调光功能，并配有声音提示。灯头可以 340 度调整照明高度。可配有万年历和时间显示屏。要求整体造型时尚，局部细节设计精美、产品使用操作简单，在不影响整体外观的基础上，允许多功能、多用途，同时考虑节能与环保。

二 LED 台灯分析

1. LED 照明技术的优点

LED 工作台灯对比普通有如下优点：耗电量低、使用寿命长、高亮度、低热温、坚固耐用、环保。所以 LED 工作台灯得设计应从绿色照明的理念出发，通过科学的照明设计，采用效率高、寿命长、安全和稳定性的照明部件（电光源、灯用电器附件、灯具、配线器以及调光控制设备和控光器件），改善人们工作、学习、生活条件和质量，创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现情感需求的照明设计。LED 光源采用内嵌式面设计，有效避免眼睛和光源直视，即使是仰视一定的角度，也能有效的杜绝炫光和瞬盲，缓解眼睛疲劳。



2. 人群定位探讨

对该 LED 台灯的消费群体在产品定位的基础上进行细分，主要有学生群体、爱好阅读的成功人士、电脑玩家、选送礼物购买者、对 LED 技术了解和信任的学习者、喜欢简洁具有质感设计的人士。

3. LED 台灯风格分析

在设计初期，需对当今 LED 台灯风格的一线资料进行充分掌握，所以前期的调研工作和调研方法主要有：网上调查，从灯具电商网站上对热销产品进行归类，并对相关数据进行统计分析；从每年 4 月份和 11 月份的香港春秋两季灯饰展，每年 5 月份的中山古镇灯饰博览会等重要展会查询灯饰风格；灯饰企业家和销售人员的问卷调查；中山古镇灯饰广场专卖店的实地调研。通过调查总结，LED 台灯设计的风格主要是形态简洁、操作简单、能灵活转动、满足多角度照明需求、而且便于折叠。

4. LED 台灯设计趋势

未来 LED 台灯设计呈现简少主义的设计趋势，主要体现在将照明科技和工业设计有效的结合。在造型上极为简练，将多余的外形全部简化，剩下最简单的形态。在材料上寻求突破性的实验创新，并运用最新 LED 科技的技术发光原理，营造时尚而温馨的家居环境照明氛围。如以色列设计师 Nir-Meiri 以 LED 为光源，善于运用特殊的材料如沙砾、海藻等，这些灯具设计作品具有温馨的家居环境氛围。同时获得 2011 年 IF 奖和 2011 年台湾精品奖的灯具将灯臂和灯底座融为一体，色彩上采用大方的红色，做到了极简。



8-32 以色列设计师 Nir-Meiri 的灯具设计



8-33 未来 LED 灯具设计趋势

5. 市场主流 LED 工作台灯分析

目前市场上主要有下面三款台灯受到业界的普遍关注。嫁接苹果手机造型的台灯，该台灯体现出对时尚元素的元素，将通信产品的形态语言嫁接在灯具底座和灯罩上，具备一定的时尚感，消费者反映良好。小二郎健康 LED 护眼台灯，提炼动画人物概念运用在台灯上，特别吸引儿童类的消费群体。雪莱特台灯采用灵活的转轴设计，两扇能折叠的 LED 灯片突出了设计的亮点，在市场上也是热卖的产品。所以通过整体分析，这三款产品都有自己个性化的造型语言，在功能照明上各具特色，视觉上通过金属和塑料的搭配体现出时尚感。



8-34 市场主流 led 灯具

三 设计方法及造型设计分析

该分析过程主要集中在台灯设计方法造型元素上，通过收集近 20 年来国内外著名的台灯设计作品，然后从造型元素、色彩工艺、结构设计、材料设计及设计方法上进行整体分析，分析结果对 LED 台灯设计起到指导性作用。

1. 造型风格分析

台灯的造型风格和语言受到多方面的制约或影响，如灯具功能、结构材料、消费文化和地域文化、人机工程学等。在造型特色具有代表性的有：英国工业设计师 Ross Lovegrove 的台灯设计作品运用有机美学形态，充满未来感，因该设计师以揉合、自然美态和超新科技的有机设计享负盛名；意大利设计师奇特里奥的台灯设计则体现出简单而纯粹的几何线条；另外根据鸭子形态而来的台灯具有灵活的转动部件则体现出仿生形态设计语言。



8-35 LED 台灯造型风格分析

2. 色彩工艺分析

台灯主要由金属和塑料材质组成，铝材、不锈钢、铜件、铝镁合金是常用金属，铝材经过电镀产生亮面光泽、经过拉丝形成特殊纹理，经阳极氧化可产生不同色彩，铜件本身具有一定的质感和光泽，金属台灯主打色彩是原色银、纯净白、静雾黑，或者表面光亮的电镀。塑料台灯由于注塑材料色彩选择性多，因此塑料台灯的彩色更为丰富。



8-36 LED 灯具色彩工艺

3. 特殊材料运用

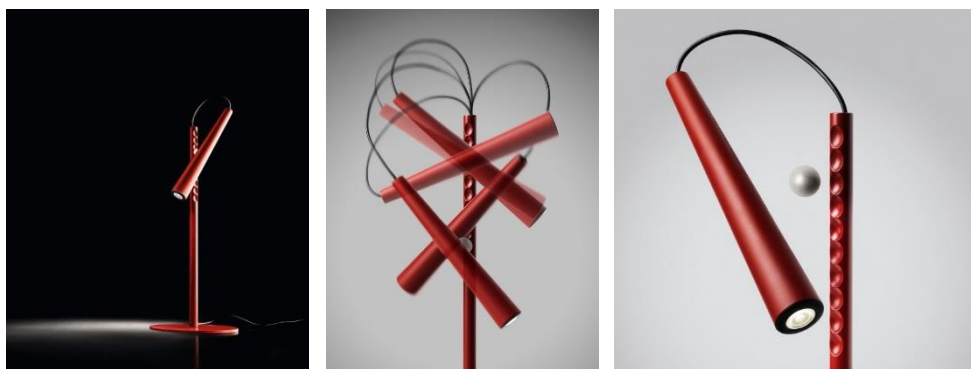
为保证灯具多角度旋转，在台灯设计中经常运用铝合金和硅胶弯管，该类材料可灵活自由弯曲，操作起来非常便捷，而且可以与灯臂和灯底座形成很好的形态衔接。其他的材料如毛毡的使用，利用其本身具备摩擦力的特点，可使灯管具有稳定性和可调性，使用者能随便调节光源的角度和高度。



8-37 灯具材料运用

4. 转轴结构设计

旋转结构设计是灯具设计重点考虑的因素，往往能体现灯具产品最大的特征。如下图所示的台灯利用磁铁的磁性工作原理，带有磁性的钢球能灵活移动灯具的照明高度和角度，起到特殊的转轴作用。



8-38 磁铁工作原理台灯

采用四轴联动结构的灯具，稳定性极强而且不失灵活性。



8-39 四轴联动结构台灯

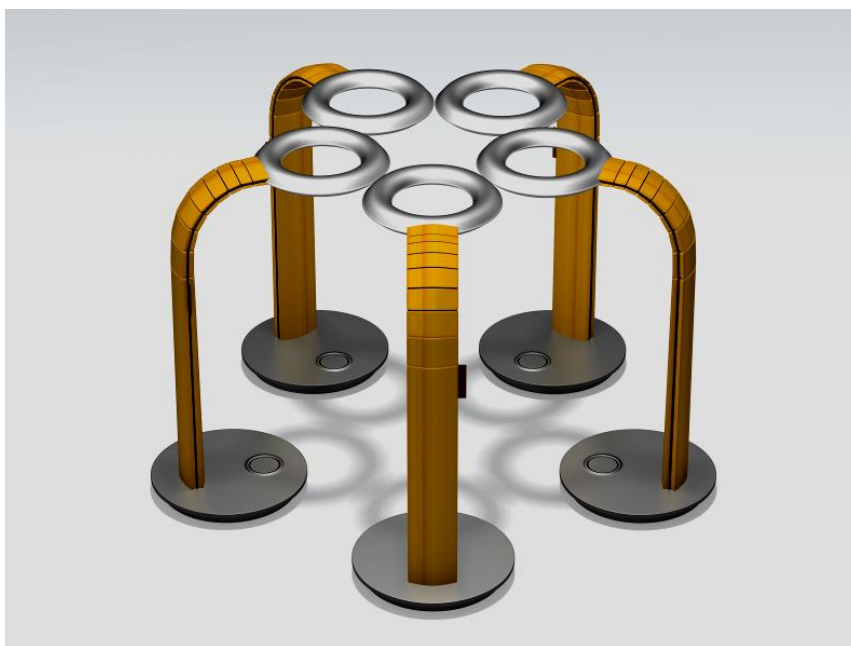
该灯具的灯臂和底座的转轴设计能保证灯具最大限度的活动。



8-40 自由旋转结构灯具

下图所示台灯由扁平的弯管材料连接圆形的底座和光源部分，功能统一、个

性十足且具有较高的审美价值。



8-41 弯管台灯

5. 注重产品功能、强调互动体验

灯具产品注重照明功能，而且强调使用过程中与用户的交互行为，有趣的体验能增加产品的价值。如飞利浦·斯塔克设计的台灯运用其一贯的幽默感的设计手法，该台灯通过帽子的遮挡能创造特殊的照明体验，产品能为 IPOD 等电子产品充电，体现了一定的实用功能。



8-42 台灯设计——飞利浦·斯塔克

6. 形态创新

在灯具产品的形态创新中，需要区分产品的核心功能和辅助功能，同时紧密围绕产品的主题进行创造。美国著名工业设计师 Yves Behar 为 Hermiller 公司

设计的叶子台灯，在产品形态上实现了独特创新。该台灯细长的造型如一片优美直立的叶片，可延伸并旋转 180 度，为另一片水平叶片提供支持，当水平叶片折叠靠近直立叶片时，光线将逐渐趋于柔和。



8-43 Hermiller 公司叶子台灯

为突出灯具的用户控制功能，所以将控制区域做了独特的划分，液晶触摸按键进行面积上的夸张处理，凸显无与伦比的触控技术，同时也强化了产品的体验功能，以此吸引消费者的青睐。

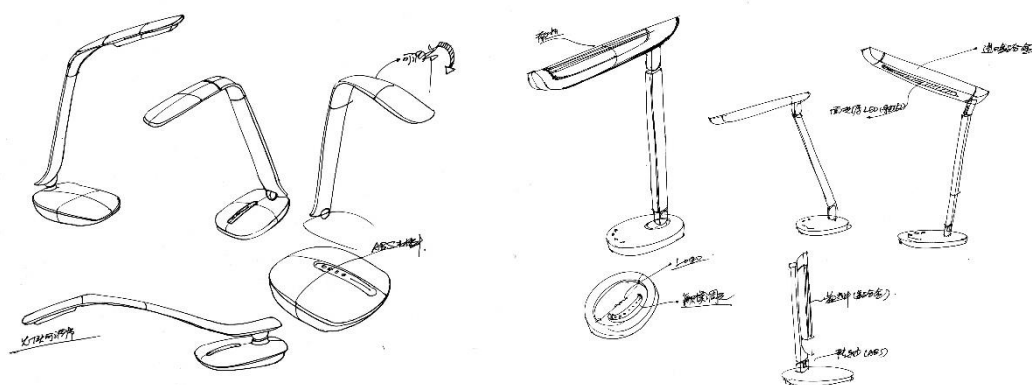


8-44 液晶触控屏幕台灯

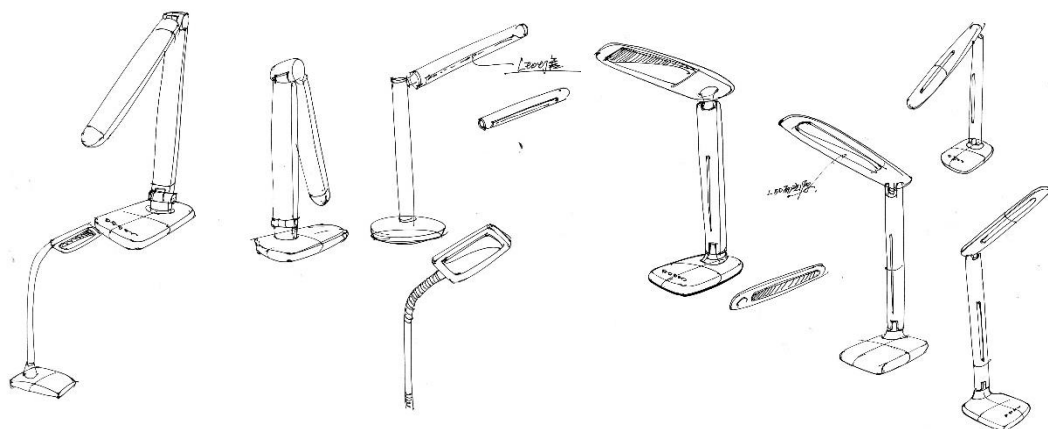
第二阶段 设计方案构思

一 概念草图设计

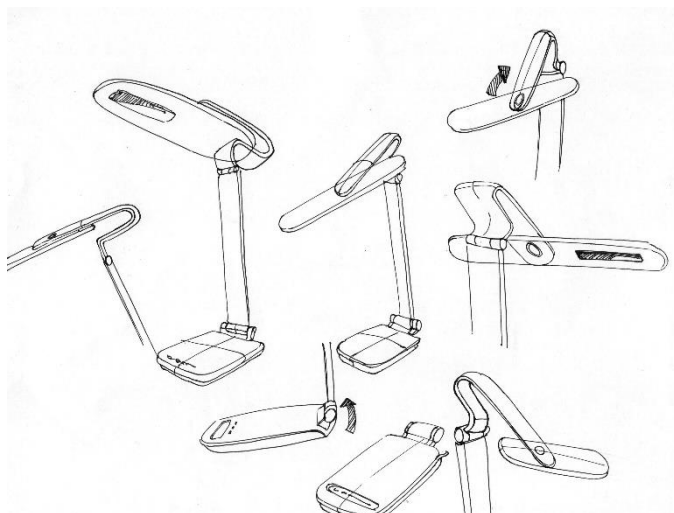
选用一种创造性思维方法进行构思,这里主要采用头脑风暴法进行草图设计与讨论,也成为“畅谈会法”,设计团队以会议形式对灯具方案进行咨询或讨论,始终保持自由,融洽,轻松的气氛,与会者无拘无束地发表自己对台灯创意的见解,不受任何框架的限制。团队其他成员则从发言中得到启示,进而产生联想,提出新的或补充的意见,这样产生了许多充满新意的台灯方案,最后对这些方案进行整理和分析。下面 5 组概念设计草图充分考虑产品的折叠性,在光源选择上以片光源为主,形态倾向简洁、材料节省且容易开模。



8-45 台灯概念草图设计（一）



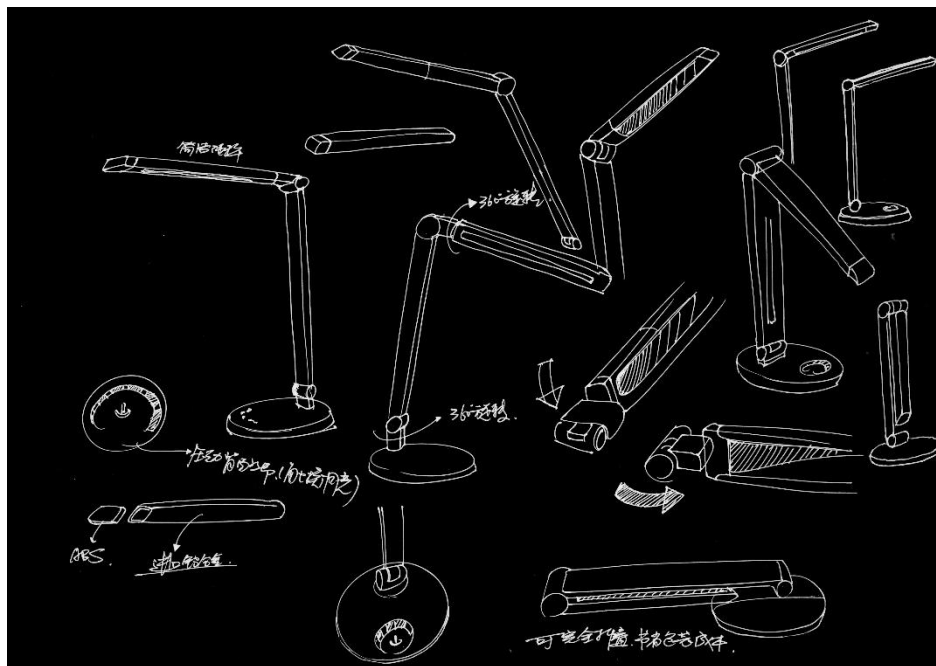
8-46 台灯概念草图设计（二）



8-47 台灯概念草图设计五

二 设计方案优化

在方案优化阶段，设计师与企业负责人进行积极沟通，详细分析每款设计方案的优缺点，并与市场上热卖灯具进行比较，同时仔细研究企业产品线开发思路和销售渠道，最后选择一种构件简单、**几何线条的方块造型**。该造型风格形式朴素、实用耐看，适合于大众消费人群，在未来市场具有持续性售卖的特点，不会随着时代久远而受淘汰，因而规避了潜在的市场风险。



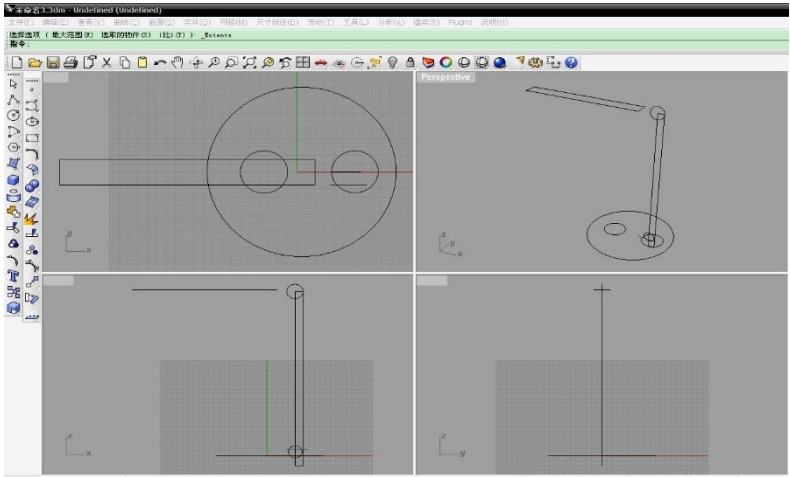
8-48 台灯优化方案草图

第三阶段 三维模型设计

三维模型构建除了需要掌握扎实的建模技巧外,更需要设计师具备三维空间的思考能力,创意推敲与设计分析的能力。由于细节的深入和结构的调整,通常三维模型和二维草图会有一些出入,有经验的设计师会很好地解决这个问题。建模前期需认真考虑灯具的分模方式和模具的装配,以及灯具需要用几个部件来完成,然后按照产品的实际尺寸和比例进行绘制。

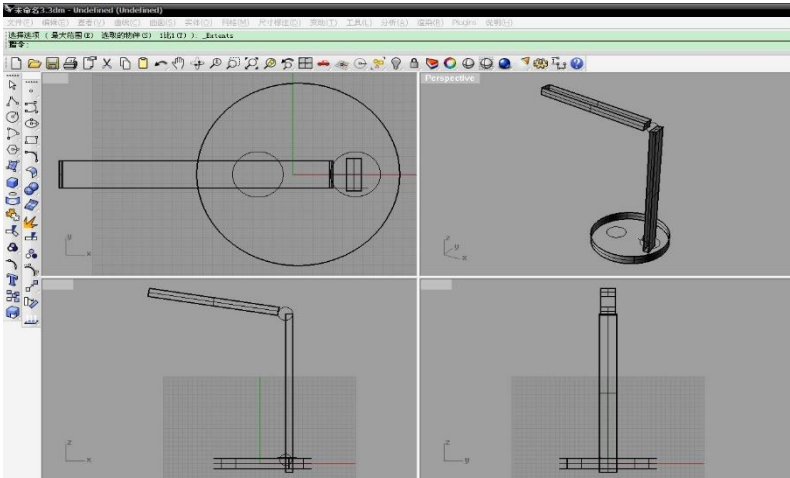
该章节通过产品轮廓线和结构线的绘制、形体块面的绘制、倒角制作、连接件和开关制作、模型分层设计等步骤完成台灯三维模型设计,具体内容步骤如下:

01 执行“矩形”和“圆”命令,以坐标原点为基准绘制。



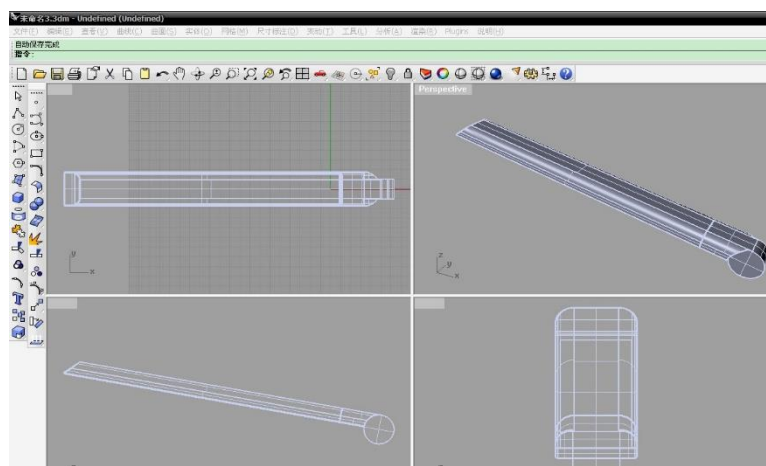
8-49 轮廓线和结构线的绘制

02 执行“直线挤出”命令,结合线挤出,然后选择全部图形执行“将平面洞加盖”命令。



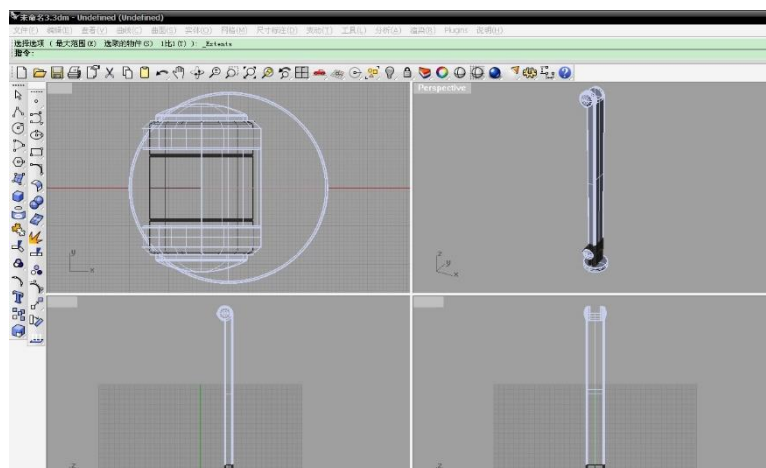
8-50 形体块面的绘制

03 执行“不等距边缘圆角”命令，把灯罩建模出来。



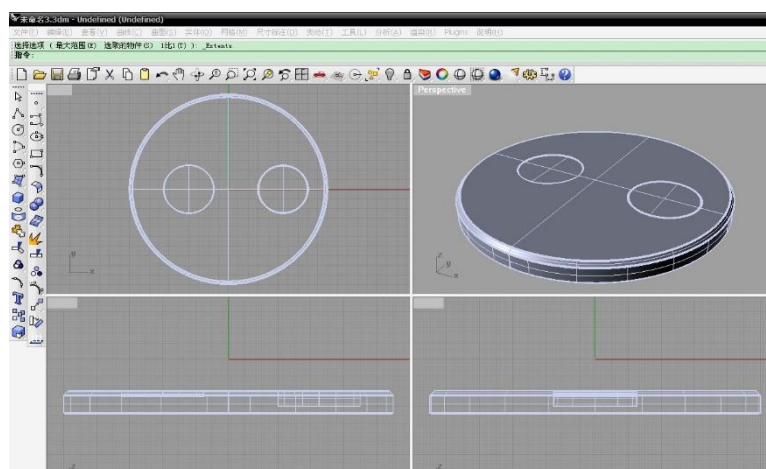
8-51 倒角制作步骤一

04 执行“不等距边缘圆角”命令，把灯柱建模出来。



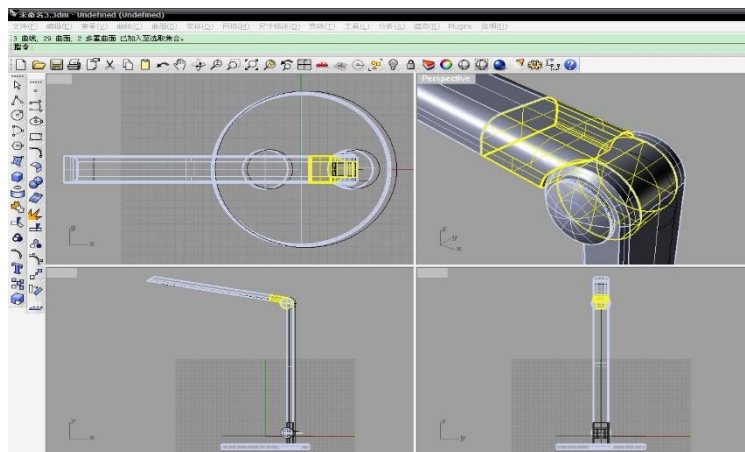
8-52 倒角制作步骤二

05 执行“不等距边缘圆角”命令，把底座建模出来。



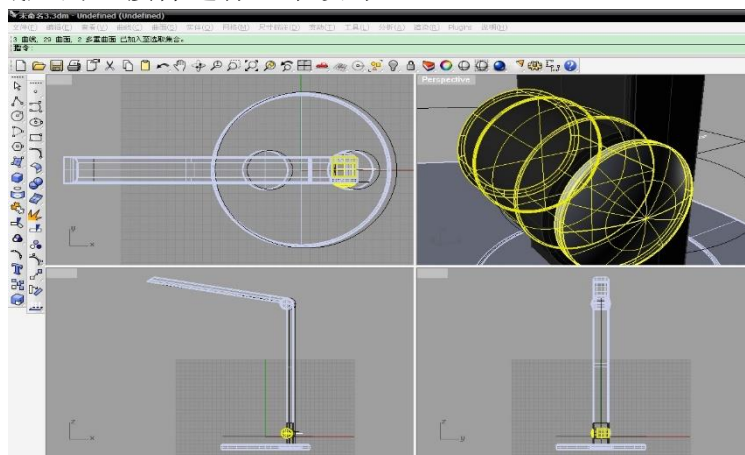
8-53 倒角制作步骤三

06 将灯柱和灯罩的连接件进行三维设计。



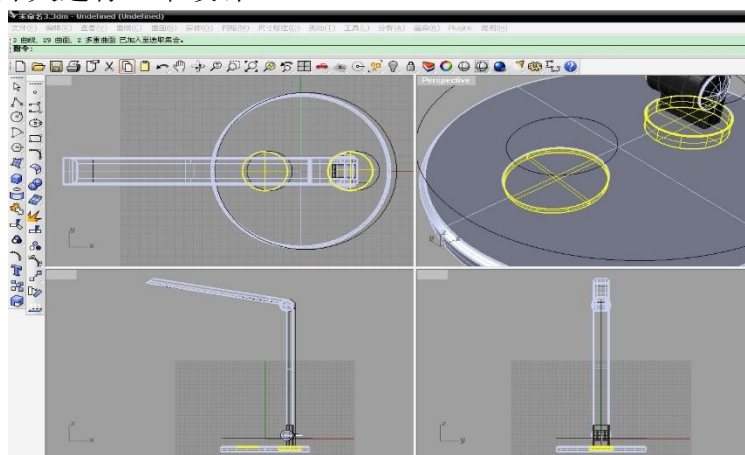
8-54 连接件和开关制作步骤一

07 将灯柱与底座的连接件进行三维设计。



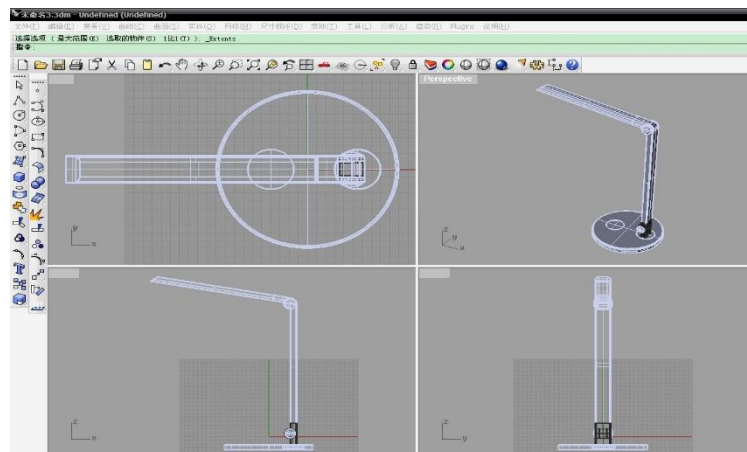
8-55 连接件和开关制作步骤二

08 将底座的开关进行三维设计。



8-56 连接件和开关制作步骤三

09 完成最终的模型



8-57 连接件和开关制作步骤四

10 按照灯具的不同材料选择不同的图层（此步骤利于产品后期的渲染，以及同结构工程人员进行清晰和有效的沟通）

第四阶段 结构与工艺设计

一 灯臂结构与工艺

台灯的灯臂采用 ABS 压塑成型，ABS 抗冲击性和耐热性好，易加工、制品尺寸稳定、表面光泽性好，后期组装成型容易。

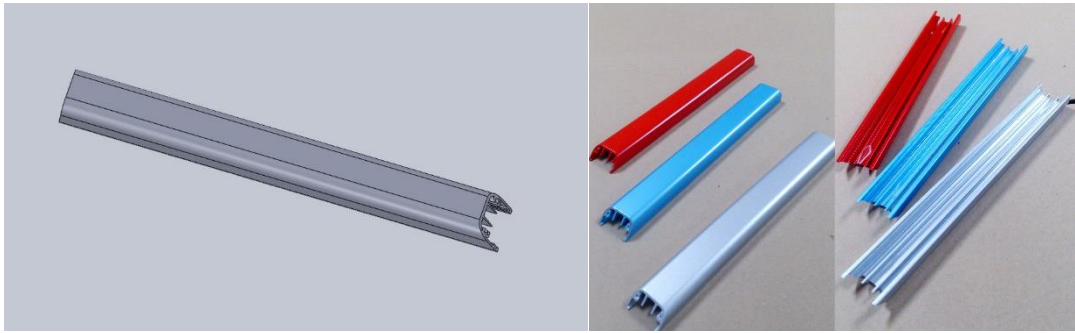


8-58 灯臂结构和后期成型效果图

二 灯杆结构与工艺

灯杆材料的选择主要考虑灯光源长时间发热的问题，如选用传统的塑料容易损坏和老化，选用金属铝材经镀铬处理后不易划伤、掉色，而且具有极佳的散热效果。此处铝材工艺流程主要是车削成型切割，然后经过精雕加工，抛光处理，

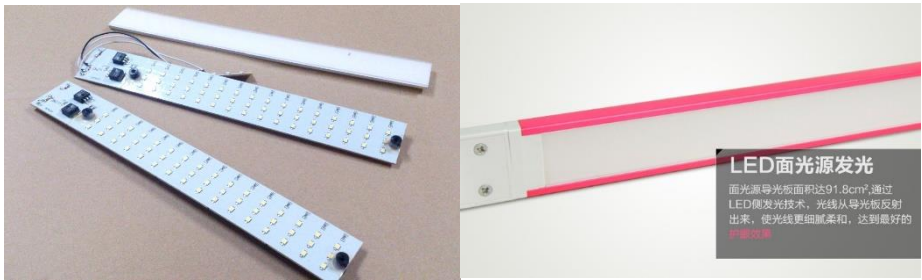
表面喷砂和表面阳极氧化等工艺完成。



8-59 灯杆结构和后期成型效果图

三 台灯光源设计

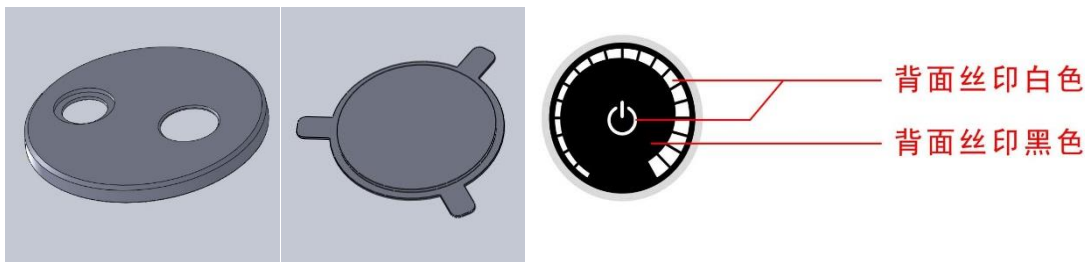
台灯光源设计考虑消费者长时间的工作和学习，灯光的照明强度与舒适度是主要决定因素，选用 48 颗 LED 灯珠组成的面光源发光模块，光线成线型分布，色温 6500K 的冷白光经 PC 扩散柔光板导光，达到舒适的极佳照明效果。



8-60 LED 灯珠布置效果图

四 台灯底座及按键结构与工艺

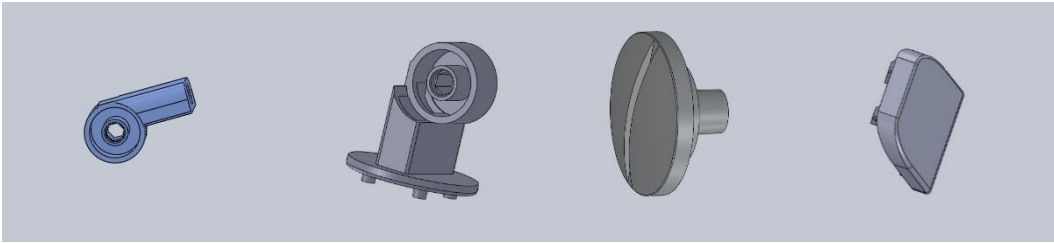
底座主要考虑灯具的牢固性和稳定性、按键的灵敏性。底座表面采用 ABS 压塑成型，表面喷砂处理，底座内部添加配重铁增加重量。按键则采用透明 PC 材料背面根据设计要求丝印相应的图标符号。



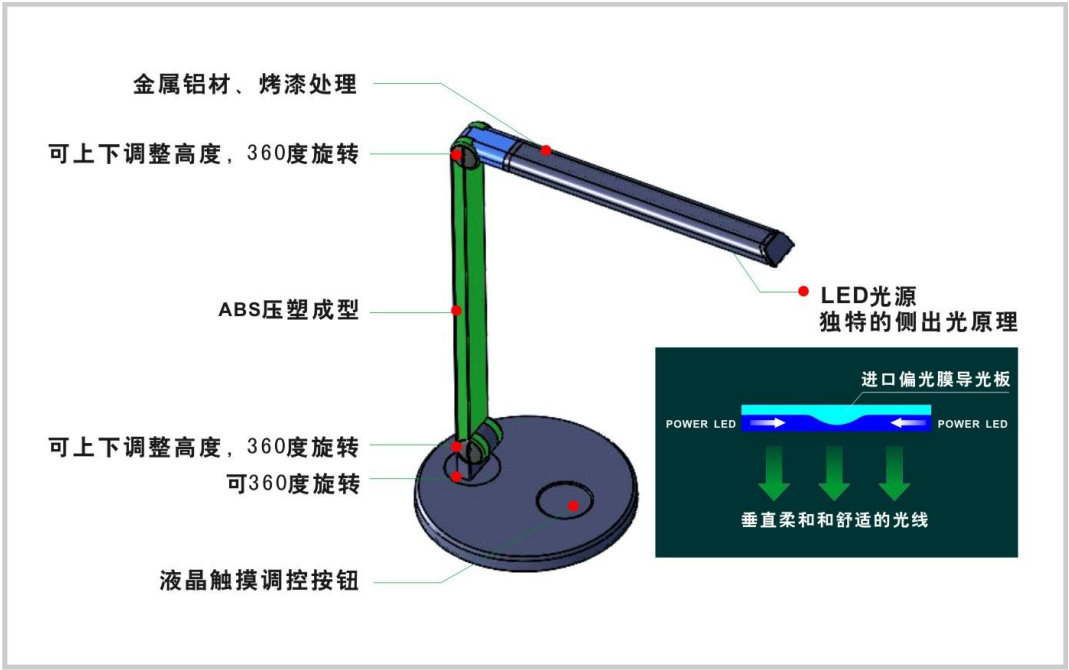
8-61 LED 底座结构及按键工艺图

五 其他部件结构与工艺

考虑台灯在工作中频繁的转动灯臂和灯杆，连接件的设计要注意阻力系数，保证长久使用过程中会保持完好的体验效果，材料选择 ABS 压塑成型，锁扣采铸铁材料。



8-62 连接件结构图



8-63 台灯整体工艺图

第五阶段 平面策划设计

一 功能特点提炼

1. 无与伦比的触控设计

首先需要提炼和强化的是台灯的无极触控技术，这是体现台灯特质的一个亮点。前期步骤是设计师和摄影师进行沟通，布置特定的环境和场景，选择适当的光线和拍摄的视点。拍摄好图片后用 PS 软件进行后期的处理，配合文字进行进

一步的深化表达。



8-64 台灯局部摄影图一

文案部分：

触控开关的设计，感应灵敏，带给消费者更多的产品使用体验。无级别调节亮度，调节起来更加得心应手，从环境光到工作照明光，提供更多的选择性。

2. 旋转功能设计

旋转功能设计也是台灯的重要卖点，可将台灯旋转到不同的角度，通过不同的视角及局部特写来表现，然后配合红色的转动符号辅助说明，这样能将旋转特点体现的非常清晰。



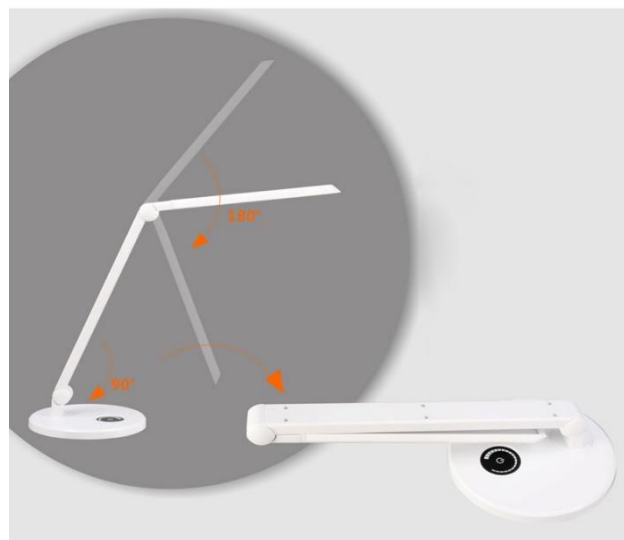
8-66 台灯局部摄影图二

文案部分：

从人机工程学的角度考虑，设计了多处可活动的旋转功能，使消费者能便捷的掌控照明的高度和角度。

3. 折叠功能设计

渲染几张旋转台灯灯臂的效果图，然后将几张图组合在一块，并标注可旋转的方向和角度，同时拍摄一张产品完全折叠后的状态。



8-67 台灯折叠功能摄影图

文案部分：

折叠功能的设计节省了大量的包装成本及运输成本，从而最终减轻消费者的

负担。

二 台灯色彩提炼

色彩设计中，通过分析近两年主流家电产品、家具、灯具、服装及汽车等产品的色彩、分析产品与家居环境之间的相互关系，对消费趋势和定位人群的喜好进行预测，从而得出橙色、蓝色、红色、白色、银色和玫瑰色六种色调方案。多样化的色彩提供消费者更多选择的空间，同时利于产品集中销售。

1. 橙色调

橙色是一种明快、热烈、温暖而欢快的色彩，在工业产品中运用的非常普遍，如下图所示的橙色灯具和椅子充满了活力与华丽的特征，橙白搭配运用在台灯上传达了一种健康而温暖的形象。



8-68 台灯橙色配色方案

2. 蓝色调

蓝色是一种秀丽、清新、忧郁而豁达的冷色调色彩同时也预示着灵感和灵性。在啤酒包装、消费电子产品和紧凑型汽车中经常可见到蓝色的运用，天蓝色调的台灯让室内空间多了一层沉稳和宁静的气息。



3. 红色调

红色调鲜艳夺目，非常醒目，在视觉上给人一种迫近感和扩张感，容易引发兴奋、激动、紧张的情绪。红色的性格强烈、外露，饱含着一种力量和冲动，其中内涵是积极的、前进向上的，为活泼好动的人所喜爱。如热情而欢乐的可口可乐包装、象征激情与速度的法拉利跑车，孟菲斯代表人物索特萨斯的“反机器的机器”——红色情人节打印机。红色的台灯使生活和工作环境充满热烈而奔放的气息。



8-70 台灯红色配色方案

4. 银色调

这里将白色到黑色的所有无色色彩成为银色调。银色象征洞察力与理性，沉稳而高贵，在家电产品中使用的频率越来越高，受到很多消费者的青睐。同时银色是沉稳之色，代表高尚、尊贵、纯洁与永恒，更重要的是银色是时尚色调，中间色的一种，极其容易搭配，如日本无印良品崇尚极简的银色。银色调中的白色台灯朴素而不失大气，简略而不失时尚、金属感十足。



8-71 台灯白色配色方案

三 整体文案设计

整体文案中需要给产品提炼一个大方而高贵的名字,应果断舍弃企业以英文字母加上阿拉伯数字的传统命名方式,因其不能反映产品的特质,导致识别度不高,不利于后期的宣传推广。此处可吸收国内外汽车品牌的品名策划,如比较成功的有:福特毅虎、保时捷卡宴、丰田皇冠、JEEP 自由光、长城哈弗和东风景逸等。结合该灯具的特点取名“悦动”台灯,突出简洁、智能、便捷和高效的创新卖点。在产品设计描述中可从创意构思点、功能与形态、细节与质感及环保主题等方面做综合的描述,同时配上英文说明,向海外市场推广。具体文案如下:

品名:【悦动】台灯

创新点:简洁、智能、便捷、高效

产品设计描述:

悦动台灯力求在形、色、质等方面体现出家居日用产品的独到特性,简洁的几何美、素雅的钛金白底盘配上不同色系的灯杆、哑光的高质感赋予灯具独具匠心的外观。

“悦”既能代表喜悦之悦,又能代表阅读之阅,在设计过程中强调消费者的使用体验,六档调光方式的全触摸按钮,智能、便捷、高效,让用户尽情体验阅读之乐。

“动”则代表灵动和转动。特殊的机械转轴设计不仅使灯臂从 0-150 度能灵活转动,而且灯杆能完全折叠,节省后期的包装运输成本,体现环保的需求。

参考文献

- (1) 桂元龙, 杨醇. 产品形态设计. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- (2) 李农. 景观照明设计与实例详解. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- (3) 北京照明学会照明设计专业委员会. 照明设计手册. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- (4) 夏进军. 产品形态设计. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- (5) 徐清涛. 灯饰设计. 北京: 高等教育出版社. 2010.

参考网站:

<http://usa.flos.com/>

<http://www.artemide.com/home/index.action>

<http://www.qisdesign.com.cn/>

<http://www.red-dot.sg/zh>

<http://ifworldldesignguide.com/>

http://go.cndesign.com/news/detail_888.html

<https://www.mooodi.com/>