

## 摘 要

在当今能源紧缺，环境污染的严峻形势下，新一代照明光源 LED（发光二极管，Light Emitting Diode）以其独特的优势，在各个行业均得到了广泛应用。然而，如何对 LED 进行高效的配光设计，以满足各个应用领域对照明灯具的要求，成为目前 LED 照明领域亟待解决的重大课题。为了实现 LED 照明系统的高效率、小型化，需要针对 LED 光源进行二次配光设计。本课题是在非成像光学与自由曲面理论基础，针对大尺寸以及 RGBW 全彩 LED 光源的光学系统设计进行研究。具体研究内容如下：

研究自由曲面面型的设计方法，基于边缘光线理论、能量守恒定律和几何光学基本定律，采用计算过程和编程简单的 ODE(Ordinary Differential Equation)法，设计了一款照度均匀的平凸透镜；采用几何求解法，设计了一款全内反射准直透镜；基于试错法，设计了手电筒变焦透镜和非对称洗墙灯透镜。

针对大尺寸 LED 光源的变焦透镜，将 ODE 自由曲面法和试错法相结合，设计了一款用于舞台灯照明的变焦透镜组，实现了聚光和泛光状态都均匀的照明效果；在现有手电筒结构基础上，用全内反射（TIR）结构，成功设计了一款远射程的手电筒变焦透镜。

针对 RGBW 全彩 LED 光源的舞台灯照明，为了解决光束角单一和操作困难的缺陷，提出一种由调焦片和 TIR 透镜组合的变焦透镜系统。并针对 RGBW 光源用于舞台灯照明时混光差和光斑不均匀的现象，提出了一种非规则六边形复眼透镜阵列结构。

为了解决洗墙灯远照射距离和高均匀度不能同时兼顾的难题，提出了非对称透镜结构。针对洗墙灯照明时容易出现的光斑分层和黄斑现象，提出了一种新型匀光结构。成功设计出一款光斑均匀、投射距离远的洗墙灯透镜。

所有设计的产品都开模并测试，实际的测试效果与软件仿真结果基本吻合，验证了所提出方案的准确性与可行性。

**关键词：** 非成像光学，LED 二次配光设计，连续变焦系统，照度均匀度

## ABSTRACT

Nowadays, in the grim situation with energy shortage and environmental pollution, a new generation of LED lighting with its unique advantages have been used in various industries widely. However, how to improve the efficient of LED light distribution design to meet the lighting requirements in various application areas become a problem to be solved in the field of LED lighting. To achieve high efficiency and miniaturization of the LED lighting system, it is necessary to design the secondary light distribution for the LED light source. This subject is based on the non-imaging optics and free-form surface theory, and research for optical system design with large-size and RGBW full-color LED light source. The specific research contents are as follows:

Based on the theory of edge ray, the law of conservation of energy and the basic law of geometrical optics, a simple ODE method was proposed, and a flat convex lens with uniform illumination was designed. According to the basic law of geometrical optics, a geometric method to solve the free surface method was proposed to design a total internal reflection collimator lens. Based on trial and error method, we designed a flashlight zoom lens and asymmetric wall washer lens.

Aiming at the zoom lens of large size LED light source, the ODE free surface method, the trial and error method were combined to design a zoom lens group for stage lighting, which realized the uniform lighting effect of condenser and flood light. Based on a flashlight structure, with a total internal reflection (TIR) structure, a long range of flashlight zoom lens was designed successfully.

For the stage lighting of RGBW full color LED light source, to solve the problem of single beam angle and difficult operation, a zoom lens system combined with focusing lens and TIR lens was proposed. And for the RGBW light source for the stage light illumination when the mixed light and uneven spot phenomenon, we proposed an irregular hexagonal eye lens array structure.

To solve the problem that the far distance and high uniformity of the wall washer cannot be considered at the same time, an asymmetric lens structure was proposed. A

new type of uniform structure was proposed for the spotting and macular phenomenon, which was easy to occur when the wall was illuminated. We also designed a uniform spot, projection distance away from the wall lamp lens successfully.

All the designed products were modeled and tested. The actual test results were in good agreement with the software simulation results, which verified the accuracy and feasibility of the proposed scheme.

**Keywords:** Non - imaging optics, LED secondary light distribution design, Continuous zoom system, Illumination uniformity

# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 LED 应用于照明的优势.....	1
1.3 LED 二次光学的设计方法.....	2
1.3.1 LED 二次光学透镜设计的研究现状.....	2
1.3.2 LED 变焦透镜国内外研究现状.....	6
1.4 本课题的研究意义和主要内容.....	7
1.4.1 研究意义.....	7
1.4.2 主要研究内容.....	8
2 LED 二次配光透镜设计的理论基础.....	10
2.1 光度学基本理论.....	10
2.2 非成像光学设计的基本理论.....	12
2.2.1 边缘光线原理.....	13
2.2.2 斯涅尔定律.....	13
2.2.3 光学扩展量.....	14
2.3 舞台灯系统结构和工作原理.....	15
2.3.1 LED 变焦系统的工作原理.....	15
2.3.2 舞台灯系统的主要参数属性.....	16
2.4 本章小结.....	17
3 大尺寸 LED 光源的变焦透镜设计.....	18
3.1 双透镜组的变焦系统设计.....	18
3.1.1 双透镜组的变焦原理.....	18
3.1.2 二次透镜的设计与分析.....	19
3.1.3 自由曲面轮廓曲线方程的建立.....	20
3.1.4 基于 ODE 方法的平凸透镜建模与分析.....	23
3.1.5 变焦透镜系统的验证.....	25
3.2 LED 变焦手电筒设计.....	27
3.2.1 手电筒的结构及原理.....	27
3.2.2 变焦手电筒的设计及优化.....	28
3.2.3 产品的测试与修正.....	31
3.2.4 射程测量.....	34
3.3 本章小结.....	35
4 基于 RGBW 全彩 LED 光源的舞台灯变焦透镜.....	37
4.1 舞台灯变焦透镜原理.....	37
4.1.1 RGBW 光源的选取.....	37
4.1.2 舞台灯变焦透镜的结构及原理.....	38
4.2 TIR 准直透镜的设计.....	38
4.2.1 准直透镜的原理及初始结构.....	38
4.2.2 自由曲面的几何算法.....	39
4.2.3 基于几何算法的准直透镜设计.....	40

4.2.4 准直透镜的验证.....	41
4.3 变焦透镜的设计及优化.....	43
4.3.1 复眼透镜阵列的结构及设计方法.....	43
4.3.2 变焦透镜的设计.....	45
4.3.3 混光的优化.....	46
4.4 透镜的验证与测试.....	48
4.4.1 变焦过程的验证.....	48
4.4.2 透镜的测试.....	50
4.4.3 调焦片的修正.....	50
4.5 本章小结.....	51
5 一种新型高效率洗墙灯的设计与应用.....	53
5.1 研究背景.....	53
5.2 洗墙灯透镜的设计.....	53
5.2.1 洗墙灯透镜的初步建模.....	53
5.2.2 透镜的优化.....	54
5.3 产品测试.....	58
5.4 本章小结.....	59
6 总结与展望.....	61
6.1 研究总结.....	61
6.2 展望.....	62
参考文献.....	63
致 谢.....	66
在学期间发表的学术论文及其他科研成果.....	67

# 1 绪论

## 1.1 课题研究背景

近年来,随着人类对自然资源和能源消耗的逐渐增加,由此而引起的环境污染和生态破坏问题也日益突出。受能源危机的影响,LED 以及相关行业已经成为世界各国的研究热点。为了应对 LED 照明产业的发展趋势,各国政府也纷纷采取行动,一方面逐步停止白炽灯,另一方面出台相关政策推动 LED 照明行业的发展。早在 1998 年,日本就率先开展了“21 世纪照明”计划,通过 LED 技术来提高照明的能量效率;在 2000 年,欧盟启动了“彩虹计划”,用于推广白光 LED 的应用;2004 年韩国推出了“GaN 半导体开发计划”。我国在 2003 年制定并启动了“半导体照明系统工程”,首次将 LED 作为国家发展战略来推动,接着在 2006 年又启动了 LED 照明工程 863 计划,2009 年,我国多个部门联合发表了《半导体照明产业发展意见》,希望此政策能提升 LED 照明产业技术水平<sup>[1]</sup>。目前我国已经成为全球 LED 封装和应用产品的重要基地,并且在很多照明领域已居于世界前列。

## 1.2 LED 应用于照明的优势

随着半导体照明技术不断发展,LED 光源正逐步取代以卤素灯、白炽灯、荧光灯、高压气体放电灯等为主的传统光源。LED 光源与其他光源相比在以下方面具有明显的优势<sup>[2,3]</sup>:

(1) 安全环保。现在普遍使用的荧光灯、汞灯光源中含有对人体有害的汞,这些光源在发光的过程中和废弃后不仅会危害人体健康,同时也会污染环境。而 LED 无辐射,在使用时不会产生有害物质,并且废弃物可以回收利用,属于绿色照明光源。

(2) 能耗低。LED 属于直流驱动,具有极低的功耗。通常单颗 LED 光源的电压在 1.5 V~4 V 之间,电流在 20 mA~70 mA 之间。也就是说,LED 消耗的电能不高于 0.1 W,在同等照明效果下,LED 耗电量是白炽灯的八分之一,荧光灯管的二分之一。

(3) 高效节能。由于 LED 的光谱几乎全部在可见光区域内,白炽灯和卤钨灯

光效仅有 12~24 lm/w, 荧光灯光效为 50~70 lm/w, 钠灯光效为 90~140 lm/w, 而 LED 的光效可达 50~200 lm/w。

(4) 寿命长。LED 灯的体积小、重量轻, 不易损坏。在现有的照明设备中, 使用寿命最长的仅有 8000 小时, 而 LED 平均寿命长达 10 万小时, 是传统光源寿命的 10 倍以上。

(5) 响应时间短。LED 灯的响应时间为纳秒级, 可以按照要求在一个光源或者多个光源的不同区域间进行切换, 可在高频情况下使用。

(6) LED 色彩丰富。在控制系统的作用下, LED 基于 RGB 三基色原理, 具有 256 级灰度, 能组合出  $256^3=16777216$  种颜色。

随着 LED 光源的光学效率、光通量等性能参数的提高, LED 光源已经普遍应用于景观照明、室内照明、道路照明等领域。但目前对 LED 灯具配光元器件的设计主要停留在传统灯具的设计方法, 由于结构设计的不合理, 造成照明效果不理想。因此, 需要对 LED 光源进行二次配光设计, 以提高光能利用率、光照度等光学参数, 使得 LED 光源具有更广的应用。故对此进行研究既具有理论价值又具有实际价值。

### 1.3 LED 二次光学的设计方法

#### 1.3.1 LED 二次光学透镜设计的研究现状

为了更大程度利用 LED 芯片发出的光, 并在照明区域内满足一定的设计要求, 需要对 LED 进行光学设计。LED 的光学设计分为一次光学设计和二次光学设计。

LED 的一次光学设计是从封装材料形状方面来提高 LED 的光学效率。LED 的一次光学设计是将 LED 芯片发出的光能尽可能多取出, 主要决定了 LED 的光束角、光通量、发光强度分布等。目前, 很多厂家在进行 LED 一次光学设计的研究, 比如 OSRAM、CREE、Philips、日亚、天电、添鑫等。

LED 光源与传统光源在光通量上, 还存在一些差距。因此, 除了提高光源自身的光效外, 还需要对 LED 二次配光进行优化设计。LED 的二次配光设计是在一次光学设计基础上进行的, 将 LED 发出的光线重新分配, 使其照射到预定的目标面上, 达到照明系统的设计要求。目前, LED 二次光学系统设计主要是对透

镜、反光杯、微结构层(包括复眼透镜阵列和柱面透镜阵列)、遮光板等进行设计。二次光学设计需要借助几类计算机软件来完成<sup>[4, 5]</sup>, 这类光学软件具有超强的机械仿真功能, 几乎可以模拟所有的三维模型, 设计者可以在开模或大批量生产前对产品做光学系统的仿真, 常用的光学仿真软件有 TracePro<sup>[6]</sup>, LightTools<sup>[7]</sup>和 ASAP<sup>[8]</sup>。本文在第三、第四和第五章均运用光学软件 LightTools 进行仿真。LightTools 可以快速、精确地进行光线追迹, 并可以通过照度分布、光谱分布、亮度分布等对配光光效进行分析。

LED 的二次光学设计主要是对自由曲面面型进行设计, 现阶段, 主要有两种设计方法, 分别为试错法<sup>[9]</sup>、数值法。

### (1)试错法

试错法又被称为经验法, 主要是根据设计者的经验进行设计。这种方法是根据客户需求, 首先在三维建模软件如 SolidWorks、ProE 或 UG 中绘制出光学元器件(如透镜、反光杯、遮光板等)的初始结构, 然后将这些结构导入光学照明设计软件(如 LightTools、TracePro 或 ASAP 等)中, 在对光学元器件进行位置、材料、表面光学参数等设置后, 进行光线追迹, 得出整个灯具在接收屏上的照度分布和光强分布。经过多次的仿真、分析光学器件的结构, 设计出满足设计要求的产物。试错法设计自由曲面透镜的步骤如图 1.1 所示。

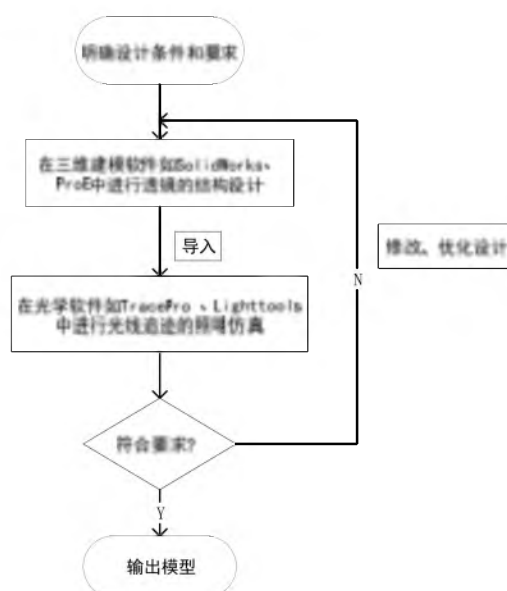


图 1.1 试错法设计自由曲面的流程

Fig1.1 Trial and error method to design free surface process



## (2)数值法

LED 的二次光学设计主要基于非成像光学理论，LED 二次光学透镜的设计重点是对自由曲面面型进行设计。早在上世纪 30 年代就有学者提出了非成像透镜的设计方法，到目前通过试错法或解偏微分方程法得到自由曲面面型，自由曲面透镜的设计方法已经日益完善。基于非成像光学理论的自由曲面指的是无法用解析式来表达且没有统一的方程可以描述的曲面，可以对光能的分布进行重新分配。目前数值法主要有剪裁法 (Tailored)、多重表面同步设计法 (SMS)、网格划分法。数值法设计自由曲面透镜的流程如图 1.2 所示。

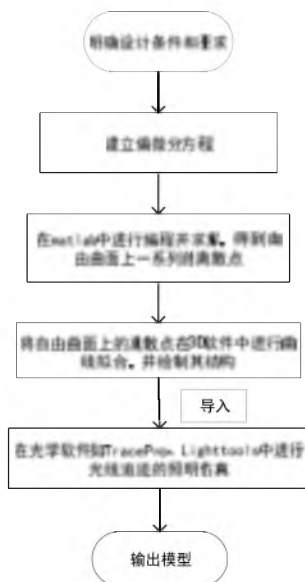


图 1.2 数值法进行二次光学设计的流程

Fig.1.2 Numerical method for the second optical design process

剪裁法是基于入射光矢量、出射光矢量以及自由曲面法矢量这三者之间的关系，主要依据 LED 光源与接收屏上照度分布的限制条件构造出偏微分方程组，并求出自由曲面上的一系列离散点，如图 1.3 所示。剪裁法早在 1993 年由 R.Winston 和 H.Ries 提出，通过建立非线性偏微分方程组得到反射镜的光学面型<sup>[10]</sup>。同年，两人利用此方法计算负合椭球面 (CEC) 反射镜，将角度空间的能量分布控制起来，并提出能量分布与透镜的尺寸密切相关<sup>[11]</sup>。2002 年，OEC 公司的 H.Rise 和 J.Muschaweck<sup>[12]</sup>提出，可以通过建立微分方程求解法来构造自由曲面面型并成功设计出了一款用于矩形光斑照明的自由曲面透镜。此后，越来越多的人用剪裁法设计二次光学透镜。2008 年，郝翔<sup>[13]</sup>用剪裁法设计了适用于小角度光源的对称二次光学透镜。2009 年，中国计量学院的余桂英、金骥等人利用剪裁法设计了一

款针对显微镜 LED 照明系统的反射器<sup>[14]</sup>，经过仿真其照度均匀性高达 90.6%，光能利用率高达 99.6%。2012 年，德国的 Axel 等人<sup>[15]</sup>利用剪裁法，基于点光源设计了一款光学效率高、菲涅尔损耗低且照度均匀的透镜。2016 年，郭震宁等人<sup>[16]</sup>进一步用该方法，利用自由曲面上的入射光矢量和反射光矢量构造出了自由曲面面型，成功设计了一款适用于扩展光源，光能利用率为 81%，均匀度为 85% 的广告灯，实现了均匀照明的效果。

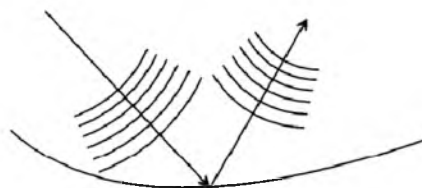


图 1.3 剪裁法示意图

Fig.1.3 Clipping method

多重表面同步设计法即 SMS (Simultaneous multiple surface) 法，该方法是基于费马定理和边缘光线理论，根据光学扩展量守恒建立光源与照明目标面上能量的对应关系，同时可求解两个或两个以上的自由曲面。此方法均适用于点光源与扩展光源的二次光学设计，早在 1990 年由 LPL 公司提出。2004 年，P. Benitez 等人<sup>[17]</sup>依据 LED 光源与目标面上的光能分布特性，建立起两对输入波前和输出波前的对应关系，并设计了具有两个自由曲面的光学系统。由于 SMS 法对于扩展光源的均匀照明以及小角度出射都有很高的精度，因此国内很多研究人员用此方法进行了成像和非成像光学镜头的设计。2011 年，赵会富等人<sup>[18]</sup>基于 SMS 法，采用 RIXR 结构，设计了一款小角度的 LED 准直透镜，其光学效率高达 83.48%。浙江大学的吴仍茂等人<sup>[19]</sup>针对大功率 LED，成功设计出定向控制投射器，其光学效率高达 91%。2012 年，浙江大学的蒋水秀、孙翔等人<sup>[20]</sup>通过对二维 SMS 法和三维 SMS 法的研究，设计了一款出射角度较小的二次光学透镜，实现了非旋转对称透镜结构均匀照明目标，照度均匀性高达 94%，能量利用率为 84.15%。程颖<sup>[21]</sup>在 2013 年，用 SMS 法分别设计了一款最大入射角 40° 的非成像光学透镜和一款用于短距投影系统的成像透镜。

网格划分法的设计思路是基于边缘光线理论和能量守恒定律，适用于点光源的二次光学透镜设计。首先将 LED 芯片发出来的光能量分成很多个光通量相等的单元，然后这些光能经过透镜后被重新分配到接收屏上，同时也将接受屏进行

划分,使光源与接收屏一一对应,再根据斯涅尔定律推导出自由曲面的微分方程,并在编程软件 MATLAB 中使用迭代法计算出二次光学透镜自由曲面上的一系列离散点,最后将这些离散点拟合成一条光滑的自由曲线。早在 1998 年, W. Parkyn<sup>[22]</sup>就提出了划分网格的方法。后来研究者将该方法用于自由曲面的设计。2011 年,王恺<sup>[23]</sup>基于反馈优化法,提出了一套适用于扩展光源的自由曲面透镜的设计方法,实现了大角度均匀照明,将目标区域内的照度均匀度由 0.53 提高至 0.90。2016 年,潘诗发等人<sup>[24]</sup>基于等能量的网格划分法和边缘光线理论,设计了一款实现 LED 阵列近场均匀照明的的大角度自由曲面透镜,并用反馈优化法对其进行优化,最终优化出的透镜出光角度为 157°,均匀度为 0.84,出光效率大于 0.9。

### 1.3.2 LED 变焦透镜国内外研究现状

目前,国内外的研究人员对变焦透镜在成像系统方向研究比较成熟,而对非成像光学系统研究却很少。市面上的照明透镜也主要以单一固定角度为主,但在很多特殊场合,需要用可变光束角透镜来实现照明的要求,比如用于夜间监控系统的红外照明设备,需要根据红外摄像机的变焦范围来改变视场角,使照射范围覆盖整个监控区域。在商用舞台灯照明领域也需要用变焦透镜来实现光束角可变的照明要求。根据大量的文献调研和市场调研发现,国内大多数照明公司设计的 LED 透镜光束角一般固定在 12°、24°或 36°,不能实现光束角的连续变化,且光学效率仅有 65%。目前,实现 LED 变焦透镜的方式有多种,比较典型的是采用整体菲涅尔透镜、整体凸透镜或者多片式透镜组的方式。2000 年,上海理工大学的吉建华、陈家璧等人<sup>[25]</sup>对菲涅耳透镜进行分析,提出通过改变透镜材料的折射率来制作菲涅耳透镜的方法。整体菲涅尔透镜在变焦时,需要移动整个透镜或 LED 光源,移动时的范围非常有限且不好控制。2008 年,魏永刚、李贤阳采用单颗凸透镜调焦结构,通过调节 LED 光源与凸透镜之间的距离来改变出射光线的照射区域。单颗凸透镜在变焦时存在的问题是,LED 光源发散角一般为 180°,单透镜不能高效收光,无法达到小角度照明的要求。为了解决单颗凸透镜和菲涅尔透镜无法实现小角度照明的问题,出现了多片式透镜组变焦系统。2012 年,李小虎、刘华等人申请了双透镜有级变焦手电筒<sup>[26]</sup>,该手电筒由固定透镜、移动透

镜、调焦盖组成,通过改变移动透镜与 LED 光源之间的距离调节出射光线的照射区域和亮度,达到变焦的目的。虽然多片式透镜组可以解决小角度照明的问题,但依然存在以下问题:首先,多透镜组无法收集利用大角度光束,造成光能浪费;其次,整个变焦系统的透镜数量多于单颗透镜,导致灯具体积较大且笨重,影响灯具的正常操作。近几年一些研究者采用特殊透镜结构进行变焦透镜设计,增大了变焦透镜系统的光束角范围。王红印、张军等人在 2011 年设计了一款用于舞台灯的变焦透镜系统<sup>[27]</sup>,该变焦系统基于 LED 阵列光源,调焦距离在 0 mm~10 mm 的范围内,全角可达到 18.5°~38.7°,且光能利用率高达 78%。2012 年,刘华等人<sup>[28]</sup>申请并公开了一种可实现连续变焦的新型 LED 透镜及方法,该发明专利采用单颗全反射式透镜结构,在调焦距离在 0 mm~1.5 mm 范围内,可实现 8°~20°的连续变焦。同年,深圳市朗恒电子有限公司申请了一款可同时实现聚光效果和泛光效果的变焦手电筒的专利,该手电筒由非球面和菲涅尔透镜结合而成,通过菲涅尔透镜对边缘光线进行散化,从而避免了成像现象。

## 1.4 本课题的研究意义和主要内容

### 1.4.1 研究意义

LED 光源以其体积小、重量轻、寿命长、耗能低等优势备受世界各国的广泛关注,LED 光源替代传统光源已经是大势所趋。由于 LED 的发光分布不同于传统光源,往往要根据实际需求,对 LED 进行二次配光设计,才能在确保光能利用率的基础上,进一步实现照明系统的小型化。因此,展开针对 LED 光源二次配光设计的研究不仅具有科研价值还具有实际意义。

目前二次光学透镜主要以单一固定角度为主,在实际照明环境应用中,已安装好的灯具仅能实现单一光束角的照明需求。变焦透镜的结构过于单一,主要有多片式透镜组和单颗菲涅尔透镜,这些结构的变焦透镜可调光束角的范围比较小,且在用于大尺寸和 RGBW 光源的舞台灯照明时,容易出现混光差,照度不均匀的情况。因此,展开针对大尺寸和 RGBW 全彩 LED 光源的变焦透镜的研究具有实用价值和研究意义。

洗墙灯不仅用于建筑装饰照明,还用于勾勒大型建筑的轮廓。一般以对称的 TIR 结构居多,这种结构的透镜在洗墙时光斑容易出现黄斑和分层现象,照射距

离短，均匀度低，光学利用率低（效率仅有 40%~50%）是目前洗墙灯具厂所面临的困难。因此，展开针对 LED 洗墙灯透镜的研究同样具有实际价值和研究意义。

### 1.4.2 主要研究内容

本课题主要针对目前常用的 LED 二次光学透镜照明光学系统存在的变焦范围小、光斑不均匀、混光差、光能利用率低、操作不方便的缺点，研究了对应的新型 LED 变焦透镜系统和洗墙灯透镜。各章节的主要内容如下：

第一章为论文的绪论部分。简要介绍 LED 光源区别于其他光源的独特优势；概述目前国内外 LED 二次光学透镜自由曲面面型设计方法的发展；分析 LED 变焦透镜设计现状及存在的问题，引出本课题的主要研究内容和意义。

第二章为 LED 变焦透镜设计的理论基础。重点介绍非成像光学的光度学参数以及它们之间的相互关系。阐述了非成像光学的重要概念及基本理论，包括边缘光线原理、斯涅尔定律和光学扩展量。最后对 LED 变焦透镜的结构和原理进行研究，介绍了 LED 舞台灯的主要参数，阐述了三种 LED 舞台灯变焦透镜的变焦原理并对其进行分析。

第三章针对大尺寸 LED 光源设计了两款变焦透镜系统，包括变焦透镜组的舞台灯透镜和 TIR 与凸透镜结合的手电筒变焦透镜。针对变焦透镜组，基于点光源，提出了一种几何解法设计变焦透镜的方法，匹配 XPE 光源后，对整个光学变焦系统进行了验证。针对手电筒变焦透镜，运用试错法进行设计，并对其射程进行测量，在实验室和户外分别对聚光和泛光状态进行测试。

第四章针对 RGBW 全彩 LED 光源设计了一款舞台灯变焦透镜。通过对比分析第三章中变焦透镜的结构，提出了一种由 TIR 透镜和调焦片组合的新型变焦透镜结构，首先采用几何解法设计了 TIR 准直透镜，并根据光学扩展量和本人几年的设计经验，提出了两种准直透镜的验证方法。通过分析普通复眼透镜结构，提出在上述准直 TIR 透镜的出光面添加不规则的六边形复眼透镜阵列结构，实现光束角可调且混光均匀的舞台灯透镜。

第五章针对贴片 LED 光源设计了一款洗墙灯透镜。基于洗墙灯的照明方式，在常见的 TIR 透镜基础上，提出了一种非对称 TIR 洗墙灯透镜结构，并利用光

学软件 LightTools 及几种匀光结构解决洗墙过程中，光斑出现黄斑、分层及洗墙高度低的难题，最后对实际产品的洗墙效果进行了验证。

第六章，对全文的研究工作进行总结，并对未来研究方向做出展望。

## 2 LED 二次配光透镜设计的理论基础

### 2.1 光度学基本理论

二次光学设计的最终结果取决于人眼对目标面的判断，我们可以用 LED 光源的光通量、发光强度、光照度、光亮度、发光效率等一些光度学参数来反映可见光的特性。光度学理论的基本参数如下：

(1) 光通量 ( $\phi$ )：在单位时间内，LED 发出且被人眼接收到的能量，用于描述 LED 总发光能量大小的物理量。光通量的单位是流明 (lm)。通常照明公司使用远方测试仪器和积分球对 LED 的总光通量进行测量，如图 2.1 所示为 GO-2000 远方测试仪器。



图 2.1 远方分布式光度计

Fig.2.1 Remote distributed photometer

(2) 发光强度 (I)：发光强度又称光强，指 LED 在指定方向上单位立体角内的光通量，其单位为坎德拉 (cd)。表达式为：

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (2-1)$$

式中， $d\phi$ 为光照射到接收屏上微小面积上的光通量， $d\Omega$ 是立体角微元。

发光强度分布曲线又称配光曲线。实际二次光学设计中，在远方测试仪器最终测试生成的报告中可以读出透镜的光束角。光束角是指发光强度两个方向间的夹角。通常我们将峰值光强的一半称为半角，将峰值光强的 1/10 称为全角。通过调节自由曲面可以得到需要的光束角。

LED 光源呈朗伯分布，法向方向光强最大，越偏离法向方向光强越小。朗伯光源配光曲线如图 2.2 所示，其光强分布呈余弦分布，可以表式成：

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos \theta \quad (2-2)$$

其中,  $I_0$  为 LED 出光面轴线方向上的光强,  $\theta$  为光源出射方向与轴线之间的夹角。

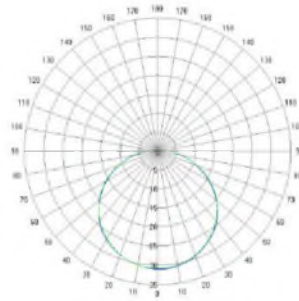


图 2.2 朗伯光源的光强分布曲线

Fig.2.2 Light intensity distribution curve of Lambertian light source

(3) 光照度 ( $E$ ): LED 光源发出的光经过照明系统后, 照射到接受屏上, 接收屏上单位面积内收到的光通量多少即为光照度。通俗的说, 照度大小反映了目标面上接收到光能的多少。光照度是照明系统设计中最重要指标之一, 单位是勒克斯 ( $\text{lx}$  或  $\text{lux}$ ), 可以反映目标面被照射的亮暗程度。表达式为:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2-3)$$

其中,  $dS$  为目标面上的微小面积。

不同的场所, 对照度的要求也不同。通常情况下, 白天采光良好时室内的照度为  $100 \text{ lx} \sim 500 \text{ lx}$ ; 正午太阳垂直照射地面的照度可达  $10^5 \text{ lx}$ ; 办公室内的平均照度一般为  $500 \text{ lx} \sim 1000 \text{ lx}$ ; 商业照明中, 垂直的平均照度为  $300 \text{ lx} \sim 500 \text{ lx}$ 。

在实际二次光学设计中都需要在接受屏上实现特定的照度分布。光斑的照度均匀度是评价二次光学设计好坏的重要参数之一。可以用照度计直接测量, 本论文使用的照度计型号为 TES 1332A (台湾泰仕制造), 如图 2.3 所示。



图 2.3 照度计

Fig.2.3 Illuminometer



(4) 光亮度 (B): 光亮度可以理解为人眼看到光源或光学表面的明亮度, 是在指定方向上, 发光表面的发光强度与其垂直的发光面面积的比值。其单位为坎德拉/平方米 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) 或尼特 (nit)。表达式为:

$$B = \frac{d\Phi}{\cos\theta \cdot dS \cdot d\Omega} \quad (2-4)$$

其中,  $\cos\theta \cdot dS$  是单位面元在观察方向上的投影。由于表面发光或者反光是具有方向性的, 亮度会随着方向不同而有所改变。

(5) LED 发光效率 ( $\eta$ ): 定义为 LED 光源发出的光通量与其所消耗电功率之比。发光效率与 LED 输出的光通量紧密相关, 如何提高 LED 光效一直是设计人员研究的重点。发光效率单位为流明/瓦 ( $\text{lm}/\text{W}$ )。公式为:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (2-5)$$

其中, P 为 LED 光源的电功率。

(6) 照度均匀度 (U) 与光效 ( $\eta$ ): 照度均匀度的表示方法有很多种, 我们一般用接收屏上所接收到的最小照度与平均照度的比值来表示, 表达式为:

$$U = E_{\min}/\bar{E} \quad (2-6)$$

其中,  $E_{\min}$  为最小照度,  $\bar{E}$  为平均照度。不同的应用场所, 对均匀度的要求也会不同, 当照度均匀度趋于 1 时, 可认为等照度。

光效 ( $\eta$ ): 我们将光效定义为接收屏上所接收到的光通量与 LED 所发出光通量的比值, 表达式为:

$$\eta = \Phi_R/\Phi_S \quad (2-7)$$

其中,  $\Phi_R$  为接收屏上所接收到的光通量,  $\Phi_S$  为 LED 所发出的总光通量。

## 2.2 非成像光学设计的基本理论

成像光学 (Imaging Optics), 是一门将成像质量作为目标而发展起来的学科, 其主要研究内容是如何在接收屏上获得足够好的物像<sup>[29]</sup>。与成像光学相比, 非成像光学 (Nonimaging Optics) 是在光源与接收屏之间找到一种经过光学元器件优化的光线传播路径。边缘光线原理<sup>[30,31]</sup>、斯涅尔定律以及光学扩展量 (Etendue)<sup>[32]</sup>都是非成像光学中的重要理论。

### 2.2.1 边缘光线原理

边缘光线原理在数学上有严格的证明，是非成像光学中一个非常重要理论，为确定 LED 光源与接受屏的坐标对应关系奠定了基础。边缘光线原理可以描述为：在 LED 出射的光线中处于边界上的那些光线，经过光学系统后，同样会照射到接收屏的边界上。通俗的说，如果 LED 光源上边界区域的光线经过整个光学系统之后照射到接收屏上的边界区域，那么 LED 所有内部光线都能完全通过该光学系统，如图 2.4 所示。

在实际的二次光学设计中，光源多为扩展光源，可通过边缘光线原理调节光的能量分布。通常，中心光线控制着接受屏上光斑的光照度或者光强的最大值和位置，边缘光线调节光斑的边缘部分并削弱中心光斑的光照度或光强，提高整体光斑的均匀度。边缘光线设计原理比较简单，便于理解与应用，我们将用此原理设计的透镜称为复合抛物面型。本文第三章变焦透镜组和第四章的 TIR 准直透镜就是基于非成像边缘光线原理设计的。

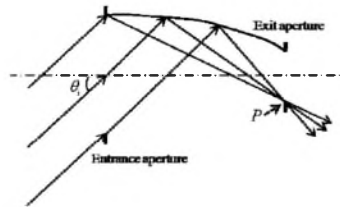


图 2.4 边缘光线原理

Fig.2.4 Principle of edge light

### 2.2.2 斯涅尔定律

斯涅尔(Snell)定律也称为折射定律。当光线经过两个不同介质的交界面时，光线就会改变原来的传播方向。在折射率为 $n_1$ 的介质中，入射光线 $\vec{l}$ 经过光学系统沿着 $\vec{O}$ 方向射入折射率为 $n_2$ 的介质中，光路示意图如图 2.5 所示。 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为光线的入射角和折射角。根据斯涅尔定律，则有：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-8)$$

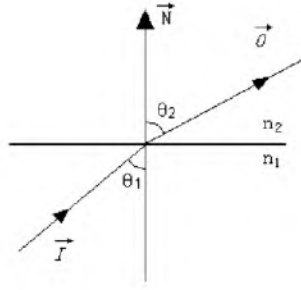


图 2.5 折射光路示意图

Fig.2.5 Schematic diagram of refraction light path

在非成像光学中,通常采用折射定律矢量形式建立透镜的自由曲面面型方程,表达式如下:

$$n_2 \vec{O} - n_1 \vec{I} = \vec{N} \sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 \vec{O} \cdot \vec{I}} \quad (2-9)$$

### 2.2.3 光学扩展量

光学扩展量是光学系统中一个光的属性,不仅用来评价光学元器件对整个光学系统光能利用率的影响,还用于描述光束本身<sup>[33]</sup>。

光学扩展量是非成像光学理论的核心概念,反映光线在整个光学系统中的传播规律,理想情况下,此光学系统必须是无损耗的,即没有折射、发射、散射等造成的能量损耗。如图 2.6 所示,若一光束在常数  $Z$  平面上的截面微元是  $dA$ ,且具有一定的角度范围  $d\alpha d\beta$ ,当该光束通过无损耗的光学系统时,该面法线上的投影  $dA \cos \theta$  与该面所围立体角  $d\Omega$  的乘积即为光学扩展量,其单位是  $\text{sr} \cdot \text{m}^2$ ,可表示为:

$$n^2 dA d\alpha d\beta = n^2 dA \cos \theta d\Omega \quad (2-10)$$

式中,  $n$  为透镜材料的折射率,上式可以用积分形式表示成:

$$\int n^2 dA d\alpha d\beta = \int n^2 dA \cos \theta d\Omega \quad (2-11)$$

我们就将这三个量称为光学扩展量,其表达式为:

$$\text{Etendue} = \int n^2 dA \cos \theta d\Omega = \iiint dA dp dq \quad (2-12)$$

式中,  $p = nL, q = nM, L、M$  分别为微面元上光线的余弦值。

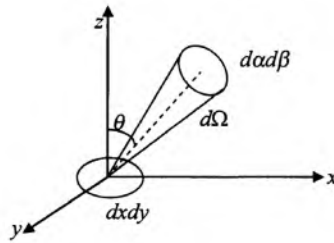


图 2.6 光学扩展量的空间图

Fig.2.6 Spatial map of optical expansion

光学扩展量实际上是一个几何量，与光能大小以及光强分布等无关。在理想状态下，我们可以将光学扩展量视为一个守恒量，因此在实际光学系统设计时，可以用它来评估照明系统的各元件能否正常合作：如果 LED 光源的扩展量不大于其他光学元器件的扩展量，那么光线就能顺利通过元器件并且没有光能损失，反之部分光线就会被元器件阻挡造成光能损失。

## 2.3 舞台灯系统结构和工作原理

### 2.3.1 LED 变焦系统的工作原理

LED 照明的整个光学系统主要是由 LED 光源和二次光学器件组成，其中二次光学器件主要有反光杯<sup>[34, 35]</sup>、光学透镜<sup>[36, 37]</sup>、扩散板<sup>[38, 39]</sup>三种基本形式，如图 2.7 所示。

反光杯一般为抛物面结构，它将 LED 的光线进行会聚。当 LED 光源在抛物面的焦点时，此时光线最为集中。在同一焦距的反光杯可以通过改变 LED 光源与焦点之间的相对距离实现光束角可调，达到变焦的效果。但反光杯进行变焦时，存在以下问题：（1）光斑外圈会有明显的亮圈，这部分光也称为杂散光；（2）光斑中心有暗区；（3）副光斑比较明显。尽管反光杯可以调节光束角的大小，但满足不了实际照明要求。

扩散板是一种具有发散性的导光材料，照明中一般将 PC 或 PMMA（亚克力）作为材料。通过漫反射与材料的折射率将相对集中的光线分散开，与反光杯变焦原理相同，也是改变 LED 光源与扩散板的相对距离进行变焦。扩散板表面一般经过雾化处理或者添加复眼透镜结构，受结构的影响光束角变化不明显，一

般仅能变化  $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。扩散板通常与二次光学透镜一起使用,放置在透镜的出光面,用以调节光斑的均匀性。

光学透镜通过光的折射或反射定律改变了光原来的传输方向。目前,实现 LED 舞台灯变焦的方式有多种,比较典型的是整体菲涅尔透镜和反光杯加凸透镜的方式。整体菲涅尔透镜在实现变焦时,需要整体移动该透镜或 LED 光源,移动时的范围非常有限且不好控制;反光杯加凸透镜在实现变焦时,通过改变凸透镜与反光杯的距离来调节出射光线的区域和亮度,由于凸透镜尺寸较大且变焦过程移动距离过大,不利于 LED 舞台灯具的小型化,且成像后的色差很难控制。无论在菲涅尔透镜还是凸透镜作用时,LED 初始所形成的平行光线一定会被改变,且变焦范围都比较小,无法满足舞台灯光的照明需求。



图 2.7 二次光学器件

Fig.2.7 Secondary optics

### 2.3.2 舞台灯系统的主要参数属性

**色温 (K):** 色温是衡量 LED 舞台灯具的重要参数之一,是一种简单且有效表示光源颜色的方法。LED 光源的色温是通过对比其色彩和理论黑体来确定,也就是说,在某一温度下当 LED 光源与黑体颜色相同时,就将此时黑体温度称作光源色温。

LED 光源的色温与色调息息相关。通常色温越高时色调越冷,而色温越低时色调越暖。LED 白光光源发出的光依据色温范围可分成暖色光、冷白色光和冷色光。当色温低于 3300 K 时,例如白炽灯,此时的光色偏红,会给人温暖的感觉;当色温在 3000 K~6000 K 时,例如台灯,此时色调对人视觉和心理没有太大影响,会使人感到心情愉悦;当色温大于 6000 K 时,例如日光灯,此时光色呈现出蓝色,会使人感到清冷,常用于办公照明。我们可以合理调节色温和颜色来改善人们的情绪,使得灯光不仅起到照明的作用,同时也满足人们的心理需求。表

2.1 所示为一些常见发光物体的色温，从中可以看出对照明光源要求的色温范围在 2800 K~6500 K。

表 2.1 常见发光体的色温<sup>[40]</sup>

Tab.2.1 Color temperature of common luminous bodies<sup>[40]</sup>

发光物	火柴光	蜡烛	白炽灯	台灯	月光	日光	日光灯	电视屏幕
CCT (单位: K)	1700	1850	2800	3400	4100	5000	6500	9300

显色性：显色性指的是 LED 光源对物体本身颜色所表现出来的程度，即颜色的逼真程度。与色温相同，显色性也是评判产品质量好坏的重要参数之一。通常用显色指数（CRI）体现 LED 光源的显色性，描述物体在 LED 光源照射下的颜色与自然光照明时颜色的偏离程度。如果 LED 光源的显色性越高，则显色指数就越高，那么我们所看到的颜色也就越接近于物体本身的颜色。太阳光的 CRI 定义为 100，不同 LED 光源对应不同的 CRI，表 2.2 是一些常见光源的显色指数。

表 2.2 常见光源的显色指数

Tab.2.2 Color index of common light sources

光源	卤钨灯	荧光灯	高压钠灯	金卤灯	LED 光源
显色指数 ( $R_a$ )	100	80-90	20-25	85-95	60-95

## 2.4 本章小结

本章首先对非成像光学中光度学的基本参数进行总结，并对其在光学设计中的用法进行详细介绍。另外，本章还重点介绍了非成像光学的重要理论，包括边缘光线原理，斯涅尔定律和光学扩展量，为第三章、第四章、第五章的二次光学设计提供了理论依据。最后对舞台灯透镜的变焦原理以及重要参数进行了说明，为后面的设计打下了坚实的基础。

### 3 大尺寸 LED 光源的变焦透镜设计

#### 3.1 双透镜组的变焦系统设计

##### 3.1.1 双透镜组的变焦原理

目前，有两种方法可以实现 LED 灯具光束角可变：一种是保持光学透镜的位置不变，通过移动 LED 光源调节透镜与光源之间的相对距离；另一种是保持 LED 光源位置不变，通过移动光学透镜调节透镜与光源之间的相对距离。虽然通过调节 LED 与凸透镜之间的相对距离改变出射光线照射区域的方式可以改变光束角，但由于 LED 光源的发散角为  $180^\circ$ ，单凸透镜无法满足高效收光，光能利用率比较低。基于单凸透镜变焦的这些缺陷，本章选用双透镜组的方式来实现变焦，该变焦系统由两个透镜组合而成，靠近光源的二次透镜将 LED 散光光源收集起来，调焦透镜用于调节焦距。图 3.1 为整个光学变焦系统的结构，从左到右依次是 LED 光源、二次透镜以及调焦透镜。变焦透镜组的原理与单颗平凸透镜或者反光杯不同：保持 LED 光源与二次透镜的位置固定，将调焦透镜沿着光轴从与 LED 二次透镜最小调焦距离（即  $T=0$ ）移动至最大调焦距离的过程中，光束角由大到小变化。相比于单颗透镜的变焦，在相同尺寸及调焦距离条件下，双透镜组的变焦能得到更小的光束角、更高的峰值光强以及更高的光能利用率。

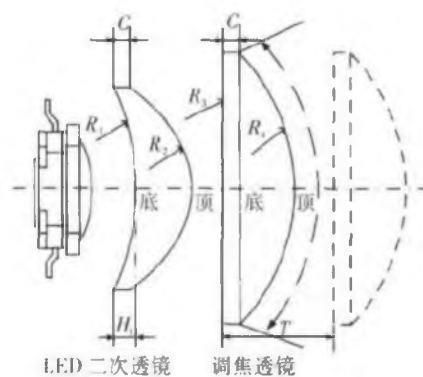


图 3.1 变焦透镜组的结构<sup>[27]</sup>

Fig.3.1 Structure of the zoom lens group<sup>[27]</sup>

在本章中，设计一款用于舞台灯照明的变焦透镜系统，要求调焦距离  $T$  在  $0\text{ mm}\sim 11\text{ mm}$  的范围内，实现光束角在  $6^\circ\sim 30^\circ$  之间变化，且整个变焦系统的光学

效率必须大于 50%。为了达到设计要求,我们要分别设计好二次透镜和调焦透镜,然后组合起来验证整个变焦透镜系统的效果。

### 3.1.2 二次透镜的设计与分析

本设计中,采用 CREE XLamp XPE 作为 LED 光源,其功率为 3.3 W,光通量为 349 lm,尺寸为 3.5 mm\*3.5 mm,为确保模拟所用光源与实际测试光源一致,光学软件 LightTools 模拟所用光源模型与光源文件均来源于 Cree 官网。众所周知,XPE 是带有一次透镜的光源,为确保二次透镜底部与 LED 光源的发光面贴平,采用双凸透镜结构来设计,如图 3.2(a),该透镜光学半径为 2.7 mm,总高为 4.08 mm,(b)为 LED 光源与二次透镜的装配位置图。

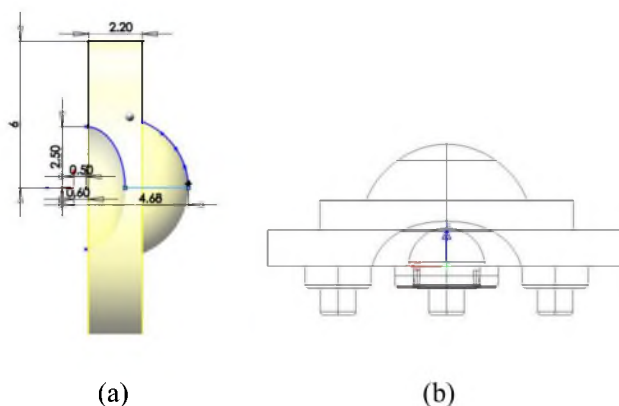


图 3.2 二次透镜结构 (a)透镜模型 (b)光源与透镜装配位置

Fig.3.2 Secondary lens structure (a) Lens model (b) Light source and lens assembly position

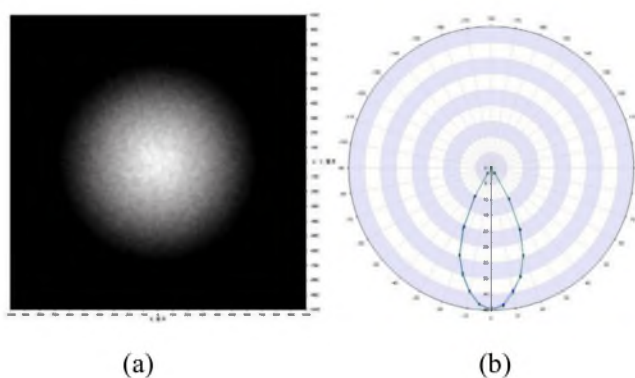


图 3.3 二次透镜的仿真结果 (a)照度图 (b)光强分布曲线

Fig.3.3 Simulation results of quadratic lenses:

(a) Illumination graph (b) Light intensity distribution curve

LED 二次透镜通常采用 PMMA(聚甲基丙烯酸酯)、PC (聚碳酸酯) 或者玻



璃作为材料, PMMA 材料的耐热性比较差, 当温度达到  $70^{\circ}$  时, 材料会发生软化, 容易变形; PC 的热变形温度虽然高于 PMMA, 在  $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$  之间, 但它的耐疲劳性能不佳, 注塑时流动性差; 相对于 PC 和 PMMA, 玻璃的透光率和耐高温性能好, 但其制作工艺复杂, 无法进行复杂结构的透镜制作。综合考虑三种材料的耐高温性和注塑难度, 靠近 LED 光源的二次透镜采用耐高温耐热的 PC 材料, 远离 LED 的调焦透镜采用 PMMA 材料。

将二次透镜的 3D 模型导入 LightTools 中进行光线追迹, 在距离光源 1 m 远处放置一个尺寸为  $2000\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$  的接受屏, LED 光线数设置为 100 万条。通过使用试错法多次对二次透镜的光学面进行分析与优化, 最终图 3.3 (a) 的照度图呈现出一个直径约 120 cm 的均匀圆形光斑, 且无明显的亮圈和暗区, 图 (b) 的配光曲线显示半光强角为  $48.5^{\circ}$ 。

### 3.1.3 自由曲面轮廓曲线方程的建立

当光源发光面直径远小于光源到光学元器件的距离时, 可以将光源视为点光源<sup>[41]</sup>。在设计二次光学透镜时, 为了方便求解自由曲面, 我们将尺寸小于光学器件  $1/5$  的 LED 光源近似为理想点光源。二次光学透镜设计时, 为了简化计算步骤, 通常将 LED 视为理想点光源, 无需考虑发光位置和光源尺寸对光学器件的影响。

不同于第一章中提到的 SMS 法、剪裁法和网格划分法自由曲面面型的几种设计方法, 本章参考文献<sup>[42-45]</sup>关于自由曲面的算法, 发现一种易懂且编程简单的算法, 也称为 ODE 法, 在 2000 年, 由 W.Tai 等人首先提出。如图 3.4 所示, 建立 XY 直角坐标系。光源位于 XY 直角坐标的原点 O 处, 该光学元器件为平凸透镜, 其前表面为平面, 后表面为自由曲面。设光源与平凸透镜的前表面距离  $L_1$ , 透镜后表面顶点距离接受屏  $L_2$ , 透镜前表面与后表面距离即该透镜厚度为  $D$ , 从光源发出的任意一条光线 1 到达透镜的前表面并相交于点 M ( $L_1, L_1 \tan \alpha$ ), 经过空气与透镜交界面的光线 2 发生折射并交于透镜后表面轮廓曲线上任意一点 P ( $x, y$ ), 最终光线 3 折射出去照射到接收屏上并相交于点 Q ( $L, r$ )。  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为光线经过透镜前表面 M 点的入射角和折射角,  $\gamma$ 、 $\theta$  分别为光线交于透镜后表面 P 点的入射角和折射角。

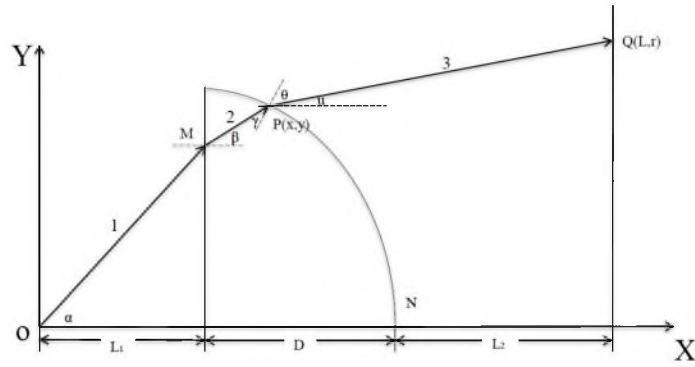


图 3.4 自由曲面透镜分析模型示意图

Fig.3.4 Free - form surface lens analysis model

由几何光学的折射定律，则光线 2 的直线方程可写成：

$$y = L_1 + (x - L_1) \tan \alpha \quad (3-1)$$

$$\tan u = \frac{r - y}{L - x} \quad (3-2)$$

$$L = L_1 + D + L_2 \quad (3-3)$$

由于空气的折射率为 1，透镜材料的折射率设为  $n$ ，对于光线 2 和光线 3，由斯涅尔定律可以得到：

$$\sin \alpha = n \sin \beta \quad (3-4)$$

$$n \sin \gamma = \sin \theta \quad (3-5)$$

由三角函数的万能公式：

$$\tan a = \frac{2 \tan \frac{a}{2}}{1 - (\tan \frac{a}{2})^2} \quad (3-6)$$

$$\tan \frac{a}{2} = \frac{1 - \cos a}{\sin a} \quad (3-7)$$

联立式 3-6 和式 3-7 可得：

$$\cos a = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan a)^2}} \quad (3-8)$$

$$\sin a = \frac{(\tan a)^2}{\sqrt{1 + (\tan a)^2}} \quad (3-9)$$

将 3-9 带入 3-5 中可得：

$$n \frac{\tan \gamma}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\tan \theta)^2}{1 + (\tan \gamma)^2}} = 1 \quad (3-10)$$

由图 3.4 可以看出，折射光线 2 与 3 的斜率分别为  $\tan \beta$ 、 $\tan \mu$ ，假设 P 点的法线斜率是  $k$ ，根据两条直线的夹角公式可以得到：

$$\tan \gamma = \frac{\tan \beta - k}{1 + k \tan \beta} \quad (3-11)$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \mu - k}{1 + k \tan \mu} \quad (3-12)$$

联立 3-10, 3-11, 3-12 可得：

$$n \frac{\tan \alpha - k}{\tan \mu - k} \sqrt{\frac{1 + (\tan \mu)^2}{1 + (\tan \alpha)^2}} = 1 \quad (3-13)$$

将 3-8 带入 3-13 中可得：

$$k = \frac{n \sin \beta - \sin \mu}{n \cos \beta - \cos \mu} \quad (3-14)$$

根据导数的定义，可以将 P 点法线斜率用微分方程来表示：

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-n \cos \beta + \cos \mu}{n \sin \beta - \sin \mu} \quad (3-15)$$

由于 LED 呈朗伯余弦分布，设光强分布函数为  $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ ，其中， $I_0$  是 X 轴上的发光强度， $E(y)$  是接受屏上的照度分布函数，立体角元的微分形式为  $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ 。在理想状态下，根据能量守恒定律，即 LED 发光立体角  $\Omega$  发出的总光通量与接受屏上对应半径  $r$  范围内接收的光通量相等。

$$\int_0^\theta I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \int_0^r E \cdot 2\pi \cdot r dr \quad (3-16)$$

为了获得一个照度均匀的光斑，也就是说，光线经过透镜后照射到接收屏上各个点的照度是一个定值，将该定值设为  $E_0$ 。根据光束角与面积坐标之间关系，对式 (3-16) 取边界条件得

$$E_0 = \frac{I_0 (\sin \theta_{max})^2}{r_{max}^2} \quad (3-17)$$

当  $\theta$  以最大角  $\theta_{max}$  入射，经过平凸透镜折射到接收屏上呈现出一个  $r = r_{max}$  的圆形光斑。

$$r = r_{max} \frac{\sin \theta_{max}}{\theta_{max}} \quad (3-18)$$

将式 3-3, 3-4, 3-18 带入式 3-2 并化简得到：

$$\tan \mu = \frac{\sin \alpha}{L-x} \left[ \frac{r_{max}}{\sin \alpha_{max}} - \frac{L_1}{\cos \alpha} - \frac{x-L_1}{\sqrt{n^2 - s \sin^2 \alpha}} \right] \quad (3-19)$$

由于孔径角 $\alpha$ 与透镜相关，因此用孔径角 $\alpha$ 来描述非球面的表面形状是非常方便的。将式 3-1，3-4 分别对 $\alpha$ 进行微分可得

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - s \sin^2 \alpha}} \quad (3-20)$$

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{L_1}{\cos^2 \alpha} + \frac{x-L_1}{\cos^2 \alpha} \frac{d\beta}{d\alpha} + \tan \beta \frac{dx}{d\alpha} \quad (3-21)$$

联立式 3-20，3-21 可得自由曲面上的点 $x$ 与 $\alpha$ 的关系

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{\frac{L_1}{\cos^2 \alpha} + \frac{n^2(x-L_1) \cos \alpha}{(n^2 - s \sin^2 \alpha)^{3/2}}}{\frac{\sqrt{n^2 - s \sin^2 \alpha} - \cos \mu}{\sin \alpha - \sin \mu} + \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - s \sin^2 \alpha}}} \quad (3-22)$$

当给出平凸透镜  $L_1$ ， $D$ ， $L_2$  以及直径时，就可以得到 $\alpha_{max}$ 值，然后以 $\alpha$ 为自变量，利用 Matlab 数值计算软件解微分方程，使用四阶龙格-库塔法求解出自由曲面上的一系列 $\alpha_1$ ， $\alpha_2$ ..... $\alpha_n$ 以及对应的 $x$ 值，再根据式 3-1 得到对应的  $y$  值，这样就可以得到自由曲面上的各离散点的坐标。

### 3.1.4 基于 ODE 方法的平凸透镜建模与分析

在上节自由曲面公式的推导基础上，设计一款平凸透镜作为整个变焦系统的调焦透镜，其采用透光率为 92%，折射率为 1.4935 的 PMMA 作为材料。在 3.1.2 节中设计的二次透镜半光强角为  $48.5^\circ$ ，为满足整个半光强角  $6^\circ \sim 30^\circ$  的调焦范围要求，平凸透镜在整个变焦系统泛光状态的光束角应控制在  $20^\circ$  左右。首先设置好平凸透镜的初始参数，前表面与光源的距离  $L_1 = 10 \text{ mm}$ ，透镜直径  $20 \text{ mm}$ ，透镜边缘厚度  $2 \text{ mm}$  即透镜前表面与后表面相连接处厚度。利用迭代法并结合 MATLAB 编程求出自由曲面在  $xy$  平面内的离散点，将这些离散点导入三维机械建模软件 SolidWorks 中拟合出一条光滑的样条曲线，如图 3.5 (a) 所示，然后在 SolidWorks 里完善草图，将曲线绕光轴旋转  $360^\circ$  即可获得透镜的三维模型，如图 3.5 (b) 所示。

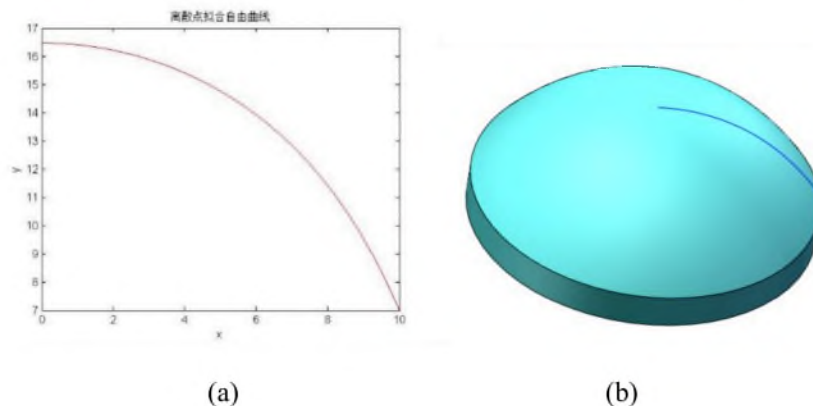


图 3.5 拟合的透镜模型 (a)轮廓曲线 (b)透镜实体模型

Fig.3.5 Fit to the lens model (a) Contour curve (b) Lens solid model

距离点光源 1000 mm 处，放置一个尺寸 500 mm\*500 mm 接受屏，利用光学仿真软件 LightTools，分别匹配点光源和 XPE 光源进行仿真，结果如图 3.6 所示。(a)、(b)为匹配点光源时的结果，照度图表明，点光源经过该平凸透镜后，在接受屏上形成一个直径 360 mm 的圆形光斑，且呈等照度分布；配光曲线显示半光强角为  $20^\circ$ ，匹配点光源时的光斑效果与理论分析一致。(c)、(d)为匹配 XPE 光源时的结果，从照度图可以看出，XPE 光源经过该平凸透镜后，在接受屏上呈现出一个直径 500 mm 均匀圆形光斑；配光曲线显示半光强角为  $21^\circ$ 。

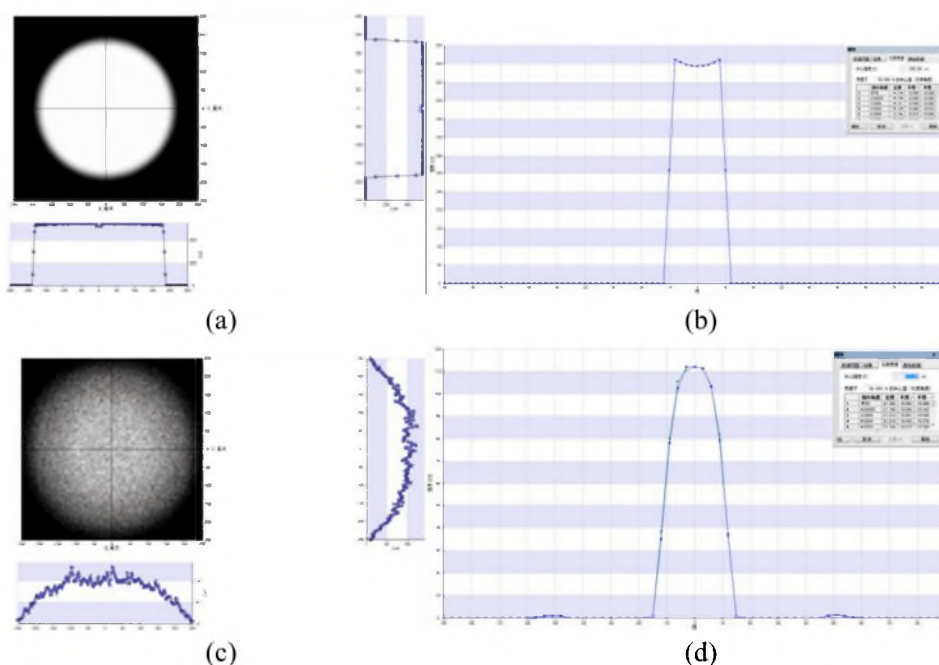


图 3.6 仿真结果:

(a)(b)匹配点光源的照度图与配光曲线 (c)(d)匹配 XPE 光源的照度图与配光曲线

Fig.3.6 Simulation results (a) (b) for the matching point light source illumination chart and light

distribution curve (c) (d) to match the XPE light source illumination and light distribution curve

依据等照度原则，理论上照度均匀度应达到 100%，匹配点光源时光斑基本呈等照度分布，而匹配 XPE 光源时整体光斑比较均匀，但是在距离中心点 150 mm 以外，照度曲线并非像匹配点光源时呈直角下降，分析原因：由于此款透镜是基于点光源设计的，当匹配尺寸较大的光源时就会存在差异，除此之外，离散点拟合的自由曲线也存在一定的误差。根据此款透镜的设计要求，这些误差在可接受范围内。匹配点光源和 XPE 仿真的半光强角相差不大，均在  $20^\circ$  左右，符合整个变焦系统对调焦透镜光束角的要求。通常设计大功率、大尺寸的透镜时，为确保设计方案的可行性，会采用 Matlab 编程与试错法相结合的方法。

### 3.1.5 变焦透镜系统的验证

将上述整个变焦透镜系统导入 LightTools 中进行仿真，距离 LED 光源 2 m 处，放置一个 2000 mm\*2000 mm 的接受屏。分别观察聚光时和泛光时 NS 光线追迹、光斑照度图以及光强分布曲线。

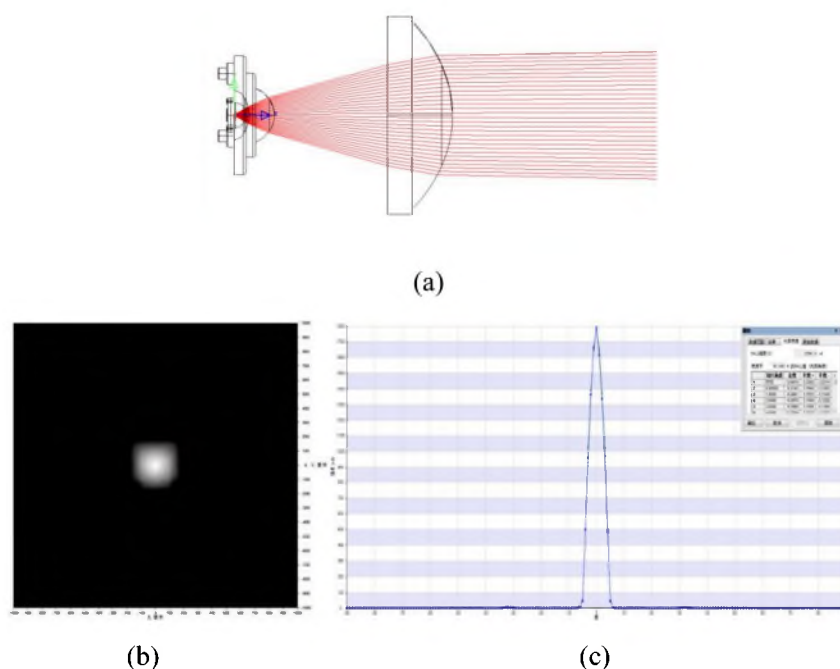


图 3.7 聚光状态仿真结果 (a) NS 光线追迹 (b)照度图 (c)光强分布曲线

Fig.3.7 Condensation status simulation results:

(a) NS ray tracing (b) Illumination graph (c) Light intensity distribution curve

聚光状态时二次透镜和调焦透镜相距 11.5 mm，仿真结果如图 3.7 所示，NS

光线追迹表明，从 LED 光源发出的光线，首先经过二次透镜后发生了汇聚，然后经过调焦透镜平行出射；照度图呈现出 XPE 光源芯片形状，光斑比较均匀。在准直透镜的设计过程中经常会出现芯片成像的现象，无法单独使用，但本款设计是应用于舞台灯照明，整灯由几十颗甚至上百颗透镜排列而成，实际投射出均匀的圆形光斑；配光曲线显示光束角为  $6^\circ$ ，这个角度已经是极限值了，目前这个透镜尺寸光束角无法做到更小。

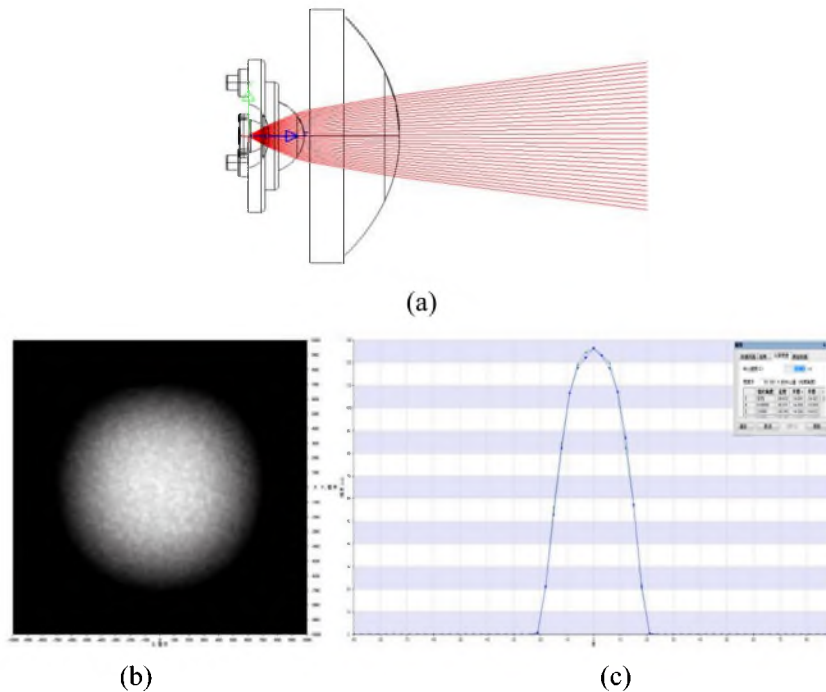


图 3.8 泛光状态仿真结果 (a) NS 光线追迹 (b)照度图 (c)光强分布曲线

Fig.3.8 Flooding state simulation results:

(a) NS ray tracing (b) Illumination graph (c) Light intensity distribution curve

泛光时二次透镜和调焦透镜相距  $0.5\text{ mm}$ ，仿真结果如图 3.8 所示，NS 光线追迹可以看出，从 LED 光源发出的光线经过整个变焦透镜系统后发生了扩散；照度图呈现出一个直径为  $1300\text{ mm}$  的均匀圆形光斑；配光曲线显示光束角在  $30^\circ$  左右，在相同尺寸下，该角度可以做到更大，但大角度实际出来的产品在整灯照射时会出现六个花瓣一样的光斑，这是由于漏光导致的。

表 3.1 光束角随 T 变化

Tab.3.1 Beam angle varies with T

T (mm)	0	2	4	6	8	10	11
半光强角( $^\circ$ )	28.9	26.1	22.8	18.8	15.1	10.7	6

本设计综合考虑聚光状态和泛光状态的情况,是最优方案。随着  $T$  从  $0\text{ mm}$  不断增大到  $11\text{ mm}$  时,整个变焦透镜系统半光强角仿真结果如表 3.1 所示。从表 3.1 可以看出,随着调焦距离  $T$  不断增加,半光强角越来越小,由最大角度  $30^\circ$  减小至  $6^\circ$ 。光学软件 LightTools 仿真结果表明,在调焦距离最大时即  $T=11\text{ mm}$ ,LED 的光能利用率为  $85.7\%$ ;在调焦距离最小时即  $T=0\text{ mm}$ ,LED 的光能利用率高达  $85.2\%$ 。整个变焦透镜系统的光束角、光斑、光学效率均满足舞台灯实际应用中的要求。

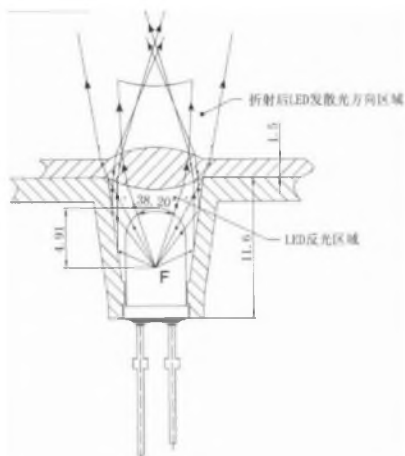
## 3.2 LED 变焦手电筒设计

### 3.2.1 手电筒的结构及原理

手电筒作为一种可移动光源被应用于家庭照明、野外探险等场合。早期的手电筒头体安装有反射面型的抛物器,从光源发出的光,一部分光线经过抛物器发生反射以平行光线出射,其余光线直接从玻璃板射出,造成光能的浪费,故光学效率仅有  $10\%$  左右。近几年 LED 手电筒以其寿命长、亮度高、体积小、方便携带等优点广受消费者的青睐,常见的 LED 手电筒的光束角都是一个固定的值。LED 聚光手电筒俗称强光手电筒,只是单一的将 LED 发出的光尽可能的准直,将光斑会聚的尽可能小,其半光强角大约在  $10^\circ$  左右;而用于泛光照明的 LED 手电筒,其二次光学透镜的半光强角在  $30^\circ$  左右。这些手电筒结构如图 3.9 所示,从图中可以看出,LED 光源发出的光线经过光学器件后分成很多杂乱无章的光线。这类手电筒照射到  $3\text{ m}$  以外的墙面上光斑存在以下问题:中心较亮,从中心到边缘照度锐减,边缘外会出现亮圈。除此而外,这类手电筒仍然存在光能利用低,射程不够远的问题。本章针对此现象设计了一款高均匀度、高效率、远射程的变焦手电筒。

在本实例中,手电筒的变焦原理与单颗凸透镜变焦原理相同,都是通过调节 LED 光源与透镜之间的距离,从而实现光束角可调。本款变焦透镜是保持 LED 光源不变,通过旋转手电筒的灯头,改变透镜与 LED 光源的相对位置进行变焦。



图 3.9 常用手电筒的结构<sup>[46]</sup>Fig.3.9 Commonly used flashlight structure<sup>[46]</sup>

LED 变焦手电筒的设计要求：调焦距离为 0 mm~6 mm，半光强角变化范围为 8°~85°，光能利用率大于 50%。聚光状态下，光通量 1000 lm，实测的射程要达到 240 m 以上；泛光状态下，半光强角要达到 85°左右。聚光和泛光状态下均要满足光斑均匀、无黄圈、无芯片成像。

### 3.2.2 变焦手电筒的设计及优化

手电筒透镜的设计采用 Cree 公司生产的 XP-L HI 冷白光作为光源，此款光源为贴片光源，其功率为 10 W，光通量为 1095 lm，尺寸为 3.5 mm\*3.5 mm，光源结构如图 3.10 所示。在同等光学条件下，相对于同属高亮度的 XP-L HD，XP-L HI 系列 LED，XP-L HI 光源能够将射程提升 30%~50%，具有更强的远射能力。

根据客户提供的灯具，本节采用 TIR（全内反射透镜）<sup>[47-51]</sup>结构设计手电筒透镜，其最大外径为 36 mm，高 15.6 mm，选用光学级 PC 作为材料，如图 3.11(a) 所示。该透镜通过中间聚光的凸透镜和侧面全反射透镜的反射面结构，从而使光束角连续可变。

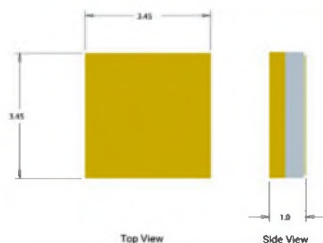


图 3.10 XP-L HI 光源尺寸参数

Fig.3.10 XP-L HI light source size parameters

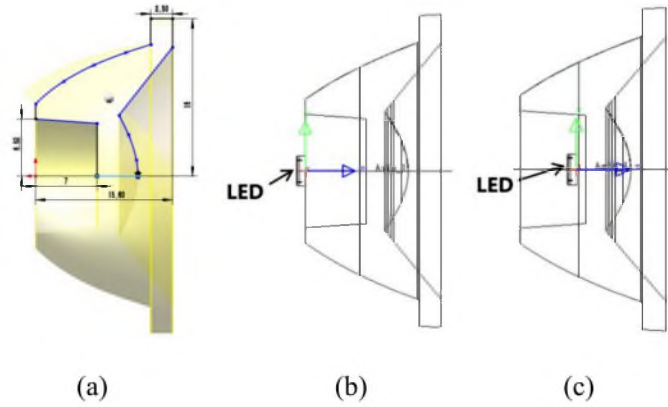


图 3.11 手电筒结构及位置 (a)透镜结构 (b)聚光状态 (c)泛光状态

Fig.3.11 Flashlight structure and position (a) lens structure (b) Spotlight state (c) Flooding state

聚光时透镜底部与 XP-L HI 光源的发光面贴平，如图 3.11(b)；泛光状态时 LED 光源与透镜底部相距 6 mm，如图 3.11(c)所示。将手电筒初始模型导入 LightTools 中进行仿真，距离 LED 光源 1000 mm 处，放置一个尺寸 300 mm\*300 mm 接受屏，观察聚光状态时的光斑照度图和光强分布曲线，结果如图 3.12。

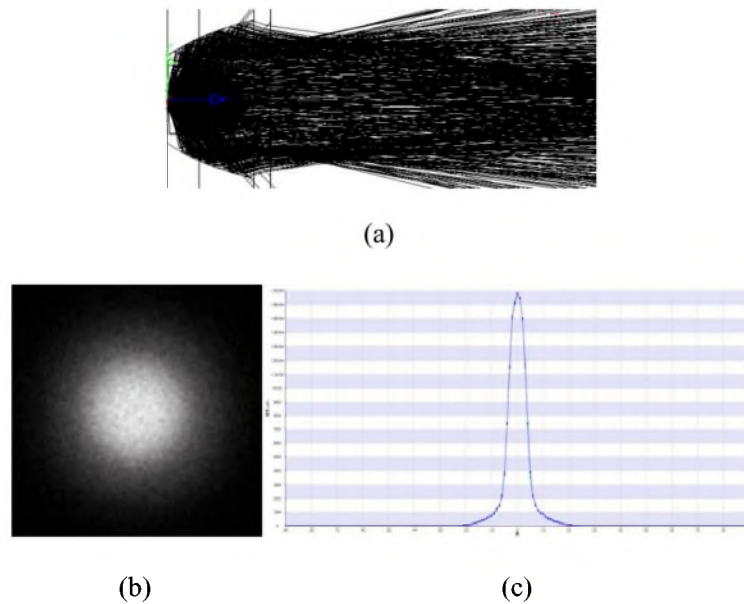


图 3.12 聚光状态的仿真结果 (a)光线追迹 (b) 1m 远处照度图 (c)光强分布曲线

Fig.3.12 Simulation results of condenser state:

(a)Ray tracing (b) 1m distant illumination (c)Light intensity distribution curve

聚光状态时图 3.12 的仿真结果表明:由光线追迹图看出，光线经过透镜后并非平行出射；从照度图看出，光斑分布不均匀且副光斑比较大；配光曲线显示，半光强角为  $7.4^\circ$ 。

通过 SolidWorks 与 LightTools 的链接功能, 运用试错法对初始结构中的凸透镜以及侧面反射面进行多次调整, 最终优化结果如图 3.13 所示。聚光状态时, LED 芯片位于凸透镜与全反射透镜的焦距内, 当无限趋于凸透镜与全反射透镜的焦点处时, LED 发出来的光, 一部分光线经过凸透镜后平行出射, 其余光线在全反射透镜上发生反射后在凹形出光面上发生折射然后准直出射, 这两部分光线最终照射在接收屏上, 此时光束角最小。

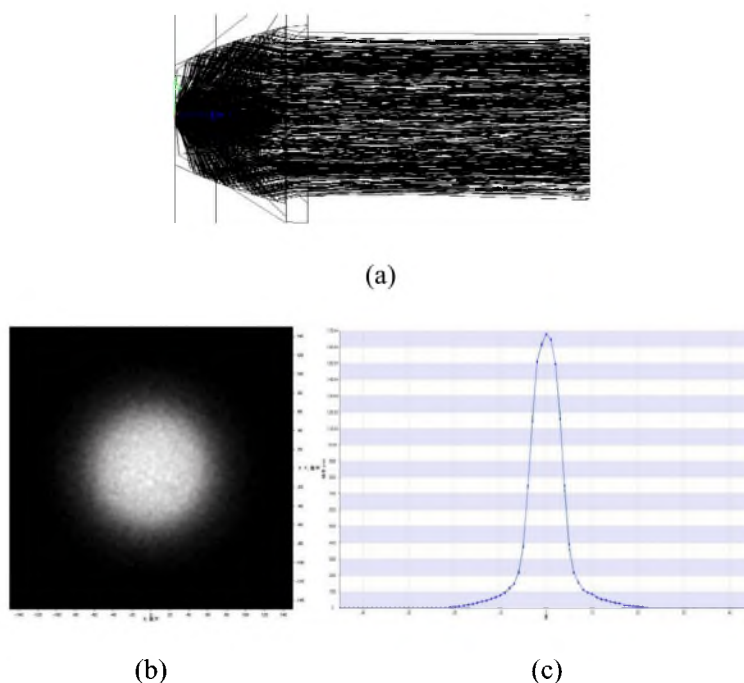


图 3.13 优化后仿真结果 (a)光线追迹 (b)1m 远处照度图 (c)配光曲线

Fig.3.13 Simulation results after optimization:

(a) Ray tracing (b) 1m distant illumination graph (c) Light distribution curve

对比优化前后的照度图和配光曲线, 从图 3.13 (a) 的光线追迹图看出, 经过 TIR 透镜的光线基本平行出射; 照度图表明, 在 1m 远处形成一个直径为 14 cm 的圆形光斑, 光斑均匀, 无暗区, 副光斑比优化前明显减少; 配光曲线显示, 半光强角为  $7.5^\circ$ 。仿真结果符合客户对聚光状态时光斑和光束角的要求。

上面对聚光时的效果进行了验证, 这里还需要验证泛光状态时光斑是否符合要求。LED 光源固定, 将 TIR 透镜向左移动 6 mm, 在与 LED 光源相距 1 m 远处, 放置一个尺寸为 2000 mm\*2000 mm 的接受屏。泛光状态时, LED 芯片位于凸透镜与全反射透镜的焦距内, 当无限趋近于凸透镜时, LED 光源发出的光, 一部分光线经过凸透镜扩散出去, 其余光线经过全反射透镜反射后在凹形出光面

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/695033014242011110>