

分类号 TN202

密级 公开

UDC 535

编号 10299S1503084



江 苏 大 学

学 术 型 硕 士 学 位 论 文

辅助投影汽车倒车灯光学系统研究与设计
OPTICAL SYSTEM RESEARCH AND DESIGN OF
AUXILIARY PROJECT AUTOMOBILE REVERSING
LAMP

指导教师 姚红兵 教授

作者姓名 丁 勇

申请学位级别 工学硕士 专业名称 光学工程

论文提交日期 2018 年 4 月 论文答辩日期 2018 年 6 月

学位授予单位和日期 江苏大学 2018 年 6 月

答辩委员会主席

评阅人

2018 年 6 月

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果，也不包含为获得江苏大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2018 年 6 月

学位论文版权使用授权书

江苏大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致,允许论文被查阅和借阅,同时授权中国科学技术信息研究所将本论文编入《中国学位论文全文数据库》并向社会提供查询,授权中国学术期刊(光盘版)电子杂志社将本论文编入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》并向社会提供查询。论文的公布(包括刊登)授权江苏大学研究生院办理。

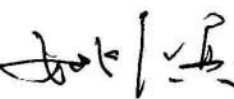
本学位论文属于不保密 ☒。

学位论文作者签名:



2018 年 6 月 7 日

指导教师签名:



2018 年 6 月 7 日

摘要

随着汽车产业的智能化发展,汽车照明除了照明的基本功能性之外,也更加注重了与周围环境的互动性,即利用真正可变的光型图案建立更明确的以车灯照明的通信方式,向其他道路使用者显示车辆行驶的意图,从而达到驾驶者同其他道路使用者之间的交流互动。本文基于非成像光学理论,借助光学软件 LucidShape 和 SPEOS 对具有交互式功能的辅助投影倒车灯光学系统进行了大量的探索和研究,提供了一种未来汽车照明系统可能应用的光学系统。

论文主要的研究内容包括:

1. 根据 GB15235-2007 汽车及挂车倒车灯配光要求,基于原有双侧倒车灯的 3D 结构造型对光学反射面进行重新设计,合理划分反射面各区域,分别调整各个区域反射面的扩散角度,使得各个区域反射面相互配合。保证倒车灯内侧 45° 可视角的发光强度满足法规要求最低值 15 cd。利用 CATIA 对灯壳横条花纹进行设计,使其同反射面相互配合以提高光学系统的光线利用率并且和后组合灯的整体造型保持一致。最终模拟光型分布满足倒车灯配光法规要求和倒车灯的路照要求。

2. 对辅助投影倒车灯系统进行设计,其中包括光学相关的 LED 光源的选择、反射面,挡板及透镜的设计以及电子相关的 PCB 板和驱动电路的设计。最后,将所有的光学零件在 SPEOS 中进行模拟并对挡板的孔径的尺寸大小及光学透镜的各个参数进行优化,最终模拟结果满足预期光型分布要求。

3. 对样灯进行测试及法规验证,光型分布同设计光型保持一致,样灯发光强度和光通量都可以达到模拟结果的 83%以上,满足倒车灯配光要求及路照要求。辅助投影倒车灯在路面投影出比较清晰的“箭头”符号,通过测量成像的平均照度值的比值为 13.1:3.2:1,成像位置同预期设计位置基本保持一致,可以在汽车倒车过程中,为其他道路使用者提供信号指示作用,可以有效地减小交通事故的发生,提升道路安全性,验证了设计方法的可行性。

关键词:尾灯,倒车灯,交互式功能,自由曲面反射镜,配光标准

ABSTRACT

With the intelligent development of the automotive industry, people begin to pay more attention to the interaction with the surrounding environment in addition to the basic functionality of automobile lighting system, that is through the use of truly variable light patterns to establish a more distinct and lighting-based way of communication, shows the vehicles' intentions to the passengers on-board. Based on the theory of non-imaging optics, the optical softwares of LucidShape and SPEOS are used to carry out a large number of explorations and researches on the auxiliary project reversing lamp optical system with interactive function, and provide a possible application method of the future automotive lighting system.

The main research contents include as below:

Firstly, according to the photometric requirements of regulation GB15235-2007, the reflector of reversing lamp was redesigned based on the 3D structure of original paired reversing lamp, the fundamental surfaces were divided legitimately and the surface profile data of sub-surface were optimized, which could fulfill the regulation of the photometric intensity 45 degrees inwards at least 15 cd. the horizontal stripes of the outer lens were redesigned with CATIA, to improve optical system light utilization and keep it consistent with the overall shape of the lamp. The final simulation result can meet the photometric intensity regulation and fulfill the requirments of the road scene illumination of reversing lamp.

Secondly, the auxiliary projection reversing lamp system was designed, including the selection of optically-related LED light source, the design of the reflector, baffle and lens, and the electronically-related PCB board and driving circuit. Finally, all the parts were simulated and optimized in SPEOS so that the final results meet the requirements.

Thirdly, the sample lamp was tested and carried out regulations validation, the sample lamp test result had achieved 83% of simulation value which consistent with

the simulation result, and the light intensity of each point is above the minimum value required by the regulation and satisfies the reversing lamp road scene illumination requirements. The auxiliary projection reversing lamp projects a relatively clear “arrow” symbol on the road, The ratio of the average illuminance value measured of the imaging is 13.1:3.2:1. The imaging position is basically consistent with the expected design. it can provide signal indication for other road users during the reversing of the car, which can effectively reduce traffic and improve the road safety, the feasibility of the design method is verified in practice.

Keywords: Automotive rear lamps, Reversing lamp, Interactive function, Free-form surface reflector, Photometric regulation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 汽车尾灯的发展历史及现状.....	1
1.2.1 汽车尾灯发展历史.....	1
1.2.2 汽车尾灯国内外发展现状.....	4
1.3 课题研究的内容以及章节安排.....	9
第二章 几何光学和光度学基础知识.....	11
2.1 几何光学.....	11
2.2 光度学的基本概念.....	12
2.2.1 辐射通量和光通量.....	12
2.2.2 发光强度.....	13
2.2.3 辐射亮度和光亮度.....	14
2.2.4 辐射照度和光照度.....	14
2.2.5 光色.....	15
2.3 照明设计重要因素.....	16
2.3.1 传输效率.....	16
2.3.2 照明分布的均匀性.....	17
2.4 本章小结.....	17
第三章 光学系统设计基础及配光标准.....	19
3.1 非成像光学设计理论基础.....	19
3.1.1 光学扩展量.....	19
3.1.2 能量会聚比.....	20
3.2 自由曲面设计方法.....	21

3.2.1 自由曲面光学设计方法.....	21
3.2.2 自由曲面设计基础.....	22
3.3 灯具政策、法规及标准.....	24
3.3.1 国内外法规标准及现状.....	24
3.3.2 倒车灯配光法规要求.....	25
3.4 设计软件介绍.....	26
3.4.1 CATIA.....	26
3.4.2 LucidShape	26
3.4.3 SPEOS.....	27
3.5 本章小结.....	27
第四章 倒车灯光学系统设计.....	29
4.1 尾灯常用的光学系统.....	29
4.1.1 反射碗光学系统.....	29
4.1.2 光导光学系统.....	30
4.1.3 厚壁件光学系统.....	32
4.2 倒车灯光学系统设计.....	32
4.2.1 光源的选择.....	33
4.2.2 反射面的设计.....	35
4.2.3 灯壳花纹的设计.....	36
4.2.4 倒车灯系统模拟及优化.....	40
4.3 倒车辅助投影系统设计.....	45
4.3.1 LED 光源选择.....	45
4.3.2 抛物面反射面设计.....	47
4.3.3 挡板设计.....	49
4.3.4 光学透镜设计.....	49
4.3.5 PCB 板及驱动电路设计	50
4.3.6 投影灯系统的模拟及优化.....	53
4.4 本章小结.....	56

第五章 倒车灯及辅助投影系统样灯测试.....	57
5.1 样灯测试.....	57
5.1.1 测试仪器介绍.....	57
5.1.2 倒车灯测试结果分析.....	58
5.1.3 投影灯测试结果分析.....	61
5.2 误差的产生和解决方法.....	63
5.2.1 光源位置偏移引误差分析.....	63
5.2.2 模拟和生产工艺的误差分析.....	65
5.3 本章小结.....	65
第六章 总结与展望.....	67
6.1 课程总结.....	67
6.2 工作展望.....	68
参考文献.....	69
致 谢.....	73
攻读硕士学位期间取得的研究成果.....	75

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着社会的不断进步与经济水平的日益提高,汽车已经成为了人们日常生活中不可或缺的交通工具,给人们的出行提供了极大的方便。根据国际汽车制造商组织发布的统计数据显示,2017 年全球汽车产销量数据平稳低速增长,全年汽车产量达到 9730 万辆,同比增长 2.4%;汽车销量达到 9680 万辆,同比增长 3.1%。中国作为全球汽车产销量最大的国家,全年产量 2902 万辆,同比增长 3.2%;销量达到 2887.9 万辆,同比增长 3%,连续九年蝉联全球第一^[1]。

在汽车产业规模不断增长的同时,汽车产业也正在发生一场深刻的变革。未来汽车产业在围绕“安全、环保、节能”的主旋律下,将向“低碳化、信息化、智能化”逐渐转型。这一变化将对汽车产业产品结构、生产方式和创新的内涵与驱动力产生深刻的影响,其影响的广泛性、创新性和复杂性都是前所未有^[2]。

车灯作为一个很重要的汽车外观产品,是汽车的“眼睛”,而且法规对汽车外观要求有一半以上都集中在车灯上,汽车灯具是主动安全性的重要组成部分^[3,4]。世界汽车安全事故统计资料表明:夜间发生的交通事故是白天的三倍,照明状况不良时的事故率又是照明良好时的三倍^[5]。为满足节能、环保及智能化的汽车产业发展方向,汽车照明的发展不仅要紧紧的追随国家“十三五”发展规划的总基调,而且还要承接“十二五”专项发展规划,围绕大行业优化调整政策,实施《中国制造 2025》,不断推动汽车照明行业的发展。近几年国内市场,LED 灯具不仅广泛应用于汽车信号灯具上,同时也作为前照灯的主光源^[2,6,7]。各个汽车灯具制造商也加快了对创新、智能化的汽车照明产品的研发进程,对车灯新的技术的研究具有十分重要的应用意义。

1.2 汽车尾灯的发展历史及现状

1.2.1 汽车尾灯发展历史

汽车照明技术的发展同光源技术的发展密切相关,光源技术的变革为汽车照明的发展提供了可能,同时,汽车照明技术的创新也为光源发展提供了方向。不

管是汽车前照灯还是汽车尾灯，都从最初的燃料燃烧光源到后面的电致发光然后再到现在的 LED 半导体二极管的使用以及未来的面发光的 OLED 光源，在发光原理上发生了根本性的变化。

第一代汽车光源使用的是气体燃料光源。主要使用气体燃料（包括乙炔、煤气等）燃烧为驾驶者提供照明，在燃烧之前先将燃料汽化。当时燃料光源被认为是照明光源的最高水平。但是这种光源光效低，只可以满足较低的照明要求，操作复杂，而且还存在着极大的安全隐患，所以这种气体燃料光源很快就被淘汰了。

第二代汽车光源使用的是白炽灯。1875 年，加拿大多伦多的 Henry Woodward 和 Matthew Evans 首次申请并获得了白炽灯专利^[8]。1878 年，英国物理学家 Joseph Swan 和美国发明家爱迪生都分别研制出具有实用意义的真空白炽灯泡。1979 年，爱迪生又研制出了真空碳丝白炽灯，此时灯丝会在高温环境中升华，久而久之灯丝就会变长变细而被烧断，当时的灯泡寿命仅有 14 h^[9]。随着白炽灯寿命的提高，在 1925 年，白炽灯逐渐应用到汽车照明上，并标志着汽车照明从燃料照明迈进了电气照明的具有革命性的时代。同气体燃料相比，白炽灯工作性能更加稳定，也更加安全。但是白炽灯属于热光源，利用率较低且寿命短暂，一般寿命约为 1000 h~1500 h 之间。所以，目前汽车市场上基本不再使用白炽灯。

第三代汽车光源使用的是卤素灯。1959 年，Elmer G. Fridrich 和 Emmett Wiley 的卤钨灯获得了专利授权，同年研制出了第一只卤钨循环白炽灯-碘钨灯^[10]。1964 年，法国贝斯公司加工出了第一批用于汽车照明的卤钨灯泡。它是利用了卤和钨循环的原理而制成，灯丝经过高温升华产生的钨蒸汽与灯泡玻壳附近的卤元素发生反应生成卤化钨，这种化合物遇到温度较高的灯丝后就会分解为卤元素和钨元素，而钨元素又重新沉淀到了灯丝上，循环过程使得灯丝的使用寿命延长了 1 倍以上，长达 2000 h~3000 h。卤素灯是白炽灯的优化产品，它保持了白炽灯的简单、成本低廉的优良特点，同时也克服了白炽灯的寿命短、发光效率低等缺点^[11]。到目前为止，卤素灯在汽车前照灯及尾灯上仍然具有广泛的应用。

第四代汽车光源使用的是氙气大灯（High Intensity Discharge 简称 HID）。氙气大灯专门用于提高汽车前照灯的强度而研制出来的前照灯专用光源，氙气大灯属于重金属灯，是一种通过充满惰性气体的半透明或透明熔融石英管内的电极之间产生光的电气体放电灯。并且石英电弧管中通常还含有金属或金属盐。一旦电

压从 12 V 突然增加到 23000 V 时, 会加热和蒸发金属混合物, 电弧等离子体中的存在极大地增加了电弧对于给定功率输入产生的可见光的强度。与卤素灯相比, 氙气大灯不仅具有更高的亮度而且能照亮更远的距离, 会给驾驶者提供更加清晰的视野^[12,13]。

第五代汽车光源使用的是 LED (Light Emitting Diode)。LED 属于冷光源, 具有小体积、低耗电量、长使用寿命、高亮度、环保、耐用等优点^[14]。基于这些优点, 使得各个汽车制造商将目光转向了 LED 技术的研发与生产, 目前已经在汽车制动灯、转向灯和倒车灯方面得到了广泛的应用, 预计在 2020 年大约 60% 的尾灯会采用 LED 照明^[2]。另外 LED 占用的空间更小, 使得汽车灯具可以实现个性化的造型, 整车厂更容易增加个性化元素。随着 LED 亮度的增加, LED 在前照灯领域也占据了重要的位置, 使得前灯照明模组更加多样化和智能化, LED 将成为汽车照明应用中最为广泛的光源。

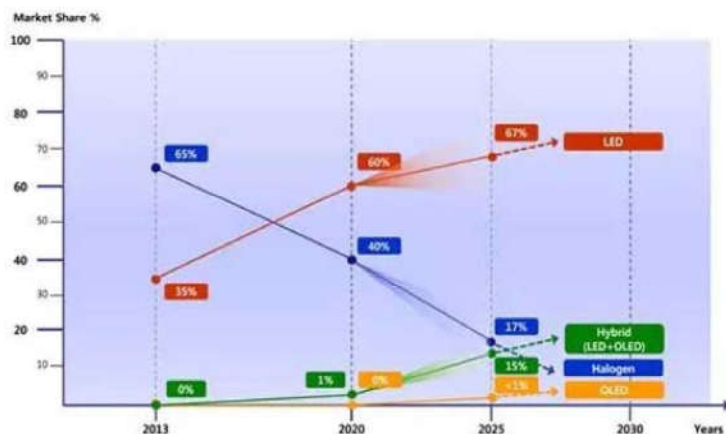


图 1.1 汽车尾灯光源发展趋势

Figure 1.1 Automobile rear lamp source development trend

第六代汽车光源将是 OLED (Organic Light Emitting Diode)。OLED 是一种超有机材料层聚合而成的二极管发光源, 具有自发光、视觉广、高对比度、色彩更加丰富立体及拥有更高的可塑性等特点^[15]。但是, 目前 OLED 还存在发光强度不足, 不容易满足较高的配光分布, 同时还存在发光效率低和成本较高的问题, 所以现在 OLED 只应用在极少数高端汽车照明上。

汽车外部灯具按照不同作用进行划分, 主要分为照明功能和信号功能两大类。其中起到照明功能的灯具主要有: 汽车前方的远近光灯和前雾灯, 汽车尾部的倒

车灯和牌照灯等；而转向灯、后雾灯、位置灯、昼间行车灯、回复反射器等功能都是具有指示作用的信号灯^[5]。但是值得注意的是，倒车灯功能不仅起到为本车提供倒车照明的功能外，还起到了为后方车辆及行人提供倒车的信号指示作用，所以倒车灯既可以分为照明功能也具有信号灯功能的作用^[16,17]，各个功能灯具在汽车上的分布如图 1.2 所示。



图 1.2 汽车照明应用示意图

Figure 1.2 Schematic diagram of automobile lamp function Application

1.2.2 汽车尾灯国内外发展现状

汽车照明灯功能的灯具和信号功能的灯具的发展呈现出两个不同的趋势。照明功能的远近光从最初的只需要满足法规基本要求外到如今越来越智能化的趋势，例如 ADB、矩阵式大灯等，它的发展变化也代表了车灯的整体演变过程。而尾灯发展变化也是与前灯同步进行的，尾灯主要是从灯具结构造型作为切入点，其变化多表现在结构和造型等方面，如单灯、组合灯、复合灯、混合灯以及最新流行的将后信号灯的左、右两部分连成一体的贯穿式后组合灯等，如图 1.3 所示。



图 1.3 贯穿式汽车尾灯

Figure 1.3 Cross style automobile rear lamp

其整体结构变得更加的无缝结合、偏平仿生，造型也更加丰富独特，且与整车造型保持一致。随着光源技术不断的提高，汽车尾灯不断涌现出新的技术。同时，尾灯中各种新技术的诞生也正是汽车制造商为了追求不一样的效果而不断努力发展而来的，而且在追求这种效果的过程中，汽车厂商也逐渐形成统一的具有各自“家族特征”的尾灯标志，加强汽车品牌的识别度。

尾灯最常见的便是反射镜加上灯壳组成的光学系统，反射形式的尾灯包括传统的灯泡反射式以及现在广泛使用的 LED 反射式光学系统。1985 年 LED 汽车信号灯首次出现在客车上，1986 年 Nissan 300zx 配备 LED 高位刹车灯，标志着 LED 正是成为汽车照明的新型光源^[18]。我国于 2000 年在 Santana 2000 型上首先使用 LED 高位刹车灯。2005 年，大众产品中的高尔夫车型为第一代配备全 LED 的量产车型^[19]。从这以后，各大汽车厂商都相继推陈出新展示出各种各样的 LED 灯具，如图 1.4 表示为常见的 LED 汽车灯具。



图 1.4 常见的全 LED 汽车尾灯

Figure 1.4 Examples of full LED automobile rear combination lamp

随着 LED 光源的广泛使用, 因为其体积小等优点, 可以更好地将光线耦合进光导及厚壁件中, 光导和厚壁件的出现让尾灯的点亮均匀性上升到了更高的层次。2006 年, 三段式光导第一次运用到雪铁龙 C4 量产车型上; 2008 年, 环状式光导作为后位置灯第一次运用在奥迪 A3 的尾灯上^[20]; 2010 年, 宝马 5 系尾灯采用了厚壁件的光学结构。同时尾灯还出现了更加别致的设计, 例如极富立体感造型的半透半反材料的“隧道式”车灯, 以及更加均匀的 Milky (乳白色材料) 材料的应用, 新材料的出现也为汽车尾灯增添了更多样式, 点亮效果更加的吸引眼球。如图 1.5 所示。



图 1.5 常见的尾灯结构

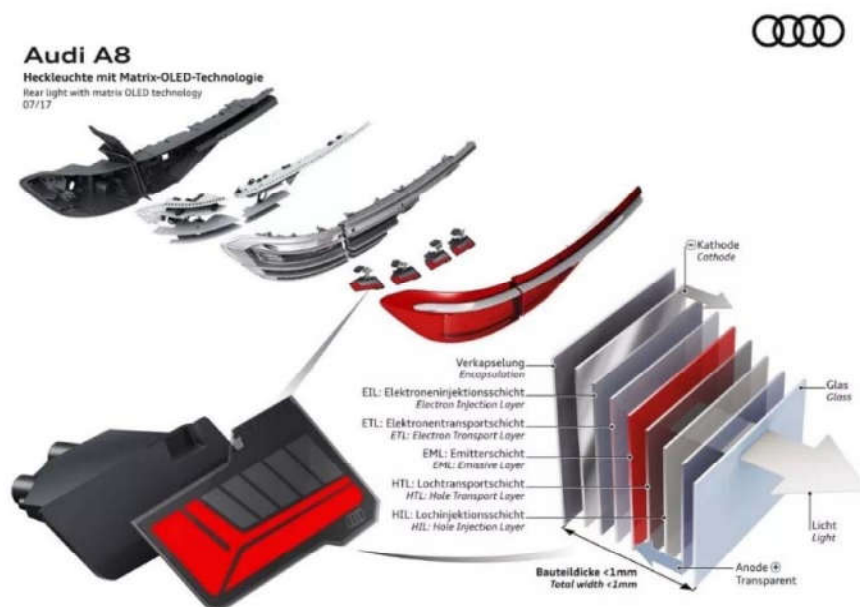
Figure 1.5 Examples of rear combination lamp

随着科技的发展, OLED 光源逐渐应用于少数高端车型上。2015 年欧司朗为 BMW M4 Iconic Lights 概念车提供了第一款 OLED 汽车光源。在 2016 年 4 月, Audi 发布了 2016 TT RS 跑车, 提供可选配的 OLED 尾灯, 这是全球首款配备 OLED 尾灯的量产汽车^[21]。在 2017 年巴塞罗那车展上, Audi 带来了全新 A8 车型, 采用了具有家族特征的贯穿式 OLED 尾灯, 具有很高的辨识度^[22]。在 2017 年 9 月的法兰克福车展上, 奔驰 S 级轿车首次发布了配备了 33 颗 OLED 光源的汽车尾灯, 每个 OLED 单元可单独控制, 可顺序点亮, 科技感十足^[23], 如图 1.6 所示。



图 1.6 OLED 在汽车尾灯上的应用

Figure 1.6 Applications of OLED in rear combination lamp

图 1.7 Audi OLED 尾灯结构示意图^[24]Figure 1.7 Schematic diagram of Audi OLED rear combination structure^[24]

除了对尾灯外观均匀性的不断发展与改善之外,具有交互式功能的尾灯也是未来的另外一个趋势。2016 年 4 月,奥迪在日本向外界公布了第一款具有交互式功能的“呆萌”矩阵式汽车灯具。该灯具可以显示出各种“颜文字”表情,被称之为“颜文字 LED 灯具技术”^[25],如图 1.8 所示。其主要作用是用来缓解驾驶员的压力,同时也可以用来同其他驾驶员进行交流沟通,例如在驾驶的过程中犯错影响到别人时,可以在尾灯显示道歉的表情,向后面车辆驾驶员表达歉意。这也是最早出现的交互式灯具技术。



图 1.8 Audi LED 矩阵技术

Figure 1.8 LED matrix technology of Audi

随后，在 2017 年第十二届上海汽车灯具产业发展论坛上，海拉展出了一款史无前例的照明设备--地毯式迎宾灯，也称之为“天使之翼”^[26]。作为新一代的汽车迎宾灯，在夜间具有极佳的辨识度。另外，在上海汽车灯具产业发展论坛上，大茂伟瑞柯车灯有限公司副总经理 Dr. Rainer Neumann 作了题目为“Future Technologies for Front and Signal Lighting”的研究报告，报告介绍了并指出了未来汽车灯具的发展方向。随着汽车产业智能化的发展，尾灯在未来必将呈现出具有交互式的作用，利用光型的变化同周围环境进行信息交换。如交互式倒车灯在车辆倒车时在路面上投影出一定的标识符号，提醒后方车辆注意行驶安全。具有交互式功能的尾灯增强道路使用者之间的交流，如下图 1.9 所示。

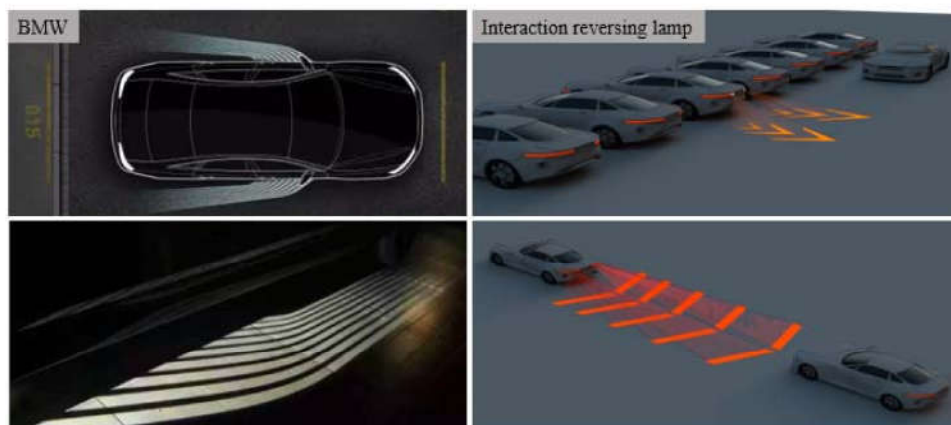


图 1.9 交互式功能的汽车灯具

Figure 1.9 Automobile lamp with interaction function

在 2018 年日内瓦车展上，戴姆勒首次展示了“Digital Light”大灯技术。该技术有一百万个光点，让车灯成为了一个高清投影机，可以在车辆行驶时的前方道路上投射图片或交通标志，包括：低抓地力路面标志、施工现场标志、防追尾标

志、车道保持标志、盲点警告标志和限速标志^[27]，如图 1.10 所示。

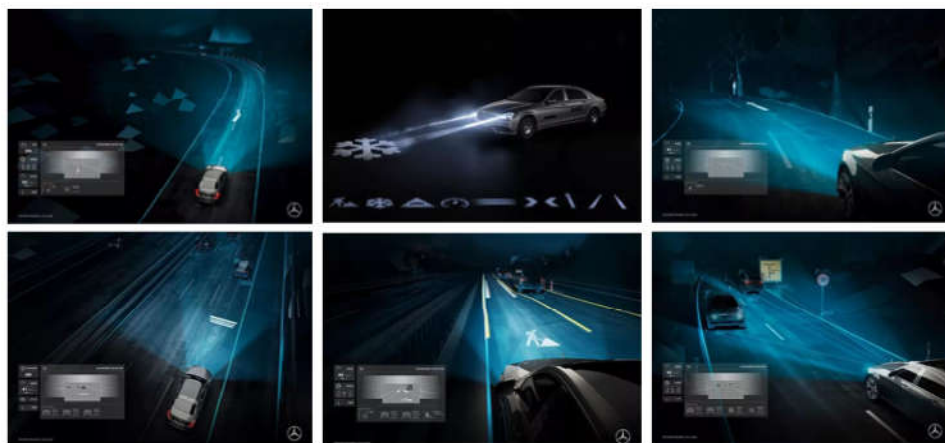


图 1.10 戴姆勒 Digital Light 技术

Figure 1.10 Digital light technology of Daimler company

因此，具有交互式功能的汽车灯具将会在汽车产业智能化发展中充当愈加重要的角色，极大的提升了道路安全性，减少道路安全事故的发生，成为未来汽车照明的发展的必然趋势。

1.3 课题研究的内容以及章节安排

本文研究并改进了已有某款汽车双侧倒车灯系统，利用 LED 投射式原理实现倒车灯辅助系统并重新设计单侧倒车灯使其配光性能满足单侧倒车的法规要求，为未来汽车尾灯提供一种可能应用的照明方式。主要的工作包括了光源的选择、自由曲面及光学透镜的设计，以及实物样灯测试及数据测试分析等工作。文章着重研究讨论了在汽车灯具设计过程中的基本方法及如何在节约成本的同时提高光学系统的有效利用率，如何在达到法规要求基础上获得较好的点亮效果。文章的结构安排如下：

第一章介绍了课题的研究的主要背景、汽车尾灯发展历史及现状、课题研究的内容及意义。概括了汽车尾灯展的各个阶段，以及具有交互式功能的汽车灯具随着汽车产业的智能化发展充当着愈加重要的角色，从而得出了课题研究的必然性。

第二章介绍了关于汽车灯具设计所用到的光学基础知识。包括几何光学以及照明设计需要考虑的重要因素，并对法规中汽车灯具的色度要求做了简要的介绍

分析。

第三章介绍了灯具光学系统设计的基础知识及法规中关于倒车灯的配光及样灯测试相关要求。同时还阐述了尾灯常采用的光学系统以及非成像光学设计的理论基础,研究并分析了自由曲面的理论知识及设计方法以及汽车灯具设计过程中所使用的软件。

第四章对满足倒车灯法规的单侧倒车灯和倒车灯辅助投影系统的设计进行设计。首先是对满足倒车灯法规要求的单侧倒车灯进行了设计,在原有的双侧倒车灯的 3D 结构基础上,利用 LucidShape 软件重新设计反射面,使其满足内外侧 45° 的可视角发光强度要求最小值 15 cd。然后进行辅助投影倒车系统的设计,根据设计要求选择合适 LED 光源,设计用于准直的反射面及用于会聚光线的会聚透镜和具有放大作用的光学透镜,最后对 LED 的驱动电路进行设计,将所有需要进行追迹的光学元件用 SPEOS 进行模拟及优化,最后的结果符合预期并且满足设计要求。

第五章进行了样灯制作及测试。并将测试结果通模拟结果进行对比分析,从而研究光学系统设计过程中可能会产生误差的因素,其中包括了光源位置偏移引起的误差,以及模拟过程参数设置和生产工艺之间的比较分析。

第六章进行分析和总结。对系统设计中还存在的不足进行分析和展望,提出新的工作计划及方向。

第二章 几何光学和光度学基础知识

2.1 几何光学

把光线当作一种几何线进行研究的理论称之为几何光学,几何光学是人们从无数客观光学现象及实践经验中抽象出来的,光线的方向代表光能的传播方向。利用几何光学可以使得自然界中许多光的传播现象和光学系统的原理变得一目了然,光学设计过程中在满足预定给定的技术要求的同时,解决问题的方法简单明了且合理可靠。目前几何光学仍然是大多数光学仪器的设计基础,因此几何光学具有极其重要的实际应用价值。

根据几何光学理论,光可分为两种情况进行传输:一是光线在均匀介质中传输方向不会发生改变;另一种情况是在不同介质分界处光线方向发生偏折^[28,29]。

在同一均匀介质中光沿直线传播,称为光的直线传播原理。该定律可以很好的解释日常生活中常见影的形成、日食、月食及小孔成像等自然现象。

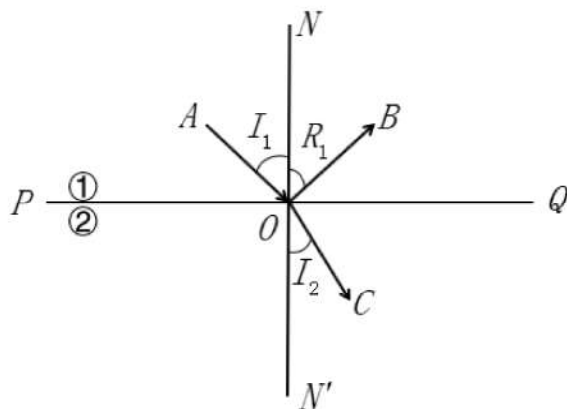


图 2.1 反射、折射定律

Figure 2.1 Snell's law

在图 2.1 中, PQ 表示为两种不同介质的分界面,法线用 NN' 表示, AO 为入射光线, BO 和 CO 分别表示为反射光线和折射光线。光线在同一种介质中传播时,反射角等于入射角,即 $I_1 = R_1$, 称之为反射定律;当光线由一种介质传播到另一种介质时,光线发生偏折现象且遵循折射定律:

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{n'}{n} \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中 I_1 和 I_2 分别表示入射和折射光线同法线之间的夹角, n 和 n' 分别表示两种介质的折射率。如果令 $n = n'$, 则 $I_1 = I_2$, 即为反射定律。这表明反射定律是可以通过折射定律进行表示, 同时折射定律也称之为斯涅耳定律。

2.2 光度学的基本概念

光度学基于人眼视觉度量, 主要包括光通量、发光强度、照度及亮度等参数之间的关系^[30-33]。1760 年, 朗伯用数学公式阐明了各个参数之间的关系。光度学主要用于人眼视觉系统, 因此只有在波长为 360 nm~760 nm 的可见光适用于这一度量。

2.2.1 辐射通量和光通量

通量用于表示一定空间范围内的总的能量, 常使用到的有辐射通量和光通量, 其大小表征着一个光学系统的辐射能量强弱。辐射通量又可以用功率进行表示, 一般用 Φ_e 表示。光谱密集度 $\Phi_{e\lambda}$ 曲线通常用来表示辐射体包含了不同波长的电磁波, 如图 2.2 所示。

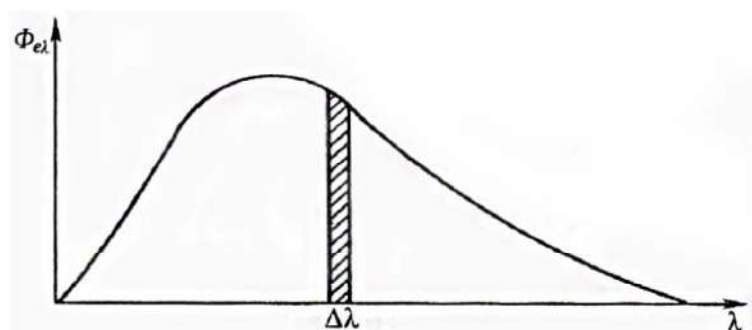


图 2.2 光谱密集度曲线
Figure 2.2 Spectral density curve

图 2.2 中 $\Phi_{e\lambda}$ 表示意义如下:

$$\Phi_{e\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_{e\lambda}}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_{e\lambda}}{d\lambda} \quad (2.2)$$

对所有辐射体内所求波段范围内的光谱密集度进行积分便可以得到总的辐射功率为:

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda \quad (2.3)$$

类似于辐射通量，光通量表示人眼所能感受到的辐射功率，光通量和辐射通量之间的转化通过 CIE 标准观察者的视见函数来表示，用式 (2.4) 进行表示，单位是流明 (lm)。

$$\Phi = \int_{\lambda=0}^\infty K(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda \quad (2.4)$$

$$K(\lambda) = C \cdot V(\lambda) = 683V(\lambda) \quad (2.5)$$

式 (2.5) 中 $K(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 分别表示光谱光视效能和视见函数。光谱光视效能描述的 CIE 标准观察者对不同可见光波长的反应，其大小依赖于环境照明水平。视见函数定义为光谱光视效率，表示范围在 0 和 1 之间数值。

2.2.2 发光强度

立体角同二维空间的平面角度一样，表示一个物体对应特定的三维空间的角。立体角 Ω 单位用球面度 Sr 表示，它由一个顶点位于球心，半径为 r 的圆锥体表示，如图 2.3 所示。该锥体对应的球面表面为 S ，立体角定义为：

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (2.6)$$

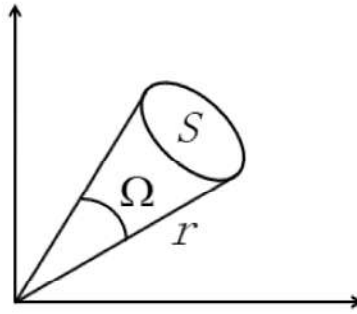


图 2.3 立体角定义
Figure 2.3 Definition of solid angle

发光强度描述了光的立体角的分布情况，表示光源特定方向上的立体角内所辐射的光通量数值，用坎德拉 (cd) 来表示发光强度的大小。

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.7)$$

强度无法通过探测器直接测量，一般探测器测量的都是光通量或者能量，通过照度进行转换。假如探测器表面的照度分布均匀，光源和探测器距离为 r ，则可以用探测面积所围成的立体角来计算强度。对于近场测量时，对扩展光源必须要考虑到辐射叠加的情况；但是对于远场测量时，离焦线可以忽略光源光线的焦散，从照度很容易推断出强度的大小^[31]。

2.2.3 辐射亮度和光亮度

在可见光波段，亮度被认为是实际观察者对目标指定面积的响应。辐射亮度分布则描述了光源表面每个点沿不同方向的辐射能力。因此，只要知道了光源的辐射亮度分布，那么就可以知道光学系统的辐射和传输能力。辐射亮度定义为在垂直于辐射方向上单位面积的发光强度，用 L_e 进行表示，单位为 $W/(Sr \cdot m^2)$ 。在辐射强度为 I_e 的情况下，其辐射亮度 L_e 表示为：

$$L_e = \frac{I_e}{dS_n} = \frac{I_e}{dS \cdot \cos a} \quad (2.8)$$

同样的，光亮度与辐射度学中的辐射亮度相对应，光亮度的单位 cd/m^2 。

假定 $I = 1 \text{ cd}$ ， $dS = 1 \text{ m}^2$ ，那么光亮度 $L = 1 \text{ cd/m}^2$ 。

2.2.4 辐射照度和光照度

照度用于表示单位面积的辐射通量，单位为 lx。照度根据测量的表面不同可以分为出射度和照射度，如图 2.4 所示。



图 2.4 辐射照度和辐射出射度

Figure 2.4 Irradiance and radiation

若测量平面自身就是辐射体，那 A 点的出射照度强弱可以用光通量除以面积进行表示，如式 (2.9) 所示。

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (2.9)$$

如果某一表面被其他辐射体照射，那么 A 点被照射的强弱可以用辐射照度表示为：

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (2.10)$$

汽车照明设计过程中，汽车前照灯和倒车灯的路照分析都是用照射度进行分析，所设计的产品必须满足一定的路照要求。

2.2.5 光色

汽车及挂车外部照明和光信号装置的安装规定（GB4785-2007）对汽车灯具各个功能出射色度有着严格的规定，除了倒车灯以外，汽车灯光必须严格遵守“前不见红，后不见白”的法规要求^[16,17]。汽车照明光色主要分为红色、黄色和白色三种颜色。色度标准采用 GB/T 3977 中 1931 XYZ 色度系统，标准灯泡及实际测量过程中的测量条件必须严格按照 GB/T 3978 相应规定，各功能出射光色度的测量值必须都在规定的光色坐标范围内^[34,35]，如图 2.5 所示。

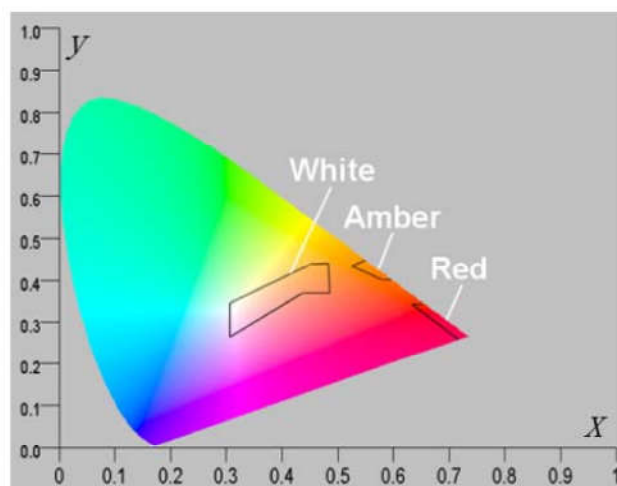


图 2.5 汽车照明色坐标范围

Figure 2.5 Chroma range of automobile lamp

法规 GB4785 对汽车灯具其他功能也有相应的规定^[16]，如下表 2.1 所示：

表 2.1 汽车灯具各功能色度
Table 2.1 Chroma of automobile lamps

功能名称	色度	功能名称	色度
远光灯	白色	近光灯	白色
前雾灯	白色或黄色	日行灯	白色
倒车灯	白色	牌照灯	白色
前位灯	白色	后位灯	红色
制动灯	红色	后雾灯	红色
转向信号灯	琥珀色	危险警告信号	琥珀色
紧急制动信号	琥珀色或红色	示廓灯	前白后红

2.3 照明设计重要因素

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。光学从光源到目标的传输通常有两个重要的因素：传输效率和目标上的分布。在光源一定的情况下，传输效率尤为重要，然而，往往所需要的分布和效率不能同时兼有。因此，在进行设计过程中，要使得效率和均匀性处于一个最佳的平衡位置^[36]。

目前车灯设计及生产过程中，都在往成本降低方向进行，因此在进行光学设计时，不仅在效率和均匀性之间衡量，还要考虑成本和其他因素，其最终结果就是设计一个综合考虑效率和均匀性、成本低廉、工艺简单和可快速生产的车用照明系统。

2.3.1 传输效率

传输效率 η_t 定义为屏幕上测得的接受通量 Φ_{target} 和灯泡实际出射通量 Φ_{source} 的比值^[32]，即

$$\eta_t = \frac{\Phi_{target}}{\Phi_{source}} \quad (2.15)$$

该定义包括了光源的所有辐射点、所有方向和所有光谱信息。因此可以用光源的空间位置、角度和光谱分布情况等方面来对光源辐射进行分析，用光谱辐射亮度 L_e 或者光亮度 L 来描述式 (2.15)，得到^[33]：

$$\eta_t = \frac{\iiint h_{target}(r, \Omega, \lambda) L_{target}(r, \Omega, \lambda) dr d\Omega d\lambda}{\iiint h_{source}(r, \Omega, \lambda) L_{source}(r, \Omega, \lambda) dr d\Omega d\lambda} \quad (2.16)$$

式中 h_{target} 和 h_{source} 分别表示接受目标滤波器函数和光源滤波器函数，光谱分布通常都是一致的，但是位置和角度方向可能不同。

2.3.2 照明分布的均匀性

照明分布的均匀性规定了模拟的或者测量的照度分布如何满足目标分布。照度分布测量至少需要满足以下三个物理量中的某一种^[36]：

- 1、辐射照度或者光照度：测量单位面积的光通量；
- 2、强度：测量单位立体角的通量；
- 3、辐射亮度或者光亮度：测量单位面积、单位立体角的通量。

通过与抽样测量结果或模拟目标分布结果相比，可以确定均匀性分布情况。

2.4 本章小结

本章主要介绍了汽车照明设计过程中会涉及到的几何光学和光度学的基本理论知识。同时还介绍了在汽车照明设计过程中传输效率和照明分布的均匀性两个重要的因素。

第三章 光学系统设计基础及配光标准

3.1 非成像光学设计理论基础

3.1.1 光学扩展量

光学扩展量是非成像设计中最基本也是最重要的概念之一，其概念在 20 世纪 70 年代才被正式的接受。首先，它描述了光学系统的通量的传输特性；第二，它具有改变目标辐射分布的能力。描述了系统中通量的角向和空间传播的情况，所以它与系统辐射传播特征相关。在没有吸收、散射、增益或者菲涅尔反射损失的无损系统中，所有通过系统入瞳输入的通量将全部从出瞳出射。在光学设计中具有重要的应用，光学扩展量可以定义为^[30,37]：

$$\xi = n^2 \iint \cos \theta dA_s d\Omega \quad (3.1)$$

由式 (3.1) 可知，利用在光束传播方向上所通过的截面积同光束所占据的空间立体角之间的积分来进行表示光束的扩展量。光学扩展量可以用程函方程式(eikonal)根据同性非导体媒质中的时谐场进行导出：

$$U = \int du = \int \iiint n^2 dx dy dL dM = \xi \quad (3.2)$$

x , y , L , M 分别表示光学系统的中光线的位置和方向余弦，由它构成的四维空间为相空间，体积表示为 U 。当某一光学系统的扩展量不变时，光束通过该系统的传输如图 3.1 所示。

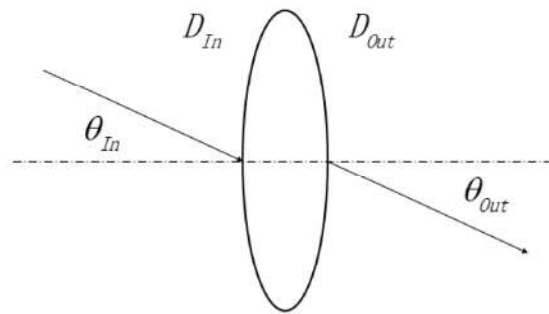


图 3.1 光学扩展量守恒示意图

Figure 3.1 Schematic diagram of optical etendue conservation

光学扩展量描述了光学元件对整个光学系统能量利用率的影响，它代表了光

学系统收集光束能量的能力，光学扩展量的值越大，意味着传递的光能越多，光能利用率越高。如果入射光束的光学扩展量小于或等于光学系统所允许通过的光学扩展量，则光束能够全部通过光学系统，不会引起能量的损失，这种情况时光能利用率最高。

3.1.2 能量会聚比

能量的分布及能量的传输效率是非成像光学首要考虑的因素，能量会聚比最重要的属性就是来自于输入面积 A 的能量同输出孔径面积 A' 被传输的能量的比值，把这个比值称之为能量会聚比^[38-40]，用 C 来表示：

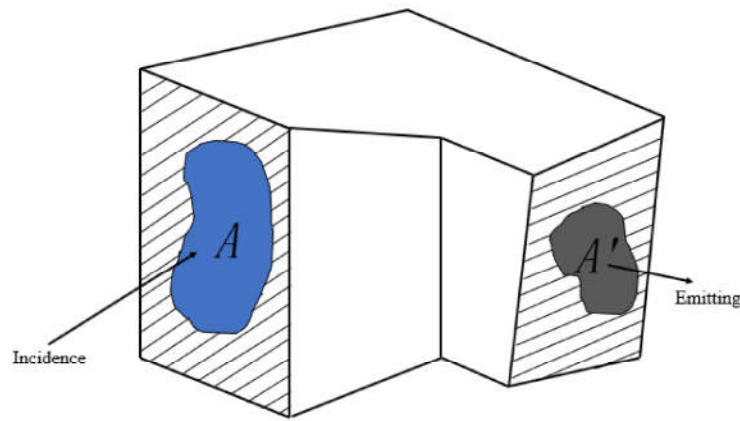


图 3.2 能量会聚比示意图

Figure 3.2 Schematic diagram of energy convergence ratio

如图 3.2 表示某一光学系统中能量的传输路径，光学以立体角 Ω 射入到入射面 A 上，以立体角 Ω' 从出射面 A' 出射，根据能量守恒定律可以得到如下方程：

$$A \times \sin^2(\Omega) = A' \times \sin^2(\Omega') \quad (3.3)$$

那么能量会聚比则可以表示为：

$$C = \frac{A}{A'} = \frac{\sin^2(\Omega')}{\sin^2(\Omega)} \quad (3.4)$$

当输出光线的辐射分布是半球面时，即当 $\Omega' = \frac{\pi}{2}$ 时，可以得到指定接受立体角

的能量会聚比的最大值，此时的能量会聚比是：

$$C = \frac{A}{A'} = \frac{1}{\sin^2(\Omega)} \quad (3.5)$$

3.2 自由曲面设计方法

3.2.1 自由曲面光学设计方法

自由曲面指的是非线性对称和非旋转对称的光学表面^[41]。它是基于非成像光学理论发展而来的，用来满足某些非对称照度和会聚度光学系统，如汽车近光灯、聚光灯和一些太阳能聚光器等。虽然自由曲面加工相比于旋转或者线性对称的曲面加工要困难的多，但是其灵活的空间布局极大的提高了设计自由度，不仅可以控制发光强度的分布，也可以控制光像的扩散角度以达到预期的光型。而且同传统成像光学相比较，非成像光学对全面的表面光洁度和完成的要求比较低，所以自由曲面更加适合非成像光学应用。自由曲面不仅可以简化系统结构还可以获得更好的光学性能，使得自由曲面汽车造型设计等领域得到了广泛的应用。

自由曲面的设计主要有数值优化法和直接法两种方法^[42,43]。数值优化法是根据光源的发光特性和元件的光学属性，按照设计目标来选取评价函数，利用计算机编程来控制初始面型上的数值点的位置，实现照明系统设计及仿真，通过光线追迹模拟实际的光线分布，根据计算出的优化函数值的大小来调整数值点的位置并进行调整，然后在计算机上再进行优化、再模拟，在短时间内设计产品原型。由于大多是光学软件是采用蒙特卡罗方法进行光线追迹，需要大量的光线数才能保证模拟结果的准确性，需要大量的时间导致效率低下^[41]。另外，自由曲面设计不同于传统光学成像设计，它是通过 B 样条曲线来表示。因为没有特定的解析式，很难通过修改几个简单的评价函数来达到优化的结果，给设计者带来难度^[44]。另一种是直接法，即在给定的光学条件下无需对光学表面方程进行迭代运算的数学方法。从一开始就给定光源及其曲线辐射分布以及目标面要求的辐射照度、强度或亮度。故直接法能使设计速度加快，修改更加便利，它是一系列设计方法的统称，如多表面同时设计法、剪裁法、数值法等^[45]。

3.2.2 自由曲面设计基础

在自由曲面设计中,为了便于计算,将光源假设为点光源并且关于整个照明系统是轴对称的。光源是一个近似朗伯型光源,意味着它的辐射亮度分布不依赖于方向,且光源的空间强度分布是观察角的余弦函数^[46],因此其光强分布为:

$$I(\varphi) = I_0 \cos \varphi \quad (3.6)$$

其中 φ 表示为出光方向与轴线之间的角度, I_0 表示发光强度,那么总出射光通量可以表示为:

$$\Phi = \int I(\varphi) d\Omega = \pi \cdot I_0 \sin^2 \varphi_{\max} \quad (3.7)$$

其中 $\varphi_{\max}$ 表示最大的发散角,通常为 90° ,以光源中心作为坐标原点建立坐标系, Z 轴表示为出光方向。其反射定律的矢量形式可以表示为:

$$\sqrt{2}\sqrt{1-\vec{Out} \cdot \vec{In} \cdot \vec{N}} = \vec{Out} - \vec{In} \quad (3.8)$$

式中 $\vec{In}$ 、 $\vec{Out}$ 、 $\vec{N}$ 均为坐标形式的向量, $\vec{In}$ 、 $\vec{Out}$ 分别表示为入射光线和出射光线单位向量、 $\vec{N}$ 表示为单位法向量。

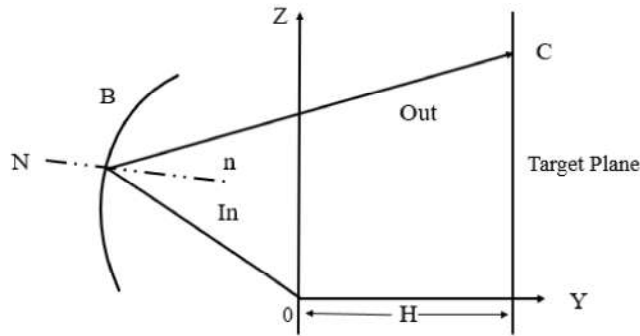


图 3.3 自由曲面与入、出射光线的几何关系

Figure 3.3 The Geometric relations between free-form surface and lights

如图 3.3 中,假设出射光线与 Y 轴的夹角为 φ ,且与自由曲面相交于点 B ,经过自由曲面反射后与屏幕相交于点 C , H 表示屏幕与光源之间的距离^[47,48]。那么入射光线单位向量 $\vec{In}$ 和出射光线单位向量 $\vec{Out}$ 可以表示为:

$$\vec{In} = (\cos \varphi(i), \sin \varphi(i)) \quad (3.9)$$

$$\overrightarrow{Out} = \frac{1}{\sqrt{(H-y(i))^2 + (z'(i) - z(i))^2}} \times (H - y(i), z'(i) - z(i)) \quad (3.10)$$

式中 $z'(i)$ 表示探测器上照明区域的横坐标。结合 Snell 定律可以求出点 B 的单位法向量 $\overrightarrow{N}(a, b)$ ：

$$\begin{cases} a = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1}{\sqrt{(H-y(i))^2 + (z'(i) - z(i))^2}} - n \cdot \cos \phi(i) \right) \\ b = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1}{\sqrt{(H-y(i))^2 + (z'(i) - z(i))^2}} - n \cdot \sin \phi(i) \right) \end{cases} \quad (3.11)$$

式中 $\Delta = \sqrt{2} \sqrt{1 - \overrightarrow{Out} \cdot \overrightarrow{In}}$ 。

在求解过程中，计算出射光线确定反射面初始点 B_0 的法向量 $\overrightarrow{N}_0$ ，从而就可以确定该点的切平面 S_0 ，该切平面与下一条入射光线 $\overrightarrow{In}_1$ 相交点 B_1 。以此类推，由前一点的切平面与下一点的法向量所在的直线相交得到下一点^[49,50]，如图 3.5 所示。

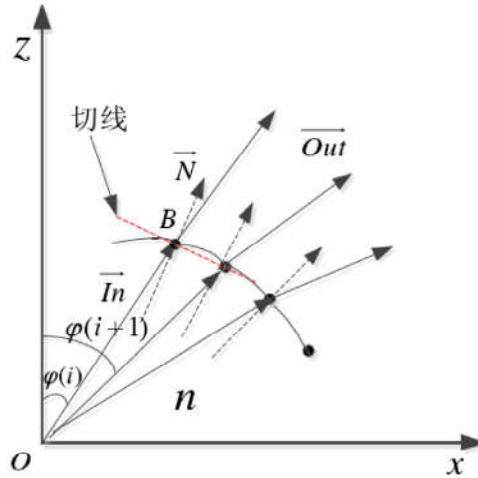


图 3.4 离散点坐标计算示意图

Figure 3.4 Scattered point coordinate calculation

根据 B 点的法向量可以得到该点的切线方程：

$$\frac{x - x(i)}{b} = \frac{z - z(i)}{-a} \quad (3.12)$$

那么与 x 轴夹角 $\phi(i + 1)$ 的直线方程为：

$$\frac{x}{\cos \varphi(i+1)} = \frac{z}{\sin \varphi(i+1)} = t \quad (3.13)$$

上式中 t 为参数,由式(3.11)和式(3.12)可以求得自由曲面的下一个离散点的坐标:

$$\begin{cases} x = x(i+1) = \frac{a \cdot x(i) + b \cdot z(i)}{a \cdot \cos \varphi(i+1) + b \cdot \sin \varphi(i+1)} \cdot \cos \varphi(i+1) \\ y = y(i+1) = \frac{a \cdot x(i) + b \cdot z(i)}{a \cdot \cos \varphi(i+1) + b \cdot \sin \varphi(i+1)} \cdot \sin \varphi(i+1) \end{cases} \quad (3.14)$$

在三维坐标系中自由曲面构建需要首先计算出一条初始线,它是整个自由曲面的起始曲线,然后由这条初始线上的每一个点作为起始点继续生成子曲线,这些子曲线共同构成整个自由曲面。然后将这些点的坐标导入到3D软件中可以拟合出最终的自由曲面模型。

3.3 灯具政策、法规及标准

3.3.1 国内外法规标准及现状

汽车灯具法规标准在国内外的主要标准体系有:我国的GB法规、美国的SAE标准和欧盟的ECE标准^[51]。目前我国使用的灯光标准、按照规定、灯具的环境适应性到机动车使用的光源,从最初的有选择的选用部分标准和标准的内容外,拆分和合并ECE法规制定我们的标准,到一一对应,全面系统的采用ECE的全部要求,以及全部灯具的相关法规。

目前,中国机动车灯具行业借助汽车工业飞速发展的机遇通过学习、引进、消化吸收和创新等不断提高灯具的研发设计能力、工艺制作水平及质量要求,已能同发达国家同步开发各种新型灯具。在导光条、LED的应用和AFS系统等方面,因为我国起步较早,在技术上基本达到国际先进水平。由国内技术专家和法规工作者独立编写的《汽车用LED前照灯》(GB 25991-2010)在ISO/TS 22/SC8会议上作了提案^[52]。目前,该提案还在协商中,但是独立的创新技术不多,在标准化方面,我国依然还是标准的使用者,我国的灯具法规主要依据ECE标准进行修订。

美国联邦机动车安全标准FMVSS对汽车灯光这类主动安全部件提出了具体

的技术要求,规定在美国所有车辆上的灯具必须通过 DOT 认证并且达到 FMVSS 571.108 标准要求^[53]。

欧盟 ECE 法规主要适用于欧盟汽车照明市场,但是它在汽车灯具产品型式认证制度上对其他的法规标准的认证体系产生了深刻的影响。国际上大部分的汽车灯具市场在其市场准入管理制度中常常参考借鉴或直接引用 ECE 法规。目前 ECE 共有 126 项法规,其中涉及灯具的 34 项。灯具 ECE 法规的内容更新较快,并不断的引入新技术、新方法,2015 年,3 项灯具 ECE 法规进行了修订^[2]。

3.3.2 倒车灯配光法规要求

我国根据实际道路情况,倒车灯法规的起草及制定主要参考了欧盟的 ECE R23 的相关规定,我国倒车灯标准采用的是 2007 年发布的《汽车及挂车倒车灯配光性能》(GB15235-2007)。法规中明确了倒车灯的配光性能及实际灯具测量要求,倒车灯的每个测试点的发光强度数值应该不小于图 3.5 中每个测试点对应的发光强度数值(单位:cd):

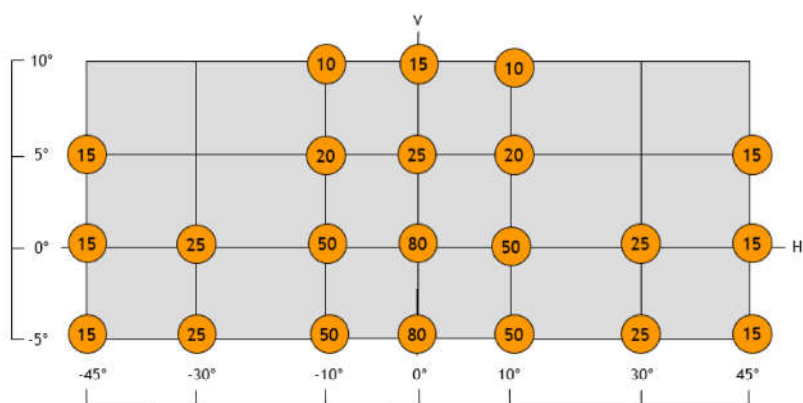


图 3.5 倒车灯配光性能分布范围

Figure 3.5 Distribution range of reversing lamp intensity

同时,还规定了在 H-H 水平面及其以上的相关测试点的发光强度不大于 300 cd,在 H-H 水平面以下至-5°测试点发光强度不大于 600 cd,-5°以下的配光区域发光强度数值不能超过 8000 cd。在图 3.5 中的所示配光范围中,探测器上的光型分布不能出现明显的局部变化,即在任何两个测量点之间发光强度大于或等于两个测量点中较低值的 50%。若车辆尾部安装了两只或者成对的倒车灯,在进行配光设计或者样灯测试过程中,法规对内侧 45°可视角发光强度没有要求^[54,55]。

而在 SAE 法规中,虽然每个测试点的发光强度数值同 ECE 和 GB 是一样的,但是 SAE 对倒车灯的配光性能的要求要高于 ECE 和 GB,当车辆安装两只相同倒车灯时,向内的水平方向的角度依然要求到 45° ,每个灯具的 30° 或者 45° 的值以平均值进行判断;车辆安装两只不同设计的倒车灯时,就要分别进行测试,数值相加必须满足图 3.1 最低要求的发光强度的二倍;车辆只安装一只倒车灯时,各个测试点的数值需是上图中要求的最低数值的两倍^[56]。

3.4 设计软件介绍

随着计算机语言的编程能力的提高,涌现出了许多光学设计软件,为车灯设计提供了极大的方便。光学工程师可以借助光学软件更快的设计出相应的光学元件,并通过加载对应的光学属性及光源文件进行快速的模拟及优化,使其设计的光学系统满足各个功能的光型分布及配光要求。在车灯前期设计过程中,最常用的包括三维软件 CATIA 及模拟软件 LucidShape 和 SPEOS 等

3.4.1 CATIA

CATIA 作为一个同行业中处于领先地位的软件提供 3D 设计和模拟解决方案,主要运用于汽车、航空航天及机械设计等领域。CATIA 强大的曲面造型能力及实体数据处理为车灯结构设计提供了极大的方便和灵活性,在早期的车灯设计中,光学软件除了模拟功能外,不具备光学元器件的设计能力,此时的光学设计主要在 CATIA 中实现,通过计算,然后在 CATIA 中进行曲面的模型创建,再导入到光学软件中进行模拟,所以 CATIA 软件在车灯设计领域占有了不可或缺的地位。

3.4.2 LucidShape

LucidShape 是全世界唯一且最先进的车用灯具光学 CAD 软件,是一款针对设计、模拟、分析以及制作报告上都具有强大功能的互动式工具。LucidShape 的研发成功给设计人员提供了方便,设计人员可以非常方便的利用该软件创建出所需的光学元件。LucidShape 具有非常广泛的应用,强大的模拟工具包含了光源、表面、材料及探测器。可以应用于智能照明 (AFS, ADB)、光导设计、快速可行性评估及有效率的模型设计等领域。除此之外, LucidShape 还提供了视觉化模组

及汽车照明系统在点亮和未点亮的两种情况下的仿真图像。视觉化模拟描述了所有在几何系统与光源之间的光学互动，同时也提供了设计过程中针对光学元件的分析并且评估人眼真实看见系统的状态。

3.4.3 SPEOS

SPEOS 作为一套无缝镶嵌于 CATIA 中的一款具有光学设计、模拟及分析的光学软件，主要运用于汽车整车和车灯前期设计过程中。SPEOS 具有高速的运算核心可以轻易的设计出几何结构并执行百万条光线追迹运算，该软件在车灯设计中通常会用到 LM (Light Molding)，VE (Visual Ergonomy) 和 OSD (Optical Surface Design) 模块，设计者可以很方便的切换到不同功能的模块。SPEOS 点亮效果最符合实际的结果，所以一般用的最多的为 VE 模块，用于仿真出如照片般真实的产品图像，从而在可以帮助设计人员在产品生产前了解光线分布及外形渲染效果。并可以量化出如亮度分布，对比度及色彩饱和等一系列技术数据，如图 3.6 所示：



图 3.6 VE 仿人眼模拟效果
Figure 3.6 Simulation result of VE

3.5 本章小结

本章主要介绍了非成像光学设计的理论基础，以及目前车灯设计中常用的自由曲面设计的理论分析。同时还阐述了汽车灯具政策、法规及标准国内外现状，对倒车灯配光法规要求作了详细的总结。最后对车灯设计过程中使用的软件 CATIA、LucidShape 和 SPEOS 作了简单的介绍。

第四章 倒车灯光学系统设计

4.1 尾灯常用的光学系统

汽车尾灯按照不同功能的划分,主要分为制动灯、后位置灯、倒车灯、后转向灯、后雾灯以及侧标志灯。在尾灯的设计过程中,首要的任务便是满足法规要求,在满足各功能法规要求的前提下,然后尽可能的优化光线传输效率及点亮效果,以达到均匀的点亮效果。尾灯中常采用的光学系统主要有直射式以及非直射式反射碗、光导、厚壁件等,不同的光学系统其效率及设计方法有所不同。

4.1.1 反射碗光学系统

反射碗是尾灯中最为常见的光学系统,通常以抛物面作为基面,再通过在其基面上设计不同形式的光学花纹,如图 4.1 所示。鱼眼花纹(Pillows)类型的光学面可以控制水平和垂直两个方向上的光线分布,而条状花纹(Stripes)只能控制水平或者垂直方向的光线分布。

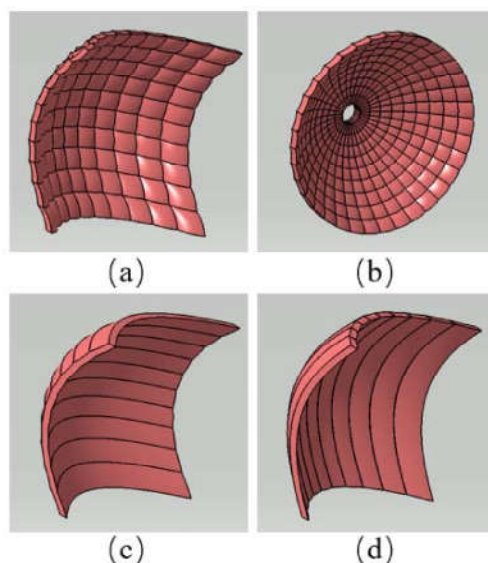


图 4.1 反射面花纹类型 (a) 矩形鱼眼 (b) 环状鱼眼 (c) 横条纹 (d) 竖条纹
Figure 4.1 Pillows or stripes of reflector (a) rectangle pillows (b) circle pillows (c) horizontal stripes (d) vertical stripes

其基本原理就是利用抛物面反射碗可将放置在反射碗焦点位置的光源发出的光线转化为平行光出射的光学性质,然后再通过调整控制抛物面上的光学花纹

的曲率、角度等，将光源发出的光线反射到指定的位置，从而得到预期的光型分布。光学系统输出的光通量与该系统的输入光通量的比值即表示光学系统的光效，可以用来评估光学系统的光学效率。反射碗的光学效率可以用立体角来进行估算，对于相同的反射面开口，焦距越小，反射碗的立体角越大，可以收集到的能量越多，则光学效率越高。但是，并非焦距越小越好，要综合各个方面的因素来选定焦距。对于光源为灯泡的反射碗，尾灯中的焦距通常为 20 mm。焦距越小，可能会出现散热问题。而对于光源为 LED 的反射碗，在满足反射碗能覆盖开口大小的前提下，焦距越小 LED 的位置越深。此时，虽然反射面立体角越大，但是光学面受到其他零件的遮挡也会越严重，这样也会影响到光效。

根据光源光轴的方向与实际光学系统的出光方向不同，可以将此类光学系统分为直射式反射碗和非直射式反射碗，其结构如图 4.2 所示。通常情况下，灯泡类型的系统通常采用直射式反射碗，而 LED 类型的系统则通常采用非直射式反射碗。

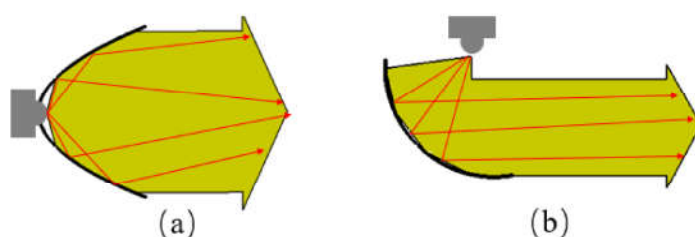


图 4.2 LED 反射式光学系统示意图 (a) 直射式 (b) 非直射式

Figure 4.2 Schematic diagram of LED reflective optical system (a) directional (b) in-directional

相对于直射式反射面，非直射式反射面通常具有更高的光学效率。因为直射式反射碗收集到的是相对于光源光轴方向边缘大角度的光，而非直射式反射碗收集到的是光轴角度附近的光能量。因此，非直射式反光面能收集到更多的光能量，另一方面，非直射式的反射碗没有灯泡孔，这也减少了光能量的损失。其次，从造型的角度来看，非直射式属于间接照明的形式，在外观上观察不到光源的安装位置，均匀的点亮效果使行人及驾驶员对灯具的视觉信号接受更为顺畅。

4.1.2 光导光学系统

随着 LED 在汽车灯具上的广泛应用，人们对尾灯的需求除了基本的信号功能外，开始重视起了车灯不同的样式带来的视觉冲击。再加上光学微结构注塑的

精确度大大提高,所以光导应运而生,被越来越多的汽车整车厂所青睐。光导通常运用于信号灯中,如汽车外部昼间行车灯,位置灯和内部氛围灯等功能。

光导是利用全反射原理将 LED 光源发出的光线从导光条的一端传输到另一端并且能够满足各功能的相关法规要求的光学器件。当光线从光密介质射向光疏介质且入射角不小于临界角时,光线就不会折射进入光疏介质而在两种介质的分界面反射回光密介质,使得光线在光密介质中继续传输。在传输过程中,利用光导表面的微小的齿状结构来破坏光的全反射,并控制光线沿特定的方向出射实现特定的光型分布^[41,42],基本几何模型如图 4.3 所示。



图 4.3 光导的几何模型
Figure 4.3 Geometry of light guide

对于光导设计来说,其最重要的就是将 LED 尽可能多的光线耦合进光导,提高光导的效率。所以一般 LED 出光面同光导入光截面的距离越近越好,但是这只是理想条件下的光源放置,在实际生产过程中,距离太小会划伤 LED,所以必须预留 1 mm 左右的安全距离。同时,除了 LED 直接入射到光导的方式外,还可以采取在 LED 的前方增加准直的光学器件以提高光线的耦合效率,常用的光学器件如菲涅尔透镜、全反射透镜等^[57],如图 4.4 所示。

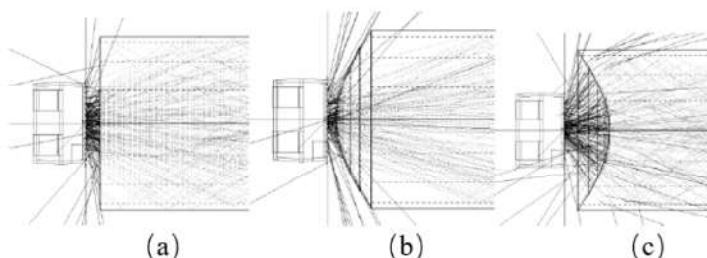


图 4.4 常用 LED 耦合方式 (a) 直接耦合 (b) 菲涅尔透镜 (c) 全反射
Figure 4.4 Coupling light methods of LED (a) direct coupling (b) Fresnel lens (c) TIR lens

对于光导的评估,除了满足功能的法规外,其最重要的就是光导在点亮状态下的均匀性评估。不同的材料对导光条具有很重要的影响,所以在选用材料时需

要选择光学级材料,同时还可以通过调整不同光导齿之间的距离及光线偏折角度来优化光导使其均匀性达到评估标准。

4.1.3 厚壁件光学系统

厚壁件是利用折射和全反射的光学原理来进行光线传输,常用的结构是准直器 Collimator 和表面的光学花纹。Collimator 主要用于收集和准直光线,通过折射或全反射将发散的光线会聚到出光面,然后再通过出光面上的光学花纹完成配光,其基本原理和反射面加灯壳花纹一致,如图 4.5 所示。

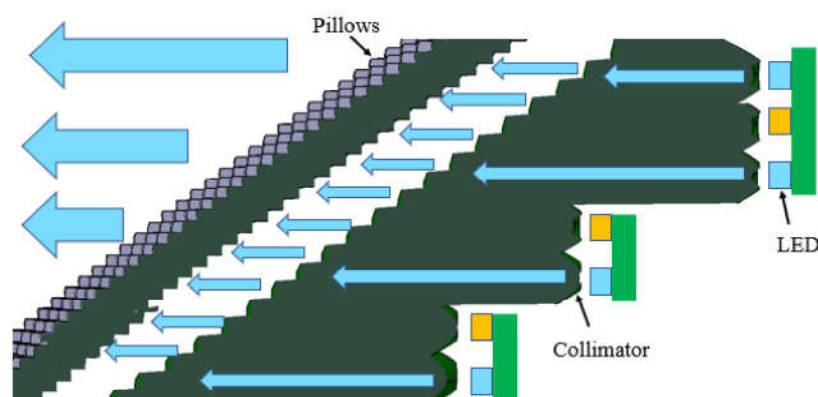


图 4.5 厚壁件设计示意图

Figure 4.5 Schematic diagram of thick wall

同光导一样,厚壁件也主要用于汽车昼间行车灯、位置灯等功能。但是厚壁件的光源可以随着造型的趋势按照一定的间距进行布置,不同于光导的光源只能放置于导光条的两端;其次,厚壁件的光学效率高于光导的光线传输效率,一般的效率约为 25%到 30%^[58,59]。因为放置的 LED 颗粒比较多,所以每颗 LED 的功率比较低,使得光学系统的散热性能更好,且 LED 的发光效率受温度的影响较小。而且厚壁件对形状的要求更低,同一个厚壁件可以实现多种功能的切换,如常用的前位置灯和转向都是共用光学系统。但是,厚壁件也有不足的地方,如需要更多数量的 LED 颗粒,更多的材料需求且没有光导的均匀性好等。

4.2 倒车灯光学系统设计

该辅助倒车灯系统由两部分组成,左侧部分为投影倒车辅助系统,起到警示作用;右侧部分作为常规倒车灯,如下图 4.6 所示。左灯具有信号指示作用的箭

头通过光学透镜投影到地面，给道路上的行人及驾驶员提供倒车信号的警示作用，增加了道路使用者之间相互交流。右侧部分作为正常功能使用的汽车倒车灯功能，其光型分布可以满足国家法规 GB15235-2007 对于机动车的倒车灯配光要求。

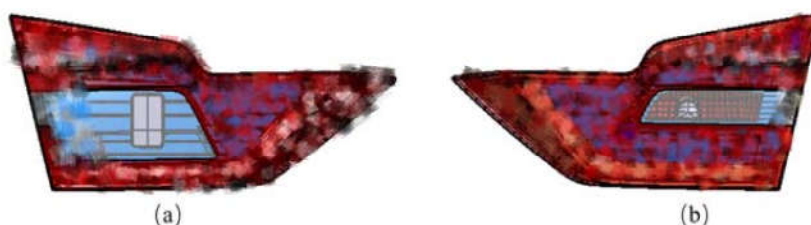


图 4.6 光学系统组成示意图 (a) 辅助系统 (b) 倒车灯

Figure 4.6 Schematic diagram of optical system (a) auxiliary system (b) reversing lamp

左灯在保留原有基本造型结构不变外，重新进行的光学设计。之前的倒车灯为双侧倒车灯，根据法规 GB15235-2007 中的规定，当汽车配备两只倒车灯时，倒车灯的内侧的发光强度只需要满足内侧 30° 的要求，而当汽车只配备一只倒车灯时，发光强度必须满足内侧 45° ，所以右侧倒车灯需要进行重新设计以满足内侧 45° 的发光强度要求^[54]。首先，对右侧倒车灯部分进行设计。倒车灯主要由灯壳、光源及反射面组成，除此之外还包括具有装饰作用的饰板及支撑作用的灯体等零件。

4.2.1 光源的选择

在倒车灯的设计中，因为该功能没有遮光罩且具有足够大的出光面积，很容易就可以满足倒车灯对于探测面上的光通量的要求。所以本设计采用的光通量较低的 W16W 卤素灯泡就可以实现设计要求，W16W 为白色光源，其标准灯泡在电压为 13.5V 的情况下光通量为 $310 (1 \pm 20\%) \text{ lm}$ ，最大功率为 21.35 W。它的发光特性及出射光色度满足欧盟 ECE 要求，该灯泡的基本尺寸如图 4.7 所示^[60]。

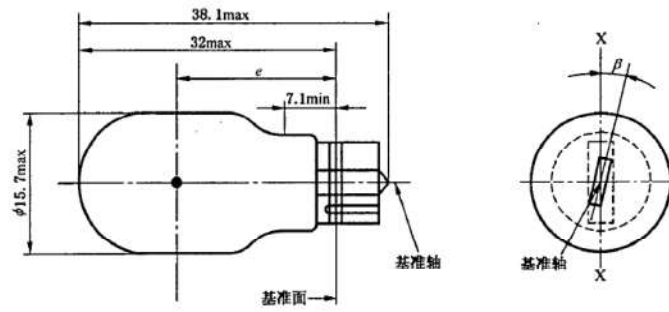


图 4.7 W16W 灯泡主要几何尺寸

Figure 4.7 Geometry dimensions of W16W bulb

e 表示为灯泡光源中心与基准面之间的距离，对于生产过程中的非标准灯泡，大小为 $20.6 \pm 1.3 \text{ mm}$ 。针对于该系列的标准灯泡，其尺寸控制会更加严格，标准灯泡其大小为 $20.6 \pm 0.3 \text{ mm}$ 。 β 表示横向偏差量，也就是指灯丝中心与两个互相垂直的平面的最大横向偏差，这两个平面都通过基准轴，其中一个平面还通过 X-X 轴，标准灯泡 β 的大小必须控制在 5° 的范围之内，非标准灯泡需控制在 15° 的范围内^[60]。

在没有任何光学器件的情况下，将测量的 W16W 光源的 Ray File 文件在 LucidShape 中进行模拟，模拟光线数为 300M。模拟结果显示 W16W 光通量为 325 lm，满足国标中对该光源的光通量的要求，如图 4.8 所示。

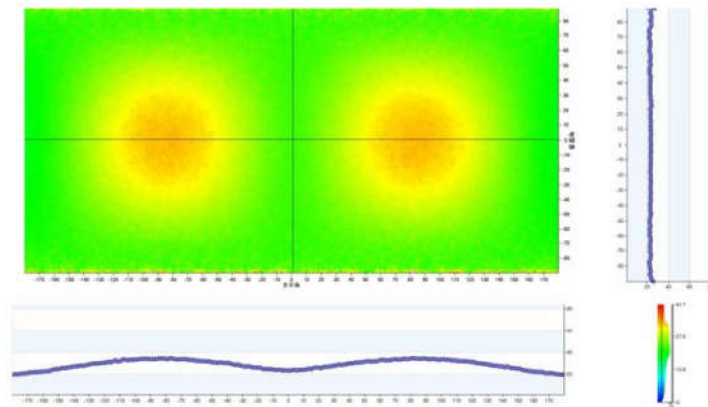


图 4.8 W16W Ray File 文件模拟结果

Figure 4.8 Simulation result of W16W bulb ray file

4.2.2 反射面的设计

倒车灯作为既可以为他人提示倒车的信号,也可以为本车驾驶员提供照明的作用的双重功能灯具。在倒车灯设计中,必须保证足够的能量,即在探测器上有最小的光通量要求,对于单灯来讲,探测器上的光通量必须不小于 32.9 lm ,其发光面的面积至少为 3200 mm^2 才可以满足最小光通量要求。因此,在设计前期,就需要进行发光面面积的检查。将倒车灯可用的反射面的轮廓投影到垂直于 X 轴的平面上,测量出有效面积为 5421.1 mm^2 ,在最小发光面积上是可以满足倒车灯最小设计面积要求。

汽车灯具设计及模拟主要借助 LucidShape 软件中的 FunGeo 模块进行设计分析。反射面是在抛物面的基础上根据自由曲面剪切法进行建立的。但是,在设计时,在考虑光学效率的同时还需要考虑到实际产品的散热问题。当焦距越小,会导致灯体内部的温度越高,甚至会超过光学元件材料的耐热极限。所以在考虑光学效率和材料耐热极限的同时,将反射面的焦距设置为 $F=20\text{ mm}$ 。整个反射面由尺寸为 $5\times 5\text{ mm}$ 的“鱼眼花纹”组成,在距离光源中心 3.16 m 处建立收集发光强度的探测器。

首先,需要将所有参与光学模拟的零件从 CATIA 导入到 LucidShape 中。在导入时,必须先建立一个全局坐标,它使数据在两个软件中间具有相同的位置关系。当光学系统为单一光源时,全局坐标和光源中心坐标保持一致;但是当系统为多光源时,如 LED 灯具,需要建立额外的光源中心坐标。将光学元件按照全局坐标轴导入到 LucidShape 中,并设置零件相应的光学属性如表 4.1 所示:

表 4.1 光学属性设置
Table 4.1 Optical parameter setting

光学元件	光学属性
灯壳	PMMA
饰板	镀铝(吸收)
反射镜	镀铝(反射)

通过 LucidShape 建立的反射面如图 4.9 所示:

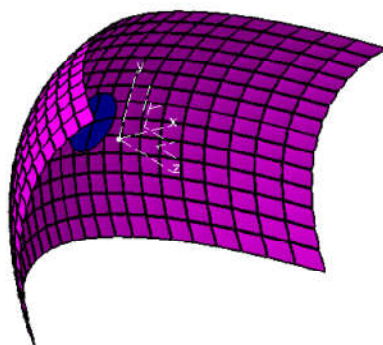


图 4.9 反射面的创建
Figure 4.9 Reflector create

4.2.3 灯壳花纹的设计

汽车尾灯各功能的设计中，除了利用反射面的花纹来控制光线的分布，还可以通过在灯壳或者内套上面设计特定的花纹来改变光线在水平方向和垂直方向上的分布。在灯壳上面设计花纹不仅可以完成中心区域的配光分布，也是解决可视角问题的有效方法，同时还在满足造型的基础上挡住灯腔内部结构的要求，使得到更好的点亮效果。常见的花纹结构如下图 4.10 所示。

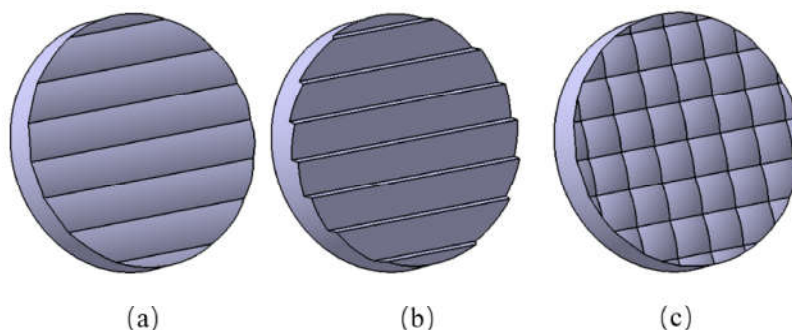


图 4.10 常见灯壳花纹类型 (a) 条状花纹 (b) 齿状花纹 (c) 鱼眼花纹
Figure 4.10 Stripe type of outer lens (a) stripes (b) step stripes (c) pillows

为了验证各种类型花纹的有效性，下面将对光线路径进行推导，然后再建立出相应的 3D 模型，最后在 LucidShape 软件中进行模拟验证。

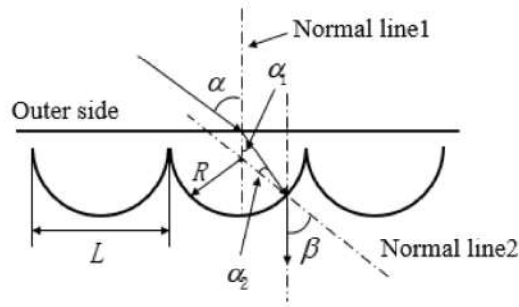


图 4.11 条状花纹原理示意图

Figure 4.11 Schematic diagram of stripe principle

为了便于分析和研究，假设灯壳的外表面为规则的平面，且入射光线为平行光。根据光路可逆原理，把光线看作是从灯壳外表面入射，在经过两次折射后出射光变成平行光。条状花纹原理示意图如图 4.11 所示，花纹的半径为 R ，花纹之间的间隔为 L ，第一次折射的入射角和折射角分别为 α 、 α_1 ，第二次折射的入射角和出射角分别为 α_2 、 β ，灯壳的折射率为 n 。

当光线入射到灯壳外表面时，经过第一次折射，由折射定律可以得到：

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \alpha_1 \quad (4.1)$$

所以

$$\sin \alpha_1 = \frac{1}{n} \sin \alpha \quad (4.2)$$

当光线发生第二次折射

$$n \cdot \sin \alpha_2 = \sin \beta \quad (4.3)$$

又因为

$$\alpha_2 = \beta - \alpha_1 \quad (4.4)$$

带入到式 (4.2) 可以得到

$$n \cdot \sin(\beta - \alpha_1) = \sin \beta \quad (4.5)$$

$$\sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1 = 1 \quad (4.6)$$

所以将式 (4.2)，(4.6) 代入到式 (4.5) 中进行化简

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - 1} \quad (4.7)$$

为了便于计算,假设光线在灯壳内部传输距离为 $L/2$, 所以可以得到 $\tan \beta$ 的另一个表达式, 即

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{R^2 - (\frac{L}{2})^2}}{\frac{L}{2}} \quad (4.8)$$

根据式 (4.7) 和 (4.8) 可以得到花纹曲率半径的表达式:

$$R = \frac{L \cdot \sqrt{n^2 - 2\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + 1}}{2 \sin \alpha} \quad (4.9)$$

在设计时,根据花纹扩散角度就可以计算出花纹的曲率半径,曲率半径越小,光线偏转角越大;反之花纹的曲率半径越大,光线偏转角就越小。除了条状花纹之外,在解决可视角问题时还会用到齿状的花纹,齿状花纹光线折射过程同条状花纹光线折射过程一致,也是通过两次折射过程。但是,需要计算出折射齿状花纹的高度,如图 4.12 所示。

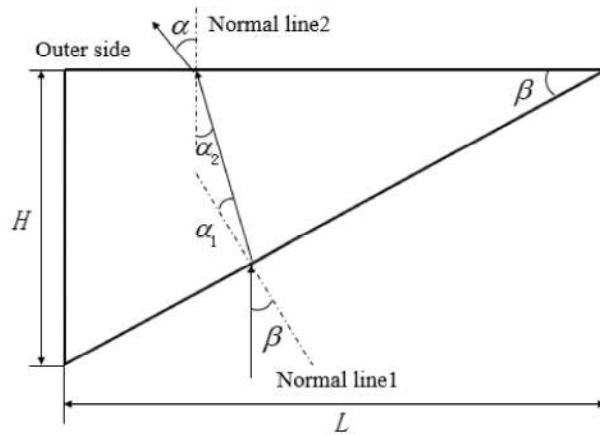


图 4.12 齿状花纹原理示意图

Figure 4.12 Schematic diagram of step stripe

齿状花纹也是通过两次折射将光线偏折到一定的角度,推导过程同式 (4.1~4.8) 一致,最后可以得到齿状花纹的高度 H 同扩散角度 α 及花纹间隔 L 之间的关系为:

$$H = \frac{L \cdot \sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - 1} \quad (4.10)$$

为了验证公式推导的正确性,将在 CATIA 中建立相应的花纹模型。首先,需要算出条状花纹的曲率半径 R 和齿状花纹的高度 H ,假设 $L = 3 \text{ mm}$,扩散角度 $\alpha = 8^\circ$,灯壳材料选用 PMMA,根据式 (4.9) 和式 (4.10) 得到曲率半径和高度分别为 $R = 5.45 \text{ mm}$ 、 $H = 0.86 \text{ mm}$ 。

表 4.2 花纹参数设置
Table 4.2 parameter setting

折射率 n	花纹间隔 L	扩散角度 α	曲率半径 R	齿高度 H
1.492	3 mm	8°	5.45 mm	0.86 mm

在 CATIA 中建立模型,然后建立好的 3D 模型导入到 LucidShape 中进行光线追迹。建立 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的矩形面光源置于坐标原点位置处,且将出光方式设置为平行光。建立发光强度探测器的水平方向和垂直方向的大小尺寸分别为 $H(-15,15)$ 、 $V(-15,15)$,采用蒙特卡罗方法进行追迹,模拟结果如图 4.13 所示。

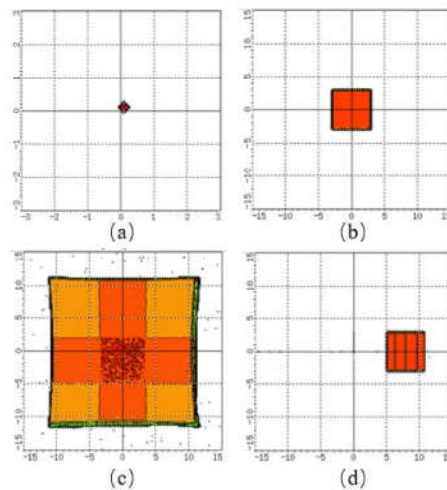


图 4.13 模拟结果 (a) 探测器位于无限远无花纹 (b) 探测器位于有限远无花纹
(c) 鱼眼花纹 (d) 齿状花纹

Figure 4.13 simulation result (a) no stripe with infinite far field detector (b) no stripe with finite near field detector (c) pillows (d) step stripe

在图 4.13 (a) 中,探测器位于无限远处,光源出射光为平行光,所以使得探测器上的光斑全部集中在小角度范围。为了使得模拟结果便于观察,将探测器

移动到距离光源 $L = 200 \text{ mm}$ 的位置, 此时灯丝不能近似为点光源, 灯丝在探测器上形成水平和垂直方向都是 3° 的像, 如图 4.13 (b) 所示; 图 4.13 (c) 和 (d) 分别表示光源通过鱼眼花纹和齿状花纹之后形成的光型, 鱼眼花纹将光型在水平和垂直方向扩散了 8° , 而齿状花纹只在水平方向扩散 8° , 模拟结果同公式推导过程保持一致。灯壳上面的花纹必须同反射面上的花纹相互配合以提高光学系统整体的效率。同反射面花纹一样, 鱼眼花纹可以控制水平和垂直方向的光型分布, 横条花纹和竖条花纹则分别只能控制垂直方向和水平方向的光型分布, 而齿状花纹是用来解决可视角的问题的最有效的方法之一。

在倒车灯的设计中, 为了提高光学系统效率并保证后组合灯整体的造型美观, 在灯壳内侧设计横条花纹。花纹之间的间隔为 $L = 3 \text{ mm}$, 垂直方向扩散角度 $\alpha = 5^\circ$, 所以根据式 (4.9) 计算得到花纹的曲率半径 $R = 8.56 \text{ mm}$, 利用 CATIA 中“扫描”命令设计完成后灯壳如下图 4.14 所示。

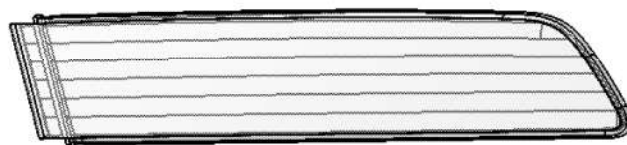


图 4.14 灯壳横条花纹

Figure 4.14 Horizontal stripe of outer lens

4.2.4 倒车灯系统模拟及优化

优化过程中, 主要是通过优化自由曲面反射面中水平方向及垂直方向的扩散角, 从而实现预期的光型分布。例如在 Spread 的默认设置中, 采取均匀扩散的方式, 即水平方向的扩散角为 $\pm 20^\circ$, 垂直方向的扩散角为 $\pm 13^\circ$, 进行光线追迹后, 光型分布和各法规测试点数值值如下图 4.15、4.16 所示:

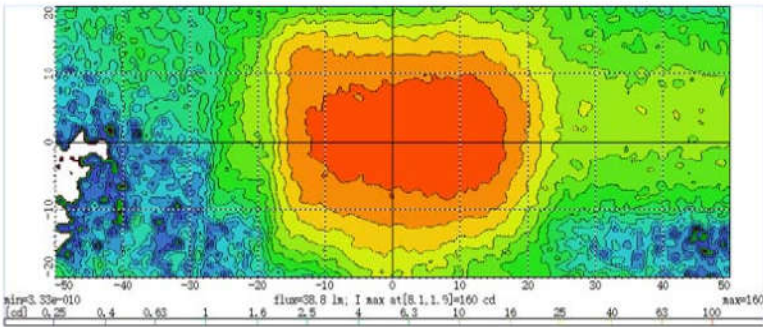


图 4.15 水平 $\pm 20^\circ$ ，竖直 13° 光型分布

Figure 4.15 Light distribution of horizontal $\pm 20^\circ$ and vertical $\pm 13^\circ$

[deg] I-45.0 I-30.0 I-10.0 I0.000 I 10.0 I 30.0 I 45.0 I									
I	I	I	300 I	300 I	300 I	I	I	I	I
10.0 I	I	I	90 I	90 I	97 I	I	I	I	I
I	I	I	10 I	15 I	10 I	I	I	I	I
I	300 I	I	300 I	300 I	300 I	I	300 I	I	I
5.0 I	1.27 I	I	108 I	129 I	137 I	I	25 I	I	I
I	15 I	I	20 I	25 I	20 I	I	15 I	I	I
I	300 I	300 I	300 I	300 I	300 I	300 I	300 I	I	I
0.0 I	0.18 I	1.8 I	122 I	135 I	152 I	20 I	17 I	I	I
I	15 I	25 I	50 I	80 I	50 I	25 I	15 I	I	I
I	600 I	600 I	600 I	600 I	600 I	600 I	600 I	I	I
-5.0 I	0.23 I	1.27 I	100 I	122 I	132 I	13 I	13 I	I	I
I	15 I	25 I	50 I	80 I	50 I	25 I	15 I	I	I

name	value OK [cd]	min [cd]	max [cd]	test pos./area H, H/V, V [deg]	found pos. [deg]
above H	158.5 OK	--	300.0	-90.0, 0.0 : 90.0, 90.0	8.0, 2.0
H-SD	154.2 OK	--	600.0	-90.0, -5.0 : 90.0, 0.0	8.8, 0.0
below 5 deg.	134.5 OK	--	8000.0	-90.0, -90.0 : 90.0, -5.0	9.6, -5.0

The light distribution is NOT OK

图 4.16 倒车灯法规检查

Figure 4.16 Regulation check of reversing lamp

此时的光型呈现出强光区光型不集中，而可视角区域光强不足的问题，均匀扩散角度使得光型能量不足且效率低下，无法满足倒车灯法规对于内外侧 45° 必须不小于 15 cd 的发光强度要求，如上图右侧红色标记均小于法规要求最低值。所以在设计时，必须合理划分区域，分别调整反射面的扩散角度，各个区域反射面相互配合，在光源一定的能量情况下提高配光效率，得到满足倒车灯法规的光型分布。在强光区域处，减小反射面的扩散角度，使得中间光型更加会聚；在可视角设计时，特别是倒车灯对于内外侧 45° 的发光强度要求较高时，利用局部反射面进行翻面打光。

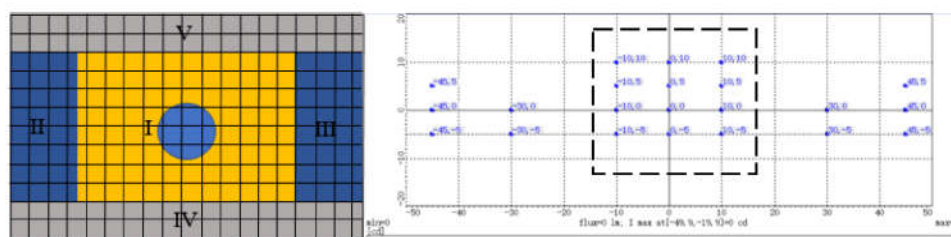


图 4.17 反射面区域划分

Figure 4.17 Regional division of Reflector

灯泡光源 60% 的能量都分布在图 4.17 中区域 I，通过调整扩散角将这一部分的光线集中探测器的强光区域，在水平方向 $\pm 10^\circ$ ，垂直方向 $\pm 5^\circ$ 的区域内，为了保证生产过程中的一定的加工及灯泡安装过程中的位置误差，必须留有一定的预留空间，所以将其中的少部分反射面将扩散角设置为水平方向 $\pm 13^\circ$ ，垂直方向 $\pm 8^\circ$ ，预留出 2° 到 3° 的范围；同时强光区域反射面还需要整体具有比较宽的光型分布，选择部分反射面将光型扩散到内外侧 30° ，使其具有足够的发光强度。区域 II 主要负责倒车灯外侧 45° 的光强分布，通过将该区域的反射面进行翻面打光，使光线偏折到外侧 45° ，在翻转的同时还需要兼顾外侧 30° 到 45° 范围内的光强分布，水平方向的扩散角设置为 $(-30^\circ, -48^\circ)$ ，垂直方向扩散角均匀扩散为 $(-8^\circ, +8^\circ)$ ，保证 3° 的设计余量。同理，区域 III 的水平扩散角设置为 $(30^\circ, 48^\circ)$ ，竖直扩散角度为 $(-8^\circ, +8^\circ)$ 。区域 IV 位于反射面下方位置，在灯体下方会有侧墙，会导致向下扩散的光线损失，造成能量的浪费。所以这一区域的光线主要向上方打光，垂直扩散角度可以设置为 $(-1^\circ, +7^\circ)$ ，而水平方向扩散角可以根据具体情况起到补充其他区域的光强分布。同理，区域 V 为了避免上方侧墙造成的光能量损失，垂直扩散角度设置为 $(-7^\circ, 1^\circ)$ 。

以上的反射面区域划分是最基本的设计优化思路。在实际应用时，汽车灯具造型各异，不同的灯体具有不同的结构，所以还需要具体的灯具进行分析。借助软件的模拟，可以快速的知道参数设置后的光型分布情况，再根据光型的分布及法规的要求进行优化。通过不断的修改参数，不断的模拟，最终可以达到比较完美且满足法规的光型分布。通过将设计的反射面导出到 CATIA 中进行数据处理，将多余的部分裁切掉，同灯体缝合，同时还需要考虑到拔模方向等加工过程中的因素。然后再将所有参与模拟的元器件导入到 LucidShape 进行最终的模拟及确

认，如图 4.18、4.19 所示。

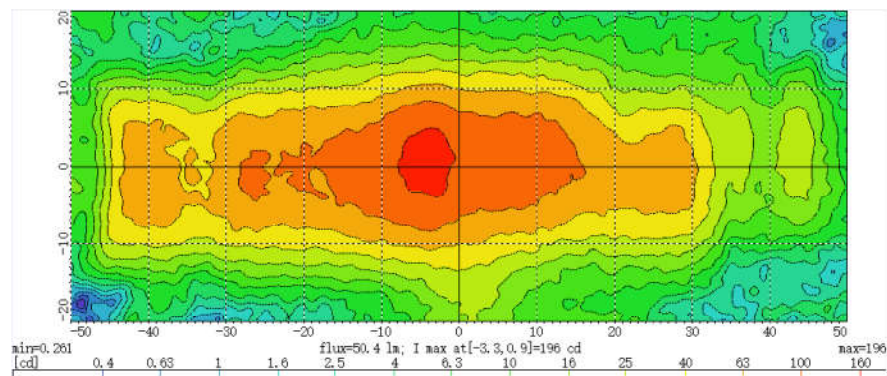


图 4.18 优化后模拟结果

Figure 4.18 Simulation result of optimization

Regulation :
backup lamp: GB15235

[deg]	I-45.0	I-30.0	I-10.0	I0.000	I10.0	I30.0	I45.0	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I
10.0	I	I	I	53	63	55	I	I
I	I	I	I	10	15	10	I	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	300	I	I	300	300	300	I	300
5.0	I	39	I	I	115	121	I	116
I	15	I	I	20	I	25	I	20
I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	300	I	300	I	300	I	300	I
0.0	I	35	I	81	I	149	I	150
I	15	I	25	I	50	I	80	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	600	I	600	I	600	I	600	I
-5.0	I	41	I	77	I	124	I	118
I	15	I	25	I	50	I	80	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I

name	value OK [cd]	min [cd]	max [cd]	test pos./area H, H/V, V [deg]	found pos. [deg]
above H	196.0 OK	--	300.0	-90.0, 0.0 : 90.0, 90.0	-3.2, 1.0
H-5D	186.4 OK	--	600.0	-90.0, -5.0 : 90.0, 0.0	-4.8, -1.8
below 5 deg.	147.9 OK	--	8000.0	-90.0, -90.0 : 90.0, -5.0	-4.4, -5.0

The light distribution is OK

图 4.19 倒车灯法规检查

Figure 4.19 Regulation check of Reversing lamp

模拟结果探测器上光通量 50.4 lm，最大发光强度 196 cd。满足倒车灯 GB15235-2007 法规要求，且同时满足生产工艺上的预留量要求，即下限应不低于 GB 法规的 1.3 倍。

针对于倒车灯设计，其光型必须满足一定的路面照度及规定探测器的光通量的要求：即水平 50L-50R 和垂直方向上 15U-90D 的范围内的探测器上，倒车灯的光通量必须不小于 100 lm；同时还需要在距离汽车尾部水平方向 3 m 和 6 m 的

位置处垂直方向上 $\pm 1.5\text{ m}$ 及 0 m 的测试点的路面照度值不小于 3 lx ，以保证在路面上具有足够大的范围能起到照明及提醒后方车辆或行人的目的；另外还需要满足大于 3 lx 的范围规定，在水平方向上大于 3 lx 的光型长度要大于 12 m ，在离汽车尾端 5 m 的垂直方向大于 3 lx 的光型宽度必须不小于 8 m 。

将模拟的光照度曲线分布导入到 LucidShape 路照分析模块中，根据具体的整车的尺寸设置汽车轴向宽度及纵向长度；灯具的高度设置为 0.85 m ；然后在路面上照度分布曲线如下图 4.20 所示。

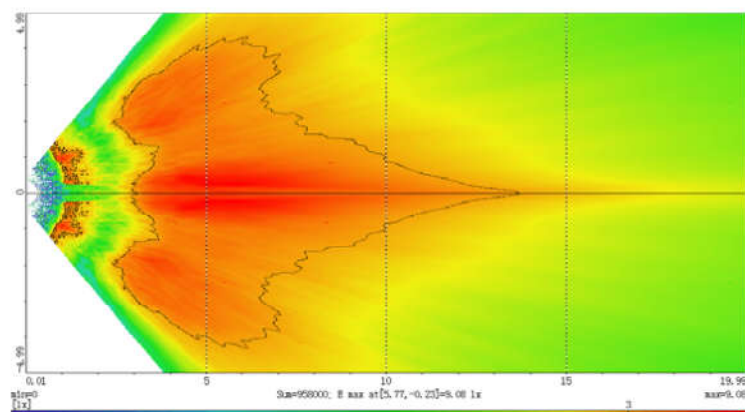


图 4.20 倒车灯路照分布

Figure 4.20 Road scene illumination of reversing lamp

通过点及区域的测量可知，模拟结果完全可以满足上述照度要求，如下表所示：

表 4.3 倒车灯路照要求

Figure 4.3 Road scene illumination check of reversing lamp

测试点	x	y	目标值	测量值
光通量	(50L-50R, 15U-90D)		100 lm	100.2 lm
A	6	-1.5	3 lx	3.819 lx
B	6	0	3 lx	6.377 lx
C	6	1.5	3 lx	3.819 lx
D	3	-1.5	3 lx	3.212 lx
E	3	1.5	3 lx	3.212 lx
大于 3 lx 长度	-	0	12 m	13.8 m
大于 3 lx 宽度	5	-	8 m	8.2 m

4.3 倒车辅助投影系统设计

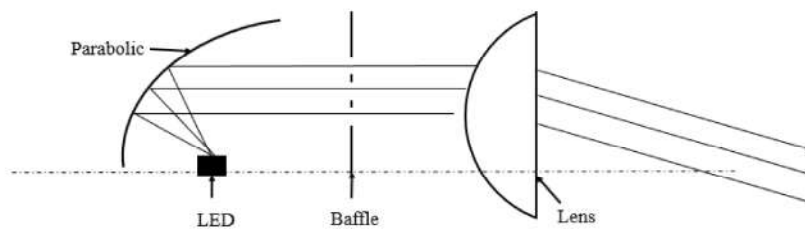


图 4.21 投影系统示意图

Figure 4.21 Schematic diagram of projection system

倒车辅助投影系统主要由四部分组成，如图 4.21 所示。它们分别为抛物式反射面、LED 光源、挡板及光学透镜组成。设计主要从以下几方面进行：

4.3.1 LED 光源选择

在汽车灯具设计及制造中，光源无疑是最重要的器件。汽车前后方的各个功能的光色在 GB4785-2007 中规定“前不见红，后不见白”，倒车灯除外，汽车后方光色只能红色、白色和黄色^[16]。而投影灯作为一种具有交互式功能的灯具，其“显著性”至关重要，本课题选用了黄光 Luxeon F Plus PC Amber LED 颗粒作为投影系统光源，其物理尺寸如图 4.22 所示。

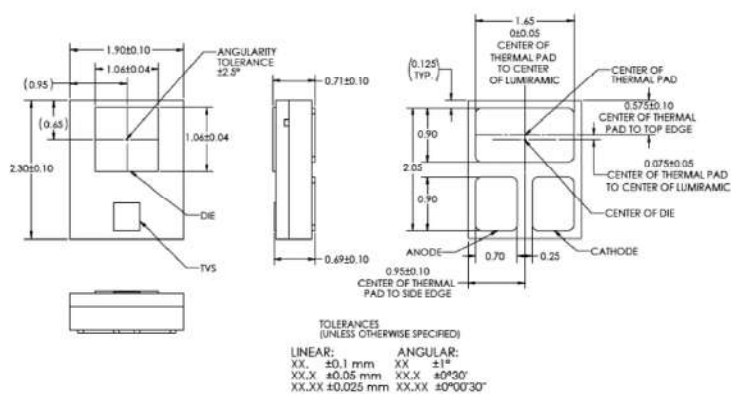


图 4.22 Luxeon F 几何尺寸

Figure 4.22 Geometry size of Luxeon F

Luxeon F 由 Limileds 专门为汽车照明提供的一种高功率的黄光及热稳定性的 LED，该 LED 其发光角度为 120°，可以满足 SAE 和 ECE 的法规色度要求和 AEC-Q101 生产标准。

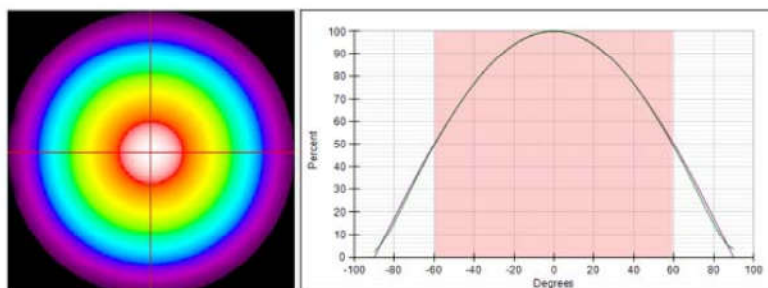


图 4.23 Luxeon F 发光角度
Figure 4.23 Light emitting angle of Luxeon F

下表 Luxeon F Plus PC Amber 型号 LED 的电学参数,在设计时应该特别注意。

表 4.4 Luxeon F Plus PC Amber 电学性能
Table 4.4 Electrical performance of Luxeon F Plus PC amber

参数	性能
直流前端电流范围	50 mA~1000 mA
最大节点温度	135 °C
测试电流下的操作温度	-40 °C~125 °C
最大电流下的操作温度	-40 °C~125 °C

散热一直是降低 LED 发光效率的重要原因,随着 LED 周围温度增加,LED 发光效率急速下降, Luxeon F 光学性能输出随温度的变化如图 4.24 所示。

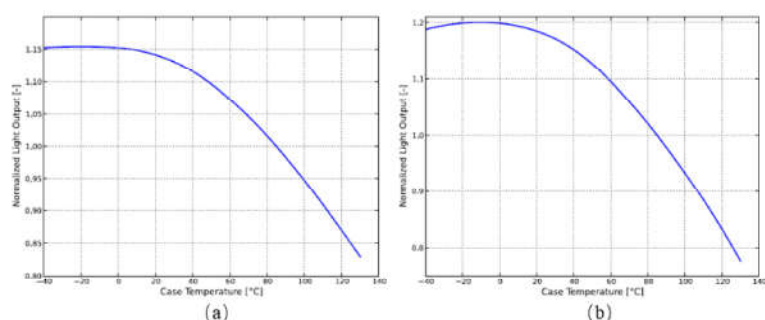


图 4.24 发光效率随着温度的变化 (a) 20 ms MP, 350 mA (b) 20 ms MP, 1000 mA^[61]
Figure 4.24 Light emitting efficiency changes with temperature (a) 20 ms MP, 350 mA (b) 20 ms MP, 1000 mA^[61]

在 350 mA 和 1000 mA 时,发光效率基本保持一致,且随着温度逐渐大于 80 °C时,LED 的发光效率急速下降,导致 LED 的输出光通量受到严重的影响,

所以在设计前期一定要全面考虑到光学系统的散热情况，温度越低的情况下，能利用到的光能越多，光学系统的效率也就越高。

4.3.2 抛物面反射面设计

基于 3D 模型现有几何空间，采用非直射抛物面将光线进行准直，其母线是二次曲面抛物线。抛物线的定义表示为动点到定点和定直线的距离相等的轨迹。定点和定直线分别表示焦点、准线，标准方程如下所示^[62]：

$$\sqrt{x^2 + \left(y - \frac{1}{4a}\right)^2} = \left|y + \frac{1}{4a}\right| \quad (4.11)$$

将式 (4.11) 进行化简可以得到

$$y = ax^2 \quad (a > 0) \quad (4.12)$$

式中 (x, y) 表示抛物线上任一动点的轨迹坐标， a 则是一正常数，表示为交点到准线的距离，在标准抛物线方程中，焦点可以用 $F(0, \frac{1}{4a})$ 表示，准线方程为

$y = -\frac{1}{4a}$ 。抛物线可以将光线进行准直，即经焦点的光线经过抛物面反射后的光线平行于光轴^[63]，使得抛物面广泛应用于各种探照灯及汽车灯具上。

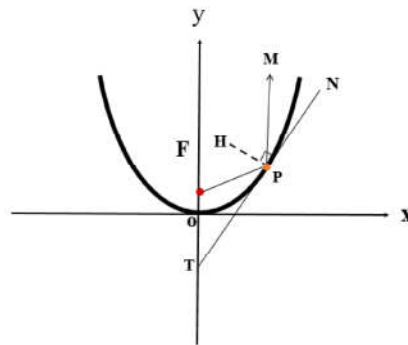


图 4.25 出射光平行性质

Figure 4.25 Parallel properties of emitting light

为了证明出射光平行于光轴的性质，假设抛物线上某点 $P(x_0, y_0)$ ， PT 表示抛物线在 P 点处的切线，且 $PH \perp PT$ ，则根据抛物线的定义可知：

$$|PF| = y_0 + \frac{1}{4a} \quad (4.13)$$

抛物线的导数方程为：

$$y' = 2ax \quad (4.14)$$

所以切线 TN 的斜率为 $2ax_0$ ，那么直线 TN 的表达式：

$$y - y_0 = 2 \cdot a \cdot x_0 (x - x_0) \quad (4.15)$$

另 $x = 0$ 时， T 的坐标 $(0, -y_0)$ ，所以

$$|FT| = |PT| = y_0 + \frac{1}{4a} \quad (4.16)$$

可以得到 $\angle FTP = \angle FPT$ ，同时根据反射定律可以知道 $\angle FPH = \angle MPH$ ，最终得到 $\angle FTP = \angle MPN$ ，即 $MP \parallel y$ 轴得证。

将母线抛物线沿光轴旋转 180° 就可以得到我们需要的抛物面反射面，所以抛物面也具有和抛物线同样的光学性质。由于 LED 为朗伯发光体且尺寸通反射面相比可以近似于点光源，所以将 LED 放置在抛物面的焦点位置处，其出光方向垂直于光轴方向，生成的曲面如下图 4.26 所示。

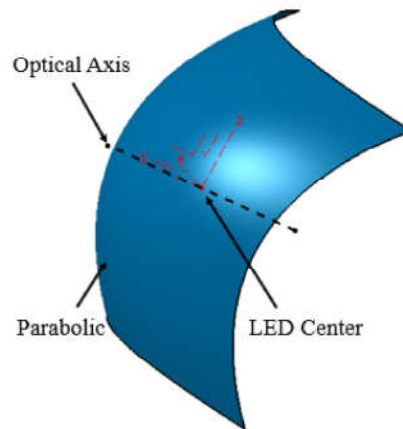


图 4.26 抛物面反射镜
Figure 4.26 Parabolic reflector

在模拟过程中，将反射面的材料设置为 PMMA，并在实际发生反射的光学表面进行电镀处理，电镀之后的反射率大概为 80%，以使得可以利用到更多的光

线，而在实际加工中所选用的材料及表面处理也要和设计状态保持一致。

4.3.3 挡板设计

挡板的作用就是将抛物面反射的平行光学遮挡成想要的光型，然后光线通过透镜成像在地面上。而使用的符号必须简单易懂，所以本设计采用的光型是相对简单箭头形状。设计挡板时，最重要的就是挡板上箭头的大小尺寸以及孔径之间的相互间隔。根据设计要求，设计的模型如下图 4.27 所示。

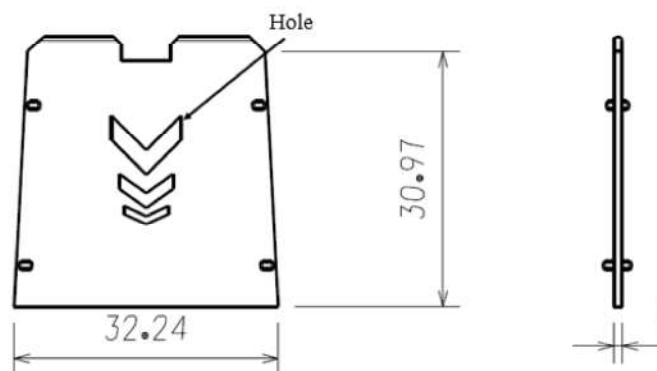


图 4.27 挡板模型及其几何尺寸
Figure 4.27 Geometry size of baffle

在挡板的正反两面各加上 4 个锚点，在组装时用来固定挡板。在加工时也有可能出现一定的误差，所以也可以根据测量的误差，用砂纸打磨锚点来前后移动挡板的位置，确保与设计位置保持一致。另外，还需要在挡板的非出光区域涂上黑漆，用来避免光线经过多次反射后造成的杂散光。

4.3.4 光学透镜设计

在非成像光学中主要是对有限的能量进行重新分配从而得到预期的光型分布，所以一般的光学透镜设计方法也主要是根据能量守恒及折、反射定律进行设计。本设计采用旋转对称的非球面透镜，即能够用含有高次系数多项式来表示特定的透镜面形，其中心到边缘的曲率半径连续发生变化。根据偶次项非球面方程创建透镜^[64]：

$$f(h) = \frac{h^2}{R + \sqrt{R^2 - (1 + k)^2}} + C_4 h^4 + C_6 h^6 + \cdots + C_{16} h^{16} \quad (4.17)$$

其中 k 表示锥面度, 当 $k < -1$ 时, 为双曲面; 当 $k = -1$ 时, 为抛物面; 当 $k = 0$ 时, 为球面。 R 表示曲率半径, $C_4, C_6 \cdots C_{16}$ 表示非球面透镜的系数。为了方便快速起见, 在 LucidShape 中来建立透镜的 3D 模型, 将设计需要的参数输入到软件中, 各个参数如下表 4.5 所示

表 4.5 透镜参数输入
Table 4.5 Input parameter of lens

Lens	Radius	Focal length	Conic	Thickness	$C_4 \sim C_{16}$	Focal position
1	20 mm	50 mm	-1	1	0	(0,8.2,-52.5)
2	20 mm	50 mm	-1	1	0	(0,8.2,47.5)

透镜材料设置为 PMMA, 其模型为如下图 4.28 所示。

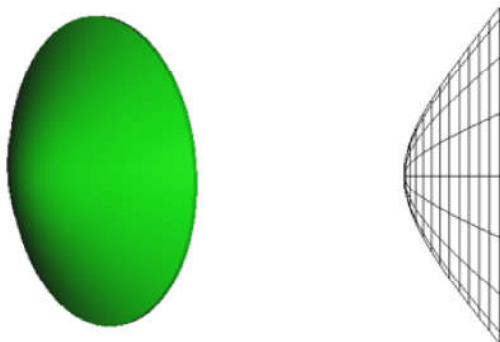


图 4.28 偶次项非球面透镜 3D 模型

Figure 4.28 3D model of even-numbered aspheric lens

4.3.5 PCB 板及驱动电路设计

LED 属于温度敏感元件, 随着温度升高, 将会造成 LED 的亮度降低、允许的工作电流减小、正向电压降低及色温、波长漂移, 故为了提高 LED 光源的发光效率, 需进行合理的散热设计, PCB 作为 LED 的载体能否将热量较好的散发到空气中将变得尤为重要^[65,66]。

在汽车灯具中常用的 PCB 材质主要有三种: 分别是 FR4 (环氧玻璃布层压板)、FPC (柔性电路板) 及 IMS (铝基电路板)。一般根据不同的需求选择不同的 PCB 材料, 三种不同的 PCB 板的特点如表 4.6 所示:

表 4.6 PCB 板类型
Table 4.6 Type of PCB

PCB 板材质	散热性能	成本	造型	布局设计
FR4	中	低	中	易
FPC	中	高	好	中
IMS	好	高	中	难

在设计时为了更好的 LED 散热性能, 使用 IMS 作为 PCB 板的材质。另外在设计 PCB 板时还应该考虑到: 设计 PCB 板形状比较规则, 以提升利用率, 增大散热; 标示出元件禁止布元件区域, 如反射碗、热熔及外观考虑等因素; 另外在条件允许的情况下, PCB 板边缘还应该做倒角处理, 避免安装时划伤。走线时也要留有一定的安全空间, 通常情况除地线外, 走线距离 PCB 边缘不小于 3 mm, 地线距 PCB 边缘不小于 1 mm, 元件距 PCB 边缘不小于 3 mm; 走线距离电镀区域不小于 3 mm, 元件距电镀区域不小于 3 mm。所以根据以上要求及灯体结构空间大小, 最终设计 PCB 板和驱动板结构如下图 4.29 所示:

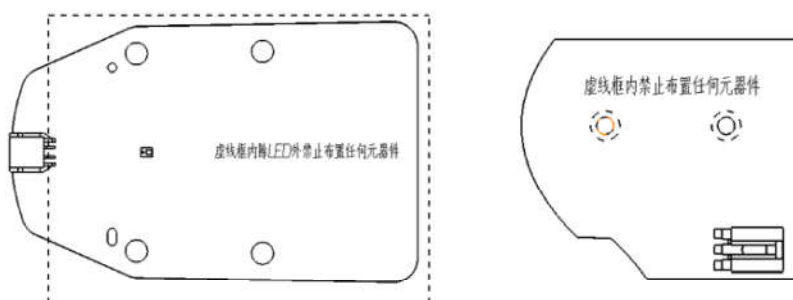


图 4.29 PCB 板和驱动板结构示意图

Figure 4.29 Schematic diagram of PCB and driving board

LED 驱动模块除了要满足安全要求外, 还应具备以下基本功能: 一是尽可能保持恒流特性; 二是应保持较低的自身功耗; 三是有效的热管理方式; 同时还应该满足 EMC 性能等, 以保证 LED 的发光效率^[67]。

基于以上的要求, LED 驱动模块的主要有三种类型: 分别是电阻式驱动方法、线性电源驱动方法和开关电源驱动方法。电阻式驱动电路其输出电流不稳定, 随着输入电压的波动, 输出电流变化明显, 但是成本相应的较低, 一般用于低功率 LED 的驱动, 如汽车信号灯的驱动。线性电源驱动即脉宽调制, 其电流比较

稳定近似于恒流输出且脉宽调制可以实现双功能驱动，但是效率较低，一般常用于中低功率 LED 的驱动。开关电源特征可以通过升压、降压和极性变换来达到恒定的电流输出，具有较高的效率，但是需要有针对性的布置元件改善 EMC 性能和较高的成本，一般用于高功率 LED 的驱动，常用于汽车前照灯的驱动^[66]。

表 4.7 不同驱动模块的特征对比

Table 4.7 Comparison of several driving methods

驱动类型	电阻式	线性电源	开关电源
效率	低	低	高
降压方式	是	是	是
升压方式	否	否	是
直流输出	是	是	是
发热量	高	高	低
EMC 风险	低	低	高
成本	低	中	高

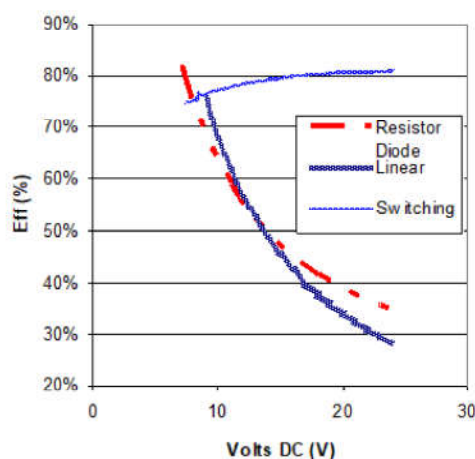


图 4.30 不同驱动方式效率对比

Figure 4.30 Efficiency comparison of different driving board

本设计中只采用一颗 LED，以开关电源驱动方式进行驱动，使 LED 在恒定电压 13.5 V 的情况下具有恒定的电流输出。驱动电路及各个元器件的参数分别如图 4.31 所示：

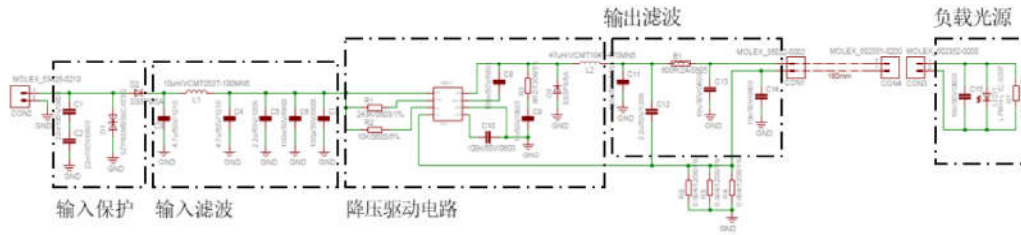


图 4.31 开关电源驱动方式

Figure 4.31 Switch power driving method

该驱动方式主要由输入保护、输入滤波、降压驱动电路、输出滤波及负载五部分组成。输入保护电路是对输入回路中的过流、过压保护以及限流作用；输入滤波是一个由 C3、L1、C4 组成的 π 型 LC 滤波电路。输出滤波是由 C12 和 B1 和 C13 组成的 RC 滤波电路。降压驱动电路中采用的是单芯片开关式稳压器，能够保证恒定的电流用于高功率 LED 的驱动。负载光源采用 Luxeon F LED 颗粒。

4.3.6 投影灯系统的模拟及优化

首先，发光强度是根据立体角来进行描述，距离不会影响其值的大小。但是，在发光强度一定的情况下，照度受到距离的影响较大，同距离的平方成反比^[28]。

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (5.18)$$

式中 E 和 I 分别表示照度、发光强度， r 表示距离。当发光强度一定时，距离越远，照度越小；反之，距离越近，照度值越大。所以当挡板上的孔径大小一定时，地面成像的照度值随着距离的增加而变小。基于这样的条件，使得三个投影像的大小按照从近到远的顺序逐个增大，这样不仅会缩小像与像之间的照度差异，而且还可以增加对行人及其他车辆的警示作用，让投影所成的像具有一定的层次关系。

将设计完成后的透镜导入到 CATIA 中进行数据处理，根据出光孔的尺寸裁切掉不需要的部分，以避免杂散光所产生的影响。该部分的模拟是在 SPEOS 软件中进行，SPEOS 模拟时是以实体进行光线追迹，所以必须将裁切后的透镜进行实体化处理，然后设置材料属性，透镜的光学属性需要设置为光学抛光处理。然后在距离投影灯下方 0.85 m 位置处建立一个平面，并将其设置为探测器，探测器的尺寸为 1500×4000 。探测器在水平和垂直方向上的分辨率设置 0.2×0.2 ,

且同时可以收集 400 nm 到 760 nm 波长范围内的可见光。

一般汽车倒车灯在路面上照度要求是距离汽车尾部 1 m 到 4 m 的范围内，所以本设计时也是需要将像投影在这个范围之内。假设倒车灯的安装位置距地面的高度为 0.85 m。挡板上的孔径尺寸大小，主要的有左右角度、尺寸长度及空间的宽度灯参数。可以在 CATIA 建立相应的参数，利用其参数化特性可以很方便的进行参数修改。首先，对挡板的上方孔径进行优化，通过上方孔径的光线成像光斑距离汽车最近。根据预期设计要求，第一个成像范围在距离汽车的 1 m 到 1.5 m 的范围内，水平宽度约为 0.35 m。将孔径开口角度设置为定值 90° ，主要通过改变孔径的宽度、长度以及孔径距离挡板底端的距离，根据 SPEOS 模拟结果不断的进行参数优化，直到第一个成像位置及大小满足预期要求时，再通过类似的方法对中间孔径和下方孔径进行调整，使得第二个像和第三个像的位置大概在 2 m 和 3 m 处，其大小分别为 $0.9\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、 $1.1\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。最后，根据三个成像的位置及大小再根据整体的效果进行各个参数的微调，同时也包括三个孔径的开口角度调整，从而在探测器上得到预期的投影像的分布。通过 SPEOS 模拟出来的结果如图 4.32 所示。



图 4.32 SPEOS 模拟结果
Figure 4.32 SPEOS simulation result

此时，路面上成像不明显，而且光型的相对宽度较窄，不能满足预期的光型要求。造成这样的原因是因为只有极少部分平行光可以透过挡板，而绝大部分光线被吸收掉或在反射面和挡板之间来回反射而形成杂散光，光学效率低。为了增加光学效率，提高光线的透过率，在反射面和挡板之间增加一个聚光透镜，让更多的平行光通过透镜会聚之后通过挡板，然后再通过放大透镜成像在路面上，这样可以允许更多的光线透过挡板，增加透镜之后其结构示意图如图 4.33 所示。

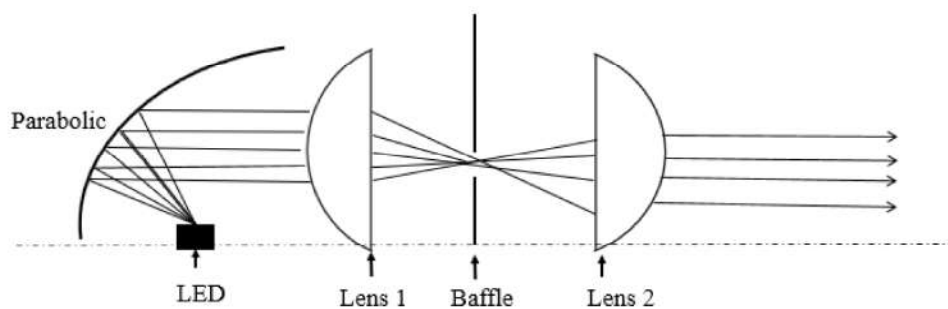


图 4.33 优化之后结构示意图

Figure 4.33 Schematic diagram of optimization

根据模拟结果按照上述优化方法再次对挡板的孔径的尺寸进行相应优化。最后,可以得到以下的尺寸大小,上中下方的三个孔径的在正视图方向上的几何尺寸如下图 4.34 所示。

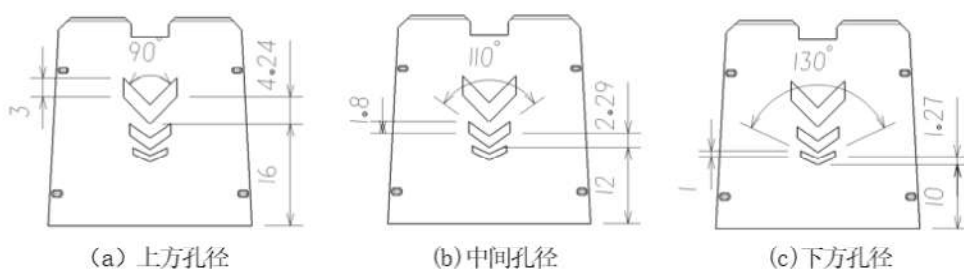


图 4.34 正视图上三个孔径的几何尺寸

Figure 4.34 Geometry size of hole in the front direction

最后,通过 SPEOS 模拟出来的结果如图 4.35 所示:

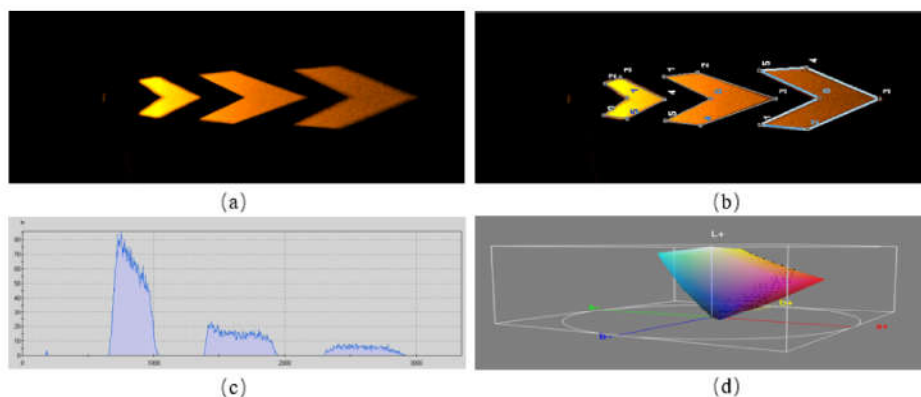


图 4.35 SPEOS 模拟结果 (a) 实际颜色 (b) 测量工具 (c) 强度曲线 (d) 颜色

Figure 4.35 SPEOS simulation result (a) true color (b) measurement (c) intensity (d) color

如图 4.35 所示, 增加透镜之后, 会聚透镜使得更多的光线通过挡板成像在路面上, 提高了光线的利用率。从直观上看, 光型较之前变得更宽, 且亮度也更大, 光型随着距离的增加呈现出由小到大的渐变趋势, 该光型不管是宽度和亮度较之前都有了明显改善且满足预期设想。利用 SPEOS 中测量工具对每个成像区域进行测量, 从左到右所成的像分别用 Area_1 和 Area_3 表示, 其照度值和区域内的光通量如下表 4.8 所示。

表 4.8 照度测量值
Table 4.8 Measurement value of illumination

Value	Area_1	Area_2	Area_3
Maximum(lx)	178.02	53.60	20.99
Average(lx)	77.78	18.75	6.75
Light Flux(lm)	6.36	3.71	1.74
Color (x, y)	(0.58, 0.419)	(0.567, 0.412)	(0.585, 0.414)

从表 4.8 中可以看出, 三个像的照度值越来越小。即使在理想的情况下, 在出射发光强度都一样时, 路面上的照度同距离的平方成反比。每个成像距离不同, 三个像之间的照度比约为 5.69:2.75:1, 也就是说第一个像会比第三个像的照度大于 5 倍以上。

但是, 实际上在设计时为了保证成像大小有一个渐变的过程, 成像在最远的像的挡板上的孔的尺寸要小于其他的孔径, 所以这样就会导致更大的照度差异。模拟过程中的像之间的照度值从左到右分别是 Area_1 到 Area_3, 通过测量三个像的平均照度及最大值之间比值分别为 11.5:2.8:1 和 8.48:2.55:1。每个光型的光色进行测量, 其结果满足 GB4785-2007 对汽车尾部光色要求。

4.4 本章小结

本章主要介绍了倒车灯及投影辅助倒车系统的设计优化及模拟过程, 其中包括了光源的基本信息及光源的选择、光学系统的基本原理的介绍以及设计过程中应该注意到的关键点等。其中倒车灯模拟结果可以满足法规 GB15235-2007 的发光强度要求, 而投影辅助倒车系统则用于增加车辆之间以及行人之间的交互式作用, 提高道路的安全性, 提供一种未来照明系统可能应用的方法。

第五章 倒车灯及辅助投影系统样灯测试

5.1 样灯测试

5.1.1 测试仪器介绍

样灯测试使用的测试设备为德国 LMT 配光机进行测试, 该设备需放置在一定空间的暗室中, 且在测试过程中要保证没有杂光对结果产生干扰。测试方法采用的是灯具旋转法进行测试, 即在保持探测器位置不变的情况下, 将待测灯具放置在旋转平台上, 通过设定程序来控制样品旋转的角度。利用该设备来进行配光测试和光域扫描分析, 配光测试只是测量法规要求的点上的发光强度的数值, 而光域扫描则是按照设定的测量间隔测量大量的点的数据, 然后通过大量的点绘制出光型分布曲线, 水平方向上和垂直方向上的测试点之间间距设置为 0.2。LMT 配光机主要由旋转平台、探测器、供电模块及控制机箱等组成, 如下图 5.1 所示。

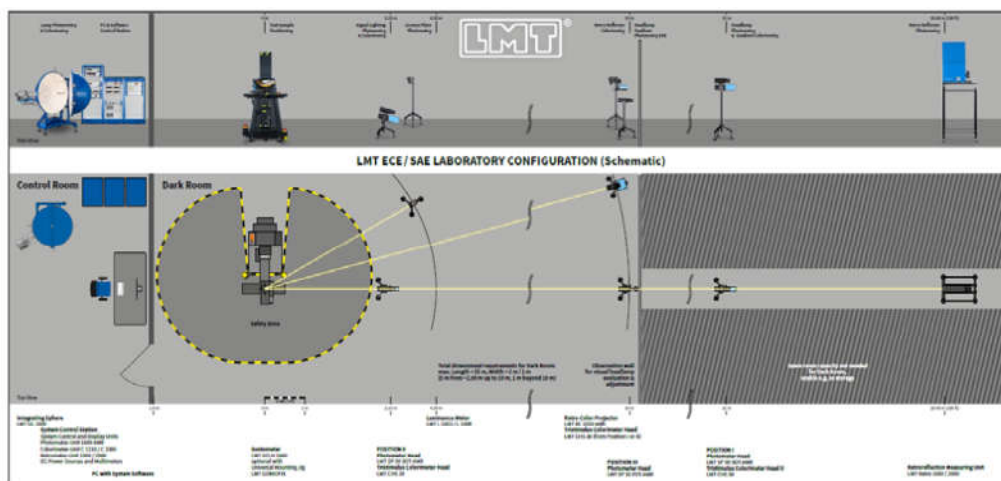


图 5.1 LMT 配光机示意图

Figure 5.1 Schematic diagram of LMT measurement instrument

在暗室中, 配光机是检测过程中最重要的设备。不仅可以验证灯具设计的正确性, 还可以对存在问题的灯具进行测量, 从而找出问题所在。通常一套完整的配光机会配置三个探测器, 它们分别放置在距离测试样品外的 3.16 m、10 m 和 25 m 的位置处。信号灯测量通常使用的是 3.16 m 的探头, 前照灯及前雾灯则使用的 25 m 处的探头, 10 m 处的探头通常用于需要满足 SAE 法规标准的前照灯的测试。另外在 10 m 墙上可以方便的观察到灯具光型的分布, 通过测量

墙上的光型分布快速的进行光源中心的位置校准。

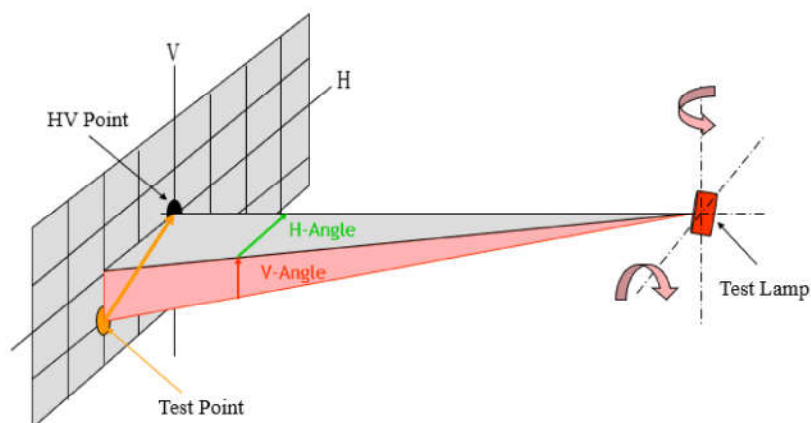


图 5.2 样灯测试示意图

Figure 5.2 Schematic diagram of sample lamp

在灯具配光测试过程中，首先需要将被测灯具固定在测试平台上，然后将灯具的灯丝中心同测试探头的基准点校准。将样灯在水平和垂直两个方向沿着 H 轴和 V 旋转相应的角度进行测量，最后通过数据整理后得到配光报告。

手持式照度计主要由光度头和显示器两部分组成，如图 5.3 所示。用于测量被照面上的光照度，具有体积小、重量轻、操作方便等特点。利用手持式照度计可以很方便的测量出投影到地面上光型的某一区域的照度值，



图 5.3 手持式照度计

Figure 5.3 Hand-held illumination measurement

5.1.2 倒车灯测试结果分析

首先，将样灯固定在该灯具的配光治具上，将激光校准中心同灯泡灯丝中心

进行校准。然后调取倒车灯的配光程序，设置每个测试点之间的测量间隔为 0.2×0.2 。将灯具的对插件连接之后，将电压设置为 13.5 V 进行点亮操作。因为光源为灯泡，一般只需要 1 分钟的时间就可以达到比较稳定状态，倒车灯加工之后整灯样品及点亮效果如图 5.4 所示。



图 5.4 倒车灯实物 (a) 未点亮效果 (b) 点亮效果
Figure 5.4 Reversing lamp (a) sample (b) lit appearance

最终通过配光机测量之后，其光型分布和倒车灯法规检查如下图 5.5、5.6 所示。

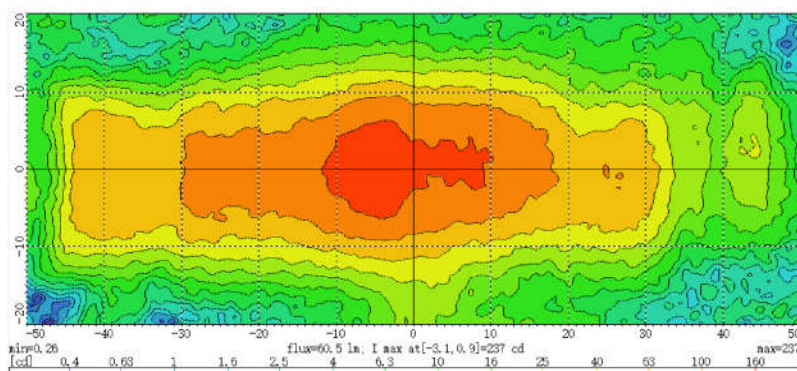


图 5.5 光域扫描结果
Figure 5.5 Photometric scan result of Reversing lamp

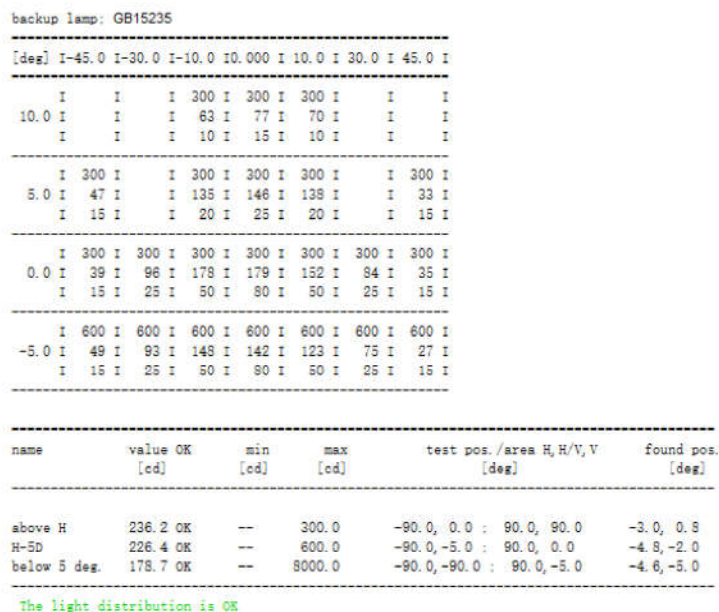


图 5.6 倒车灯法规检查

Figure 5.6 Regulation check of Reversing lamp

从上图 5.5、5.6 可以看出，最大发光强度为 237 cd，光通量为 60.5 lm。满足单侧倒车灯对于探测器上的光通量要求，实际样灯测量的最大发光强度和光通量都可以达到模拟结果的 83%以上，扫描光型分布可以满足法规 GB15235-2007 中对于各个测试点和区域之间没有局部突变的配光要求，从而验证了倒车灯设计过程中分析的正确性与可行性。

将扫描的结果导入到 LucidShape 中，并设置倒车灯在整车上面的实际高度及宽度等参数，进行倒车灯路照分析模拟，其光型分布如图 5.7 所示。

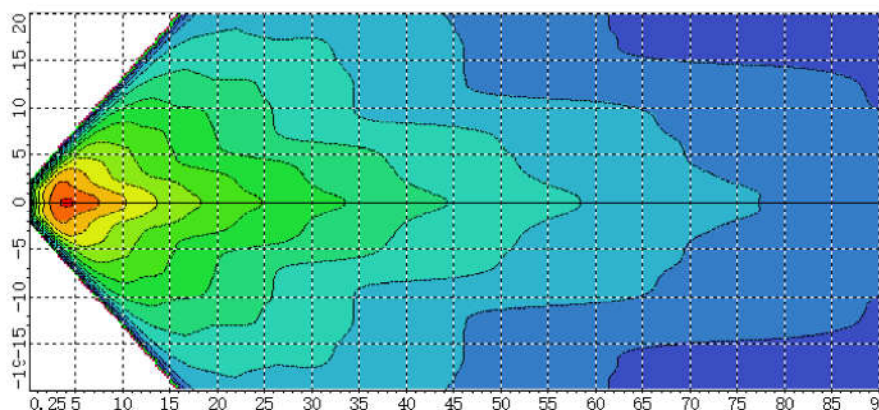


图 5.7 倒车灯路照分析

Figure 5.7 Road illumination analysis of reversing lamp

表 5.1 倒车灯路照要求

Figure 5.1 Road scene illumination check of reversing lamp

测试点	x	y	目标值	测量值
光通量	(50L-50R, 15U-90D)		100 lm	105.5 lm
A	6	-1.5	3 lx	4.82 lx
B	6	0	3 lx	6.71 lx
C	6	1.5	3 lx	4.831 lx
D	3	-1.5	3 lx	4.52 lx
E	3	1.5	3 lx	4.36 lx
大于 3 lx 长度	-	0	12 m	13.9 m
大于 3 lx 宽度	5	-	8 m	9.1 m

通过路照分析，测量屏幕上的光通量及各个测试点的照度测量值均大于目标值，该样灯路照分析结果满足倒车灯路照要求。而且同模拟路照结果相比，大于 3 lx 的光型分布的距离更远且宽度更宽，该倒车灯可以作为倒车信号灯作用同时也能为驾驶员提供更好的照明功能。

5.1.3 投影灯测试结果分析

经过样品加工之后，整灯及各个零件如下图 5.8 所示。



图 5.8 辅助投影灯零部件示意图

Figure 5.8 Schematic diagram of auxiliary projector lamp

将整灯固定在灯具治具上并且放置在高 0.85 m 的测试平台，将电压设置为 13.5 V，然后接通电源，在暗室路面上点亮效果如图 5.9 所示。



图 5.9 实物点亮效果

Figure 5.9 Lit appearance of sample

将照度计放置在每个成像位置中心点和边缘两侧位置处，对每个成像光型的三个点的照度值进行测量，读取照度计的数值并进行记录，如表 5.2 所示：

表 5.2 照度测量值

Table 5.2 Measurement value of illumination

Value	Area_1	Area_2	Area_3
Point 1(lx)	70.02	17.60	4.99
Point 2(lx)	82.78	20.75	7.15
Point 3(lx)	68.36	16.71	4.74
Average(lx)	73.72	18.35	5.63

从上图 5.9 可以发现，成像光型也出现由小到大的渐变趋势，实物点亮效果同模拟效果基本保持一致，在距离灯具较近的位置的光型更亮。从表 5.2 中，从左到右分别是 Area_1 到 Area_3，通过测量三个像的平均照度为 13.1:3.2:1，距离越远的成像光型越暗，而且每个成像位置中心位置也较边缘两侧的数值大。同时，在明暗相交的位置还存在分界不清晰，是由于镀漆挡板不能完全吸收光线，仍然有一部分光线在反射面和挡板之间多次反射，造成明暗截止线不清晰。成像位置同预期设计位置基本保持一致，可以在汽车倒车过程中，为其他道路使用者提供信号指示作用，可以有效地减小交通事故的发生。

5.2 误差的产生和解决方法

5.2.1 光源位置偏移引误差分析

在样品生产加工过程中, 不管采用的是 LED 还是卤素灯泡作为光源, 如果光源的位置同设计时的位置不一致, 势必会导致最后的光学效果不佳。一般针对于反射式的光学系统, 光源在较小距离的偏移对结果影响较小。但是对于比较复杂的光导系统, 光源位置的偏移则是致命的影响, 可能会导致整体偏暗, 不能满足设计时的法规要求, 同时会对导光条的均匀性产生极大的影响。

在实际整灯组装过程中, 出现光源位置的偏移的概率非常大。所以, 在设计后期, 必须对光源位置偏差后能否满足法规要求等影响因素进行检查。一般在 xyz 三个方向上通过移动光源中心方向, 然后进行模拟。对于卤素灯泡, 各个方向上移动的距离至少为 1 mm。如下图 5.10~5.12 所示。

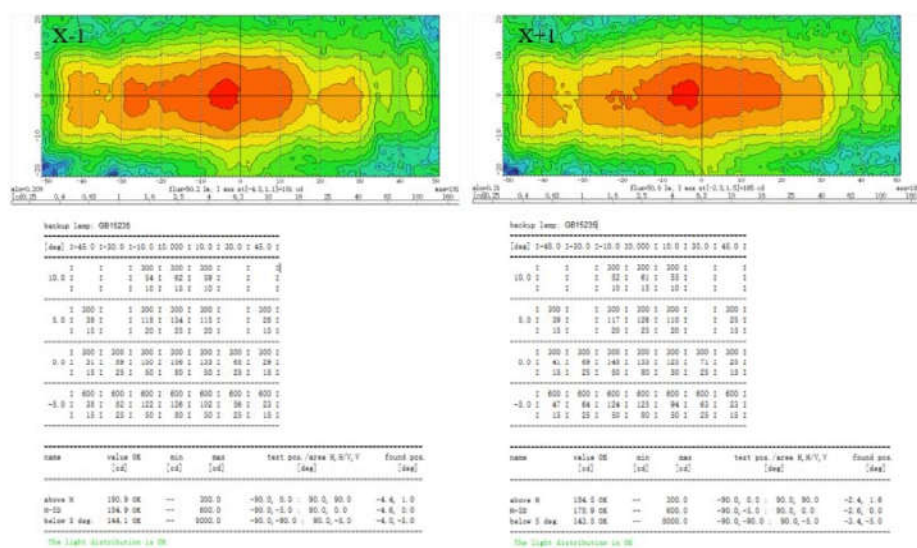


图 5.10 X 方向上的误差分析

Figure 5.10 Tolerance analysis in the X direction

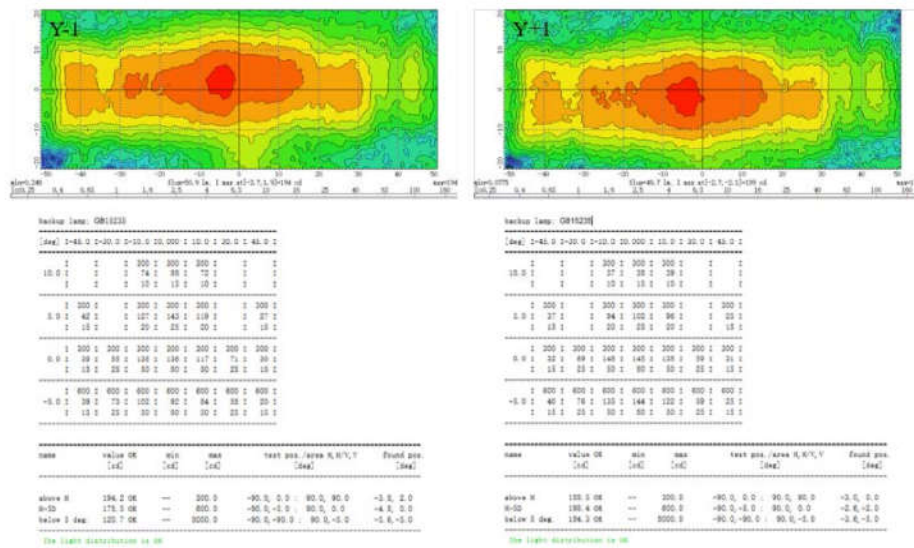


图 5.11 Y 方向上的误差分析

Figure 5.11 Tolerance analysis in the Y direction

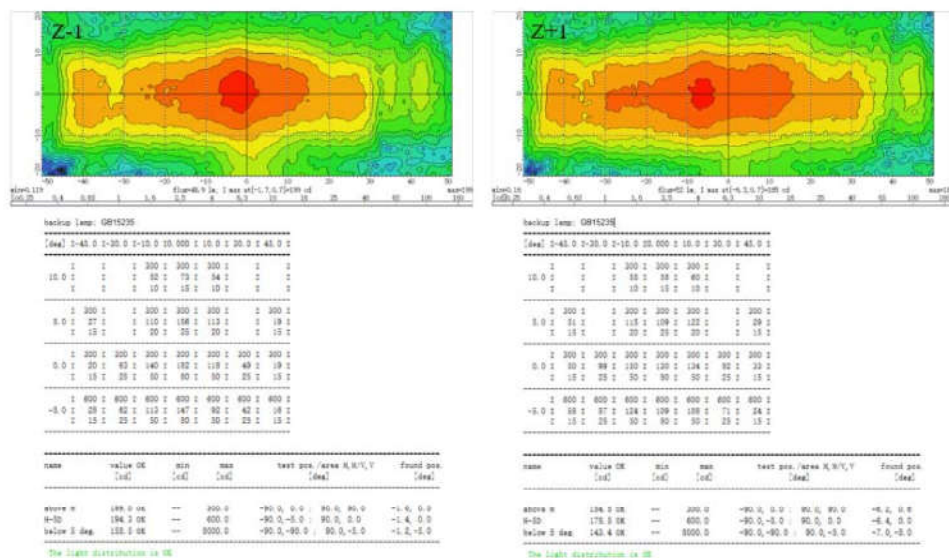


图 5.12 在 Z 方向上的误差分析

Figure 5.12 Tolerance analysis in the Z direction

如上图 5.10~5.12 所示，光源位置在六个方向移动后，该倒车灯光学系统依然可以满足法规的配光要求，且满足不小于法规要求最小值的 1.3 倍的配光要求。这样的话，在后期的加工过程中就会留有更大的预留空间，出现配光问题的可能性降低。

而对于 LED 作为光源的辅助投影光学系统，因为 LED 光源体积小，所以在不同的方向上移动 0.3 mm，如果是多颗 LED 光源的系统，则有多种组合方式需

要进行检查。

5.2.2 模拟和生产工艺的误差分析

通常光学软件模拟结果都会与实际测试结构存在一定的差异,在模拟过程中,除了设置常规的零件光学属性外,如反射系数、折射率等参数。而对于折射面 LucidShape 是以面体进行模拟,将零件厚度简化为空气,因此在模拟的时候还需要考虑实际过程中的菲涅尔折射,光学软件模拟的参数设置都是通过大量的模拟结果同实际测试结构之间的对比,从而不断的优化各自的参数设置习惯,以使得模拟结果同测试结果之间的差异越来越小。尽可能设计阶段就可以预料到潜在的隐患,这样不仅可以避免或者减少后期的整改工作,还会节约大量的财力物力。

同时在设计过程中,还需要考虑到加工精度能否在现有的条件下达到要求,比如在设计检查阶段,还需要对某些光学面之间做倒圆角分析,检查倒圆角之后会不会对结果产生较大的影响。

5.3 本章小结

本章主要进行了倒车灯及辅助投影灯的样灯测试。简单的介绍了现有的配光设备。还进行了实物的测试及同设计模拟结构进行了对比分析,其测试结果满足法规 GB15235-2007 对于倒车灯的发光强度的要求及倒车灯路照要求。投影灯实物点亮效果同模拟效果基本保持一致,在距离灯具较近的位置的光型更亮。对光源位置偏差所产生的误差进行了分析总结,以及在模拟和生产工艺上的差异产生的误差进行了分析。

第六章 总结与展望

6.1 课程总结

本文基于非成像光学自由曲面理论,设计出了一种新型的辅助投影倒车光学系统。该系统可以在车辆倒车期间在路面上投影出“箭头状”的几何形状,为后方车辆及行人提供警示作用,可以有效的避免道路安全事故的发生。另外通过对单侧倒车灯重新进行光学设计,使其可以满足倒车灯法规 GB15235-2007 对于倒车的配光及路照要求。为了验证设计的可行性,还进行了倒车灯的样件制作,组装元器件等一系列工作。通过对实物样件测试,验证了本文中所述的光学理论设计方法的正确性和有效性。现从以下几个方面多本文所做的工作进行总结:

1. 将已有的满足双倒的倒车灯结构进行重新设计。首先需要对自由曲面进行合理区域划分,以提高光学系统的效率。然后通过对自由曲面各个区域的水平及垂直方向上的扩散角度的重新设计优化,使得倒车灯内侧 45° 的可视角可以满足倒车灯法规 GB15235-2007 的不小于 15 cd 的配光要求。设计完成后,将反射面数据进行裁切和缝合处理,再次将所有器件进行模拟分析,对光源位置偏移进行误差分析。结果显示,在 XYZ 三个方向上移动之后均可以满足倒车灯的法规要求,且可以满足生产过程中“不小于法规最低值 1.3 倍”的生产要求。

2. 设计具有交互式功能的投影式辅助倒车系统。首先选择了符合要求的 LED 光源,然后按照路面上投影像的要求进行透镜焦距的计算,在 LucidShape 中进行光学透镜的设计及优化,将设计的透镜进行裁切并进行实体化的数据处理,在 SPEOS 中进行模拟优化,直至满足预期的光型要求。

3. 进行 LED 的 PCB 板及驱动电路的设计,其中包括基础的电路保护模块以、稳压的模块及光源驱动模块。

4. 进行设计样灯的制作,并且标注每一个器件的加工及精度要求。样件制作完成后,还需要对制作的进行检查是否与设计过程中保持一致。

5. 样件测试,对测试数据进行分析,并且得到符合法规要求的测试报告。然后讨论设计结果同实际结果之间的误差。

6.2 工作展望

本文设计出了投影辅助倒车系统,通过对实物的测试,该设计满足基本要求。但是还有许多地方需要改进。

1. 虽然设计的单侧倒车灯可以满足倒车灯法规要求。但是设计工程中,为了满足内外侧 45° 的 15 cd 的最低发光强度要求,进行了翻面打光方式,这个方式直接的影响就是点亮效果,所以在后续工作中还要对系统进行优化,使其具有更加完美均匀的点亮外观。

2. 设计的具有交互式功能的辅助投影系统,虽然在路面上可以显示出预期的标志符号,但是该符号是通过挡板上方的孔径进行成像而得到的。这样造成大量的光线损失,光学有效效率较低,导致路面照度值较低。所以在后续的工作中,通过大量的透镜与挡板的矩阵排列放置,每个组合投影成形状不同的光型,然后将所有光型进行叠加形成一个完整的光型,从而提高光线利用率。

未来汽车照明发展依托的是技术的进步,随着人工智能的发展,汽车智能化是当今全球汽车界重要的发展趋势之一。汽车照明也应该迎头赶上,紧紧的追随汽车行业的发展步伐,运用互联网技术对传统制造业进行改造,使得汽车照明朝着更加安全、环保、节能、智能化、人性化的方向。

参考文献

- [1] 2017 年全球汽车产销量大数据分析. <http://blog.163.com/quejh97nju>.
- [2] 师建华.创新协同开展汽车零部件产业新未来[M].中国汽车工业协会, 2016.
- [3] 刘丽. 汽车前大灯造型设计的实践与探索[J]. 科技资讯, 2017, 15(24):95-95.
- [4] 史文库. 现代汽车新技术.第 2 版[M]. 国防工业出版社, 2011.
- [5] 黄佐贤.现代汽车灯具[M].北京: 长虹出版公司, 2003.
- [6] 贾刚. 中国汽车零部件产业发展现状和趋势[J]. 汽车工程师, 2017(6):11-13.
- [7] 凌铭, 张建文, 黄中荣. 汽车灯具的发展趋势[J]. 照明工程学报, 2013, 24(4):106-112.
- [8] 江源. 光源发展史(一)[J]. 灯与照明, 2010, 34(1):54-62.
- [9] Johnson J. the end of light bulb[J]. Chemical & Engineering News, 2007, 85(49):46-51.
- [10] Fridrich E G, Wiley E H. Electric incandescent lamp: US, US2883571[P]. 1959.
- [11] 复旦大学电光源实验室编. 电光源原理[M]. 上海科学技术出版社, 1979.
- [12] 赵云. 正确认识和使用氙气前照灯[J]. 福建工程学院学报, 2008, 6(b12):87-89.
- [13] Stevens C R. Power supply for a high intensity discharge or fluorescent lamp: US, US4277728[P]. 1981.
- [14] 吴淑梅, 霍彦明. LED 光源的应用及前景[J]. 灯与照明, 2008, 32(3):24-26.
- [15] 赵明. 白光 OLED 光源发展现状及前景[J]. 记录媒体技术, 2010(4):36-40.
- [16] GB4785-2016. 汽车及挂车外部照明和光信号装置的安装规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] ECE R48. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light signalling devices[S]. United nations, 2014.
- [18] 刘波. 轿车灯具时尚新潮流[J]. 光源与照明, 2007(2):44-45.
- [19] 曾智豪. LED 产业在中国的营销与战略-以 BSL 公司为例[D]. 复旦大学, 2010.
- [20] 徐瑞麟. 光导系统在汽车照明中的应用[D]. 复旦大学, 2008.
- [21] 马宁. 宝马:有颜值有内涵的量产 OLED 尾灯[J]. 产品可靠性报告, 2015(8).
- [22] http://auto.sina.com.cn/j_kandian.d.html?docid=fynwxum4964598&subch=nauto.
- [23] <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1576977504297458726&wfr=spider&for=pc>.
- [24] <http://www.audi.com/en/innovation/design/>
- [25] <https://www.cnledw.com/info/newsdetail-48300.htm>.

- [26] <http://auto.gasgoo.com/News/2017/04/21085155515570011550C501.shtml>.
- [27] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1595164903687296348&wfr=spider&for=pc>.
- [28] 安连生, 李林, 李全臣. 应用光学.第 3 版[M]. 北京理工大学出版社, 2002.
- [29] Kingslake R. Optical System Design[M]. Academic Press, 1983.
- [30] Hall P R. Radiometry and the Detection of Optical Radiation[J]. Optica Acta International Journal of Optics, 1983, 31(4):369-370.
- [31] 郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 中国计量出版社, 2010.
- [32] Winston R. Nonimaging optics[J]. Scientific American, 2005, 264(3):76-81.
- [33] Chaves J. Introduction to Nonimaging Optics[J]. Crc Press, 2008.
- [34] 刘倩, 李利, 陈静,等. 机动车灯具色度检测研究综述[J]. 中国照明电器, 2016(6).
- [35] 陈波. 基于 LED 的汽车后组合灯关键技术研究[D]. 武汉理工大学, 2006.
- [36] 刘昊. 照明工程 非成像光学设计[J]. 国外科技新书评介, 2013(10):22-23.
- [37] Cassarly W J. Taming light using nonimaging optics[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004.
- [38] 李文宜. LED 道路照明灯具的二次光学系统研究与设计[D]. 复旦大学, 2009.
- [39] 范泮曦. 实现 LED 二次配光的自由曲面光学系统设计[D]. 浙江大学, 2015.
- [40] 何煜. 基于波前重构的非成像光学透镜设计方法[D]. 浙江工业大学, 2014.
- [41] 丁毅. 自由曲面光学器件的设计及其在照明系统中的应用[D]. 浙江大学, 2009.
- [42] Jacobson B A. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source[J]. 2001, 4446.
- [43] Smith W J, Betensky E, Williamson D, et al. The past, present, and future of optical design[C]// Contract Proceedings. International Society for Optics and Photonics, 2006:63422Y-63422Y-32.
- [44] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, et al. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17):12958.
- [45] Luneburg R K, King A L. Mathematical Theory of Optics[J]. American Journal of Physics, 1966, 34(3):x,350.
- [46] 方翔, 江新光, 吴逢铁,等. 非相干 LED 白光产生无衍射光的光源设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):159-162.

- [47] Zhenrong Z, Xiang H, Xu L. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35):6627-34.
- [48] 王洪, 王丽君, 叶菲菲,等. 投射式LED汽车近光灯自由曲面透镜设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9):2463-2467.
- [49] Gordon J M. Tailored edge-ray designs for uniform illumination of distant targets[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6):1726-1737.
- [50] Timinger A L, Muschaweck J A, Ries H. Designing tailored free-form surfaces for general illumination[C]. *SPIE International Symposium on Optical Science and Technology*. International Society for Optics and Photonics, 2003:128-132.
- [51] 王丹, 杨晓松, 武华堂,等. 中、美、欧、澳汽车前雾灯标准及试验方法对比[J]. *汽车科技*, 2014(2):38-41.
- [52] 李姜一欣. 新型LED汽车前照灯光学系统设计[D]. 天津工业大学, 2015.
- [53] 古志华, 王益群. 美国电动汽车安全标准认证与评价体系研究[C]. *中国标准化论坛*, 2014.
- [54] GB15235-2007. 汽车及挂车倒车灯配光性能 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [55] ECE R23-2013.Uniform provisions concerning the approval of reversing and manoeuvring lamps for power-driven vehicles and their trailers[S]. United nations. 2014.
- [56] SAE J593c-2013.the photometric regulations of reversing lamps[S]. 2014.
- [57] Andreas Bielawny, Willi Brandenburg. Principles of backlighting functions in automotive lighting[J]. *Procedings ISAL*.2011:890-904.
- [58] 刘晓曼. 厚壁透明件车灯导光条的注塑工艺研究[D]. 浙江工业大学, 2015.
- [59] 罗慧海. 某乘用车全光导尾灯的研究与开发[D]. 吉林大学, 2015.
- [60] GB15766-2016. 道路机动车辆灯泡性能要求[S].北京: 中国标准出版社, 2017.
- [61] <https://www.lumileds.com/uploads/610/DS109-pdf>.
- [62] 吴仍茂. 自适应前照系统(AFS)中的LED前照灯设计[D]. 上海大学, 2009.
- [63] 胡海蕾. LED照明光学系统的设计及其阵列光照度分布研究[D]. 福建师范大学, 2005.
- [64] 朱军彦. 鱼眼镜头的设计[D]. 江苏大学, 2014.
- [65] 文耀康. 大功率LED数字驱动电源的设计[D]. 湖南大学, 2015.
- [66] 温德尔. LED驱动电路设计[M]. 人民邮电出版社, 2009.

[67] 刘晨阳. 汽车大功率 LED 前照灯设计研究[D]. 东北大学, 2013.

致 谢

时光荏苒,三年的研究生生活即将结束。三年专业课程的学习和实习工作中,是与各位老师、同学、家人和朋友的帮助分不开的,在此论文完成之际向诸位表达我最真挚的感谢。

本论文的研究工作是在导师姚红兵老师的悉心指导下完成的,衷心感谢姚老师在大学期间的指导和关心。姚老师在大学期间的学习生活中严格要求学生,谆谆教诲使我受益匪浅。同时,姚老师严谨求实的教学态度和勤奋努力的工作作风也时常激励着我,作为将来工作学习的宝贵财富。

感谢大茂伟瑞柯车灯有限公司设计部辛忠华经理、吴全明课长及其他所有光学设计课同事在我实习阶段工作和生活方面对我的帮助和关心,以及指导我如何解决工作中和学习过程中遇到各种问题,你们是我进入汽车照明行业的引路人。

感谢 18 届光学工程同学及朝夕相处的研究生室友饶宵、卞锦文和岳震。不管是在日常生活和学习过程中,大家都给予了我很多帮助,大家的欢声笑语将成为以后无比珍贵的回忆。

最后,我要特别感激我的爸爸妈妈及女友湛姣姣。当我学习上遇到困难,失落无助的时候,是你们一直默默在背后默默为我打气,给予我的精神上的支持,你们是我努力的动力。

丁 勇

二零一八年四月于江苏大学

攻读硕士学位期间取得的研究成果

发表论文：

1. 姚红兵，丁勇，辛忠华，吴全明，刘敏. 独立自由曲面 LED 汽车前雾灯的光学设计[J]. 应用光学，2018（发表）