

# 汽车照明系统的设计及超精密自由曲面加工技术

蒋金波 杜雪 李荣彬

(香港理工大学,工业及系统工程学系,先进光学制造中心)

**摘要:**随着汽车产业的高速发展和市场的激烈竞争,现代汽车照明系统对发光效率、安全性能、以及美观的要求也越来越高。汽车照明中的自由曲面反射镜及LED照明系统的设计和加工是至关重要的。有别于传统光学系统的设计,汽车照明系统的非成像光学的设计是个多学科、复杂的过程。设计结果的好坏直接影响到照明系统的发光效率、能耗、以及汽车的安全性能。随着光学系统设计和超精密加工技术的进步,越来越多的光学元件采用了非球面以及自由曲面,汽车照明系统的效率以及性能得以极大的提高。本文阐述了汽车照明的非成像光学系统的设计和超精密加工技术。

**关键词:**汽车照明系统; LED二次光学器件; 自由曲面; 非球面; 超精密加工技术

## Design and Fabrication of Freeform Reflector for Automotive Lighting System

Jiang Jinbo To Sandy W. B. Lee

(Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University)

### Abstract

Modern automotive illumination systems require higher efficiency, safety, and good aesthetic features. The design, fabrication and measurement of freeform reflectors and LED secondary optics are critical issues for automotive illumination systems. The non-imaging optical design for the automotive lighting system, which departs from the methods of traditional optical design, is an arisen interdisciplinary field. In order to meet the traffic regulations, unique freeform shapes and geometries should be adopted to create the special legal light pattern. Mean while, high accuracy freeform reflector could not be made by conventional manufacturing process, ultra-precision machining is the method. And the measurement of the freeform surface is also a new area. In this paper, the optical design, fabrication and the measurement of the freeform reflector headlamps are investigated.

**Key words:** Automotive lighting system; LED secondary optics; Freeform reflector; Aspheric lens; Ultra-precision machining technology

## 1 背景

目前汽车照明技术的发展非常迅猛。各汽车制造商(还包括供应商及交通法规和标准的制定者)都渴望发展未来流行的照明技术。一个新的照明系统

往往需要一个全新的设计理念,并依赖于机械电子部件、光学元件的超精密加工等技术才能成功地推向市场。

在汽车前照方面,和传统的抛物面反射镜加配光透镜的组合相比,采用自由曲面反射镜可以同时实现会聚和配光的功能,这样一来前照灯的灯罩就可以设

\* 中华人民共和国香港特别行政区政府创新科技署项目资助。项目号: GHS 073/04

计成符合审美要求的不具任何配光功能的保形灯罩, 车灯的形状和汽车流线形的形状融为了一体, 整体变得非常美观。自由曲面的设计使得前照灯变得更加灵活性和紧凑。

另外, 除了自由曲面反射镜, 高亮度固态照明 (LED) 技术在汽车照明中也发挥了越来越重要的作用。目前已有很大型的汽车制造商将高亮度的 LED 应用到产品, 例如用于尾部照明的倒车灯、驻车灯、刹车灯、信号灯、转向灯等。相对于电流输入后需要几秒响应时间才可以点亮的传统卤素灯, LED 光源的响应时间几乎是零, 这对于在后边驾驶的车辆而言更加安全。相对于卤素灯, 使用 LED 光源的组合尾灯可以节省约 200W 左右, 只消耗卤素灯所需电能的 50% 左右。同时小尺寸的 LED 光源也给汽车信号系统的设计和封装提供了更高的灵活性。

虽然非成像光学系统可以通过商用软件例如 ASAP<sup>[1]</sup>、LightTools<sup>[3]</sup>、TracePro<sup>[2]</sup>、SPEOS<sup>[4]</sup>、LucidShape<sup>[5]</sup>、ReflectorCAD<sup>[1]</sup>、以及 CATIA<sup>[6]</sup> 和 Unigraphics<sup>[7]</sup> 等进行建模和光线追迹, 并且设计的曲面可以通过多轴联动的超精密 CNC 数控加工机床, 如单点金刚石飞刀铣削、研磨等来加工。然而曲面的设计和加工在很大程度上还是取决于设计和加工人员

的经验和技术。根据配光的需要成功地优化自由曲面往往需要更多的人工介入。同样, 自由曲面数控程序的编程也是决定曲面加工成败与否的关键。

## 2 LED 在汽车照明系统中的应用

在过去的二十年里, 发光二极管 (LED) 已经成功地打入了汽车照明系统中。虽然刚开始 LED 只是用于汽车内部的各种指示和表盘, 随着 80 年代末和 90 年代初高亮度 LED 技术的涌现, 这种格局已被打破, LED 被广泛地用于汽车外部信号系统的照明已经成为可能。

尤其在 90 年代初, 更加成熟的 III-V 族和 II-VI 族如镓铝磷 (InGaAlP) 高亮度 LED 技术使得 LED 在汽车信号系统中的市场迅速扩大。到 2004 年底已有大约 40% 左右的汽车和轻型卡车开始生产基于 LED 照明的刹车灯。市场的驱动力正是来源于 LED 的高性能 (例如极短的响应时间)、高可靠性以及 LED 所提供的高度灵活的设计风格。高亮度 LED 价格的稳步下降最终将导致 LED 最终会取代传标准的白炽灯泡。

至今为止, LED 主要应用在例如刹车灯、驻车灯、

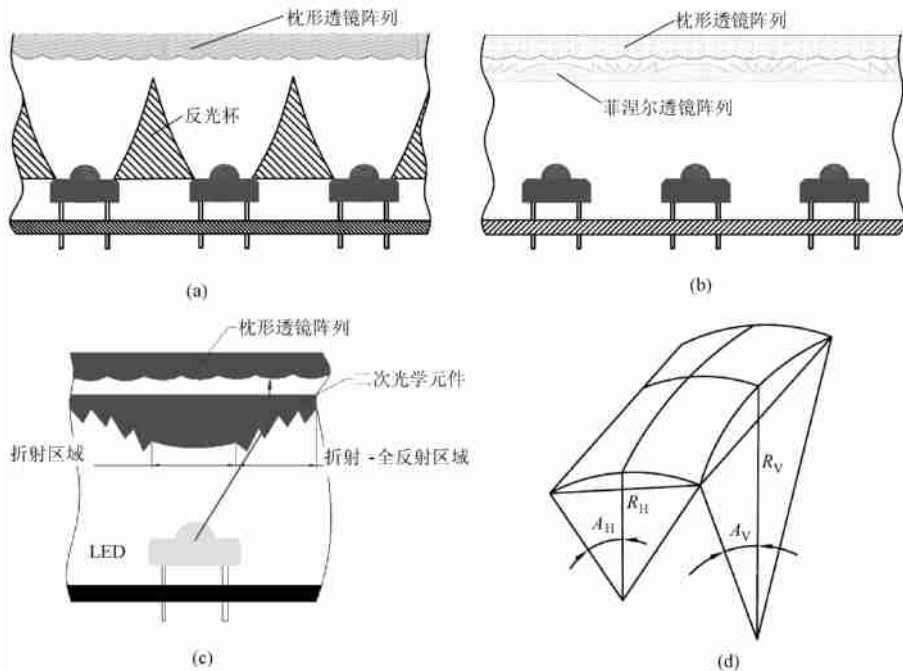


图 1 典型 LED 信号照明系统的结构

(a) 反光杯阵列+ 枕形透镜阵列; (b) 菲涅尔透镜阵列+ 枕形透镜阵列, (c) 组合全反射-折射透镜阵列+ 枕形透镜阵列; (d) 两个垂直方向曲率半径不一致的枕形透镜

转向灯、雾灯、倒车灯等汽车信号系统中。典型的LED信号照明系统的结构是由LED光源、准直系统和具有配光功能的灯罩组成。其中准直系统一般为抛物面反光杯、菲涅尔透镜或者是折射-全反射组合透镜阵列。准直系统收集LED光源发出的各个角度的光, 将之变为平行光。具有配光功能的灯罩再将平行光变成符合标准(如欧洲的ECE标准, 美国的ASE

标准和中国的国家标准)的光型分布。灯罩上面通常有很多枕形透镜阵列。枕形透镜一般是在XY两个垂直方向曲率半径不一致的超环面, 以产生两个垂直方向上不同的光的角分布, 信号照明系统的结构如图1所示。

对于不同发散角的LED光源, 照明系统的结构选择是至关重要的。譬如对于发散角较小的LED光

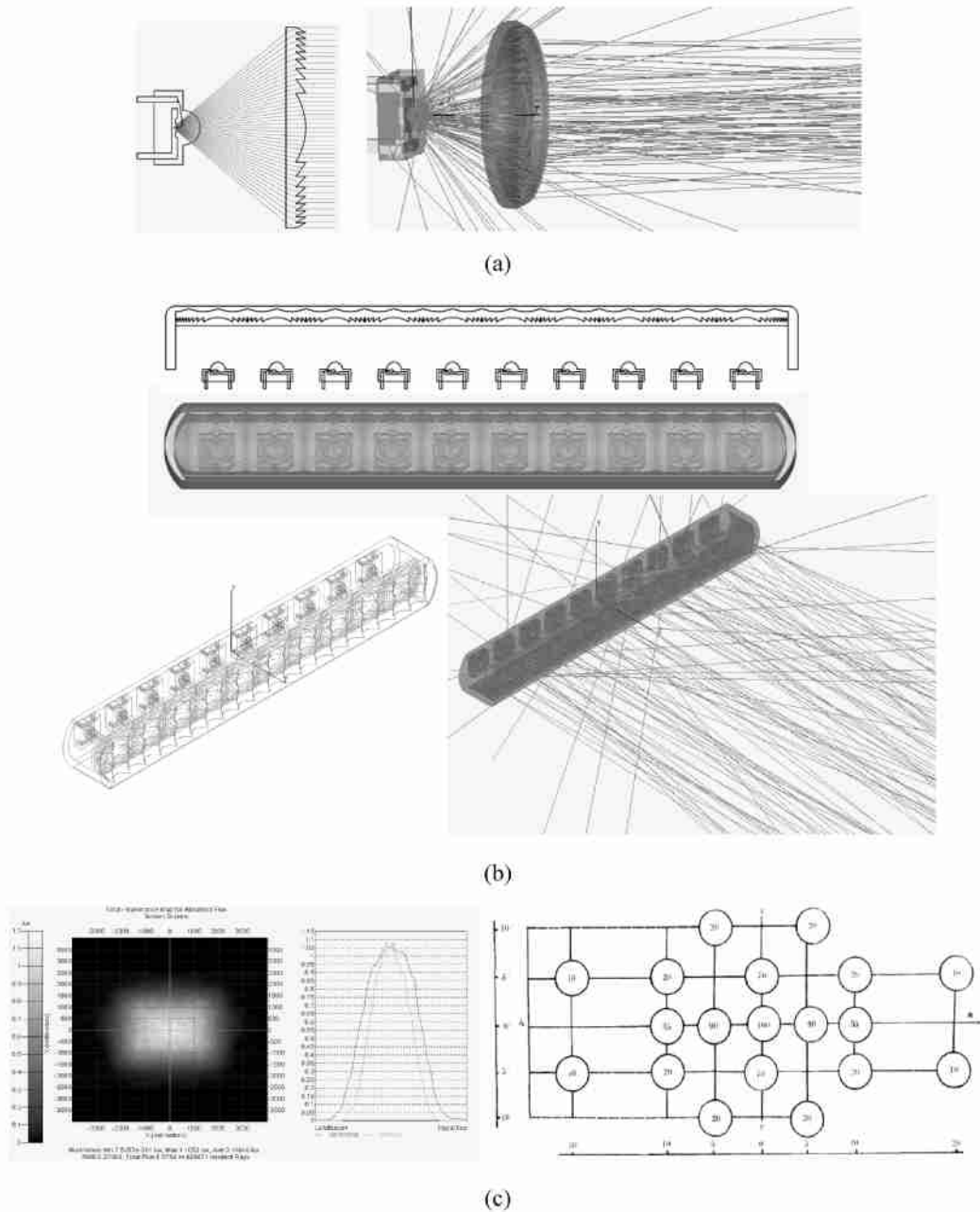


图2 汽车后窗条状LED刹车灯设计

(a) KingBright 90° LED建模; (b) 条状LED刹车灯设计的建模和光线追迹;

(c) 左侧为计算机模拟的光型图, 右侧为GB5920—94国家标准

源,那么准直系统就可以采用凸透镜或菲涅尔透镜阵列。然而对于大发散角例如朗伯分布(Lambertian)的LED光源,由于凸透镜或菲涅尔透镜的数值孔径并不是 $180^\circ$ ,不能收集从LED发出的所有角度的光,这时采用凸透镜或菲涅尔透镜作准直系统会降低效率。图2为一个汽车后窗条形刹车灯的设计,这里采用发散角为 $\pm 45^\circ$ 的高亮度食人鱼LED,准直系统的菲涅尔透镜其数值孔径角也为 $\pm 45^\circ$ ,顶部的枕形透镜阵列用来产生符合国家标准GB5920—94的光形。图2c的左侧为观察屏设置在25米远处的计算机模拟的结果,右侧为GB5920—94规定的不同位置的测试点,标有标准要求的最小发光强度。模拟结果在每一个测试点处的发光强度都通过要求所规定的值。

而对于朗伯分布的LED光源或大发散角的LED

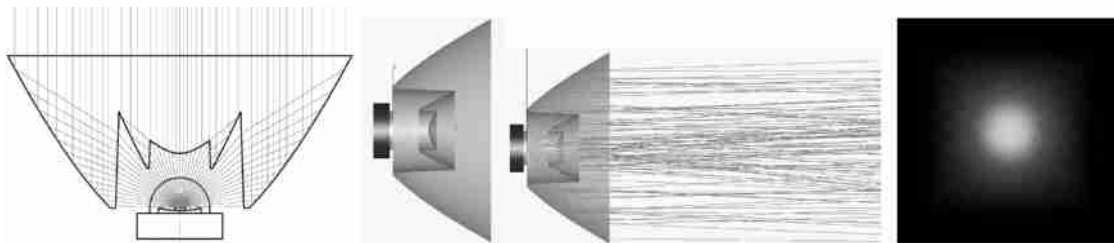


图3 高效率R&TIR(折射-全反射)LED二次光学元件

在LED的汽车信号系统中,除了上述的常见的结构之外,有的系统直接将准直系统和配光系统组合起来,譬如LED透镜的下表面可以设计为菲涅尔透镜或全反射-折射组合透镜,而透镜的上表面为具有配光功能的枕形透镜。有的系统设计干脆将LED的反光杯设计成同时具有聚光和配光功能的自由曲面复合反射镜,这样外面的配光透镜就可以节省了。

### 3 LED汽车前照灯

尽管至今高亮度LED取得的成就十分显著,但LED还没有真正渗透到汽车的前照市场。直到最近,LED在前照灯中的应用还是被认为有问题的,主要是由于白光LED的功率以及商业效率(性价比)还是偏低,以及输出功率的稳定性、散热、以及价格等诸多问题。但是随着LED高亮度白光技术不断高速地发展,尤其是在过去几年的时间里大芯片面积( $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 以上)的高功率氮化镓(GaN)白光LED芯片的涌现,以及日臻完善的封装技术,汽车前照市场最终还是接纳它。另外还有一个问题是急需解决的,那就

光源(例如远场角度分布为BatWing即蝙蝠翼状的LED)来讲,准直系统宜采用反光杯的形式或采用全反射-折射组合透镜的形式。全反射-折射组合透镜可以使聚光系统设计得效率非常高。图3为一个全反射-折射透镜的设计,共分为3个区域,其中间有一个非球面透镜,为折射区;外边有两个齿状的为折射-全反射区,折射-全反射部分将从LED射出的角度比较大的光线经过一次折射再通过外面的全反射面反射后准直出来。由于它充分利用了折射和全反射,它可以将LED发出的所有角度的光线都能收集起来。如果不考虑菲涅尔损耗,理论上它可以做到100%的效率,对于LED来讲,折射-全反射组合透镜是理想的二次光学元件。

是除了LED发光效率和输出功率的问题外,随着LED功率的提高,散热的问题也变得越来越突出。由于前照灯的装配靠近汽车的引擎,周围环境的温度很高,所以LED灯散热的问题是必须解决的。还有就是如何设计和加工出符合法规光形的LED光学元件,那也需要相当先进的技术水平的。

汽车前照灯最主要的是安全性。目前国际上有许多不同的标准对汽车前照灯作了大篇幅的规定以确保夜间行驶的安全。主要的两个国际标准有欧洲及日本使用的E-法(ECE),美国使用的联邦汽车安全标准(FMVSS)。这两个标准都在2003年做了相应的修改,并且增加了一些新的内容,如加入了自适应前照灯系统方面的规定等。汽车工程师协会照明标准委员会(SAE)也制定了一些相应的有关LED前照系统的新标准(J2650 LED道路照明装置)并考虑等时机成熟的时候通过。

对于LED前照灯而言,一个关键的挑战是亮度(即坎德拉每平方米 $\text{cd}/\text{m}^2$ )的分布,汽车前照的标准要求不仅仅投在路面上的光需要有多少流明(lumen)的光通量,而且对不同角度的发光强度(坎德拉 $\text{cd}$ )

的分布也有严格的规定。标准的汽车头灯用的钨一卤素灯可以产生1000流明的白光。这要求LED汽车头灯也必须产生足够的光通量满足1000流明的数目,要满足这么高亮度的照明要求其难度是可想而知的。也就是说如果一个汽车头灯是由8个LED照明单元组成的,那么每个LED照明单元至少需要125流明的光通量才能满足总的光通量的要求。以目前的技术水平而言,单个LED根本不可能有这么高的输出功率。

图4为一个LED前照系统的光学模型。由于单个高功率LED的输出功率还不够高,这里采用了8个LED光源,单个LED的光源为150流明。为了充

分利用LED发出的光,LED朝上放置,发光方向和系统的光路成 $90^\circ$ 。反光杯为半个椭球面,椭球面有两个焦点,椭球面里边的焦点位于LED放置的位置,椭球面的另外一个焦点位于反光杯的出口处。这样LED发出的光聚焦在椭球光杯出口的位置形成一个很小的聚焦的光斑,此处可以放一个挡光片,将聚焦光斑中不需要的一部分挡住,没有被挡住的光斑形状通过前面的投影镜头投影出来。针对不同标准的光形可以制作不同形状的挡片。由于每个LED照明单元是采用投影方式的,挡片挡住的光斑的边界经投影出来后可以产生明显的明暗截止线,所以容易设计出符合ECE或SAE等标准的光形。

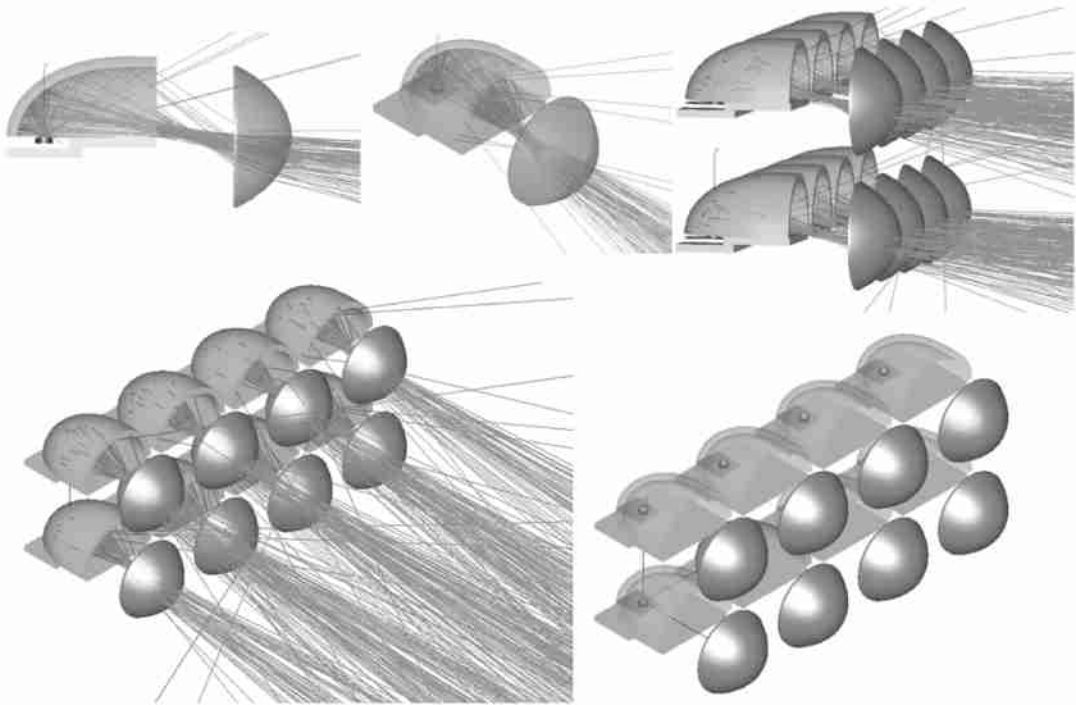


图4 投影型LED汽车前照灯

## 4 自由曲面汽车前照灯反射镜

因为定制的自由曲面反射镜可以符合汽车前照严格的光形要求,相比于传统的抛物面加配光镜的结构,自由曲面反射镜更加高效、灵活和紧凑。所以自由曲面反射镜的前照系统的设计和加工技术在最近的几年内也得到了迅猛的发展。自由曲面反射镜可以直接提取灯泡中60%以上的光通量并投射到路面,可以将反光面最大效率地利用起来。因为反射镜是自由曲面的,曲面的形状是根据配光的光形的要求

来设计,所以反射镜本身直接实现了配光的功能,而不需要在前面再加一块配光透镜。好的自由曲面反射镜的设计可以有效地减小散射和不需要的反射损失,并避免给对面行驶的车辆造成眩目。

自由曲面前照灯反射镜对传统的金卤灯灯泡以及HID(高强度气体放电灯)灯泡,如飞利浦D2R灯泡都非常适用。图6为一个自由曲面前照近光灯的设计,设计中使用的光源为H<sub>4</sub>金卤灯,设计基于边界光线原理(Edge-Ray Principle)<sup>[8]</sup>,为了便于配光,曲面划分为许多个小曲面片,每一曲面片都会产生各自的配光,所有曲面片产生的光形叠加后将产生一个符合国

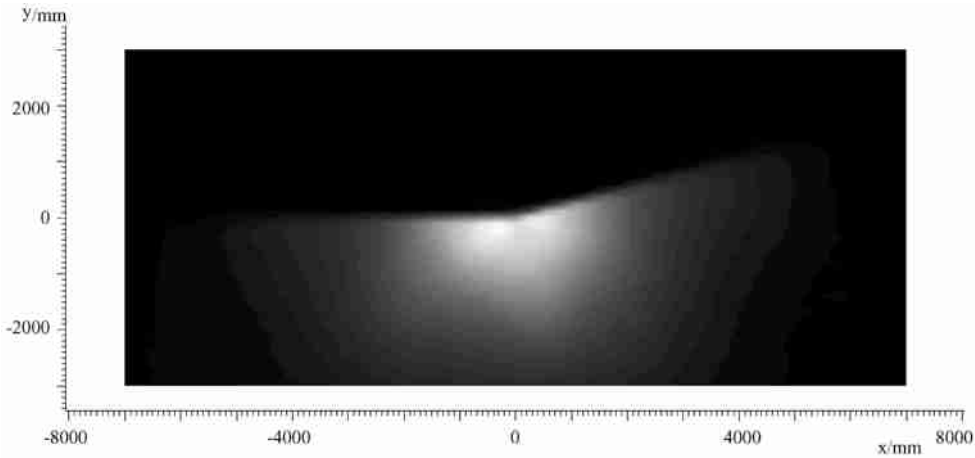


图 5 投影型 LED 汽车前照近灯光型

家标准 GB45—99 的光形<sup>[9]</sup>。因为标准要求光形的右侧需要有一个 15° 的明暗截止分界线(观察屏方向在 25 米远,屏幕法线方向为逆着光线方向看)。为了产生 15° 的明暗截止分界线的这部分光形,反射镜的右侧划出一块区域,这块区域内的反射片都为 75° 方向排列方式,见图 6 的左侧图。图 6 右侧为采用租用的

ASAP 软件进行光线追迹后的结果,光形图中左边的光都分布在水平线 0-0 线以下,而右边部分的光则分布在 15° 的明暗截止分界线以下,其他各个测试点的光强度分布都通过标准的要求。光线追迹和结果分析也可以用其他的照明设计软件如 LightTools 和 Tracepro 等软件。

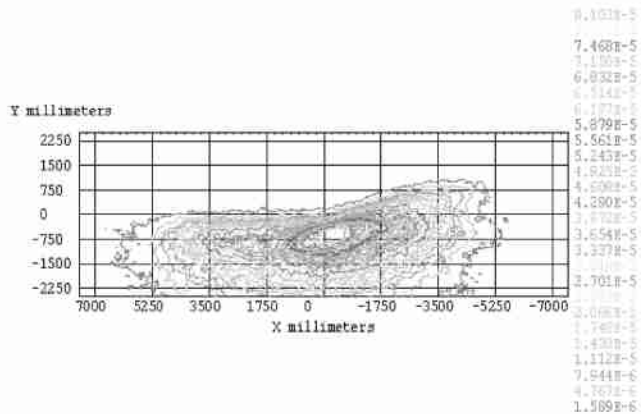
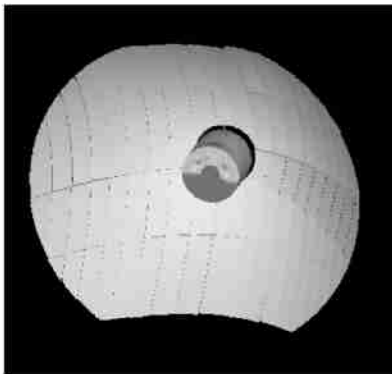


图 6 自由曲面前照近光灯

## 5 自由曲面汽车光学元件的超精密加工技术

对于汽车光学元件,有许多是非轴对称的片状自由曲面,还有些灯罩上用来配光的枕形透镜的是双曲率非轴对称的。即使是旋转对称的有些也非常复杂,如组合的折射全反射 LED 透镜有折射部分和全反射部分,元件一些部分的角度比较尖锐,用传统的车一抛光的模式很难确保高精度的面形以及很好的表面粗糙度。为了确保光学元件的设计标准以及光学效

率,用超精密的单点金刚石加工机床来加工这类光学元件是很好的选择。为了加工各种不同形状、非共形、非轴对称的自由曲面,可以采用多轴联动的单点金刚石加工技术,自由曲面汽车光学元件设计的结果可以转换为 IGES 的机械格式,输入机床程序进行复杂曲面的加工。图 7 为香港理工大学先进光学制造中心 Precitech Freeform 705G 五轴联动自由曲面数控加工机床,它有 XYZ 三个平动主轴和 BC 两个回转主轴,加工的方式为飞刀铣削(raster milling),除了工件在 XYZ 三个方向的平动之外,回转主轴还可以在 360° 空间内调整加工角度,所以它可以加工一些形状

比较奇特的自由曲面,加工完成后的工件的面形误差

为亚微米级,表面粗糙度为几个纳米。

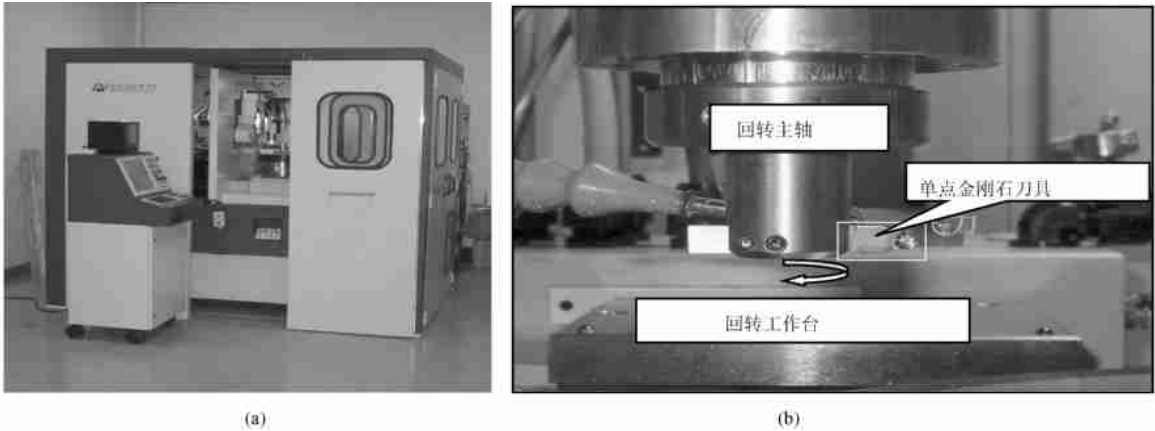


图7 (a) 超精密5轴加工设备 (Precitech Freeform 705G); (b) 超精密飞刀铣削主轴和工作台结构

然而,虽然到目前为止已经有很多种现成的NC数控机床刀路轨迹生成软件包,如CATIA的NC Manufacturing<sup>[6]</sup>软件包等。但是对于自由曲面光学元件,由于面形误差和表面粗糙度的要求,对加工步长和刀具都是必需特殊设置的,这些软件包还不能直接利用来直接作这些自由曲面的刀路轨迹生成程序。

因此现开发了一种多功能的自由曲面光学元件的加工程序以适应各种不同形状自由曲面的加工。图8为一个车头灯自由曲面反射镜数控加工的控制界面。将输入的IGES格式,变成NC刀路轨迹生成软件,并进行虚拟加工仿真,确保无差错后再输入到超精密加工机床进行加工。

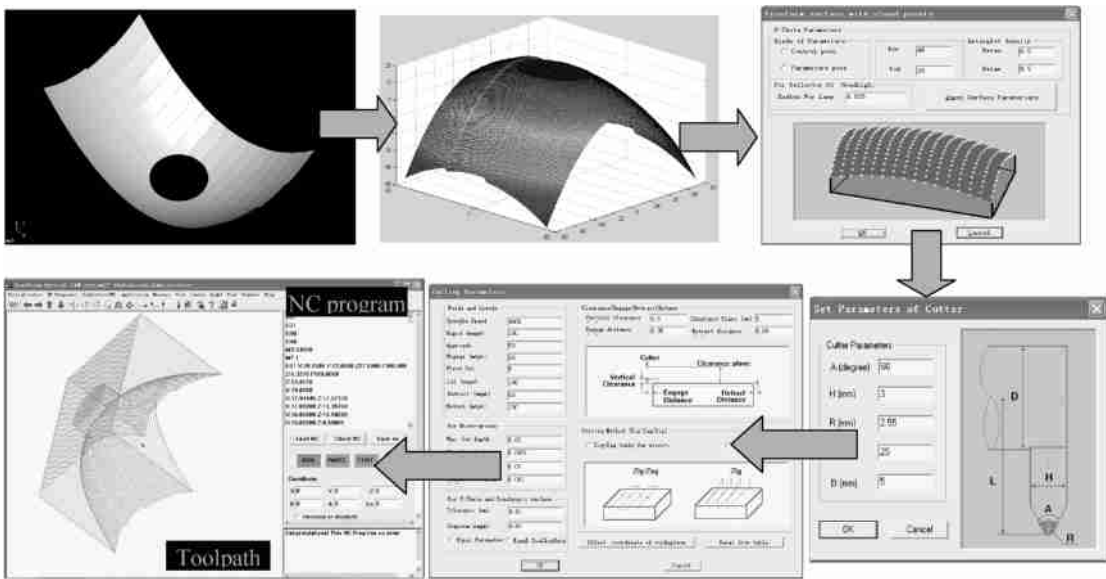


图8 自由曲面光学元件的刀路轨迹生成程序

## 6 结论

本文探讨了汽车照明系统自由曲面光学元件的设计和加工。考虑到照明系统的效率、安全和交通法规的标准,自由曲面反射镜和LED照明系统的设计和加工都是非常关键的。有别于传统光学系统的设

计,其中非成像自由曲面光学系统的设计是一项结合光学和自由曲面设计和建模的多学科的、复杂的过程。为了加工各种不同的复杂的自由曲面,介绍了一种多轴联动的单点金刚石加工技术,以及开发了针对不同自由曲面的超精密加工数控程序。

(下转 P56)

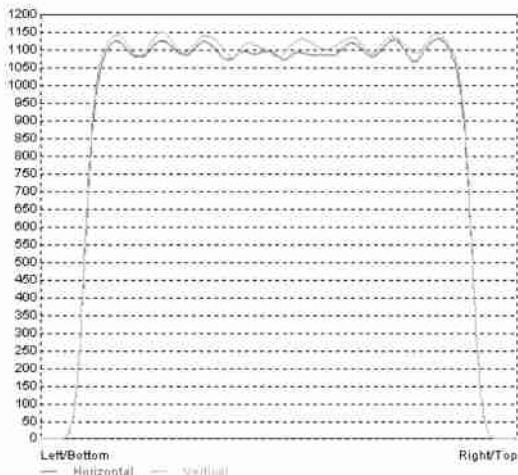
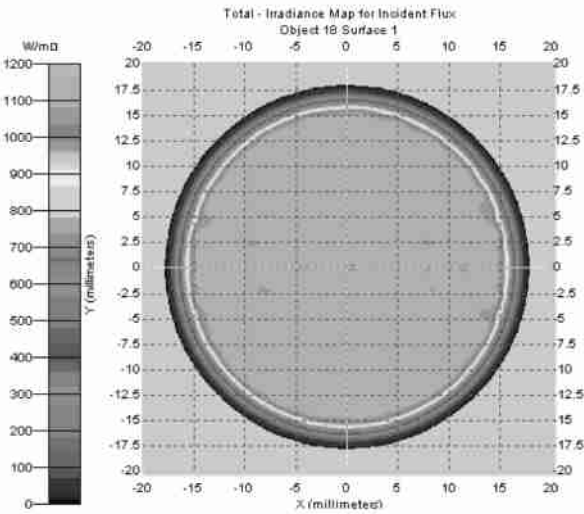


图4 模拟得到的输出近场光斑和光强分布图

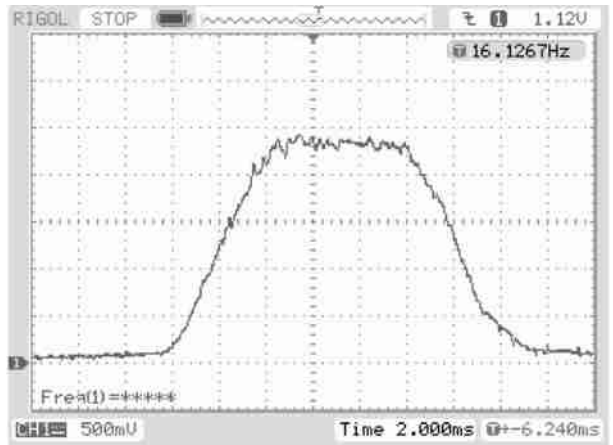


图5 CCD光强测量法得到的近场光强分布

### 参考文献

- [1] 江源. 聚合物光纤传光束用光源及其应用[J]. 光源与照明. 2003, (1): 17~ 22
- [2] 陈琼, 刘红, 李金国等. LED光源模型研究[J]. 照明工程学报. 2006, 17(1): 10~ 14
- [3] 陈波, 李伟平, 黄杨程等. 一款LED后位灯的光学设计与仿真[J]. 光学仪器, 2006, 28(5): 37~ 41
- [4] 沈默, 李海峰, 陆巍等. 用于LED照明的反射型复眼设计方法[J]. 光学学报, 2006, 35(1): 93~ 95
- [5] 王乐. LED应用于照明的计算和仿真[J]. 照明工程学报. 2007, 18(1): 26~ 30
- [6] 吴宝宁, 李宏光, 俞兵等. LED光学参数测试方法研究[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 513~ 516

(上接第P52页)

### 参考文献

- [1] <http://www.breault.com/>
- [2] <http://www.lambdare.com/>
- [3] <http://www.opticalres.com/>
- [4] <http://www.optisworks.com/>
- [5] <http://www.lucidshape.com/>
- [6] <http://www.3ds.com/>
- [7] <http://www.uni-graphic.com/>
- [8] Harald Ries, Ari Rabl, Edge-ray principle of nonimaging optics, J. Opt. Soc. Am. Vol. 11, No. 10, October 1994 A, pp: 2627
- [9] 中华人民共和国国家标准. 汽车前照灯配光性能, GB4599-94

◆雷士照明上海研发中心于2008年7月8日在上海正式成立, 该公司举行了“创新启迪未来”为主题的研发中心开业庆典。这是雷士照明在惠州总部的研发中心之后在自主研发与创新上又一重大举措。中国照明学会理事长王锦燧、常务副理事长兼秘书长徐淮、中国照明电器协会副理事长兼秘书长刘升平以及中心特聘顾问、专家等300余人出席庆典仪式。在研发中心开业庆典上, 研发中心还举办了中心发展战略研讨会, 就中心今后的发展战略, 广泛征求与会顾问、专家的意见。