

# 激光光源汽车前照灯自由曲面反射器设计

蒋露松, 陈宇\*, 海小华, 彭礼威

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 文中针对激光前照灯的光学结构设计困难和能量利用率低的问题, 以球面最优传输理论为基础, 提出了一种新的自由曲面反射器设计方法。该方法基于支撑曲面的结构, 针对扩展光源进行了优化, 有效抑制了目标照明区外的照度, 实现了清晰的明暗截止线。文中根据 GB 25991—2010 标准, 设计了适用于激光前照灯(含近光灯和远光灯)的自由曲面反射器, 并使用扩展朗伯光源进行模拟仿真。仿真结果表明, 配光屏幕上各测试点和测试区域的照度均符合法规要求, 反射面连续光滑, 能量利用率分别为 96.96% 和 97.80%。通过实现高能量利用率的结构, 减少了汽车前照灯的功耗, 利于汽车前照灯的散热设计, 延长了激光光源使用寿命, 并为设备的生产加工带来便利。

**关键词:** 非成像光学; 自由曲面反射器; 最优传输理论; 汽车前照灯

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230321

## 0 引言

相对于 LED 光源, 激光光源得益于其在元件尺寸和发光效率方面拥有的绝对优势, 被认为是最有潜力的下一代前照灯<sup>[1]</sup>。随着近几年新技术的应用和工艺的完善, 激光光源作为第五代汽车前照灯光源在汽车照明领域得到广泛研究, 并已取得初步应用。其中最具代表性的是宝马与欧司朗联合开发的激光大灯, 其照射距离可以达到更远的 600 m, 亮度则是 LED 的 5 倍<sup>[2]</sup>。

除了体积小、发光效率高, 激光光源还具有寿命长、亮度衰减低、热效率低等优点, 激光大灯的这些特点为汽车前照灯散热设计、汽车造型设计带来更高的自由度, 并且由于其在雨雾或者路况复杂的行驶条件下能获得较好的照明反馈<sup>[3-4]</sup>。随着激光远程激发荧光技术 (Laser Activated Remote Phosphor, LARP) 在汽车照明领域的发展<sup>[5]</sup>, 用于汽车前照灯的激光光源的价格逐年下降。未来, 激光大灯在驾驶安全方面扮演重要的角色已是大势所趋。

近年来, 部分高校和一些激光光源供应商致力于

激光前照灯的应用研究, 其中不乏各式的自由曲面光学结构。王翔等<sup>[6]</sup>基于三基色激光混光光源设计了满足国标的激光光源汽车远、近光灯; 朱江等<sup>[7-8]</sup>通过差分法求解 Monge-Ampere 方程, 设计了激光光源汽车前照灯自由曲面透镜; 赖军等<sup>[9]</sup>利用网格划分法设计了两款分别用于远光灯和近光灯的配光的自由曲面透镜; 曾翌等<sup>[10]</sup>针对反射式自由曲面汽车激光前照灯进行研究, 设计了基于自由曲面反射器的激光光源汽车前照灯。

然而, 综上所述的方法中, 除了求解 Monge-Ampere 方程可以获得连续的自由曲面外, 其余都使用了子面拼接或曲面阵列的方法来实现目标照度分布, 均存在设计的自由曲面不连续的问题, 为生产加工带来困难。而 Monge-Ampere 方程具有强烈的非线性, 求解极为困难。此外, 利用这些方法设计的反射器, 其能量利用率普遍较低, 其中最高值仅为 81%。

因此, 为解决激光前照灯的光学结构设计困难且能量利用率低的问题, 文中基于改进的球面最优传输的反射器设计方法<sup>[11]</sup>设计出面型连续平滑、具有较高能量利用率的自由曲面前照灯(含近光灯和远光

收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-05-10

基金项目: 吉林省教育厅项目 (JKH20210821KJ)

作者简介: 蒋露松, 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 陈宇, 男, 副教授, 博士, 主要从事光学系统设计方面的研究。

灯)反射器。在符合 GB 25991—2010 的配光要求的前提下,分别将汽车前照灯的能量利用率提升至 96.96% 和 97.80%,可以显著降低光源的功耗,减小汽车前照灯的散热需求,延长汽车前照灯的使用寿命。

## 1 设计原理及方法

### 1.1 自由曲面反射器设计流程

自由曲面反射器设计的算法流程图如图 1 所示。

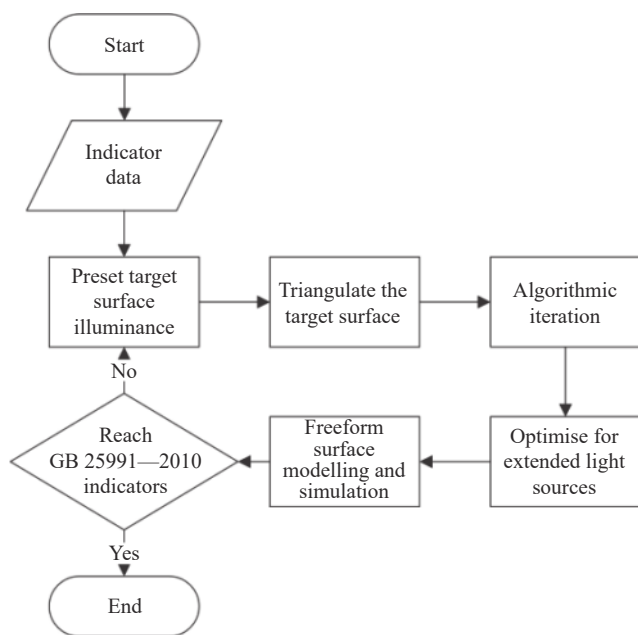


图 1 算法流程框图

Fig.1 Block diagram of the algorithm flow

首先根据指标数据,如目标面测试点位置、光照度要求等,预设目标面的光照度分布。然后对目标面进行三角剖分,用离散的目标点照度代替连续的目标面照度。使用球面最优传输的反射器设计算法迭代,根据目标点的照度,以及光源的位置和方向,反推出反射器上对应点的坐标,从而得到反射器的面型。接下来针对扩展光源进行优化,根据光源的大小和发光特性,对反射面采样点位置进行微调,以减少其对目标面光照度的影响。最后进行自由曲面建模,将反射器上的离散点拟合成一个连续的自由曲面,并进行光学仿真,验证算法的可靠性。

分析光学仿真的结果,判断是否满足 GB 25991—2010 的照度指标要求,若不符合,则需回到预设目标面照度的流程,对预设的目标面照度进行微调,重新

进行以上流程。

### 1.2 最优传输理论

反射器设计实际上是将光源的照度空间分布转换为目标面上的照度空间分布。这个问题可以归结为一个三维空间中的 Monge-Ampere 问题<sup>[12]</sup>。Monge-Ampere 问题是经典的最优传输问题,文中使用最优传输方法<sup>[13]</sup>求解该问题。

最优传输问题用数学语言可描述为:对于两个完备可分的度量空间  $X, Y$ , 以及分别定义在  $X, Y$  上的测度  $\mu, \nu$ , 给定运输成本函数  $c: X \times Y \rightarrow [0, +\infty]$ , 寻找最优的运输方案, 以最小的运输成本将空间  $X$  测度地运输到空间  $Y$  上。

最优传输问题可以简单地理解为:对于两个不同的概率分布及对应的运输成本函数,寻找实现分布变换并且总传输成本最小的运输方案。求解最优传输问题的方法即为最优传输方法,目前常见的最优传输方法除了文中使用到的几何变分方法,还有流体力学方法、数值方程方法等。

### 1.3 设计方法的几何表示

支撑椭球面算法<sup>[14-15]</sup>是最优传输理论在几何上的一种具体表现,该算法的凸优化性质决定了其在自由曲面设计方面具有确定的收敛解。文中在算法迭代步骤使用支撑椭球面算法,设计出初始的自由曲面反射器面型,图 2 为支撑椭球面法的二维示意图。

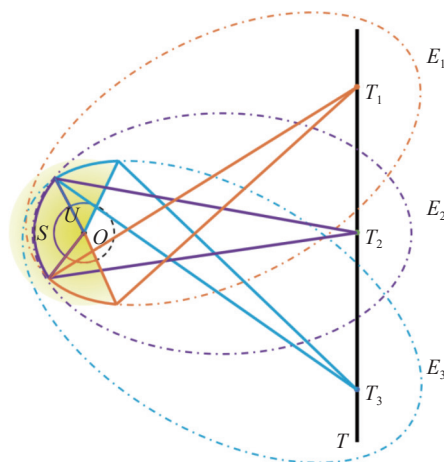


图 2 设计方法的二维示意图

Fig.2 Two-dimensional schematic of the design method

图中,  $E_i (i = 1, 2, \dots)$  为焦点位于原点  $O$ 、另一个焦点位于目标点  $T_i (i = 1, 2, \dots)$  的一系列旋转椭球面,

曲面  $S$  为所有旋转椭球面的支撑曲面,  $U$  为单位球面。其中, 曲面  $S$  和单位球面  $U$  上不同的颜色 (如图 2 中的橙色、紫色和蓝色) 代表反射至不同目标点的曲面子面及其在单位球面的投影区。点光源位于原点  $O$  处, 其辐射区域为图 2 中以  $O$  点为中心的黄色扇形, 由  $O$  点发出的光线经曲面  $S$  反射后, 分别落在目标点  $T_i (i = 1, 2, \dots)$  处, 在目标面上形成特定的照度分布。

因此, 若光源为各向照度均匀的点光源, 目标面上的各目标点的归一化照度等于对应的旋转椭球面子面在曲面  $S$  中的占比; 若光源为非均匀光源, 如朗伯光源, 则需要对曲面进行积分。为减小计算的复杂度, 文中以子面中心点的照度作为子面平均照度的近似替代。

如需增加  $T_i$  的归一化照度, 就要减小  $E_i$  椭球面的离心率, 使  $E_i$  面在曲面  $S$  中的占比增加, 从而增加  $T_i$  的归一化照度。在图 2 的基础上, 减小  $E_2$  椭球面的离心率, 增加  $T_2$  点归一化照度后的示意图如图 3 所示。最优传输反射器设计方法正是通过调整各个旋转椭球面的离心率来调整目标面的照度分布的。

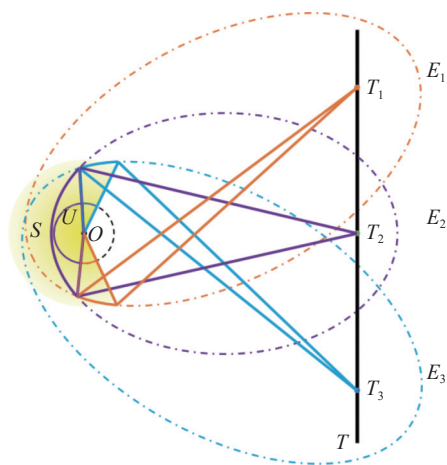


图 3 调整方法的二维示意图

Fig.3 Two-dimensional diagram of the adjustment method

为了在目标面上实现连续的目标照度分布, 需要增加目标面上的目标点, 用离散的目标点照度分布逼近连续的目标面照度分布。因此, 需要对目标面进行网格剖分, 在获得离散目标点的同时, 也能获取目标面之间的相邻关系。目标点的增加意味着旋转椭球面数量也随之增加, 同时也意味着构成曲面  $S$  的子面

数量增加, 曲面  $S$  作为所有旋转椭球面的支撑曲面, 其整体连续、子面光滑。因此, 随着子面数量的增加, 曲面  $S$  的整体光滑度也会增加。

因此, 目标面的剖分精度越高, 自由曲面越光滑, 目标面的照度越连续, 对目标面进行合适精度的网格剖分对于该设计方法最终是否能获得好的结构至关重要。

#### 1.4 目标照度及剖分网格的获取

为了确定最优传输离散目标点的目标照度, 需要知道目标面的照度分布。由于 GB 25991—2010 并未给出目标面上的理想照度分布, 关键的照度要求只针对数个测试点和区域。因此, 文中把法规给定的几个测试点和测试区域边界顶点的坐标和照度作为插值点的基准, 再使用薄板样条插值法<sup>[16]</sup> 获得整个目标面上的目标照度。使用薄板样条插值法可以避免龙格现象, 以得到平滑的插值曲面, 便于后续的自由曲面设计。

为了获得目标面的剖分网格, 文中使用 Delaunay 三角剖分算法获得目标面上的三角网格。另外, 球面最优传输的反射器设计方法对网格划分精度的要求很高, 然而网格数量的增加会导致算法单次迭代时间和迭代次数的增加, 从而导致算法耗时的增加。由于文中设计的目标面照度要求在明暗截止线附近剧烈变化, 在其他区域则较为均匀。通过对目标面进行不同密度的剖分, 使算法既能满足目标面具有清晰明暗截止线的设计要求, 又能缓解迭代耗时的增加。

由于在目标测度计算和目标网格剖分时使用了相同的空间分布, 最终得到的目标面光斑锐度会有一定程度的增加。但由于使用扩展光源会带来近似误差, 并且存在曲面采样精度有限等问题, 要根据仿真结果进行如图 3 所示的反馈优化。

#### 1.5 针对扩展光源的优化

在利用最优传输反射器设计方法确定各个旋转椭球面的离心率后, 以点光源位置为原点, 在其辐射区域内进行均匀采样。图 4 为自由曲面设计三维模型的二维示意图, 其中黑色虚线箭头表示采样光线。同时限制自由曲面反射器仅在光源的辐射区域内生成, 以便自由曲面反射器以最小的面型接收光源发出的光线。图中蓝色离散点是采样光线与各个旋转椭球面交点中离原点最近的点, 也是自由曲面反射器的

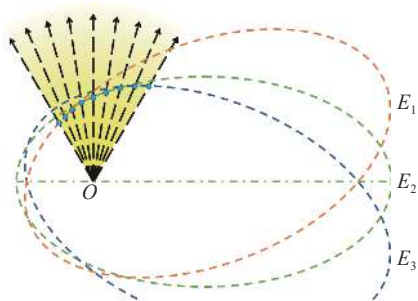


图 4 支撑面采样二维示意图

Fig.4 Two-dimensional diagram of the support surface sampling

采样点。最终可以通过散点插值或点云拟合的方法得到连续的自由曲面反射器。

文中使用的光源为圆形扩展光源,并非理想点光源,导致对迭代完成后获得的结构进行模拟仿真所得到的光斑与目标照度有着较大的差异,该差异一方面来源于光源的尺寸,另一方面与面型离散控制点的采集有关。增加曲面与光源距离,可以减小扩展光源的影响,而通过增加控制点的密度或直接使用参数化曲面构建自由曲面,则可以减小面型取样带来的影响。

将光线用光锥代替,便可得到扩展光源发出的光经过自由曲面任意一点反射后在目标面上形成光斑的位置和尺寸,可借此对自由曲面进行调整。图 5 为该三维模型的二维示意图。

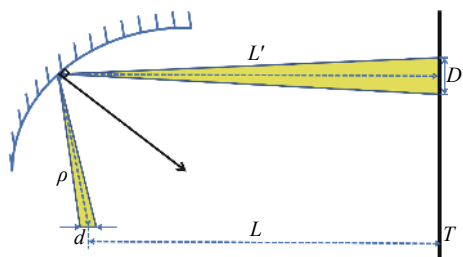


图 5 扩展光源光锥二维示意图

Fig.5 Two-dimensional diagram of the extended light source light cone

目标光斑的直径  $D$  可以近似等于  $L'd/\rho$ , 其中  $L$ 、 $L'$  分别为光源和反射器到目标面的距离;  $d$  为光源的直径;  $\rho$  为自由曲面上一点到光源中心的距离。

由于文中研究的结构尺寸远小于其到目标面的距离,  $L'$  可以用  $L$  近似替代, 得到的光斑直径  $D$  的公式为:

$$D = Ld/\rho \quad (1)$$

光斑中心的坐标等于目标面上对应的三角剖分顶点坐标。

图 6 为使用扩展光源时的支撑面采样示意图。采样方式与图 4 类似, 黑色虚线箭头代表从扩展光源的中心发出的一条采样光线, 点  $P_i (i = 1, 2, \dots)$  为该采样光线与旋转椭球面  $E_i (i = 1, 2, \dots)$  的交点, 其中点  $P_1$  为采样光线对应的采样点, 扩展光源发出的光经过采样点反射后, 在目标面  $T$  上形成光斑。目标面  $T$  上的红色线段表示目标照度的下边界, 红线以上是照明区域, 以下是暗区。

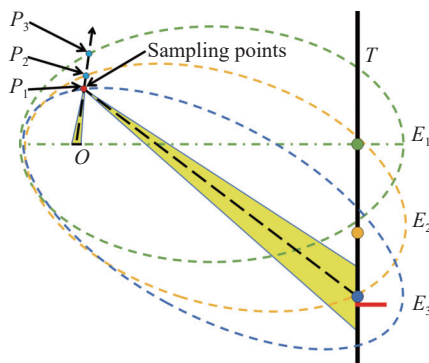


图 6 采用扩展光源的支撑面采样二维示意图

Fig.6 Two-dimensional diagram of support surface sampling with an extended light source

可以看出, 光斑的大小与扩展光源的大小成正比。如果光源是点光源, 光斑就会集中在目标面  $T$  上的一点。最优传输反射器设计方法是针对点光源设计的, 若使用扩展光源, 如图 6 所示, 部分光线会照射在红线以下的目标面上, 导致暗区照度增加。为了解决这个问题, 需要针对扩展光源进行优化, 以达到理想的照明效果。

为了避免扩展光源经某一采样点反射后形成的光斑进入暗区, 可以将采样点设置为该采样光线与各个旋转椭球面的第二个交点, 即离原点次近的点。如图 7 所示, 采样点从图 6 的  $P_1$  的位置调整为图 7 的  $P_2$  的位置, 使得反射光线不再照射到暗区, 实现了针对扩展光源的优化。

优化方法的具体算法实现如下: 依次求解每一条采样光线与所有旋转椭球面的交点坐标, 再判断扩展光源所发出的光束经这些点所处微面元反射后, 在目标面上形成的光斑是否进入暗区。将光斑进入暗区的交点设置在无穷远, 以实现将这些交点排除在自由曲面采样点之外的目的。

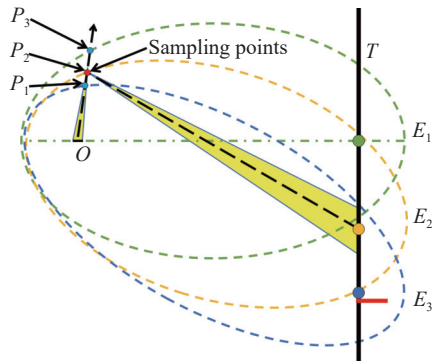


图 7 针对扩展光源的优化方法二维示意图

Fig.7 Two-dimensional diagram of the optimization method for the extended light source

## 2 自由曲面反射器设计

文中提出的自由曲面设计方法,适用于目标面任意光照度分布的自由曲面反射器设计。该方法能有效地避免使用扩展光源造成的光斑超出照明区域边界的问题,可以广泛应用于 LED 光源配光设计、激光光束整形和汽车车灯设计等领域。

文中使用该方法设计了汽车前照灯的近光灯和远光灯的自由曲面反射器,以验证该方法的有效性。

### 2.1 近光灯反射器设计

#### 2.1.1 设计指标

近光灯自由曲面反射器设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Tab.1 Design indicators

Item	Value
Diameter of light source/mm	1.2
Divergence angle of light source/(°)	60
Distance from the target surface to the light source/m	25
Distance from reflecting surface to the light source/mm	50

此次设计采用的光源是 OSRAM 公司设计生产的白色激光光源模组,使用蓝激光激发陶瓷荧光片转换白光的技术。产品的长度为 21.5 mm,口径为 12 mm。光通量可根据输入电流调节,标品最大光通量为 620 lm (电流 2.5 A 时)。

除文中所使用的激光光源之外,OSRAM 等厂商正积极研发适用于汽车照明的高亮度白色激光光源,目前,普遍采用蓝色单色光加黄色荧光粉片的方法来

制造白光<sup>[17-18]</sup>,可以得到发散角较大、角亮度均匀的光源,降低了自由曲面反射器设计的难度,但是,荧光粉热稳定性差<sup>[19]</sup>,而且存在高能激光击穿荧光片的风险,会产生一定的安全隐患。为了解决这些问题,此次设计使用的已封装测试的激光模组,无击穿风险。

#### 2.1.2 目标照度的获取

通过 1.4 节所示方法对目标面照度进行预设,根据 GB 25991—2010 规定,目标面为前照灯基准中心前 25 m 的垂直平面配光屏幕,实际基准中心应按照前照灯结构决定,但鉴于文中设计的反射面结构远小于前照灯到配光屏幕(前者约为后者的 1‰)的距离,因此文中忽略前照灯结构,将光源中心视为基准中心。

GB 25991—2010 设定的目标照度如表 2 所示,表中测试点集 A 中各点的位置如图 8 所示,其余点集的各点位置用横纵坐标表示,表中  $E_{50R}$  为 50R 的实测照度值。

插值点 A 为法规规定的测试点;插值点 B 为 IV 区

表 2 目标面测试点规定照度和理想照度

Tab.2 Specified and ideal illuminance at the target surface test point

Interpolation point set	Test points and test area/mm	Specified illuminance/lx	Preset illuminance/lx
A	HV	$\leq 0.7$	0.3
	B50L	$\leq 0.4$	0
	75R	$\geq 12$	17
	75L	$\leq 12$	10
	50L	$\leq 15$	12
	25L	$\geq 2$	8
	50V	$\geq 6$	15
	50R	$\geq 12$	16
	25R	$\geq 2$	8
	Zone I	$\leq 2 \cdot E_{50R}$	
Zone III	$\leq 0.7$		
	$\geq 3$		
B	(-2250, -750)		10
	(2250, -750)		10
	(0, -750)		12
	(-2250, -375)		8
C	(2250, -375)		13
	(2250, 0)		12
	(2250, 187.5)		8
	(250, -125)		0

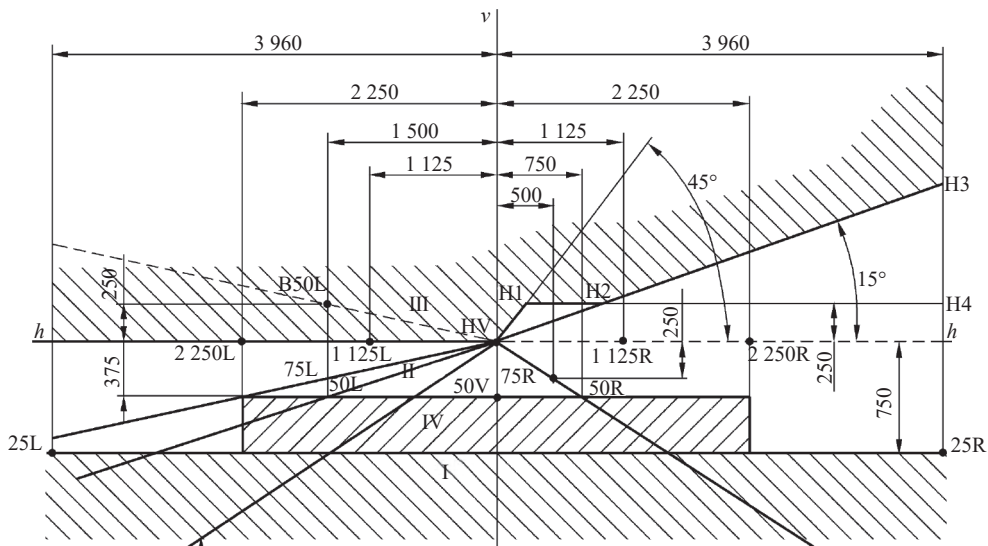


图 8 配光屏幕示意图

Fig.8 Light distribution screen diagram

的边界点,用于对IV区的照度进行预设;插值点C为II区照度的控制点,用于增加II区中HV-H2-H3线之下区域的预设照度,以增加配光屏幕的照明均匀度,增加前照灯配光曲线的平滑度;插值点D为测试点HV和测试点75R的中点,将其设置一个较小值可以增加HV点附近的明暗截止线的清晰度。

文中预设的控制点及其照度,可以根据需要进行适度调整,以使最终的照明结果满足设计要求。

将各插值点输入 Matlab,并使用 Matlab 的拟合工具箱,采用薄板样条插值法进行插值取样后得到的配光屏幕照度分布如图 9 所示。为了实现III区任何点处的照度值小于 0.7,在插值时除了表 2 所示的插值点,还在III区及明暗截止线处设置密集排列的多个插值点,照度值均预设为 0。由图 9 可见,III区的值被限制为相对较小的照度,以符合法规对前照灯不产生眩目的要求。

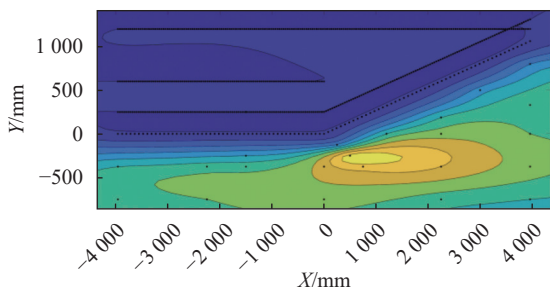


图 9 插值目标照度分布

Fig.9 Interpolated target illuminance distribution

### 2.1.3 目标面的三角剖分

将获得的目标照度归一化后再进行适当缩放,作为非均匀三角剖分的分布密度,然后据此得到的 Delaunay 三角剖分图如图 10 所示。

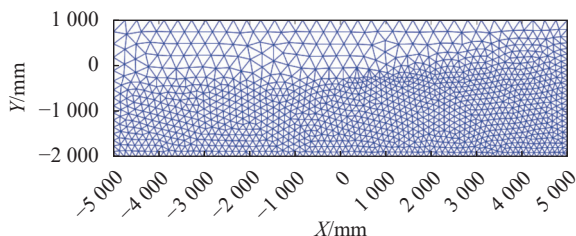


图 10 目标面剖分图

Fig.10 Diagram of target surface profile

目前实现不均匀三角剖分的方法有很多种,文中使用的是 Persson 提出并设计的名为 Distmesh 的网格生成器。

由于文中使用的自由曲面生成法会导致目标面上的三角剖分网格随着算法的不断迭代发生改变,如顶点的删除或边的翻转,并且剖分的密度也与其对偶的 Voronoi 图包络面积成正相关,所以,网格剖分的精度对迭代的速度和最终得到的结果产生较大的影响。因此在算法开始迭代前,得到一个合适的三角剖分网格对于该算法来说至关重要。

### 2.1.4 反射面模型构建及仿真分析

使用 1.1 节中所述的方法,通过数值计算软件

Matlab 进行编程并运算, 最终构建的自由曲面反射器如图 11 所示, 图 11(a) 为近光灯系统的示意图, 图 11(b) 为近光灯反射面的矢高分布图。反射面的具体参数如下: 反射面尺寸为 51.34 mm×50.78 mm×61.36 mm, 曲面的原点位于光源的 50 mm 远处, 反射面最大矢高小于 6 mm, 有利于生产加工。

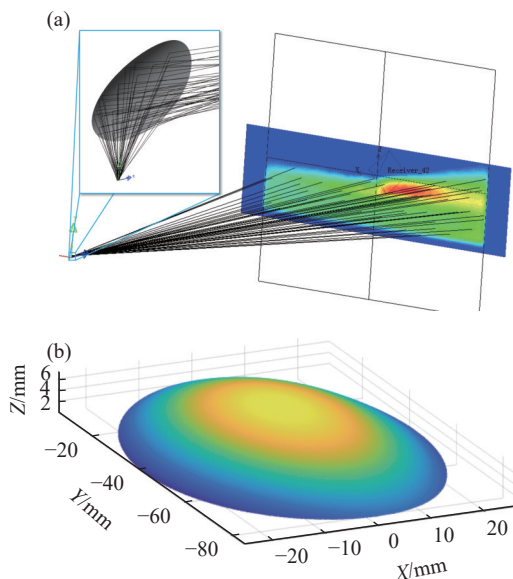


图 11 (a) 近光灯反射器示意图; (b) 近光灯反射面矢高分布图

Fig.11 (a) Diagram of the low beam reflector; (b) Sagittal height distribution of low beam reflective surface

在系统设计时, 如需进一步增加光源尺寸或减小光源与反射镜的距离, 会增强扩展光源尺寸对系统配光性能的影响, 导致目标面照明区的照度分布与预设照度分布偏差增大, 暗区照度上升, 明暗截止线的锐度下降。

使用 SolidWorks 对反射面进行实体建模, 并导入 Lighttools, 设置光源为直径 1.2 mm 的朗伯光源, 发散角设置为全角 60°, 运用蒙特卡洛法对自由曲面反射器进行总数为 2 500 万的光线追迹仿真, 得到 25 m 远处的目标面的照度分布如图 12 所示。此次仿真的峰值误差为 3.53%, 仿真结果具有较高可信度。

文中采用目标面上入射光线的总光通量与光源的总光通量之比来表示系统的能量利用率, 得到系统的能量利用率为 96.96%。

将仿真的网格结果导出并使用网格插值法获得如表 3 所示的各个测试点的照度, 测试点以及测试区域的照度均符合 GB 25991—2010 中对于近光灯的配

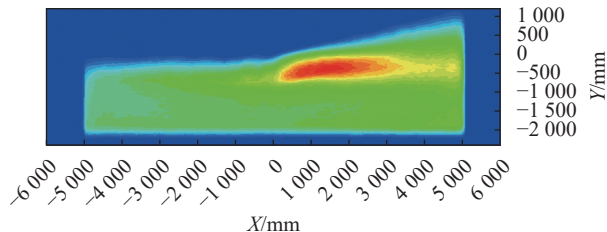


图 12 近光灯目标面光斑图样

Fig.12 Spot pattern of the target surface of a low beam

表 3 近光灯目标面测试点照度

Tab.3 Test spot illuminance on the target surface of a low beam

Test points and test area	Specified illuminance/lx	Preset illuminance/lx
HV	≤0.7	0.4665
B50L	≤0.4	0
75R	≥12	13.6567
75L	≤12	3.9907
50L	≤15	6.4047
50R	≥12	18.1695
50V	≥6	10.3166
25L	≥2	7.8913
25R	≥2	12.2983
Zone I	≤2·E <sub>50R</sub>	≤14.5161
Zone III	≤0.7	≤0.4991
Zone IV	≥3	≥5.8523

光要求。

## 2.2 远光灯反射器设计

采用相同的设计方法和流程, 设计满足 GB 25991—2010 照度指标要求的远光灯反射器结构。远光灯反射器的设计指标与近光灯相同, 都如表 1 所示, 但远光灯亮度要求更高, 单个光源无法满足。因此, 文中用三个相同的远光灯反射器组成阵列, 以达到法规的照度标准, 图 13 为反射器阵列的三视图和斜视图。

图 14 所示为设计远光灯时使用的目标面照度分布和三角剖分图。远光灯在配光屏幕上无需清晰的明暗截止线, 为了简化计算, 文中采用均匀网格剖分。

构建的自由曲面反射器如图 15 所示, 图 15(a) 为远光灯系统的示意图, 图 15(b) 为反射面的矢高分布图。单个反射器尺寸为 51.84 mm×52.00 mm×61.25 mm, 反射器阵列尺寸为 155.84 mm×52.00 mm×61.25 mm,

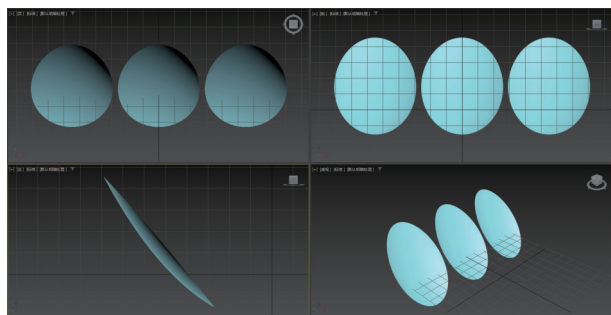


图 13 反射器阵列示意图

Fig.13 Reflector array diagram

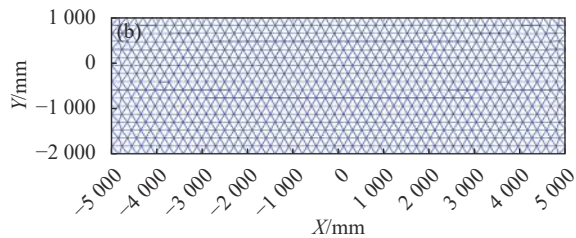
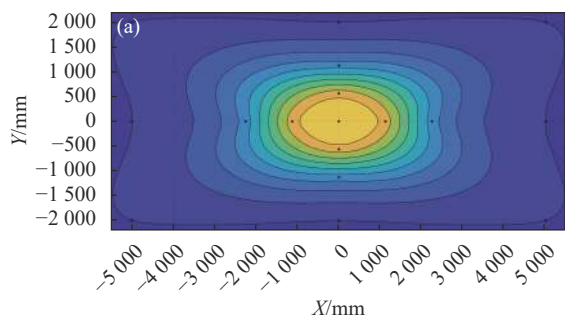


图 14 (a) 插值目标照度分布; (b) 目标面剖分图

Fig.14 (a) Interpolated target illuminance distribution; (b) Target surface profile

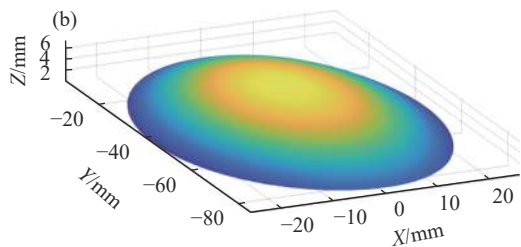
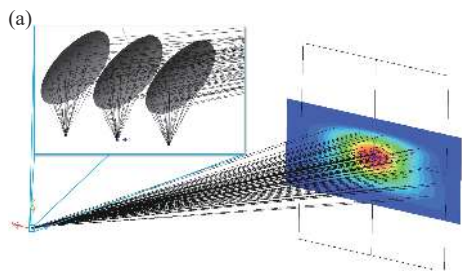


图 15 (a) 远光灯反射器示意图; (b) 远光灯反射面矢高分布图

Fig.15 (a) Diagram of the high beam reflector; (b) Sagittal height distribution of high beam reflective surface

反射面最大矢高小于 6 mm, 有利于生产加工。

图 16 为目标面的照度分布, 仿真结果的峰值误差为 3.26%, 设置的光源总光通量为前照灯仿真的 5 倍, 系统的能量利用率为 97.80%。

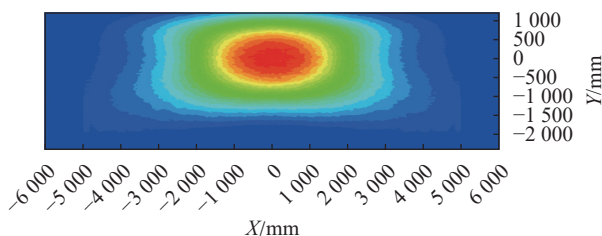


图 16 远光灯目标面光斑图样

Fig.16 Spot pattern of high beam target surface

表 4 列出了配光屏幕上各测试点的照度, 其中测试点以及测试区域的照度均满足 GB 25991—2010 中远光灯的配光要求。

表 4 远光灯目标面测试点照度

Tab.4 Test spot illuminance on the target surface of a high beam

Test points and test area	Specified illuminance/lx	Preset illuminance/lx
$E_{max}$	$\geq 48$ and $\leq 240$	120.39
HV	$\geq 0.8E_{max}$	117.15
HV to 1 125L and R	$\geq 24$	$\geq 100.87$
HV to 2 250L and R	$\geq 6$	$\geq 47.38$

### 3 结论

文中介绍了一种改进的基于球面最优传输理论<sup>[20]</sup>的自由曲面反射器设计方法。该方法可以在目标面上形成指定的照度分布, 这意味着该设计方法不仅适用于汽车前照灯照明, 还可以用于当前流行的汽车投影。文中针对扩展光源进行了优化, 有效地避免了使用扩展光源造成的光斑超出照明范围的问题, 使其在激光整形领域也具有适用性。

为了证明该方法的有效性, 文中设计了适用于激光前照灯(含近光灯和远光灯)的自由曲面反射器, 其反射面为旋转椭球面族的支撑面, 该反射面整体连续且光滑, 便于生产加工。除了满足 GB 25991—2010 的配光要求外, 配光屏幕的照度分布更加均匀, 结构的能量利用率分别达到 96.96% 和 97.80%, 减少了汽车



前照灯的能耗,符合未来汽车行业对节能、环保、能源高效利用的发展新趋势。由于光源所需功率的降低,散热问题可以得到很好的解决,光源模块的使用寿命也能得到有效延长。

### 参考文献:

- [1] Ling Ming, Zhang Jianwen, Huang Zhongrong. Development of automotive light and lighting [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, 24(4): 106-112. (in Chinese)
- [2] Chen Liang, Wang Jianchao, Pan Yong, et al. Research progress and key technology analysis of laser illumination for automobile [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(6): 1044-1048. (in Chinese)
- [3] 张越, 宋佳玲, 陆一凡. 汽车前照灯的发展与应用[J]. 光源与照明, 2021(161): 45-47.
- [4] Stephan Berlitz, 刘波. LED之后会出现什么技术?[J]. *汽车零部件*, 2010(6): 33-35.
- [5] Xu Liqiang. Study on new white light source base on LARP technology[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015. (in Chinese)
- [6] Wang Xiang. Study on free-form optical system for laser vehicle headlamp[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] 朱江. 基于激光光源的汽车前照灯研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [8] Zhu Jiang, Xing Haiying, Gao Tiecheng, et al. Design of LD headlight high-beam freeform lens [J]. *Optical Technique*, 2016, 42(4): 367-370. (in Chinese)
- [9] Lai Jun. Optical system for automobile headlamp based on laser remote activated phosphor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] Zeng Yi. Illumination system design of automotive laser headlight based on freeform surface [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] Xue Longjiang. Algorithm and implementation of optimal transport based reflector design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] Vladimir Oliker, Elsa Newman. The energy conservation equation in the reflector mapping problem [J]. *Applied Mathematics Letters*, 1993, 6(1): 91-95.
- [13] Gu Xianfeng, Luo Feng, Sun Jian, et al. Variational principles for Minkowski type problems, discrete optimal transport, and discrete Monge –Ampère equations [J]. *Asian Journal of Mathematics*, 2016, 20(2): 383-398.
- [14] Kochengin S A, Oliker V I. Computational algorithms for constructing reflectors [J]. *Computing and Visualization in Science*, 2003, 6(1): 15-21.
- [15] Fournier F, Cassarly W, Rolland J. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5295-5304.
- [16] Bookstein F L. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(6): 567-585.
- [17] Lin Renwang, Hou Yuantao. Research on the safety of automobile laser-assisted high beam [J]. *China Auto*, 2021(355): 26-32. (in Chinese)
- [18] Yang Zhi, Pang Hongli, Jin Guanyang, et al. High beam boost with high luminance white laser source [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2018, 29(5): 78-84. (in Chinese)
- [19] Tao Shixu. Study of high performance phosphor-in-glass design and laser lighting characteristics for automotive headlights [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [20] Tan Zhongheng. Spherical area-preserving parameterization method based on optimal mass transportation [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)

## Design of freeform reflector for laser light source automotive headlight

Jiang Lusong, Chen Yu\*, Hai Xiaohua, Peng Liwei

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

### Abstract:

**Objective** Laser light source is a new type of automotive headlight light source that is efficient, compact, and long-lasting. It has attracted wide attention and research in recent years. It can provide longer and brighter illumination distance and brightness, as well as higher design freedom for heat dissipation and styling. Currently, some universities and research institutions have designed and optimized the freeform optical structure of laser

headlights. However, most of the existing methods adopt sub-surface stitching or surface array to achieve the target illuminance distribution, which leads to discontinuity of the freeform surface and increases the production processing difficulty. In addition, the reflectors designed by the existing methods have low energy utilization rate. Aiming at the problems of difficult optical structure design and low energy utilization rate of laser headlights, a new freeform reflector design method based on spherical optimal transport theory is proposed, and a freeform reflector suitable for laser headlights (including low beam and high beam) is designed using this method.

**Methods** The algorithm flow chart of freeform reflector design is shown (Fig.1). First, according to the coordinates and illuminance of the test points and boundary vertices of the test area given by the regulation GB 25991—2010, the target illuminance on the target surface is obtained by using thin plate spline interpolation method. Then, different density Delaunay triangulation is performed on the target surface. A series of rotating ellipsoids are obtained with the origin and triangulation vertices as focal points (Fig.2), which are used to form the freeform surface. Then, the reflector design algorithm based on spherical optimal transport is used to iterate and obtain the eccentricity of these rotating ellipsoids. According to the size and luminous characteristics of the light source, the area of reflection light on the target surface is determined (Fig.5). If there is light irradiating to the dark area, the position of the sampling point is adjusted (Fig.7) until no reflected light can irradiate to the dark area. Finally, SolidWorks is used to model the reflection surface entity, fit it into a continuous freeform surface, and import it into Lighttools for optical simulation to verify the reliability of the algorithm.

**Results and Discussions** Simulation is carried out for low beam and high beam respectively. The light source used in simulation is a Lambert light source with a diameter of 1.2 mm and a divergence angle of  $60^\circ$  full angle. The simulation results show that the illuminance distribution on the distribution screen meets the regulation requirements, and the reflection surfaces are smooth and continuous. The illuminance of test points on low beam target surface is listed (Tab.3). The energy utilization rate of low beam system is 96.96%, and a clear bright-dark cutoff line is realized (Fig.12). The illuminance of test points on high beam target surface is listed (Tab.4). The high beam reflector is an array of three identical reflection surfaces. The energy utilization rate of high beam system is 97.80%.

**Conclusions** This paper proposes an improved reflector design method and designs a freeform reflector for laser headlights (including low beam and high beam). The reflector can not only form a distribution that meets the regulation GB25991—2010 requirements, but also has a smooth surface shape and high energy utilization rate. It can effectively reduce the power consumption of automotive headlights, improve the heat dissipation performance of automotive headlights, extend the service life of laser light sources, and facilitate equipment production and processing. It conforms to the new development trend of energy conservation, environmental protection and efficient use of energy in future automotive industry.

**Key words:** non-imaging optics; free-form reflector; optimal transmission theory; automotive headlight

**Funding projects:** Education Department of Jilin Province (JJKH20210821KJ)