

多曲面反射体的计算机辅助设计及优化*

杨波¹ 刘一超² 王涌天¹

(1 北京理工大学光电工程系,北京 100081)

(2 北京华瑞通科技有限公司,北京 100081)

摘要 研究了自由曲面反射式照明系统的设计理论和方法. 根据反射器的尺寸、位置以及配光要求按点光源设计得到曲面型值点初始坐标后,将双三次B样条曲面引入照明系统的设计,反算出控制顶点. 给出了空间任意一条入射光线与反射器区块的交点及其曲面法线向量的求法,为了提高光路追迹的效率,针对多曲面反射体给出了一种快速判断相交区块的算法. 探讨了用阻尼最小二乘法对B样条曲面反射器进行优化设计的方法,通过优化运算修正控制顶点Z轴坐标,使得曲面在使用扩展光源时光形分布尽可能满足设计要求.

关键词 应用光学;自由曲面反射器;计算机辅助设计;均匀B样条曲面;光线追迹;控制顶点;阻尼最小二乘法

中图分类号 O439;TP39

文献标识码 A

0 引言

传统的汽车前照灯由三部分构成,分别为光源、反射器和配光镜(车灯面罩),为了便于加工,反射器面型通常取为抛物面,配光镜是由一系列透镜及棱镜组合而成,用这些折光单元来实现规定的照明光型. 随着流线型车身逐渐受到人们的青睐以及加工技术的进步,目前新型轿车普遍采用多曲面反射体车灯^[1,2],此类车灯的反射器由多块自由曲面拼接构成,反射器集反射和配光两大功能于一体,免除了原来配光镜的作用,使之变为仅起保护和装饰作用的透明薄面罩. 这类车灯的优点主要在于消除了组合透镜式配光镜产生的菲涅尔效应从而提高了光能利用率以及不要求车灯前面罩垂直于照明方向,可以有较大的倾角以配合流线型车身的设计. 但是由自由曲面构成的多曲面反射体的设计难度很大,必须采用计算机进行辅助设计^[3,4,6,7],本文介绍我们在研制自由曲面反射器CAD软件方面取得的初步成果.

1 自由曲面反射器的描述

为了实现照明系统初始结构的自动确定,用理想的点光源近似实际光源,根据反射器的尺寸给出其在XY平面内的分区图,并对每个区块划分网格,可以求出各网格结点的X、Y坐标. 根据反射器的尺寸、位置以及配光要求,用光路追迹和数值积分相结合的算法自动计算出各网格结点的Z坐标. 反射器各个区块上这些网格结点称为曲面的型值点,

由这些型值点可以反算出双三次均匀B样条曲面的控制顶点,这样就得到了近似满足照明光型要求的自由曲面(多曲面)反射器面型的各个初始参数.

根据B样条曲线曲面的理论^[5],一片双三次B样条曲面片由16个控制顶点定义,用矩阵表示的曲面方程为

$$P(u, w) = UBVB^T W^T \quad (1)$$

其中控制顶点矩阵

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} \end{bmatrix}$$

U和W为参数矩阵

$$U = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1]$$

$$W = [w^3 \quad w^2 \quad w \quad 1]$$

对于双三次均匀B样条曲面,常量矩阵

$$B = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

当u和w在[0,1]上遍历时,就可以得到一个双三次B样条曲面片. 求控制顶点的过程称为B样条插值曲面的反算,构造一个3×3次B样条曲面插值给定阵列的数据点 P_{pq} ($p=0,1,\dots,m;q=0,1,\dots,n$),求曲面控制顶点的过程可以转化为两阶段的曲线反算过程. 先对所有n+1列空间点列分别做一元三次B样条插值,得到m+3行空间点列,每行有n+1个点,然后对这m+3行空间点列按同样的方法每行再做一元3次B样条插值,对于每一行又得到n+3个空间点,从而可以计算出曲面所有的控制顶点 V_{ij} ($i=0,1,\dots,m+2;j=0,1,\dots,n+2$).

*国家自然科学基金资助项目(60378023,60025513)

Tel:010-68912565 Email:wyt@bit.edu.cn

收稿日期:2004-05-12

用我们开发的程序对一个汽车头灯的近光灯反射器进行了设计,其分块数目为 81,得到的反射器曲面如图所示,图 1 为反射器在 XY 平面分区图,图 2 为反射器的俯视图.

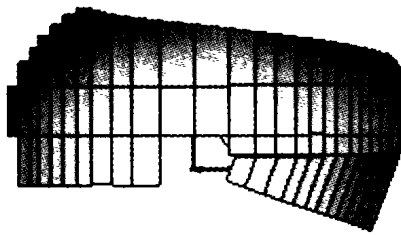


图 1 反射器 XY 平面分区图
Fig. 1 Division of reflector in XY plane



图 2 近光灯反射器曲面俯视图
Fig. 2 Top view of the low beam reflector

2 B 样条曲面的光路追迹算法

为了评判反射器的性能,必须进行非顺序光路追迹. 首先对光源进行建模,用圆柱面光源模拟实际光源的灯丝,使用 Monte-Carlo 方法随机产生空间入射光线的起始点坐标和方向余弦. 光路追迹的关键在于求解入射光线与自由曲面反射器的交点以及该点上曲面的法线. 为此提出了一种求交点的迭代算法. 如图 3, 区块 $ABCD$ 是空间的一块 B 样条曲面,在 XY 平面内的投影为矩形,空间任意一条直线 l 与该块曲面在 I 点相交, E 、 F 两点分别在曲面的边界曲线 AB 、 CD 上, G 、 H 都在直线 l 上,且 E 、 G 两点在 XY 平面内投影重合, H 、 F 两点在 XY 平面内投影也重合.

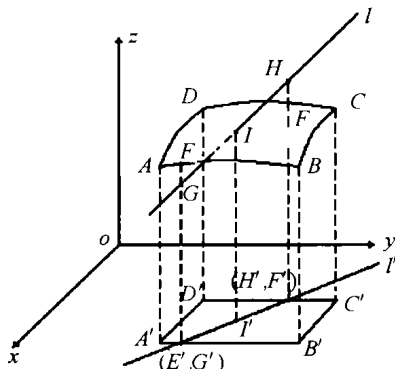


图 3 空间直线与一块 B 样条曲面相交示意图
Fig. 3 Ray intersection with a segment in 3D space

如图 4, 交点 I 定位于过 E 、 G 、 H 、 F 的平面与曲面的交线上. 连接 E 、 F 的直线交线段 GH 于 K_1 点,过 K_1 点做平行于 Z 轴的直线交曲面于 I_1 点,求出 I_1 点的 Z 坐标,然后求出 K_1 与 I_1 的 Z 坐标差值 Δz_1

$= z_{k_1} - z_{i_1}$, 于是连接 I_1 、 F 交 GH 于 K_2 点,过 K_2 做平行于 Z 轴的直线交曲面于 I_2 , 求出 $\Delta z_2 = z_{k_2} - z_{i_2}$, 以此类推, 分别得到 I_3 、 $I_4 \dots$ 各点, 以及对应的 Z 坐标差值 Δz_3 、 $\Delta z_4 \dots$, 逐次逼近 I 点, 直至第 j 次的 $\Delta z_j \leq \epsilon$, ϵ 是预先设定的精度值, 则 I_j 点的坐标即为 I 点坐标的近似解, 该方法收敛速度很快, 一般只需要几次迭代即可求得满足精度要求的解.

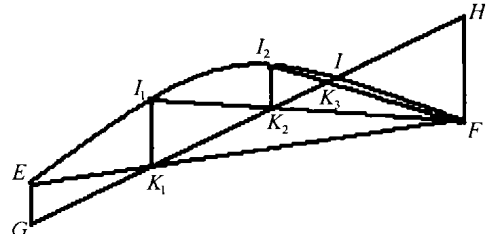


图 4 求交点的迭代逼近法示意图
Fig. 4 Iterative process for coordinate calculation of intersection point

按上述过程求得入射光线与区块的交点 I 以后, 决定 I 点坐标的双三次均匀 B 样条曲面参数 u_i 、 w_i 也可以求出. 计算反射光线的走向时还要求出曲面在该点处的法线向量 N , 由双三次均匀 B 样条曲面表达式 (1), 可以推出

$$N = A \times B \tag{2}$$

式中

$$A = \frac{\partial P(u, w)}{\partial u} = U' B V B^T W^T$$

$$B = \frac{\partial P(u, w)}{\partial w} = U B V B^T W'^T$$

$u, w \in [0, 1]$ (3)

得到交点处的曲面法线向量以后, 就可以按照一般的光路追迹方法求得反射光线的方程, 进一步计算反射光线与测试屏交点坐标.

以上论述了判断一条入射光线与空间一个区块交点近似解的方法, 而一个实用的多曲面反射体通常都有数十个区块构成, 在求交点以及法线时必须首先找到与入射光线相交的区块, 因此如果能够快速找出相交区块, 势必会提高光路追迹的效率, 为此提出一种快速判断相交区块的算法: 设区块总数为 N , 为精确起见每个区块沿其四条边界曲线上均匀选取 M 个边界点, 求出每个边界点与光源连线即边界光线的方向向量记为 $(E_{mn} = E_{xmn} \hat{i} + E_{ymn} \hat{j} + E_{zmn} \hat{k}, m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N)$, 每一个区块的边界光线方向余弦的平均值可以求出

$$\overline{E_{xn}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{xmn} \quad \overline{E_{yn}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{ymn}$$

$$\overline{E_{zn}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{zmn} \quad (n = 1, \dots, N) \tag{4}$$

再求出入射光线方向余弦 (I_x, I_y, I_z) 与每个区块边界方向余弦平均值的差值

$$\Delta_n = |I_x - \overline{E_{xn}}| + |I_y - \overline{E_{yn}}| + |I_z - \overline{E_{zn}}|$$

$(n = 1, \dots, N)$ (5)

将这些差值按大小排序,一般来说绝大多数入射光线与具有最小的 Δ 值的区块相交,如果无交点,则考虑 Δ 值次小的区块,如果还是不相交,认为该入射光线与整个反射器不相交,经实验验证该方法显著提高了光路追迹效率而且不会丢失与反射器相交的入射光线.

用上述算法对第 2 部分设计得到的反射器进行光路追迹,结果如图 5,所用的光源为长 5.5 mm、半径 0.5 mm 的圆柱面光源,追迹光线数目为 1,000,000 条,到达 25 m 外垂直 Z 轴放置的宽 8 m、高 4 m 的测试屏上的光线数目约占总数目的 35%,可以看到光型基本符合要求,在配置为奔腾四代 1.5 GHz 的 CPU 和 256M 内存的计算机上只用了 142 s.

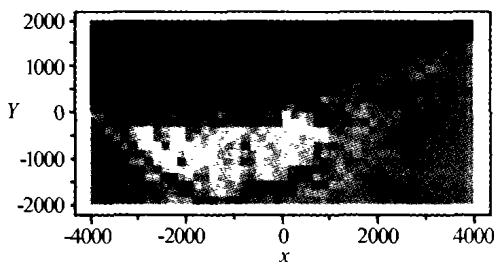


图 5 近光灯配光结果伪彩图
Fig. 5 Illumination distribution produced by the low beam reflector

3 自由曲面反射器的优化设计

实际所用的光源相对于反射器而言一般不能看成是点光源,而是有一定几何尺寸的扩展光源. 按点光源设计得到的反射器在使用扩展光源时部分区块在测试屏上得到的光斑尺寸会大于设计期望值,设计者通常是用试错的办法修改反射器在 XY 平面的分区图或该区块对应的光斑位置、尺寸等参数然后重新设计,为了减少设计人员的工作量并且提高自动化程度,我们尝试用阻尼最小二乘法对反射器曲面进行了优化. 将控制顶点 Z 轴坐标作为优化变量,在光源以及反射器上均匀选取一些点,把发自光源上的采样点并入射到反射器上采样点的光线称为特征光线,计算每条特征光线在测试屏上的交点与期望位置点的距离偏差,并以这些偏差构造评价函数. 特征光线概念的应用,使得我们可以通过为数不多的光线的追迹,了解整个反射器的性能,评价函数的计算变的比较容易,从而使得对反射器的面型进行优化成为可能. 在用扩展光源的几何中心点作为点光源设计得到曲面控制顶点的初始坐标以后,通过优化运算修正曲面的控制顶点参数,使得反射器在使用扩展光源时的光形分布尽可能满足设计要求. 根据阻尼最小二乘法的理论,当系统评价函数的改进量为 ΔF 时,系统自变量的变化量矩阵为 ΔX ,有

$$\Delta X = (A^T A + pI)^{-1} A^T \Delta F \tag{6}$$

式中 A 为 阻尼最小二乘法中评价函数随变量变化的一阶导数矩阵, p 为 阻尼因子, I 为 单位矩阵. 优选阻尼因子 p , 求出相应的解向量, 得到一个评价函数比原始系统小的新系统, 对新系统重新计算导数矩阵 A , 这样不断迭代直到找到最优解.

用一块 B 样条曲面反射器做测试,反射器在 XY 平面内的投影为一个 60 mm × 60 mm 的以坐标轴为对称轴的正方形,反射器的中心距光源中心在 Z 轴方向距离约 50 mm,按光源中心点设计要求该反射器在 25 m 远的垂直于 Z 轴放置的测试屏上产生一个中心位置在 (0,0), 宽高度都为 2000 mm 的正方形光斑. 追迹的光线数目都为 1,000,000 条,图 6(a) 为由扩展光源中心点设计得到的反射器在使用点光源时测试屏上得到的照度伪彩图,可以看到光斑形状位置都比较理想. 同样的反射器当光源换为直径 1 mm、长度 10 mm 的圆柱面光源时,光斑变为图 6(b) 所示形状,不仅超出了期望的区域,而且发生了明显的变形. 对优化得到的反射器重新追迹光路,测试屏上光斑如图 6(c) 所示,光斑的形状和位置都基本满足要求,证明了优化是成功的,图 6(d) 为反射器模型. 三次光路追迹在测试屏所在的平面上接收到的光线数目大致相等,约 540,000 条,证明光斑分布的变化确实是通过反射器形状的改变从而导致光路发生改变而不是通过去除“多余”的光线(例如使反射器远离光源,从而使接收到的光线数目减少)的方式实现的. 优化过程总共迭代了 17 次即得到最终结果,在配置为奔腾四代 1.5 GHz 的 CPU 和 256 M 内存的计算机上只用了 24 s. 在对诸如车灯反射器此类的由多块自由曲面

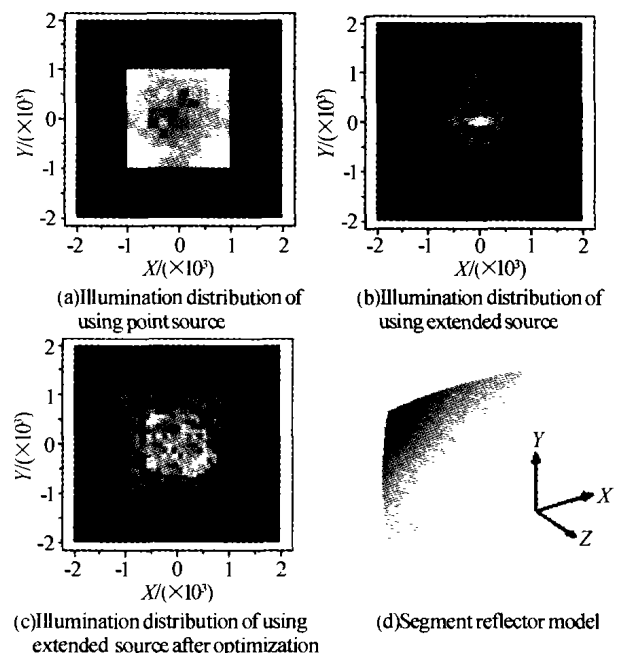


图 6 光能要求均匀分布时优化前后测试屏光斑分布图
Fig. 6 Illumination results of a segment reflector before and after optimization

连接构成的反射器的优化过程中,每个区块针对扩展光源分别进行优化设计,从而得到满足设计要求的最终反射器。

4 结论

本文针对多曲面反射体这种复杂照明系统器件的设计提出了一套系统的解决方案,使用双三次均匀 B 样条曲面作为反射器的面型,得到曲面的型值点坐标以后反算出控制顶点坐标。给出了空间任意一条入射光线与双三次均匀 B 样条曲面的交点以及交点处曲面法线向量的求法。我们成功地将阻尼最小二乘法引入照明系统设计,对反射器曲面进行了优化,有助于解决按照点光源设计得到的反射器在使用扩展光源时光斑的扩散问题。

参考文献

- 1 Neumann R. Improved low beam by use of segmented headlamp systems. *SAE Technical Paper*, 1987, **870063**: 1248 ~ 1262
- 2 Erickson G A, Allen P J, Tuck R G. Variable curvature headlamp reflector parametric analysis. *SAE Technical Paper*, 1991, **910820**: 1123 ~ 1140
- 3 Rabl A, Gordon J M. Reflector design for illumination with extended sources; the basic solutions. *Applied Optics*, 1994, **22**(25): 6012 ~ 6021
- 4 Shatz N, Bortz J, Dassanayake M. Design optimization of a smooth headlamp reflector to SAE/DOT beam-shape requirements. *Proc SPIE*, 1999, **3781**: 135 ~ 154
- 5 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 北京: 科学出版社, 2000. 88 ~ 136
Zhu X X. Representations of Freeform Curves and Surfaces. Beijing: Science Press, 2000. 88 ~ 136
- 6 王谦, 何赛灵. 反射式液晶显示光学的理论计算. 光子学报, 2001, **30**(4): 410 ~ 416
Wang Q, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 410 ~ 416
- 7 刘江, 刘承宜, 杨友源, 等. 用于动物细胞和组织培养的新型 LED 生物光源系列. 光子学报, 2004, **33**(2): 151 ~ 154
Liu J, Liu C Y, Yang Y Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 151 ~ 154

Automatic Design and Optimization of Segmented Free Form Reflector

Yang Bo¹, Liu Yichao², Wang Yongtian¹

¹ Department of Opto-electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

² Beijing Huaruitong Science & Technology Co. Ltd., Beijing 100081

Received date: 2004-05-12

Abstract The design theory and method for illumination systems with free form reflectors are studied. The coordinates of the initial shape points on the reflector are obtained by raytracing from a point source according to the reflector size, position and illumination requirements. Uniform bicubic B -spline surfaces are used to describe the shape of the reflector, and the control point coordinates are calculated by equation solving. An iterative method is developed to calculate the coordinates of the intersection point of an incident ray with a B -spline surface in 3D space. Formulae are given to calculate the direction cosines of the surface normal at the intersection point. For segmented reflectors, a method is presented to rapidly determine the segment with which the incident ray strikes. The damped-least-squares method is used to optimize the B -spline surface reflector. The Z -coordinates of the control points are adjusted through the optimization, so that the light distribution generated by the reflector with a real (extended) source meets the design requirements.

Keywords Applied optics; Free form reflector; Computer-aided design; Uniform bicubic B -spline surfaces; Ray-tracing; Control points; Damped-least-squares method



Yang Bo received his B. Sc in measurement and control technology & instruments from Beijing Institute of Technology in 2000. He is currently pursuing his doctoral studies at Department of Opto-electronic Engineering of Beijing Institute of Technology. His research interests are CAD of optical systems especially illumination systems. He is a member of SPIE.