

产生多向准直光束的自由曲面反光镜设计

钱伟 杨波

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 在大地测量领域中,经常会遇到需要产生360°环形准直光束的情况,目前采用的方案是将半导体激光器光束准直,准直后激光束垂直入射到45°圆锥面,经圆锥面反射后形成环绕圆锥面的360°环形出射光束。为了解决当前方案结构复杂、装调不便等问题,研究设计了一种自由曲面反光镜,使得整个光学系统仅由半导体激光器和反光镜组成。先将光源当成理想点光源,通过微分几何分析得到自由曲面离散点坐标,继而拟合成自由曲面面型,最后利用软件根据实际光源尺寸大小进行优化设计。仿真结果表明,在半导体激光器发散角为20°、发光面半径为50 μm、焦距为30 mm的情况下,在10 m位置能得到亮度均匀、谱线宽度仅为30 mm的准直光束。

关键词 光学设计;自由曲面反光镜;准直光束;离散点;非成像光学

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.012201

Free-Form Reflector Design for Muti-Direction Collimated Beam

Qian Wei Yang Bo

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract In the field of geodesy, it is common that engineers need to produce 360° circular collimated beam. Now, the scheme is collimating beam from semiconductor laser firstly. Then, projecting the collimated beam to a cone with a inclination of 45° and 360° circular collimated beam comes out. To solve existing problems such as complex structure, inconvenient installation and so on, a design of free-form reflector is proposed to make the whole optical system consist of semiconductor laser and reflector only. The first step is calculating discrete coordinates of free-form by establishing a differential equation in the case of assuming the source to a point source. Then fitting to a free-form surface with the discrete coordinates as above. At last, carrying out a optimization design in the software according to the actual size of source. Then the free-form surface will be obtained with the discrete coordinates as above. Finally, lighttools is used to optimize the optical system according to actual size of light source. The simulation reveals that semiconductor laser with 20° divergence, 50 μm radius and 30 mm focus can obtain uniform beam of 30 mm width 10 m away.

Key words optical design; free-form reflector; collimated beam; discrete points; non-image optics

OCIS codes 220.3630; 080.4228; 080.4298; 220.2945

1 引言

目前,随着加工工艺的成熟,自由曲面的应用越来越广。自由曲面的应用有利于改善光学系统复杂的结构,减少零件的数目,同时也就避免了装备误差等的产生。在大地测量领域中,为了产生360°环形准直光束,传统的做法是首先将光源发出的光束准直,再将准直光束投射到顶角半角为45°的圆锥形反光镜上,反射后即得到所需光束。利用自由曲面能将准直和反射光束的功能集成到一个光学元件上,这样使得前期加工还有后期装调都变得简单,而且也消除了准直棱镜对光能的吸收,大大提高了光能利用率,经济上也节约了成本。

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-07-21; 网络出版日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61108051, 61205015)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ47076503)

作者简介: 钱伟(1992—),男,硕士研究生,主要从事自由曲面设计方面的研究。E-mail: mrtenet@yeah.net

导师简介: 杨波(1977—),男,博士,副教授,主要从事光学工程、自由曲面设计方面的研究。

E-mail: yangbo@usst.edu.cn

这里利用的光源是半导体激光器(LD)。半导体激光器相比于发光二极管具有发光效率高、体积小、重量轻等优势^[1],这些对于所研究的内容都是至关重要的。而且随着半导体激光器技术的成熟,应用起来也并不复杂。

照明系统的设计方法主要是经验法和数值法^[2-6]。对于没有设计经验者,在没有现成模型的情况下建立初始结构具有一定困难^[7]。本文则选择了一种简单并且实用的方法,从点光源开始,首先基于几何分析建立微分方程^[8-9],通过 Matlab 软件计算出自由曲面轮廓线^[10]。再采用非均匀有理 B 样条曲面拟合,建立初始结构,导入到 Lighttools 中。最后,在 Lighttools 里面建立半导体激光器模型,对自由曲面反光镜进行优化设计,通过不断修改面型及参数得到最优设计。该设计可以将半径为 50 μm ,发散角为 20°的半导体激光光源在距离锥顶 30 mm 的位置得到 30 mm 宽的均匀环形光线,像面设置在距离光源 10 m 处。最后提供了实物照片以及利用实际光源探测到的结果图片。

2 设计过程

2.1 几何分析

由于需要得到的是一个旋转对称的自由曲面,因而可以先求得其在 $yo z$ 截面内第一象限的自由曲面曲线,再由该曲线围绕 z 轴旋转一周即可得到完整的自由曲面反光镜。

建立如图 1 所示的坐标系,假设点光源 S 在 $(-30,0)$ 的位置,自由曲面反光镜为 P 。从光源发出的光线 I 与反光镜交点为 $m(y,z)$,反射后出射光线为 O ,其与 z 轴平行。

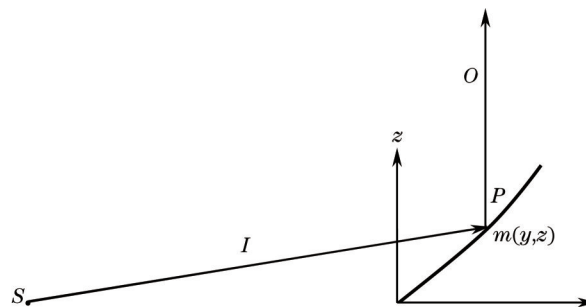


图 1 自由曲面坐标系

Fig.1 Free-form coordinate system

假设自由曲面在 m 点的斜率为 k ,入射光线 I 的斜率为 a ,反射光线 O 的斜率为 b ,则由几何学可得到:

$$(k - a)/(1 + ka) = (b - k)/(1 + kb), \quad (1)$$

其中,

$$k = dz/dy, \quad (2)$$

$$a = z/(y + 30), \quad (3)$$

$$b = 0, \quad (4)$$

整理上述方程表达式即可得到如下微分方程:

$$z/(y + 30)(dz/dy)^2 + 2(dz/dy) - z/(y + 30) = 0. \quad (5)$$

已知 $z(0)=0$,利用 Matlab 软件可以轻松求解该微分方程,得到 z 关于 y 的表达式。再次利用 Matlab 进行计算模拟,即可得到一系列散点。

2.2 针对 LD 光源的优化设计

真正理想的点光源在实际中并不存在,这里采用的是发光面半径为 50 μm 的 LD 光源。将在 2.1 节求解得到的散点采用非均匀有理 B 样条曲面拟合^[11-12]得到自由曲面的初始结构,将该结构导入到 Lighttools 软件里面进行仿真,发现当光源设为点光源时,准直光束几乎没有发散角,10 m 位置处谱线宽度仅为 5.27 mm,这和光束照射在反光镜上并投影在 z 方向的宽度保持一致。但将光源换成发光面半径为 50 μm 的 LD 光源后,中心视场光线没有受到什么影响,因此边缘视场的大部分光线就无法到达 10 m 位置的探测器上。

Lighttools 是美国 ORA 公司开发的一款光学系统建模软件,其 illumination 模块与主体程序配套使用,成功地解决了照明系统的计算机辅助设计问题。软件还具有扩展的数值精度和专门进行光学设计的光线

追迹工具。其自带的优化功能大大降低了设计的难度。

实验中选用的LD根据实际测量,得到其激光发射能量分布在 20° 的范围内。据此,在软件里面,将光源设置为半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的高斯散射光源,高斯角度 σ 为 6.5° ,则其发散角为 20° ,其光强分布满足该表达式:

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

将自由曲面反光镜的对称轴与 z 轴重合,紧接着将反射光线在全局坐标下 y 轴方向的方向余弦添加为评价函数,设置自由曲面面型参数为优化变量,利用软件的自动优化功能重复多次优化,逐步减小该系统的评价函数,最终得到的自由曲面反光镜模型如图2所示。

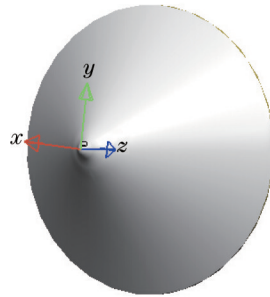


图2 自由曲面反光镜的Light tools模型图

Fig.2 Free-form reflector model in Light tools

3 实验及结果

将在第2节生成的自由曲面反光镜利用Lighttools软件进行仿真模拟,设置探测器为半径10 m的圆形接收器,仿真结果如图3、4所示。

图3所示的是光源距离锥顶30 mm的情况,由图中可以看到光源发出的光束经反光镜反射后形成了 360° 的环形光束;图4所示的光栅图表中辐照度显示不均是屏幕分辨率以及软件仿真所致,实际情况则是由于发光光源的光强分布以及自由曲面反光镜都是旋转对称的,所以亮度绝对均匀。在Lighttools软件中测得光束的谱线宽度为30 mm。

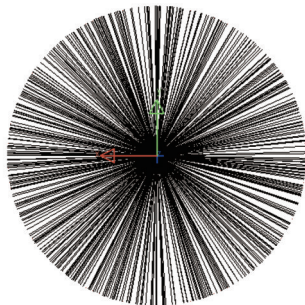


图3 Lighttools光线追迹图

Fig.3 Ray-tracing graph in Lighttools

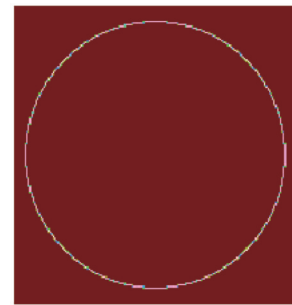


图4 光栅图表

Fig.4 Raster chart

当光源距离锥顶的距离足够大时,光源的尺寸就可以忽略不计。考虑到这个情况,选择将光源置于距离锥顶100 mm的位置,运用相同的方法,最终得到的模拟结果是谱线宽度为20 mm,这和光束照射在反光镜并投影在 z 方向的宽度相差无几,不过随之而来的问题就是光能利用率的降低。

最后对所制作的实物进行分析。自由曲面反光镜使用的材料是6061铝合金材料,使用金刚石单点车床加工,表面粗糙度控制在纳米量级。光源采用单色LD激光器,实物照片及实验结果分别如图5、图6所示。

测量结果表明,在10 m位置处光束的谱线宽度仅为4 mm。这是由于所选用的半导体激光器能量集中度高,大量的光能量都集中在中间很小的发散角内;并且反光镜对光能量具有一定的吸收,在空气中长距离传播也有相当的损耗。最终获得了清晰可见的、宽度仅为4 mm的均匀环形光束,达到了测量需要。



图5 实物照片
Fig.5 Physical photo



图6 工作面上光束
Fig.6 Beam on working plane

4 结 论

提出了一种产生 360° 环形光束的自由曲面反光镜的设计方法。通过简单的几何分析列出微分方程,解出自由曲面初始结构。再利用Lighttools软件优化仿真,最终加工出实物进行实验。这种方法解决了传统方法的结构复杂、装调不便的问题,极大地提升了光能利用率,降低了制作成本,可以在10 m甚至更远的位置投射出纤细明亮的均匀环形光线。

参 考 文 献

- 1 Tang Jian, Yang Bo. Free-form reflector design for beam shaping of laser diode[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208002.
唐 舰, 杨 波. 基于半导体激光器的线性整形自由曲面反射镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208002.
- 2 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
丁 毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540-544.
- 3 Liu Zhenjie, Liu Peng, Yu Feihong. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(11): 112201.
- 4 Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. Freeform lens design for LED illuminaton[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1486-1490.
丁 毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现LED照明的自由曲面透镜设计[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1486-1490.
- 5 Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. Compound parabolic concentrator-simultaneors multiple surfaces design methods for LED collimators[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922004.
张 航, 梁 雪, 严金华. LED准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922004.
- 6 H Ries, J Muschaweck. Tailored freeform optical surface[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 19(3): 590-595.
- 7 Gao Duorui, Zhong Liujun, Zhao Zhao, *et al.*. System design based on Matlab[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416002.
高铎瑞, 钟刘军, 赵 昭, 等. 基于Matlab的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- 8 Chen Weiheng. Introduction of Differential[M]. Beijing: Beijing University Press, 1990: 101-109.
陈维桓. 微分几何初步[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 101-109.
- 9 Lü Tongfu, Kang Zhaomin, Fang Xiunan. Numerical Computing Methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
吕同富, 康兆敏, 方秀男. 数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社: 2013.
- 10 Zhang Jiangxia. The method of using matlab to solve the differential equations[J]. Mechanical management and development, 2008, 23(6): 48-50.
张江霞. 利用MATLAB求解微分方程的方法探索[J]. 机械管理开发, 2008, 23(6): 48-50.
- 11 H Chase. Optical design with rotationally symmetric NURBS[C]. SPIE, 2002, 4832: 10-24.
- 12 T L R Davenport. 3D NURBS representation of surface for illumination[C]. SPIE, 2002, 4832: 293-301.

栏目编辑: 韩 峰