

基于半导体激光器的线性整形自由曲面反射镜设计

唐 舰 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 在许多测量系统以及激光焊接的系统中,拥有一字线图案的激光器发挥着重要的作用。为了提高传统一字线激光器光学系统的光能利用率和改善光学照明效果,研究设计了一种自由曲面反射镜,使得光线在细线的宽度方向准直出射,在长度方向以大角度扩散,同时也保证照度均匀性。通过建立自由曲面模型、构建偏微分方程,得到自由曲面点云的数值解,从而拟合得到自由曲面面型。仿真结果表明,发散角在高达 150° 时,照度均匀性高达90%,在不考虑反射率损失时能量利用率在99%以上。

关键词 光学设计;自由曲面设计;一字线图案;非成像光学;点云;照度;半导体激光器

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0208002

Free-Form Reflector Design for Beam Shaping of Laser Diode

Tang Jian Yang Bo

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

Abstract Laser with straight-line light pattern and uniform illumination is required in many measurement systems and laser welding systems. Instead of the traditional methods using diffractive optical elements and cylindrical lens, a free-form surface design method for laser diode source is proposed to improve the utilization efficiency of the light energy and the optical lighting effect, utilizing a free-form reflector to distribute the light uniformly in one direction and collimate the light in the orthogonal direction. Through the establishment of free surface model, constructing the partial differential equation, and solving the point cloud of surface, the shape of the freeform surface is obtained. Compared with the traditional methods in the line pattern design, the efficiency and uniformity are both significantly enhanced by this method. The simulation result shows that an illuminance uniformity is about 90% and an efficiency about 99% (without considering the reflectance loss) are achieved within 150° of the spread angle.

Key words optical design; free-form surface design; straight-line light pattern; nonimaging optics; point cloud; illumination; laser diode

OCIS codes 080.4228; 080.4298; 220.2945

1 引 言

目前,随着半导体激光器(LD)技术的成熟以及其相比发光二极管(LED)光源而言所具有的光效率高、体积小、重量轻等优势,半导体激光器在光纤通信、光电测量、军用武器等领域得到越来越多的应用。比如,在光电测量领域中,常需要用LD光源投出一条笔直的细线作为参考线。还有在激光焊接领域中,通常需要一条照度均匀的激光细线,从而可以明显有效的提高焊接的效率。在现有的设计方法中激光细线大多采用衍射光学器件(DOE)或者柱面镜来实现。采用DOE器件会较大程度的损失光能量,并且其加工工艺复杂,要

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61205015, 61108051)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ170004)

作者简介: 唐 舰(1989—),男,硕士研究生,主要从事自由曲面设计方面的研究。E-mail: tl_tj_jan@hotmail.com

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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

求的精度较高;采用柱面镜的方式往往很难得到的大的发散角,并且线上的照度分布也不均匀。但是,如果能采用自由曲面反射镜实现要求的话,便可以克服这些不足。而在以往的自由曲面设计研究中,有非常多的研究都可以使特定区域实现照度均匀化,比如圆形区域^[1-2]和矩形区域^[3-6]。但是现有的这些研究大多都是针对LED作为光源,并且这些矩形照明区域的长宽比也远远达不到要求,不能作为一根长的细线^[7]。为此,本文拟在设计一种针对LD光源的自由曲面反射镜,使反射光斑为一条照度均匀的、长度指定的直线。这样不仅可以充分的利用LD的光能量,并且不需要那么复杂的加工精度,降低制作成本。

本文通过设计光源与照明区域的拓扑关系,求得一组一阶偏微分方程组,数值求解后即可得到自由曲面的面型,求解过程只需要花费几秒钟的时间。再采用非均匀有理B样条曲面拟合,最后导入LIGHTTOOLS光学照明软件模拟仿真,就可以在指定照明区域上得到一条照度均匀的细线,并且在细线宽度方向准直出射,可以在一定高度内维持较细的线宽。该设计方法可以使发散角度达到150°,并且在发散角内的照度均匀性达到90%,线宽方向的准直角度可以达到3'左右。也就是说,在距离光源1 m的位置,可以得到一条长5 m、宽度小于3 mm的均匀亮线。同时,在某些特殊场合,可以通过牺牲一定的光照均匀性,使得发散角接近180°,可以使光线在很短距离内发散到10 m甚至100 m远,来适用实际需求。

2 设计方法

2.1 自由曲面设计基本方程

首先建立如图1所示的坐标系,假设光源S在坐标系原点,自由曲面反射器P和目标面T分别位于光源的上、下方。从光源发出的任意光线 $I(I_x, I_y, I_z)$ 与自由曲面反射器P交于点 $p(x, y, z)$,反射光 $O(O_x, O_y, O_z)$ 与目标面T相交于点 $t(t_x, t_y, t_z)$,其中点 $p(x, y, z)$ 的法线 N 指向 z 轴的负方向,目标面T垂直于 z 轴,距离光源距离为 $-t_z$ 。

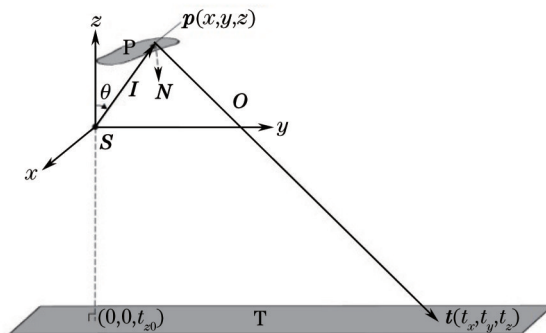


图1 自由曲面坐标系

Fig.1 Free-form coordinates

由于光源在原点,入射光线的单位向量可以表示为

$$I_e = p/|p|, \quad (1)$$

反射光线的单位向量为

$$O_e = (t - p)/|t - p|, \quad (2)$$

式中 p 、 t 分别表示 p 点、 t 点的矢径。根据反射定律可以建立起反射面上的法线 N 与 O_e 和 I_e 的联系为

$$(O_e - I_e) // N. \quad (3)$$

令反射面上的点 $z=f(x, y)$,那么法线 N 还可以通过 $f(x, y)$ 在 x 和 y 两个方向上的偏导数表示为

$$N = f_y \otimes f_x, \quad (4)$$

式中 $f_x = (1, 0, f'_x)$, $f_y = (0, 1, f'_y)$ 。这样,根据上述方程整理可得如下一阶偏微分方程组^[8]:

$$f'_x = -\left(\frac{t_x - x}{r_t} - \frac{x}{r_p}\right) / \left(\frac{t_z - z}{r_t} - \frac{z}{r_p}\right), \quad (5)$$

$$f_y = -\left(\frac{t_y - y}{r_t} - \frac{y}{r_p}\right) / \left(\frac{t_z - z}{r_t} - \frac{z}{r_p}\right), \quad (6)$$

式中 $r_p = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $r_t = \sqrt{(t_x - x)^2 + (t_y - y)^2 + (t_z - z)^2}$ 。显然, 因为目标面垂直于 z 轴, 所以 $t_z = t_{z0}$ 。那么根据(5)式和(6)式, f_x 和 f_y 可以通过 x, y, z, t_x 和 t_y 表示, 故只需要通过 x, y 和 z 表示出 t_x 和 t_y , 就可以得到 $f(x, y)$ 关于 x, y 和 z 的一组偏微分方程, 从而求解。

2.2 针对LD光源的自由曲面设计方法

本文采用具有椭圆高斯散射模型的点光源作为LD光源的模型, 其光强分布公式可以表述为

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \exp\left[-\frac{\theta^2}{2} \left(\frac{\cos^2 \varphi}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\sigma_y^2}\right)\right], \quad (7)$$

式中 I_0 为常数, θ 为图1中的角度, φ 为光线在 x - y 平面内投影方向与 x 轴的夹角, σ_x 为椭圆高斯分布在与 x 轴平行方向上的标准偏差, σ_y 为椭圆高斯分布在与 y 轴平行方向上的标准偏差, 这里 x 轴方向就是光源的慢轴方向, y 轴方向就是快轴方向。通常快轴角度要大于慢轴角度, 所以设计的时候发散快轴方向的光线, 同时使慢轴方向的光线准直的反射出去, 这样便可以得到一条细线。

显然, 如果要准直慢轴方向的光线, 只需要 $O_x = 0$ (即 $t_x = x$) 即可。由于细线的线宽相比于长度非常窄, 所以可以近似的认为 $t_y(x, y, z) = t_y |x = 0$ 。

图2为理想情况下, 照明区域与自由曲面的俯视图。其中细线可以看作一个宽度非常小的矩形。 L_{\max} 为矩形的长度, L_0 是为了使反射光避开光源机械部件而设计的偏移长度。

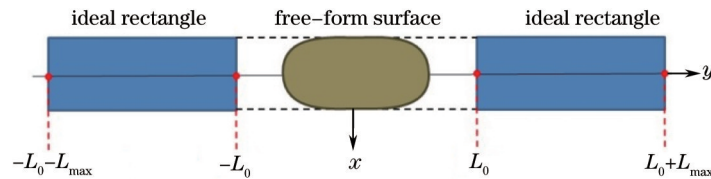


图2 俯视图下的理想目标图案

Fig.2 Ideal target in the top view

为了求解2.1节中提到的偏微分方程, 就必须先得到 t_y 在 y 轴上与 y, z 的对应关系。可以假设, 如果 $t_y |x = 0$ 围绕 z 轴旋转一周, 可以得到一个环形图案, 其中 L_0 为内圆半径, $L_0 + L_{\max}$ 为外圆半径。如果, 此时的光源强度换作以 $I_0 \exp[-\theta^2 / (2\sigma_y^2)]$ 来描述的简单高斯光源, 便可以得到一个照度均匀的环形光斑。根据能量守恒定理可以得出

$$2\pi \int_0^{\theta} I_0 \exp\left[-\theta'^2 / (2\sigma_y^2)\right] \sin \theta' d\theta' = E\pi L(\theta)^2 - E\pi L_0^2, \quad (8)$$

式中照度常数 $E = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} I_0 \exp\left[-\theta'^2 / (2\sigma_y^2)\right] \sin \theta' d\theta' / [\pi(L_{\max} + L_0)^2 - \pi L_0^2]$, 并且光源的99.99%以上的能量都分布在 θ_{\max} 以内。那么 $L(\theta)$ 就可以通过 θ 表示出来, 其中 $\theta = a \tan(y/z)$ 。当环形的照度均匀时, 其实可以看出这里的 $L(\theta)$ 就是 $t_y |x = 0$, 那么根据上述方式便可以通过 y 和 z 来表示 $t_y |x = 0$, 于是, 整个(5)式和(6)式就可以表示成 $f_x = f_x(x, y, z)$ 和 $f_y = f_y(x, y, z)$, 从而得到 $z = f(x, y)$ 关于 x 和 y 方向的偏微分方程组, 通过数值求解就可以得到自由曲面^[9]。

3 曲面实例与仿真结果

根据第2节的方法, 设计了一个自由曲面反射器实例, 并用LIGHTTOOLS软件仿真模拟。根据比较常见的LD光源参数, 这里椭圆高斯光源的参数为 $\sigma_x = 2^\circ$, $\sigma_y = 10^\circ$, 也就是说, 此光源的慢轴半发散角为 6° 左

右,快轴半发散角为 30° 左右。如图 3 所示,自由曲面反射器中心位于光源上方 1 mm ,目标面在光源下方 100 mm ,该反射器可以均匀的把光线分散到光源两侧,其中 $L_0 = 70\text{ mm}$, $L_{\max} = 200\text{ mm}$ 。

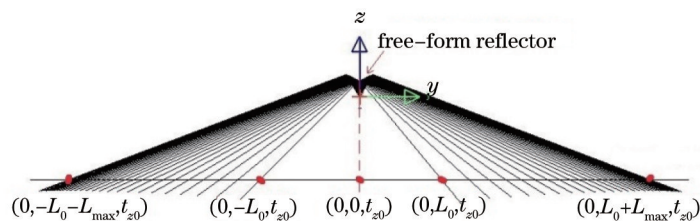


图 3 自由曲面反射器

Fig.3 Free-form reflector system

由于光源大多数的能量集中在 $3.2\sigma_y$ 内,所以这里选取 $\theta_{\max} = 32^\circ$,来保证 99% 以上的能量可以被利用。数值求解(5)式和(6)式时, dx 和 dy 的精度均取 0.001 mm 。

根据 2.2 节的所述的設計方法,可以求得自由曲面反射在第一象限的数据点云,反射器关于 x 轴和 y 轴对称,于是可以求得整个曲面的点云,自由曲面的形状如图 4 所示。

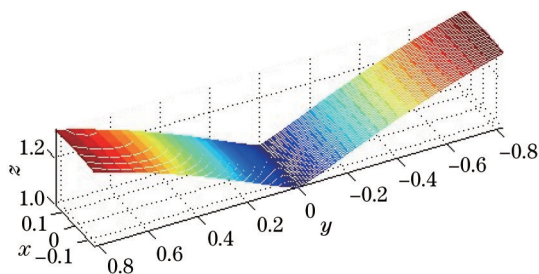


图 4 在 Matlab 中求得的自由曲面反射器

Fig.4 Free-form reflector in Matlab

当求得该曲面的点云数据之后,再用非均匀有理 B 样线条(NURBS)拟合曲面^[10-11]生成模型,最后导入 LIGHTTOOLS 进行光学仿真。数值计算得到点云数据后(先只考虑 y 轴正方向的点),按照 x 轴方向和 y 轴方向分为多组点,分别拟合成 4 阶样条曲线,再由这些相互垂直的网格线拟合得到右翼曲面。图 5(a)为在 Rhinoceros 软件中,由 50×50 的网格线拟合而成的自由曲面右翼,考虑到高斯分布的不均匀性,在曲面拟合时 50×50 的网格线并不是均匀分布,而是在越接近 x 轴和 y 轴时的线条分布越密集,这样既减少不必要的大量计算,也可以用更多的曲线准确的描述光强分布密集区域的曲面细节,尽量减少拟合过程中带来的误差,从而使拟合后的面型更加接近理想情况。最后,将拟合后的右翼面型导入到 LIGHTTOOLS 软件中,并对称复制之后就得到整个反射曲面,如图 5(b)所示。

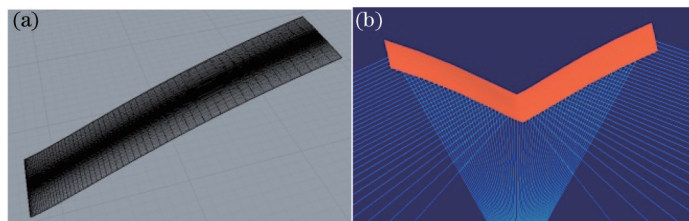


图 5 拟合后的面型。(a)在 Rhinoceros 中的右翼;(b)在 LIGHTTOOLS 中的整体面型

Fig.5 Fitting shape. (a) Right half side in Rhinoceros; (b) whole reflector in LIGHTTOOLS

图 6 为针对右翼的照射情况,追迹 10^6 条光线后的结果,图 6(a)是线性图,由于接收器在光源 100 mm 下方,此时的照明区域的长宽比已经非常大了,在同一张图内已经无法看清照度情况了,所以截取了光栅图中的首、中、尾三分部组成了图 6(b)。通过图 6 可以看到,照明区域在长度方向照度均匀很好,达到 90% 左右,然而在宽度方向一直保持在很窄的范围内。在接收器上的一字线图案达到 200 mm 的长度,仅仅 0.1 mm 的宽

度。其长宽比高达 2000:1, 这还仅仅是反射器右半边的情况, 如果算作反射器整体的话, 长宽比可以达到 4000:1。并且如果不计反射损失的话, 在这个范围内的能量占光源能量的 99% 以上。

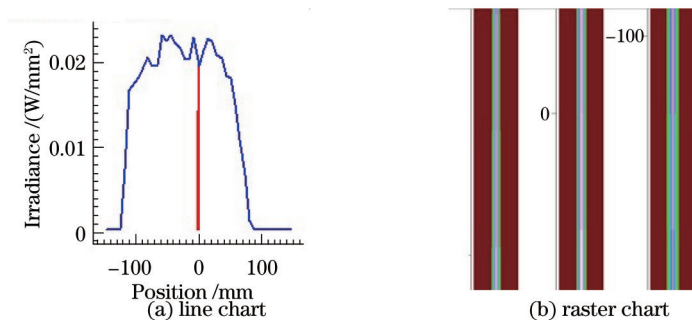


图 6 在 LIGHTTOOLS 中的仿真结果

Fig.6 Simulated results in LIGHTTOOLS

为了更加严格的测试该自由曲面反射器设计方法的合理性, 提高了设计要求。在上述单边发散角 69.6° 的条件下, 采用同样的光源, 把单边发散提高到 84° , 已经非常接近 90° 的极限了。按照上述方法再生成一个新的自由曲面, 并再次导入 LIGHTTOOLS 仿真。同样针对反射器右半边追迹了 10^6 条光线后, 在光源 100 mm 下可以得到一条 1.2 m 长, 1 mm 宽的直线, 并且在不考虑反射率损失时能量利用率高达 99.6%, 图 7 显示了此情况下的线性图。

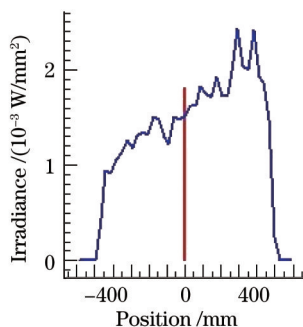


图 7 半发散角接近 84° 时的线性图

Fig.7 Line chart simulation with about 84° spread angle

如图 7 所示, 在单边发散角高达 84° 时, 其直线长度方向的照度虽然没有图 6(a) 均匀, 但是仍然有 50% 左右的均匀性, 证明了本设计方法的可行性。

4 结 论

提出了一种针对半导体激光器的自由曲面反射器的设计方法。通过设计一种光源与照明区域的拓扑对应关系, 可以推导出的一组偏微分方程并利用数值解法求得曲面, 经过 3D 建模软件 Rhinoceros 软件和 LIGHTTOOLS 光学软件仿真, 最终可以在目标区域形成一根照度均匀的直线。该设计方法可以克服传统设计方法的不足, 充分利用光能, 可以在很短距离的内投射出一条笔直的均匀亮线。

参 考 文 献

- 1 Z Zhenrong, H Xiang, L Xu. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. Appl Opt, 2009, 48(35): 6627-6634.
- 2 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, et al.. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297-2301.
- 3 余桂英, 金 骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297-2301.
- 4 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
- 5 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.
- 6 Y Ding, X Liu, Z R Zheng, et al.. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958-12966.

- 5 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance based on differential geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022006.
刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. *光学学报*. 2012, 32(10): 1022006.
- 6 R M Wu, Z R Zheng, H F Li, *et al.*. Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(13): 2257–2263.
- 7 M A Moiseev, L L Doskolovich, N L Kazanskiy. Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions [J]. *Opt Express*, 2011, 19(103): A225–A233.
- 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 H Chase. Optical design with rotationally symmetric NURBS [C]. SPIE, 2002, 4832: 10–24.
- 11 T L R Davenport. 3D NURBS representation of surface for illumination [C]. SPIE, 2002, 4832: 293–301.

栏目编辑: 史 敏