

衍射型激光透射塑料焊接的衍射光学元件设计与分析

王 霄 李 品 陈 成 邢 安 向宝珍 刘会霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 衍射型激光透射塑料焊接技术是一种新型的同步焊接技术。介绍了衍射型激光透射塑料焊接基本原理,提出了一种基于衍射光学元件的激光同步焊接技术;建立了衍射模型,并采用加权 G-S 算法,使用 Matlab 软件模拟计算出权因子大小对所设计的衍射光学元件(DOE)的影响。模拟结果表明,随着权因子变大,衍射效率提高,分布在辐射区域的光强就越多;均方差(SSE)提高,整形后光斑的均匀性就降低,辐射区域的光强就不均。最后,进行了 DOE 调制整形的实验,得到了整形前后激光束光斑形状,达到预期的图形。

关键词 物理光学; 衍射光学元件; 激光透射焊接; 塑料; 衍射效率; 均方差; 加权 G-S 算法

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0161

Design and Analysis of Diffractive Optical Element on Laser Transmission Welding Based on Diffraction

Wang Xiao Li Pin Chen Cheng Xing An Xiang Baozhen Liu Huixia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Laser transmission welding of plastics based on diffraction is a new technology of simultaneous welding. This paper introduces the principle of laser transmission welding of plastics based, and tells a laser simultaneous welding technology based on diffractive optical element. Diffractive model is established and based on the weighted G-S algorithm, the influence of the size of weighted factor on the design of diffractive optical element (DOE) is numerically simulated, at the same time, the influence of the size of weighted factor on the welding is analyzed by using Matlab. The simulation results indicate that with the weighted factor increasing, the diffractive efficiency is improved that means the light intensity in the emitting region is enhanced, and meanwhile, sum of square error (SSE) is improved that means the uniformity of the spot is decreased after reshaping, and the light intensity in the emitting region may be non-uniform. Finally, the experiment of modulation and reshaping of DOE is carried out, the pre and post spot shapes are acquired, attaining the expected pattern.

Key words physical optics; diffractive optical element; laser transmission welding; plastics; diffractive efficiency; sum of square error; weighted G-S algorithm

1 引 言

随着激光塑料焊接技术^[1,2]的飞速发展,研究出了一系列的焊接方法,如轮廓焊接^[3]、同步焊接^[4]、准同步焊接^[5]、掩膜焊接^[6]、放射状焊接^[7]、Globo 球形焊接^[8]和衍射焊接^[9]等。其中,衍射焊接可以看成是一种新型的同步焊接,不但具有同步焊接的优点:不需要激光源与待焊工件之间相对运动而且具有很高的焊接效率,并且在焊接过程中不易引起工件的翘曲变形,此外还特别适用于不规则复杂焊缝的焊接。本文针对衍射焊接,利用改进的加权 G-S 算法设计衍射光学元件(DOE),将入射光

波场的高斯分布转换成十字型的场分布,模拟分析了权因子对衍射效率和均方差的影响。

2 衍射型激光透射塑料焊接原理

衍射型激光透射塑料焊接是根据激光束特性及焊缝形状设计出对应的衍射光学元件,对激光光束进行调制整形,使得激光光斑形状达到预先想要得到的图形,再把激光束通过标准光学透镜,使得激光光斑形状得到等比例缩小,最终得到的激光光斑形状与焊缝形状相同。利用调制后的激光束对塑料进行同步焊接,从而达到塑料焊接的目的。基于衍射

作者简介: 王 霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工及性能数值模拟、数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: wx@ujss.edu.cn

光学元件的激光塑料焊接原理如图 1 所示。

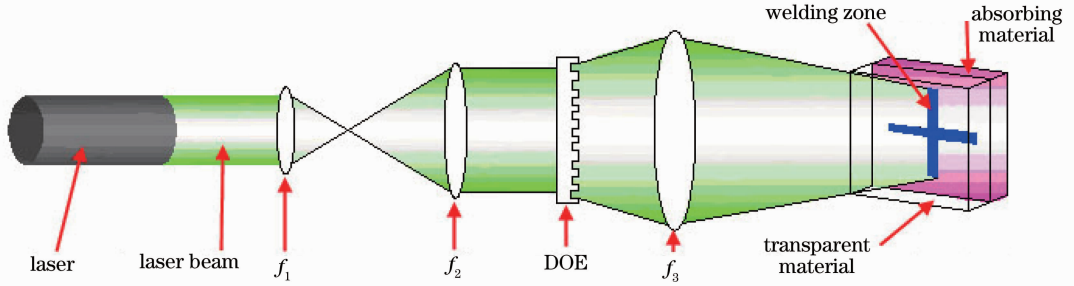


图 1 基于衍射光学元件的激光塑料焊接原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding of plastics with DOE

3 衍射光学元件设计与分析

3.1 衍射模型的建立

衍射光学元件的理论分析方法主要有 3 种:几何理论分析法、标量衍射理论、矢量衍射理论,本文以标量衍射理论作为设计衍射光学元件的分析方法。按照近似程度不同,标量衍射理论主要包括菲涅耳衍射和夫琅和费衍射,因此在设计 DOE 之前,需要先确定衍射的类型,并建立相应的衍射模型。由参考文献 [10] 可以看出,当 $26666\lambda \leq d \leq 16666666\lambda$ 时,其中 λ 为照射波长, d 为 DOE 与像平面之间的距离,可用菲涅耳衍射,而当 $d > 16666666\lambda$ 时,可用夫琅和费衍射。假设照射波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,则当 DOE 到像平面之间的距离范围为: $0.014 \sim 8.87 \text{ m}$ 时可用菲涅耳衍射公式,当距离范围大于 8.87 m 时可用夫琅和费衍射公式。考虑到在光路系统建立时,DOE 与接收屏之间的距离有限,所以在设计 DOE 时采用菲涅耳衍射模型,衍射模型如图 2 所示。

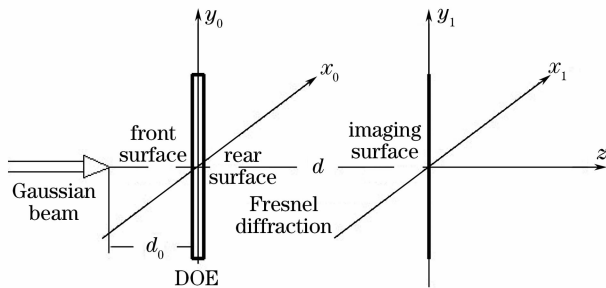


图 2 衍射模型

Fig. 2 Diffraction model

下面分析高斯光束从入射到成像的整个过程。高斯光束沿着 z 轴传播一段距离 d_0 后到达 DOE 的前表面,振幅分布为 $U_0(x_0, y_0)$,且呈高斯分布。并认为高斯光束在 DOE 前表面上各点的相位相同,即

等相面为平面。由于所设计的 DOE 是纯相位型光学元件,所以不会造成光能被吸收或遮挡,DOE 只对高斯光束的相位进行调制,因此利用纯相位型 DOE 具有较高的激光能量利用率。设 DOE 的相位分布为 $\phi(x_0, y_0)$,经过 DOE 的相位调制,在 DOE 后表面上的光束分布函数为 $U_0(x_0, y_0) \exp[i\phi(x_0, y_0)]$ 。此后,振幅为 $U_0(x_0, y_0)$,相位为 $\phi(x_0, y_0)$ 的光束在自由空间传播距离 d 后到达衍射接收屏,这一过程为菲涅耳衍射过程。光束到达接收屏后产生新的光场分布 $U_1(x_1, y_1) = U_1 \exp[i\phi_1(x_1, y_1)]$,此时的 $U_1(x_1, y_1)$ 分布情况就可看作屏上接收的图样。

需要解决的问题就是在预先知道所需光场分布为 U_{object} 的情况下求解 DOE 的相位分布 $\phi(x_0, y_0)$,使得实际光场分布 $U_1(x_1, y_1)$ 高精度地逼近目标光场分布 U_{object} 。

3.2 DOE 的设计算法

衍射型激光透射塑料焊接的关键是要设计出与激光束特性及焊缝形状相对应的衍射光学元件。设计 DOE 的算法有很多种,最主要的大致有:G-S 算法^[11]、杨顾算法(YG)^[12]、模拟退火算法(SA)^[13]和遗传算法(GA)^[14]。

G-S 算法基本步骤可以概括为:

1) 给定 DOE 的初始相位分布 $\phi_0(x, y)$ (以后每次迭代使用步骤 5 (得到的相位分布),与入射光的振幅 $|U(x, y)|$ 构成入射的波函数 $f_n(x, y)$

$$f_n(x, y) = |U(x, y)| \exp[i\phi_n(x, y)]; \quad (1)$$

2) 对 $f_n(x, y)$ 作傅里叶变换得到 $g_n(u, v)$;

3) 用 $g_n(u, v)$ 的相位部分和希望得到的振幅 $|G(u, v)|$ 构成 $g'_n(u, v)$

$$g'_n(u, v) = \begin{cases} |G(u, v)| \exp(i\phi_n), & (x, y) \in \omega_2 \\ 0 & (x, y) \notin \omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 w_2 是想得到的图样区域。

- 4) 对 $g'_n(u, v)$ 作逆傅里叶变换得到 $f'_{n+1}(x, y)$;
- 5) 用 $f'_{n+1}(x, y)$ 的相位和入射光的振幅

- $|U(x, y)|$ 构成下一次迭代的入射波函数 $f_n(x, y)$;
- 6) 重复以上步骤直到设计精度满足预期要求或达到最大迭代次数。算法流程图如图 3 所示。

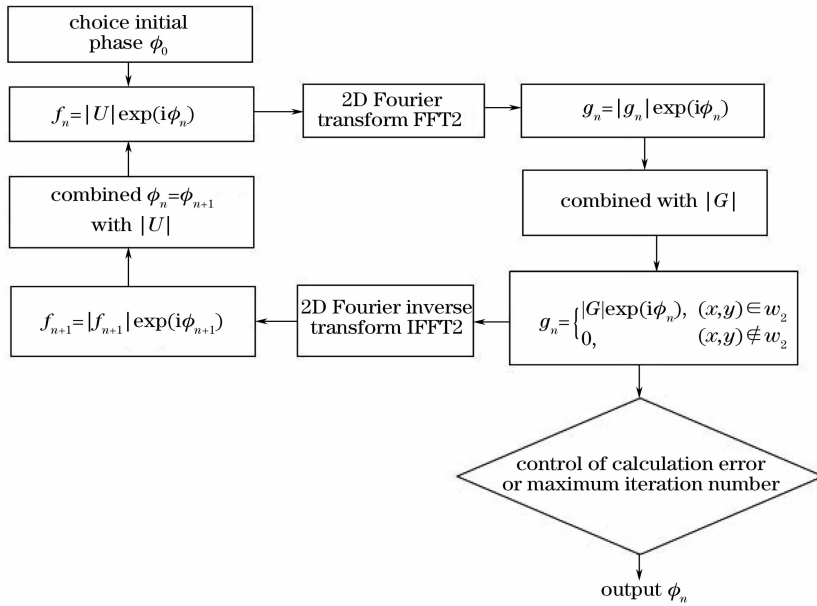


图 3 G-S 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of G-S algorithm

对于收敛的迭代过程,只要迭代足够多次,就可以使结果达到任意的精度,但有时迭代过程收敛缓慢,从而使计算量变得很大,因此迭代过程的加速是一个重要的问题。在这里采用加权法来使 G-S 算法加速。加权法的思想如下:

设 x_k 是根 x^* 的某个近似值,用迭代公式校正一次得

$$\overline{x_{k+1}} = \phi(x_k), \quad (3)$$

又 $x^* = \phi(x^*), \quad (4)$

由中值定理有

$$x^* - \overline{x_{k+1}} = \phi(x^*) - \phi(x_k) = \phi'(\xi)(x^* - x_k), \quad (5)$$

其中 $\xi \in (x^* - x_k)$, 当 $(x^* - x_k)$ 范围不大时,设 $\phi'(\xi)$ 变化不大,其估计值为 β ,则有

$$x^* - \overline{x_{k+1}} \approx \beta(x^* - x_k), \quad (6)$$

(6)式可以写为

$$\overline{x_{k+1}} \approx \beta x_k + (1 - \beta)x^*, \quad (7)$$

这样在 G-S 算法中第 k 次循环中的(2)式变为

$$g'_n(u, v) = \begin{cases} [\beta |g_n(u, v)| + (1 - \beta) |G(u, v)|] \exp(i\phi_n), & (x, y) \in w_2 \\ 0, & (x, y) \notin w_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 β 是权因子。

利用以下剩余函数来决定是否终止迭代^[15]

$$M_0 = \iint_{-\infty}^{\infty} [|g_n(u, v)| - |G(u, v)|]^2 dudv, \quad (9)$$

由 $|g'_n|$ 代替 $|g_n|$ 以后 M_0 变为

$$\begin{aligned} M'_0 &= \iint_{-\infty}^{\infty} [|g'_n(u, v)| - |G(u, v)|]^2 dudv = \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} [\beta |g_n(u, v)| + (1 - \beta) |G(u, v)| - |G(u, v)|]^2 dudv = \\ &= \beta^2 \iint_{-\infty}^{\infty} [|g_n(u, v)| - |G(u, v)|]^2 dudv = \beta^2 M_0, \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可以看到,若 $-1 \leq \beta \leq 1$,则有 $M'_0 \leq M_0$,由此可以得出加权 G-S 算法收敛速度快。

3.3 模拟结果及分析

编程采用 Matlab 6.5。

模拟过程中 η 和均方差(SSE)定义为

$$\eta = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} G_r(x,y)^2}{\sum_x \sum_y G_r(x,y)^2}, \quad (11)$$

$$SSE = \frac{\sum_x \sum_y [G_r(x,y) - G_o(x,y)]^2}{\sum_x \sum_y G_o(x,y)^2}, \quad (12)$$

式中 Ω 为信号区域, M, N 为整个再现像位图的大小, $G_r(x, y)$ 为再现像的信息强度分布, $G_o(x, y)$ 代表目标像的信息强度分布。衍射效率 η 定义为再现像中信号区域光强所占的比重, SSE 代表了再现像的强度分布与目标像强度分布的相似性以及再现像强度的均匀性。在理想情况下, 衍射效率 $\eta = 1$, SSE 为 0。在编程计算过程中, 可将衍射效率 η 和均方差 SSE 作为优化设计算法的目标函数, 也可以通过设置最大迭代次数停止迭代运算。

由(11)式, (12)式计算出衍射效率和均方差, 从而得到衍射效率和均方差随权因子的变化情况, 如表 1 所示。

表 1 衍射效率和均方差随权因子的变化

Table 1 Diffractive efficiency and SSE as a function of weighted factor

β	$\eta / \%$	SSE / %	β	$\eta / \%$	SSE / %
-1	93.67	12.57	0.1	94.52	12.86
-0.9	93.70	12.29	0.2	94.60	16.57
-0.8	93.58	12.35	0.3	94.72	15.63
-0.7	93.86	12.45	0.4	94.73	15.50
-0.6	93.82	11.88	0.5	94.90	15.54
-0.5	93.99	11.62	0.6	95.07	17.35
-0.4	94.02	11.54	0.7	95.18	22.24
-0.3	94.14	11.49	0.8	95.43	25.96
-0.2	94.17	14.04	0.9	95.85	32.30
-0.1	94.29	12.82	1.0	96.56	57.31
0	94.31	13.82			

图 4 和图 5 分别是衍射效率与均方差随权因子变化而变化的曲线。由图 4 和图 5 可知, 随着权因子 β 的增大, 衍射效率增大, 而均方差也增大。权因子取在 0.1~0.5 之间时, 均方差变化缓慢, 衍射效率也不低。

权因子对衍射效率和均方差的影响, 也就是对 DOE 整形效果的影响, 对最终的焊接也产生了影

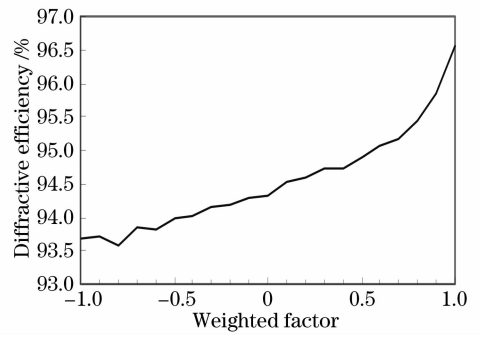


图 4 衍射效率随权因子的变化

Fig. 4 Diffractive efficiency as a function of weighted factor

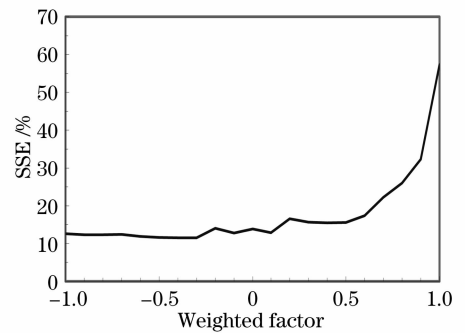


图 5 均方差随权因子的变化

Fig. 5 SSE as a function of weighted factor

响。权因子越大衍射效率越高, 分布在焊缝区域的光强就越多; 均方差越大, 整形后光斑的均匀性就降低, 焊缝容易不均。因此, 具体应用时, 可以选择适合的权因子。

3.4 DOE 的制作

DOE 的制作方法很多, 按照所用掩膜版及加工表面浮雕结构的特点, 可分为图 6 所示的 3 种方法^[16]:

1) 标准 DOE 制作方法, 如图 6(a)所示, 它是由二元掩膜版经多次图形转印、套刻, 形成台阶式浮雕表面。这是发展最早、最成熟也是当前最常用的一种方法;

2) 直写法, 如图 6(b)所示, 无需掩膜版, 仅通过改变曝光强度, 直接在器件表面形成浮雕轮廓。这是一种新兴的 DOE 加工方法(主要是激光束直写和电子束直写), 具有制作连续表面结构的功能;

3) 灰阶掩膜图形转印法, 如图 6(c)所示, 所用掩膜版透射率分布是多层次的, 经一次图形转印, 即形成连续或台阶表面结构。这是目前正在探索的一种尚不成熟的方法, 具有成本低、周期短、方法简便等优点, 但有待于提高加工精度。

3.5 DOE 调制整形的实验

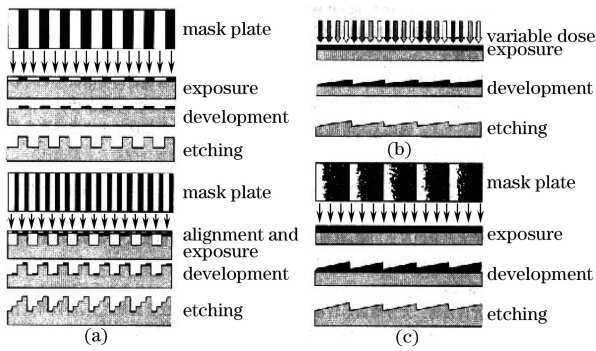


图 6 DOE 的 3 种加工方法。(a) 标准 DOE 制作方法；
(b) 直写法；(c) 灰阶掩膜图形转印法

Fig. 6 Three manufacture methods of DOE. (a) Standard manufacture method of DOE; (b) direct writing; (c) gray scale mask transfer process

将激光束通过 DOE 进行调制整形的实验,整形前后激光束光斑形状如图 7 所示,从图中可以看到整形后的激光光斑形状达到预先想要得到的十字图形。

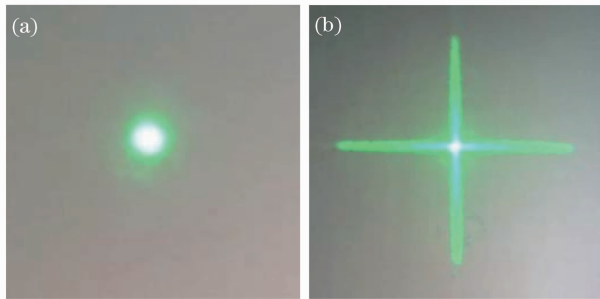


图 7 (a) 初始光斑形状；(b) 衍射后光斑形状
Fig. 7 (a) Initial spot shape; (b) spot shape after diffraction

4 结 论

本文提出了基于衍射光学元件的激光透射塑料焊接方法,阐述了本方法的基本原理,分析并模拟了加权 G-S 算法中权因子对衍射效率和均方差的影响,给出了衍射效率和均方差随权因子变化的规律,进行了将激光束通过 DOE 调制整形的实验,得到了整形前后激光束光斑形状,由于研究经费及实验激光器的限制,没有继续进行后续的焊接实验。但是随着衍射光学元件技术的发展,DOE 制作水平也将会得到提高,其价格也会相应下降。届时可以针对功率较高的 Nd:YAG 或者半导体激光器设计制作 DOE,通过实验验证权因子对焊接的影响。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Laser transmission welding polypropylene pastics[J]. *Chinese J. lasers*, 2008, **35**(3): 466~471
王 霄,张惠中,丁国民等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471
- 2 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807
刘会霞,邢安,张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1081~1087
- 3 Prabhakaran R., Kontopoulou M., Contour laser-laser transmission welding of glass reinforced nylon 6 [J]. *Thermoplastic Composite*, 2006, **19**: 427~739
- 4 Jones I. Laser welding for plastic components[J]. *Assembly Automation*, 2002, **22**(2): 129~135
- 5 Jones I. Techniques for welding polymeric devices using laser sources[J]. *Material Technology*, 2005, **20**(1): 76~78
- 6 Haberstroh E., Hoffmann W. M., Poprawe R. *et al.*. 3 Laser transmission joining in microtechnology [J]. *Microsyst. Technol.*, 2006, **12**(7): 632~639
- 7 Leister Company. Radial welding[EB/OL]. 2006-11-1. <http://www.leister.com/en/radialschweissen.html>
- 8 Leister Company. Radial welding[EB/OL]. 2006-11-1. <http://www.leister.com/en/globoschweissen.html>
- 9 Grewell D. A.. Modeling of molecular healing for micro-laser welding of plastics with diffractive optical elements as spatial modulators[D]. Ohio :The Ohio State University,2005
- 10 Chen Caihua. The summary of the analysis method on binary optical element[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2000, **23**(3): 58~63
陈彩花. 二元光学元件分析方法概述[J]. *长春光学精密机械学院学报*, 2000, **23**(3): 58~63
- 11 Zou Jieyu, Lu Yaxiong, Huang Ziqiang *et al.*. The design of diffraction optical elements for beam shaping with improved GS algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**: 48~52
邹杰宇,卢亚雄,黄子强等. 基于改进 GS 算法的衍射光学光束整形元件的设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**: 48~52
- 12 Yin Xiaoli, Yu Chongxin, Yan Shuhua. Research on the weighted Yang-Gu algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 530~535
颜树华. 加权杨-顾算法研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 530~535
- 13 Yin Xiaoli, Yu Chongxiu. Design of DOE using improved simulated annealing algorithm[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(2): 154~157
尹霄丽,余重秀. 用改进的模拟退火算法设计二元光学阵列器件[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(2): 154~157
- 14 Lu Jianye, Li Qi, Dong Yunhua *et al.*. Direct design of quantized DOEs by genetic simulated annealing algorithm [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(4): 365~367
鲁建业,李琦,董蕴华等. 采用混合遗传-模拟退火算法对 DOE 的直接设计[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(4): 365~367
- 15 Xinghua Wang. Liquid crystal diffractive optical elements: applications and limitations[D]. Kent: Kent State University, 2005
- 16 Tian Qian, Liao Yanbiao, Sun Liqun. Engineering Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006
田 芊,廖延彪,孙利群. *工程光学*[M]. 北京:清华大学出版社, 2006