

遗传算法在激光束整形中的应用*

张静娟 姬 扬 姚德成

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

陈俊本

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(1995 年 1 月 18 日收到; 1995 年 5 月 23 日收到修改稿)

采用遗传算法设计了一个 8 台阶二元光学元件, 可用菲涅耳变换系统将高斯光束变换成均匀圆光束, 均匀区能量转换效率达到 87%, 输出波形比较理想. 将遗传算法设计的结果同稳相法和输入输出法设计的结果进行比较, 发现在同时降低量化台阶数和增大最细线条宽度的条件下, 用遗传算法进行设计并制作出的激光束整形元件仍可以得到满意的变换结果.

PACC: 4280K; 4230

1 引 言

遗传算法是一种基于自然遗传和自然选择原理的搜索算法, 它将适者生存原理和基因交换机制结合起来, 形成具有独特优化机制的有效的搜索技术^[1]. 不同于一般的每次只改变一个解的搜索算法, 遗传算法每次改变一组解, 通过在好的解之间进行组合来获得更好的解, 是一种并行的、多向搜索的算法. 近年来, 遗传算法在物理学中得到了一定程度的应用, 如分析统计力学模型^[2], 设计 Dammann 光栅^[3], 光学特征识别^[4]等等.

用二元光学元件来进行光束波前变换, 是活跃在光学领域中的一个重要课题, 有着重要的应用价值^[5-8]. 实现激光束整形的系统分为傅里叶变换系统和菲涅耳变换系统两类, 我们曾用反应离子刻蚀方法制备的二元光学元件通过傅里叶变换系统将高斯束变换成均匀束^[7], 为了使系统走向实用化, 我们曾采用无透镜的菲涅耳变换系统对于一般圆对称光束的波前变换进行过研究^[8]. 设计二元光学元件的方法有光学一般变换方法^[9]、GS 算法^[10]、输入输出法^[11]和稳相法^[8, 12], 用上述方法计算出完成变换所需要的位相分布, 然后根据生产工艺所能达到的精度将位相值量化, 再制成实际的二元光学元件. 然而我们发现, 当量化台阶数目降到 8 台阶或更少时, 如果要得到满意的输出波形, 必须减小最细线条的宽度, 这就给制作工艺带来更高的精度要求.

为了在降低量化台阶数目和增大最细线条宽度的同时仍能获得理想的输出, 本文用遗传算法直接从量化的位相值开始搜索, 设计了最细线条宽度为 10 μm 的 8 台阶二元光学元件, 可将高斯光束经菲涅耳系统变换成均匀圆光束, 并同稳相法和输入输出法设计量

* 中国科学院基础研究项目.

化的结果进行了比较, 计算结果表明遗传算法是一种有效的设计二元光学元件的方法.

2 设计方法

光束的波前变换就是将输入平面上某一个给定的复振幅分布经光学系统变换后在输出面上得到所需的特定复振幅分布.

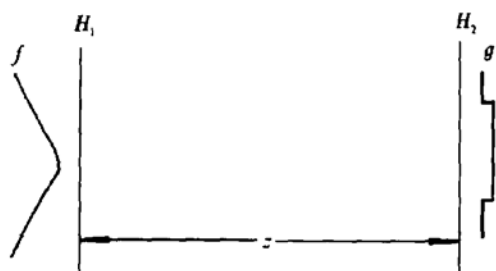


图1 菲涅耳波前变换系统

根据光学一般变换理论, 光束的波前变换可以由通过两个纯位相的衍射光学元件 H_1 和 H_2 构成的光学系统来实现, 如图1所示. 在这个系统中, 位于输入平面上的衍射光学元件 H_1 将输入复振幅分布 f 的位相进行调制并且经过距离 z 的传播后在输出平面上得到所要求的实振幅分布 $|g|$, 在输出平面上的第二个衍射光学元件 H_2 进一步调制输出的位相分布, 形成所要求的

复振幅分布 g . 显然, 如果只要求在输出平面上得到特定的强度分布, 那么只用一个衍射光学元件 H_1 就可以达到目的.

对于一般圆对称光束的波前变换, 采用极坐标系可使计算简化为一维的径向运算. 设输入面上的复振幅分布为 $f(r_1)$, 输出面上得到的特定复振幅分布为 $g(r_2)$, $H_1(r_1)$ 和 $H_2(r_2)$ 是两个衍射元件的位相分布函数

$$H_1(r_1) = \exp[j\varphi_1(r_1)], H_2(r_2) = \exp[j\varphi_2(r_2)], \quad (1)$$

输入 $f(r_1)$ 经过图1的光学系统, 在菲涅耳近似条件下, 在输出面上得到

$$g'(r_2) = aH_2(r_2) \int f(r_1)H_1(r_1)\exp[jk(r_1^2 + r_2^2)/2z]J_0(kr_1r_2/z)r_1dr_1, \quad (2)$$

其中 a 为常数, k 为波矢, z 为传播距离, $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数.

光束的波前变换就是寻找位相分布 $H_1(r_1)$ 和 $H_2(r_2)$ 使得误差函数达到最小.

$$E = \int |g(r) - g'(r)|^2 r dr. \quad (3)$$

文献[8]曾讨论过稳相法和输入输出法的求解公式和计算步骤, 本文不再赘述.

遗传算法采用一组 N 位的 M 元串结构来代表一个样本组, 每个样本由一个 N 位 M 元串来表示, 串中每一位的值表示了样本的一个信息特征. 通过对一个给定的评价函数的计算来衡量每个样本对环境的适应情况(即此样本的输出与期待输出之间的差别大小), 然后在适应得好的 M 元串之间进行片结构交换、产生变异来获得一组在整体水平上更为适应的新样本. 利用这种机制可以获得最接近于期待输出的样本.

设衍射光学元件 H_1 和 H_2 的最大半径分别为 r_{10} 和 r_{20} , 将它们分成 N 个等间距的同心圆环, 将位相分布函数 $\varphi_1(r_1)$ 和 $\varphi_2(r_2)$ 按 M 个台阶量化, 这样(1)式离散化后表示成

$$H_k(r_k) = \exp(jh_{ki}2\pi/M), \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} k &= 1, 2, & (i-1)/N < r_k/r_{k0} < i/N, \\ i &\in \{1, 2, \dots, N\}, & h_{ki} &\in \{1, 2, \dots, M\}, \end{aligned} \quad (5)$$

M 和 N 均为整数. 由于处在同一圆环上的点具有相同的位相值, 而且只能取 M 个离散的位相值之一, 这样 H_1 位相分布就可以用一个 N 位的 M 元串 $X_1X_2\cdots X_N$ 来表示, 其中 X_i 为 1 到 M 的整数.

定义评价函数为

$$E = \sum (|g_i|^2 - |g'_i|^2) / \sum |g_i|^2, \quad (6)$$

其中 g_i 是所需的复振幅分布, g'_i 是由(2)式计算得出的输出面上的复振幅分布, 我们的搜索目标就是使上式达到最小.

下面给出遗传算法计算的流程.

(1)初值. 随机选取一组 Q 个(Q 为偶数) H_1 的位相分布, 即随机选取的一组 Q 个 N 位 M 元串.

(2)评价适应情况. 相应于每一分布用(2)式计算输出面上的复振幅分布, 用(6)式计算相应的评价函数 E_j , 对每一分布赋予一概率 P_j

$$P_j = C_1 / (E_j + C_2) \quad j \in \{1, 2, \dots, Q\}, \quad (7)$$

其中 C_1 和 C_2 为可调整的参数, 这样, 评价函数小的分布被赋予大的概率, 概率满足

$$\sum P_j = 1. \quad (8)$$

(3)交叉再殖. 根据(2)中赋予每一位相分布的概率, 首先按概率随机选取两个位相分布, 例如选中了 $X_1X_2\cdots X_N$ 和 $X'_1X'_2\cdots X'_N$, 然后产生一个随机整数 L , $1 < L < N$, 以 L 为界进行交叉得到两个新的位相分布为 $X_1\cdots X_LX'_{L+1}\cdots X'_N$ 和 $X'_1\cdots X'_LX_{L+1}\cdots X_N$; 继续这一过程直至得到 $Q-2$ 个新的位相分布. 按概率选择并交叉是为了保证搜索向评价函数减小的方向进行.

(4)变异. 对于(3)中得到的位相分布, 以适当的概率 P_m (P_m 是根据经验选择的常数)来改变 N 位 M 元串每一位上的值, 即对每一位产生一个从 0 到 1 均匀分布的随机数 P , 如果 $P < P_m$, 则改变该位的值, 否则不变.

(5)产生一组 Q 个新的位相分布. 将交叉再殖并经过变异后产生的 $Q-2$ 个全新的位相分布与前一组中评价函数最小的两个位相分布合并到一起, 就构成了新的一组 Q 个位相分布.

(6)重复(2)~(5)直到一组中最佳分布的误差小于预先给定的阈值为止.

为了鉴别遗传算法的优缺点, 我们也采用了稳相法和输入输出法来进行设计, 对三者设计的结果作了比较.

3 模拟计算

对于管长为 230 mm, 功率为 1.8 mW 的平凹腔 He-Ne 激光器, 其输出端面为平面镜

端,是高斯光束束腰位置,求得的束腰为 $w_0 = 0.2912$ mm,我们取距 He - Ne 激光器输出端 50 mm 处为输入平面,在该平面上高斯束径为 $w = 0.2932$ mm,等相面为曲率半径 $R = 3582$ mm 的球面,由于 R 值很大,可以近似为平面波.输入面上的复振幅分布为

$$f(r_1) = \exp(-r_1^2/w^2). \quad (9)$$

设在输出面上要求的复振幅分布为半径为 $3w$ 的均匀圆束:

$$g(r_2) = g_0 \text{circ}(r_2/3w), \quad (10)$$

g_0 为实常数,由能量守恒条件

$$\int |f(r_1)|^2 r_1 dr_1 = \int |g(r_2)|^2 r_2 dr_2, \quad (11)$$

可知 $g_0 = 1.6144$.

设衍射元件 H_1 和 H_2 的最大半径分别取为 $r_{10} = 1.0$ mm, $r_{20} = 1.2$ mm,将位相片划分成 $N = 100$ 个等差圆环,量化台阶数 $M = 8$.自由空间传播距离 $z = 100$ mm,波长 $\lambda = 632.8$ nm,用稳相法、输入输出法和遗传算法计算得到的能量转换到均匀区的效率和误差函数值的结果见表 1,三者的输出波形分别见图 2、图 3 和图 4.

表 1 三种算法计算结果的比较

	稳相法		输入输出法		遗传算法
	连续	量化 $M = 8$	连续	量化 $M = 8$	$M = 8$
均匀区能量 转换效率	0.958	0.926	0.981	0.952	0.876
误差函数值 E	0.0492	0.0672	0.016	0.0341	0.0202

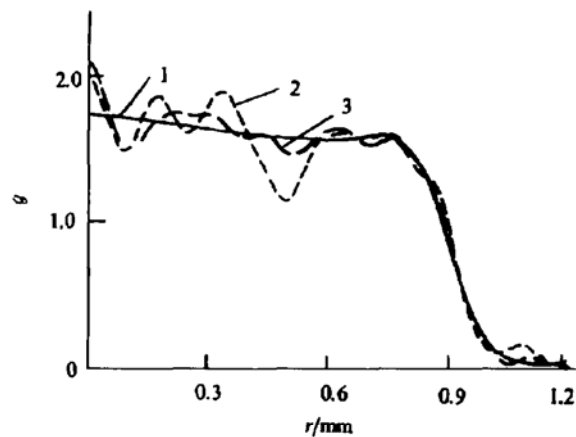


图 2 稳相法计算的输出波形的比较 曲线 1 为连续位相的结果;曲线 2 为 8 台阶的结果; 曲线 3 为 16 台阶的结果

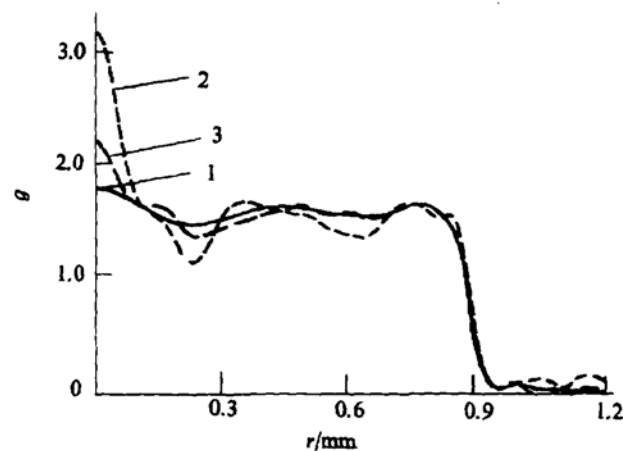


图3 输入输出法计算的输出波形的比较 曲线1为连续位相的结果;
曲线2为8台阶的结果; 曲线3为16台阶的结果

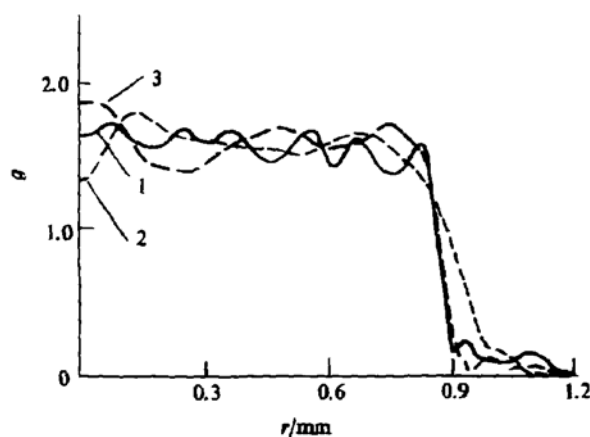


图4 在8台阶情况下, $N=100$ 时用遗传算法计算的波形(曲线1), $N=400$ 时用稳相法计算的波形(曲线2), $N=400$ 时用输入输出法计算的波形(曲线3)

由表1看出,遗传算法设计的系统的转换到均匀区的能量效率较其他两者略低,但误差函数值 E 较小.从图2可见,对于位相值可连续分布的纯位相光学变换系统而言,用稳相法设计的输出波形顶部较平,但边缘不陡;经8台阶和16台阶量化以后的输出波形在均匀区明显变差.图3给出用输入输出法计算的连续位相分布、8台阶和16台阶量化的结果.由图3可以看出,随着量化台阶数的增多,输出波形将逐渐接近连续分布时的结果.在量化台阶数目 $M=8$ 的情况下,图4给出遗传算法在 $N=100$ 时的输出波形与其他两种算法在 $N=400$ 时的输出波形.由图4可见,无论是输出波形的均匀性还是边缘的陡度,遗传算法的结果都远比其他二者为好,而且,遗传算法的最细线条宽度较其余两种方

法加宽了 4 倍,这就给制作带来了极大的便利.

用遗传算法设计的 H_1 和 H_2 的位相分布如图 5 和图 6 所示.

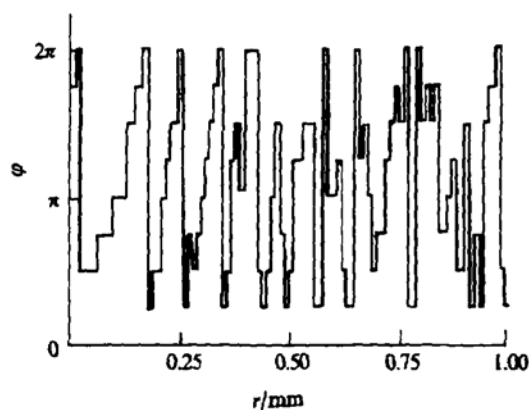


图 5 H_1 的位相分布

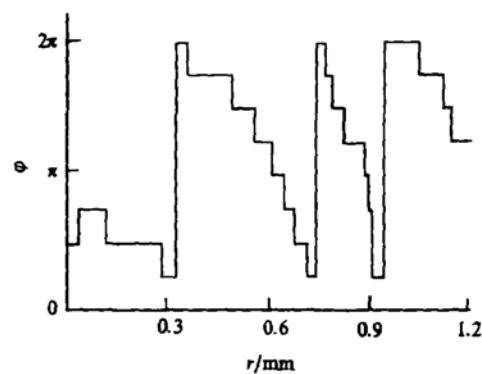


图 6 H_2 的位相分布

4 结 论

本文讨论了用遗传算法设计圆对称光束波前变换系统的问题,并通过模拟计算比较了遗传算法、稳相法和输入输出法设计的结果,发现采用遗传算法设计可以最大限度地利用生产工艺所能达到的精度.在相同的制作工艺条件下,用遗传算法设计制作出的二元光学整形元件比用后两种方法得到的输出波形好得多.因此,我们认为,在我国微细加工设备和技术条件下,要求制备高质量的二元光学元件可以从设计方法寻找解决途径,这是具有现实意义的.

- [1] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (Addison - Wesley Reading, MA, 1989).
- [2] A. P. Bennett and J. L. Shapiro, *Phys. Rev. Lett.*, **72**(1994), 1305.
- [3] 羊国光, *光学学报*, **13**(1993), 577.
- [4] U. Mahlab, J. Shamir and H. G. Caulfield, *Opt. Lett.*, **16**(1991), 648.
- [5] W. B. Veldkamp, *Appl. Opt.*, **21**(1982), 3209.
- [6] J. Cordingley, *Appl. Opt.*, **32**(1993), 2539.
- [7] 张静娟、羊国光、许超等, *物理学报*, **41**(1992), 1941.
- [8] 许超、张静娟、陈俊本, *物理学报*, **42**(1993), 1245.
- [9] 顾本源、杨国桢、董碧珍, *物理学进展*, **8**(1988), 365.
- [10] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, *Optik*, **34**(1971), 357; *ibid.*, **35**(1972), 237.
- [11] J. R. Fienup, *Appl. Opt.*, **21**(1982), 2758.
- [12] F. S. Roux, *Opt. Eng.*, **30**(1991), 529.

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM TO LASER BEAM RESHAPING

ZHANG JING - JUAN JI YANG YAO DE - CHENG

(*Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing 100039*)

CHEN JUN - BEN

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031*)

(Received 18 January 1995; revised manuscript received 23 May 1995)

ABSTRACT

Genetic algorithm is used to design a binary optical system with 8 grey levels to implement the wavefront transformation from gaussian beam to circularly flat - top beam. The comparison with the stationary phase method and the input - output method shows that genetic algorithm is more appropriate to design binary optics for profile reshaping than the other two methods.

PACC: 4280K; 4230