

遗传禁忌混合的膜系优化设计

孔 艳 朱华新

(江南大学光信息科学与技术系, 江苏 无锡 214122)

摘要 传统遗传算法的并行机制使得遗传算法的广域搜索能力较强,而禁忌搜索算法具有较快的收敛速度和较强的局部搜索能力。将遗传禁忌混合的优化算法用于光学薄膜的膜系优化设计中。混合优化算法的主体思路是以遗传算法为主体,把禁忌搜索算法的多样化特征引入遗传算法的交叉和变异中,从而使搜索过程具有记忆能力,实现两种算法的优势互补。通过减反膜和分束膜的实例优化设计,得到了比传统遗传算法更好的设计结果,表明该算法是高效和可靠的。

关键词 光学薄膜;优化设计;遗传算法;禁忌算法

中图分类号 O484.4⁺1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.123102

Coating Optimization Design Using Genetic/Tabu Hybrid Optimization Algorithm

Kong Yan Zhu Huaxin

(Department of Optical Information Science and Technology, Jiangnan University,
Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract Traditional genetic algorithms (GA) are of good ability of global search because of its parallelism, while tabu search algorithm is of fast convergence and great local search capacity. Combining the advantages of genetic algorithms and tabu search algorithm, a new algorithm — genetic/tabu hybrid optimization algorithm is proposed to design multilayer coatings. The theory of tabu search is imported into the crossover and mutation processes of GA, which makes the algorithm have the ability of memorizing. Better designs are obtained using genetic/tabu hybrid optimization algorithm to design antireflection coatings and beam splitter than the traditional GA. The results indicate the effectiveness and reliability of the algorithm.

Key words optical thin film; optimization design; genetic algorithm; tabu algorithm

OCIS codes 310.6805; 310.4165; 220.4000

1 引 言

多层光学薄膜的优化设计方法一直是薄膜光学研究的重要方向^[1,2]。以膜系结构(包括膜层选取的材料、膜层数量、膜层厚度等)为参数的评价函数是一个比较复杂的多峰函数,多数传统的优化算法用于优化设计膜系时,极易陷入到局部极值点,而且搜索效率和应用范围都受很大的限制。

传统遗传算法(GA)的并行机制使得遗传算法的广域搜索能力较强。但是由于它的交叉遗传机制导致染色体间具有局部相似性,另一方面变异能力不够使得种群多样性不够,而导致搜索停滞不前,陷入“早熟”,算法的爬山能力较差。相对于遗传算法,禁忌搜索(TS)^[3,4]算法具有较快的收敛速度和较强的局部搜索能力,对于一个较好的初始结构能很快收敛并得到全局最优解^[5]。

本文结合两种算法的优点,将遗传禁忌混合优化算法用于膜系设计中。通过减反膜和分光膜的实例优化设计,得到了比传统遗传算法更好的设计结果,表明了该算法的高效性和可靠性。

收稿日期: 2012-08-21; **收到修改稿日期:** 2012-09-17; **网络出版日期:** 2012-10-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP111A20)资助课题。

作者简介: 孔 艳(1979—),女,博士,讲师,主要从事光学算法优化方面的研究。E-mail: ykong80@163.com

2 基本理论

依据薄膜光学的基本理论,整个膜系结构的反射率是入射介质的折射率 n_0 、基片的折射率 n_s 、各层薄膜的折射率 $n_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ 和各层膜厚 $d_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ 的函数,它又与入射角 θ_0 和所在波长 λ 有关^[6]。

膜系的特征矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \frac{j}{\eta_i} \sin \delta_i \\ j\eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\eta_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ_i 为膜层的相位厚度,表示为

$$\delta_i = \frac{2\pi n_i d_i \cos \theta_i}{\lambda}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2)$$

式中 η_i 为膜层的修正光学导纳,

$$\begin{cases} \eta_i = n_i / \cos \theta_i & \text{for p-component} \\ \eta_i = n_i \cos \theta_i & \text{for s-component} \end{cases}. \quad (3)$$

膜系的等效导纳定义为

$$Y = C/B, \quad (4)$$

则膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^* \quad (5)$$

各层薄膜材料的折射率 n_i 和厚度 d_i 一经确定,即可根据上述公式得到在波长 λ 处的反射率 $R_s(\lambda)$ (s 光的反射率) 和 $R_p(\lambda)$ (p 光的反射率),则有

$$\bar{R}(\lambda) = [R_s(\lambda) + R_p(\lambda)]/2. \quad (6)$$

为合理表征设计多层膜系结构的光谱性能与目标值之间的偏差,需要合理的评价函数。对一般膜系,选取普遍通用的评价函数:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \mu_i [R(\lambda_i, \mathbf{x}) - \bar{R}(\lambda_i)]^2, \quad (7)$$

式中 m 为所考虑的参考波点数, $\bar{R}(\lambda_i)$ 为预期反射率, μ_i 为权重因子, $\mathbf{x} = [d_1, d_2, \dots, d_k]$ 为膜系依次厚度结构参数。

膜系的各层折射率、厚度均可由传统遗传算法及改良遗传算法进行优化,但实际过程中可供选择的薄膜材料有限,无法获得任意折射率及折射率任意变化的材料,通常情况下膜系各层的折射率均为已知固定的常量(不做变量),因此在确定材料和膜系层数后,仅对各层膜的厚度进行优化。

3 算法实现

算法将 GA 作为主体,把禁忌搜索算法的多样化特点引入 GA 的交叉和变异中,从而使搜索过程具有记忆能力,实现两者的优势互补。两种算法结合的总体思路为:1)把禁忌搜索算法的“特赦”和“禁忌”思路引入 GA 中,改进其实际交叉操作过程,不仅可实现原本遗传算法的“精英保留”,而且更具有记忆功能,有效限制个体被替换的频率,可以保持种群的多样性,避免算法的“早熟”;2)遗传算法自身的缺陷是其爬山能力较弱,主要原因是变异操作造成的,因此采用禁忌搜索代替变异操作,加重了邻域搜索的力度,达到快速收敛的目的。

遗传禁忌混合优化算法的具体实现如下。

1) 编码选择与初始参数设定,产生初始种群。采用实数编码,对 k 层膜系,采用 k 维向量 $\mathbf{x} = [d_1, d_2, \dots, d_k]$ 表示膜系的厚度结构参数。设定种群规模 N_p ,最大遗传代数 N_G 。种群中个体的基因可以表示成

$$d_i = d_l(i) + r[d_u(i) - d_l(i)], \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

式中 r 为一个随机实数,在 $[0, 1]$ 间, $d_l(i)$ 与 $d_u(i)$ 分别为第 i 层膜设定的边界厚度。由(8)式随机产生 N_p

个符合边界条件的个体作为初始群体。

2) 判断是否满足停止准则,即判断最大代数是否达到 N_G 。满足则运算停止,并输出结果,否则将继续下面运算。

3) 根据当前种群进行选择操作。首先计算个体的适应度值。选择适应度值标定函数 $G(\mathbf{x})$:

$$G(\mathbf{x}) = 1/F(\mathbf{x}), \quad (9)$$

用转轮法进行正比选择双亲,适应度高的个体被选择作为双亲的几率大。该适应度函数使种群的选择压力随种群进化增大。到种群进化后期,不同个体间选择概率相差很大,种群将很快达到收敛^[7,8]。

4) 引入禁忌搜索的思想进行交叉遗传。

① 对于每一对双亲,生成 $[0,1]$ 之间的随机数 r ,如果 $r \leq P_c$ (P_c 为交叉概率),则双亲染色体进行交叉操作,产生两个子代。否则双亲直接进入子代。交叉操作采用单点交叉:随机产生交叉位置,并在该位置进行交换操作,如图1所示。

② 依据父代染色体的平均适应值作为渴望水平,并将染色体的适应度值作为禁忌对象。

③ 如果子代染色体没有被禁忌,则进入下一代。否则计算其适应度值,如果子代适应度值优于渴望水平,则破禁,被赦免进入下一代。其他则选择父代染色体进入下一代。

5) 采用禁忌搜索进行变异操作。

① 初始化禁忌搜索算法,设定禁忌搜索的渴望水平、禁忌表和迭代次数。以种群的平均适应值为渴望水平,以基因变异方向为禁忌对象,对 k 层膜系最多有 $2k$ 个变异方向,用 k 位二进制数表示。

② 对于每个染色体,首先生成 $[0,1]$ 之间的随机数 r ,若 $r \leq P_m$ (P_m 为变异的概率),则将该染色体进行禁忌搜索变异操作,否则将考虑下一个染色体。

③ 以当前染色体为初始解,以其与相邻染色体的超空间距离 s 为搜索半径,产生候选解集的基因:

$$d_i^{\text{new}} = d_i^{\text{odd}} + (-1)^{b(i)} rs, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (10)$$

式中 r 为 $[0,1]$ 间的随机实数, $b(i)$ 为基因的变异方向, $b(i) = 0$ 基因向正方向变化, $b(i) = 1$ 向负方向变化。

④ 依据设定的渴望水平和禁忌表,选择一个解,并将禁忌表更新。

⑤ 判断禁忌搜索停止准则是否满足,满足则结束搜索,否则转③。

6) 以新的种群返回2),继续下一代遗传和变异。

4 优化设计实例

由于 Matlab 软件优越的矩阵计算功能,采用遗传禁忌混合优化算法和 Matlab 编程对光学膜系中常见的减反膜和分束膜进行优化设计,并与传统的遗传算法优化结果进行了比较。

4.1 减反膜设计

优化设计了 400~800 nm 波长范围的减反膜。设计采用 8 层膜系,选择 TiO_2 和 MgF_2 作高低折射率材料,两者的色散情况如表 1 所示,K9 玻璃作基底,由于 K9 玻璃在可见光区的色散很小,所以折射率可以粗略记为 1.52,即为非色散情况,光线垂直入射,设定目标为 $T=100\%$ 。

表 1 TiO_2 和 MgF_2 的色散情况

Table 1 Dispersion of TiO_2 and MgF_2 at different wavelengths

Wavelength /nm	400	600	800
TiO_2 dispersion	2.5	2.35	2.3
MgF_2 dispersion	1.4	1.38	1.35

设计过程中,种群规模 $N_p=500$,最大遗传代数 $N_G=50$,交叉和变异概率分别取 $P_c=0.9$, $P_m=0.2$ 。对每一层薄膜的物理厚度进行优化,其搜索区间为 5~150 nm。评价函数采用(9)式,目标反射率 $\tilde{R}=0$,其中

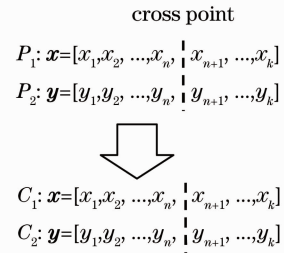


图 1 实数编码单切点交叉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-tangent-point crossover operator in real codes

权重因子 $\mu=1$ (在 400~800 nm 均衡优化,并未突出某一波段重点优化)。变异操作过程中设置禁忌表长度为 10,最大迭代次数为 25。以父代的平均适应值为渴望水平。

图 2 是优化后膜系的反射率曲线(实线)。图中同时给出了相同设计条件下,传统 GA 优化后的反射率曲线(虚线)。表 2 给出了不同优化方法得到的膜系结构和平均折射率值。表中给出的数据是高低折射率材料的光学厚度值,中心波长为 600 nm。

表 2 不同优化方法得到的减反膜结构

Table 2 Structure parameters of anti-reflection coatings obtained by different algorithms

Algorithm	Film structure	$R_{ave}/\%$
Traditional GA	A/1.228L0.215H0.45L0.343H0.426L0.279H0.522L0.125H/G	0.623
Genetic/tabu hybrid algorithm	A/1.018L0.269H0.176L0.689H0.178L0.301H0.409L0.099H/G	0.216

4.2 分束膜设计

优化设计了 400~800 nm 波长范围的透射反射比为 1:1 的分束膜。设计采用 9 层膜系,光线 45° 入射。评价函数仍采用(9)式,目标反射率 $\bar{R}=50\% \pm 1\%$ (平均透射率),权重因子 $\mu=1$ 。其他参数设置同减反膜优化设计。

图 3 是优化后膜系的反射率曲线(实线)。图中同时给出了相同设计条件下,传统 GA 优化后的反射率曲线(虚线)。表 3 给出了不同优化方法得到的膜系结构及其光谱性能与目标值的均方根差。

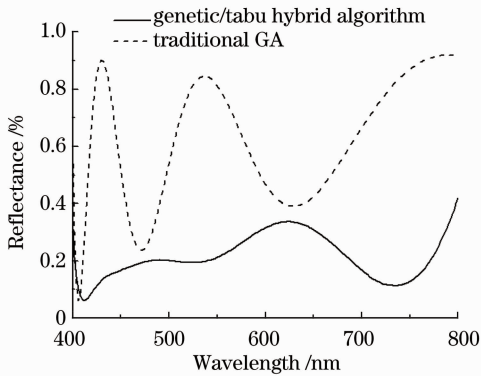


图 2 优化设计的减反膜反射率曲线

Fig. 2 Reflectance curves of AR coatings after optimization

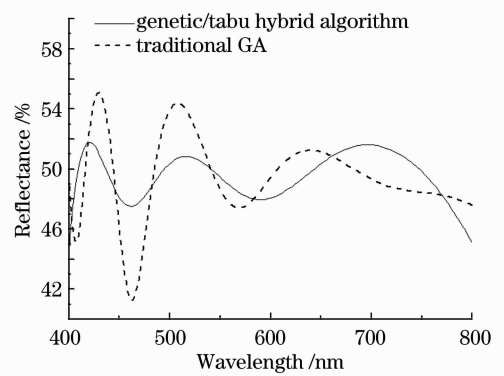


图 3 优化设计的分束膜反射率曲线

Fig. 3 Reflectance curves of beam splitter after optimization

表 3 不同优化方法得到的分束膜结构

Table 3 Structure parameters of beam splitters obtained by different optimization algorithms

Algorithm	Film structure	$R_{RMS}/\%$
Traditional GA	A/0.925H1.216L0.697H0.51L0.536H0.296L1.164H0.361L0.274H/G	2.766
Genetic/tabu hybrid algorithm	A/0.599H1.199L0.682H0.239L0.245H1.728L0.05H0.782L0.09H/G	1.633

5 结 论

利用遗传禁忌混合优化算法进行膜系优化设计,可以有效改善传统遗传算法优化过程中“早熟”及后期优化爬山能力弱的缺点,相同设计条件下,能设计和优化出更好的膜系。同时,优化时可以对每层膜的厚度搜索区间进行限制,尤其对于红外薄膜的设计而言,材料可选择的余地更小(相对可见光区),如何在有限的材料选择余地下得到更优的膜系结构显得尤为重要,因此该混合算法具有较强的指导和应用价值。

参 考 文 献

1 Yu Hua, Cui Yun, Shen Yanming *et al.*. Design, preparation and characterization of 355 nm antireflection coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **12**(12): 2026~2030

余 华, 崔 云, 申雁鸣 等. 355 nm 增透膜的设计、制备与性能[J]. *中国激光*, 2008, **12**(12): 2026~2030

- 2 Huang Yun, Wu Suyong, Yang Kaiyong. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0431002
黄云, 吴素勇, 杨开勇. 基于灵敏度控制的光学薄膜膜系主动设计方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0431002
- 3 Xing Wenxun, Xie Jinxing. Modern Optimization Calculation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 51~76
邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 51~76
- 4 Li Zhengda, Yang Bo. Study of optical design with liquid lens based on improved tabu search[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0822001
李正达, 杨波. 基于改进禁忌搜索算法的液体透镜系统优化设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0822001
- 5 Wang Dingwei, Wang Junwei, Wang Hongfeng *et al.*. Intelligent Optimization Method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. 20~55, 81~132
汪定伟, 王俊伟, 王洪峰等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 20~55, 81~132
- 6 H. A. Macleod. Optical Thin Film Technology [M]. Zhou Jiulin, Yin Shubai Transl.. Beijing: National Defense Industry Press, 1974. 192~204
H. A. 麦克劳德. 光学薄膜技术[M]. 周九林, 尹树百译. 北京: 国防工业出版社, 1974. 192~204
- 7 J. A. Dobrowolski, F. C. Ho, A. Belkind *et al.*. Merit functions for more effective thin film calculations[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2824~2831
- 8 S. Martins, J. Rivory, M. Schoenauer. Synthesis of optical multiplayer systems using genetic algorithms[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13): 2247~2254