

基于多目标遗传算法的光学薄膜优化设计

王培霞¹ 贾育秦²

(¹ 太原科技大学物理系, 山西 太原 030024; ² 太原科技大学机电学院, 山西 太原 030024)

摘要 目前光学薄膜设计大多为单目标寻优设计,难以满足一些复杂光学薄膜的需求。构建出光学薄膜的多目标优化膜系,设计一种新型、高效的多目标遗传算法(DMOGA)用于模型的求解。该算法使用基于支配关系的选择策略、基于动态聚集距离削减非支配解集规模、动态调整算法运行参数等策略使得 DMOGA 不仅容易实现,而且能得到较好分布性和逼近性的解。将 DMOGA 应用于光学薄膜的优化设计实例中,取得良好的效果,表明了多目标优化在光学薄膜设计中的有效性以及应用前景。

关键词 薄膜;优化设计;多目标;遗传算法

中图分类号 O484.8 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.073101

Optical Thin Film Design Based on Multi-Objective Genetic Algorithm

Wang Peixia¹ Jia Yuqin²

¹ Department of Physics, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China

² College of Mechanical Electronic Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract At present, nearly all optimization methods used for optical thin film design can seek only one object, which is difficult to meet the complex needs of optical thin films. So, the multi-objective optimization model of optical thin film and a new multi-objective genetic algorithm (DMOGA) are proposed. In DMOGA, a method based on non-dominated relationship is used in choosing operator. Solution with qualified distributivity and approximation by shrink of the population of non-dominated set is achieved based on dynamic crowding distance and the algorithm parameters are adjusted dynamically to improve the efficiency of algorithm. Some examples of optical thin film designs are solved by DMOGA. The results show that DMOGA is a useful algorithm for multi-objective problems and may have a bright future in optical thin film design.

Key words thin films; optimization; multi-objective; genetic algorithm

OCIS codes 310.0310; 310.4165; 310.6845

1 引言

光学薄膜^[1]具有丰富的光谱性能,在航天、通信、计算机、能源、交通、医疗和国防等领域得到广泛的应用,并在各个方面深刻影响着人民的生活。伴随着光电子技术的飞速发展,新的应用需求对光学薄膜的性能、应用范围、类别和数量等方面得到迅速发展,同时对光学薄膜的设计提出了许多新的要求。常用的光学薄膜设计方法有梯度法、变尺度法(拟牛顿法)和单纯形法^[2]等,特别是20世纪80年代发展起来的Needle法^[3],基本上能对大部分的光学薄膜进行设计。但是,这些方法都是局部优化方法,对初始值的选择要求较高,而且不能保证所得到的结果是最优解。近年来,随着计算机技术的发展,模拟退火算法和遗传算法等^[4,5]全局收敛算法在光学薄膜设计中表现出良好的效果。针对目前光学薄膜设计中往往只考虑某单一目标,这不能满足一些光学薄膜设计要求的现状。本文依据光系薄膜设计理论,建立了光学薄膜设计的多目标

收稿日期: 2010-11-02; 收到修改稿日期: 2011-03-09; 网络出版日期: 2011-05-20

基金项目: 山西省自然科学基金(2008011027-1)资助课题。

作者简介: 王培霞(1953—),女,副教授,主要从事大学物理、光学技术等方面的研究。E-mail: wpxs@163.com

模型,针对该模型设计了一种新型、高效的多目标遗传算法(MOGA)用于求解该模型,最后用实例验证了算法的有效性。

2 光系薄膜设计理论

影响光系薄膜光学性质的因素主要有:入射介质折射率 n_0 ,基板折射率 n_s ,这些因素由使用环境等众多因素决定;膜系的工作波段范围 λ 、入射角 θ ,这些因素一般是因设计需要而定;每层膜的折射率 n_i ,厚度 d_i 以及膜系的总层数 m ,这些称为膜系设计的结构参数,是设计者能够改变的。

根据薄膜光学原理,光学膜系的性质可以通过膜层特征矩阵的连乘来计算,

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{k=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_k & i \sin \delta_k / \eta_k \\ i \eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ_k 为膜层的相位厚度,可表示为

$$\delta_k = \frac{2\pi n_k d_k \cos \theta_k}{\lambda}, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

η_k 为有效导纳,可表示为

$$\eta_k = \begin{cases} n_k / \cos \theta_k & \text{p component} \\ n_k \cos \theta_k & \text{s component} \end{cases}, \quad (3)$$

其中折射角 θ_k 由 Snell 定律确定

$$n_0 \sin \theta_0 = n_k \sin \theta_k, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

膜系的等效导纳 Y 为

$$Y = C/B. \quad (5)$$

则可以计算出膜系的反射率 R 和折射率 T ,

$$R = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2, \quad T = \frac{4\eta_0 \eta_{m+1}}{|\eta_0 B + C|^2}. \quad (6)$$

当光学薄膜使用的材料以及结构确定,只有每层膜的厚度是设计变量。本文以反射率作为设计依据,薄膜 p 分量和 s 分量的反射率为厚度 $d(d=d_1, d_2, \dots, d_m)$ 的函数: R_p^D 和 R_s^D 。

设计光学薄膜即是通过讨论给定结构参数下薄膜系统的光学特性与所要求的目标特性(R_p^M 和 R_s^M)之间的偏差,从而将薄膜设计问题转化为选择结构参数的最小优化问题。常用的目标函数^[6]构建方式有

$$F(d) = \sum \omega_i (R^D - R^M)^2, \quad (7)$$

式中 ω_i 为权重系数。该方式实际上是把不同偏振分量在不同格点处的反射率残差按照一定的权重进行了叠加,也有不少文献仅仅考虑 p 分量的反射率残差。

因优化算法的限制,对光系薄膜进行单目标设计对问题进行简化并得到了较好的设计效果,但随着对光系薄膜要求的提高和计算方法的改进,使对光系薄膜多目标优化设计不仅变得必要也能够实现。文献[6]尝试使用基于免疫应答原理的多目标优化方法对光系薄膜进行多目标优化设计并取得良好效果。多目标遗传算法在光学薄膜优化设计也有成功的应用,比如商用的 Macleod 和 Tfcalc 软件。然而,随着多目标遗传算法研究繁荣发展,多目标遗传算法的理论和实践有长足的发展,设计出高效的遗传算法并应用于光学薄膜的设计中,以得到更好的优化效果,仍是一个值得研究的课题。

3 基于支配关系选择的多目标遗传算法

遗传算法是一种受到自然界生物从低级到高级的进化过程启发,借鉴物竞天择、优胜劣汰、适者生存的自然选择和自然进化机理而产生的一种仿生智能进化算法,对于复杂函数优化等问题具有很强的全局搜索能力和很快的收敛速度。遗传算法通过交叉算子、变异算子、选择算子逐步进化来得到最优解,标准的遗传算法只能应用于单目标优化问题,但其隐并行的计算模式十分适合用于多目标问题的求解。

3.1 多目标遗传算法

多目标优化问题和单目标优化问题有本质的区别,多目标优化问题不再是寻求某个目标最优,因多数情况各个目标相互制约,多目标优化问题寻求的是一个帕累托(Pareto)最优解集^[7],多目标优化算法和单目标优化算法也有很大区别。

遗传算法不仅已经在单目标优化问题中得到广泛的应用,也在多目标优化问题中得到足够的重视,许多学者开发了各种多目标遗传算法,比较经典的方法有:Schaffer^[8]率先提出了向量评估遗传算法(VEGA)用于求解多目标问题以来,Zitzler等^[9]提出的强 Pareto 进化算法(SPEA),Kalyanmoy等^[10]提出的改进非劣性分层遗传算法(NSGA-II)等。这些方法各有优缺点,本文在总结这些方法的经验上提出一种新的多目标遗传算法,基于支配关系选择的多目标遗传算法(DMOGA)。基于支配关系选择的多目标遗传算法在选择方式上使用基于个体支配关系的锦标赛选择方法,算法产生的 Pareto 解采用外部种群储存并使用改进的快速排序法构造,基于动态聚集距离对外部种群进行削减使算法得到分布更均匀的 Pareto 前沿。

3.2 基于支配关系选择

选择策略是遗传算法中一个重要方法,选择方法的好坏影响着算法的效果。遗传算法常用的选择方法是基于个体适应度的,多目标遗传算法也往往通过不同方法定义个体的适应度。多目标遗传算法中,适应度函数定义的好坏直接影响着算法的收敛性和所得解集的分布性能。

本文避开适应度函数的构造,直接依据个体的支配关系进行选择。使用锦标赛选择的方法,从群体内随机选取两个个体,这两个个体的相互关系有支配、被支配、互不支配 3 种,依照图 1 的流程选择个体,其中 $\text{Rand}(0,1)$ 表示一个 $[0,1]$ 之间的随机数。

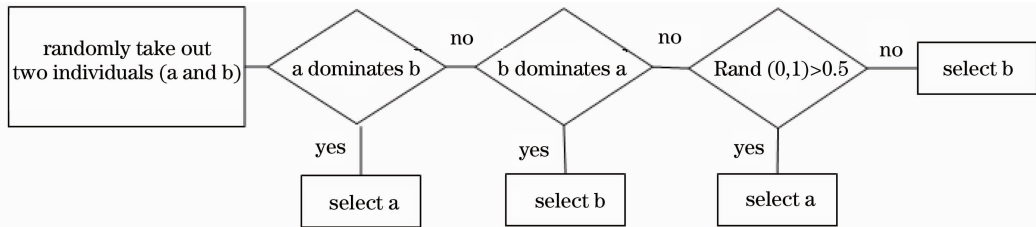


图 1 多目标遗传算法的选择策略

Fig. 1 Choose method of MOGA

3.3 动态聚集距离的计算

在算法运行过程中,会产生大量非支配个体,如果全部储存在非支配解集中,将造成非支配解集十分庞大,严重影响算法的效率。使用基于动态聚集距离^[11]对外部种群进行削减,不仅保证了外部种群保持在一定的数目,而且保证了算法的执行效率,也能保留大量分散个体使得到的 Pareto 解集具有良好的分布性。先给出个体聚集距离的计算方法。

个体 i 的聚集距离可计算为

$$I_i \cdot dcd = I_i \cdot cd / \lg(1/V_i), \quad (8)$$

式中 $I_i \cdot cd$ 为个体 i 的聚集距离,可表示为

$$I_i \cdot cd = 1/m \sum_{k=1}^m |I_{i+1} \cdot f_k - I_{i-1} \cdot f_k|, \quad (9)$$

V_i 可表示为

$$V_i = 1/m \sum_{i=1}^m (|I_{i+1} \cdot f_k - I_{i-1} \cdot f_k| - I_i \cdot cd)^2, \quad (10)$$

其中 m 为目标的维数, I_i 为对非支配个体进行排序后的第 i 个个体, $I_i \cdot f_k$ 为第 i 个个体 I_i 在第 k 维目标上排序后的第 k 维函数值。

在外部集维护过程中,剔除掉聚集距离最小的个体之后对每个留下来的个体重新计算聚集距离,称之为动态聚集距离。若外部集中的非支配个体数 N 未达到规定规模 M 时,将产生的非支配个体直接存储到外部集;否则,根据动态聚集距离从外部集中去除 $N - M$ 个个体。

3.4 精英保护策略和遗传参数自适应调节

遗传算法中的精英保留策略是将遗传算法过程中得到的优良个体之间选择进入下一代,使优良个体得到保护有利于算法的快速收敛。借助于精英保留策略的思想,先从当代的支配解集(存储为外部种群)里面随机选取一定数目的个体之间进入下一代,下一代剩余个体则按照锦标赛方法从父代子代个体中基于支配关系选择。

遗传算法进化过程中,种群的聚集程度对算法收敛性和全局搜索能力有很大影响,选择使用自适应遗传参数:当种群趋于聚集时,选择较小的交叉概率和较大的变异概率,可以提高种群的多样性,避免算法早熟收敛于局部最优处;当种群趋于发散时,选择较大的交叉概率和较小的变异概率,使种群加速收敛,增加算法的收敛速度。经过多次实验,遗传算法在进化初期种群比较分散,进化后期则种群的聚集程度较高。其中交叉概率和变异概率随种群进化代数自适应线性变化。

3.5 算法流程

使用基于支配关系的锦标赛方法选择策略、基于动态聚集距离构造外部种群、同时使用精英保护策略遗传参数自适应调节的 DMOGA 的基本流程如图 2 所示,算法具有以下特点:1)使用新的基于支配关系的选择策略避免了适应度函数的构造,简化了算法复杂度;2)外部种群的构造方法不仅提高算法效率,同时保证了 Pareto 解集分布的多样性;3)精英保护策略和自适应调节遗传参数加快算法的熟练性能和全局搜索性能。对多个测试函数的实验表明,该算法在收敛性和分布性均优于经典的 NSGA-II。

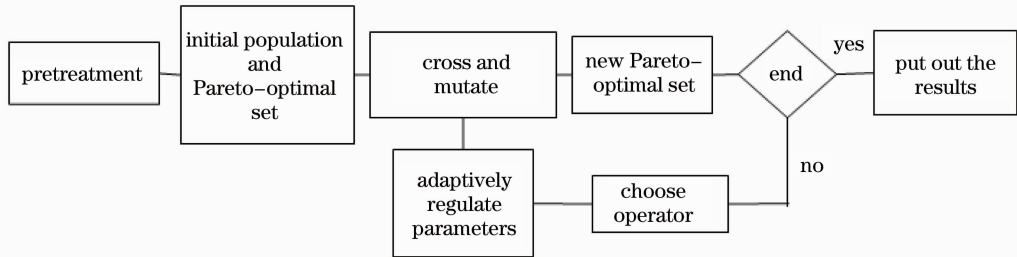


图 2 DMOGA 算法流程图

Fig.2 Flow chart of DMOGA

4 优化设计实例

根据第 2 部分的原理,使用 Matlab 编写程序,以消偏振膜系为例,说明多目标遗传算法在光学膜系优化设计中的应用。对于消偏振膜系,要求同时在 p 分量和 s 分量达到设计目标,即

$$\min \begin{cases} F_p = \sum \omega_i (R_p^D - R_p^M)^2 \\ F_s = \sum \omega_i (R_s^D - R_s^M)^2 \end{cases} \quad (11)$$

DMOGA 算法的参数设置为:群体规模 100,最大进化代数 1000,非支配解集最大为 100,交叉概率在 $[0.6, 0.9]$ 之间随进化代数线性递减,变异概率在 $[0.2, 0.5]$ 之间随进化代数线性递增。

对于某消偏振宽带减反射膜系,要求在 $600 \sim 900 \text{ nm}$ 范围的波段以 45° 射入的光高透射。选用 5 层膜系结构,高、低折射率材料分别为 $\text{TiO}_2(2.15)$ 和 $\text{MgF}_2(1.38)^{[6]}$,基底为 BK7 玻璃(1.52)。运行 DMOGA 得到如图 3 所示的结果。其中每一个点代表一种设计方案,可以供不同偏好的使用者(在不同的场合)选择。

在图 3 选择点(0.0614, 0.0581)对应的方案为例进行说明,该点所对应的膜系机构如表 1 所示,反射率曲线则如图 4 所示,在所要求的工作波段反射率均低于 0.8% ,很好地达到了设计要求。

8 层的双波段消偏振减反射膜系的设计要求是:高低折射率材料分别为 $\text{Ta}_2\text{O}_5(2.15)$ 和 $\text{MgF}_2(1.38)^{[6]}$,每层膜厚度 $d_i \in [0, 500]$,基底为 K9 玻璃($n_s = 1.52$),要求从空气($n_0 = 1.0$)中以 45° 入射角射入的光,在波长为 $500 \sim 680 \text{ nm}$ 和 $1260 \sim 1360 \text{ nm}$ 两个波段同时实现减反射。

使用 DMOGA 进行设计,得到的设计去掉一些不合标准(某方向的误差过大),结果如图 5 所示。所得到的结果分布均匀,供使用者选择。

在图 5 选择点(0.0604,0.0630)对应的方案为例进行说明,该点所对应的膜系机构如表 2 所示,反射率曲线则如图 6 所示,设计效果良好。因遗传算法是随机搜索算法,还可以通过增大最大进化代数等方法改善设计结果。

表 1 (0.0614,0.0581)点对应的膜系结构

Table 1 Concrete structure of multilayer corresponding to (0.0614,0.0581)

Layer	Material	Refractive index	Physical thickness /nm
0	Air	1.00	
1	MgF ₂	1.38	151.5165
2	TiO ₂	2.15	188.8574
3	MgF ₂	1.38	61.0098
4	TiO ₂	2.15	25.8624
5	MgF ₂	1.38	52.8595
Sub	Glass (BK7)	1.52	

表 2 (0.0604,0.0630)点对应的膜系结构

Table 2 Concrete structure of multilayer corresponding to (0.0604,0.0630)

Layer	Material	Refractive index	Physical thickness /nm
0	Air	1.00	
1	MgF ₂	1.38	152.3281
2	Ta ₂ O ₅	2.15	36.7472
3	MgF ₂	1.38	25.9268
4	Ta ₂ O ₅	2.15	16.7836
5	MgF ₂	1.38	20.4936
6	Ta ₂ O ₅	2.15	180.6068
7	MgF ₂	1.38	45.3856
8	Ta ₂ O ₅	2.15	18.4145
Sub	Glass (K9)	1.52	

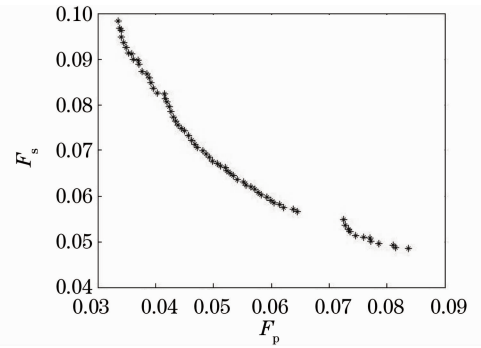


图 3 消偏振宽带减反射膜的设计结果

Fig. 3 Design results of non-polarizing broadband antireflection coating

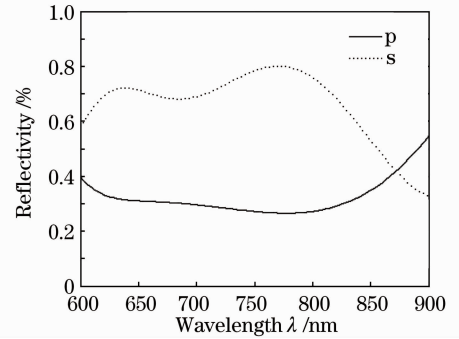


图 4 (0.0614,0.0581)点对应膜系的光谱曲线
Fig. 4 Reflectivity curve of film corresponding to (0.0614,0.0581)

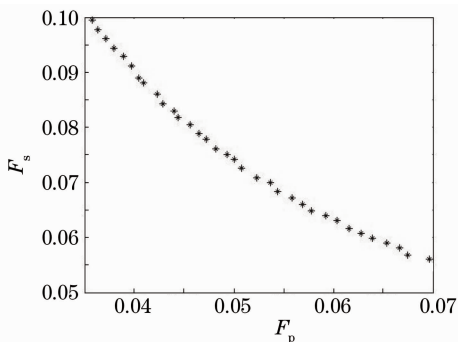


图 5 双段消偏振减反射膜的设计部分结果
Fig. 5 Part design result of two-separate-waveband depolarizing antireflection coating

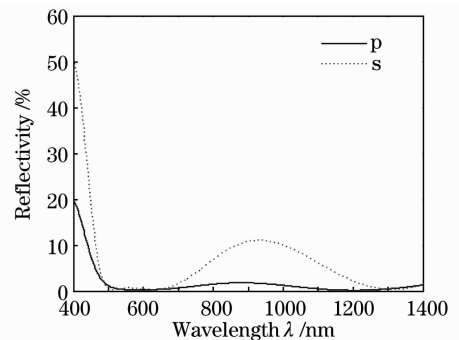


图 6 (0.0604,0.0630)点对应膜系的光谱曲线
Fig. 6 Reflectivity curve of film corresponding to (0.0604,0.0630)

5 结 论

尝试对光学薄膜进行多目标优化设计,使用多目标优化设计原理,同时对多个目标进行优化,以便得到更加合理的设计方案。为了实现多目标优化设计,提出一种新的多目标遗传算法,该算法实现简单,效率高,

全局搜索能力强等优点。将多目标遗传算法用于两个消偏振膜系设计实例中,取得了很好的设计效果,证明了设计思路的正确性,也说明了多目标遗传算法应用于光学薄膜设计中是一种值得推广应用的方法。

光学薄膜设计是一类复杂的问题,不仅需要考虑到所设计的光学薄膜的光学特性,还应该同时考虑该薄膜的容易制备、使用等问题。光系薄膜优化设计的数学模型和设计优化算法等都是光学薄膜优化设计的难点,(多目标)进化算法能够为光学薄膜优化设计提供大量崭新、高效的算法,对光学薄膜进行设计是一种具有较强理论意义和良好发展前景的方法。

参 考 文 献

- 1 J. Q. Xi, Schubert, Jong Kyu Kim *et al.*. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection[J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(3): 176~179
- 2 Wang Xuehua, Xue Yiyu, Zhao Li *et al.*. Application of the simplex method to optimum design of multi-layer optical thin films [J]. *J. WUT(Information & Management Engineering)*, 2002, **24**(5): 134~137
王学华, 薛亦渝, 赵利等. 单纯性调优法在多层膜系优化设计中的应用[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2002, **24**(5): 134~137
- 3 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, W. DeBell. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5493~5508
- 4 O. Hasancebi, S. Carbas, E. Dogan *et al.*. Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures [J]. *Comput. Struct.*, 2009, **87**(5-6): 284~302
- 5 Hyo-Gyoung Kwak, Jieun Kim. An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames [J]. *Comput. Aid. Design*, 2009, **44**(11): 2218~2227
- 6 Wang Wenliang, Xiong Shengming. Multiobjective optimization approach of optical thin film design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2026~2030
王文梁, 熊胜明. 光学薄膜自动设计的多目标优化方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 2026~2030
- 7 Zhen Jinhua. Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2007. 1~3
郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 1~3
- 8 J. D. Schaffer. Some Experiments in Machine Learning Using Vector Evaluated Genetic Algorithms [D]. Nashville, Tennessee, UAS: Vanderbilt University, 1984
- 9 E. Zitzler, L. Thiele. Multi-objective evolutionary algorithm s: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, 1999, **3**(4): 257~271
- 10 Deb Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agrawal *et al.*. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, 2002, **6**(2): 182~197
- 11 Eugene Y. C. Wong, Henry S. C. Yeung, Henry Y. K. Lau. Immunity-based hybrid evolutionary algorithm for multi-objective optimization in global container repositioning[J]. *Engng. Appl. Artif. Intel.*, 2009, **22**(6): 842~854