

一种新的光学膜系设计方法——NEEDLE 法[†]

周 健 林永昌 顾永琳

(北京理工大学光电工程系,北京 100081)

摘 要 针(NEEDLE)法是一种先进的光学膜系设计方法.它克服了传统优化方法中容易陷入局部极值的缺点.它通过在膜系中插入薄层,使得膜系评价函数降低,且优化设计可以从任意给定的单层膜开始.文中同时给出了其数学模型的详细推导,以及用 NEEDLE 法设计的光学膜系举例.

关键词 优化设计; 评价函数; 光学膜系设计

分类号 O484

以膜系结构为参数的膜系的评价函数是一个复杂的多峰值函数.当膜系层数超过 6~8 层时,膜系评价函数的峰值急剧增多,用传统的优化方法如:梯度法、鲍威尔法、复合形法、蒙特卡洛法等,都容易陷入到初始膜系结构的局部极值中去,从而无法得到满意的结果.例如:梯度法以评价函数对膜系各参数的导数的平方和的大小 f 作为判敛标准,因此用梯度法将陷入较接近于初始结构的一个局部极值处,寻优过程将无法继续.在膜系的寻优过程中,要找到一个满足设计要求的局部极小值需要一个连续的寻优过程.这个寻优过程从初始结构开始,至达到局部极值;改变膜系结构(增加或减少膜系层数),继续寻优,重复上述过程,直到满足设计要求的局部极小值时停止.

为此讨论了一种新的膜系设计方法——NEEDLE 法,它的基本思想是莫斯科大学的 Tikhonravor 于 1982 年提出的.1992 年产生了第一个 NEEDLE 法的计算机代码^[1~3].

1 原 理

NEEDLE 法的特点是对任意给定的膜系计算其 p 函数(permissible function),计算出最佳插入位置,然后在这一位置插入一极薄的膜层,插入以后将导致评价函数的大幅度降低.持续这一过程,膜系层数将不断增多,从而获得评价函数不断降低的膜系结构,而最终获得满意的结果.这时膜系的层数可能较多,可以调用别的优化方法:如共轭斜量法,使评价函数进一步降低.同时加入关于膜层厚度的约束条件,合并那些较薄的膜层.

下面,讨论在膜系的任意位置,插入一薄层后对评价函数的影响.对正入射无吸收膜系的情况,假定膜层折射率分布是分段连续的,则膜系的反射系数和反射比为

收稿日期:1996-11-12

† 国家自然科学基金资助项目

$$r(z) = \frac{n_a - Y(z, \lambda)}{n_a + Y(z, \lambda)} \quad (1)$$

$$R(z) = |r(z)|^2 = r(z) r^*(z) \quad (2)$$

其中 n_a 是出射介质的折射率, z_a 是膜系总的几何厚度; Y 是膜系的等效导纳. 由下面的微分方程得

$$\frac{dY}{dz} = i 2 [n^2(z) - Y^2(z, \lambda)] \quad (3)$$

其边界条件为

$$Y(0, \lambda) = n_s \quad (4)$$

n_s 是基片的折射率. 采用具有普遍意义的评价函数的表示形式

$$F[n(z)] = \prod_{l=1}^L v_l \{ R[n(z), \lambda] - \tilde{R}(\lambda) \}^2 \quad (5)$$

$\tilde{R}(\lambda)$ 是各波点处的理想反射比. 可以看出评价函数的值仅由 $n(z)$ 函数决定.

在插入膜层以前, 膜系的导纳用 Y 表示, 折射率分布用 $n(z)$ 表示, 插入膜层以后, 膜系的导纳用 \tilde{Y} 表示, 折射率分布用 $\tilde{n}(z)$ 表示. 如图 1 所示.

图中, z 是膜系的几何坐标, 原点是极邻近基片的位置. z_a 表示膜层总的几何厚度, \hat{z} 是任意指定的插入位置, Δz 是插入层有厚度, Y 是膜系的等效导纳, 插入后膜系的折射率分布可以写为

$$\tilde{n}(z) = \begin{cases} n(z), & z \notin [\hat{z}, \hat{z} + \Delta z] \\ \hat{n}, & z \in [\hat{z}, \hat{z} + \Delta z] \end{cases}$$

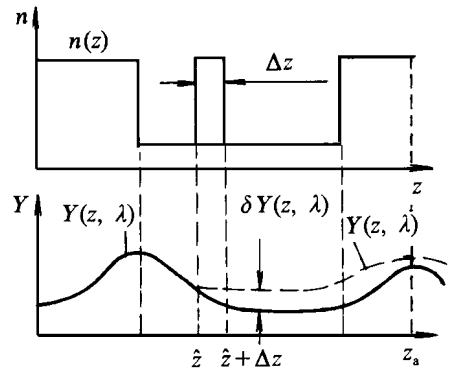


图 1 膜系的折射率和导纳的分布

这是一个关于 $Y(z)$ 的线性微分方程. 它和式(7)非常相似. 式(12)的边界条件设在点 z_a 处, 共有 L 个波点, 所以共有 L 个边界条件.

$$Y(z, l) = \frac{2}{n_a} \prod_{l=1}^L v_l [R(z, l) - \tilde{R}(z, l)] \times r^*(z) [1 + r(z)]^2 \quad (13)$$

这样式(11)可以写为

$$F = - \prod_{l=1}^L \operatorname{Re} \{ Y(z_a, l) Y^*(z_a, l) \} \quad (14)$$

可以证明, $Y(z_a, l) Y^*(z_a, l) = |Y(\xi, l)|^2$, ξ 是任意插入点.

因此
$$F = 2 \prod_{l=1}^L \frac{1}{|Y(\xi, l)|^2} [\hat{n}^2 - n^2(\xi)] z \quad (15)$$

令
$$P(z) = 2 \prod_{l=1}^L \frac{1}{|Y(\xi, l)|^2} \quad (16)$$

所以
$$F = P(\xi) [\hat{n}^2 - n^2(\xi)] z \quad (17)$$

这是所得的最终结论. 为了使评价函数得到最大的降到最低. F 应是负值, 且越小越好. 由式(17)可以看出: 当 $\hat{n}^2 - n^2(\xi) > 0$ 时(即在低折射率膜层中插入高折射率的薄层), 应求得 $P(z)$ 的最小值; 反之, 应求得 $P(z)$ 的最大值. 根据式(16), 运用一维搜索法, 可以在 $[0, z_a]$ 找到一点 ξ , 使得 $P(\xi)$ 最大或最小. NEEDLE 法的一种变形是同时寻找多个插入位置, 然后在这些位置同时插入薄层. P 函数的最佳插入位置(如图 2 所示, 箭头指).

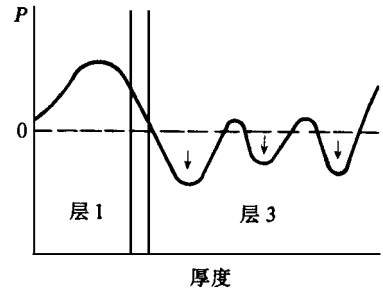


图 2 P 函数和最佳插入位置

至此, 完成了 NEEDLE 法的数学模型的建立, 对于有角度入射和含吸收的膜系, 则上述推导过程需稍作改动, 即分别考虑 S 分量和 P 分量.

2 实例应用

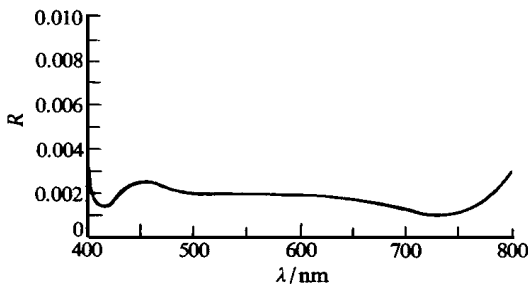


图 3 0° 入射的减反射膜

glass, H 和 L 的折射率为 1.52, 2.35, 1.38; 10 层;
glass/0.130H0.436L0.424H0.215L1.201H0.085L0.131H
0.063L0.369H0.972L/air; 中心波长为 600nm

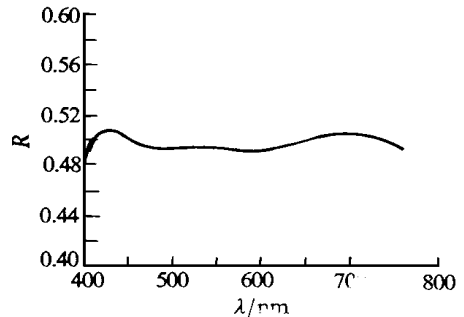


图 4 45° 入射, $R = T = 1$ 的分光镜

glass, H 和 L 的折射率为 1.52, 2.35, 1.38; 10 层;
glass/0.738L0.123H0.820L0.540H0.197L1.093H1.078L
0.966H/air; 中心波长为 600nm

作者根据上述模型编制了设计程序,下面给出这一程序的设计实例.分别设计了400~800nm的减反射膜,1 μ m分光膜和短波通滤光片,结果分别示于图3,4,5中.本程序在586/120微机运行时,10min内可以完成设计,且具有较好的结果.

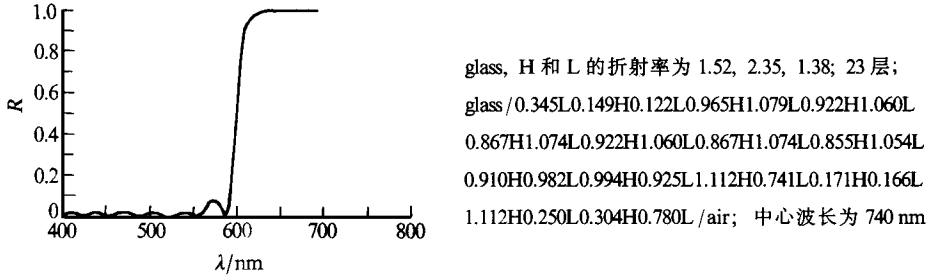


图5 0°入射短波通滤光片

参 考 文 献

- 1 Tikhonravov A V, Trubetskov M K. Development of needle optimization technique and new features. of optical layer design software. SPIE proceedings, 1994, 2253: 10 ~ 20
- 2 Tikhonravov A V, Trubetskov M K. Thin film coating design using second order optimization method. Proc Soc Photo-Optical Instrument Eng, 1992, 1782: 156 ~ 164
- 3 Sullivan B T, Dobrowolski J A. Implement of a numerical needle method for thin film design. Optical Interference Coatings OSA Technical Digest Series, 1995, 7: 72 ~ 74

New Method of Optical Coatings Design ——Needle Method

Zhou Jian Lin Yongchang Gu Yonglin

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract The needle method is a new and advanced optical coatings design method. It can solve the problem of the conventional optimum methods (too often falling into local minimum). And it can decrease the value of the merit function by inserting new thin layer. The program applying to the needle method was developed. The mathematical model and explanations of this method were supplied and some examples of optical design were presented.

Key words optimum design; merit function; optical coating design