

# 光学薄膜技术资料选编

(内部资料)

第一机械工业部情报所

# 前 言

# 核



镀膜技术是光学零件加工的关键工艺之一。

六十年代以来，由于空间技术、激光和微光技术及红外仪器的发展，促使光学薄膜技术得到较快进展。目前，从真空紫外直到远红外光谱区域内的各种薄膜均有生产。光学薄膜理论的研究、膜系设计及膜层的测量、镀制技术等都是各国有有关部门进一步从事研制的新课题。

近年来，特别是无产阶级文化大革命以来，我国光学薄膜技术也有了较快的发展，取得了显著成果。激光膜的反射率达 99.7~97.8%；介质干涉滤光片的半宽度做到小于 10 埃，透射率达 65~70%；增透膜的透射率达 98%（透射范围在 2700 埃以内）；随着彩色电视和电影事业的发展，分光膜和冷光膜的镀制技术也有了较大提高，在膜系设计和氧化物薄膜反应蒸发技术方面，也取得初步成果；真空镀膜设备及膜厚控制装置都有了新的发展。

为了总结交流经验，我们根据今年七月“光学薄膜技术交流会”的要求，把有关单位的科研成果和生产实践的经验，选编成本册出版。限于水平，错误之处，在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1972.9

# 毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

# 目 录

一、膜系设计 .....	( 1 )
1-1 光学多层膜自动校正设计 .....	上海光学仪器研究室 浙江大学光仪系镀膜组 ( 1 )
1-2 膜系设计简述 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 12 )
1-3 多层介质膜的自动校正 .....	临夏电影机械研究所 ( 20 )
1-4 用等效折射率的概念设计红外带通滤光片 .....	..... 中国科学院上海技术物理研究所 ( 24 )
二、干涉滤光片 .....	( 35 )
2-1 干涉滤光片的特性和结构 .....	浙江大学光仪系镀膜组 ( 35 )
2-2 法布里-珀罗干涉滤光片的镀制 .....	上海光学仪器研究室 ( 43 )
2-3 全电介质超窄带干涉滤光片制备中的一些问题 .....	北京玻璃研究所 ( 55 )
2-4 3~5 $\mu$ 红外截止滤光片的试制 .....	北京玻璃研究所 ( 69 )
2-5 10.6 $\mu$ 各种滤光片的制备 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 73 )
2-6 反红外宽透射带滤光片 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 76 )
2-7 8~14 $\mu$ 多层膜干涉滤光片 .....	中国科学院上海技术物理研究所 ( 79 )
2-8 干涉滤光片的制备及其光学特性 .....	中国人民解放军京字一二六部队 ( 82 )
2-9 介质干涉滤光片的镀制 .....	上海光学元件厂 ( 91 )
2-10 干涉滤光片的胶合 .....	上海光学元件厂 ( 96 )
2-11 近红外宽带滤光片的试制 .....	南开大学物理系镀膜组 ( 99 )
2-12 用光谱照相法测定窄通带干涉滤光片的几个参数 .....	北京玻璃研究所 ( 102 )
三、激光膜与氧化物薄膜的蒸镀 .....	( 111 )
3-1 二氧化锆( $ZrO_2$ )——二氧化硅( $SiO_2$ )反射膜的制备 .....	上海光机所镀膜组 ( 111 )
3-2 关于镀制6328 $\text{\AA}$ 全反射膜的一些工艺问题 .....	复旦大学光学系镀膜组 ( 118 )
3-3 氧化物薄膜反应蒸发技术 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 124 )
3-4 用充氧技术蒸涂 $Bi_2O_3$ 、 $SiO_2$ 薄膜 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 130 )
3-5 用电子枪蒸涂高温氧化物薄膜 .....	中国人民解放军沈字六一九部队 ( 130 )
四、镀膜设备及膜厚控制装置 .....	( 137 )
4-1 KGJ-1型光学薄膜控制仪 .....	上海曙光机械制造厂 ( 137 )
4-2 真空电子束蒸镀技术 .....	上海机械学院 ( 145 )
4-3 介绍一种真空蒸镀用的多坩锅电子枪 .....	上海机械学院 ( 151 )
4-4 双光路膜厚控制仪 .....	北京仪器厂、北京工业学院 北京第二光学仪器厂 ( 157 )
4-5 光学薄膜的厚度控制装置——波长扫描法 .....	..... 中国人民解放军京字一二六部队 ( 167 )
五、彩色分光膜 .....	( 179 )

5-1	用于彩色电视摄影的三色分光滤光片的镀制	浙江大学光仪系镀膜组	(179)
5-2	彩色分光膜的制备	中国人民解放军沈字六一九部队	(185)
5-3	彩色电视分光膜的镀制	新添光学仪器厂	(189)
5-4	分光膜	上海光学仪器研究室	(202)
六、其他			(215)
6-1	用镀膜方法产生补色双像	新添光学仪器厂	(215)
6-2	ZnS-MgF <sub>2</sub> 多层介质膜龟裂现象的克服	南开大学物理系镀膜组	(220)
6-3	介绍几种薄膜的镀制工艺	西北光学仪器厂	(222)

# 一、膜系设计

## 光学多层膜自动校正设计

上海光学仪器研究室  
浙大光仪系镀膜组

镀膜技术近年来有着较大的发展，特别是出现多层膜以后，给薄膜在光学方面开辟了新的应用，薄膜光学理论、薄膜设计至薄膜测量、薄膜制备都取得了长足的进步，逐渐形成一个比较完整的领域，是引人注目的课题之一。我国真空镀膜技术从无到有发展也很快。随着国民经济和光学仪器工业的飞跃发展，对多层高反射膜、多层减反射膜、多层干涉滤光膜、多层光热分离膜不断提出了新的要求，因此掌握薄膜设计的重要性已日渐显露，同时电子计算机的广泛应用，也为薄膜自动设计提供了可能性。

本文是光学多层膜自动校正设计工作的一个初步小结，在第一部分将简要地叙述问题的提法和数学处理。第二部分阐述数学计算方法和实现程序。所应用的方法有最陡下降法、阻尼最小二乘法以及非线性不等式法、正交化法等。所编制的程序多是在 DJS-5 和 X-2 数字计算机上实现的。第三部分是我们的粗浅体会。由于初始结构与能得到的最后解是密切相关的，初始结构的自动设计必须引起注意。因此在整个设计过程中几种设计方法的综合使用是可取的。上述所有方法中都是把各层膜的厚度作为设计参数来处理的。但目前在国内，以很好的精度镀制任意膜厚组合的多层膜，工艺上存在着一定困难，为了使自动设计的最佳方案在工艺上能够实现，我们设置了逐组变更法，按相近厚度把多层膜分成若干组再进行适当的校正。在本文最后则是一些计算实例和程序框图。

我们知道，在光线的入射角  $\varphi_0$ ，入射媒质的折射率  $N_0$  和衬底的折射率  $N_s$  给定的条件下，一组膜系的反射率  $R$  取决于膜层所用物质的折射率  $N_1, N_2, \dots, N_n$  和各层的光学厚度  $x_1, x_2, \dots, x_n$  以及所考定的光波波长  $\lambda$ ，也即

$$R = R(N_1, N_2, \dots, N_n, x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda) \quad (1.1)$$

现欲在给定的波段  $\lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_0$  上确定设计参数  $N_i$  和  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )，以获得所要求的光谱特性。在某些文献上，可以见到将所有这些参数均作为可校正的参数的自动设计方案。但是，由于至今可供镀制薄膜的物质为数甚少，从中挑选近于由这些方案得出的折射率最佳参数，在绝大多数情况下是不能赋予实现的。所以，目前多采用以各层光学厚度  $x_i$  作为可校正的参数，故  $R$  可简单的表示为

$$R = K(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda)$$

这表示在给定的波长  $\lambda$  上， $R$  是一个  $n$  维函数，我们所致力的是从  $n$  维空间中某一点  $X^0(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ ——初始设计——出发，经过某种数学手段，找到该空间中的一点  $X^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ ，它所对应的  $R(X^*, \lambda)$  符合于我们所期望的光谱特性的要求。

所谓某种数学手段即选用某种从  $X^0$  到  $X^*$  的收敛法。这涉及抽象出一种评价不同的设计方案  $X'$ ,  $X'$  的质量好坏 (也即接近于  $X^*$  的程度) 的判断方法, 这种方法可分为两类: 一类是设置  $X$  的某一函数  $\Phi(X)$  作为评价函数, 其是由数量的大小判定方案优劣的方法; 另一类是不设置评价函数, 即所谓领域型自动设计的方法 (下面将谈到)。本文所讨论的收敛法除去非线性不等式法属于后者外, 其余均属于前者。

由于通常  $R(X, \lambda)$  是  $X$  的非线性函数, 在进行数值计算时, 常将其展开为泰勒级数取其开始的几项来近似。当弃去二次和二次以上的项时, 即线性近似; 当弃去二次以上 (保留二次) 的项时即二次近似。目前, 以线性近似为基础的方法占主流。本文也主要考虑线性近似。

下面进行收敛法的具体阐述。

## 二

### 1. 最陡下降法

这里考虑的是一种改进了的最陡下降法 [1]、[2] 它以

$$\Phi(X) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} W(\lambda) |R(X, \lambda) - R^*(\lambda)| d\lambda \quad (2.1)$$

作为评价函数, 其中,  $W(\lambda)$  为权函数, 这是与能量分布、受光器的分光灵敏度等有关的量。  $X = X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  如前所述为各层的光学厚度,  $R^*(\lambda)$  则为理想的光谱特性。在  $W(\lambda) = 1$  时,  $\Phi(X)$  的几何意义是图 1.1-1 中阴影部分的面积, 其物理意义是所考虑的光谱范围内的残余能量。

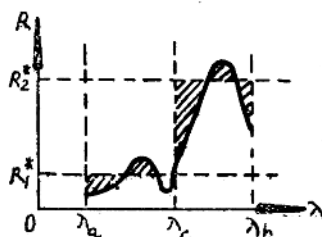


图 1.1-1

以初始点  $X^p$  为中心, 作半径为  $r$  的  $n$  维超球面

$$\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^p)^2 = r^2 \quad (2.2)$$

在此球面上, 求取使  $\Phi(X)$  达到极小值的点  $X^0$ , 为此,

用拉格朗日乘子法, 求该条件极值问题, 变为下述函数  $F(X)$  的普通极值问题

$$F(X) = \Phi(X) + \varepsilon \left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^p)^2 - r^2 \right\} \quad (2.3)$$

令  $\text{Grad} F(X) = 0$  定出待定参数  $\varepsilon$ , 同时用下述近似

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)_0 &\approx \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)_p \approx \frac{1}{r} \left\{ \Phi(x_1^p, x_2^p, \dots, x_{i-1}^p, \right. \\ &\quad \left. x_i^p + r, x_{i+1}^p, \dots, x_n^p) - \Phi(X^p) \right\} \equiv \frac{\Phi^{(i)}}{r} \end{aligned} \quad (2.4)$$

可导出超球面上极值点之座标  $X^0$  为:

$$x_i^0 = x_i^p \pm r \frac{\Phi^{(i)}}{\Phi_0} \quad (2.5)$$

式中

$$\Phi_0 = \left\{ \sum_{i=1}^n [\Phi^{(i)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

\* 为便于比较, 实例中权重因子均取 1。在实际设计时再根据每次校正的光谱特性曲线给予适当加权。

若记

$$\cos \omega_i \equiv \Phi^{(i)} / \Phi_0$$

$$\cos \Omega \equiv (\cos \omega_1, \cos \omega_2, \dots, \cos \omega_n)$$

则 (2.6) 式成为

$$x_i^0 = x_i^p \pm r \cos \omega_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

或即

$$X^0 = X^p \pm r \cos \Omega \quad (2.7)$$

从几何上来讲,  $\cos \Omega$  是由数量场  $\Phi(X)$  所产生的梯度场  $\vec{G} = \text{Grad} \Phi(X)$ , 在点  $X^p$  的梯度矢量之方向余弦, 也即等位面  $\Phi(X) = \Phi(X^p)$  在  $X^p$  点的法线矢量的方向余弦。

在 (2.7) 式中的正负号, 应取负号 (即取梯度的相反方向) 得点  $X^0$ 。继而评价新参数组  $X^0$ , 若  $\Delta = \Phi(X^0) - \Phi(X^p) < 0$ , 表示  $X^0$  优于  $X^p$ , 便以  $X^0$  取代  $X^p$ , 继续前过程, 至出现  $\Delta > 0$ , 则需适当地缩小超球半径  $r$  再进行迭代。直至  $r$  充分缩小到某一预给值  $\delta > 0$  时为止。因为, 由此迭代后得到的点列所对应的评价函数值是单调下降的, 且显然有下界, 故收敛于它的下确界。此下确界即为函数  $\Phi(X)$  在点  $X^p$  附近的极小值。

为实现该法我们所作的程序框图及计算实例见附录。实践结果表明, 该法是比较可行的, 但在后几次迭代中, 极小化  $\Phi(X)$  的调整幅度不大, 收敛速度变慢。有如下几个问题需要提出:

(1) 超球半径  $r$  的大小, 由设计者根据经验给出适当的值。过分大则计算偏导数时的误差大, 甚至会产生远离极值点的情况, 这相当于给出更坏的初始设计。但  $r$  过分小, 则显然会增加迭代次数而影响收敛速度。

(2) 用外推差商近似计算偏导数时的步长  $r$ , 也必须选择适当。它可以取得和该次迭代中的超球半径  $r$  不同的数值是更合理的 (譬如控制  $r$  大小的  $\delta$  为  $2m\mu$ , 则外推步长取一适当值不变, 如  $5m\mu$  左右)。作了这一改动后所推导出的迭代公式在形式上仍与 (2.5) 式相同 (推导从略)。这一改动的作用在于, 当  $r$  较大时, 偏导数的符号和数值仍可较为精确。

(3) 求积分 (2.1) 时, 须先用子程序计算  $R(X, \lambda)$ , 我们大多选用特征导纳计算公式 (见 [5] 或 [6])。而积分本身的近似公式, 在原则上可以用梯形公式, 也可用辛普生公式, 并不影响  $\Phi(X)$  作为评价量来鉴定参数组  $X$  的质量标准。但须注意的是

梯形公式

$$S \approx \frac{(\lambda_b - \lambda_a)}{2(m-1)} [y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{m-1} + y_m] \quad (2.8)$$

辛普生公式

$$S \approx \frac{(\lambda_b - \lambda_a)}{3(m-1)} [y_1 + 4y_2 + 2y_3 + \dots + 4y_{m-1} + y_m] \quad (2.9)$$

其中

$$y_i = |R_i - R_i^*| \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

由此可以看出梯形公式基本上是本征的, 而辛普生公式却是加权的。而这种加权并非一定必要。所以我们宁可采用精度较低些的梯形公式来计算, 这也便于和其它收敛法作比较。

(4) 我们还试用了取下述  $\Phi(X)$  作为评价函数

$$\Phi(X) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} W(\lambda) [R(X, \lambda) - R^*(\lambda)]^2 d\lambda \quad (S > 0) \quad (2.10)$$

特别取  $S = 2$ , 也就是取反射率残量  $(R - R^*)$  自乘加权数和数作为评价量。这也相当于



〔在 $W(\lambda)$ 均取1的情况下〕,在公式(2.1)中用残量 $|R - R^*|$ 自身作为权因子,这样就跟最小二乘法相一致起来。

此外,附带提及,当发现光谱曲线起峰不够陡时,根据经验介绍,可以采用如下办法来改善,即在需要起峰的地方,加密插值点(也即缩小步长)的办法。这在程序上是容易实现的,并不会发生任何困难。

## 2. 最小二乘法和阻尼最小二乘法

在上节(4)中已经述及在(2.10)式中取 $S = 2$ 即是最小二乘,而这里所叙述的最小二乘法以及由此演变产生的阻尼最小二乘法薄膜自动校正方案,是按另一途径——线性化 $\Phi$ ——解线性方程组——的办法构造的,现简述如下:

### (1) 最小二乘法

为了简化记号,该法所取的评价函数可写为

$$\begin{aligned}\Phi(X) &= \sum_{i=1}^m [W_i(\lambda) (R_i(X, \lambda) - R_i^*(\lambda))]^2 d\lambda \\ &= \sum_{i=1}^m f_i^2 (f_i \equiv W_i(R_i - R_i^*))\end{aligned}\quad (2.11)$$

由于 $R_i$ 并因此 $f_i$ 是 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的非线性函数(注意 $R_i$ 现在就是我们在 $(\lambda_0, \lambda_0)$ 波段上,所要考虑的各个波长上的反射率,它共 $m$ 个,可根据实际需要决定其间隔大小和个数)。1  $\leq i \leq m$  现在其在初始点 $X_0$ 近旁线性化,得一次近似写成矩阵形式

$$f = A\Delta X + f_0 \quad (2.12)$$

其中

$$\begin{aligned}A &= (a_{ij}) & a_{ij} &= \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)_0 & i &= 1, 2, \dots, m \\ & & & & j &= 1, 2, \dots, n \\ f &= \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix} & f_0 &= \begin{pmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ \vdots \\ f_{m0} \end{pmatrix} & \Delta X &= \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix}\end{aligned}$$

此处( )<sub>0</sub>表示在 $X = X_0$ 处取值

选择 $\Delta X$ 使得 $\Phi(X)$ 取极小值,即令 $\vec{G} = \text{Grad}\Phi = 0$ ,并用(2.12)式代入得

$$\text{Grad}\Phi = 2A^T f = 2(A^T A \Delta X + A^T f_0) = 0 \quad (2.13)$$

或即

$$A^T A \Delta X = -A^T f_0 \quad (2.13')$$

此处 $A^T$ 为 $A$ 之转置矩阵。

这是一个 $n$ 阶线性方程组,其系数矩阵 $A^T A$ 正定对称,故可按平方根法求解 $\Delta X$ ,得

$$\Delta X = -(A^T A)^{-1} A^T f_0 \quad (2.14)$$

但是,由于它是由一次近似得到的,而实际系统是非线性的,所以解

$$X_1 = X_0 + \Delta X$$

给出的 $\text{Grad}\Phi(X_1)$ ,一般情况下不等于0。

把 $X_1$ 当作下一次迭代的出发点而取代 $X_0$ ,重复上述计算得 $X_2$ ,如此反复可得 $X$ 空间点 $X_0, X_1, \dots, X_i, \dots$ 的序列。

当系统的非线性小时,  $X$  点的序列可以较快地收敛到最佳解。

但在系统的非线性大时, 则发生  $X$  点的序列在极值点  $X^*$  附近振荡而使收敛缓慢, 甚至发生发散的情况。所以必须采用下法来处理。

## (2) 阻尼最小二乘法

此法的想法是使每一次迭代中 (2.13) 式的解  $\Delta X$  的大小限制在线性近似 (2.12) 相当满足的范围之内, 为此把  $\Delta X$  的模数亦加进评价函数中去, 并赋给它以适当的权重因子——阻尼因子。也即取

$$\psi(X) = \Phi(X) + p^2 \sum_{j=1}^n q_j^2 (x_j - x_j^0)^2 \quad (2.15)$$

式中  $p^2$  表示残数与增量  $\Delta X = X - X_0$  的相对重要性的阻尼因子, 而  $q_j$  诸项表示各参数相对重要性的阻尼因子。

$$q_j = \left( \sum_{i=1}^m a_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

令  $\text{Grad} \psi = 0$ , 则线性化后得方程组

$$(A^T A + p^2 Q) \Delta X = -A^T f_0 \quad (2.17)$$

其解形式上为

$$\Delta X = -(A^T A + p^2 Q)^{-1} A^T f_0 \quad (2.18)$$

式中

$$Q = \begin{pmatrix} q_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & q_n^2 \end{pmatrix}$$

事实上, 只要将  $A^T A$  阵的对角线元素均乘以  $(1 + p^2)$  即可由 (2.13) 导出阻尼方程 (2.17)。

(也有在  $A^T A$  阵的对角线元素上均加上正阻尼因子  $p$  的方法, 两者没有本质上的差别)。

阻尼因子的选取, 可按找寻满足  $\frac{\partial \Phi'}{\partial p} = 0$  的极小点  $p$ , 每迭代一次求一次的办法确定, 这里  $\Phi'$  是根据阻尼最小二乘法解出来的下一次准迭代初始点的价值。求  $\frac{\partial \Phi'}{\partial p} = 0$  的极小点  $p$  可按优选法试验得出。

我们将所采取的程序框图见附录 1

该法已被成功地应用于透镜自动设计中, 它亦同样适用于薄膜自动设计。只要诸因子选择适当该方法总能得到一个较为满意的解。例如, 求矩阵  $A$  的元素时, 需计算偏差商, 步长  $r$  的取值必须适当, 否则会有较大误差 (在薄膜设计中, 我们取  $r = 5\text{m}\mu$  左右)。

与最陡下降法比较, 该法在运算量和在所要求计算机的储存量上均有所增加。主要的计算量 (a) 求矩阵  $A$  的元素、(b) 解线性方程组 (2.13) 和 (c) 优选 每次迭代阻尼因子  $p$ 。这三部分对于 (a), 子程序计算一次即可得出矩阵  $A$  的一列。  $n$  层膜经过  $n$  次计算便得到矩阵  $A$  的全部元素。这一步的计算程序较之透镜的场合还是更为容易实现的。且计算量和最陡下降法求偏微商的计算量完全相同。唯 (b)、(c) 两部分计算量和要存储的量是增添的。但在另一方面, 收敛的速率却可望得到提高。

此外, 在我们所用的阻尼最小二乘法薄膜设计自动校正方案中, 未考虑附加边界条件。

我们考虑, 只要阻尼因子选取适当, 应该可以避免违犯边界条件的情况发生。

### 3. 其他方法

#### (1) 非线性不等式方法

我们还编制了非线性不等式方法的薄膜设计自动校正程序。这是一种不用评价函数的方法, 它是直接让参量  $X$  收敛到使反射率残量各自在容许范围之内 (所谓领域型自动设计) 的方法。

设满足不等式

$$\alpha_i \leq f_i(X) \leq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m+n, \quad (2.19)$$

的点  $X$  的集合用  $R_i$  表示

这里  $f_i$  分为两部分

(a)  $f_i = R_i - R_i^2$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 即反射率残量。

(b)  $f_i = x_i$  ( $i = m+1, \dots, m+n$ ) 即光学厚度。

后者 (b) 所对应的不等式即边界条件。

满足 (2.19) 全部不等式的点集  $R$  是  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m+n$ ) 的交集,

$$R = \bigcap_{i=1}^{m+n} R_i \quad (2.20)$$

将  $f_i$  在初始点  $X^0$  邻域线性化, 得到与 (2.19) 相对应的线性不等式组

$$\alpha_i \leq [\text{Grad} f_i(X_0)] \Delta X + f_i(X_0) \leq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m+n \quad (2.21)$$

解这个线性不等式组求得  $\Delta X$ , 从而得到  $X_1 = X_0 + \Delta X$ , 如果  $X_1 \in R$ , 则  $X_1$  即为所要求的解。若  $X_1 \notin R$ , 则以  $X_1$  取代  $X_0$  反复迭代直至求得  $X^* \in R$  为止。不等式组的解是由逐次近似方法求得 [3]。

我们在实际计算发现要找到满足所有不等式组 (2.19) 的  $X^*$  是较困难的。但初始设计可以较粗糙, 经头两次迭代可获得较大幅度的校正。因此可以用此法作一、二次迭代后获得一个较好的初始设计再用前述方法作进一步地校正。要成功地使用该法作自动校正设计, 还有待于从实践上和理论上 (如收敛性问题) 作进一步的探讨。

(2) 近来在光学自动设计中出现的正交化方法是值得注意的。所考虑的变数空间  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的正交化, 使得函数  $R(X)$  的非线性影响, 在每一次迭代中都得以修正。这是它较之阻尼最小二乘法更合理的所在。在加阻尼的场合——也正是为了消除非线性影响——已经往好的方向变化的参数也同样受到数值大小一样的阻尼。其次, 还可考虑对评价函数的正交化, 以使得评价量具有更为明确的物理意义和实用价值 (这一点对透镜设计更为重要)。所谓变数空间的正交化, 其方法即是通常的矢量直交化。可见于任何一本较为详尽的论述线性代数计算方法的书籍, 如 [7]。

但使用该法所需要作的计算量和所要求的计算机的储存量均比较大, 需要使用一台容量较大和较快速的电子计算机, 限于时间和现有条件, 该法尚未能予以实际计算, 拟在今后进一步加以考虑。

(3) 二次近似, 在本节结束时, 我们想提一提关于二次近似理论的应用问题。如上所述, 各种线性化方法中带来的主要矛盾在于如何修正非线性的影响。因此, 自然想到对  $R(X)$  一开始就用二次近似——即在其泰勒展开式中留下常数项、一次项和二次项, 而弃去二次以上的项来近似, 并根据  $\Phi(X)$  取极小值的条件  $\text{Grad} \Phi = 0$ , 导出一个包含有  $R(X)$  各一阶、

二阶偏导数为系数的线性方程组(具体方案从略,可见〔2〕)。最佳参数由解此方程组而获得。我们亦考察过这种方案,它在程序上几乎和最陡下降等法没有多大差异,因此是容易实现的。但这种方案最大的弱点是运算量大,主要是在计算各二阶偏导数时的运算量较大,特别是 $n$ (层数)较大时,更是如此。例如,当 $n=5$ 时,就需要用子程序计算15次来算出各二阶偏导数。当 $n=10$ 时,这个次数增大到55次之多。因此当 $n$ 较大时,此法在我们目前现有的条件下是较难于实现的。

### 三

光学设计自动化的工作,已经有近二十年的历史,出现了许多有实用价值的方案。但仍有许多问题,其中有一些还是带根本性的问题有待解决。比如初始设计的自动化问题就是其中一个,以上所述及的方法,均只能获得邻近于初始设计的极值点作为最佳设计。若该最佳设计仍不够理想时,如何跳至另一极值点的研究,只见到为数不多的文献上提及,但远未妥善解决,今后拟在现有工作的初步基础上进一步考虑新的收敛法和初始设计的自动化问题。

在薄膜自动设计的进程中,较为迫切的问题是要求精确控制任意膜层厚度的技术和装置的产生。同时也希望有更多的可供镀制光学膜的物质材料的出现,预计在不久的将来,这些问题,将越来越变得突出起来。

考虑到我们目前的现有条件,控制膜厚大体上是用极值法( $R+T$ 法)控制膜厚。对非 $\lambda/4$ 整数倍光学厚度的镀制,则必须经过折算,并在镀制时增加比较片等办法来加以解决。而自动校正出的最佳光学厚度往往是各层互异的。加工起来甚感不便。特别是在层数较多时,更是如此,以至使自动校正的最佳方案不能予以实现。为了适应镀膜的现有条件,我们设置了一种逐组变更自动校正方案,这是由逐个变更法加以改善得来的。原法是最早出现的光学自动设计的方法之一,现由于其它更好的方法的出现而几乎不用了。但是,我们认为,仍可吸取其简单易于实现等合理的成分。

原来的逐个变更法是对 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的第一个参量 $x_1$ ,改变一个增量 $\Delta x$ 其它参数不变。若评价量 $\Phi$ 减少,则用 $x_1 + \Delta x_1$ 取代 $x_1$ ;若 $\Phi$ 增加,则用 $x_1 - \Delta x$ 取代 $x_1$ 。再依次变动参数 $x_2, x_3, \dots, x_n$ 并反复进行,直至 $\Phi$ 减少到适当的数值为止。

这里,当 $\Phi$ 减少时用 $x_i + \Delta x_i$ 取代 $x_i$ 是正确的。但当 $\Phi$ 增加时用 $x_i - \Delta x_i$ 取代 $x_i$ 是不确切的,它没有排除用 $x_i - \Delta x_i$ 取代 $x_i$ 后, $\Phi$ 仍增加的情况。而这种情况是会出现的,特别是在迭代的后期,该情况的出现表明原参数 $x_i$ 是不应变易的。若强行变易,以下就发生混乱而明显地影响收敛速率。因而,必须对此种情况加以判断,以决定该参数 $x_i$ 应否变易。

具体使用该法时是,先用方法一、或二、(或其他方法)进行自动校正,一旦各层光学厚度的相近程度的趋势明朗后,即按光学厚度的相近程度加以分组,每组都同一光学厚度,然后转入逐组变更法再行自动校正,每一组内的参数总是同时进行同样大小的变易,逐组进行下去,直至得到一个最佳方案为止。由于多种不同的光学厚度仅分为为数不多的几组,这就可便于加工实现。

最陡下降法程序框图

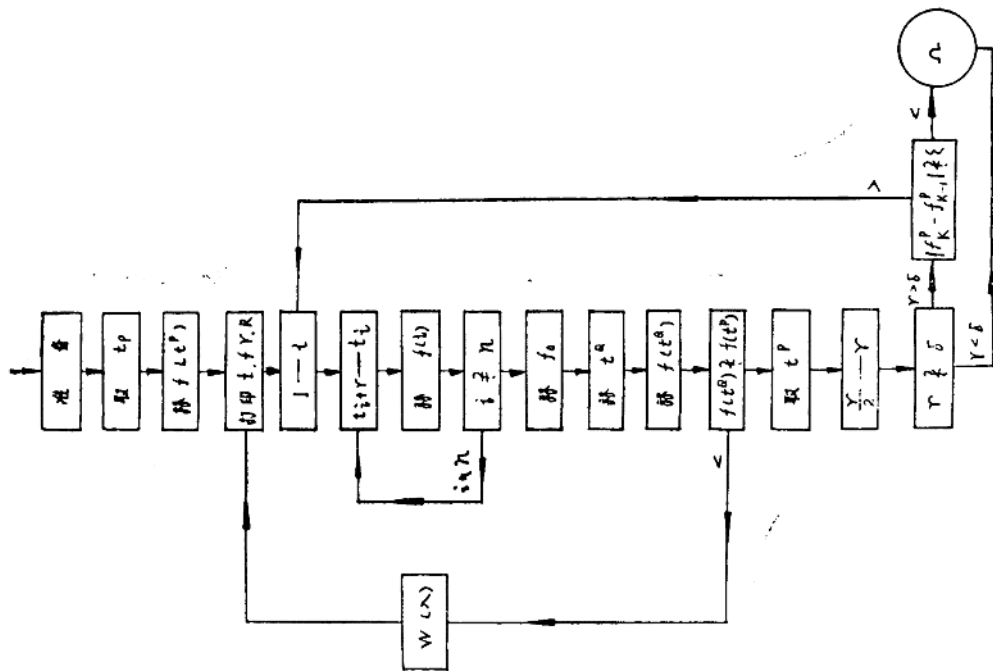
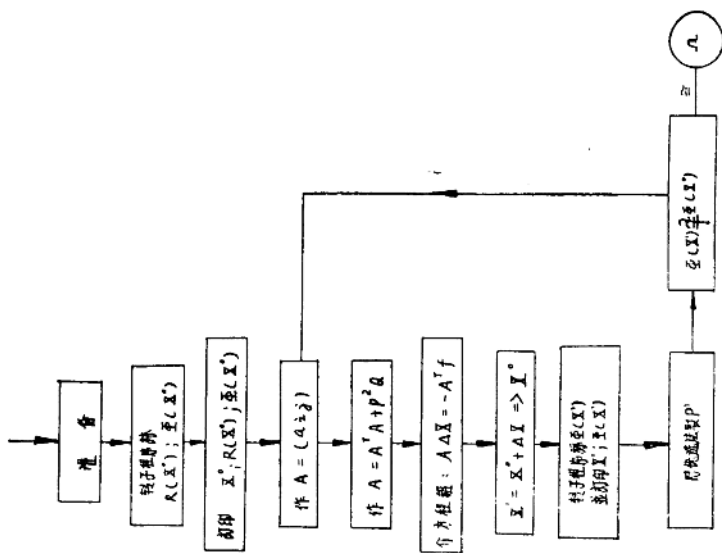


图 2

注:  $t^p$  即文中  $X^p$ ,  
 $f(t^p)$  即文中  $\Phi(X^p)$   
 其余类同

阻尼最小二乘法程序框图



$\cong$  表示前四位数据相同

图 3

表 1 (1) 9 层  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜的自动校正 500~700m $\mu$ ,  $\lambda_0 = 732\text{m}\mu$

波长 $\lambda$ (m $\mu$ )	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700
起始反射率 R	0.1127	0.0353	0.0390	0.1428	0.2583	0.3208	0.3074	0.2076	0.0508	0.0558	0.3676	0.6567	0.9101	0.8854	0.9245	0.9462	0.9592	0.9673	0.9725	0.9760	0.9783
第二次叠代后 R	0.0522	0.0176	0.0604	0.1267	0.1513	0.1063	0.0200	0.0506	0.3242	0.6140	0.7842	0.8710	0.9162	0.9413	0.9561	0.9653	0.9712	0.9750	0.9716	0.9792	0.9801
第五次叠代后 R	0.1333	0.0540	0.0072	0.0318	0.0589	0.0653	0.0264	0.0043	0.1455	0.4332	0.6712	0.8079	0.8805	0.9200	0.9427	0.9564	0.9651	0.9727	0.9745	0.9770	0.9785

表 1 (2)

层数	起始厚度 (m $\mu$ )	第二次叠代后之厚度	第五次叠代后之厚度
1	183.0	187.0	200.7
2	183.0	183.3	188.7
3	183.0	176.7	175.1
4	183.0	17.21	170.0
5	183.0	171.8	171.8
6	183.0	174.9	176.7
7	183.0	179.5	181.9
8	183.0	183.0	186.4
9	183.0	183.9	186.7

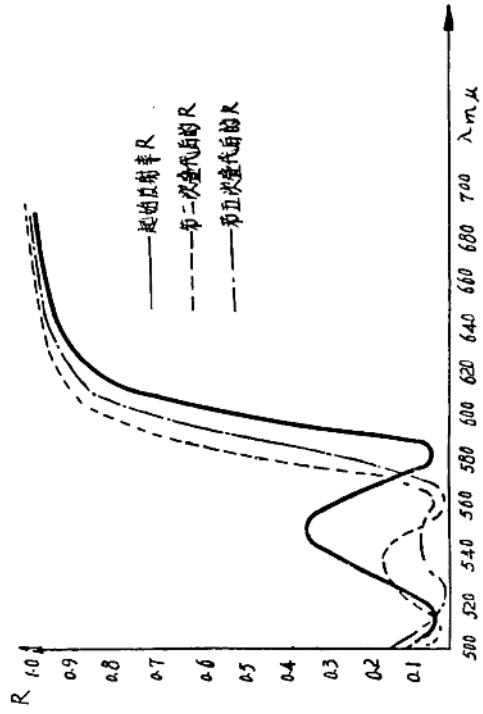


图 4

表 2 (1) 9 层用  $f(\lambda) = \int_{\lambda_0}^{\lambda_b} W(X) |R(\lambda) - \varphi(\lambda)|^2 dx$  时  $\frac{\lambda_0}{4}$  膜的自动校正  $500 \sim 700 \text{ m}\mu$ ,  $\lambda_0 = 732 \text{ m}\mu$

波长 $\lambda$ (m $\mu$ )	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700
起始反射率 R	0.1127	0.0353	0.0390	0.1422	0.2583	0.3208	0.3074	0.2076	0.0508	0.0558	0.3676	0.6567	0.8101	0.8854	0.9245	0.9452	0.9592	0.9673	0.9725	0.9760	0.9783
第二次叠代后 R	0.0804	0.0232	0.0508	0.1348	0.1981	0.1956	0.1164	0.0158	0.1014	0.4147	0.6763	0.8172	0.8882	0.9257	0.9469	0.9595	0.9675	0.9726	0.9761	0.9783	0.9797
第四次叠代后 R	0.1286	0.0476	0.0192	0.0641	0.1240	0.1393	0.0882	0.0108	0.0727	0.3565	0.6315	0.7911	0.8734	0.9170	0.9414	0.9560	0.9650	0.9709	0.9748	0.9774	0.9790

表 2 (2)

层数	起始厚度 (m $\mu$ )	第二次叠代后之厚度 (m $\mu$ )	第四次叠代后之厚度 (m $\mu$ )
1	183.0	185.1	189.5
2	183.0	183.4	186.9
3	183.0	179.5	180.1
4	183.0	176.2	174.3
5	183.0	175.5	173.3
6	183.0	177.8	177.2
7	183.0	181.4	183.1
8	183.0	184.0	186.8
9	183.0	184.2	186.1

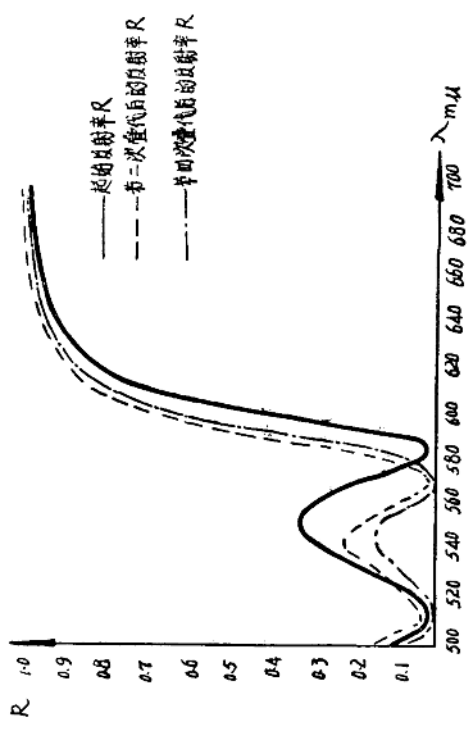


图 5

由图解法得三层减反膜初始设计的自动校正

$G\text{SiO}(0.127\lambda) + \text{ZnS}(0.363\lambda) + \text{ThF}_4(0.191\lambda) + A$

表 3

层 数	起 始 厚 度 ( $m\mu$ )	第三次叠代后的厚度 ( $m\mu$ )	第六次叠代后的厚度 ( $m\mu$ )
1	120.35	118.94	116.34
2	228.69	225.89	221.51
3	80.01	94.68	108.76

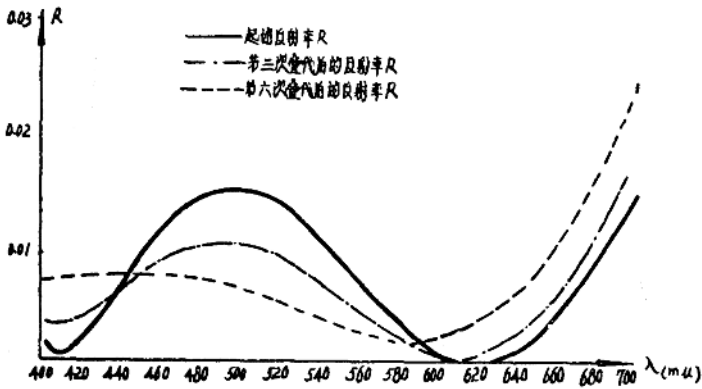


图 3

参 考 文 献

- [1] 应用物理(日), 31(1962)739。
- [2] 应用物理(日), 32(1963)199。
- [3] J. O. S. A, 56(1966)677。
- [4] Appl. opt, 4 (1965)937。
- [5] 固体薄膜的光学性质, 中译本(1965)。
- [6] Thin-Film Optical Filters(1969)。
- [7] 线性代数计算方法 (中译本) (1965.9)。



# 膜系设计简述

中国人民解放军沈字六一九部队

随着光学薄膜应用的发展，不断地对各种薄膜提出新的光学特性，因此，多层膜系的设计工作已成迫在眉睫的任务。

目前膜系设计的主要目的是寻找出具有某特定光性的膜系，对研究制备起指导作用。

本文首先简述几种常用的膜系设计和计算方法，其次介绍我们在膜系计算方面开展的一点工作，最后，综述国外膜系设计的发展趋向。

## 一、膜系设计和计算的几种方法

### 1. 递推法

考虑下图表示的  $K$  层膜

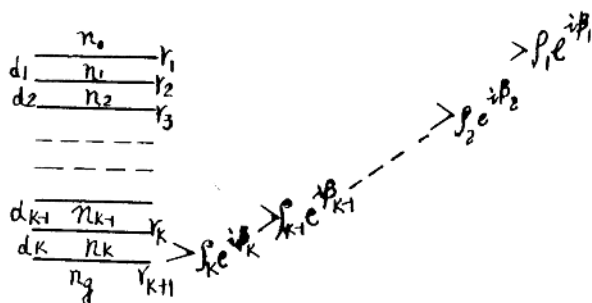


图 1.2-1

其中  $r_1, r_2, \dots, r_{k+1}$  为界面的菲涅耳系数， $n_1, n_2, \dots, n_k$  为膜层的折射率， $n_0$  为空气折射率， $n_g$  为衬底折射率， $d_1, d_2, \dots, d_k$  为膜层厚度， $\rho_1 e^{i\beta_1}, \rho_2 e^{i\beta_2}, \dots, \rho_k e^{i\beta_k}$  为有效复振幅系数。

具有两个界面的一层膜可用一具有有效复振幅系数  $\rho e^{i\beta}$  的一个界面代替。根据这一概念，我们可以从与衬底相邻的底层开始，逐次通过中间膜层数而算到膜系顶层，求解多层膜系的有效复振幅系数。这样对第  $K$  层界面可求其有效复振幅系数为：

$$\rho_k e^{i\beta_k} = \frac{r_k + r_{k+1} e^{-2ig_k}}{1 + r_k r_{k+1} e^{-2ig_k}} \quad g_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k$$

加进  $(k-1)$  层膜后，又有

$$\rho_{k-1} e^{i\beta_{k-1}} = \frac{r_{k-1} + \rho_k e^{i\beta_k} e^{-2ig_{k-1}}}{1 + r_{k-1} \rho_k e^{i\beta_k} e^{-2ig_{k-1}}}$$

将此过程一直重复到得出整个膜系的最终有效复振幅系数  $\rho_1 e^{i\beta_1}$  为止，全系统反射系数便简单地由  $\rho_1^2$  给出。

### 2. 矩阵法

大家熟悉，膜层的性质可用一特性矩阵表示。考虑一  $k$  层膜系，这样，膜系的反射系数