光学系统设计技巧（续）

郑保康

（云南北方光电仪器有限公司 昆明 650114）

（续 2009 年 $No.2$）

ξ 6.2.3 棱镜公差的确定

棱镜的有些要求与透镜相同，这里就不重复了。

1. 棱镜的平面度

棱镜整个面形误差通常可以认为是与棱镜上叠加一透镜等价它对象差的影响亦可按初级象差理论来计算。例如一反射平面位于平行光线中，则由于不平度引起的象差为：

$$\left.\begin{aligned} S_{\mathrm{I}} &= 2\frac{h^4}{r^3} \\ S_{\mathrm{II}} &= 2\frac{h^3}{r^2}i_P \\ S_{\mathrm{III}} &= 2\frac{h^2}{r}i_P^2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6-60)$$

式中 i_P 为光线与反射面法线的夹角。当反射面倾斜 45°时，$i_P=0.7$，要求中心点亮度 $S\cdot D\geqslant 0.8$，则有：

$$S_{\mathrm{III}} = \frac{2h^2}{r}i_P^2 = \frac{2h^2}{r}\times 0.5 = \frac{h^2}{r} \leqslant 0.7\lambda \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6-61)$$

因为 1 道光圈的平面不平度为 0.5λ，因此在整个通光口径内，平面不平度不能超过一个半光圈。若面形差不是一个球面，而是柱面、椭圆面，光束产生的象散更为严重，此时的公差应更加严格。望远系统的棱镜反射面表面误差一般为 $N=0.1\sim1.0$ 道光圈，ΔN 为 $0.05\sim0.2$ 道光圈。

2. 角度误差

由于角度误差，使棱镜不再等价于平行平板，而等价于光楔，光楔的作用是使不同的单色光出射光束的偏角不同，而引起色差。在屋脊棱镜中，若屋脊角不是直角，则使象分开成为双象。上述两种后果均造成象的轮廓模糊，光学系统的倍率大时，更为严重。一般来说，两象错开的线条宽度对眼的张角小于 $0.2'\sim0.1'$，可以认为象是清晰的。我们可以用如下方法来计算公差。

（1）平行平板

平行平板的楔角差 θ 引起的光线偏角：

$$\left.\begin{aligned} \delta_F &= \theta\,(N_F-1) \\ \delta_C &= \theta\,(N_C-1) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6-62)$$

故引起颜色光线的分散角为 $\theta\,(N_F-N_C)$。于是，当平行平板位于望远镜物镜前，则允许的楔角为：

$$\theta_{\text{允许}} = \frac{0.2'\sim0.1'}{(N_F-N_C)\,\Gamma} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (6-63)$$

式中：

N_F、N_C——分别为 F、C 光的折射率，

Γ——望远镜的视放率，

$\theta_{允许}$——平行平板允许的楔角。

若平行平板位于目镜焦点前 x 处，如图 6-4 所示，则允许楔角为：

$$\theta_{允许}=\frac{0.2'\sim0.1'}{(N_F-N_C)\ \frac{x}{f'_{目}}}\cdots\cdots\quad(6-64)$$

式中：$f'_{目}$——目镜焦距，

x——平行平板至目镜焦点的距离。

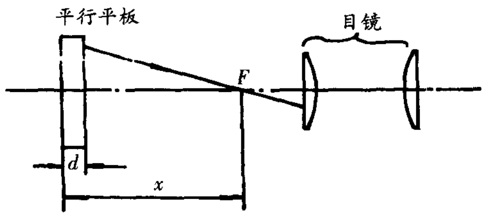

图 6-4

（2）直角棱镜

与前述方法一样，只需要求出颜色光线的分散角后，即可定出公差。讨论下面三种情况下引起的分散角。

a. 一次反射的直角棱镜，只有直角误差时不引起光线偏折。当两锐角不相等时，则引起角度误差，锐角误差为 θ，分散角为 $2\theta\ (N_F-N_C)$。

b. 二次反射的直角棱镜，只有锐角误差时不影响棱镜的出射光线方向。若直角产生误差 θ，则引起入射光线和出射光线的分散角为：

$2\theta\ (N_F-N_C)$

对于多次反射棱镜的角度误差，亦可按此法将棱镜展开，依据其角度误差对不同颜色光线的偏角差来限制其允许的 δ 值。

反射棱镜的光学平行度以其互相垂直的两个分量表示，在入射光轴截面方向的光学平行度分量称做“第一光学平行度”，以 θ_{I} 表示；在垂直于入射光轴截面方向上的光学平行度分量称做“第二光学平行度”，以 θ_{II} 表示。

在光学零件图上应标注棱镜的 θ_{I}、θ_{II} 和角度公差（一般均为一个角度公差），屋脊棱镜还要标注双象差（S）。

（3）屋脊棱镜的双象差

双象差 S 与屋脊角误差 δ 的关系，可从图 6-5 得到，当入射的平行光束位于屋脊棱的垂直平面内时，得到：

$$S=4n\delta\ \cdots\cdots\cdots\cdots\quad(6-65)$$

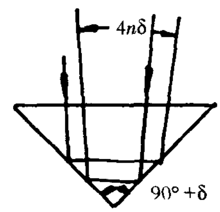

图 6-5

若屋脊棱的垂直平面与光轴构成某一角 β，则从图 6-6 可得到双象差与屋脊角误差之间的普遍关系式：

$$S=4n\delta\cos\beta\ \cdots\cdots\cdots\cdots\quad(6-66)$$

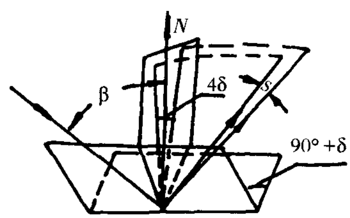

图 6-6

双象差的给定，根据经验，在目方双象的夹角 $\omega'\leqslant20''$时，不能为人眼所觉察。

a. 在物镜前屋脊棱镜的双象差计算公式为：

$$S=\frac{\omega'}{\Gamma}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\quad(6-7)$$

b. 在物镜和目镜之间的屋脊棱镜双象差计算公式为：

$$S=\omega' f'_{目} / \left(\frac{L_J}{n}+d\right) \quad \cdots\cdots\cdots \ (6-8)$$

式中：ω'——双象光束通过目镜后的角度；

$f'_{目}$——目镜焦距；

L_J——屋脊棱镜展开后，光轴与屋脊棱点到棱镜出射面的厚度；

n——屋脊棱镜折射率；

d——棱镜出射面到分划面的距离。

具体尺寸详见图 6－7 所示。

一次反射直角棱镜和二次反射直角棱镜的光学平行度和角度极限偏差按表 6－38 的规定分为三级。

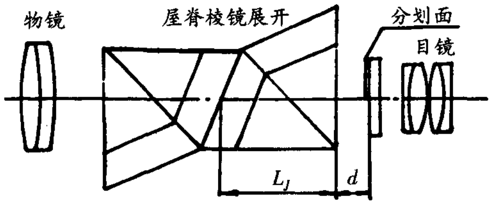

图 6－7

表 6－38

精度等级	角度极限偏差/分					
	一次反射直角棱镜			二次反射直角棱镜		
	$\theta_{Ⅰ}$	$\theta_{Ⅱ}$	△90°	$\theta_{Ⅰ}$	$\theta_{Ⅱ}$	△45°
1	2		±2	2		±2
2	5		±5	5		±5
3	10		±10	10		±10

3. 棱镜的倒边倒角

按 GB1204－75《光学零件的倒角》的规定标注棱镜的倒边倒角。详见表 6－39。

表 6－39 (mm)

最短棱边长度	二面角倒角宽度	三面角倒角宽度	倒角位置
3～6	$0.1^{+0.1}$	$0.4^{+0.3}$	二面角：
>6～10	$0.2^{+0.2}$	$1.0^{+0.4}$	倒角面垂直于二面角的二等分面
>10～30	$0.4^{+0.3}$	$1.5^{+0.5}$	三面角：
>30～50	$0.6^{+0.4}$	$2^{+0.6}$	倒角面垂直于三面角中每个二面
>50	$0.8^{+0.5}$	$2.5^{+0.8}$	角的二等分面之交线

第七章 象差自动平衡

ξ 7.1 概述

电子计算机在光学设计中的应用经历了三个阶段，第一阶段只是简单的代替人工计算象差，第二阶段由计算象差进一步计算象差变化量表，作为分析和校正象差的依据，第三阶段是在象差变化量表的基础上，求解结构参数，自动修改结构，校正象差，即所谓的“自动设计”或“象差自动校正”。现在象差自动校正程序已成为光学设计中普遍应用的工具了。

在光学自动设计刚开始出现的时候，有人错误地认为，有了自动设计程序，搞光学设计的人就无事可做了，原先的象差理论和设计经验也没有用处了。实际上并非如此，象差自动校正程序只能完成整个设计过程中一部分工作，它仅仅是一个工具，如果设计人员使用得当，可以加速设

计进程提高设计质量，如果使用不得法，仍然不能发挥它的效果。整个设计过程来说，起决定作用的仍然是人。

要充分发挥自动设计的作用，一方面要不断改进和提高程序的性能，编制更加完善的自动设计程序，另一方面也需要使用程序的设计人员从理论和实践两方面掌握正确使用程序设计光学系统的方法。而目前人们对后一方面比较忽视。本章的目的主要是为了后者。

本章的内容首先从使用程序的角度出发，结合传统的手工校正过程，介绍了光学自动设计的基本原理，说明象差自动校正程序能够完成哪些工作，不能完成哪些工作，设计人员在设计过程中应起的作用。然后分别介绍目前使用得最多的两种自动校正程序——阻尼最小二乘法程序和适应法程序，使用过程中应注意的问题。

ξ 7.2　象差自动校正的基本原理及其和人工校正过程的关系

我们利用象差变化量表进行光学系统的象差校正时，假定象差的变化量和结构参数的变化量二者是成比例的，换句话说认为系统的结构参数和象差之间符合线性关系。这个假定同样也是象差自动校正的基础，根据这个假定如果我们利用 n 个结构参数来校正系统的 m 种象差，每种象差要求都可以表示成一个线性方程式，m 种象差对应 m 个方程式的线性方程组：

$$\left.\begin{array}{c}\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\Delta x_1+\cdots\cdots\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\Delta x_n=\Delta f_1\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}\Delta x_1+\cdots\cdots\frac{\partial f_m}{\partial x_n}\Delta x_n=\Delta f_m\end{array}\right\}\cdots(7-1)$$

公式中 $\Delta f_1\cdots\cdots\Delta f_m$ 为 m 种象差所要求的改变量，$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$（$i=1,\cdots\cdots m,\ j=1,\cdots\cdots n$）是每种象差对每个结构参数的偏微商；$\Delta x_1\cdots\cdots\Delta x_n$ 则为每个结构参数相应的改变量。利用象差变化量表人工校正象差，实际上就是找上述方程组的近似解，但是我们用的不是象差对结构参数的偏微商，而是象差变化量表。所谓象差变化量表就是把每个结构参数变化一个小量 δx_j，计算出各种象差的变化量 δf_{ij}，把它们按象差和结构列成表格。它们在本质上是一样的，因为我们并不用解析的方法直接求出偏微商 $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$，而是用象差对结构参数的差商 $\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_j}$ 来近似的代替微商 $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$，即为：

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}=\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_j}\quad(i=1\cdots\cdots m,\ j=1\cdots\cdots n)$$

将上式两边同乘 Δx_j 得：

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\Delta x_j=\delta f_{ij}\ \left(\frac{\Delta x_j}{\delta x_j}\right)$$

代入方程组（7-1）得：

$$\left.\begin{array}{c}\delta f_{11}\left(\frac{\Delta x_1}{\delta x_1}\right)+\cdots\cdots+\delta f_{1n}\left(\frac{\Delta x_n}{\delta x_n}\right)=\Delta f_1\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \delta f_{m1}\left(\frac{\Delta x_1}{\delta x_{x1}}\right)+\cdots\cdots+\delta f_{mn}\left(\frac{\Delta x_n}{\delta x_n}\right)=\Delta f_m\end{array}\right\}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7-2)$$

方程组（7-2）和（7-1）在形式上的差别是用象差变化量 δf_{ij} 代替偏微商 $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ 作为象差线性方程组的系数，而用结构参数改变量 Δx_j 和计算象差变化量表时该参数的增量 δx_j 之比 $\frac{\Delta x_j}{\delta x_j}$，代替 Δx_j 作为方程组的自变量。利用象差变化量表进

行象差校正，就是用人工分析的方法，直接找象差方程组（7－2）的近似解。当然在人工校正时，同时参加校正的象差数 m 和自变量数 n 都不能太大。在每次校正中，只能选几种主要的象差，用几个最有效的结构参数，找出一组方程组的近似解。象差自动校正就是用电子计算机求解象差线性方程组，当然同时参加校正的象差数 m 和自变量数 n 基本上不受限制。但是二者在原理上并无区别，在人工校正过程中遇到的很多问题，同样会在自动校正过程中反映出来。

根据象差方程组中方程式的个数 m 和自变量的个数 n 的多少，分成两种不同的情况：第一种情况 $m \leqslant n$，方程式的个数小于或等于自变量的个数，方程组有无穷多组解或有唯一确定解；第二种情况是 $m > n$，方程式的个数多于自变量个数，方程组没有准确解。对这两种不同的情况，需要用不同的数学方法求解，这就形成了两种不同的自动校正方法，前者称为适应法，后者称为阻尼最小二乘法。下面分别介绍这两种方法的具体解法。

1. 当 $m > n$ 时，方程组没有准确解，我们用“最小二乘解”作为方程组的近似解，下面说明最小二乘解的意义。设：

$$\varphi_1 = \omega_1 \left[\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \cdots\cdots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n \right) - \Delta f_1 \right]$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\varphi_m = \omega_m \left[\left(\frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \cdots\cdots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Delta x_n \right) - \Delta f_m \right]$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^{m} \varphi_i^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7-3)$$

Φ 称为评价函数，φ_i 称为加权象差函数，ω_i 称为权因子。我们求 Φ 的极小值解作为象差方程组的近似解，它就是所谓“最小二乘解”，Φ 为极值的条件是：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta x_j} = 0 \quad (j = 1, \cdots\cdots n) \quad \cdots\cdots\cdots \quad (7-4)$$

这是一个具有 n 个自变量，m 个方程式的方程组，称为“法方程组”。法方程组的解就是象差方程组的最小二乘解。我们把象差方程组和法方程组用矩阵表示，设

$$A = \begin{vmatrix} \omega_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, & \cdots\cdots \omega_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots \\ \omega_m \frac{\partial f_m}{\partial x_1}, & \cdots\cdots \omega_m \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{vmatrix}$$

$$\Delta F = \begin{vmatrix} \omega_1 \Delta f_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \omega_m \Delta f_m \end{vmatrix} \qquad \Delta x = \begin{vmatrix} \Delta x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{vmatrix}$$

则象差方程组（7－1）为：

$$A \Delta x = \Delta F \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7-5)$$

法方程组（7－4）为：

$$A^T A \Delta x = A^T \Delta F \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7-6)$$

方程组（7－5）和方程组（7－1）的区别是每个方程式的两边都乘以相应的权因子 $\omega_1 \cdots\cdots \omega_m$，显然并不影响方程组的解。法方程组（7－6）的解的公式为：

$$\Delta x = (A^T A)^{-1} A^T \Delta F \quad \cdots\cdots \quad (7-7)$$

2. 当 $m \leqslant n$ 时：

如果 $m = n$，方程式的个数等于自变量的个数，方程组有确定解，求解这样的方程组是没有困难的（这里我们暂不考虑象差和自变量的相关问题）。但是如果 $m < n$，则方程组为不定方程组，有无穷多组解，这就产生了解的选择问题。这个问题在人工校正过程中也同样存在，我们采取的办法是，优先改变那些最有效的结

《云光技术》2010 Vol. 42 №1

构参数，使系统达到校正时，结构参数改变得尽可能少。在自动校正中同样按这个原则来挑选方程组的解，给方程组的解增加一个条件，即要求 $\sum_{j=1}^{n}\triangle x_f^2$ 为极小值，它也就相当于要求结构参数改变得尽量小。问题变成了满足象差方程组（7－1）的条件下求 $\sum\triangle x^2$ 的极小值解，求这种解的数学方法称为："拉格朗日乘数法"解的公式是：

$$\triangle x = A^T\ (AA^T)^{-1}\triangle F \quad \cdots\cdots\ (7-8)$$

以上公式中的系数矩阵 A，无需考虑权因子，直接是方程组（7－1）的系数矩阵。$\triangle F$ 也没有权因子。当 $m=n$ 时，以上公式也能应用，它就是象差方程组的确定解。

上面我们分别介绍了两种自动校正方法所用的数学方法和解的公式。上述讨论的根本前题是象差和结构参数之间符合线性关系。但是实际上象差和结构参数之间的关系是非线性的。如果现在系统的象差很大，由象差线性方程组求出的解也就很大，很可能已大大超出了系统的线性范围。如果直接用这样的解来修改系统的结构，往往不能获得预期的结果，甚至可能使象差变得更坏了。这个问题同样会在人工校正过程中遇到，我们用什么办法来解决呢？在人工校正时，如果系统现有象差很大，我们并不企求通过一次修改结构就使系统达到完全校正，而是通过多次小量修改结构参数，使象差逐渐趋近最后目标值。即采用"逐次渐近"的方式克服象差和结构参数之间的非线性。在自动校正过程中，也采用了同样的方法。

在阻尼最小二乘法中，具体的要求是我们希望每一次修改结构，既能使评价函数 $\Phi=\sum\varphi^2$ 下降，又不希望结构改变得太多。为了达到这个目的，我们不单纯求 $\sum\varphi^2$ 的极小值，而是改为求下列函数的极小值：

$$\Phi=\sum\varphi^2+P^2\sum\triangle x^2 \quad \cdots\cdots\cdots\ (7-9)$$

公式中 P 称为阻尼因子，P 越大求得的 $\triangle x$ 越小，根据系统线性的好坏，优选一个最好的 P 值，这时法方程组变为：

$$(A^TA+P^2I)\ \ \triangle x = A^T\triangle F \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\ (7-10)$$

解的公式变为：

$$\triangle x = \ (A^TA+P^2I)^{-1}A^T\triangle F \quad \cdots\cdots\cdots\ (7-11)$$

评价函数中阻尼项的加入体现了既要校正象差，又不能使系统改得太大的逐次渐近思想，用以克服结构参数和象差之间的非线性，通过多次迭代，使系统达到最后校正。

在适应法中为了用逐次渐近的方法克服系统的非线性，我们把由公式（7－8）求出的解缩小若干倍。这也就相当于把系统要求的象差改变量 $\triangle F$ 缩小若干倍进行求解的结果一样。把这样的解进行系统结构的修改，计算出象差以后，如果线性比较好，按新的象差结果继续根据原来的系数矩阵 A，按公式（7－8）求解。这样继续迭代直到线性差了，再重新计算一个象差变化量表。上述过程和手工校正过程中逐次渐近的做法十分相似的。

根据上面所述，象差自动校正过程和人工校正过程一样都是建立在线性近似和逐次渐近的基础上，作小量修改得出来的，这就很难摆脱原始系统的特点，因此校正能否取得成功和原始系统的好坏有很

大关系。在手工校正时，我们往往遇到这样的情况，一个系统经过几次修改后，就会发现系统很难进一步校正了。某些象差的下降，必须导致另一些象差的上升，这种难以继续校正的情况，同样会在自动校正过程中出现。

在阻尼最小二乘法中，上述情况表现为评价函数 Φ 进入了局部极值，不再继续下降。评价函数在整个自变量空间一般存在多个极值，程序只能下降到和原始系统邻近的那个极值，这个极值很可能并不是系统可能达到的最小极值，这样的极值我们称为局部极值。

在适应法中，上述情况表现为象差相关，象差方程组中出现矛盾方程式，程序无法求解。

ξ 7.3 象差自动校正程序中的几个问题

（一）象差参数的选择

在传统的光学设计中，多采取单项独立的几何象差数作为象差参数。作为自动校正中使用的象差参数除了单项几何象差而外，还有垂轴象差，波象差，象差系数，光学传递函数等等，下面我们分别就每种象差参数的优缺点作些说明。

1. 单项几何象差：

单项几何象差长期以来在人工校正象差的过程中被采用，对多数光学设计人员来说比较习惯，而且对它的性质和特点作过仔细的研究，便于和已有的象差理论知识和人们长期积累的设计经验相结合。各类象差之间彼此是独立的，而且只需要用少数几个参数就可以控制系统的质量，所以它最适合于适应法自动校正过程的要求。对阻尼最小二乘法来说，它对象差的个数，以及它们是否相关，并无严格要求。但是由于各种象差统一在一个评价函数中，程序通过下降评价函数来校正象差，因此要求这些象差在量纲和数量上应尽可能一致，否则会造成各种象差比例失调，某些象差可能校正得很好，而另一些象差则可能很差。如球差 $\delta L'$ 和 OSC' 同在一个评价函数中，$\delta L'$ 校正到 0.01 如果认为已经校正得比较好的话，那么 $OSC' = 0.01$ 就太大了。为了解决这个问题，在评价函数中给每种象差乘上一个权因子。这样通过权因子来调节各种象差之间的相互比例关系。国内的阻尼最小二乘法程序不少是采用单项几何象差来构成评价函数的，为了初步解决不同象差之间的平衡问题，一般在程序中给各种象差加入一组固定的权因子，称为“自动权”。另一组“人工权”，由设计人员来控制，可根据具体情况加以改变。

对适应法来说，它直接求解象差方程组，使各种象差分别达到各自的目标值，因此各种象差在量纲和数量上的不同对校正过程并无影响。

2. 垂轴象差

另一种在自动校正过程中用得较多的象差参数是垂轴象差，一般在整个象面上选三个象点，即轴上点，0.7 视场，全视场。从每个象点的成象光束中选若干条光线，计算出每条光线的垂轴象差 $\delta y'$、δz（相对于主光线象点的象差），显然这些象差有相同的量纲，在数量上也是相当的，因此用它们来构成阻尼最小二乘法的评价函数比单项几何象差方便。所以目前国外多数阻尼最小二乘法程序都以垂轴象差为主来构成评价函数。采取的光线总数一般在十几条至几十条不等。

垂轴象差作为适应法的象差数是不适当的，首先它们并不是彼此独立的，而是相关的，而且要能够充分代表一个系统的质量，必须计算的光线和象差个数比较多，因此难于满足适应法中象差个数必须小于自变量个数的要求。

3. 波象差

用波象差作为象差参数的好处是在数量上比较一致，因此评价函数中的权因子就显得不重要了。基本上可以不必改变权因子，就能使象差达到较好的平衡状态，评价函数和光学系统的实际质量之间的关系更加密切，有利于系统达到最佳校正。

使用波象差作为象差参数，一般有两种方式，一种是象垂轴象差那样，采用有限条光线的波象差，另一种是在整个通光面积内对波差的平方进行积分，后者更能表示出系统质量的优劣，但计算工作量大得多。

波象差比较适合于阻尼最小二乘法用来构成评价函数，而不适用于适应法，因为它们之间同样是相关的。由于波差计算量较大，同时又不如几何象差直观，目前使用得较少，一般只是作为最后精确校正使用。

除了上面讲的三种象差参数而外，在自动校正中也有采用初级和高级象差系数、或者光学传递函数作为象差参数的，但是应用都比较少。象差系数比较适合于适应法，因为它们彼此之间是独立的，而且个数比较少。

（二）自变量的类型和尺度

所谓自变量就是光学系统的可变结构参数，在自动校正程序中，自变量有以下几种形式。

1. 单个变量

如透镜表面的曲率、厚度、玻璃的折射率、色散，它们每一个都作为一个独立的变量使用，这是程序中使用得最多的变量形式。

2. 整组弯曲

把某一透镜组作为一个整体进行弯曲，如我们人工校正中经常使用的那样，它可以使透镜组的光焦度保持不变。

3. 同号或异号结组变量

这主要用于某些具有对称结构的系统，例如对称目镜中为了保持两个透镜组完全相同，要求 $c_1 = -c_6$、$d_1 = d_5$、$n_2 = n_6$ 等等，如图 7－1 所示。我们把 c_1 和 c_6 称为异号结组变量，d_1 和 d_5 称为同号结组变量，当 c_1 改变时，c_6 也相应的改变，两者保持大小相等符号相反的关系；d_1 和 d_5 则永远大小相等符号也相同。在折反射系统中也需要使用同号和异号结组变量。

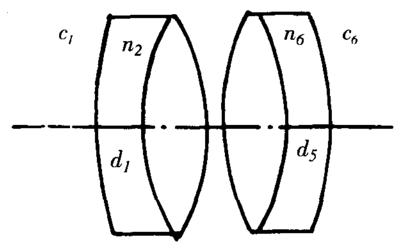

图 7－1

在阻尼最小二乘法中，如果用垂轴象差或波象差构成评价函数，通常把象面位移也作为一个变量使用，程序自动找出最好的象面位置。在阻尼最小二乘法中，结构参数的改变量 $\triangle x_j$（$j = 1$，……n）以 $P^2 \sum \triangle x_j^2$ 的形式进入评价函数，阻尼因子 P 的大小是根据系统线性的好坏由

程序自动优选的。但是和式$\sum \Delta x_j^2$中的Δx_j对不同类型的变量在数量方面的差别很大，例如曲率c可能在0.01以下，而厚度d可能达到1以上，它们对象差的影响也很不一致。如果以它们的实际数值进入评价函数，对数量小的，如曲率就起不到阻尼作用，而数量大的，如厚度则限制得过死。这样势必造成只改变曲率而厚度变得很少，起不到校正作用。这种情况在适应法中也同样存在，因为适应法求出来的是满足$\sum \Delta x_j^2$为极小值时象差方程组的解。为了解决这个问题，一种办法是给不同类型的变量乘以一个类似权因子的数；另一种办法是对不同类型的变量给出不同的结构参数增量[δc、δd、δn、$\delta(n_F-n_C)$]计算象差变化量表，用象差变化量表作为象差方程组的系数矩阵，把象差方程组由（7-1）变成（7-2）的形式，直接求解方程组（7-2）中的$(\frac{\Delta x_j}{\delta x_j})$，并以$(\frac{\Delta x_j}{\delta x_j})$的形式进入和式，得$\sum(\frac{\Delta x_j}{\delta x_j})^2$。利用调节$\delta c$、$\delta d$、$\delta n$、$\delta(n_F-n_C)$的大小来达到统一变量尺度的目的，使各类变量都能均衡的发挥它们的校正作用。后一种方法和传统的光学设计方法相一致，使用比较方便。

（三）边界条件

实际使用的光学系统，除了校正象差的要求而外，还必须满足某些外部尺寸的要求，例如系统的象方焦截距l'_F，或者象距l'，出瞳距或入瞳距，系统的总长度等等。此外还有一些结构上的要求，如负透镜的中心厚度和正透镜的边缘厚度不允许小于一定的数值。所有这些在程序中称为边界条件，系统必须满足这些边界条件方能使用。

在阻尼最小二乘法中边界条件一般作为象差来处理，如果系统违背边界条件，则把违背的量作为一种象差加入评价函数，在往后的迭代中进行约束。所以阻尼最小二乘法的评价函数通常由三部分构成，除了前面已经提到的象差参数和结构参数阻尼这两部分而外，还有一部分就是边界条件。由于阻尼最小二乘法象差个数不受限制，因此允许对系统提各种各样的边界条件，数量不受限制。当边界条件作为象差参加校正以后如果不再违背，经迭代一定次数后就把它释放，不再参加校正，直到它重新违背时才又恢复控制。

对透镜的中心或边缘厚度以及玻璃光学常数等这些边界条件，也可以采用另一种方式来处理，当它们越出边界时，直接把它们拉到边界上，并且把它们冻结起来，不再作为变量进行校正，经过若干次迭代再加以释放，重新作为变量参数校正。

在适应法自动校正程序中，边界条件同样是采取这两种方式来处理的，对第一种作为象差处理的边界条件，它作为一种象差以一个线性方程式的形式加入象差方程组一起进行求解，由于适应法的象差个数受到限制，因此作为象差加入校正的边界条件就不能太多，一般只把后截距、入瞳或出瞳距这些边界条件作为象差处理，而透镜厚度、介质的光学常数这些都采用冻结和释放的方式处理。

（未完待续）