

光学设计指导书

刘冬梅、王文生等主编

长春理工大学光电工程学院

2005 年

前 言

按照“应用光学”教学大纲规定的设计要求，并结合光电工程学院的《应用光学》教学特点及具体的情况，我们编写了《光学设计指导书》。

本指导教程着眼于应用光学的基本理论知识、光学设计基本理论和方法，侧重于典型系统具体设计的思路 and 过程，加强学生对光学设计的切身领会和理解，将理论与实际融合、统一，以提高学生综合分析及解决问题能力的培养。在该实验指导教程中共包含三部分的内容：光学设计中的 PW 法、望远系统 PW 方法的具体计算过程、ABR 程序的介绍及使用等。在编写过程中我们吸纳了过去课程设计的经验与长处，内容深入浅出、文字通顺、易读易懂，具有自己的特色。

本教程由光电工程学院刘冬梅、王文生、刘智影、霍芙蓉等主编。

由于本人水平有限，教程中难免有不足之处，衷心希望广大读者对教程中的不足之处给予批评指正。

编者

2005 年 1 月

目 录

第一章	光学设计中的 PW 法.....
§ 1-1	光学系统的基本象差参量.....
§ 1-2	光学系统的基本象差参量的规化.....
§ 1-3	双胶合薄透镜组的 $\overline{P}^\infty, \overline{W}^\infty, \overline{C}_I$ 与结构参数的关系.....
第二章	望远系统 PW 法的具体计算过程.....
§ 2-1	望远系统的原理.....
§ 2-2	课程设计的内容及要求.....
§ 2-3	望远系统 PW 法的具体设计过程.....
第三章	ABR 程序的介绍及使用.....
§ 3-1	ABR 程序的介绍.....
§ 3-2	数据文件的建立及 ABR 程序的操作.....

第一章 光学设计中的 PW 法

§ 1-1 光学系统的基本象差参量

任何光学系统都是由许多光组组成，每个光组都有自己的性能要求，如显微系统、望远系统至少由物镜和目镜两部分构成，照相系统多为一个照相物镜。光学设计的过程主要是首先根据光组的特性要求（ $f', D/f', 2\omega$ 等）选定其结构型式，然后进行初始结构参数的求解。但是无论是利用初级象差理论为基础求解得的初始结构参数，还是根据已有资料选用的初始结构参数，它们的象差都不一定能满足要求，因此必须进行象差校正。

为应用初级像差理论求解光学系统的初始结构参数，需把以前那些便于实际计算初级像差系数的基本公式组（1-2）作必要的变换，以使它们能与透镜或透镜组的结构参数联系起来，而用 P, W 表示的初级像差系数表示式是解决这一实用问题所需的较好形式。

现在在初级像差系数的公式组（1-2）中引入符号 P, W ：

$$\begin{aligned} P &= ni(i-i')(i'-u) \\ W &= (i-i')(i'-u) \end{aligned} \quad (1-1)$$

并以 $\frac{i_z}{i} = \frac{h_z}{h} + \frac{J}{hni}$ 代入，即可得到以 P 和 W 所表示的初级像差系数表示式（1-3）：

（需要指出的是公式中所涉及的各量的物理意义与应用光学中所讲到的相一致，此处就不分别加以介绍了，带有下角标 z 的表示的是与主光线相关的各物理量。）

$$\begin{aligned}
\delta L' &= -\frac{1}{2n_k' u_k'^2} \sum_1^k S_I & S_I &= l u n i (i - i') (i' - u) \\
K_s &= -\frac{1}{2n_k' u_k'} \sum_1^k S_{II} & S_{II} &= S_I \frac{i_z}{i} \\
x'_{ts} &= -\frac{1}{n_k' u_k'^2} \sum_1^k S_{III} & S_{III} &= S_I \left(\frac{i_z}{i}\right)^2 \\
x'_t &= -\frac{1}{2n_k' u_k'^2} \left(3 \sum_1^k S_{III} + \sum_1^k S_{IV}\right) & S_{IV} &= J^2 \frac{n' - n}{n' n r} \\
x'_s &= -\frac{1}{2n_k' u_k'^2} \left(\sum_1^k S_{III} + \sum_1^k S_{IV}\right) & S_V &= (S_{III} + S_{IV}) \frac{i_z}{i} \\
\delta y'_z &= -\frac{1}{2n_k' u_k'} \sum_1^k S_V & C_I &= l u n i \left(\frac{dn'}{n'}\right) \left(\frac{dn}{n}\right) \\
\Delta I'_{FC} &= -\frac{1}{n_k' u_k'^2} \sum_1^k C_I & C_{II} &= C_I \frac{i_z}{i} \\
\Delta Y'_{FC} &= -\frac{1}{n_k' u_k'} \sum_1^k C_{II}
\end{aligned} \tag{1-2}$$

$$\begin{aligned}
\sum_1^k S_I &= \sum_1^k h P \\
\sum_1^k S_{II} &= \sum_1^k h z P + J \sum_1^k W \\
\sum_1^k S_{III} &= \sum_1^k \frac{h_z^2}{h} P + 2J \sum_1^k \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum_1^k \frac{1}{h} \Phi \\
\sum_1^k S_{IV} &= -J^2 \sum_1^k \frac{1}{r} \Delta \frac{1}{n} = J^2 \sum_1^k \frac{1}{h} \pi \\
\sum_1^k S_V &= \sum_1^k \frac{h_z^2}{h^2} P + 3J \sum_1^k \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum_1^k \frac{h_z}{h^2} (3\Phi + \pi) - J^3 \sum_1^k \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n}
\end{aligned} \tag{1-3}$$

$$\text{式中, } \left\{ \begin{array}{l} \pi = -h \frac{1}{r} \Delta \frac{1}{n} \\ \Phi = \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} = h \Delta \frac{1}{nl} \end{array} \right. \quad (1-4)$$

公式组(1-3)把各个初级像差系数表示为二条近轴光线在折射面上的高度以及三个参量 P, W, π 的函数。这几个参量表征着折射面的像差贡献, 由于它们仅被第一近轴光线的量决定, 使得在实用上极为方便。

用光线光路计算方法求光学系统的像差值以判定其成像质量, 必须首先知道该系统的结构参数 (r, d, n) 。这个结构可能是像差已经校正的可用结果, 也可能是供像差校正用的初始结构, 本章的目的是按初级像差理论求取光学系统的初始结构, 以供作光路计算校正像差之用。在求解光学系统的初始结构时, 按初级像差公式计算, 并略去透镜的厚度, 因此, 它是一个近似解, 其近似程度决定于所设计的系统的视场和孔径。

当光学系统的各个薄透镜组的光焦距及它们相互间的位置为已知时, 第一近轴光及第二近轴光线在各个光组上的入射高度 h, h_z 也就确定了。根据式(1-3)可知: 每个薄透镜组的初级像差由 P, W 两个参量确定, 故称 P, W 为薄透镜组的像差参量或像差特性参数。

利用 P, W 求薄透镜系统的初始解的过程为: 首先对整体光学系统作外形尺寸计算, 求出各个光组上的光线入射高度 h, h_z , 光焦距 Φ 和拉赫不变量 J 等; 再根据对各个薄透镜组的像差要求按薄透镜系统像差公式(1-3)求出各薄透镜组的像差参量 P, W ; 最后由 P, W 确定各个薄透镜组的结构参数。

任何光学系统或光组的像差参量表达式均可分为两部分: 一部分称为内部参数, 是指光组各个折射面的曲率半径 r 、折射面间的间隔 d 和折射面间介质折射率 n ; 另一部分参数称为外部参数, 是指物距 l 、焦距 f' 、半视场角 ω 和相对孔径 D/f' 等。

上述 P, W 不仅和内部参数有关, 而且也和外部参数有关, 即 P, W 值还随外部参数的变化而变化。为使 P, W 值只决定于内部参数以便由其决定光学系

统的结构，故对光学系统的 P, W 值的计算给以特定条件，称之为规化条件，即令： $u_1 = 0, h_1 = 1, f'_1 = 1, u'_k = 1$ 。把任何焦距的光学系统缩放到 $f'_1 = 1$ 后，按规化条件作光线光路计算，所求得的像差参量以 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 表示，称为光学系统的基本像差参量。这样，任何光学系统的基本像差参量 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 值只和系统的内部参数有关，而不再受外部参数的影响。

§ 1-2 光学系统的基本象差参量的规化

为使由 P, W 值求解光组结构参数方便，须将 P, W 中与内部参量有关的量和与物体位置有关的量分离开来。具体的作法是以某一特定位置，即物在无穷远时的 P, W 值来作为薄透镜组的基本像差参量，并记之为： $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ ，再建立起任意物体位置时的 P, W 值与 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 之间的关系。

一、物体在有限距离时的 P, W 的规化

由薄透镜的焦距公式可知：将各个折射面曲率半径除以 f' ，则系统的焦距便规化为 1，再取 $h = 1$ ，计算出的薄透镜系统的像差参量用 \bar{P}, \bar{W} 表示，现在求 P, W 和 \bar{P}, \bar{W} 之间的关系。

由高斯公式得： $u' - u = h\Phi$

上式两边除以 $h\Phi$ 得： $\frac{u'}{h\Phi} - \frac{u}{h\Phi} = 1$

设 $\bar{u}' = \frac{u'}{h\Phi}, \bar{u} = \frac{u}{h\Phi}$ 代入上式得： $\bar{u}' - \bar{u} = 1$

从以上关系得知：当取 $f' = 1, h = 1$ 时， \bar{u}', \bar{u} 分别为原来的 u', u 乘以 $1/(h\Phi)$ 。此外考虑到 P 和 u', u 的三次方成比例， W 和 u', u 的平方成比例，故进行规化时有如下关系，见式 (1-5)：

$$\begin{cases} \bar{u} = u/(h\Phi) \\ \bar{P} = P/(h\Phi)^3 \\ \bar{W} = W/(h\Phi)^2 \end{cases} \quad (1-5)$$

根据相关公式可知,当焦距规化后其放大率不变,即物像的相对位置不变。

二、对物体位置的规化

但是在实际光学系统中,物体可能处于不同的位置,当物体的位置发生改变时, \bar{P}, \bar{W} 值也将发生变化。当物体位于无穷远位置时,其规化的 \bar{P}, \bar{W} 值可用 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 加以表示:

$$\begin{cases} \bar{W} = \bar{W}^\infty - u_1(2 + \pi) \\ \bar{P} = \bar{P}^\infty - u_1(4\bar{W}^\infty + 1) + u_1^2(3 + 2\pi) \end{cases} \quad (1-6)$$

三、薄透镜组的基本像差参量

将上述 P, W 规化步骤综合如下:

第一步:按式(1-5)将 P, W 规化为 \bar{P}, \bar{W} ;

第二步:将 \bar{P}, \bar{W} 规化为 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$, 此时该值只与光组内部参数有关,而与外部参数无直接关系。

当相接触薄透镜系统在空气中时,在规化条件下,有:

$$\Delta l'_{FC} = -\frac{1}{n'u'^2} \sum_1^k \bar{C}_I = -\sum_1^k \bar{C}_I$$

式中, $\sum_1^k \bar{C}_I = \sum_1^k \frac{\bar{\phi}}{\nu}$,

$\bar{\phi}$ 为薄透镜组的总光焦度 $\Phi = 1$ 时的各个薄透镜的光焦度。故而在规化条件下,相接触薄透镜组的位置色差等于它的负值位置色差系数 $-\sum_1^k \bar{C}_I$ 。

规化和不规化的相接触薄透镜系统的位置色差系数有如下关系:

$$\sum_1^k C_1 = h^2 \Phi \sum_1^k \bar{C}_I \quad (1-7)$$

式中, $\Phi = \sum_1^k \phi$ 为薄透镜组的实际光焦度; $\sum_1^k \bar{C}_I$ 为规化色差,习惯上用 \bar{C}_1 表示,

和 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 一样也是薄透镜组的基本像差参量之一。

同理，可得倍率色差系数 $\sum_1^k C_{II}$, $\sum_1^k \bar{C}_{II}$ 之间的关系为：

$$\sum_1^k C_{II} = hh_z \Phi \sum_1^k \bar{C}_{II} \quad (1-8)$$

四、用 $\bar{P}, \bar{W}, \bar{C}$ 表示的初级象差系数

用 $\bar{P}, \bar{W}, \bar{C}$ 表示的初级象差系数公式如下式所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_1^k S_I = \sum_1^k h^4 \Phi^3 \bar{P} \\ \sum_1^k S_{II} = \sum_1^k h^3 h_z \Phi^3 \bar{P} + J \sum_1^k h^2 \Phi^2 \bar{W} \\ \sum_1^k S_{III} = \sum_1^k h^2 h_z^2 \Phi^3 \bar{P} + 2J \sum_1^k h h_z \Phi^2 \bar{W} + J^2 \sum_1^k \Phi \\ \sum_1^k S_{IV} = J^2 \sum_1^k \pi \Phi \\ \sum_1^k S_V = \sum_1^k h h_z^3 \Phi^3 \bar{P} + 3J \sum_1^k h^2 h_z \Phi^2 \bar{W} + J^2 \sum_1^k \frac{h_z}{h} \Phi (3 + \pi) \\ \sum_1^k C_I = \sum_1^k h^2 \Phi \bar{C}_I \\ \sum_1^k C_{II} = \sum_1^k h h_z \Phi \bar{C}_{II} \end{array} \right.$$

由上列公式，根据设计时实际要求的初级像差系数可解得各薄透镜组的 \bar{P}, \bar{W} 值，它就是各光组在规化条件下的值。

§ 1-3 双胶合薄透镜组的 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty, \bar{C}_I$ 与结构参数的关系

一、双胶合薄透镜组的独立结构参数及球面曲率半径的公式

薄透镜组中用得较多的是双胶合透镜组，它是能满足一定的 P, W, C_I 要求

的最简单的形式。当设计一个要求给定的 f', h 和 P, W, C_1 的双胶合透镜组时，首先利用上节的规化公式求出相应的 $\overline{P}^\infty, \overline{W}^\infty, \overline{C}_1$ ，再求解透镜组的结构参数。本节重点讨论由 $\overline{P}^\infty, \overline{W}^\infty, \overline{C}_1$ 来求解双胶合透镜的结构参数。

双胶合薄透镜组的结构参数包括三个折射球面的曲率半径 (r_1, r_2, r_3)，两种玻璃材料的折射率 (n_1, n_2) 和平均色散 (ν_1, ν_2)。在规化条件下，双胶合薄透镜的 $f'=1$ ，则有：

$$\Phi = \phi_1 + \phi_2 = 1$$

式中， ϕ_1, ϕ_2 分别为两个透镜的光焦度，由上式得：

$$\phi_2 = 1 - \phi_1$$

显然， ϕ_1, ϕ_2 中只有一个独立变数，现取 ϕ_1 作为独立变数。

若玻璃材料已选定，光焦度也确定的条件下，只要确定三个折射球面曲率半径之一，其余两个也就确定了。因此，三个半径也只有一个独立变数，故双胶合薄透镜组以 r_2 或 $\rho_2 = 1/r_2$ 为独立变数，并以阿贝不变量 Q 来表示之：

$$Q = 1/r_2 - \phi_1 = \rho_2 - \phi_1 \quad (1-9)$$

透镜弯曲的形状由 Q 决定，所以 Q 称为形状系数。

综上所述，用以表示双胶合薄透镜的全部独立结构参数为： $n_1, \nu_1, n_2, \nu_2, \phi_1, Q$ 。至于球面半径或其曲率，可由下式 (1-10) 求得：

$$\begin{cases} \frac{1}{r_2} = \rho_2 = \phi_1 + Q \\ \frac{1}{r_1} = \rho_1 = \frac{\phi_1}{n_1 - 1} + \rho_2 = \frac{n_1 \phi_1}{n_1 - 1} + Q \\ \frac{1}{r_3} = \rho_3 = \frac{1}{r_2} - \frac{1 - \phi_1}{n_2 - 1} = \frac{n_2}{n_2 - 1} \phi_1 + Q - \frac{1}{n_2 - 1} \end{cases} \quad (1-10)$$

二、 $\overline{P}^\infty, \overline{W}^\infty$ 和结构参数的关系

$\overline{P}^\infty, \overline{W}^\infty$ 除了和玻璃折射率 n_1, n_2 有关，还与第一近轴光线和光轴的夹角 u, u' 有关，为此可将 u, u' 表示为结构参数的函数。经展开化简和整理可得：

$$\begin{cases} \bar{P}^{\infty} = A Q^2 + B Q + C \\ \bar{W}^{\infty} = K Q + L \end{cases} \quad (1-11)$$

式中,

$$\begin{cases} A = a_1 \phi_1 + a_2 \phi_2 \\ B = b_1 \phi_1^2 - b_2 \phi_2^2 - 2 \phi_2 \\ C = c_1 \phi_1^3 + c_2 \phi_2^3 + (l_2 + 1) \phi_2^2 \\ K = \frac{A + 1}{2} \\ L = \frac{B - \phi_2}{3} \end{cases}$$

式中所涉及各个系数, 均是和折射率有关的量, 这里就不一一介绍了。

如果将 \bar{P}^{∞} 对 Q 配方, 则有:

$$\begin{cases} \bar{P}^{\infty} = A(Q - Q_0)^2 + \bar{P}_0 \\ \bar{W}^{\infty} = K(Q - Q_0) + \bar{W}_0 \end{cases} \quad (1-12)$$

式中,

$$\begin{cases} \bar{P}_0 = C - \frac{B^2}{4A} \\ Q_0 = -\frac{B}{2A} \\ \bar{W}_0 = K Q_0 + L = \frac{A + 1}{2} Q_0 - \frac{1 - \phi_1 - B}{3} \end{cases}$$

上式即为双胶合薄透镜组的结构参数和基本像差参量的关系式。 \bar{P}^{∞} 和 Q 是抛物线函数, \bar{P}_0 是抛物线的顶点, 当 $Q = Q_0$ 时, \bar{P}_0 即为 \bar{P}^{∞} 的极小值。 \bar{W}^{∞} 和 Q 是线性函数, 不存在极值点。 $\bar{P}_0, \bar{W}_0, Q_0$ 即和玻璃材料有关也与位置色差有关。为了讨论 $\bar{P}^{\infty}, \bar{W}^{\infty}$ 与玻璃材料的关系, 从 (1-12) 式中消去与形状有关

的因子 $(Q-Q_0)$ ，得到：

$$\bar{P}^\infty = \bar{P}_0 + \frac{4A}{(A+1)^2}(\bar{W}^\infty - \bar{W}_0)^2 \quad (1-13)$$

令

$$p = \frac{4A}{(A+1)^2}$$

由于当将光学玻璃进行组合时，并按不同的 \bar{C}_I 值计算A值时，A值的变化范围不大，其平均值 $A \approx 2.35$ ，将此值代入上式p值表示式中，有：

$$p = 0.85$$

因 \bar{W}_0 的变化范围很小，当火石玻璃在前时， $\bar{W}_0 = -0.2$ ；当冕牌玻璃在前时， $\bar{W}_0 = -0.1$ 。将此两种情况下的近似数值分别代入式(1-13)，有：

$$\begin{cases} \bar{P}^\infty = \bar{P}_0 + 0.85(\bar{W}^\infty + 0.1)^2 \\ \bar{P}^\infty = \bar{P}_0 + 0.85(\bar{W}^\infty + 0.2)^2 \end{cases} \quad (1-14)$$

从上式可知，不同的玻璃组合和不同的 \bar{C}_I 值，将有不同的 \bar{P}_0 值。由于 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 是抛物线函数关系，故当材料及 \bar{C}_I 改变时， \bar{P}_0 也改变，而抛物线的形状不变，只是位置上下移动。

为了便于根据不同的 \bar{P}_0 值和 \bar{C}_I 值找到满足设计要求的玻璃组合，《光学仪器设计手册》上册对常用的玻璃按冕玻璃在前和火石玻璃在前的两种组合方式计算并列出了有关值，表中分别按七个不同的 \bar{C}_I 值计算出 \bar{P}_0 以及它们的各个系数。见表1-1，1-2。

三、 计算双胶合透镜的结构参数步骤

计算双胶合透镜的结构参数步骤如下：

- 1、由式(1-14) $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 求 \bar{P}_0
- 2、由 \bar{P}_0 值和 \bar{C}_I 值查表 1-1（只体现极少部分）找出需要的玻璃组合，再查表 1-2 按所选取玻璃组合找出 $\phi_1, Q_0, \bar{P}_0, \bar{W}_0$ 。

3、求 Q ：

$$Q = Q_0 \pm \sqrt{\frac{\bar{P}^\infty - \bar{P}_0}{A}} \quad (1-15)$$

$$Q = Q_0 + \frac{\bar{W}^\infty - \bar{W}_0}{K} \quad (1-16)$$

从式 (1-15) 求得两个 Q 值和式 (1-16) 求得的 Q 值进行比较，取其接近的一个值。

4、根据 Q 求折射球面的曲率 ρ_1, ρ_2, ρ_3 。

5、由上面求得的曲率是在总焦距为 1 的规化条件下得到的曲率，从薄透镜的焦距公式可知，如果实际焦距为 f' ，则半径与 f' 成正比。即有：

$$\begin{cases} r_1 = f' / \rho_1 \\ r_2 = f' / \rho_2 \\ r_3 = f' / \rho_3 \end{cases}$$

表 1-1

n_1 \bar{P}_0 n_2		K3 (冕牌玻璃在前)						
		$\bar{C}_I = 0.010$	$\bar{C}_I = 0.005$	$\bar{C}_I = 0.002$	$\bar{C}_I = 0.001$	$\bar{C}_I = 0.00$	$\bar{C}_I = -0.0025$	$\bar{C}_I = -0.005$
ZF1		1.949	1.195	0.345	-0.003	-0.402	-1.602	-3.117
ZF2		1.979	1.334	0.616	0.311	-0.029	-1.050	-2.334
ZF3		2.024	1.535	0.992	0.761	0.505	-0.262	-1.227
ZF5		2.044	1.624	1.156	0.958	0.737	0.077	-0.750
ZF6		2.063	1.666	1.234	1.051	0.846	0.237	-0.526
n_1 \bar{P}_0 n_2		F3 (火石玻璃在前)						
		$\bar{C}_I = 0.010$	$\bar{C}_I = 0.005$	$\bar{C}_I = 0.002$	$\bar{C}_I = 0.001$	$\bar{C}_I = 0.00$	$\bar{C}_I = -0.0025$	$\bar{C}_I = -0.005$

QK3	2.126	1.560	0.771	0.422	0.025	-1.192	-2.771
K3	1.975	1.139	0.162	-0.260	-0.736	-2.179	-4.024
K7	1.771	0.625	-0.639	-1.176	-1.778	-3.585	-5.872
K9	1.912	1.149	0.268	-0.112	-0.539	-1.833	-3.483
K10	1.654	0.311	-1.137	-1.750	-2.433	-4.479	-7.057

表 1-2

$\begin{matrix} n_1 \\ \overline{P_0} \\ n_2 \end{matrix}$	K9 (冕牌玻璃在前)						
	符号	$\overline{C_I} = 0.010$	$\overline{C_I} = 0.005$	$\overline{C_I} = 0.002$	$\overline{C_I} = 0.001$	$\overline{C_I} = 0.00$	$\overline{C_I} = -0.0025$
ZK2 1.6725 32.2	ϕ_1	+1.36237	+1.68589	+1.8799	+1.94470	+2.17116	+2.1711
	A	+2.36363	+2.40349	+2.42740	+2.43537	+2.46327	+2.46327
	B	+10.9237	+15.7881	+18.8423	+19.8829	+23.6142	+23.6142
	C	+14.5343	+27.2331	+37.2024	+40.9366	+55.6885	+55.6885
	K	+1.68181	+1.70174	+1.71370	+1.71768	+1.73163	+1.73163
	L	+3.76205	+5.49133	+6.3741	+6.94255	+8.26181	+8.26181
	Q_0	-2.31079	-3.28441	-3.88116	-4.0821	-4.79328	-4.79328
	$\overline{P_0}$	+1.91303	+1.30581	+0.63738	+0.35429	-0.90638	-0.90638
	$\overline{W_0}$	-0.12429	-0.09789	-0.07705	-0.069244	-0.03839	-0.038395
	p	+0.83564	+0.82995	+0.82655	+0.82542	+0.82148	+0.82148

第二章 望远系统 PW 法的具体计算过程

§ 2-1 望远系统的原理

亥普勒望远镜的原理示意如下图 2-1 所示：

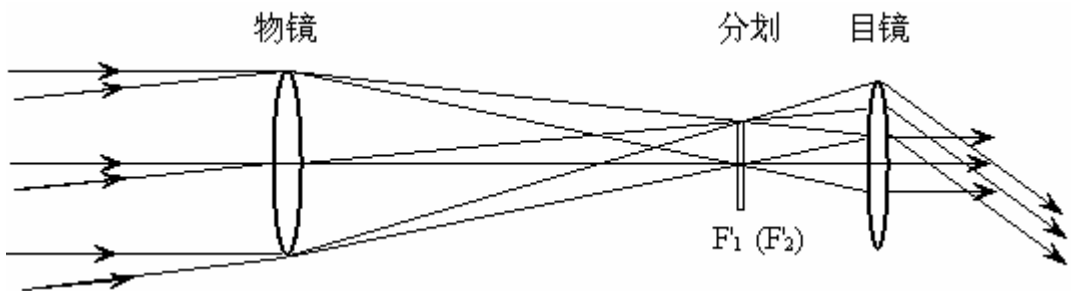


图 2-1

图中可见亥普勒望远镜是由正光焦度的物镜与正光焦度的目镜构成，与显微镜不同的是望远镜的光学间隔为 0，平行光入射平行光射出。其系统的视觉放大倍率为：

$$\Gamma = -f'_o / f'_e = -D / D'$$

式中， f'_o 为物镜的焦距； f'_e 为目镜的焦距； D 为入瞳直径； D' 为出瞳直径。在此成像过程中，有一个实像面位于分划面上，可以实现相应的瞄准或测量。

由于亥普勒望远镜成倒像不利于观察，故而需在系统中加入一个由透镜或棱镜构成的转像系统。军用望远镜的转像系统多是用两个互相垂直放置的 $D_{II} - 180$ 棱镜（即保罗棱镜）组成。

伽利略望远镜是由正光焦度的物镜和负光焦度的目镜组成，其视觉放大率大于 1，形成的是正立的像，无需加转像系统，也无法安装分划板，应用较少。

§ 2-2 课程设计的内容及要求

一、完成此设计任务的主要步骤

- 1、根据已知的一些技术要求，进行外型尺寸计算；
 - 1) 目镜的选取及计算；
 - 2) 物镜的结构型式及外型尺寸计算；
 - 3) 分划板的外型尺寸计算；
 - 4) 棱镜的类型选取及外型尺寸计算；
- 2、像差计算
 - 1) 求取棱镜的初级像差；
 - 2) 求取物镜的初级像差；
 - 3) 根据物镜的像差求出双胶合物镜的结构参数。
- 3、计算象差容限；
- 4、根据物镜的结构参数及棱镜的结构参数进行部分光线追迹，初步求出像点的位置及象差的大小；
- 5、利用前几步计算出的初始结构参数制作数据文件；
- 6、利用数据文件上机操作、计算。并用像差容限加以评价系统的可实用性，如果结果不满足像差容限的要求，则需修改初始结构参数，再进行上机操作，如此反复，直至满足要求为止。

二、 撰写论文的主要内容：

- 1、题目及光学系统的性能要求；
- 2、写出设计的全部计算过程（包括系统原理光路图）；
- 3、像差容限的计算；
- 4、数据文件的形式内容；
- 5、手动追迹光线的结果（ L, l 表）；
- 6、利用 ABR 程序的计算结果；
- 7、利用 ABR 程序的计算结果绘制出相应的 D 光、C 光、F 光球差曲线、正弦差曲线、OPD 曲线等；
- 8、写出整个设计过程的心得。

§ 2—3 望远系统 PW 法的具体设计过程

设计题目要求：

设计一个 Γ 倍的观察镜（属望远系统），其设计要求如下：

全视场： 2ω

出瞳直径： d

镜目距： p

鉴别率： α

渐晕系数： k

棱镜的出射面与分划板之间的距离： a

选取棱镜用作转像棱镜，其棱镜的光学材料为已知

选用目镜类型为已知。

一、目镜的计算

目镜是显微系统和望远系统非常重要的一个组成部分，但目镜本身一般并不需要设计，当系统需要使用目镜时，只要根据技术要求进行相应类型的选取即可。

1、首先根据已知的视觉放大倍率 Γ 及视场 2ω ，求出 $2\omega'$ ，即：

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} \Rightarrow \Rightarrow 2\omega' = 2\operatorname{arctg}(\Gamma \times \operatorname{tg} \omega)$$

2、因为目镜有负畸变（3% ~ 5%），所以实际应取：

$$2\omega' = 2\operatorname{arctg}(\Gamma \times \operatorname{tg} \omega) + 2\operatorname{arctg}(\Gamma \times \operatorname{tg} \omega) \times 5\%$$

3、根据实际所需的 $2\omega'$ 数值、出瞳直径值及出瞳距值等，来选择合适的目镜类型。常见的目镜类型及目镜的具体数据参数详见《光学仪器设计手册》上册。在本次设计中所需的目镜的结构形式应该做为已知条件给出，如：目镜 2—35；目镜 2—28 等。

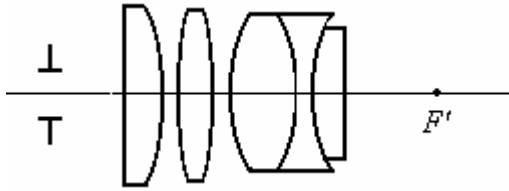


图 2-2

例如：目镜 2-28（结构图见 2-2）

此外设计手册中还提供有相关的结构数据参数表 2-1 及主要的系统数据：

表 2-1

r	d	n_D	ν	$\Phi_{\text{效}}$
∞	5.3	1.5524	63.3	24.1
-25.24	0.2			25.4
50.93	5.5	1.5524	63.3	27.5
-50.93	0.2			27.5
25.53	10.0	1.4874	70.0	26.1
-25.53	1.8	1.7280	28.3	24.2
17.989	6.0	1.4874	70.0	21.8
-157.04				21.6

$f' = 20.216, 2\omega = 57^\circ, s_{f'} = 4.49, d = 5.0$ 等。

从图 2-2 中我们不难发现该目镜的出瞳位于整个系统的左侧，而在目镜的实际运用中，出瞳应位于系统的右侧。此种情况相当于将目镜倒置，故而它所给出的 $s_{f'} = 4.49$ 我们不能直接加以运用，这里的 $s_{f'}$ 是指 F' 与目镜最后一面之间的距离。

4、将手册中所给的目镜倒置：

由于将目镜倒置，则目镜的数据将发生一定的变化，以目镜 2-28 为例，原来的第一个折射面（ $r_1 = \infty$ ）变为第八个面（ $r_8 = \infty$ ），原来的第二个折射面（ $r_2 = -25.24$ ）变为第七个折射面（ $r_7 = 25.24$ ）……，以此类推。值得注意的是：不但折射面的次序发生变化，与此同时其半径的符号也将发生相应的

改变，原来为正，则现在为负。倒置后的新的数据如下表 2-2 所示：

5、进行手动追迹光线，求出倒置后的 s_f ：

如何进行光线追迹？我们以一个具体的双胶合物镜为例进行一下说明（见表 2-4）：

例如：一双胶合物镜的初始结构参数如下所示（见表 2-3）：

表 2-2

r	d	n_D	ν	$\Phi_{\text{效}}$
157.04	6.0	1.4874	70.0	
-17.989	1.8	1.7280	28.3	
25.53	10.0	1.4874	70.0	
-25.53	0.2			
50.93	5.5	1.5524	63.3	
-50.93	0.2			
25.24	5.3	1.5524	63.3	
∞				

表 2-3

r	d	n_D
62.5	4.0	1.51633
-43.65	2.5	1.67270
-124.35		

表 2-4

	1	2	3	
l	∞	179.547	341.467	
$-r$	62.5	-43.65	-124.35	

$l-r$ $\times u$ $\div r$	$h_1 = 10$	223.197	465.817	
i $\times n/n'$	0.160000 1/1.51633	-0.278585 1.51633/1.67270	-0.106533 1.67270	
i' $\times r$ $\div u' = (u + i - i')$	0.105518 0.054482	-0.252542 0.028439	-0.178198 0.100104	
$l'-r$ $+r$	121.047 62.5	387.617 -43.65	221.359 -124.35	
l'	183.547	343.967	97.009	
lu $\div u'$	100	9.78207	9.71097	
l' $-d$	183.547 4.0	343.967 2.5	97.009	

注意：计算过程中至少保留六位有效数字。

采用与上相同的方法就可得到目镜倒置后的 s_f 值（指焦点 F 与目镜最后一面的距离，也即指当平行光入射目镜系统时追迹光路中的最后一个面的像距 l' 值）。

6、计算出瞳距 p' ：

望远系统的简单结构图如下所示：

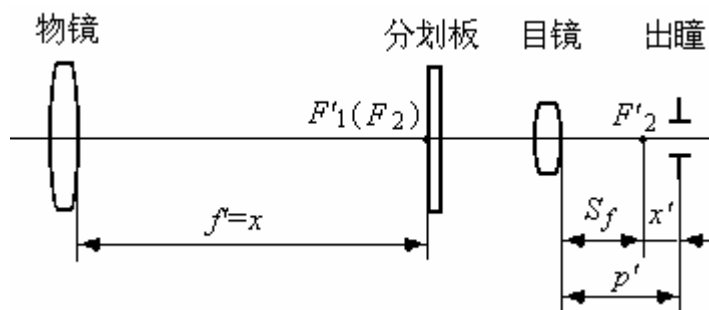


图 2-3

由于一般情况下望远系统的孔径光阑是物镜的边框，则根据出瞳的定义：孔径光阑经后面的光学系统在像空间所成的像是出瞳，如上图所示。则有：

$$\begin{aligned}x &\approx f'_1 \\x' &= p' - s_f\end{aligned}$$

公式中的 x, x' 分别是指计算出瞳位置时的物距和像距。则根据牛顿公式 $xx' = ff'$ 有：

$$-f'_1(p' - s_f) = -f_2'^2 \Rightarrow (p' - s_f) = \frac{f_2'^2}{f'_1} \Rightarrow p' = s_f + \frac{f_2'^2}{f'_1}$$

根据所求得的出瞳距 p' ，与题目要求的出瞳距值进行比较，若二者比较接近，则认为所选择的目镜基本满足要求，从而最后确定了目镜的结构类型。

二、选择物镜的结构型式及一些主要数据

1、根据目镜焦距 f'_2 求取物镜的焦距 f'_1 ：

$$\Gamma = f'_1 / f'_2 \Rightarrow f'_1 = \Gamma \times f'_2$$

2、求物镜的视场 2ω ：从题意中得出。

3、求物镜的通光口径：

$$\Gamma = D / D' \Rightarrow D = D' \times \Gamma$$

公式中的 $D' = d$ （是题中所给出的出瞳直径值）

4、求取物镜的相对孔径 D / f' ：

根据题目所给出的视场大小及相对孔径的大小选择物镜所需的结构形式。常见的望远物镜的结构形式有：双胶合、双分离、三片式等等，在本次系统设计中由于所设计的系统的视场不大，相对孔径也不大，故可选用双胶合物镜。双胶合物镜的结构形式如下图 2-4 所示：



图 2-4

三、 计算分划板

1、计算分划板直径：

$$D_{\text{分}} = 2tg\omega \times f'_1$$

2、查表求取分划板厚度 $d_{\text{分}}$ 及其公差值。

根据分划板直径查《光学仪器设计手册》上册 P372 表

3、求鉴别率 α ：

$$\alpha = 140'' / D$$

只要此值小于系统要求的分辨率即满足要求。

四、 计算棱镜

由于亥普勒望远系统成倒像，故尚需在整个系统中加入一转像系统，在本次设计中我们加入的是棱镜转像系统。棱镜转像系统应置于物镜的像平面附近，为了不使棱镜上的疵病反映到目镜中，还要使棱镜离开象平面一定距离，即题中所给出的 a 值。如果无特殊要求棱镜的位置应位于横向尺寸最小的地方。

1、棱镜的选型：本课程设计中棱镜的类型及所用光材已作为已知条件给出。而各种常见的棱镜结构示意图位于《光学仪器设计手册》上册 P91 页的图表中，此外在图表中还标明了棱镜各参数的数值大小。

2、求取棱镜的展开长度 L

从 P91 页的图表中可查得每种类型棱镜的结构参数 K ，则有：

$$L = K \times D_{\text{棱}}$$

式中， $D_{\text{棱}}$ 为选用棱镜的通光口径，其大小与渐晕系数 k 及 a 值有关。

3、 $D_{\text{棱}}$ 值可采用如下的近似公式进行求取：

$$\begin{cases} tg\alpha = \frac{kD_1 - D_{\text{分}}}{2f'_1} \\ D_{\text{棱}} = D_{\text{分}} + 2(a + \bar{d}) tg\alpha \Rightarrow D_{\text{棱}}, L \\ \bar{d} = L/n = KD_{\text{棱}}/n \end{cases}$$

式中， n 为棱镜所用光材对D光的折射率； \bar{d} 为棱镜的等效空气层厚度； α 是一过渡参量。通过上式可求出棱镜的通光口径，但是由于棱镜本身也存在一个安装固定的问题，故而所取的 $D_{\text{棱}}$ 值应适当加大以满足设计要求，可取增量值为2。

4、计算 b 值：

$$b = f'_1 - a - \bar{d}$$

通过以上分析，初步确定系统结构形式如下图2-5所示：

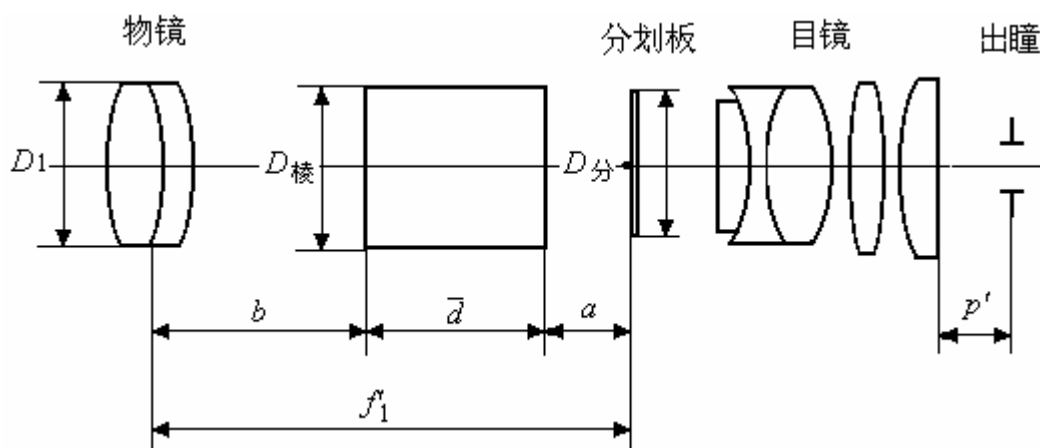


图 2-5

值得注意的是，此时的计算结果皆是在薄透镜的状态下计算得出的，在以后的计算过程中如需用到 b 值，最好通过加厚后的透镜的光线追迹结果来进行计算（ $b = l'_3 - \bar{d} - a$ ）为好，否则结果不够准确。

五、 像差计算

由于望远系统属于小象差系统，故在系统设计过程中只需考虑：球差、正弦差及位置色差。在下面的公式中所涉及到的折射率 n 为棱镜光材的D光折射率的大小。

1、求棱镜初级像差：

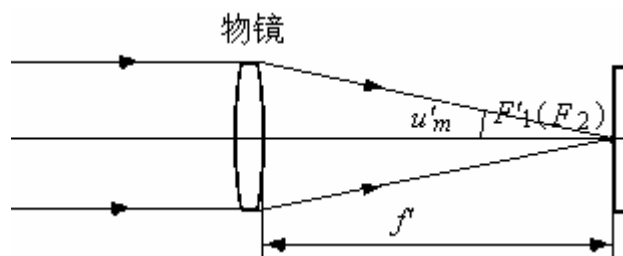


图 2-6

1) 求 u'_m (见图 2-6): $tg u'_m = \frac{D_{物}/2}{f'_1}$

2) 求 u_z (见图 2-7): $u_z = -\omega$

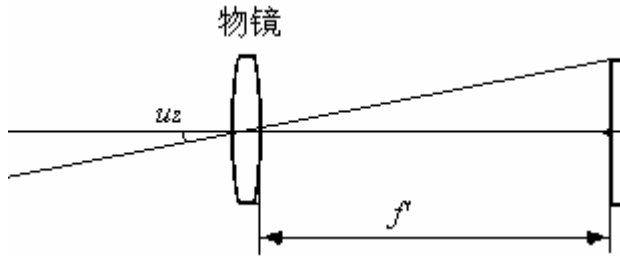


图 2-7

3) 棱镜球差 $LA'_{棱}$ 的计算:

$$LA'_{棱} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} Lu'^2_m$$

4) 棱镜正弦差 $SC'_{棱}$ 的计算:

$$SC'_{棱} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} \frac{Lu'^2_m \times u_z}{y'} = LA'_{棱} \times \frac{u_z}{y'}$$

式中, y' 是分划板半高度。

5) 棱镜的位置色差 $\Delta L'_{FC棱}$ 计算:

$$\Delta L'_{FC棱} = \frac{\delta n_{FC}}{n^2} \times L = \frac{L}{\nu_D} \times \frac{n_D - 1}{n^2}$$

6) 拉赫不变量 J 的计算:

$$J = n_1 u_m y'$$

式中, $n_1 = 1$ 是空气折射率。

2、物镜的初级像差的计算:

1) 物镜球差的计算: $LA'_{物} = -LA'_{棱} = -\frac{n^2 - 1}{2n^3} Lu'^2_m$

2) 物镜正弦差的计算:

$$SC'_{\text{物}} = -SC'_{\text{棱}} = -\frac{n^2 - 1}{2n^3} \frac{Lu'_m{}^2 \times u_z}{y'} = -LA'_{\text{棱}} \times \frac{u_z}{y'}$$

3) 物镜的位置色差计算:

$$\Delta L'_{FC\text{物}} = -\Delta L'_{FC\text{棱}} = -\frac{\delta n_{FC}}{n^2} \times L = -\frac{L}{v_D} \times \frac{n_D - 1}{n^2}$$

3、求双胶合物镜的结构参数:

1) 求像差系数:

$$\text{球差系数: } \sum_1^k S_I = -2n'u'_m{}^2 \times LA'_{\text{物}}$$

$$\text{正弦差系数: } \sum_1^k S_{II} = -2JSC'_{\text{物}}$$

$$\text{位置色差系数: } \sum_1^k C_I = -n'u'_m{}^2 \times \Delta L'_{FC\text{物}}$$

上式中的 n' 是空气折射率。

2) 规化的 $\bar{P}, \bar{W}, \bar{C}, \bar{P}_0$

$$\begin{cases} \bar{P} = \frac{\sum S_I}{h^4 \Phi^3} \\ \bar{W} = \frac{\sum S_{II}}{h^2 \Phi^2 J} \\ \bar{C} = \frac{\sum C_I}{h^2 \Phi} \\ \bar{P}_0 = \bar{P}^\infty - 0.85(\bar{W}^\infty + 0.1)^2 \end{cases}$$

公式中的 h 为入瞳半高度; Φ 为物镜的光焦度。

对于望远系统而言, 有 $\bar{P}^\infty = \bar{P}, \bar{W}^\infty = \bar{W}$, 则可求出 \bar{P}_0 值, 在此式中我们

是假设双胶合物镜的冕牌玻璃在先，火石玻璃在后进行计算的。若取火石玻璃在先，冕牌玻璃在后，则 \bar{P}_0 式中的0.1应变为0.2。

通过上式计算就可能求出 \bar{P}_0 值及 \bar{C} 的大小，根据此二个数值就可以选取相应的玻璃组合。

3) 选取玻璃对组合：

在《光学仪器设计手册》上册中自 P108 页始提供了许多不同的玻璃对组合，我们下面所要做的就是从中选择一对与 \bar{P}_0 值及 \bar{C} 值相近的一对玻璃，来作为构成双胶合物镜的光学材料。但是值得注意的是玻璃对的选取并非是任意的，它需要采用内插法来加以计算，下面就以一个例子为例来加以说明。

例如：假设计算的数值为： $\bar{P}_0 = 0.18342681, \bar{C} = 0.00207547$ ，则分析过程如下：

由于 $\bar{C} = 0.00207547 \in [0.005, 0.002]$ 则与此 \bar{C} 值相对应的 \bar{P}_0 值应为多少？ \bar{P}_0 是随所选的玻璃组合的不同而不同。

假设首先选取玻璃 $K_9 + F_2$ 组合， $\bar{P}_0 = 0.18342681$ （计算所得的规范化值）

则通过查表得：当 $\bar{C} = 0.005$ 时， $\bar{P}_0 = 0.938$

当 $\bar{C} = 0.002$ 时， $\bar{P}_0 = -0.053$

则当 $\bar{C} = 0.00207547$ 时， \bar{P}_0 值计算结果为：

$$\frac{\bar{P}_0}{0.938} = \frac{0.002075 - 0.002}{0.005 - 0.002} \Rightarrow \bar{P}_0 = 0.025$$

上式的得来是通过采用内插法，利用三角形相似得到的（见图 2-8）。

现在将用内插法求得的 $\bar{P}_0 = 0.025$ 与规范化所得的 $\bar{P}_0 = 0.18342681$ 进行比

较，由于二者相差太大，故可认为此种玻璃 $K_9 + F_2$ 组合不满足要求。再寻另

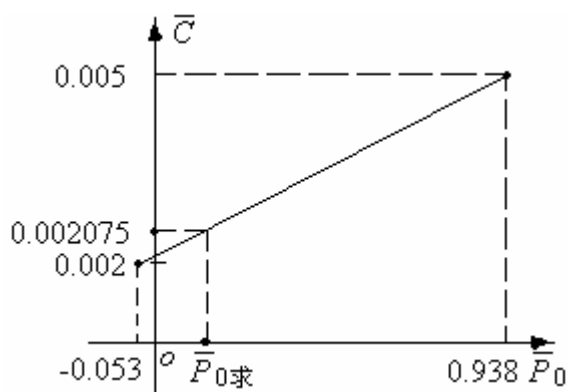


图 2-8

一玻璃组合进行计算，如此循环往复，直至满足要求为止，即两个 \bar{P}_0 值比较接近为止。值得强调的是，为了最终获得比较好的像质，在此环节的计算过程中应尽可能的多算几组玻璃组合，并从中选取最好的玻璃组合作为双胶合的光材。

4) 玻璃对确定之后，记录下该组合所对应的各参数量值：

$$\phi_1, A, B, C, K, \bar{Q}_0, \bar{W}_0$$

这些量值也全部通过内插法进行计算，将内插后的结果作为该组合的最终结果。

5) 求形状系数 Q ：

$$Q_1 = Q_0 \pm \sqrt{\frac{\bar{P}^\infty - \bar{P}_0}{A}}$$

式中， \bar{P}_0 为选定玻璃对后所内插出的值， A, Q_0 也为内插后的值。通过上式计算后可得到二个 Q_1 值，将此二个 Q_1 值分别与下式的结果进行比较，选取与下式结果更为接近的值。

$$Q' = Q_0 + \frac{\bar{W}^\infty - \bar{W}_0}{K}$$

为获得良好的像质，再将选取的 Q_1 值与上式的计算结果求平均值，此均值则

为最后所求的形状系数，即有：

$$Q = (Q_1 + Q') / 2$$

6) 求双胶合各个折射面的曲率 ρ_1, ρ_2, ρ_3

$$\begin{cases} \rho_2 = \phi_1 + Q \\ \rho_1 = \frac{n_1}{n_1 - 1} \phi_1 + Q \\ \rho_3 = \frac{n_2}{n_2 - 1} \phi_1 + Q - \frac{1}{n_2 - 1} \end{cases}$$

式中， n_1 是双胶合第一块透镜的 D 光折射率； n_2 是双胶合第二块透镜的 D 光折射率， ϕ_1 是内插后的值。

7) 半径缩放：

$$\begin{cases} r_1 = f'_1 / \rho_1 \\ r_2 = f'_1 / \rho_2 \\ r_3 = f'_1 / \rho_3 \end{cases}$$

8) 根据现已求出的双胶合的初始数据追迹光线（假设是薄透镜，即： $d_1 = d_2 = 0$ ， d_1 是第一块透镜的中心厚度， d_2 是第二块透镜的中心厚度），所运用的初始参数如下： $l = -\infty, r_1, r_2, r_3, h_1, d_1, d_2, n_1, n_2$ ，追迹光线的方法如表 2-4 所示。从追迹光线的过程中可以获得一些中间数据，如： u'_1, u'_2 ，分别是光线经第一个折射面及第二个折射面的像方孔径角的大小，此二个数值在以后的运算过程中将有应用。

9) 透镜外径 $D_{\text{外}}$ 的计算：

透镜的通光口径与外径是两个不同的概念，由于透镜本身也存在安装及固定的问题，所以加工时的实际口径要比计算得出的通光口径要大一些，而增量的多少则跟通光口径的大小及固定的方法有关，例如：

设物镜的通光口径： $D = 45\text{mm} \in [30, 50]$ ，查《光学仪器设计手册》上册表 9-18，若采用滚边固定，则增量值为 2mm ；若采用压圈固定，则增量值为

2.5mm。现取压圈固定则透镜的外径尺寸为：

$$D_{\text{外}} = 45 + 2.5 = 47.5\text{mm}$$

10) 求两个透镜的中心厚度 d_1, d_2 ：

①求各个折射面的矢高 x_1, x_2, x_3 ：

$$x = r \pm \sqrt{r^2 - \left(\frac{D_{\text{外}}}{2}\right)^2} \quad \text{当} \begin{cases} r > 0 \cdots \cdots \text{取“—”号} \\ r < 0 \cdots \cdots \text{取“+”号} \end{cases}$$

②凸透镜的边缘最小厚度 t_1 的计算：

$$\text{方法一：当取中等精度时，} t_1 = \frac{D_{\text{外}} + 3x_2 - 3x_1}{10}$$

方法二：查表《光学仪器设计手册》上册 P371 表 9—19 选取 t_1 值。

③凹透镜的边缘最小厚度 t_2 的计算：

$$\text{同理，当取中等精度时，} t_2 = \frac{D_{\text{外}} + 8x_3 - 8x_2}{10}$$

④求第一块透镜的中心厚度 d_1 ：

$$d_1 = t_1 - x_2 + x_1$$

⑤求第二块透镜的中心厚度 d_2 ：

$$d_2 = t_2 - x_3 + x_2$$

由于凹透镜本身的特点是中心薄边缘厚，故应令其中心厚度适当加厚（如取增量值为 1.5）。

11) 修改半径：

在第七步中计算的各个半径值是在薄透镜的前提下计算得来的，现透镜已由薄变厚，故其各个折射面的半径值也应发生适当的变化。所采用的公式如下：

$$r_i^* = r_i \frac{h_i}{h_{i0}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{代表三个折射面})$$

式中， r_i^* 为修改后的各个折射面的半径； r_i 为各个折射面原来的半径值； h_i 为光线在各个折射面上的投射高度； h_{i0} 为光在第一个折射面上的投射高度。 h_{i0}

的计算公式如下所示：

$$h_1 = D_1 / 2$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u'_1$$

$$h_3 = h_2 - d_2 u'_2$$

说明：通过公式求出的半径值原则上应进行圆整，可通过查《光学仪器设计手册》上册表 P356 来实现圆整。

至此，我们已通过 PW 法计算出了望远系统的所有基本初始结构参数，请同学们列表整理。

12) 利用相应的初始结构参数追迹光线，所需追迹的光线如下：

5 个折射面近轴光的光路追迹（加厚的）；

5 个折射面主光线的光路追迹（加厚的）；

5 个折射面边缘光线的光路追迹（加厚的）。

其中，主光线的 $l_{z1} = \frac{PA_1^2}{2r_1}$ ，式中 PA_1 可从边缘光的追迹光线表中找到。也可

取一种近似的求法： $l_{z1} \approx x_1$ ， l_{z1} 是入瞳中心与第一个折射面间的距离。

4、计算像差容限的大小：

$$1) \text{ 球差: } \begin{cases} \delta L'_{0.7} \leq \frac{6\lambda}{n' \sin^2 u'_m} \\ \delta L'_m \leq \frac{\lambda}{n' \sin^2 u'_m} \end{cases}$$

式中，波长可取 $\lambda = 550nm$ 。

2) 正弦差： $SC' \leq 0.0025$

$$3) \text{ 位置色差: } \Delta l'_{FC} \leq \frac{\lambda}{n' \sin^2 u'_m}$$

六、建立数据文件（具体做法见第三章）

七、上机操作，进行像差校正

八、实际光学性能计算：

1、实际放大倍率： $\Gamma = \frac{f'_{\text{实物}}}{f'_{\text{目}}}$

2、实际出瞳距： $p' = \frac{f'_1}{\Gamma} + s_f$

3、实际出瞳直径： $d = \frac{D_{\lambda}}{\Gamma}$

4、鉴别率： $\alpha = \frac{140''}{D_{\lambda}}$

九、绘制球差、正弦差、色差曲线；

十、设计总结。

第三章 ABR 程序的介绍及使用

§ 3-1 ABR 程序的介绍

ABR 程序适用于共轴系统的设计。系统中的面形可以是球面、二次曲面或高次曲面，系统可以是折射系统、反射系统或折反射系统。

系统结构参数的给出首先是给出基准球面系统的结构参数（对于非球面，基准球面半径与非球面顶点的近轴曲率半径相同），然后再对其中的非球面给出它们的非球面系数。程序可以计算一种色光的像差也可以计算三种或五种色光的像差。

为了计算像差，除了系统的初始结构参数而外，还必须给出物距、物高（物体位于无限远时，给物方视场角）、物方孔径角（物体位于无限远时，给出光束投射高度），此外还应给出孔径光阑所在面的序号或者给出入瞳的位置。

本程序的计算内容分为：初级像差、实际单色像差及色差、其余色光的像差三大部分，使用者可以根据需要进行选择。此外本程序还可以计算指定的光线。象面可以是平面也可以是球面或非球面。

除了计算像差之外，系统还具备以下功能：

- 1、按指定焦距对系统进行缩放；
- 2、在键盘上修改系统的结构参数；
- 3、计算像差变化量表等。

以上功能可通过人机对话的方式来完成，可计算的最大面数为八十个面。

§ 3-2 数据文件的建立及 ABR 程序的操作

在进行像差计算之前，必须把结构参数、光学特性等各种数据组织成一个数据文件。在数据文件中各种数据必须按规定的格式和顺序进行排列，而且必须按指定数据类型标示出（浮点数须加小数点，整形数不须加小数点），数与数之间应用“，”进行分隔，整个数据文件的内容按性质不同可分为六个部分，

下面我们就对它们的格式及意义分别进行说明。

一、 数据文件的内容说明

1、 数据文件第一行为：*OPTION, Ncolor, Nsruf, Nostop, (Nas)*

此行数据由四个或五个整形数据组成，并且排列在同一行内。

1) **OPTION** 是开关参数，其内容结构如下表所示，其构成的每一位数值可以是“1”或“0”，不同的数值所代表的意义有所不同，其意义如下：

OP ₁	OP ₂	OP ₃	OP ₄	OP ₅
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

OP₁=1 表示系统中有非球面，同时必须输入系统中非球面的个数，此时第一行数据为六个数据；OP₁=0 表示系统中没有非球面，此时第一行为五个数据。

OP₂=1 表示系统中加入了理想系统；OP₂=0 表示系统中没有加入理想系统。

OP₃=1 表示要计算初级像差和各面近轴量；OP₃=0 表示不计算初级像差和各面近轴量。

OP₄=1 表示要计算第一色光的实际单色像差和色差；OP₄=0 表示不计算。

OP₅=1 表示要求计算其余色光的像差；OP₅=0 表示不计算。

例如：开关参数表示为：11111 表明系统中有非球面，系统后加入了理想系统，计算初级像差，计算第一色光单色像差和色差，计算其余色光的像差。

2) **Ncolor** 代表的是色光数目，它有 1, 3, 5 三种不同的情况；

例如：Ncolor=3，则要求数据文件第三部分中要求输入 n, n_a, n_b 三种不同色光的折射率值。

3) **Nsruf** 表示系统总面数，但是不包括入瞳和像面。

4) **Nostop** 表示实际孔径光阑所在面的序号。

例如：Nostop=2 表示第二面为实际孔径光阑。

5) **Nas** 表示系统中非球面的个数，只有当 OP₁=1 时才需输入这个数据。

2、数据文件第二行为： $L, \omega(y), h(\sin U), (Fideal)$

这部分数据为体现的是系统的光学特性参数，它包括三个或四个数据，且也位于同一行。

1) L 表示物距，当物平面位于无限远时 $L = 0$ ，而当物距实际等于 0 时，可以付与 L 一个很小的数。例如 $L = -1.0 \times 10^{-6}$ 。

2) $\omega(y)$ 表示半视场或物高，当物平面位于无限远时，输入的是半视场角；当物平面位于有限远时，输入物高。

3) $h(\sin U)$ 表示投射高度或孔径角的正弦值。当物平面位于无限远时，输入的是轴向平行光束的投射高度；当物平面位于有限远时，输入的是轴上点孔径角的正弦值。

4) $Fideal$ 表示加入的理想系统的焦距，只有当 $OP_2 = 1$ 时才要求输入此数据值。

3、数据文件第三部分数据为系统的结构参数和入瞳位置及像面半径，全部数据为浮点数，当系统有 $Nsruf$ 个面时，这部分数据有 $(Nsruf + 1)$ 行。系统的面数越多，这部分数据也就越多。

1) 在第三部分数据中，其第一行为： $r_1, d_1, n_1, n_{a1}, n_{b1}, n_{c1}, n_{d1}$

其中， r_1 为第一面的半径，当该面是平面时有 $r_1 = 0$ ；

d_1 是指：当 $Nostop = 0$ 时，由入瞳到第一面顶点的距离；

$n_1, n_{a1}, n_{b1}, n_{c1}, n_{d1}$ 代表物空间的介质折射率。对于空气介质来说，它们全部为 1；若介质不是空气，则它们代表所在的介质空间对各个不同色光的折射率值。值得注意的是随着 $Ncolor$ 数值的不同，所需输入的折射率的个数也不一样。例如： $Ncolor = 3$ ，则输入 n_1, n_{a1}, n_{b1} ，即可。

2) 第三部分数据中第二行为： $r_2, d_2, n_2, n_{a2}, n_{b2}, n_{c2}, n_{d2}$

其中， d_2 代表第一面顶点到第二面顶点的距离，其余量值意义同上。依此类推，第三行、第四行……第 $Nsruf$ 行。

4) 第三部分数据中第 $Nsruf + 1$ 行：

其第一个数据 r 为像平面半径，若像平面为平面，则有： $r = 1$ ；

其第二个数据 $d = 0$ 该数没有意义；

其第三至第七个数据则代表像空间的介质折射率，意义与前相同。

4、第四部分为系统中非球面系数，只有系统中有非球面时才有意义（略）。

5、第五部分数据为要求计算投射高度和斜厚度的光线参数。

6、第六部分是像差计算数据的最后一行，为 4444.，它表示整个数据的结束。

二、 数据文件的建立

例如：以本次设计中某一位学生计算的初始结构参数结果为例建立数据文件如下：

```
00111,3,5,0,  
0.,-3.5,15.,  
87.5,0.,1.,1.,1.,  
-64.27,5.,1.5163,1.52195,1.51389,  
-260.,3.2,1.6199,1.63209,1.611503,  
0.,60.727,1.,1.,1.,  
0.,101.7716,1.5181,1.52428,1.51549,  
0.,0.,1.,1.,1.,  
4444.,
```

数据文件第一行表示：计算初级像差，计算第一色光单色像差和色差，计算其余色光的像差；有三种色光；五个折射面；光阑位于第一面上。

数据文件第二行表示：物体位于无限远，其半视场为 $\omega = -3.5^\circ$ ，平行于光轴的光线的投射高度为 15mm ；

数据文件第三行表示： r_1^*, l_z ，及物方介质为空气的折射率；

数据文件第四行表示： r_2^*, d_1 ，及双胶合第一块透镜对 D 光、C 光、F 光的折射率值。

数据文件五行表示： r_3^*, d_2 ，及双胶合第二块透镜对 D 光、C 光、F 光的

折射率值。

数据文件第六行表示： r_4, b ，即棱镜展开成平板后第一面的半径，由于该面是平面，故 $r_4 = 0$ 。其后的几个数值是空气的折射率值。

数据文件第七行表示： r_5, L ，即棱镜展开成平板后第二面的半径及平板的展开长度，由于该面也是平面，故 $r_5 = 0$ 。其后的几个数值是棱镜光材对 D 光、C 光、F 光的折射率值。

数据文件第八行表示：像平面是个平面故有： $r_6 = 0$ ，第二个数没有意义，永远为 0，后三个数为空气折射率。

最后一行表示数据结束。

三、 程序操作

1、首先在硬盘或软盘上按上面的要求建立数据文件；

2、在 DOS 操作系统下，由键盘输入：ABR（然后回车）即可运行本程序；也可在 WINDOW 操作系统下，双击 ABR 图标，运行本程序。

3、程序正常运行之后，在屏幕上显示：

```
**** PROGRAM (ABR) STARTED****
```

```
TYPE YOUR DATA FILE NAME, PLEASE!
```

若数据文件已经建立，并命名为 TESE.TXT，则在此提示下输入：TESE.TXT（回车）；于是屏幕上提示：

```
TYPE YOUR OUTPUT FILE NAME, PLEASE!
```

4、经键盘输入输出文件名，例如：OUT1.TXT(回车)

若你输入的数据文件没有格式上的错误，则程序开始运行进行像差计算，并将结果存放在 OUT1.TXT 中。若数据文件有格式上的错误，则系统会提示你有误。此时，你必须返回到数据文件中查找错误并改正，并再次运行本程序，直至数据文件通过为止。

5、打开 OUT1.TXT 文件，分析计算结果的合理性，如果像差超差，则需要修改初始结构参数之后再次运行，直至满足系统设计的要求。