

长出瞳距目镜的等晕代数法 及其编程设计

林 银 森

摘 要

本文提出等晕代数法用于三组元长出瞳距目镜的初始结构求解及其象差设计。分析结构型式,建立等晕代数方程,并阐述了应用微机编程实现象差平衡的基本原则。文中最后给出两个数字例子的结构参数和象差结果。

【关键词】 三组元;长出瞳距目镜;等晕方程;编程设计

引 言

出瞳距是表征目镜光学特性的重要因素之一。现行常规目镜的出瞳距都较小,使用范围受到了限制。军用目视系统因其特定的使用环境和条件,要求目镜应具有相当长的出瞳距。

国内外有关这类目镜的设计少见报导。仅卡路(P. Kalló)曾对三组元薄透镜组成的长出瞳距目镜初始设计阶段校正象差的可能性进行过讨论^[1],但其研究仍然是沿用传统的试验方法。

本文提出等晕代数法用于三组元长出瞳距目镜的编程设计。其特点在于它可以直接获得厚透镜系统的初始结构参数,同时在象差平衡过程中,保持各组元和系统的光焦度不变,避免焦距缩放所造成的象质损害。

1 结构型式分析

众所周知,目镜与物镜相比具有特殊的性质,即目镜的出瞳必须位于系统的外部,这就使得目镜设计的象差平衡阶段增加困难。而长出瞳距目镜的设计,又会遇到比普通目镜设计的更大难度。这是因为长出瞳距目镜即使在限制视场角不太大的情况下,主光线在目镜上就可能有很大的入射高度,造成严重的轴外非对称性象差。

显然,长出瞳距目镜的结构型式,主要应由获得长出瞳距和轴外象差平衡的可能性决

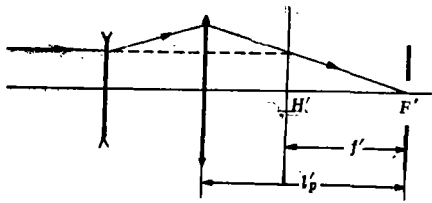


图1 正、负薄透镜分离

定。实现长出瞳距的最简单办法是采用正、负薄透镜分离。如图1所示，对一定的焦距而言，由于象方主平面 H' 外移，使出瞳距 l_p' 加大。而且，这种正、负薄透镜分离结构，有利于校正场曲。

但是，正、负薄透镜分离导致正透镜的入射光线高度增大，偏角负担加重，必然会产生大的高级象差。基此，正透镜可以分裂成两个正透镜；同时，为了校正色差和出瞳中心的光阑球差，将分裂后的第二块正透镜引进胶合面是有利的。按照目镜倒置光路设计的原则，最后得到如图2所示的三组元长出瞳距目镜的结构型式。

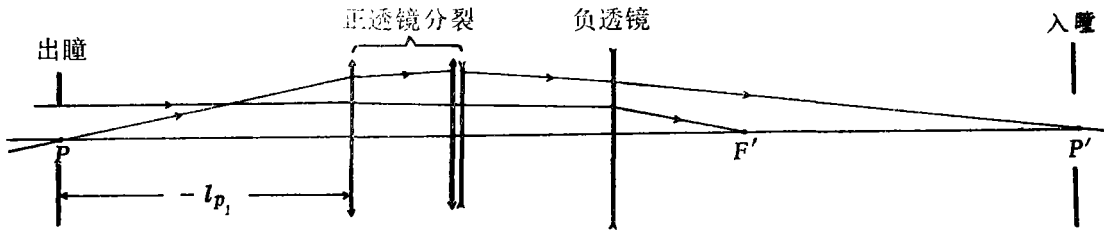


图2 三组元长出瞳距目镜结构型式

2 等量代数法

对于目镜系统，首先应考虑轴外象差的校正问题。场曲和色差由组元的先焦度合理分配得到消除；为了校正彗差和象散，我们可以把系统中的某些折射面形成等光程面或同心面，

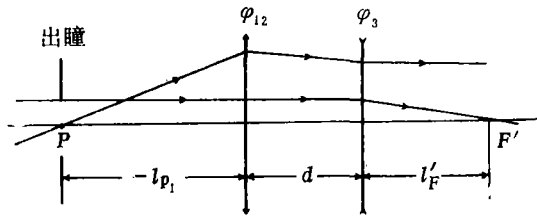


图3 等效二组元结构

使主光线与折射面的法线重合，而球差在整个视场内是保持不变的，满足等晕成象的特性；同时，应用代数方法求解出满足校正目镜系统全部象差所需的结构参数。

为方便计，三组元基本结构型式引进模拟透镜 φ_{12} 而简化成等效二组元结构。如图3所示，在选定模拟透镜的 v_{12} 及 v_3 ，并保证目镜总光焦度 φ 和工作距离 l_F' 的前提下，只考虑满足消倍率色差，则可得到二组元光焦度 φ_{12} ， φ_3 及其间隔 d ，有：

前提下，只考虑满足消倍率色差，则可得到二组元光焦度 φ_{12} ， φ_3 及其间隔 d ，有：

$$\left. \begin{aligned} d &= \frac{A[(1-A)v_{12} - v_3]}{\varphi[(1-A)v_{12} - Av_3]} \\ \varphi_{12} &= A/d \\ \varphi_3 &= \frac{d\varphi - A}{(1-A)d} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $A = 1 - \varphi l'_F$ 。并可按 $l_{P1} = -(1 - d\varphi_3)/\varphi$ 求得出瞳距。

模拟透镜分裂成两块正透镜, 应保持光焦度 φ_{12} 消倍率色差的条件不变, 且使第一块透镜为平凸透镜, 平面朝平行斜光束形成等光程面, 第二面与主光线同心, 以满足等晕成象。

设两块正透镜采用同一种玻璃, 则按照图 4 所示几何关系, 即可导得分裂后的两块正透镜光焦度 φ_1, φ_2 及其间隔 e_1 , 第一块正透镜玻璃材料的阿贝常数 ν_1 和它的第二面曲率半径 r_2 , 以及第二、三透镜之间的间隔 e_2 , 有:

$$\left. \begin{aligned} \nu_1 &= \frac{\varphi_{12}[\varphi_{12}n_1 \bar{l}_{P1}(2z-1) + z(2n_1-1)]}{cn_1[z + \varphi_{12} \bar{l}_{P1}(z-1)]} \\ \varphi_2 &= (\varphi_{12} - \nu_1 c)/z \\ \varphi_1 &= (2z-1)\varphi_2 + \nu_1 c \\ e_1 &= z/\varphi_1 \\ e_2 &= d + l'_{H12} \\ r_2 &= n_1 l_{P1} - d_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,

$$\left\{ \begin{aligned} c &= -(1 - d\varphi_{12})\varphi_3/\nu_3; \\ z &= -l'_{H12}\varphi_{12}; \\ l_{H12} &= e_1\varphi_2/\varphi_{12}; \\ \bar{l}_{P1} &= \frac{[l'_{P3} + d(1 - l'_{P3}\varphi_3)]}{[(1 - l'_{P3}\varphi_3)(1 - d\varphi_{12}) - l'_{P3}\varphi_{12}]}; \\ l_{P1} &= \left[\bar{l}_{P1} + \left(l_{H12} + \frac{d_1}{n_1} \right) \right]. \end{aligned} \right.$$

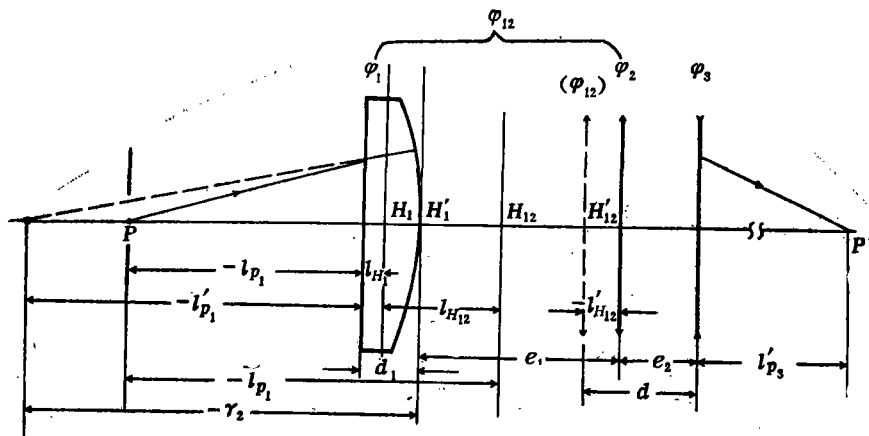


图 4 模拟正透镜分裂

在实际工作中, 一般取 $l'_{P3} = 180 \sim 185 \text{mm}$ 。第一块平凸透镜厚度 d_1 可任意选取, 但 l'_{H12} 需根据 ν_1 的合理性不断加以调整。由于等效二组元系统并未涉及初级场曲的校正, 所以, 第一块透镜玻璃的折射率必须细心选择, 使 S_4 达到尽可能地小。

考虑到对高级象散的平衡, 往往需要预留一定量的 S_4 。再者, 由方程(2)式计算得到合理的 v_1 值有时会遇到麻烦。为此, 这里提供另一种途径, 即从模拟正透镜分裂成两块正透镜后的初级场曲系数出发, 依次利用方程(2)和(1)式, 经移项整理可得:

$$A = \frac{\{\varphi[v_3(1-NV) + 2Nv_{12}] + n_3\overline{S}_4(v_{12} - v_3)\}}{[v_{12}(2N\varphi + n_3\overline{S}_4) + N\varphi v_3(2-V)]}, \quad (3)$$

式中, $\overline{S}_4 = S_4/j^2$; $N = -n_3/n_1$; $V = v_1/v_3$ 。

选定 v_1 , v_{12} , v_3 , n_3 , S_4 和 l'_{P3} , 由方程(3)算得 A 后代入方程(1)和(2), 分别求出 d , φ_{12} , φ_3 和 \overline{l}_{P1} , 并按下式求得 l'_F 和 z , 有:

$$\left. \begin{aligned} l'_F &= (1-A)/\varphi \\ z &= -l'_{H12}\varphi_{12} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

式中, $l'_{H12} = -\frac{n_1\overline{l}_{P1}(v_1c - \varphi_{12})}{\{n_1v_1c(1 + \varphi_{12}\overline{l}_{P1}) - \varphi_{12}[2\varphi_{12}n_1\overline{l}_{P1} + (2n_1 - 1)]\}}$ 。则 $\varphi_1, \varphi_2, e_1,$

e_2 和 r_2 即可按方程(2)确定。

第二块正透镜加入胶合面变成双胶合镜组, 其目的是为了减小光阑球差和消除整个系统的位置色差。双胶合镜组的光焦度可按下式求解, 有:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} &= \frac{v_{21}(c_1v_{22} - \varphi_2)}{(v_{22} - v_{21})} \\ \varphi_{22} &= \varphi_2 - \varphi_{21} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

式中, $c_1 = [(c_1)_2 - \sum c_1]/h_2^2$ 。(c₁)₂和 h_2 分别为第二块透镜的初级位置色差和近轴光线入射高度; $\sum c_1$ 为整个系统初级位置色差的总和。

当选择双胶合镜组的厚度 d_{21} 和 d_{22} 后, 可在保持其光焦度不变的条件得到三个曲率为:

$$\left. \begin{aligned} \rho_4 &= \frac{-\overline{b} + \sqrt{\overline{b}^2 - 4\overline{a}\overline{c}}}{2\overline{a}} \\ \rho_3 &= \frac{\varphi_{21} + (n_{21} - 1)\rho_4}{(n_{21} - 1)[1 - (n_{21} - 1)d_{21}\rho_4/n_{21}]} \\ \rho_5 &= \frac{(n_{22} - 1)\rho_4 - \varphi_{22}}{(n_{22} - 1)[1 - (n_{22} - 1)d_{22}\rho_4/n_{22}]} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

式中,
$$\left\{ \begin{aligned} \overline{a} &= -[d_{21}d_{22}(n_{21} - 1)(n_{22} - 1)(\varphi_{21} + \varphi_{22})/(\varphi_{21}\varphi_{22})]; \\ \overline{b} &= [d_{21}d_{22}(n_{21} - n_{22})\varphi_{21}\varphi_{22} + \varphi_{22}n_{22}d_{21}(n_{21} - 1) - \varphi_{21}n_{21}d_{22}(n_{22} - 1)]/(\varphi_{21}\varphi_{22}) \\ \overline{c} &= (n_{22}d_{21} + n_{21}d_{22}). \end{aligned} \right.$$

第三透镜引进等晕面, 使其第二面与主光线同心。选择厚度 d_3 , 并保持光焦度 φ_3 不

变, 即可按下式求得两个曲率, 有:

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= \frac{-b^* - \sqrt{b^{*2} - 4a^*c^*}}{2a^*} \\ \rho_7 &= 1/l'_{\rho_3} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

式中,

$$\left\{ \begin{aligned} a^* &= -(n_3 - 1)^2 d_3, \\ b^* &= n_3 \varphi_3 (n_3 - 1) (d_3 + l'_{\rho_3}), \\ c^* &= -n_3 \varphi_3 [\varphi_3 l'_{\rho_3} + (n_3 - 1)]. \end{aligned} \right.$$

如图 5 所示, 我们只要附加计算三组元各有关主平面位置, 就可以对系统的结构作出精确安排。

由于在推导双胶合厚透镜三个曲率时, 是保持薄变厚的光焦度不变, 这就必须满足 H'_{21} 与 H_{22} 重合, 使加厚后的间隔为零。所以, 实际上 H_2 与 H_{21} 重合, H'_2 与 H'_{22} 重合, 则由图 5 可得:

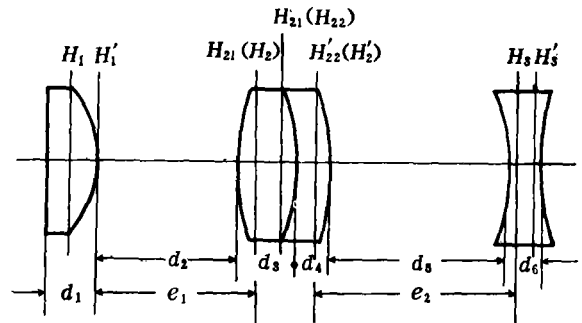


图 5 精确安排结构

$$\left. \begin{aligned} d_2 &= e_1 - l_{H_{21}} \\ d_5 &= e_2 + l'_{H_{22}} - l_{H_3} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

式中,

$$\left\{ \begin{aligned} l_{H_{21}} &= -(n_{21} - 1) d_{21} \rho_4 / n_{21} \varphi_{21}; \\ l'_{H_{22}} &= -(n_{22} - 1) d_{22} \rho_4 / n_{22} \varphi_{22}; \\ l_{H_3} &= -(n_3 - 1) d_3 \rho_7 / n_3 \varphi_3. \end{aligned} \right.$$

3 微机编程设计

如前所述, 等晕代数法的突出优点是便于应用微机编程, 实现初始结构参数和象差平衡设计全过程的循环作业, 其框图如图 6 所示。

在象差平衡阶段, 首先应使轴外细光束象散和场曲获得校正, 则轴上点球差一般就能同时得到消除。象差平衡的基本原则可归结为:

1. 不断调整初级场曲系数 S_4 , 使高级象散得到最佳平衡。但必须注意的是, S_4 过大往往导致出瞳距 l_{p1} 过小, S_4 过小又会在工作距 l_f 过小。当 S_4 需要选定较大值时, 可以通过选取合适的模拟透镜的阿贝常数 v_{12} 加以弥补。在相同 S_4 值的条件下, v_{12} 大 l_{p1} 增大, l_f 减小, 反之亦然。

2. 双胶合镜组的两个厚度, 尤其是负透镜的厚度 d_4 (见图 5), 对子午和弧矢场曲 X'_t, X'_s 非常敏感, 改变 d_3 和 d_4 的值, 在保持光焦度不变条件下改变各面曲率, 使初级象散的分布值发生变化而达到平衡的目的, 它们对工作距 l_f 无影响; 改变最后负透镜的厚度

d_6 , 使 X'_1 和 X'_2 产生不同程度的变化, 同样可以对象散的校正起作用, 但工作距 l'_F 会有所影响。

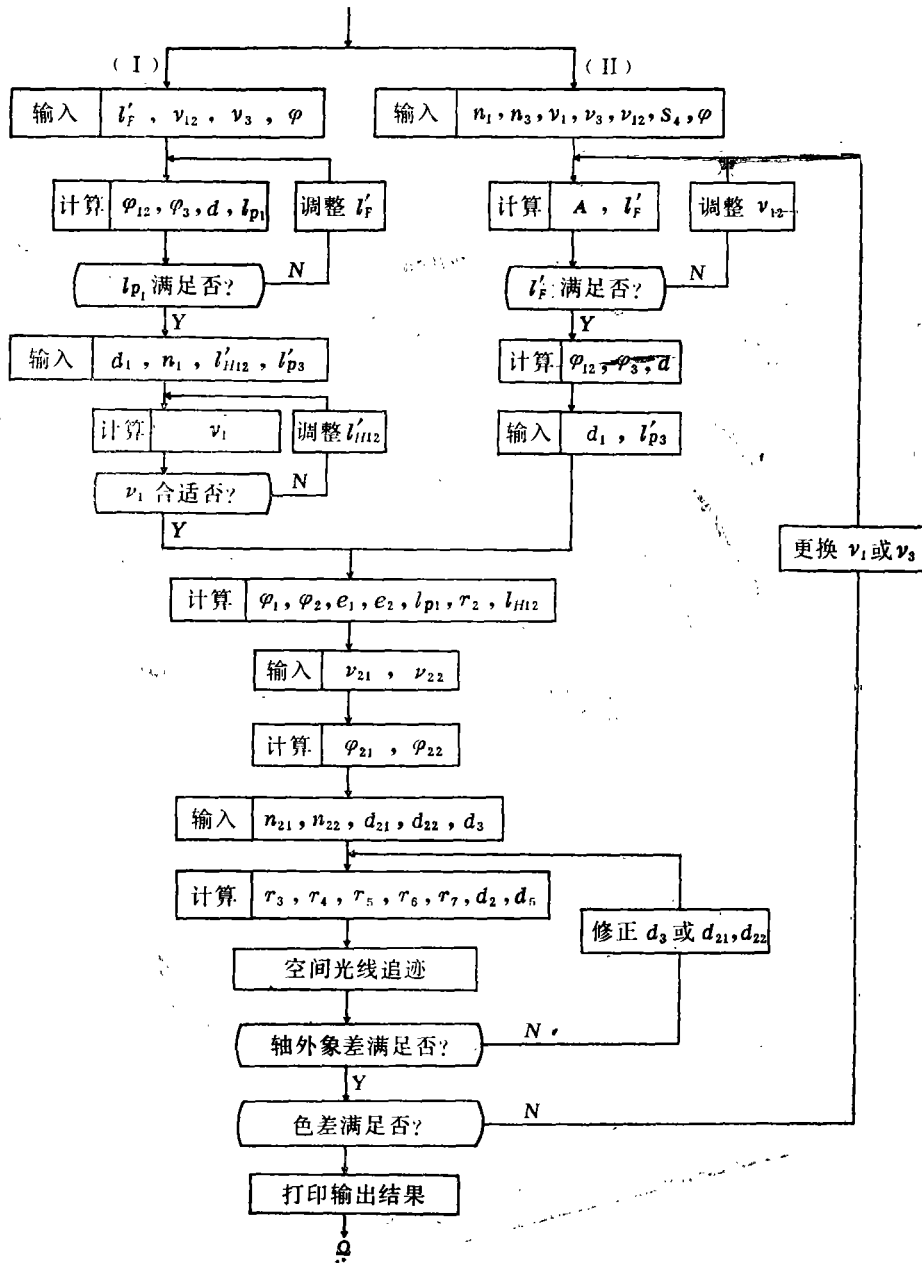


图 6 微机程序设计框图

3. 改变第一块透镜和最后一块负透镜的两个曲率, 对于象散的校正都有一定的作用。但前者使出瞳距 l_{p1} , 后者使工作距 l'_F 和同心条件产生少量的变化。

4. 更换折射率相同, 阿贝常数不等的玻璃, 可以使色差获得校正。

4 数字例子

利用等晕代数法及其编程设计不同途径 (I) 和 (II) (见图 6), 并灵活应用象差平衡的基本原则, 已实际设计出焦距 $f' = 40\text{mm}$, 出瞳直径 $D_{\text{出}} = 5\text{mm}$, 出瞳距 $l_{p1} = 34 \sim 72\text{mm}$ 的三组元长出瞳距目镜系列。限于篇幅, 这里仅摘录两个数字例子的结构参数和象差结果列于表 1 加以说明。

表 1 两个数字例子的结构参数和象差结果

路线	技术性能			结构参数					象差结果		
	l_{p1}	w	l'_f	No.	r	d	n	v	类别	1	0.707
(I)	61.64	-10°	17.08	1	∞	3	1.5688	58	LA'	-0.050	-0.025
				2	-99.711	2.01	1	57.3	$\Delta L'_{Fc}$	-0.020	-0.024
				3	22.362				x'_i	-0.424	-0.509
				4	-26.110	9.6	1.6594	20.36	X'_{ts}	0.0495	-0.234
				5	-45.655	4.4	1.9521	1	$\Delta Y'_{Fc}$	-0.1079	-0.0307
				6	-26.464	6.24	1		DT'	-5.54(%)	-2.99(%)
				7	183.557	3		1.80784	40.74	K'_T	-0.00267
(II)	-72.2	-9°	11.32	1	∞	6	1.4996	62.1	LA'	-0.0615	-0.0306
				2	-114.274	3.56	1	57.3	$\Delta L'_{Fc}$	0.105	0.0101
				3	19.479				x'_i	-1.2873	-1.2844
				4	-25.584	13	1.6594	20.36	X'_{ts}	-0.0027	-1.1675
				5	-47.583	7.09	1.9521	1	$\Delta Y'_{Fc}$	-0.2546	-0.0861
				6	-17.248	6.16	1		DT'	-8.414(%)	-4.284(%)
				7	183.458	2.92		1.806	25.4	K'_T	-0.0349

参 考 文 献

- [1] Ralló P. Investigation of the Correctibility of Oculars with Long Exit Pupil Distance in the Initial Design Phase. Optik 1980, 57(3).

The Algebraic Method of Isoplanat and Its Programming

Design for Ocular with Long Exit Pupil Distance

Lin Yinsen

Abstract

This paper presents the algebraic method of isoplanat used in solution of the initial construction and its aberration design for ocular with long exit pupil distance of treble components. The constructive mode is analysed. Algebraic equations of isoplanat are developed, and the basic principle of aberration compensation by using the microcomputer programming is described. Finally, the constructive parameters and aberration consequences of two numeral examples are given in this paper.

[Key words] treble components; ocular with long exit pupil distance; isoplanat equations; programming design