

含不晕镜系统的约束方程 及其匹配模式

林 银 森

摘 要

本文研究单不晕镜和双胶不晕镜用于测绘与计量光学系统的设计理论和方法。建立含不晕镜远焦和准直物镜的约束方程, 导出不晕镜由薄变厚的曲率修正公式, 并借助光学技术参数的诺谟图解, 阐述不晕镜玻璃选择的基本原则。

作为数字例子, 文中给出几种典型远焦和准直物镜的匹配模式及其象差结果。同时, 论述了不晕镜设计的优越性及其位移对光学性能与成象质量的影响。分析表明, 不晕镜用于远焦和准直物镜的设计, 具有实用性、简便性和经济性等特点。

【关键词】 含不晕镜系统; 设计理论; 方法

一、约 束 方 程

不晕镜是一种自变量少而又能满足齐明成象的极好光学元件, 它已成功地应用于高倍油浸显微物镜^[1, 2]和激光发射系统等。

当不晕镜用于构成远焦和准直物镜时, 不晕负镜必须取第一面同心, 第二面齐明形式; 不晕正镜必须取第一面齐明, 第二面同心形式; 双胶不晕镜又必须取第一面齐明, 第二面同心和第三面齐明形式。而且, 不晕镜玻璃材料的折射率对主镜的焦距 f_1' 产生约束作用。

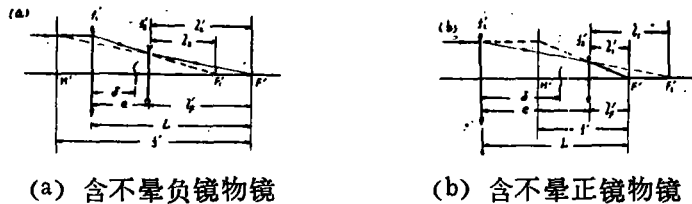


图 1 含不晕镜系统光学结构

由图 1 (a)和(b), 并引进齐明成象的几何式^[2], 可分别写出它们的物象关系式如下:

本文1986年12月收到。

$$\left. \begin{aligned} l_2 &= (f'_1 - e) = (n+1)r_2/n \\ l'_2 &= (L - e) = (n+1)r_2 \end{aligned} \right\} \text{(不晕负镜)} \quad (1a)$$

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= (f'_1 - e) = (n+1)r_1 \\ l'_1 &= (L - e) = (n+1)r_1/n \end{aligned} \right\} \text{(不晕正镜)} \quad (1b)$$

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= (f'_1 - e) = (n_1 + 1)r_1 \\ l'_1 &= (L_1 - e_1) = (n_1 + 1)r_1/n_1 \\ l_2 &= (L_1 - e_1) = (n_2 + 1)r_2/n_2 \\ l'_2 &= (L - e) = (n_2 + 1)r_2 \end{aligned} \right\} \text{(双胶不晕镜)} \quad (1c)$$

(1c) 式中 L_1 , e_1 为主镜和双胶不晕镜的第一正镜组成的分系统筒长和间隔。

根据图 1 (a) 和 (b) 几何关系, 又有

$$(L - e) = (f'_1 - e)f'/f'_1 \quad (2)$$

将 (2) 式分别与 (1a)、(1b) 和 (1c) 式联立, 即可导得满足齐明成象条件的主镜焦距 f'_1 的约束方程:

$$f'_1 = f'/n \quad \text{(不晕负镜)} \quad (3a)$$

$$f'_1 = nf' \quad \text{(不晕正镜)} \quad (3b)$$

$$f'_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)f' \quad \text{(双胶不晕镜)} \quad (3c)$$

从保证物镜总焦距 f' 的要求, 单不晕镜焦距 f'_2 及其与主镜的间隔 e , 分别由下式给定:

$$\left. \begin{aligned} e &= f'_1(f' - L)/(f' - f'_1) \\ f'_2 &= f'(e - f'_1)/(f' - f'_1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在准距测距远焦系统中, 因 f'_1 受齐明条件的约束, 它是违背准距条件的。欲同时满足齐明和准距条件, 可采用调整仪器中心轴的位置加以实现, 有

$$\delta = (2e - L)f'_1/[f'_1 - (2e - L)] \quad (5)$$

双胶不晕镜的优点在于能同时满足齐明和消色差, 其焦距 f'_2 、间隔 e 及仪器中心轴距 δ , 应按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} e &= Z(f' - L)/W \\ f'_2 &= Z[(f' - L) - W]/W^2 \\ \delta &= Z[2Z(f' - L) - LW]/[W(Z + L) - 2Z(f' - L)] \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

取规范化 (令 $f' = 1$) 形式为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{e} &= Z(1 - Q)/W \\ \bar{f}'_2 &= Z[(1 - Q) - W]/W^2 \\ \bar{\delta} &= Z[2Z(1 - Q) - QW]/[W(Z + Q) - 2Z(1 - Q)] \end{aligned} \right\} \quad (6b)$$

式中, Q 为缩短系数 ($Q = L/f'$), $Z = n_1/n_2$, $W = (1 - Z)$ 。

各薄不晕镜的曲率半径由下列方程组求解:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= (f'_1 - e) \\ r_2 &= nr_1/(n+1) \end{aligned} \right\} \text{(不晕负镜)} \quad (7a)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= (f'_1 - e)/(n+1) \\ r_2 &= (n+1)r_1/n \end{aligned} \right\} \text{(不晕正镜)} \quad (7b)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= (f'_1 - e)/(n_1 + 1) \\ r_2 &= (n_1 + 1)r_1/n_1 \\ r_3 &= (L - e)/(n_2 + 1) \end{aligned} \right\} \text{(双胶不晕镜)} \quad (7c)$$

二、曲率修正

为了使单薄不晕镜加厚保持焦距 f'_2 和齐明条件不变, 必须修正二个曲率半径, 其修正公式分别导得如下:

$$\left. \begin{aligned} a_1 r_2^{*2} + b_1 r_2^* + c_1 &= 0 \\ r_2^* &= \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1 c_1}}{2a_1} \\ r_{11}^* &= [(n+1)r_2^*/n] + d \\ a_1 &= (n+1) \\ b_1 &= n(e + d - f'_1) \\ c_1 &= f'_2(n-1)d \end{aligned} \right\} \text{(不晕负镜)} \quad (8a)$$

$$\left. \begin{aligned} a_2 r_2^{*2} + b_2 r_2^* + c_2 &= 0 \\ r_2^* &= \frac{-b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4a_2 c_2}}{2a_2} \\ r_1^* &= n(r_2^* + d)/(n+1) \\ a_2 &= n^2 \\ b_2 &= n[nd - (f'_1 - e)] \\ c_2 &= f'_2(n-1)d \end{aligned} \right\} \text{(不晕正镜)} \quad (8b)$$

对于双胶不晕镜, 则可直接采用非远距双胶薄透镜组向厚透镜变换的近似公式^[1]加以修正, 有

$$\left. \begin{aligned} l'_H &= \frac{(u_1 - n_1 u_2)d_1}{n_1(u_4 - u_1)} + \frac{(u_1 - n_2 u_3)d_2}{n_2(u_4 - u_1)} \\ l_H &= \frac{(u_4 - n_1 u_2)d_1}{n_1(u_4 - u_1)} + \frac{(u_4 - n_2 u_3)d_2}{n_2(u_4 - u_1)} \\ h_1 &= h + l'_H u_1 & r_1^* &= h_1(n_1 - 1)/(n_1 u_2 - u_1) \\ h_2 &= h_1 - d_1 u_2 & r_2^* &= h_2/u_2 \\ h_3 &= h + l'_H u_4 & r_3^* &= h_3(n_2 - 1)/(n_2 u_3 - u_4) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

方程 (9) 中各符号意义如图 2 所示。为了精确保持薄透镜时的 u_1 , u_2 (u_3) 和 u_4 及第

一近轴光线在主平面上的入射高度 h 不变, 可对厚度为 d_1 和 d_2 的三个曲率半径近似值 r_1^* , r_2^* , r_3^* 作光路计算, 并从满足齐明条件出发, 以新的 l_H 按下式确定出 r_1^* , r_2^* , 和 r_3^* 的第二次近似值, 有

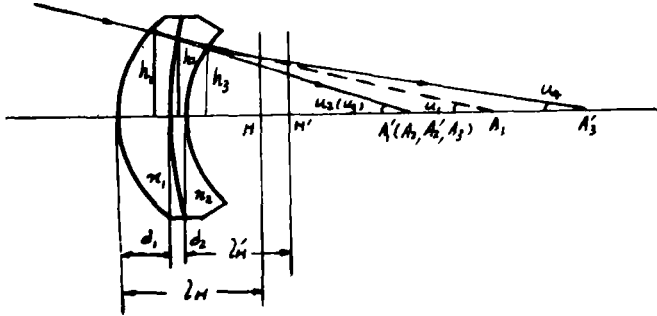


图2 非远距双胶薄变厚的符号标识

$$\left. \begin{aligned} r_1^* &= [(f'_1 - e) + l_H] / (n_1 + 1) \\ r_2^* &= [(n_1 + 1)r_1^* / n_1] - d_1 \\ r_3^* &= n_2(r_2^* - d_2) / (n_2 + 1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

重复上述步骤, 一般只需 3 ~ 5 次的近似迭代, 即可得到任意准确度的值。

三、诺谟图解

玻璃选择对含不晕镜的系统, 尤其准距测距远焦物镜的设计是重要的。诺谟图解则可直观地为设计者提供不同折射率的玻璃与技术参数之间的关系。为方便计, 采用如下规化 (令 $f' = 1$) 形式, 即

$$\left. \begin{aligned} \overline{f'_1} &= 1/n \quad (\text{不晕负镜}) \\ \overline{f'_1} &= n \quad (\text{不晕正镜}) \\ \overline{e} &= \frac{\overline{f'_1}(1-Q)}{(1-\overline{f'_1})} \\ \overline{f'_2} &= \frac{(\overline{e} - \overline{f'_1})}{(1-\overline{f'_1})} \\ \overline{\delta} &= \frac{(z\overline{e} - Q)\overline{f'_1}}{\overline{f'_1} - (2\overline{e} - Q)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以缩短系数 Q 作为横坐标, 纵坐标表示 $\overline{f'_1}$, $\overline{f'_2}$, \overline{e} 和 $\overline{\delta}$ 。玻璃折射率取 $n = 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9$ 。不晕负镜和不晕正镜的诺谟图解分别如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出, 采用不晕负镜的内调焦准距式远焦物镜, $Q = 0.6$ 是 $\overline{\delta}$ 的一个转折点, 折射率 n 处于 1.5 ~ 1.9 范围内的玻璃, 只有当 $0.6 < Q < 0.8$ 时, 才能找到合适的 $\overline{\delta}$ 值。采用不晕正镜, $\overline{\delta}$ 有意

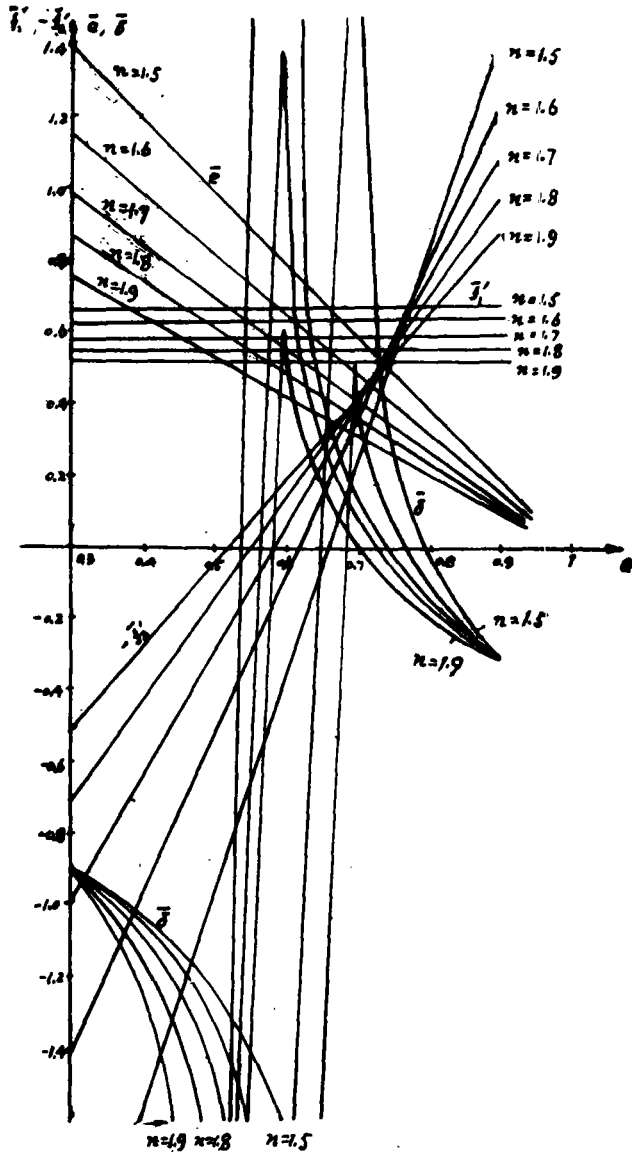


图3 含不晕负镜系统诺谟图解

义的Q值大致在1.25~1.45区间内。

双胶不晕镜的玻璃选择应同时考虑齐明和消色差问题，即合理选择Z值满足齐明，合理选择K值 ($K = \Delta v/v_1$) 满足消色差。在规化条件下，其表示式为

$$K = (1 - Z)/(1 - n_1) \quad (12)$$

实际上，由于玻璃品种的限制，严格满足方程(12)是困难的，需要通过更换玻璃组合逐步逼近。设 $x = (1 - Z)/(1 - n_1)$ ，若要求 $K = x$ ，则可得修正 v_1 (或 v_2) 与修正 n_1 (或 n_2)

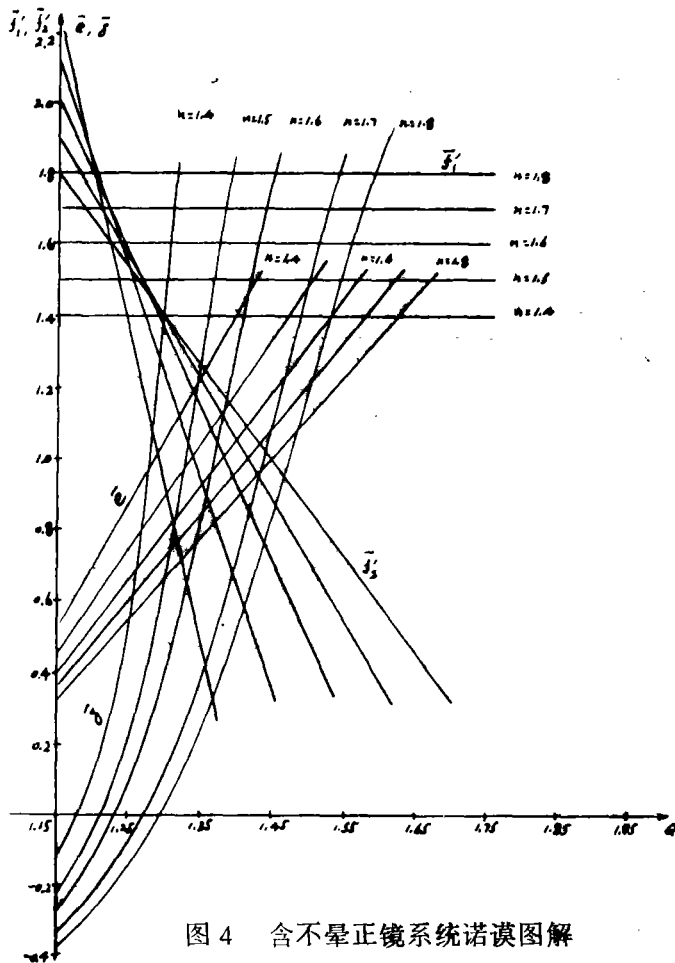


图4 含不晕正镜系统诺谟图解

更换玻璃组合的公式如下：

$$\left. \begin{aligned} \text{或} \quad v_1 &= v_2 / (1 - x) \\ v_2 &= v_1 (1 - x) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{或} \quad n_1 &= n_2 (1 - k) / (1 - n_2 k) \\ n_2 &= n_1 / [1 + k(n_1 - 1)] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

实践表明，同时满足齐明和消色差的玻璃为高折射率、低色散冕牌玻璃与低折射率、高色散火石玻璃的组合。而且，玻璃组合顺序影响双胶不晕镜的焦距正负，双胶不晕负镜必须火石在前，冕牌在后；双胶不晕正镜则相反。

值得一提的是，当双胶不晕负镜用于内调焦准距测距物镜设计时，在满足齐明和消色差及合理的中心轴距 δ 情况下，虽然可以找到合适的玻璃组合，但最短视距受到了限制。下面所给出的匹配模式Ⅳ中，理论上的最短视距应为 2.4m，而实际上只能达到 10m 就是一例。

四、匹配模式

应用上述理论和方法，已设计出几种含正、负单不晕镜和双胶不晕镜的典型远焦与准直

物镜的匹配模式，包括 15" 测角仪准直物镜、内调焦准距望远镜物镜及精密立体测图仪前置系统等。其光学结构，技术性能和象差结果如表 1 所示。

表 1 六种典型含不晕物镜系统的匹配模式及其象差曲线

匹配模式		光学结构	技术性能	象差曲线		
No.	系统名称			$\delta L'$	osc'	opo
I	含不晕负镜的 15" 测角仪准直物镜		$f' = 500 \text{ mm}$ $2W = 1.8^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{10}$ $Q = 0.64$			
II	含不晕负镜的内调焦准距望远镜物镜		$f' = 240 \text{ mm}$ $2W = 1.6^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{6.9}$ $Q = 0.742$ $\delta = -0.589L$			
III	含不晕正镜的内调焦准距望远镜物镜		$f' = 240 \text{ mm}$ $2W = 1.6^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{6.9}$ $Q = 1.277$ $\delta = 0.5L$			
IV	含双胶不晕负镜的内调焦准距望远镜物镜		$f' = 240 \text{ mm}$ $2W = 1.6^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{6.9}$ $Q = 0.949$ $\delta = 0.6L$			
V	含双胶不晕正镜的内调焦准距望远镜物镜		$f' = 240 \text{ mm}$ $2W = 1.6^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{6.9}$ $Q = 1.068$ $\delta = 0.535L$			
VI	含双胶不晕负镜的立体测图仪前置系统		$f' = 400 \text{ mm}$ $2W = 2^\circ$ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{8}$ $Q = 0.9329$			

五、分析結論

不晕镜用于远焦和准直物镜的设计，具有实用性、简便性及经济性等特点。

1、简化光学结构。以某厂生产的 15" 测角仪准直物镜为例，原系统的主镜采用三片式，付镜为双胶合。从表 2 可知，当保持技术参数相同情况下，将主镜改为双分离，付镜采

表 2 付镜采用单不晕镜代替普通双胶合设计的象质比较

象 差	h/h _m	原 设 计	新 设 计
$\delta L'$	1	0.05425	0.0538
	0.707	-0.03327	-0.039
osc'	1	-1.01×10^{-5}	-1.2×10^{-4}
	0.707	-4.12×10^{-4}	-6×10^{-5}
op D	1	-1.046×10^{-4}	1.9×10^{-5}
	0.707	-4.02×10^{-4}	-9.5×10^{-5}

用单不晕负镜后（见模式 I），不仅减少了二块镜片，而且，轴上和近轴三种象差的边光和带光残留量与原设计结果一致，满足了实际使用要求。

2、缩短设计周期。常规的双胶合设计一般总是采用 P, W 法进行的，从玻璃选择，求解初始结构参数到象差平衡，耗时费力。而双胶不晕镜设计采用的是解析法，便于应用微机

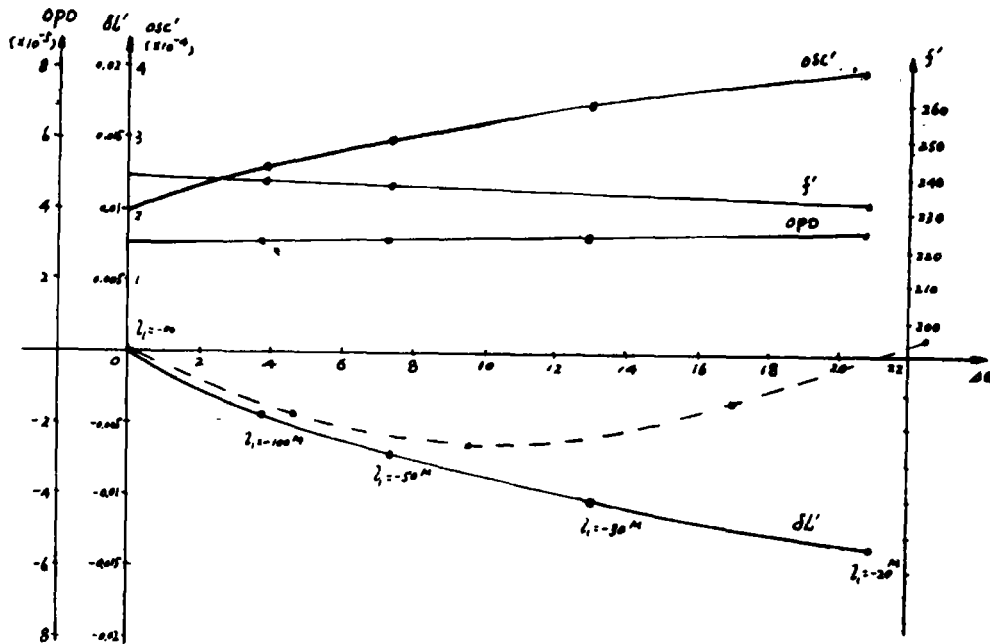


图 5 模式 IV 的象差与焦距随视距变化曲线

编程直接获得消象差的结构参数, 无需经历反复光线追迹进行象差校正的循环作业过程, 因而有效地提高了设计效率。

3、降低调焦锐度。在准距测距远焦物镜中, 调焦镜采用单不晕镜或双胶不晕镜代替普通双胶合, 当同样保证中心轴距 $\delta = 0.57L$ 的前提下, 前者的 Q 值较后者大, 从而使调焦镜的移动范围增大, 调焦锐度降低。此外, 双胶不晕镜随视距不同移动调焦时, 系统的象差变化并未使象质受到超容限的损害 (见图 5)。图中虚线所示为模式 II 中单不晕负镜球差随其物距的变化曲线。可以看出, 即使物距改变 9.6mm, 球差仅仅增大 0.0064mm。这就表明, 不晕镜的轴向安置误差要求并不是严格的。

参 考 文 献

- [1] А.И.杜德罗夫斯基, 光学仪器理论, 第二卷, 科学出版社, 1963.
- [2] 张以谟, 应用光学 (上册), 机械工业出版社, 1982.

The Restraint Equation Containing the Aplanat System and Its Matched Mode

Lin Yinsen

Abstract

This paper investigates the design theories and methods in applying the single and dual cement aplanats in the optical system used in surveying and metrology. The restraint equation for afocal and collimating objective lenses containing aplanat are established. The formulas are derived for curvature correction when thin aplanats grow into thick ones. With the help of optical technical parameter nomography, a basic principle for the selection of aplanat glass is described.

As a numeral example, this paper gives several matched modes and aberration results of classic afocal and collimating objective lenses. The advantages of the aplanat design and the effects of shifting on optical performances and imaging quality are also commented on. Analysis has demonstrated that with regard to afocal and collimating design, the aplanat has many features such as adaptability, convenience and economy, etc.

[Key words] containing aplanat system; design theory; method