

# 反射棱镜制造误差的分析与计算

连铜淑

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 有误差的反射棱镜经展开后已不再呈现为一块平行玻璃板, 取代它的是一块楔玻璃板。如何求得楔玻璃板的光学平行差(一个综合性的参量)无疑是一项头等重要的任务。为此, 本文提出了求解此种棱镜的反射部像空间的总量像偏转  $\Delta\mu'$  的一个普遍适用的公式。参量  $\Delta\mu'$  与光学平行差具有同等重要的意义, 同时利用这一参量再经一些简单运算, 便可得到所需的光学平行差, 即一个具有二自由度的矢量  $\Delta N$  或  $P_{\Delta N}$ 。上述方法表明, 基于刚体运动学理论的反射棱镜调整原理同样也可用于反射棱镜制造误差的分析与计算。本方法还彻底揭示了存在于这两个主要参量  $P_{\Delta N}$  和  $\Delta\mu'$  之间的紧密关系, 有利于该课题的进一步研究。本文明确指出, 玻璃板楔形角的作用将会造成一直线物在成像中的像弯曲缺陷而非像倾斜。文章还提出了一些新概念和新观点。

**关键词** 反射棱镜; 制造误差; 光学平行差; 棱镜的棱差; 棱镜角偏差; 调整; 像偏转; 光轴偏; 像倾斜

**中图分类号** O439, TH74

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)09-0068-05

## Analysis and Calculation of Manufacturing Errors for Reflecting Prisms

LIAN Tongshu

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** The result of unfolding a real reflecting prism with angle and "pyramid" errors can no longer be a plane-parallel glass block, and the substitute will be a wedge-shaped plate. How to find the wedge parameter or optical parallelism of this glass block is a matter of primary importance. For this purpose, a novel generalized formula to determine the total image rotation  $\Delta\mu'$  in the image space of the reflecting part of the real prism has been established for the first time. First of all, the total image rotation itself is equally a crucial characteristic of a real reflecting prism with the above-mentioned errors, and furthermore by using  $\Delta\mu'$  the wedge parameter, namely, a vector of two degrees of freedom  $\Delta N$  (or  $P_{\Delta N}$ ) can easily be solved through only a few steps of simple calculation. This approach shows that the problem regarding the manufacturing errors of a reflecting prism can be settled in the same way as we have done in solving the issue relevant to the adjustment of reflecting prisms relying on the theory of kinematics of a rigid body. In the meanwhile the close relation between the two main parameters  $P_{\Delta N}$  and  $\Delta\mu'$  has been thoroughly exposed that would be advantageous to the further study of this topic. The paper also clearly states that the wedge effect will lead to a curved image for a linear object, instead of to produce an image lean. Besides, some new ideas and viewpoints have been presented.

**Keywords** reflecting prism; manufacturing errors; prism angle error; pyramid error; optical parallelism; adjustment; image rotation; optical axis deviation; image lean

### 0 引言

反射棱镜制造误差有多方面的内容, 本文仅限于反射棱镜诸反射面与折射面的方位误差的范围。

为简单起见, 以下只讨论平行光路的问题。因此, 只须注意反射棱镜各工作平面的方向误差, 而不必考虑它们的位置误差。

有误差的反射棱镜经展开后已不再呈现为一块平行玻

璃板, 取代它的是一块楔玻璃板, 它在平行光路中的影响只相当于一个楔镜的作用。所以, 一块实际的反射棱镜在展开后等效于一个有误差的平面镜系统和一块楔镜串联而成的复合系统。

本文的任务有三:

- 1) 求有误差的平面镜系统所造成的光轴偏和像倾斜;
- 2) 求楔镜的参量——光学平行差;

收稿日期: 2010-04-18

作者简介: 连铜淑, 教授, 研究方向为反射棱镜, 电子信箱: lts3006083680@sina.com

3) 求楔镜所造成的光轴偏和像弯曲。

以上工作将为反射棱镜的精度分析与公差计算奠定必要的基础。

## 1 光学平行差

### 1.1 光学平行差的定义

将棱镜出射面的法线(规定向内)看作沿逆光路方向的入射光线,经各反射面逐次反射后,光线在到达棱镜入射面之前对入射面法线(规定向外)的方向偏差,称为反射棱镜的光学平行差,即棱镜展开到其反射部物空间中的平行玻璃板的平行差。

换一种方式,若将棱镜入射面的法线(规定向外)视为棱镜反射部的物矢量,那么其像矢量对出射面法线(规定向内)的偏差,称为反射棱镜的光学平行差,即棱镜展开到其反射部像空间中的平行玻璃板的平行差。

二者无本质差别,本文采用后者。

### 1.2 光学平行差的表达方式

光学平行差是一个二自度的平面矢量,其表达方式有二:

$$\Delta N = N_2 - N_1 \quad (1)$$

或

$$P_{\Delta N} = N_2 \times N_1 \quad (2)$$

式中,  $N_1$  为楔玻璃板入射面的法线单位矢量,  $N_2$  为楔玻璃板出射面的法线单位矢量。二者的方向均迎向光线入射的方向,或者说,  $N_1$  向外,  $N_2$  朝内。

光学平行差一方面由棱镜各工作面的方向误差所致,另一方面又决定了棱镜成像质量;同时,光学平行差在检验中容易测量,在加工中也可能控制。因此,光学平行差是反射棱镜的一个非常重要的、综合性的技术参量。给定公差,对光学平行差加以限制,可约束其他许多与此参量相关的原始误差。

## 2 基本公式

### 1) 像偏转 $\Delta\mu'$

由反射部诸反射面和屋脊的偏转误差( $\gamma_i$ )所造成的反射部像空间的像偏转  $\Delta\mu'$  为

$$\Delta\mu' = \sum_{i=1}^{m-1} S_{m-1} S_{m-2} \cdots S_{i+1} J_{\mu P_i}(\gamma_i) \quad (3)$$

$$J_{\mu P_i} = E - S_i$$

式中,  $(m-1)$  为反射棱镜的成像单元总数,屋脊和单反射面一样,都计数为一个成像单元,所以“ $o$ ”和“ $m$ ”分别为入射面和出射面的相关参量的下标,例如理想入射面法线单位矢量  $N_o$  和理想出射面法线单位矢量  $N_m$ ;  $S_i$  为第  $i$  个成像单元的误差传递矩阵(特征矩阵),这里被传递的误差必须是按照偏转法的方式所表达的误差,如  $\gamma_i, \gamma_{i\alpha}, \gamma_{i\beta}$  以及  $\Delta\theta P$  等;  $E$  为单位矩阵。

例如,当  $m=3$  时

$$\Delta\mu' = S_2(E - S_1)(\gamma_1) + (E - S_2)(\gamma_2) \quad (4)$$

### 2) 光学平行差 $\Delta N$ 与 $P_{\Delta N}$

设  $N'_o, N'_m$  和  $N'_\alpha, N'_{m\alpha}$  分别为展开后的玻璃板的入射面和出射面法线的理想方向和实际方向,  $\Delta N'_o$  和  $\Delta N'_m$  为相应法线的方向误差,则

$$\Delta N = N'_{m\alpha} - N'_{\alpha} = (N'_m + \Delta N'_m) - (N'_o + \Delta N'_o) \quad (5)$$

由于

$$N'_m = N'_o$$

则

$$\Delta N = \Delta N'_m - \Delta N'_o \quad (6)$$

又由文[6]中的已知公式,有

$$\Delta N'_o = [S_{T,2\varphi}(\gamma_o) + \Delta\mu'] \times N'_o$$

$$\Delta N'_m = \gamma'_m \times N'_m = \gamma'_m \times N'_o$$

将此二式代入式(6),最后得

$$\Delta N = [\gamma'_m - S_{T,2\varphi}(\gamma_o) - \Delta\mu'] \times N'_o \quad (7)$$

由式(1)和式(2),有

$$P_{\Delta N} = (N_1 + \Delta N) \times N_1 = \Delta N \times N_1$$

或

$$P_{\Delta N} = \Delta N \times N \quad (8)$$

式中,  $N$  为  $N_1$  或  $N_2$  的标准值。

将式(7)代入式(8),并用  $N'_o$  取代  $N$ ,得

$$P_{\Delta N} = \{[\gamma'_m - S_{T,2\varphi}(\gamma_o) - \Delta\mu'] \times N'_o\} \times N'_o \quad (9)$$

### 3) 由楔镜造成的平行光束的偏转 $\Delta A''$

图1为一块与楔玻璃板相对应的楔镜,它反映了一定的光学平行差。设  $A$  为楔镜的入射平行光束的方向,  $A''$  为对应的出射平行光束。则

$$A'' = A + \Delta A'' \quad (10)$$

将微分求误差法应用于折射矢量公式<sup>[6]</sup>,可逐步求得

$$\Delta A'' = \eta_i P_{\Delta N} \times A \quad (11)$$

式中

$$\eta_i = \frac{n \cos i' - \cos i}{\cos i} \quad (12)$$

或

$$\eta_i = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \tan^2 i} - 1 \quad (13)$$

或

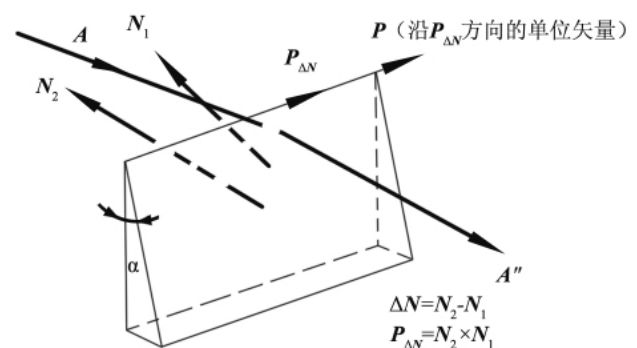


图1 楔镜及其参量

Fig. 1 Wedge with its parameters

$$\eta_i = \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 i}} - 1 \quad (14)$$

这里,  $i$  和  $i'$  分别为入射光线在楔玻璃板(或楔镜)的入射面处的入射角和折射角,  $n$  为玻璃折射率。

公式(11)的结构完全符合所要求的型式。其中的  $\eta_i P_{\Delta N}$  呈现为一个按右螺旋规则沿转轴方向表示的矢量。

### 3 计算实例——屋脊五棱镜

图2为一块标有角偏差  $\gamma_{1\alpha}$  和棱差  $\gamma_{1\beta}$  的屋脊五棱镜。

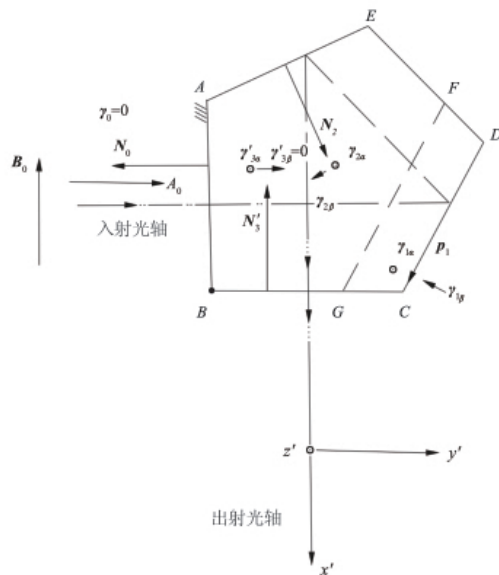


图2 标有角偏差和棱差的屋脊五棱镜

Fig. 2 Roof Pentaprism with angle and pyramid errors

#### 1) 基准及计读坐标系

AB——基准面

B——基准棱

$x'y'z'$ ——标定在基准面和基准棱上的计读坐标系

#### 2) 已知原始数据

$$N_o = -j'$$

$$P_1 = \cos 22.5^\circ i' - \cos 67.5^\circ j'$$

$$= 0.924i' - 0.383j'$$

$$N_2 = \cos 22.5^\circ i' + \cos 67.5^\circ j'$$

$$= 0.924i' + 0.383j'$$

$$N_3 = -i'$$

$$\gamma_o = 0$$

$$\gamma_1 = \gamma_{1\alpha} + \gamma_{1\beta}$$

$$= -\gamma_{1\beta} \cos 67.5^\circ i' - \gamma_{1\beta} \cos 22.5^\circ j' + \gamma_{1\alpha} k'$$

$$= -0.383\gamma_{1\beta} i' - 0.924\gamma_{1\beta} j' + \gamma_{1\alpha} k'$$

$$\gamma_2 = \gamma_{2\alpha} + \gamma_{2\beta}$$

$$= \gamma_{2\beta} \cos 67.5^\circ i' - \gamma_{2\beta} \cos 22.5^\circ j' + \gamma_{2\alpha} k'$$

$$= 0.383\gamma_{2\beta} i' - 0.924\gamma_{2\beta} j' + \gamma_{2\alpha} k'$$

$$\gamma'_3 = \gamma'_{3\alpha}$$

$$= \gamma'_{3\alpha} k'$$

$$S_1 = S_{P_1, 180^\circ} = \begin{pmatrix} 0.707 & -0.707 & 0 \\ -0.707 & -0.707 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$S_2 = S_{N_2, 180^\circ} = \begin{pmatrix} 0.707 & 0.707 & 0 \\ 0.707 & -0.707 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$S_{T, 90^\circ} = S_2 S_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$J_{\mu P, 1} = E - S_1$$

$$S_2 J_{\mu P, 1} = S_2 (E - S_1) = S_2 - S_2 S_1 = \begin{pmatrix} 0.707 & 1.707 & 0 \\ -0.293 & -0.707 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

$$J_{\mu P, 2} = E - S_2 = \begin{pmatrix} 0.293 & -0.707 & 0 \\ -0.707 & 1.707 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

#### 3) 求反射部像空间的像偏转 $\Delta\mu'$

$\Delta\mu'$  由反射部各反射面的方向误差  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  所致。本例  $m=3$ 。将有关数据代入式(4), 得

$$\Delta\mu' = \begin{pmatrix} -1.848\gamma_{1\beta} + 0.766\gamma_{2\beta} \\ 0.766\gamma_{1\beta} - 1.848\gamma_{2\beta} \\ -2\gamma_{1\alpha} + 2\gamma_{2\alpha} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中  $\Delta\mu'_x$  为像倾斜, 而  $\Delta\mu'_y$  和  $\Delta\mu'_z$  分别代表  $y'$  光轴偏和  $z'$  光轴偏。

#### 4) 求光学平行差 $\Delta N$ 和 $P_{\Delta N}$

据式(7)和式(9), 并考虑到  $\gamma_o=0$  和  $m=3$ , 有

$$\Delta N = (\gamma'_{3\alpha} - \Delta\mu'_x) \times N'_o \quad (16)$$

$$P_{\Delta N} = [(\gamma'_{3\alpha} - \Delta\mu'_x) \times N'_o] \times N'_o \quad (17)$$

将已求得的  $\Delta\mu'$  代入式(16)和式(17), 并考虑到  $N'_o = -i'$  及  $\gamma'_3 = \gamma'_{3\alpha} k'$ , 得

$$\Delta N = \begin{pmatrix} 0 \\ -\gamma'_{3\alpha} - 2\gamma_{1\alpha} + 2\gamma_{2\alpha} \\ -0.766\gamma_{1\beta} + 1.848\gamma_{2\beta} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$P_{\Delta N} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.766\gamma_{1\beta} - 1.848\gamma_{2\beta} \\ -\gamma'_{3\alpha} - 2\gamma_{1\alpha} + 2\gamma_{2\alpha} \end{pmatrix} \quad (19)$$

式(19)中的第3个矩元可以归并为角度误差

$$\begin{aligned} -\gamma'_{3\alpha}-2\gamma_{1\alpha}+2\gamma_{2\alpha} &= -3\gamma'_{3\alpha}+(2\gamma'_{3\alpha}-2\gamma_{1\alpha})+2\gamma_{2\alpha} \\ &= 3\Delta 90^{\circ}+2\Delta_C 112.5^{\circ}+2\Delta_E 112.5^{\circ} \end{aligned}$$

5) 求楔镜所造成的光轴偏和像弯曲

重写式(11)和式(13):

$$\begin{aligned} \Delta A'' &= \eta_i P_{\Delta N} \times A \\ \eta_i &= \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \tan^2 i} - 1 \end{aligned}$$

① 求光轴偏

式(11)的物理意义和数学结构表明,当入射角  $i=0$  时,  $\eta_i P_{\Delta N}$  项代表由楔镜所致的光轴偏。

此光轴偏应与反射部像空间的光轴偏  $\Delta \mu'_y$  和  $\Delta \mu'_z$  叠加在一起。

② 求像弯曲

图3为一屋脊五棱镜被展开到其反射部像空间的情况。

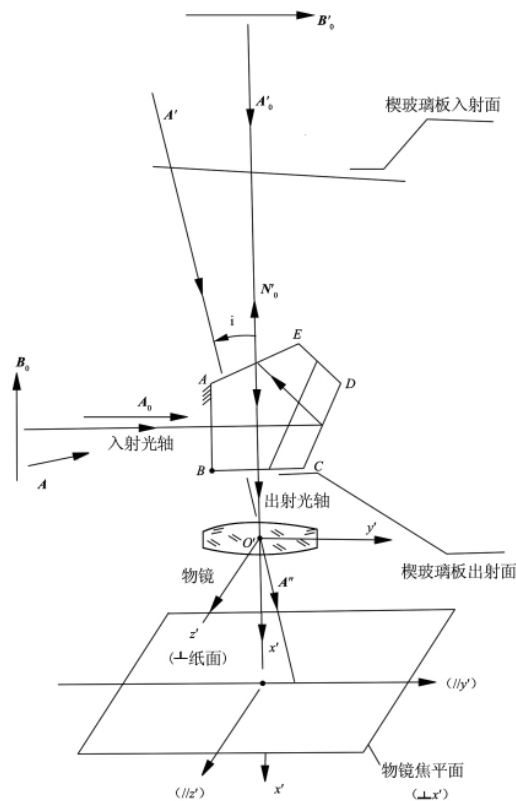


图3 屋脊五棱镜展开到反射部像空间的情况

Fig. 3 Ray path after unfolding a roof pentaprism into the image space of its reflecting part

对楔玻璃板来说,  $B'_0$  是在远处位于棱镜主截面内垂直于光轴的一直线物。  $A'$  代表来自  $B'_0$  一束平行光的方向, 而  $A''$  则代表它穿过楔玻璃板后的平行光束的方向。

据式(10)、式(11), 并用  $A'$  取代  $A$ , 有

$$A'' = A' + \eta_i P_{\Delta N} \times A' \quad (20)$$

以下求  $A''$  在物镜后焦面上的成像点的位置  $(y', z')$ 。

将棱镜坐标  $x'y'z'$  的原点  $O'$  置于物镜的中心, 通过坐标

原点  $O'$  且平行于  $A''$  的直线方程为

$$\frac{x'-0}{A''_{x'}} = \frac{y'-0}{A''_{y'}} = \frac{z'-0}{A''_{z'}} \quad (21)$$

设物镜焦距  $f'=1$ , 则焦平面的方程为

$$x'=1 \quad (22)$$

将式(22)代入式(21), 得

$$y' = \frac{A''_{y'}}{A''_{x'}}; \quad z' = \frac{A''_{z'}}{A''_{x'}} \quad (23)$$

通常, 望远镜的物方视场在  $10^{\circ}$  以内, 即  $|i| \leq 5^{\circ}$ , 此时  $A''_{x'} \approx 1$ , 则

$$y' = A''_{y'}; \quad z' = A''_{z'} \quad (24)$$

已知

$$A' = \begin{pmatrix} 1 \\ \sin i \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix}$$

代入式(20)得

$$A'' = \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix} + \eta_i \begin{pmatrix} 0 \\ -\gamma'_{3\alpha} - 2\gamma_{1\alpha} + 2\gamma_{2\alpha} \\ -0.766\gamma_{1\beta} + 1.848\gamma_{2\beta} \end{pmatrix}$$

则

$$\begin{aligned} y' &= i + \eta_i (-\gamma'_{3\alpha} - 2\gamma_{1\alpha} + 2\gamma_{2\alpha}) \\ z' &= \eta_i (-0.766\gamma_{1\beta} + 1.848\gamma_{2\beta}) \end{aligned} \quad (25)$$

选择来自直线物  $B'_0$  (即  $B_0$ ) 的 11 束平行光束:  $i=5^{\circ}, 4^{\circ}, 3^{\circ}, 2^{\circ}, 1^{\circ}, 0^{\circ}, -1^{\circ}, -2^{\circ}, -3^{\circ}, -4^{\circ}, -5^{\circ}$ , 并设  $\gamma_{1\alpha}=\gamma_{2\alpha}=\gamma'_{3\alpha}=\gamma_{1\beta}=\gamma_{2\beta}=3'$ , 由相关公式求得的数据列于表 1。图 4 以夸大的方式表达了像弯曲的现象。

表 1 计算结果

Table 1 Result of calculation

| $i$          | $\eta_i$ | $y'$                 | $z'$    |
|--------------|----------|----------------------|---------|
| $5^{\circ}$  | 0.50319  | $5^{\circ}-1.5096'$  | 1.6336' |
| $4^{\circ}$  | 0.50204  | $4^{\circ}-1.5061'$  | 1.6296' |
| $3^{\circ}$  | 0.50114  | $3^{\circ}-1.5034'$  | 1.6267' |
| $2^{\circ}$  | 0.50051  | $2^{\circ}-1.5015'$  | 1.6247' |
| $1^{\circ}$  | 0.50013  | $1^{\circ}-1.5004'$  | 1.6234' |
| $0^{\circ}$  | 0.50000  | $0^{\circ}-1.5000'$  | 1.6250' |
| $-1^{\circ}$ | 0.50013  | $-1^{\circ}-1.5004'$ | 1.6234' |
| $-2^{\circ}$ | 0.50051  | $-2^{\circ}-1.5015'$ | 1.6247' |
| $-3^{\circ}$ | 0.50114  | $-3^{\circ}-1.5034'$ | 1.6267' |
| $-4^{\circ}$ | 0.50204  | $-4^{\circ}-1.5061'$ | 1.6296' |
| $-5^{\circ}$ | 0.50319  | $-5^{\circ}-1.5096'$ | 1.6336' |

像弯曲应与反射部所造成的像倾斜  $\Delta \mu'_y$  叠加在一起。

算例并非对棱镜的精度分析, 也不是公差计算, 所以没有考虑该棱镜是单件生产还是批量生产以及与之相关的对原始误差处理的极限法或是概率法等问题。该棱镜被看作是一块已经加工完毕的产品。

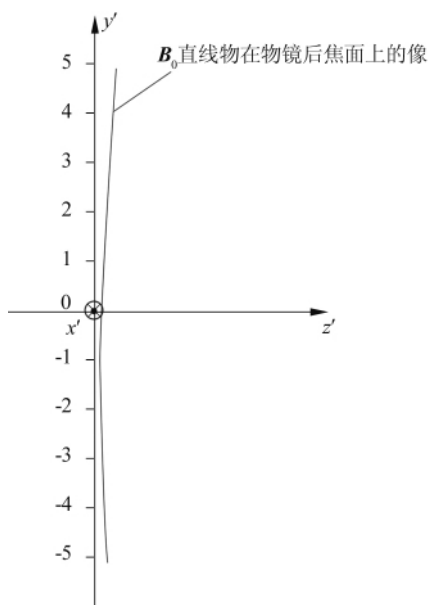


图4 直线物的弯曲像

Fig. 4 Curved image for a linear object

不过,计算的结果至少能够明确地指出,究竟一块楔玻璃板(楔镜)是会造成像倾斜,还是像弯曲。同时,还揭示了光学平行差  $P_{\Delta V}$  同它所带来的像弯曲的大小及弯曲的方向之间的联系。

#### 4 结论

1) 将基于刚体运动学的反射棱镜调整的原理应用于反射棱镜制造误差的分析与计算上,使得原来似乎在性质上有较大差异的两种不同课题被归入到一个统一的体系里,而这个体系就是刚体运动学的学派体系。

2) 构建了求解由棱镜各反射面与屋脊的原始误差在反射棱镜反射部像空间中所造成的像偏转总量  $\Delta\mu'$  的一个综合的公式。该公式承袭了用刚体运动学解决棱镜微量转动问题时所具有的全部优点。

3) 赋予  $S_{T2\varphi}$  以“误差传递矩阵”的新意。

4) 光学平行差对一直线物在成像中的影响是造成像弯曲,而不是像倾斜。

#### 参考文献 (References)

- [1] 麦伟麟. 反射棱镜的光学平行差[J]. 五机部标准化通讯, 1965(2).  
Mai Weilin. Newsletter of Standardization, 5th Ministry of Machine Building, 1965(2).
- [2] 唐家范. 四元数在光学仪器中的应用[J]. 云光技术, 1975(4): 40-47.  
Tang Jiafan. Yunguang Jishu, 1975(4): 40-47.
- [3] 何绍宇, 郑长英. 棱镜位移和微量旋转引起的光路变化 [C]//光学设计文集. 第一机械工业部情报所, 1973.  
He Shaoyu, Zheng Changying. The change of raypath caused by linear and angular displacements of reflecting prisms [C]//Proceedings on Optical Design. 1st Ministry of Machine Building, Institute of Information, 1973.

- [4] 荆工, 史尔. 应用光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.  
Jing Gong, Shi Er. Applied optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1973.
- [5] 连铜淑. 棱镜调整 (光轴偏和像倾斜计算)[M]. 北京: 北京理工大学, 1974.  
Lian Tongshu. Adjustment of reflecting prisms (Calculation of optical axis deviation and image lean)[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1974.
- [6] 连铜淑. 棱镜调整[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978: 14-20.  
Lian Tongshu. Adjustment of reflecting prisms [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978: 14-20.
- [7] 连铜淑. 棱镜调整(原理和图表)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.  
Lian Tongshu. Adjustment of reflecting prisms (Principle and tabulation) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979.
- [8] 迟泽英, 徐金镛. 应用光学[M]. 南京: 华东工学院, 1984.  
Chi Zeying, Xu Jinyong. Applied optics [M]. Nanjing: East-China Engineering Institute, 1984.
- [9] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 30-34, 100-111.  
Lian Tongshu. Theory of conjugation for reflecting prisms [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 30-34, 100-111.
- [10] 汤自义, 须耀辉, 王志坚. 反射棱镜[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.  
Tang Ziyi, Xu Yaohui, Wang Zhijian. Reflecting prism [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1981.
- [11] 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 131-168.  
Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied optics and elements of optical design[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 131-168.
- [12] 毛文伟. 棱镜调整的矩阵分析[J]. 云光技术, 1981(5).  
Mao Wenwei. Yunguang Jishu, 1981(5).
- [13] Hopkins R E. Mirror and prism systems [M]//Applied Optics and Optical Engineering, Vol. 3, New York: Academic Press, 1965: 270-276.
- [14] Rudolf Kingslake. Optical system design [M]. New York: Academic Press, 1983: 159-160.
- [15] Lian Tongshu. Theory of conjugation for reflecting prisms: Adjustment and image stabilization of optical instruments [M]. A Pergamon - CNPIEC Joint Venture, International Academic Publishers, 1991: 105-115.
- [16] Pogarev G B. Adjustment of optical instruments[M]. Leningrad: Machine Building Publishing House, 1982: 128-130.

(责任编辑 代丽)

#### 欢迎向“学术聚焦”栏目推荐会议文集

《科技导报》“学术聚焦”栏目旨在围绕当前某一与科技相关的热点问题展开讨论,客观、简洁、集中地发表原创性科技成果或专家的创新言论。每期将从科学会议、学术沙龙的众多科研报告中精选 10 篇左右,从中提炼成一篇 4500 字左右的综述性文章,以反映研究者的重要研究成果和主要学术观点。欢迎科技会议、学术沙龙、学术论坛组织者及时提供会议论文集、主要报告材料。栏目责任编辑:陈广仁;投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。