

光电自准直经纬仪光学系统设计与公差分析

王国名¹, 劳达宝¹, 周维虎^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光电自准直经纬仪是一种集成了光电自准直仪和经纬仪双重功能的精密测量系统,其光路由目视内调焦望远系统和光电自准直系统两部分组成。首先提出共光路光学系统的设计原理与方法,优化设计成像清晰的内调焦望远系统和分辨率较高的自准直光学系统。然后对影响成像质量最大的多胶合棱镜进行公差分析和设计,给出既满足成像要求又兼具经济性的加工公差值。最后对设计的光学系统进行精度测试。测试结果表明,所设计的光学系统在 $\pm 20''$ 视场范围内自准直精度达到 $0.6''$,可以满足设计要求。

关键词 光学设计; 自准直经纬仪; 内调焦系统; 光路计算; 优化设计

中图分类号 TN16 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.102203

Optical System Design and Tolerance Analysis of Photoelectric Self-Collimation Theodolite

Wang Guoming¹, Lao Dabao¹, Zhou Weihu^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The photoelectric self-collimation theodolite is a kind of precision measurement system that integrates dual functions of the photoelectric autocollimator and the theodolite. The optical path of the photoelectric self-collimation theodolite consists of two parts that include the visual inner-focusing telescope system and the photoelectric self-collimation system. Firstly, the design principles and methods of the common optical path optical system are proposed. The inner-focusing telescope system with good imaging ability and the self-collimation optical system with high resolution are optimally designed. Then, the tolerance analysis and design of the multi-glue prism that influences the image quality most are carried out. And the processing tolerance value which satisfies the imaging requirement and economy is given. At last, the precision of the designed optical system is tested. The experimental results show that the self-collimation accuracy of the designed optical system is $0.6''$ within the field of view of $\pm 20''$, which can meet the design requirements.

Key words optical design; self-collimation theodolite; internal focusing system; optical path calculation; optimization design

OCIS codes 220.2740; 220.3620; 220.4830

1 引言

随着我国国防事业的大力发展,国防大型系统的组装、航天载荷系统的装调检测等任务显得更加繁重和复杂,由此提出了能够适应复杂使用环境、便携性强、精度达标、自动化程度高的仪器使用要求。传统的电子经纬仪、自准直仪等仪器已经不能满足高效高质完成组合参数测量和复杂检测任务指标的要求。因此,研究一种能够集成多种测量仪器功能,并能够具有自动数据采集和处理功能的仪器来代替传统测量仪器的需求十分迫切。

收稿日期: 2016-12-12; **收到修改稿日期:** 2017-01-20

作者简介: 王国名(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机系统设计与仿真等方面的研究。

E-mail: wangguoming@aoe.ac.cn

基于上述亟待解决的实际生产问题,本文提出了一种新型自准直经纬仪,其具有高精度准直定位、精密角度测量等特点^[1-2]。该经纬仪集成了传统电子经纬仪和光电自准直仪的双重功能,既能作为空间方位测量的基本工具,同时具备失准角测量功能,实现方便、结构简单,具有较高的测量精度。同时,该经纬仪又可以在精密仪器的安装、调试和检测过程中发挥巨大作用,可应用于大尺寸的形状和位置测量、机床和机器人几何误差的精确标定以及大型工装的安装定位等领域。该经纬仪光路主要由两部分组成^[1],一是光电自准直光路,二是内调焦望远光路。光电自准直光路用于精密角度自动测量和精密定位;内调焦望远光路,既是目视自准直光路,又是经纬仪系统瞄准光路,用于跟踪、瞄准和空间姿态测量。自准直光路的测量分辨率主要与焦距有关,即焦距越长分辨率越高。同时,光学系统机械筒长受实际二维正交转台尺寸结构所限制,因此兼顾短筒长和长焦距的优势是新型自准直经纬仪光学系统设计需要解决的关键问题。另外,为实现光路紧凑,光路中具有多个胶合透镜,如何平衡分配加工误差是设计中的另一个关键问题。

2 共光路光学系统设计

2.1 目视望远光学系统设计

望远系统采用内调焦式光学系统^[3],要求光学系统设计为 28 倍高倍率望远系统,实现 0.5 m 到无穷远的清晰成像。调焦采用负透镜,其和前面的固定组一起组成望远物镜系统,在保证较长焦距的同时,能够最大程度地缩短光学筒长。内调焦光学系统的原理如图 1 所示^[2]。

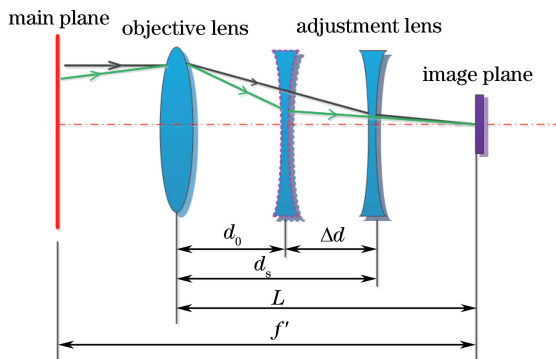


图 1 内调焦原理

Fig. 1 Principle of internal focusing

内调焦望远物镜初始结构设计^[3-4]受物镜总焦距 f' 、光学筒长 L 和仪器转轴位置 ΔL 的限制,求解固定组焦距 f'_1 、调焦组焦距 f'_2 和调焦无穷远时正负透镜间距 d_0 的表达式为:

$$\frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - d_0} = f', \quad (1)$$

$$d_0 + f' \left(1 - \frac{d_0}{f'_1} \right) = L, \quad (2)$$

$$L - 2d_0 + \frac{\Delta L \cdot f'_1}{\Delta L + f'_1} = 0, \quad (3)$$

(1)式为组合焦距公式,(2)式为光学总筒长公式,(3)式为经纬仪设计的准距公式,可以由此求得 f'_1 、 f'_2 和 d_0 三个参数。然后再根据望远物镜的最短视距(0.5 m)可求得最近视距调焦镜间距 d_s ,也就是:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \quad (4)$$

$$l'_1 = \frac{l_1 f'_1}{l'_1 + f'_1}, \quad (5)$$

$$l_2 = l'_1 - d_0, \quad (6)$$

$$l'_2 = \frac{l_2 f'_2}{l_2 + f'_2} = \frac{(l'_1 - d) f'_2}{l'_1 - d + f'_2}, \quad (7)$$

$$d_0 = L - l'_2, \quad (8)$$

$$d_s = \frac{1}{2} [(l'_1 + L) - \sqrt{(l'_1 - L)(l'_1 - L + 4l'_2)}], \quad (9)$$

由此可求得最终初始结构参数为:光学筒长 $L = 150$ mm, 入瞳 $D_1 = 45$ mm, 当缩短系数 $Q = 0.6$ 时, $\Delta L = 85$ mm, $f' = 250$ mm, $d_0 = 100.31$ mm, $f_1 = 125.2$ mm, $f_2 = -49.84$ mm, $d_s = 116.6$ mm, $\Delta d = d_s - d_0 = 16.3$ mm。

目镜是望远物镜和人眼之间的中继镜组,有焦距短、视场大、相对孔径小的特点,目镜的入瞳和出瞳远离透镜组。根据 28 倍的放大倍率,有:

$$\Gamma = \frac{D_1}{D_2} = \frac{f'}{f'_e} = 28, \quad (10)$$

则目镜焦距 $f'_e = 8.09$ mm, 出瞳直径 $D_2 = 1.6$ mm, 总光学筒长 14 mm, 根据光瞳衔接原则,物镜在焦面的像高 h 最大为 2.77 mm, 则视场角为:

$$\omega = \frac{h}{f'_e} = \frac{2.77}{8.09} = 18.9^\circ. \quad (11)$$

镜目距为:

$$l'/f' = 6/8.09. \quad (12)$$

对称式目镜初始结构具有中等视场角,场曲、畸变也较小,是中等视场目镜中像质较好的系统。而且,其出瞳距较大,有利于缩小整个仪器的体积和重量。

光学系统的优化原则要求各部分分系统独自校正像差,这样更加有利于系统整体像差平衡,装调相对简易。由于目镜视场大、焦距短等原因,残留像差一般较大。为了尽可能提高整个系统的成像质量,要考虑物镜和目镜的残留像差进行部分补偿,特别是目镜的残留场曲、像散和倍率色差较大,可以用物镜来进行部分补偿。望远系统的整体优化,满足光瞳衔接原则,可以减少系统的渐晕,能够保证系统能量。图 2 所示为望远系统的整体优化图和最终优化得到的调制传递函数(MTF)。无穷远成像时,在 60 lp 的 MTF 值为 0.5; 500 mm 成像时,在 60 lp 的 MTF 值优于 0.4,整个系统的成像质量较好。系统入瞳直径为 45 mm,总光学筒长 162 mm,视场角为 1.4° 。

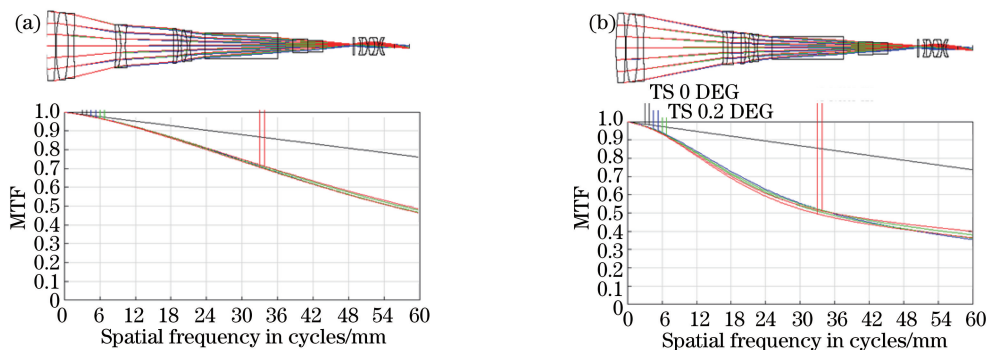


图 2 望远系统光路设计。(a) 无穷远处成像;(b) 500 mm 处成像

Fig. 2 Optical path design of telescope system. (a) Imaging at infinity; (b) imaging at 500 mm

2.2 光电自准直光学系统设计

如图 3 所示为自准直光路原理,当反射镜有 θ 角度的转动时,反射光路就会有 2θ 的角度倾斜,并且自准直像在像面上产生 Δx 的位移,则知^[5-6]:

$$\Delta x = f \cdot \tan 2\theta. \quad (13)$$

自准直仪的测量分辨率由相邻像素间距 d (mm)、成像系统焦距 f' (mm) 以及接收器件亚像素细分分数 N 决定^[7],即为:

$$\vartheta = \frac{k \cdot d}{2 \cdot N \cdot f'}, \quad (14)$$

由于设计要求自准直综合精度要达到 $1''$,故自准直分辨率至少要达到 $0.1''$,欲使接收系统分辨率增大,需要

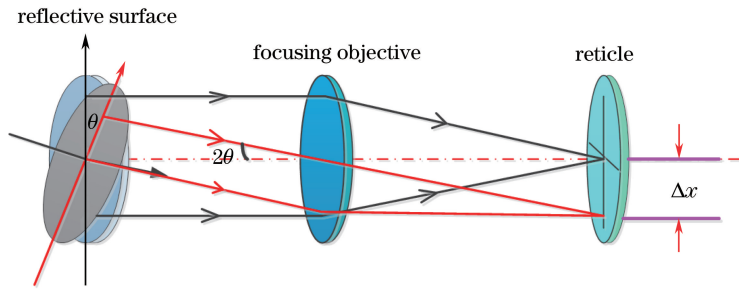


图3 自准直光路原理

Fig. 3 Principle of self-collimation optical path

将自准直光路的焦距加长。由于自准直光路与望远系统共用部分光路,受望远系统的筒长限制,内调焦物镜焦距不能满足自准直光路的焦距要求,所以在电荷耦合器件(CCD)成像接收光路中添加透镜组以增加光路焦距^[4-8],光路的总焦距为:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 - d \cdot \Phi_1 \Phi_2, \quad (15)$$

式中 Φ_0 为调整后接收光路的总光焦度, Φ_1 为共光路部分的光焦度, Φ_2 为后增加透镜组的光焦度, d 为两透镜组的主面间距。其中,令系统总焦距 $f'_0 = 400$ mm,则总的光焦度为:

$$\Phi_0 = 1/f'_0 = \frac{1}{400} = 0.0025 \text{ mm}^{-1}, \quad (16)$$

物镜共光路部分的焦距 $f'_1 = 196$ mm,则光焦度为:

$$\Phi_1 = 1/f'_1 = \frac{1}{196} = 0.0051 \text{ mm}^{-1}. \quad (17)$$

设定 $d = 200$ mm,则由(8)式可知, $\Phi_2 = 0.125$,则 $f'_2 = 8$ mm。再经过优化设计,最后获得系统成像效果如图4所示,可以看出60 lp时MTF值大于0.2,说明系统成像效果能够满足仪器测量的使用要求。

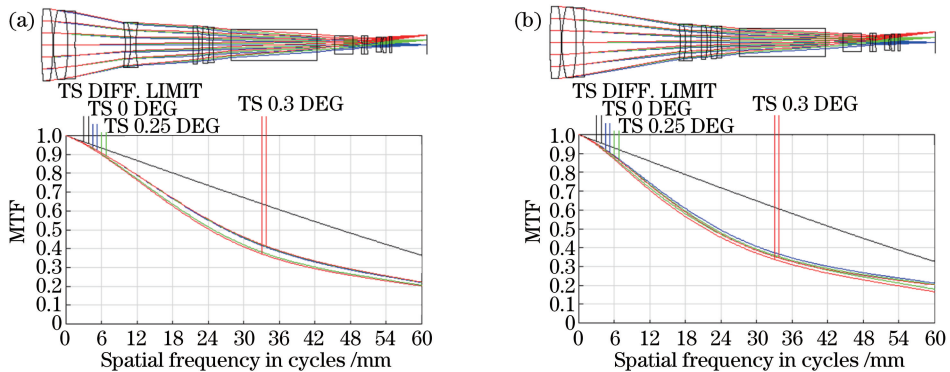


图4 自准直光路设计。(a)无穷远处成像;(b)500 mm处成像

Fig. 4 Optical path design of self-collimation. (a) Imaging at infinity; (b) imaging at 500 mm

最终,设计完成的光学系统如图5所示,设计形成一套较为合理的多光路共轴、多系统集成成的光学系统,实现了所要求的功能和指标。

3 共光路多胶合棱镜公差设计分析

光学系统的另一个设计难点是如何合理分配多胶合棱镜组的加工公差。光路设计中使用多个棱镜胶合的组合棱镜,其中普罗棱镜为3个直角棱镜胶合,分光棱镜则为4个直角棱镜的胶合。单个棱镜的加工公差必须进行严谨的设计,才能做到加工难度和设计标准的相互契合。棱镜的角度误差本质上是使入射光轴与出射光轴产生偏折。一般将使光轴发生偏折的棱镜角度误差分为出射平面与入射平面关系的第一平行误差 θ_{\parallel} ,以及由于棱差导致的第二平行误差 θ_{\perp} 。将出射光轴的偏折量分为两个正交分量进行分析。其中,由第一平行误差引起的偏折量为 δ_{\parallel} ,由第二平行度误差引起的偏折量为 δ_{\perp} ^[9],则:

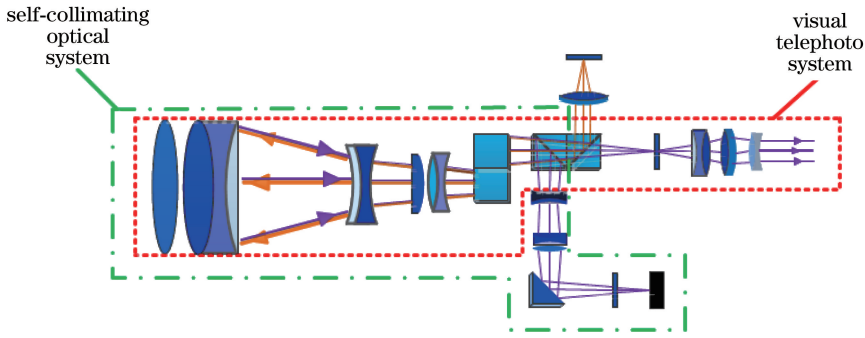


图5 光电自准直经纬仪总体图

Fig. 5 Photoelectric auto-collimation theodolite optical system

$$\delta_I = n\theta_I + \Delta\omega_I, \quad (18)$$

$$\delta_{II} = n\theta_{II} + \Delta\omega_{II}, \quad (19)$$

式中 $\Delta\omega_I$ 为出射面法线在光轴截面内的偏折角; $\Delta\omega_{II}$ 为出射面法线在光轴截面垂直面的偏折角, n 为折射率。反射棱镜的设计公差就是基于以上棱镜平行度误差引起的光轴偏折量分析给出的。

在望远系统中, 当棱镜位于分划板和物镜之间时, 棱镜加工误差与光轴偏折关系为:

$$\begin{cases} n\theta_I + \Delta\omega_I = \frac{\delta'_I \cdot f'_m}{\Gamma} \\ n\theta_{II} + \Delta\omega_{II} = \frac{\delta'_{II} \cdot f'_m}{\Gamma} \end{cases} \quad (20)$$

式中 f'_m 为目镜焦距, Γ 为系统放大倍率。此外, 反射棱镜的加工角度误差除了与光轴偏折有关, 还与系统的色差有关。

反射棱镜的色散表达式为:

$$\delta'_{CF} = (n_F - n_C) \cdot \theta, \quad (21)$$

式中 n_F 为 F 光谱下的折射率, n_C 为 C 光下的折射率。棱镜加工误差引起的色差为:

$$\theta = \frac{\delta'_{CF} \cdot f'_m}{l(n_F - n_C)}. \quad (22)$$

设系统允许的总光轴偏移量为 δ'_z , 令由第一平行度和第二平行度引起的总偏移量相等, 即 $\delta'_{Iz} = \delta'_{IIz}$, 则:

$$\delta'_{Iz} = \delta'_{IIz} = \frac{\delta'_z}{\sqrt{2}}, \quad (23)$$

$$\begin{cases} \delta'_I = \frac{\delta'_{Iz}}{\sqrt{K}} \\ \delta'_{II} = \frac{\delta'_{IIz}}{\sqrt{K}} \end{cases}. \quad (24)$$

根据以上关于棱镜加工误差与光轴偏折和色差关系的分析, 可以定量计算棱镜设计所需的公差范围。根据图 1 所示光路, 能够产生色差的光学元件有调焦物镜、正像棱镜、分光棱镜和目镜, 则元件系数 $K = 4$, 设定色散角度小于 $0.5'$, 则各部分的色差允许值为:

$$\delta''_{CF} = \frac{\delta'_{CF}}{\sqrt{4}} = \frac{0.5}{2} = 0.25. \quad (25)$$

正像棱镜和分光棱镜位于物镜与分划板之间, 则根据(22)式, 其中物镜焦距为 8.09 mm, 正像棱镜到分光镜间距 $l_1 = 10$ mm, 分光镜到分划板距离 $l_2 = 20$ mm, $n_F - n_C = 806 \times 10^{-5}$, 代入(22)式, 则正像镜色差 θ_{ZX} 和分光镜色差 θ_{FG} 为:

$$\begin{cases} \theta_{ZX} = 4' \\ \theta_{FG} = 8' \end{cases}, \quad (26)$$

使正像棱镜和分光棱镜中第一平行度 θ_{IZX} 、 θ_{IFG} 和第二平行度 θ_{IIZX} 、 θ_{IIFG} 分别相等,则有:

$$\begin{cases} \theta_{\text{IZX}} = \theta_{\text{IIZX}} = \frac{\theta_{\text{ZX}}}{\sqrt{2}} = 2.828' \\ \theta_{\text{IFG}} = \theta_{\text{IIFG}} = \frac{\theta_{\text{FG}}}{\sqrt{2}} = 5.657' \end{cases} \quad (27)$$

由于正像镜由 3 个直角棱镜组合而成,分光棱镜由 4 个直角棱镜组合而成,则可得:

$$\begin{cases} \theta_z = \frac{\theta_{\text{IZX}}}{\sqrt{6}} = \frac{\theta_{\text{IIZX}}}{\sqrt{6}} = 1.15' \\ \theta_f = \frac{\theta_{\text{IFG}}}{\sqrt{8}} = \frac{\theta_{\text{IIFG}}}{\sqrt{8}} = 2.378' \end{cases} \quad (28)$$

综上所述分析,正像棱镜 θ_z 和分光棱镜 θ_f 单个小直角棱镜给定的公差为:

$$\begin{cases} \theta_{\text{Iz}} = \theta_{\text{IIZ}} = 1' \\ \theta_{\text{If}} = \theta_{\text{IIF}} = 2' \end{cases} \quad (29)$$

通过以上计算分析可知,三胶合的正像镜和四胶合的分光镜满足成像要求的加工误差分别为 $1'$ 和 $2'$ 时,则设计较为合理。

4 光学系统自准直精度测试与结果分析

将设计加工的光学系统进行系统精度测试,测试装置如图 6 所示,其由标准自准直仪、多面棱体、待检自准直镜头和精密回转台组成^[10]。

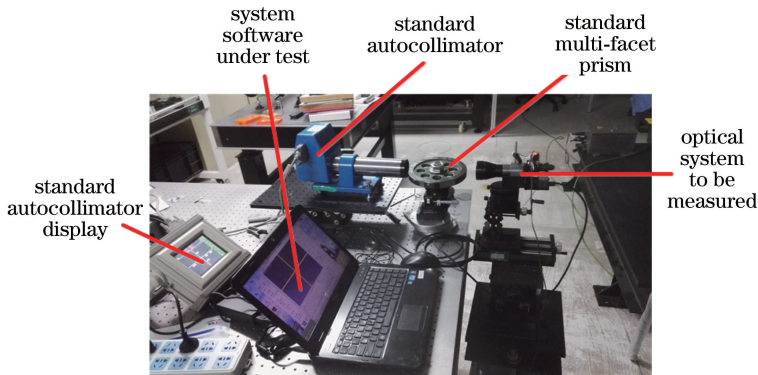


图 6 自准直仪系统精度测试

Fig. 6 Accuracy test of autocollimator system

检测时,标准多面棱体固定在精密回转台上。标准自准直仪精度为 $0.1''$,示值分辨率为 $0.01''$,36 面棱体工作角不确定度为 $0.2''$,待检系统要求精度达到 $1''$ 。具体的测试步骤如下:

1) 待检系统的零位标定。待检光电自准直系统的零位定标是保证光电自准直经纬仪测量值可信度的重要步骤。首先以标准自准直仪作为定标基准,调节多面棱体,使标准自准直仪的示数为 0。然后固定多面棱体,调整待检自准直仪系统,使待检自准直仪系统的目视分划板处投影十字丝像与目视分划板十字丝重合,此时 CCD 处接收十字丝的位置定位初始零点。转动多面棱体至下一个临近面,使标准自准直仪示数为零时,待检系统的读取示数为 a_2 。以此类推,获得正向 36 个面的零位示数,再以同样方法逆向读取 36 面零位示数,取其均值作为最终绝对零位。

2) 自准直系统精度测试。将标准自准直仪初始值记为 s_0 ,被检系统初始值记为 a_0 ,旋转回转台,使自准直获得一个读数 s_1 ,被测系统获得读数 a_1 。以此类推,自准直仪获得读数 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$,相对应的被测系统获得读数 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$,再进行反方向逐次测量,然后计算结果为:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_n &= a_n - a_0 (n = 1, 2, 3, \dots), \\ \Delta\beta_n &= s_n - s_0 (n = 1, 2, 3, \dots), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\Delta R_n = \Delta \alpha_n - \Delta \beta_n (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (31)$$

式中 R_n 为受检点示值误差。

自准直精度测试结果如表 1 所示。其中 Z 组为顺时针方向测试数据, N 组为逆时针方向测试数据, ΔY_1 、 Δy_1 分别为顺时针测量时, 被检系统和标准仪器 y 方向相邻测试数值的差值; ΔY_2 、 Δy_2 分别为逆时针测量时, 被检系统和标准仪器 y 方向相邻测试数值的差值。由 Y 轴的误差测试结果可以看出, 最大误差为 $0.597''$, 在 $\pm 20''$ 范围内的自准直误差小于 $0.6''$, 可以满足设计使用要求。

表 1 自准直精度测试结果

Table 1 Results of self-collimation precision test

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z	ΔY_1	3.810	7.080	9.640	15.810	18.820	1.730	4.150	6.590	13.660	18.050
	Δy_1	3.504	6.835	9.488	15.285	18.847	1.225	4.399	6.553	13.467	17.828
	ΔR	0.306	0.245	0.152	0.525	-0.027	0.505	-0.249	0.037	0.193	0.222
N	ΔY_2	1.520	6.530	9.900	11.750	18.650	2.920	7.500	11.700	15.010	17.940
	Δy_2	1.230	6.069	9.329	11.722	18.376	2.323	6.997	11.268	14.453	17.697
	ΔR	0.290	0.461	0.571	0.028	0.274	0.597	0.503	0.432	0.557	0.243

5 结 论

光电自准直经纬仪光学系统的设计主要有两个难点, 一是望远系统和自准直系统共光路却不共焦距, 这是因为自准直光路为了提高分辨率而需要特殊加长焦距。为此, 本设计通过增加附加透镜组, 在提高焦距的同时不影响光学筒长, 具有光路短、精度高的特点。二是如何明确给出光路中多胶合棱镜组的公差分析和分配方法。从理论上严格推出合理的多胶合棱镜加工公差值, 并通过更高精度的标准自准直仪和多面棱体的组合方式对所设计的光学系统进行自准直精度测试。测试结果表明所设计系统的精度可以达到设计预期要求。

参 考 文 献

- [1] Gao Limin, Luo Changzhou, Chen Liangyi. Development of photoelectric autollimation theodolite[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(5): 622-624.
高立民, 罗长洲, 陈良益. 一种新型光电准直经纬仪[J]. 光子学报, 2003, 32(5): 622-624.
- [2] Liu kai. The key technique research on new-type self-collimation theodolite[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
刘凯. 新型光电自准直经纬仪关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] Gao Zhishan. Design of a compact objective with inner-focusing for a total sation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 28(5): 502-506.
高志山. 紧凑型内调焦全站仪物镜设计[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(5): 502-506.
- [4] Wang Peifang, Xiang Yang, Gao Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922007.
王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922007.
- [5] Zhang Junjie. The study on improving resolution and indicating stability of photoelectric autocollimator[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
张俊杰. 提高光电自准直仪分辨率和示值稳定性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] Golubovskii Y M, Pivovarova L N. Broad-range autocollimator with a linear CCD photodetector[J]. Journal of Optical Technology, 1995, 62(4): 261.
- [7] Gan Junhong. Research on autocollimator measurement system of area-array CCD[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
甘俊红. 面阵 CCD 自准直测量系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [8] Zhang Junjie, Li Zhengyang, Ye Shenghua. Using optical zoom to improve the resolution of photoelectric collimator

- [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2011, 24(1): 50-52.
- 张俊杰, 李政阳, 叶声华. 采用光学放大提高光电自准直仪的分辨力[J]. 传感技术学报, 2011, 24(1): 50-52.
- [9] Wang Zhijian, Wang Peng, Liu Quan. The dynamic optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- 王志坚, 王鹏, 刘泉. 动态光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [10] Bai Jianming. Research of collimation measurement accuracy for large-field photoelectric autocollimator [J]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- 白建明. 大视场光电自准直仪准直测量精度研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.