

doi: 10.3788/gzxb20164511.1112002

伽利略望远镜与柱面镜组合式长焦综合测量系统

刘爱敏^{1,2}, 高立民¹, 肖茂森¹, 陆卫国¹, 王海霞¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 为了实现定距离、较大视场范围某低速点的快速方位角及高程测量要求, 采用点型光源、伽利略望远镜与柱面镜组合式长焦光学系统及双正交线阵 CCD, 搭建了一种复合柱面镜长焦光学测量系统。该组合式长焦光学系统无一次成像面, 系统光学长度短, 系统前组为伽利略型望远镜型式, 接近无焦。在一定测量范围内, 选择合适的前组角放大倍率和前组口径等参量, 使得在不同位置的点所成线像均与双阵 CCD 正交。有针对性地优化光学系统设计、选择合适的系统评价函数并对系统装调及测量原理进行准确度分析。结果表明, 该系统在测量距离为 10 m, 视场范围 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 内时, 方位角测量误差在 $\pm 2.5''$ 以内, 且系统长度较短, 公差较宽松。该系统解决了光源合作目标尺寸严格受限的问题, 探测器尺寸较大且成本较低。

关键词: 方位角及高程测量; 柱面镜; 复合长焦光学系统; 光学设计

中图分类号: O439; TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1112002-6

Integrated Measurement System with Galileo Telescope Combined with Cylindrical Lens

LIU Ai-min^{1,2}, GAO Li-min¹, XIAO Mao-sen¹, LU Wei-guo¹, WANG Hai-xia¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To achieve azimuth and height measurement of a slowly moving point in a certain distance and wide field of view, a combined long-focal-length cylindrical lens measurement system was built. A point shape reticle, a long-focal-length optical system formed by a Galileo telescope combined with cylindrical lens and two orthogonal linear array CCD were utilized. There isn't a real middle image plane in the combined long-focal-length optical system with a relatively short optical length. The front part of the system is a Galileo telescope, and its focal power is approximate to 0. Within a measurement range, some parameters, such as the value of the angular magnification and diameter of the front part, should be properly selected, making the linear image from different field orthogonal to the two linear CCD. Through targeted lens system design optimization, proper selection of merit function, and tolerance analysis of the alignment and measurement principle, the accuracy of azimuth measurement of this system is less than $\pm 2.5''$, within field of view of $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, at the measurement distance of 10 m, additionally with relatively small system length, and relatively loose tolerance. The proposed system can solve the problem of the limited size of light source cooperation target, making a low cost and large size photo-electronic detector.

Key words: Azimuth and height measurement; Cylindrical lens; Composite long-focal-length optical system; Optical design

OCIS Codes: 120.3930; 120.4570; 080.3620; 110.6770; 110.3000

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11404387)资助

第一作者: 刘爱敏(1984-), 女, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为光学系统设计及多孔径成像技术。Email: liuaimin1232003@163.com

导 师: 高立民(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电精密测角技术及激光参数诊断等技术。Email: glm@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-04-08; 录用日期: 2016-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着定位定向技术的发展,基准传递技术也在不断发展.已知某点通过已知轴相对于北向的方位信息时,需要采用非接触测量手段测得另一一定距离目标相对于已知轴的方位角,可通过在已知方位点放置光学测量系统,在定距离处放置合适的光源合作目标,通过成像方法完成二维位置测量^[1-2].当光源合作目标在一定平面范围内低速运动时,定距离内的二维位置测量转换为一维方位角测量和高程测量,再结合作目标在平面的旋转角的感知,即可获得合作目标相对于已知轴的方位角和高程.

线阵 CCD 广泛应用于高精度大范围位置测量中,与面阵 CCD 相比,其优点是可以设置较多的一维像元数,且价格较为低廉,而总像元数较面阵 CCD 相机少,像元尺寸比较灵活,每秒的帧幅率高,特别适用于一维动态目标的位置测量^[1-3].

为实现二维位置测量,线阵 CCD 可与点光源合作目标及柱面镜相结合使用.当系统焦距较长且系统光学长度受到限制时,线阵 CCD 的一维像元足够完成对应维的测量.在完成高精度的二维位置测量时,可选择球面与柱面镜组合结构型式.一些已经报道的光学系统^[4-6]先采用球面镜系统对光点进行一次成像,存在一次中间成像面,然后再采用柱面系统进行二次成像,但是这种结构的光学长度较长^[6].

为尽量缩短系统光学长度,并满足准确度及速度的要求,结合现有的望远光学系统^[7],提出了一种伽利略望远镜与柱面镜组合式长焦光学系统,该系统无一次成像面,系统光学长度短.系统前组为伽利略型望远镜型式,接近无焦,采用球面镜组;后组采用柱面镜组,焦距较短.通过前组的放大,可使系统的焦距较长、非球面数量较少且可靠性高,无运动部件.通过合理选择前组角放大倍率及口径值等参量,可确保在不同位置点光源所成线像均与双线阵 CCD 正交,既能够完成特定距离,整个范围内某点相对于某轴线的方位角和高程测量,同时满足数据量小、探测速率较快且成本较低的要求.

1 测量原理

采用长焦柱面系统及双线阵 CCD,对点型光源合作目标进行成像,进而得到与光源合作目标固连的某点 P 方位角,系统的测量原理如图 1.

图 1 中,照明系统照亮光源模块的点型目标图案,图案通过柱面光学成像镜组变换为线型图像成像到线阵 CCD 上.线阵 CCD 像面垂直于柱面镜母线放置.通过放置两组正交的镜组及线阵 CCD 组件完成二维独立位置测量.

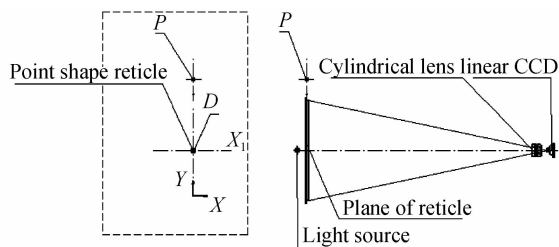


图 1 测量原理

Fig. 1 Principle of measurement

假设点 D 在移动物方 X 、 Y 方向移动的距离分别为 d_x 、 d_y (单位: mm),目标参考位置对应的 CCD 像元值分别为 p_{x0} 、 p_{y0} ,目标相对于参考位置运动距离 d_x 、 d_y 后,其位置对应的 CCD 像元值分别为 p_{x1} 、 p_{y1} ,线阵 CCD 信号质心所对应的 CCD 像元之间的距离位置为 $p_{x1} - p_{x0}$ 、 $p_{y1} - p_{y0}$,可以计算出 X 、 Y 方向上的物象放大比例 S_x 、 S_y ,即

$$\begin{cases} S_x = \frac{d_x}{p_{x1} - p_{x0}} \\ S_y = \frac{d_y}{p_{y1} - p_{y0}} \end{cases} \quad (1)$$

根据物象放大比例系数,可以计算得到点型光源中心相对光学接收镜头光轴 X 、 Y 方向的坐标,即

$$\begin{cases} x = (p_x - p_{x0}) \frac{d_x}{p_{x1} - p_{x0}} \\ y = (p_y - p_{y0}) \frac{d_y}{p_{y1} - p_{y0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, p_x 、 p_y 分别为目标移动某距离后对应的像元值.

假设在竖直面内,点 P 位于点光源 D 正上方 l 处,当光源不存在平面内的旋转时, P 点在 X 方向上的坐标为

$$\begin{cases} P_x = x \\ P_y = y + l \end{cases} \quad (3)$$

当光源存在平面内的旋转角 θ 时,可由倾角仪测得

$$\begin{cases} P_x = x + l \sin \theta \\ P_y = y + l \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

假定基准轴为光轴,已知物点距离光心的距离为 Z ,则某点 P 相对于光轴的方位角和高程为

$$\begin{cases} H_{sp} = \arctan \left(\frac{P_x}{Z} \right) \\ P_y = y + l \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

假设光源合作目标与测量镜头光心的距离约为 10 m,要求测量系统在 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 视场范围内完成方位角测量,对应于物方的运动范围为 $\pm 261.9 \text{ mm} \times \pm 261.9 \text{ mm}$,要在这么大范围内完成高精度测量,需结合该系统结构型式本身的特殊性,对系统相关参量进行合理控制,以保证点型光源所成的线像始终与双线阵 CCD 相交,完成整个范围内点 P 相对于某轴线的方位角和高程测量.

2 系统设计结果

2.1 点型光源合作目标

按照一般成像原则,点型光源合作目标在像方的直径 d_p 至少应为 3 个像元大小,单个像元大小 d 为 $7 \mu\text{m}$,光学系统焦距 f 为 -300 mm ,工作距离 x 为 -10 m ,则横向放大倍率计算公式为

$$\beta = \frac{d_p}{d} = -\frac{f}{x} \quad (6)$$

$d_p = -3d = -21 \mu\text{m}$,则点型目标直径 $d_p \geq 0.7 \text{ mm}$,取 $d_p = 2 \text{ mm}$.此外,对应于点型光源结构,单个像元对应的 X 、 Y 方向的分辨率 Δx 、 Δy 均为 $\pm 0.23 \text{ mm}$.

2.2 设计分析

为充分保证整个测量范围内合作目标点所成的线像均与双线阵 CCD 正交,假设前组角放大倍率为 γ ($\gamma \geq 1$),口径为 D_q ,后组柱面镜系统焦距为 f_z ,则整个系统焦距变为 $f' = \gamma f_z$,点光源也被变换为长度为 $L = D_q/\gamma$ 的一条线像.在一定测量范围内,通过合理选择 γ 、 f_z 及 D_q ,合理布局光学系统,控制在不同位置点光源所成线像均与双线阵 CCD 正交且共轭成像.光学系统设计原理如图 2.该系统由单个共用物镜前组(类伽利略望远镜组)、一个分光镜组及两个正交柱面镜组构成,以确保两路光学系统焦距较长、系统长度较短且放大倍率相同.

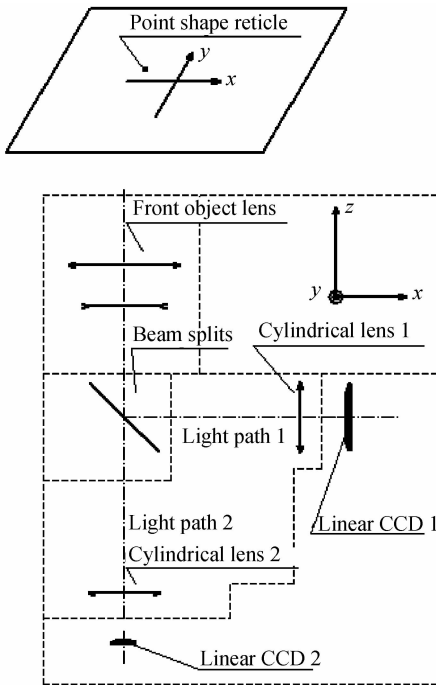


图 2 系统光路

Fig. 2 Light path of the optical system

图 2 中,在光路 1 的有光焦度方向,线阵 CCD 1 位于点型光源合作目标共轭像面处,与柱面镜组 1 的母线正交,其光敏面位于 YOZ 平面,光敏长度方向与 OZ 方向平行且与光路 1 的光轴无 Y 向偏移量;在光路 2

的有光焦度方向,线阵 CCD 2 位于点型光源合作目标共轭像面处,与柱面镜组 2 的母线正交,其光敏面位于 XOY 平面,光敏长度方向与 OY 方向平行且与光路 2 的光轴无 X 向偏移量.

图 3 为一个点光源合作目标在不同视场或不同测量位置与线阵 CCD 的交线示意图.由于使用了柱面镜,每一路光学系统有两个方向的参量^[8-11],即光学系统方向 1(柱面镜有光焦度方向)和光学系统方向 2(柱面镜无光焦度方向).假设前组伽利略望远镜的角放大率为 $\gamma \geq 1$,那么随着方向 1 入射角逐渐增大,方向 2 上在弱光焦度的工作面上光线的高度也会增大.虽然线长变化不大,但是由于其主光线角度差异大,且后端还有较长的光路,导致该线像的中心离线阵 CCD 所设置的位置(光轴位置)越来越远.光学系统方向 2 主要用于变形,设计中需合理控制前组伽利略望远镜的角放大率 γ ,使得点目标变换成的线像在工作范围内均与双线阵 CCD 正交,才能确保测量无盲区.

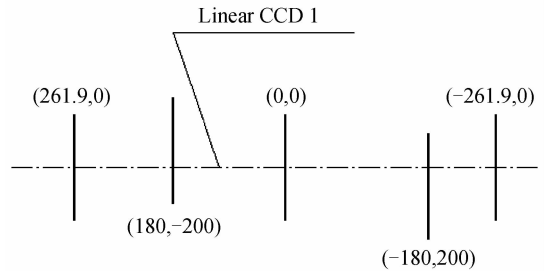


图 3 线阵 CCD 与不同视场线像正交图

Fig. 3 Schematic of linear image from different field on the linear CCD

2.3 设计实例

组合成像光学系统的主体可分解为两个相似的部分,以其中一个部分为例进行设计.由于使用了柱面镜,则有两个方向的参量:组合成像光学系统方向 1(柱面镜有光焦度方向)和组合成像光学系统方向 2(柱面镜无光焦度方向),如图 4.其中,方向 1 为点目标变换为线像时线宽的方向,系统焦距约为 220 mm ,口径为 100 mm ,像面与系统线阵 CCD 设置位置基本重合,与物点在方向 1 共轭.方向 1 主要用于汇聚光能量,并将点目标准确成像于 CCD 像面处,可以按照一般成像系统的标准来评价.方向 2 为点目标变换为线像时线长的方向.在满足系统口径大小和测量准确度的要求下,经过光学优化设计,方向 2 的系统焦距约为 $2 \times 10^5 \text{ mm}$,近似无焦,利于像差的控制.像面与系统线阵 CCD 设置位置较远,处于较大离焦状态,对成像点在方向 2 的位置无严格约束.为缩短系统长度,在方向 2 的系统前端采用了类似伽利略望远镜的缩束系统,后端放置分光棱镜、柱面镜,延长了工作光路,在保证系统像质及测量范围内无盲区的前提下,选择方向 2 的角放大率为 $\gamma = 2.46$,入射光的入射角度由 1.5° 被

放大为约 3.68° 。此外通过合理选择光阑位置,可在保证像质的前提下,压低轴外视场主光线高度,由于方向1与方向2焦距差异大且功能不同,选择点列图的均方根弥散斑对整个系统进行评价。

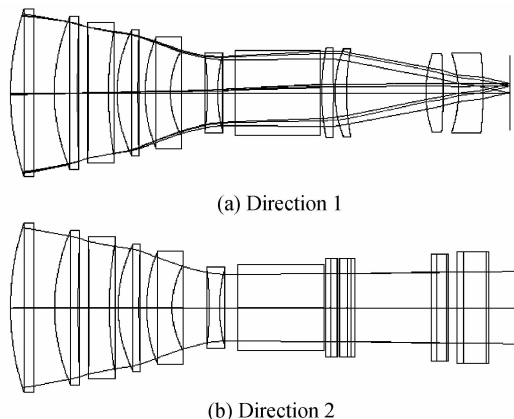


图4 组合成像光学系统的成像光路

Fig.4 Raytrace diagram of combined imaging optical system

组合成像光学系统在 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 1.06^\circ)$ 、 $(0^\circ, 1.5^\circ)$ 、 $(1.5^\circ, 0^\circ)$ 视场点的点列图如图5。图中 OBJ 的角度表示物方视场, IMA 的数值表示像方主光线位置。

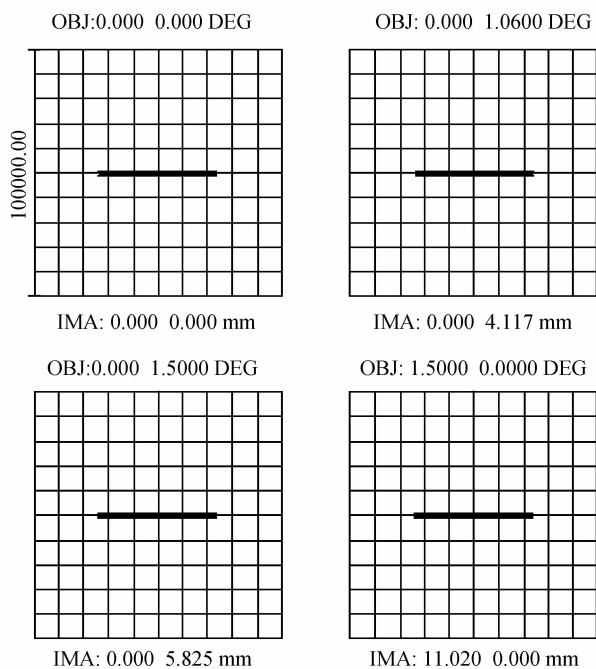


图5 组合成像光学系统的点列图

Fig.5 Spot diagram of combined imaging optical system

图5中,系统将点目标转换为X方向均方根(Root Mean Square, RMS)半长度约为12 mm、Y方向RMS半宽度约 $14 \mu\text{m}$ 左右的线型弥散斑,约占4个像元(像

元大小约为 $7 \mu\text{m}$),各视场基本一致,能够满足系统测量的使用要求。当光线以垂直方向 1.5° 入射时,主光线高度为11.02 mm($(1.5^\circ, 0^\circ)$ 视场点的点列图中主光线高度),光斑半长度 RMS 约为11.3 mm,且留有一定余量。

进一步对系统的畸变进行分析,结果如图6,系统最大畸变小于0.06%,光学设计残余畸变对测量几乎不会产生影响。

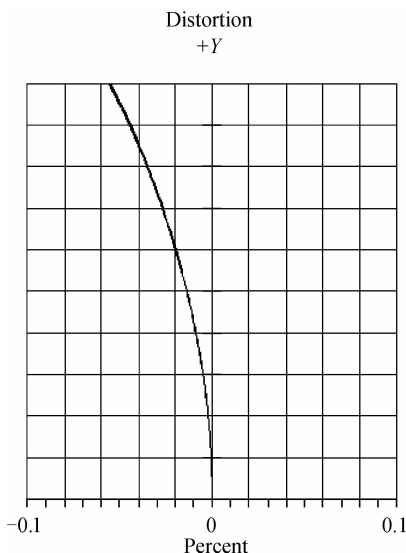


图6 组合成像系统的畸变曲线

Fig.6 Distortion curve of combined imaging optical system

当系统偏心误差为0.05 mm,倾斜为 $1.2'$ 时,采用ZEMAX软件,以系统的均方根弥散斑(RMS spot)在x、y两个方向的分量作为性能评价指标,进行公差灵敏度分析。分析结果见表1、2。

表1、2分别分为三部分,第一部分为公差最敏感的前10项,第二部分为所有参量的综合敏感度分析结果,第三部分为采用后截距作为补偿参量,在当前公差条件下,后截距的变化情况。表1中, TSTX 和 TSDY 分别为单个表面的面倾斜和偏心公差参量; TETX 为元件的面倾斜参量; RSS 为平方和开根。表2中 TTHI 和 TIND 分别为表面厚度和折射率的公差参量。其他公差项如表面光圈、表面局部光圈及材料阿贝数等对评价指标影响较小,并未在表中显示。

由图5、图6、表1及表2的分析结果表明,在系统装配公差较为宽松的情况下,通过控制畸变及光学系统像质,并在 CCD 像面处设置合理的调整机构,可以保证点目标变换的线目标在 1.5° 仍然能在线阵 CCD 上成像,该像与线阵 CCD 在测量范围内均正交,从而完成二维测量。

表 1 组合成像光学系统光路方向 1 公差分析结果

Table 1 Tolerance analysis result of combined imaging optical system at direction 1

Item	Data				
	Type	Value	Criterion	Change	
Worst offenders	TSTX	5	-0.02°	0.014 090 66	0.000 292 26
	TSTX	5	0.02°	0.014 068 01	0.000 269 61
	TSTX	5	-0.02°	0.014 030 75	0.000 232 36
	TETX	5 6	-0.02°	0.014 009 69	0.000 211 29
	TETX	5 6	-0.02°	0.013 991 16	0.000 192 76
	TETX	5 6	0.02°	0.013 972 17	0.000 173 77
	TETX	21	-0.02°	0.013 940 86	0.000 142 46
		21			
	TSTX	8	0.02°	0.013 932 38	0.000 133 98
	TSDY	10	0.05 mm	0.013 824 18	0.000 125 78
TSDY	10	-0.05 mm	0.013 913 73	0.000 115 33	
Estimated performance changes based on RSS method	Nominal RMS spot Y		Estimated change	Estimated RMS spot Y	
	0.013 798 40		0.000 636 44	0.014 464 84	
Compensator statistics; change in back focus	Minimum		Maximum	Mean	Standard deviation
	-0.165 819		0.166 045	0.000 001	0.026 809

表 2 组合成像光学系统光路方向 2 公差分析结果

Table 2 Tolerance analysis result of combined imaging optical system at direction 2

Item	Data				
	Type	Value	Criterion	Change	
Worst offenders	TTHI	9 10	-0.05 mm	11.335 735 20	0.035 650 32
	TIND	1	-5×10^{-4}	11.335 303 63	0.035 218 75
	TIND	3	-5×10^{-4}	11.333 765 48	0.033 680 60
	TIND	7	-5×10^{-4}	11.329 888 72	0.029 803 84
	TTHI	6 8	0.05 mm	11.325 539 97	0.025 455 09
	TTHI	4 6	-0.05 mm	11.324 308 35	0.024 223 47
	TTHI	2 4	0.05 mm	11.323 385 66	0.023 300 78
	TTHI	10 12	-0.05 mm	11.319 065 77	0.018 980 89
	TIND	5	5×10^{-4}	11.318 491 44	0.018 406 55
	TTHI	8 10	-0.05 mm	11.316 401 47	0.016 316 59
Estimated performance changes based on RSS method	Nominal RMS spot Y		Estimated change	Estimated RMS spot Y	
	11.300 084 88		0.090 313 95	11.390 398 83	
Compensator statistics; change in back focus	Minimum		Maximum	Mean	Standard deviation
	-0.164 283		0.164 525	0.000 002	0.026 768

3 准确度分析

由式(1)~(4)可知,倾斜角度 θ ($\theta \leq 2^\circ$) 可通过倾角仪进行测量,取测量准确度为 $\Delta\theta = 1'$,那么,当点型目标在竖直面内存在水平位移 X ($X \leq 262$ mm) 和沉降位移 Y ($Y \leq 262$ mm) 时,由倾斜角度 θ 引起 P 点在 x

向、 y 向的测量准确度表达式为^[12]

$$\begin{cases} \Delta P_x = \Delta x + l \cos \theta \Delta \theta \\ \Delta P_y = \Delta y - l \sin \theta \Delta \theta \end{cases} \quad (7)$$

由第 2 节计算可知,二维位置测量的单个像元对应物方分辨率约为 $\Delta x = \Delta y = \pm 0.23$ mm,由于系统所接收图像非常简单,只有线像在 CCD 上的两个点,可采

用带阈值的质心算法对单个点进行定位,该算法准确度为约为 0.3 像元^[13],二维位置测量的单个像元对应的物方准确度为: $\Delta x = \Delta y = \pm 0.077 \text{ mm}$. 取 $l = 150 \text{ mm}$, $\theta = 2^\circ$, $\Delta\theta = 1'$,引起的误差为

$$\begin{cases} \Delta P_x = 0.12 \\ \Delta P_y = 0.076 \end{cases} \quad (8)$$

由式(1)~(5)可知,当点 P 与点型目标在竖直面内存在水平位移 X ($X \leq 262 \text{ mm}$) 和沉降位移 Y ($Y \leq 262 \text{ mm}$) 时,由倾斜角度 θ 引起的点 P 的方位角测量误差为

$$\Delta H_{sp} = \arctan\left(\frac{0.12}{10 \times 1000}\right) = \pm 2.5'' \quad (9)$$

由于系统装配公差较为宽松,按照一般装配要求(偏心误差为 0.05 mm,倾斜角为 $1.2'$)即能保证光学系统性能指标.由于系统共用前组,两路的放大倍率可基本保持一致,后组的光学元件参量相同,如果存在加工装配的微量差异可通过在两个方向上设置不同的比例参量来解决.该系统在二维方向上均能满足系统的准确度、长度指标要求.

4 结论

本文采用点型光源、伽利略望远镜与柱面镜组合式长焦光学系统及双线阵 CCD 建立了综合测量系统,讨论了系统测量原理、光源合作目标的设计、光学系统的设计,并对系统测量准确度进行了计算.计算结果表明,在 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 视场范围内,系统对某点的方位角测量准确度可达 $\pm 2.5''$,为较大视场、高准确度、定距离某点方位角测量提供一种新的技术途径.该系统还可被应用于高准确度、大范围二维位置测量,或与其他一维测量系统相结合共同完成三维测量.

参考文献

- [1] DONG Bin, YANG Ren, LIU Xing-zhan, *et al.* A method of measuring precisely two-dimension position with linear array CCD[J]. *Optical Technology*, 1998, **5**: 42-45.
董斌,杨韧,刘兴占,等.一种使用线阵型 CCD 实现高准确度二维位置测量的方法[J]. *光学技术*, 1998, **5**: 42-45.
- [2] WANG Feng, LI Hai-feng, ZHENG Zhen-rong, *et al.* Video lens design for light-spot position measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 107-110.
王丰,李海峰,郑臻荣,等.光点位置测量系统镜头设计[J]. *光电工程*. 2008, **35**(10): 107-110.
- [3] GUO Jing-jing, ZHAO Xu-wen, LI Min, *et al.* A novel

rotational velocity transducer based on linear CCD[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(8): 1478-1481.

郭晶晶,赵绪文,黎敏,等.基于线阵 CCD 的新型转速传感器[J]. *光子学报*, 2012, **23**(8): 1478-1481.

- [4] LI Jing, YUAN Feng, HU Ying-hui. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1635-1641.
李晶,袁峰,胡英辉.基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(6): 1635-1641.
- [5] 浙江大学. 基于线阵 CCD 的光点平面位置探测系统: 中国, 200810059043. 1[P]. 2008-01-07.
- [6] LIN Feng-chun, LIU Xu. Position measurement method based on linear array CCD with inverting prism [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, **40**(6): 1089-1092.
林逢春,刘旭.基于线阵列 CCD 的带转像棱镜的位置测量[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, **40**(6): 1089-1092.
- [7] YAMADA K. Telescope optical system; US, 8194318B2[P]. 2012-06-05.
- [8] XIAO Yan-fen, ZHU Jing, YANG Bao-xi, *et al.* Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(2): 0216001.
肖艳芬,朱菁,杨宝喜,等.用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. *中国激光*, 2013, **40**(2): 0216001.
- [9] HAN Qing, WANG Jian, LI Can, *et al.* Displacement measuring method based on astigmatism effect of crossed cylindrical lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 0712005.
韩庆,王健,李灿,等.正交柱面镜像散位移动测量方法的研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(7): 0712005.
- [10] LIANG Min-yong, LIAO Ning-fang, FENG Jie, *et al.* Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359-1363.
梁敏勇,廖宁放,冯洁,等.三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1359-1363.
- [11] XIE Zheng-mao, GAO Li-min, HE Jun-hua. Design of high-speed photography optical system for air bubbles in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0422002.
谢正茂,高立民,何俊华.水下气泡高速摄影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0422002.
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 机械工业出版社, 2014, 57-60.
- [13] WEI Xin-guo, ZHANG Guang-jun, JIANG Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(9): 812-815.
魏新国,张广军,江洁.星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **29**(9): 812-815.