

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.05

一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统

高廷, 孙安斌, 马骊群, 甘晓川, 曹铁泽, 王继虎
(中航工业北京长城计量测试技术研究所 大尺寸实验室, 北京 100095)

摘要: 设计了一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统。系统采用测微准直望远镜与 CCD 视觉系统相结合的方式, 将测微准直望远镜的目视测量视场转换成数字测量视场, 进而实现在整个数字视场范围内取样测量。通过对 CCD 相机的角度当量和位移当量进行标定, 可直接计算出线位移和角位移, 实现了数字化测量。通过实验验证, 该系统的定位测量不确定度优于激光跟踪仪, 定向测量不确定度优于经纬仪, 可用于工业大尺寸测量。

关键词: 准直瞄准; 定位测量; 定向测量; 自标定; 大尺寸

中图分类号: TB92; TH741.14

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0018-04

A Novel Digital Collimation Telescope with Self-calibration

GAO Ting, SUN Anbin, MA Liqun, GAN Xiaochuan, CAO Tieze, WANG Jihu
(Large-scale Laboratory, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A novel digital collimation telescope with self-calibration is presented. By combining micrometric collimation telescope with CCD camera which is used to collect the visual field of the micrometric collimation telescope instead of eyes, it realizes measurement in the whole digital visual field. Through the calibration of the CCD camera's angular equivalent and position equivalent, the positions and angles can be calculated directly. The experimental results show that the position uncertainty of the system is superior to a laser tracker; the angular uncertainty of the system is superior to a theodolite. Therefore, the digital collimation telescope can be used for industrial large-scale measurement.

Key words: collimation telescope; position-measurement; angular-measurement; self-calibration; large-scale

0 引言

测微准直望远镜是一种精密校准工具, 广泛应用于航空、造船、机床、化工等工程, 用于在大型工程中建立测量基准线^[1]。与其它测量系统相比, 测微准直望远镜可同时进行位置和姿态的测量, 且具有测量精度高的特点。但传统的测微准直望远镜都是依靠人眼从仪器的目镜中观察角度或位移分化板, 根据测微鼓轮的刻度读取测量结果, 长时间操作不仅容易造成测量人员眼睛疲劳, 还会增大瞄准读数误差^[2-3], 这使得测微准直望远镜的实际测量误差远大于本体误差^[4]。

为提高准直望远镜的实际测量精度需要对测微准直望远镜进行数字化改造, 即用电子瞄准代替人眼瞄准。目前已有的准直望远镜电子瞄准方案是采用二次

成像光学技术与数字图像显示技术相结合, 对准直望远镜的瞄准目镜进行改造, 设计新型的电子目镜^[5-6], 由电子目镜实时拍摄高清晰测量图片, 经过图像显示及处理软件将瞄准图像经由电子屏幕显示出来。但这种电子目镜只能获取电子影像, 无法通过影像实现数字化测量, 读取测量目标的数据仍然依靠测微鼓轮。造成这种现象的主要原因是没有实现图像像素当量的标定问题。

为实现测微准直望远镜的图像化显示及数字化测量, 本文设计了一种带有自标定功能的数字准直瞄准测量系统, 该系统将准直望远镜与 CCD 视觉系统相结合, 用 CCD 相机代替人眼采集测量图像, 同时增加了像素当量标定系统。通过对获取的准直像和定位像进行标定, 可直接计算出线位移和角位移, 实现了数字化测量。通过数字化测量大大提高了准直望远镜的实际测量精度, 且能够连续读数, 使观测更方便、更准确。

收稿日期: 2016-04-11; **修回日期:** 2016-04-22

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (J052012B006)

作者简介: 高廷 (1988-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为自动控制、图像处理; 马骊群 (1965-), 女, 研究员, 博士, 研究方向为几何量测试与校准技术。

1 测量系统组成

本文设计的带有自标定的数字准直瞄准测量系统由测微准直望远镜、CCD 相机、精密位移台、精密转台和平面瞄准镜组成,如图 1 所示。其中,测微准直望远镜用于准直定向测量和瞄准定位测量;CCD 相机通过特制的 CCD 套筒固定在望远镜的目镜上,用于获取望远镜测量的准直像和定位像并进行图像处理;精密转台可以准确调整准直望远镜的瞄准方向,通过转台给出的标准角度值可对 CCD 数字图像的角度当量进行标定;精密位移台用于承载并驱动测微准直望远镜及精密转台沿位移台的导轨移动,直线导轨两侧安装的双光栅尺能够对 CCD 位移当量进行标定,同时还能够消除因直线度引入的望远镜瞄准线产生偏摆的影响;平面瞄准镜为工作目标,是带有十字叉丝标记的平面镜,通过十字叉丝确定准直望远镜所瞄准目标的具体位置。

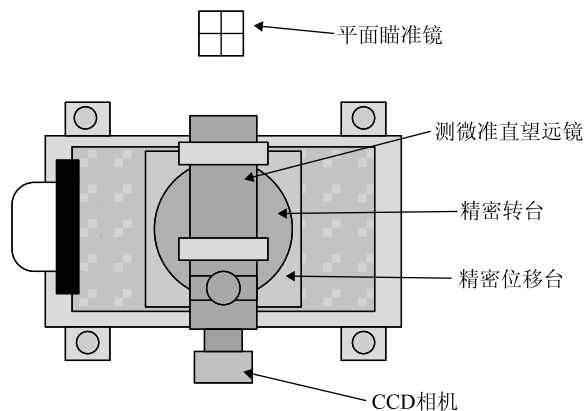


图 1 系统结构示意图

2 CCD 相机像素当量标定

实现测微准直望远镜的数字化的测量的核心技术就是对 CCD 相机的像素进行当量标定。对相机的像素当量标定就是要建立 CCD 相机采集到的测量视场图像上的像素数与所对应的线位移或角位移之间的对应关系。

CCD 相机像素的当量值与瞄准目标到 CCD 成像面的距离有关,当目标距离改变时,像素的当量值也发生改变,这就要求每次调焦后均需要对 CCD 进行像素当量标定。

通常,原始图像坐标系 (OUV) 定义如图 2 所示,横轴为 U 轴,纵轴为 V 轴,坐标系的原点 O 位于图像的左上角。为了与准直望远镜的中心视场坐标系相对

应,建立 CCD 准直瞄准图像坐标系 ($O'XY$),其定义如下:横轴为 X 轴,纵轴为 Y 轴,CCD 视场的中心为坐标系的原点 O' (见图 3)。设原始图像像素大小为 $(U_{\max}, V_{\max})$,则 CCD 准直瞄准图像坐标系原点位于原始图像坐标系下点 $(U_{\max}/2, V_{\max}/2)$ 位置处。

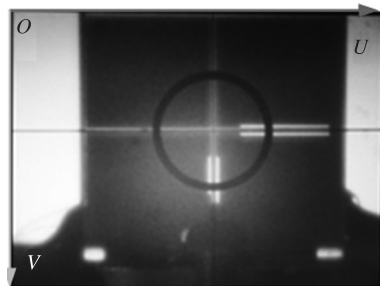


图 2 原始图像坐标系的定义

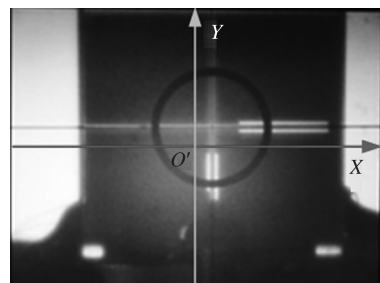


图 3 CCD 准直图像坐标系的定义

为了准确计算出 CCD 的像素当量,首先需要确定 CCD 的像素感应当量及所显示图像的缩放比。

已知 CCD 的感应区尺寸为宽×高 = W (mm) × H (mm),对应的像元数量为 U (pixel) × V (pixel),则 CCD 宽度方向上的像素感应当量为 $P_x = W/U$ (mm/pixel);高度方向上的像素感应当量为 $P_y = H/V$ (mm/pixel);定义 P_{xy} 为 CCD 的宽高像素感应比,则 $P_{xy} = P_x/P_y$ 。

所显示图像的缩放比 λ 是指测量原始图像尺寸与屏幕前端显示图像尺寸之间的对应关系。如原始图像与显示图像的像素大小不相同需计算图像的缩放比。为了保证图像不变形,显示图像的横向 (X) 和纵向 (Y) 缩放比应相等,即将显示图像按原始图像自身比例进行缩放。显示图像的缩放比 λ 计算方式如下:

设测量原始图像的像素大小为 (U_1, V_1) 、前端显示图像的像素大小为 (U_2, V_2) ,计算出像素缩放比 $\lambda = \min(U_1/U_2, V_1/V_2)$ 。

测量点在原始图像坐标系下的像素坐标 (U, V) 与在 CCD 准直瞄准图像坐标系下的像素坐标 (X, Y)

之间的对应关系为

$$X = \lambda (U - U_2/2)$$

$$Y = \lambda (V_2/2 - V)$$

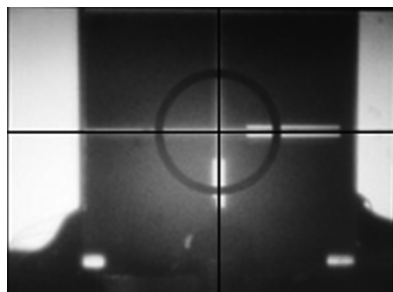
2.1 CCD 位移当量标定

CCD 位移当量标定方法为将准直望远镜调焦至精密平面镜的“十字”标记线上(对中状态,见图4),记录当前对中图像中十字线中心的像素位置 X_1 、位移台位置 L_1 ;左右移动精密位移台一定距离并记录对中图像位置 (X_2, L_2) 和 (X_3, L_3) ,则 X 方向的位移当量 L_X 计算公式为

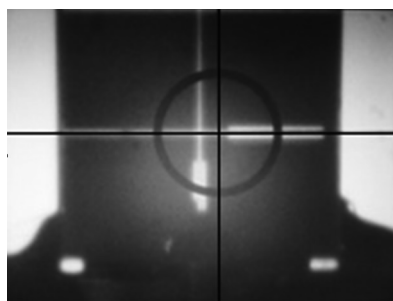
$$L_X = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{L_2 - L_1}{X_2 - X_1} + \frac{L_3 - L_1}{X_3 - X_1} \right)$$

根据 L_X 可直接计算出 L_Y , 有

$$L_Y = \frac{L_X}{P_{XY}}$$



(a) 对中像初始位置



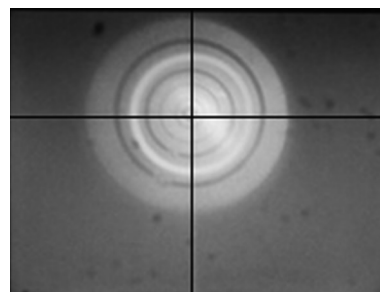
(b) 对中像偏移位置

图4 对中像位置

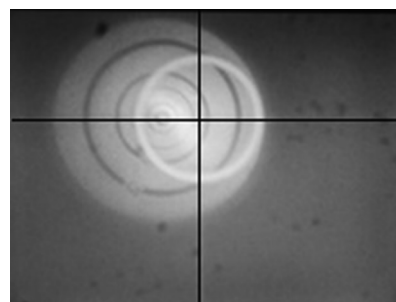
2.2 CCD 角度当量标定

CCD 角度当量标定方法为将望远镜准直调焦至望远镜的“同心环”准直像上(准直状态,见图5),记录当前准直图像中同心环中心的像素位置 X_1 、转台角度 R_1 ;左右移动转台一定角度并记录准直图像位置 (X_2, R_2) 和 (X_3, R_3) ,则角度当量 R_X 计算公式为

$$R_X = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2 - R_1}{X_2 - X_1} + \frac{R_3 - R_1}{X_3 - X_1} \right)$$



(a) 准直像初始位置



(b) 准直像偏移位置

图5 准直像位置

同理,根据 R_X 可直接计算出 R_Y , 有

$$R_Y = \frac{R_X}{P_{XY}}$$

3 CCD 位移及角度当量标定实验

将瞄准目标安置在距离望远镜 5 m 远的位置上,对所获取的位置测量图像和准直测量图像进行当量标定,标定结果见表1、表2。

从表1、表2的标准偏差可以看出,位移的当量标定误差为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,角度的当量标定误差为 $\pm 0.00001^\circ$ ($0.036''$)。

表1 位移当量标定

序号	标准位移/mm	图像像素	位移当量/mm
1	2.5	198	0.0126
2	5.0	399	0.0125
3	7.5	601	0.0125
4	-2.5	-201	0.0124
5	-5.0	-403	0.0124
6	-7.5	-602	0.0125
平均值/mm			0.0125
标准偏差/mm			0.0001

表2 角度当量标定

序号	标准角度/(°)	图像像素	角度当量/(°)
1	0.025	112	0.00022
2	0.050	210	0.00024
3	0.075	320	0.00023
4	-0.025	-105	0.00024
5	-0.050	-221	0.00023
6	-0.075	-335	0.00022
平均值/(°)			0.00023
标准偏差/(°)			0.00001

4 测量系统不确定度分析

由于增加了电子目镜并对数字图像进行了像素当量标定，因此准直望远镜实际测量时引入的不确定度除了望远镜的本身测量不确定度外，主要不确定度来源是准直望远镜的瞄准误差。通常图像的分辨力以像素为单位，则瞄准误差可近似设定为1个像素，由此瞄准误差可以用像素当量来估计。

4.1 定位测量不确定度估计

定位测量不确定度主要来源于准直望远镜瞄准误差、位移台定位误差、位移台直线度误差、望远镜本体误差。假设目标位于望远镜的前方近5 m的位置，则有：

1) 定位瞄准误差引入的不确定度

根据表1的标定结果知5 m左右位置的位移当量为0.0125 mm，取均匀分布，由此可估计5 m以内瞄准误差引入的不确定度分量

$$u_1=0.0125\text{ mm}/\sqrt{3}\approx0.0073\text{ mm}$$

2) 位移台定位误差引入的不确定度

该项误差由所选用的标准位移台所决定，该误差通常由生产厂家给出，是指用该位移台进行长度测量时的定位误差。根据位移台的检定结果，其定位误差为0.001 mm。取均匀分布，由此引入的测量不确定度分量

$$u_2=0.001\text{ mm}/\sqrt{3}\approx0.0006\text{ mm}$$

3) 位移台直线度误差引入的不确定度

当用望远镜瞄准远方目标时，确定瞄准位置的主要不确定度来源于位移导轨的直线度。如图6所示，系统采用双光栅尺测量的方案，位移导轨的宽度为200 mm，根据双光栅的输出可调整测量系统位移导轨

的直线度不超过1 μm。则 $\tan\alpha=1\times10^{-3}/200=5\times10^{-3}$ ，取均匀分布，由此引入的测量不确定度分量

$$u_3=5\times10^{-3}L/\sqrt{3}\approx2.9\times10^{-3}L$$

式中：L为望远镜的瞄准距离，mm。

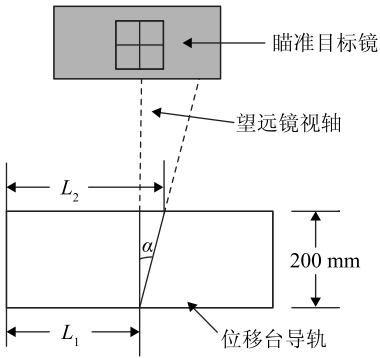


图6 位移台直线度误差

4) 望远镜本体定位测量误差引入的不确定度

望远镜本体在5 m内的定位测量引入的不确定度为0.025 mm，取均匀分布，则本体引入的不确定度分量为

$$u_4=0.025\text{ mm}/\sqrt{3}\approx0.015\text{ mm}$$

则合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2} \\ &\leq \sqrt{u_1^2+u_2^2+u_4^2}+u_3 \\ &= 0.017\text{ mm}+2.9\times10^{-3}L \end{aligned}$$

扩展不确定度

$$U=0.034\text{ mm}+5.8\times10^{-3}L\text{ (}k=2\text{)}$$

4.2 定向测量不确定度估计

定向测量不确定度主要来源于准直瞄准误差、转台本身的测角误差、转台偏心补偿误差以及望远镜本体测量误差。

1) 定向瞄准误差引入的不确定度

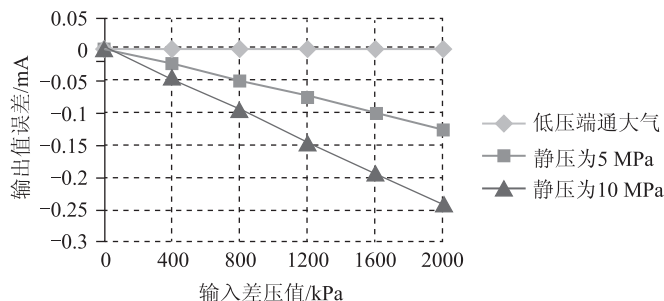
根据表2的标定结果知5 m左右位置的角度当量为0.00023°≈0.83″，取均匀分布，由此可估计5 m以内准直瞄准误差引入的不确定度均小于

$$u_1=0.83''/\sqrt{3}\approx0.48''$$

2) 转台测角误差引入的不确定度

该项误差由所选用的标准转台所决定，该误差通常由生产厂家给出，是指用该转台进行角度测量时的测角误差。根据转台的检定结果，其测角误差为1.0″。取均匀分布，由此引入的测量不确定度分量

$$u_2=1.0''/\sqrt{3}\approx0.58''$$



(b) 0~2000 kPa差压变送器测量结果比较

图4 静压对差压变送器输出值影响

从试验数据看出：在静压不同的条件下，相同差压点，传感器示值存在较大差别，该静压影响主要跟差压传感器的类型和结构原理有关。另外，差压值在不同静压下的影响仍需要进行大量的实验分析，以进一步确定静压对差压仪表性能的影响。

5 结语

目前，越来越多领域应用到差压测量，为保证仪表的精确测量，对差压传感器的静压影响必须予以重视。国内外对高静压差压校准技术的研究也越来越多，

主要集中在对差压传感器静压影响的研究以及高准确度静压差压活塞的研制等方面，通过对该技术的研究与相关应用，可以改进目前校准差压仪表不科学合理的现状，提高对各类差压仪表的校准测试水平，进而为相关科研生产项目提供更有利的保障。

参考文献

- [1] 杜水友, 孙筱云, 竺惠敏. 压力测量技术及仪表 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 曹秀敏. 差压变送器的应用和发展 [J]. 山西电力技术, 2001 (2): 63-64.
- [3] 中国百科网. 静压对校验差压变送器影响程度的评估 [EB/OL]. [2013-07-23]. <http://m.chinabaike.com/t/35273/2013/0723/1321344.html>.
- [4] S. Woo, I. Choi, H. Song, B. Kim. New differential pressure standard at KRISS [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [5] M. Kojima, K. Saitou and T. Kobata. Study on calibration procedure for differential pressure transducers [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [6] 中国计量测试学会. 压力测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2006.

(上接第21页)

3) 偏心补偿误差引入的不确定度

该项误差是指测微准直望远镜的转动中心相对于转台的转动中心的位置偏差，在整个圆周上误差分布为正弦分布。利用测角不确定度为 $1.0''$ 的转台进行偏心误差补偿，则偏心补偿误差可估计为

$$u_3 = 1.0''/\sqrt{2} \approx 0.71''$$

4) 望远镜本体定向测量误差引入的不确定度

依据光轴与机械轴的不平行度 $3''$ ，取均匀分布，则引入的测量不确定度

$$u_4 = 3''/\sqrt{3} \approx 1.8''$$

则合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 2.1''$$

扩展不确定度 $U = 4.2'' (k=2)$

5 结论

由测量系统的不确定度分析可以看出，本文设计的带有自标定的数字准直瞄准测量系统的定位测量不确定度可达到 $0.034 \text{ mm} + 5.8 \times 10^{-3} L (k=2)$ ，其定位测量

能力与激光跟踪仪相当；定向测量不确定度可达到 $4.2'' (k=2)$ ，其测角能力与高精度的电子经纬仪相当。这表明该系统完全满足高精度空间定位定向测量的需求，可用于风洞天平静校台的校准、发动机传动轴的轴体装配及大尺寸对测角和定位要求较高的场合。

参考文献

- [1] 中航工业陕西华燕航空仪表有限公司. CZW 测微准直望远镜操作手册 [Z]. 2011.
- [2] Martinelli P, Musazzi S, Perini U. An autocollimator based optical system for precise angular alignment control over large exploring aresa [J]. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65 (4): 1012-1014.
- [3] 赵莹. 光学自准直比较测角仪的数字化测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 蒋有年. 关于测微准直望远镜等光学仪器瞄准误差的探讨 [J]. 航空工艺技术, 1982 (3): 38-4.
- [5] 大连光程光电科技有限公司. CZW-D 测微准直望远镜电子目镜简介 [EB/OL]. [2016-01-18]. <http://diguangcheng.cn.china.cn/>.
- [6] 欧同庚、陈志高, 杨博雄, 等. CCD 光电自准直仪工作原理及误差源分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27 (6): 98-100.