

文章编号: 1001-3806(2016)05-0734-04

## 一种可变长度光电基准尺

吴斌, 王晓蕾

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了实现对非正交轴系激光经纬仪测量系统的快速、准确定向, 采用构建新型光电基准尺的方法, 提出并研究了一种基于高精度光电位置敏感器件的可变长度光电基准尺构建技术。阐述了非正交轴系激光经纬仪的特点, 根据其特点及非正交轴系激光经纬仪测量系统定向的需要, 确定了可变长度光电基准尺构建的总体思路, 完成了硬件电路设计, 构建了可变长度光电基准尺, 并标定了两光电位置敏感探测器的空间位姿关系, 以实现可变长度基准测量。结果表明, 利用该可变长度光电基准尺定向后的测量系统, 其相对测量精度优于 0.03%, 可方便、高精度地实现非正交轴系激光经纬仪测量系统的定向。

**关键词:** 光电子学; 可变长度光电基准尺; 位置敏感探测器; 激光经纬仪; 系统定向; 空间坐标测量

**中图分类号:** TN29

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.024

### A variable-length photoelectric reference scale

WU Bin, WANG Xiaolei

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to orientate a non-orthogonal shafting laser theodolite measurement system quickly and accurately, a construction technology of variable-length photoelectric reference scale was proposed based on high-precision photoelectric position sensitive detector. Firstly, the feature of a non-orthogonal shafting laser theodolite was elaborated. According to the features and the orientation requirement of a non-orthogonal shafting laser theodolite measurement system, the general idea of the construction of variable-length photoelectric reference scale was confirmed. After that, the design of hardware circuit was finished and a variable-length photoelectric reference scale was constructed. Finally, spatial position relationship between two photoelectric position sensitive detectors was calibrated to realize the measurement of variable-length reference. The experiment results show that the relative measurement accuracy of variable length photoelectric reference scale is better than 0.03%. The orientation of a non-orthogonal shafting laser theodolite measurement system can be realized conveniently and in high-precision.

**Key words:** optoelectronics; variable-length photoelectric reference scale; position sensitive detector; laser theodolite; system orientation; space coordinate measurement

## 引言

随着航空航天、船舶工程、轨道交通、电力、汽车等国家重大技术装备制造业水平的提高, 在大尺寸范围内对单点坐标、几何尺寸及曲面特征等的现场、快速、精密测量已成为工业测量的研究热点和难点。目前, 电子经纬仪、激光跟踪仪、全站仪和摄影测量相关设备成为了大空间、大尺寸对象精密制造、装调的主要测量手段。新型激光电子经纬仪由于具备伺服驱动和激光瞄准等功能, 为实现自动化测量提供了新的途径<sup>[1-5]</sup>。

为满足船舶分段的自动化测量需要, 作者研究了

作者简介: 吴斌(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为工业视觉检测、大尺寸数字化测量及图像处理技术等。

E-mail: wubin@tju.edu.cn

收稿日期: 2015-07-10; 收到修改稿日期: 2015-09-02

以两台 Leica TM5100A 激光电子伺服经纬仪为基础的测量平台, 结合与视准轴同轴投射的准直激光技术和视觉跟踪引导技术, 构建了一套面向大空间、大尺寸对象现场自动测量的系统样机<sup>[6]</sup>。但在后续研究和应用的过程中发现, 高精度电子经纬仪对制造工艺要求严格、造价昂贵, 制约了其应用推广。所以作者在借鉴经纬仪的三轴正交结构模式基础上, 提出并研究了一种新的非正交轴系激光经纬仪架构及其测量原理与方法<sup>[7-10]</sup>。非正交轴系激光经纬仪系统组建时, 经纬仪间空间位姿关系的确定是建立系统测量模型的关键所在, 它影响整个系统测量结果的精度。系统定向时, 长度基准测量是一个必不可少的环节<sup>[11]</sup>。传统经纬仪系统定向时, 通过望远镜人工瞄准基准尺两端标志, 而对于激光经纬仪来说, 视准轴是一个准直激光光束, 无法进行人眼瞄准, 但结合视觉图像技术可实现系统自动定向及自动瞄准测量。针对上述激光经纬仪的特

点,本文中提出并研究了一种可变长度光电基准尺。

### 1 可变长度光电基准尺总体思路

图1所示为可变长度光电基准尺的结构示意图。其中间基础部分为碳纤维基准杆,基准杆两端各放置一个2维光电位置敏感器件(position sensitive detector, PSD)。标定两个PSD间的位姿关系。当激光经纬仪的“视准轴”激光光束瞄准基准杆的两端标志时,光电位置敏感器件提供光束照射的位置信息。系统自动定向时,为了便于视觉引导,并保证精度,首先将主(左)经纬仪引导至光电基准尺一端的PSD靶面上,然后再引导辅(右)经纬仪与主经纬仪进行交会;随后引导主、辅经纬仪至光电基准尺的另一端PSD靶面上交会。上述过程中,视觉技术只是将主经纬仪引导指向PSD的靶面,并由主经纬仪确定PSD靶面上的交会位置,但是由于PSD靶面具有一定的尺寸面积,所以每次引导主经纬仪指向的位置并不固定,因此,每次瞄准测量时,光电基准尺提供了可变的长度基准。该基准尺可自动确定光束照射的位置及实时的基准长度,并将长度信息发送给上位机进行定向解算。

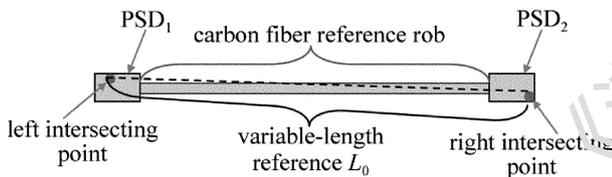


Fig. 1 Structure of variable-length photoelectric reference scale

### 2 可变长度光电基准尺的构建

#### 2.1 PSD信号处理电路设计

PSD是一种基于非均匀半导体横向光电效应,对其感光面上入射光斑重心位置敏感的光电器件。2维PSD能测量出入射光斑在其光敏接收平面上的位置坐标<sup>[12-14]</sup>。

如图2所示,在光敏面两对边的几何中心位置引出4个电极,其中两条对应电极定义为x坐标方向的电极X<sub>1</sub>和X<sub>2</sub>,另外两条对应电极定义为y坐标方向的电极Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>。当有光斑照射到PSD的光敏面上时,在4个电极输出电流信号,设为I<sub>X1</sub>, I<sub>X2</sub>, I<sub>Y1</sub>, I<sub>Y2</sub>,若以PSD的几何中心为坐标原点,光斑坐标(x, y)与电极输出的光电流之间有如下关系:

$$x = \frac{(I_{X_2} + I_{Y_1}) - (I_{X_1} + I_{Y_2})}{I_{X_1} + I_{X_2} + I_{Y_1} + I_{Y_2}} \times \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$y = \frac{(I_{X_2} + I_{Y_2}) - (I_{X_1} + I_{Y_1})}{I_{X_1} + I_{X_2} + I_{Y_1} + I_{Y_2}} \times \frac{L}{2} \quad (2)$$

式中,L是2维PSD光敏面的边长。

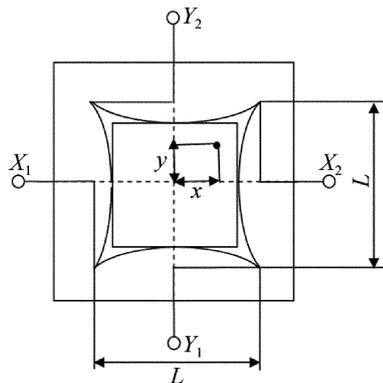


Fig. 2 Photosensitive surface and electrode

当入射光斑落在器件感光面的不同位置时,PSD将对应输出不同的电信号。通过对此输出电信号的处理,即可确定入射光斑在2维PSD上的位置。

本文中采用了PSD单通道信号处理方案,如图3所示,即从PSD输出的4路信号先通过一个多路复用器,通过通道切换,4路信号可以经同一信号处理通道进行处理,这样不仅使PSD 4路的输出信号得到了一致性处理,而且大大降低了系统成本。然后将信号通过1个3阶低通滤波器以消除高频干扰,最后通过模数(analog-to-digital, AD)转换,将数据送入微控制器中进行处理。

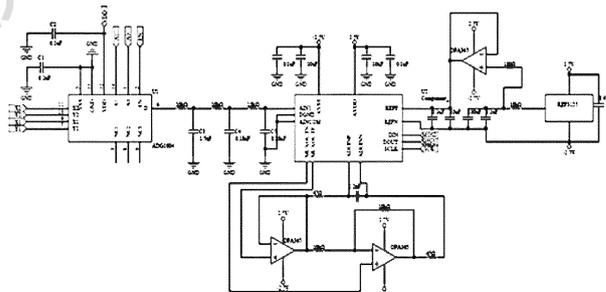


Fig. 3 Design of overall circuit

PSD的输出信号包含有来自外界杂散光引起的信号、PSD的暗电流等,在开始测量之前,先采集外界杂散光产生的光电流信息,并将杂散光作用下的数据保存在微控制器中,以对测量结果给予补偿,提高测量精度。

#### 2.2 PSD间位姿关系的标定

PSD可以提供照射其上光斑的位置,但基准尺的长度需要在光斑位置确定的基础上,结合基准尺两端PSD的位姿关系计算得到。PSD间位姿关系的标定可通过三坐标测量机或激光跟踪仪等外部仪器设备完成,如图4所示。设外部仪器的测量坐标系为O<sub>w</sub>-x<sub>w</sub>y<sub>w</sub>z<sub>w</sub>, PSD<sub>1</sub>的坐标系为O<sub>1</sub>-x<sub>1</sub>y<sub>1</sub>z<sub>1</sub>, PSD<sub>2</sub>的坐标系为O<sub>2</sub>-x<sub>2</sub>y<sub>2</sub>z<sub>2</sub>。

首先,在O<sub>w</sub>-x<sub>w</sub>y<sub>w</sub>z<sub>w</sub>坐标系下测定PSD<sub>1</sub>的4个顶点,利用基于多公共点坐标转换法<sup>[15]</sup>,求得O<sub>1</sub>-x<sub>1</sub>y<sub>1</sub>z<sub>1</sub>坐标系与O<sub>w</sub>-x<sub>w</sub>y<sub>w</sub>z<sub>w</sub>坐标系之间的关系。设O<sub>w</sub>-x<sub>w</sub>y<sub>w</sub>z<sub>w</sub>

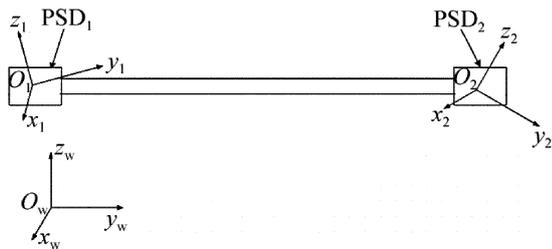


Fig. 4 Sketch of coordinate system

坐标系与  $O_1-x_1y_1z_1$  坐标系的转换矩阵为  $M_1$ , 则有:

$$[x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T = M_1 \cdot [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T \quad (3)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_{x_1} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_{y_1} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & t_{z_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $(r_{00}, r_{10}, r_{20})$  为  $x$  轴方向旋转矢量,  $(r_{01}, r_{11}, r_{21})$  为  $y$  轴方向旋转矢量,  $(r_{02}, r_{12}, r_{22})$  为  $z$  轴方向旋转矢量,  $(t_{x_1}, t_{y_1}, t_{z_1})$  为平移矢量。

同理, 设  $O_w-x_wy_wz_w$  坐标系与  $O_2-x_2y_2z_2$  坐标系的转换矩阵为  $M_2$ , 则有:

$$[x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T = M_2 \cdot [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T \quad (5)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} r'_{00} & r'_{01} & r'_{02} & t_{x_2} \\ r'_{10} & r'_{11} & r'_{12} & t_{y_2} \\ r'_{20} & r'_{21} & r'_{22} & t_{z_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由(3)式和(5)式可求得两 PSD 间的位姿关系:

$$M_r = \begin{bmatrix} 0.999170205 & 0.025350351 & -0.038969572 & 1340.1922 \\ 0.008398367 & 0.924080861 & -0.381053577 & -2020.8057 \\ 0.040530906 & 0.381914928 & 0.923101162 & -967.7190 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

基准尺精度评价实验中, 如图 6 所示, 基于两台 Leica TM5100A 电子经纬仪构建测量系统, 系统定向采用可变长度光电基准尺完成, 在经纬仪前方 3m 区域内均匀选取 8 个位置, 利用定向后的系统对传统基准尺(标称长度为 900.081mm)进行长度测量, 以间接

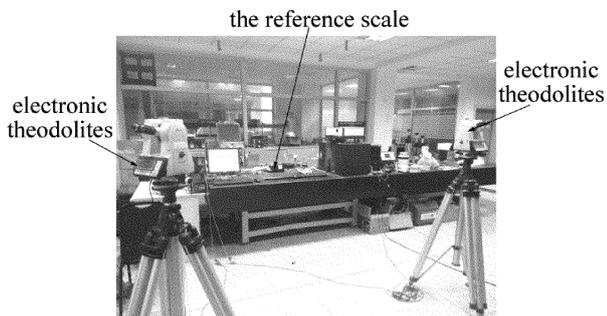


Fig. 6 Experiment system

$$[x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T = M_r \cdot [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T \quad (7)$$

式中,  $M_r = M_1^{-1} \cdot M_2$ 。

### 3 实验验证

#### 3.1 PSD 位置重复性实验

为验证 PSD 位置测量的重复性精度, 将激光器和 PSD 分别固定在精密调整架上, 并对激光器输出光束整形, 保证入射 PSD 光斑直径为 1mm, 同时使激光器光束垂直入射到 PSD 光敏面, 实验中入射光点位置保持不变, 每间隔 1s 测量一次入射光点的坐标位置, 其坐标位置波动幅度曲线如图 5 所示。

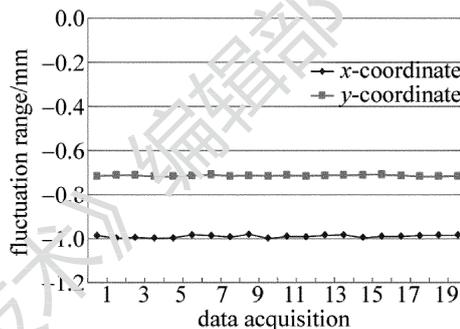


Fig. 5 Wave chart of coordinate position

$x, y$  方向的标准差分别为:  $\sigma_x = 0.0057\text{mm}; \sigma_y = 0.0028\text{mm}$ 。

#### 3.2 基准尺精度评价实验

根据前述方法设计完成了可变长度光电基准尺, 并利用三坐标测量机进行了 PSD 间位姿关系的标定。标定结果如下:

Table 1 Length measurement of traditional reference scale and relative error

position	x-coordinate/ mm	y-coordinate/ mm	z-coordinate/ mm	length/ mm	relative error/%
1	1007.9213	599.6616	1706.2940	900.0108	0.008
	1905.4780	597.0995	1639.9258		
2	1023.1966	499.8454	1798.2943	899.8781	0.02
	1922.4690	494.7610	1765.6786		
3	946.7582	399.6569	1969.3281	899.9390	0.02
	1839.9728	392.9382	2078.9314		
4	954.9730	398.0503	2033.4701	900.1082	0.003
	1843.3479	394.3000	1888.6572		
5	1043.0360	498.1426	1765.3587	900.1968	0.01
	1931.2291	495.9253	1911.8592		
6	923.3545	398.9183	1939.1983	899.8198	0.03
	1821.6396	393.7398	1886.9225		
7	802.8834	400.3712	1904.7842	899.8793	0.02
	1700.4082	393.3240	1840.1129		
8	1620.4126	597.7866	1810.9966	900.2242	0.02
	2489.2025	596.1437	1575.1893		

评价可变长度光电基准尺的长度精度。结果如表1所示,可以看出,利用可变长度基准尺定向后的系统,其相对测量精度优于0.03%。

#### 4 结 论

针对激光经纬仪的特点和定向需要,提出并研究了一种基于高精度光电位置敏感器件的可变长度光电基准尺,在经纬仪准直光束照射时,可自动、动态提供可变长度长度基准,尤其在无望远镜瞄准装置的激光经纬仪系统构建中,更可在视觉引导跟踪系统的配合下,实现系统的自动定向,既减少了人工参与,在保证较高精度的同时,也大大提高了测量效率。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Z L, ZHU J G, GENG N, *et al.* The design of double-theodolite 3-D coordinate measurement system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(5):660-664 (in Chinese).
- [2] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, *et al.* Recent developments in large-scale dimensional metrology [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2009, B223(6): 571-595.
- [3] CUYPERS W, van GESTEL N, VOET A, *et al.* Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3): 292-300.
- [4] MAUTZ R. Overview of current indoor positioning systems [J]. Geodesy and Cartography, 2009, 35(1): 18-22.
- [5] HOPE C, CHUAQUI M. Geotechnical instrumentation news-managed total station monitoring [J]. Geotechnical News, 2008, 26(3): 28.
- [6] WU B, WANG B. Automatic measurement in large-scale space with the laser theodolite and vision guiding technology [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 2013(5): 629385.
- [7] WU B, SU X Y. A precise guiding method for automatic measurement with visual guiding theodolites [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 453-457 (in Chinese).
- [8] LI G Y. Principle and development trend of non-orthogonal coordinate system [J]. Journal of Geomatics, 2003, 28(1):4-10 (in Chinese).
- [9] HUANG G Y, LI G Y. Study of system orientation and coordinate calculation of IMS [J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2003, 32(3):256-260 (in Chinese).
- [10] WU B, YANG S. Research on measurement technology of non-orthogonal shaft laser theodolites [J]. Laser Technology, 2015, 39(5):603-609 (in Chinese).
- [11] GENG N. Study on the calibration method of theodolite coordinate measurement and system implementation [D]. Tianjin: Tianjin University of Instrument Science and Technology, 2010:13-20 (in Chinese).
- [12] FAN Zh G, ZHANG F Sh, ZUO B J, *et al.* Effect of noise ray on properties of position sensitive detector [J]. Laser Technology, 2004, 28(4):442-444 (in Chinese).
- [13] KOMATSU M, OIKAWA K, TSUCHIDA N, *et al.* Hole position and inclination sensor with 2 dimensional PSD, and its application to automatic shaft inserting [C]// International Conference on Multi-sensor and Integration for Intelligent Systems. New York, USA: IEEE, 1996: 78-85.
- [14] SONG D Y. Research and application on technology of precise PSD micro-displacement online measurement [D]. Tianjin: Tianjin University of Photoelectron Technology, 2012:21-24 (in Chinese).
- [15] FU J, CHU W, DIXSON R, *et al.* Three-dimensional image correction of tilted samples through coordinate transformation [J]. Scanning, 2008, 30(1): 41-46.