

## 基于激光跟踪仪的快速镜面准直与姿态测量方法

杨 振, 沈 越, 邓 勇, 李 丛

(信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 提出了一种利用激光跟踪仪进行镜面准直和姿态测量的方法, 分析了测量精度。分别利用高精度电子经纬仪与激光跟踪仪对单个立方镜和双立方镜进行准直和姿态测量, 计算固定立方镜相邻镜面夹角和双立方镜坐标系间的转换参数, 对比新方法的测量精度。同时比较测量效率、测量环境要求。实验结果显示: 比于传统镜面拟合法低于 0.5' 的准直测量精度, 新方法精度达到 10" 量级, 与主流的经纬仪方法相当; 同时, 新方法在测量效率上较经纬仪方法提高 1 倍以上, 对测量环境的要求也较为宽松, 在实际生产中可以代替经纬仪进行准直与姿态测量工作。

**关键词:** 准直; 激光跟踪仪; 姿态测量; 立方镜

中图分类号: P258 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1017001

## Rapid cubic prism collimation and attitude measurement method based on laser tracker

Yang Zhen, Shen Yue, Deng Yong, Li Cong

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A method of laser cubic prism collimation and attitude measurement was proposed in this paper, and the accuracy was analyzed. A single cubic prism and double cubic prisms were collimated and measured respectively by using high precision electronic theodolites and laser tracker system. The angle of adjacent surface and coordinate transformation parameters were calculated, and the measuring accuracy of new method was compared. The measurement efficiency and environmental requirements was also compared. The experiments results show that the new method achieved an accuracy of 10", which is significantly improved compared to other traditional methods with an accuracy of 0.5', indicating that this new method had the equivalent accuracy to other mainstream theodolite method. At the same time the efficiency of new method was improved by more than double, and the requirements for the measurement environment were also more relaxed. It could replace the method of theodolite in the actual production.

**Key words:** collimation; laser tracker; attitude measurement; cubic prism

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

作者简介: 杨振(1981-), 男, 讲师, 主要从事精密工程测量方面的研究。Email: 12290074@sina.com

## 0 引言

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出,现代工业特别是大型装备制造业正在向信息化、智能化发展,高精度的设计、制造和检测是保证产品质量的关键。准直与姿态测量是建立坐标系的重要一环,广泛应用于航天器部件产品的精密制造、震动测试等环节<sup>[1]</sup>。目前该测量方法主要通过高精度的电子经纬仪对立方镜的镜面准直测量来实现。

其测量原理为使用两台经纬仪分别准直立方镜相邻两个镜面,通过观测获取镜面法线的方向,修正后作为立方镜坐标系的两个坐标轴,并以此建立立方镜坐标系。

当前高精度的电子经纬仪测量精度可达 0.5",具体实践中该方法的准直测量精度可优于 1",姿态精度可优于 5",是目前最高的,也没有被其它高精度测量工业测量仪器所替代。而现阶段该方法最大的缺点在于准直测量的可操作性差,由此导致效率低下、测量精度受人工影响程度大等问题。

近年来,各种新型工业测量仪器不断涌现,尤其是激光跟踪仪具有测量精度高、操作简便、测量速度快等特点,迅速得到了广泛应用。由于采用干涉测距原理,其点位测量精度极高,因此通过激光跟踪仪进行镜面准直从而建立立方镜坐标系的方法也被提出,具体做法是将靶标球放置立方镜镜面上,测量一定数量镜面点坐标,拟合镜面的平面并建立法线方向。该方法虽然理论可行,但由于立方镜镜面面积较小,给实际操作带来困难,其准直测量精度在 0.5' 以下,远远低于主流的经纬仪方法<sup>[2-6]</sup>。

## 1 基于激光跟踪的镜面准直新方法

### 1.1 激光跟踪准直测量原理

基于激光跟踪仪的镜面准直测量,就是利用光的直线传播与反射定律,利用两个高精度的点坐标直接构建镜面法线。其方法如图 1 所示,将跟踪仪安置在立方镜附近合适位置,旋转激光发射头,使激光发射方向瞄准至立方镜某镜面上 A 点,此时激光被镜面反射,在反射光线所在直线上某位置 a 点处安置基座及靶标球,测量 a 点三维坐标 $(x_a', y_a', z_a')$ ,该坐标值实际为 a 点在镜面内像点 a' 坐标;测量完成

后重新旋转跟踪仪发射头,调整激光方向瞄准 a 点,直接测量在 a 点靶标球三维坐标 $(x_a, y_a, z_a)$ ,该坐标值即 a 点实际位置坐标。

根据光的直线传播定律和反射定律,不难证明 aa' 两点连线即为镜面 A 点的法线方向。设该法线向量为 $\vec{x}(a_1, a_2, a_3)$ ,其中:

$$a_1 = \frac{(x_a - x'_a)}{D_a} \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{(y_a - y'_a)}{D_a} \quad (2)$$

$$a_3 = \frac{(z_a - z'_a)}{D_a} \quad (3)$$

$$D_a = \sqrt{(x_a - x'_a)^2 + (y_a - y'_a)^2 + (z_a - z'_a)^2} \quad (4)$$

同理,跟踪仪对 A 点所在镜面的相邻镜面 B 进行准直测量,可得该镜面的法线向量 $\vec{y}(b_1, b_2, b_3)$ 。将上述向量叉乘,即可得到垂直于两向量的第三向量 $\vec{z}(c_1, c_2, c_3)$ ,从而建立该立方镜坐标系。

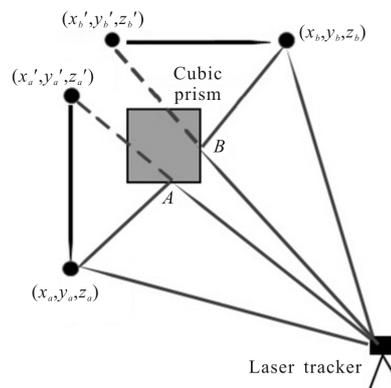


图 1 激光跟踪仪准直与姿态测量

Fig.1 Collimation and attitude measurement of laser tracker

### 1.2 准直与姿态测量精度分析

与传统经纬仪准直测量方法不同,该方法准直和姿态精度主要取决于法线上两点的点坐标测量精度。另外,姿态测量精度还取决于立方镜坐标系的建立精度。立方镜一般由精密加工制造,加工精度较高,相邻两镜面垂直度优于 3"。通过跟踪仪建立相邻镜面法线时,可根据实际测量值计算得到法线向量夹角,并通过向量修正建立立方镜坐标系。

以徕卡 AT901 激光跟踪仪为例,其标称测量精度如表 1 所示。

表 1 徕卡 AT901 激光跟踪仪标称精度  
Tab.1 Nominal precision of Leica AT901

| laser tracker             |              |
|---------------------------|--------------|
| Type                      | AT901_B      |
| Maximum range/m           | 80           |
| Angle accuracy            | 15 μm+6 μm/m |
| Distance accuracy(IFM)/μm | 0.5          |
| Distance accuracy(ADM)/μm | 10           |
| Coordinate accuracy       | 15 μm+6 μm/m |

假设跟踪仪距离的不确定度为  $m_d$ , 水平角和垂直角的不确定度为  $m_\alpha$  和  $m_\beta$ , 则空间任意一点  $P(x, y, z)$  的不确定度  $\sigma_p$  为:

$$\sigma_p = \sqrt{m_d^2 + d^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot m_\alpha^2 + d^2 \cdot m_\beta^2} \quad (5)$$

法线计算公式为:

$$\vec{m} = \left( \frac{x-x'}{D}, \frac{y-y'}{D}, \frac{z-z'}{D} \right) \quad (6)$$

则可得法线的不确定度  $u_x$  为:

$$\vec{\sigma}_m = \frac{\sqrt{2}}{D} \cdot \sigma_p \quad (7)$$

化为秒值并整理得到:

$$\vec{\sigma}_m = \frac{\sqrt{2}}{D} \cdot \rho \cdot \sqrt{m_d^2 + d^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot m_\alpha^2 + d^2 \cdot m_\beta^2} \quad (8)$$

按照上述公式, 架设的激光跟踪仪距离立方镜为 2 m, 发射出的激光垂直角约为  $0^\circ$ 。安放的靶标球距离立方镜分别为 2、4、8 m。 $D$  表示靶标球虚像和实像间距离,  $d$  表示跟踪仪与靶标球间距离<sup>[7-11]</sup>。靶标球距离立方镜 2 m 时  $D=4$  m,  $d=4$  m。代入计算得  $\sigma=2.9''$ 。靶标球距离立方镜 4 m 时  $D=8$  m,  $d=6$  m,  $\sigma=2.0''$ 。靶标球距离立方镜 8 m 时  $D=16$  m,  $d=10$  m,  $\sigma=1.6''$ 。

## 2 准直与姿态测量精度测试

为验证新方法准直测量可行性, 分析测量精度, 在实验室分别用电子经纬仪和激光跟踪仪对立方镜进行了准直与姿态测量对比实验, 实验所用经纬仪为两台徕卡 T3000A 和两台徕卡 TM5100A 电子经纬仪, 标称测角精度均为  $0.5''$ ; 跟踪仪为徕卡 AT901-B 型激光跟踪仪; 靶标球选择标准 1.5 in (1 in=2.54 cm) CCR 球棱镜, 通过基座固定安置在铝合金脚架上, 保证测量时的稳定性。

### 2.1 单个立方镜垂直度检测

实验中, 首先利用经纬仪对立方镜固定相邻镜面(设为  $AB$  面)进行准直测量,  $AB$  两面垂直度标称为  $90^\circ$ 。准直与互瞄均采用准直灯十字丝法, 望远镜焦距均固定为无穷远, 每一镜面均双面观测 5 个测回, 记录各自的水平角和垂直角观测值, 计算  $AB$  面法线向量夹角。

跟踪仪观测时, 其跟踪头在自动搜寻目标时候会小角度摆动搜索, 由于立方镜镜面较小, 在测量反射虚拟点时发射光线很容易摆动到立方镜镜面之外, 因此激光跟踪仪的设站位置与立方镜间的距离不宜过远, 实验中保持在 2 m 左右。固定该位置后依次将靶标球放置在距离立方镜大致 2、4、8 m 位置处观测, 每个位置观测 5 个测回, 记录实点位置和虚像点位置坐标值, 计算  $AB$  面法线向量夹角, 计算结果如表 2 所示。

表 2 立方镜垂直度检测实验

Tab.2 Perpendicularity testing experiment of cubic prism

|          | Theodolite<br>89°59' | Laser tracker<br>89°59'(90°00') |       |       |
|----------|----------------------|---------------------------------|-------|-------|
|          |                      | 2 m                             | 4 m   | 8 m   |
| Round 1  | 57.2"                | 57.0"                           | 58.3" | 57.6" |
| Round 2  | 54.9"                | 59.4"                           | 00.2" | 56.0" |
| Round 3  | 56.9"                | 54.6"                           | 55.7" | 58.4" |
| Round 4  | 57.8"                | 00.8"                           | 58.1" | 58.1" |
| Round 5  | 58.4"                | 59.1"                           | 57.9" | 56.6" |
| Average  | 57.0"                | 58.2"                           | 58.0" | 57.3" |
| $\Sigma$ | 1.3                  | 2.4                             | 1.6   | 1.0   |

从表 2 可以得知, 经纬仪 5 个测回数据的内符合精度为  $1.3''$ , 跟踪仪观测精度在普通 2 m 观测距离上达到  $2.4''$ , 略低于经纬仪。随着立方镜与靶标球距离的增大, 观测精度可进一步提高, 平均值与经纬仪观测数据趋于一致。实验结果与理论分析保持一致, 验证了该方法的可行性。

### 2.2 双立方镜姿态测量检验

双立方镜间姿态测量目前主流的方法是通过 4 台高精度的电子经纬仪分别准直 2 个立方镜的 4 个镜

面进行,如图 2 所示。

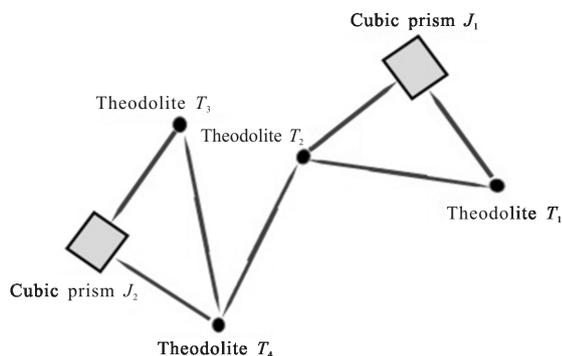


图 2 经纬仪双立方镜测量

Fig.2 Two cubic prisms measurement with theodolites

实验中,经纬仪  $T_1$  和  $T_2$  分别准直立方镜  $J_1$ ,经纬仪  $T_3$  和  $T_4$  准直立方镜  $J_2$ 。经纬仪  $T_1$  和  $T_3$  进行互瞄,建立坐标系传递路径。以此得到  $J_1$  立方镜坐标系与  $J_2$  立方镜坐标系的转换矩阵  $R$ ,其值为公式(9):

$$R = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_x & \cos\beta_x & \cos\gamma_x \\ \cos\alpha_y & \cos\beta_y & \cos\gamma_y \\ \cos\alpha_z & \cos\beta_z & \cos\gamma_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $i, j, k$  分别为  $J_1$  立方镜坐标系相应的坐标轴向量; $\alpha, \beta, \gamma$  分别为向量与  $J_2$  立方镜坐标系 3 个坐标轴的夹角。

跟踪仪实验中,所用方法与测量单立方镜时一致。但在设站时注意适当安置跟踪仪位置,使其尽量满足可对两个立方镜的镜面同时准直观测的要求,否则产生搬站的影响,设站示意如图 3 所示<sup>[12-13]</sup>。

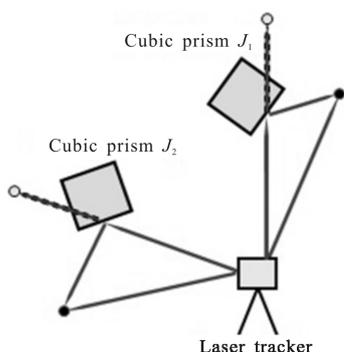


图 3 激光跟踪仪双立方镜测量

Fig.3 Two cubic prisms measurement with laser tracker

经纬仪准直和互瞄观测均采用精度最高的自准直灯十字丝法,跟踪仪测量时将靶标球放置在距离

立方镜大致 4 m 位置处观测。两组实验过程立方镜位置均保持不变,每组实验均观测 5 个测回。计算每个测回的双立方镜姿态值,平均值结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 经纬仪双立方镜实验结果

Tab.3 Experimental results of 2 cubic prisms with theodolites

| B | A            |              |             |
|---|--------------|--------------|-------------|
|   | X            | Y            | Z           |
| x | 113°01'46.4" | 23°02'37.4"  | 90°56'55.3" |
| y | 156°57'37.3" | 113°01'47.5" | 90°17'46.5" |
| z | 90°38'37.8"  | 89°14'34.1"  | 0°59'38.1"  |

表 4 跟踪仪双立方镜实验

Tab.4 Experimental of 2 cubic prisms with laser tracker

| B | A            |              |             |
|---|--------------|--------------|-------------|
|   | X            | Y            | Z           |
| x | 113°01'41.4" | 23°02'41.0"  | 90°56'56.6" |
| y | 156°57'42.4" | 113°01'51.0" | 90°17'45.7" |
| z | 90°38'37.6"  | 89°14'32.7"  | 0°59'38.9"  |

表 3 中 5 测回最大夹角互差 8.2",平均 3.6";表 4 中 5 测回最大夹角互差 12.7",平均 5.8",且与经纬仪数据平均值最大夹角互差 5.1",平均 2.4"。

### 3 对比研究

通过准直与姿态测量精度测试可发现,该激光镜面准直方法完全可行,测量精度与高精度电子经纬仪相当。实验过程中,同时对测量速度等问题做了对比研究。

#### 3.1 测量速度比较

利用高精度电子经纬仪进行镜面准直,其操作较为复杂,基本可分为大致瞄准、有限远焦距准直十字丝、无限远焦距准直十字丝 3 个阶段,其准直时间和观测人员熟练程度有较大关系。新的跟踪仪准直方法只需转动跟踪仪,测量 2 个固定点即可,与普通点位置测量没有明显差别。

上述双立方镜准直和姿态测量实验中,统计两种方法 4 个测回的实验时间进行记录对比,两种方

法均不包括仪器联机和准备时间。由于经纬仪方法需要用到 3 台仪器,且包含有互瞄观测,因此必须由至少两人操作完成。而跟踪仪测量一人即可完成。实验中,4 台经纬仪首先需要建立统一的测量坐标系,由于测量坐标系建成后不可移动测站,因此之前必须完成 4 台仪器的准直寻像过程。实验中完成所有仪器的准直寻位,用时 8'27",4 个测回总计用时 42'45"。而跟踪仪由于在适当位置可同时观测双立方镜,不涉及搬站问题。测量得到镜面中虚像位置坐标以及靶标球真实位置坐标用时平均为 3'18"。共用时 14'57"完成了 4 次测回测量任务。记录时间曲线如图 4 所示。

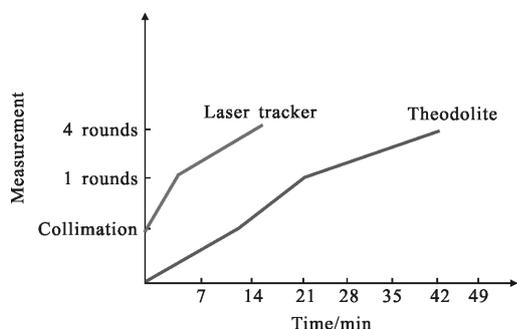


图 4 时间对比图

Fig.4 Time comparison

### 3.2 测量环境要求比较

由于采用完全不同的测量仪器和理论,为了获得两种方法各自最高的测量精度,仪器所需要的测量环境要求有所不同。

经纬仪准直由于必须将焦距调至无穷远,因此对于仪器相对于立方镜的安置距离没有限制要求,方便观测即可。但其对于仪器架设的高度限制较大,必须严格根据立方镜的安置高度和倾斜程度架设,实际工程中往往需要借助于专用的高低脚架才能观测,甚至于特殊情况下无法满足观测条件。另外整个测量过程中必须保持整个经纬仪系统的稳定<sup>[14-15]</sup>。

激光跟踪仪准直不需要垂直对准镜面,理论上只要在跟踪仪角度测量范围内都可以观测。且测量过程中,测回之间可随意移动仪器。通过实际操作发现,由于激光是通过立方镜镜面进行反射,且准直法线的计算只能通过两点计算,没有多余点检核,因此立方镜镜面的平面度对测量结果有一定影响。当平面度达不到要求时,准直不同的镜面点计算的法线

可能会产生粗差。另外,观测时需要准直镜面留有一定冗余空间,供其在自动寻找目标时微调发射光线的方向来寻找目标,若镜面的可视面积太小,激光则极易调节到镜面之外。因此激光准直法对位置有一定的限制要求,距离立方镜尽可能接近,特别是测量多个立方镜时可尽量安置在立方镜对角线方向上。如图 5 黑色斜线区域所示即为最佳跟踪仪安置位置。

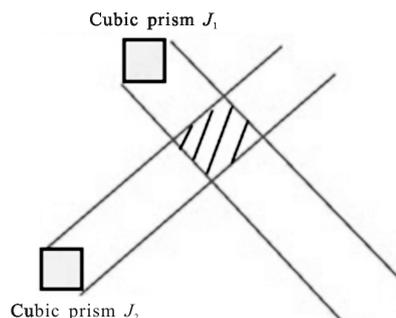


图 5 激光跟踪仪观测最佳区域

Fig.5 Best area of laser tracker

通过以上分析可知,利用激光跟踪仪进行准直和姿态测量,将对角度观测转换为对点观测,充分发挥了激光跟踪仪高精度点位测量优势,整体准直和姿态测量精度与目前主流的经纬仪方法相当。测量效率上,该方法单人单台仪器即可操作,无需人眼瞄准观测,能够大幅降低工作强度,避免人员观测误差。测量环境上,跟踪仪无需整平、高度调整范围限制小,测回之间可随意变换位置。综合对比如表 5 所示。

表 5 测量方法比较

Tab.5 Comparison of measurement methods

| Methods             | Theodolite | Laser tracker |
|---------------------|------------|---------------|
| Accuracy            | High       | High          |
| Manual aim          | Need       | Not need      |
| Time                | Long       | Short         |
| Setting requirement | High       | Low           |
| System calibration  | Need       | Not need      |

## 4 结论

综上分析,激光跟踪仪已经具备替代高精度经纬仪进行准直和姿态测量的能力。特别在操作方法、测量速度等方面也同样具有显著优势。该方法拓宽

了准直和姿态测量的手段和方法,也拓宽了激光跟踪仪的应用范围。

#### 参考文献:

- [1] Li Guangyun, Li Zongchun. The Principles and Applications of Industrial Measuring Systems [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011: 4–12. (in Chinese)
- [2] Wang Zhi, Wu Guodong. Calibration of transition matrix on cubic prisms in mapping camera and star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 1(20): 96–101. (in Chinese)
- [3] Zhang Jie, Wang Jinghai, Shi Lei, et al. The research of real-time attitude measurement based on theodolite by using auto collimation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 5(42): 40–44. (in Chinese)
- [4] Yan Yonggang, Ouyang Jianfei, Liu Wanli, et al. Error correction for the tracking mirror [C]// 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008.
- [5] Cai Wei, He Xiaomei, Wang Jihu, et al. The measurement of performance of SMR with laser tracker [J]. *Acta Merologica Sinica*, 2008, 29(4): 77–81. (in Chinese)
- [6] Chalfoun J, Bidard C, Keller D, et al. Calibration using generalized error matrices of a long reach articulated carrier [C]//IEEE Conference on Automation Science and Engineering Scottsdale, 2007: 22–25.
- [7] emScon 3.0 programmers manual tracker programming interface[R]. Leica Geosystem, 2010.
- [8] Fan Baixing. Research and realization of the high precision coordinate measurement technique using laser tracker [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2013: 18–20 (in Chinese).
- [9] Ouyang Jianfei, Liu Wanli, Yan Yonggang, et al. Coordinate measuring accuracy of laser tracker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,37(4): 15–18. (in Chinese)
- [10] Suo Rui, Liang Zhiyong, Fan Zhijun, et al. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004,34(8): 251–253. (in Chinese)
- [11] Liu Ying, Xie Chi, Yang Fu. Study of measurement uncertainty forecasting for laser tracker system [J]. *China Measurement & Test*, 2010, 36(7): 25–27. (in Chinese)
- [12] Wang Wei, Guo Jieying, Ren Chunzhen, et al. The vector measurement method of a special satellite thruster [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(2): 30–34. (in Chinese)
- [13] Huang Guiping, Qing Guiqing, Ma Kaifeng. Attitude calibration on three-line array CCD camera of space stereo mapping [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, 338: 17–20. (in Chinese)
- [14] Holler Y, Krause B, Petrov A, et al. Precise transfer measurement of the magnetic axis to outside monuments[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, 18(2): 1645–1647.
- [15] Zhang Jie, Zhang Wei, Fan Shenghong, et al. A new method for rapid measurement of spacecraft attitude [J]. *Radio Communications Technology*, 2017, 4(43): 67–70. (in Chinese)