

文章编号 1004-924X(2008)09-1695-06

激光跟踪测量系统角度自动校正装置设计

刘万里¹,曲兴华¹,欧阳健飞²,王占奎³

(1.天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072;

2.河南理工大学 精密工程研究所,河南 焦作 454003;3.河南科技学院 机电学院,河南 新乡 453003)

摘要:研制开发了一种能使激光跟踪测量系统在动态条件下连续测量的角度自动校正装置。它主要由精密圆形导轨和角度方位自动调节机构组成,能使角锥棱镜在动态测量过程中始终指向激光跟踪测量系统,从而实现在动态条件下的连续工作。利用研制的角度自动校正装置对激光跟踪测量系统进行了角度误差补偿试验,结果表明,该装置使激光跟踪测量系统的水平角测量误差由 $34.69\ \mu\text{m}$ 减小到 $9.71\ \mu\text{m}$,垂直角测量误差由 $35.43\ \mu\text{m}$ 减小到 $10.03\ \mu\text{m}$,从而有效地提高了激光跟踪测量系统的角度测量精度,解决了激光跟踪测量系统在动态测量中受角锥棱镜逆反射器接收角度范围限制而导致的无法连续测量问题。

关键词:激光跟踪测量系统;角度校正装置;角锥棱镜

中图分类号:TN247 文献标识码:A

Design of angular automatic calibration mechanism for laser tracker system

LIU Wan-li¹, QU Xing-hua¹, OUYANG Jian-fei², WANG Zhan-kui³

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *Precision Engineering Institute, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;*

3. *College of Mechatronics, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)*

Abstract: In order to resolve the problem that Laser Tracker System (LTS) can not continuously measure Corner Cube Retro-reflector (CCR) position in dynamic conditions for CCR's receivable angle is restricted, an angular automatic calibration mechanism for LTS is designed to measure the CCR positions in real time. The calibration mechanism mainly is consists of a precision circular guide-way and a angular automatic adjustment device, which can make the CCR track the laser beam emitted from LTS all the time. The designed calibration mechanism and Hexagon G128 coordinate measuring machine are used to compensate the angular measuring error of LTS. The experimental results demonstrate that the maximum angular measuring error of LTS in measuring distance of 0.752 m is decreased sharply from $34.69\ \mu\text{m}$ to $9.71\ \mu\text{m}$ in horizontal direction and from $35.43\ \mu\text{m}$ to $10.03\ \mu\text{m}$ in vertical direction, which shows the LTS angular measuring accuracy is effectively improved.

Key words: Laser Tracker System(LTS); angular calibration mechanism; Corner Cube Retro-reflector (CCR)

收稿日期:2007-11-29;修订日期:2008-01-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475038)

1 引言

激光跟踪测量系统是目前最新型的空间大尺寸坐标测量系统之一,它集激光干涉测距技术、光电检测技术、精密机械技术、计算机及控制技术、现代数值计算理论于一体,可对空间运动目标进行跟踪并实时测量其三维空间坐标,具有精度高、实时快速、动态测量、操作简单等特点,是尺寸测量、安装、定位、校正和逆向工程等方面功能强大的计量工具,在汽车、造船、核工业、机械制造、航空航天和设备装配等精密工业领域得到越来越广泛的应用。随着我国上述行业测试技术的迅速发展,激光跟踪测量系统已经开始大量引进并用于生产实践^[1-2]中。

激光跟踪测量系统的测量精度是设计制造这类产品和应用于生产实践的重要基础,因此确保激光跟踪测量系统在使用中的测量精度,对提高产品生产效率、制造精度和生产水平起着至关重要的作用。激光跟踪测量系统的误差源主要有距离测量误差和角度测量误差,而角度测量误差是主要误差源,对于整个测量系统精度起主导作用。随着制造过程中质量控制和溯源精度的不断提高,对激光跟踪测量系统的校准需求也越来越迫切。因此,对激光跟踪测量系统系统的测量精度和动态测量性能提出了更高要求。激光跟踪测量系统目前仍然是以静态测量方式为主,在动态测量中因目标反射镜接收角度范围的限制导致的无法测量的问题直接影响了测量工作正常进行和系统测量精度。如何解决以上问题,是当前激光跟踪测量技术领域的焦点研究课题之一,国内外已经对其进行了广泛的研究,其主要采用校正方法有精密长导轨和陀螺仪技术等,但在激光跟踪测量系统角度测量精度校正和全方位误差补偿上未能取得重大突破。为满足这一要求,本文研制开发一种能使激光跟踪测量系统在动态条件下连续测量的角度自动校正装置,可全面地对激光跟踪测量系统的角度测量精度进行校正和误差补偿^[3-4]。

2 激光跟踪测量系统测角误差分析

2.1 激光跟踪测量系统工作原理

激光跟踪测量系统主要由跟踪探测、跟踪转

镜和伺服控制 3 部分组成。跟踪探测部分能根据瞄准偏差信号决定目标运动速度的方向和大小,包括光电探测器(如 PSD、CCD 或四象限光电管)、光学部分(如激光干涉仪、目标反射镜(角锥棱镜、猫眼反射镜)、跟踪反射镜、分光棱镜、1/4 波片等)及信号处理系统。跟踪转镜能部分保证固定于其上的反射镜绕两个互相垂直并相交的轴旋转,为高速、高精度、稳定跟踪提供保证,其结构形式、刚度、转动惯量、摩擦力矩、结构稳定性和平衡性都将影响整个系统的测量精度和响应特性。伺服控制部分是跟踪瞄准系统的控制环节,不仅影响整个系统稳定性,而且直接关系到系统的跟踪精度和响应速度。

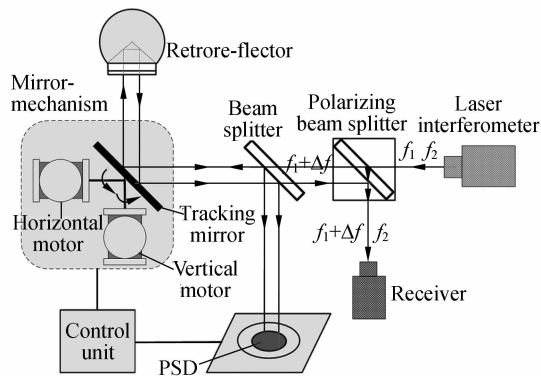


图 1 激光跟踪测量系统的工作原理

Fig. 1 Working principle of laser tracking system

如图 1 所示,激光跟踪测量系统基本工作原理是:由激光干涉仪发射出的测量光束,经分光镜到达跟踪转镜之后,由跟踪转镜反射到目标反射镜中心,由目标反射镜中心入射的光线按原光路返回,到达分光镜后一部分激光束被反射到光电位置检测器,另一部分光束进入干涉系统与参考光束汇合进行位移测量。进入光电检测器的光束用于实现对目标反射镜的跟踪,平衡状态时位置检测器输出信号为零,此时控制系统没有信号输出;当目标反射镜运动时,返回光束发生平移,在位置检测器上产生偏差信号。该信号输入到跟踪控制系统,驱动电机带动转镜围绕反射基点旋转,从而改变进入目标反射镜的光束方向,使偏差信号减小,实现对目标反射镜的跟踪^[5-6]。

2.2 误差分析

激光跟踪测量系统至目标反射器的距离通过

激光干涉仪测得,伺服电机驱动两个角度光码盘转动,给出水平角和垂直角。激光跟踪测量系统采用球坐标,如图2所示,目标空间坐标由式(1)给出:

$$\begin{cases} x=r\sin\beta\cos\alpha \\ y=r\sin\beta\sin\alpha \\ z=r\cos\beta \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,在激光跟踪测量系统测量精度影响因素中,测角误差最为显著,而跟踪系统部件之间几何位置不正确是测角误差的重要来源,理想的几何关系应满足以下要求^[7]:

(1) 水平伺服电机轴线和垂直电机轴线正交,且与跟踪转镜旋转中心交于一点,该点位于跟踪转镜镜面上,作为激光跟踪测量系统的坐标原点。

(2) 水平角度光码盘与水平伺服电机轴线正交,垂直角度光码盘与垂直伺服电机轴线正交,且水平和垂直电机轴线分别通过水平和垂直角度光码盘中心。

由于加工和装配、运输、温度变化、变形等误差因素的影响,实际几何位置难以满足上述理想关系,于是产生以下角度几何测量误差。几何误差属系统误差,可以通过角度校正装置消除其影响。

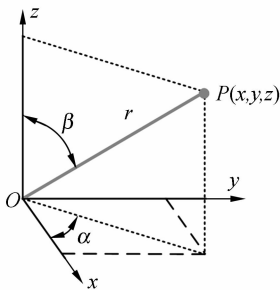


图2 激光跟踪测量系统球坐标系

Fig. 2 Spherical coordinate of laser tracking system

3 角度自动校正装置设计

3.1 角锥棱镜

目标反射镜是激光跟踪测量系统的重要部件,目前用于激光跟踪系统的目标反射镜主要有角锥棱镜逆反射器、猫眼逆反射器两种^[8-9]。Faro SI型激光跟踪测量系统使用的是角锥棱镜逆反

射器,本文主要对角锥棱镜进行研究。

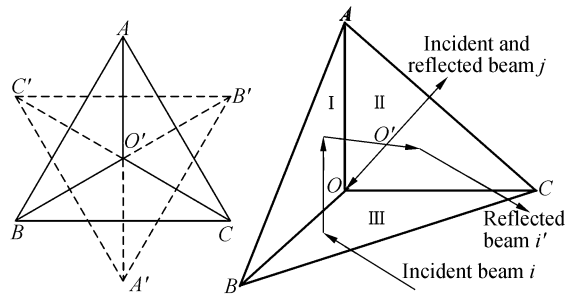


图3 角锥棱镜

Fig. 3 Corner cube retro-reflector

如图3所示,角锥棱镜的几何形状是3个二面角都是直角的三棱锥,从入射面以任意方向入射的光线,经过3次反射后,出射光将与入射光平行,入射至角锥棱镜中心的光则沿原路返回,当棱镜绕通过其顶点的反射面法线转动时,出射光线不变。设角锥棱镜的三边 $OA=OB=OC=a$, 原点 O 到面 ABC 的垂足 O' 的距离为 $d=a/\sqrt{3}$, 当入射光线在面 ABC 入射时,其出射光线为倒置的面 $A'B'C'$, 通过光线的孔径为面 ABC 的内切圆。因圆心为 O' , 半径 $r=a/\sqrt{6}$, 故其最大接收角为:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r}{d}\right) = 35.26^\circ \quad (2)$$

当入射角 $> 35.26^\circ$ 时,总有一部分光线在一个或两个反射面折射,造成光能损失增大,严重影响了激光跟踪测量系统的测量精度^[10]。

为解决激光跟踪测量系统在动态测量中受目标反射器接收角度范围限制而无法连续测量的问题,本文研制开发了一种能使激光跟踪测量系统在动态条件下连续测量的角度自动校正装置。

3.2 自动校正装置设计

本文所研制的激光跟踪测量系统角度自动校正装置具有以下主要功能:角锥棱镜的方位角可自动调整,保证角锥棱镜中心始终对准激光跟踪测量系统的光束方向,使激光跟踪测量系统在动态条件下连续工作。针对激光跟踪测量系统在动态条件下连续测量的要求,考虑了利用高精度仪器对其进行校正的可行性。

角度自动校正装置(如图4所示)的工作原理是:首先把自动跟踪装置固联在三坐标测量机上,让三坐标测量机以精密圆形导轨为圆心做标

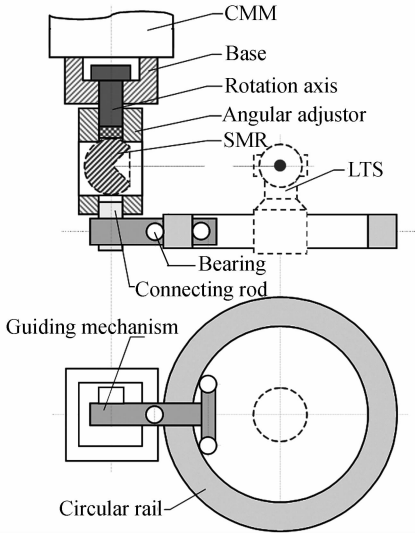


图 4 角度自动校正装置

Fig. 4 Angular automatic calibration mechanism

准圆周运动。角度方位调节机构在三坐标测量的带动下围绕着精密圆形导轨做圆周运动。角度方位调节机构内带有磁性卡槽,可以将角锥棱镜可靠地吸附在磁性座上。导向机构在连接杆的带动下在圆形导轨上滑动,同时驱动角度方位调节机构向相反的运动方向转动,并不断地调节角锥棱镜的方位角,使角锥棱镜中心始终对准激光跟踪测量系统的光束方向,从而实现激光跟踪测量系统在动态条件下的连续测量,为下一步激光跟踪测量系统动态测量中的角度误差补偿提供保障。

3.3 误差补偿

对公式(1)微分,可得则测角误差与坐标误差之间的关系为^[11-12]:

$$\begin{cases} dx = r \cos \beta \sin \alpha \cdot \Delta \beta + r \sin \beta \cos \alpha \cdot \Delta \alpha \\ dy = r \cos \beta \cos \alpha \cdot \Delta \beta - r \sin \beta \sin \alpha \cdot \Delta \alpha \\ dz = -r \sin \beta \cdot \Delta \beta \end{cases} \quad (3)$$

如图 5 所示,当激光跟踪测量系统在 xy 平面内做标准圆周运动时,即 $\beta = 90^\circ$ 时,水平角修正量 $\Delta \alpha$ 可表示为:

$$\Delta \alpha = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{2r} \right), \quad (4)$$

式中, $\Delta x = x_i - x_j$, $\Delta y = y_i - y_j$ 。

同理,激光跟踪测量系统垂直角修正量可表示为:

$$\Delta \beta = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}}{2r} \right), \quad (5)$$

式中, $\Delta z = z_i - z_j$ 。

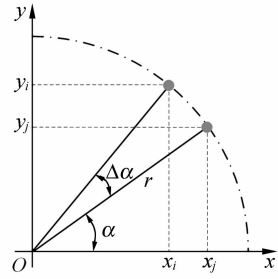


图 5 水平角测量误差

Fig. 5 Measuring error of horizontal angle

由公式(3)、(4)和(5)可得激光跟踪测量系统经过角度误差修正后,第 i 点至第 j 点距离为:

$$d_{ij} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (6)$$

式中, $X = [(x_i - x_j) + (dx_i - dx_j)]^2$, $Y = [(y_i - y_j) + (dy_i - dy_j)]^2$, $Z = [(z_i - z_j) + (dz_i - dz_j)]^2$ 。

4 实验

研制的激光跟踪测量系统角度自动校正装置的实物照片如图 6 所示。本文利用海克斯康 G9128 三坐标测量机和角度自动校正装置对 FARO SI 型激光跟踪系统进行了水平角和垂直角度误差补偿实验。实验中,首先将 1.67 cm 角锥棱镜吸附在角度方位调节机构的磁性座上,让三坐标测量机围绕着精密圆形导轨做圆周运动,且每次转动的幅度为 1° 。激光跟踪测量系统实时的测量角锥棱镜的坐标位置,通过式(4)和(5)计算出实际转过的角度值,然后与标准值进行比较,求出测量误差,最后按式(6)对其进行误差补偿和修正。



图 6 角度误差补偿试验装置

Fig. 6 Angular error compensation experiment mechanism

FARO SI型激光跟踪系统的水平角测量 $0\sim 270^\circ$,垂直角测量 $0\sim 130^\circ$ 。精密圆形导轨的半径为 0.376 m ,三坐标测量机以精密圆形导轨做圆周运动,且每次转动的幅度为 1° 。在水平角度方向上一共测量 270 个点,垂直角度方向测量 130 个点,其测量结果如图7和图8所示,其中实线表示的是用角度自动校正装置补偿后的测量结果,虚线表示的是补偿前的测量结果。由图可知,在水平方向,补偿前的水平角测量最大误差为 $|\delta_\alpha|_{\max} = 34.69\ \mu\text{m}$,补偿后其测量误差减少到 $9.71\ \mu\text{m}$ 。而在垂直角方向,补偿前垂直角测量最大误差由 $|\delta_\beta|_{\max} = 35.43\ \mu\text{m}$,变为补偿后的 $10.03\ \mu\text{m}$ 。实验结果充分说明,所研制的角度自动校正装置能有效地修正激光跟踪测量系统角度测量误差,从而提高系统的测量精度。

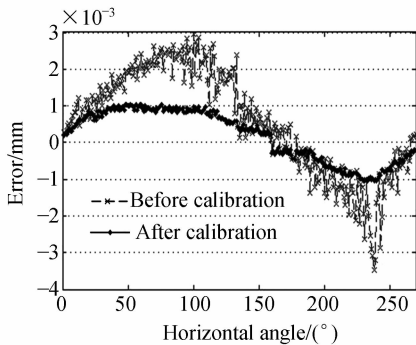


图7 水平角测量误差曲线

Fig. 7 Measured results of horizontal angle

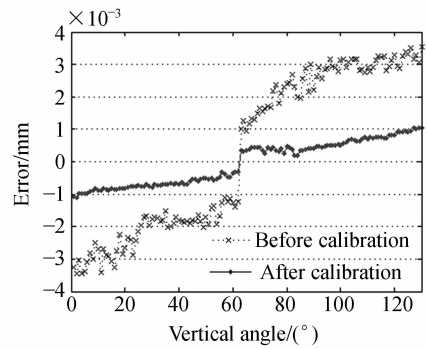


图8 垂直角测量误差曲线

Fig. 8 Measured results of vertical angle

5 结论

本文研制开发了一种能使激光跟踪测量系统在动态条件下连续测量的角度自动校正装置,有效地解决了激光跟踪测量系统在动态测量中受角锥棱镜逆反射器接收角度范围限制而无法连续测量的问题。实验结果证明,所研制的角度自动校正装置使激光跟踪测量系统水平角测量误差由 $34.69\ \mu\text{m}$ 减小到 $9.71\ \mu\text{m}$,垂直角测量误差由 $35.43\ \mu\text{m}$ 减小到 $10.03\ \mu\text{m}$,从而有效地修正了激光跟踪测量系统角度测量误差,提高了系统的测量精度。本研究为更好地校正和补偿激光跟踪测量系统测量误差提供技术支持,为使该系统向动态、高精度测量方向发展打下了基础。

参考文献:

- [1] LIU W L, OUYANG J F, QU X H, *et al.*. Misalignment error calibration of faro retro probe for laser tracker system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(5):281-283.
- [2] 刘万里, 曲兴华, 闫勇刚. 激光跟踪测量系统的建模与仿真[J]. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(3):50-53.
LIU W L, QU X H, YAN Y G. Modeling and simulation of laser tracking system [J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2007, 20(3):50-53. (in Chinese)
- [3] OUYANG J F, LIU W L, YAN Y G, *et al.*. Angular error calibration of laser tracker system [J]. *SPIE*, 2006, 6344:6344-6348.
- [4] OUYANG J F, LIANG Z Y, ZHANG H X, *et al.*. Research of measuring accuracy of laser tracker system [J]. *SPIE*, 2006, 6280:6280-6286.
- [5] CHEN X R, CAI P, SHI W K. Dynamic measuring the position of a moving object based on laser tracking system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(6):777-780.
- [6] OSAWA S, TAKATSUJI T, HONG J, *et al.*. Evaluation of the performance of a novel laser tracker used for coordinate measurements [J]. *SPIE*, 2001, 4401:127-135.
- [7] LIN C C, HER J L. Angular errors measurement of a rotary table by a laser tracker system [J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series C*, 2004, 25

(2): 185-188.

- [8] 王为农, 苏永昌, 任国营. 激光跟踪仪的动态特性研究 [J]. 计量学报, 2007, 28(1): 34-36.
WANG W N, SU Y CH, REN G Y. A study on dynamic character of laser tracker [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, 28(1): 34-36. (in Chinese)
- [9] 周维虎, 费业泰, 李百源, 等. 激光跟踪仪几何误差修正 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1): 56-63.
ZHOU W H, FEI Y T, LI B Y, *et al.*. The correction of geometric error for laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(1): 56-63. (in Chinese)
- [10] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 43-47.
SHAO B, SUN L N, QU D S, *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 43-47. (in Chinese)
- [11] 王向军, 韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析 [J]. 光学 精密工程, 2005, 13(6): 686-690.
WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 686-690. (in Chinese)
- [12] 颜明, 张军安, 吴佐华. 静电陀螺仪对准误差产生的系统伺服跟随动误差分析 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 853-857.
YAN M, ZHANG J A, WU Z H. Analysis of system servo following error caused by alignment error of ESG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 853-857. (in Chinese)

作者简介: 刘万里(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究. E-mail: liuwanli218@126.com
曲兴华(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究. E-mail: quxinghua@tju.edu.cn
欧阳健飞(1962—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究. E-mail: ouyang@hpu.edu.cn

● 下期预告

一种对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法

张红鑫, 卢振武, 刘 华, 孙 强, 王 建

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

提出了一种对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法, 通过对同一个小眼追迹多束相互倾斜的光线来分析不同小眼对感杆束上光强分布的影响, 避免了在建模过程中大量计算各个小眼的三维坐标, 使整个建模过程大大简化. 文中利用这种方法在 ZEMAX 软件中进行了实例模拟, 对同一个小眼追迹 6 束光线, 相对应探测器上得到的归一化光强分别为 0.782 3、0.784 7、0.773 3、0.480 5、0.109 5、0.001 93, 分析结果证明这种方法能够对重叠型复眼进行准确的模拟与分析.