

旋转激光平面测角精度测试方法研究

熊 芝, 郝继贵, 耿 磊, 孙 博, 杨学友, 叶声华
(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:空间测量定位系统是一种基于旋转激光平面进行角度交汇定位的网络测量系统, 为了对系统测角性能进行评估, 提出了一种测角精度测试方法。测试装置以多齿分度台作为角度基准对水平角精度进行检定, 垂直角精度则采用解析方法进行估计。首先利用多面棱体、平行光管以及调整机构调整分度台旋转轴和发射站旋转轴平行, 再利用千分表调整两旋转轴径向距离, 保证两轴的同轴度在 0.05 mm 以内, 轴线夹角在 10" 以内。实验结果表明, 系统水平测角精度高于 3", 最佳垂直角精度可达 1"。该测试方法有效可行。

关键词:网络测量系统; 角度交汇; 测试装置; 精度

中图分类号: TB92; TP202⁺.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.004

Verification of angle measuring accuracy for rotating planar laser beams

XIONG Zhi, ZHU Ji-gui, GENG Lei, SUN Bo, YANG Xue-you, YE Sheng-hua

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

Abstract: Workspace Measurement and Positioning System is a type of network measurement system using rotating planar laser beams to realize positioning based on the principle of angle intersection. In order to estimate the system angle measuring performance, a testing method is proposed. In the testing device, a multi-tooth division table is used to establish the reference angle to verify the horizontal angle precision, while the vertical angle precision is evaluated through analytic method. Polygon, collimator and other adjusting mechanisms are used to make the rotation axes of division table and transmitter parallel. Dial indicator is utilized to adjust the radial distance of the two axes. Concentricity of the two axes is within 0.05 mm and inclination angle is less than 10". The experiment results show that the system horizontal angle accuracy is better than 3", and the optimal vertical angle accuracy can be 1". The testing method is effective and feasible.

Key words: network measurement system; angle intersection; testing device; accuracy

1 引言

20 世纪 90 年代, 室内 GPS 在美国航空部门的测量需求下应运而生, 该系统可应用于航空自动化装配过程、计算机 CAD 模型比对以及在线质量控制和检验等。英国 Bath 大学和德国 Karlsruhe 大学大地测量研究所对室内 GPS 进行了大量的静态测量性能评估试验以及动态跟踪应用研究。国内部分高校(如天津大学、西安交通大学、华中科技大学等)

和研究机构也对该系统进行了大量理论研究和样机实验, 国内航空制造业正在积极探索其具体应用模

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 50735003); 天津市科技支撑项目(No. 08ZCGYGX11800); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(No. 09JCZDJC26700)资助。

作者简介:熊 芝(1985 -), 女, 博士研究生, 研究方向为激光及光电检测。E-mail: roth0611@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-08-23

式,室内 GPS 是当今大尺寸测量领域研究热点^[1-4]。

室内 GPS 利用多个旋转激光平面交汇实现三维坐标的测量,具有测量范围广、测量精度高、可多任务并行等优点。该系统由多个发射站组成,每个发射站旋转部位装有两个固定的线状激光器,发射站和接收器之间单向通讯形成角度测量子系统,当测量场中至少有 2 个发射站时即可实现定位^[5]。作为角度交汇定位测量系统,发射站测角精度是实现高精密坐标测量的基础,对测角精度的研究是分析系统定位误差的第一步。为了对发射站测角精度进行定量检定,本文提出了一种基于自准直仪和多面棱体标准量规的测角精度测试方法,并以天津大学精仪学院国家重点实验室自主研发的空间测量定位系统(workspace measuring and positioning system, wMPS)为实验平台,对发射站测角精度进行了测试。

2 测角原理

在 wMPS 测量系统中,发射站和接收器构成一对角度测量子系统。发射站实物图如图 1 所示。发射站固定部位的同步光脉冲用来定义系统的零时刻,位于发射站旋转头的两激光平面在空间实现扫描,接收器将扫描激光平面脉冲信号转化为时间信息,通过发射站结构参数的传递将水平旋转角度转化为空间角度。

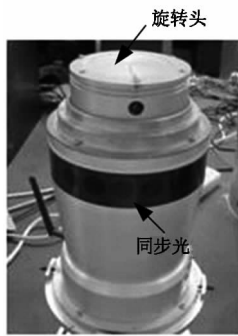


图1 发射站

在发射站局部坐标系中,旋转轴为 Z 轴,第一个光平面和旋转轴的交点为坐标系原点,该光平面上过原点且与旋转轴垂直的方向为 X 轴,根据右手定则确定 Y 轴,如图 2 所示。 ϕ_1, ϕ_2 为两个光平面与 Z 轴的夹角, θ_{off} 为两个光平面的夹角。将发射器视为静止参考物,发射器顺时针转动时,被测点绕旋转轴逆时针旋转。设 P 为被测点初始位置, P_1 为被测点转至第一个光平面所在位置,水平旋转角为 θ_1 , P_2 为被测点转至第二个光平面所在位置,水平旋转角为 θ_2 。

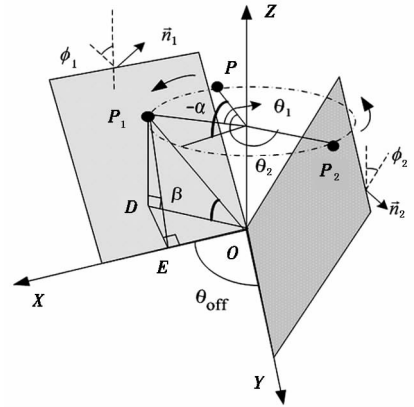


图2 wMPS 发射站测角模型

定义被测点在局部坐标系中的水平角(水平投影顺时针旋转至 X 轴正向的角度,范围为 $[0, 2\pi)$)为 α ,垂直角(被测点方向矢量和水平面的夹角,范围为 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$)为 β 。

由图 2 所示几何关系可得:

$$\begin{cases} \sin(-\alpha - \theta_1) = \tan\phi_1 \tan\beta \\ \sin(\alpha + \theta_2 - \theta_{\text{off}}) = \tan\phi_2 \tan\beta \end{cases} \quad (1)$$

3 测试方法

3.1 测试装置

测试装置主要包括自准直仪、四面棱体、千分表以及手动分度台,如图 3 所示。自准直仪采用德国 TRIOPTICS 公司生产的 TriAngle 系列,由高分辨率的 CCD 传感器和配套的物镜管组合而成,测量精度为 $0.2''$ 。测试时将四面棱体放置在物镜前方用作反射镜,从 OptiAngle 数字化应用软件界面可读出四面棱体反射面和平行光束的倾斜角度,以平行光束作为基准,调整各轴线与平行光束垂直。千分表是日本三丰 513 - 401 系列千分表,最小刻度值为 $1 \mu\text{m}$,测量范围为 $0.14 \mu\text{m}$,精度为 $3 \mu\text{m}$ 。手动分度台型号为 DFT - 720A,用来建立角度基准,分度台最小分度值为 0.5° ,测角精度 $0.5''$,重复性精度为 $0.12''$ 。

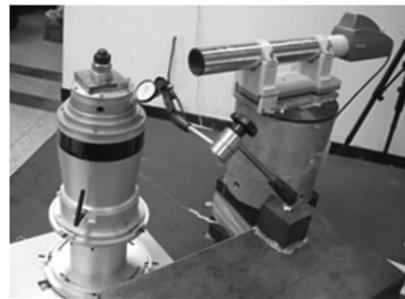


图3 水平角精度测试装置

3.2 测试步骤

测试步骤分为同轴度调整和角度对比测量。首先将四面棱体放置在旋转头顶端刚性黏结,以 90° 的间隔转动发射站旋转头,调整四面棱体相对于平行光管的俯仰,使四面棱体四个反射面均和平行光束垂直;其次固定发射站旋转头,将发射站和四面棱体视为一个刚体,旋转分度台,使刚体绕分度台轴线转动,用同样的方法调整刚体轴线和平行光束垂直,此时发射站旋转轴和分度台轴线平行;然后旋转分度台,根据千分表读数在发射站旋转头绕分度台轴线转动过程中的跳变,调整两轴线的径向距离;反复调整直到满足同轴度要求。

同轴度调整好之后,即进行角度对比测量,如图4所示。

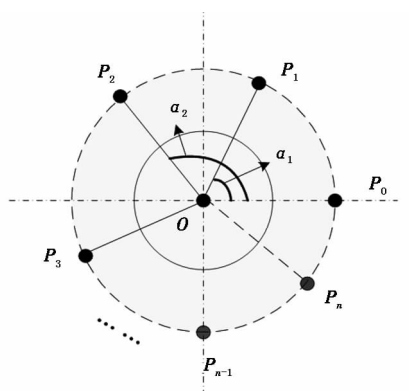


图4 角度对比测量示意图

O为分度台和发射站的旋转中心,接收器放置在固定的三角架上,以分度台为参考对象,在分度台零刻线位置锁定分度台,定义此时接收器的位置为 P_0 , P_n 为分度台每转动一个角度时,接收器相对分度台零位的位置。发射站在 P_n 处测量的角度减去 P_0 处的基准角度为发射站在 P_n 处的测量值。发射站测量值与分度台转动的标准值之差为测量误差。

4 实验及结果分析

4.1 水平角精度测试

实验前对发射站内参进行了标定,光平面倾角分别为 38° 和 -49° ,夹角为 89° 。实验中接收器放置在距离分度台10 m远的位置,接收器的高度位于近似水平面处。对同轴度调整结果为两轴的同轴度约为0.04 mm,两轴夹角约为 $10''$ 。定义往返测为一个测回,往测时分度台顺时针旋转,返测时分度台逆时针旋转,测量角度间隔为 10° ,旋转一周回到零位取首尾零位读数的平均值作为零位读数,单次测量误差 φ_i 为:

$$\varphi_i = \alpha_i - \alpha_0 - \alpha_{\text{标}} \quad (2)$$

其中, α_0 为发射站零位读数; α_i 为各受检点读数; $\alpha_{\text{标}}$ 为分度台标准角度值。表1所示为一个测回中各受检点测量误差。

表1 水平角精度测试结果

测回	点号	测量误差/角秒											
往测	1~12	0.0	-0.9	-1.7	-1.8	-1.3	-1.0	-0.2	-1.5	0.5	1.7	0.9	0.5
	13~24	0.7	-0.4	0.8	0.5	-0.2	-0.8	0.6	0.3	-1.3	-1.2	-0.8	0.4
	25~36	-1.0	-1.5	-0.9	-1.2	0.3	-1.0	0.1	-1.1	-1.4	-1.0	-1.6	0.4
返测	1~12	-1.0	0.1	-1.2	-0.1	-0.2	-1.2	-0.7	0.0	-0.6	0.1	0.3	0.7
	13~24	-0.5	1.5	0.2	0.9	0.5	0.7	1.1	-0.1	-0.9	-1.2	-0.4	-0.5
	25~36	-0.9	-0.1	-0.5	-0.9	-1.2	-0.6	-1.5	-2.1	-1.4	-1.3	-0.8	-0.7

定义测试精度为3倍的标准差^[6-7]:

$$\varepsilon_\alpha = 3 \times \sqrt{\frac{\sum \phi_i^2}{2n}} \quad (3)$$

式中:

$$\phi_i = \varphi_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (4)$$

其中, φ_i 为每个受检点的测量误差; n 为受检点数。

根据表1测量结果计算得 $\varepsilon_\alpha = 2.4''$ 。

4.2 垂直角精度估计

由式(1)可解得:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{-\tan \phi_2 \sin \theta_l - \tan \phi_l \sin(\theta_2 - \theta_{\text{off}})}{\tan \phi_2 \cos \theta_l - \tan \phi_l \cos(\theta_2 - \theta_{\text{off}})} \\ \beta = \arctan \left(\frac{\sin(-\theta_l - \alpha)}{\tan \phi_l} \right) = \arctan \left(\frac{\sin(\theta_2 + \alpha - \theta_{\text{off}})}{\tan \phi_2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)微分得:

$$d\beta = \frac{-\cos(-\theta_l - \alpha)(d\alpha + d\theta_l) - \tan \beta d\phi_l}{(1 + \tan^2 \beta) \tan \phi_l} \quad (6)$$

或:

$$d\beta = \frac{\cos(\theta_2 + \alpha - \theta_{\text{off}})(d\alpha + d\theta_2 - d\theta_{\text{off}}) - \tan \beta d\phi_2}{(1 + \tan^2 \beta) \tan \phi_2} \quad (7)$$

式(6)、式(7)均体现了水平角误差和垂直角误差之间的关系,此时应该根据实际的误差源分布情况,选择合适的计算公式计算垂直角,或者取两个垂直角的平均值作为估计。以式(7)为例说明垂直角不确定估计的方法,将式(7)扩展为协方差传播式^[8-9]:

$$\sigma^2 \beta = \frac{1 - \tan^2 \beta \tan^2 f_2}{((1 + \tan^2 \beta) \tan \phi_2)^2} (\sigma^2 \alpha + \sigma^2 \theta_2 + \sigma^2 \theta_{\text{off}}) + \frac{\tan^2 \beta}{((1 + \tan^2 \beta) \tan \phi_2)^2} \sigma^2 \phi_2 \quad (8)$$

根据实验得到的水平角标准差以及大量实验得到的误差项标准差对垂直角不确定度进行估计:

$$\sigma \beta = \sqrt{\frac{2.2 - 2.5 \tan^2 \beta}{(1 + \tan^2 \beta)}} \quad (9)$$

取3倍标准差作为精度估计,则:

$$\varepsilon_\beta = 3\sigma \beta = \sqrt{\frac{19.8 - 22.5 \tan^2 \beta}{(1 + \tan^2 \beta)}} \quad (10)$$

对 $[0^\circ, 40^\circ]$ 的垂直角范围进行不确定度估计,在上述各误差项的前提下,根据式(10)计算得 $\varepsilon_\beta = [0.9'', 4.5'']$,且垂直角测量误差的大小随着垂直角的增大而减小。因此在对垂直角精度或者垂直方向的误差控制要求较高时,应将被测点置于距水平面较远的位置。

4.3 调整误差分析

若发射站轴线和分度台轴线完全重合,则发射站局部坐标系绕旋转轴转动角度和分度台旋转角度一致。但实际调整过程存在一定的误差,并不能达到理想情况,两根轴线会有相互偏移或倾斜。当两轴轴心偏移时,设被测点(接收器)离分度台中心的距离为 R ,分度台转轴和发射站旋转轴的偏心距为 d ,分度台对应被测点的水平角为 θ ,如图5所示。

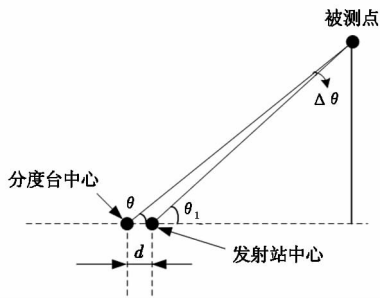


图5 偏心误差对实验结果的影响

分度台中心到被测点的向量为 $V_r = [R \cos \theta, R \sin \theta]$,则发射站旋转中心到被测点的向量为 $V_t = [R \cos \theta - d, R \sin \theta]$,因此发射站测量值和分度台标

准值之差为:

$$\Delta \theta = \arccos \left(\frac{V_r \cdot V_t}{|V_r| |V_t|} \right) = \arccos \left(\frac{R - d \cos \theta}{\sqrt{R^2 - 2Rd \cos \theta + d^2}} \right) \quad (11)$$

令 $d/R = A$,则:

$$\Delta \theta = \arccos \left(\frac{1 - A \cos \theta}{\sqrt{1 - 2A \cos \theta + A^2}} \right) \quad (12)$$

式(12)可以看出,接收器距离分度台中心越远,其偏心误差对实验结果的影响越小。实验中接收器放置在距离分度台10 m远的位置,若偏心距 $d = 0.04$ mm,则由于偏心距带来的误差最大为 $0.8''$ 。

当两轴之间存在倾斜,倾角 $\lambda = 10''$ 时,对位于10 m远的被测点,在不同高度时轴线倾斜对实验结果的影响进行了仿真,发现轴线倾斜的影响对被测点高度的变化很敏感,当高度为100 mm时,由于倾斜带来的比对误差最大值为 $0.2''$ 。因此将接收器放置在近似水平面的位置可忽略由于轴线倾斜带来的误差。

5 结论

本文设计了一套wMPS发射站测角精度测试装置。发射站和分度台旋转轴同轴度是影响检定结果的关键因素之一,为了减小同轴度调整误差对测试结果的影响,要求两轴的同心度在0.05 mm以内,且两轴的夹角小于 $10''$,接收器固定在近似水平面处。实验表明,目前wMPS单站水平测角精度优于 $3''$,而垂直测角精度受观测点所在位置的影响,最佳测量精度可达 $1''$ 。该实验结果验证了测角模型的合理性以及测试方法的有效可行。wMPS高精度的测角能力保证了该系统能在大尺度空间内实现精密坐标测量,作为一种新型的大尺度空间坐标测量系统,wMPS在航空航天、汽车船舶及工业测量等领域将具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] C Depenthal. Path tracking with IGPS [C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010.
- [2] J E Muelaner, Z Wang, J Jamshidi, et al. Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT) [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(3): 217 - 229.
- [3] Yang Linghui, Yang Xueyou, Lao Dabao, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of

- optical planes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6):1105-1109. (in Chinese)
- 杨凌辉, 杨学友, 劳达宝, 等. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6):1105-1109.
- [4] Xi'an Jiaotong University. A space positioning method based on dual rotating laser plan transmitter network[P]. Chinese Patent, No. 200810150383.5. (in Chinese)
- 西安交通大学. 基于双旋转激光平面发射机网络的空间定位方法: 中国, 200810150383.5[P].
- [5] Lao Dabao, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. Study on calibration technology of network laser scan space positioning system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6):1-6. (in Chinese)
- 劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 网络式激光扫描空间定位系统标定技术研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6):1-6.
- [6] Yang Jun, Qi Hongxing, Li Zhengwen. Testing method of repetition laser-aiming system [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6):673-677. (in Chinese)
- 杨俊, 亓洪兴, 李正文. 高重频激光瞄准系统精度测试方法研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(6):673-677.
- [7] Fei Yetai. Error method and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)
- 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] Liu Yichun, Guo Lihong, Guan Wencui, et al. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10):1823-1830. (in Chinese)
- 刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1823-1830.
- [9] Wan Shicheng, Xing Canfei, Li Hui, et al. Study on precision uncertainty in measurement [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(II):78-80. (in Chinese)
- 万事成, 邢灿飞, 李辉, 等. 测量精度与测量不确定度研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(II):78-80.