

文章编号 1004-924X(2011)04-0870-08

扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化

劳达宝,杨学友,郝继贵,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:介绍了一种基于旋转平面激光单站测角、多站交汇的坐标测量系统,并对其校准方法进行了优化。分析了系统的测角方式和多传感器交汇测量的特点,阐述了基于传统方法的单基站方位信息测量原理及系统结构,并提出了相应的单站结构参数和系统参数校准方法。针对转轴直线和光平面的特点,设计了配套附件并借助经纬仪标定了结构参数,同时通过接收器确定光平面初始位置来实现多站系统校准。为进一步完善校准技术,分析了影响校准精度的主要误差因素,基于此分别对结构参数标定方式和系统校准过程的控制加以改进,研究了一种系统一体化标定方法。实验显示,系统整体测量误差达到0.1 mm,证明了提出的校准方法切实可行,提高了校准精度。

关键词:大尺寸测量;坐标测量;激光测量法;校准;误差分析

中图分类号:TH72;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0870

Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system

LAO Da-bao, YANG Xue-you, ZHU Ji-gui, YE Sheng-hua

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

Abstract: On the basis of angle measurement by a rotating planar laser in the single station and intersection in the multi-station, a coordinate measuring system was introduced, and its calibration method was optimized. With analyzing its features of special angle measurement and multi-sensor intersection measurement, the principle of azimuth information measurement by the single station and the system structure were described, then the calibration methods for structure parameters of single station and system parameters were studied. According to the characteristics of a rotating shaft and a laser plane, structure parameters were calibrated by theodolites through designed corresponding accessories, and the system calibration was realized by determining the laser planes in the initial place by using a receiver. In order to perfect the calibration technology, the main error factors affecting the calibration accuracy were analyzed, the calibration methods of structure parameters and the process of system calibration were modified. An integrative calibration method for the system was proposed. Experiments show that the measuring accuracy of the system has reached 0.1 mm, which proves the calibration

收稿日期:2010-07-30;修订日期:2010-09-29.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 50735003);天津市自然科学基金资助项目(No. 09JJCZDJ26900);天津市科技支撑计划重点项目(No. 08ZCGYGX11800)

method is feasible, and can improve the calibration accuracy.

Key words: large-scale measurement; coordinate measurement; laser measuring method; calibration; error analysis

1 引言

随着科学技术的快速发展,对先进制造技术的要求越来越高,大尺寸、超大尺寸设备的制造技术尤其令人关注。大型生产设备的制造均对自动化、智能化、柔性化有很高的要求,而它们的实现与高精度、高效率、自动化的测量技术和设备密切相关。目前工业现场常用的测量设备有三坐标测量机,激光跟踪仪测量系统,光电经纬仪测量系统,数字摄影测量系统以及关节臂全站仪等^[1-2]。

根据测量原理来分类,上述仪器主要分为正交和非正交两大类,而非正交测量系统由于其简便、可移动、非接触等优点而应用广泛。非正交测量系统通过角度、距离的测量来实现坐标测量,比较典型的是激光跟踪仪采用距离和角度测量相结合,而经纬仪^[3-4]、双目视觉传感器^[5]采用角度交汇。可见,空间角度交汇测量在大尺寸测量中具有举足轻重的作用。

另一方面,校准技术是测量仪器的基础,也是其核心技术。一般而言,基于空间角度交汇测量的系统由两个或两个以上基站组成,由基站实现目标方位信息的测量,由多站交汇确定坐标。相应的基站结构参数校准结果影响目标点方位信息测量精度,系统参数校准结果影响系统交汇精度。因此,研究高效、高精度的校准技术对系统整体性能的提高至关重要^[6-8]。

分析现有的基于角度传感为基础的可见交汇测量方法,其核心问题是空间角度的自动高效测量,以及测量精度的提高^[9]。为此,本文提出了一种基于空间前方角度交汇的测量系统,与其他系统不同的是该系统是通过旋转平面激光扫描被测空间来实现自动测角的。鉴于校准技术对于测量系统的重要性,本文重点研究其基站结构参数以及系统参数的校准方法。首先参照现有类似系统

的工作原理及其校准方法,结合本系统的基站,基于旋转激光平面实现扫描角测量的原理,采用现有交汇测量的方法,验证了系统实现测量的几何基础,及相应的校准方法。在此基础上,重点分析了校准过程中的误差因素,修正了测量模型,并进一步完善校准方法,从而提高校准效率,减低校准误差。

2 系统原理

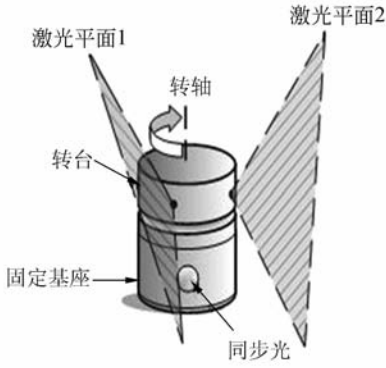
系统硬件主要由两个(或以上)发射站和接收器组成,将接收器安放在被测物上,可随时接收每个发射站的两束旋转平面激光和同步光信号,即时获得激光平面扫描时间,分别计算转换为自身相对于各站的方位信息,由前方交汇原理测出接收器点坐标。其测量原理与传统交汇测量仪器类似,所不同的是其单站自动化快速测角方式。

发射站的结构示意图如图1(a)所示,实物图如图1(b)所示。发射站由两大部分组成:固定基座和转台。其中固定基座安置了电源、电机及其控制器和同步光发射模块(脉冲激光器及其驱动),电机通过轴系与转台连接并带动其均匀转动;转台上主要固定了两个成 90° 夹角水平放置的发射可见平面激光的激光器,它由无线供电模块实现供电并使其发出的两束激光平面与转轴夹角大约为 30° ,两光平面夹角约为 60° 。

基于以上结构,单个基站的测角原理如下:发射站工作时,电机带动转台高速旋转,至每转的某一位置时触发同步光,此时接收器接收同步光信号,记录该时刻作为初始时刻 t_0 ,则此时平面激光的位置为初始位置(当发射站固定时,初始位置不变)。而当两激光平面扫过接收器时,同样记录下两个时刻 t_1 和 t_2 。如图2所示,结合转速 ω 从而获得激光平面扫描角 θ_1 和 θ_2 :

$$\begin{cases} \theta_1 = \omega \times (t_1 - t_0) \\ \theta_2 = \omega \times (t_2 - t_0) \end{cases}, \quad (1)$$

发射站测角原理如下:首先建立发射站坐标



(a)示意图

(a) Schematic diagram



(b)实物图

(b) Implementation

图 1 发射站结构图

Fig. 1 Structure of transmitter

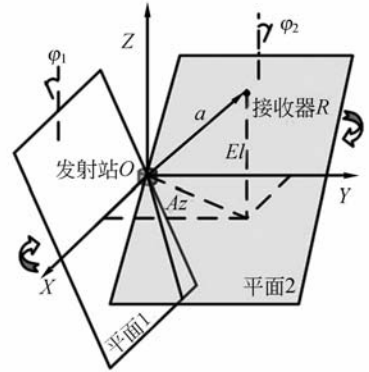


图 3 发射站坐标系

Fig. 3 Coordinate system of transmitter

与转轴夹角 φ_1 和 φ_2 , 推导出水平垂直角公式:

$$\begin{cases} Az = \arctan\left(\frac{\sin \theta_1 \tan \varphi_2 - \sin(\theta_2 - \theta_{\text{off}}) \tan \varphi_1}{\cos \theta_1 \tan \varphi_2 - \cos(\theta_2 - \theta_{\text{off}}) \tan \varphi_1}\right) \\ El = \arctan\left(\frac{\sin(\theta_1 - Az)}{\tan \varphi_1}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 水平角 Az 为发射站原点与接收器连线 a 在 XOY 投影线与 X 轴夹角, 垂直角 El 为 a 与 XOY 夹角。

至此, 接收器相对于单个基站的方位信息已获得。确定发射基站之间的空间关系后, 即可将各基站的角度测量信息统一, 根据交汇测量原理即可实现接收器坐标测量, 经传递实现被测物点位置的测量。

3 系统校准

由式(2)可知, 发射站实现方位角测量需要确定以下参数: 光平面与转轴夹角 φ_1, φ_2 和两光平面水平夹角 θ_{off} 。鉴于激光平面与转轴的虚拟性, 直接测量这些参数较困难, 可以利用辅助仪器分别测量转轴直线方程和光平面方程, 再由方程相交得出。

根据传统交汇测量仪器(如经纬仪)测量原理, 除实现水平垂直角测量外, 测量前还需通过系统定向建立两站之间空间关系^[10]。由前述系统原理分析可知, 只要在同一坐标系下获取各基站的原点坐标, 以及各站激光平面在初始位置的状态, 就可关联各基站坐标系。

由于 φ_1, φ_2 和 θ_{off} 在基站工作过程中是固定不变的, 而基站原点坐标可由转轴直线方程和光

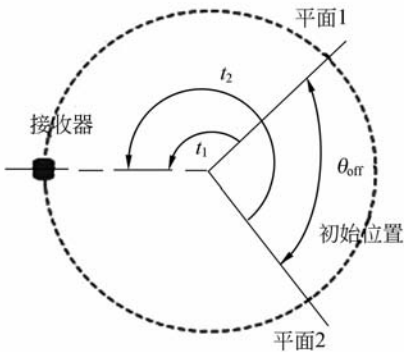


图 2 光平面扫描角

Fig. 2 Scanning angles of laser plane

系, 如图 3 所示, 以两光平面与转轴交点为原点, 转轴为 Z 轴, 以初始位置光平面 1 与 XOY 交线为 X 轴, 再由右手法则确定 Y 轴。结合两光平面与 XOY 交线夹角 θ_{off} , 以及图 2 中所示的两平面

平面方程相交获得。因此,只要在同一坐标系下测出转轴直线方程和在初始位置获得光平面方程,即可校准所有参数。校准方法及步骤如下:

(1)采用经纬仪校准本系统,整个校准过程中将其固定在合适的位置。

(2)利用经纬仪测量转轴。如图 4 所示,在转台上安装一靶标,在靶标上不同高度处放置靶标球。将转台旋转至不同位置分别测量靶标球坐标,根据每个靶标球的运动轨迹在不同高度获得与转轴垂直的圆,由其圆心拟合转轴直线方程。

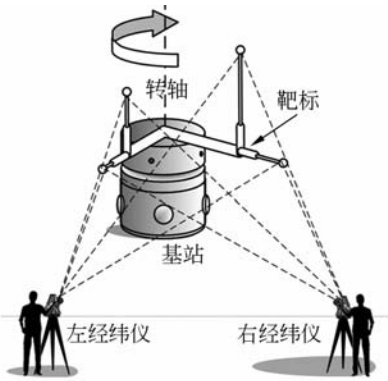


图 4 转轴校准

Fig. 4 Calibration of rotating shaft

(3)确定光平面初始位置。如图 2 所示,启动发射站,当将接收器固定在空间中某一位置,此时 t_1 为 0。停止电机转动,打开扫描激光器,将光平面 1 旋转至接收器感光元器件,此时光平面处于初始位置。

(4)初始位置光平面标定。由步骤(3)确定初始位置,将转台固定。如图 5,设计平面纸靶,在纸靶上打印横线,光平面在靶面上形成光条,与横

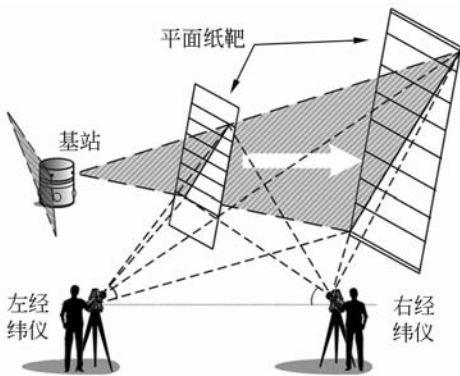


图 5 光平面校准

Fig. 5 Calibration of laser plane

线交点即为光平面上点,利用经纬仪测量不同位置的多个交点坐标,即可拟合出光平面方程。

4 误差分析及优化设计

上文根据传统交汇测量仪器的测量原理,分析了本系统测量的几何基础,并对系统校准技术进行了研究,实现了测量。但由于其独特的结构和单站测角方式,直接套用现有原理和简单校准方式将造成测量误差较大,因此,本文在前面研究的基础上,对其测量和校准主要误差来源进行了分析,从而分别对测量方式和校准方法进行了有效改进,提高了系统测量的精度。

4.1 误差分析

(1) 转轴与两光平面不交于同一点。式(2)中,水平垂直角计算公式是假定转轴与两激光平面交于同一点。实际上,这很难由机械加工装配保证。因此,由基站两光平面测出接收器水平垂直角存在误差。

(2) 激光平面初始位置的判定。采用标定步骤 3)中的方法确定初始位置时,调整接收器位置处于 t_1 为 0 后,较难将光平面 1 打在接收器感光元器件中心上。若初始位置的确定存在误差,必定对系统基站之间空间关系的校准带来误差。

4.2 测量及校准方法优化

以上两点误差来源,实际上分别造成了单站测量方位角信息误差以及系统交汇误差,而这两方面是整个系统的基础,因此,需对前面所述测量和校准方法加以改进。对于接收器方位信息的测量,结合发射站的结构和原理来看,实质上是获得两个激光平面分别旋转经过接收器时的状态,据此确定基站与接收器之间的空间位置关系。将接收器看作理想点,则此时接收器为该状态平面上一点。只要分别求得各基站各平面经过接收器时的方程,多个平面相交即为接收器点坐标。测量原理如图 6 所示。

设发射站转速为 ω ,两激光扇面从初始位置绕转轴旋转至接收器点,分别用时 t_1 和 t_2 ,由接收器计时测得。在发射基站坐标系下,光平面经过接收器时平面方程为:

$$\begin{cases} f(p_1) = f_0(p_1)\delta(\theta_1) \\ f(p_2) = f_0(p_2)\delta(\theta_2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\delta(\theta_1), \delta(\theta_2)$ 为关联函数,只与 θ_1, θ_2 有关, θ_1

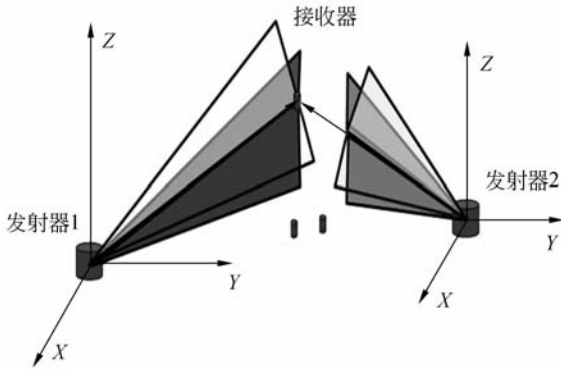


图 6 交汇测量原理图

Fig. 6 Principle of intersection measurement

$=\omega t_1, \theta_2 = \omega t_2$ 为光平面从初始位置至接收器的旋转角, $f_0(p_1), f_0(p_2)$ 为初始位置激光扇面的平面方程, 式(3)中两平面相交所得直线代替水平垂直, 更准确地表征了接收器相对于发射基站的方位信息。将多个基站统一, 形成的多条直线相交, 交点即为接收器点坐标。

经过以上改进, 建立发射站坐标系时, 只需将基站原点改为转轴与平面 1 交点, 而 X 轴为平面 1 与 XOY 交线即可。以经纬仪坐标系为世界坐标系, 设发射基站坐标系到世界坐标系下的旋转平移矩阵为 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} , 则世界坐标系下初始位置光平面方程:

$$\begin{cases} f_{0w}(p_1) = \mathbf{R} \times f_0(p_1) + \mathbf{T} \\ f_{0w}(p_2) = \mathbf{R} \times f_0(p_2) + \mathbf{T} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $f_{0w}(p_1)$ 和 $f_{0w}(p_2)$ 包含了实现系统测量的所有参数信息。因此, 只需标定出每个基站的 $f_{0w}(p_1)$ 和 $f_{0w}(p_2)$, 即可实现系统的一体标定。

图 7 以某发射基站中平面 1 为例, 说明初始位置光平面校准方法。首先保证整个校准过程中世界坐标系不变, 当发射基站不在工作状态时, 采用辅助仪器由前述方法直接测得转轴直线方程。

在发射站激光平面所扫描空间布置 n 个接收器 $R_1 \sim R_n$, 计时测得光平面从初始位置扫描到各个接收器 R_i 的时间差 $t_i (i=1 \sim n)$, 同时辅助仪器测得接收器在世界坐标系下的精确坐标值 $R_i (x_i, y_i, z_i)$ 。

激光扇面从初始位置绕转轴旋转角度 $\theta_i = \omega t_i$ 后, 经过接收器 R_i 。虚拟时, 若将 R_i 绕转轴

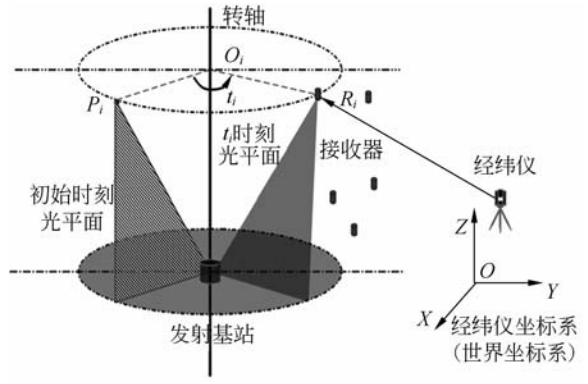


图 7 初始位置光平面坐标

图 7 Calibration of laser plane

反方向旋转 θ_i , 则通过已知的转轴直线方程和该点坐标得出接收器在初始位置平面上的点坐标 $P_i(x_i^p, y_i^p, z_i^p)$ 。相似的, 求出 n 个接收器 $R_1 \sim R_n$ 在初始位置光平面上的对应点 $P_1 \sim P_n$ 。利用这些点进行最小二乘拟合出世界坐标系下初始位置平面 1 方程 $f_{0w}(p_1)$ 。同理, 测出激光平面 2 方程 $f_{0w}(p_2)$ 。

类似的, 在同一世界坐标系下测出两个或两个以上发射站初始位置光平面, 再根据接收器所接收到的扫描角计算出各平面经过接收器时的方程, 此时各平面的交点即为接收器点坐标。

5 实验结果

以两个发射基站大约相距 1.8 m 水平放置搭建实验平台, 分别采用前面所述改进前后的方法对系统进行标定测量, 以此检验方法改进的效果。

首先采用经纬仪就优化前后两种方法分别对系统进行标定, 然后将接收器在距离基站约 4 m 的空间中移动 18 个位置, 分别采用本系统和经纬仪对其测量, 在本系统中用不同的标定结果和测量方法解算, 将数据配准后, 与经纬仪比较实验结果如表 1 和表 2 所示。由实验数据可以看出, 测量校准方法改进后, 系统测量精度有了很大的改善。

表 1 改进前测量结果

Tab.1 Measurement results without improvement

(Unit: mm)

| 点号 | 扫描平面激光测量系统 | | | 经纬仪 | | | 误差 | | | |
|----|------------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|---------|---------|-----------|
| | X_1 | Y_1 | Z_1 | x | y | z | X_1-x | Y_1-y | Z_1-z | |
| 1 | 2 399.446 | -1 874.115 | -127.814 | 2 399.297 | -1 873.873 | -127.735 | 0.149 | -0.242 | -0.079 | |
| 2 | 2 395.946 | -1 875.563 | -414.355 | 2 395.498 | -1 874.981 | -414.188 | 0.448 | -0.582 | -0.167 | |
| 3 | 2 269.44 | -3 184.878 | -22.0404 | 2 268.87 | -3 184.917 | -22.144 | 0.57 | 0.039 | 0.103 6 | |
| 4 | 2 268.157 | -3 185.048 | -352.678 | 2 267.647 | -3 185.363 | -352.834 | 0.51 | 0.315 | 0.156 | |
| 5 | 319.721 | -3 047.983 | -26.428 | 319.413 | -3 048.533 | -26.628 | 0.308 | 0.55 | 0.2 | |
| 6 | 321.697 | -3 048.823 | -379.2 | 321.381 | -3 049.288 | -379.154 | 0.316 | 0.465 | -0.046 | |
| 7 | 391.581 | -1 744.557 | -29.63 | 391.894 | -1 744.292 | -29.722 | -0.313 | -0.265 | 0.092 | |
| 8 | 393.118 | -1 742.713 | -342.613 | 393.707 | -1 742.46 | -342.762 | -0.589 | -0.253 | 0.149 | |
| 9 | 1 339.396 | -2 911.523 | -402.325 | 1 339.461 | -2 911.069 | -402.446 | -0.065 | -0.454 | 0.121 | |
| 10 | 1 314.472 | -3 065.412 | -222.826 | 1 315.041 | -3 065.469 | -222.767 | -0.569 | 0.057 | -0.059 | |
| 11 | 937.696 | -3 076.889 | -245.461 | 937.555 | -3 076.437 | -245.667 | 0.141 | -0.452 | 0.206 | |
| 12 | 921.384 | -3 243.459 | -496.654 | 921.685 | -3 243.961 | -496.464 | -0.301 | 0.502 | -0.19 | |
| 13 | 837.461 | -3 312.328 | -218.411 | 837.952 | -3 312.263 | -218.415 | -0.491 | -0.065 | 0.004 | |
| 14 | 414.31 | -2 822.678 | -420.473 | 414.135 | -2 822.188 | -420.414 | 0.175 | -0.49 | -0.059 | |
| 15 | 355.399 | -3 228.808 | -221.979 | 355.007 | -3 229.321 | -222.007 | 0.392 | 0.513 | 0.028 | |
| 16 | 311.478 | -2 358.992 | -449.528 | 310.891 | -2 359.542 | -449.386 | 0.587 | 0.55 | -0.142 | |
| 17 | 1 039.799 | -3 164.784 | -463.372 | 1 039.669 | -3 164.346 | -463.528 | 0.13 | -0.438 | 0.156 | |
| 18 | 1 318.04 | -3 156.824 | -311.673 | 1 318.106 | -3 157.02 | -311.82 | -0.066 | 0.196 | 0.147 | |
| | 最大误差 | | | -0.589 | | | -0.582 | | | 0.206 |
| | 误差(绝对值)均值 | | | 0.34 | | | 0.357 111 | | | 0.116 944 |
| | 误差标准差 | | | 0.389 465 | | | 0.409 932 | | | 0.130 087 |

表 2 改进后测量比对结果

Tab.2 Measurement results after improvement

(Unit: mm)

| 点号 | 扫描平面激光测量系统 | | | 经纬仪 | | | 误差 | | | |
|----|------------|-----------|----------|-----------|------------|----------|--------------|---------|---------|-----------|
| | X_2 | Y_2 | Z_2 | x | y | z | X_2-x | Y_2-y | Z_2-z | |
| 1 | 2 399.209 | -1 873.81 | -127.756 | 2 399.297 | -1 873.873 | -127.735 | -0.088 | 0.068 | -0.021 | |
| 2 | 2 395.39 | -1 874.96 | -414.123 | 2 395.498 | -1 874.981 | -414.188 | -0.108 | 0.023 | 0.065 | |
| 3 | 2 268.753 | -3 184.85 | -22.126 | 2 268.87 | -3 184.917 | -22.144 | -0.117 | 0.069 | 0.018 | |
| 4 | 2 267.757 | -3 185.4 | -352.78 | 2 267.647 | -3 185.363 | -352.834 | 0.11 | -0.04 | 0.054 | |
| 5 | 319.335 | -3 048.64 | -26.63 | 319.413 | -3 048.533 | -26.628 | -0.078 | -0.109 | -0.002 | |
| 6 | 321.351 | -3 049.37 | -379.176 | 321.381 | -3 049.288 | -379.154 | -0.03 | -0.083 | -0.022 | |
| 7 | 391.986 | -1 744.28 | -29.744 | 391.894 | -1 744.292 | -29.722 | 0.092 | 0.01 | -0.022 | |
| 8 | 393.828 | -1 742.51 | -342.711 | 393.707 | -1 742.46 | -342.762 | 0.121 | -0.05 | 0.051 | |
| 9 | 1 339.347 | -2 911.23 | -402.369 | 1 339.461 | -2 911.069 | -402.446 | -0.114 | -0.164 | 0.077 | |
| 10 | 1 314.938 | -3 065.61 | -222.726 | 1 315.041 | -3 065.469 | -222.767 | -0.103 | -0.145 | 0.041 | |
| 11 | 937.49 | -3 076.53 | -245.649 | 937.555 | -3 076.437 | -245.667 | -0.065 | -0.095 | 0.018 | |
| 12 | 921.78 | -3 244.06 | -496.498 | 921.685 | -3 243.961 | -496.464 | 0.095 | -0.096 | -0.034 | |
| 13 | 838.057 | -3 312.42 | -218.401 | 837.952 | -3 312.263 | -218.415 | 0.105 | -0.154 | 0.014 | |
| 14 | 414.095 | -2 822.09 | -420.386 | 414.135 | -2 822.188 | -420.414 | -0.04 | 0.096 | 0.028 | |
| 15 | 355.105 | -3 229.46 | -222.022 | 355.007 | -3 229.321 | -222.007 | 0.098 | -0.141 | -0.015 | |
| 16 | 310.904 | -2 359.38 | -449.43 | 310.891 | -2 359.542 | -449.386 | 0.013 | 0.162 | -0.044 | |
| 17 | 1 039.704 | -3 164.2 | -463.58 | 1 039.669 | -3 164.346 | -463.528 | 0.035 | 0.145 | -0.052 | |
| 18 | 1 318.132 | -3 156.91 | -311.814 | 1 318.106 | -3 157.02 | -311.82 | 0.026 | 0.108 | 0.006 | |
| | 最大误差 | | | 0.121 | | | -0.164 | | | 0.077 |
| | 误差(绝对值)均值 | | | 0.079 889 | | | 0.097 666 67 | | | 0.032 444 |
| | 误差标准差 | | | 0.089 545 | | | 0.109 028 | | | 0.038 37 |

6 结 论

本文研究了一种扫描平面激光坐标测量系统的测量原理及其校准方法。通过分析直接利用传统交汇测量原理对本系统出现的问题进行误差分

析,并结合本系统的特点,对测量和校准方法进行了优化。相对于原方法,本文提出的方法不需要在校准过程中进行繁琐的精确调整,提高了效率。实验表明,方法的改进大大提高了系统的测量精度,其由优化前的约 0.5 mm 提高到了 0.1 mm 左右。

参考文献:

- [1] 李广云. 非正交系标测量系统原理及进展[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(2): 4-10.
LI G Y. Principle and developing trend of non-orthogonal coordinate systems [J]. *Journal of Geomatics*, 2003, 28(1): 4-10. (in Chinese)
- [2] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增): 1-5.
ZHANG G X. Development orientations of coordinate measuring techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(supp.): 1-5. (in Chinese)
- [3] 赵立荣, 柳玉晗, 朱玮, 等. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2786-2793.
ZHAO L R, LIU Y H, ZHU W, *et al.*. Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2786-2793. (in Chinese)
- [4] 王晋疆, 金素坤, 邸旭, 等. 经纬仪测量系统在工业测量中的应用[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 53-55.
WANG J J, JIN S K, DI X, *et al.*. Application of theodolite Measuring system in industrial measurement [J]. *Opti-Electronic Engineering*, 2003, 30(1): 53-55. (in Chinese)
- [5] 刘立欣, 刘亦菲, 张永刚. 条带式弹道像机交汇测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增): 234-235.
LIU L X, LIU Y F, ZHANG Y G. Intersection measuring system of trajectory camera with long narrow photosensitive surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(supp.): 234-235. (in Chinese)
- [6] 周富强, 张广军, 江洁, 等. 现场双经纬仪三维坐标测量系统[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 165-169.
ZHOU F Q, ZHANG G J, JIANG J, *et al.*. Three-dimensional coordinate measuring system with binocular theodolites on site [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(1): 165-169. (in Chinese)
- [7] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1439-1444.
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [8] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [9] 张滋黎, 郝继贵, 周虎, 等. 一种新型自动结果经纬仪引导跟踪方法[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 1-7.
ZHANG Z L, ZHU J G, ZHOU H, *et al.*. Guidance tracking method of a new automatic Laser theodolite system [J]. *Opti-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 1-7. (in Chinese)
- [10] 黄桂平, 李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 256-260.
HUANG G P, LI G Y. Study of system orientation and coordinate calculation IMS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(3): 256-260. (in Chinese)

作者简介:



劳达宝(1984—),男,广西北海人,博士研究生,2006年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为大尺寸光电检测技术。E-mail: rober981@163.com



郝继贵(1970—),男,安徽无为,人,博士生导师,教授,博士生导师,1991年、1994年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,1997年于天津大学获得博士学位,主要从事视觉检测技术的研究。Email: jigui@tju.edu.cn

导师简介:



杨学友(1949—),男,江西南昌人,教授,博士生导师,1981年、1984年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事视觉检测技术及应用研究。E-mail: xueyou@tju.edu.cn



叶声华(1934—),男,湖北沙市人,教授,博士生导师,中国工程院院士,1956年于华中科技大学获得学士学位,1962年于天津大学获得硕士学位,主要从事激光及光电测量技术方面的研究。E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

● 下期预告

长条形空间反射镜及其支撑结构设计

李志来,徐宏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了满足反射镜在重力和温变载荷下具有较高面形精度的要求,提出了一种空间反射镜柔性支撑结构。根据光学设计指标要求确定了反射镜的结构形式,并根据反射镜的具体结构形式设计了带有柔性的支撑结构,利用有限元分析软件对反射镜组件进行了有限元分析和结构优化。分析结果表明,反射镜组件的一阶固有频率达到179 Hz,在 x, y, z 三轴方向1 g重力作用下镜面面形误差RMS值分别达到5.06, 4.43, 7.59 nm,在3个方向1 g重力和4℃温升耦合作用下镜面综合面形误差RMS值分别达到6.08, 6.32, 8.08 nm。实验室静态检测结果表明,反射镜在4℃温变条件下能够保证像质,力学试验结果与理论分析基本吻合,经过力学与热真空环境试验后,反射镜面形变化不明显。分析及试验结果表明,反射镜及其支撑结构设计合理,能够满足空间应用要求。