

某姿态测量系统标定用转台指向误差补偿

霍 炬¹, 仲小清², 杨 明², 刘 佳²

(1 哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院, 哈尔滨 150001, hitzxq@126.com;

2. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为提高某姿态测量系统的标定精度, 对其标定设备三轴转台的指向误差补偿方法进行研究. 分析了影响指向误差的因素; 基于多体系统运动学基本原理, 阐述了转台系统拓扑结构的低序体阵列, 并推导出相邻两体间的低序算子; 进而建立关于转台三个回转轴线平均线夹角的指向误差模型; 通过仿真研究了各误差项对指向误差的影响规律; 最后介绍了误差模型参数的测量方法. 误差补偿实验验证了方法的有效性和可行性.

关键词: 标定; 误差补偿; 三轴转台; 指向误差; 多体系统运动学

中图分类号: TP448.15

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0100-06

Orientation error compensation of turntable for calibration of a non-contact measurement system

HUO Ju¹, ZHONG Xiao-qing², YANG Ming², LIU Jia²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, hitzxq@126.com;

2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To calibrate a non-contact measurement system more precisely, the orientation error compensation of a three-axis turntable for calibration was investigated in this paper. The factors causing the orientation error were analyzed, then the topological structures and low-order body arrays of multi-body system were illustrated based on the basic principle of multi-body system kinematics. An orientation error model was built by deducing the operator of two adjacent bodies in advance, and the error model was just the function of angles of average lines of three axes. The orientation law about the effect of each factor on the orientation error was addressed by simulation results. The method to measure parameters of the error model was introduced. Results of error compensation experiments verify the validity of the proposed algorithm.

Key words: calibration; error compensation; three-axis turntable; orientation error; multi-body system kinematics

某型姿态测量系统是哈尔滨工业大学研制的一套光学测量系统, 用于实现对空间目标六自由度运动参数的非接触测量, 系统的结构框图如图1所示. 该系统图像采集速率达400 frame/s, 姿态角测量精度为1'. 测量系统的标定是研制过程中需要突破的关键技术之一, 确定三轴转台作为系

统姿态角测量的标定设备, 它可以模拟运动目标在空间的姿态. 作为标定设备, 其指向误差需远小于待标定系统测量误差, 确定姿态测量系统标定用转台指向误差小于6". 实际标定所使用转台轴的位置误差不大于1", 轴线不垂直度不大于10". 测试表明, 该转台的指向误差已达到12". 如果不对指向误差进行补偿, 将无法对姿态测量系统进行精确标定.

国内外学者对于该领域已经进行了大量的研究, 形成了许多有价值的结论和方法^[1-7]. 但这些

收稿日期: 2008-06-10.

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助项目 (HITQJNS. 2007. 021)

作者简介: 霍 炬(1977—), 男, 博士, 副教授;

杨 明(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

方法中所设计的误差模型都含有非常多的参数,以三轴转台为例,其参数达 20 多项^[1-4],阻碍了其在实际生产中的应用. 针对这一问题,本文研究

了姿态测量系统标定用转台指向误差的补偿方法,建立了指向误差模型,模型参数少,易于测量.

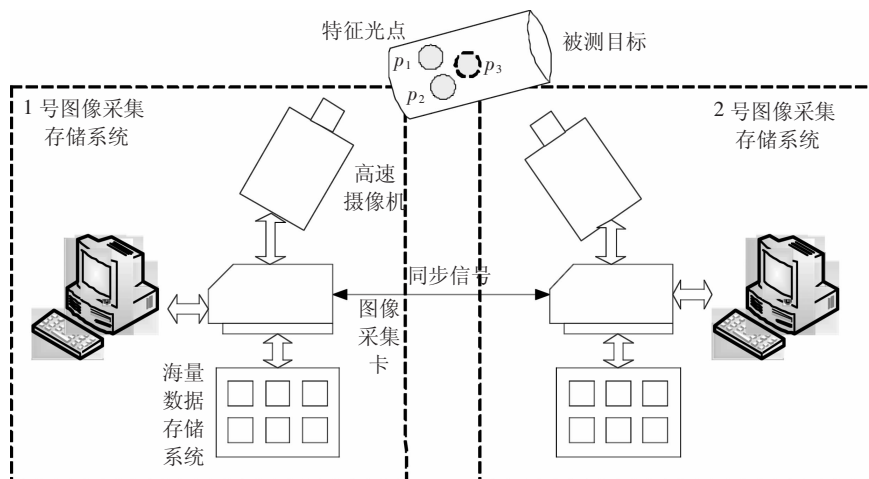


图1 某型姿态测量系统结构框图

1 指向误差模型的建立

1.1 影响指向误差的因素

所谓指向误差是指固连在转台内框架上的单位向量经过转台的转动后预期指向与实际指向之间的偏差^[1-2]. 引起转台指向误差的因素包括:轴线垂直度误差、轴的回转误差、轴的位置误差、以及由轴的摆动引起的相对误差等^[1-4]. 其中,位置误差影响最大,垂直度误差次之,回转误差再次之,而轴的摆动相对误差在系统刚度较大、速度较低的前提下几乎可以忽略不计^[2].

鉴于当前国内三轴转台的研制水平,相对于垂直度误差,转台轴的位置误差、回转误差均较小;而且在姿态测量系统的标定中,转台的运动速度较小,其摆动误差的影响可忽略,所以影响标定用转台指向误差的主要因素是轴线垂直度误差. 本文将建立关于垂直度的指向误差模型. 轴线垂直度是指转台两轴线之间的角度与 90° 的偏差角^[4]. 本文采用平均轴线垂直度,把垂直度看成不受轴的回转误差、轴的位置误差以及摆动误差的影响.

1.2 多体系统误差建模方法

多体系统是指由多个刚体或柔体通过某种方式连接而成的复杂机械系统,转台系统可以抽象成多体系统. 基于多体系统理论的误差建模方法近几年得到了广泛的应用,它全面考虑了影响系统运动精度的各项因素以及相互耦合情况,利用特有的低序体阵列来描述复杂系统,具有建模过

程规范化、约束条件少、易于解决复杂系统运动问题的特点^[5]. 对于任意多体系统,常设一惯性参考坐标系为 0 体,并定义低序列算子,得到多体系统拓扑结构的低序体阵列. 这样多体系统中的任何一个体都可以通过低序体阵列追溯到 0 体惯性参考系中^[4-5].

图2是测量系统标定所使用的立式三轴转台结构示意图,规定转台的外框轴为 x 轴,中框轴为 y 轴,内框轴为 z 轴. 按照多体系统的分析方法可以建立其低序体阵列,设转台基座为 0 体,由基座向上分别为外框轴系(1 体)、中框轴系(2 体)、内框轴系(3 体)和设备(4 体). 依据多体理论,对于每个低序体分别建立坐标系和运动参考坐标系. 转台的运动可理解为体坐标系将相对于其运动参考坐标系平移和旋转,例如外框轴的旋转就是 1 体相对于 1 体运动参考坐标系的变换.

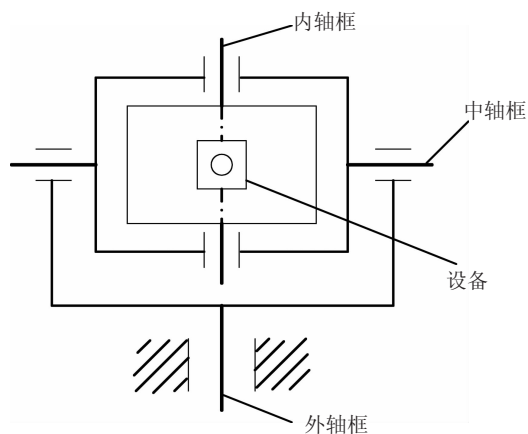


图2 立式转台系统结构示意图

根据多系统误差建模理论,首先应建立相邻两体间的低序算子. 定义低序体坐标系为 B_l , 高序体坐标系为 B_h , 高序运动参考坐标系为 M_h . 此时,低序算子可以表示为:高序体坐标系 B_h 相对于低序体坐标系 B_l 的变换 $T_{B_h B_l}$.

依据刚体旋动理论,高序体坐标系相对于高序运动参考坐标系的变换关系可表示为

$$T_{B_h M_h} = \begin{bmatrix} R_{B_h M_h} & S_{B_h M_h} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: $S_{B_h M_h}$ 表示高序体坐标系 B_h 原点 O_{B_h} 在高序运动参考坐标系 M_h 中的位置向量, $R_{B_h M_h}$ 表示高序体坐标系相对于高序运动参考坐标系运动的旋转矩阵.

设置高序运动参考坐标系与低序体坐标系固联,即二者不发生相对运动,则高序运动参考坐标系相对于低序体坐标系的变换关系可表示为

$$T_{M_h B_l} = \begin{bmatrix} R_{M_h B_l} & S_{M_h B_l} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中: $S_{M_h B_l}$ 表示高序运动参考坐标系 M_h 原点 O_{M_h} 在低序体坐标系 B_l 中的位置向量; $R_{M_h B_l}$ 表示由于不垂直度引起的高序运动参考坐标系相对于低序体坐标系的旋转矩阵.

由式(1)和(2)可以得到高序体坐标系与低序体坐标系的变换关系为

$$T_{B_h B_l} = T_{B_h M_h} \cdot T_{M_h B_l} = \begin{bmatrix} R_{B_h M_h} \cdot R_{M_h B_l} & R_{B_h M_h} \cdot S_{M_h B_l} + T_{B_h M_h} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(3)的左上角子阵表示高序体坐标系与低序体坐标系的姿态关系,它与两坐标系的位置无关. 因为本文只分析指向误差,所以只需要分析 $T_{B_h B_l}$ 的左上角子阵即可,定义其为 $R_{B_h B_l}$:

$$R_{B_h B_l} \triangleq R_{B_h M_h} \cdot R_{M_h B_l},$$

分析式(1)和(2)可知, $R_{B_h B_l}$ 是高序体坐标系相对于其运动参考坐标系的旋转角度 $(\theta, \varphi, \gamma)$, 以及由于不垂直度 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 的函数,即

$$R_{B_h B_l} = f(\theta, \varphi, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z).$$

式中: $(\theta, \varphi, \gamma)$ 是期望的安装在转台上的设备通过转台的运动而与转台基座间的姿态角;而 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 代表了转台的不垂直度,它将影响转台的性能,是使用中所不期望的.

1.3 三轴转台指向误差模型的建立

依据以上的分析,本节将建立三轴转台的指向误差模型. 以图2所示的三轴立式转台为例,3个回转轴之间不严格正交,而是存在一偏差,如

图3所示. 图中 Oy , Ox , Oz 轴分别代表外、中、内框的实际回转轴, Ox , Oy 两轴的夹角 $\angle xy$ 为 $90^\circ + \Delta z$, Ox , Oz 两轴的夹角 $\angle xz$ 为 $90^\circ + \Delta y$, Oy , Oz 两轴的夹角 $\angle yz$ 为 $90^\circ + \Delta x$. 依据误差定义可知,转台3个回转轴的不垂直度分别为 Δz , $\Delta y, \Delta x$. 指向误差不受相交度误差的影响,所以可以假定3个回转轴交于同一点 O .

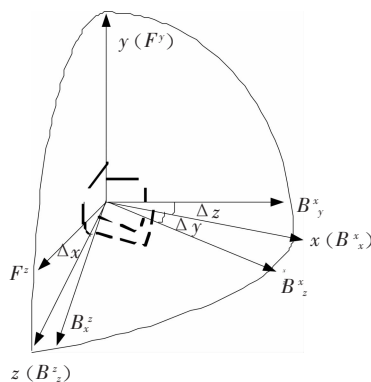


图3 三轴转台不垂直度示意图及坐标系定义

结合姿态解算的计算方法,本节按由内框及外框的顺序推导误差模型,即先分析内框体坐标系相对于中框体坐标系的关系,再建立中框体坐标系相对于外框体坐标系的关系,依此类推,最终建立三轴转台的指向误差模型.

1) 内框体坐标系 B_z 相对于中框体坐标系 B_x 的关系

两坐标系如图3所示. 文中所有坐标系均为直角坐标系,符合右手规则,为了更直观地表现坐标系的建立方法,图中只给出了坐标系的两个坐标轴,第三轴按右手规则确定;因为本文不考虑相交度误差,所以认为所有坐标系原点重合. 内框体坐标系与内框固联, B_z^z (下标表示坐标系编号,上标表示坐标轴编号,下同) 与内框回转轴线 Oz 重合, B_z^x 处于 Oz 和 Ox 形成的平面内. 定义内框运动参考坐标系 M_z 与中框固联,在转台初始指向时, M_z 和 B_z 重合. 假设转台绕回转轴 Oz 转动角度 θ , 则此运动可描述为内框体坐标系 B_z 绕其坐标轴 B_z^z 旋转 θ 角与内框运动参考坐标系重合,其旋转矩阵为

$$R_{M_z B_z} = R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中, $R_z(\theta)$ 的下标 z 表示绕坐标系的 z 轴旋转(下同).

定义中框体坐标系 B_x 与转台中框固联, B_x^x 与 Ox 重合, B_x^z 位于 Oz 和 Ox 形成的平面内. 内框运动

参考坐标系 M_z 和中框体坐标系 B_x 均与中框固联, 二者相对姿态不随转台的运动而变化(本文不考虑回转误差), 是一固定值. 根据两坐标系的定义可知, M_z 绕其 y 轴旋转角度 Δy 即与 B_x 重合, 所以内框运动参考坐标系相对于中框体坐标系的旋转矩阵可以表示为

$$R_{B_x M_z} = R_y(\Delta y) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta y) & 0 & -\sin(\Delta y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Delta y) & 0 & \cos(\Delta y) \end{bmatrix}.$$

式中: $\Delta y \triangleq \angle xz - 90^\circ$ 为回转轴 x 与回转轴 z 间的不垂直度.

自此, 建立了内框体坐标系 B_z 相对于中框体坐标系 B_x 的变换矩阵, 可表示为

$$R_{B_x B_z} = R_y(\Delta y) \cdot R_z(\theta). \quad (4)$$

2) 中框体坐标系 B_x 与外框体坐标系 B_y 的变换关系

中框体坐标系定义如上. 定义中框运动参考坐标系 M_x 在转台初始指向时与中框体坐标系 B_x 重合, 且与转台外框固联. 当转台绕回转轴 Ox 旋转角度 γ 时, 中框体坐标系与其运动参考坐标系的变换关系可表示为

$$R_{M_x B_x} = R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

定义外框体坐标系 B_y 与外框固联, B_y 与转台 Oy 回转轴重合, B_y^* 处于 Oy 和 Ox 形成的平面内, B_y^* 依据右手法则确定. 仿照内框分析方法, 可以确定中框运动参考坐标系 M_x 相对于外框体坐标系 B_y 的旋转矩阵, 即

$$R_{B_y M_x} = R_z(\Delta z) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta z) & \sin(\Delta z) & 0 \\ -\sin(\Delta z) & \cos(\Delta z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: $\Delta z \triangleq \angle yx - 90^\circ$ 为回转轴 y 与回转轴 x 间的不垂直度.

至此, 建立了中框体坐标系 B_x 与外框体坐标系 B_y 的变换矩阵为

$$R_{B_y B_x} = R_{B_y M_x} R_{M_x B_x} = R_z(\Delta z) \cdot R_x(\gamma). \quad (5)$$

3) 外框体坐标系 B_y 与基座坐标系 F 的变换关系

外框体坐标系定义如上, 定义外框运动参考坐标系 M_y 在转台初始指向时与外框体坐标系重合, 且与转台基座固联. 当转台绕回转轴 Oy 旋转角度 φ 时, 外框体坐标系相对于其运动参考坐标系发生相对于运动, 其变换矩阵可表示为

$$R_{M_y B_y} = R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

定义基座坐标系 F 与基座固联, F^y 与 Oy 重合, F^z 在 Oy 和 Oz 形成的平面内, 则外框运动参考坐标系相对于基座坐标系的变换关系可以表示为

$$R_{F M_y} = R_x(\Delta \hat{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta \hat{x}) & \sin(\Delta \hat{x}) \\ 0 & -\sin(\Delta \hat{x}) & \cos(\Delta \hat{x}) \end{bmatrix}.$$

式中: 在不垂直度的分布满足一定条件时, $\Delta \hat{x} \simeq \Delta x \triangleq \angle yz - 90^\circ$, 下节将推导 $\Delta \hat{x}$ 的精确解.

至此, 建立外框体坐标系 B_y 相对于基座坐标系 F 的变换矩阵:

$$R_{F B_y} = R_{F M_y} R_{M_y B_y} = R_x(\Delta \hat{x}) \cdot R_y(\varphi). \quad (6)$$

在实际使用中, 可以定义设备坐标系 M 与内框体坐标系 B_z 重合, 则

$$R_{B_z M} = I. \quad (7)$$

综合式(4), (5), (6)和(7), 可以得到当转台存在不垂直度时, 设备坐标系和转台基座坐标系间的变换关系为

$$\begin{aligned} R_{F M} &= R_{F B_y} \cdot R_{B_y B_x} \cdot R_{B_x B_z} \cdot R_{B_z M} = \\ &R_x(\Delta \hat{x}) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_z(\Delta z) \cdot R_x(\gamma) \cdot \\ &R_y(\Delta y) \cdot R_z(\theta). \end{aligned} \quad (8)$$

1.4 $\Delta \hat{x}$ 的精确解

依据转台基座体坐标系和外框旋转参考坐标系的建立方法, $\Delta \hat{x}$ 与 3 个不垂直度角之间的关系可用下图 4 表示.

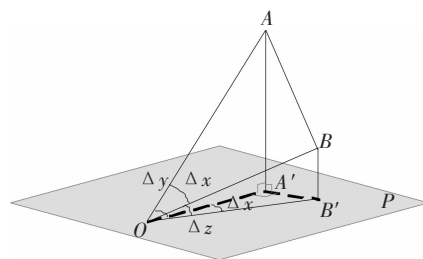


图4 $\Delta \hat{x}$ 与不垂直度角度间的几何关系

图中直线 OA 和 OB 在平面 P 上的投影分别为 OA' 和 OB' . Ox , Oz 回转轴间的不垂直度 Δy 在图中可表示为 $\angle A'OA$; Ox , Oy 回转轴间的不垂直度 Δz 可表示为 $\angle B'OB$; 而 $\angle AOB$ 则表示 Oy , Oz 两回转轴间的不垂直度 Δx ; 其对应的两投影直线间的夹角 $\angle A'OB'$ 就表示上节所述的 $\Delta \hat{x}$. 利用立体几何的知识可以得到 $\Delta \hat{x}$ 的精确解为

$$\cos(\Delta \hat{x}) = \frac{\cos(\Delta x) - \sin(\Delta y) \sin(\Delta z)}{\cos(\Delta y) \cos(\Delta z)}.$$

由上式可知, 当 Δy 和 Δz 符号相同且数值较接近时, $\Delta \hat{x}$ 可以用 Δx 代替. 实际使用中, 可以按需求定义回转轴的方向来使二者符号相等.

2 仿真实验及误差补偿实验

2.1 指向误差仿真

理想状态下,转台转动后,预期的设备坐标系相对于转台基座坐标系的变换关系可用姿态矩阵 $R(\theta, \varphi, \lambda)$ 表示,对应的3个姿态角俯仰(Pitch)、偏航(Yaw)、滚转(Roll)为 $[\theta, \varphi, \lambda]^T$; 由于垂直度误差的存在,实际的姿态矩阵为 $\bar{R}(\theta, \varphi, \lambda, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$, 根据刚体旋转理论,也可分解成3个姿态角 $[\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\lambda}]^T$. 本文采用实际和期望姿态角的差来定义指向误差 $\Theta^{[1]}$, 如下式所示:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\theta} \\ \bar{\varphi} \\ \bar{\gamma} \end{bmatrix}.$$

本节利用所建立的误差模型研究不垂直度误差对转台指向误差的影响规律. 仿真时,假定转台的3个回转轴同时启动,且以同速率进行转动,三轴的运动范围均为 $[-15^\circ, +15^\circ]$. 为了研究不垂直度对指向误差的影响规律,每次仿真时只添加一项不垂直度. 当转台3个回转轴线不垂直度均为 $10''$ 时,指向误差如下图5所示.

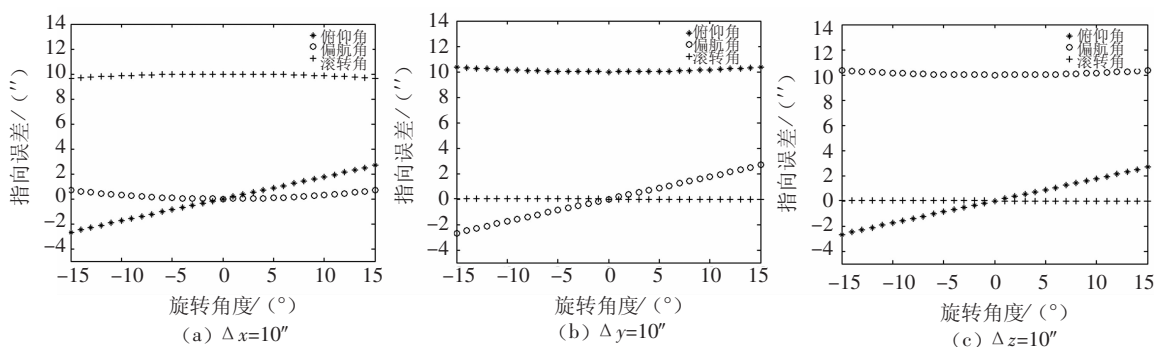


图5 不垂直度对指向误差的影响

由仿真结果可知,1) 每项不垂直度主要影响一个姿态角,且数值上与不垂直度值大致相等,如图5中3个子图的最顶端数据项所示;2) 每项不垂直度对指向误差的某个分量影响很小,大致为0,如图5中3个子图中底端的近似水平线. 在使用中,可以依据此规律判断误差的主要成因.

2.2 模型参数测量

如前所述,本文采用平均轴线垂直度,其数值可通过激光跟踪仪(实验中所用激光跟踪仪空间综合精度为 10×10^{-6}) 测量转台3个回转轴间的夹角获得,测量方法如下:

首先,在待测回转轴的框架上(不处于回转轴线上)安置激光跟踪仪靶标. 图6(a)是立式转台外框轴线测量示意图. 测量必须按先内框后外框的顺序进行.

然后,使转台绕待测轴转动,用激光跟踪仪实时采集转台运动过程中靶标的位置.

最后,利用所采集的靶标的位置拟合平面,该平面的法线向量就代表了回转轴线的方向.

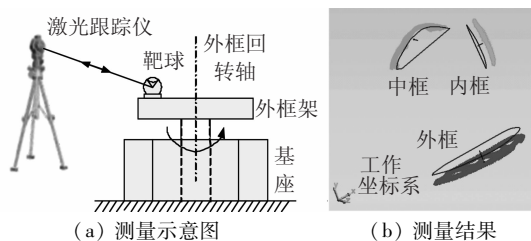


图6 不垂直度测量示意图和测量数据

在同一个工作坐标系中,分别测量内、中、外3个回转轴线的方向向量,计算三者的夹角就可以求得误差模型中的3个不垂直度参数. 图6(b)是实验中所使用转台的测量结果,图中密集部分代表所测量的点,闭合曲线代表拟合的平面;表1为对应的不垂直度.

表1 回转轴间夹角测量结果

回转轴	两轴夹角/(°)	不垂直度/(")
外框轴和中框轴	90.002 543	9.155
外框轴和内框轴	90.002 610	9.396
中框轴和内框轴	90.001 985	7.146

2.3 误差补偿实验

本文所建立的误差模型已成功应用于某姿态测量系统标定用转台指向误差的补偿,本节对标定过程中的指向误差补偿实验进行介绍. 因为激光跟踪仪具有精确测量静态点3D坐标的能力,所以实验中仍然使用激光跟踪仪测量装配于转台上的设备相对于转台底座的实际姿态.

实验时,首先使转台旋转至一位置,其码盘角度值是不考虑垂直度误差的姿态参数 $[\theta', \varphi', \lambda']^T$; 然后通过激光跟踪仪测量设备相对于转台基座姿态角的约定真值 $[\theta, \varphi, \lambda]^T$ (当前使用需求下,该值与真值间的误差可忽略). 姿态测量系统标定需要的数据是设备相对于底座的姿态,所以实验利用本文模型对码盘角度(不考虑垂直度误

差的姿态)进行修正,其结果记为 $[\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\lambda}]^T$. 利用式(8),误差补偿可具体表示为

$$\mathbf{R}_{FM}(\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\gamma}) = \mathbf{R}_x(\Delta\hat{x}) \cdot \mathbf{R}_y(\varphi') \cdot$$

$$\mathbf{R}_z(\Delta z) \cdot \mathbf{R}_x(\gamma') \cdot \mathbf{R}_y(\Delta y) \cdot \mathbf{R}_z(\theta').$$

式中: $\mathbf{R}_{FM}(\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\gamma})$ 为以姿态角 $(\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\gamma})$ 为变量

的姿态矩阵; $\Delta\hat{x}, \Delta y, \Delta z$ 为激光跟踪仪测量得到的三轴转台不垂直度误差.

修正前后的姿态数据 $[\bar{\theta}, \bar{\varphi}, \bar{\lambda}]^T$ 分别与姿态角的约定真值 $[\theta, \varphi, \lambda]^T$ 对比,可以分析补偿效果,部分实验数据如下表2所示.

表2 补偿前后指向误差数据

序号	姿态角	码盘读数/(°)	实际姿态/(°)	补偿后姿态/(°)	补偿前误差/(")	补偿后误差/(")
1	θ	-3.537 5	-3.535 9	-3.535 1	5.760	-2.880
	φ	0.999 7	1.002 4	1.002 6	9.720	-0.720
	γ	8.305 7	8.308 7	8.308 2	10.800	1.800
2	θ	-12.373 2	-12.370 6	-12.371 0	9.360	1.440
	φ	1.614 9	1.616 9	1.617 6	7.200	-2.520
	γ	2.846 9	2.850 0	2.849 4	11.160	2.160
3	θ	7.380 1	7.382 1	7.382 5	7.200	-1.440
	φ	7.640 9	7.643 6	7.643 6	9.720	-0.000
	γ	1.570 4	1.573 7	1.573 0	11.880	2.520

由表2的数据可以看出,补偿前转台最大指向误差已达到11.88",而补偿后指向误差小于3",可以满足姿态测量系统的标定需求.

3 结 论

三轴转台作为某姿态测量系统的标定设备,其垂直度误差是影响标定精度的最主要因素.分析了影响指向误差的因素;基于多体系统运动学理论,建立了三轴转台的指向误差模型;并介绍了模型参数的测量方法.该模型参数少、易于测量,已应用于某姿态测量系统标定用转台指向误差的补偿,取得了预期的效果.虽然当前所建立的误差模型仅包含了不垂直度,但是只要在模型建立的过程中考虑坐标系原点间的位置,就可以利用文中方法分析不相交度、回转误差等因素的影响.影响转台标定精度的因素还有速率稳定度误差,以及幅相误差等,文中所建立的模型只是误差补偿的一个主要方面,这也是实验部分补偿后最大指向误差仍达3"的一个原因.

参考文献:

[1] ANDRIANOS N, DIEZ C, DEMORE L A. Flight table

orientation error transparency for hardware - in - the loop facilities [J]. SPIE proceedings series, 2001, 4366: 269 - 282.

[2] 肖卫国,郝崇恩,李高风. 三轴飞行模拟转台误差研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5): 678 - 681.

[3] JHA B K, KUMAR A. Analysis of geometric errors associated with five - axis machining centre in improving the quality of cam profile [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(6): 629 - 636.

[4] 李岩,范大鹏. 基于多体系统运动学理论的三轴转台装配误差建模分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 981 - 987.

[5] 曲智勇,陈维山,姚郁. 某型六自由度运动系统误差建模[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(9): 1345 - 1349.

[6] LIN Y, SHEN Y. Modeling of five - axis machine tool metrology models using the matrix summation approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21: 243 - 248.

[7] DEMORE L A, ANDRIANOS N P. Design study for a high accuracy thress - axis test table[J]. AIAA Journal of Guidance, 1987, 10(1): 104 - 114.

(编辑 张 宏)