

转台角速率的高速摄像测量方法

杨亮^{1,2}, 沈湘衡¹, 张宁¹, 赵玉艳³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 针对精确测量转台角速率在转台性能评价中的重要性问题, 提出一种测量转台角速率的高速摄像方法. 该方法利用平行光管作为可测目标固定在转台上, 目标的空间位置与转台转动的角位置相对应. 在转台转动过程中, 通过高速相机记录目标空间位置实现测量, 并采用像元细分技术定位的方法来提高测量精度. 细分精度达到0.03个像元. 利用该方法对某型号的低速转台进行了试验数据采集及分析, 验证了该方法的可行性. 误差分析结果表明, 在转台角速率为 $0.2^\circ/\text{s}$ 时, 该方法的测速精度可达到 3.405×10^{-4} , 完全可以用于高精度转台的角速率测量. 由于高速相机的采样频率较高, 因此, 实现了转台瞬时角速率的测量. 该方法的非接触测量方式实现了对转台角速率的客观评价.

关键词: 光电测量; 惯性技术; 高速摄像; 角速率; 转台; 亚像素; 空间角度模型; 测速精度
中图分类号: TB 934 文献标志码: A

High-speed video measurement method for rotary table angular rate

YANG Liang^{1,2}, SHEN Xiang-heng¹, ZHANG Ning¹, ZHAO Yu-yan³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. China Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China)

Abstract: For the importance of measuring accurately the angular rate in the performance evaluation of rotary table, a high-speed video method for measuring the angular rate of rotary table was proposed. A collimator tube was fixed to the rotary table as a measureable objective, and the space position of the objective was corresponding to the rotating angular position of the table. In the rotating process of rotary table, the objective space position was recorded with a high-speed camera and thus the measurement was implemented. The orientation method with the pixel subdivision technology was adopted to improve the measurement precision, where the subdivision precision could reach 0.03 pixels. This method was used to collect and analyze the test data for a certain type of low-speed rotary table. The error analysis result shows that the precision of rate measurement can reach 3.405×10^{-4} when the angular rate of rotary table is $0.2^\circ/\text{s}$. It means that the present method can be used for measuring the angular rate of high-precision rotary table. The instantaneous angular rate of rotary table can be measured due to the high sampling frequency of high-speed camera. The objective evaluation for the angular rate of rotary table is realized with the non-contact measurement way in the proposed method.

Key words: photoelectric measurement; inertial technology; high-speed video; angular rate; rotary table; sub pixel; space angle model; speed measurement precision

转台主要用于惯性平台及惯性仪表的研制、测试和鉴定, 是保证惯性导航系统精度的关键设备之一. 随着惯性元件精度的提高, 对转台的精度和性能的要求也越来越高. 转台的速率精度和速

收稿日期: 2009-12-08.

基金项目: 国家 863 高新技术计划资助项目(2008AA7034320B).

作者简介: 杨亮(1981-), 女, 吉林松原人, 博士生, 主要从事光电设备的精度检测等方面的研究.

率平稳性是决定转台性能的关键指标. 转台在实际的转动过程中, 其速率不是理想的匀速运动, 因此, 其实际的角速率与给定指令并不完全一致^[1], 这就需要对转台的角速率进行测量.

转台角速率的测量主要经历了2个阶段. 第1个阶段是粗略估计阶段, 这一时期的制造工艺水平比较落后, 转台角速率精度在设计指标中的要求不高, 转台转速稳定性的评价大多局限于根据直观显示即转速数据的实时显示来进行评价的, 一般只要大致平稳就能达到要求; 在第2阶段, 转台旋转体的转动平稳性对其本身和测试对象的影响已经不能忽略, 对转台的转动波动等现象的研究也越来越受到广泛的关注. 传统的测量方法有高速测量时的频率法和低速测量时的周期法, 由于其应用原理具有一定的缺陷性, 都会有 ± 1 的计数误差, 同时, 以上测量方法在转台高速转动时信号处理速度相对较慢, 因此, 只能用取平均的方法来求得近似值, 不能很好地反映转台转动过程中的实时波动. 随着科技的进步出现了很多新的测量方法, 即利用不同的传感器(例如磁敏传感器和光电传感器等)进行测量, 而这些传感器大多用于转台的伺服控制中测量转台的实时角速率, 不能从客观的角度反映出转台的角速率, 并且由于采样频率的限制, 往往测量的角速率所反映的是在某一小段时间内的平均角速率. 因此, 目前仍缺乏对转台这种高精度设备角速率评价的测量方法, 这样就降低了转台在使用过程中的可信度.

本文采用了高速摄像测量方法来实现对转台角速率的测量. 利用测量设备与被测设备之间的空间角度关系建立了空间角度模型, 从而能够客观地测得转台的角速率. 由于高速摄像测量方法的采样时间间隔可以达到毫秒甚至微秒级, 因此, 测到的转台角速率近乎为瞬时角速率. 本文对高速摄像测量方法的原理进行了阐述并对该方法的测量误差进行了分析, 利用该方法对某型号的低速转台进行了试验数据采集及分析.

1 测量方法

转台的瞬时角速率是指当采样时间间隔 Δt 趋向于无穷小时, 转台角位置增量与时间之比, 即

$$\omega \approx \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $\Delta \theta$ ——角位置增量;

Δt ——转台采样时间间隔.

速率精度是指被控转台的平均角速率和给定

角速率之差与给定角速率的比. 速率平稳性是指被控转台实际速率对其平均速率的波动程度.

1.1 高速摄像测量原理

采用平行光管模拟无穷远的空间目标, 通过光学系统将此目标成像在相机的接收面上. 由于平行光管发出的是平行光, 因此, 由共轴理想光学系统成像性质可知, 一束平行光经过光学系统以后, 一定相交于像方焦平面上的某一点, 该点就是无限远轴外物点的共轭像点^[2]. 图1为测量原理图, 由于平行光管模拟无限远目标, 因此, 它所发出的光线总是相互平行的. 目标光束与光学系统主光轴有一定的夹角 θ , θ 的大小反映了轴外目标点与主光轴的距离, 当 $\theta \rightarrow 0$ 时, 轴外的物点就为轴上的物点.

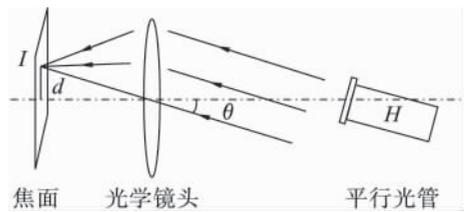


图1 测量原理图

Fig. 1 Scheme detecting principle

由图1可知, 平行光管 H 模拟无限远目标, 经过光学系统在焦平面上成一像点 I . 平行光管 H 发出的光束与主光轴所成的角度为 θ , 像点 I 到主光轴的距离为 d , θ 与 d 的关系为

$$\tan \theta = \frac{d}{f} \quad (2)$$

式中 f 为光学系统的焦距.

将平行光管固定在转台上, 在转台的转动过程中, 当转台转动的角度发生变化的同时, 平行光管所发出的平行光也以相同的角度随之变化. 因此, 平行光管的角度变化反映了转台的转动角度, 通过分析像点 I 在CCD像面上的位置变化, 就能得出转台的角度变化值.

1.2 高速摄像测量方法

测量系统采用凝视工作模式. 由于相机视场角的限制不能满足对转台的整体测量, 因此, 需要对转台进行分区测量. 本文讨论了转台在水平方向单个区间的角速率测量方法.

首先需要对转台进行静态标定, 即在相机的视场内选出 n 个基准点, 即 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. 对这 n 个基准点进行多次重复标定. 将基准点拟合成一条直线, 如图2所示.

设此直线为 l , 假设理想情况下, 转台在水平方向旋转时各个点的竖直方向的偏转角是相同的. 当 l 的斜率为 α 时, 说明相机接收面是以某一



图 2 基准点标定

Fig. 2 Calibration for reference point

角度 α 倾斜的. 图 3 为测量光路图 M_1 为 CCD 接收面的垂直轴 N_1 为 CCD 接收面的水平轴, 而实际空间水平轴为 l . 点 O 为光学系统的主光轴 C 与像面的交点. o 为点 O 到 l 的垂线 OC 的垂点. 点 I_1, I_2 为 2 个采样点, 其采样时间分别为 T_1, T_2 . 点 I_1 所对应的视场角为 θ_1 , 点 I_2 所对应的视场角为 θ_2 .

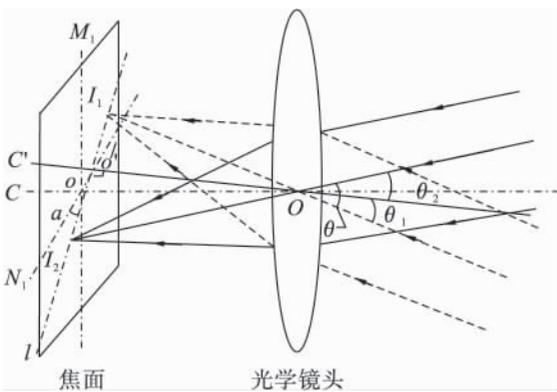


图 3 测量光路图

Fig. 3 Optical configuration for measurement

Oo 为焦距 f 在直角三角形 I_1Oo, I_2Oo 中有

$$OI_1 = \sqrt{f^2 + (I_1o)^2} \quad (3)$$

$$OI_2 = \sqrt{f^2 + (I_2o)^2} \quad (4)$$

在三角形 OI_1I_2 中, 由求积公式可得到

$$Oo = \sqrt{\frac{2p(p - OI_1)(p - OI_2)(p - I_1I_2)}{(I_1I_2)^2}} \quad (5)$$

式中 $p = \frac{1}{2}(OI_1 + OI_2 + I_1I_2)$.

$$\begin{cases} (I_1o)^2 = (OI_1)^2 - (Oo)^2 \\ (I_2o)^2 = (OI_2)^2 - (Oo)^2 \end{cases} \quad (6)$$

由式 (6) 可得出点 o 的坐标, 即

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{I_1o}{Oo}\right) \quad (7)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{I_2o}{Oo}\right) \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \arctan\left(\frac{I_2o}{Oo}\right) - \arctan\left(\frac{I_1o}{Oo}\right) \quad (9)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (10)$$

式中: θ ——点 I_1, I_2 所对应转台的转角;

ΔT ——点 I_1, I_2 的采样间隔.

当采样时间间隔趋近于无穷小时, 根据式 (1) 可得到转台的瞬时角速率.

由式 (9)、(10) 和 (1) 可以实现转台在任意 2 个采样点之间角速率的测量.

1.3 高速摄像测量系统的结构

图 4 为测量装置示意图, 测量系统由高速相机 (光学镜头)、计算机和平行光管等组成.



图 4 测量装置示意图

Fig. 4 Schematic detecting device

由平行光管模拟一个无限远空间目标, 通过光学镜头采集到高速相机的接收面上, 同时记录相机的采样时间. 计算机对高速相机进行控制和图像下载, 并对图像数据进行判读分析.

由于该系统要求的精度较高, 因此, 提高系统的测量精度就需要提高高速相机的像元角分辨率. 像元角分辨率是由 CCD 芯片像元尺寸和光学镜头焦距决定的. 提高像元角分辨率可通过减小像元尺寸或增大光学镜头的焦距来实现; 而增加光学镜头的焦距会使相机视场角变小, 像元尺寸太小会降低相机的灵敏度. 由于本系统采用的是高速相机, 所以不能用像元尺寸太小的探测器件, 只能采用长焦距的光学镜头, 通过减小视场角来提高单个像元的空间角分辨率.

1.4 目标定位方法

采用细分技术的亚像元定位方法进一步提高了系统的分辨能力. 光斑的定位方法为灰度平方质心法, 灰度平方质心法使得目标灰度分布的权重得到进一步的突出, 在理想情况下, 可以得到比灰度质心法更好的定位精度^[5-6]. 图像中目标的质心为

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum \sum xI^2(x, y)}{\sum \sum I^2(x, y)} \\ y_0 &= \frac{\sum \sum yI^2(x, y)}{\sum \sum I^2(x, y)} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $I(x, y)$ 为像元灰度值.

2 实验结果及分析

采用高速相机 MS50K 测量某低速转台的角

速率,最大分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ 像素,像元尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,光学镜头的焦距为 $50\ \text{mm}$,相机的视场角为 17.46° ,实际接收目标的视场角为 6° ,像元的角分辨率为 $49''$,相机采用的曝光时间为 $100\ \mu\text{s}$ 。

设置转台以 $0.2^\circ/\text{s}$ 的角速率作匀速运动,分别通过高速摄像测量方法测量转台的角速率和直接读取转台编码器的角度值及时间值得转台的角速率。其中相机的采样频率分别为 25 和 $10\ \text{Hz}$,计算机读取编码器的采样频率为 $10\ \text{Hz}$ 。角速率的波动曲线如图5所示。

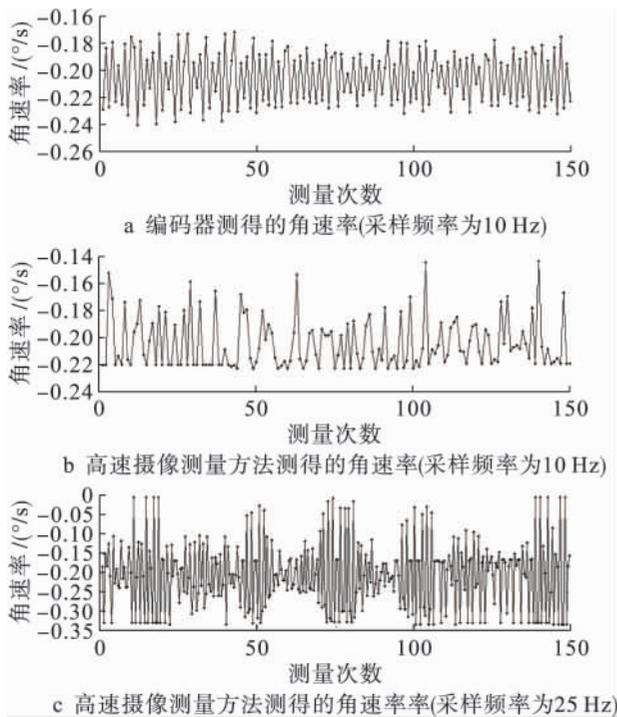


图5 角速率波动曲线

Fig. 5 Fluctuation curves of angular rate

图5a为通过记录转台编码器实时输出的角度及时间值得到的速率曲线,采样频率为 $10\ \text{Hz}$;图5b为通过高速摄像测量方法得到的速率曲线,采样频率为 $10\ \text{Hz}$;图5c为通过高速摄像测量方法得到的速率曲线,采样频率为 $25\ \text{Hz}$ 。

由图5可知,转台在匀速转动时,其速率不是绝对平稳的。这是由于电动机转速不均匀等方面的原因使其速率发生了一定的变化。由于2种测量方法不是同时采样,测量方法不同及采样时间不同,因而使得图5a和5b的速率曲线有一些差别。从图5c中的速率曲线可知,提高高速摄像测量系统的采样频率,测得转台角速率的变化幅度增大,这是由于转台的伺服系统是采用开环结构设计的,且是由步进电动机驱动的,因此,转台的瞬时角速率在不同的时刻是有差异的。随着采样

频率的提高,得到的转台角速率更接近瞬时角速率,因此,其速率曲线的波动程度会比较大。表1为实验数据的分析结果。

表1 数据结果分析

Tab. 1 Analysis of data results

方法	频率/Hz	$\bar{\varepsilon}/(^\circ/\text{s})$	σ	U
编码器测量方法	10	-0.204 60	0.020 385	0.002 94
高速摄像测量方法	10	-0.204 31	0.019 290	0.001 51
高速摄像测量方法	25	-0.204 27	0.089 510	0.001 32

表1中 $\bar{\varepsilon}$ 为平均角速率; σ 为角速率的平稳性; U 为角速率精度。由表1可知,在相同的采样频率下,高速摄像测量方法所测得的转台性能指标与编码器测得的结果相差不大,说明通过高速摄像测量方法对转台性能指标的测量结果是可信的。提高采样频率所得到的转台性能指标有所变化,转台角速率平稳性的变化尤为显著。通过数据分析结果可以看到,高频率采样所测得的结果更接近于瞬时角速率,因此得到的转台角速率平稳性较低。

高速摄像测量方法是通过外界设备测量转台的角速率,作为测量目标的平行光管,其体积小、质量轻,对转台的工作状态影响很小。通过本文方法所测得的数据能够客观地说明转台的实际运转情况。通过以上实验结果可知,采样频率越高,所得到的转台角速率越接近转台的瞬时角速率,越能反映出转台的实际工作状态,而高频采样正是高速摄像测量方法的优势。高速摄像测量方法的采样频率可以做到 $1\,000\ \text{Hz}$ 甚至更高,通过高频采样获得转台的瞬时角速率是编码器测速及其他测速设备所达不到的。

3 测量方法的误差分析

3.1 定位误差分析

本系统采用凝视工作模式,影响系统定位误差的主要误差源有:

1) 判读误差。目标点的判读精度主要由亚像元的定位精度决定的,其测量精度可以达到 $1/30\ \text{pixel}$ 。相机的最大分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$,像元尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,光学系统的焦距为 $50\ \text{mm}$,像元角分辨率为 $49''$,最大判读误差为 $\sigma_{\text{maxr}} = 49''/30 = 1.633''$,按正态分布 $\sigma_r = 1.633''/3 = 0.544''$ 。

2) 光学镜头畸变误差. 由于光学镜头存在畸变, 引起像斑质心定位不准确而引起误差, 此误差为系统误差, 可以通过标定畸变的方法来减小, 此误差可忽略.

3) 振动、气流的影响. 在测量过程中, 由于振动、气流等环境因素的影响, 对测量结果带来一定的误差. 实验采取气浮隔振平台等措施避免环境影响, 此误差可忽略.

4) 机架轴系随机误差. 根据精密机架的设计, 方位和俯仰轴系晃动误差最大值为 $2''$, 按正态分布 $\sigma_f = 2''/3 = 0.667''$.

5) 基准点标定误差. 在转台处于静止状态下对基准点进行多次重复连续采集得到重复性误差. 静态标定误差为 $\sigma_p = 0.1''$.

测量系统的定位误差为

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_p^2} = 0.867'' = 2.408 \times 10^{-4}$$

3.2 时间误差分析

1) 积分时间误差. 由相机的曝光时间引起的图像拖尾所产生的时间误差. 本误差属于系统误差, 在测量过程中可修正.

2) 采样时间误差. 本系统可采用 2 种方式获取时间值, 一种为直接读取相机内部时间, 一种通过外部采样脉冲信号触发相机录取图像, 这 2 种方法产生的时间误差均小于 $1 \mu\text{s}$, 即 $\sigma_t < 1 \times 10^{-6} \text{ s}$. 本实验采用的是相机的内部时间.

3.3 系统速率测量精度分析

当转台的角速率为 $\omega = 0.2^\circ/\text{s}$, 测角间隔为 $d = 1^\circ$ 时, 系统的测速精度为

$$\sigma_\omega = \frac{\sqrt{2 \left(\frac{\partial \omega}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + 2 \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 \sigma_t^2}}{\omega} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2} = 3.405 \times 10^{-4}$$

对于 I 级速率转台的速率精度标准是, 当测角间隔为 1° 时, 转台的速率精度要达到 0.2×10^{-2} . 测量设备的精度要比被测设备的精度至少高 3 倍, 因此, 测量设备的精度要达到 6.67×10^{-4} 以上. 本文系统的测速精度完全可以达到要求.

此外, 通过增加系统光学镜头的焦距可以进一步提高系统的定位精度, σ_0 可以提高到 1.895×10^{-4} , 系统的总精度可提高到 2.680×10^{-4} .

4 结 论

本文分析了利用高速摄像测量转台角速率的方法, 并通过试验验证了该测量方法的可行性. 通

过误差分析得出, 该方法的速度测量精度可达到 3.405×10^{-4} , 完全可以用于高精度转台的角速率测量.

1) 高速摄像测量方法具有非接触的特点, 排除了被测设备在测试过程中对测量结果的一些不定因素的影响, 实现了对转台的客观评价;

2) 高速摄像测量方法具有高频采样的特点, 使得测量的数据更接近于转台的瞬时角速率, 从而能够进一步获得转台的实际工作状态.

因此, 本文方法能够为检测和改进转台伺服系统提供更为客观、可靠的测量数据作为参考, 从而提高转台的角速率精度及平稳性, 提高转台的整体性能.

参考文献 (References):

- [1] 曾庆双, 秦嘉川. 转台伺服系统低速性能分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(2): 64-69. (ZENG Qing-shuang, QIN Jia-chuan. Analysis on the lowspeed function of turntable servo system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2001, 9(2): 64-69.)
- [2] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. (YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.)
- [3] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. (FEI Ye-tai. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.)
- [4] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 147-148. (YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. Precision measurement and movement measurement based on image [M]. Beijing: Science Press, 2002: 147-148.)
- [5] 刘金国, 李杰, 郝志航. APS 星敏感器探测灵敏度研究 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 553-557. (LIU Jin-guo, LI Jie, HAO Zhi-hang. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 553-557.)
- [6] 赵岩, 翟百臣, 武克用, 等. 转台伺服控制系统中数字化速度测量方法的研究 [J]. 电光与控制, 2005, 12(1): 43-46. (ZHAO Yan, ZHAI Bai-chen, WU Ke-yong, et al. Study on digital speed measurement methods for servo control system of swivel table [J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(1): 43-46.)
- [7] 付永启. CCD 在测速中的应用 [J]. 光学精密工程, 1995, 3(2): 94-97. (FU Yong-qi. Application of CCD in speed testing [J]. Optics and Precision Engineering, 1995, 3(2): 94-97.)
- [8] 黄战华, 刘森, 张伊馨, 等. 高速运动目标的光电精密测速系统误差分析 [J]. 光电工程, 2006, 33(3): 58-61. (HUANG Zhan-hua, LIU Miao, ZHANG Yi-xin, et al. Error analysis of precision opto-electronic velocity measurement for high-speed moving object [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(3): 58-61.)

(下转第 120 页)

