

三轴惯性仿真转台的动态性能测试方法

孙 伟,车莉娜,徐爱功

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:惯性仿真转台动态特性直接制约着惯性器件的标定精度,该文通过设置惯性仿真转台3个转动框架的摇摆幅度和频率,研究各旋转框在独立摇摆工作条件下所对应的角位置、角速度和加速度的理论输出与实际输出的获取方法并建立两者间的误差曲线。转台测试结果表明,该测试方法可有效获取实验室三轴惯性仿真转台的动态误差特性,且转台高频抖动噪声是影响惯性器件标定效果的主要因素。

关键词:三轴惯性仿真转台;转台动态误差;测试;惯性器件

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A

Dynamic Testing Method of Three-axis Inertial Simulation Turntable

SUN Wei, CHE Lina, XU Aigong

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The calibration accuracy of inertial device is determined by the dynamic characteristic of inertial simulation turntable. By setting up the swing amplitude and frequency of the three turning frameworks in the inertial simulation turntable, the method for obtaining the theory and practical output of angular position, angular rate and acceleration of each turning framework under independent swing is studied, and the error curve between theory and practice is calculated. The turntable testing results show that the dynamic error characteristic of three-axis inertial simulation turntable can be obtained by the proposed testing method and the high frequency dither noise is the main factor of influencing the calibration accuracy of inertial device.

Key words: three-axis inertial simulation turntable; turntable dynamic error; testing; inertial device

0 引言

惯性器件作为惯导系统中的核心部分,测试其动态特性是捷联惯导系统研制中的重要环节^[1-5]。三轴惯性仿真转台作为基础测试设备可满足测试的基本要求,但受转台自身精度影响及长期使用过程中产生的一些新误差,致使转台处于动态环境下会激发出更明显的误差。因此,研究转台动态性能测试方法,评价转台在动态环境下的理论与实际输出间的误差,考察转台各旋转框对惯性器件动态误差测试的影响具有重要意义^[6-8]。本文提出将转台各旋转框分别处于摇摆状态,通过求取转台角位置、角速度和加速度的理论与实际曲线,得出转台在动态条件下的角位置误差、角速度误差和加速度误差,以此完成对转台动态性能的测试。

1 转台动态误差测试

论文以实验室三轴惯性仿真转台作为研究对象。其台体采用U-O-O结构,即U形外框绕方位轴(外框轴Z)旋转、O形中框绕俯仰轴(中框轴Y)

旋转、O形内框绕横滚轴(内框轴X)旋转,且三轴旋转连续无限。方位轴为铅垂,俯仰轴为水平,横滚轴绕俯仰轴可处于不同位置。

1.1 转台角位置误差

对转台进行动态误差测试时,分别给转台各框施加按正弦规律变化的角速度输入,当转台框绕框轴以 0° 为中心做往复摇摆运动时,转台摇摆框的理论位置曲线为

$$P = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: P 为转台在 t 时刻的理论角位置; A 为摇摆幅度; f 为摇摆频率。需根据转台角位置的实际采样时刻对转台理论角位置曲线进行离散。依据采样时刻确定方法的不同,提出单一采样时间间隔和分周期求采样时间间隔确定转台角位置的实际采样时刻。

单一采样时间间隔确定转台角位置采样时刻的方法是依据数据接收软件采集到的转台实际角位置数据,计算出任意1s两个数据间的采样间隔,以此可得转台的理论角位置数据。其中,转台的角位置

收稿日期:2012-07-08

基金项目:第51批中国博士后科学基金面上资助项目(2012M510830);辽宁省教育厅一般基金资助项目(L2011047)

作者简介:孙伟(1984-),男,黑龙江萝北县,讲师,博士,主要从事惯性导航与组合方面的研究。E-mail:sunwei-3775235@163.com。

采样数据源于转台自身的输出口。设定转台内框的摇摆幅度为 10° , 摇摆频率为 0.1 Hz , 转台的理论角位置与实际角位置曲线如图 1 所示。

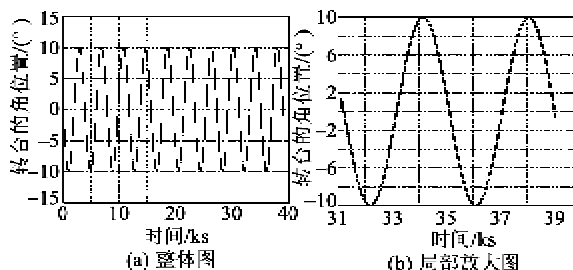


图 1 采用单一采样间隔的转台角位置对比曲线

由图 1 可知, 数据采集初期, 转台理论角位置数据能与实际角位置数据对齐, 保持相位一致, 但随着时间的推移, 理论值与实际值之间出现了较明显的相位差。这是由于数据接收软件在接收数据、数据解码和数据保存的过程需耗费一定时间造成的。如设定数据采样时间间隔为 2.5 ms , 转台的数字信号处理器 (DSP) 每 2.5 ms 向接收数据的计算机串口发送一次数据, 理论上每秒中能采集到 400 个数据。但由于计算机上的数据接收软件在接收、解码和保存数据的过程需耗费一定的时间, 因此实际上每秒采集到的数据个数不能达到 400, 而是在 $390\sim 391$ 之间变化, 因此实际采样时间间隔也在 $1/390\sim 1/391$ 之间。如果用单一采样时间间隔对式 (1) 进行离散, 就会出现上述转台理论角位置曲线与实际角位置曲线不对齐的现象, 且随工作时间的推移, 两曲线间的相位差会逐步加大。

分周期求采样时间间隔的主体思想是以框架摇摆平衡位置为基准, 把转台角位置的输出划分为若干周期, 分别计算每个周期的采样点数, 进而求出每个周期的采样时间间隔, 以此确定对应周期内转台角位置的实际采样时刻。该方法可消除转台角位置实际曲线与理论曲线间存在的相位差。图 2 为分周期法离散后的转台角位置理论输出与实际输出的曲线图。

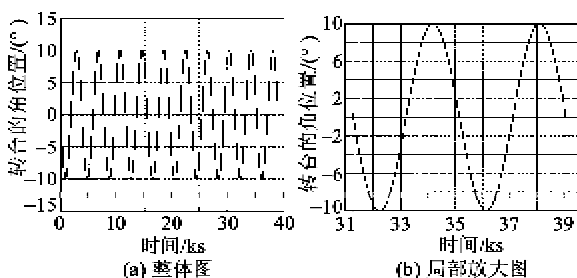


图 2 采用分周期法的转台角位置对比曲线

由图 2 可知, 采用分周期法得到的转台角位置

理论输出与实际输出曲线能实现良好的时间同步, 有效解决了因单一时间间隔离散转台的理论角位置曲线而造成转台角位置实际输出与理论值时间不同步的问题。

1.2 转台角速率误差

由于转台自身的限制, 通过数据接收软件只能接收到转台的实际角位置数据。但利用已知的转台角位置数据进行求导即可得到转台的角速度, 则

$$\omega_i = (P_{i+1} - P_i) / dt \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 时刻的转台角位置; ω_i 为第 i 时刻的转台角速度; dt 为两点角位置值间的采样时间间隔, 它等于每秒钟采集到的转台角位置个数的倒数。利用上述方法得到的转台的角速度如图 3 所示。

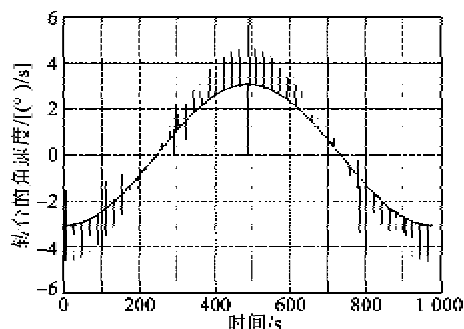


图 3 转台角位置求导得到的转台角速度

由图 3 可知, 转台的角速度曲线存在许多脉冲。原因是对信号求导 (即相当于信号通过微分器) 过程中, 会对信号的高频部分进行未知倍数的放大并使信号失真。由于求导得到的信号较复杂, 所以不易控制滤波器的“度”。图 4 为转台的实际角速度, 图 3 与图 4 对比可知, 滤波器滤除了原始信号中的尖刺的同时也使信号产生失真。因此, 该方法不可行。

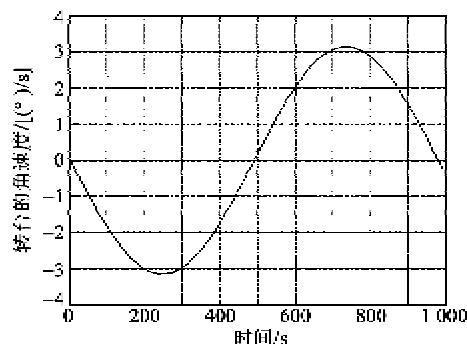


图 4 转台的实际角速度

但对式 (1) 求导并进行一系列变换可得

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f A \cos(2\pi f t) = 2\pi f A \sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &2\pi f A \sin\left[2\pi f \left(t + \frac{1}{4f}\right)\right] = 2\pi f A \cdot \end{aligned}$$

$$\sin\left[2\pi f\left(t+\frac{T}{4}\right)\right] \quad (3)$$

令 $t+\frac{T}{4}=t'$, 式(3)变为

$$\omega=2\pi fA\sin(2\pi ft')=2\pi fp' \quad (4)$$

式(4)反应了转台角速度与角位置间的函数关系。不需对角位置信息求导,就可通过已知的转台实际角位置得到转台的实际角速度。由于数据采用离线处理,且转台运动具有周期性,所以利用该方法得到转台的实际角速度曲线如图4所示。

通过与图3对比,图4描述的转台实际角速度无尖刺且能反映转台的运动状态,因此该方法可用于对转台角速度的提取。

1.3 转台加速度误差

在重力场内分别对转台的内框和中框进行动态特性测试,它们感受重力加速度分量为

$$a=g\sin P \quad (5)$$

式中: a 为转台摇摆框所感受的重力加速度分量; g 为当地重力加速度。将式(1)代入式(5)可求出转台理论加速度值。同理,利用数据接收软件得到的转台实际角位置,也可求出转台的实际加速度值。

2 惯性器件动态误差测试的必要性

捷联惯导系统中的惯性器件与载体固联,直接承受载体角运动。由角运动引起的干扰易使其产生动态误差。因此,研究惯性器件的动态误差是提高捷联惯导系统环境适应能力所必须进行的研究工作。惯性器件的动态特性测试是在载体作变角速度/变角加速运动的环境下对惯性器件的输出进行测试。在实验室现有条件下,利用三轴惯性仿真转台模拟舰船的摇摆运动,对其施加按正弦规律变化的角速度输入,通过分析转台的运动规律,建立惯性器件的理论输出和实际输出曲线,计算动态输出误差,以评价惯性器件的动态特性。

转台动态误差直接影响惯性器件的测试水平。由于转台自身局限性导致惯性器件在测试过程中,会存在一些干扰因素夹杂在转台实际角速度和加速度中,影响对惯性器件动态误差的正确判断,且这些干扰因素在不同转台框中的作用程度不同。因此惯性器件测试选择不同的转台框时,就会出现不同的测试结果。

3 测试结果及分析

3.1 转台动态误差测试结果分析

根据论文提出的转台动态误差测试方法,对转

台内、中、外三框进行测试。分别设定转台各框摇摆幅度为 5° , 摇摆频率为 0.2 Hz , 各框角位置误差曲线、角速度误差曲线和加速度误差曲线分别如图5~12所示。

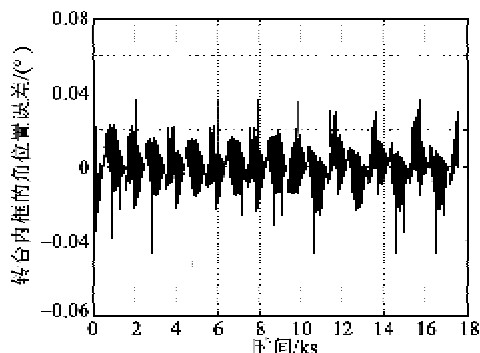


图5 转台内框的角位置误差

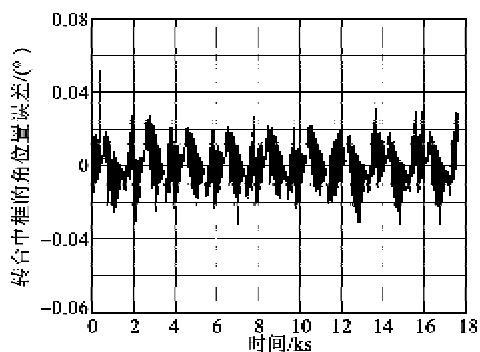


图6 转台中框的角位置误差

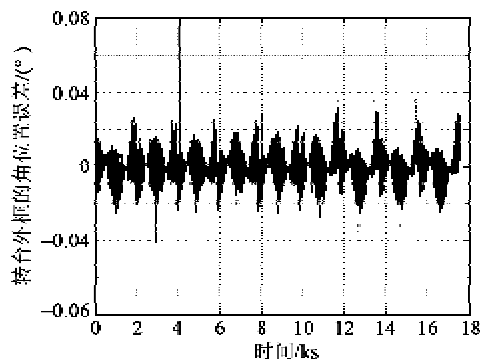


图7 转台外框的角位置误差

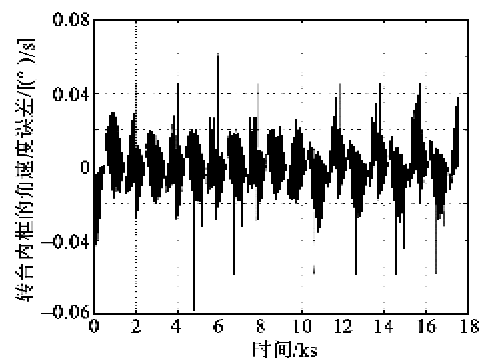


图8 转台内框的角速度误差

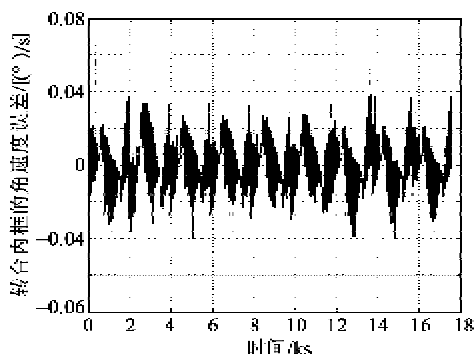


图9 转台中框的角速度误差

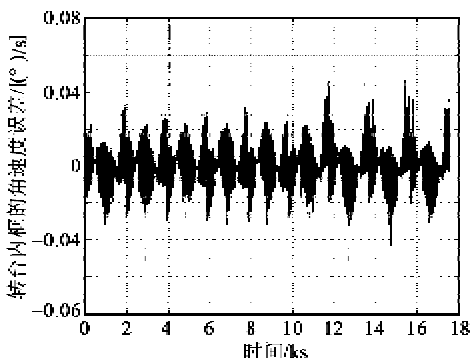


图10 转台外框的角速度误差

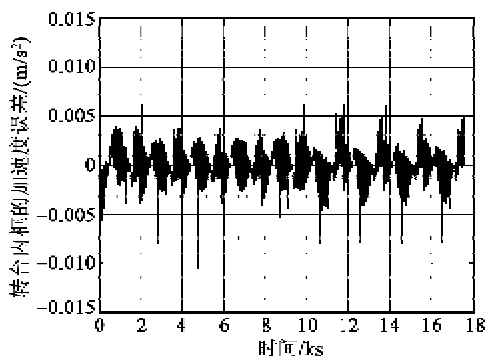


图11 转台内框的加速度误差

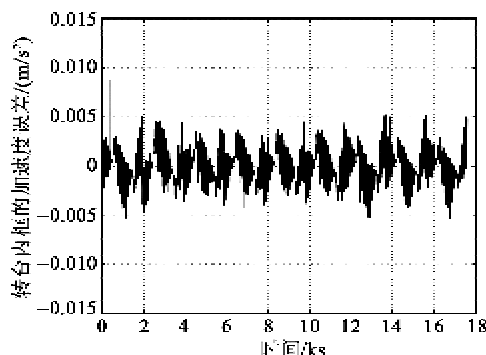


图12 转台中框的加速度误差

通过对图5~7的分析可看出,转台内、中、外框的角位置常值误差分别为 $-6.201\ 656 \times 10^{-5}$, $-9.386\ 311 \times 10^{-5}$, $3.765\ 857 \times 10^{-5}$,其标准差分

别为 $0.009\ 075$, $0.009\ 734$, $0.008\ 431$ 。

转台内、中、外框的角速度误差的常值误差分别为 $-7.793\ 231 \times 10^{-5}$, $-1.179\ 519 \times 10^{-4}$, $4.732\ 315 \times 10^{-5}$,其标准差分别为 $0.011\ 404$, $0.012\ 232$, $0.010\ 595$ 。

转台内、中框的加速度误差的常值误差分别为 $-1.057\ 561 \times 10^{-5}$, $-1.600\ 543 \times 10^{-5}$,其标准差分别为 $0.001\ 547$, $0.001\ 659$ 。由于转台的外框对方位不敏感,所以在重力场中,转台的外框不存在加速度误差。

转台的动态性能是指动态平稳性,所谓常值误差是指误差均值,标准差用来表征离散性。根据实验得到的角位置误差,角速度误差及加速度误差的均值和标准差可看出,转台外框的动态性能最好,内框次之,中框最差,转台框的角位置误差、角速度误差和加速度误差中均不含常值误差。经分析可知转台的机械抖动会引起输出信号中存在高频噪声。

3.2 惯性器件的动态特性测试

为了验证转台动态误差对惯性器件动态特性测试的影响,选择不同转台框对捷联惯导系统中的惯性器件进行测试。但只有部分惯性器件可选择不同的转台框即光纤陀螺X轴可选择中框和外框,光纤陀螺Y轴可选择内框和外框,加速度计Z轴可选择内框和中框。

按照本文提出的惯性器件动态误差测试方法,对上述3个惯性器件进行测试。分别设定不同转台框的摇摆幅度为 8° ,依次执行摇摆频率为 0.1 Hz 、 0.2 Hz 、 0.3 Hz 、 0.4 Hz 和 0.5 Hz 的摇摆运动。光纤陀螺X的测试结果(即角速度误差的标准差)如表1所示,光纤陀螺Y的测试结果(即角速度误差的标准差)如表2所示,加速度计Z的测试结果(即加速度误差的标准差)如表3所示。

表1 光纤陀螺X的测试结果

频率/Hz	角速度误差的标准差/($^\circ$)	
	中框	外框
0.1	0.016 92	0.016 77
0.2	0.044 42	0.028 37
0.3	0.050 15	0.045 17
0.4	0.083 98	0.082 47
0.5	0.161 95	0.102 92

表 2 光纤陀螺 Y 的测试结果

频率/Hz	角速度/[$(^{\circ})/\text{s}$]	
	内框	外框
0.1	0.028 07	0.026 37
0.2	0.072 27	0.038 22
0.3	0.086 58	0.050 04
0.4	0.097 04	0.081 90
0.5	0.121 01	0.106 53

表 3 加速度计 Z 的测试结果

频率/Hz	加速度/ (m/s^2)	
	内框	中框
0.1	0.003 12	0.003 50
0.2	0.003 54	0.004 42
0.3	0.004 88	0.005 43
0.4	0.009 01	0.009 47
0.5	0.014 28	0.014 60

结合对表 1~3 的分析可看出,随着摇摆频率的增长,误差的标准差逐渐增大。因此可表明,转台的各项误差主要由转台的机械抖动引起,表现为高频的抖动噪声。我们在对惯性器件进行测试时,尽量选择动态性能好的转台框,以减小测试设备对被测试器件精度的影响。

4 结束语

本文提出一种实验室三轴惯性仿真转台的动态误差测试方法。利用转台的摇摆工作状态,通过求取三轴转台转动框的角位置误差、角速度误差和加速度误差实现对转台动态性能的评价。利用转台对惯性器件的性能指标进行测试,结果表明转台各框的动态误差会对惯性器件的测试结果产生影响。寻求合理的方法去除转台抖动噪声,减小测试设备误差并进一步提高惯性器件的测试精度是我们今后继

续开展的研究工作。

参考文献:

[1] HECKMAN D W, BARETELA M. Interferometric fiber optic gyro technology(IFOG)[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(2): 23-28.

[2] NEIL B, GEORGE S. Inertial sensor technology trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.

[3] 孙枫, 孙伟. 基于双轴转位机构的光纤陀螺标定方法研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1870-1874.
SUN Feng, SUN Wei. Research on the calibration of IFOG based on the two-axis indexing[J]. Control and Design, 2010, 25(12): 1870-1874.

[4] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1997.

[5] 太松月. 光纤陀螺捷联惯性导航系统标定测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

[6] 范胜林, 孙永荣, 袁信. 捷联系统陀螺静态漂移参数标定[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(1): 42-46.
FAN Shenglin, SUN Yongrong, YUAN Xin. Calibration of gyro static drift parameters of strapdown system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(1): 42-46.

[7] MORROW R B, HECKMAN D W. High precision IFOG insertion into the strategic submarine navigation system[A]. Position Location and Navigation Symposium[C]//Palm Springs, CA, USA: IEEE, 1998: 332-338.

[8] LIU Q, LIU L, QI Z K. Error analysis and compensation of strapdown inertial navigation system[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(2): 117-120.

(上接第 518 页)

[11] A H 施利亚耶夫, 著. 概率[M]. 周概容, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[12] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 安徽: 中国科技大学出版社, 2009.

[13] 王宇, 汤建勋, 张鹏飞, 等. 一种提高激光陀螺惯导系统精度的方法[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 467-470.

[14] SOLOVIEV A. Tight coupling of GPS, INS, and laser for urban navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1731-1746.

WANG Yu, TANG Jianxun, ZHANG Pengfei, et al. A method to improve the accuracy of RLG INS[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 467-470.