

## 陀螺仪安装误差的测量方法研究

杨功流      杨君      李俊      高钟毓  
 (清华大学)    (天津航海)    (西北工业大学)    (清华大学)  
 (精密仪器系)    (仪器研究所)    (航海学院)    (精密仪器系)

**摘要:** 介绍了一种用于测量平台式惯性导航系统陀螺安装误差的陀螺轴扰动技术. 该技术无需增加惯导系统的硬件设施, 通过对平台框架施加特定的控制力矩, 使其按照要求的规律运动, 然后采集有关的数据并通过适当的算法即可得到陀螺的安装误差角. 理论分析和仿真结果表明, 利用该技术可以有效地提高惯导系统的导航精度.

**关键词:** 惯性导航系统; 伺服纵摇轴扰动; 陀螺安装误差

**中图分类号:** U666.12    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-4512(2003)07-0078-03

陀螺输入轴的不对准误差相当于一个等效的常值陀螺漂移<sup>[1]</sup>, 监控技术只能测量陀螺本身的漂移, 而无法测量自身的安装误差. 对于中等精度惯导系统来说, 陀螺的安装误差并不算什么问题, 30"的安装误差, 等效陀螺漂移最多也超不过 0.003°/h; 但对于高精度惯导系统, 安装误差所等效的常值陀螺漂移就是影响系统精度不容忽视的一个因素<sup>[2]</sup>. 本文所阐述的陀螺轴扰动技术就是用于测量陀螺仪的安装误差, 在工程实际中据此测量值可在惯导计算机中作相应的补偿, 从而有效地提高惯导系统的导航精度. 这种技术的实现既可在实验室中, 也可在码头系泊状态下进行.

## 1 陀螺轴扰动技术的工作原理

陀螺轴扰动技术主要用于在固定指北半解析式惯性导航系统中进行陀螺仪安装误差的测量, 其基本思路是: 为了测量稳定平台台体上安装的某一陀螺仪(例如北向陀螺仪)的安装误差, 可以让与该陀螺仪敏感轴(或称输入轴)名义上垂直的平台框架轴(例如纵摇轴)以高速率、小振幅的角速度扰动, 若北向陀螺仪的输入轴不严格正交于纵摇轴, 则一个与非正交度成正比的速率信号将被北向陀螺仪的输入轴所感知; 适当地处理该速率信号, 就能够算出北向陀螺仪相对于扰动轴的安装误差.

陀螺仪的安装误差可以用其绕另外两根轴的

转角来表示, 如图 1 所示. 假设北向陀螺仪的输入轴  $OI$  不严格垂直于平台的纵摇轴  $OX$  及方位轴  $OZ$ , 存在安装误差角  $\eta_x$  及  $\eta_z$ . 当沿纵摇轴  $OX$  以某一角速度  $\omega_x$  扰动时, 与之成比例的速率信号  $-\omega_x \sin \eta_z \cos \eta_z$  就会被北向陀螺仪的输入轴所敏感. 扰动量在陀螺仪输入轴上的分量如图 2 所示. 同样, 当沿方位轴  $OZ$  以某一角速度  $\omega_z$  扰动时,

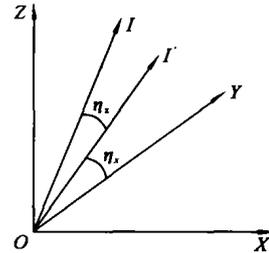


图1 陀螺仪安装误差示意图

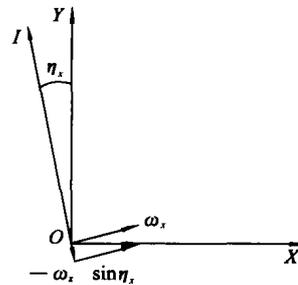


图2 扰动分量示意图

与之成比例的速率信号  $\omega_z \sin \eta_z \cos \eta_z$  也会被北向陀螺仪的输入轴所感知. 这样, 在进行陀螺轴扰动时, 由于北向陀螺仪存在安装误差, 它将敏感知另外两个轴的角速度, 该角速度在系统中的作用

收稿日期: 2002-11-07.

作者简介: 杨功流(1967-), 男, 博士研究生; 北京, 清华大学精密仪器系(100084).

基金项目: “十五”国防重点预研基金资助项目(105040201).

等效于该陀螺仪的漂移量,用  $\epsilon$  表示这个等效漂移.由图 1 可得

$$\epsilon = -\omega_X \sin \eta_X \cos \eta_Z + \omega_Z \sin \eta_Z \cos \eta_X.$$

安装误差一般只有十几秒到几十秒,  $\eta_X$  和  $\eta_Z$  为小量,因此上式可以化简为

$$\epsilon = -\omega_X \eta_X + \omega_Z \eta_Z.$$

这样,利用陀螺轴扰动技术,可以分别求出陀螺仪的安装误差  $\eta_X$  和  $\eta_Z$ .

陀螺轴扰动有几种实现方法.本文介绍的是伺服纵摇轴扰动法,这种方法的执行过程如图 3 所示.图中硬件设备都是固定指北半解析式船用惯导系统已具备了,因此扰动技术需要增加的系统硬件设备很少,从而使得系统的控制、分析和处理十分方便.

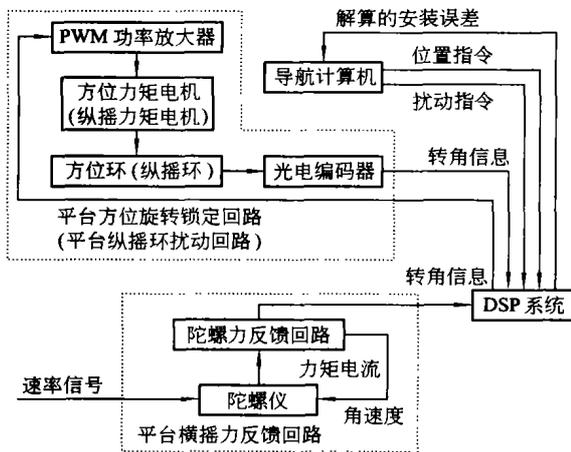


图3 伺服纵摇轴扰动技术示意图

平台方位旋转锁定回路从计算机接受位置指令,由测角系统测得的实时位置信息与计算机给出的位置指令在DSP中比较,误差信号经DSP进行解算,其PWM控制电压信号经功率放大器放大后由方位力矩电机驱动方位环旋转至方位环锁定.测角系统中的测角元件采用高精度的光电编码器,经细分处理后测角精度在 $0.5''$ 左右<sup>[3]</sup>.实时角度信号送给DSP进行处理,目前测角系统的控制精度可以达到 $\pm 2''$ <sup>[4]</sup>.

平台纵摇扰动DSP控制回路从计算机接受扰动指令,由测角系统测得的实时位置信息与计算机给出的扰动指令相比较,将误差信号经DSP进行控制解算,放大后驱动内环转动.适当设置回路的带宽,使扰动回路能够满足对扰动指令的跟踪要求.

在平台横摇力反馈回路中,陀螺仪敏感的角速度由力反馈电路转换成与之成比例的力矩电流,经DSP的A/D口由DSP解算后送计算机处理.

## 2 陀螺轴扰动技术的实施

陀螺轴扰动技术的实施分为水平轴扰动技术的实施和方位轴扰动技术的实施.以下主要讨论水平轴扰动技术的实施,方位轴扰动技术的实施与此类似,在此就不再赘述了.

水平陀螺轴扰动技术的实施均通过纵摇轴扰动来实现.测量水平陀螺仪绕方位轴转过的失调角,必须先把陀螺仪的输入轴对准名义上的横摇轴,然后通过实施纵摇轴的扰动技术来测量.而垂直面内的失调角均可以通过方位轴扰动技术来测得.

首先让方位环工作在旋转锁定状态,从计算机接受旋转指令,让平台沿方位轴逆时针转过 $90^\circ$ ,使东向陀螺仪的输入轴名义上对准“平台北向”,然后平台自锁在这个位置上,此时东向陀螺仪工作在力反馈状态.当平台扰动时,横摇轴工作在跟踪状态,纵摇轴工作在扰动状态,而方位轴工作在锁定状态;扰动和跟踪以及被扰动的陀螺仪均受计算机控制.

按以上过程测出东向陀螺仪沿方位轴转过的失调角 $\eta_X$ 后,让平台沿方位轴顺时针转过 $90^\circ + \eta_X$ ,让北向陀螺仪的输入轴名义上对准“平台北向”,并让平台自锁在这个位置上,北向陀螺仪工作力反馈状态.然后实施扰动技术即可测出北向陀螺仪沿方位轴的失调角 $\delta_X$ .

由于系统的初始偏角很大,因此扰动技术分为粗对准和扰动两个阶段.粗对准过程大约20s即可完成,然后外环工作在跟踪状态,内环工作在扰动状态.

## 3 安装误差角的计算

为了便于数据处理和扰动技术的实施,选取扰动信号的形式如下:

$$\theta = \theta_0 \sin \omega_0 t,$$

式中,  $\theta_0 = 5^\circ$ ;  $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 20$  s.

从以上可以看出,扰动的角速率比地球自转角速率的水平分量大得多.扰动速率被陀螺仪输入轴敏感的分量

$$\dot{\gamma} = \dot{\theta} \sin \eta_X = \theta_0 \omega_0 \cos \omega_0 t \cdot$$

$$\sin \eta_X \approx \eta_X \theta_0 \omega_0 \cos \omega_0 t.$$

由于存在摇摆噪声 $\xi$ ,陀螺力反馈回路接收的角速度信号为

$$\omega = \eta_X \theta_0 \omega_0 \cos \omega_0 t + \xi.$$

为了消除摇摆噪声的影响,必须对陀螺力反馈回路接收的角速度信号进行滤波处理,为此在计算机中作如下处理:

$$\omega \cos \omega_0 t = \eta_X \theta_0 \omega_0 \cos^2 \omega_0 t + \xi \cos \omega_0 t = (\eta_X/2)(1 + \cos 2\omega_0 t) + \xi \cos \omega_0 t. \quad (1)$$

式(1)经滤波后,得到直流分量,则  $\eta_x = 2\omega_1 / (\theta_0 \omega_0)$ .

为了去除摇摆噪声,本研究在以下的方案中采用了巴特沃斯滤波器,使系统在通频带内幅频响应曲线平坦,在截止频率以外,幅频响应衰减较快.三阶巴特沃斯滤波器能够满足本系统的要求.

#### 4 准动态仿真

仿真条件为:

a. 航向角,  $K = K_0 + K_1 \sin \omega t$ , 式中,  $K_0 = 15^\circ$  ( $K_0$  为固定航向角);  $K_1 = 5.73^\circ$  ( $K_1$  为偏航角);  $T = 2\pi/\omega = 7$  s.

b. 纵、横摇角的幅值均为  $15^\circ$ , 周期为 8 s.

c. 陀螺仪安装误差角假设为  $62''$ .

仿真结果,用本文所述的扰动技术测得安装误差角为  $63''$ .

#### 参 考 文 献

- [1] 陆元九. 陀螺及惯性导航系统. 北京: 科学出版社, 1964.
- [2] 谢列托维奇 C M. 陀螺系统仪表误差的自动补偿. 赵荣先, 雷传奇(译). 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [3] 李培华, 林友德. 光电编码器误差测量. 光学仪器, 1996, 18(3): 1~7
- [4] 高钟毓. 机电一体化系统设计. 北京: 机械工业出版社, 2000.

### Technique for estimation of gyro installation errors

Yang Gongliu Yang Jun Li Jun Gao Zhongyu

**Abstract:** A technique for estimation of gyro installation errors in gimbale INS was presented based on the oscillation around gyro input axis. Without extra electronics and other devices, the gyro installation error can be obtained by processing the collected data after applying a specific control torque to the gimbal to make it move in the set way. The theoretical analysis and simulation results show that the technique of oscillation around gyro input axis will improve the accuracy of INS.

**Key words:** inertial navigation system; pitch axis; gyro installation error

**Yang Gongliu** Doctoral Candidate; Dept. of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 10084, China.

#### 华中科技大学博士后科研流动站(17个)(1)

力学: 一般力学与力学基础、固体力学、流体力学、工程力学.

机械工程: 机械制造及其自动化、机械电子工程、机械设计及理论、车辆工程.

动力工程与工程热物理: 工程热物理、热能工程、动力机械及工程、流体机械及工程、制冷及低温工程、化工过程机械.

电气工程: 电机与电器、高电压与绝缘技术、电力电子与电力传动、电力系统及其自动化、电工理论与新技术.