

文章编号 1004-924X(2008)09-1712-04

# 光电平台中陀螺解耦问题的研究

陈占军<sup>1,2</sup>, 葛文奇<sup>1</sup>, 李 英<sup>1,2,3</sup>, 赵秀影<sup>1,4</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;  
4. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**为了解决两轴、三轴光电平台中陀螺仪的解耦问题,提高光电平台的稳定性,分析了造成两轴光电平台陀螺仪输出耦合的原因,给出了两轴平台正割解耦的算法。结合动力调谐挠性陀螺仪的工作原理与三轴光电平台的具体结构,探讨了三轴光电平台陀螺仪耦合的原因,给出了三轴平台正弦解耦的算法以及基于 ARM 单片机的解耦软硬件处理技术。通过对三轴平台解耦实验,滚转轴 22 mV 的耦合输入在解耦后输出降低到 3 mV,耦合程度降低 86.4%,大大提高了平台高速运动时的控制性能和稳定精度。

**关键词:**光电平台;速率陀螺;解耦;ARM 单片机;惯性导航

**中图分类号:**V241.5 **文献标识码:**A

## Research of gyro decoupling problem on photo-electric platform

CHEN Zhan-jun<sup>1,2</sup>, GE Wen-qi<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Xiu-ying<sup>1,4</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*; 4. *Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** To resolve the problem of the gyro decoupling on two-axis and three-axis photo-electric platforms, and improve their stabilizations, the gyro coupling reason of two-axis photo-electric platform was analyzed, and a secant decoupling algorithm was given. With combination of the principle of flexible dynamic tuning gyroscope and the specific structure of photo-electric platform, the gyro coupling reason of tree-electric platform was discussed, and a sine decoupling algorithm and the ARM-based MCU decoupling hardware and software processing techniques were given. The experimental results indicate that the coupling amplitude value decreases from 22 mV to 3 mV, which means coupling degree decreases by 86.4%. It comes to the conclusion that proposed algorithm improves the control performance and stability accuracy when the platform turns at a high speed.

**Key words:** photo-electric platform; rate gyro; decoupling; ARM-based MCU; inertial navigation

收稿日期:2007-11-05;修订日期:2008-01-21.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)

# 1 引言

近年来,机载光电平台发展很快,结构越来越复杂,精度要求越来越高,功能也越来越强。因此,越来越受到人们的重视。陀螺仪是平台上最关键的测量元件之一,是稳定系统中的主要测量元件,尤其对速率陀螺仪,无论是两轴平台上的两自由度一体陀螺仪,还是三轴平台上的单自由度陀螺仪,在使用中必须考虑陀螺仪的解耦问题,否则会影响平台稳定精度,甚至会产生错误结果<sup>[1-6]</sup>。本文分别对二自由度陀螺仪以及三轴平台中的单自由度陀螺仪的解耦问题加以分析探讨。

# 2 单体双自由度的陀螺仪解耦

动力调谐挠性陀螺仪,绝大多数为两轴一体的双自由度陀螺仪,当把它作为两轴平台的速率敏感元件时,为分别测出两个轴的运动速度,必须将其安装在内框架的回转轴上。当俯仰轴(或称水平轴)与水平面成  $0^\circ$  角时,对方位轴(垂直轴)的运动速度测量无任何影响;当俯仰轴向下(或向上)运动成一定角度  $\alpha$  时,此时陀螺仪所敏感的方位输出信号幅值会下降,因为陀螺仪所敏感的方位运动只是一部分运动,如图 1 所示。为了保持速度的恒定,需要转换到  $0^\circ$  时的速度。

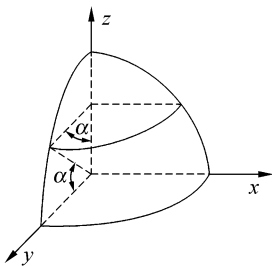


图 1 双自由度陀螺  
Fig.1 Two freedom gyro

根据几何关系不难推出式(1)的关系:

$$\Omega_{E_0} = \Omega_{E_i} \cdot \sec \alpha, \quad (1)$$

式中,  $\Omega_{E_0}$  为俯仰角  $\alpha$  时解耦后方位轴的陀螺理想输出,  $\Omega_{E_i}$  为俯仰角  $\alpha$  时在解耦前方位轴陀螺实际输出。式(1)即所谓的正割补偿,也是最基本最简单的解耦方法。当用两只单自由度陀螺仪分别敏

感各自的运动轴时,则不存在上述解耦问题。

# 3 三轴稳定平台中的陀螺解耦

近年来,在机载光电平台中或导引头中,三轴稳定平台也不断出现和广泛应用。在三轴平台中,尽管使用了 3 只单自由度陀螺仪,同样也存在解耦问题,其关系如图 2 所示。有  $x, y, z$  三个轴,图中  $z$  轴为最内环轴,  $y$  轴为中环架,而  $x$  轴为外环架,3 只陀螺分别为  $G_x, G_y, G_z$ 。

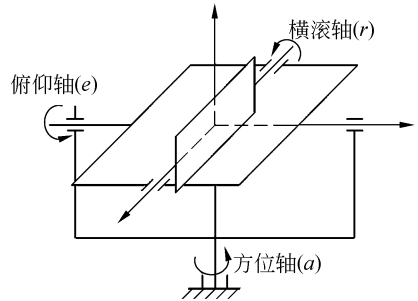


图 2 三轴转台结构图  
Fig.2 Block diagram of three axial turntable

记方位平面为  $PA$ , 俯仰平面为  $PE$ , 滚转平面为  $PZ$ 。当俯仰平面由原来位置向下(向上)转动一个角度时,此时外框速度不会对中框速度有影响(非正交安装除外),但是对滚转轴的运动速度有影响,即使是滚转轴自身无运动,外框也会对滚转轴产生一个附加输出分量,从而使滚转轴产生附加运动,这个附加运动是系统不希望产生的,这就是系统要解决的陀螺解耦问题。

造成陀螺耦合的主要原因是平台坐标系  $Oxyz$ (陀螺仪轴输入轴坐标系)不能和  $Ox_Ay_Az_A$ (平台伺服回路执行轴坐标系)重合。针对这一原因,应在平台系统中加入坐标转换电路,把陀螺在  $Oxyz$  坐标系中的信号转换到  $Ox_Ay_Az_A$ 。假设  $T$  为转换矩阵,  $\alpha$  为方位角度,  $\psi$  为俯仰角度,则有:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \psi \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \psi \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha \sec \psi & \cos \alpha \sec \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(3)可见,转换矩阵分为方位坐标分解器和正割分解器两部分。其中方位坐标分解器可以

由沿方位安装的正余弦旋转变压器来实现,正割分解由放大电路来实现。设方位坐标分解器的变换系数为  $k_{ACR}$ ,正割分解器的传递系数为  $k_{SR}$ 。则有:

$$\begin{cases} u_x^A = k_{ACR}(u_x^a \cos \alpha + u_r^a \sin \alpha) \\ u_y^A = k_{ACR}k_{SR}(u_x^a \sin \alpha + u_r^a \cos \alpha) \sec \psi \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $u_x^A$  和  $u_y^A$  分别为输入到俯仰和横滚伺服系统的电压。对于横滚来说当伺服系统的增益足够大时可以省略正割分解器,同时当方位角度比较小(变化范围为  $\pm 5^\circ$ )时,  $\cos \alpha \approx 1$ ,于是有:

$$\begin{cases} u_x^A = k_{ACR}(u_x^a \cos \alpha + u_r^a \sin \alpha) \\ u_y^A = k_{ACR}(u_x^a \sin \alpha + u_r^a) \end{cases}. \quad (5)$$

如果三轴转台使用三轴一体化陀螺仪,则解耦问题更加复杂化,这里不做讨论。

### 4 解耦的计算机实现

#### 4.1 基于 ARM 单片机解耦处理电路

根据实际系统的要求,解耦电路必须要在能够完成解耦功能的同时,电路尽可能简单。综合模数转换精度和数模转换精度以及处理器运算速度等因素,系统选用了菲利普公司的 LPC2136 单片机作为控制器。LPC2136 控制器具有多通道 10 位的模数转换模块和单通道 10 位的数模转换模块,大大简化了硬件电路,同时减少了系统需要的体积;LPC2136 具备 60 MHz 的处理速度,其内部加速模块能够使程序运行加速到 200 MHz,采样频率在 20 kHz 以上,几乎可以看作连续系统;同时 LPC2136 具有 32 位运算处理器,保证了计算正弦函数时的计算精度<sup>[7-9]</sup>。

根据(3)式,设计出的硬件电路如图 3 所示。

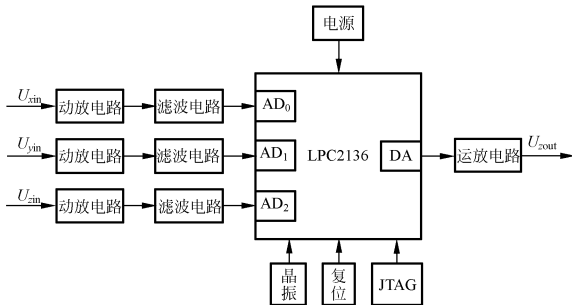


图 3 平台解耦电路框图

Fig. 3 Circuit diagram of platform decoupling

### 4.2 解耦计算的软件设计

按照(3)式,将  $u_a, u_x^a, u_r^a$  分别经 10 位 A/D 变换器采入,并经运算得出  $u_y^A$ 。这里以 C 语言编写运算程序,程序流程图如图 4 所示。

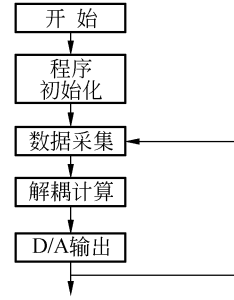


图 4 程序流程图

Fig. 4 Flowchart of program

### 5 实验结果分析

为检验平台解耦系统的解耦效果,对三轴平台做如下实验:保持  $z$  轴(滚转轴)相对静止(即: $z$  轴伺服系统给定 0 输入),分别测试  $x$  轴(方位轴)在不同的角度下, $y$  轴(俯仰轴)在不同的速度下的工作,测试  $z$  轴解耦前与解耦后的陀螺输出。测试条件:滚转轴解耦前静态输入 18 mV,滚转轴解耦后静态输出 -28 mV,方位水平位置电压 5.0 V。

表 1 三轴转台解耦实验数据表

Tab. 1 Decouple lab data table of three axial turntable

方位角 度(V)	俯仰速 度(V)	横滚解耦 前陀螺输 出(mV)	横滚解耦 后陀螺输 出(mV)	解耦前 相对输 出(mV)	解耦后 相对输 出(mV)	降低程度 (%)
-7.201	1	-6	-34	-24	-7	70.833 3
-7.201	1	-5	-30	-23	-3	86.956 5
-7.201	-1	39	-25	21	2	90.476 2
-7.201	-1	40	-24	22	3	86.363 6
-3.465	1	-2	-24	-20	3	85.0
-3.465	1	-4	-29	-22	-2	90.909 1
-3.465	-1	38	-24	20	3	85.0
-3.465	-1	37	-22	19	5	73.684 2
-3.465	-1.503	47	-22	29	5	82.758 6
-3.465	1.503	-13	-32	-31	-5	83.871

由表 1 实验数据可见,最大耦合降低 90.909 1%,最小耦合降低 73.684 2%。虽然不

能依照理论计算彻底消除三轴平台的耦合,但是解耦后俯仰轴的运动对滚转轴的影响大大降低。

## 6 结 论

速率陀螺作为光电平台系统中高精度测量元件,其输出的结果正确与否直接关系到平台的

稳定精度。本文通过对两轴、三轴光电平台中存在的陀螺耦合问题进行了分析和相应坐标系的变换,并分别给出了相应的解耦算法;以 ARM 单片机作为解耦系统的核心,给出了三轴平台的硬件处理电路。该解耦系统经过了 600 多小时的各种试验,电路工作稳定可靠,算法也是可行的。

## 参考文献:

- [1] 郭富强,于波,汪叔华. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.  
GUO F Q, YU B, WANG SH H. *Gyro Stabilization Plant and the Application*[M]. Xi'an: Northwestern University Press,1995. (in Chinese)
- [2] 毕永利,刘洵. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程,2004,31(2):16-18.  
BI Y L, LIU X. Design of a velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope-stabilized platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004,31(2):16-18. (in Chinese)
- [3] 陆元九. 陀螺及惯性导航原理[M]. 北京:科学出版社,1964.  
LU Y J. *Gyro and Inertial Navigation Principle* [M]. Beijing:Scientific Press,1964.
- [4] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.  
ZHANG R W. *Satellite Trajectory Attitude Dynamics and Control* [M]. Beijing:Beijing Aerospace University Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [5] 颜昌翔,王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程,2000,8(3):203-204.  
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-204. (in Chinese)
- [6] 李岷,马军. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(5):847-852.  
LI M, MA J. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):847-852. (in Chinese)
- [7] 周立功,张华,等. 深入浅出 ARM7[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.  
ZHOU L G, ZHANG H. *Easy ARM7* [M]. Beijing:Beijing Aerospace University Publishing House. (in Chinese)
- [8] PHILIPS. LPC213x User Manual 2005[Z].
- [9] PARVIN R H. *Inertial Navigation* [M]. D. Van Nostrand Company, INC,1962.

作者简介:陈占军(1979—),男,河北保定人,博士研究生,主要从事伺服控制方面的研究。E-mail: chzhj\_6@163.com  
葛文奇(1946—),男,吉林长春人,博士生导师,主要从事伺服控制方向的研究。