

文章编号: 1001-0920(2002)03-0368-04

# 一类含陀螺安装误差角的惯导平台漂移模型的修正

付振宪, 邵长胜, 邓正隆

(哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 研究陀螺安装误差角对惯导平台漂移运动的影响, 在此基础上推导了修正的平台漂移运动模型, 并指出了以往平台漂移运动方程中与陀螺安装误差有关的错误。分析表明, 以往模型中出现的从陀螺敏感轴系到平台轴系的变换阵是多余的。在实际惯导平台上通过测漂实验对新模型进行了验证, 结果表明, 由基于新模型的 EKF 得到的参数估计收敛性远好于基于未修正模型的情况。

**关键词:** 陀螺; 安装误差角; 惯导平台; 漂移; 建模

**中图分类号:** V 294.322      **文献标识码:** A

## Modification of inertial navigation platform drift model containing gyro misalignment angles

FU Zhen-xian, SHAO Chang-sheng, DENG Zheng-long

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The effect of gyro misalignment angles on the INS platform drift is investigated. A modified platform drift model is derived which corrects the previous modeling error relevant to the gyro misalignment angles. The coordinate transform matrix from gyro sensor frames to the platform frame, which arises in the previous literature, is shown to be superfluous. Verification is made by performing drift test on a real type of INS platform, whose measurement data is processed by EKF to identify the platform drift parameters. The parameter estimation result given by the EKF based on the new derived model exhibits much better convergence than that given by the EKF based on the unmodified one.

**Key words:** gyro; misalignment angle; INS platform; drift; modeling

## 1 引言

惯导平台上与陀螺和加速度计相关的各种误差源是导致平台产生漂移的主要原因。对这些误差源的辨识及补偿一直是被关注的领域。由于系统级辨识与元件辨识相比具有置信度更高、可辨识参数更多等优点, 随着对飞行器导航精度要求的不断提高, 对惯导平台漂移误差的系统级辨识与补偿已成为当前的研究热点。

系统级辨识的前提是要建立起能如实反映平台漂移发生机理的运动模型。Frazier J Hellings 在研究扩展卡尔曼滤波器(EKF)在平台漂移参数系统级辨识中的应用时, 以基于液浮单自由度陀螺的惯导平台为背景, 把陀螺、加速度计的各阶输出误差系数、安装误差角以及控制力矩标度因数都考虑在内, 建立了多达 63 维的平台漂移模型<sup>[1]</sup>。该模型物理意义明确, 具有较强的工程实用性, 在惯导平台测漂领

收稿日期: 2001-02-21; 修回日期: 2001-04-17

作者简介: 付振宪(1972—), 男, 山东广饶人, 博士生, 从事惯导平台误差辨识技术等研究; 邓正隆(1935—), 男, 辽宁本溪人, 教授, 博士生导师, 从事现代控制理论在惯性技术中的应用等研究。

域得到较多的采用<sup>[2]</sup>。

然而最近的研究表明,文献[1]的模型中存在与陀螺安装误差角有关的错误。本文推导了修正的惯导平台漂移模型,并将其与文献[1]的模型进行对比,指出了原模型中的错误所在。最后通过实际平台的测漂验证了本文所提出的模型。

## 2 含陀螺安装误差角的平台漂移模型的推导

同文献[1]一样,本文研究的也是三轴液浮陀螺惯导平台。平台上正交安放3个单自由度速率积分陀螺*X*、*Y*和*Z*,输入轴*I<sub>x</sub>*、*I<sub>y</sub>*和*I<sub>z</sub>*平行于平台的三轴*x<sub>p</sub>*、*y<sub>p</sub>*和*z<sub>p</sub>*,分别用来测量沿着平台三轴的外施角速度分量 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 和 $\omega_z$ 。由于陀螺安装误差及其它误差源的影响,陀螺的输出角速度分量 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 和 $\omega_z$ 并不等于被测角速度分量。

以*X*陀螺为例, $\omega_x$ 包含由输入轴*I<sub>x</sub>*所敏感的平台壳体相对惯性空间的角速率 $\omega_{ix}$ ,由陀螺内部误差源所引起的漂移 $\omega_{lx}$ 和由陀螺控制力矩产生的指令角速率 $\omega_{mdx}$ 。

$$\omega_x = \omega_{ix} + \omega_{lx} + \omega_{mdx} \quad (1)$$

其中, $\omega_{ix} = C_p^{sgxi} \omega_p^i$ , $C_p^{sgxi}$ 为从平台坐标系到*X*陀螺坐标系的变换阵 $C_p^{sgx}$ 的首行, $\omega_p^i = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 为平台相对惯性空间的角速度在平台坐标系中的表示。因此*X*陀螺的输出

$$\omega_x = C_p^{sgxi} \omega_p^i + \omega_{lx} + \omega_{mdx} \quad (2)$$

*X*陀螺是用来测量平台壳体沿着平台*x<sub>p</sub>*轴的外施角速率。因此,无论是否存在陀螺安装误差以及陀螺漂移角速率 $\omega_{lx}$ ,陀螺输出 $\omega_x$ 都将当成平台壳体外施角速率在*x<sub>p</sub>*轴上的分量,而不是实际的*I<sub>x</sub>*方向的分量。为试图保持平台相对惯性空间姿态稳定,在伺服回路的控制下,平台相对壳体(固定于测试基座上)的补偿角速度沿*x<sub>p</sub>*轴的分量将与 $\omega_x$ 大小相等方向相反。因此*X*陀螺引起的平台相对壳体的角速度在平台坐标系中表示为

$$\omega_{p(x)}^o = - [\omega_x \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

类似地,陀螺*Y*和*Z*引起的平台相对壳体的角速度分别为

$$\begin{cases} \omega_{p(y)}^o = - [0 \ \omega_y \ 0]^T \\ \omega_{p(z)}^o = - [0 \ 0 \ \omega_z]^T \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \omega_y &= C_p^{sgyi} \omega_p^i + \omega_{ly} + \omega_{mdy} \\ \omega_z &= C_p^{sgzi} \omega_p^i + \omega_{lz} + \omega_{mdz} \end{aligned}$$

分别为陀螺*Y*和*Z*的输出角速率, $C_p^{sgyi}$ 和 $C_p^{sgzi}$ 的定义同前面的 $C_p^{sgxi}$ 类似。

实际平台相对壳体的角速度是3个陀螺的输出通过平台伺服稳定回路共同作用引起的。考虑到伺服回路的误差 $\delta\omega_{ervo}$ ,最终平台相对壳体的角速度 $\omega_p^o$ 为

$$\begin{aligned} \omega_p^o &= \omega_{p(x)}^o + \omega_{p(y)}^o + \omega_{p(z)}^o + \delta\omega_{ervo} = \\ &= - C_p^{sgxi} \omega_p^i - \omega_p^i - \omega_{md}^i + \delta\omega_{ervo} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$C_p^{sgi} = [C_p^{sgxi} \ C_p^{sgyi} \ C_p^{sgzi}]^T$$

$$\omega_p^i = [\omega_{lx} \ \omega_{ly} \ \omega_{lz}]^T$$

$$\omega_{md}^i = [\omega_{mdx} \ \omega_{mdy} \ \omega_{mdz}]^T$$

$C_p^{sgi}$ 相当于从平台坐标系到陀螺输入轴系(即由3个陀螺各自的敏感输入轴*I<sub>x</sub>*、*I<sub>y</sub>*和*I<sub>z</sub>*共同组成的轴系,为一个非正交系)的坐标变换阵。

式(5)即为最终含陀螺安装误差角的平台漂移运动模型。

## 3 与文献[1]中平台漂移模型的对比及分析

文献[1]中给出的平台漂移运动模型为

$$\omega_p^o = - \omega_p^i - C_p^{sgi} [\omega_p^i + \omega_{md}^i] + \delta\omega_{ervo} \quad (6)$$

其中 $C_p^{sgi} = (C_p^{sgi})^{-1}$ 为从陀螺输入轴系到平台坐标系的变换阵。

对比式(5)和式(6)可以看出,(6)的右侧多了一个变换阵 $C_p^{sgi}$ 。文献[1]对此的解释是平台的漂移角速度向量 $\omega_p^o$ 和陀螺组的输出角速度向量 $C_p^{sgi} \omega_p^i + \omega_p^i + \omega_{md}^i$ 分别是定义在平台轴系和陀螺输入轴系中,所以中间需要经过一次坐标变换。但实际上,无论这两套坐标系是否重合,陀螺的输出分量都被平台伺服稳定回路当成沿着平台相应轴的外施角速度分量,也就是说平台伺服回路是把这两套坐标系当作重合,因此这里 $C_p^{sgi}$ 是多余的。对式(5)右侧再乘以变换阵 $C_p^{sgi}$ ,相当于认为平台上各个陀螺的安装误差角已经准确知道,并且在平台稳定伺服回路中做了完美补偿。这在工程上这显然不可能,否则就无需进行陀螺安装误差角的辨识,这也与文献[1]的初衷相矛盾。退一步讲,即使在平台的测漂过程中,平台稳定伺服回路的确对陀螺安装误差角的影响做了相应的补偿,那么补偿时所基于的陀螺误差角要么是事先通过其它测试得到参数值,要么是基于平台测漂校准程序(如卡尔曼滤波器)实时给出的误差角辨识结果,即在线辨识、在线补偿。这时式

(6) 中变换阵  $C_{sgl}^p$  所采用的陀螺安装误差角的数值将不再是准确真实值,而是在线辨识程序实时给出的估计值。但文献[1]中并无此打算,故该解释也是不成立的。

值得注意的是,文献[1]的研究只限于仿真,在仿真阶段,平台漂移模拟程序和参数辨识程序都是基于错误的式(6),因此这种建模错误不会对误差辨识的仿真结果产生负面影响。只要辨识方案得当,仿真的辨识结果仍会较好地收敛于设定的真实值,建模错误在仿真中得以掩盖<sup>[3,4]</sup>。但是一旦投入工程应

用,这种建模错误势必带来负面影响,不但会使陀螺安装误差角无法辨识,还会不同程度地影响其它参数的辨识精度。

#### 4 实际平台上的测漂验证

为了验证前面所推导模型的正确性,我们在实际惯导平台上进行了6位置测漂实验<sup>[5]</sup>,分别由基于模型(5)和基于模型(6)的EKF进行了两组参数辨识。每组包括3次,对被辨识的参数分别取不同的估计初值(见表1)。下面以沿着Z陀螺输入轴的一

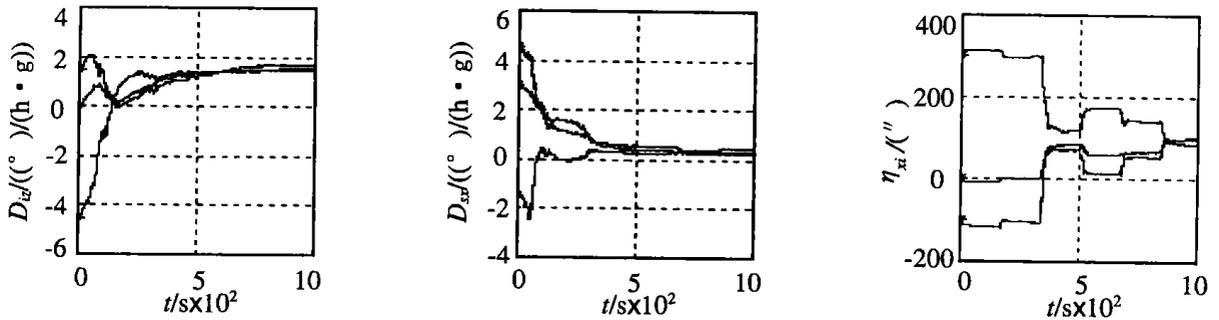


图1 基于式(5)的滤波器所得参数估计曲线

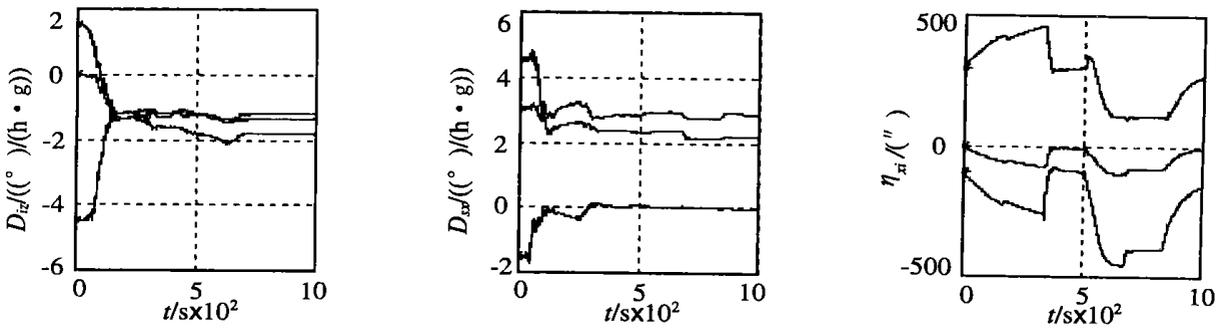


图2 基于式(6)的滤波器所得参数估计曲线

表1 参数估计结束时刻滤波器给出的估计方差

被辨识参数	$D_{zl}/((\gamma)/(h \cdot g))$		$D_{xl}/((\gamma)/(h \cdot g))$		$\eta_{xl}/( )$		
	估计结果	标准差	估计结果	标准差	估计结果	标准差	
基于式(5)	第1次	1.51	0.03	0.29	0.14	101.04	5.47
	第2次	1.69	0.03	0.44	0.13	85.92	6.99
	第3次	1.55	0.03	0.311	0.08	96.09	4.24
基于式(6)	第1次	-1.79	0.04	-0.06	0.15	268.15	14.98
	第2次	-1.20	0.03	2.89	0.16	-157.02	16.40
	第3次	-1.35	0.03	2.21	0.12	-8.07	27.15

单表测试结果

1.45

0.33

112

次漂移系数  $D_{iz}$ , 沿着  $X$  陀螺转子轴的一次漂移系数  $D_{sx}$  和  $X$  陀螺的平面内安装误差角  $\eta_{ki}$  为例, 给出这两种情况下参数的估计曲线对比(单位中  $h$  表示小时,  $g$  表示一个标准重力加速度)。

从图 1 可以看出, 基于式(5)的滤波器所得到的参数  $D_{iz}$ ,  $D_{sx}$  和  $\eta_{ki}$  的估计曲线能够从所选取的不同初始值分别收敛到 1.6, 0.2 和 100 附近, 据此可以判断这些参数的真实值也分别在这些值的附近。而基于式(6)的滤波器所得到的图 2 曲线则显示, 当对这些参数选取不同的估计初值时, 虽然  $D_{iz}$  的估计曲线也呈现较明显的收敛趋势, 但其收敛程度显著低于图 1 对应曲线,  $D_{sx}$  的估计曲线收敛程度更差, 而安装误差角  $\eta_{ki}$  的估计曲线则自始至终一直游摆不定, 没有收敛的迹象。这表明基于(6)的滤波器对  $D_{iz}$ ,  $D_{sx}$  和  $\eta_{ki}$  的估计结果精度较差, 甚至根本不可靠。这与上节的结论一致。

表 1 为两组辨识结束时刻滤波器所给出的这几个参数的估计结果及其标准差。从表 1 看, 基于式(5)的估计结果与此前单表元件级测试的结果比较接近, 基本是可靠的; 而基于式(6)进行的辨识, 除了  $\eta_{ki}$  的最后估计标准差比基于式(5)的情形稍大一些外, 其它参数的标准差与基于式(5)的情形基本相同。如果只根据标准差判断, 便会误认为基于式(6)估计是准确的, 这一点有很大的欺骗性。只有通过其它方法对其进行检验(譬如对估计初值不同的情况下得到的结果进行比较, 或同单表测试的结果

比较), 才会发现基于错误的平台模型辨识得到的结果其实是不可靠的。

## 5 结 语

本文所推导的惯导平台漂移模型纠正了以往模型中与陀螺安装误差角有关的错误。该模型更符合平台漂移的发生机理, 因此可以保证基于 Kalman 滤波器的估计程序对平台漂移误差参数采用系统级辨识得到可靠的辨识结果。

### 参考文献(References):

- [1] Frazier J Hellings. Application of extended Kalman filtering to a dynamic laboratory calibration of an inertial navigation system[R]. 1973, AD-763718: 32-35.
- [2] Kitersw R A. Design, development and laboratory test results of Kalman filter system-level IMU Calibration Technique[R]. 1975, AD-A046257: 17-26.
- [3] Jiang Y F, Lin Y P. Error estimation of INS ground alignment through observability analysis [J]. IEEE Trans on AES, 1992, 28(1): 92-96.
- [4] Stimac L W. Sensor alignment Kalman filters for inertial stabilization systems [A]. IEEE Position Location and Navigation Symposium [C]. Monterey: IEEE, 1992. 4-13.
- [5] 付振宪, 裴昕国. 惯导平台漂移误差参数辨识的实验研究 [J]. 中国惯性技术学报 (J of Chinese Inertial Technology), 1999, 7(4): 12-15.

(上接第 367 页)

- [5] 周凯. 虚拟轴数控机床的虚实映射联动控制 [J]. 中国机械工程 (Chinese Mechanical Engineering), 1998, 9(3): 16-18.
- [6] B Dasgupta, P Choudhury. A general strategy based on the Newton-Euler approach for the dynamic formulation of parallel manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(2): 801-824.
- [7] E Mcinroy John, F O Brien John, W Neat Gregory. Precise, fault-tolerant pointing using a Stewart platform [J]. IEEE/ASME TRAC on Mechatronics, 1999, 4(1): 91-95.
- [8] 郭庆鼎, 勾丽丽, 张凤. 交流直线伺服电机虚拟轴数控机床实现精确与容错控制 [A]. 第一届国际机械工程学术会议 [C]. 上海, 2000.
- [9] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等. 直线交流伺服系统的精密控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] Merlet J P. Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators [J]. Int J Robotics Research, 1992, 11(2): 150-162.
- [11] 王敬庚, 傅若男. 空间解析几何 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1999.
- [12] H Kilryong, C Wankyun, Y Youm. New resolution scheme of the forward kinematics of parallel manipulators using extra sensors [J]. Trans Mech Design, 1996, 118(3): 214-219.
- [13] Merlet J P. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data [J]. Proc 1993 IEEE Int Robotics and Automation Conf, 1993, 3(4): 200-240.