

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.015

基于卡尔曼滤波的MEMS陀螺仪漂移补偿

陈 晨, 赵文宏*, 徐慧鑫, 周芬芬, 安 平
(浙江工业大学 超精密加工实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为解决MEMS陀螺仪在测量过程中容易产生漂移的问题,将卡尔曼算法应用于陀螺仪的漂移补偿中。分析了陀螺仪误差源,建立了陀螺仪误差模型,提出了用卡尔曼滤波算法处理陀螺仪零点随机误差的方法,通过运用Allan方差分析法评价了卡尔曼滤波效果;最后,在转速测试平台上进行了陀螺仪测量试验。研究表明,通过建立误差模型和采用卡尔曼滤波算法能有效减小陀螺仪测量过程中的漂移。

关键词: MEMS陀螺仪; 卡尔曼滤波; Allan方差分析法

中图分类号: TH161⁺.7; TH89 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0311-03

Compensation of MEMS gyroscope error based on Calman filter

CHEN Chen, ZHAO Wen-hong, XV Hui-xin, ZHOU Fen-fen, AN Ping

(Laboratory of Ultra-sophisticated Machining, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that it is easy to produce the error of MEMS gyroscope in the test, the Calman algorithm was investigated. After the analysis of the cause of the error of the gyroscope, the error model of gyroscope was established. The Calman filter algorithm was presented and the effect of Calman filter was evaluated on the Allan variance method, the gyroscopes were tested on the rotating speed device. The experimental results indicate that the combination of model and Calman filter can reduce the error of gyroscope in the test.

Key words: MEMS gyroscope; Calman filter; Allan variance method

0 引 言

在球体研磨过程中,施加压力、磨粒颗粒大小、抛光液浓度以及设备本身的误差都会影响到球体运动轨迹,使球体偏离预期轨迹。球体轨迹的偏离可能影响球体在研磨过程中的去除率,降低球体加工精度^[1]。而研究者通过对研磨过程中球体运动轨迹的在线检测,可以判断各加工参数对于球体轨迹的影响,为加工参数的优化提供了理论依据。

轨迹球测量系统利用捷联惯导系统原理,可以有效获得轨迹球的实时姿态,即轨迹球的研磨轨迹。捷联惯导系统自主性强、成本低廉、体积小,但相对平台惯导系统,其惯性单元的动态误差较大^[2-3],所以须对捷联惯导系统的测量值进行误差补偿。其系统中存

在多个误差源,包括惯性元器件的安装误差、惯性元器件的测量误差、初始对准误差以及计算误差^[4]。其中惯性元器件的测量误差对系统误差影响最为明显。而惯导单元测量误差主要由陀螺漂移产生。轨迹球测量系统把陀螺仪固定在动态系统,由于恶劣的工作环境^[5-6],另外伴随较大的施矩速度,导致陀螺在运行中产生严重的陀螺漂移。所以,陀螺仪的测量误差决定了轨迹球测量系统的精度。

为了解决陀螺仪测量过程中容易产生漂移的问题,近年来不少学者提出利用小波算法理论对陀螺仪进行降噪处理,以减少随机误差对于陀螺漂移的影响。鉴于小波算法复杂、计算量大的特,其并不适合应用于嵌入式系统之中,本研究提出用卡尔曼滤波算法对陀螺仪进行降噪处理,首先建立陀螺仪漂移模

收稿日期: 2012-09-25

作者简介: 陈 晨(1987-),男,浙江余姚人,主要从事超精密加工相关设备方面的研究. E-mail:ccdipan@163.com

通信联系人: 赵文宏,男,教授级高级工程师,硕士生导师. E-mail:whzhao6666@163.com

型,再利用卡尔曼滤波算法减少随机误差对陀螺仪测量的影响,并用 Allan 方差分析法评价卡尔曼滤波算法,最后在转速测试平台进行陀螺仪测量实验。

1 陀螺漂移模型建立

在恶劣的工作环境下,陀螺会产生严重的陀螺漂移,其测量误差主要由刻度因子误差、陀螺零点漂移组成。根据 MEMS 陀螺仪的基本特性,联立陀螺漂移的静态数学模型:

$$\begin{aligned} N_x &= A_x + B_x w_x \\ N_y &= A_y + B_y w_y \\ N_z &= A_z + B_z w_z \end{aligned} \quad (1)$$

式中: N_x, N_y, N_z —陀螺三轴测量误差; A_x, A_y, A_z —陀螺三轴的零点漂移; B_x, B_y, B_z —陀螺三轴的刻度因子误差; w_x, w_y, w_z —陀螺三轴的转速。

陀螺仪的三轴零点漂移由零点常值误差和零点随机误差所组成:

$$\begin{aligned} A_x &= A_{x0} + i_x + \Delta A_t \\ A_y &= A_{y0} + i_y + \Delta A_t \\ A_z &= A_{z0} + i_z + \Delta A_t \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_{x0}, A_{y0}, A_{z0} —陀螺仪的常值误差; i_x, i_y, i_z —陀螺的随机误差; ΔA_t —陀螺的温度漂移。

轨迹球测量系统中所用 MEMS 陀螺仪为 Invensense 公司生产的 MPU3050 陀螺仪。根据其数据手册所述,MPU3050 温度漂移为 $0.1^\circ/\text{s}/^\circ\text{C}$,以 $t = 25^\circ\text{C}$ 为基准,可以得到它的温度漂移为:

$$\Delta A_t = (t - 25) \times 0.1 \quad (3)$$

另外,MPU3050 分辨率 131 Lbs/(°/s),静态非线性度为 0.2%,所以在静态环境中,其线性度良好,并不需要对其测量值进行误差补偿。而在动态环境中,由于存在加速度,甚至加加速度,突然的速度改变会导致 MPU3050 所测得角速度误差增大。MPU3050 因为加速度改变而引起的角速度偏移量为 $0.1^\circ/\text{s}/\text{g}$ 。

则:

$$B_x' wx = B_x wx + 0.1a \quad (4)$$

式中: B_x' —动态刻度因子误差, B_x —静态刻度因子误差, $0.1a$ —偏移量补偿。

如前面所述, B_x 为 0,所以由加速度引起的角速度误差为 $0.1a$ 。所以可得陀螺漂移数学模型为:

$$\begin{aligned} N_x &= A_x + (t - 25) \times 0.1 + i_x + 0.1 \times a_x \\ N_y &= A_y + (t - 25) \times 0.1 + i_y + 0.1 \times a_y \\ N_z &= A_z + (t - 25) \times 0.1 + i_z + 0.1 \times a_z \end{aligned} \quad (5)$$

2 陀螺仪零点漂移分析与补偿

本研究运用卡尔曼滤波算法原理对陀螺仪

MPU3050 的零点误差进行补偿。首先运用卡尔曼滤波对于随机信号进行降噪处理,最后运用 Allan 方差分析法对于陀螺仪滤波前后效果进行比较分析。

零点误差由随机误差和常值误差两部分组成,即:

$$\begin{cases} J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ S = A - J \end{cases} \quad (6)$$

式中: J —常值误差, S —随机噪声误差, x_i — i 时刻零点采样值, A —零点误差。

通过公式(6)的数学处理就可以剥离出一个均值为 0 的随机噪声 S 。

卡尔曼滤波模型是建立在已知随机信号数学模型的基础之上,适用于时变非平稳时间序列的数字滤波。其实质是在已知观测值数据基础上,运用递推理论,实现对于未来状态量的估计,使得估计值尽可能地接近真实值。卡尔曼滤波的数学模型为:

$$\begin{cases} x_n = \Phi_{n|n-1} x_{n-1} + w_{n-1} \\ y_n = C_n x_n + v_n \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_n — n 时刻陀螺仪状态量; y_n —陀螺仪 n 时刻的测量值; w_n —输入噪声; v_n —观测噪声; $\Phi_{n,n-1}$ —状态转移矩阵。

其中, w_n 、 v_n 的协方差分别为 Q 、 R 。

具体卡尔曼滤波递推过程如下:

状态一步预测为:

$$\hat{x}_{n|n-1} = \Phi_{n|n-1} \hat{x}_{n-1} \quad (8)$$

式中: $\hat{x}_{n|n-1}$ —由 $n-1$ 时刻陀螺仪状态量预估 n 时刻陀螺仪状态量。

状态估计为:

$$\hat{x}_n = \hat{x}_{n|n-1} + kg(y_n - C_n \hat{x}_{n|n-1}) \quad (9)$$

一步预测误差阵为:

$$P_{n|n-1} = \Phi_{n|n-1} P_{n-1|n-1} \Phi_{n|n-1}^T + Q \quad (10)$$

增益系数为:

$$kg(n) = \frac{P_{n|n-1} C_n^T}{C_n P_{n|n-1} C_n^T + R} \quad (11)$$

预测误差阵为:

$$P_n = (1 - kg(n) C_n) P_{n|n-1} \quad (12)$$

该研究系统模型中,设置 Φ_n 、 C_n 为 1,初始设置 $kg(0), P_{00}$ 为 1,即可进行卡尔曼滤波。

在卡尔曼滤波递推模型的基础上,本研究通过实验得到滤波前后陀螺仪的随机时间序列。具体实验步骤如下:

(1) 将陀螺仪置于 25°C 恒温室内,静止置于水平桌面。

(2) 轨迹球测量系统供电,并与计算机通信。

(3) 采样周期设为0.1 s,陀螺补偿前后各采样 N 个点, $N=1\,000$ 。

(4) 计算陀螺仪3轴零点常值误差,剥离出陀螺仪随机误差。

(5) 用Allan方差分析法对滤波前后的陀螺仪的随机时间序列进行比较。

卡尔曼滤波前、后陀螺仪 x 轴随机序列如图1、图2所示,经过卡尔曼滤波后,陀螺仪 x 轴随机噪声得到了明显的收敛,随机漂移量明显减小。

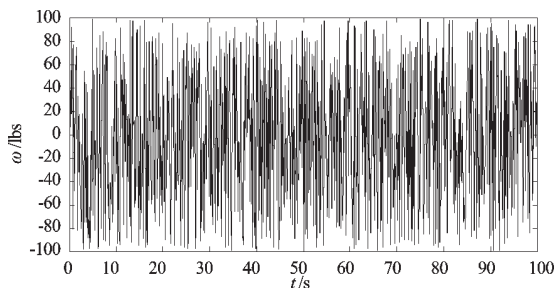


图1 卡尔曼滤波前陀螺仪 x 轴随机序列

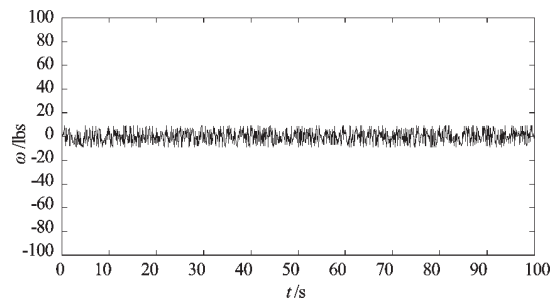


图2 卡尔曼滤波后陀螺仪 x 轴随机序列

Allan方差分析法能够用于对各种误差源的统计特性进行表征和辨识^[7-8],可适用于任何随机噪声的分析研究,是定量鉴别陀螺仪随机误差的有效方法。

假设采样周期为 t_0 、采样 m 次、相关时间 $\tau=kt_0$,其每一相关时间 τ 的均值为:

$$\begin{cases} \bar{\eta}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{(j-1)k+i} \\ \sigma_a^2(\tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{j=1}^{m-1} \bar{\eta}_j^2 \end{cases} \quad (13)$$

将前面实验卡尔曼滤波前后所得的两组随机序列, τ 分别为0.1 s、0.2 s、0.4 s、1 s、2 s、4 s、10 s、50 s,比较滤波前后的Allan方差值。卡尔曼滤波前后陀螺仪 x 轴随机误差的Allan值对比图如图3所示。

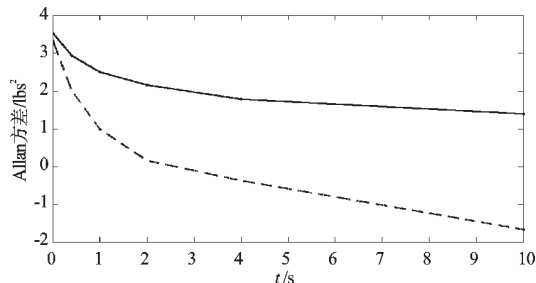


图3 卡尔曼滤波前后陀螺仪 x 轴随机误差的Allan值对比图

图3中,实线表示滤波前随机误差Allan值,虚线表示滤波后随机误差Allan值,可以发现经过卡尔曼滤波后,随机误差的Allan有明显的减少,与图1及图2所表现的图形相符合。从而可以证明,运用卡尔曼滤波对陀螺仪进行降噪处理是有效的。

另外,Allan方差分析法还可以分析陀螺噪声的组成成分。MEMS陀螺仪随机误差主要有角随机游走(ARW)、速率随机游走(RRW)、速率斜坡(RRW)、偏差的不稳定性(BI)、量化噪声(QN)、正弦噪声(SN)^[9-11]组成。各部分相对于相关时间 τ 的阶数分布在-2~2之间。

所以MEMS陀螺仪的Allan表达式可以写成如下形式:

$$\sigma_a^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{j=1}^{m-1} \bar{\eta}_j^2 \quad (14)$$

本研究通过设置不同的 τ 代入公式(14),运用最小二乘法,可以求得 A_n 各系数,即各部分噪音对于Allan值的权重系数,确定各噪声源对于随机误差的影响。

3 陀螺仪漂移补偿模型的实验验证

陀螺仪漂移补偿模型的具体实验步骤如下:

(1) 将陀螺仪上电并置于ARMS机械轴承精密直驱转台,陀螺仪 x 轴与转台平面平行。

(2) 将转台从0开始加速,加至10 r/min,加速时间100 s,采集周期0.1 s,共1 000个点,温度25℃。

(3) 匀速转动100 s,采用周期0.1 s,共1 000个点。

(4) 运动完成后,取下陀螺仪,读取SD卡中的陀螺数据。

陀螺仪 x 轴匀加速运动时所测时序图如图4所示,匀速转动时所测时序图如图5所示。

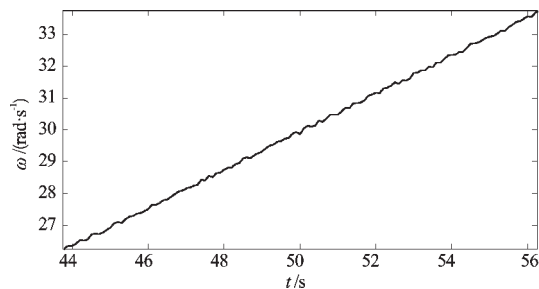


图4 陀螺仪 x 轴匀加速运动时所测时序图

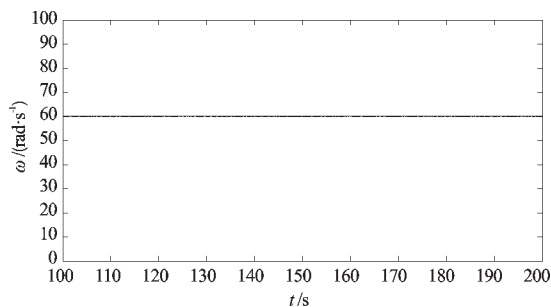


图5 陀螺仪 x 轴匀速转动时所测时序图

(下转第321页)

一处新热液泉口。由系统采集的数据绘制的PH等值线图和温度等值线图如图7、图8所示。

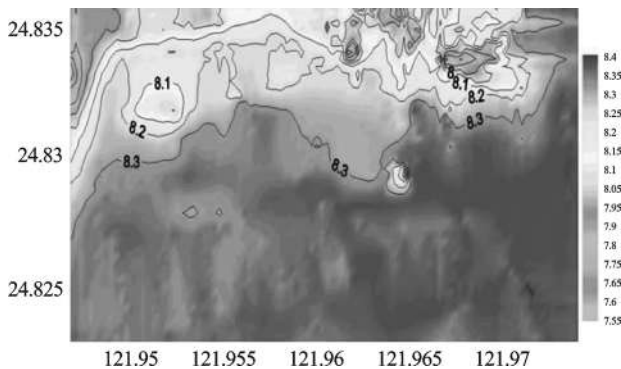


图7 PH等值线图

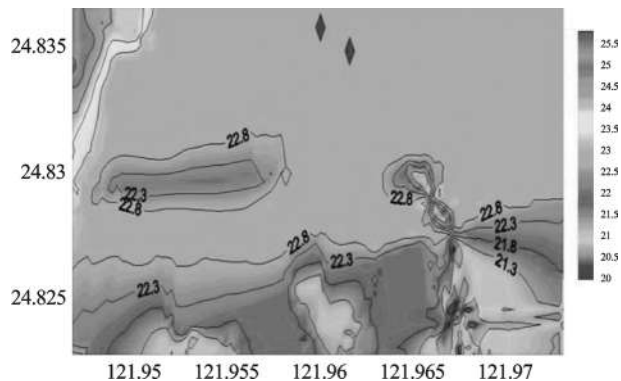


图8 温度等值线图

4 结束语

该热液探测系统设计具有功耗低的特点,能够满

足长时间深海环境下连续数据采集要求。

该系统的采样精度较高,化学通道的采样精度能够达到0.1 mV,压力通道精度为0.7 kPa。经试验验证,系统能够稳定地完成数据采集工作。

该系统使用巡检方式进行多路数据采集,通过使用多路器和外接A/D的设计,极大地简化了电路结构。

参考文献(References):

- [1] 李江海,牛向龙,冯 军. 海底黑烟囱的识别研究及其科学意义[J]. 地球科学进展. 2004,19(1):17-25.
- [2] 冯 军,李江海,牛向龙. 现代海底热液微生物群落及其地质意义[J]. 地球科学进展,2005,20(7):732-739.
- [3] 杜同军,翟世奎,任建国. 海底热液活动与海洋科学研究[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版,2002,32(4):597-602.
- [4] 周建平. 集成深拖与AUV对洋中脊热液喷口的联合探测[J]. 热带海洋学报,2011,30(5):81-87.
- [5] 沈建华,杨艳琴. MSP430系列16位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 胡晓军. 数据采集与分析技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2010.
- [7] 郭业才. 模拟电子技术[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [8] 秦 龙. MSP430单片机应用系统开发典型实例[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [9] 朱建林,郭有贵. 上位机与下位机通信的设计初步[J]. 现场总线与网络技术,2005(1):68-7.

[编辑:李 辉]

(上接第313页)

经过陀螺仪误差补偿,在匀加速和匀速环境下,测量结果比陀螺仪补偿前准确。

4 结束语

本研究分析了MPU3050陀螺仪特性并建立了其漂移模型,利用卡尔曼滤波算法对陀螺仪的随机噪声进行降噪处理,并运用Allan方差分析法对卡尔曼滤波效果进行定量分析。实验结果证明,卡尔曼滤波算法能够有效减小陀螺仪的随机误差,提高陀螺仪的测量精度。而相对于其他滤波算法,卡尔曼滤波算法计算量小,有效减轻了单片机的计算负担。

参考文献(References):

- [1] 黄 晨,邓乾发,戴 勇. 精密陶瓷轴承球研磨新方法[J]. 轻工机械,2008,26(6):91-93.
- [2] 高宗余,方建军,于丽杰. MEMS传感器随机误差Allan方差分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(12):2863-2868.
- [3] 邓 跃,刘政华,李秋生. 基于角速率陀螺移动载体的运行载体判断及应用[J]. 机电工程,2007,36(11):83-86.

- [4] WANG J H, GAO Y. An intelligent MEMS IMU-based Land Vehicle Navigation System Enhanced by Dynamics Knowledge [C]//Proceeding US ION 61st Ann Meeting, Cambridge:[s.n.],2005:27-29.
- [5] 李绪友,张 娜. 基于动态Allan方差的光纤陀螺动态特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(2):183-187.
- [6] LORENZO G, PATARIZIA T. The dynamic Allan variance [J]. *Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2009,52(3):450-464.
- [7] 祝树生,任建新,张安峰. 光纤陀螺随机游走分析方法研究[J]. 应用光学,2009,30(6):1003-1006.
- [8] 宋凝芳,张中刚,李立晶. 光纤陀螺随机游走系数的分析研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(4):34-38.
- [9] 邹学锋,卢新艳. 基于Allan方差MEMS陀螺仪性能评价方法[J]. 微纳电子技术,2010,47(8):490-493.
- [10] 善盈盈,卢德林. 典型MEMS器件结构优化设计平台[J]. 轻工机械,2012,30(3):88-91.
- [11] 赵思浩,陆明泉,冯振明. 基于一种简化Allan方差法的IMU误差分析[J]. 传感器与微系统,2010,29(12):10-15.

[编辑:张 翔]