

注：国家自然科学基金资助项目（NO. 61571053）；北京市属高校创新能力提升计划项目（NO. TJSJHG201310772026）

摘要：时间漂移是倾角传感器产生测量误差的主要原因之一，对其进行合理的分析并研究补偿方法具有重要的意义。本文简要介绍了基于挠性加速度计的倾角传感器的工作原理，分析了其时间漂移产生的原因，提出了一些克服时漂的方法，实际应用表明了这些方法是切实可行的。

关键词：倾角传感器；时间漂移；重力加速度；磁钢；补偿

中图分类号：TP212 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2018)02-0021-05

收稿日期：2017-12-18

倾角传感器时漂的机理分析与补偿方法的研究

袁鑫全¹ 高国伟¹ 胡平² 潘宏生²

1. 北京信息科技大学 信息获取与检测重点实验室, 北京 100101; 2. 北京国科航传感技术有限公司, 北京 100101

一、引言

倾角传感器是测量角度的高精度传感器^[1]，在工业、军事、航空等各个领域都有着重要的应用，其具有测量稳定、准确、快速的特点。随着科学技术的发展、科技水平的提高，对倾角传感器的稳定性、准确度的要求也在提高，时间漂移成为了影响传感器测量性能的重要因素。

本文主要以一种基于石英挠性加速度计的倾角传感器 SNJ-II 为研究对象，其精度为 6'，取其测量范围为 0°~60°，在长时间的工作中，设备的某些参数可能发生变化。时间漂移的产生主要来自产品结构内部的影响，随着时间的推移，漂移会逐渐变大，直接影响测量性能，必须加以抑制。

本文在介绍倾角传感器的工作原理上，分析了时间漂移产生的原因，给出了时间漂移的补偿方法。

二、倾角传感器的工作原理

本文所研究的倾角传感器是通过挠性加速度计作为敏感元件进行角度测量，然后通过高精度的模数转换器 CS5532 来实现模数转换，以高性能的 ATmega128 单片机为 MCU 控制器，通过 SPI 接口实现与模数转换器的通信，使用 ADM2582E 实现硬

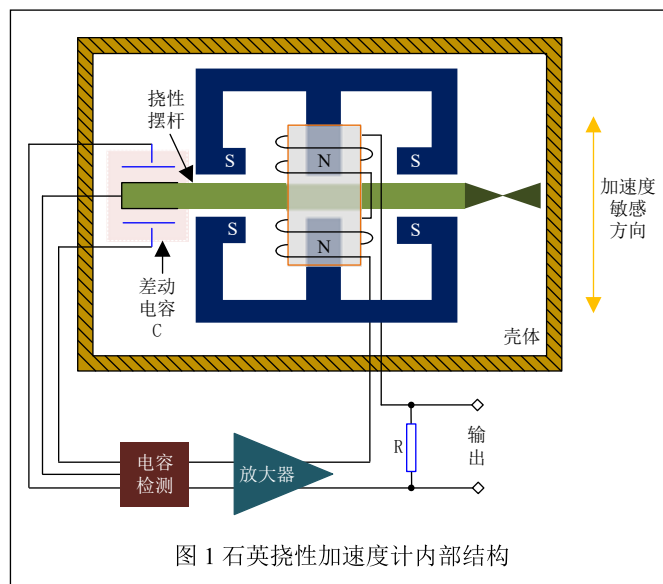


图1 石英挠性加速度计内部结构

件通信协议的转换。其中敏感元件石英挠性加速度计是核心部分。石英挠性加速度计是一种闭环式的摆式加速度计^[2]，其内部结构如图1所示。

石英挠性加速度计的工作原理：当敏感载体（加速度计挠性摆杆和力矩线圈）在敏感方向上受到的加速度发生变化时，其受力也就随之发生改变，从而打破了敏感载体与力矩线圈构成的力矩平衡，使得挠性摆杆发生偏移，这时差动电容的中心极板发生位移，导致电容容值也会发生变化，当其变化量超过差动电容“容量-电压”转换器的最小分辨率后，转换的电压也会随着变化，这样变化量通过放大器进行放大对力矩线圈进行驱动，通过更改力矩线圈的电流大小，使得力矩线圈产的力矩发生改变，从而使敏感载体与力矩线圈构成的力矩重新进入平衡状态，而采样电阻采到的是力矩线圈中的电流，这样就建立了采样电阻两端电压与加速度之间的关系。又由于倾角和加速度存在确定关系，从而就可以获得倾角和输出之间的关系。

加速度计中敏感载体受力如图2所示，则有如下公式：

$$F = mg \sin \theta \quad (1)$$

$$F_e = BLI \quad (2)$$

$$Fl_1 = F_e l_2 \quad (3)$$

$$U = RI \quad (4)$$

$$I = K_p \Delta u \quad (5)$$

$$\Delta u = U_{c1} - U_{c2} \quad (6)$$

差动电容“容量-电压”转换器输出电压：

$$\begin{cases} U_{c1} = K_c C_1 \\ U_{c2} = K_c C_2 \end{cases} \quad (7)$$

差动电容容量：

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\epsilon_0 S_1}{d_1} \\ C_2 = \frac{\epsilon_0 S_2}{d_2} \end{cases} \quad (8)$$

根据公式(1)~(8)可得倾角传感器的基本数学模型：

$$U = \frac{Rmg l_1}{l_2 BL \sin \theta} \quad (9)$$

其中， U —加速度计输出电压；

R —采样电阻；

m —敏感载体（加速度计的挠性摆杆和力矩线圈）质量；

g —测量时重力加速度；

l_1 —敏感载体重心距离挠性固定点距离；

l_2 —力矩线圈施力点距离挠性固定点距离；

B —磁钢产生的稳定磁场强度；

L —在磁场中线圈等效长度；

θ —测量角度；

K_c —差动电压“容量-电压”转换器转换比例系数（单位：V/F）；

K_p —放大器放大倍数（单位：A/V）。

三、时间漂移的机理分析

1、电子元器件的漂移

从公式(1)~(8)可以看出，电子元器件（如电容、电阻、运算放大器）的数值变化会对倾角传感器产生影响。随着时间的推移，这些元器件的数值会发生一定的变化，这就导致传感器的参数发生变化。但是，我们可以选择一些输出噪声低、稳定性好一点的元器件，这样可以很好的降低这些元器件对倾角传感器的影响。我们所研究的倾角传感器中的放大器输入端的电压差变化很小，所以元器件对倾角传感器的影响很小，可以忽略。

2、重力加速度的影响

由公式(9)可以看出重力加速度 g 对基于石英挠性加速度计的倾角传感器的精度有影响。当 g 发生变化时，倾角传感器就会随之产生测量误差。重力加速度的变化主要是由于地理位置变化产生影响，不同纬度的重力加速度 g 值是不同的^[3]，如下：

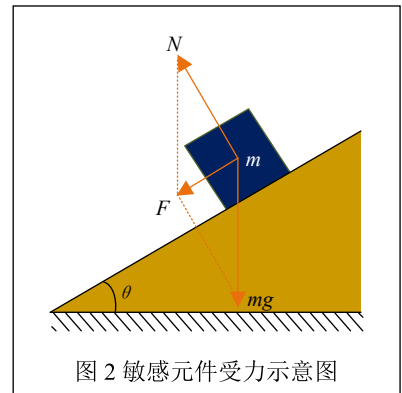


图2 敏感元件受力示意图

$$g=9.78049+0.0052884\sin^2\alpha-0.0000059\sin^22\alpha \quad (10)$$

其中, α —纬度值。

由上式可以得出, 赤道的重力加速度为 9.78m/s^2 , 南北两极的重力加速度为 9.83m/s^2 , 重力加速度变化量在平均海平面南北方向上约为 0.0005m/s^2 。

由公式 (9) 推导出重力加速度变化时, 角度的关系式为:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{g_1 \sin \theta_0}{g_0}\right) \quad (11)$$

其中, θ_0 —按预设的重力加速值计算的角度值;

θ_1 —实际的角度值;

g_0 —预设的重力加速值;

g_1 —实际加速度值。

由公式 (11) 可以看出, g_1 加速度值不等于 g_0 时, 角度值也不相等, 产生了测量误差。

3、磁钢的影响

由公式 (9) 可以明显得出, 磁钢产生的磁场强度 B 的变化会直接影响测量角度的精确度。研究表明, 随着时间的变化, 磁钢的内部应力会发生变化, 随之其磁场强度 B 会逐渐变弱, 这说明磁钢具有时间稳定性, 也就是说磁钢由于自身结构材料的原因, 随着时间的变化会发生磁性变化现象。据研究, 未经热稳定处理的磁钢, 其磁感应强度每年约变化 5% ^[4]。研究发现, 除了自身材质组成结构影响外, 外部因素也能引起磁钢退磁的现象。如温度、外磁场、机械作用、流质等很多原因可以导致磁钢退磁现象的发生。

当外部有交流磁场作用, 磁钢会产生退磁现象,

磁钢的退磁使磁感应强度减小到一定值, 这会使得测量的角度产生误差。受到外部机械冲击时, 磁钢的自身内部结构可能发生变化, 影响其磁感应强度的大小, 直接影响倾角传感器的测量值。如果磁钢接触到腐蚀性的物质会使其内部结构发生变化, 这也会直接导致传感器测量的角度产生误差。

四、补偿方法的研究

1、重力加速度的补偿方法

由上述倾角传感器的数学模型式 (9) 可以得出, 重力加速度减少 0.0005m/s^2 时, 倾角传感器测量的角度值变化范围约为 $0.005^\circ \sim 0.05^\circ$ 。可见重力加速度的微弱变化对本文所研究的倾角传感器的角度测量影响不大, 可以忽略。但当标定倾角传感器的地点与测量地点重力加速度差值偏大 (如赤道的重力加速度与南北极的重力加速度相差 0.05m/s^2) 时, 这对倾角传感器的测量结果影响很大, 测量误差大大超出了其测量精度, 必须进行补偿。

方法一, 通过通信控制器直接校正单片机中加速度计存储的 g 值;

方法二, 在产品设计中增加高精度的纬度测量装置, 将测量值传输给单片机, 通过公式 (10) 计算出当地的重力加速度, 实现传感器的自动校准。

2、磁钢的磁性补偿

由于磁钢的稳定性受很多因素的制约, 对磁钢的磁性能进行补偿, 有利于基于挠性加速度计的倾角传感器的设计和生产。改善磁钢的方法有热稳定处理、



图3 实验室恒温箱



图4 振动试验台



图5 真空干燥箱

表 1 实验数据表 (单位: °)

给定角度	北京 $g=9.8\text{m/s}^2$		武汉 $g=9.8\text{m/s}^2$		武汉 $g=9.794\text{m/s}^2$	
	测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差
0	0.492	0.492	0.581	0.581	0.494	0.494
10	9.945	-0.055	9.842	-0.158	9.940	-0.060
20	19.980	-0.020	20.240	0.240	20.000	0
30	29.965	-0.035	30.190	0.190	29.980	-0.020
40	39.995	-0.005	40.213	0.213	40.005	0.005
50	50.012	0.012	50.230	0.230	50.015	0.015
60	60.026	0.026	60.321	0.321	60.020	0.020

温度循环处理、抗冲击振动处理等。

(1) 热稳定处理

使磁钢在高于常温的某一温度环境下保持适当长的时间, 这样可以加速其自然老化的过程。这也是所谓的人工时效处理或热退磁处理^[5], 即以短时间的热时效来完成长时间的常温时效。将磁钢置于恒温电加热箱内, 设定温度为 80℃, 保温 3h 后取出, 置于室内自然老化 30min, 然后重复上述过程 3 次。

(2) 温度循环处理

磁钢的工作环境温度不同, 影响其磁感应强度的变化。在使用磁钢之前, 通过温度循环处理对其进行稳定化退磁。将磁钢置于如图 3 所示的恒温箱中, 调节恒温箱的温度, 高温设定为 60℃, 低温设定为 40℃, 然后对其进行高低温循环 5 次, 温度各保持 2h。其中循环次数依据磁钢材料的不同自行调节。高低温的设定要求比磁钢的工作温度范围大。

(3) 预振动处理

将磁钢放置于图 4 所示的振动台上, 进行振动试验。通过多次振动试验, 磁钢内部组织结构快速稳定, 增强磁钢在使用中的抗振动能力。在产品制作完成后, 对产品进行整体灌胶处理, 通过真空干燥箱使胶体快速、均匀流动, 确保排干产品内部空气, 这不仅可以增强磁钢的抗振动能力还能够预防腐蚀。

五、系统测试

根据上述方法, 对倾角传感器 SNJ-II 型进行试验, 将传感器置于温度设定为 20℃ 的恒温箱中测量, 首先

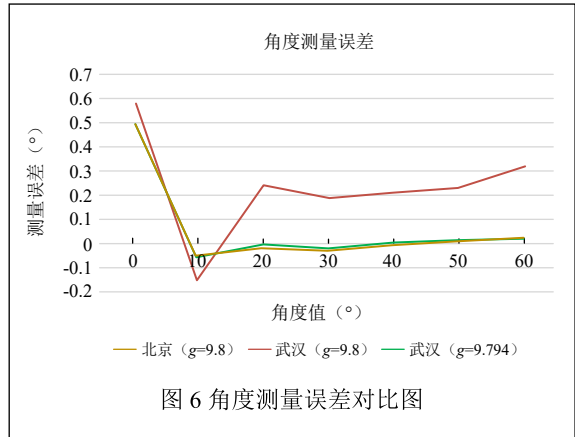


图 6 角度测量误差对比图

将在北京标定的传感器在当地测量, 再将其在武汉测量, 最后将传感器在武汉标定并在当地进行测量, 测量数据如表 1, 角度测量误差对比如图 6。可以看出, 校准重力加速度后, 倾角传感器的误差小于校准前的误差。

六、结束语

倾角传感器是测量倾角的一种高精度传感器, 是科研、工业生产不可缺少的装置之一, 其性能的提高, 具有重要的科学和社会价值。而时间漂移是制约倾角传感器的准确度的重要因素, 降低漂移对倾角传感器的影响是设计产品的关键环节之一。本文系统地分析了倾角传感器时间漂移产生的原因, 尤其对重力加速度和磁钢的磁感应强度这两个影响因素作了较全面地分析, 提出了比较完善的补偿漂移的方法。依据本文的研究方法, 对基于挠性加速度计的倾角传感器 SNJ-II 型进行实验, 测量误差减小, 取得了较满意的结果。

参考文献

[1] 吴秀芹, 高国伟, 李倩芸, 等. 倾角传感器自动标定系统的研究 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(4): 54-55.
 [2] 王珂. 石英挠性加速度计偏值和标度因数稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
 [3] 林鸿初. 重力加速度是常数吗? [J]. 自然杂志, 1980(9): 49-51.
 [4] 滕召胜, 郁文贤, 夏胜平. 电子分析天平温漂与时漂的自动补偿 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(3): 6-10.

[5] 齐凤春. 永磁体的稳定性 [J]. 磁性材料及器件, 1981(4): 18-35.

Mechanism analysis and compensation method study of time drift of tilt sensors

YUAN Xin-quan¹, GAO Guo-wei¹, HU Ping², PAN Hong-sheng²

(1. *Information Acquisition and Detection Key Laboratory, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China*; 2. *Beijing GKsens Sensing Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China*)

Abstract: Time drift is one of the main reasons for the measuring error of tilt sensor. It is of great significance to conduct a reasonable analysis and study on the compensation method. The working principle of tilt sensor based on flexible accelerometer is introduced briefly in this paper. The causes of time drift are analyzed, and some method for overcoming the time drift are proposed. The results in practical applications show that these methods are feasible.

Key words: tilt sensor; time drift; gravitational acceleration; magnet; compensation

作者简介

袁鑫全: 北京信息科技大学信息获取与检测重点实验室, 硕士, 主要从事传感器、检测技术与自动化控制的研究。

通讯地址: 北京市朝阳区北四环中路 35 号

邮编: 100101

邮箱: 568224680@qq.com

高国伟: 北京信息科技大学信息获取与检测重点实验室, 博士, 主要从事倾角传感器的设计与研发, 自动检测方面的研究。

胡平: 北京国科舰航传感技术有限公司, 工程师, 硕士, 主要从事倾角传感器的设计与研发。

潘宏生: 北京国科舰航传感技术有限公司, 工程师, 硕士, 主要从事倾角传感器的设计与研发。