

微机械硅摆倾斜仪的时温漂补偿技术

段晓艳¹, 张学松², 李晓白¹, 张伟¹

(1. 北京信息科技大学 传感技术中心, 北京 100101; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 为了提高特种车辆遂行任务系统的效能, 基于微机械硅摆效应, 研究设计了一种微机械硅摆倾斜仪。微机械硅摆感应倾角变化, 经信号调理并放大, 采用软件补偿倾角输出信号线性度。受环境温度、微机械结构等的影响, 零位输出存在较大温漂和时漂。利用温度传感器采集实时温度, 设计软件算法, 进行温漂抑制。采集倾角信号, 分段拟合时间和倾角信号的关系并进行数学处理, 抑制零位时漂。实现时温漂补偿技术后, 在不同温度环境中, 启动倾斜仪, 零位输出信号偏差 ≤ 10 mV, 且启动时间由 20 min 缩短为 10 s。

关键词: 微机械硅摆; 倾斜仪; 零位输出; 温漂; 时漂

中图分类号: TN379; TM22; TH712 **文献标识码:** A

Time and Temperature Drift Compensation Technology of Micro Machined Silicon Pendulum Tiltmeter

DUAN Xiaoyan¹, ZHANG Xuesong², LI Xiaobai¹, ZHANG Wei¹

(1. Key Lab. of Sensor, Beijing Information and Technology University, Beijing 100101, China;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: To improve the performance of implementing task system of special vehicle, we designed a silicon micro machined pendulum tiltmeter based on the obliquity effect of micro machined silicon pendulum. The micro machined silicon pendulum sensed the change of angle, then the signal was conditioned and amplified. The linearity of the angle output signal was compensated by using the software. Because of the influence from the environment temperature, micro machined structure and precision of chip, there existed larger time drift and temperature drift in the zero output. The temperature drift was suppressed by using the temperature sensor to collect real time temperature and designing the software algorithm. Then the zero time drift was suppressed by collecting the signals of angle, piecewise fitting the relation between the time and angle signals and mathematical processing. After time and temperature drift compensation, the zero output deviation was ≤ 10 mV and the starting time was shortened from 20 min to 10 s in different temperature environments.

Key words: micro machined silicon pendulum; tiltmeter; zero output; temperature drift; time drift

0 引言

微机械惯性传感器是以半导体工艺和微机械加工工艺为基础, 在单晶硅片上制造出来的微机电系统(MEMS)。近年来, MEMS 惯性传感器持续向高性能发展并广泛应用在智能设备、无人机、无人车等^[1-2]。在特种车辆中, 水平角速率、角度码盘和陀螺仪等可准确探测和跟踪目标。地面无人车辆中, MEMS 陀螺仪可以对车辆位置和行车轨迹进行监测, 还可以对车辆姿态进行管理。MEMS 惯性传感

器前景广阔, 也是当前惯性技术领域的一个研究热点。

倾斜仪作为惯性传感器中的一种, 是测量物体倾斜角度变化的仪器, 其中摆式倾斜仪由摆基座和摆体两部分组成, 摆体利用重力加速度实现载体水平姿态测量, 如汽车倾斜变化测量, 倾斜仪可以感应车体的姿态变化并输出倾角信号。

在坦克装备中, 将倾斜仪安装在车体上, 监测车体和平台的运动状态。为了提高特种车辆的遂行任

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372016); 北京市传感器重点实验室开放课题基金资助项目(2016)

作者简介: 段晓艳(1993-), 女, 山西人, 硕士生, 主要从事惯性器件的研究。E-mail: 139976138@qq.com。通信作者: 张伟(1969-), 男, 北京人, 副研究员, 主要从事微机械惯性器件的研究。E-mail: way_zh@163.com。

务系统的效能,在平台控制回路引入动态倾角信息作为前馈量,研究设计了一种微机械硅摆倾斜仪,实现在运动状态下的倾角测量。测量原理为微机械硅摆效应,分析倾角和输出信号的关系,通过软件算法改善倾角输出信号的线性度。针对温度和微机械加工误差等引起的问题(零位温漂和时漂)提出解决方法,并进行了试验验证。

1 倾角测量原理

微机械倾斜仪中的倾角姿态检测结构是硅摆,硅摆结构是差动电容式传感器。上、下极板是镀钽银的陶瓷板为固定状态,中间极板即硅摆为动极板^[3]。图1为倾斜仪放置于与水平面成 θ 角的平面上的结构示意图,图中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别是钽银电极和硅摆构成的4个电容。设硅摆受重力作用与水平面成 φ 角倾斜,由图可知 $\varphi > \theta$,实际倾角状态下,硅摆重心位置的不同, φ 与 θ 角的关系也不同。

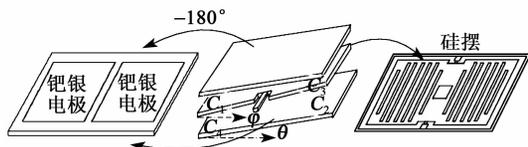


图1 模拟倾斜仪示意图

硅摆结构中,极板间存在气体,忽略边缘效应,则硅摆结构的电容为

$$C = \frac{\epsilon \omega l}{4\pi k d} \quad (1)$$

式中: ω 和 l 分别为交叠面积的长和宽; d 为板间距; k 为静电常量; ϵ 为气体的介电常数。当交叠面积或板间距发生变化时,电容值也会变化。理论上,硅摆几何结构规整,且质量结构均匀,交叠面积和板间距均相同,则 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$ 。实际测量中,此理想结构并不存在。若 $\varphi > \theta$, C_1 、 C_2 容值减小, C_3 、 C_4 容值增加,引起信号检测电路输入电压 V_1 、 V_2 的变化,信号检测电路如图2所示, V_s 为该部分电路的输入电压, V_1 、 V_2 的计算式为

$$V_1 = \frac{\frac{1}{j\omega C_1 + j\omega C_2}}{R + \frac{1}{j\omega C_1 + j\omega C_2}} V_s = \frac{1}{j\omega R(C_1 + C_2) + 1} V_s \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{\frac{1}{j\omega C_3 + j\omega C_4}}{R + \frac{1}{j\omega C_3 + j\omega C_4}} V_s =$$

$$\frac{1}{j\omega R(C_3 + C_4) + 1} V_s \quad (3)$$

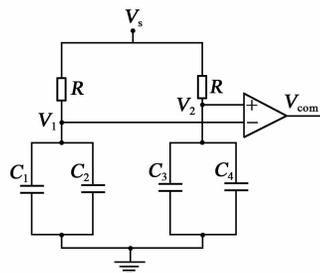


图2 信号检测电路

由式(2)、(3)可见, C_1 、 C_2 容值减小时, C_3 、 C_4 容值增加, $V_1 > V_2$ 。 V_1 和 V_2 通过差分放大电路放大并输出。因此,输出信号将随倾斜角度变化发生规律变化。

2 总体设计

微机械硅摆倾斜仪由电源、倾角敏感元件、信号调理电路、温度传感器和数字处理部分组成,如图3所示。倾角敏感元件感应载体倾斜角度变化,转换为电压信号并经电路放大,通过数字处理提高线性度,抑制零位漂移,以输出精准的载体倾角信息。

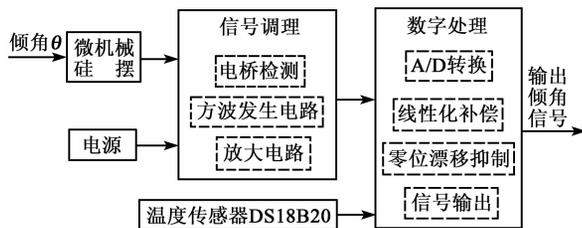


图3 系统结构框图

2.1 硬件结构

微机械硅摆是倾角敏感元件,如图4所示。该微机械硅摆还具有陀螺效应,能够利用旋转载体自身的旋转作为驱动,可以同时输出偏航、俯仰和自旋角速度,体积小,成本低,结构简单,广泛应用于如滚转导弹等高速旋转体的姿态检测^[4]。

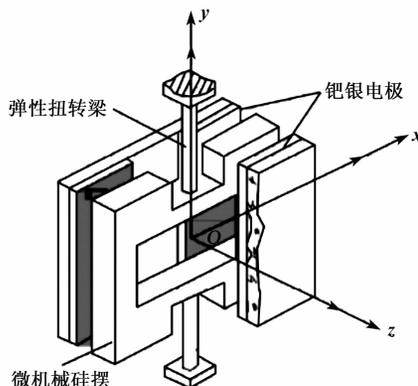


图4 微机械硅摆结构图

信号调理电路由电桥检测和方波发生电路、放大电路构成,硅摆的电容通过方波发生器进行充放电。放大电路如图 5 所示,其中采用的 AD620 是一款低成本、高精度仪表放大器,采用了经典的三运放改进设计,仅需要一个外部电阻来设置增益。在实际测量系统中,从传感器所获得的信号为差模小信号,并含有较大共模部分,其数值有时远大于差模信号。三运放结构的精密放大器可有效放大差模信号,抑制共模信号,差模放大倍数越大,共模抑制比越高。OP27 是高精度、低噪声、低漂移的精密运算放大器,采用偏置电流补偿电路,两个输入端的偏置电流匹配良好,且具有良好的温度稳定性。

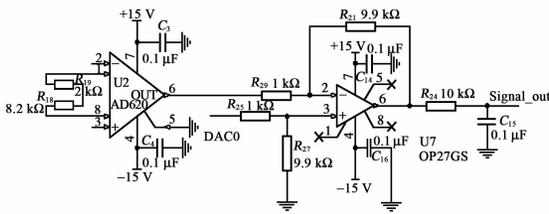


图 5 放大电路

2.2 数字处理

数字处理主要包括线性化补偿和零位漂移抑制。在实际系统中,输出信号与被测物理量之间不一定是线性关系,如微机械硅摆倾斜仪中,倾斜角度和输出信号之间就存在非线性误差。通过数字处理可以补偿倾角和输出信号的线性度。同时,设计软件算法,抑制倾斜仪自身误差、环境温度等引起的零位温漂和时漂,使输出更精确。

2.2.1 线性化补偿

线性化补偿可以通过硬件或软件两种方法来实现。硬件补偿法需采用专门电路,如串、并联电阻或对数比例电路。软件补偿法有查表、计算、线性插值、最小二乘拟合等方法,但查表法要求的存储容量相对较大,算法需要用数学方程式精确描述传感器特性。

微机械硅摆的倾斜角度(−30°~30°)和输出电压信号的关系,如图 6 所示。

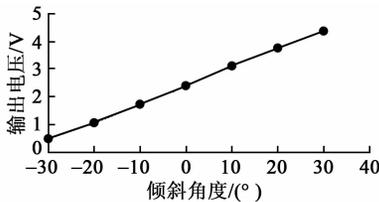


图 6 倾角和输出电压信号关系

通过信号放大调理后,零位输出为 1.5 V ± 10 mV。利用单片机将电压信号转换为数字信号,采用线性插值法在量程范围内(−30°~30°)分段用直

线逼近输出信号曲线,根据逼近后每个小分段的端点和中点数据建立最小二乘拟合直线方程:

$$S = K\theta + A \tag{4}$$

式中: S 为倾角输出电压对应的数字量; K 为最小二乘直线的斜率; A 为倾角零位输出值对应的数字量。

对应于量程范围内的数字量输出为

$$S(FS) = K\theta_{max} \tag{5}$$

式中: $S(FS)$ 是 −30° 和 30° 时输出电压对应的数字量的差值; θ_{max} 为满量程的角度范围,即 $\theta_{max} = 60^\circ$ 。

曲线与最小二乘直线对应的输出之间最大偏差的绝对值:

$$\max |S_i| = \max |S_i - S(i)| \tag{6}$$

则非线性度为

$$\epsilon = \frac{\max |S_i|}{S(FS)} \times 100\% \tag{7}$$

通过线性化补偿,有效改善了倾斜仪的非线性度,如图 7 所示,补偿前的非线性度为 1.4%,补偿后非线性度为 0.3%。

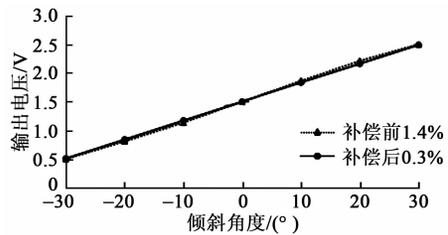


图 7 补偿前后非线性度对比

2.2.2 零位漂移抑制

零位漂移大小是倾斜仪性能稳定性的重要指标。零位漂移包括温度漂移(温漂)和时间漂移(时漂)。在启动时刻,根据环境温度和 AD620 输出信号的关系,实现温漂补偿,然后采集输出信号,实时补偿时间引起的漂移,总体方案流程如图 8 所示。

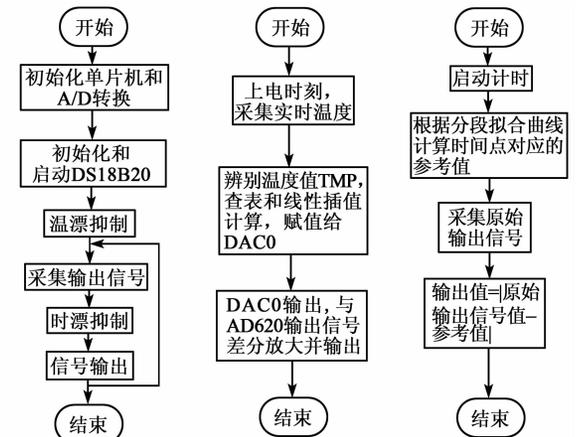


图 8 总体方案流程图

1) 温漂影响及处理方法。温漂是周围环境温度变化引起的零点漂移。在温度试验箱中多次试验,计算多次测量的平均值,上电时刻 AD620 的输出电压与环境温度的关系如图 9 所示。抑制温度漂移的方法主要有温度控制和零偏补偿。温度控制法需要设计额外的温控部件,但温控的动态特性(快速性、稳定性、滞后性等)会影响微机械硅摆的性能。零偏补偿法需要通过温度试验建立硅摆的零偏温度补偿模型,补偿模型需要定期校正。这两种方法在使用条件和提高零偏稳定性的效果方面都具有一定的局限性^[5-7],但零偏补偿法可以结合软件算法实现,较温控方法的改善效果更好。在微机械硅摆倾斜仪中,将温度传感器与零偏补偿法相结合,实时修正零位电压。

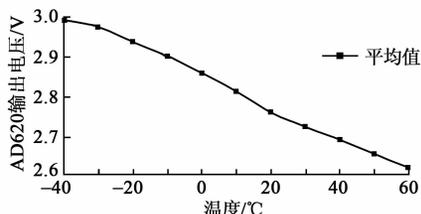


图9 上电时刻温度和 AD620 输出电压关系图

将单片机的 DAC0 端接到 OP27 运算放大器的正输入端,利用软件算法得到温漂修正值,通过单片机 DAC0 输出修正电压。利用温度传感器 DS18B20,实时感测环境温度。DS18B20 为单线数字温度传感器,采用单总线接口方式,测量温度范围宽(-55~+125 °C),精度高(± 0.5 °C)。根据环境温度(-40~+60 °C)和上电时刻 AD620 输出电压的关系,构建查询表。采集温度值,利用查表法和线性插值原理,实时赋值给 DAC0,DAC0 电压信号与 AD620 输出电压通过 OP27 运算器差分放大并输出。

温漂补偿后,不同温度环境中,启动倾斜仪,零位输出信号基本稳定,偏差范围 ≤ 10 mV。

2) 时漂影响及处理方法。时漂是在通电工作条件下,输出随时间的变化。设置定时器,采集上电 30 min 的零位输出信号,如图 10 所示。0~20 min 输出信号不稳定,倾斜仪无法正常工作;20 min 后输出信号基本稳定,即倾斜仪启动时间为 20 min。零位输出随着时间规律性变化,在不同温度点,其变

化规律基本一致。

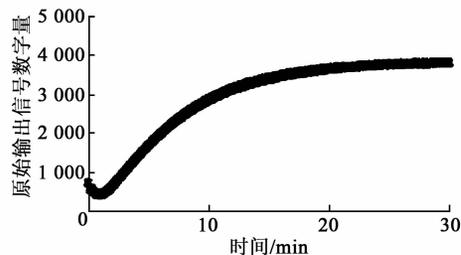


图10 输出信号数字量随时间漂移图

采用曲线分段拟合法建立时间-输出信号数字量的数学模型。分段多项式拟合法是指对某时间段内获取的原始信息数据进行局部多项式拟合,用多项式函数拟合各段曲线的漂移趋势,跟踪噪声数据随时间变化的规律,利用不同时间段噪声的波动特性,确定合适的拟合次方。在多项式拟合中,次数较高时,其正规方程组是病态的,低次分段拟合,可降低病态程度,降低误差量。

利用 MATLAB 进行分段拟合,分为 0~1 min、1~5 min 和 5~10 min、10~20 min 段,根据拟合曲线建立时间点对应的参考量,将采集到的原始输出信号数字量与同一时间点的参考量对应,输出值= $|\text{原始输出信号值}-\text{参考值}|$,减小浮动带宽。

实现时漂补偿,启动倾斜仪 10 s 后,采集零位输出信号如图 11 所示,启动时间由 20 min 缩短为 10 s,浮动带宽降低了 92%。

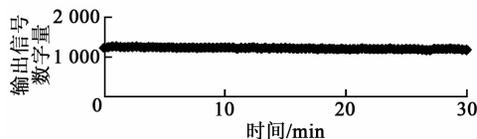


图11 时间漂移补偿后输出信号数字量

3 系统性能测试

将倾斜仪按照敏感轴方向安装在光学分度头测试台上^[8],并调至水平位置,在倾角模拟电压输出端接电压表。接通电源,稳定 10 s 后,使倾斜仪倾斜一定角度分别为 -30°、-20°、-10°、0°、+10°、+20°、+30°,记录倾角输出电压信号如表 1 所示。该倾斜仪的倾角测量范围为 -30°~30°,灵敏度为 0.033 V/(°),零位输出为 1.5 V ± 10 mV,非线性度 $\leq 0.3\%$ FS。

表1 倾斜仪输出电压信号表

倾角/(°)	-30	-20	-10	0	10	20	30	非线性度/%
输出	0.504	0.838	1.173	1.503	1.835	2.168	2.502	0.109 0
电压/V	0.498	0.833	1.168	1.499	1.833	2.168	2.501	0.123 5
	0.499	0.835	1.171	1.503	1.837	2.168	2.501	0.152 2

4 结束语

本文对微机械硅摆倾斜仪进行了研究。倾角的敏感元件为微机械硅摆,载体倾角发生变化时,硅摆受到重力作用引起电容结构和输出电压的变化,通过放大电路,实现输出信号的放大。采用高性能的数据采集系统——Aduc812单片机对倾角和输出电压信号的线性关系进行补偿,非线性度降低到 $\leq 0.3\%FS$ 。另外,受环境温度、倾斜仪误差等影响,零位输出信号存在较大漂移,建立数学模型和曲线拟合,设计软件算法抑制温度和时间漂移,使得在不同温度下倾斜仪的零位输出基本稳定。该倾斜仪可较好地实现载体倾角的测量,经数字处理后零位输出为 $1.5\text{ V}\pm 10\text{ mV}$,倾角测量范围为 $-30^\circ\sim 30^\circ$,灵敏度为 $0.033\text{ V}/(^{\circ})$,启动时间由 20 min 缩短为 10 s 。

参考文献:

- [1] 赵正平. 典型 MEMS 和可穿戴传感技术的新发展[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(1): 1-4.
ZHAO Zhengping. The new development of typical MEMS and wearable sensor technology [J]. Micro Nano electronic Technology, 2015, 52(1): 1-4.
- [2] GUO Zhanshe, CHENG Fucheng, LI Boyu, et al. Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(10): 2053-2066.
- [3] 郭亨, 张福学, 赵辉, 等. 抑制加速度干扰的微机械二维倾角传感器[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(2): 53-57.
GUO Heng, ZHANG Fuxue, ZHAO Hui, et al. Interference suppression acceleration of micro mechanical two-dimensional Angle sensor [J]. Journal of Beijing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(2): 53-57.
- [4] 丁君. 基于微惯性传感器的姿态算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [5] 刘燕锋, 陈志勇, 张嵘. 对称单质量微机电陀螺的零偏自补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 66-71.
LIU Yanfeng, CHEN Zhiyong, ZHANG Rong. Bias self compensation method for single mass MEMS gyroscope symmetric structure[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 66-71.
- [6] BAHARI J, FENG R, LWUNG A M, et al. Robust MEMS gyroscope based on thermal principles[J]. IEEE Journal of Micro Electromechanical Systems, 2014, 23(1): 100-116.
- [7] LIEWALD J T, KUHLMANN B, BALSINK T, et al. 100 kHz MEMS vibratory gyroscope [J]. IEEE Journal of Micro Electromechanical Systems, 2013, 22(5): 1115-1125.
- [8] 朴林华, 崔雪梅, 王星, 等. 微机械全方位水平姿态传感器的研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(2): 207-209.
PIAO Linhua, CUI Xuemei, WANG Xing, et al. Research on micro machined omnidirectional level attitude sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(2): 207-209.
- [9] 高幸. 动基座水平姿态传感器的研究[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2013.
- [10] 谈林霞, 张福学. 高精度动态水平姿态传感器系统设计[J]. 压电与声光, 2001, 33(6): 910-914.
TAN Linxia, ZHANG Fuxue. The system design for high-precision dynamic level attitude sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 33(6): 910-914.
- [11] 王学敏, 金磊, 管延伟. 常温下微机械陀螺长时漂移特性实验研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 620-623.
WANG Xuemin, JIN Lei, GUAN Yanwei. Experiment study on the long-time drift characteristic of MEMS gyroscope under normal temperature [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 620-623.
- [12] 张福学, 张伟. 无驱动结构硅微机械陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 160-170.