

doi: 10.7690/bgzd.2014.06.018

基于 MEMS 加速度计的倾斜姿态角传感器设计

雷凌毅, 唐恭富, 姚毅

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对应用领域中判断水平面及水平面夹角的问题, 设计一种倾斜姿态角传感器。把 MEMS 加速度计 SCA103T-D04 与 C8051F47 单片机组合在一起, 对 MEMS 加速度计输出信号进行调理和 AD 采集, 单片机 C8051F047 完成数据分析和温度补偿, 并通过 CAN 总线通讯接口和 RS232 通讯接口输出倾斜角度值, 输出周期为 200 ms。该倾斜姿态角传感器测量精度为 0.03°, 测量范围为 -6°~6°, 具有体积小、重量轻、精度高、温度适应范围宽的特性, 可广泛应用于建筑、道路、桥梁及军用设备等领域。

关键词: MEMS 加速度计; 倾斜姿态角传感器; 单片机 C8051F047; 温度补偿

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Design of Incline Transducer Based on MEMS Accelerometer

Lei Lingyi, Tang Gongfu, Yao Yi

(Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the judging problem of level and its angle in application field, design a incline attitude angle sensor. The acceleration of MEMS SCA103T-D04 and C8051F47 single chip computer are combined together, conditioning and AD acquisition the MEMS accelerometer output signal. SCM C8051F047 complete the analysis of the data and temperature compensation, the data of incline sensor can be transmitted through CAN and RS232, the period is 200 ms. The measuring accuracy is 0.03° and the measuring rang is -6°~6°. The incline sensor has the advantages of small volume, light weight, high precision, wide range of temperature adaptation characteristics, it can be widely used in the fields of construction, roads, bridge and military equipment and so on.

Keywords: MEMS accelerometer; incline attitude angle sensor; SCM C8051F047; temperature compensation

0 引言

在许多应用领域中经常需要判断某个平面是否处于水平, 或测量该平面相对于水平面的夹角。目前市场上的倾斜姿态角传感器主要有: 液态倾斜姿态角传感器、气体倾斜姿态角传感器、固态倾斜姿态角传感器和光学倾斜姿态角传感器。与液态倾斜姿态角传感器相比, 固态倾斜姿态角传感器具有结构简单、可重复性强、反应快的优点, 与光学倾斜姿态角传感器相比, 固态倾斜姿态角传感器具有适应性强、价格便宜的优势^[1]; 因此, 笔者设计一种基于 MEMS 加速度计传感器与 C8051F047 单片机组合而成的倾斜姿态角传感器。

1 方案原理设计

系统由 MEMS 加速度计 SCA103T-D04、调理滤波电路, 温度采集电路, A/D 转换电路, CAN 总线通信接口电路, RS232 通信接口电路和数字处理电路等模块组成, 电路原理框图如图 1 所示。

SCA103T-D04 加速度计模块输出的加速度电

压信号经调理电路放大、滤波等处理后, 经过 A/D 转换电路进行模数转换, 得到的加速度信号所对应的倾斜角由数字处理电路运算得出, 再根据环境温度进行温度误差补偿和误差处理, 将倾斜角度值通过 CAN 总线通讯接口^[2]和 RS232 通讯接口输出。

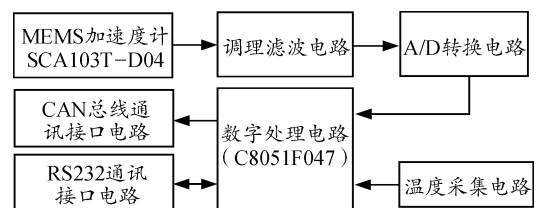


图 1 电路原理框图

2 硬件设计

2.1 MEMS 加速度计 SCA103T-D04

SCA103T-D04 是一款低功耗、低噪音、低成本电容式硅微机械单轴加速度计, 内部包含了一个硅敏感微电容传感器和一个 ASIC 专用集成电路。该硅敏感微电容传感器的敏感元件为固定电容器, 采用悬臂梁、固定支架或挠性轴结构, 支撑一个当作

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-02-13

作者简介: 雷凌毅(1979—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事嵌入式系统设计和控制研究。

电容动板电极的质量块，质量块与一个固定板构成一个平板电容，如图 2 所示。其工作原理是：在外部加速度的作用下，检验质量块产生位移，这样就会改变质量块和电极之间的电容，将这种变化量用外围电路检测出来就可以测量加速度的大小。在本倾斜姿态角传感器的应用中，主要是检测重力加速度在其倾斜方向上的分量，并由此计算出与水平方向上的夹角。为保证精度，该系统设计量程为±6°，工作温度范围：-40~85℃。

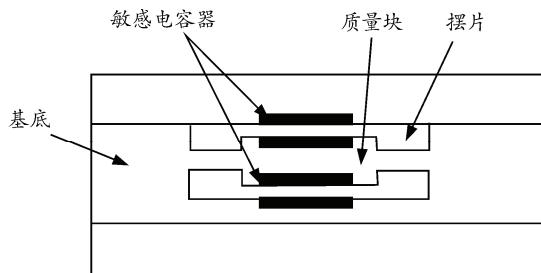


图 2 电容式 MEMS 加速度传感器结构

2.2 调理及 AD 转换电路

图 3 为加速度计 SCA103T-D04 的调理电路及 AD 转换框图。



图 3 调理电路及 AD 转换框图

SCA103T-D04 输出信号经运算放大器 INA114 放大滤波后，进入 A/D 转换器进行模数转换。前置运放 INA114 实现差分放大等功能。

AD 转换电路中采用 AD 公司生产的 AD676 模数转换器，将差分运算放大器放大调理后的模拟信号转换成数字信号。AD676 是一种 16 位并行输出的模数转换器，利用开关电容充电再分配结构获得高速转换（转换时间为 10 μs）的性能，并通过芯片自动校准电路进行非线性数字校正，使该器件总的性能达到优化。积分非线性误差：0.001 56%，总谐波失真：0.002%。

2.3 数字信号处理电路

数字信号处理电路主要完成 MEMS 加速度计数据的采集、数据的转换、温度误差的补偿、数据的误差处理、通信数据的处理等功能。

数字信号处理电路采用 C8051F047 单片机作为运算处理的核心部件，该器件采用的是高速、流水线结构的 8051 兼容的 CIP-51 内核（可达 25MIPS），是完全集成的混合信号片上系统，具有 32 个 I/O 数字引脚；片内集成了一个 CAN2.0B 控制器；具有

32KB 可在系统编程的 FLASH 存储器；4KB 的外部数据存储器；具有片内 VDD 监视器，看门狗定时器。FLASH 存储器还具有在系统重新编程能力，可用于非易失性数据存储。

2.4 温度采集电路

温度采集电路测量倾斜姿态角传感器工作时的环境温度，计算倾斜角度时补偿由于温度原因所引起的误差。

温度采集电路采用 AD 公司的 AD7814 温度传感器，该器件是一种 10 位的温度数字转换器，转换准确度为±2℃，分辨率为 0.25℃，工作温度范围为 -55~+125℃，具有 SPI 接口，与 C8051F047 单片机的 SPI 接口相连，完成环境温度的采集。

3 软件设计

3.1 软件流程

软件设计主要包括系统初始化、加速度采集、温度采集、温度补偿、倾角计算、数据处理、数据通讯接口等模块。

系统上电后，首先初始化，然后每 10 ms 采集一次 MEMS 加速度计输出的加速度信号和温度传感器的数据，然后计算出具体的加速度值并进行温度补偿，得到补偿后的加速度值，再计算出加速度值所对应的倾角值。将每一次倾角值存入 FIFO 循环队列的数据存储区域中。当采样样本达到 20 组数据后，进行数据误差处理。倾角值通过 CAN 总线通讯接口和 RS232 通讯接口输出，输出周期为 200 ms。系统软件流程如图 4 所示。

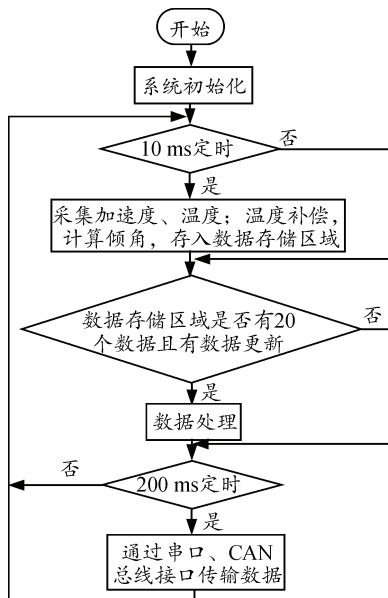


图 4 系统软件工作流程

3.2 A/D 采集与实现

AD676 模数转换器数据接口是 16 位并行数据接口，模数转换时间为 10 μs。器件有一个表示工作状态的信号输出接口 (BUSY)，一个主时钟输入接口 (CLK)，一个采集控制引脚端 (SAMPLE)。BUSY 高电平表示该器件正在进行转换或者校准，低电平表示可以从并行接口读取数据；器件完成一次转换需要 17 个时钟周期，主时钟用软件通过 I/O 接口产生；在转期间，SAMPLE 控制内部采样/保持放大器的状态，SAMPLE 的下降沿启动一次转换。单片机控制 AD676 的时序如图 5 所示。

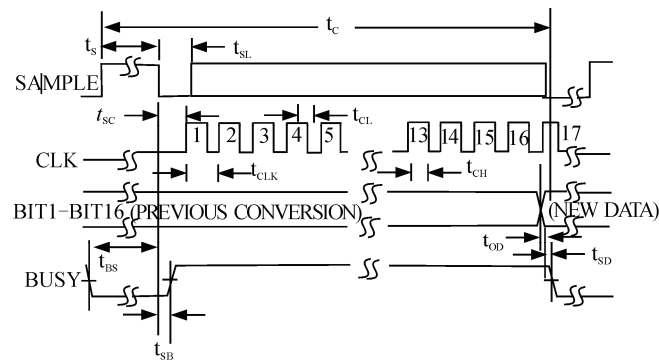


图 5 AD676 转换的时序

3.3 倾角计算

倾斜测量装置是基于 MEMS 技术的加速度传感器^[3]。当传感器静止时，作用在传感器上面的加速度只有一个重力加速度，此时重力加速度方向和传感器灵敏轴的夹角就是传感器基于水平面的倾斜角，如图 6 所示。加速度传感器输出的电压 V 与受到的加速度 α 之间的关系为： $V = k\alpha$ ，其中 $\alpha = g \sin \theta$ ， k 为加速度敏感度。由此可得：

$$\theta = \arcsin(V / kg) \tag{1}$$

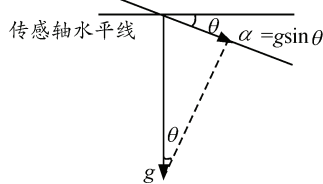


图 6 传感轴与重力加速度的关系

由于安装制造工艺的限制，在计算实际倾斜角度时，加速度传感器输出的电压还需减去加速度传感器在水平位置输出的基准电压值，由公式 (1) 可得实际输出角度值为：

$$\theta' = \arcsin((V - V_{zero}) / kg) \tag{2}$$

其中： V_{zero} 为加速度传感器在水平位置输出的基准电压值，此值通过将待标定倾斜姿态传感器安装在

调平的光学分度头上，通过 RS232 通讯接口发送标定命令，倾斜姿态传感器自动完成零点标定。

3.4 温度补偿

加速度传感器的加速度敏感度 k 会随着温度的变化而变化。在倾斜姿态角传感器内部安装温度传感器，测量内部工作温度，补偿由温度变化而产生的角度偏差^[4]。加速度温度系统补偿如式 (3)、式 (4)。

$$Scorr = -10^{-7} \times T^3 - 10^{-5} \times T^2 + 10^{-3} \times T - 0.031 \tag{3}$$

$$k_{comp} = k \times (1 + \frac{Scorr}{100}) \tag{4}$$

其中： k 为加速度传感器正常敏感度， V/g ； k_{comp} 为补偿后的敏感度。

3.5 数据处理

系统每隔 10 ms 采集加速度、温度，并计算补偿倾斜角度，得到一个样本量，每 200 ms 处理一次 20 个样本数据^[5]。对 20 个样本数据进行排序，按求值公式 (5) 对去掉 2 个最大值和 2 个最小值后的数据求算术平均值。

$$V_{输出值} = (SUM_{20} - (V_{最大值1} + V_{最大值2} + V_{最小值1} + V_{最小值2})) / 16 \tag{5}$$

3.6 数据通讯

系统有 CAN 总线和 RS232 2 个通讯接口。CAN 总线满足 CAN2.0B 协议，通讯速率为 500 kbit/s，RS232 接口通讯速率为 9 600 bit/s。2 个通讯接口均输出一个标准的浮点数，表示当前倾斜姿态传感器角度。

4 实验分析

在实验室比较干净的电磁环境中，将倾斜传感器安装在型号为 JJF4 光学分度头的实验工具上，从 $-6^\circ \sim +6^\circ$ 之间测量 14 组数据。测量原始数据如表 1 所示。

表 1 实验数据统计

光学分度头	倾斜传感器	光学分度头	倾斜传感器
354°0'5"	6°0'25"	0°0'7"	-0°0'23"
6°0'5"	-6°0'49"	359°0'6"	0°59'45"
5°0'5"	-5°0'41"	358°0'4"	1°59'43"
4°0'5"	-4°0'37"	357°0'5"	2°59'50"
3°0'4"	-3°0'41"	356°0'1"	4°0'11"
2°0'3"	-2°0'27"	355°0'5"	5°0'22"
1°0'6"	-1°0'26"	354°0'5"	6°0'19"

根据表 1 数据分析，倾斜传感器最大误差值为 44"。在某现场电磁环境比较复杂的实际工程应用中，误差最大值为 108" (0.03°)。