

# Tilt Sensor Designed Based on C8051F352 MCU

JIANG Haitao, LIU Xiaohua

1. Jiaozuo Teachers college, Jiaozuo, China

2. Northwestern Polytechnical University, Xian, China

**Abstract:** Designed a tilt sensor with high function, low power consumption C8051f352 MCU is introduced, which is based on a single-Axis Accelerometer and a Dual-Axis Accelerometer. In this paper, the work principle, hardware design and software flow chart of this tilt sensor are introduced in detail separately. The principle and whole frame of the system are given, the design of the hardware circuit and software are mainly presented. Compared with tradition attitude indication system, this system has low power consumption and small size. The results of tests indicate that the system has high reliability and this method can be used to determine the tilt of aircraft which needs to be controlled.

**Keyword :** tilt sensor; accelerometer

## 基于C8051F352 单片机的倾角传感器设计

蒋海涛<sup>1,2</sup>, 刘晓花<sup>1</sup>

1. 焦作师范高等专科学校, 焦作, 中国, 454001

2. 西北工业大学电子信息学院, 西安, 中国, 710072

**摘要:** 利用高性能、低功耗 C8051F352 单片机, 研制一个基于三轴加速度计传感器采集信号的倾角传感器, 包括倾角传感器的工作原理、硬件设计以及软件算法流程。介绍了倾角的测量原理及整体框架, 重点阐述了系统的硬件电路设计和软件设计。该系统体积小, 功耗低, 可靠性高, 可用于各类飞行器的倾角指示和测量。

**关键词:** 倾角传感器; 加速度计

### 1 引言

斜测技术是确定物体在空间的倾斜和倾向的专门技术, 它应用于空间飞行器的惯性测量系统、机器人的机械臂伸展确定、车船体的倾斜测量、岩体倾向判断、工程钻空轨迹检测等许多方面。

加速度传感器是倾角传感器的一种, 测量值为加速度, 测量的目的是得出测量对象的姿态倾角, 是将运动或重力测量值转换为电信号的传感器。倾角传感器主要用于倾斜角、惯性力、冲击力及振动等参数的测量。

本文采用 ADI 公司的单轴加速度计 ADIXL102 和双轴加速度计 ADIXL202 和 Silicon Labs 公司研制的 C8051F352 单片机。该系统体积小、重量轻且结构简单, 非接触的传感方式可以避免磨损, 具有广阔的工业、军事应用前景。

### 2 测量原理

测量原理: 在地球上任何位置的物体都受到重力

的作用而产生一个加速度, 把加速度传感器固定在物体上, 当物体姿态改变时, 加速度传感器的敏感轴输出值随之改变, 因此可通过测量加速度的变化来获知物体姿态的变化, 利用沿载体坐标系安装的三轴加速度输出数据即可确定载体的倾角[3]。

以三向量轴重力加速度计测量物体轴向的静态重力加速度分量, 从地面固连坐标系(OXdYdZd)转到物体固连坐标系(OXYZ)下, 通过数值计算, 误差校正, 能准确判断物体的倾斜, 判断物体的倾角<sup>[4]</sup>。

地面坐标系(法面坐标系)OX<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 固定与大地, 原点选取在地面上的某一点, 轴 Z 沿铅垂线方向向上, 轴 X、Y 在水平面内, 其指向按具体条件选取(一般可以选取指向目标)。

若把原点放在被测物质心, 坐标轴始终平行于地面坐标系的轴 X<sub>1</sub>、Y<sub>1</sub>、Z<sub>1</sub>, 则此坐标系 OX<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 称为被测物牵连的地面坐标系。当仅关心坐标系方位, 而不关心原点位置时, 此坐标系可以简称为地面坐标系。

三轴加速度传感器测角装置采用此地面坐标系, 可将三个单轴加速度计通过装配装置来组成正交的三

轴加速度计(也可采用单片多轴加速度计,如1997年、1999年Tako等提出了一个微机械的、压阻的、完全集成的三轴加速度计)。

三轴加速度计的测量原理如图1所示,三轴加速度计由三个单轴加速度计正交组合而成,每个单轴加速度计分别用于测量OX、OY、OZ轴向的加速度值。坐标系之间通过平移和旋转可以进行相互变换。平移是保持两个坐标系之间通过平移和旋转可以进行相互变换,平移是保持两个坐标系的轴一致,把原坐标系的原点移到新坐标系的原点;旋转是保持两个坐标系的轴一致,根据需要把原坐标系的轴旋转一定的角度,于新坐标系的轴重合。旋转是一个矩阵转换过程,可以用旋转矩阵来表示。

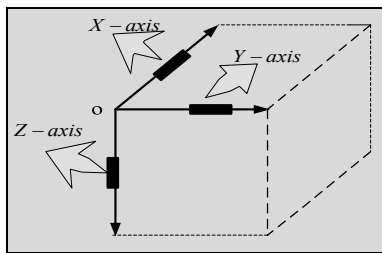


Figure 1. Principle of accelerometer measure attitude  
图1 加速度计测量原理

在空间的三个角一般表示方法为:

偏航角  $\varphi$ :测量物体轴OX在水平面  $OXdYd$  上的投影线与轴  $OXd$  之间的夹角。绕轴  $OZd$  按右手法则使  $OXd$  与OX在水平面的投影相重合的方向为正。

俯仰角  $\theta$ :测量物体轴OX与水平面  $OXdYd$  之间的角度。当轴X向上方倾斜时,  $\theta$  为正。

滚转角  $\gamma$ :测量物的对称平面  $OXdYd$  与包含轴  $Xd$  的铅垂平面之间的夹角。按右手法则,当右翼下倾、左翼上倾时,  $\gamma$  为正。

(1)  $Ax, Ay, Az$  为坐标转动后沿各轴测得的加速度值。 $\theta, \gamma$  分别为俯仰角和滚转角,转动范围为  $[-90, +90]$ 。如图2所示。

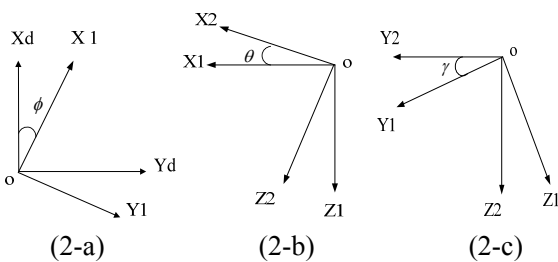


Figure 2. Schematic diagram of coordinate system rotation angle  
图2. 倾角转动的坐标系示意图

$\theta$  表示坐标系  $X_1Y_1$  绕  $Y_1$  轴旋转的角度,而得到坐标系  $X_2Y_2Z_2$ 。 $\gamma$  表示坐标系  $X_2Y_2Z_2$  绕  $X_2$  轴旋转的角度,而得到坐标系  $XYZ$ 。三轴加速度计在  $X_1Y_1Z_1$  坐标系下测得三个轴的值为  $[0,0,g]$ ,在  $XYZ$  坐标系下测得的三个轴的值为  $[Ax,Ay,Az]$ 。

根据坐标投影关系,可以得到如下公式:

$$Ax = -g \sin \theta ; Ay = g \sin r \cos \theta ;$$

$$Az = g \cos r \cos \theta$$

由此可得:

$$g = \sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Az^2}$$

$$\tan \theta = \frac{-Ax}{\sqrt{Ay^2 + Az^2}} , \tan r = \frac{Ay}{Az}$$

我们所需要得到的姿态角的参数为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{-Ax}{\sqrt{Ay^2 + Az^2}}\right), r = \arctan \frac{Ay}{Az}$$

当物体姿态改变时,加速度传感器的敏感轴输出信号随之改变,因此我们可以通过测量加速度的变化获知物体姿态的变化,利用沿载体坐标系安装的三轴加速度输出数据可以确定体的倾角。

硬件设计上,根据传感器的信号输出范围,对单片机电压基准进行了调整,使的传感器的输出信号正好在单片机的输入信号范围内。在信号处理软件设计上,对A/D采样的数据进行有效的滤波算法预处理。

### 3 硬件电设路计

#### 3.1 单片机及其串口通信电路

系统采用C8051F352单片机作为系统的控制器,C8051F352是Silicon Labs公司研制的一款高性能的微处理器,它具有8KB Flash,片内集成了丰富的外设,包括8通道16位ADC,2个USART(支持SPI和I<sup>2</sup>C总线接口),16个I/O口,8位DAC,温度传感器,定时计数器、电源电压监控器等,它支持JTAG片上调试,使开发调试大大简化,本设计中主要利用了C8051F352的片内ADC采集加速度计输出的信号,利用片内USART和计算机进行通信。

#### 3.2 MEMS 加速度传感器电路

采用ADI公司三轴加速度传感器ADXL330,其灵敏度为300mv/g,抗冲击能力为10000g,由于采用了MEMS技术,ADXL330在使用上相当简单,其电路如图4所示。从图中可以看出,ADXL330只需外接4个电容接就可以构成加速度测量电路,其中C1去藕电容,C2~C4为滤波电容,与ADXL330内部电路构成低通

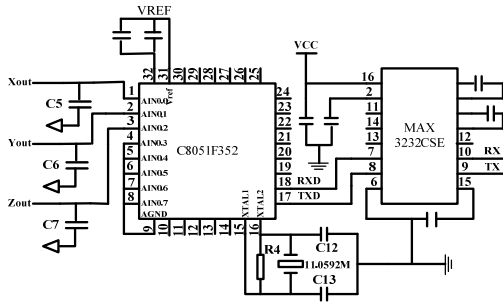


Figure 3. Microcontroller Peripheral Circuits  
图3. 单片机外围电路

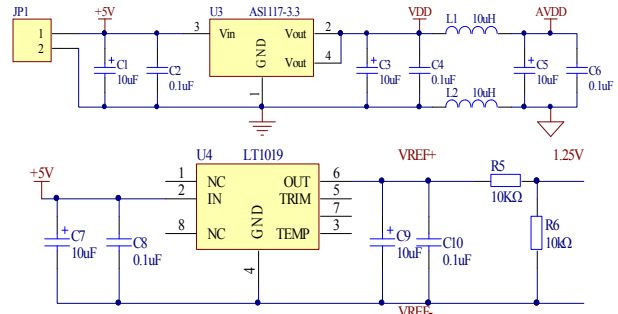


Figure 5. The power and voltage datum reference circuit  
图5. 电源及电压基准电路

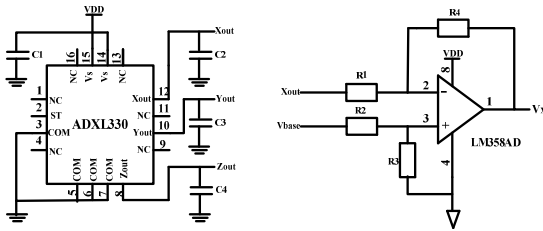


Figure 4. MEMS accelerometer circuit (left) and Signal Conditioning circuit (right)  
图4. MEMS 加速度计电路 (左) 及信号调理电路 (右)

滤波电路，电容的大小会影响滤波电路的带宽，本系统采用 0.1uF 的电容，构成滤波电路的带宽为 50Hz。

### 3.3 信号调理电路

ADXL330 的 0g 偏移电压典型值为 1.5V，灵敏度的典型值为 300mV/g，电压变化范围比较小。为了提高测量精度须对输出信号进行处理，本文设计了一个差分放大电路进行信号调理，图 4 给出了 X 轴的信号调理电路，Y 轴和 Z 轴的信号调理电路与之相同。首先，对加速度计的输出的电压减去一个偏置电压（由参考电压源分压得到，约为 1V），然后再进行放大，可以得到信号调理电路的输出  $X_{out}$  的范围为 1.215V~1.835V，则可计算出  $V_x$  的范围为：0.473V~1.837V。

### 3.4 电压基准电路

电源电路采用 AS1117-3.3 进行稳压，AS1117 可以在输入电压为 0.9V~4.5V 的范围时稳定输出 3.3V 电压，转换效率可高达 85%。电压基准采用 LT1019，它能模数转换器提供 2.5V 电压基准，电压输出误差 <0.5%，温漂 <3ppm/°C，对该电压基准进行电阻分压为信号调理电路提供偏置电压。如图 5 所示。

## 4 软件设计

系统的软件设计包括下位机和上位机两部分，为了确保上位机和下位机通信，还设计了一个基于 RS232（串口）的顶层通信协议。下位机软件是在运行单片机上的程序，其主要作用是采集加速度信号，计算出俯仰角和滚转角并发送给计算机；上位机软件是运行在计算机上的程序，其主要作用是向下位机发送命令，接收下位机传送的数据，将数据以直观的方式显示出来，并进行保存；通信协议规定了通信的波特率、数据帧长度、帧格式以及各种命令代码等。

### 4.1 上位机软件设计

上位机软件采用 Labwindows/CVI 设计，CVI 中的面板和控件为用户提供了良好的人机界面。采用 STRIPCHART 控件能够将俯仰角和滚转角的变化波形以滚屏的方式显示出来，CVI 中自带的 RS-232 Library 为串口通信提供库函数，通过使用这些库函数可以方便地与下位机进行通信。上位机软件运行界面如图 6 所示。

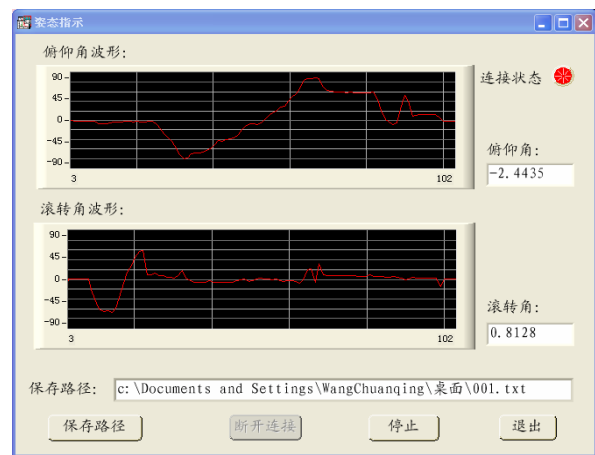


Figure 6. Upper level computer interface  
图6. 上位机软件运行界面

### 4.2 下位机软件设计.

下位机软件主要完成单片机初始化、自检、采集数据、计算俯仰角、接收串口命令并通过串口发送数据等，程序设计上采用了循环和中断相结合的方法。主程序中采用循环方式采集加速度计输出的信号，计算俯仰角和滚转角，并通过查询系统状态变量来判断当前状态。为了提高接收串口数据的实时性并避免发生数据丢失，串口数据的接收采用中断方式，串口接收到数据后，将数据保存到数组中，判断数据的有效性，通过查询数据帧中的命令代码并相应地改变系统状态变量的值。下位机软件的程序流程图如图 7 所示。

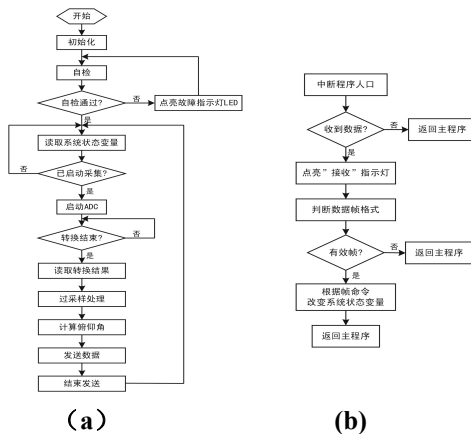


Figure 7. Slave system flow chart  
图 7. 程序流程图

### 4.3 通信协议

#### (1) 基本约定

通信协议为上位机和下位机进行通信时的约定，本设计中通信所采用的波特率为 115200bps，无校验位，数据位为 8 位，停止位为 1 位。

#### (2) 数据帧格式

为了确保通信的准确可靠，避免出现数据混乱、数据丢失，定义了数据帧格式。上位机发送给下位机的命令帧的格式如表 1 所示。

Table 1. Host computer sends a command frame format  
表 1. 上位机发送的命令帧格式

字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	字节 5
帧头	命令码	设置有效	偏移电压	增益
字节 6	字节 7	字节 8	字节 9	
输出率	均值点数	增益调整	帧尾	

下位机发送给上位机的数据帧的格式如表 2 所示。

Table 2. Under-bit machine to send the data frame format  
表 2. 下位机发送的数据帧格式

字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	字节 5
	标志码	俯仰角高字节	俯仰角低字节	滚转角高字节
字节 6	字节 7	字节 8	字节 9	
滚转角低字节	保留	保留	帧尾	

数据帧的长度也为 9 个字节，帧头和帧尾同样为固定值(0x55)，标志码为固定值 0x01，标志码为其它值会被视为无效的数据帧，俯仰角和滚转角均占用两个字节。

命令帧的长度为 9 个字节，帧头和帧尾为固定值 (0x55)，命令码为 0x01 时表示该命令为连接命令，命令码为 0x02 时表示该命令为启动命令，而命令码为 0x03 和 0x04 时分别为停止命令和断开连接命令。设置有效表示该数据帧是否对模数转换器的配置进行重新设置，为 0 时表示不进行重新设置，大于 0 的任何值都表示设置有效。偏移电压、增益、输出率、均值点数、增益调整等是用来重新设定模数转换器的参数。

## 5 结论

### 5.1 结果

将所设计的姿态指示仪在转台上进行测试，将转台上刻度和上位机采集到结果进行对比，结果如表 3、4、5、6 所示。

Table 3. Output roll angle  $\gamma (\theta=0^\circ)$   
表 3. 输出角滚转角  $\gamma (\theta=0^\circ)$

编号	理论值 $\gamma$ (度)	X (g)	Y (g)	Z (g)	输出值 $\gamma$ (度)	误差 (度)
1	0	0	0	1	-0.13	0.13
2	10	0	0.174	0.985	10.22	0.22
3	20	0	0.342	0.939	19.88	0.12
4	30	0	0.511	0.866	29.79	0.21
5	40	0	0.643	0.766	40.32	0.32

Table 4. Output roll angle  $\gamma (\theta=15^\circ)$   
表 4. 输出角滚转角  $\gamma (\theta=15^\circ)$

编号	理论值 $\gamma$ (度)	X (g)	Y (g)	Z (g)	输出值 $\gamma$ (度)	误差 (度)
1	0	-0.258	0	0.966	0.14	0.14
2	10	-0.258	0.168	0.951	9.89	0.11
3	20	-0.258	0.330	0.907	19.79	0.21
4	30	-0.258	0.483	0.585	30.38	0.38
5	40	-0.258	0.621	0.769	40.29	0.29

Table 5. Output Pitch angle  $\theta$  ( $\gamma=0^\circ$ )表 5. 输出角俯仰角  $\theta(\gamma=0^\circ)$ 

编号	理论值 $\theta$ (度)	X (g)	Y (g)	Z (g)	输出值 $\theta$ (度)	误差 (度)
1	0	0	0	1	-0.31	0.31
2	10	-0.174	0	0.985	10.19	0.19
3	20	-0.342	0	0.939	19.76	0.24
4	30	-0.501	0	0.866	29.73	0.27
5	40	-0.642	0	0.766	39.64	0.36

Table 6. Output Pitch angle  $\theta$  ( $\gamma=15^\circ$ )表 6. 输出角俯仰角  $\theta(\gamma=15^\circ)$ 

编号	理论值 $\theta$ (度)	X (g)	Y (g)	Z (g)	输出值 $\theta$ (度)	误差 (度)
1	0	0	0.258	0.965	0.21	0.21
2	10	-0.174	0.254	0.951	9.73	0.27
3	20	-0.342	0.243	0.907	19.78	0.22
4	30	-0.501	0.224	0.836	30.29	0.29
5	40	-0.642	0.198	0.739	39.73	0.27

以上表明：该姿态指示系统具有较高的分辨率，俯仰角精度在 $\pm 0.4^\circ$ 之内，滚转角在俯仰角不大于  $50^\circ$

时精度在 $\pm 0.5^\circ$ 之内。在长达 12 个小时测试中未发现数据丢失现象，表明系统具有较高可靠性

## 6 结论

采用 MEMS 传感器代替传统机械电子装置，能大大缩小系统的体积，降低系统功耗，其可靠性和抗冲击能力也是传统机电装置所不具备的。本文设计的倾角传感器采用 MEMS 加速度传感器能够获得精度的俯仰角信息，是对现有倾角指示系统的探索与创新。

## References (参考文献)

- [1] MaZhongMei. Microcontroller C Programming Language Collection [M]. BeiJing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1999.
- [2] FeiYeTai. Error Theory and Data Processing (Fourth version) [M]. BeiJing: Machinery Industry Press, 2002.
- [3] ShanJiaYuan. Rotation axis within the framework of system modeling. [J] Computer Simulation, 2002, 19(5):5-7.
- [4] GaoHao, High Flying Science, [M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Press.
- [5] Michael J. Caruso Applications of Magneto resistive Sensors in Navigation System. Sensors and Actuators, 1997.
- [6] ZhangZhiTong. Proficient in MATLAB(6.5 Version) [M]. BeiJing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002.
- [7] SunZhaoXi, Portable Attitude Measurement System Based On C8051F021 [J]. Instrument and Sensor Technology, 2004, (11):37-38.