

数字式横风传感器设计与实现

周庆飞¹, 徐明龙²

(1. 北京航天测控技术有限公司 基础测量产品事业部, 北京 100041;

2. 西安交通大学 强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 基于风洞实验提出了一种自动监测横风风速及风向的设计方案, 研制出一种数字式横风传感器; 通过建立数学模型, 重点分析了气流压差和空气密度对横风风速的影响, 依据空气动力学相关理论推导出横风风速计算公式, 给出了设计参数并进行了实验验证; 简要介绍了传感器硬件电路结构和工作原理, 以及下位机软件程序设计; 差压传感器通过横风探头感应气流变化采集压差信号, 温度传感器监测环境温度, 通过查表法得到空气密度, 微处理器 MSP430 结合气流压差和空气密度计算出风速; 采用 IIR 数字滤波算法, 有效抑制了压差信号的高频噪声干扰; 通过异步通信方式对传感器进行零点标定, 消除零点漂移。

关键词: 横风; 差压传感器; 温度传感器; MSP430; IIR 数字滤波

Design and Implementation of Digital Crosswind Sensor

Zhou Qingfei¹, Xu Minglong²

(1. Dept. of Basical Measurement Products, Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Beijing 100041, China;

2. State Key Lab. of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An automatic detection for crosswind based on wind-tunnel experiment is presented, and a digital crosswind sensor is developed. In order to analyse crosswind velocity on the impact of stream's pressure difference and air density, a mathematical model is established. A formula is deduced to calculate crosswind's velocity according to the theory of aerodynamics, which is validated by wind-tunnel experiment after the design parameters is given. It describes the sensor's hardware circuit and principle, as well as the subordinate computer's programs; The pressure difference sensor acquisitions the free stream's pressure difference signals by virtue of the probe. The temperature sensor monitors environment temperature to translate the air density by the aid of ROMs. MCU MSP430 exports crosswind's velocity, combining with pressure difference and air density. IIR digital filter algorithm is adopted to suppress high frequency noise of pressure difference effectively.

Keywords: crosswind; pressure difference sensor; temperature sensor; MSP430; IIR digital filtering

0 引言

横风是指垂直于物体运动方向的侧向风。横风传感器是目前监测横风风速及风向的主要技术手段。横风容易导致弹道发生侧向偏移, 影响弹着点的位置, 最终无法准确命中目标。横风传感器是军事火控系统的重要组成部分, 用于感知弹道横风大小, 提供给计算机调整射击诸元, 提高弹道计算精度和首发命中率^[1]。

当前, 传统的横风传感器多采用风轮式和加热式, 这种设计体积大、响应速度慢、测量精度低, 难以满足要求^[2]。随着 MEMS 技术的日趋成熟, 数字式传感器技术发挥自身优势克服传统设计缺陷, 已得到广泛应用。

1 硬件设计

横风传感器的结构如图 1 所示。横风传感器主要包括探头、差压传感器 ASDXL-D4、微处理器 MSP430、温度传感器 DS18B20、RS232 接口以及稳压电源等, 其中 MSP430 微处理器模块软件部分由 IIR 数字滤波和串行异步通信构成。横风传感器工作原理如下: 当外界环境产生空气流动时, 气流通过

横风传感器探头导入差压传感器内部, 差压传感器感应气流压差变化并数字输出压差信号至微处理器中; 同时温度传感器实时采集温度信号, 通过单线接口与微处理器进行通信; 微处理器对压差信号进行数字滤波处理, 并结合温度信号查表得到当前状态下的空气密度, 依据数学模型计算得到横风信号, 通过 RS232 接口传输到上位机, 实时显示横风风速大小以及风向。其硬件电路如图 2 所示。

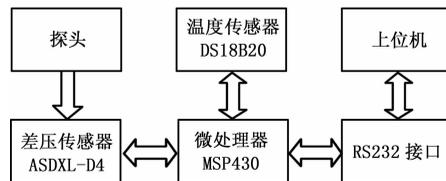


图 1 结构框图

以下对硬件电路主要组成部分进行简单介绍。

1.1 差压传感器 ASDX-D4

ASDX-D4 系列是加拿大 Honeywell 公司开发的一种差压传感器。该传感器内置专用集成电路 (ASIC), 经全面校准并有温度补偿功能; 采用 DIP 结构, 提供有关传感器偏置量、灵敏度、温度系数和非线性的数字校正; 具有 12 位 I2C 兼容协议接口, 其时钟线 SCL 和数据线 SDA 能够与微处理器方便地连接; 外设两个通气管前部 (P1) 和背部 (P2), 其与横风

收稿日期: 2014-01-11; 修回日期: 2014-03-30。

作者简介: 周庆飞 (1983-), 男, 山东威海人, 硕士, 从事传感器技术、智能控制等方向的研究。

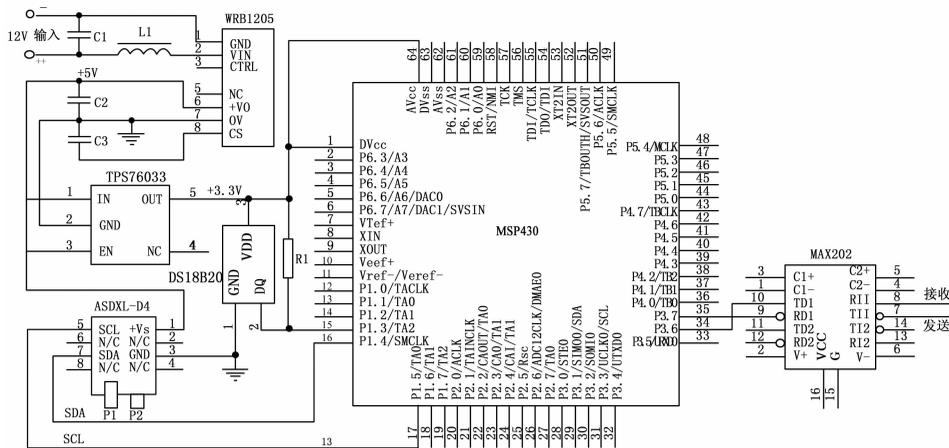


图 2 硬件电路图

传感器探头的连接示意图如图 3 所示：数字输出量是经过偏置校正的压差值 P2-P1，用具有 12 位（无符号）精度的十六进制格式表示，通过判断输出值与零点偏置值的大小识别风向：当输出值小于零点偏置值时，气流从探头上的测压孔 a 流入 b 流出，反之，流向相反；测量精度可达 ±2.5% 满刻度量程，适用于空气和干燥气体等无腐蚀、非离子的工作流体。

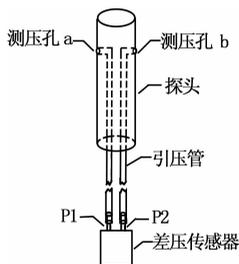


图 3 探头与差压传感器连接示意图

1.2 微处理器 MSP430

MSP430 系列是美国 TI 公司推出的 16 位超低功耗混合信号处理器。该处理器采用独特的时钟系统设计，拥有 1 种活动模式和 5 种低功耗模式，其工作在活动模式下耗电仅为 250 μA/MIPS（约为传统 MCS-51 单片机的 1/50），I/O 输入端口漏电流最大为 50 nA（约为其它系列微处理器的 1/100）；工作在低功耗模式下待机电流小于 1 μA，其处理器整体功耗远远低于业内其他产品。MSP430 集成了众多功能模块，本设计用到的模块有：定时器、I/O 端口、UART 异步串行通信、JTAG 仿真调试口等。

1.3 温度传感器 DS18B20

DS18B20 是一种高分辨率的单总线温度传感器。其主要特性如下：TO-92 封装；可编程分辨率 9~12 位；温度测量范围：-55~+125 °C；测量精度：±0.5 °C；1-Wire 总线接口；电源电压 3.0~5.5 V。

1.4 稳压电源

电源稳压特性的优劣直接影响到传感器的测量精度，甚至关系到整体设计的成败。本横风传感器选用了 WRB1205 系列隔离型 DC/DC 模块，为系统提供 5 V 直流电压，输入输出满足对隔离的要求，有效避免外界噪声耦合干扰；此外，还选用

了 TPS76033 线性稳压器，为系统提供 3.3 V 直流电压。

2 软件设计

2.1 下位机程序设计

MSP430 微处理器支持 C 语言开发，开发工具采用先进的 JTAG 调试，其软件集成开发环境 EW430 由 IAR 公司提供。下位机程序采用 C 语言编写，主要包括主程序、系统初始化、定时采样中断处理、串口接收中断处理、串口数据发送、异或校验、命令执行处理、Flash 读写、I2C 通信及 1-Wire 通信等子程序，其中定时采样中断处理子程序中添加了 IIR 数字滤波算法。

图 4 为下位机主程序流程图，程序整体采用中断处理方式，其主体部分是定时采样和异步通信中断子程序。定时采样中断函数采样间隔为 40 ms，即信号采样频率为 25 Hz，程序中主要包含 IIR 数字滤波算法以及风速换算处理。异步通信子程序模块采用接收中断的形式实现，程序中包含接收处理、发送处理、异或校验及命令执行处理等函数。

本程序中采用了低功耗设计，微处理器大约 96% 的时间处于低功耗模式，仅在进行串行通信时才被唤醒，平均工作电流仅为 65 μA，大大降低了传感器能耗。

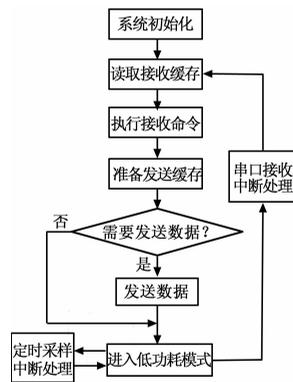


图 4 主程序流程图

2.2 滤波算法仿真

为有效抑制压差信号的高频噪声干扰，在下位机程序中设计添加了六阶巴特沃斯低通滤波算法，采样频率 $F_s=25$ Hz，截止频率 $F_l=0.5$ Hz。巴特沃斯滤波器是 IIR 滤波器的一种，其幅频特性具有通带平坦、阻带衰减迅速的特点^[3]。相比于 FIR 滤波算法来说，IIR 滤波算法运算量要小很多，可以更有效地满足给定的幅频响应技术指标。然而，IIR 滤波的相频特性却是非线性的，存在相位失真^[4]。为此，借助 Matlab 对巴特沃斯滤波器相关特性进行了仿真研究，如图 5 所示。

从图 5 中可以看出：滤波器幅频特性良好，通带平坦阻带衰减迅速，相频特性在通带内近似呈现线性关系。该滤波器设计采用了双线性变换法，由于截止频率很低致使通带很窄，所以通带内离散域信号频率 ω 很小，利用小角度逼近 $\omega/2 \approx \tan(\omega/2)$ ，群延时近似为常数，满足线性相位要求。例如对于

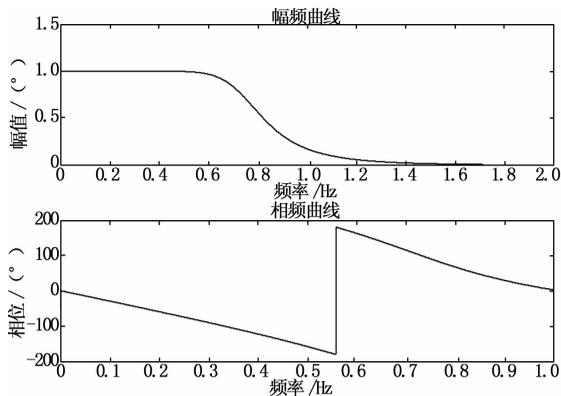


图 5 滤波器特性仿真

0.5 Hz 的噪声信号其离散域信号频率 $\omega \approx 0.125$, 小角度逼近误差仅为 0.000 08, 这样的误差在设计过程中是允许的^[5]。

为了进一步验证该滤波器不会产生明显相位失真的问题, 在 Matlab 仿真环境下进行了如下研究: 针对滤波器相位滞后问题的仿真研究如图 6 所示, 上图显示频率分别为 0.25 Hz、0.05 Hz 和 0.025 Hz 的信号叠加输入时滤波前后的波形对照, 二者幅值近乎相同但相位不同, 滤波后的波形明显发生相位滞后; 下图显示滤波后的信号经过超前校正前移 31 个点后与滤波前的波形对照, 二者几乎完全重合。由此可见, 这种滤波器设计方案在通带内不同频率的输入信号滤波时延均为 1.24 秒, 近似满足线性相位要求, 几乎不会产生相位失真。

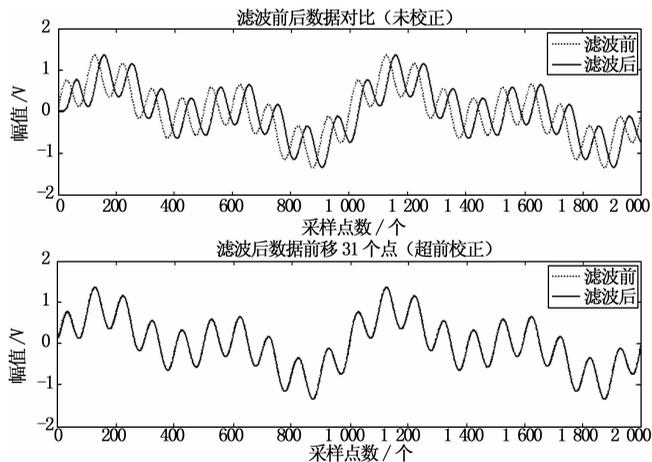


图 6 滤波器相位失真仿真研究

表 1 滤波器系数

分母系数	分子系数
$a[1][0] = -1.769954140054943$	$b[1][0] = 0.000000048639875$
$a[1][1] = 0.784021683857753$	$b[1][1] = 0.00000097279780$
$a[2][0] = -1.822694924953042$	$b[1][2] = 0.000000048638942$
$a[2][1] = 0.837181651035329$	$b[2][0] = 1.000000000000000$
$a[3][0] = -1.921886056158179$	$b[2][1] = 2.004449111044679$
$a[3][1] = 0.937161150435728$	$b[2][2] = 1.004468909384149$
	$b[3][0] = 1.000000000000000$
	$b[3][1] = 1.995550280015331$
	$b[3][2] = 0.995570075646140$

由于 IIR 滤波器设计本身对有效字长要求很高, 采用直接型误差累积过大, 所以采用二阶级联形式^[6]。该滤波器系统函数为:

$$H(z) = \prod_{i=1}^3 \frac{b[i][0] + b[i][1]z^{-1} + b[i][2]z^{-2}}{1 + a[i][0]z^{-1} + a[i][1]z^{-2}} \quad (1)$$

其中: i 表示第 i 个二阶级联单元; 数组 a 、 b 分别为滤波器分母、分子系数, 通过 Matlab 编程可直接导出对应的滤波器系数, 具体数值参见表 1。

3 实验及结果分析

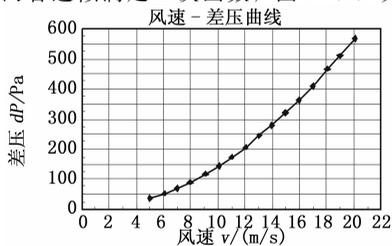
3.1 数学建模与风洞实验

针对横风监测设计要求, 建立风速测量数学模型。如图 3 所示, 假定气流通过测压孔 a、b 流经差压传感器内部, 测压孔 a、b 两处气压分别为 P_a 、 P_b , 根据空气动力学相关理论推导可知风速 v 满足如下关系式:

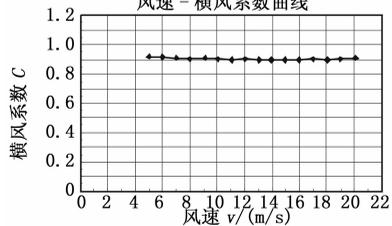
$$v = C \sqrt{\frac{dP}{\rho}} \quad (2)$$

式中, v 为横风风速大小, C 为横风系数, 可通过实验测得, dP 为气压差, 其值定义为 $P_a - P_b$, ρ 为空气密度。

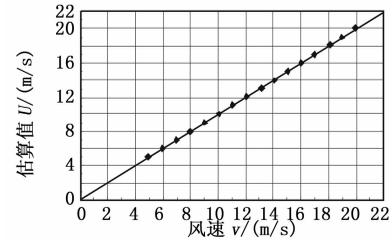
为了确定横风系数 C 并且验证关系式 (2) 的可行性, 在横风传感器设计之初进行了风洞实验, 实验结果分析如图 7 (a) ~ (c) 所示。本次实验是在特定环境温度下进行的, 当前空气密度 $\rho = 1.1614 \text{ kg/m}^3$, 风速控制在 5~20 m/s 之间, 分别测得不同风速条件下测压孔 a、b 处气压值 P_a 、 P_b , 共测得 16 组数据。数据分析处理如下: 图 7 (a) 为风速与压差的关系曲线, 两者近似满足二次函数; 图 7 (b) 为风速与横风



(a) 风速 - 压差曲线
风速 - 横风系数曲线



(b) 风速 - 横风系数曲线
风速 - 估算值回归曲线



(c) 风速 - 估算值回归曲线

图 7 风洞实验数据分析

系数的关系曲线，其中横风系数通过关系式 (2) 求得，从图中可以看出横风系数近似为常数 0.9，由此便知 $C=0.9$ ；图 7 (c) 为风速与估算值的线性回归曲线，其中估算值是指在空气密度为 1.1614 kg/m^3 、横风系数为 0.9 的条件下针对不同压差计算出的风速值。风速与估算值的线性回归方程为 $y=0.995x+0.0475$ ，回归系数为 0.9998，从图中可以看出二者近似相等，线性相关，由此可以验证关系式 (2) 在工程设计中具备较高的可信度。

3.2 传感器标定方法

由于差压传感器 ASDX-D4 输出是经过偏置的数字信号，其差压零点值易受外界环境影响发生零点漂移，必须进行传感器标定。标定方法如下：将横风传感器探头置于无风密闭环境中，通过串口以异步通信方式发送标定命令，下位机认定当前压差为零点，并将该压差值保存在 MSP430 的 Flash 中，避免掉电丢失。

4 结论

数字式横风传感器研制成功后，经过长期测试工作稳定，实现了预期的设计效果。该传感器主要应用于军事火控领域、还可应用于航天航空、汽车工业等各种需要检测横风量的领域。

作者创新观点：基于风洞实验提出一种检测横风风速及风向的设计方案，通过数学建模的方法简化研究对象，根据相关理论推导得到风速测量的关系式，并对其可信度进行实验验证；

利用 Matlab 对 IIR 数字滤波算法进行仿真研究，证明滤波器设计的可行性和合理性，编写滤波算法并在微处理器中实现该算法；采用差压传感器测量气流压差，温度传感器测量环境温度，通过查表法测得空气密度，实时监测气流变化输出横风风速；实现全双工异步通信功能，可通过向串口发送命令的方式对传感器进行零点标定，消除零点漂移。

参考文献：

- [1] Lu R H, Zhao C S, Yang Z W. Research on computational method for extend target posture angle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27: 1211-1212.
- [2] Chandrakssan A, Brodersen R. Low-power COMS digital design [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992, 27: 473-483.
- [3] 吴成富, 冯 喆, 等. 一种改价的基于红外传感器的无人机姿态测量方法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 883-885.
- [4] Xiao J X, Chen G J, Xie Y L. Test and design-for-testability of IIR filter [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19: 203-209.
- [5] Mukherjee N, Rajski J, Tyszer J. Testing schemes for IIR filter structure [J]. IEEE Transactions on Computers, 2001, 50: 674-688.
- [6] Dabrowski A, Sozanski K. Control circuit for active power-harmonic-compensation filter in power systems realized With DSP TMS320C50 [A]. 3rd European DSP Education & Research Conference [C]. Paris, France, 2000; 1-7.

(上接第 2700 页)

经测试，每更换一个电阻，均能实现可靠精确的测量，测量误差为 $\pm 2\%$ ，在工业测试领域具有很好的借鉴作用。这里采集了 20 个电阻的测量值，500 V 电压档位 1~9 M 之间电阻所测得的电阻值分布如图 7 所示，同一档位下 10~100 M 之间电阻所测得的电阻值分布如图 8 所示。

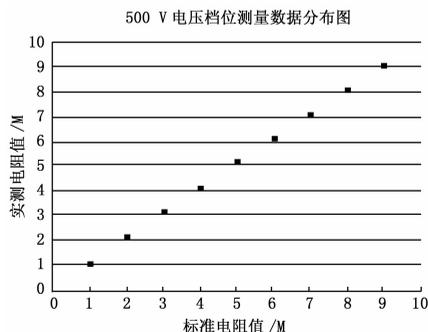


图 7 1 M 间隔的被测电阻的数据分布图

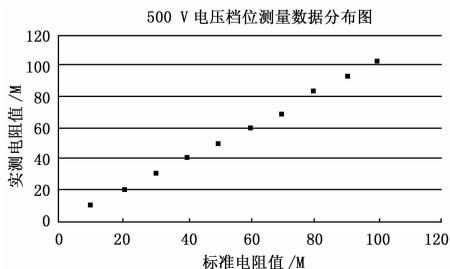


图 8 10 M 间隔的被测电阻的数据分布图

7 结束语

本文介绍了基于 S3C2440 的数字兆欧表自动切换采样电阻的驱动程序和应用程序的实现方案。经运行验证，该驱动程序加入内核，并烧写到开发板上后，运行应用程序能够可靠的工作，且性能稳定，测量精度高。这一设计方案同时对在其他嵌入式设备上扩展 gpio 口也有一定的参考价值 and 意义，应用程序也对其他的设备有一定的借鉴作用。

参考文献：

- [1] 虎恩典, 张广忠. 单片机控制的智能型电子兆欧表 [J]. 测控技术, 2004, 23 (12): 71-73.
- [2] 李 俊. 嵌入式 Linux 设备驱动开发详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [3] James W G. 测试驱动的嵌入式 C 语言开发 [M]. 尹 哲, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] 冯国进. 嵌入式 Linux 驱动程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008; 151-168.
- [5] 王润琪, 欧阳益锋, 等. 基于 QT 的触摸屏驱动在 LINUX 下的应用设计 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (12): 1429-1430.
- [6] 赵振亮, 徐立鸿, 邓梧鹏, 等. 基于 Linux 系统中嵌入式 GUI 的研究与分析 [J]. 微型电脑应用, 2006, 22 (11): 42-44, 50.
- [7] 闫锋欣, 曾泉人, 张志强, 等. C++ GUI Qt4 编程 (2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [8] Rubini A. Linux 设备驱动程序 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.