

基于 MS5611 的小型无人机高度检测系统设计

潘银松¹ 刘天刚¹ 马泽忠² 刘智华²

(1. 重庆大学光电工程学院 重庆 400030; 2. 重庆市国土资源和房屋勘测规划院 重庆 400020)

摘要: 为了满足某小型无人机中对飞行高度信息的需要,设计了一种采用 MEMS 气压高度传感器来获取无人机的相对高度的检测系统,同时利用了外界的环境温度来进行相对高度的误差补偿。该系统采用了 MS5611 数字气压传感器来获取外界的气压值和温度值,并使用了 STM32F103 微处理器来处理相关数据和控制检测系统。此外,阐述并介绍了气压高度检测的原理、检测系统的硬件电路设计方案和软件算法设计方案等。最后实验数据表明,设计方案能够满足无人机对高度测量的需求。

关键词: 数字气压传感器;高度检测;滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of small UAV height detection system based on MS5611

Pan Yinsong¹ Liu Tiangang¹ Ma Zezhong² Liu Zhihua²

(1. College of Opto-Electronic Engineering of Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Planning Institute of Chongqing Land Resources and Building Surveying, Chongqing 400020, China)

Abstract: In order to meet the needs of flight height information of a small unmanned aerial vehicle (UAV), designing a kind of detecting system adopting the MEMS height pressure sensor and it is used to obtain the relative height of UAV. It uses the outside ambient temperature to compensate the error of relative height at the same time. The system adopts a MS5611 digital atmospheric pressure sensor to obtain pressure value and temperature value of the outside world, and adopts the microprocessor STM32F103 to deal with the related data and control detecting system. Besides, Elaborating the theory of detecting barometric altitude, the design scheme of hardware circuit and software algorithm of the detecting system. Finally, the experimental data show that this design scheme can meet the needs of UAV for height measurement.

Keywords: digital atmospheric pressure sensor; height detection; filter

1 引言

小型无人机以其成本低廉、体积小、重量轻、机动性强、续航时间长等特点,所以在民用领域中的使用越来越广泛^[1]。高度测量系统的主要作用是保持无人机的相对高度值始终处于控制之下,维持无人机的对地高度,所以高度测量要采用反馈控制方法。准确的相对高度信息对于无人机的飞行来说至关重要,它是维持无人机安全飞行的重要状态参数,同时也对地面操控人员对无人机下达指令起着关键性的作用。因此,无论无人机是处于自动驾驶状态还是手动状态,高度测量对于无人机都起着关键性的作用。

在航空领域中,测量气压高度普遍是依据大气压强变化的规律来的,即大气压强值随着海拔高度的增加而减小,从而可以通过检测大气静压间接获得海拔高度。

在理想的气体环境下,实际高度约等于气压高度,而在实际的气体条件下,由于温度和空气密度等因素的差异始终存在,因此实际高度与气压高度间存在着差距。所以在实际的检测气压高度时,主要工作之一就是尽量减小其他环境因素对高度测量带来的影响,以便使得测量的气压高度尽可能多地逼近实际高度,同时还要有较好的分辨率。

近年来,随着 MEMS 技术及微电子技术的快速发展,新型传感器在电子航空导航领域的应用层出不穷^[2]。因其具有质量体积小、抗干扰能力强、能耗低、成本低、温度特性好、精度高等优点,所以今后将会逐步地取代传统的机械式仪表^[3]。

2 高度检测原理

主流无人机的飞行高度一般低于 5 km,所以在对无人

机的飞行环境和相关气体参数测量时,主要以对流层参数为参照。根据国际标准可以得到高度 H 和大气压力 P_H 间的关系式,即标准气压高度公式。

气压高度测量是基于大气为理想大气的假设,在理想大气条件下,气压和高度满足指数关系:

$$P_H = P_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{g_0/\beta R} \quad (1)$$

得到:

$$\frac{P_H}{P_b} = \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{-g_0/\beta R}$$

$$\left(\frac{P_H}{P_b} \right)^{\beta R/g_0} = 1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b)$$

$$H - H_b = \left[\left(\frac{P_H}{P_b} \right)^{-gR/g_0} - 1 \right] \frac{T_b}{\beta}$$

所以,高度计算公式为:

$$H = \left[\left(\frac{P_H}{P_b} \right)^{gR/g_0} - 1 \right] \frac{T_b}{\beta} + H_b \quad (2)$$

式中: P_H 为高度 H 下的气压,单位为 Pa; P_b 为地面高度 H_b 下的气压,单位为 Pa; β 为温度梯度,单位为 K/m; R 为空气专用气体常数,单位为 $\text{m}^2/\text{k} \cdot \text{s}^{-2}$; g_0 为重力加速度,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; T_b 为地面高度 H_b 下的温度,单位为 K。由于系统测量的是相对高度,即以无人机起飞点为基准高度,所以取值 $H_b = 0 \text{ m}$ 。此外,其他的气体参数为 $\beta = -6.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$, $g_0 = 9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $R = 287.04668^{[4]}$ 。

将测量得到的 P_H 和 P_b 、 T_b 代入式(2)中即可求出无人机的实时相对高度值。

3 系统硬件方案设计

系统硬件电路主要包括两个部分,即机载电路模块和地面站电路模块。机载电路部分主要由数字气压传感器 MS5611、微控制器 STM32F103、无线模块 NRF24L01、外扩

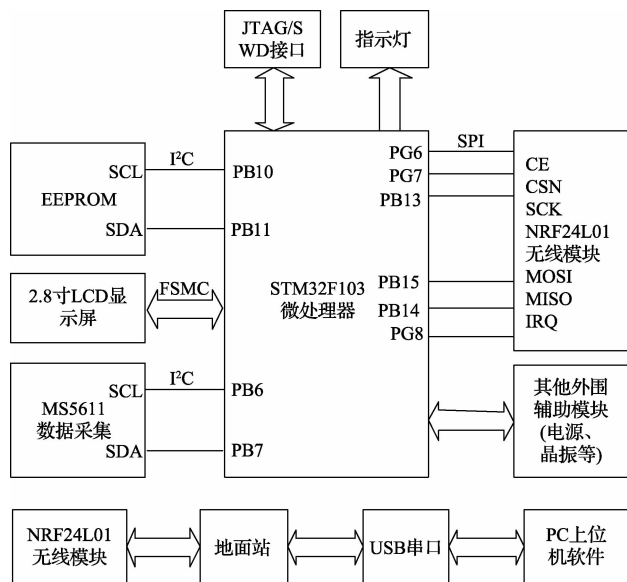


图 1 高度检测系统硬件电路

E^2 PROM 存储器以及其他外围辅助电路,如电源、JTAG 等构成。地面站电路部分由无线模块 NRF24L01、地面处理器模块和上位机组成。整个小型无人机气压高度检测系统的硬件电路图如图 1 所示。

微控制器 STM32F103 通过模拟 I²C 总线通信协议接口与数字气压传感器相连,以从传感器中获取气压值、温度值以及其他补偿数据,并经过软件的相应优化,从而得到稳定的气压值和温度值。该系统的 E^2 PROM 存储器用于存储计算出的高度、气压和温度值数据,并可以通过无线模块发送存储的数据到地面站接收站,再经串口发送到上位机上(一般是 PC),以便地面操控人员实时地了解及控制无人机的飞行高度。此外,系统还配有 LCD 显示屏(主要用于前期的程序调试阶段,方便查看数据),JTAG/SWD 接口用于载入程序^[5-6]。

3.1 传感器单元

气压测量使用的是 MS5611 型气压温度传感器,MS5611 是一种使用 MEMS 技术,把高线性的硅压阻传感器和低功耗的模数转换接口电路集成于一体的数字气压传感器单元,其主要功能就是把测得的未经补偿的模拟气压经过 ADC 模块转换成 24 位的数字气压值输出,同时也可以输出一个 24 位的数字温度。其工作电压为 1.8~3.6 V,高度分辨率可高达 10 cm,气压强度测量范围为 10~1 200 mbar (1 毫巴=1 百帕),温度测量范围为 -40~+85℃。每个传感器都有其独立的出厂校准值,被存储在一个内部的 128 bit 存储器(PROM)中,要使用这些值需要用软件来读取并通过程序转换成标准气压值和温度值。该器件支持 SPI 和 I²C 总线协议,可与任何微处理器通信匹配。MS5611 体积小,功耗低,精度和分辨率高,响应时间短,广泛应用于气压计、高度计、手持仪器、智能设备等领域。

3.2 无线通信模块

该系统作为机载部分需要装在无人机上面,所以必须需要一个通信模块来将各种飞行姿态参数传回地面。该系统采用 NRF24L01 无线模块芯片,该芯片具有以下特性:免许可证使用的 2.4 G 全球开放的 ISM 频段;抗干扰能力强,最高工作速率 2 Mbps;内置 CRC 检错和点对多点的通信地址控制;125 个可选的频道,可以满足多点通信和变频通信的需要;可设置自动应答,以确保数据的可靠传输。无线模块通过 SPI 总线协议与 MCU 通信,最大的传输速度可以达到 10 MHz。可应用于无线鼠标、安防系统、遥感勘测、无线门禁等领域^[7]。

4 系统软件方案设计

整个高度测量系统的软件方案设计是采用 C 语言和 MATLAB 语言编写的,并使用了 Keil μ Vision4 开发环境和 MATLAB 软件。程序的编写采用模块化的方案组织程序,主要包括通用 I/O 口模拟 I²C 总线通信协议模块程序、微处理器滴答定时器模拟系统时钟程序、无线通信模块程

序、气压高度解算算法程序、读取传感器寄存器的中断子程序。

系统的主程序首先执行各个模块程序的初始化程序,然后以循环的方式运行着,同时循环中间不断地有中断子程序的执行。系统主程序的工作流程图如图 2 所示。

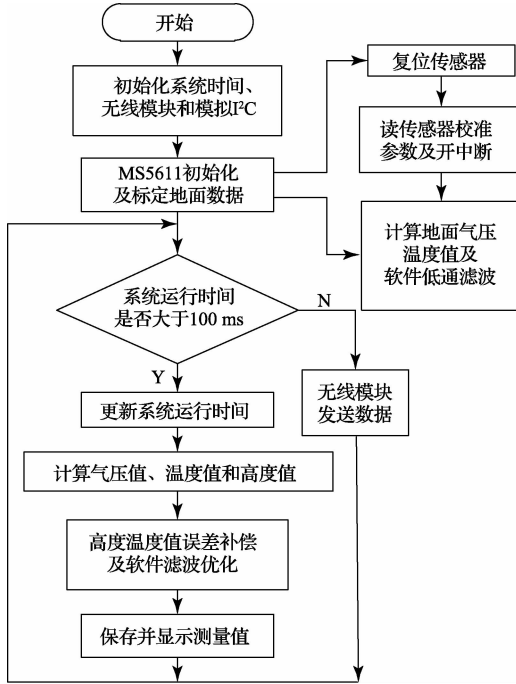


图 2 测量系统主程序流程

程序最开始进行各个辅助功能模块的初始化,最后进行传感器的初始化。MS5611 初始化时首先向传感器发送复位命令,以复位传感器的每个寄存器,然后读取该传感器 PROM 中独有的校准参数,并开启用于读取传感器气压和温度值的中断子程序模块。然后对传感器进行校准,即确定传感器初始化时该位置的地面压强和温度值,并对它们进行低通滤波以保证数据的准确性。随后便是一个循环,每隔 100 ms 读取一次传感器中的气压和温度值并计算出相对应的高度值并滤波,最后保存和显示数据;若时间距离上次循环小于 100 ms,则用无线模块发送保存的数据到地面站。

4.1 相对高度换算

大气压力在数值上等于所在海拔高度往上直到大气上界整个空气柱的质量^[8]。

一般的海拔高度换算参考公式如下所示:

$$Altitude = 44330 \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/5.255} \right] \quad (3)$$

式中: $Altitude$ 为高度,单位为 m; P 为对应于当前高度的大

气压力值; P_0 为标准大气压值^[9]。

因为该公式采用的是标准大气压和标准气压下的温度值,因此在具体的测试环境下并不准确,而应该采用具体测试环境下的气压和温度值进行计算才更加准确^[10]。故该系统采用的是式(2)的换算方法。将式(2)中的常量代入,即为:

$$T = g_T + 273.15$$

$$Alt = 153.8462 \times T \times \{1 - \exp[0.190259 \times \log(P/g_P)]\} \quad (4)$$

式中: g_P 和 g_T 为系统初始化标定时计算出的地面气压和温度值,其中温度需要转换为标准温度 T ; P 为对应高度的压力值; Alt 为系统测得的相对高度。

4.2 软件滤波优化

测量系统共采用了 2 种滤波方式,即去最值滑动平均滤波和低通软件滤波。

气压高度测量的是大气静压,高度测量滤波的实质是气压测量的滤波。程序使用了去最值滑动平均滤波,是为了消除数据的随机误差,即在连续的 n 个测量值中,去除最小值和最大值,用其余的 $n-2$ 个值来求算术平均值,并作为当前测量值。因为高度是由气压换算而来,确保气压值的准确性尤为重要,所以在程序中对气压数据就用了该方法。经实验验证,有效地去除了测量数据中的毛刺。

在系统初始化中有一个标定过程,需要计算出起飞点的地面气压值和温度值,这两个值对后面的高度解算非常重要并且初始化后不能再修改,所以必须保证这两个值尽可能的精确,故采用了软件低通滤波对它们进行优化。滤波方程式为:

$$Q_n = kQ_{n-1} + (1-k)P_n \quad (5)$$

式中: Q_n 为当前输出值; Q_{n-1} 为上次输出值; P_n 为当前输入值; k 为滤波系数 ($0 < k < 1$),它直接影响着数值的稳定性和响应速度^[11]。经过若干组实验数据对比分析,测量系统当 $k = 0.8$ 时能最好地满足数值的稳定性和响应速度。

4.3 中断子程序

测量系统采用中断方式来读取传感器的实时气压和温度数据,以保证高度值解算过程的快速执行和相对高度值的更新速率。中断间隔时间为 100 ms,即每 100 ms 中断一次。由于传感器的温度值的更新速度比压力值慢,所以程序通过状态变量设定每读 1 个温度值,便要等到读完 5 个压力值后才会再去读下 1 个温度值,依次循环。并且每次要读取相应的数据时都要先发送相应的读取命令才行。中断程序的执行过程如图 3 所示。

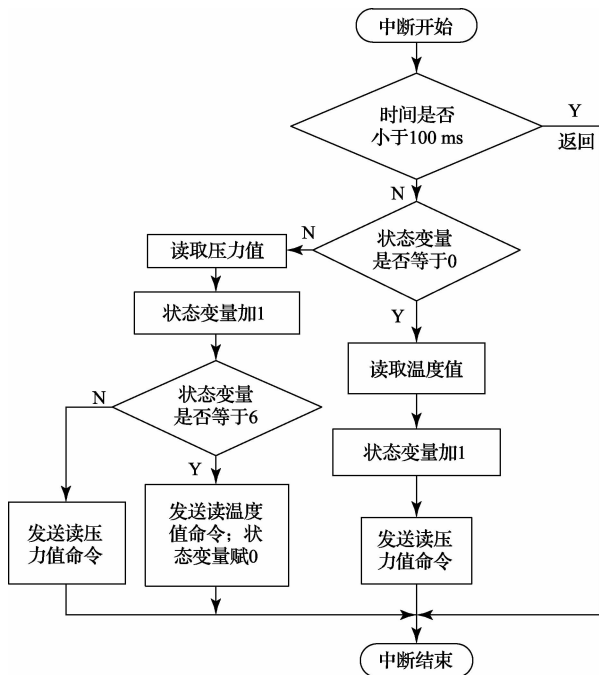


图3 中断子程序流程

5 系统实验结果

本实验采取静态测试的方法,即在传感器处于静止的情况下来采集高度测量数据,以实验该测量系统的稳定性。由于系统测量的是相对高度,所以在理想情况下,高度数据应该趋向于0 m。为了尽可能地获取准确的实验数据,故在传感器工作5 min后再进行数据采集,实验中共记录了3 min的数据,并将气压强度值与相对高度值同时记录在图中。此外,实验时环境温度基本处于17.77~18.06℃。实验数据如图4所示。

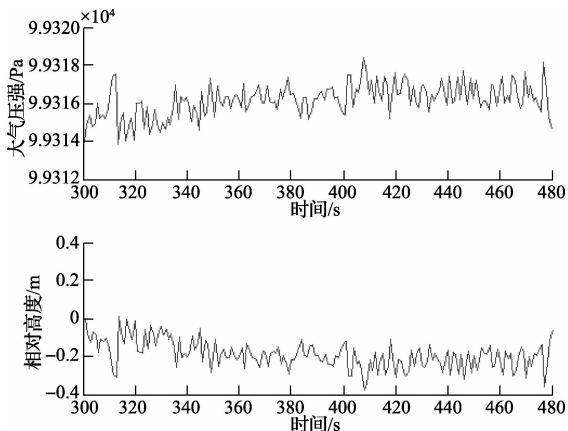


图4 实验结果

从图4中可以看出,相对高度值普遍处于-0.2 m左右,而理想情况下值应该处于0 m附近,所以高度测量系统

还存在一定的偏移量。为了使系统达到更高的精度,故对系统又进行了重新调试,即在程序中每次计算出相对高度值时都在原高度值基础上再加上0.2 m的修正值。重新采集数据,如图5所示。

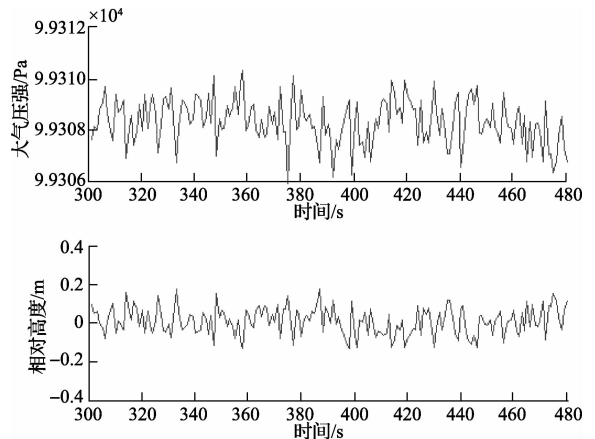


图5 修正后的实验结果

从图5看出相对高度值基本都处于0 m值附近,最大随机误差基本在0.1 m左右。此外,从图中还可看出,压强值与相对高度值基本上是相互对称的,这也验证了高度随着气压强度的增大而减小的规律。因此,可以看出该高度测量系统稳定性良好,能够较好地满足无人机对高度测量的要求。

6 结论

相对于其他的测高方法来说,利用MEMS气压传感器测量高度具有精度高、成本低、响应时间短等优势。采用的测高方法利用温度补偿来设法消除环境带来的影响,并使用了多种滤波方案,从而使测得的相对高度尽量地逼近系统所在位置的实际情况,较好地解决了真实高度和气压高度间存在的差距问题。经实验结果分析,所设计的无人机测高系统精度高、稳定性好,能够满足无人机飞行控制系统对高度测量的实际需要。

参考文献

- [1] 陈庆峰. 通用无人机地面控制站研究与设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 4-8.
- [2] 李艳, 管斌, 王成宾, 等. 电子磁罗盘航向角误差推导及分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1566-1572.
- [3] 郑志霞, 冯勇建. MEMS接触电容式高温压力传感器的温度效应[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1141-1147.
- [4] 刘伟, 王超, 张京娟. 微小型、高精度高度计的设计与实现[J]. 遥测遥控, 2010, 31(4): 56-59.
- [5] 陈勇, 裴海龙, 陈远炫. 基于ARM小型直升机飞控系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2010(2): 329-331.

- [6] 雷金奎,马媚,张小林. 基于 Visual Studio 的无人机地面配置及检测平台设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 84-87.
- [7] 段容霞,崔少辉. 单片机与 GSM 模块通讯技术的研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(1): 79-82.
- [8] 王晖,李小民. 高精度小型无人机气压高度测量系统的设计[J]. 测控技术, 2012, 31(2): 12-15.
- [9] 王俊彩,王福平,侯瑞峰,等. 基于 BMP085 的一种便携式海拔高度测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 123-125.
- [10] 郝振海,黄圣国. 高精度气压高度表的研制[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(1): 134-138.

- [11] 宫晓琳,房建成,盛蔚. 一种 GPS 与高精度气压高度表在线互标定方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 818-821.

作者简介

潘银松, 1963 年出生, 工学博士, 副教授。主要研究方向为半导体光电集成器件及集成化芯片系统(SOC)技术、传感技术及系统和信息获取及处理技术。

E-mail: panys@cqu.edu.cn

刘天刚(通讯作者), 1988 年出生, 工学硕士。主要研究方向为嵌入式系统及虚拟、网路仪器技术。

E-mail: ltg1019@126.com

(上接第 18 页)

- [10] WALUYO A B, ZHU F, TANIAR D, et al. Design and Implementation of a Mobile Broadcast System [C]. Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2014 IEEE 28th International Conference on. IEEE, 2014: 449-456.
- [11] LIANG H, ZHUANG W. Efficient on-demand data service delivery to high-speed trains in cellular/infostation integrated networks[J]. Selected Areas in

Communications, IEEE Journal on, 2012, 30(4): 780-791.

作者简介

朱渊婧, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为物联网等。

E-mail: 352879402@qq.com

(上接第 21 页)

速度不大幅下降, 提高了 Flash 存储资源的利用率, 且降低了缓存资源的占用。适用于多种基于 NAND Flash 的高速数据采集存储的应用场合^[10-11], 是一种可靠的坏块管理实现方案。

参考文献

- [1] 舒双宝,罗家融,薛二兵. 基于 PCI 的托卡马克高速数据采集系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 120-125.
- [2] 刘兆庆,朱雨,乔立岩. 一种高速载荷数据模拟源的设计[J]. 电子测量技术, 2013, 38(8): 115-118.
- [3] 宋鹏飞,王厚军,曾浩. 高速深存储数据采集系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 903-912.
- [4] 赵桦云,张敬帅. 基于 NAND Flash 的数据存储系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012(1): 71-73.
- [5] 宁飞. 大容量存储中 NAND Flash 坏块的管理方法[J]. 电子测试, 2010, 12(12): 64-68.
- [6] 彭兵,步凯,徐欣. NAND Flash 坏块管理研究[J]. 微处理机, 2009, 4(2): 113-115.
- [7] 周军. NAND Flash 的坏块管理设计[J].

Microcontrollers & Embedded Systems, 2010, 9: 15-20.

- [8] 李幼萌,李庆诚,宫晓利. FTL 层的 NAND Flash 坏块管理算法研究与实现[J]. IEEE, Services Science, Management and Engineering, 2010: 254-257.
- [9] 陈佳欣,吉小军. 基于 FPGA 的混合测试系统的高速可靠存储方案[J]. 电子测量技术, 2013, 36(12): 56-59.
- [10] 于成毅,裴东兴,梁志剑. 基于 MSP430 的车载 CAN 总线数据记录仪[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(12): 35-37.
- [11] 李玉峰,韩晓红,刘洋,等. 基于 FPGA 的高速数据采集系统的实现与性能分析[J]. 电子器件, 2012(6): 709-712.

作者简介

乔立岩, 1973 年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为自动测试技术, 智能优化算法和模式分类。

李元亨, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为数据采集技术, 数据存储方法。