

基于 STC8A8K+MS5837 的高精度船舶吃水监测系统的设计

裴 瑜¹, 陆金金¹, 朱金善², 田 园¹

(1. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为提高船舶吃水检测精度, 研制了基于 STC8A8K+MS5837 的高精度船舶吃水监测系统; 该系统利用压力传感器 MS5837 高精度的特点, 并结合液体压强与深度的关系解决船舶吃水测量精度低的问题, 同时单片机 STC8A8K 将吃水数据通过 RS485 总线发送给上位机; 上位机以 Cortex-A9 处理器为核心, 搭载了 Linux 操作系统, 液晶屏上可以显示实时数据, 并且可以通过 USB 接口导出测量数据, 保存数据以供后续研究; 现场实验表明, 该系统具有安装方便、实时性高的优点, 其测量精度可达 0.1 mm。

关键词: 船舶吃水; 压力传感器; 高精度; 实时处理; STC8A8K 单片机

Design of High-precision Ship Draught Monitor Based on STC8A8K+MS5837

PEI Yu¹, LU Jinjin¹, ZHU Jinshan², TIAN Yuan¹

(1. School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of ship draught measurement, a high-precision ship draught monitoring system based on STC8A8K+MS5837 was developed. According to the relationship between liquid pressure and depth, a high-precision pressure sensor MS5837 was applied to solve the problem of low accuracy in this system. Besides, the draught data is transmitted from the microcontroller STC8A8K to the host computer, which can display real-time data on the LCD screen and save the data for subsequent research. Field experiments demonstrate the system's measurement accuracy can reach 0.1 mm with real-time performance, and it can be easily installed on ship.

Keywords: ship draft; pressure sensor; high precision; real-time processing; microcontroller STC8A8K

0 引言

散货是指不加包装的货物, 如煤炭、谷物、矿砂、盐、水泥、河沙等大宗货物。国际海上货物运输中, 由于散货船运量大, 货源充足, 航线固定, 装卸效率高因素, 散货船已成为运输船舶中的主力军。2017 年全球 1 万载重吨以上的船舶, 共计 25 714 艘, 其中干散货船 9 992 艘、占 38.85%^[1]; 2019 年初, 全球干散货船舶总计运力 8.4 亿载重吨, 占货船总计运力的 42.6%^[2]。可见散货船运输在经济发展中的作用日益重要。

随着船舶大型化的发展, 很多散货船在锚地进行驳卸, 有些港口泊位前沿水域流速也较大, 例如, 阿根廷拉普拉塔河、巴拉那河沿岸港口, 孟加拉吉大港等港口的最大流

速可达 7~8 kn; 我国部分港口流速也较大, 如宁波港、舟山港、曹妃甸港等港口的流速可达 4~5 kn^[3]。因此, 流速引起的船体下沉, 致使水尺计重过程中六面吃水的读数大于静水中船体的实际吃水, 从而影响到水尺计重的精度^[4]。

散货船装卸货量需要通过检测船舶吃水变化来计算, 其测量精度是一个重要问题。以 7 万吨级的满载散货船、存在 2 cm 的吃水误差为例, 由船舶吃水值带来的误差就可达 250 吨^[5], 仅这一项误差就达 3.5%, 占许用误差总量 (5%) 的 70%。目前检测船舶吃水通常采用六面水尺观测法、超声波或激光测量距仪得到船舶吃水数据, 但精度都不够高, 如: 水下超声波检测船舶吃水, 测量精度为 2.8 cm^[6]; 基于单波束仰扫回波信号强度处理的船舶吃水检测, 测量精度为 1 cm^[7], 需要将单波束声纳安装在在船

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-01-19。

作者简介: 裴 瑜(1999-), 男, 辽宁阜新人, 大学本科生, 主要从事仪器仪表的开发工作方向的研究。

田 园(1978-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 高级实验师, 主要从事自动化专业实验教学工作方向的研究。

通讯作者: 朱金善(1971-), 男, 江西九江人, 工学博士, 教授, 主要从事航海技术方面的教学方向的研究。

引用格式: 裴 瑜, 陆金金, 朱金善, 等. 基于 STC8A8K+MS5837 的高精度船舶吃水监测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 21-24, 36.

船底部；利用激光测距检测船舶吃水，测量精度为 1.5 mm^[8]；六面水尺观测法是目前比较常用的方法，通过测量人员乘坐小船或攀爬软梯进行读数，这种方法有 3 个主要的局限性：1) 受风浪的影响较大，读数准确度较低；2) 目测吃水较为不便，观测人员要从软梯爬到吃水处读取，既有一定的危险又不准确；3) 速度慢、效率低，不便于持续掌握船舶吃水（下沉量）的动态变化。观测吃水的精度为 1 cm 或 0.6 英寸。并且安装方式过于复杂，需要增加操作，实时性差。

在此背景下，本文提出一种基于高精度压力传感器 MS5837 的船舶吃水监测系统的设计，通过测量压力变化间接检测船舶吃水变化，测量精度可达 0.1 mm。本系统可安装在龙骨板下缘，也可以安装在船舷水尺附近。因后者安装实施较为简单、灵活，故本文也将围绕后者进行说明。

1 系统结构及原理

监测系统原理如图 1 所示，上位机位于甲板上，以 Cortex-A9 处理器为核心，搭载了 Linux 操作系统，并且带有 LCD 触摸屏用于人机交互，同时可以进行数据存储，带有 USB 接口可将数据取出以供后续研究。上位机内置大功率 12 V 锂电池，可供整个系统连续工作 24 小时以上。下位机可安装在龙骨板下缘或船舷水尺附近，包含主板和多种传感器以及固定装置，封装在不同的防水壳体内，通过防水电缆相连。其中，压力传感器是本系统核心；电磁铁和永磁铁将压力传感器固定在船舷上以消除波浪和流对传感器的扰动。

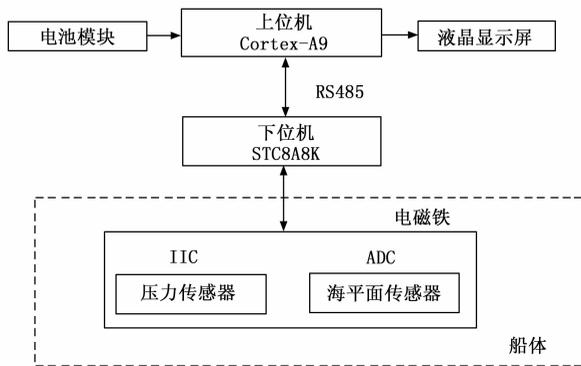


图 1 监测系统原理图

由于大气压强的存在，监测系统中的传感器在海平面的临界点时，水深计算值不为零。因此，在下位机开机后，先读取大气压强 P_0 ，当下位机放入水中后，读取压强 P ，同时结合当地的重力加速度 g 和所测海域的海水密度 ρ ，由公式 $h = \frac{P - P_0}{\rho g}$ 得到调零后的水深。

若将下位机压力传感器安装在龙骨板下缘，则水深测量值 h 即为船舶吃水深度；若将其安装在船舷水尺附近，则需结合下位机压力传感器相对于船体龙骨板下缘的垂直距离 h_{OFF} ，得到船舶吃水深度为“ $h_{\text{DRAFT}} = h + h_{\text{OFF}}$ ”。一般情况下，把下位机压力传感器固定在船舶空载吃水 h_{LIGHT}

(h_{LIGHT} 为船舶空载时水线面与船体龙骨板下缘的垂直距离) 处，则船舶吃水为“ $h_{\text{DRAFT}} = h + h_{\text{LIGHT}}$ ”。

针对本系统的应用场景，可忽略 h_{OFF} ，在装卸货开始前，将压力传感器固定在水面以下 h_1 处，装卸货完成时测得水深为 h_2 ，则吃水变化为“ $\Delta h = h_2 - h_1$ ”。为了方便比较数据，可以将 h_1 设置成固定值，即深度 h 的参考点。此处引入海平面传感器，该传感器到主板之间的电缆长度是 L_1 ，压力传感器到主板之间的电缆长度是 L_2 ，满足 $L_2 > L_1$ ，确保压力传感器位于水面以下。首次测量时，将电缆一端的下位机紧贴着船舷往下放，当海平面传感器的探头接触到海水时，其输出的电压信号会产生突变，此时压力传感器所处深度为 $L_2 - L_1$ ，数值上等于参考点深度 h_1 。由于电缆长度在出厂时已经确定，所以 h_1 的值也确定。

2 吃水监测系统下位机设计

2.1 下位机硬件设计

下位机中的主板是以 STC8A8K 单片机为核心的一块电路板，STC8A8K 其机器周期约是传统 8051 单片机的 1/12，运行速度比后者快约 12 倍，内置 5 个定时器，并且提供了丰富的数字外设，如多路 UART 接口、IIC 和 ADC 接口等。设计的下位机主板通过 I2C 接口来读取 MS5837 的数据，I2C 是一种多向控制总线，多个芯片可以连接到同一总线结构下，同时每个芯片都可以作为实时数据传输的控制源，这种方式简化了信号传输总线接口。此外，通过 ADC 接口来读取海平面传感器输出的电压值；通过 RS485 接口来和上位机通信；通过 STC8A8K 单片机的 2 路数字量 IO 口，经 2 路继电器来控制电磁铁的通断电。下位机经电缆由上位机的 12 V 锂电池供电。STC8A8K 的 UART 接口为 TTL 电平，这里采用两片 MAX485 来进行 TTL 和 RS485 之间的电平转换，从而上下位机之间可以进行较长距离的全双工通信。

下位机主板的模块如图 2 所示。

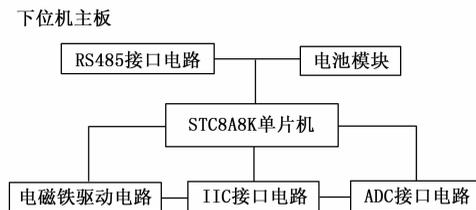


图 2 下位机功能模块图

本监测系统下位机采用两片 MAX485 来进行 TTL 和 RS485 之间的电平转换，一路接单片机的 RXD 引脚，另一路接单片机的 TXD 引脚。此外，单片机使用两路 IO 口来分别使能传输，当 /RE 为逻辑 0 时，芯片工作在接收状态，当 DE 为逻辑 1 时，器件处于发送状态，从而启停数据的传输。

根据不同船舶的吃水深度范围的要求，可选择 MS5837 的不同型号，例如本系统选用的 MS5837-02ba，工作范围可达水下 20 m，精度为 0.01 mbar，这种基于 MEMS 的传

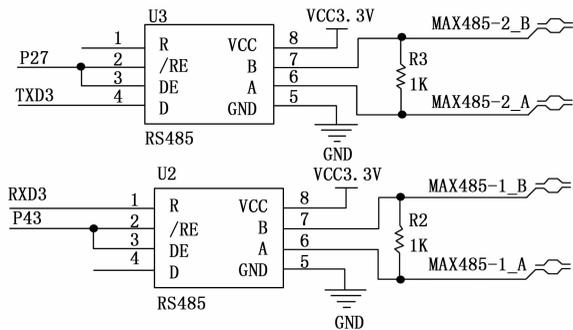


图 3 RS485 工作原理图

传感器包含一个高线性压力传感器, 该传感器具有超低功率 24 位数字输出 (I2C), 可用于高分辨率测量。本系统中, 将 MS5837 焊接在一个直径 2 cm 的圆形电路板上, 用胶密封在一个 316 不锈钢圆柱腔体内, MS5837 的 4 各引脚通过电缆从腔体的另一端引出。海平面传感器是自制的传感器, 图 4 所示, 防水壳的一端固定两根 316 不锈钢钢针, 两根钢针各自连接两根导线, 接到单片机的一路 ADC 口, 该接口另接一个分压电阻至 Vcc, 基于空气和海水的不同导电率, 当钢针从空气进入海水中后, ADC 引脚和 GND 引脚之间的阻抗会产生突变, 从而 ADC 引脚的电压突变 STC8A8K 检测到这个电平的突变立刻通知上位机, 压力传感器 MS5837 已经到达指定的初始位置。

STC8A8K 的两路 IO 口各接一个 MOS 管 M3400, 将电流放大从而驱动继电器, 这也是为了保护单片机避免大电流冲击导致运行不稳定或者损坏, 因为电磁铁的工作电流达 5 A, 通电瞬间会对系统有较大的冲击。

主板上的 STC8A8K、MS5837 等芯片需要 3.3 V 电源供电, 而其它元器件需要 5 V 电源供电, 这里采用金升阳公司的 DC/DC 降压模块 7805L 将 12 V 电平转换成 5 V, 该降压模块效率高达 75% 以上, 体积小, 所需外围器件少, 非常适合移动设备。此外, 采用 AMS1117 将 5 V 转成 3.3 V, 该芯片采用 SOT-23 封装, 输出电压浮动范围在 1% 以内, 其最大可提供 800 mA 的带负载能力, 完全满足主板上 STC8A8K、MS5837 等芯片的供电需求。

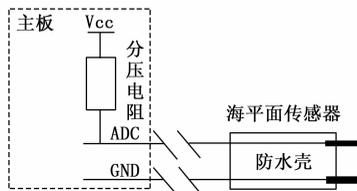


图 4 海平面传感器工作原理图

2.2 上位机和下位机软件设计

上位机采用 QT 进行应用软件开发, 软件设计主要包括人机交互和后台程序设计。Qt 是一个跨平台 C++ 图形用户界面应用程序开发框架, 提供了丰富的类库, 此外, 不同于 Visual Studio, Qt 提供了一种称为 signals/slots 的

安全类型来替代回调, 这使得各个对象之间的协同工作变得十分简单。Qt 对应的集成开发环境为 Qt Creator, 两者共同构成的 Qt SDK, 包含了开发跨平台应用程序所需的全部功能。

从人机交互的角度, 用户可以在 UI 界面上设置采样时间, 点击“start”, 上位机开始读取下位机发送过来的压力、深度、温度信息, 将这些信息显示在 LCD 屏上, 同时也存在上位机本地的数据文件中。点击“stop”后停止通信, 用户可以将 U 盘插入上位机的 USB 接口, 点击操作界面中的“copy”, 即可将数据文件复制到 U 盘中, 以便后续研究。

上位机的 UI 界面功能由 Qt 提供的 QWidget 类来实现, 在 Qt Creator 的开发环境中可以在 QWidget 中方便地添加按钮、文本框等控件类的成员, 设计者可以用少量代码即可实现交互功能。后台程序主要实现串口通信, 放在 QObject 类中实现, 在 QObject 的成员函数 run () 中不断地读取下位机的下位机的信息, 成功读取一帧数据后, 发送 signal 给 QWidget 的 slot 函数, 该函数将读取到的数据显示和存储。

下位机的程序流程如图 5 所示, 首先进行串口、定时器和传感器的初始化, 然后读取大气压强, 接着判断采样时间是否已到, 若否, 就等待, 若是, 则根据接收到的用户设置信息来修改继电器状态和采样时间, 然后读取压强和温度并计算海水深度, 最后将压强、温度和水深等数据发送至上位机。

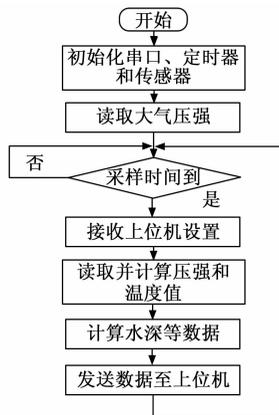


图 5 软件流程图

MS5837-02ba 内部含有压力和温度检测模块, 下位机程序读取压强和温度并结合本系统相关参数计算压力传感器所处位置的水深, 后文简称水深, 以及海水密度等物理量, 然后将所得数据发送给上位机, 并且可以借助大气压强进行水深测量的调零。

下位机给上位机发送数据的时间间隔可由上位机来设置, 后文将此发送间隔称为采样时间, 本系统采样时间最小可以设置为 100 ms。

其中, 读取压强、温度和计算水深是本系统软件设计的重点。本文所提水深以海平面为零, 向下为正方向。

2.2.1 读取数据并计算压强和温度

首先从压力传感器中读取标定数据 $C_1 \sim C_6$, 该数据为

工厂在基准温度为 20 ℃时预设的参数，分别代表压力灵敏度、压力偏移、压力灵敏度温度系数、压力补偿温度系数、基准温度和温度系数。

然后读取当前 MS5837 的压强和温度原始数据 D_1 和 D_2 ，该数据为 24 位二进制数，是不可直接使用的压强和温度数值，需要处理，由：

$$dT = D_2 - C_5 * 2^8 \tag{1}$$

得到当前温度与基准温度的差值，由：

$$TEMP = 2000 + dT * C6/22 \tag{2}$$

得到实际温度 $TEMP$ (℃)。MS5837 输出的压强数据受温度的影响，需要修正，由：

$$OFF = C_2 * 217 + (C_4 * dT)/26 \tag{3}$$

得到温度偏移量，然后结合：

$$SENS = C_1 * 216 + (C_3 * dT)/27 \tag{4}$$

计算温度灵敏度系数，最后由：

$$P_1 = (D_1 * SENS/221 - OFF)/21 \tag{5}$$

得到实际压强 P_1 (mbar)。

当压力传感器所处环境温度高于 20 ℃时， P_1 即为压强真实值；当返回温度低于 20 ℃时，需要修正测量结果，由：

$$T_i = 11 * dT2/235 \tag{6}$$

$$OFF_i = 31 * (TEMP - 2000)2/23 \tag{7}$$

$$SENS_i = 63 * (TEMP - 2000)2/25 \tag{8}$$

$$TEMP_2 = (TEMP - T_i)/100 \tag{9}$$

得到实际温度 $TEMP_2$ (℃)，由：

$$P_2 = (D_1 * SENS_2/221 - OFF_2)/215/100 \tag{10}$$

得到实际压强 P_2 (mbar)。

2.2.2 算法优化

式 (1) ~ (10) 中的变量都是 32 位，而 STC8A8K 的开发环境对变量的支持最大为 32 位。为了避免乘法或加法运算可能导致的数据溢出，现以温度高于 20 ℃的情况为例，可将计算公式 (1)、(3) ~ (5) 合为一式，得到式 (11)：

$$P_1 = (D_1/2^8) * (C_1/2^8)/2^3 - (C_2 * 2^3) + (D_1/2^8) * (C_3/2^8) * (dT/2^8)/2^{18} - (C_4/2^8) * (dT/2^8)/2^4 \tag{11}$$

上式同时节省了运行时间，理论上，依次计算式 (1)、(3) ~ (5) 需要 95 个机器周期，而式 (11) 仅需 63 个机器周期。为作进一步优化，可用移位运算替换乘除运算，将式 (11) 改写为 (12)：

$$P_1 = (D_1 \gg 8) * (C_1 \gg 8) \gg 3 - (C_2 \ll 3) + (D_1 \gg 8) * (C_3 \gg 8) * (dT \gg 8) \gg 18 - (C_4 \gg 8) * (dT \gg 8) \gg 4 \tag{12}$$

由式 (12) 计算得到压强 P_1 仅需 40 个机器周期，这大大节省了运行时间。

2.2.3 计算船舶吃水变化

将下位机安装在船舷水尺附近，测得装货前压力传感器所处位置水深为 h_1 ，装货后所处水深为 h_2 ，由：

$$h = h_2 - h_1 \tag{13}$$

得到吃水变化。

3 上位机与下位机通信

配置下位机串口 3 使其工作在模式 0，此模式一帧信息为 10 位：1 位起始位，8 位数据位，1 位停止位，波特率可变，不使用流控制，无奇偶校验位。使用定时器 3 作为波特率发生器，波特率设置为 115 200。上位机和下位机之间的数据都是 ASCII 码。数据传输格式如表 1、2 所示。

表 1 下位机发送信息的数据格式

字节序号	0	1~4	5	6~9	10	11~12	13
内容	S	采样时间 (秒)	.	采样时间 (ms)	,	电磁铁组状态	#

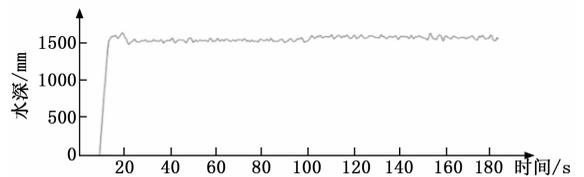
表 2 上位机发送信息的数据格式

字节序号	0	1~4	5	6~9	10	11~14	15	16~19	20	21~24	25
内容	S	压力 (整数位)	.	压力 (小数位)	,	温度	,	深度	,	海水密度	#

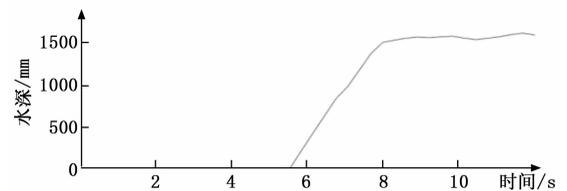
4 应用实例

为了检验本文设计的吃水监测系统的效果，我们在停靠于大连港的系泊船“育鲲”轮上进行了实测。工作人员将下位机和传感器沿着船舷放到海平面，当传感器接触到海平面时，会返回给上位机信号，此时点击上位机触摸屏上的开始按钮，则监测系统开始正常运行。之后将传感器继续向下，放到海平面以下几十厘米处，将电磁铁贴在船体，系统正常工作，上位机实时显示此时的水深信息。

图 6 (a) 为“育鲲”轮外舷船中吃水实测数据曲线。在 0 s 时，将本系统的下位机沿着船舷缓慢向下移动 9 s 左右下位机的压力传感器到达海平面临界面并继续向下移动，12 s 左右到达指定位置，13 s 时，下位机压力传感器稳定。将图 6 (a) 中 0~13 s 的曲线细节放大，如图 6 (b)，是下位机压力传感器从开始工作到达到指定位置时的水深变化曲线。



(a) 水深测量曲线



(b) 水深测量曲线

图 6 水深测量数据曲线