

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.006

# 发动机热膜式空气流量计设计与试验研究

董良雄<sup>1</sup>, 肖金赫<sup>2</sup>, 朱发新<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋学院 港航学院, 浙江 舟山 316022; 2. 中国船级社 武汉分社, 湖北 武汉 430022)

**摘要:** 针对目前国内船用双燃料发动机空气流量计设计较少以及模拟电路设计方案难以适用的问题,对流量计控制电路存在的缺陷以及非线性误差进行了研究,设计了一种基于MC9S08QD4单片机的发动机热膜式空气流量计。在充分利用芯片内部的硬件资源基础上,开发了热膜传感单元输出模拟信号采集、模/数转化以及流量信号输出控制等电路。同时,针对流量信号存在对环境温度交叉敏感等问题,采取了基于查表的自动标定方法和基于多项式拟合的误差补偿方法。对该设计进行了与标准流量计的性能对比试验和发动机不同工况下的性能对比试验。试验结果表明,该设计能有效减小的非线性误差影响以及减少工况变化对测量精度的影响,有利于实现空气流量计的自动化和智能化。

**关键词:** 空气流量计; 非线性误差; 自动标定; 误差补偿

**中图分类号:** TH814; TP216; **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)10-1262-04

## Design and experimental study of hot-film air flow meter on engine

DONG Liang-xiong<sup>1</sup>, XIAO Jin-he<sup>2</sup>, ZHU Fa-xin<sup>1</sup>

(1. Maritime School of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Wuhan Branch of China Classification Society, Wuhan 430022, China)

**Abstract:** Aiming at less original design and the problems that the analog circuit design are not applicable to hot-film air flow meter (AFM) of dual fuel marine engine in China. A kind of hot-film air flow meter based on MC9S08QD4 microcontroller was designed by studying the nonlinearity error of AFM and defects of analog circuit. On the basis of fully utilizing hardware resources, the microcontroller acts as the central controller and performs the signal processing and control of the meter. In allusion to the cross-sensitivity of ambient temperature, a error compensation method of air flow meter based on polynomial regression analysis was presented and automatic calibration based on Look-up Table for nonlinearity were introduced. The performance comparative tests were done within engine different working conditions. The test result indicate that the design can reduces nonlinearity error and the influence of the change of engine operation points, that is helpful to realize automation and intelligent of air flow meter.

**Key words:** hot-film air flow meter (AFM); nonlinearity error; automatic calibration; error compensation

## 0 引 言

空气流量计(AFM)一般安装在空气滤清器和节气门体之间,用来测量吸入发动机中的空气量的多少,作为确定燃油喷射量的主要参数,对保证发动机的正常运转、提高燃油经济性起到至关重要的作用。热膜式空气流量计的功能是建立在热平衡原理基础上,采用硅膜或者其他材料制造热膜,配合相应电路

板实现空气流量到电压信号的转换。长期以来空气质量流量计的知识产权和专利技术一直掌握在国外某些大型汽车零部件制造商手中,国内热膜式空气流量计产品仍然以模拟输出型为主,相关文献也主要以模拟流量计分析、新型电路设计等为主。

热膜式空气流量计具有很明显的非线性特性而容易导致输出误差,针对这种动态特性的非线性问题,目前大多仅从机理上研究和证明,尚未提出过相应的解决思路。XU Ke-jun等<sup>[1]</sup>提出以综合信息方法

收稿日期: 2014-05-13

作者简介: 董良雄(1974-),男,湖北武汉人,讲师,主要从事电气测试及自动化技术方面的研究。E-mail: dongliangxiong@163.com

分析了空气流量传感器在不同进气量下的特性,用于进气量的控制;王肖芬<sup>[2]</sup>用时变自回归滑动平均RMA均模型描述AFM传感器的动态非线性特性,预测传感器的响应,但这些方法计算复杂,难以实现,也不利于传感器的动态校正。美国专利<sup>[3]</sup>采用电控单元中的查表式算法,对于特定的传感器应用提供一种线性校正方法,但改进思路是在发动机控制算法上进行控制,对于不同传感器,其效果并不能得以很好地体现,而且不易实现通用化和产品化。

本研究针对上述问题进行某船舶双燃料发动机使用的空气流量计的优化设计,由于使用环境对传感器结构布置的特殊要求,模拟信号直接传送较为困难而且影响传送精度,因此笔者采用微处理器与热膜传感单元接合的数字输出型设计。

## 1 系统硬件电路设计

传感器主要组成包括惠斯登电桥电路、电桥自动平衡电路、功率放大电路、微处理器电路(含A/D转换)、D/A转换电路以及信号输出电路等,智能空气流量计电路结构框图如图1所示。

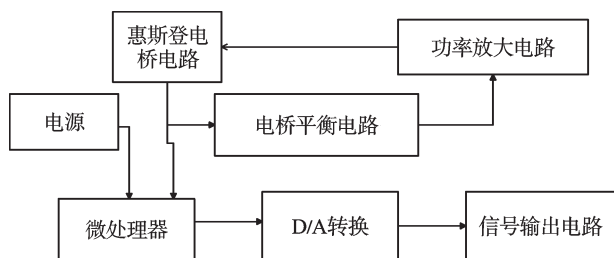


图1 智能空气流量计电路结构框图

主体电路采用了反馈电路,工作时,当热膜电阻与空气之间的热交换发生变化时,热膜温度发生改变,引起热膜电阻值发生相应的变化,并且空气质量流量越大,被带走的热量也就越多,其电阻值减小越多。因此电路中输入到运算放大器的电压也随之而变,由于输入到运算放大器的电压变化将引起反馈放大器电压发生改变,结果通过热膜的电流随之改变,直到热膜的温度恢复原值,惠斯登重新恢复平衡。这时供给电桥的电压已经发生了变化,因此电桥电压的变化能反映空气的流量的变化,这个桥路电压作为测量空气流量的电信号引入带有A/D转换功能的微处理器电路进行处理,将电桥输出电压信号转换为数字信号,然后经过线性化处理后,输出电压信号,成为输出信号供ECU作为判断信号使用。

### 1.1 微处理器的选择

本研究选用Freescle的MC9S08QD4汽车级芯片

作流量计的微处理器,主要基于如下原因:

(1) 芯片内含8位A/D转换器,能满足发动机控制精度要求。该设计所适用的发动机进行空燃比计算时,若采用双区或多区燃烧模型对燃烧过程进行循环计算,准确性高但计算量大,所以只用作离线计算,而在实际运行时笔者采用对实验数据的拟合数学模型进行计算,因此选择与其运算与处理要求相适应的处理器。

(2) 作为一种经济型微处理器,其内含HCS08系列内核、时钟以及总线接口与流量计的需求接口和功能相适应。可大大减小系统设计的外围接口,同时不至于引起处理器接口的浪费<sup>[4]</sup>。

(3) 该芯片具有应用于汽车的背景而且体积非常小,能耐受并适应流量计的特殊使用环境。

### 1.2 微处理器与信号输出电路

微处理器与信号输出电路如图2所示,经过第一级差动放大器的电桥输出信号被输入到微处理器的两个A/D转换接口。微处理器对信号进行计算和处理后输出给D/A转换器。D/A转换器按照时序将数字量改变为模拟量,与其相连的运算放大器对来自D/A转换器的电压信号进行放大产生一定大小的电流输出,利于保证流量计与ECU之间信号传输的健壮性。

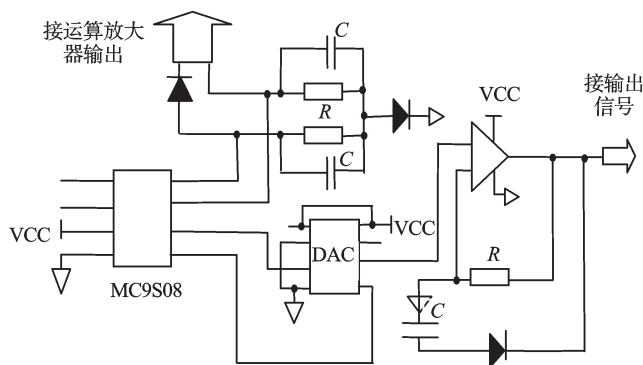


图2 微处理器以及信号输出外围电路

### 1.3 电桥自动平衡电路

电桥自动平衡电路如图3所示,当热膜电阻与空气之间的热交换发生变化时,热膜温度发生改变,引起热膜电阻值发生相应的变化。此时电桥不再处于平衡状态,输出电压也改变。改变后的电压经过运算放大器的多级放大后控制电桥的输入电压,使通过热膜电阻的电流随着变化,直到热膜的温度恢复原值,惠斯登重新恢复平衡。这时电桥输出电压与通过热膜电阻的流体质量流量相关,通过测量电桥输出电压,可经换算得出空气的质量流量。

电桥自动平衡电路的输出电压信号进入功率放大电路,由其变为电流信号供给惠斯登电桥的输入

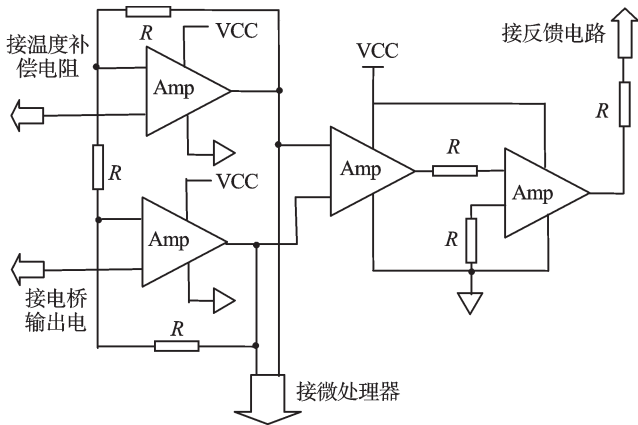


图3 电桥自动平衡电路

端。由于输入信号含同相电压,第一级采用差动放大,以提高抗共模干扰能力。为了提高电桥输出端的增益,输出端的电压采用了多级放大的方式,通过配合不同反馈电阻值,可以调节输出端的电压增益的大小。

## 2 系统自动标定

空气质量流量计整个电路装在管道中,受环境温度影响较大,空气的热传导、密度、粘性以及空气与热膜电阻之间的温差都与空气温度紧密相关,空气温度的改变必然会导致流量计输出信号的改变,所以空气质量流量计要进行标定<sup>[5]</sup>。

系统将流量计电桥电压与流量之间的标准对应关系建立对应表格,找出流量计固有误差与输出值之间的关系,进而实现自动标定。在流量计的数据库中,预先存放了标准流量计不同测试点的电压值、流量值以及相邻两个测试点之间直线斜率,数据按每3个为一组的形式储存起来。标定时,流量计输出电压信号经过微处理器的A/D转换后,将该值与存储单元中的电压值进行多次重复比较,直到被调用的测试点的数值超过传感器的实际输出值并与之最为接近,依此读出标准流量以及相邻两测试点的斜率,并以此计算流量计的输出值,具体实现程序如图4所示。

标定后的空气质量流量计的实时电压、实时流量即可根据标定对应关系进行修正后输出,而且不受空气密度影响,所以在海拔高的地区通用也无需另作标定。

## 3 输出信号误差与矫正

电路中使用的运算放大器具有低漂移、高增益特性,元件参数不可能绝对对称,会产生失调电压且其大小与环境温度有关。另一方面,环境温度的变化也会影响热膜电阻的热耗散率,进而影响传感器的输出电压,因而电路中设有温度补偿电阻来补偿因电阻加

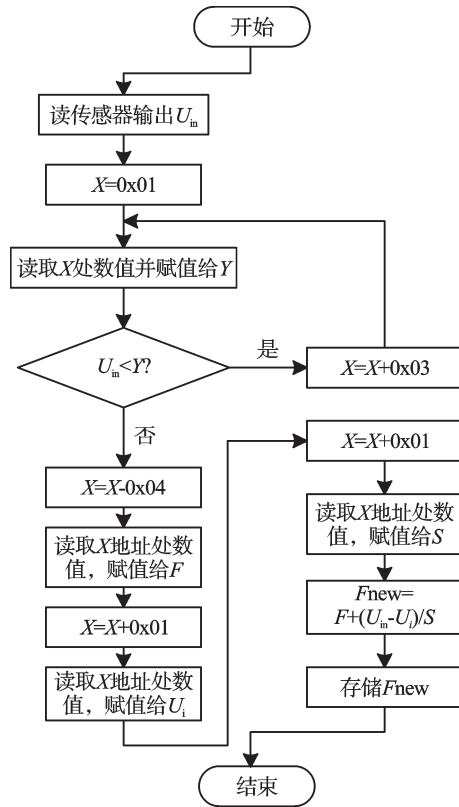


图4 自动标定程序流程示意图

工等原因而引起的固有误差<sup>[6]</sup>。温度补偿电阻加工精度要求很高,加工误差也会影响到补偿电阻处的电压值,而且由于电阻热敏系数具有非一致性,存在对温度的交叉敏感,使该电压还与环境温度、空气流速都有关系,空气流量存在因工况不一致引入的误差<sup>[7-8]</sup>。

为了在程序中矫正上述非线性误差,本研究将电桥中温度补偿电阻处的电压值引入微处理器,根据标准流量计在实际工况下的测试结果计算测量偏差,找出系统因补偿电阻引起的固有误差与流量计输出之间的关系,进而对流量计的输出值进行误差补偿,设  $x_i$  为温度补偿电阻电压值,令误差补偿  $f(x)$  用多项式表示为:

$$f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \tag{1}$$

设  $y_i$  为流量计实际工况下的测量偏差,因此,误差补偿值要使式(2,3)中的偏差  $e$  的平方和  $E$  为最小:

$$e_i = f(x) - y_i, i = 1, 2, \dots, 5 \tag{2}$$

$$E = \sum_{i=1}^5 e_i^2 = \sum_{i=1}^5 [f(x_i) - y_i]^2 \tag{3}$$

根据极值理论,要使  $E$  达到最小,必须使:

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0, i = 1, 2, \dots, 5 \tag{4}$$

根据上式可建立方程组,通过解方程组可得各阶多项式系数,从而求得多项式拟合曲线。对流量计进行多项式误差补偿后,即可使流量计测量精度控制在允许范围内。而且对于不同管径、不同流量范围的空



气质量流量计,无需进行硬件上的改动,而是直接通过对微处理器的运算程序以及查表数据进行改动就可以改变误差补偿值,使流量计在硬件性能变化或工况改变时保持原有精度。

## 4 测试结果与分析

该流量计设计精度为1%,量程为0~500 kg/h,为了对空气流量计的综合性能进行分析,对空气流量计的测试分为静态测试和动态测试两部分进行。静态性能测试是使流量计通过一定流量的空气并使空气流量平稳的变化,测量传感器的输出与真实值之间的关系即电压流量关系,测得的流量计与标准流量计电压流量曲线关系如图5所示。

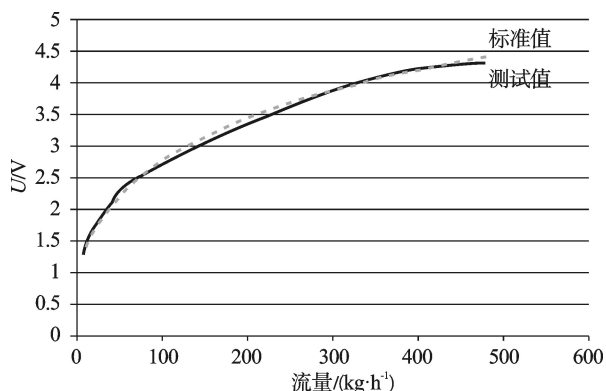


图5 流量计输出特性图

被测流量计静态性能曲线和标准流量计测得曲线最大差值在0.2 V以内;动态测试通过流量计的空气流量发生突变时流量计的响应时间来描述<sup>[9]</sup>,实际测量值为10 ms。综合结果表明了性能符合要求。

本研究对该空气流量计进行温度对比试验,热膜电阻设计在工作温度下(95 ℃)电阻值为5 Ω。笔者取两臂电阻之比为1:300,在相同空气流量条件下选温度80 ℃,与20 ℃时的电压误差进行比较,得到不同流量下的误差值的变化曲线如图6所示。图6中,之所以在小流量范围内误差较大,是由于流体特性和热辐射所造成的<sup>[10]</sup>,而系统在一定流量范围内可以达到误差总和最小,从而保证所需的精度范围。

## 5 结束语

本研究结合双燃料船舶为发动机设计热膜式空气流量计,用微控制器与运算放大器、功率放大器以

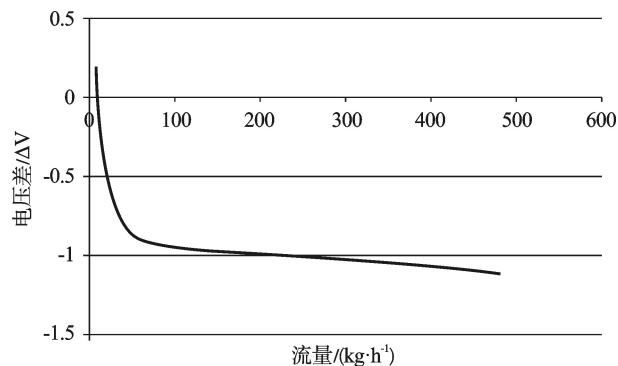


图6 温度对比误差变化图

及信号输出电路等硬件结构实现了流量计的使用可靠性。笔者采用查表方法对信号进行处理,实现了流量计自动标定和校准功能。针对传感器的非线性误差,本研究充分利用处理器片内硬件资源进行误差补偿,保证了流量计的输出精度,其精度也可以在微处理器中的程序中改动。测试结果表明,流量计响应迅速、测量精度高,整体设计具有一定的实用价值。

## 参考文献 (References):

- [1] XU Ke-jun, ZHANG Jin, WANG Xiao-fen. Improvements of nonlinear dynamic modeling of hot film MAF sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(1): 34-40.
- [2] 王肖芬. 流量传感器信号建模、信号处理及系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学电气与自动化工程学院, 2007.
- [3] HAROLD E W, SHIREY B G. Mass air flow engine control system with mass air event integrator: US, 4986243A [P]. 1990-01-19[1991-01-22].
- [4] 山海峰, 刘 涵, 郭吉丰. 基于PLC的汽车电子燃油泵性能检测系统[J]. *机电工程*, 2013, 30(7): 793-797.
- [5] 屈 敏, 蔡伟义. 基于微硅片的新型车用热膜式空气流量计[J]. *汽车电器*, 2007(5): 42-44.
- [6] 黄修铜, 王婷旺, 杨文涛, 等. 基于PIC单片机的热膜式空气流量计设计[J]. *技术与应用*, 2013, 19(11): 15-19.
- [7] 周景宇, 文桂林, 张邦基. 车用热膜式空气流量计分析与设计[J]. *机械设计与制造*, 2012(7): 12-14.
- [8] MALCZYNSKI G W, SCHROEDER T. An Ion- Drag Air Mass- Flow Sensor for Automotive Applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, 28(2): 304-309.
- [9] 洪俊美, 暨仲明. 发动机综合测试控制系统的研制[J]. *机电工程*, 2009, 26(10): 65-73.
- [10] 刘逢春, 张 俊, 朱锐锋, 等. 台架使用中的热膜式空气流量计修正方法研究[J]. *柴油机*, 2014, 36(1): 53-56.

[编辑:张 豪]

### 本文引用格式:

董良雄,肖金赫,朱发新. 智发动机热膜式空气流量计设计与试验研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(10): 1262-1265.

DONG Liang-xiong, XIAO Jin-he, ZHU Fa-xin. Design and experimental study of hot-film air flow meter on engine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(10): 1262-1265.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>