

热膜式空气质量流量微型传感器的自诊断

李礼夫, 张大杰

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

[摘要] 以微硅片传感器件为对象,研究汽车进气的热膜式空气质量流量微型传感器的自诊断原理及其实现方法. 该方法根据内燃机中的热量传递和空气质量流量测量的基本原理,设计了基于自诊断的热膜式空气质量流量微型传感器,该传感器由基于 Heraeus 微硅片的加热传感单元与温度传感单元、信号处理与转换器、加热器、加热控制器和微型计算机组成. 针对该传感器结构和空气在传感器中的强制对流方式,从理论与仿真实验两方面,推导出在一定的发动机工况下,加热器的热流量与空气质量流量的关系,获取了加热器表面温度、加热器上流区域的温度和其下流区域的温度随发动机工况变化而改变的关系,并以此来对该微型传感器进行故障的自诊断,理论与仿真实验表明,该方法具有可行和实用的特点.

[关键词] 空气质量流量测量; 热膜式传感器; 微型传感器; 故障自诊断

[中图分类号] TP212.12; TH814 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9965(2009)05-0483-04

Self diagnosis for hot film mass airflow microsensor

LI Li-fu, ZHANG Da-jie

(College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

[Abstract] The self-diagnosis method on hot film mass airflow microsensor has been developed for vehicle intake air in the paper. Based on the theory of heat transfer and mass airflow rate measurement for internal combustion engine, first, a hot film mass airflow microsensor on self-diagnosis is designed. It is composed of heat sensing unit, temperature sensing unit with Heraeus silicon, signal processor and converters, heater, heating controller and computer. The temperature sensing unit is separated into heater upstream temperature sensor resistor and heater downstream temperature sensor resistor according to intake air flow direction. Then, from both theory and experiments, the relation between the heat transfer rate of heater and the mass airflow rate on intake air are deduced in a certain engine working condition, and the temperature distributing rules in heater surface, heater upstream and heater downstream are obtained. These relations rules are regarded as the reference models of self-diagnosis in the microsensor. Finally, the failure of microsensor can be detected to compare the real-time measurement model with the reference one. Thus, this method can not only measure mass airflow rate in real time, but also inspect diagnosis fault by heat sensing unit and temperature sensing unit automatically.

[Key words] mass airflow rate measurement; hot film mass airflow sensor; microsensor; self-diagnosis

[收稿日期] 2008-12-19

[基金项目] 广东省电动汽车研究重点实验室开放基金项目(2007A03005)

[作者简介] 李礼夫(1955-),男,教授,博士,研究方向:车辆性能测试与分析技术. 电话:0086 020 87113658, E-mail: pmlfi@scut.edu.cn.

空气质量流量传感器是汽车电控汽油喷射发动机的关键部位之一,其工作性能与发动机的动力性、燃料经济性和排放性有着直接联系^[1]。由于热膜式空气质量流量传感器能适应空气压缩性大、黏度小、系统非线性等特点^[2-3],直接测定空气质量流量,具有体积小、测量精度高、受气流脉动、回流和进气温度变化干扰小等优点,使其在现代汽车发动机上得到广泛应用。然而,在空气污染指数(API-Air Pollution Index)较高的行驶环境下,常常因为其温度传感单元被空气中的氧化物和悬浮颗粒物污染,出现热膜式空气质量流量传感器分辨率与灵敏度下降,甚至错误计量,造成电控汽油喷射发动机不能正常工作,汽车动力、排放性能变差等严重问题,为此,本实验根据内燃机中的热量传递和空气质量流量测量的基本原理,研究基于自诊断的热膜式空气质量流量微型传感器(简称SDHFM)工作原理及其方法,解决运行过程中的空气质量流量传感器的故障诊断问题。

1 基本原理

基于自诊断的热膜式空气质量流量微型传感器的工作原理见图1,它是由基于Heraeus微硅片的加热传感单元与温度传感单元、信号处理与转换器、加热器、加热控制器和微型计算机组成。

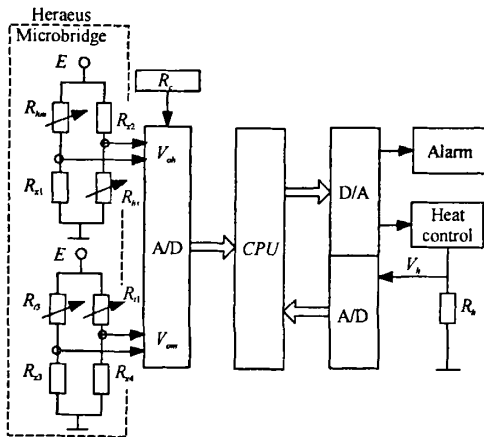


图1 基于自诊断的热膜式空气质量流量微型传感器原理图

其中,加热传感单元由铂质电阻器 R_{hm} 、 R_h 、电阻 R_1 和 R_2 所组成,它用于测量加热器 R_h 的表面温度;温度传感单元由铂质电阻器 R_1 、 R_3 和电阻 R_3 、 R_4 所组成,其任务是测量加热器 R_h 上流区域的温度 T_{u1} 与其下流区域的温度 T_{s3} 之差,电阻器 R_{u1} 、 R_{s3} 和加热器 R_h 按空气流动的方向放置,其相互关系见

图2所示,即 R_{u1} 、 R_{s3} 被对称分布在距离加热器 R_h 为 L_u 的两侧,主要用来分别测量加热器的上流区域的温度 T_{u1} 和下流区域的温度 T_{s3} 。

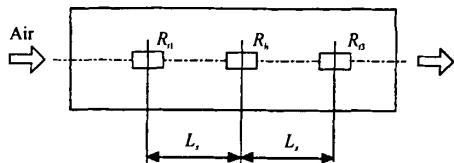


图2 温度传感电阻 R_{u1} 、 R_{s3} 和加热电阻 R_h 位置分布图

信号处理与转换器包括信号调理电路、A/D和D/A转换电路等,其作用是对所有传感单元的信号进行处理和转换;加热器 R_h 用于加热测量区域的温度;空气温度由电阻器 R_e 来测量;加热器 R_h 上的电压信号将通过相应的信号调理与转换电路进入计算机。当利用SDHFM测量空气质量流量时,微型计算机将对经过信号调理与转换的各传感单元的信号进行分析,从中得出当前气体质量流量和各区域的温度变化状况,根据给定加热器的温度值和传感器出厂标定曲线,对传感器的工作状况进行诊断,其诊断结果将通过D/A转换接口以指令方式分别向加热控制器和声光报警器发出,以此来控制加热器的电压变化和报警器的报警,即告知操作人员当前传感器工作正常与否。

自诊断的工作原理是,在SDHFM开始以强制对流方式工作时^[4],由传热学可知^[5],加热电阻器在单位时间里散热量 Φ 与加热器表面温度 T_h 、空气温度 T_c 之差成正比,其关系可表示:

$$\Phi = hA(T_h - T_c) \quad (1)$$

式中, h 是加热器表面传热系数, A 是加热器的表面积,而 h 与雷诺数 Re 、普朗特数 Pr 、努塞尔数 Nu 之间有下列关系:

$$h = \frac{\lambda Nu (Re^n \cdot Pr^m)}{l} = \frac{\lambda Nu [\rho u l / \mu]^n \cdot (c_p u / \mu)^m}{l} \quad (2)$$

式中, λ 为空气的导热系数; μ 是空气的黏性系数; ρ 为空气的密度; u 为空气流速; c_p 为空气的比热容; l 为加热器的代表性尺寸。 m 与 n 为常数,其值与空气的性质及雷诺数有关。定义质量流量 Q_M 为:

$$Q_M = \rho u S \quad (3)$$

式中, S 为传感器测量管路的截面积,当将式(2)和(3)代入式(1),可得:

$$\Phi = B \lambda^{1-m} \mu^{m-n} c_p^n (T_h - T_c) Q_M^n = BK_T (T_h - T_c) Q_M^n \quad (4)$$

式中, $K_T = \lambda^{1-m} \mu^{m-n} c_p^m$, B 为常数, $K = BK_T$, 它受温度的影响可由恒温差电路来补偿。如果传感器处于热平衡状态时的加热器的电压为 V_h , 加热器的电阻值为 R_h , 则在加热器的散热量 Φ 与其发热量 V_h^2/R_h 相等的条件下, 可以推出空气质量流量 Q_m 与加热器电压 V_h 之间的关系为:

$$Q_m = \left(\frac{V_h^2 \nu^n \lambda^m}{R_h c_p^m \nu^m \lambda K (T_h - T_c)} \right)^{1/n} \quad (5)$$

同时, 由图1中的加热传感单元的桥式电路, 可算出其输出电压 $V_{oh}^{[6]}$:

$$V_{oh} = E \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta R_{hm}}{R_{hm}} \right) \quad (6)$$

式中, n 为常数, 代表桥臂比, 而 $\Delta R_{hm} = \alpha T_{hm}$, α 为电阻的温度系数, T_{hm} 为电阻 R_{hm} 表面上温度, 其值与加热器的温度 T_h 之间关系可通过对传感器标定获得^[7], 即通过测量 T_{hm} 值可获得 T_h 值。因此, 通过传感器可得到加热器温度 T_h 、加热器电压 V_h 和空气温度 T_c , 如果将它们和各个常数代入式(5)中, 就可计算出热平衡状态下的质量流量 Q_m 。同理, 由图1的温度传感单元的桥式电路可计算其输出电压 V_{om} , 其表达式为:

$$V_{om} = E \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta R_{\delta} - \Delta R_{\delta 1}}{R_{\delta}} \right) = E \frac{n\alpha}{(n+1)R_{\delta}} (T_{\delta} - T_{\delta 1}) \quad (7)$$

如果 SDHFM 处于热平衡状态时, 由于 $R_{\delta 1}$ 、 R_{δ} 处于加热器的对称位置 L_s 上, 因此, $T_{\delta} = T_{\delta 1}$, $V_{om} = 0$ 。当空气流量随发动机工况变化时, 如空气流量增大, SDHFM 将处于非热平衡的状态, 加热器的温度 T_h 、加热器上流区域的温度 $T_{\delta 1}$ 和下流区域的温度 T_{δ} 将随着空气流量的变化而改变, 但空气质量流量 Q_m' 和 T_h 仍可通过可测量 T_{hm} 、 V_h 、空气温度 T_c 和计算式(5)的方法来获得, 同时, 由式(1)还可推出加热器表面的动态传热系数 h' 的表达式, 即

$$h' = \frac{V_h^2}{R_h A (T_h - T_c)} \quad (8)$$

如果通过 h' 与空气流速 u' 之间标定关系^[5], 还可得到实际 u' 值。为了获得动态的 T_{δ} 和 $T_{\delta 1}$, 根据被加热空气单位时间内吸收热量 Φ_L 与加热器散失热量 Φ 相等原理, 可推出下式:

$$G c_p (T_{\delta} - T_{\delta 1}) = A h' (T_h - (T_{\delta} + T_{\delta 1})/2) \quad (9)$$

其中, G 为空气流量, 其值为 $G = \rho u' \pi d/4$ 。因此, 在测得 $T_{\delta} - T_{\delta 1}$ 的基础上, 联立求解式(7)和式(9), 就可解出 T_{δ} 和 $T_{\delta 1}$, 其中 T_{δ} 的表达式为:

$$T_{\delta}' = \frac{A h (2 T_h - T_{\delta 1}') + 2 G c_p T_{\delta 1}'}{A h + 2 G c_p} \quad (10)$$

在获得了 T_h' 、 T_{δ} 和 $T_{\delta 1}$ 的基础上, 就可对传感器中的加热器 R_h 、温度传感电阻 $R_{\delta 1}$ 和 R_{δ} 进行诊断。其方法是, 首先通过可测量 V_h' 、 T_{hm}' 、 T_c' 和 V_{oh}' 值, 按式(6)计算出加热器温度值 T_h' , 如果将其与给定加热器温度值 T_{hs} 相比, 如两者之间的差值超过所规定的范围, 则表示加热器可能出现故障。否则, 继续检测, 即综合利用可测量 V_h' 、 T_c' 、 V_{oh}' 和 V_{om}' , 按式(7)~(9)计算出实际的 T_{δ}' 和 $T_{\delta 1}'$, 将这些值与传感器出厂标定曲线相比较, 如果它们其中某个值所产生的偏差较大, 则说明该值对应的电阻器出现了故障。当某个器件(加热器电阻、上、下流电阻器等)出现故障时, 计算机都会通过声光报警信号反馈到操作面板上, 进而保证了 SDHFM 的可靠工作。

2 实验

以常用汽车空气质量流量传感器的性能参数为指标^[8], 即流速测量范围为 $0 \sim 94$ m/s、空气进气质量流量为 $2 \sim 10$ g/s、传感器输出为信号电压 $0 \sim 5$ V 等, 采用计算机数学软件 MATHCAD 对 SDHFM 进行了空气质量流量传感器的计量和自诊断仿真实验。经实验获取了不同进气流速 u 的条件下的加热器电压 V_h 与进气质量流量 Q_m 之间的相互关系, 如图3所示。

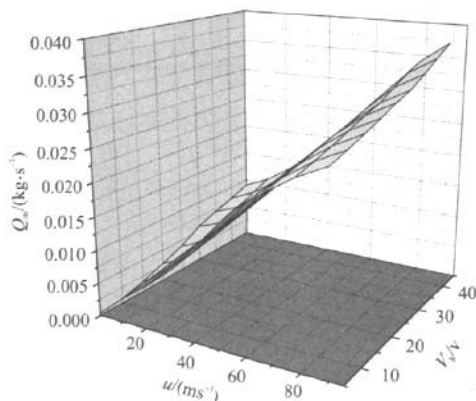


图3 进气流速 u 、加热器电压 V_h 与进气质量流量 Q_m 之间的关系图

由图可知, 进气流速 u 与进气质量流量 Q_m 具有 $Q_m(u) = -1.657 \times 10^{-5} + 4.372 \times 10^{-4} \times u$ 的线性关系, 而进气流速 u 与加热器电压 V_h 之间呈 $V_h(u) = 12.56 + 0.678u - 0.0033u^2$ 二次曲线关系。通过分析还获得了加热器的上流区域温度与下流区

域温度之间的差 $\Delta T = T_{\delta} - T_{\text{上}}$ 与 u 的关系,如图4所示。

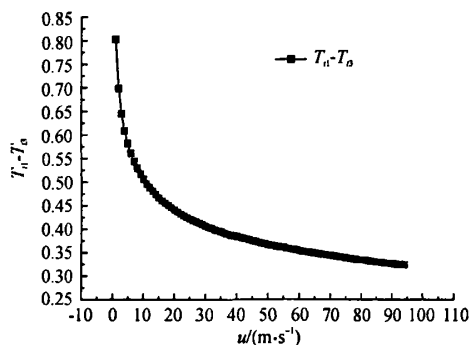


图4 $\Delta T = T_{\delta} - T_{\text{上}}$ 与进气流速 u 变化的关系

从图可知, ΔT 与 u 呈 $\Delta T(u) = 0.346e^{-\frac{u}{25}} + 0.243e^{-\frac{u}{31.04}} + 0.3165$ 的指数函数关系, u 值较小时, ΔT 值较大,随着 u 值增大, ΔT 值变小。在此基础上,通过计算式(7)和式(9)可以得出加热器的下流区域温度 T_{δ} 、上流区域温度 $T_{\text{上}}$ 随进气流速 u 变化关系,如图5所示。

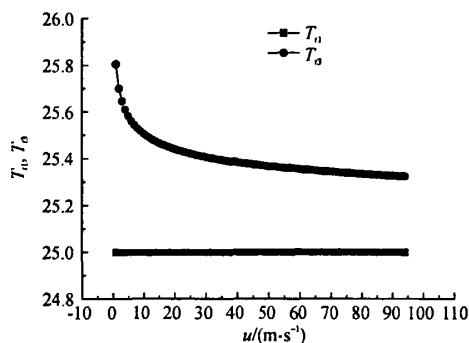


图5 下流区域温度 T_{δ} 和上流区域温度 $T_{\text{上}}$ 随进气流速 u 变化关系

上述这些关系及其曲线都可以作为 SDHFM 自诊断的参考量,即通过实时测量和计算而得到的 $\Delta T'$, T'_{δ} , $T'_{\text{上}}$, T_h 等是 SDHFM 自诊断的关键测量值,当利用计算机将它们与对应的参考值(如图4和图5所示)相比较时,就能正确地判断出 SDHFM 的工作状态,如果其实际测量值 $\Delta T'$, T'_{δ} , $T'_{\text{上}}$, T_h 不具有图4和图5所示的随 u 逐渐变小的趋势,或具有相

似趋势但其值与参考值相差甚远时,SDHFM 将会做出传感器工作不正常的报警,并显示其故障点,从而能保证传感器和发动机始终工作在正常的状态下。

3 结论

与常用热膜式空气质量流量传感器相比^[4,6,8], SDHFM 由于综合运用了传热、传感和计算机技术,具有动态响应好,测量精度较高的特点。通过运用热能传递过程中的能量守恒定律,SDHFM 不仅能直接得出加热器实际表面温度、上、下流区域的实际温度,并通过它来对传感器的加热器,上、下流区域的传感器件进行故障分析,找出故障源,而且它还能计量热平衡与非热平衡状态下的空气质量流量,因此,SDHFM 不仅能诊断出热膜式空气质量流量传感器在工作过程中所出现的传感器件分辨率下降、失效等严重问题,而且能解决空气质量动态流量的测量问题。

[参考文献]

- [1] 吴克刚. 热膜式空气质量流量传感器的动态响应[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(5):99-102.
- [2] 刘冲, 吴成百, 张文涛, 等. 微型燃料电池测试系统的气体流量控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3):459-465.
- [3] ATHANASIOS P Z. Methods based on one component laser Doppler anemometer and hot film anemometer for three dimensional turbulent measurements [J]. Proc of SPIE, 2005(5856):874-881.
- [4] 李长武, 梁国伟. 汽车用热线式空气流量传感器[J]. 传感器技术, 2004, 23(8):38-40.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [6] J. 玛瑞克, H. P 特拉汉. 汽车传感器[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [7] 刘光达, 王红宣. 电桥应变传感器信号线性的修正方法[J]. 光学精密工程, 1998, 6(2):95-99.
- [8] 沈剑平, 梁和平, 梁桂森. 热膜式气体质量流量计设计[J]. 柴油机, 2003(4):24-26.

[责任编辑:刘蔚绥]