

横圆管表面空气自然对流换热测试系统开发

朱 磊, 姜周曙*, 黄国辉

(杭州电子科技大学 自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要:为了更好地研究受热横圆管在大空间中的自然对流换热现象,设计开发了横圆管表面空气自然对流换热测试系统。该测试系统采用上下位机模式,可实现横圆管的自然对流换热系数的测定和准则关联式的验证。实际应用结果表明,该测试系统具有功能完善、测量精度高、重复性好等优点,很好地满足了自然对流换热测试的要求。

关键词:横圆管;自然对流换热;测试系统

中图分类号: TH811; TP212

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)10-1194-05

Development of testing system for natural convection heat transfer to air of circumferential surface of horizontal circular cylinders

ZHU Lei, JIANG Zhou-shu, HUANG Guo-hui

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to better study natural convection heat transfer phenomena of horizontal circular cylinders in large space, a testing system was designed and implemented. The testing system used a mode of upper and lower computer, and finished the measurement of heat transfer coefficient and verification of criterion expression. The actual application results show that the system can obtain full feature, higher precision and better repeatability, and better satisfy the requirements of natural convection heat transfer testing.

Key words: horizontal circular cylinder; natural convection heat transfer; testing system

0 引 言

自然对流换热是指不依靠泵或风机等外力推动,由流体自身温度场的不均匀性造成流体的流动,由此引起的对流换热。各种热工设备和管道的热表面向周围空气的对流散热就是典型的自然对流换热的应用实例,例如:电子元件散热、冰箱排热管散热以及事故条件下核反应堆的散热等^[1-2]。横圆管表面空气自然对流换热性能测试系统主要用于研究受热横圆管在大空间中的自然对流换热现象,是传热学的重要内容之一,有助于认识自然对流换热过程和分析换热系数影响因素。

本研究研制成功的测试系统实现了横圆管的自然对流过程监测、换热系数测定和准则关联式验证等功

能。该测试系统采用高精度的数据采集板实现精确测量;并以计算机为监测单元,选用 .NET Framework 2.0 开发平台,采用面向对象的编程思想,开发了相应的测控软件,能实时检测、记录、显示、存储和处理采集的数据,通过对换热过程的实时监测和数据分析可加深对自然对流换热过程的理解。

1 测试系统总体设计

1.1 原理及测试方法

被加热的横圆管以自然对流和热辐射两种方式向外界散热,根据牛顿冷却定律,受热横圆管表面由于对流换热而散失的热量 Q_c 可由下式计算^[3]:

$$Q_c = h(t_w - t_f)A \quad (1)$$

式中: Q_c —对流换热量, W; h —平均换热系数,

收稿日期: 2011-04-25

作者简介: 朱 磊(1987-),男,浙江宁海人,主要从事检测技术与自动化装置方面的研究. E-mail: leiz24@163.com

通信联系人: 姜周曙,男,博士,教授. E-mail: jzs@hdu.edu.cn

$W/(m^2 \cdot K)$; t_w —横圆管壁面平均温度, $^{\circ}C$; t_f —流体(空气)温度, $^{\circ}C$; A —横圆管有效换热面积, m^2 。

由于热辐射而散失的热量 Q_r 可由下式计算:

$$Q_r = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{t_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_f}{100} \right)^4 \right] A \quad (2)$$

式中: Q_r —辐射换热量, W ; ε —横圆管表面辐射率, 可从相关手册中根据横圆管外表面平均温度 t_w 查得; c_0 —黑体辐射系数, $c_0 = 5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

在忽略管子端部散热的前提下, 横圆管的对流换热量 Q_c 应等于加热器总加热量 Q 与辐射换热量 Q_r 之差, 即:

$$Q_c = Q - Q_r \quad (3)$$

式中: Q —加热器加热量, W 。

利用式(1,2,3), 则对流换热系数 h 可由下式求得:

$$h = \frac{Q - Q_r}{(t_w - t_f)A} \quad (4)$$

根据传热学和相似原理理论, 当受热表面在流体中发生自然对流换热时, 包含自然对流换热系数的准则关联式可整理为:

$$N_u = c(G_r P_r)^n \quad (5)$$

式中: N_u —努谢尔特准数, $N_u = hD/\lambda$; G_r —葛拉晓夫准数, $G_r = gD^3\beta\Delta t/\nu^2$; P_r —普朗特准数, $P_r = \nu/a$; a —流体的导温系数, m^2/h ; λ —流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$; D —横圆管直径, m ; ν —流体的运动粘度, m^2/s ; β —流体的体积膨胀系数, $\beta = 1/T_m, 1/K$; T_m —定性温度, 取 $T_m = (t_w + t_f)/2 + 273, K$; Δt —过余温度, $\Delta t = t_w - t_f, ^{\circ}C$; c, n —待定实验常数, 需根据实验数据用最小二乘法进行确定。

加热器以固定功率对特定直径的横圆管进行加热, 待整个横圆管达到热稳定状态后, 通过测定横圆管各点表面温度, 求得横圆管壁面平均温度 t_w , 然后通过测定测试箱内空气各点温度, 求得空气平均温度 t_f , 再测定加热量 Q , 利用式(2,4)可求得平均对流换热系数 h ; 通过改变横圆管直径和加热功率, 可获得不同工况下的测试数据, 求得各工况下的 N_u 、 G_r 和 P_r , 最终利用式(5)通过最小二乘法确定 c 和 n , 并与文献推荐值进行比较; 此外, 还可通过求得的 c 和 n 验证拟合效果^[4-5]。

1.2 测试系统设计

测试系统采用上、下位机模式, 下位机为带单片机 MC9S08DZ48 的数据采集板, 主要负责横圆管温度信号采集等功能; 上位机系统包括 PC 机和测控软件, 主

要负责换热过程实时监测、测试结果计算和结果验证分析等功能; 测量对象为横圆管, 采用紫铜材料, 外表面镀铬, 内部有加热电阻丝, 悬挂于密封的测试箱内; 测温元件为温度传感器, 采用 K 型热电偶, 置于横圆管的表面和测试箱中; 执行器为加热装置, 包括直流稳压电源和功率表, 直流稳压电源连接横圆管, 根据上位机控制信号可对横圆管进行不同大小的焦耳加热, 功率表可对加热功率大小进行测量和显示; 系统结构框图如图 1 所示。

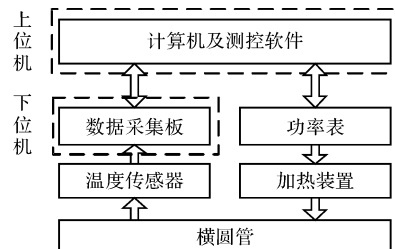


图 1 测试系统结构框图

2 下位机硬件设计与实现

数据采集板是本系统的设计重点之一, 它主要连接温度传感器和上位机系统, 硬件电路主要由微控制器、信号调理电路、电源电路、通信电路和热电偶冷端补偿电路等组成, 其结构框图如图 2 所示。其中 A/D 转换器采用低功耗、低噪声、高精度的 AD7793^[6], 它是 24 位精度, 内置仪表放大器 and 基准电压源。AD7793 的输出经电磁隔离芯片 AD μ m1301 有效隔离后与微控制器的 SPI 总线相连。

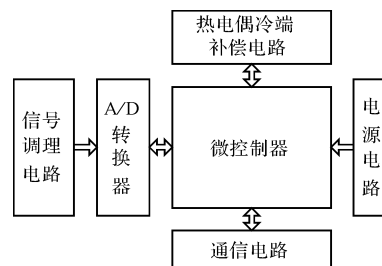


图 2 数据采集板总体结构框图

2.1 微控制器

微控制器采用 MC9S08DZ48^[7], 它具有 8 位 HCS08 中央处理器, 时钟频率最高可达 40 MHz(总线频率 20 MHz); 并具有丰富的内部资源和强大的片上仿真/调试功能, 完全能满足实际应用需要。

2.2 信号调理电路

信号调理电路原理图如图 3 所示, 电路主要包括通道选择、滤波和信号放大电路 3 部分。由于实验中

需采集多路热电偶信号,因此首先采用单片机控制光耦选通一路热电偶;然后热电偶输出的微弱模拟电压信号进入滤波和保护电路,滤波电路采用 RC 滤波器,以消除高频干扰,保护电路包括 ESD 管、保险丝和 TVS 管,主要是起到静电保护、防止电流过大、抑制共模和差模干扰等作用;为了提高采集精度和消除共模干扰,本研究采用 AD623 放大器将热电偶信号放大,其中 AD623 的负电源采用 MAX1720 转换输出 -5 V,以实现热电偶负电压信号的放大,还有 AD623 的参考电源选用高精度的基准电压源 AD780 转换输出 2.5 V

V,以提高 AD623 的输出基准;最后将放大后的信号送给 A/D 转换芯片。

2.3 电源电路

电源电路原理图如图 4 所示。电源输入采用 24 V 开关电源,首先经过极性、过压和过流保护电路,然后通过 7805 降压芯片得到 5 V 电源,经滤波处理供给模拟部分电路使用,再通过 DC-DC 隔离芯片 B0505S-1W 得到 5 V 电源,主要是为了将模拟电源和数字电源隔开,以降低相互干扰,此 5 V 电源供给数字部分电路使用。

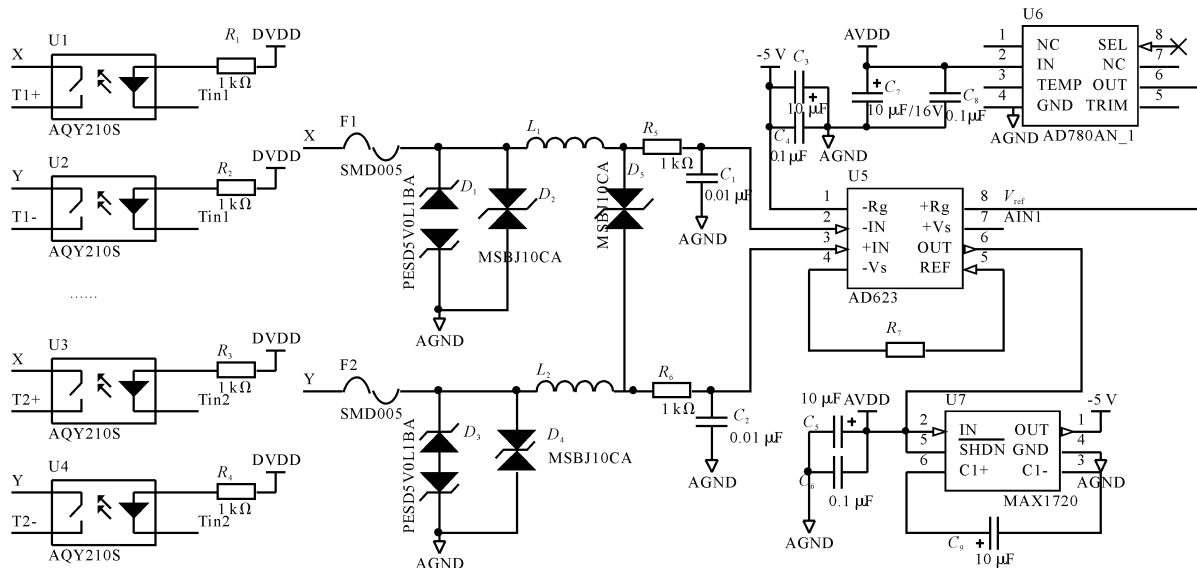


图 3 信号调理电路原理图

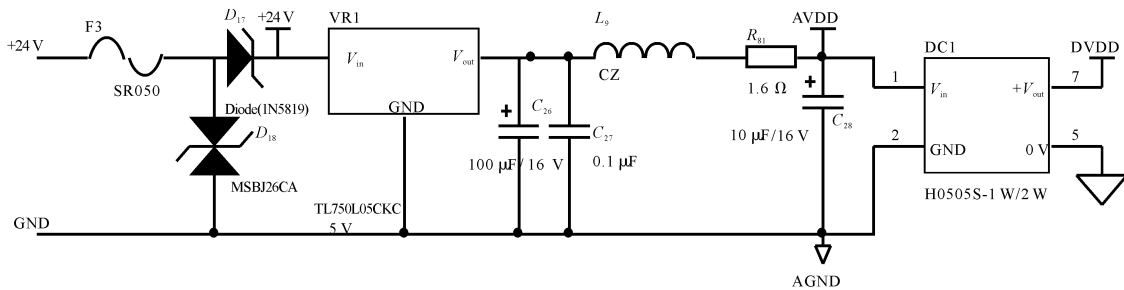


图 4 电源电路结构原理图

2.4 通信电路

数据采集板与 PC 机之间的数据通信采用 RS-485 异步串行通讯接口,它可实现半双工通信,数据传输速率可达 10 MB/s,通信距离可达 1 200 m。本研究选择带光电隔离的 RS-485 接口芯片 MAX1480,这种芯片将光电耦合器、变压器、DC-DC 转换器和二极管等器件集成于一体,具有通信可靠、抗干扰能力强等优点。

2.5 热电偶冷端补偿电路

冷端补偿电路采用数字式温度传感器 DS18B20,它直接将温度信号转换为数字信号,并与微控制器采

用单总线连接,具有测温精度高、连接方便、占用接口少等优点。

3 系统软件设计与实现

3.1 数据采集板程序设计

数据采集板的程序设计采用 C 语言编写,选用 CodeWarrior 集成开发环境。整个程序的设计采用模块化设计思想,软件主要包括以下几部分:主程序、数据采集与处理程序、通信程序、中断服务子程序等。进入主程序后,首先进行系统初始化,包括外围设备和全

局变量的初始化,然后使能串口中断和复位看门狗,接着通过采样时间判断是否进入数据采集与处理程序,主要完成 A/D 转换器启动、转换信号读入、信号滤波处理、温度换算和处理等工作,再通过通信标志判断是否进入通信程序,主要是根据收到的上位机指令进行相应的响应处理,包括参数设置、通道选择和数据发送等功能,最后返回到复位看门狗,进入下一个循环。程序流程图如图 5 所示。

中断配置主要包括串口的接收和发送中断,完成数据的接收和发送功能。程序运行中,若出现中断,程序会跳转到相应的中断服务子程序。

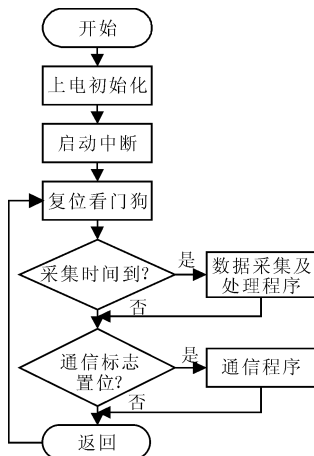


图 5 程序流程图

3.2 上位机测控软件设计

根据系统功能要求,上位机测控软件的功能图如图 6 所示,主要功能有:

(1)实时数据采集:与数据采集板进行通信,实现温度信号的实时动画显示、表格显示和曲线显示,并可自动将数据存入数据库中,也可将数据进行报表输出和打印;

(2)数据处理:可根据采集的数据计算出输入功率、辐射功率、换热功率、换热系数等参数,并可根据计算得到的参数拟合准则关联式的曲线,得到参数 c 和 n ;此外,还可对拟合结果进行验证和分析;

(3)历史数据查询:运用数据库技术可对历史数据进行查询^[8],包括表格显示、曲线显示、报表导出和打印等功能;并可对数据进行分析;

(4)参数设置:可对系统参数设置,包括密码修改、黑度设置和热平衡设置等。

上位机测控软件的设计开发主要采用 C#语言编写,开发平台选用 .NET Framework,使用 Visual Studio 2005 集成开发环境。软件设计中运用面向对象的设计方法优化了代码结构^[9-10],最终设计完成的动画界

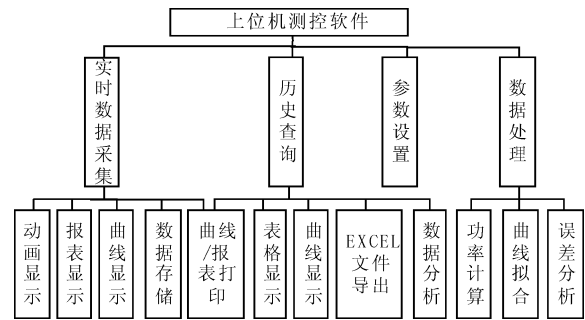


图 6 上位机测控软件功能图

面如图 7 所示。

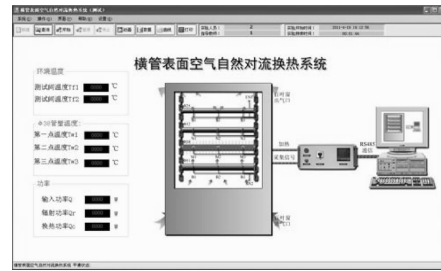


图 7 测控软件动画界面

4 系统实验结果

该系统实测了直径分别为 25 mm, 38 mm, 51 mm 的横圆管在不同加热功率下的实验状况,并记录了实验数据,根据横圆管壁温平均温度 t_w 和测试箱内空气温度 t_f ,算出定性温度,再根据查得的干空气物性参数及实验测得数据,计算得 h 、 N_u 、 G_r 和 P_r ,如表 1 所示。

表 1 横圆管实验数据

实验序号	横圆管直径 D/mm	加热功率 Q/W	壁面平均温度 $t_w/(^{\circ}C)$	空气温度 $t_f/(^{\circ}C)$	平均换热系数 h	努谢尔特数 N_u
1	25	89.9	121.9	17.5	9.97	8.41
2	25	65.4	100.8	18.3	9.26	8.00
3	38	102.4	107.5	18.6	8.77	11.43
4	38	140.5	132.8	18.9	9.36	11.82
5	51	45.3	56.6	17.0	6.44	12.01

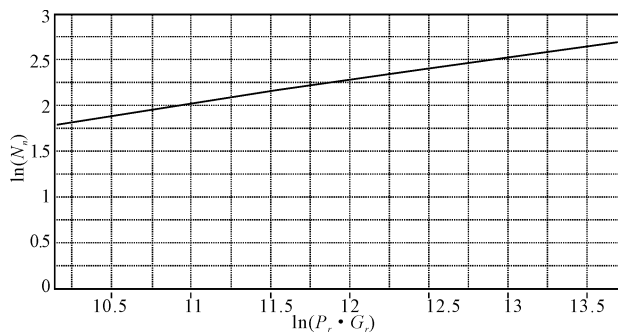
通过对式(5)两边取对数,可得:

$$\ln N_u = \ln c + n \ln (G_r P_r) \quad (6)$$

本研究根据表 1 各组实验数据,计算 $G_r P_r$ 值,再在双对数坐标上标出以上试验点,绘制得到 $N_u - (G_r P_r)$ 关系曲线,然后用最小二乘法对数据进行直线拟合,如图 8 所示,最终求得系数 $c = 0.489, n = 0.253$ 。

5 结束语

笔者利用所设计的软、硬件系统建立了横圆管表面空气自然对流换热测试系统,实际应用结果表明,该

图 8 $N_f - (G_r P_r)$ 拟合曲线

系统可以精确测量温度信号、实时监测对流换热过程、记录和分析实验数据,具有重复性好、测量精度高、功能完善等优点,完全可作为研究自然对流换热现象的计算机辅助测试系统。

参考文献 (References):

[1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006.

- [2] 陈景华. 材料工程测试技术[M]. 上海:华东理工大学出版社,2006.
- [3] 胡汉平,程文龙. 热物理学概论[M]. 2版. 合肥:中国科技大学出版社,2009.
- [4] 宋艺新,段远源. 空气沿横管外表面自然对流实验系统[J]. 实验技术与管理,2003,20(5):5-8.
- [5] 宋艺新,侯树鑫,段远源. 空气横掠圆管强迫对流换热实验的研究[J]. 实验技术与管理,2008,25(5):50-55.
- [6] Analog Devices Inc.. AD7792/AD7793 Data Sheet [EB/OL]. [2009-09-09]. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7792_7793.pdf.
- [7] Freescale Inc.. MC9S08DZ48 Data Sheet [M]. USA: Freescale Inc., 2006.
- [8] HUDDLESTON J. Beginning C# 2005 Databases [M]. Beijing: Tsinghua University Press & Prentice Hall, 2006: 247-250.
- [9] 周长发. C#面向对象编程[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
- [10] TITUS T. C# Threading Handbook [M]. Beijing: Tsinghua University Press & Prentice Hall, 2004: 20-30.

[编辑:张翔]

(上接第 1179 页)

力等边界条件,让整个计算模型更符合实际。通过计算发现,排气门鼻梁区应力比较大。

(3)在疲劳寿命计算中,气缸盖材料的 $S-N$ 曲线虽然是近似得到的,但是可以定性得到气缸盖各区域相对疲劳寿命的分布。另外,将热载荷近似为静态载荷,提高了计算效率的同时不影响结果的准确性。通过计算发现,气缸盖燃烧火力面一侧容易产生疲劳破坏,特别是进气门和排气门区域。

参考文献 (References):

[1] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1981.

[2] SHOJAEFARD M H, GHAFFARPOUR M R, NOORPOOR A R, et al. Thermo-mechanical analysis of an engine cylinder head [J]. *Pro-Quest science Journals*, 2006, 220(5):627-636.

[3] 梁莎莉,代秀红,姚海民,等. 柴油机气缸盖的三维有限元结构强度分析[J]. 农业机械学报,2004,35(3):45-48.

[4] 陶建忠,佟德辉,李国祥,等. 6200型柴油机气缸盖强度的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(11):205-210.

[5] 胡定云,陈泽忠,温世杰,等. 某柴油机气缸盖疲劳的可

靠性预测[J]. 车用发动机,2008(B06):38-44.

- [6] 骆清国,刘红彬,龚正波. 柴油机缸体-缸套-缸盖-冷却水整体耦合传热仿真研究[J]. 车用发动机,2009(1):31-35.
- [7] LI Shi-xiong, MAO Jin-long, WANG Shu-mao. Cylinder head FEM analysis its improvement [C]//Computer and computing technologies in agriculture. China: Wuyishan, 2007:761-768.
- [8] 李春铃. 柴油机气缸盖温度场数值模拟[J]. 柴油机设计与制造,2006,14(2):18-20.
- [9] 庞铭,谭建松,解志民,等. 蠕墨铸铁气缸盖激光热冲击研究[J]. 机电工程技术,2011,40(1):72-74.
- [10] 郑远春,王艳武,杨立. 异步电动机定子温度场仿真研究[J]. 机电工程技术,2009,38(9):76-78.
- [11] 刘彦奎,魏延刚. 基于 ABAQUS 的三环减速器多齿啮合效应分析[J]. 机械,2010,35(10):27-28.
- [12] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [13] LEE C C, CHIANG K N, CHEN W K, et al. Design and analysis of gasket sealing of cylinder head under engine operation conditions [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005(41):1160-1174. [编辑:罗向阳]