

嵌入式发动机活塞温度测试系统设计

石敬南¹, 王代华¹, 张强^{2,3}, 赵庆岚⁴

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261000;

3. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261000;

4. 陆军装备部驻北京地区军事代表局, 北京 100000)

摘要: 针对发动机活塞温度缺乏有效的测试手段, 设计了一种嵌入式活塞温度测试系统; 选用 K 型热电偶作为温度传感器, 利用 AD590 配合 2.5 V 基准电压源输出补偿电势对热电偶冷端温度进行了补偿, 通过调节 AD8495 设定点电压在预设温度下输出上升沿实现了可调触发温度功能; 系统在 PIC 单片机控制下通过内置模数转换器 (ADC) 采集活塞顶部 3 个测点的温度数据后, 通过 CC2530 将测试结果发送至上位机接收平台; 测试前在高温箱内对系统进行了标定, 将实测值与标定值进行了对比并在发动机台架上进行了试验; 实测结果表明: 系统测量误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下仍能正常工作, 具有良好的稳定性和可靠性。

关键词: 存储测试; 无线通信; 发动机活塞; 测温

Design of Embedded Piston—temperature Test System for Engine

Shi Jingnan¹, Wang Daihua¹, Zhang Qiang^{2,3}, Zhao Qinglan⁴

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. State Key Laboratory for

Engine Reliability, Weifang 261000, China; 3. Weichai Power Co., Ltd. Weifang 261000, China;

4. Military Representative Bureau of Army Equipment Department in Beijing, Beijing 100000, China)

Abstract: In view of the fact that there is no effective means to measure engine piston temperature, this paper designed one feasible embedded piston—temperature testing system. By selecting K—type thermocouple as temperature sensor and combining AD590 with output compensation voltage of one 2.5 V reference voltage source, it further compensated thermocouple cold—end temperature accordingly. In addition, it adjusted AD8495 set—point voltage under present temperature to output rising edge for achieving function of adjustable trigger temperature. After collecting temperature data upon 3 test points on top of piston via embedded Analog—to—digital converter (ADC) under control of PIC single chip, it turns out this system can send all test results to receiving platform of upper computer via CC2530. Before test, the entire system was also calibrated within high—temperature cabinet. After completing a series of comparisons between actually—tested values and calibrated ones, subsequent tests upon engine bench would be conducted. And these actually—tested results show that test accuracy of the system can reach $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. It can normally operate even in high temperature environment up to $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, demonstrating better stability and reliability.

Keywords: storage test; piston for engine; wireless communication; temperature test

0 引言

活塞作为发动机最关键的零部件之一, 工作环境十分恶劣^[1]。发动机燃烧室内部燃气瞬时温度可达 $2\ 000\text{ K}$ ^[2], 活塞在气缸中往复运动的同时, 会直接接触高温燃气, 受热严重, 而密闭的燃烧室又不利于散热^[3], 高温在活塞内部产生的热变形和热应力会使活塞强度降低, 最终造成发动机拉缸^[4]。研究表明, 局部温度过高, 温度分布不均导致活塞内应力增大、活塞变形是活塞失效的主要原因^[5]。

因此对发动机活塞温度进行测试, 获取温度随时间变化曲线, 进而为分析活塞温度场分布规律提供实测数据, 对发动机设计和改良具有重要意义。

传统的活塞测温方法有硬度塞法、易熔合金法、残余硬度法等^[6], 因测量精度不高, 实测过程中大都作为参考方法使用。引线法精度较高, 但在活塞往复运动过程中, 引线因反复拉伸很容易折断^[7]。针对发动机活塞温度测试以上问题, 本文将存储测试方法与无线通信技术相结合, 设计了一种具有无线通信功能的发动机活塞温度测试系统,

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-01-22。

基金项目: 内燃机可靠性国家重点实验室开放基金(skler-201901)。

作者简介: 石敬南(1995-), 男, 山西阳泉人, 硕士, 主要从事动态测试技术与无线通信技术方向的研究。

王代华(1977-), 男, 山东日照人, 博士, 副教授, 主要从事动态测试技术及智能传感器系统方向的研究。

引用格式: 兰 天, 李瑞玲, 张忠海, 等. 智能农业除草机器人研究现状与趋势分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 119-123.

将测试装置做散热隔热处理后嵌入发动机内部实时采集活塞测点温度值。

1 系统结构及原理

系统由测试仪和上位机两部分构成，总体框图如图 1 所示。测试仪主要由电源管理模块、信号调理模块、采集存储模块和无线通信模块构成，上位机部分由上位机软件和 ZigBee 协调器模块构成。系统选用 K 型热电偶作为测量活塞温度的传感器，通过信号调理模块将热电偶输出电压变为可被 ADC 接收的范围，信号调理模块包括 RFI 前置滤波、通道选择、冷端补偿和二阶压控滤波等部分。采集存储模块选用 PIC24 系列单片机作为控制核心，并选用 PIC 单片机内置 12 位 AD 作为模数转换器，负责采集活塞顶部的 3 路热电偶信号并将测试结果存至存储器内。测试仪无线通信模块选用 CC2530 作为主控芯片，负责与上位机进行通信，上位机协调器节点也由 CC2530 作为控制核心，负责网络的建立、串口命令的发送和无线数据的接收。

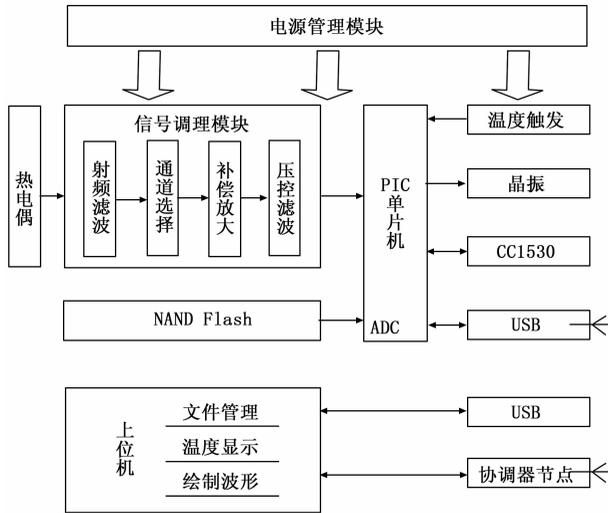


图 1 系统原理框图

系统上电后，PIC 单片机作为主机使用，CC2530 工作在从机模式。为了降低系统功耗，PIC 单片机在采集进程开始前和结束后均处于低功耗模式，CC2530 由定时器控制周期性休眠和唤醒。测试开始前，先通过上位机对系统触发温度进行设定，当发动机运转至测试工况后，环境温度升至预设值，PIC 外部中断触发，系统开始采集任务。当上位机发来指令后，首先被从机 CC2530 射频信号收发模块接收处理后，再由 CC2530 通过外部中断唤醒 PIC 单片机对上位机指令进行处理。

系统主要设计指标如下：

- 1) 温度测试范围：50~800 ℃；
- 2) 温度测试误差： $\leq \pm 2$ ℃；
- 3) 最高工作温度： ≥ 125 ℃；
- 4) 采样频率：50 kHz；

2 系统硬件设计

2.1 前置 RFI 射频滤波电路设计

活塞测温时，测试环境周围手机、电脑、无线电广播等设备会产生的大量的高频噪声信号^[8]。由于热电偶输出信号很小，这些噪声被热电偶引线拾取后会产生较大干扰，经仪表放大器整流后会造成直流失调^[9]，造成测试误差，且在仪表放大器的后续信号处理中不易滤除。因此，在热电偶信号输入仪表放大器之前，设计了前置 RFI 低通滤波电路，如图 2 所示。其中，差模截止频率为：

$$f_{dm} = \frac{1}{2\pi R(2C_2 + C)} \quad (1)$$

共模截止频率为：

$$f_{cm} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中， $C = C_1 = C_3$ ， $R = R_1 = R_2$ ， $C_2 \geq 10C$ 。

当 $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}$ ， $C_1 = C_3 = 10 \text{ nF}$ ， $C_2 = 100 \text{ nF}$ 时，代入得 (1) 和 (2) 得， $f_{dm} = 757.88 \text{ Hz}$ ， $f_{cm} = 15.92 \text{ kHz}$ 。即对频率大于 757.88 Hz 的差模信号和频率大于 15.92 kHz 的共模信号具有很好的抑制作用。

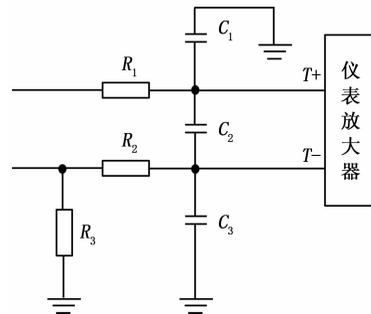


图 2 RFI 滤波原理图

2.2 冷端补偿电路设计

使用热电偶测温时，通常默认参考端温度为 0 ℃^[10]，但在测试发动机活塞温度时，热电偶冷端温度并不为 0 ℃，因此需要对冷端进行温度补偿。测试系统冷端补偿电路设计如图 3 所示，主要由基准电压源、AD590 和补偿电阻构成，通过在热电偶回路中产生随温度变化的反向电势，将冷端温度不为 0 时产生的电势抵消掉，从而起到温度补偿的作用。其中 AD590 为集成温度传感器的环境温度测量芯片，输出电流与温度上升成正比，LT66548BX 为 2.5V 基准电压源。

设活塞顶部热电偶测试端温度为 T ，环境温度为 R ，热电偶回路产生的热电势为 $E(T, R)$ ，即热端产生的接触电势为 $E(T)$ ，冷端产生的接触电势为 $E(R)$ ，且在实际测量过程中，补偿电阻 A 产生的补偿电势为 U_A 。则热电偶回路输入仪表放大器的电势为 $E(T, R)$ 与 U_A 之和，当冷端电势 $E(R)$ 与补偿电势 U_A 相等时，二者完全抵消，实现冷端温度补偿。据此对结点 A 应用节点电压法并列写出冷端

温度补偿电压方程。另外, 当完全补偿时, 补偿电压 U_A 对温度的变化率应与 K 型热电偶在温度为 R 时的微分热电势相等, 据此列出补偿电压的导数方程, 两者联立如下:

$$\begin{cases} U_A = \frac{RA}{RB + RA}(RBIA(R) - V_{ref}) = E(R) \\ \frac{dU_A}{dt} = \frac{RAR_B}{RA + RB} \times \frac{dIA}{dt} = KR \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, 电阻 A 为接参考电压源的补偿电阻, 电阻 B 为节点 A 的接地电阻, $I_A(R)$ 为 AD590 芯片在环境温度为 T 时的输出电流, V_{ref} 为 2.5 V 基准电压, K_R 为热电偶在环境温度为 R 时的微分热电势, 式中只有电阻 A 、 B 的电阻值未知, 通过代入已知量可求出电阻 A 与电阻 B 的值。

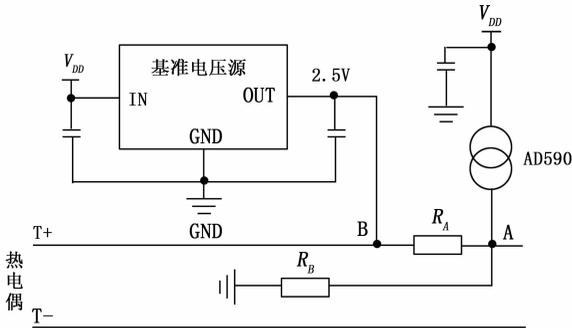


图 3 冷端补偿电路原理图

2.3 可调温度触发电路设计

测试系统具有可调温触发功能, 当环境温度达到系统触发值后, 系统自动开始瞬态温度的采集。可调温度触发电路主要由 AD8495 和数字电位器构成, 通过上位机编程控制数字电位器实现预设触发温度的功能。AD8495 为 ADI 公司生产的集成冷端温度补偿的精密热电偶放大器, 其输出电压 V_{out} 和温度 T 具有良好的线性关系, 当用作温度设定点控制器时, 设定温度 T_0 为:

$$T_0 = (V_{se} - V_{REF})/5 \text{ mV}/^\circ\text{C} \quad (4)$$

式中, V_{se} 为 SENSE 引脚输入电压, V_{REF} 为参考电压。当温度低于预设温度时, AD8495 输出低电平。温度高于预设温度时, AD8495 输出高电平。实际测试过程中, 当温度上升至预设温度值后, AD8495 输出上升沿触发 PIC 单片机外部中断, 唤醒 PIC 单片机开始工作。数字电位器选用单通道 256 位置分辨率的数字电位器, REF 引脚接电压基准芯片输出, 通过分压跟随电路调整其电压变化范围为 0~1.25 V, 通过单片机控制数字电位器即可使 SENSE 引脚输入电压为 5 mV 的整数倍, 由 (4) 式知, 当 V_{REF} 引脚接地时, 控制 SENSE 引脚电压即可调节预设触发温度。

2.4 二阶压控滤波电路设计

对热电偶输出信号放大后, 还需通过滤波电路滤除残余噪声, 采用二阶压控滤波电路实现。系统工作频率范围在 5 kHz 以内, 其自身的谐振频率大于 50 kHz, 综合考虑上述两个参数, 设置滤波器的截止频率为 10 kHz。二阶压

控低通滤波电路如图 4 所示。取 $R_3 = R_4 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$ 。则二阶压控滤波电路通带电压放大倍数 A_{up} 为:

$$A_{up} = 1 + \frac{R_4}{R_3} = 2 \quad (5)$$

等效品质因数 Q 为^[11]:

$$Q = \left| \frac{1}{3 - A_{up}} \right| = 1 \quad (6)$$

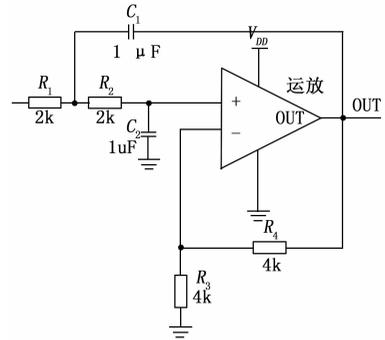


图 4 二阶压控滤波电路原理图

2.5 无线通信设计

系统采用 ZigBee 技术作为无线通信方式, 选用 TI 公司生产的 CC2530 芯片实现。系统无线通信部分由测试仪无线发送端和上位机协调器节点两部分组成, 两者通过 CC2530 建立 ZigBee 无线网络进行通信。测试仪无线发送端由主控芯片 CC2530 及其外围的 JTAG 下载口电路、晶振电路、射频收发端外接的巴伦电路和天线等部分组成。上位机协调器节点电路与测试仪发送端相似, 主控芯片也为 CC2530, 通过串口与上位机相连, 负责系统网络组建、发送上位机命令和接收无线测试数据。

3 系统软件设计

3.1 主程序设计

PIC 单片机工作流程如图 5 所示, 测试系统上电后, PIC 单片机首先对内部堆栈指针、中断向量表、各 I/O 口、

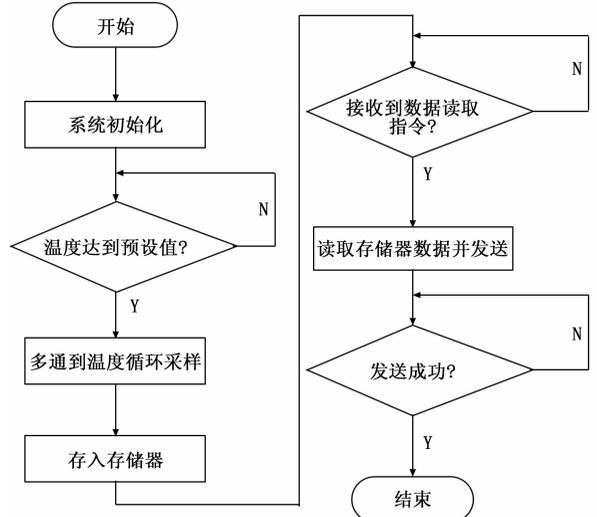


图 5 PIC 单片机主程序流程图

看门狗、串口通信模块等部分进行初始化设置，配置系统时钟并为寄存器赋初值，初始化完成后，使能全局中断并将外部中断 INT1 设置为上升沿触发，然后进入睡眠模式等待相应指令。当 AD7485 作为预设温度控制器时，上位机通过调节 SENSE 引脚输入电压即可设定系统开始瞬态采集的初始温度值。当测试环境温度到预设值后，AD7484 会输出一个上升沿唤醒单片机进入中断子程序，系统开始瞬态温度采集并将数据有序存入 NAND Flash 中。当测试工况的瞬态温度数据采集完成后，定时器完成定时产生定时中断，系统进入低功耗模式。当 CC2530 接收到上位机发来的数据读取指令时，先判断指令类型及有效性，然后通过外部中断唤醒主机。主机将需要发送的数据从 NAND Flash 中读出后，通过 UART 串口返回至 CC2530，最后通过射频无线发送模块将数据发送至上位机接收终端。当单片机发生异常时，看门狗首先将当前存储的数据和地址保存下来再产生复位信号使单片机复位，当无线传输功能发生异常时，可在设备回收后通过 USB 口直接读取 NAND Flash 中存储的备份数据。

3.2 ZigBee 无线通信模块程序设计

测试系统无线通信模块工作过程如图 6 所示。测试仪内部，CC2530 与 PIC 单片机通过 UART 接口通信，PIC 单片机工作在主机模式，CC2530 作为从机使用。测试系统开始工作后，从机节点被上电激活，先进行软硬件初始化，然后开始扫描与上位机相连的协调器节点组建的网络信息，检测到信标后立刻发送关联请求申请加入网络直至入网成功。

测试仪无线通信模块与上位机成功连接后，进入任务轮询模式，检测射频信号收发引脚收到的上位机指令并根据指令优先级进入相应的任务执行子程序。上位机命令主要包括唤醒/复位/休眠 PIC、开始/停止采集、无线数据接收和存储器数据擦除命令：当收到复位 PIC 指令时，CC2530 会向 PIC 单片机 MCLR 脚发送低电平复位信号使其复位；收到唤醒 PIC 指令时，CC2530 通过外部中断 INT2 唤醒 PIC 单片机；当收到无线数据接收指令时，通过 UART 串口将指令写入 PIC 处理，然后将其返回的数据发送至上位机接收端。为了降低系统的功耗，从机 CC2530 在任务轮询结束后，系统自动进入低功耗模式，当定时结束后再次进入新一轮循环。

4 实验结果与分析

在活塞温度测试试验前，利用高温箱对测试系统进行了标定。系统上位机最终接收的值为测量端电压转换成的数字量，需要转变为测量端温度值。由于不同温度下热电偶微分热电势有一定差

别，输出不是线性关系，直接建立系统输出与活塞温度的拟合关系式比较复杂。因此，先测试不同温度下的热电偶经冷端补偿电路后输入仪表放大器的电压值，将其与最终上位机接收的数字量用最小二乘法拟合，建立二者的拟合关系式，进而将电压值代入 ITS-90 温标规定的从热电偶输出电势反解测量端温度的 NIST 公式中求出测试端温度值^[12]。从 0 ℃ 到 800 ℃ 以 50 ℃ 为间隔取 16 个温度点对系统进行了标定，通过拟合关系式解算出最终温度值，然后通过公式 (7) 对拟合关系进一步修正，使最终修正结果的最大正误差与最大负误差相等，系统误差在 ±1 ℃ 以内。标定值、未经修正的温度值和修正后的温度值如表 1 所示，修正前系统最大误差为 0.9 ℃，修正后变为 0.8 ℃。

表 1 最终拟合温度表 (单位: ℃)

标定值	解算值	修正值	标定值	解算值	修正值
50	50.9	50.8	450	449.4	449.3
100	100.5	100.4	500	500.6	500.5
150	149.6	149.5	550	550.4	550.3
200	199.3	199.2	600	599.7	599.6
250	250.5	250.4	650	650.6	650.5
300	299.6	299.5	700	699.5	699.4
350	350.8	350.7	750	750.5	750.4
400	399.3	399.2	800	800.3	800.2

$$y = f(x) - \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \quad (7)$$

式中， $f(x)$ 为拟合函数， Δ_1 和 Δ_2 分别为最大正误差与最大负误差， y 为修正后的温度值。

在活塞顶部布设 3 个温度测点，其中测点 1 位于活塞

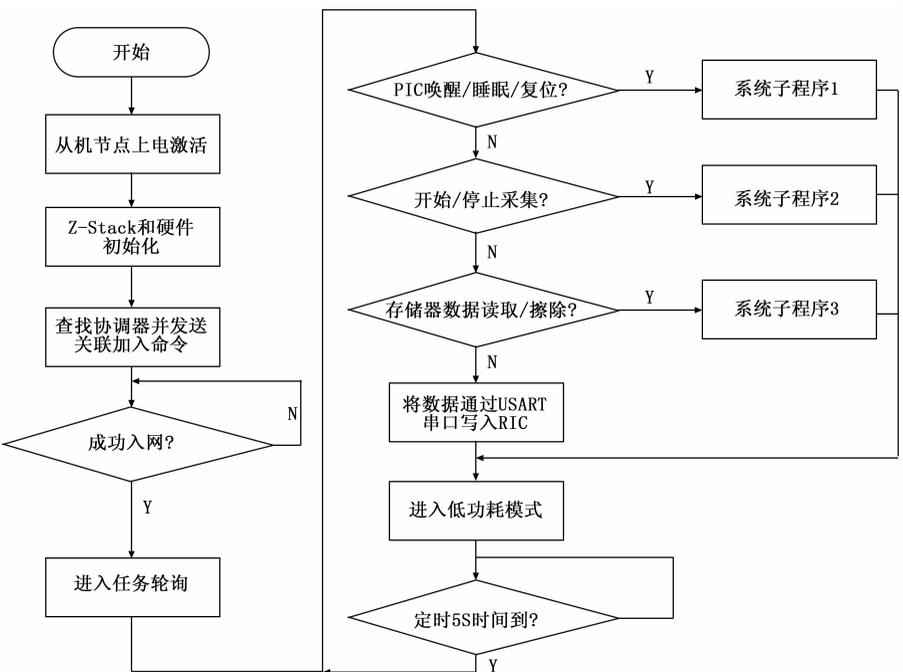


图 6 ZigBee 终端程序

中心,测点2与测点3对称分布在活塞顶部靠近边缘位置的两侧,测点2位于气缸进气侧方向,测点3位于气缸排气侧方向。通过上位机关闭系统温度触发功能,打开无线触发开关,按如下步骤在发动机台架上进行活塞温度测试试验:

1) 在活塞销孔附近打3个与活塞顶面垂直的钻孔,然后将热电偶引线做隔热隔热处理后经钻孔安装至活塞顶部3个测点处;

2) 将测试装置做隔热减震处理后安装在活塞销座的下方并上电;

3) 检查发动机油箱、水箱、机油液位等参数是否正常,启动发动机;

4) 发动机怠速运转15分钟后,通过发动机台架配置的测功机调节发动机转速和扭矩,使发动机进入待测试工况。

5) 上位机发送“开始采集”指令开始活塞顶部温度采集,采集完成后发送“数据读取”指令接收测试数据。

6) 调整发动机转速,运行稳定后按步骤5)再次测试新工况下的活塞顶部温度值。

7) 通过上位机打开系统温度触发功能,设置环境温度触发值后,再次测试。

发动机转速为1500 r/min时测点1测试结果如图7所示,发动机转速为2000 r/min时测点3测试结果如图8所示。当发动机转速为1500 r/min时,测点1~3稳定后的平均温度分别为232℃、228℃和245℃。发动机转速升至2000 r/min时,测点1~3稳定后的平均温度分别为255℃、250℃和280℃。

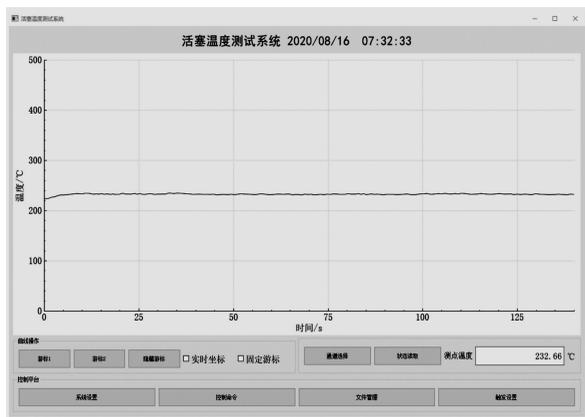


图7 1500 r/min 测点1测试结果

从测试结果可以看出,3个测点中位于排气侧的测点3温度最高,位于燃烧室中心的测点1温度略高于进气侧的测点2,3个测点的温度均随着发动机转速的增加而升高。

5 结束语

本文将存储测试技术应用在发动机活塞温度测试领域,

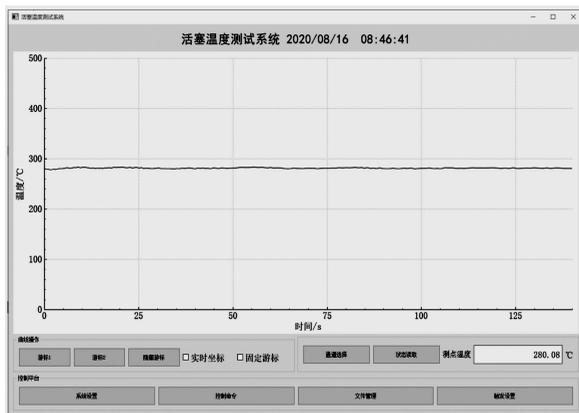


图8 2000 r/min 测点3测试结果

设计了一种嵌入式活塞温度测试系统,并通过发动机台架试验验证了系统的有效性和可靠性。试验表明,本系统在130℃高温环境下仍能正常工作,误差在±1℃以内,实现了预期功能,为活塞温度测试提供了新的技术手段,为发动机活塞设计和优化提供了实测数据支撑。

参考文献:

- [1] 王浩宇,徐建安,曲东越.某船用柴油机活塞件疲劳寿命预测及损伤演化分析[J].内燃机工程,2020,41(6):86-94.
- [2] 王贵新,马金凤,吴文涛,等.柴油机活塞在流域换热冷却下的温度场计算分析[J].热科学与技术,2020,19(1):72-79.
- [3] 蔡翌辉,刘畅,郭豪杰,等.高强度柴油机活塞温度与应力场有限元分析及其结构改进[J].内燃机工程,2020,41(1):1-11.
- [4] 吴飞,詹洁,李培杰,等.汽车发动机冷热冲击试验系统设计[J].机械设计与制造,2019(10):162-165.
- [5] 许宝余.柴油机活塞三维温度场数值计算与分析[J].江苏船舶,2013,30(1):28-31.
- [6] 曹斯琦,苏铁熊,王孝.关于内燃机活塞测温方法的综述[J].内燃机,2015(2):1-4.
- [7] 张志勇,黄荣华.发动机活塞温度测量方法综述[J].柴油机设计与制造,2005(1):19-23.
- [8] 温婷,董博,郭伟.电磁干扰的危害及电磁兼容技术分析[J].电脑迷,2018(8):139.
- [9] Charles Kitchin, Lew Counts, Moshe Gerstenhaber.降低仪表放大器电路中的射频干扰整流误差[Z].AN-671应用笔记,2003.
- [10] 鞠文斌,王元委.基于CAN总线的燃气轮机高温传感器设计[J].传感器与微系统,2018,37(4):98-100.
- [11] 李立煌.具有无线数据传输功能的瞬态温度测试系统[D].太原:中北大学,2014.
- [12] 肖红练.热电偶电动势规范和允差国家标准修订解读[J].自动化仪表,2018,39(7):51-55.