智能化与控制

基于 LabVIEW 的双燃料发动机测试系统设计与开发

谢　涛[1]，高金军[2]，姚　崇[1]，孙　军[1]，陶　锋[1]，王　宇[1]

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 上海外高桥造船有限公司,上海 200137)

摘　要：基于 NI 数据采集卡及调理模块,配合发动机各关键位置的传感器,采用 LabVIEW 软件编写采集程序和串口通信程序,开发了双燃料发动机实时监控测试系统。利用标准信号发生器等设备校准所开发的测试系统,并在双燃料发动机试验台上获取了部分测试点的实时状态参数,验证了所设计开发的测试系统的精确度。

关键词：LabVIEW;双燃料发动机;测试系统;数据采集

中图分类号:TK427^{+}.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001 - 4357(2017)04 - 0031 - 05

Design and Development of Test System for Dual-Fuel Engines Based on LabVIEW

Xie Tao[1], Gao Jinjun[2], Yao Chong[1], Sun Jun[1], Tao Feng[1], Wang Yu[1]

(1. College of Power and Energy Engineer, Harbin Engineering University, Heilongjiang Harbin 150001;
2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137)

Abstract: Based on the NI data acquisition (DAQ) card and SCXI module together with the sensors mounted on the engine, the real-time monitoring and test system was developed for dual-fuel engines through the acquisition programs and serial communication programs designed by LabVIEW. The designed test system was calibrated by using the standard signal generator and then its accuracy was verified on the experimental bed by comparing with the real-time parameters of the dual-fuel engine.

Key words: LabVIEW; dual-fuel engine; test system; data acquisition (DAQ)

0　引　言

评价一型发动机性能优劣的关键是发动机的运行状态参数。双燃料发动机作为目前内燃机的发展趋势之一越来越受到关注。内燃机试验中须要测量多个与运行相关的物理量，如转速、转矩、功率、油耗、压力等[1]；而双燃料发动机的测试量除了以上几个还有天然气消耗量。同时由于切换时叠加天然气的燃烧，缸内温度会迅速升高，测量各缸排气温度也十分必要。天然气在进气总管喷射，节气门后的进气总管压力直接反映混合气的流量，相比传统柴油机其测试精度要求更高。与涡轮增压天然气发动机相同，涡轮增压双燃料发动机在以天然气燃料为主的模式下工作时，存在低速扭矩不足和瞬态响应滞后等问题，因此涡轮增压器前后压力的精确测量也至关重要。

鉴于以上对试验台架测试精度的要求，设计了基于 LabVIEW 的 DAQ 数据采集模块和串口通信模块，开发了针对双燃料发动机的测试系统，试图解决传统发动机试验台架测试实时性差，人为误差影响测试精度等问题。

1　双燃料测试系统

本次测试系统设计开发的对象是玉柴 YC6K420 系列直列六缸 CNG/柴油双燃料发动机。该机天然气采用单点喷射方式。主要采集的数据有：各缸排气歧管温度；两路涡轮前温度，分别对应 1、2、3 缸和 4、5、6 缸经过冷却水套的排气总

收稿日期：2017-02-20；**修回日期**：2017-03-27

作者简介：谢涛(1992 -)，男，硕士研究生，主要研究方向为天然气与双燃料发动机电子控制技术，E-mail：xietao0505@qq.com。

管温度；一路涡轮后温度，即排气总管在涡轮增压器做功后的温度；冷却水出、入口温度；1 缸缸压；进气总管压力，可据此判断中冷后压力；涡轮前后的排气压力，可判断涡轮增压器的做功情况；发动机转速和凸轮位置。另外，基于双燃料发动机的特点，节气门氧传感器数据、排气烟管温度、整体油、气耗值对于排放节能来说也极为重要。测试系统涉及的具体传感器类型如表 1 所示。

表 1　传感器类型

测量参数	传感器类型
1 ~ 6 缸排气歧管温度	OMEGAK 型热电偶
涡轮前、后温度	OMEGAK 型热电偶
1 缸缸压	AVL 高温压传感器
进气总管压力	AVL 压力传感器
涡轮前、后排气压力	Kistler 压阻式压力传感器
转速、凸轮位置	磁电式传感器
冷却水进、出口温度	OMEGAPt100 型热电阻
油、气耗量	精密质量油耗仪（RS485 串口通信）

2　测试系统实现方式

整个双燃料发动机测试系统主要功能包括：各传感器的 DAQ 数据采集，信号调理，以及油耗仪与上位机的串口通信。测试系统具体实现方式如图 1 所示。

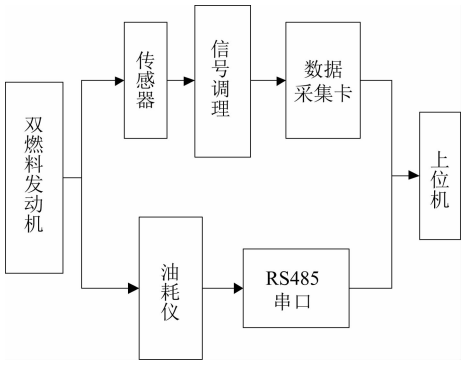

图 1　测试系统整体架构

2.1　数据采集硬件设备

在 DAQ 数据采集环节，通过分析发动机测量信号的特点，选用 NI 的 PXI 6251 采集卡实现各个模拟量的信号采集。作为 NI 最新的 M 系列采集卡，输入输出的 FIFO 缓冲器比之前的系列提高很多；多路复用模式的 PXI 6251 采集卡可以利用有限的模数转换器极大地扩展数据采集通道[2]，满足了表 1 中待采集传感器信号的数量。与传统的采用 PCI 总线的采集卡不同，采用 PXI 总线的采集卡能够在更复杂的工况下实现高采集速率，满足发动机信号快速响应的要求。

SCXI 模块是 NI 专门为各类信号调理设计的模块，尤其适合同 M 系列的采集卡搭配使用。在本测试系统中 SCXI 模块主要用来提供三线 Pt 热电阻的激励、热电偶的冷端补偿以及电压信号的调理。利用霍尔传感器采集到的发动机转速为类方波信号，为提高精确性同时避免与 SCXI 模块的时钟干扰，采用计数器专用的 PXI 6602 Timing 采集卡。DAQ 硬件组成结构如图 2 所示。

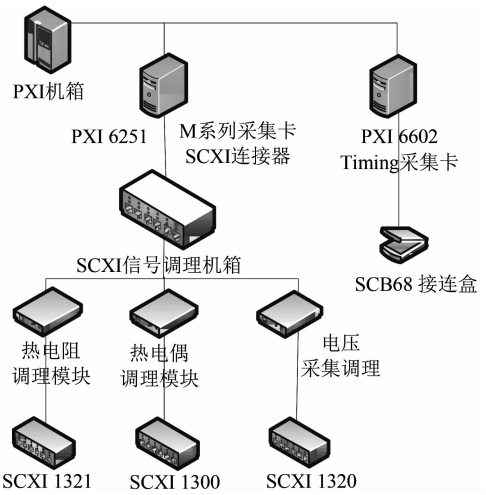

图 2　数据采集（DAQ）硬件组成结构

2.2　油、气耗测量设备

双燃料发动机油耗和气耗的测量精度要求极高。本测试系统中由三台德国 Endress + Hauser (E + H)公司的质量流量计构成油耗、气耗仪组合。其中两台分别测量进油和回油，差值即为双燃料发动机的油耗量；另一台作为气耗仪测量压缩天然气的消耗量。该型流量计基于科氏力质量流量测量原理，复杂的计算通过油耗仪的 PLC 计算处理，只须将 PLC 中 RAM 存储的数据通过 RS485 串口与上位机进行通信，解析后显示在测试界面。

根据流量计技术手册要求，须设计基于 Modbus_ RTU 协议的 LabVIEW 测试系统，其主要功能用于信号的通讯和数据解析，解析标准采用 IEEE745 浮点数标准。油耗测量程序中还要将两个流量计值做差计算，最后实现油耗、气耗数据的实时显示与存储。

3　测试系统软件开发

测试系统的软件开发主要分为两部分：DAQ 采集；流量计 PLC 通过 Modbus 协议与上位机进行 RS485 串口通信。

3.1　DAQ 采集程序流程

总体采用顺序结构依次构建各个模块程序，采用连续采集方式，将各通道数据按时间顺序同步连续采集，数据采集流程如图 3 所示。DAQmx 定时函数选择“连续采样”；调用 DAQmx 开始任务函数后，采集开始；每次循环中，DAQmx Read 函数在等待、读取到所须采样点后返回。

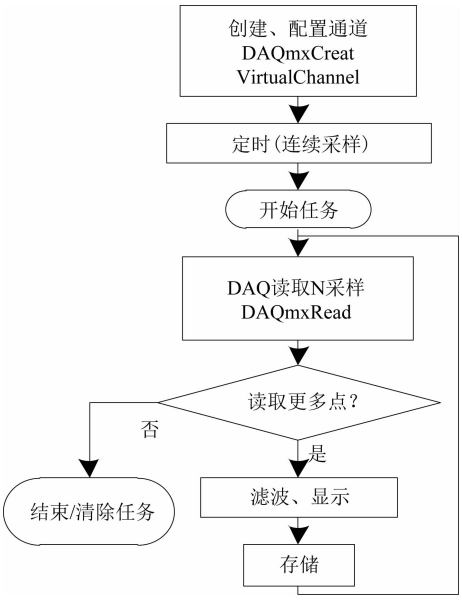

图 3　DAQ 数据采集流程

3.2　DAQ 采集程序设计

DAQ 数据采集程序主要包括通道创建、配置及信号的采集，即数据读取、滤波调理、数据显示与保存等。

创建配置各个采集通道须根据待测信号的特点和要求，利用 LabVIEW 的多态 VI 选择功能，创建配置物理通道，包括测量各温度、压力的模拟通道，和用来测量经施密特触发器整形的转速信号的计数器通道。根据发动机测试的特点修改通道参数，如冷却水温 RTD 热电阻的测量范围在 0 ~ 100 ℃，在硬件上须对 SCXI1321 做相应跳线配置，以获得最准确的采集值。具体配置程序如图 4。

定时环节即配置模拟输入的采样时钟，主要须配置采样速率、每通道采样数以及采样模式。采样速率指设备在每个通道上的采集速率，决定了每秒种进行模数转换的次数。此次选用的 PXI 6251 采集卡多通道采样时最高采样率达到了 1（$MS \cdot s^{-1}$）[3]，本文选择多路复用模式，采样率公式如下：

$$\text{各通道最高采样速率} = \frac{1\ (MS \cdot s^{-1})}{\text{通道总数}}$$

本测试系统共使用 24 个模拟通道，最高采样速率可达到 4.1（$kS \cdot s^{-1}$），可以满足需要。根据 Nyquist 采样定理，采样率须大于最高信号频率的两倍。采样率越高采集越不易失真，但过高的采样速率对后台数字处理系统的要求较高。对于当前输入的发动机温度、压力等模拟信号，暂时不考虑信号频率，每秒钟采样 2 个点就可完全满足要求，也可使数据存储量不至于太大。每通道采样数是指每次从通道读取的数据长度，通过 NI 采集的信号是从采集卡通道的 buffer（FIFO 缓存）里读取的，配置该值的关键是避免 buffer 溢出。一般与采样频率满足 1/2 的关系，程序中配置为 1。

基于 NI 的硬件设备提供的信号调理功能，模拟信号采集在程序中直接使用 LabVIEW 自带平均值滤波 VI；而在转速的计数器采集中，为避免由缺齿因素产生过大的信号波动，利用数组编写去除最大最小值后的极值平均滤波程序，得到了良好的试验效果。

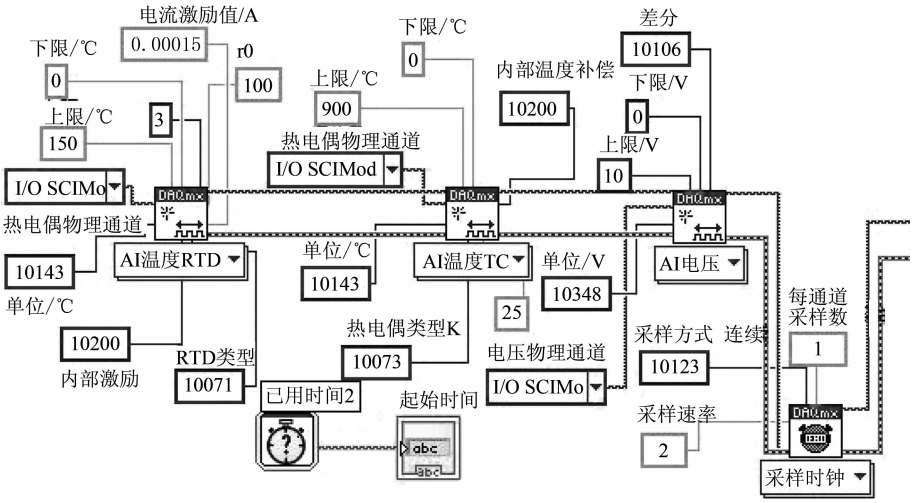

图 4　DAQmx 配置程序

采用生产者—消费者架构，生产者循环与消费者循环两者独立运行互不干涉，并采用队列方式将采集到的数据传递给消费者实现处理、保存等功能。利用 Express VI 助手添加 TDMS 数据存储，将各通道采集数据存储在一个个定时新建的 TDMS 文档中，避免了手动记录的繁琐。

3.3　油、气耗仪串口通信 LabVIEW 设计

质量流量的测量主要是利用 ModbusRS485 与上位机通信实现的。应用 LabVIEW 串口通信中 8 个 VISA（虚拟仪器软件体系结构的缩写，是一种工业界通用的仪器驱动器标准 API）。节点，包括串口初始化、串口读写、关闭串口等。实现流程图如图 5 所示。

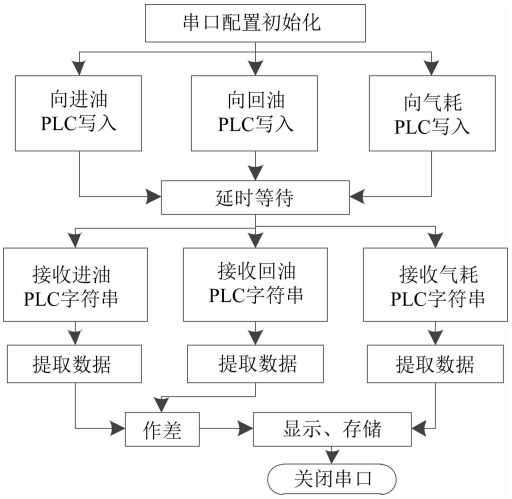

图 5　串口程序流程图

配置三个串口通道，分别对应进油、回油以及气耗三个下位机 PLC 的 RAM 值。RS485 采用半双工通信，同一时间只能完成接收或发送数据一项功能。应用层协议 Modbus 协议遵循“查询 - 响应”模式[4]，设计中采用问答方式，先向 PLC 写入一个命令，当 PLC 接到指令后再向上位机传送当前流量值。使用 Modbus 的 RTU 模式，消息发送至少要以 3.5 个字符时间的停顿间隔开始，因此问答之间须要有等待。经过多次试验，将等待时间定为 1 000 ms，既能满足发动机测试响应要求又能完整传递数据。由于从 PLC 得到的数据是字符串格式，还须要基于通信协议的具体情况设定编写解析函数。设计了名为 IEEE745 的 LabVIEW 子 VI，将字符串数据转换为浮点型表示的实际物理量。这一步也可理解为提取数据，所设计 LabVIEW 程序如图 6。

此外，质量流量计数据信号偶尔有极高或极低的不正常数据信号，也采用极值平均滤波处理，去掉最高值与最低值后取平均值。

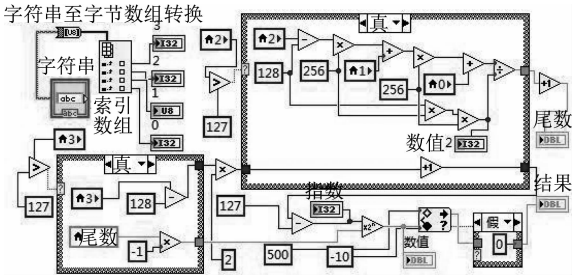

图 6　IEEE745 数据解析子 VI

3.4　测试系统前面板设计

前面板的设计按以下原则[5]：首先要能满足测试目标需求，完整显示当前程序的数据；其次所选输入控件应容易理解，便于操作，另外所选输出指示器应能直观有效地向用户传递信息；最后组件所代表类型要能兼顾 VI 进行数据处理所需的范围、精度和效率。

基于以上几点，本次设计的 DAQ 采集系统各指示控件按照发动机上传感器的实际安装位置布局，直观准确，并按照所测物理量的特点调整控件外观，便于理解和读取数据。串口通信的界面考虑到用户日常使用习惯，仿照传统的串口助手布局，各输入参数的选择直观简洁，使用简便。将完成的测试程序连接发动机台架运行，实际界面效果如图 7 所示。

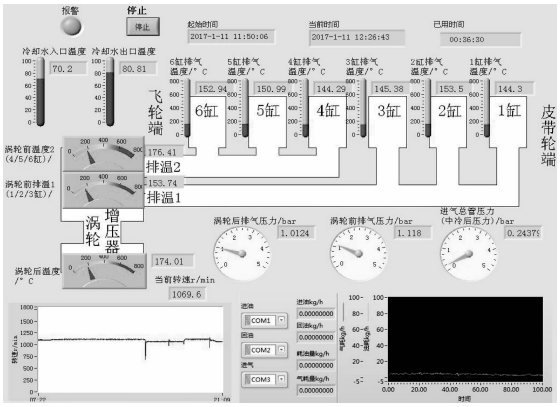

图 7　测试系统显示界面

4　验　证

经过以上流程设计的测试系统，一定程度上实现了对双燃料发动机各项物理量的测试和监控。为了验证测试系统的准确性，利用标准信号发生器等设备调试校准，并通过开机测试后与理论计算数据进行比对检验。

比较有代表性的是热电偶信号的检验。测试系统中包括六个气缸排气温度，涡轮前、后排气温度

都是采用热电偶测量，因此热电偶信号采集的准确与否显得尤为重要。热电偶测量温度的原理即根据一张绘制好的热电偶分度表，把测量得到的正负极之间的电势差与相应的温度值一一对应，以此获得测量温度。利用 Fluke744 标准信号发生器可以向传感器输入任意 mV 级精度的电势差，在上位机中可以读出各点由测试系统得出的温度，对照 OMEGA 官方提供的 K 型热电偶参考表，即可得出测量误差。以三缸排温、六缸排温、涡轮后排温测量误差为例，如图 8，可以看出：测量温度越高，测试系统的误差越小，这是非常有利的。

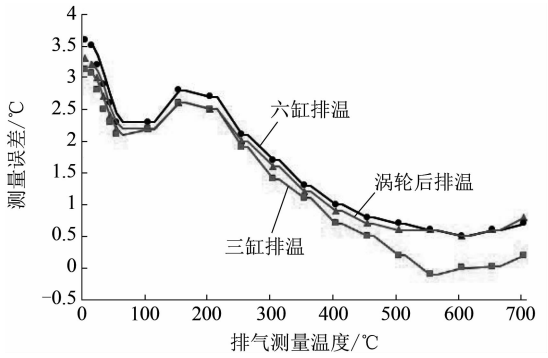

图 8　热电偶温度测量误差

同时也能根据发动机的结构从采集到的信息定性反向验证。例如 1、2、3 缸排气总管的冷却水套相比 4、5、6 缸更长，因此对应的在涡轮前安装的两个传感器测量得到的排温 1 比排温 2 的温度略低。

5　结　论

本文针对双燃料发动机的测试特点，结合 LabVIEW 虚拟仪器的优点，设计开发了发动机试验台架测试系统。经过开机试验，验证了测试系统各信号的测量精度，实现了测试系统的设计开发。

参考文献

[1] 张晓娟. 基于 LabVIEW 的发动机台架测试系统研究 [D]. 咸阳：西北农林科技大学，2008.

[2] 严昭莹，李小杰，张美娟. 基于 PXI 总线的高精度同步数据采集卡设计 [J]. 工业仪表与自动化装置，2011，(4)：41-44.

[3] NI DAQ M Series. NI User Manuals [R]. 2008.

[4] 李朝青，刘艳玲. 单片机原理及接口技术 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2013.

[5] 陈树学. LabVIEW 实用工具详解 [M]. 北京：电子工业出版社，2014.

（上接第 30 页）

[7] GROSS M S，ULLAMA，QUERINI C A. Diesel particulate matter combustion with CeO_2 as catalyst. Part I：System characterization and reaction mechanism [J]. Journal of Molecular Catalysis A：Chemical，2012，352 (1)：86-94.

[8] OLIVEIRA C F，GRACIA F A C，ARAUJO J L，et al. Effects of preparation and structure of cerium-zirconium-mixed oxides on diesel soot catalytic combustion [J]. Applied Catalysis A：General，2012，S413-414 (4)：292-300.

[9] ZOUAOUI N，ISSA M，KEHRII D，et al. CeO_2 catalytic activity for soot oxidation under NO/O_2 in loose and tight contact [J]. Catalysis Today，2012，189：65-69.

[10] WAGLOEHNER S，KURETI S. Modelling of the kinetics of the catalytic soot oxidation on Fe_2O_3 [J]. Applied Catalysis B：Environmental，2013，129：501-508.

[11] BIN F，SONG C，LY G，et al. Soot low-temperature combustion on Cu-Zr/ZSM-5 catalysts in O_2/He and NO/O_2/He atmospheres [J]. Proceedings of the Combustion Institute，2013，34：2303-2311.

[12] HAN Z W，XU S，XIE L F，et al. Study on the application of emulsion explosives in synthesizing nanostructured ceria [J]. Combustion，Explosion，and Shock Waves，2014，50 (4)：477-482.

[13] JEONG D W，NAH S，SHIM J O，et al. A crucial role for the CeO_2-ZrO_2 support for the low temperature water gas shift reaction over Cu-CeO_2-ZrO_2 catalysts [J]. Catalysis Science & Technology，2015，5 (7)：3706-3713.

[14] GIMENEZ-MANOGIL J，BUENO-LOPEZ A，GARCIA-GARCIA A. Preparation，characterization and testing of CuO/$Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ catalysts for NO oxidation to NO_2 and mild temperature diesel soot combustion [J]. Applied Catalysis B：Environmental，2014，S152-153 (4)：99-107.

[15] L-AVERSIN H，COURCOT D，ZHILINSKAYA E A，et al. Study of active species of Cu-K/ZrO_2 catalysts involved in the oxidation of soot [J]. Journal of Catalysis，2006，241 (2)：456-464.

[16] XU X D，LIU D X，LI K，et al. Role of CeO_2-ZrO_2 in diesel soot oxidation and thermal stability of potassium catalyst [J]. Catalysis Communications，2007，8 (8)：1274-1278.

[17] 邹玉红，卢勇，裴普成. 基于配气正时的柴油机高排气背压性能优化 [J]. 车用发动机，2014 (6)：39-44.