

基于 LabVIEW 的调节器低温动性能 试验台测量系统设计

刘小杰, 杜永清

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 流量调节器是液氧煤油火箭发动机中关键的自动调节装置, 其动态性能直接影响发生器乃至发动机的工作特性。为进一步验证流量调节器工作可靠性, 设计并集成了调节器低温动性能试验台测量系统。测量硬件基于 PXI 系统搭建, 软件基于 LabVIEW 平台进行编程。首先介绍了测量系统的总体方案及工作原理, 然后对热电偶测量方法、硬件选型、软件总体架构、软件子模块设计及拖拽式数据显示方法进行了重点阐述, 最后简要说明了测量系统的调试方法及结果。测试结果表明, 测量系统稳定、可靠, 能满足试验要求。

关键词: 流量调节器; 低温动性能试验台; 测量系统; PXI; LabVIEW

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0110-07

Design of LabVIEW-based measuring system for cryogenic dynamic performance test bench for regulator

LIU Xiaojie, DU Yongqing

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Flow regulator is a key automatic adjustment device of LOX/kerosene rocket engine. Its dynamic performance directly affects the working characteristics of engine and generator. To further verify the reliability of flow regulator, a measurement system for low temperature dynamic performance test bench for the regulator was designed and integrated. Its hardware is based on PXI system, and software is based on LabVIEW for programming. In this paper, the overall scheme and working principle of the measurement system are introduced, the thermocouple measuring method, hardware selection, software architecture, software sub-module design and dragging data display method are elaborated emphatically, and then the debugging method and results of the measuring system are described briefly. The test results show that the measuring system is stable and reliable, and can meet the test requirements.

Keywords: flow regulator; low temperature dynamic performance test bench; measurement system; PXI; LabVIEW

收稿日期: 2015-07-30; 修回日期: 2016-01-05

作者简介: 刘小杰 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术

0 引言

调节器是发动机实现工况转换、保持推力稳定的关键组件, 其工作可靠性直接关系到发动机的工作可靠性^[1-2]。

为了进一步提高动力系统的工作可靠性, 特别是发动机长期贮存或延迟发射时, 调节器内部的非金属密封件长时间浸泡在煤油中, 可能导致非金属密封材料失去密封作用、调节器转级卡滞或调节器无法完成转级过程。因此, 有必要建设调节器低温动性能试验台 (以下简称试验台), 开展调节器可靠性方面的试验研究及验证工作。

1 试验台功用及组成

试验台用于研究流量调节器在低温煤油环境下的动态性能, 确定其容许的边界工作条件。试验台主要由低温供应系统、回收系统、试验控制系统、指令气系统、测量系统及调节器测控仪 6 部分组成, 其中低温供应系统用于提供满足试验要求的低温试验介质; 回收系统用于对介质进行流量测量并回收; 试验控制系统用于对试验台中安装的所有气动阀门和电磁阀进行远程控制, 同时实现参数的调节功能; 指令气系统用于试验台气源供应和控制, 实现系统压力的自动调节; 测量系统用于完成温度、压力、流量、转级时间等系统参数的实时采集、换算、显示及存储工作; 调节器测控仪用于控制调节器并锁定电机角度, 控制电机以任意角度调节。试验台原理如图 1 所示。以下重点讨论试验台测量系统的设计、集成与调试。

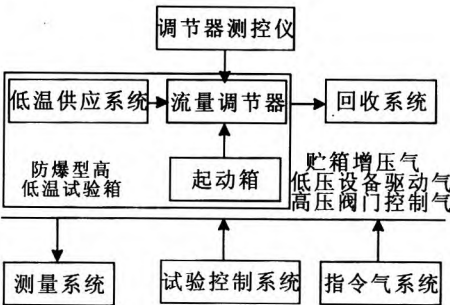


图 1 试验台组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram for composition of test bench

2 测量系统要求

测量系统作为试验台的关键设备, 其性能高低直接影响试验数据的准确性。试验台对测量系统提出以下要求:

- 测量精度: $\leq 0.2\%$ (F·S);
- 采样率: > 1 kS/s;
- 测量软件具有通道配置、数据采集及数据分析等功能, 配置灵活、操作方便;
- 测量系统应安全性高, 人机界面友好, 易操作且可扩展。

3 测量系统设计

3.1 系统总体设计

为了实现性能优良、配置灵活的设计目标, 测量系统基于 PXI 硬件与 LabVIEW 软件构建。PXI 较 PCI 有更好的集成性和可靠性; LabVIEW 图形化的编程方法更易于快速搭建测量软件。

如图 2 所示, 测量系统由传感器、机柜、计算机及软件 4 部分组成。PXI 架构的测量系统在总体结构上有两种选择: 一类是采用嵌入式计算机, 安装于 PXI 机箱内, 具有体积小、集成度高的特点; 另一类是采用普通计算机, 通过 PXI-PCI 控制卡与 PXI 机箱交换数据, 可以认为 PXI 设备是计算机内的 1 个 PCI 设备。本文采用第 2 种方案, 即远程 PC 控制 PXI 设备的架构模式, 在便于计算机升级与维护的同时, 也在一定程度上实现了远程控制功能。

信号调理选用 DATAFOURTH 公司的 SCM5B 系列调理模块, 载板选用 SCMPB01-1, 即 1 个载板将 16 路输出信号并联同步传输到采集板卡, 同时为每个模块提供 +5V 的直流激励电压。由于载板的信号输出接口和采集卡的信号输入电缆都为单根多芯形式, 故采用自行加工的信号转接板将信号传输给采集卡, 若采用与采集卡配套的接线端子盒 (SCB-68A 等), 在增加成本的同时也带来了部分接线工作。

至此, 测量系统的工作原理如下, 传感器将测量到的压力、流量及温度等信号传递给信号调

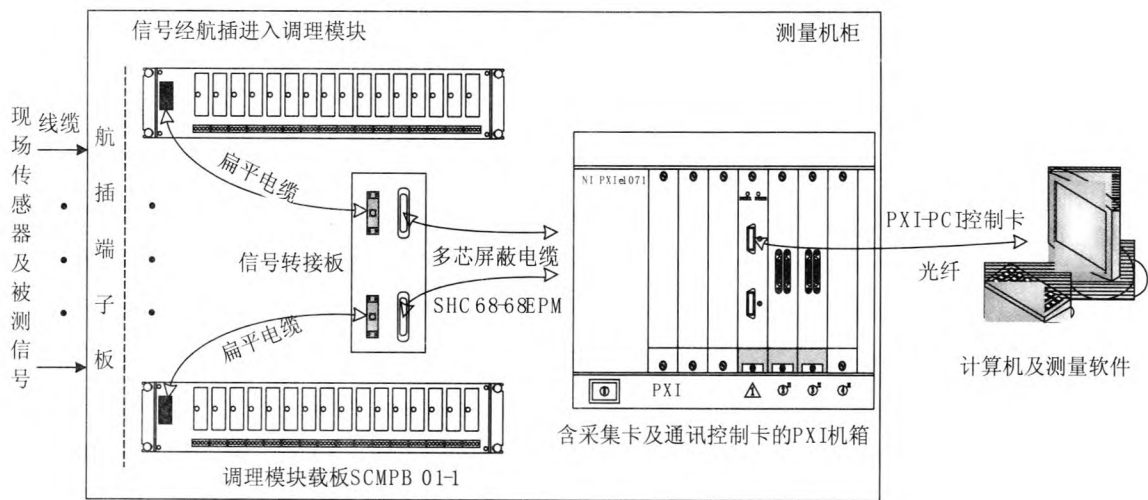


图 2 测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

理模块进行信号隔离、放大、滤波及转换，转换后的标准信号在数据采集卡内实现模数转换，计算机通过测量软件实现数据计算、显示及存储工作。试验结束后由分析软件完成曲线回放与分析，同时具备数据导出功能。

3.2 温度测量方法及调理模块选择

前端传感器的信号输出形式会影响测量方法及调理模块的选择。当前，常用的测温传感器有热电偶及热电阻 2 类。由于热电偶的测温范围大、响应速度快，被广泛应用于火箭发动机地面试验中。本试验台选择热电偶作为温度传感器。

热电偶输出为毫伏电压信号，电动势由测量端与参考端的温度差引起。在工程应用中，很难将热电偶的参考端温度稳定在 0℃，因此涉及温度补偿的问题。

具体到 5B 调理模块的选型中，有以下 2 种方案：一种是直接选择热电偶调理模块，利用载板上自带的温度传感器实现温度补偿；另一种是选择毫伏电压模块测量热电偶输出信号，通过温度变送器测量温度相对恒定的参考端温度（可补偿所有热电偶通道），在测量软件内计算出热电偶测量端的真实温度。

两类方法的优缺点对比如表 1 所示。方案 1

的优点是系统集成简单，缺点是某一类型的调理模块只能测量对应类型的热电偶；方案 2 可以使单个调理模块连接不同类型的热电偶传感器，缺点是软件编程难度增加。本文选择第 2 种方法。实现方法见图 3。

表 1 2 种温度测量方法对比表		
Tab. 1 Comparison table of two temperature measuring methods		
对比项目	采用热电偶模块	采用毫伏电压模块
补偿方法	通过载板上自带的温度传感器，由硬件电路实现温度补偿	通过自行测量参考端温度，利用测量软件实现温度补偿
	模块类型决定前端传感器类型，K 型热电偶调理模块只能连接 K 型热电偶	前端可装任意类型的热电偶，传感器类型需在软件中配置
参考端温度测量通道	无此测量通道	至少占用 1 个变送器通道，用于参考端温度测量
软件	软件处理简单，不涉及温度补偿	需要在软件内实现温度补偿

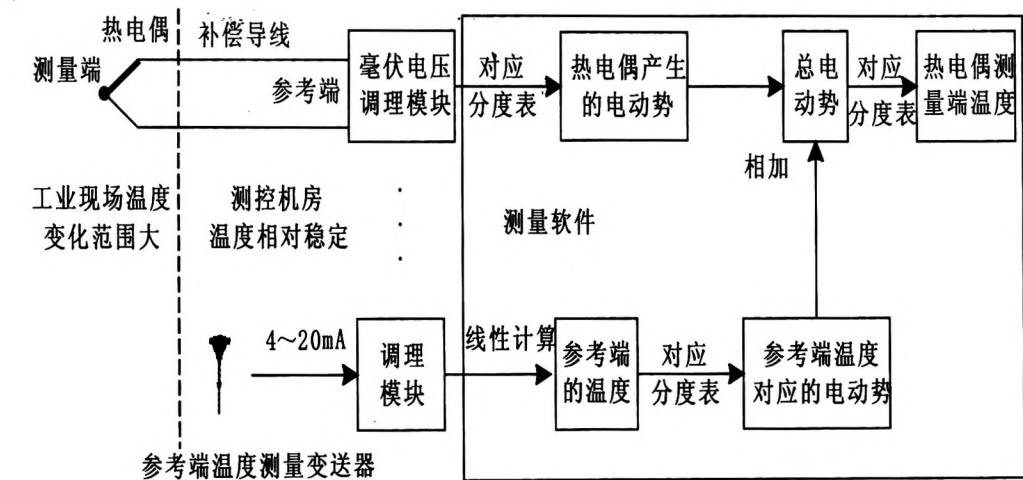


图 3 毫伏电压模块温度测量方法简图

Fig. 3 Diagram of temperature measuring method for millivolt voltage module

3.3 硬件选型行选型, 选型结果如表 2 所示。

根据以上分析结果, 对测量系统主要硬件进

表 2 测量系统主要硬件选型表

Tab. 2 Selection for main hardware of measurement system

设备	型号	用途	主要指标
PXI 机箱	NI PXIe-1071	数据采集与传输	4 槽 3U 机箱
PXI-PCI 控制卡	PXIe-PCIe8375	数据传输与控制	10 米光纤
采集卡	PXIe-6363	数据输入与输出	32 路 AI, 48 路 DI, 4 路 AO
模块载板	SCMPB01-1	信号传输与配电	16 通道载板, 无冷端补偿电路
调理模块	SCM5B30-01	毫伏信号调理	±10 mV 输入, ±5 V 输出
调理模块	SCM5B42-01	变送器信号调理	1~5 V 输出, 20VDC 供电
调理模块	SCM5B41-09	电压信号调理	±40 V 输入, ±5 V 输出
调理模块	SCM5B392-11	电流信号调理	4~20 mA 输入, 0~5 V 输出
调理模块	SCM5B41-06	电压信号调理	±10 V 输入, 0~5 V 输出
调理模块	SCM5B45-03	电压信号调理	0~3 KZ 输入, 0~5 V 输出

4 测量软件设计

4.1 软件总体设计

测量软件采用模块化设计方法, 由通道设

置、数据采集、数据分析及通道校准 4 个功能模块组成, 其中通道设置模块与数据采集模块之间是顺序结构, 软件流程图如图 4 所示。软件的总体结构位于登陆界面后面板, 用于检测用户操

作，进入相应的子模块。软件功能可采用“循环-事件结构”或“循环-条件结构”实现。本软件采用“循环-事件结构”，程序框图如图 5 所示，当执行触发事件时，首先隐藏当前登陆界面，然后进入对应子模块。

4.2 通道设置模块设计

通道设置模块的功能是：呈现给用户一个友好的界面，在此用户可以查看或配置测量通道及传感器的参数信息，包括通道是否启用、测点名称、换算系数、报警限及传感器类型等参数。通道设置模块的运行流程是：读取配置文件并显示，用户对参数进行查看或设置，当需要进入试验界面时，保存参数配置并以数组及簇的形式将参数传递给数据采集模块。通道设置界面如图 6 所示。

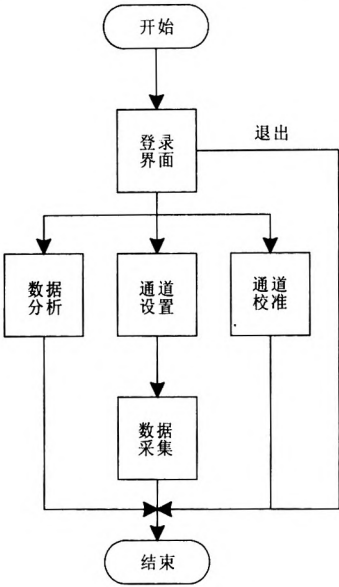


图 4 软件流程框图
Fig. 4 Flow chat of software

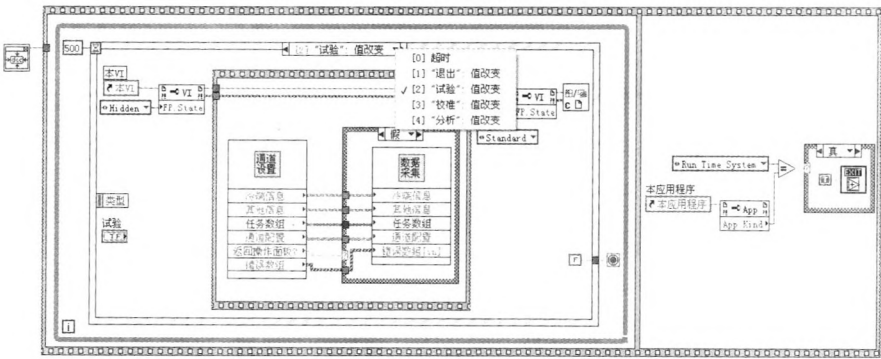


图 5 登陆界面程序框图
Fig. 5 Program diagram of login interface



图 6 通道配置界面
Fig. 6 Channel configuration interface

通道设置模块的程序框图总体是 1 个顺序结构, 第 1 帧读取配置文件, 将配置内容显示在多列列表框内; 第 2 帧由 1 个循环-事件结构及 1 个 While 循环结构组成, 前者用于响应用户界面操作, 实时将用户对配置信息的修改反应在多列列表框上, 后者用于实时刷新各通道的换算值, 方便用户配置通道; 第 3 帧为条件判断结构, 当用户选择进入数据采集界面时, 软件将从全局通道中检索出本次启用的测量通道, 创建 DAQmx 采集任务数组, 同时将启用的测量通道信息以 2 维数组的形式传递给数据采集模块, 用于数据计算及报警判断等功能。子 VI 之间的参数传递尽量采用数组或簇的形式, 不但可以减少连线数量, 增强程序的可读性, 还可以起到优化程序结构的作用。

4.3 数据采集模块设计

数据采集模块依据通道设置模块传递的参数实现数据采集、显示及存储功能。数据采集采用“生产者-消费者”模型, 即 1 个 While 循环作为生产者, 利用 DAQmx 读取函数不断的从任务通道中读取数据放入队列中, 另 1 个 While 循环作为消费者, 依次从队列中取出数据进行换算、存储、显示等操作。这里采用队列作为缓存, 也可以使用其他方式如数组作为数据缓存。

为了提高数据存储速度, 同时便于试后的数据分析, 数据存储采用如下方法: 开始记录后,

将换算值连同对应的时间列不断写入二进制文件中; 在结束数据记录时, 将本次试验的通道配置信息以文本格式与试验数据一起保存, 即每次记录产生两个文件, 二进制数据文件及配置文件。在数据分析模块中, 可利用配置文件将二进制数据文件翻译成标准文本格式。

4.4 拖拽式数据显示方法

数据显示是数据采集模块的基本功能。一般情况下, 测点的数量是大于界面可显示数量的, 因此要求显示测点可灵活配置。数据采集模块前面板放置了 1 个簇控件 (内含 18 个数值型显示控件) 及 2 个波形图表控件用于测点值的实时显示。配置显示测点的方法多种多样, 本软件采用拖拽式方案。

如图 7 所示, 用户只需从左侧的测点列表 (可隐藏) 中, 将需要显示的测点名称拖拽至显示控件即可完成配置功能。实现方法可以分解为以下 2 个步骤: 首先, 生成本次试验的测点列表。依据通道设置模块传递的参数, 利用 LabVIEW 中的树形控件生成测点列表, 其父项定义为测点类型, 子项定义为测点名称; 其次, 识别被拖拽的测点名称, 若放置成功, 则修改显示控件的属性信息, 同时根据被拖拽测点名称及索引号从换算值数组中索引出正确的数值显示在显示控件内, 此处依靠“拖拽开始”、“拖拽输入”、“放置”3 个事件结构配合完成。

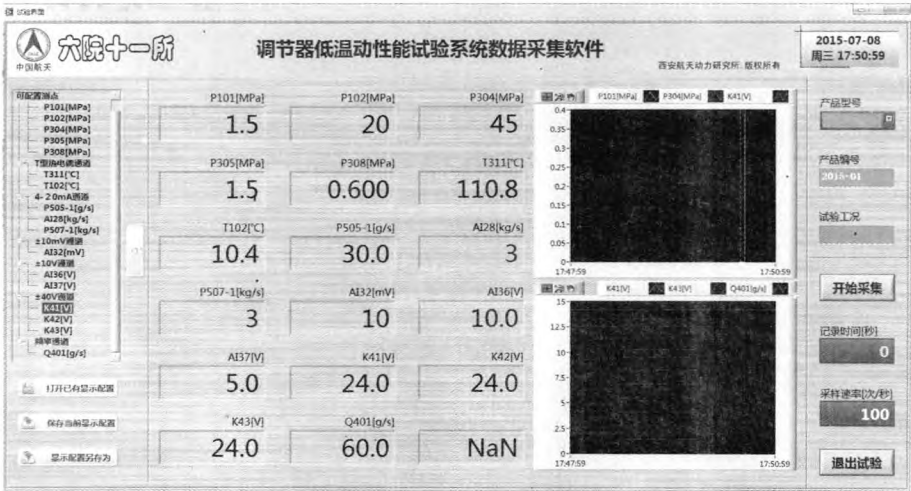


图 7 数据采集界面

Fig. 7 Data acquisition interface

5 调试与验证

为了验证测量系统的功能与精度,在完成单元调试后,利用标准信号源产生不同幅值及频率(1 Hz, 100 Hz, 1 kHz)的方波或正弦波,通过软件采集后,查看采集的数据能否完全复现信号源给出的信号。调试结果表明:测量精度优于0.2%F.S,采样率10次/秒~5000次/秒可调,测量系统满足试验台要求,运行稳定。

6 结论

针对调节器低温动性能试验台的任务需求,详细论述了测量系统硬件及软件设计要点,测试表明,测量系统满足试验台对测量精度、采样速率、可靠性及人机交互友好性等方面的要求,可以为流量调节器的性能验证及研究提供试验数据支撑。

参考资料:

- [1] 陈维宇,刘站国,王昕,等.流量调节器研制中的主要问题及结构改进[J].火箭推进,2009,35(6):31-36.
CHEN W Y, LIU Z G, WANG X, et al. Problems in the development process of a flow regulator and improvement of its structures[J]. Journal of rocket propulsion, 2009, 35(6): 31-36.
- [2] 刘上,刘红军,陈建华,等.流量调节器在泵压式供应系统中的动力学特性[J].火箭推进,2014,40(2):28-35.
LIU S, LIU H J, CHEN J H, et al. Dynamical characteristics of flow regulator in pump feed system[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(2): 28-35.
- [3] 祝敏,张辉,雷震.分布式测控系统在发动机试验中的应用[J].火箭推进,2013,39(5):98-102.
ZHU M, ZHANG H, LEI Z. Application of distributed measurement and control system in liquid rocket engine test[J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(5): 98-102.
- [4] 邱刚,康小录,乔彩霞,等.霍尔电推进长寿命试验台测控系统研制[J].火箭推进,2012,38(3):65-73.
QIU G, KANG X L, QIAO C X, et al. Design of measurement and control system for Hall electric propulsion longevity test bed [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(3): 65-73.
- [5] 黄见,胡顺星,曹开法,等.基于LabVIEW的测污激光雷达三维扫描控制系统的设计[J].大气与环境光学学报,2013,8(2):124-129.
- [6] 李梦婷,王小明.ITER CICC导体气密性检测控制系统的研制[J].真空VACUUM,2010,47(6):41-45.
- [7] 郝贵欣.基于LabVIEW的减压阀试验台测控系统[J].测控技术,2011,30(6):102-106.
- [8] 董延军,李兴军.LabVIEW多核编程技术在局域网文件传输中的应用[J].测控技术,2014,33(9):113-124.
- [9] 尹君驰,薛风.用热电偶测量流体介质温度的误差分析[J].当代化工,2014,43(8):1524-1526.

(编辑:陈红霞)