

# 基于 Labview 的液氧/煤油贮箱压力控制软件

李党科, 张 辉

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了液体火箭发动机地面试验推进剂贮箱压力控制系统的设计要点、系统组成和在 RT 实时系统环境中软件的开发过程。详细阐述了贮箱压力控制系统的工作原理、技术特点、系统组成机构, 经过多次测试及地面热试车验证, 成功实现了多路控制对象的集中控制。

**关键词:** Labview; 贮箱压力控制; 实时系统

**中图分类号:** V434.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2008) 06-0040-05

## Pressure control system based on Labview for liquid oxygen/kerosene vessel

Li Dangke, Zhang Hui

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

**Abstract:** The design requirements and system composition of propellant vessel pressure control system for liquid rocket engine ground test and the software development based on Labview under real time system were introduced in this paper. The principle of the vessel pressure control system, technology characteristics and the system framework were described in detail. Centralized control of multi-channel signals was obtained and was proved successful by ground tests.

**Key words:** Labview; control of vessel pressure; real-time system

### 0 引言

推进剂贮箱压力控制系统是试验台控制系统

的重要组成部分, 用于在系统检查和试车过程中对试车台主容器和启动容器的贮箱压力进行控制, 以达到利用容器贮箱压力控制泵前压力的目的。该系统的硬件采用了美国国家仪器公司

收稿日期: 2007-11-07; 修回日期: 2008-04-08。

作者简介: 李党科 (1980—), 男, 助理工程师, 研究领域为发动机试验测控技术。

(National Instrument 通常称为 NI) 的板卡及机箱, 软件采用了图形化编程语言 Labview。容器贮箱压力控制软件 (以下简称箱压控制软件) 主要由以下三个部分组成: 单元测试程序、系统配置程序及数据文件生成程序、主控制程序用于完成系统的单元测试、试车数据文件的生成、综合测试及试车。

## 1 开发运行环境

### 1.1 概述

如图 1 所示, 软件的开发运行环境由上位机系统和下位机系统组成, 两套系统利用局域网通过 TCP/IP 协议进行通讯协作完成软件的开发和运行。上位机系统 (简称上位机) 是软件的开发平台, 并在运行时作为下位机的人机界面, 下位机系统 (简称下位机) 是软件的运行平台, 用于运行软件并按照软件的要求返回参数及软件运行状态。程序运行时, 通过上位机启动程序并利用局域网下传到下位机执行, 下位机通过局域网将运行状态和相关数据上传至上位机。两套系统相互独立, 即在运行过程中, 任何一套系统出现故障, 另外一套系统是可以正常工作的, 如在运行过程中出现上位机“死机”故障而需要重新启动时, 下位机软件会正常运行, 继续完成控制过程 (只是上传的参数无法浏览), 当上位机重新启动后, 只需和下位机进行重新链接, 系统即可恢复正常。

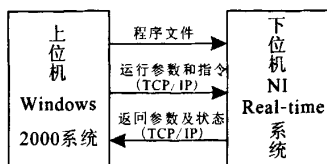


图 1 控制软件结构

Fig.1 Structure of the control software

由于下位机是软件的实际运行平台, 如果出现故障, 此时虽然上位机能正常运行, 但控制过程已经出现故障, 会导致任务无法完成, 所以如何提高下位机的可靠性成为提高整个系统可靠性的关键。

### 1.2 上位机

上位机系统的硬件平台采用 HP ML150 系列服务器, 操作系统为 Windows 2000, 软件开发环境采用图形化编程语言 Labview。

Labview 在整个开发工程中偏重于数据的流向即数据流, 编程要做的工作就是控制“数据流”, 这使得使用 Labview 开发测控软件的思路较为清晰, 整个软件就是一张数据的流向图。

在系统运行过程中, 上位机用于向下位机下传程序和提供交互界面, 即每次下位机运行什么程序, 怎么运行是通过上位机来进行控制的, 下位机的运行状态和需要实时显示的参数是通过上位机进行显示的, 同时用户对下位机发送的指令也是通过上位机下传的。

### 1.3 下位机

下位机是软件的实际运行平台, 用于在测试及试车期间对硬件进行控制以及向上位机发送系统状态及参数。

下位机全部采用 NI 公司的硬件配置: PXI-1045 机箱及零槽控制器 PXI-8186 一个, 作为整个下位机的控制器以及程序的执行机构; 计时及数字 I/O 板 PXI-6608 一块, 用于整个系统的定时; 数字 I/O 板 PXI-6527 两块, 用于对增压和主控及程控部分指令的采集; 继电器板 PXI-2565 两块, 用于电磁阀的控制。

操作系统为 NI 公司开发的操作系统 Real-Time OS (简称 RT), RT 系统是 NI 公司专门为实时控制系统开发的操作系统, 在提高系统的实时性和可靠性方面有着较为出色的性能。RT 是一款单用户多任务的 32 位操作系统, 内部集成了 Labview 的编译器, 当接收到下传的 Labview 程序, 就立即编译并且执行。RT 不提供用户界面而只通过局域网上传数据或者接收用户的指令, 这样就提高了系统的实时性, 即任何时刻系统都只运行需要它运行的程序即宏观单任务。同时 RT 系统可以为不同的过程设置不同的运行优先级, 如紧急关车的处理过程明显要优先上传运行时间的处理过程, 这样就能保证程序始终以预先设定的时序来进行。

由于 RT 系统是没有用户界面的, 下位机运

行的程序都是由上位机通过 Labview 中的 RT 模块下传至下位机的,且下位机只能识别上位机下传的 Labview 程序,这就杜绝了病毒进入下位机的可能性,提高了系统的可靠性。

2 软件组成及各功能模块

箱压控制软件主要由单元测试程序、数据文件生成程序及主控制程序部分组成,结构见图 2。

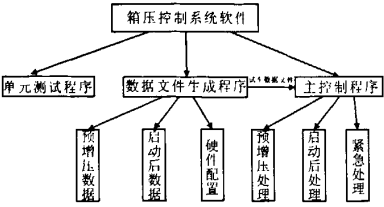


图 2 箱压控制软件框图

Fig.2 Structure of the tank pressure control program

三个模块采用独立运行、通过数据文件相互链接的运行方式,采用这种方式,可以减少程序模块的复杂度,提高软件的可维护性,每个模块产生的数据文件都可以人工进行检查,增加了软件的可靠性;同时,避免了主控制程序的反复改动,试车状态的更改只需要通过数据生成程序来改动数据文件即可,降低了软件的操作难度。

2.1 单元测试程序

单元测试程序用于完成从控制台至电磁阀中间各个环节的状态的测试,在测试过程中,岗位操作人员将指挥员的口令按照约定的规则对应成一个软件指令,由系统来执行相应的指令,完成一项测试。

单元测试程序的功能比较单一,其难点和重点在于界面设计的合理性,如将不同功能的电磁阀操作按钮集中放置,将平时使用频率较少的电磁阀操作按钮隐藏起来,这样可以提高岗位操作员查找按钮的速度(尤其在测试对象较多时);同时要注意按钮不能太小,按钮间的间距不能太小,以防止误操作,按钮的名称要尽量醒目等。

2.2 数据文件生成程序

数据文件生成程序将在预增压阶段和启动

(0 秒)后试车大纲对于推进剂贮箱压力的要求以及硬件系统的配置信息转换为试车主程序可以识别的数据格式。数据文件生成程序分为预增压数据生成模块、启动后增压数据生成模块和硬件配置文件生成模块。

(1) 预增压数据生成模块:预增压数据生成模块根据每次试车的要求,确定每次预增压阶段应读取的压力继电器信号以及相应的动作对象,并自动生成预增压数据文件。

(2) 启动后数据生成模块:根据每次试车的要求,确定发动机启动后(即 0 秒后)箱压控制系统在正常情况下以及紧急停车状态的控制对象的相应动作,并自动生成启动后状态下的数据文件。

(3) 硬件配置数据生成模块:当系统状态发生改变时(例如某个控制对象的通道改变),在不改变硬件线路的状况下通过此模块来对整个系统配置信息(包括板卡类型、板卡地址、通道号、通道名称、状态、前端节点)进行调整,以使整个系统能够正常工作。在系统状态频繁变更的试车试验系统中,采用这种做法避免了硬件板卡以及通道接头反复插拔,提高了硬件的使用寿命;同时简化了硬件变更的复杂度,减少了工作环节,提高了可靠性。在硬件状态变更较为频繁的试验测控系统中作用比较明显。

2.3 主控制程序模块

主控制程序模块是在试车过程中实现推进剂贮箱压力控制的模块,它包括预增压处理模块、启动后处理模块和紧急停车处理 3 个模块。

(1) 预增压处理模块:该模块首先读取预增压处理数据,在没有接到“紧急停车”信号的情况下巡检发动机是否启动,如果接到启动信号则程序进入启动后程序处理模块,如果没有则巡检压力继电器信号,并根据数据文件动作相应的控制对象。在此期间如接到“紧急停车”信号则程序转入紧急停车处理模块。

(2) 启动后处理模块:该模块以 PXI-6608 定时器板输出为全局控制量,根据启动后处理数据文件通过该时刻相对于“启动”时刻的时段以及在该时刻采集到的控制信号两个因素来共同决定

该时刻控制对象的动作。在接到“正常停车”信号前如接到“紧急停车”信号,则直接转入紧急停车处理程序。在Labview开发环境下对并行循环的处理采用分时处理方式,如果某一个循环的一次处理占用过多的(超过要求的处理)处理时间将会导致别的循环的处理间隔变长导致整个系统的时间精度下降。根据试验对箱压控制系统的时间精度要求,在该模块中每个循环的处理时间定为1ms。

该模块的重点和难点在于,该控制过程既有“时序”控制,又有“实时”控制,即总体上是两个“时序”控制过程(液氧系统和煤油系统),在“时序”控制过程中又需要进行“实时”控制,由于频繁的读取时钟源和计算会导致时间精度下降,所以整个模块采用一个时钟源,两个时序都通过读取同一个时钟源来进行时序的判断,通过这种方式可以每次(读取时钟源)只进行一次计算,提高系统的时间精度。

(3) 紧急停车处理模块:该模块用于处理发动机试验异常情况。由于在这种情况下,试验对箱压控制系统的实时响应要求非常高,系统必须以最高的优先级来进行紧急停车处理。在该模块中,从程序启动开始就以1ms的速度巡检紧急停车信号,以满足对紧急停车信号的实时要求。

### 3 控制时间精度及可靠性测试

#### 3.1 控制时间精度

(1) 时间误差分析:在箱压控制系统中影响时间精度的误差主要来源于定时板误差、软件消耗、以及硬件响应误差。在系统中采用的定时器板的时钟频率为10MHz,其定时精确度为0.45 ppb/天,远远高于箱压控制系统要求的时间精度(10ms),所以定时器板PXI-6608带来的时间精度误差可以忽略不计。软件误差主要来源于在处理并行循环时在循环内部消耗的时间以及软件本身运行的时间。在软件中,循环内部消耗的时间约为2ms,软件本身消耗的时间<1ms,这样软件消耗的时间最大为3ms。在系统中使用的继电器板PXI-2565,其典型响应时间为5ms,最大

为10ms,即在最坏情况下系统的时间误差为 $2+1+10=13\text{ms}$ ,满足控制系统时间精度20ms的要求。

(2) 验证方法:继电器的动作时间验证方法为编制专用的测试软件(主要用于消除软件消耗)按照一定顺序打开一定数量的继电器,通过检测计算机(采用的I/O板为固态继电器板PXI-6527,硬件误差可以忽略)记录其动作时间和动作次数即可得到继电器的打开时间极限情况和均值等信息,将程序改为关闭就可以得到继电器关闭的相应时间信息。在进行的近1000次测试中得到所有继电器动作(包括打开和关闭)的均值为4.893ms,最大值为5.923ms。

软件的整体测试采用的方法是编制数据文件运行程序,利用检测计算机来记录贮箱压力控制系统的指令和时间,最后分析其指令时间精度,在进行的多次(大于100次)测试中时间精度均满足要求(内部控制时间精度为10ms)。

#### 3.2 单元测试

各个模块编制完成后,分别对各个模块的硬件进行单元测试,平均测试次数在200次以上,硬件均按预定的程序进行动作,软件也无异常,证明软件中的各模块的正确性及硬件的可靠性。

#### 3.3 计时精度测试

用标准的时间源与软件通过硬件计时板采用同一个触发信号来同时进行不同时间长度的计时,计算软件计时与标准时间之间的误差,其误差在100秒及500秒范围内均小于0.001ms,在大于1000秒的范围内,其误差小于0.01ms,其精度远远高于系统要求的时间精度,证明了软件计时部分的正确性及可靠性。

#### 3.4 系统联试

单元测试及时间精度测试完成后,对整个软件进行组装,组成软件系统,并设计测试方案对整个系统进行系统测试。测试方案除了包括多次正常情况下运行测试,还虚拟了多种不同的异常情况对软件进行测试,并计算正常情况下的程序输出,如此反复多次。在系统的多种测试下,软件均按预定计算输出,证明了整个软件的正确性及硬件的可靠性。

性大为提高。

4 结论

用 Labview 开发控制程序在 RT 实时系统下运行,通过局域网进行上、下位机之间联系的这种程序开发模式能够将硬件系统的实时性发挥到最大,尤其适用于高精度要求的测控系统中。液氧/煤油台容器储箱压力控制软件自投入使用以来经历了冷调及 40 余次热试车均运行正常,满足试车的要求,证明了该软件系统稳定可靠。Labview 是专门用于开发测控软件的图形化开发平台,拥有强大的测控软件开发包,在开发速度上要较文本模式开发环境(C 语言等)有较大的优势;同时 RT 系统使测控软件在实时性和可靠

参考文献:

[1] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
[2] Jean J Labrosse. 嵌入式实时操作系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.  
[3] 王平. 计算机控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
[4] 杨乐平. Labview 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
[5] National Instrument. Rea-time OS User's Manual[M]. 2004.  
[6] 李伟民. 液氧/煤油发动机试验系统[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 50-56.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 22 页)

表 3 满足系统性能的减压阀出口压力范围

Tab.3 Qualified pressure range of the pressure reducing valve

出口流量/L·s <sup>-1</sup>	减压阀出口压力范围/MPa(绝)
4×M+4×L< Q ≤4×M+4×L+2×N	1.67~1.87
2×N≤ Q ≤4×M+4×L	1.62~2.02
1×L≤ Q <2×N	1.67~1.98

根据表 3 确定的减压阀出口压力范围,通过生产和试验,表明减压阀的出口压力范围确定合理,既能保证产品较高的合格率,又能保证姿控发动机各种工作工况下性能满足要求。

5 结论

比较分析了极限偏差分析方法、试车数据统计方法、随机误差分析方法确定减压阀出口压力范围的适用性。提出了将工作工况变化作为一项

影响性能的干扰因素,通过建立以工作工况控制的发动机全系统静态模型,较准确地计算了各工作工况下干扰因素对性能的影响系数。最后,在前述分析计算的基础上,应用随机误差分析方法计算求解,得到比较合理的姿控发动机减压阀出口压力偏差范围,从而解决了姿控发动机设计中减压阀出口压力确定的实际问题。该方法也可用于单组元、双组元和双模式轨姿控发动机设计中其它参数偏差的计算。

参考文献:

[1] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[D]. 航天工业总公司第十一研究所, 1998.  
[2] 尤裕荣. 逆向卸荷式气体减压阀静态特性分析[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 15-21.  
[3] 樊忠泽, 黄敏超, 余勇, 等. 空间推进系统工作过程的模块化建模[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 29-33.

(编辑: 王建喜)