

# 液氧/煤油发动机 试验控制系统软件架构与设计

李聪玲

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 论述了液氧/煤油发动机试验控制系统软件的架构和设计。该系统硬件采用基于 PXI 总线、模块化仪器的上下位机架构, 软件上位机采用 WINDOWS 2000 操作系统、LabVIEW DSC 和 LabVIEW RT 多线程优先级可视化编程环境, 下位机采用 Embedded LabVIEW RT 模块, 上下位机通过 Ethernet 和 DataSocket 实现连接和通讯。通过系统软件结构和程序模块设计, 实现了发动机各种状态控制、试验过程信号实时检测及动态工艺流程显示等功能, 系统具有高可靠性、高实时性、可视性、可操作性、可维护性和安全性等质量特性。

**关键词:** 液体火箭发动机; 试验系统; 软件设计

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 02-0046-08

## Software structure and design of LOX/kerosene engine test control system

Li Congling

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

**Abstract:** Software structure and design concept of the control system for the newly built rocket engine test stand are presented. The system applies the PXIbus, the modular instrument, LabVIEW DSC and LabVIEW RT, and realizes the function of sequential control, pressure regulating control, signal dynamic detection and dynamic display of test process under multiconditions of rocket engine ground tests. The new system is characterized by high reliability and safety, real time, easy operation and maintenance, better visualization.

**Key words:** liquid propellant rocket engine; test system; software design

收稿日期: 2008-07-11; 修回日期: 2008-11-13。

作者简介: 李聪玲 (1961—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术。

0 引言

以往的实时控制系统设计，由于受当时计算机和控制技术限制，开发平台大都采用基于 ISA 总线的工控机和 DOS 操作系统下的编程语言等，使软件的编程环境选择范围小、开发周期长，而且开发出的软件可复用性和可视性较差、操作复杂。随着计算机技术的迅猛发展，各种先进的工业总线、视窗型多任务实时操作系统、嵌入式实时模块、可视化编程语言等不断发展，对航天领域中的控制技术也提出了新的要求。作为航天推进系统的大型液体火箭高压补燃液氧/煤油发动机试验控制系统，不但要求在功能上应具备不同型号和同型号不同试验工况条件下发动机的各种控

制、试验过程对象检测和动态工艺流程显示等功能，而且要求具有高可靠性、高实时性、可操作性、可维护性、可视性和安全性等质量特性。在新系统设计中，通过采用基于 PXI 总线的嵌入式计算机和 Windows 操作系统下的 LabVIEW RT 平台和技术，很好地实现了系统的功能和性能，达到了系统设计的要求。

1 系统构成、功能、性能和质量要求

1.1 系统构成

系统主要由主控子系统、压力自动调节控制子系统、试验过程检测和工艺流程显示子系统、大屏幕显示和图象监控子系统、集控（手控）子系统、电源子系统和试验指挥子系统组成（图 1）。

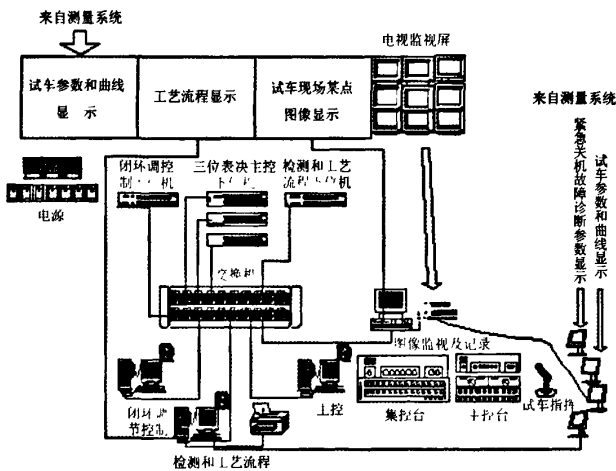


图 1 试车台控制系统组成示意图

Fig.1 Schematic of the test system

1.2 系统功能

- (1) 试验系统指挥、各受控对象手动单元测试；
- (2) 试验系统自动单元、综合测试；
- (3) 发动机电磁阀端电压、电流测试；
- (4) 试验系统加注（泄出）控制；
- (5) 试验时序自动控制；
- (6) 试验过程压力自动调节控制；
- (7) 试验过程中各受控对象状态实时检测和检测数据报告；

- (8) 试验过程中现场图象实时监控和存贮；
- (9) 试验过程中各数据参数和曲线、动态工艺流程、试验现场重要场景的大屏幕实时显示；
- (10) 试验系统容器液位和高位水池水位远距离显示。

1.3 系统性能和质量要求

- (1) 可靠性：≥99%；
- (2) 实时性：试验时序段控制精度≤10ms，试验全程控制精度≤20ms，紧急停车处理控制精度≤30ms，试验过程信号检测精度≤10ms；

(3) 通用性：实现各种型号发动机在各种不同状态下控制时，控制程序版本不变；

(4) 可视性：实时显示各种过程控制信息、动态工艺流程、数据参数、曲线、各种图象画面和容器液位等；

(5) 可操作性：用户界面清晰、操作简单方便；

(6) 可维护性：各子系统功能相对独立、接口简单明确，便于系统自动诊断、故障检查、定位和排除；

(7) 安全性：保证资源的机密性和完整性，防止非法操作和非法使用。

## 2 系统计算机硬件平台及软件功能

### 2.1 硬件平台

硬件组成见图 2。主要由主控、压力自动调节控制、试验过程检测和动态工艺流程显示子

统组成。

#### 2.1.1 主控子系统

由一台上位机和三台下位机组成，三台下位机通过以太网与上位机连接，通过 DataSocket 实现试验控制数据通讯，通过硬件表决电路实现三冗余控制。其设备选型和作用分别为：

(1) 上位机：HP ML150 服务器，IP 地址 10.10.10.10，主要完成软件编程、调试、目标代码下载和三台下位机控制状态实时监控；

(2) 下位机：美国 NI PXI-1045 机箱，NI PXI-8186 零槽控制器，1#、2#、3# 机 IP 地址 10.10.10.11、10.10.10.12、10.10.10.13，主要实现试验过程实时控制和控制信息实时传输；

(3) 下位机功能模块：美国 NI PXI-6608 定时/计数器板，NI PXI-2565 功率继电器板，NI PXI-6527 光隔数字输入/输出板，分别实现试验过程定时/计时、各种阀门驱动控制和各种开关量信号的输入/输出控制等。

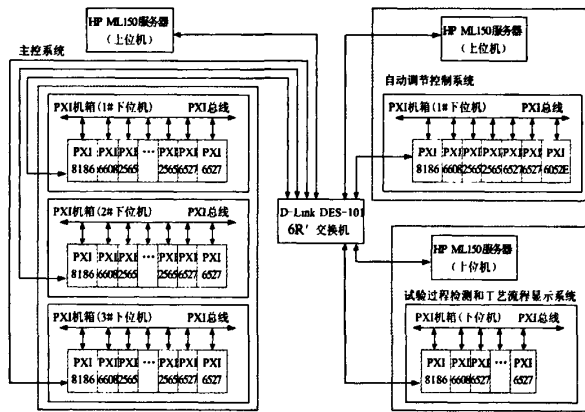


图 2 系统硬件组成框图

Fig.2 Block of the system hardware

#### 2.1.2 压力自动调节控制子系统

由 1 台上位机和一台下位机组成，上下位机通过以太网连接。

(1) 上位机：HP ML150 服务器，IP 地址 10.10.10.20，主要完成软件编程、调试、目标代码下载和下位机控制状态实时监控；

(2) 下位机：美国 NI PXI-1045 机箱，NI PXI-8186 零槽控制器，IP 地址 10.10.10.21，

主要实现试验过程压力闭环调节实时控制和处理；

(3) 下位机功能模块：美国 NI PXI-6608 定时/计数器板，NI PXI-6052E 多功能 A/D 板，NI PXI-2565 功率继电器板，NI PXI-6527 光隔数字输入/输出板，分别实现试验过程定时/计时、模拟信号采集、各种增压阀门驱动控制和各种开关量信号的输入等。

### 2.1.3 试验过程检测和工艺流程显示子系统

由1台上位机和一台下位机组成,上下位机通过以太网连接,通过DataSocket实现试验工艺流程状态数据通讯。

(1) 上位机: HP ML150 服务器, IP 地址 10.10.10.30, 主要完成软件编程、调试、目标代码下载、试验工艺流程实时显示、数据处理及各种检测数据报表的产生等;

(2) 下位机: 美国 NI PXI-1045 机箱, NI PXI-8186 零槽控制器, IP 地址 10.10.10.31, 主要实现试验过程阀门信号状态实时检测、检测数据实时传输和数据存盘等;

(3) 下位机功能模块: 美国 NI PXI-6608 定时/计数器板, NI PXI-6527 光隔数字输入/输出板, 分别实现试验过程定时/计时、所有开关量信号和阀门信号状态检测等。

## 2.2 软件功能

(1) 主控、压力闭环调节、过程检测及工艺流程显示子系统内线硬件线路检测;

(2) 系统校验;

(3) 发动机电磁阀和试验台上所有入程阀门单元、综合测试;

(4) 试验过程正常停车、各种情况下紧急停车控制及试验状态信息实时监控;

(5) 试验过程中压力自动调节控制;

(6) 试验过程中各控制指令、受控对象工作状态和工作时间实时检测, 动态工艺流程传输及显示;

(7) 试验过程中主控、压力自动调节、检测、测量、图象监视和图象记录等协调控制;

(8) 数据处理和各种数据报告产生。

## 3 软件架构与设计

### 3.1 软件架构

#### 3.1.1 开发平台选择和执行系统

为达到系统高实时性和可视性性能要求, 选用了 WINDOWS 2000、LabVIEW、LabVIEW RT, LabVIEW DSC, 其中 LabVIEW 和 LabVIEW RT 组成上位机实时开发系统;

(1) WINDOWS 2000: 上位机(主机)操作系统;

(2) LabVIEW: 上位机可视化编程语言。

(3) LabVIEW RT: 上位机实时模块;

(4) LabVIEW Datalogging/Supervisory Control (DSC) 模块: 工艺流程编程模块。

执行系统是运行在下位机(目标机)嵌入式 RTOS 上的 RT Engine, 它运行 LabVIEW RT 代码, 提供确切的实时特性。

#### 3.1.2 软件结构设计

按照软件工程化设计思想, 采用自顶向下的结构化分析和设计方法, 根据试验工艺过程, 形成系统软件功能层次结构, 见图3, 明确软件实现各种功能的需求和实现功能的过程, 完成如下系统功能软件归类及确定子系统间软件关系实现方式。

##### 3.1.2.1 主控子系统软件

(1) 线路测试监控程序、1# 线路测试程序、2# 线路测试程序、3# 线路测试程序;

(2) 系统时钟校准程序及数据处理程序;

(3) 单元测试监控程序、1# 机单元测试程序、2# 位机单元测试程序、3# 机单元测试程序;

(4) 试验控制数据文件生成程序;

(5) 试验监控程序、1# 机试验控制程序、2# 位机试验控制程序、3# 机试验控制程序。

##### 3.1.2.2 压力调节控制子系统软件

(1) 线路测试程序;

(2) 单元测试程序;

(3) 压力调节控制数据文件生成程序;

(4) 压力调节控制程序。

##### 3.1.2.3 试验过程检测及工艺流程显示子系统软件

(1) 线路测试程序;

(2) 试验过程检测程序;

(3) 动态工艺流程显示程序;

(4) 数据处理程序。

##### 3.1.2.4 子系统间软件关系实现

(1) 子系统间协调和同步实现: 3 台下位机控制程序指令信号经表决后发送, 压力调节控制程序、试验过程检测程序、测量系统各采集程序等



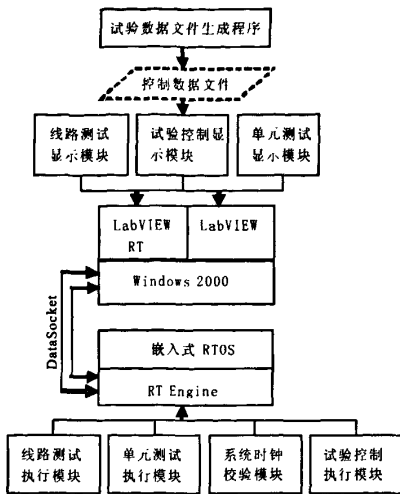


图 6 压力自动调节控制系统软件体系结构

Fig.6 Structure of the automatic pressure regulation control system

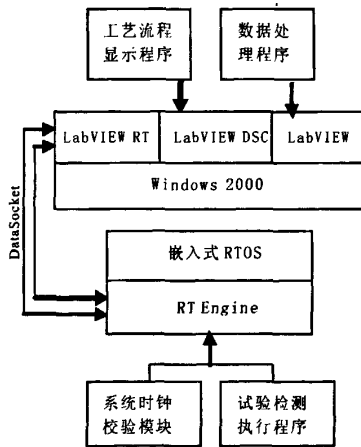


图 7 试验过程检测子系统软件体系结构图

Fig.7 Block of the checking subsystem software

### 3.2 软件设计

#### 3.2.1 功能模块设计

软件按功能分为系统硬件线路测试程序、单元测试程序、系统校验程序、试验控制数据文件形成程序、试验控制程序、试验过程检测和工艺流程显示程序、数据处理程序等。

程序模块采用结构化设计原则，以求模块功能单一、接口简单明确，以提高软件整体性能。

##### 3.2.1.1 系统硬件线路测试及单元测试程序模块设计

硬件线路测试程序主要用于系统内线每个控制通道和检测通道线路测试，单元测试程序实现试验系统对应受控对象通道测试。程序由上位机监控子程序和下位机测试子程序组成，上位机监控子程序包括用户界面模块和数据通讯模块，下位机测试子程序包括初始化模块、数据通讯模块、测试模块、数据存贮模块和复位模块等。

##### 3.2.1.2 系统校验程序模块设计

用于系统时钟精度和同步性校验。程序以引入的外部精震为基准源，对主控子系统、压力调节阀子系统、检测子系统共 5 台下位机进行时钟同步校验，校验数据放入各自内存，过程信息通过以太网在主控系统上位机显示。上位机监控子程序主要包括用户界面模块，下位机校验子程序块主要包括初始化模块、数据读取模块、校验模块、数据存贮模块和复位模块等。

##### 3.2.1.3 试验控制数据文件形成程序模块设计

形成不同型号试验文本信息、初试化控制及检测开/停车信号、正常停车控制以及各类紧急停车控制数据文件。主要由用户界面模块、数据文件形成模块、数据存盘模块、数据读取和显示模块、数据打印模块等组成。

##### 3.2.1.4 试验控制程序模块设计

按照试车任务书和试车大纲要求实现试验时序控制、闭环调节控制、各种情况下紧急停车控制。程序由上位机监控子程序和下位机控制子程序组成，上位机监控子程序包括用户界面模块和数据通讯模块，下位机控制子程序包括初始化模块、数据读取及验证模块、数据显示及通讯模块、正常停车定时控制模块、全程控制计数模块、压力调节控制模块、紧急停车定时控制模块和复位模块等。

##### 3.2.1.5 试验过程检测及工艺流程显示程序模块设计

实现试验过程各受控对象状态和控制指令检测、数据传送、存贮，工艺流程实时显示等。程序由上位机工艺流程显示子程序和下位机信号检测子程序组成，工艺流程显示子程序主要包括用户界面模块和数据通讯模块，信号检测子程序包括初始化模块、数据通讯模块、检测模块、数据

存贮模块和复位模块等。

### 3.2.1.6 数据处理程序模块设计

实现线路测试、单元测试、系统校验、综合测试、热试车等数据处理以及数据报告产生。主要包括用户界面模块、数据读取模块、数据处理模块及数据打印模块等。

### 3.2.2 可靠性设计

主控程序的可靠性设计主要从正确性、一致性和容错性三方面实现。

#### 3.2.2.1 正确性设计

(1) 试验数据生成程序严格按照试验要求生成正确的试验控制数据文件；

(2) 三台下位机试验控制程序在开车前对正常停车及各种情况下紧急停车数据进行逐项检查，只有每项数据都完全正确后试验才能开始；

(3) 三台下位机控制程序的各项功能模块采用信息隐蔽设计方法，使一个模块偶然的错误不影响其它模块的正确运行。

#### 3.2.2.2 一致性设计

(1) 三台下位机控制程序运行在相同的硬件和软件环境下；

(2) 三台下位机各种控制数据文件完全相同；

(3) 三台下位机控制程序流程、控制模式和信息传输方式完全相同，可保证上位机试验监控程序对它们的同步控制和信息显示。

#### 3.2.2.3 容错性设计

(1) 试验主控程序三冗余，对于每个程序的控制信号经三模表决后作为输出，其控制模型见图8。即只有其中二个或三个程序正常工作时，系统才能正常工作，输出正确结果；

(2) 对2#机和3#机控制程序中所有的阀门控制信号和启动、停止等系统间时序同步信号进行双冗余控制。

设图中1#、2#、3#下位机控制程序可靠度分别为 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ，控制单元可靠度均为 $R_*$ ，则

$$R_2=R_3=1-(1-R_*)(1-R_*)=R(2-R_*)$$

整个系统的可靠度为：

$$R=1-(1-R_*)(1-R_2)(1-R_3)=1-(1-R_*)(1-R(2-R_*))^2$$

设 $R_*=0.9$ ，则1#机控制程序可靠度为0.9，2#和3#机控制程序可靠度均为0.99，三台

下位机控制程序同时运行的可靠度为0.99999。

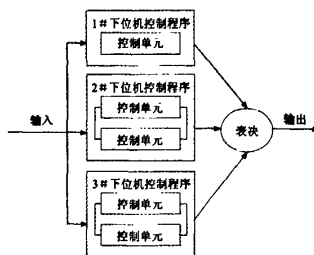


图8 主控子系统三模冗余

Fig.8 Three-mode-tolerance main control subsystem

### 3.2.3 实时性设计

系统实时性设计基于实时硬件平台和实时开发系统，采用了LabVIEW RT多线程优先级、优化循环时间等设计技术。

#### 3.2.3.1 LabVIEW RT多线程优先级设计

LabVIEW RT支持自动多线程，只要VI代码并行执行，就可被分配到多个执行线程内同时运行，多个线程可按实时性要求设置成不同优先级，一个执行系统的优先级从高到低依次为time-critical priority (highest)、high priority、above normal priority、normal priority、background priority (lowest)，高优先级线程抢占低优先级线程处理器资源，同等优先级线程则可等时间片共享。在试验程序设计中，并行运行的线程有正常停车定时控制线程、全程控制计时线程、紧急停车信号采集及处理线程、主机工作计时线程、控制信息显示线程及数据通讯线程，其中正常停车定时控制线程是按照试验控制时序，完成各个控制信号的定时发出和时间校准，是决定试验控制系统实时性的关键，优先级设置为time critical priority，全程控制计时线程主要完成试验过程全程计时，它时间的及时读取决定了定时控制线程中时间校准的精度，优先级设置为high priority，为及时采集紧急停车信号以便完成相应的紧急处理，将紧急停车信号采集线程设置为above normal poirity，另外数据通讯及控制信息显示线程，主要完成试验过程中上下位机数据通讯及控制过程信息实时显示，其优先级设置为normal poirity。

#### 3.2.3.2 优化循环时间设计

由于所有的实时系统都存在一定的“jitter”(循环程序段中的休眠时间,它相对于理想的循环时间是非常小的),这就意味着实际的循环时间可能会或多或少于理想的时间,而系统不能很好地实现实时性能指标,很大程度上是因为循环程序中有较大或很大的“jitter”。

主控程序中每一个优先级线程都执行于对应循环内,在每个不同优先级线程循环中适当设置 Until Next ms Multiple 函数输入值,既可有效协调程序执行,避免优先级导致或饥饿现象发生,又可最小化系统的“jitter”,提高控制精度。例如正常停车定时控制线程循环,优先级为 time-critical priority (highest),如不设置 Until Next ms Multiple 函数,就可能会在整个控制过程中一直独占处理器资源,使正常停车定时控制线程因得不到全程控制计时线程的基准值而不能进行有效的时间校准、紧急停车和紧急处理得不到响应、控制信息不能通讯和显示等,而设置 Until Next ms Multiple 函数输入值不当,又会该函数失去作用或产生较大的“jitter”。

在控制程序中确定每个循环 Until Next ms Multiple 函数输入值的方法是:首先测试各个循环中代码的实际运行时间,再根据对应循环线程在试验过程中的实时性要求确定该循环的休眠时间,运行时间和休眠时间相加作为 Until Next ms Multiple 函数的输入值,然后对整个控制程序进行充分调试,直到程序能在满足实时性要求基础

上稳定、可靠运行。

## 4 结论

衡量一个控制系统软件的质量特性主要是正确性、可靠性、实时性、可测试性、可使用性和可维护性等,该控制系统软件在 PXI 总线 RT 硬件设备基础上,选用了可视化 RT 开发系统、RT 引擎执行系统,通过对整个系统软件的合理架构与设计、程序编码及调试、系统测试及评审确认,投入运行。在连续几年来的热试车中,系统均可按照试验任务书和大纲要求完成各种控制、信号检测和工艺流程显示等任务,运行稳定、可靠,实时性达到了试验时段控制精度 $\leq 5\text{ms}$ 、全程控制精度 $\leq 10\text{ms}$ 、紧急停车处理控制精度 $\leq 30\text{ms}$ 、过程信号检测精度 $\leq 10\text{ms}$ 的指标,且可测试性、可使用性和可维护性强。

### 参考文献:

- [1] 张辉,郭立.液氧/煤油发动机摇摆测控系统技术要求与实现[J].火箭推进,2007,33(1):49-55.
- [2] 蒋慰孙,俞金寿.过程控制工程[M].北京:中国石化出版社,1998.
- [3] 王志武.基于虚拟仪器技术的信号处理与故障检测系统[J].火箭推进,2007,33(4):52-56.
- [4] 王顺晃,舒迪前.智能控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.

(编辑:王建喜)

(上接第 45 页)

另一方面,可避免靠经验和试验确定权值和阈值的弊端,较全面、准确地表达所诊断故障的“知识”,提高网络非线性映射的能力。并应用于液体火箭发动机故障检测中,取得较好的效果。

### 参考文献:

- [1] 陈明.神经网络模型[M].大连:大连理工大学出版社,1995.

- [2] 钟路,饶文碧,邹承明[M].人工神经网络及其融合应用技术.北京:科学出版社,2007.
- [3] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [4] Yutaka Fukuoka, Hideo Matsuki, Hasuki, Hasruiyuki Minamitani, et al. A modified back-propagation method to avoid false local minima [J]. Neural networks, 1998, (11): 1059-1072.

(编辑:王建喜)