

文章编号:1001-2486(2005)04-0008-05

面向对象的燃气发生器地面试验柔性控制模型与实现*

李海涛,王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:根据燃气发生器地面试验对控制的需求,分析了其控制行为,提出了面向对象的燃气发生器地面试验柔性控制模型。模型先进合理,符合目前测控技术发展的方向。在该模型基础上实现了柔性控制系统,能够满足各种型号的燃气发生器地面试验对控制的需求,并在试验中得到了成功的应用。与以前的控制系统相比,该系统具有可靠性高、结构简单、操作简单灵活等特点。

关键词:面向对象;燃气发生器;地面试验;柔性控制模型

中图分类号:V433 **文献标识码:**A

The Object-oriented Flexible Control Model for Ground Test of Gas Generators and Its Realization

LI Hai-tao, WANG Zhen-guo

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the ground test control of gas generators, we analyze the control behavior, and put forward an advanced object-oriented flexible control model (OOFM) for ground test of gas generators, which accords with the developing direction of the measurement and test technology. Based on the OOFM, a flexible control system (FCS) is realized, which can meet the requirements of the ground test control of all kinds of gas generators. The FCS has been used in the test successfully. Compared with the older test control system, the new system has higher dependability, simpler structure and more flexible manipulation.

Key words: object-oriented; gas generators; ground test; flexible control model

燃气发生器(简称燃发器)在工作原理上类似于液体火箭发动机,是一种利用氧气和酒精(或煤油等其他燃烧剂)燃烧生成预定流量、压力和温度的高温燃气的装置。燃发器在液体火箭发动机及其高空试车台真空系统、高超声速吸气推进研究所需地面试验系统、火箭冲压、气动激光器和化学激光器压力恢复系统中得到了广泛应用^[1,2]。对于某些科研试验单位,需要经常对不同型号的燃发器进行各种地面试验,地面试验采用的控制阀门的数量、型号及其电气特性、控制时序各不相同,因此,燃发器地面试验控制系统必须是一个通用的控制平台,具有一定的柔性,能够适应各种不同型号燃发器的地面试验,通过简单的前端硬件更换(例如阀门)和软件配置就能够完成地面试验控制。

1 基本概念

为方便描述与建模,引入了对象、资源以及 I/O 接口无关性等几个概念。

对象是指系统中与试验直接相关、所有可以控制的硬件元素(例如阀门、传感器等)和软件元素(例如控制时序、测控数据等),一个对象又包含若干属性。

资源是指在系统软件中所有可以管理的元素,包括硬件资源(I/O 模块、I/O 模块上的通道、信号转接通道等)和软件资源(驱动程序等),对象也是一种资源。

I/O 接口是指系统中连接阀门和传感器的硬件接口以及系统软件与 I/O 模块的软件接口。而 I/O 接口无关性是指通过定义一定的软硬件标准接口,当系统在更换阀门、传感器或 I/O 模块时,只需在软

* 收稿日期:2004-12-18

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:李海涛(1977—),男,博士生。

件中进行相关的配置,而无需修改系统中的硬件电路结构与软件。

2 柔性控制模型

柔性控制模型共分为3层:试验控制行为模型、硬件模型和软件模型,如图1所示。试验控制行为模型是柔性控制模型的底层,是控制系统操作的对象;硬件模型是柔性控制模型的中间层,是控制系统建立的硬件基础;软件模型是柔性控制模型的顶层,是控制系统建立的核心。

2.1 试验控制行为模型

燃发器地面试验一般采用挤压式供应系统,系统管路由一个或数个阀门控制,图2所示的是一个简化的典型氧化剂管路系统^[3]。

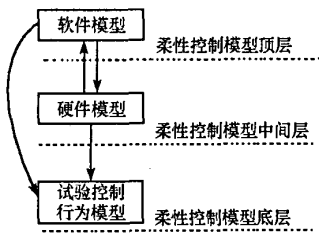


图1 柔性控制模型

Fig.1 The hierarchy of flexible control model

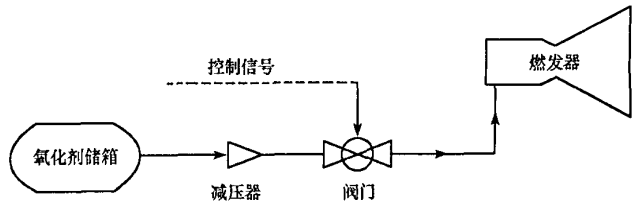


图2 氧化剂管路系统示意图

Fig.2 The schematic figure of oxidant pipeline system

进行燃发器地面试验时,系统中的系列阀门按照一定的控制时序进行开关动作,完成试验控制。一个控制时序通常由多个时序步骤组成,每一个时序步骤都包含时间点、阀门对象、阀门开关动作等3个基本元素。对于某些特殊的地面试验,需要添加一些特殊的控制条件,例如,燃发器某一个位置上的压力达到一定的压力值时,才能进行一些阀门的开关动作,否则进入另外的控制时序,如紧急关车。带有控制条件的时序步骤除了3个基本元素外,还包括一个或多个控制条件,因此时序步骤还应当扩展是否使用条件控制、压力阈值等2个元素。一个抽象出来的燃发器地面试验典型控制时序如图3所示。

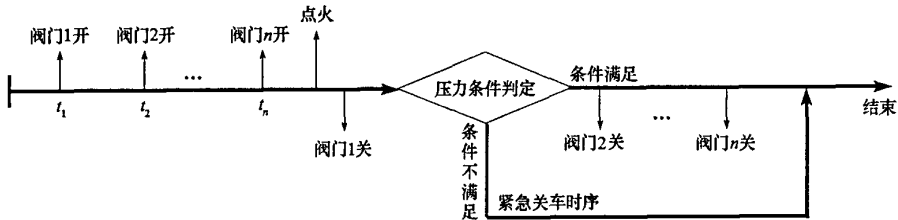


图3 燃发器地面试验控制时序示意图

Fig.3 The schematic figure of control scheduling used in ground test of gas generators

综合上述分析,燃发器地面试验控制行为可以抽象为控制时序,控制时序由多个时序步骤组成,每个步骤包含3个基本元素(时间点 T 、阀门对象 $Object$ 、阀门动作 $Action$)和2个扩展元素(是否使用条件控制 Use 、压力阈值 $Value$)。时间点确定阀门对象动作发生的时间,阀门对象和阀门开关动作确定一个阀门的动作,是否使用条件控制和压力阈值确定该阀门是否进行动作。一个控制时序可由一个集合表示: $\{CtrlTS \mid T, Object, Action, Use, Value\}$ 。

2.2 硬件模型

通常情况下,控制系统硬件主要由阀门、传感器、信号调理、信号转接、直流电源、信号电缆、I/O 模块和计算机等8部分组成,如图4所示。简化、抽象控制系统中的硬件组成元素,按照元素之间信号传递的逻辑关系,参照TCP/IP模型的分层^[4]思想,建立硬件模型,如图5所示。

硬件模型分为四层:控制对象层、信号传输层、信号控制层和系统层,模型中通过定义一系列机械、

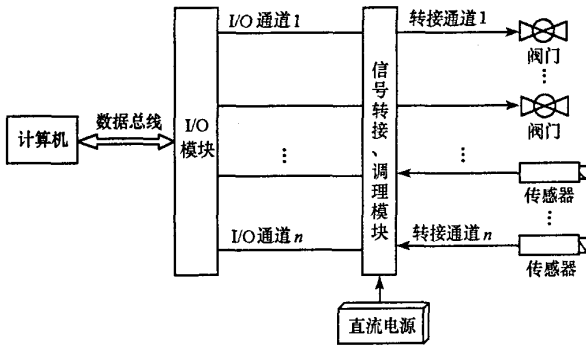


图4 控制系统的组成
Fig.4 The composing of control system

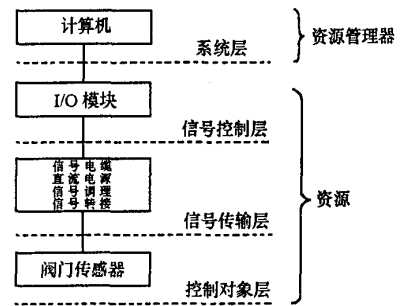


图5 柔性控制系统硬件模型
Fig.5 The hardware model of flexible control system

电气及硬件接口标准,实现了 I/O 硬件接口无关性。

(1) 控制对象层

控制对象层是模型的底层,位于控制系统的最前端,包括阀门和传感器。该层定义了控制对象所需要的控制电压、控制电流、传感器供电电压、传感器输出信号形式(电压或电流)、信号传输线制(2 线制或 4 线制)、接插件的形式和尺寸等标准。可以根据燃发器地面试验的实际需要选择合适的阀门和传感器,但是必须符合上述标准。

(2) 信号传输层

信号传输层是模型的中间层,位于控制对象层和信号控制层之间,主要包括信号传输电缆、直流电源(为控制对象供电)、信号调理以及信号转接板等。该层定义了信号传输形式(电压传输或电流传输等)、信号传输电缆的芯数、直流电源标准电压、额定功率、信号调理形式、信号转接板上的通道数以及接插件的形式和尺寸等标准。

(3) 信号控制层

信号控制层是模型的上层,由 I/O 模块组成,提供控制信号,并采集传感器返回的数据。该层定义了 I/O 模块的总线、控制通道的通道数、输出信号形式(例如标准的 TTL 信号等)、时间基准、数据采集通道的通道数、输入信号形式(电压或电流)、输入信号范围、最高采样频率以及采样精度等标准。

(4) 系统层

系统层是模型的顶层,由计算机组成,通过数据总线与信号控制层相连,并通过计算机中的控制系统软件管理系统中的资源,完成试验控制。前 3 层中所有的对象都是系统中的资源,系统层则是资源管理器。

硬件模型中的层与层之间相互独立,通过每一层所定义的标准,按照信号传递逻辑关系相互连接。硬件模型指导控制系统硬件的组建方式。

2.3 软件模型

软件模型是柔性控制模型的核心,建立在试验控制行为模型和硬件模型的基础上,模型的建立面向对象,且与硬件无关。

对于硬件模型中的 I/O 模块上的某一个 I/O 通道而言,这个 I/O 通道通过信号电缆连接到信号转接模块的某一个转接通道上,控制信号经过这个转接通道后,再通过信号电缆连接到阀门上,其通道物理连接关系如图 6 所示。I/O 通道、转接通道和控制对象等 3 个对象,分别由 3 个对象集合来表示:

$$\{IOCh \mid IOCh_ID\}, \{ConnectCH \mid ConnectCH_ID\}, \{Object \mid Object_ID, Object_Name\}$$

由通道物理连接关系,可以得到一个逻辑上的虚拟通道映射,虚拟通道映射包括 I/O 通道、转接通道和控制对象等 3 个元素,系统中所有的虚拟通道映射由一个集合表示:

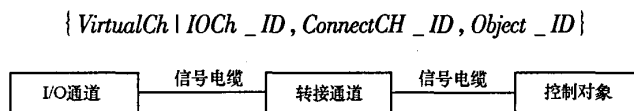


图6 通道物理连接关系

Fig.6 The relationship of physical channel connection

系统软件通过虚拟通道映射来控制相对应的物理通道中的阀门的开关动作,而多个阀门在不同时刻的开关动作集合就是试验控制行为模型中的控制时序集合 $CtrlTS$ 。每一个试验都有一个控制时序集合,为便于管理,需要为控制时序集合添加两个属性:编号 $CtrlTS_ID$ 和名称 $CtrlTS_Name$ 。这样,可以用一个控制配置集合来表示所有的控制时序集合:

$$\{ CtrlTSCfg \setminus CtrlTS_ID, CtrlTS_Name, CtrlTS \}$$

系统软件根据上述6个集合相互的逻辑关系,可以完成试验控制。由于软件对I/O模块的控制需要该模块的仪器驱动程序,为了实现I/O接口无关性的目标,采用国际通用的VISA标准编写通用仪器驱动程序。仪器驱动程序将I/O模块的操作行为进行抽象,这些行为包括打开仪器 $OpenInstr$ 、关闭仪器 $CloseInstr$ 、I/O通道参数配置 $IOChCfg$ 、I/O通道输入控制 $IOChIn$ 、I/O通道输出控制 $IOChOut$ 、仪器触发 $InstrTrig$ 等。这些行为所对应的函数组成一个仪器驱动程序,所有的仪器驱动程序由一个集合表示:

$$\{ InstrDriver \setminus OpenInstr, CloseInstr, IOChCfg, IOChIn, IOChOut, InstrTrig, \dots \}$$

系统软件通过一个管理模块对上述对象集合和系统中所有的资源进行管理,并通过系列人机交互界面与用户交互,这样,就建立了柔性控制系统软件模型,如图7所示。

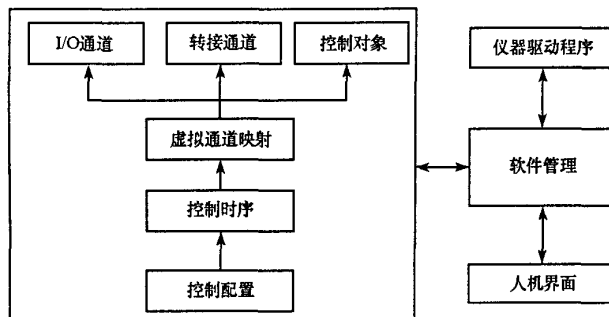


图7 柔性控制系统软件模型

Fig.7 The software model of flexible control system

3 柔性控制系统实现

采用PLC(可编程逻辑控制器)作为I/O模块,标准电磁阀和气动阀组合作为燃发器地面试验供应系统中的阀门,标准膜片式压力传感器测量燃发器压力,标准直流电源为阀门和传感器供电。阀门控制电路采用两级继电器设计,采用模块化、开放式系统架构,组建控制系统硬件。

上述的硬件设计均采用成熟的技术,特别是PLC技术,PLC是目前控制领域中应用非常广泛的一种控制设备,具有可靠性高、使用简单等特点,这从根本上保证了控制系统硬件的可靠性;所有的硬件设备均采用符合各种标准(特别是航天部有关标准)的硬件设备,保证了系统硬件的通用性和可互换性,不仅维护方便,也降低了成本。另外,采用开放式的硬件结构,可以根据将来的需求很方便地增加控制通道容量。

采用先进的图形化测控软件开发平台LabVIEW开发系统软件,软件开发引入了虚拟仪器技术、关系型数据库技术、面向对象技术以及开放式通用测试系统软件架构^[4]技术。数据库的引入使得程序、控制时序、数据相互分离,软件与硬件无关,与控制对象无关,与控制时序无关。虚拟仪器技术的引入降低了软件开发的复杂度,并提供了简洁友好的人机交互界面。

在系统软硬件安装完毕后,用户直接面对的是系统软件,而不是硬件。在软件的可视化窗口中通过一系列的简单操作,即可控制硬件完成燃发器的试验,操作过程如下:

- (1) 根据硬件的安装情况配置虚拟通道映射;
- (2) 设定各种控制时序;
- (上述两步保存后,以后无需重新配置,通过软件菜单可以直接调出)
- (3) 控制时序下载至 PLC;
- (4) 启动,完成试验控制。

柔性控制系统在某型引射器配套燃发器地面试验中得到了成功的应用,控制数种型号的燃发器完成了数百次地面试验。

与以前传统的基于内插式 PCI 数字 I/O 卡和文本编程语言的控制系统相比,该系统有以下特点:

- 建立了柔性控制模型,简化了系统硬件和软件的结构,提高了系统的标准化程度、通用性和可扩展性。

- 利用 PLC 取代原来的内插式 PCI 数字 I/O 卡,提高了可靠性、控制时间精度和控制通道的数量。

- 利用软件实现并扩展了部分以前由硬件实现的功能,例如紧急停车。

- 采用图形化软件编程技术和虚拟仪器技术开发控制软件系统,大大降低了软件开发的工作量。

- 全部采用图形化人机界面,实现了控制过程的全部可视化操作,操作简单、直观、灵活。可以根据任何硬件改动(例如更换不同类型的阀门、增加阀门和控制通道的数量等)或时序改动,在软件中做出相应的配置。另外,软件提供方便快捷的在线帮助功能。

- 数据库技术的引入大大提高了系统软件在测控数据管理、存储等方面的能力。

- 从测控系统的操作使用的角度讲,降低了对用户测控专业知识要求的程度,使得非测控专业的试验人员经过简单培训即可使用该系统完成试验。

4 结 论

柔性控制模型面向对象,但与对象无关,可以满足燃发器地面试验的控制需求。在此基础上建立的柔性控制系统可靠性高、结构简单、操作灵活,可视作一个装备级的控制系统,便于非测控专业的试验人员使用。若在模型中加入反馈控制模型^[5]、故障诊断模型^[6]和非线性自适应逆控制模型^[7],则模型可推广到大型液体火箭发动机、固体冲压火箭发动机地面试验以及其他类似的试验中使用。另外,建立模型的思想甚至可以推广应用到火箭发动机试验测试系统中。

柔性控制模型先进合理,符合目前测控技术发展的方向,而且模型可以向建立火箭发动机地面试验控制系统软硬件通用设计规范的方向发展。

参 考 文 献:

- [1] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [2] 徐万武. 二次流对超声速环空引射器真空度的影响[J]. 国防科技大学学报, 2003, 3.
- [3] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [4] 于功敬. VXI 通用测试软件框架结构的研究[J]. 计算机自动测量与控制, 1999, 7 (3).
- [5] 张育林. 变推力液体火箭发动机及其控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 刘冰. 液体火箭发动机智能化故障诊断与健康评估系统研究[D]. 国防科技大学, 1999.
- [7] 卢志刚. 非线性自适应逆控制及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

