

长期在轨推进系统故障诊断实时仿真技术研究

赵博¹, 满益明¹, 邹彦², 张凯宏³

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 山东航天电子技术研究所, 山东烟台 264000;
3. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘要: 为了解决长期在轨航天器推进系统故障常规地面检测费时费力且无法完全包络全部故障模式的问题, 提出了长期在轨推进系统故障诊断实时仿真技术方案, 建立了长期在轨推进系统故障诊断实时测试平台; 通过建立推进系统实时仿真模型, 实现对长期在轨推进系统的实时仿真; 依托实时测试平台对推进系统故障诊断策略进行仿真优化, 对在轨飞行器故障进行诊断, 并对处置预案进行验证支持故障处置决策; 长期在轨推进系统故障诊断实时测试平台有效缩短了器上故障诊断策略的优化迭代周期, 同时节省了大量原本用来进行试车的经费。

关键词: 长期在轨; 推进系统; 实时仿真; 故障诊断

Research on Real-time Simulation Technology of Fault Diagnosis of Long-term On-orbit Propulsion System

ZHAO Bo¹, MAN Yiming¹, ZOU Yan², ZHANG Kaihong³

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Shandong Institute of Aerospace Electronic Technology, Yantai 264000, China;

3. Xi'an Institute of Aerospace Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to solve the problems of time-consuming and laborious conventional ground detection in propulsion system faults, which are prone to faults in long-term on-orbit spacecrafts and unable to envelope all fault modes, a real-time simulation scheme for fault diagnosis in the long-term on-orbit propulsion system is proposed, and a real-time test platform for fault diagnosis in the long-term on-orbit propulsion system is established. The real-time simulation of the long-term on-orbit propulsion system is realized by establishing the real-time simulation model in the propulsion system. Based on the real-time test platform, the fault diagnosis strategy of the propulsion system is simulated and optimized, the fault of on-orbit aircraft is diagnosed, and the disposal plan is verified to support the fault disposal decision. The real-time test platform for fault diagnosis in the long-term on-orbit propulsion system effectively shortens the optimization iteration period of the on-board fault diagnosis strategy, at the same time, it saves a lot of funds originally used for fire tests.

Keywords: long-term on-orbit; propulsion system; real-time simulation; fault diagnosis

0 引言

随着大型应用卫星、空间站、载人飞船、月球和深空探测器等长期在轨航天器的迅速发展, 对航天器的在轨可靠性提出了更高要求。通过对公开发布的国外航天器共计 527 个在轨故障进行分析, 推进、控制、供配电发生故障的比例最高, 达 55% 以上, 主要发生的故障包括推进剂泄漏、阀门失效、管路堵塞、推进剂与贮箱材料发生化学反应、发动机羽流影响等^[1]。推进系统在轨发生故障的后果轻则某发动机支路无法提供推力, 影响控制品质, 重则造成整器爆炸, 任务失败。

长期在轨推进系统主要采用常规双组元推进系统, 采用绿色四氧化二氮 (MON-3, Mixed of nitrogen-3) 和甲基肼 (MMH, monomethyl hydrazine) 为推进剂, 采用“挤压

式”供应系统, 主要由气瓶、电爆阀、减压器、自锁阀、贮箱、电磁阀、推力室及气液管路等组成。

推进系统在设计过程中为了提高系统可靠性, 规避在轨出现故障的可能性, 对关键零部件通常采取冗余备份设计, 同时开展地面测试充分暴露设计制造风险^[2-3]。

目前常规的地面系统测试主要包括冷态联试, 地面整机试车以及静态模拟测试。但是冷态联试、地面整机试车耗费大, 周期长, 且具有一定安全风险, 实施次数较少, 无法充分暴露潜在风险。静态模拟测试取决于初始条件的合理性和全面性, 工作量大^[4-14]。

为了解决长期在轨航天器易出现故障的推进系统故障常规地面检测费时费力且无法完全包络全部故障模式的问题, 本文提出了一种长期在轨推进系统故障诊断实时仿真技术方案。依据冷态联试及整机试车数据建立推进系统实

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-05。

作者简介: 赵博 (1991-), 男, 陕西宝鸡市人, 博士, 工程师, 主要从事推进系统方向的研究。

引用格式: 赵博, 满益明, 邹彦, 等. 长期在轨推进系统故障诊断实时仿真技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 28-33.

时仿真模型, 建立推进系统故障诊断实时仿真测试平台, 对推进系统开展动态测试, 充分暴露潜在风险, 优化控制策略, 提高推进系统长期在轨可靠性。

1 系统结构及原理

一般推进系统作为推力输出系统, 设置有控制单元接收上游系统电磁阀开关机指令以及上游系统管理指令, 控制推进系统相关电爆阀、自锁阀、电磁阀开关, 实现推力输出以及对推进系统出现故障的在轨识别, 在轨隔离。基于此, 以控制单元为节点, 搭建推进系统故障诊断实时测试平台^[15-16]。

推进系统故障诊断实时测试平台系统 (以下简称: 测试平台) 基于 C/S 架构并采用模块化设计, 针对测试平台的需求开发而成, 基于二维视景软件及 VeriStand 仿真软件、LabView 软件从上位机控制模型创建、测试时序定制、推进系统仿真模型建立等方面建立起实时仿真环境并提供必要的硬件接口资源, 测试平台拓扑图参见图 1, 此平台具备两大测试模式:

1) 由上位机、推进系统控制单元及模拟负载设备一起构成闭环系统, 进行纯模型的实时数字仿真, 完成对推进系统控制单元相关故障策略的测试及验证, 以下简称 RCP 模式;

2) 上位机、推进系统控制单元及真实负载设备一起构成闭环系统, 进行硬件在回路仿真, 完成对推进系统控制单元硬件回路测试及验证, 以下简称 HIL 模式。

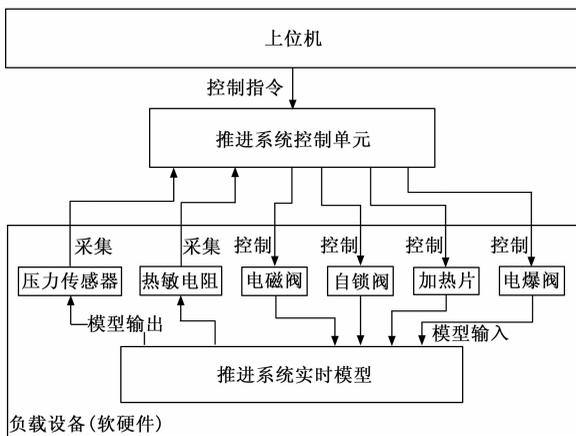


图 1 测试平台拓扑图

测试平台如图 2 所示, 由 4 个相对独立的部分组成, 各部分功能概述如下:

1) 上位机实时测试平台: 由上位机、显示器、测试平台软件、LabviewRT 实时控制模型及 1553 通信板卡组成。其中测试平台软件包括: 二维视景软件、LabView 模型编辑软件、VeriStand 监控软件。实时控制模型模拟上游系统相关指令, 并通过 1553 通信与推进系统控制单元进行交互;

控制策略实施, 指令转发, 阀门供电等功能的节点单机, 为测试平台主要测试对象;

3) 推进系统等效器: 运行 LabViewRT 实时推进系统模型, 由仿真机箱、仿真机处理器、推进系统实时模型、模拟量采集、模拟量输出板卡、真实负载 (电磁阀、自锁阀、加热器、电爆阀、压力传感器、热敏电阻, 选连) 等组成;

4) 电源系统: 由电源适配箱、电源汇接面板组成, 为上位机实时测试平台、推进系统控制单元、推进系统等效器等提供 220 V 交流电源及 28 V 直流电源, 确保系统正常运行。

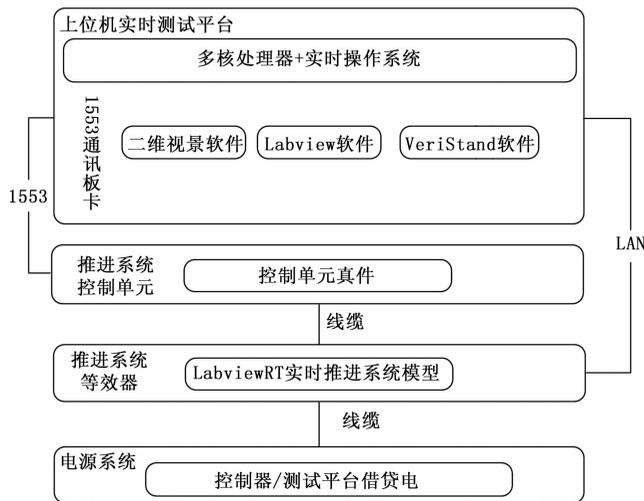


图 2 测试平台总体架构图

2 系统硬件设计

测试平台的硬件主要包括上位机实时测试平台、负载模拟设备以及供电等几大部分。

2.1 上位机实时测试平台

上位机实时测试平台同时运行二维视景软件、LabView 模型编辑软件及 VeriStand 软件, 具备测试序列编辑、模型搭建及运行、二维视景监控、模型编译下载等功能。其中上位机选用戴尔 T5810 型号, 操作系统选择 Windows7 64 位版本, 与其他分系统间通过网线交互。实时仿真机基于 PXIe 计算机箱, 配备相关处理器卡、通讯板卡等^[17-18]。

仿真机箱选用 NI PXI-1042, NI PXI-1042 是设计用于各种测试和测量应用的高性能 8 槽插小尺寸高性能多功能机箱。其同时兼容 cPCI 和 PXI 板卡, 因此具有较丰富 IO 板卡选择余地; 系统带宽最大可以达到 132 MB/s。通过编程方式对机箱背板上的触发路由模块进行配置, 可以轻松地实现触发器在设备之间的路由。与 CompactPCI 兼容的机箱具有 1 个用于设备同步的低抖动 10 MHz 参考时钟。

PXIe-8840 是一款基于 Core i7-5700EQ 处理器的高性能嵌入式控制器, 是以 X86 处理器卡为核心构造的, 可用于 PXI 系统。结合 2.6 GHz 基频、3.33 GHz 双核处理器和标准配置为 4 GB 单通道 1, 600 MHz DDR3 RAM, 模型仿真周期在 100 μs 以内, 内存配置为 4 GB。因此, 该控制器非

常适用于需要大量处理器的模块化仪器和数据采集应用。

2.2 推进系统等效器

推进系统等效器设备安装在 1 个 24 U 高的机柜中，主要包括等效器主机、等效器上位机、仿真机、负载模拟箱、1 台 KVM 模块、1 个路由器及其配套电缆。

推进系统等效器设备可使用模拟负载测试电缆连接负载模拟箱模拟电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器负载组成快速原型机测试模式 (RCP, rapid control prototype)，系统组成结构如图 3 所示。

当需要连接真实负载测试时，可使用转接电缆同时连接模拟负载和真实负载组成硬件在环测试模式 (HIL, hardware in the loop)，连接模拟负载和真实负载测试时，系统组成结构如图 4 所示。

等效器主机采用 CPCI 总线结构，内置 CPCI 电源模块、控制计算机模块、数字信号测量模块、模拟量测量模块、模拟量输出模块、电阻模拟输出模块、信号调理模块等。

等效器可以完成电磁阀、自锁阀及加热器的驱动电压和脉宽采集、压传供电电压采集、压传模拟信号以及电阻模

拟信号的输出等功能。使用的主要板卡包括：

1) 模拟量采集板卡：选用的模拟量采集板卡采用高速 16 位 ADC，采集精度 10 mV，采样速率：100 kHz，信号输入范围：0~5 V，0~10 V，-5~+5 V，-10~+10 V 可选，具备总线，供电隔离能力。

2) 数字量输入输出板卡：推进系统阀门通常为两大类信号：脉冲信号和电平信号。这两种信号的共同点是都是位口信号，因而硬件上可以采用通用的数字量输入输出板卡实现。采用高速数字隔离器对数字通路电路进行隔离，增强系统抗干扰能力，保护上位机免受现场异常信号的破坏。

3) 模拟量输出板卡：选用的模拟量输出板卡选用精度为 0.1% 的高精度电阻实现，电阻模拟精度可达 0.1%，模拟电阻范围可达 35 Ω~71 kΩ。

4) 电阻模拟板卡：选用的电阻模拟板卡采用 12 位 DAC，DA 建立时间 40 μs，量程 ±10 V，具备总线，供电隔离能力。

等效器上位机通过网线与等效器主机以及仿真机通讯，上位机运行用户界面程序，完成数据显示、数据处理、用户操作、故障模拟、流程控制以及数据存储、数据查询等功能。

仿真测试机是一台高性能的 PC 机，运行 LabVIEW RT 实时操作系统，具备精确定时性能，闭环控制周期精度可达 μs 级，推进系统动态特性模型运行在 LabVIEW RT 实时操作系统下。

测试主机和仿真测试机均运行 LabVIEW RT 实时操作系统，通过数据交互，形成了一个完整的硬件在环系统，既满足了实时性的要求，同时也提高了仿真测试器的性能。

负载模拟箱内安装电磁阀、自锁阀、电爆阀以及加热器的模拟件，模拟件集中布局在模拟负载箱中，集成度高、体积小、重量轻，负载模拟箱前面板设置状态指示灯，便于察看和操作，同时在两侧面板及顶板设计散热孔，具备良好的散热功能。

2.3 供配电系统

供配电系统为上位机实时测试平台、推进剂系统等效器以及推进系统控制单元等提供系统电源，确保系统正常运行。

电源分为设备电源和设备接口电源。

1) 测试设备电源：上位机实时测试平台、推进系统等效器（测试上位机、测试主机、仿真测试机、路由器、串口服务器）等设备的供电电源，由外部 220 VAC 提供。设备电源与其他部分电源全部隔离。

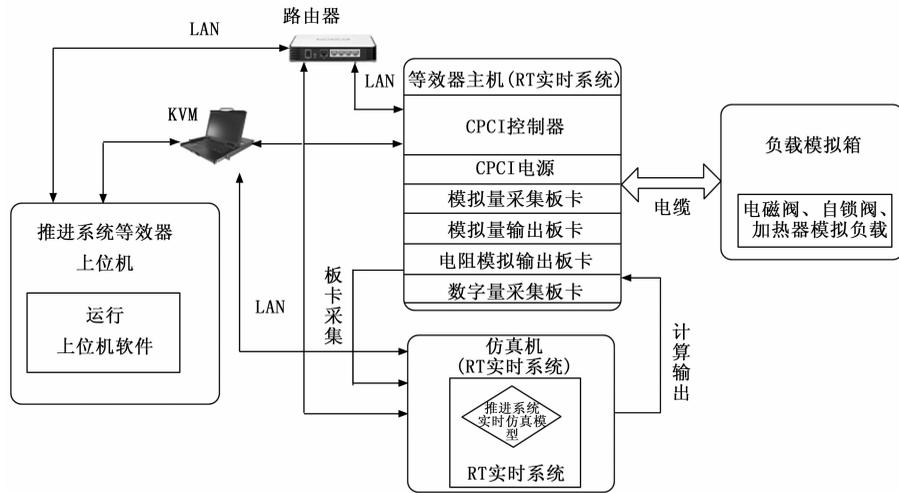


图 3 RCP 模式等效器组成

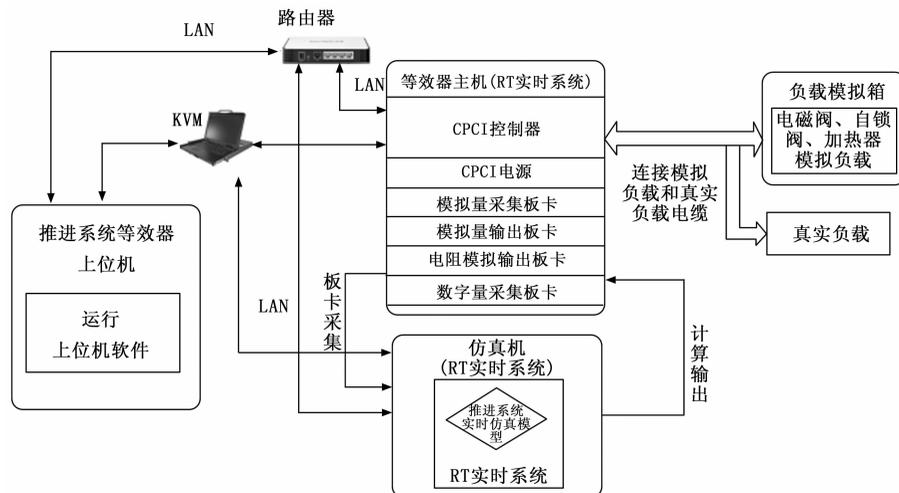


图 4 HIL 模式等效器组成

2) 测试设备接口电源: 给测试设备的接口电路供电, 接口电路用于测试信号调理, 接口电源与被测对象的二次电源共地, 与测试设备电源隔离, 具有可靠地过压、过流保护功能。

3) 器上设备电源: 推进系统控制单元的供电电源, 为 28 VDC。与测试设备电源、测试设备接口电源全部隔离。

3 系统软件设计

由于测试平台采用分布式架构设计, 软件主要分为上位机实时测试平台软件 (综合管理软件、二维视景软件)、推进系统等效器软件等。

3.1 上位机实时测试平台软件

3.1.1 综合管理软件

测试系统综合管理采用 NI VeriStand 软件, 可同时用于硬件在环模式 (HIL) 测试系统及快速原型机模式 (RCP) 系统等实时测试的应用, 能提供如主接口通信、数据记录、激励生成和 I/O 配置等必需的常用功能。模拟上游系统完成与推进系统控制单元间的 1553 通讯, 实现对控制单元的外部控制, 主要界面如图 5 所示。

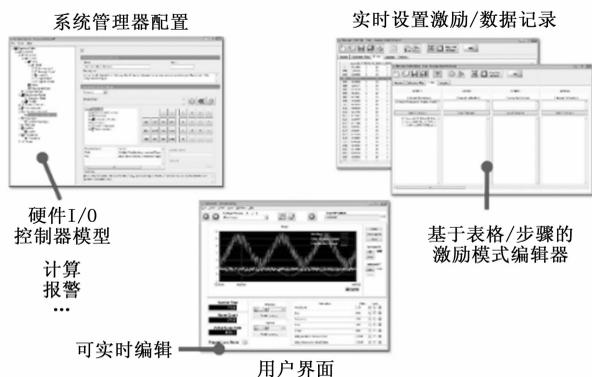


图 5 综合管理软件界面

3.1.2 二维视景软件

通过二维视景软件创建推进系统中多个元件的模型, 包括气瓶、贮箱、推力室、自锁阀、电磁阀、管路等^[19-21]。以推进系统控制单元与实时测试平台间 1553B 通信数据为输入, 对推进系统各零部件状态进行综合显示, 同时与推进系统等效器相关软硬件状态进行比对。对推进系统控制单元以及推进系统在轨状态进行综合考核, 界面示意如图 6 所示。

3.2 推进系统等效器软件

3.2.1 逻辑思路

推进系统等效器测试主机机箱后面板上具有器地连接接口, 可以完成电磁阀、自锁阀及加热器的驱动电压和脉宽采集、压力传感器供电电压采集、压力传感器模拟信号以及电阻模拟信号的输出等功能。等效器主机运行 LabVIEW RT 实时操作系统, 测试主机将采集到的电磁阀、自锁阀及加热器的驱动状态等推进系统仿真模型需要的输入通过中断的方式传输给仿真机下的实时仿真模型。同时通

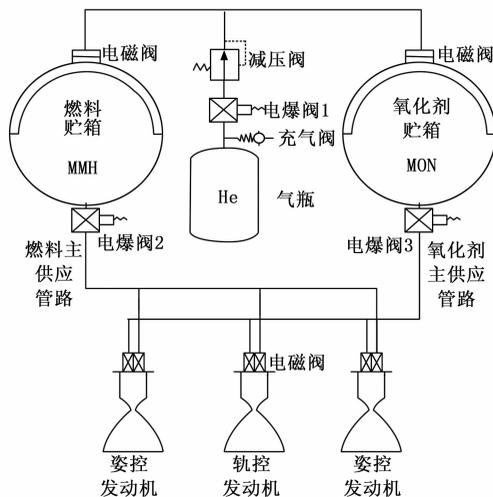


图 6 二维视景软件界面

过中断的方式实时读取仿真机的模型输出, 根据仿真模型的计算输出实时操作板卡完成压力传感器、热敏电阻模拟输出等操作。

推进系统等效器软件主要由系统监控、阀门加热器控制显示、压力温度控制显示以及实时仿真软件等部分组成。

3.2.2 系统监控

系统监控基于推进系统的原理图布局, 包括电磁阀、自锁阀、电爆阀、加热器、压力传感器、热敏电阻等, 在测试过程中相应的部件指示灯可以实时显示部件的工作状态, 其中压力传感器的压力值以及热敏电阻的温度值等均可在系统监控界面中显示, 方便查看当前动态系统等效器的工作状态, 同时与实时测试平台中的二维视景软件界面进行比对。

3.2.3 阀门加热器控制显示

阀门加热器控制显示包括电磁阀、自锁阀、电爆阀以及加热器的控制显示功能。软件按照电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器的分类进行分区显示, 显示及设置内容包括以下几部分:

1) 工作状态显示。通过指示灯显示当前电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器的工作状态, 当相应的部件工作时, 指示灯亮, 显示为绿色 (自锁阀、电爆阀为脉冲信号, 工作状态保持), 当相应的部件不工作时, 指示灯灭, 显示为红色 (电爆阀为一次有效信号)。

2) 供电电压采集显示。实时显示当前电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器的供电电压采集数据。

3) 脉宽采集显示。实时显示当前电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器的脉宽采集数据。

4) 故障模式设置。可对任意一路电磁阀、自锁阀、电爆阀和加热器进行故障设置, 故障模式包括打不开、关不断、断路等, 通过下拉列表即可完成故障模式选择, 选择完毕后单击右侧的设置按钮即可完成故障模式设置。

所有的采集数据均自动保存到数据库中, 存储周期可

设置, 每 12 个小时保存一个文件, 在硬盘允许范围内可连续保存, 支持数据库查询功能。

3.2.4 压力温度控制显示

压力温度控制显示界面包括压力传感器以及热敏电阻的控制显示功能。软件按照压力传感器和热敏电阻的分类进行分区显示, 显示及设置内容包括以下几部分:

1) 压力、温度采集显示。实时显示当前压力传感器和热敏电阻的采集数据。

2) 压力和温度设置。可对任意一路压力传感器或热敏电阻进行输出设置, 在设置压力或设置温度栏中写入需要设置的压力值或温度值, 设置完毕后单击输出按钮即可完成设置。

3) 故障模式设置。可对任意一路压力传感器以及热敏电阻进行故障设置, 故障模式包括断路、超限、无变化等, 通过下拉列表即可完成故障模式选择, 选择完毕后单击右侧的设置按钮即可完成故障模式设置。

所有的采集数据均自动保存到数据库中, 存储周期可设置, 每 12 个小时保存一个文件, 在硬盘允许范围内可连续保存, 支持数据库查询功能。

3.2.5 实时仿真软件

实时仿真软件包括仿真模型选择、参数设置、实际压力和控制压力显示图、实际温度与控制温度显示图、仿真工作记录等功能。可通过仿真模型选择下拉列表选择需要仿真的模型。参数设置主要对实时仿真模型中的参数进行设置, 包括通道选择、控制目标值、控制初始值、超限范围、偏低范围、常值、控制周期、模拟时间以及采样间隔设置等。参数设置完毕后, 单击开始模拟按钮即开始实时仿真。实际压力与目标压力显示图实时当前目标压力和实际控制压力的变化曲线图。实际温度与目标温度显示图中实时当前目标温度和实际控制温度的变化曲线图。动作记录表格记录实时仿真过程中的工作记录, 包括仿真开始时间、参数设置值、部件动作记录等, 部件动作记录包括电磁阀、自锁阀、电爆阀及加热器的开启时间、开启脉宽等。

4 关键技术验证与实现

4.1 测试平台实时联合仿真技术

测试平台实时性的要求主要体现在推进系统等效器实时接收来自上位机的电磁阀、自锁阀、电爆阀以及加热器开关脉宽采集并反馈给推进系统实时仿真模型, 随后推进系统实时仿真模型基于此完成推进系统压力传感器、热敏电阻数据随时间的变化数据, 反馈给推进系统等效器输出板卡, 供推进系统控制单元采集开展推进系统故障在轨诊断。

为确保整个测试平台实时性要求, 上位机实时测试平台采用 LabviewRT 系统完成控制模型的搭建, 实现上游系统的控制指令及管理指令实时发送给推进系统控制单。

为确保整个测试平台实时性要求, 推进系统等效器采用双 RT 实时系统的方法。

等效器主机运行 LabVIEW RT 实时系统, 设备的各类

板卡也安装在等效器主机下。首先通过测量板卡实时测量电磁阀、自锁阀及加热器等指令的电压和脉宽, 测量的同时实时的将测量值反馈给仿真测试机。

推进系统实时仿真模型运行在仿真机上, 读取实时接收模型所需的输入, 经过验证, 两个系统在通讯过程中, 从写入数据—写中断—读中断—读取数据, 整个闭环过程时间用时稳定在 1 ms 左右, 不超过 2 ms。当推进系统仿真模型计算完毕后再通过反射内存卡将模型输出反馈给测试主机, 测试主机读取仿真模型的输出用于各种负载的模拟。

由于两台主机均运行在实时系统下, 相互间进行数据交互, 测试主机和仿真测试机形成了实时的硬件闭环系统, 确保了定时的准确性和实时性。

4.2 故障模拟技术

4.2.1 电磁阀/自锁阀/电爆阀故障模拟

电磁阀/自锁阀/电爆阀故障主要包括打不开、关不断故障。针对阀门打不开的故障传统测试方案采用断开阀门连接电缆进行模拟, 但关不断的故障模式无法模拟。

正常工况测试中, 推进系统控制单元接收上游系统控制指令发出电磁阀、自锁阀以及电爆阀控制信号, 推进等效器通过板卡对电磁阀、自锁阀及电爆阀的控制信号驱动电压和脉宽进行采集, 将控制信号信息传递给推进系统仿真模型, 仿真模型通过计算各处阀门动作后相应压力传感器的变化反馈推进系统控制单元。

测试平台进行故障模拟时不需要断开相关电缆, 仅需要在推进系统等效器的上位机界面设置阀门故障模式为打不开/关不断, 等效器将故障下的控制信号信息传递给推进系统仿真模型即可改变相应压力传感器数据, 设置界面如图 7 所示。

	工作状态	供电电压	脉宽	故障模式	
电磁阀1	<input checked="" type="radio"/>	0 V	0 ms	打不开	设置
自锁阀1	<input checked="" type="radio"/>	0 V	0 ms	打不开	设置

图 7 电磁阀、自锁阀、电爆阀故障设置

当设置阀门故障状态为打不开时, 通过软件将反馈给阀门的供电状态设置为阀门不供电, 实现阀门打不开的故障模拟功能。

当设置阀门故障状态为关不断时, 通过软件将反馈给阀门的供电状态设置为阀门供电, 实现阀门关不断的故障模拟功能。

4.2.2 压力传感器故障模拟

压力传感器故障模拟压力传感器的异常故障, 该功能选用高精度模拟量输出板卡实现, 通过控制 DA 板卡模拟压力传感器的模拟信输出, 可模拟实现压力传感器断路、压力传感器输出超限、压力传感器输出无变化等故障, 输出

信号再经过接口调理箱的隔离调理后输出到控制单元, 同时通过 AD 板卡采集压力传感器的供电状态, 设置界面如图 8 所示。

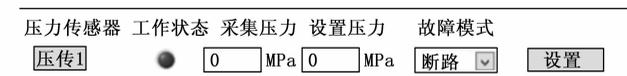


图 8 压力传感器故障模拟功能实现

4.2.3 热敏电阻故障模拟

热敏电阻故障模拟热敏电阻的异常故障, 该功能选用高精度电阻模拟板卡实现, 通过控制电阻模拟板卡模拟热敏电阻的输出, 可模拟实现热敏电阻断路、热敏电阻输出超限、热敏电阻输出无变化等故障, 输出信号再经过接口调理箱的隔离调理后输出到控制单元, 设置界面如图 9 所示。

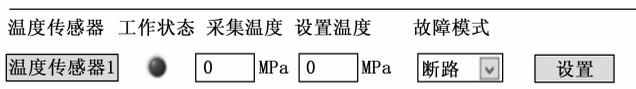


图 9 热敏电阻故障模拟功能实现

4.2.4 加热器故障模拟

加热器故障包括打不开、关不断故障, 两种故障均采用软件模拟实现, 设备采集加热器的供电电压和脉宽, 并将采集的阀门供电状态反馈给动态模型仿真算法, 设置界面如图 10 所示。

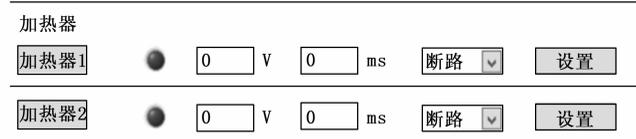


图 10 加热器故障模拟功能实现

当设置加热器故障状态为打不开时, 通过软件将反馈给加热器的供电状态设置为加热器不供电, 实现加热器打不开的故障模拟功能。

当设置加热器故障状态为关不断时, 通过软件将反馈给加热器的供电状态设置为加热器供电, 实现加热器关不断的故障模拟功能。

4.2.5 随机故障模拟

针对在轨故障发生的随机性及偶然性, 为充分测试推进系统控制策略对故障的识别, 隔离的准确性和正确性。设计随机故障模拟功能, 实现自锁阀、电磁阀、电爆阀、加热器的故障模拟随机出现在测试工作的任意时刻, 对推进系统控制单元在轨故障诊断策略进行地面测试。

5 结束语

基于少量推进系统冷态联试, 整机试车获得的系统性数据, 建立推进系统实时仿真模型。依托实时仿真模型, 建立长期在轨推进系统故障诊断实时仿真测试平台, 对推进系统控制单元在轨故障诊断策略进行纯数字, 硬件在环仿真优化。节约了大量常规地面测试成本, 同时可在航天器在轨处置故障工作中, 对处置预案进行地面验证, 支持

故障处置方案的制定。

参考文献:

- [1] 谭春林, 胡太彬, 王大鹏, 等. 国外航天器在轨故障统计与分析 [J]. 航天器工程, 2011 (4): 130-136.
- [2] 彭小辉, 晏政, 李艳军, 等. 一种基于解析冗余关系的半定性故障隔离方法在航天器推进系统中的应用 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34 (6): 104-110.
- [3] 廖少英, 赵金才. 航空一航天飞行器推进增压输送系统设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [4] 吴栋. 航天器推进系统建模与仿真平台软件设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] 张纯良, 张振鹏, 袁军娅, 等. 空间飞行器推进系统的故障检测 [J]. 宇航学报, 2001, 22 (4): 85-89.
- [6] 王继彪. 航天器单组元推进系统故障诊断方法研究及实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] 邵继业, 徐敏强, 王日新. 基于模型的航天器推进系统故障诊断 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008 (3): 47-49, 54.
- [8] ENGLE J, 于媛. 用于航天飞机推进系统正常状态监测的射前专家系统 [J]. 国外导弹与航天运载器, 1992 (6): 92-97, 77.
- [9] 臧家亮. 神舟载人飞船推进分系统的研制 [J]. 航天器工程, 2004 (1): 57-64.
- [10] 刘万龙, 牛向楠, 李全令, 等. 一种姿轨控发动机地面试验控制系统设计 [J]. 火箭推进, 2015, 41 (2): 114-117, 122.
- [11] 郭敬. 发动机推进剂增压输送系统建模仿真技术综述 [J]. 火箭推进, 2015 (5): 1-6.
- [12] 王日新. 航天器推进系统故障的面向时态检测和诊断 [J]. 推进技术, 2002 (1): 11-14.
- [13] 宝音贺喜格. 航天器推进系统故障诊断专家系统的研制开发 [J]. 推进技术, 1999 (5): 17-20.
- [14] 晏政. 航天器推进系统基于有向图的故障诊断方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [15] 戴日辉, 陈帅, 杨昊旸. 信号调理模块的 LXI 自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 15-19, 24.
- [16] 成克强, 林家全, 杨东裕, 等. 基于数字孪生的智能车间系统仿真加速测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 39-44.
- [17] 崔伟光, 杨海峰, 杨晶, 等. 卫星分系统仿真测试平台设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3264-3266.
- [18] 吴立金, 唐龙利, 柴海燕, 等. 面向船舶软件的仿真测试平台研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (5): 1451-1453, 1456.
- [19] 程谋森, 张育林, 姜春林, 等. 航天器推进系统管路充填过程动态特性 (II) 实验模拟与结果评估 [J]. 推进技术, 2000, 21 (3): 1-5.
- [20] 陈阳, 蔡国飙, 张振鹏, 等. 双组元统一推进系统减压器稳定性仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010 (10): 1135-1139.
- [21] 聂饶, 程玉强, 吴建军, 等. 航天器推进系统气液路故障仿真 [J]. 国防科技大学学报, 2017 (4): 32-41.