

# 某型发动机自动测试系统设计与实现

程进军<sup>1</sup>, 肖明清<sup>1</sup>, 刘帅<sup>1</sup>, 赵鑫<sup>1</sup>, 吴喜锋<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 95172 部队, 长沙 410000)

**摘要:** 某型发动机结构复杂, 测试需求多样, 为准确获取该发动机在各种工况下的性能参数, 并对其健康状况进行实时监控, 需要研制一套自动测试系统来完成上述任务; 从该发动机的测试特点与测试需求出发, 结合现有几类典型测试总线的优缺点, 给出了一种基于 VXI 总线的发动机自动测试系统, 对该测试系统的结构进行了设计, 给出了测试系统的资源配置框图; 按照“测试、驱动与负载模拟”一体化布局需求, 给出了测试适配器典型电路; 为满足对发动机串口的实时指令发送与实时数据存储、解析的要求, 对测试软件的有效运行方式进行了研究, 给出了“指令线程与监视线程协同工作”的软件多线程流程图; 实际应用表明, 测试系统的结构合理、方便在各类场合使用; 软件运行方式有效、实时性好, 无丢帧与误码现象发生; 该测试系统满足发动机在各类试验过程中的使用要求, 可有效开展各项测试工作。

**关键词:** 自动测试; VXI; 多线程

## Design and Implementation of an Engine Automatic Test System

Cheng Jinjun<sup>1</sup>, Xiao Mingqing<sup>1</sup>, Liu Shuai<sup>1</sup>, Zhao Xin<sup>1</sup>, Wu Xifeng<sup>2</sup>

(1. Air force Engineering University, Xian 710038, China; 2. No. 95172 Army, Changsha 410000, China)

**Abstract:** The structure of an researched engine in this paper is complex, and the test demands are diverse. To accurately obtain the performance parameters of the engine under various conditions and to monitor real-time health condition, it is necessary to develop a set of automatic test system to complete the tasks. Considering the test characteristics and test requirements of the engine, combined with the advantages and disadvantages of several kinds of typical existing test buses, an automatic test system of the engine based on VXI bus is present. The test system structure is designed and the resources configuration block diagram of the test system is given. To meet the requirements of the integrated layout of test, drive and load simulation, the typical circuit in the test adapter is given. To meet the demands of serial real-time instruction sending and real-time data saving, parsing, the effect of operation mode of the test software is studied. Further more, with the cooperation of the instruction threads and monitoring threads, multithread flow chart of the test software is given in this paper. Practical application shows that the reasonable structure of the test system is convenient in various situations. Without losing frames and making data error, the test software works effectively and real-time performance is good. The test requirements are met by the test system in the process of all kinds of engine test, and the test work can effectively be carried out.

**Keywords:** automatic test; VXI; multithread

## 0 引言

某型发动机主要由综控器分系统、传感器分系统、试验测量分系统、电机泵、阀门、点火器等分系统、组件组成。传感器分系统和试验测量分系统用来采集各测试点的数据, 而后传至综控器分系统, 综控器分系统根据接收到的传感器数据, 按照预先指令和时序指令要求, 控制电机泵、阀门和点火器等组件执行相应动作。该发动机测试的主要特点和需求包括:

1) 信号种类繁多, 信号数量庞大。被测信号包括模拟量信号、数字量信号、强电信号(高达 270 V 的电机泵运转电压)、弱电信号(数百微伏的热电偶电压)、电磁信号(电磁阀驱动信号和电机泵高达 20 000 rpm 转速引起的电磁感应信号)、光耦信号等数百路被测物理量, 各类强弱、光电磁气液信号在一个系统中共存, 对系统的可靠测试提出了较高要求;

2) 信号测量精度等级要求高。传感器分系统的温度测量

精度要求达到 0.2 °C 以上, 阀门驱动电流测试精度要求达到 0.001 A 以上, 试验测量分系统的压力测量要求达到 0.1 Kpa 以上等;

3) 测试的实时性要求高。在综控器分系统测试过程中, 一方面要实时模拟传感器的变化过程, 另一方面需要实时对综控器分系统输出的数据进行采集、存储; 在发动机系统测试过程中, 需要在 5 ms 的周期内, 将 3 个 RS422 串口数据的数百个字节数据进行实时校验、存储、解析、显示等;

4) 测试构型复杂。在测试各阶段过程中, 测试系统需要模拟综控器分系统、传感器分系统、阀门、试验测量分系统、点火器分系统等组件、分系统, 该过程对系统的结构提出了较高要求;

5) 测试对象和测试需求处于不断改进与变化中, 测试系统应能通过外观、结构、程序小幅改变来适应发动机的变化与改进。

当前, 通过计算机控制和高性能测试仪器组成自动测试系统来满足上述需求是发展的主流方向<sup>[1]</sup>。可选择的类型有: 基于 LXI 的自动测试系统和基于 PXI 的自动测试系统<sup>[2-3]</sup>。上述两型系统存在测试资源不足难以满足上述需求的问题<sup>[4]</sup>, 本文给出了一种基于 VXI 总线构建的发动机自动测试系统。

收稿日期: 2015-11-02; 修回日期: 2015-11-27。

**作者简介:** 程进军(1979-), 男, 湖北枣阳人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事武器系统检测、故障与健康管理等方向的研究。

肖明清(1963-), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事武器系统检测、测试与故障诊断等方向的研究。

### 1 系统结构及原理

测试系统主要由 5 个箱体以及 5 个箱体之间及其内部起连接作用的电缆组成，如图 1 所示，具体如下：

1) 1 号箱，包括 VXI 机箱、多个 VXI 模块和通用测试接口阵列，箱内装有 VXI 机箱和各种 VXI 模块。VXI 机箱内装的 VXI 模块是测试系统的核心部分，VXI 模块包括：零槽控制器模块 E8491B、数字万用表模块 E1412A、A/D 采集模块 E1413C、D/A 输出模块 E1418A、2 个矩阵开关模块 E1460A、VXI 多路数字通信模块和 VXI-OC 驱动中断模块等。其主要功能是提供测试激励信号、对被测信号进行测试、实现测试资源与测试适配器的连接；

2) 2 号箱，包括两路直流可调电源、测控计算机、人机接口设备、显示器；

3) 3 号箱，提供 270 V 与 28 V 可调直流电源；

4) 测试适配器，包含 21 个信号调理通道，分别对 18 路电磁阀、3 路点火器进行驱动及测试；测试适配器实现测试系统与发动机的电气信号连接、信号调理、信号隔离、信号驱动等功能。

5) 自检模拟器，按照电气接口文件要求和通信协议规范对被测对象进行电气特性的模拟；自检模拟器用来对测试系统进行自检测试，达到在测试系统与发动机连接前确保自身状态完好的目的。

系统的整体技术方案与工作原理是：系统结构采用自动测试设备+测试程序集 (ATE+TPS) 框架，测试系统与发动机的电气接口统一在 TPS 端实现，通过更换 TPS 来满足测试对象和测试需求的改变，达到集成化、通用化的目的；系统软件采用指令流程与监视流程协同工作多线程结构，指令流程进行测试流程调度、监视流程以对测试数据进行校验、存储、解析、显示，两流程结构之间通过消息、同步锁以及全局变量等方式来进行协调执行。

### 2 系统关键电路设计

综控器分系统测试过程中，需要对其驱动的多达 18 路电磁阀、3 路点火器模拟部件的瞬时消耗电流、稳态消耗电流和闭合、关断电压进行同时测试，以获取其准确的电气特性；在电磁阀组件测试过程中，测试系统需要模拟综控器驱动电磁阀，同样也需获取瞬时消耗电流、稳态消耗电流和闭合、关断电压。在上述测试需求中，测试点、驱动点、模拟点不在同一部位，且各个工作点不能相互影响，经过计算，适配器中有多达 200 余个工作点在上述测试中需要共同工作。测试适配器设计时应包括 21 个信号调理通道，分别对上述 18 路电磁阀、3 路点火器进行独立驱动及测试，以满足上述需求。设计了一种电路将测试、驱动与模拟融合在一起，如图 2 所示。

图 2 示出测试适配器一个典型信号调理通道的组成，该典型通道可实现功率驱动/功率测试/负载模拟一体化功能。电路包括下列组成部分：测量仪器 E1413C 数据采集模块（图中示

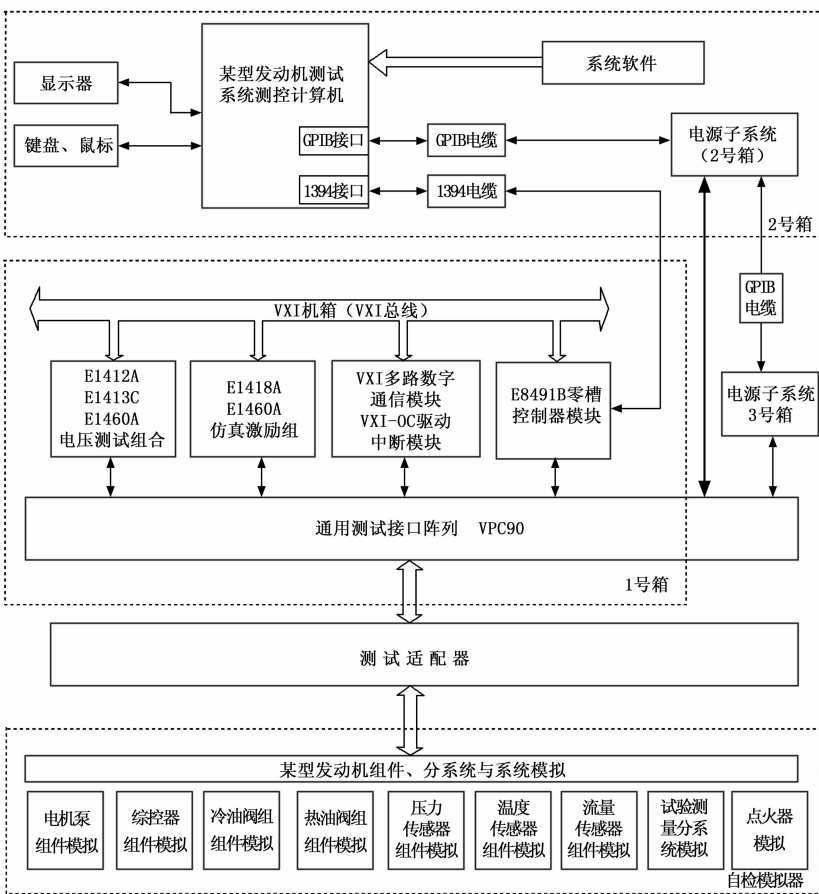


图 1 某型发动机测试系统结构框图

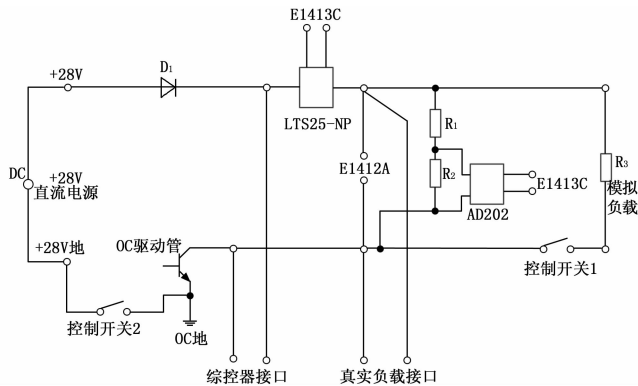


图 2 测试适配器测试、驱动与负载模拟电路

出其两路测试接口) 和 E1412A 数字万用表模块；各类接口包括：综控器接口、真实负载接口、模拟负载接口、测试仪器接口、电源驱动接口、OC 驱动管接口、回路控制接口。综控器接口接入被测综控器组件，真实负载接口接入被测电磁阀，模拟负载 R3 在适配器内安装，代替真实负载（电磁阀或火工品），真实负载与模拟负载的转换通过控制开关 1 的接通和断开来实现。+28 V 直流电源平时与测试电路 OC 驱动地线断开，在代替综控器组件时与 OC 驱动管地线相接，通过控制开关 2 的接通和断开来实现，D1 为隔离二极管，隔离综控

器组件的控制信号和 +28 V 直流电源。LTS25-NP 用来采集测试回路电流, R1 和 R2 两端的电压为负载电压, AD202 用来隔离驱动电路和 E1413C 精密测试电路, R1 和 R2 用来电阻分压, 通过 R1、R2 和 AD202 的作用, 防止 E1413C 的输入端出现高于 17 V 的差模电压 (差模电压高于 17 V, E1413C 无法正常工作), E1412A 和 E1413C 共同完成负载电压的测试, 互为备份。

### 3 系统软件部分设计

测试过程中, 有大量测试数据需要接收、存储、解析、显示、发送, 各种过程通过测试软件调度、执行, 如对上述过程处理不完善, 会导致测试软件运行不稳定、解析数据不正确, 甚至是软件死机、系统崩溃。采用“指令流程调度数据处理指令+监视流程运行数据处理过程”的层次体系来组织软件结构, 指令流程与监视流程处于多线程工作模式, 层次结构之间通过消息、同步锁以及全局变量等方式来协调执行, 如图 3 所示。

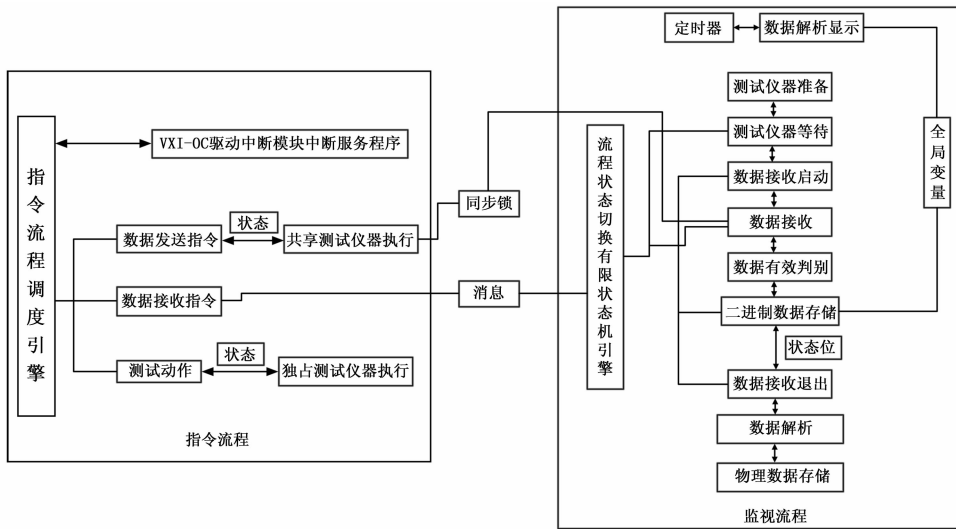


图 3 测试系统软件多线程运行流程图

图 3 中, 左右两框图分别代表指令流程和监视流程的实时工作过程。指令流程框图中, “指令流程调度引擎”在操作人员的测试执行控制下, 分段读取测试软件中预存的测试步骤, 测试步骤分为三大类: 数据发送指令、数据接收指令、测试动作。“测试动作”对应“独占测试仪器的执行”, 独占测试仪器是指测试资源在测试软件的整个运行过程中为测试动作所独有, 测试资源不共享, “测试动作”与“独占测试仪器的执行”通过“状态”来交换运行结果。为响应串口数据的实时发送, 采用 VXI-OC 驱动中断模块的 VXI 总线中端请求硬件机制来完成这一任务, VXI-OC 驱动中断模块的中断服务程序给“指令流程调度引擎”发送这一信息, “指令流程调度引擎”随后调用“数据发送指令”, “数据发送指令”对应的下一层操作是“共享测试仪器执行”, 双方通过“状态”来交换软件运行结果。“数据接收指令”发送一系列消息: “测试仪器等待”、“数据接收启动”、“数据接收”、“二进制数据存储”和“数据接收退出”给监视流程, 监视流程中的“流程状态切换有限状态机引擎”将上述消息转换为响应测试动作。测试动作运行过程中, 为防止原始二进制数据出现误码、乱码, 加入了“数据有

效判别”过程, “数据有效判别”在原始接收的海量数据中 (一般是 115 000 byte/s) 查找帧头, 帧尾, 并判断帧包校验和的正确性, 所有的判别均符合要求时才进行“二进制数据存储”, “二进制数据存储”中的当前最新值通过全局变量传递给“数据解析显示”过程用来显示测试当前值, “数据解析显示”由定时器启动刷新。指令流程如需结束数据接收过程, 将传递“数据接收退出”信息给监视流程, 在“数据接收退出”过程运行时必须判断“二进制数据存储”过程是否结束, 如果在“二进制数据存储”没有结束的情况下, 强行运行“数据接收退出”过程, 将会导致数据文件破坏、程序崩溃, “二进制数据存储”与“数据接收退出”过程之间通过“状态位”交换信息。为减少测试程序实时运行的负担, 指令流程运行完毕后, 才将“二进制数据存储”过程结果通过“数据解析”转换为物理量数据, “物理数据存储”运行存储过程。监视流程中的仪器动作运行前需要进行“测试仪器准备”, 监视流程的“数据接收”和指令流程的“共享测试仪器执行”在运行过程中会出现同时占有仪器资源的情形, 必须通过有效手段加以保护, 防止两个流程同时竞争仪器资源而出现死锁, 采用“同步锁”机制来避免上述现象的发生。

### 4 试验结果与分析

系统经过一年的试用, 性能稳定, 功能完善, 可在不同的工作场所对发动机系统的传感器、电磁阀、控制器等部件进行测试与模拟, 可对不同部件组合后的对象开展构型测试, 也可对系统开展全系统联试。软件运行稳定, 数据采集精度高, 串口指令发送与串口数据存储、解析独立运行, 无丢帧与误码现象发生, 各项功能技术指标满足研制、使用要求。

### 5 结论

某型发动机测试系统采用 VXI 总线结构进行构建, 系统研制过程中设计了独特的适配器电路, 采用多线程模式运行测试软件。测试系统通用性好、可靠性高, 抗干扰能力强; 实时性好; 测试与仿真精度高。该型测试系统可在发动机系统的研制、生产、使用维护等阶段使用, 也可在发动机系统的组件级、分系统级、系统级等各个层级开展测试, 具有强大的测试与仿真功能。

#### 参考文献:

- [1] 肖明清, 文莹. 新一代航空装备综合测试系统 [A]. 第四届国防科技工业试验与测试技术发展高层论坛 [C]. 2012: 37-42.
- [2] 程进军, 肖明清. 基于 LXI 的多总线融合的自动测试系统 [J]. 微计算机信息, 2008, 1: 130-132.
- [3] 苟新宇, 肖明清, 王承孝. LXI 总线自动测试系统拓扑结构研究 [J]. 电子测量技术, 2007, 11: 126-128.
- [4] 张雨花, 马捷中, 翟正军. 基于 VXI、PXI 和 LXI 的网络化混合测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16: 1059-1061.