

基于 VC++ 的液氧/煤油动力系统 自动紧急关机软件设计与应用

段 娜, 宋绪勇, 朱子环, 庄 建, 陈 军

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 自动紧急关机系统是火箭动力系统试验的关键环节, 是推进系统和试验台的有力安全保障。针对液氧/煤油动力系统热试车威力大、响应快的系统特性, 研发了基于 VXI 的数据采集系统及紧急关机系统, 依据功能需求设计开发了基于 VC++ 的关机判读软件。首先设计了关机判读软件系统的采集、报警、实时存储、图像显示等基本功能模块, 其次阐述了基于 VC++ 的关机判读软件的具体实施方案, 包括软件应用环境和核心程序流程, 展示了关机判读软件的应用主界面; 详细分析了影响自动关机响应时间的主要因素; 通过一百多组模拟数据进行了软件功能性、故障检测能力等多方面的测试, 实时性和准确度均达到了系统设计要求。某次液氧/煤油动力系统热试车对本系统的应用进一步验证了其性能的优异性。

关键词: 自动紧急关机; 数据采集; 实时; 多线程

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0074-06

Design and application of VC++-based software for automatic emergency cut-off system in LOX/kerosene propulsion system

DUAN Na, SONG Xu-yong, ZHU Zi-huan, ZHUANG Jian, CHEN Jun

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The automatic emergency cut-off system is the key link for test of the rocket propulsion system, and is the powerful safety guarantee of the system and test bed. According to the characteristics and the response needs of LOX/kerosene propulsion system in hot firing test, the VXI-based data acquisition system and emergency cut-off system were developed. The cut-off discrimination software based on VC++ was designed according to the functional requirement. Firstly, the basic functional module is designed, including data acquisition, warning, real-time storage, image display. Secondly, the implement scheme of cut-off discrimination software based on VC++ is explained in detail, including software application environment and flow of core-program. The main

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-04-22

作者简介: 段娜 (1983—), 女, 高级工程师, 研究领域为推进系统试验和仿真

interface of application is shown. The key factors which influence the timing response of automatic cut-off are analyzed. The software's functions and failure detection ability were tested by means of more than one hundred simulated data. The maturity of the software functions and acceptable performance were validated in the hot firing test.

Keywords: automatic emergency cut-off; data collection; real-time; multi-threading

0 引言

液氧/煤油动力系统由多台富氧补燃循环发动机组成, 其试验过程具有振动冲击力强、试验工艺过程复杂等特点。相对单机试验, 动力系统试验过程中出现零部件磨损、结构破坏和泄漏等问题时, 故障面扩大更加迅速、爆炸威力更大, 可以在短短的十几毫秒、甚至几毫秒对火箭产品、试验台及辅助设施造成极大破坏。为了保证产品、人员及试验台的安全有必要进行自动紧急关机系统建设。

自动紧急关机系统是集成了计算机、测控、仿真等手段的新技术, 通过实时检测发动机在试验过程中的性能参数, 及时发现故障趋势, 迅速采取有效措施, 既可以避免试车失败和灾难性的故障发生、保护动力系统及试验设备, 同时又可以保留故障样本。

1 系统功能需求和设计

自动紧急关机系统功能需求是: 每个检测周

期 (10 ms) 内实时对传感器工作情况和检测参数进行判断, 当判断发动机工作连续三次参数异常时, 报警的同时实施自动紧急关机, 并且判断周期不大于 50 ms。

系统功能设计见图 1, 根据需求其包括 5 个子模块: 数据采集模块、关机逻辑判读模块, 报警标志模块、存储回放模块和发送关机信号模块。

1) 数据采集。数据采集功能包括数据采集控制和程控调理功能、通用化通道配置功能、采集系统零位校准功能、硬件自校准功能、设备自检功能和 EU 转换等。

2) 关机判断。实时判读采集数据是否满足关机条件 (传感器和变换器检测单元、发动机工作异常检测单元)。

3) 报警标志。红 (参数异常报警)、黄 (传感器失效报警)、绿 (正常的机制实时显示故障报警)。黄色报警指的是传感器异常, 红色报警指的是参数异常。同一时刻 3 个黄灯表示传感器失效, 此发动机不再进行关机逻辑判断; 连续 3 个时刻 3 个红灯则关机。

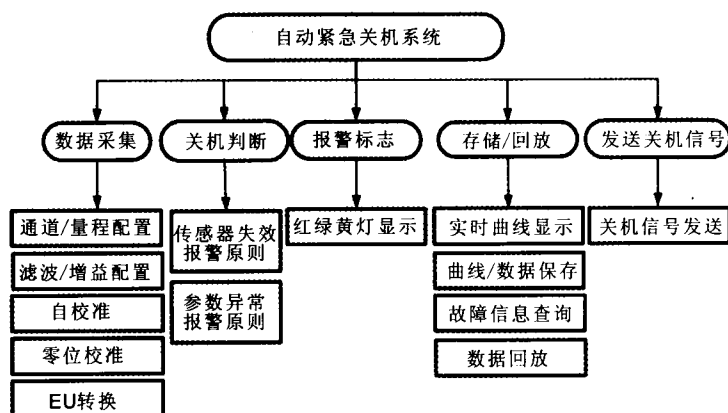


图 1 自动紧急关机系统功能框架

Fig. 1 Functional architecture of automatic emergency cut-off system

4) 存储/回放。软件可以实时以曲线形式显示采集数据,进行实时监测;数据实时存储在本地硬盘上;同时,可以转换成曲线图片和数据存储在本地硬盘上;试验结束后,根据存储的数据进行数据的图形化回放显示,确认故障信息。

5) 发送关机信号。根据判读准则,满足关机条件时,通过继电器输出板卡发出触点信号。

2 系统实施

液氧/煤油动力系统采集前端传感器/变换器输出的信号分为2路,一路给 Pacific 6000 采集系统,一路给 VXI 采集系统,将缓变信号转换器与 VXI 数据采集系统配套连接,自动紧急关机判读软件进行数据采集和紧急关机条件的判读。控制系统通过吸合、断开无源触点作为发动机点

火、关机的时统信号。测量系统将触点信号变换为 5 V 阶跃信号作为发动机的启动/关机信号。根据紧急关机判读条件连判 3 次满足关机条件时,采集主机的继电器卡输出关机触点信号,由控制系统完成后续关机操作。在实验室阶段,由故障仿真验证系统模拟传感器电压信号。

2.1 自动紧急关机软件应用环境

系统基于 VXI 数据采集系统构建,主要包括: EX2500 LXI-VXI 零槽控制器、VT1415A 模块、VT1503A 程控增益/滤波 SCP 模块,采集系统具有 24 通道电压信号增益、滤波、A/D 变换、采集功能。关机触点信号由继电器板卡发送。VXI 数据采集系统与监控关机系统的数据接口采用网口连接。故障仿真系统主要由工控机和模拟信号输出板卡组成。

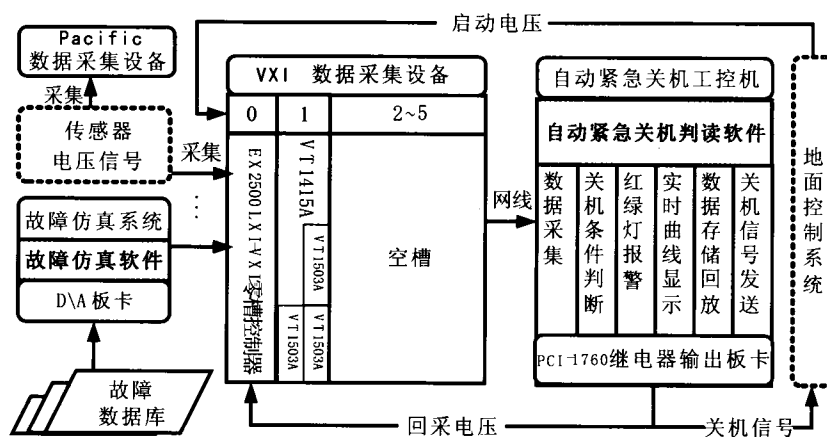


图2 自动紧急关机判读及验证系统示意图

Fig. 2 Sketch map of automatic emergency cut-off and validation system

2.2 自动紧急关机系统软件实施

本自动紧急关机软件采用 VC++ 语言开发。为了实现其上述功能设计需求,所采用的关键技术包括:多线程编程、循环队列存储、高精度定时器、试验数据实时显示、二进制数据实时存储、自动零位校准和实时红黄绿灯报警显示等。

为了提高自动紧急关机软件的实时性,增加软件的可靠性和可维护性,本软件在既定硬件资源下,完成了软件开发的资源优化配置,如图3所示,分别设置了3个线程进行不同功能模块的动作执行:线程1进行关机逻辑判断;线程2进行实时曲线显示、红黄绿灯报警;线程3进行数

据实时存储、故障信息存储。不同线程之间的数据通过全局变量进行数据传递。

其中,初始化采集设备、配置参数、存储文件包括对采集设备的 ID、采样频率的设置与读取、通道配置参数(滤波、增益、量程、校准等信息)的载入、数据存储文件和故障信息存储文件的实时创建。触发数据采集通过触发界面上采集按钮触发采集设备,进行相应采样频率的实时数据采集。关机逻辑判断由单独1个计时器线程对上述采集数据进行关机逻辑判断:参数超出传感器测量范围则该通道参数失效,不再进行逻辑判断;连续3次同时有3个参数超出正常范围

(即参数异常) 则关机。实时曲线显示、红黄绿灯报警, 两者共用 1 个计时器线程, 通过全局数组与数据采集和关机逻辑判读共享数据和状态, 实时显示各通道数据采集曲线和失效、异常、正常三状态报警灯。数据实时存储、故障信息存储, 两者共用 1 个计时器线程, 采用二

进制存储机制对数据进行实时存储, 对于关机连判的故障信息也设置存储机制。试验数据后处理, 是对上述二进制存储数据进行解析, 按照试验后发动机设计单位对发动机试验数据的具体需求, 自动将二进制文件处理成同名称的十进制数据文件。

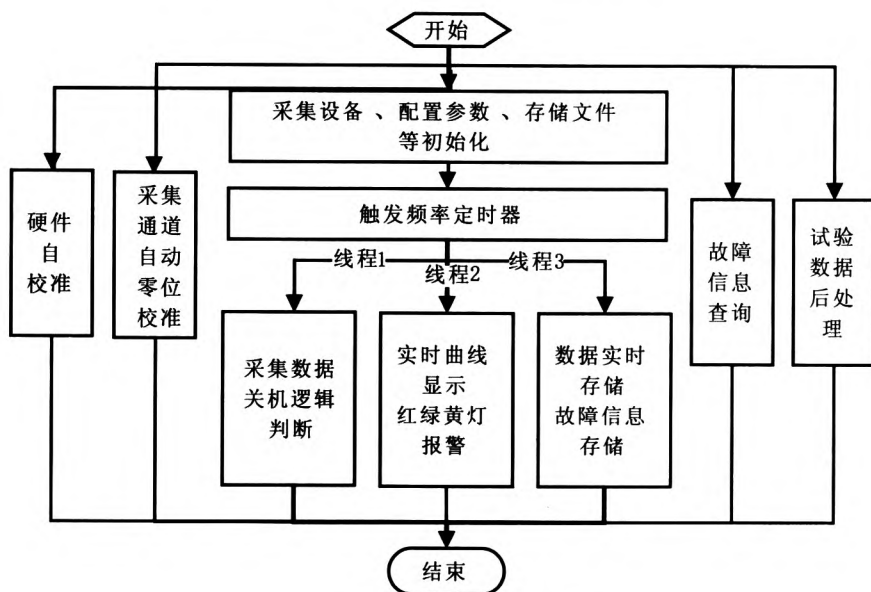


图 3 紧急关机判读程序逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of emergency cut-off discrimination program

本自动紧急关机软件开发界面如图 4 所示。它涵盖工具栏、实时数据显示区、时间监控区、通道配置区、参数设置区、实时参数监控区、红黄绿报警区。自动紧急关机软件功能包括: 数据采集、关机条件判断、红绿灯报警、实时曲线显示、数据存储和发送关机触点信号等。

其中, 数据采集和关机条件判断为核心程序, 紧急关机判读程序单独放在一个频率计时器的线程里, 定时间隔设为 10 ms, 即每隔 0.01 s 程序循环一次。程序读取 VXi 通道数据, 对启动信号(5 V)进行判读, 若大于 3.5 V, 认为发动机启动, 点火时标开始计时。根据紧急关机条件进行关机参数的读取和判断, 同一时刻有 3 个传感器失效, 则 3 个黄灯亮, 该发动机不再紧急关机; 连续 3 个时刻判读满足关机条件时, 继电器输出板输出触点信号, 3 个红灯亮, 2 台发动机同时关机。

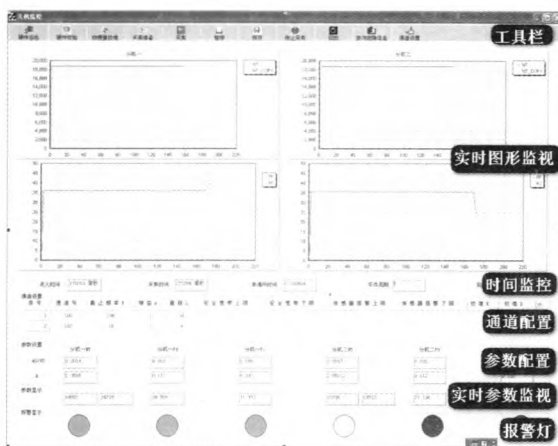


图 4 软件主界面图

Fig. 4 Software main UI

2.3 系统时间响应特性分析

采样频率为 100 Hz 的前提下, 在理想状态下 (采集时刻即为故障发生时刻), 自动紧急关

机系统从开始条件判读到发出关机指令连判三次的理论时间应为 20 ms, 此时间为发出关机指令最短时间。在非理想状态下, 采集时刻非故障发生时刻, 就有可能造成故障判断延迟, 延迟时间的范围为 [0–10 ms)。这是由定时器精度和定时时间间隔 (即分辨率) 决定的, 因此, 定时器是保证精确定时的最关键技术。其实现方式如下表所示, 其中, 多媒体定时器并不依赖于消息机制, 而是由函数产生一个独立的线程, 在一定的中断次数到达后, 直接调用预先设置好的回调函数进行处理, 而不必等到应用程序的消息队列为空, 从而切实保障了定时中断得到实时响应。因此在基于 Windows 平台的实时控制系统中, 多媒体时钟是一种很理想的高精度定时器, 它可以实现精度为 1 ms 的高精度定时; 频率定时器基于硬件系统的 CPU 响应频率, 不依赖于 Windows 时钟, 精度可达 1 μ s。本系统从计时精度、Windows 响应优先级、可靠性三方面进行比较, 实现了频率计时器作为自动紧急关机程序的定时器, 同时满足数据读取判读的技术要求和性能要求。

表 1 定时器实现方式列表

Tab. 1 List of timer implementation modes

实现方式	计时响应精度	优先级
WM_TIMER 消息映射	30 ms	低
sleep() 函数	30 ms	高
多媒体定时器 timeSetEvent()	1 ms	中
频率计时器 Query Performance Frequency()	1 μ s	中

2.4 自动紧急关机软件测试

本自动紧急关机系统既要满足关机条件, 又要满足上述各项功能和量化指标。测试方法和环境概述: 在故障验证系统上建立了涵盖 168 种故障及非故障模式的数字量输入库, 数字量经 D/A 发送板卡转换成模拟电压, 由 VXI 数据采集系统采集后进行逻辑判断。同时, 本采集系统的点火时标由控制系统触发与中断, 当控制系统接收到

关机系统的继电器吸合信号后, 即发出中断点火时标的指令, VXI 采集系统接收到该指令后停止点火时标的计时。完成实验室测试后, 在试验现场又与地面、箭上控制系统联合测试系统响应时间。

经测试验证, 本自动紧急关机系统各项功能: 传感器异常检测、发动机关机故障判定、数据实时监控、数据存贮和事后查询等全部工作正常; 从开始判断故障信息到发出关机信号最大响应时间为 34 ms, 满足任务需求。同时, 与并记的 Pacific 6000 数据采集系统记录数据具有很好的一致性。

3 自动紧急关机软件应用

本自动紧急关机软件已经多次成功应用于某液氧/煤油动力系统热试车过程, 对某一次试车过程的典型数据进行后处理, 并与 Pacific 数据采集系统的采集数据进行对比分析。

3.1 启动信号分析

启动信号是自动紧急关机判读系统的关键参数, 采样频率 100 Hz。当启动信号的电压大于 3.5 V 时, 记为点火时刻 0 时, 其上升台阶由采集系统性能决定。如表 2 所示, 从 0 V 左右到 5 V 左右, 需要 10 ms, 即一个采样周期达到了启动信号采集, 能够保证在较短的时间内获取实时参数, 为系统可靠性提供了保障。

表 2 启动信号上升参数

Tab. 2 Parameters of startup signal

t/s	启动电压值/V
-0.05	0.001 464 84
-0.04	0.001 464 84
-0.03	0.001 220 7
-0.02	0.000 73
-0.01	0.001 708 9
0	4.980 22
0.01	5.003 66
0.02	5.040 28

3.2 物理量参数分析

本系统进行故障逻辑判断的物理量参数有压力和转速, 以某次转速数据对采集性能进行分析。

如图 5 所示, 基于 VC++ 的 VXI 系统和 Pacific 系统采集的转速 N_i 参数对比, 2 条曲线基本吻合。2 列数据在参数上升阶段和下降阶段出现了小部分的参数差异性较大, 差值最大值达到了 1 800 r/min, 差异部分的放大对比曲线如图 6 所示。VXI 系统采集数据先于 Pacific 系统采集数据, 可以看出, 出现差异性是由 2 套系统的硬件采集原理的差异性决定的, 不存在数据异常、漏报、误报现象。

经分析, 其他参数具有完全相同的分析结果, 在一个采样周期内即可达到实现预期值的采样过程, 且同采样速率下, 实时性更强, 更有利于发动机直测参数的判读, 对发动机及试验台起到了更有效的保护作用。

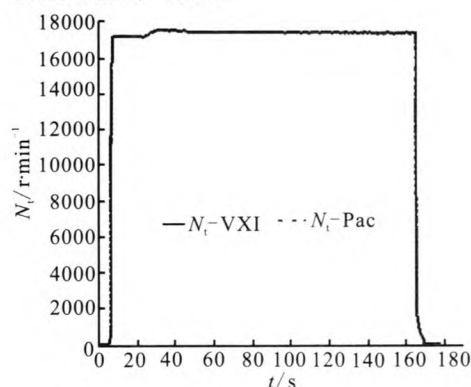


图 5 N_i 参数实测数据对比曲线图

Fig. 5 Comparison of detected data of N_i parameters

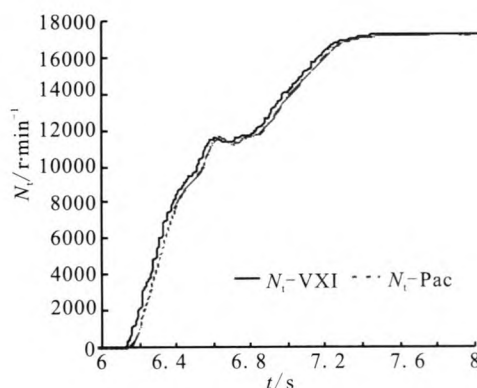


图 6 N_i 参数放大曲线图

Fig. 6 Magnified curve diagram of N_i parameters

4 结论

经上述分析、测试和试验验证, 基于 VC++ 的自动紧急关机软件系统具备异常情况快速响应自动紧急关机功能, 在液氧/煤油动力系统试验过程中, 故障紧急关机系统参数测量准确, 无“误关、漏关”事件发生, 正确地实现了逻辑判断准则的要求内容, 实时曲线显示、报警显示等功能完备、性能良好, 对地面设备和动力系统能够起到保护作用。

参考文献:

- [1] 孟昭荣, 江立辉, 胡兴伟, 等. 基于 VC 多线程的实时数据采集系统[J]. 舰船防化, 2008 (2): 44-47.
- [2] 马志刚. 基于 PXI 总线的多路数据采集系统设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(4): 57-59.
- [3] 王文武, 王诚, 郝燕玲, 等. 多媒体定时器的定制和使用方法[J]. 计算机应用, 2000, 20(3): 39-42.
- [4] 王雪梅. VC 环境下高速实时数据采集的实现[J]. 信息技术, 2006 (5): 147-151.
- [5] 郭宵峰. 火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [6] 郑人杰 主编. 计算机软件测试技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [7] FUDY C. 软件度量入门[M]. 石柱 译. 北京: 国防科工委第 301 研究所, 1996.
- [8] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [9] 蔡武昌. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] 于善奇. 应用统计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [11] 耿文忠. 新型液体火箭发动机试车台启动试验系统方案设计[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 53-57.
- [12] 王永忠. 火箭发动机故障诊断系统的研究[J]. 火箭推进, 2002, 28(2): 44-48.
- [13] 李洁. 航天发射场软件测试技术研究与应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001.

(编辑: 陈红霞)