

氢/氧火箭发动机试验自动紧急关机程序设计

陈 军, 丁博深, 段 燕
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 在氢/氧火箭发动机试验过程中, 对发动机关键参数进行监测, 及时发现异常或故障趋势, 并快速实施自动紧急关机是非常重要的。本文在 Pacific 6000 数据采集控制系统的基础上, 使用 Visual C++ 开发环境对其自带的采集软件 PI660 进行二次开发, 实现高精度自动紧急关机判读功能。在紧急关机程序设计中, 定时器的精度直接影响判读的准确性, 通过对几种定时器精度的测试和分析, 选取“多媒体定时器”用于自动紧急关机程序, 并结合 Pacific 6000 数据采集控制系统的特性, 综合分析了自动紧急关机程序的响应时间及可靠性。

关键词: 发动机试验; 液体推进剂; 自动紧急关机; 定时器; 响应时间

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 02-0069-04

Design of automatic emergency cut-off program in LH₂/LOX engine test

CHEN Jun, DING Boshen, DUAN Yan
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In LH₂/LOX rocket engine test for real-time monitoring of the engine's critical parameters, it is very important to find the abnormal phenomenon and fault trend, and make a response quickly. In this paper, based on Pacific 6000 DAS, Visual C++ development environment is used to make the redevelopment of its own software PI660 to implement the high-precision automatic emergency cut-off function. The accuracy of program's timer directly affects the precision of interpretation in design of the emergency cut-off program. The multimedia timer was selected for automatic emergency cut-off program after testing and analyzing the precision of several timer. Besides, combining with the characteristics of Pacific 6000 DAS, the response time and responsibility of the automatic emergency cut-off program were analyzed.

Keywords: rocket engine test; liquid propellant; automatic emergency cut-off; timer; response time

收稿日期: 2015-06-10; 修回日期: 2015-08-25

基金项目: 航天支撑技术项目(617010411)

作者简介: 陈军 (1980—), 男, 工程师, 研究领域为氢/氧发动机试验测控技术

0 引言

火箭发动机地面试验是发动机研制的关键环节。发动机在试验过程中出现的故障,在极短时间内可能造成灾难性后果。如果能够对发动机关键参数进行精确的检测,出现异常情况时迅速执行自动关机操作,就可避免或降低故障带来的损失,进一步提高可靠性和安全性。

某型号氢/氧发动机试验台采用 Pacific 6000 数据采集控制系统实现发动机所有稳态参数(包括关机参数)的测量。Pacific 6000 数据采集控制系统自带采集软件 PI660,并留有开发接口,如果能够在该系统基础上开发自动紧急关机程序,则既可节约成本,又可降低整个系统的复杂性。

1 自动紧急关机需求和设计

在 Pacific 6000 数据采集控制系统上实现自动紧急关机功能,需要深入了解 Pacific 6000 数据采集控制系统的特性,并在此基础上用 Visual C++来实现。

1.1 Pacific 6000 数据采集控制系统

Pacific 6000 数据采集控制系统是集传感器信号调理、AD 转换和控制于一体的高性能数据采集系统。它采用模拟、数字和软件技术对传感器信号进行调理、采集、显示和分析,提供模拟和数字信号输出对外部系统进行控制。与计算机的接口有 GPIB 及 USB2.0 两种模式。

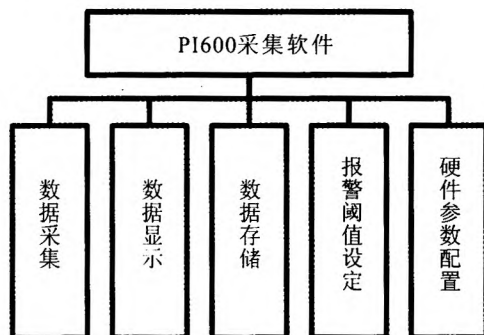


图 1 PI660 采集软件功能模块图

Fig. 1 Function module diagram of PI660 data acquisition software

自带的 PI660 数据采集软件可运行于 Win98.

NT 下,用于设置和操作 Pacific 6000 数据采集控制系统,数据采集速率最大 1 M/s,用户可根据需要对其进行二次开发。其功能模块图如图 1 所示。

1.2 自动紧急关机功能需求

发动机设计单位对紧急关机程序提出了具体判断准则。给出需要判读的关机参数及逻辑关系,对关机参数的判读周期为 100 ms,在连续三次满足关机条件时发出自动关机指令,紧急关机时间不大于 500 ms。

1.3 软件设计

由上述可知,需要在图 1 的基础上增加自动紧急关机判读模块及紧急关机信息存储模块。

1) 自动紧急关机判读。对采集系统获得的数据按照设定的逻辑关系进行判读,当满足关机条件时,通过继电器输出板卡发出触点信号,试验台控制系统接收信号后执行一系列关机动作。图 2 为自动紧急关机程序流程图。

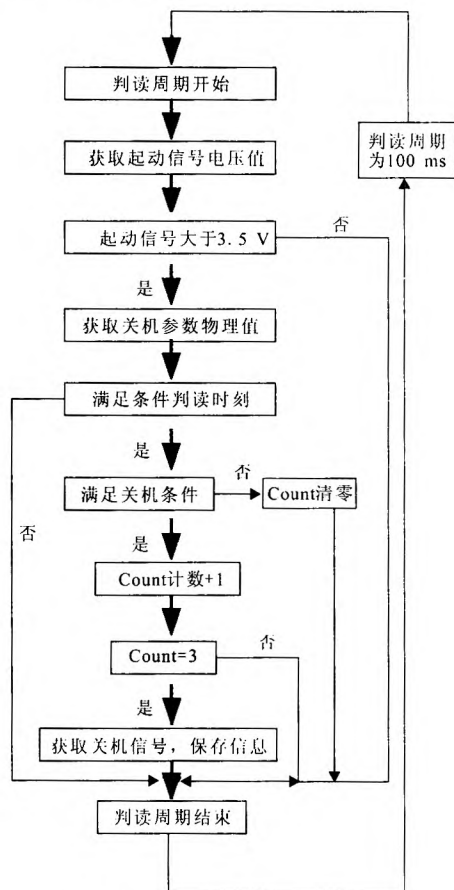


图 2 自动紧急关机程序流程图

Fig. 2 Flow chart of automatic emergency cut-off program

程序首先判断起动信号的电压值是否大于 3.5 V，当起动信号电压大于 3.5 V 时，判定发动机起动，该时刻定为“0 时刻”，开始获取关机参数的数值。使用判读周期累加的方式计时，当到达预定开始判读时刻时，开始按照预定判读条件，以 100 ms 为一个周期进行判读，当连续三次满足判读条件时发出紧急关机信号。

2) 紧急关机信息存储。当满足关机条件，执行关机动作的同时，保存判读参数的数值及时间信息，为事后查证提供依据。

通过图 2 可知，整个紧急关机判读过程由定时器控制来进行周期性的判读操作和计时，定时器性能的优劣关系到发生异常时，能否及时关机。

2 常用定时器性能对比

在紧急关机程序中，定时器是一个独立的线程，用于定时操作。在定时器使用时需要注意以下三个方面：一是在定时器中，不要执行可阻塞的事件，否则阻塞事件之后的操作将不能按时处理；二是在定时器中，不要执行过多占用 CPU 的操作，否则会导致定时器性能下降；三是定时器内的操作所需时间不能大于定时器的时间间隔，否则将引起程序崩溃。Windows 系统提供了多种定时器的实现方案，包括 WM_TIMER 消息映射、Sleep ()，timeGetTime () 函数、多媒体定时器和频率计数器等。

2.1 定时器精度测试

在 Visual C++ 6.0 开发环境下实现多个定时器对比，判读周期为 100 ms，测试时间为 2 000 s，使用频率计数器对其判读周期进行测量。统计结果如表 1 所示。

表 1 是在 CPU 为 Intel Core2 2.93GHz，安装 Windows XP SP2 操作系统的工控机上对上述定时器测试的结果。由表 1 可知，多媒体定时器和频率计数器的定时比较精确，但频率计数器的标准差较大，说明其稳定性差。

2.2 定时器差异分析

1) WM_TIMER 是将设定的定时周期转换为 IRQ0 请求中断的次数，当到达要求的次数时，

计时器对象就发送一个 WM_TIMER 消息，由响应函数处理。而 NT 内核的操作系统以约 15.600 1 ms 为周期响应中断，因此，定时器的最短时间间隔约为 15.6 ms；另外，虽然定时器已经发送了一条 WM_TIMER 消息到消息队列中，但其优先级不高，该消息可能得不到及时处理。因此，在工业实时控制系统中无法满足高精度的定时控制要求。

表 1 定时器测试结果统计
Tab. 1 Test results of timers

ms		
测试定时器	均值	标准方差
WM_TIMER	109.804 6	0.421 6
Sleep () 函数	109.830 4	0.267 3
GetTickCount () 函数	101.876 5	1.380 1
多媒体定时器	100.023 7	0.714 2
频率计数器	100.001 3	6.676 3

2) sleep () 函数的 CPU 占用率较高，一般适用于单任务的程序。实际测试，该函数的精度同 WM_TIMER 的效果相当。

3) GetTickCount () 函数可返回从计算机操作系统启动后到被调用时刻所经过的毫秒数，可利用其返回值实现定时功能。定时精度可满足需求。但是，其中断请求频繁，资源消耗较大。

4) Windows 中为多媒体定时器提供底层 API 支持，它通过 TimeBeginPeriod () 函数设置最小定时精度，使定时周期不受 15.600 1 ms 响应中断的限制，且该定时器也不依赖于消息机制，而是由 TimeSetEvent () 函数产生一个独立的线程，从而保证定时中断在 CPU 资源紧张时得到实时响应。多媒体定时器是一种比较理想的定时器，精度可达到毫秒级。

5) 频率计数器的精度非常高，可达纳秒级，但由于计算机硬件因素，会存在随机的“leap forward”现象，使得定时周期增加几十到几百毫秒，这对自动紧急关机程序来说是无法忍受的。

因此,确定使用多媒体定时器在PI660采集软件上实现自动紧急程序开发。

3 自动紧急关机程序响应时间分析

本程序是以Pacific 6000数据采集控制系统为基础进行二次开发,因此,判读响应时间受定时器和Pacific 6000数据采集控制系统两个方面的影响。

3.1 定时器精度对判读响应时间的影响

通过对定时器精度分析可知,自动紧急关机程序的一个判读周期实际是99~101 ms,由此对判读响应时间的影响如下:

1) 在连续三次判读时,会造成第三次判读时间误差为-3~3 ms。

2) 同理,使用判读周期累加的方式计时,如开始判读时刻为3 s,可能造成-30~30 ms的误差。

3.2 自动紧急关机程序自身特性对判读响应时间的影响

自动紧急关机程序的一个判读周期为100 ms,在判读发动机起动“0时刻”时,可能造成的延迟为0~100 ms。

为了消除判读“0时刻”带来的延迟,将其判读周期由100 ms改为10 ms,可将判读延迟时间缩短在0~10 ms。为了提高执行效率,减小资源消耗,程序其它部分的判读周期仍为100 ms。

3.3 Pacific 6000数据采集控制系统自身特性对判读响应时间的影响

Pacific 6000数据采集控制系统设有数据缓冲区,每隔50 ms打包发送至采集工控机,程序在 t 时刻读取的数据是过去50 ms内形成的数据包中的第一个值,因此,Pacific 6000数据采集控制系统的通道传输延迟为50 ms,如图3所示。程序在 t 时刻读取数据包中关机参数的数值时,会造成50~100 ms的延迟。

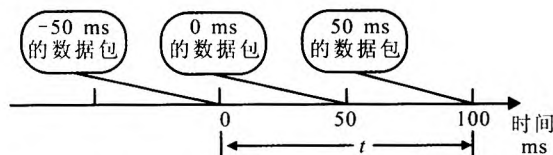


图3 Pacific 6000数据采集控制系统通道延迟

Fig. 3 Channel delay of Pacific 6000 DAS

综上所述,自动紧急关机程序响应时间为17~143 ms。

4 自动紧急关机程序测试及应用

根据发动机设计单提出的自动紧急关机判断准则,建立了涵盖故障及非故障模式库,共计32个状态。在与发动机试验状态一致的条件下模拟实现模式库内的所有状态,由Pacific 6000采集系统得到状态数据,PI660采集软件的自动紧急关机程序完成状态的判读,起动信号由控制系统触发。当输入故障模式状态时采集系统控制继电器吸合,发出信号给控制系统,控制系统接收到信号后发出关机动作指令。在试验现场与控制系统、发动机联合测试,自动紧急关机程序响应时间与上述理论分析一致。关机时间为317~443 ms,满足任务需求。自动紧急关机判读模块及紧急关机信息存储模块工作正常,PI660采集软件在二次开发后工作正常。某次热试车数据如图4所示,发动机工作到232.02 s时满足压力参数 $p_{ep} < 9.5$ MPa的关机条件,在232.36 s时完成自动紧急关机动作,关机时间为0.34 s。

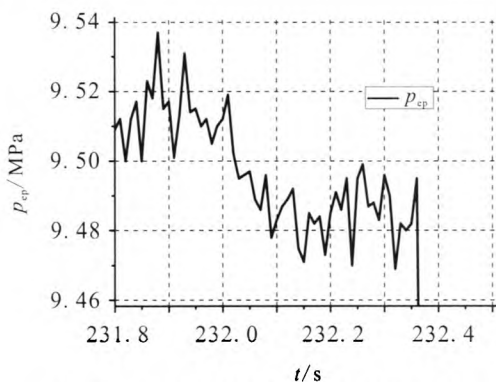


图4 p_{ep} 参数满足关机条件的放大曲线

Fig. 4 Magnified graph that p_{ep} parameters meet requirement of emergency cut-off

5 结论

经过分析、测试和试验验证,以Pacific 6000数据采集控制系统为基础,使用多媒体定时器在PI660采集软件上实现的自动紧急关机程序,具

(下转第78页)

供了资源储备。

参考文献:

- [1] 付永领, 祁晓野. AMEsim 系统建模和仿真 - 从入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [2] 周载学. 发射技术(中)[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [3] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [4] 廖少英. 液体火箭推进增压输送系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [5] 廖少英. 新一代运载火箭增压输送系统交叉输送技术研究[J]. 上海航天, 2005, 30(3): 37-41.
- [6] 范瑞祥. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 8-16.
FAN Ruixiang. Study on pressurization of new generation launch vehicle [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(4): 8-16.
- [7] 张银勇, 吴剑, 李向党. 某推进系统气路启动特性研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(6): 20-23.
ZHANG Yinyong. Starting characteristics of pneumatic system in propulsion system[J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(6): 20-23
- [8] 张雪梅. 动力系统大气垫容积启动充填仿真及试验研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(6): 1-4.
ZHANG Xuemei. Filling simulation and test research of power system with large ullage volume[J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(6): 1-4
- [9] 王定军. 贮箱充填过程仿真和分析[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 23-25.
WANG Dingjun. Simulation and analysis of the tank filling process[J]. Journal of rocket propulsion, 2008, 34(1): 23-25.
- [10] 张金容. 液体火箭发动机启动过程的动态仿真计算[J]. 低温工程, 2008 (2): 35-39.

(编辑: 马 杰)

(上接第 72 页)

备快速响应自动紧急关机功能, 无“误判、漏判”情况发生, 对发动机和地面试验设施起到一定的保护作用。由于 Pacific 6000 数据采集控制系统在其它试验系统广泛使用, 本程序的设计思路和方法具有较好的推广性, 在节约成本的同时也降低了整个测控系统的复杂性。

参考文献:

- [1] 唐云龙, 代玉东. 液氧/煤油发动机地面试验故障紧急关机系统研制[J]. 火箭推进, 2005(1): 47-51.
- [2] 卓红艳, 赵平. 基于 VC++ 的实时数据采集系统中定时器的使用比较[J]. 现代电子技术, 2007 (18): 80-82.
- [3] 王伟, 徐国华. 多媒体定时器在工业控制中的应用[J]. 微型机与应用, 2001 (12): 8-10.
- [4] 许广柱, 吴锦凤. 基于 WinCE 的发动机试验实时控制软件设计[J]. 火箭推进, 2011 (5): 74-77.
- [5] 王鹏飞, 王鹏. 基于 Visual C++6.0 的 Windows 应用程序定时器研究[J]. 计算机技术与发展, 2013 (2): 44-48.
- [6] 雷震, 唐云龙. VXI 数据采集系统的建立及其应用[J]. 火箭推进, 2008 (5): 54-58.
- [7] SOLOMON D, RUSSIONVICH M. Performance counter value may unexpectedly leap forward [J/OL]. [2011-09-14]. <http://www.wenku.baidu.com/v>.
- [8] 美国太平洋仪器公司. Pacific 6000 DAS 数据采集与控制系统硬件操作使用手册[Z]. 美国太平洋仪器公司, 2008.
- [9] 阮桢, 胡德金. 多媒体定时器在机油泵性能测试系统中的应用[J]. 工业控制计算机, 2005 (5): 27-28.
- [10] 王文武, 王诚. 多媒体定时器的定制和使用方法[J]. 计算机应用, 2000 (3): 39-41.
- [11] 何斌, 韦工. 基于多媒体时钟的定时控制[J]. 船舶电子工程, 2006 (4): 97-99.
- [12] 权晓蕾, 杨业明. 高精度定时方法在舵系统测控中的应用[J]. 计算机测量与控制. 2011 (6): 1325-1328.
- [13] 张志明, 孙广清. Windows 下高精度软件定时器的研究与实现[J]. 微型机与应用, 2003 (1): 55-57.
- [14] 张金英, 刘晓东. 基于 Windows 9x 的实时控制软件实现方案[J]. 控制工程, 2006 (S0): 116-122.
- [15] 曹双贵, 蒋芹. 基于 80X86 CPU 和 Windows 平台的实时测控系统精确定时[J]. 工业控制计算机, 2006 (10): 32-33.

(编辑: 王建喜)