

液氧/煤油发动机地面试验故障 紧急关机系统研制

唐云龙 代玉东

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 论述了液氧/煤油发动机研制地面试车中, 出现故障时所采用的紧急关机系统的原理和系统结构、设计程序、设计指标、关机判断准则、验证及应用等。

关键词: 发动机试验故障; 紧急关机; 设计; 应用

中图分类号: V434 文献标识码: A 文章编号: (2005)01-0047-05

Development of test fault emergency cut-off system for LOX/kerosene engine ground test

Tang Yunlong, Dai Yüdong

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Principles, program, design parameters and cut-off decision making criteria for LOX/Kerosene engine ground test emergency cut-off system were presented in this paper. The system has been applied to the LOX/kerosene engine ground test and verified.

Key words: engine test fault; emergency cut-off; design; application

1 引言

液体火箭发动机是我国目前运载火箭的主要动力装置。液体火箭发动机地面试验是发动机研制的关键环节, 是一项复杂的系统工程。它具有高风险、高费用、试验时间短、故障发展迅速等特点。试验中的故障可能来自发动机、也可能来

自试车台试验系统。由于试验过程中出现的故障在几十毫秒甚至几毫秒内可能造成发动机爆炸、试车台烧损、人员伤亡等灾难性的严重后果, 而人来不及判断, 无法及时采取有效措施。如果试验过程中由故障检测系统实时检测、实时判断, 采取相应的紧急关机措施, 则有可能降低故障带来的损失, 保证人身安全、保护发动机、保护试验设备, 同时为发动机试后故障分析提供故障现

收稿日期: 2004-09-04; 修回日期: 2004-12-22。

作者简介: 唐云龙 (1975—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验数据测量。

场。这对加快火箭发动机研制进度，特别对于可重复使用的液氧/煤油发动机的研制具有非常重要的意义。

随着科学技术的迅速发展，利用计算机、测控、仿真、人工智能等技术，结合专家经验，研制开发液体火箭发动机地面试验故障诊断系统成为可能。研制开发故障诊断系统，在发动机试验中进行实时状态检测、诊断，及时发现故障趋势，迅速采取有效措施，避免试车失败和灾难性的故障发生，具有巨大的经济效益和显著的社会效益。

2 液氧/煤油发动机地面试验故障紧急关机系统技术指标与功能

根据液氧/煤油发动机研制初期出现故障可能性的特点，研制开发了液氧/煤油发动机地面试验故障紧急关机系统。该系统基于关键的压力、温度、转速等参数进行实时判断，实施红线关机。

2.1 技术指标

包括采集系统与关键压力、温度、转速等传感器和开关信号直接连接，并具有自校、自检功能；系统响应发动机启动、点火、关机等控制信号时间小于 1ms。参数采集、传输、处理、判断、控制信号输出总时间小于 10ms；检测参数能力不少于 8 路，压力参数测量精度 0.5%，温度参数测

量精度 1%，转速参数测量精度 0.3%，数据传输准确率 100%，系统可靠性大于 99%。

2.2 系统功能

包括可对任意关键压力、转速、推力、温度等参数进行实时监测、实时判断；每个被监测参数出现超限时相应红灯指示，判断结果出现故障时红灯指示，同时声光报警，并对故障报警信号进行锁存；具有对被监测参数单个判断和多个表决功能；系统具有手动模拟每个参数超限和总故障功能；系统判据准则修改简单易行，参数出现超限报警时的数值和时间做存盘处理，事后可检查验证；紧急关机系统与数据采集系统、试车台控制系统相互隔离，硬件电路设计具有高的可靠性，用最少电路、最快时间响应事件；可实时显示监测参数数值及绘制曲线，并对故障点进行标明，事后可以用采集的数据进行数据回放和故障重显。

3 系统组成

3.1 系统结构

本故障紧急关机系统由传感器、信号调节器、数据采集系统、以太网数据传输系统、监控分析计算机、硬件扩展箱、信号控制等组成（见图 1）。

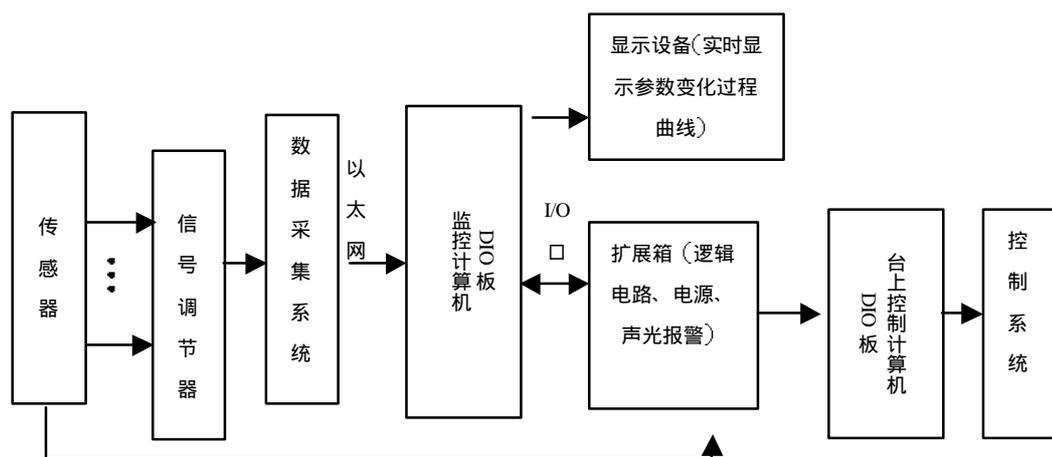


图 1 故障紧急关机系统结构框图

Fig.1 Structure of fault emergency cut-off system

3.2 硬件构成与作用

系统硬件主要由信号调节器、数据采集系统、数字 I/O 板、硬件扩展箱等组成。信号调节器完成传感器输出信号的滤波、放大、隔离等功能。数据采集系统完成对检测参数的校准、采集、发送功能。以太网数据传输系统将各节点通过星型拓扑结构连接到自适应交换机上,完成数据传输任务。监控分析计算机选用运算速度快、实时响应性能好、系统稳定性和可靠性高的计算机,完成数据计算、判断任务。

硬件扩展箱主要包括隔离电路、逻辑判断电

路、手动模拟超限电路、报警电路、输出控制电路和电源电路(见图 2)。隔离电路完成监控计算机输出与扩展箱内电路的隔离功能。手动超限电路主要模拟各检测参数超限和总故障输出。逻辑判断电路和软件判断相结合,按给定的数据判断准则完成单个参数超限或多个参数同时超限输出结果信号功能。报警电路根据逻辑判断电路的输出结果完成正常指示和故障指示及进行声光报警。输出控制电路完成故障输出信号与台上控制计算机联接和隔离。电源电路为扩展箱内各功能电路提供电源。

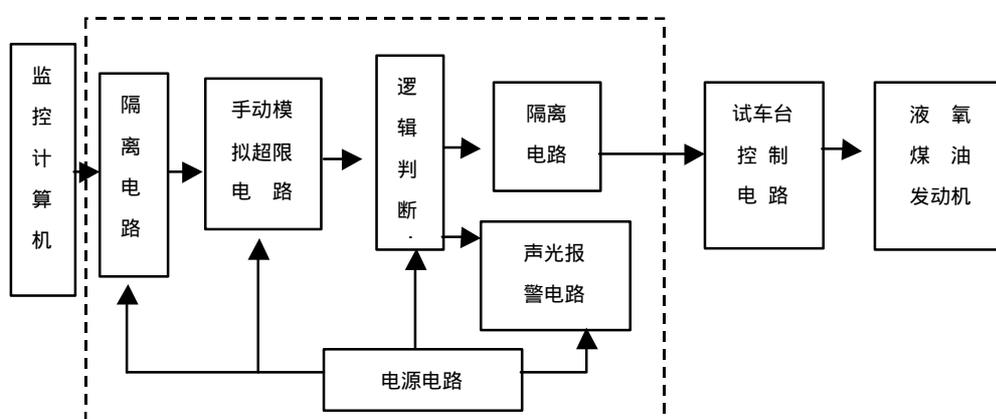


图 2 硬件扩展箱电路框图

Fig.2 Circuit of hardware expander box

4 系统工作原理和数据判断准则

4.1 工作原理

液氧/煤油发动机试车过程中,测量传感器将被测信号转换成电信号,经信号调节器调节后送到数据采集系统,数据采集系统采集试车数据的同时向监控分析计算机通过以太网按 100 次/秒速率发送数据,参数是否超限由监控分析计算机判定。监控分析计算机中增加 DIO 板,将判定的结果通过 DIO 输出端口实时送到硬件扩展箱。扩展箱完成参数超限逻辑判断、表决、声光报警及给控制台发送控制信号等任务。试车台上控制计算机对硬件扩展箱送过来的信号实时检测,最终完成故障关机。这样在 10ms 内完成故障的判断与关

机。硬件电路完成逻辑判断、表决的目的是为了提高实时性,因为多个参数的逻辑判断、表决要耗费大量的时间。

4.2 数据判断准则

实施故障关机的故障判断准则是研制故障紧急关机系统的基础,它与产品的故障模式相关。在不同的研制阶段,故障模式可能不同,所以要随着研制的深入不断地丰富和修正故障判断准则。在液氧/煤油发动机的研制初期,提出以下准则作为红线关机的依据:

(1) 选择关键的压力、转速、温度和压力信号器参数作为监测参数,并根据试车统计结果确定各参数幅值范围。

(2) 发动机启动阶段和主机阶段制定不同的判断准则。启动阶段监测参数的波形变化,发现参数下降比率超过一定范围时进行报错。主级阶

段检测给定时间内参数是否达到预定阈值,变化率是否在给定范围内,至关机时参数是否保持稳定。

(3) 根据各参数相互协调性实行多路参数表决机制。只有当多数参数同时且连续多次报错时才进行关机报警,不用单个参数来决定是否报警。

(4) 制定的判断准则需经过多次试车验证方可投入使用,如果试车状态变化则判断准则要作相应修整。

5 软件设计

故障紧急关机程序由故障参数数据发送、故障数据接收与处理判断及故障仿真三部分程序组成,分别运行于采集计算机和故障监控分析计算机上。故障数据接收处理程序又分为系数及环境变量设置、故障数据实时接收判别、事后故障报告生成等模块(见图3)。

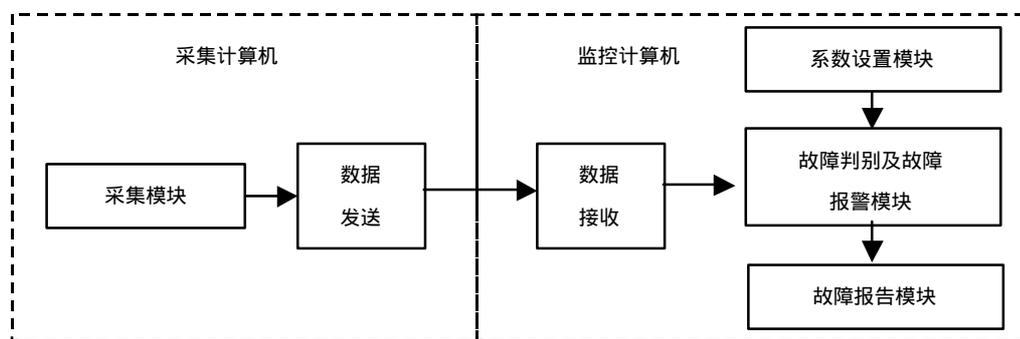


图3 各程序模块关系结构图

Fig.3 Relationship of program module

5.1 故障数据采集与发送模块

本程序是在系统采集程序上进行扩充设计而成。程序运行时,根据事先给定的次序从每次的采集原码数据中挑选出用到的诊断数据,并以给定的速率(现为100次/秒)发送到指定IP地址的监控分析主机。监控分析主机可以通过更改配置文件来变更。

本部分的难点在于既要保证数据发送的实时性和可靠性,又要对系统的采集过程不造成影响。由于系统主机计算速度和接口速度较慢,程序设计时要进行充分优化,最大程度地利用系统的能力。本程序数据传输部分采用了传输速度较快的UDP网络协议,保证了数据发送的实时性。同时由于UDP协议的无连接特性,这样无论数据接收端处于何种状态都能保证和采集系统的无关性,不会影响采集过程的进行。此外,程序设计时还采取了多种措施保证了系统的可靠性。数据发送在采集中断处理服务程序外运行,确保不会影响

采集程序的运行。在点火信号收到后才开始进行故障数据发送,减少了数据发送次数,降低了采集计算机的负担,保证数据发送的可靠性。

5.2 故障数据接收及处理模块

(1) 参数系数设置程序模块:本模块用于对参数系数、计算环境变量、文件信息等故障判断数据处理过程中用到的信息进行设置。采用Office标准界面设计,简单易用,并具备设置信息打印检查功能。

(2) 故障数据接收:数据接收部分用于实时接收发送方传来的监测数据二进制采集原码,将之转换为1:1mV/Hz数传递给数据判断处理程序并保存到硬盘上。

(3) 故障数据处理及判断:本模块用于将接收到的判断数据处理成物理量,再根据判据条件判断某个参数是否存在故障,进行故障指示输出,由信号扩展箱进行综合判断后向台上发出警示信号。此外,本模块还实时生成监测参数的数值和

曲线的显示画面,供操作人员观察。

在试验过程中由于各种原因,参数测量中会出现一些波动干扰数据。为了真实反映发动机状态,在进行数据分析判断时需要将这些干扰点排除掉。本程序中内置了干扰点消除功能,可以通过判断数据变化连续性,排除掉瞬间干扰点。

(4) 故障数据报告生成模块:用于浏览故障数据文件,并提供打印输出功能。本模块可显示任意时刻监测参数测量值、故障名称及故障发生时刻。为验证程序运行结果和故障原因分析提供重要依据。

5.3 故障仿真程序

本程序可以通过事后回放监测参数数据文件,模拟试车紧急关机系统运行情况并生成故障参数曲线。程序的判别过程完全同故障数据处理机判别程序一致。通过模拟,可全面检验故障判断准则和进行故障分析。

6 系统调试

6.1 硬件调试

利用手动模拟产生各参数超限情况,检查各分电路和总报警电路、锁存电路是否工作正常,逻辑电路之间时序是否正确,是否存在竞争冒险现象。确保逻辑电路设计的正确性和实时响应性,用最少电路、最快时间响应事件。

6.2 软件调试

从已有的试验数据中挑选出监测参数数据形成数据文件,由监控分析计算机运行数据仿真处理程序,从数据文件中定时读取数据进行回放判断,将模拟结果同试车实际情况相验证。成功的试验数据应顺利通过故障判别程序测试,失败的试验数据则应及时出现故障报警,报警情况应与实际试车情况相符,多次试车数据测试不应出现误报警情况。

6.3 联机调试

联机调试中,在采集计算机端编制数据转换程序,将已有的数据文件转换为二进制采集原码文件。编制模拟采集数据程序,将指定的数据文件中的数据实时挑选出来,按照指定速率(100次/秒)发送到监控机,监控机运行数据接收判别程序,对收到的数据进行判断,将判断结果同试车实际情况相验证,若发生故障则通过硬件扩展箱进行报警输出。该调试过程可全面检查数据传输、处理判断程序和硬件扩展箱电路的功能和稳定性、实时性。

7 热试车测试结论

研制开发的故障紧急关机系统已在十余次液氧/煤油发动机整机试车中试运行,获得了圆满成功。在试车过程中,故障紧急关机系统参数测量准确、判断正确,完整准确地实现了数据判断准则的要求内容。该系统工作可靠,未因自身原因发生误报警等异常情况,成功通过测试。

但需要指出的是:该系统仅是简单的红线关机系统,其核心是数据判断准则。根据发动机研制、试验情况,需对数据判断准则进行随机修正,以保证系统的可靠运用。

参考文献:

- [1] 郭宵峰等,火箭发动机试验[M],北京:宇航出版社,1990.
- [2] 王永忠编译,火箭发动机故障诊断系统的研究[R],火箭推进,2002,(3).
- [3] 张辉,李聪玲,火箭发动机试验控制系统的可靠性设计[R],HT-20010662.

(编辑:侯早)