

# 液体火箭发动机实时故障检测与报警原型系统的设计与实现

刘洪刚, 谢廷峰, 丁伟程, 吴建军

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙, 410073)

**摘要:** 实现了液体火箭发动机启动和稳态工作过程故障检测的神经网络和统计算法, 以及检测结果的综合决策与报警算法, 并从系统硬件、软件结构和功能等方面设计建立了液体火箭发动机工作过程的实时故障检测与报警原型系统。试车数据验证考核结果表明, 故障检测与报警系统能及时和准确地对发动机稳态和启动工作过程中的故障进行检测和报警, 现已成为实验室级发动机故障检测与报警的演示与验证原型系统, 并对实现未来箭载发动机工作过程实时在线故障检测与报警具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 液体火箭发动机; 实时故障检测; 综合决策与报警

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)04-0021-05

## Design and realization of primitive real-time fault detection and alarm system for liquid propellant rocket engines

Liu Honggang, Xie Tingfeng, Ding WeiCheng, Wu Jianjun

(School of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The real-time fault detection and alarm system for liquid-propellant rocket engines is founded in this paper, in which the hardware, software and functional structure are designed, and the integrated decision-making method and the neural network and statistical methods are proposed for fault detection. Test results show that, the system founded can detect the faults occurred in the beginning and normal process of the engines effectively and in time, and it now has been a demonstration proving system for fault detection and alarm of rocket engines in the laboratory. So it has important practical value for the on-line fault detection and alarm system of vehicles in the future.

收稿日期: 2005-04-30; 修回日期: 2005-6-29。

作者简介: 刘洪刚(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为液体火箭发动机健康监控。

**Key words:** liquid-propellant rocket engine, real-time fault detection, integrated decision-making and alarm

## 1 引言

研究液体火箭发动机故障检测与诊断方法和技术的最终目的是在发动机的健康监控系统中能实际应用,但由于发动机健康监控系统的研究和应用历史还比较短,虽然现在已经有一些系统<sup>[5, 6]</sup>投入使用或试运行,但总体来说还不是很成熟,尤其是功能较强、性能较高的系统基本都还未达到实时在线运行的水平<sup>[7]</sup>。

从实际情况和系统研制的一般途径,以及美国对 SSME (Space Shuttle Main Engine, 航天飞机主发动机) 监控系统的研究过程来看,对液体火箭发动机健康监控系统的研制可按照下面的方式进行:功能上,首先在发射前地面的检查、试车、系统行为的事后分析等技术要求相对低一些的方面取得突破,研制出状态监控与故障诊断系统,之后过渡到飞行状态,实现全局监控;算法上,从事后、离线分析向实时、在线应用发展;开发策略上,先在实验室发展演示、验证性的系统,然后发展为工程实用的系统,并在已有系统的研制和使用过程中不断总结、积累经验。

基于上述要求,本文设计建立了液体火箭发动机工作过程的网络化故障检测与报警原型系统,主要包括:完成了系统的硬件、软件结构和功能设计,实现了发动机工作过程故障检测的神经网络算法、统计算法以及检测结果的综合决策与报警算法。上述系统已经过大量的试车数据考核,现已成为发动机实时故障检测与报警的实验室级演示与验证原型系统。结果表明,该系统能有效、及时和准确地对发动机稳态和启动工作过程中的故障进行检测和报警,对实现发动机工作过程故障检测与报警的在线实时应用将具有重要的参考价值。

## 2 系统硬、软件结构和功能设计

### 2.1 系统硬件结构设计

对于液体火箭发动机,由于其特殊的工作条

件,在进行检测诊断的时候需要进行大量的数据汇集、处理和显示等工作。因此,发动机故障检测与报警系统采用了基于局域网通信技术的星型分布式系统结构,不仅可以实现分散监控和集中管理与诊断,同时还具有扩展灵活和可靠性高等特点。

系统采用如图 1 所示的硬件结构,构建发动机基于热力参数的网络化实时故障检测与报警系统:

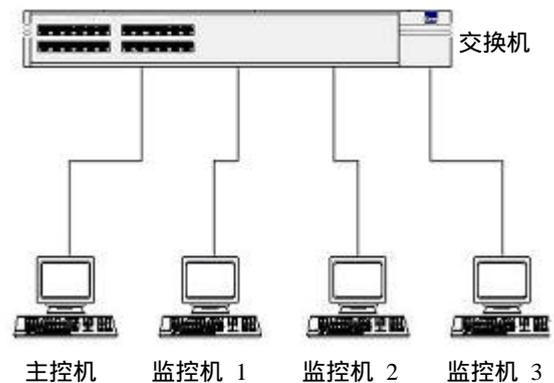


图 1 系统硬件结构

Fig.1 System hardware structure

系统的网络由多台计算机组成,主要包括:

**主控机:**负责系统任务的调度和控制、与用户的人机交互,以及故障检测的综合决策与报警;

**监控机:**包括一台或多台计算机,基于神经网络算法和统计算法完成发动机工作过程的实时故障检测与报警;

系统的网络结构为可扩展结构,可根据需要随时进行扩展;

在该网络结构中,主控机处于主导地位,而其余各计算机处于从属地位,在主控机的调度下,完成试车数据的存储、检测和显示;同时,各计算机作为独立系统运行,相互平等。

### 2.2 系统功能设计

液体火箭发动机故障检测与报警系统实现的功能主要有:对测量数据进行实时发送、传输、

接收、存储和转换的能力；具有发动机运行状态的实时显示、状态监测与综合决策报警的能力；具有对测点数据、报警信息及故障信息进行管理、查询、分析和处理的能力。

因此，发动机故障检测与报警系统按功能可分为三个子系统：

监测子系统主要完成对数据的故障检测、实时显示、综合决策、报警处理（给出报警信号，记录检测结果，并向系统用户发出报警声音、图像等信息）等任务；

用户接口子系统提供图形化人机交互界面，接收用户的控制信息并响应用户的控制命令，从而完成对系统的控制、用户和数据管理以及数据分析等操作，并将检测和报警信息反馈给用户，供用户参考；

数据库子系统是系统的数据和信息存储机构，存储和管理发动机工作过程的参数信息、测量数据以及检测和报警信息等，为发动机工作过程故障检测与报警系统提供强大的数据支持。

系统的功能按模块可分为：数据读取模块、网络通信模块、系统控制模块、故障检测模块、综合决策与报警模块、实时显示模块、数据存储模块、数据分析模块、数据管理模块和用户管理模块等。

系统的流程结构见图 2。

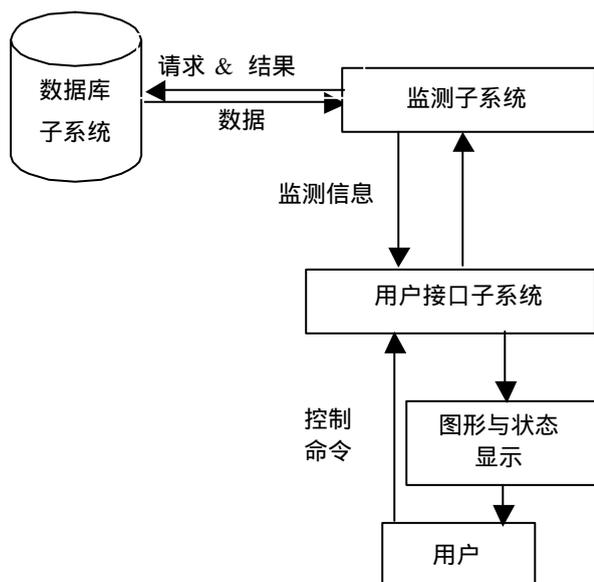


图 2 系统数据流程

Fig.2 System data flow

### 3 系统的实现与试车数据验证

#### 3.1 系统的软件实现

系统软件的编制采用了 LabWindows/CVI、C++Builder、Delphi 和 Matlab 混合编程的方法<sup>[4]</sup>。其中，底层测控、发动机试车数据的分析和检测与报警等功能由 LabWindows/CVI 实现，充分利用 LabWindows/CVI 强大的数据分析能力、丰富的控件库和测量函数库以及 C 语言简洁快速有效的功能。

发动机试车数据的管理以及用户的管理等功能则由 C++Builder 和 Delphi 编程实现，充分发挥两者开发周期短、在面向对象编程技术以及在数据库访问和数据读取方面的优势。

发动机工作过程基于神经网络的故障检测方法由 Matlab 实现，充分利用 Matlab 在神经网络计算、数据处理和仿真方面的强大功能。

上述三者都作为独立的子系统运行，并由 LabWindows/CVI 统一调用。这样，既充分发挥了每种开发工具的优势，又提高了系统的可移植性和兼容性。

作为系统的控制中心，系统软件的主界面在主控机上运行，并提供了友好的人机交互功能，主要包括：

系统结构信息：提供对发动机结构信息的显示；

系统参数选择：包括选择试车数据类型、是否声音报警等；

信息显示：提供了对发动机工作过程故障的光报警功能，同时还提供了网络中各监控机的网络连接状态，以及发动机试车数据型号、系统运行时间、运行过程实时检测结果的显示；

监控系统的操作：该区域主要集中了系统的操作功能，主要包括：系统的运行与退出、数据信号分析、数据管理、用户管理和帮助文档等。

#### 3.2 故障检测的综合决策与报警算法

对于液体火箭发动机，故障检测方法除门限检测方法以外，主要有基于模型的方法、神经网络方法、数据统计方法等<sup>[1,2,3,8]</sup>。基于模型的方法虽具有较强的检测能力，但这种方法计算量大，而且对于液体火箭发动机，很难建立其准确的数

学模型, 这都限制了它在工程中的应用。而另一方面, 在液体火箭发动机的试车过程中, 积累了大量的试车数据, 因此, 数据统计的方法作为一种根据数据是否具有正常情况下的统计特性来进行检测的方法, 由于其简单可靠的特点, 得到了广泛应用。同时, 神经网络方法是近年来随着神经网络理论和技术发展而出现的一种新的故障检测方法, 具有很强的数据处理能力, 因而有很好的应用前景。因此, 本节将基于在统计理论上发展起来的自适应相关算法 (Adaptive Correlation Algorithm, ACA)、自适应阈值算法 (Adaptive Threshold Algorithm, ATA)、包络线算法 (Envelope Algorithm, EA) 和神经网络算法 (Neural Network, NN), 以及基于表决策策略开发实现对液体火箭发动机稳态和启动工作过程故障检测的综合决策与报警。其具体实现方法为图 3。

以工程应用中的红线关机技术作为系统故障检测与报警的最底限, 即当红线关机技术检测到故障时, 不管其余算法是否已经检测出故障, 系统立即报警。

而对于发动机工作过程故障检测的自适应阈值算法、自适应相关算法和神经网络算法等, 则以少数服从多数的方法进行表决, 即只有当多数算法检测出故障时, 系统才报警。

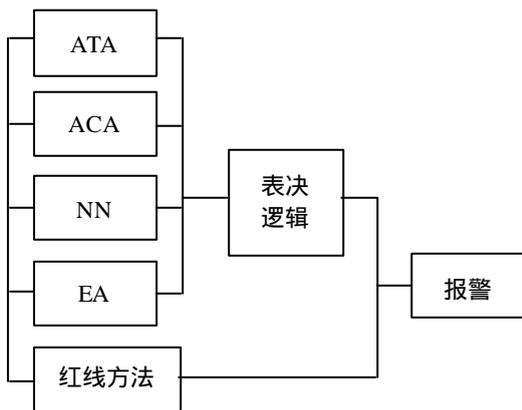


图 3 综合决策与报警算法

Fig.3 Integrated decision making method

基于上述故障检测的综合决策与报警方法, 共计用 4 次发动机稳态故障数据、1 次启动故障数据和 2 次启动异常数据进行了验证。验证结果为:

TEST1-1 试车数据: 系统在 42.70 秒检测出故障并进行报警, 实际试车中红线关机的时间为 43.23 秒;

TEST1-2 试车数据: 系统在 42.70 秒检测出故障并进行报警, 实际试车中红线关机的时间为 43.23 秒;

TEST5-5 试车数据: 系统在 275.60 秒检测出故障并报警, 实际试车中红线关机的时间为 275.8 秒;

TEST2-0 试车数据: 系统在 30.20 秒检测出故障并进行报警, 实际试车中红线关机的时间为 30.23 秒;

TEST8-8 试车数据: 系统在 0.6 秒检测出故障并报警, 实际试车中红线关机的时间为 1.32 秒;  
TEST6-0、TEST6-2 试车数据: 系统在 2.4 秒检测出异常并报警, 实际试车中该次试车工况偏低, 20 秒人工控制关机。

同时, 对表 1 中的 28 次正常试车进行了验证, 验证结果中无一出现误报警 (其中, 符号 “/” 表示算法没有误报警)。

表 1 正常试车数据检测结果

Tab.1 Detect result of normal data

Test Type	Detect Result	Test Type	Detect Result
TEST6-5	/	TEST8-6	/
TEST4-5	/	TEST8-7	/
TEST4-6	/	TEST9-1	/
TEST4-7	/	TEST9-2	/
TEST5-0	/	TEST9-3	/
TEST5-1	/	TEST9-4	/
TEST5-2	/	TEST2-1	/
TEST5-3	/	TEST2-2	/
TEST6-1	/	TEST2-3	/
TEST6-2	/	TEST2-4	/
TEST6-3	/	TEST2-5	/
TEST8-3	/	TEST3-1	/
TEST8-4	/	TEST3-2	/
TEST8-5	/	TEST3-3	/

以上结果表明, 系统对于发动机稳态和启动工作过程中发生的故障能及时准确地检测, 并且

相对红线关机时间,都有一定幅度的提前;同时,对于正常的试车数据,该算法没有产生错误的检测结果。

## 4 结论

本文建立了实验室级发动机实时故障检测与报警的演示与验证原型系统,完成了系统的硬件、软件结构和功能设计,实现了发动机工作过程故障检测的综合决策与报警算法及其试车数据的验证。结果表明,故障检测与报警原型系统能有效、及时和准确地对发动机稳态和启动工作过程中的故障进行检测和报警,对实现发动机工作过程故障检测与报警的在线实时应用具有重要的价值。

然而,在液体火箭发动机故障检测与报警系统从实验室级向现场级过渡的过程中仍存在许多问题需要解决,主要包括:

(1)在上述系统结构中,主控机作为整个系统网络结构的中枢,既要接收来自底层测控网络的大量数据,又要与网络各台计算机进行通信,因此,主控机及其网络极易可能成为提高系统实时性的瓶颈。为此,应提高现有系统结构中主控机及其网络硬件的性能,以及充分利用开发工具所提供的实时功能和基于流数据库和实时数据库技术提高系统对测量数据存储、传输的响应性能。

(2)液体火箭发动机故障检测与报警系统的准确性是其另一个重要的性能指标。提高故障检测的准确性,唯一的途径只有通过大量试车数据的验证和考核,并不断完善检测算法。但随着发

动机设计和研制水平的不断提高,故障数据将越来越难以获得。因此,在对发动机故障检测与报警系统进行现场验证与考核之前,应将人为设置和模拟故障作为实验室考核检测准确性的一个重要手段。

### 参考文献:

- [1] 朱恒伟.液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究[D].长沙:国防科技大学研究生院,1997.
- [2] 黄敏超.液体火箭发动机故障的神经网络诊断研究[D].长沙:国防科技大学研究生院,1998.
- [3] 吴建军.液体火箭发动机故障检测与诊断研究[D].长沙:国防科技大学研究生院,1995.
- [4] 宋宇峰等.LabWindows/CVI 逐步深入与开发实例[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [5] Frank Sietzen Jr. SLI. Reinventing the rocket. Aerospace America[J]. 2002, 5.
- [6] Mark Schwabacher, Jeff Samuel, Lee Brownston. The NASA integrated vehicle health management technology experiment for X-37[R]. 2002.
- [7] Jianjun Wu. Liquid-propellant rocket engines health-monitoring-a survey[C]. The 52th International Astronautical Congress. France. 2001.
- [8] John P. Butas, et al. Rocket engine health monitoring using a model-based approach[R]. AIAA-2001-3764.

(编辑:侯早)