

学 术 著 作 丛 书

液体火箭发动机 健康监测技术

张育林 吴建军 等著



本书由国防科技大学
学术著作专项经费
资助出版

液体火箭发动机健康监控技术

张育林 吴建军 朱恒伟 谢涛 刘昆 著

国防科技大学出版社

· 长沙 ·

图书在版编目(CIP)数据

液体火箭发动机健康监控技术/张育林,吴建军,朱恒伟,谢涛,刘昆著. —长沙:国防科技大学出版社,1998.11

ISBN 7-81024-470-1

I. 液体火箭发动机健康监控技术

II. 张育林 吴建军 朱恒伟 谢涛 刘昆

III. ①液体火箭发动机②故障诊断与监控

IV. V23

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:罗青 责任校对:文慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:11.5 字数:289千

1998年11月第1版第1次印刷 印数:1—800册

*

定价:20.00元

内 容 简 介

液体火箭发动机健康监控技术综合应用故障检测、诊断及控制方法,对液体火箭发动机的工作过程进行监控,从而达到提高航天器发射运行安全性和可靠性的目的。本书对液体火箭发动机健康监控的基本理论与方法进行了系统的论述,内容包括故障模式分析、故障检测与诊断算法、故障诊断实时验证系统及健康监控传感器技术。特别对液体火箭发动机的故障建模与仿真、基于模型的检测与诊断方法、基于进化计算的检测与诊断理论和基于部件模块的故障诊断方法进行了深入研究。

本书适合于从事航天技术及故障诊断理论研究与应用的人员阅读,对其它工程技术领域的科技人员及研究生也有参考价值。

前 言

航天技术是衡量一个国家综合国力的重要标志,航天发射的成功和航天飞行器的安全运行不仅具有巨大的经济意义,而且具有极其重要的社会影响。因此,对航天器和航天运输系统的安全性和可靠性提出了越来越高的要求。液体火箭发动机是航天飞行器和航天运输系统的核心,对其运行过程进行故障监控是提高航天活动安全性的重要手段。

液体火箭发动机的故障监控在最近十多年来进行了广泛研究,已经发展成为推进技术的一个专门领域,也即液体火箭发动机健康监控技术。液体火箭发动机健康监控包括故障检测、故障诊断和故障控制等方面的内容,主要目的是利用健康监控系统对液体火箭发动机的可能的运行故障进行检测、识别、定位和评估,并采取故障报警、紧急关机及启动冗余备份等故障控制措施,从而保证航天飞行的安全性或将故障引起的损失降低到最低限度。液体火箭发动机健康监控系统对于确保发动机的地面试车过程的安全性和实现基于地面试验及飞行测试数据的故障自动化分析也具有重要作用。

液体火箭发动机健康监控技术的核心是故障检测与诊断的理论与方法。现代液体火箭发动机是在极端物理条件下(例如高温、高压、强腐蚀和高密度的能量释放等等)运行的复杂流体—热动力系统,其故障的发生和发展具有极端的快速性和极大的破坏性,对

于发动机系统故障的漏报警会导致严重的后果;然而由于航天飞行及现代大型液体火箭发动机系统本身的费用极为昂贵,如果在发动机正常运行的条件下作出故障发生的误报警同样也会造成无法弥补的损失。因此,液体火箭发动机故障检测与诊断研究的主要目标就是提高健康监控系统的可靠性并在结构上不降低发动机本身的固有可靠性,从而达到提高航天飞行安全性的目标。液体火箭发动机健康监控技术综合应用推进理论、自动控制、信号处理、模式识别、人工智能及传感器技术与计算技术等多个学科领域的技术成果,发展形成了液体火箭发动机故障检测与诊断的各种算法与技术,并在航天运输系统的飞行任务及液体火箭发动机的地面试验中得到了成功的应用,取得了理论和工程上的重要进展,形成了基本的理论体系和科学方法。但是,到目前为止还没有一本系统反映液体火箭发动机健康监控技术的学术著作。本书的目的就是系统总结液体火箭发动机健康监控的基本理论和方法,为液体火箭发动机健康监控技术的研究与应用提供基础。

液体火箭发动机健康监控是正在发展的研究领域,作为一本学术专著,很难包括该领域所有方面的研究与进展,本书主要反映了作者在这方面的研究成果,包括液体火箭发动机故障的建模与仿真、故障模式与效应分析、故障诊断框架、故障检测算法、故障诊断算法等方面的内容。全书共16章,由张育林、吴建军负责统稿,其中第2章由张育林执笔,第1、3、4、5、6、7、8章由吴建军执笔,第9、10章由张育林、谢涛执笔,第11、12、13、14章由朱恒伟执笔,第15章由张育林、吴建军执笔,第16章由刘昆执笔。本书为从事航天技术及故障检测与诊断的理论研究与工程应用的研究人员提供技术参考。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(项目批准号:59186026、69785002)、国家863计划航天领域以及航天工业总公司有关基地和研究所的经费资助,本书的出版得到了国防科技大

学学术专著出版基金的大力资助,在此一并表示衷心的感谢。由于作者水平有限,难免有欠妥之处,敬请读者批评指正。

作者

1998 年 6 月于国防科技大学

目 录

第一章 绪论

§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 发展与现状	(3)
§ 1.3 故障检测与诊断方法评述	(6)
§ 1.4 健康监控技术的演变趋势	(15)
参考文献	(17)

第二章 发动机系统组成与故障效应

§ 2.1 引言	(21)
§ 2.2 发动机系统组成与工作原理	(22)
§ 2.3 发动机的性能参数与工作特性	(25)
§ 2.4 发动机故障效应	(34)
§ 2.5 结论	(39)
参考文献	(39)

第三章 发动机稳态特性仿真及分析

§ 3.1 引言	(40)
§ 3.2 发动机数学模型	(41)
§ 3.3 仿真计算方法	(47)
§ 3.4 计算结果及分析	(48)
§ 3.5 结论	(58)
参考文献	(60)

第四章 发动机故障状态过渡特性数值模拟

§ 4.1 引言	(62)
§ 4.2 发动机非线性动态数学模型	(63)
§ 4.3 数值模拟方法	(71)
§ 4.4 计算结果和讨论	(73)
§ 4.5 结论	(82)
参考文献	(83)

第五章 发动机故障综合分析及故障诊断系统框架

§ 5.1 引言	(84)
§ 5.2 发动机故障试车统计	(85)
§ 5.3 监测参数选择评价	(87)
§ 5.4 发动机故障检测与诊断系统研究框架	(91)
§ 5.5 结论	(95)
参考文献	(95)

第六章 基于模型状态估计的故障检测方法研究

§ 6.1 引言	(97)
§ 6.2 发动机状态估计数学模型	(98)
§ 6.3 发动机扩展卡尔曼滤波器	(100)
§ 6.4 故障检测算法 I — χ^2 统计测试	(102)
§ 6.5 故障检测算法 II — 智能决策方法	(104)
§ 6.6 仿真实例	(108)
§ 6.7 结论	(115)
参考文献	(116)

第七章 液体火箭发动机基于时序分析的故障检测

§ 7.1 引言	(119)
§ 7.2 发动机监测参数时序分析及建模方法	(120)
§ 7.3 故障检测策略	(125)
§ 7.4 实例验证	(125)
§ 7.5 结论	(142)
参考文献	(143)

第八章 液体火箭发动机基于非线性辨识的故障检测

§ 8.1 引言	(145)
§ 8.2 发动机启动过程和关机过程的工作特点	(147)
§ 8.3 回归分析方法及存在的问题	(148)
§ 8.4 神经网络辨识方法	(151)
§ 8.5 基于非线性辨识模型的故障检测策略	(155)
§ 8.6 工程实例验证	(156)
§ 8.7 结论	(162)
参考文献	(165)

第九章 滑动数据窗聚类方法

§ 9.1 引言	(168)
§ 9.2 高维采样数据的聚类算法	(169)
§ 9.3 高维采样数据聚类检测与诊断算法	(177)
§ 9.4 数值仿真结果分析	(183)
§ 9.5 结论	(189)
参考文献	(191)

第十章 故障特征选择

§ 10.1 引言	(194)
§ 10.2 基于 Shannon 互信息的特征参数优选准则	(195)
§ 10.3 基于样本集综合离散度的参数优选准则	(202)
§ 10.4 基于遗传算法的故障特征参数优选	(204)
§ 10.5 数值实验结果	(210)
§ 10.6 结论	(215)
参考文献	(216)

第十一章 基于静态模型故障诊断的原理和策略

§ 11.1 引言	(218)
§ 11.2 基于静态数学模型的故障诊断策略	(220)
§ 11.3 基于部件模块的故障诊断策略	(228)
§ 11.4 其它故障诊断策略	(236)
§ 11.5 故障的可检测性和可分离性	(236)
§ 11.6 结论	(238)
参考文献	(239)

第十二章 基于线性静态模型的故障诊断方法

§ 12.1 引言	(242)
§ 12.2 基于线性静态模型的故障诊断系统	(244)
§ 12.3 进一步的讨论	(257)
§ 12.4 结论	(265)
参考文献	(266)

第十三章 基于非线性静态模型的故障诊断方法

§ 13.1 引言	(268)
§ 13.2 参数估计与假设验证系统	(269)
§ 13.3 假设生成系统与结果选择系统	(276)
§ 13.4 仿真结果及分析	(277)
§ 13.5 结论	(290)
参考文献	(290)

第十四章 基于部件模块的故障诊断方法

§ 14.1 引言	(292)
§ 14.2 参数传播与协调的理论和技術	(293)
§ 14.3 基于部件模块的故障诊断系统	(310)
§ 14.4 结论	(315)
参考文献	(315)

第十五章 液体火箭发动机故障诊断算法实时验证系统

§ 15.1 引言	(317)
§ 15.2 实时验证系统的构成及实现	(318)
§ 15.3 实时故障仿真系统实现	(321)
§ 15.4 实时验证的基本问题	(332)
§ 15.5 结论	(334)
参考文献	(335)

第十六章 液体火箭发动机健康监控传感器技术

§ 16.1 引言	(336)
§ 16.2 传感器技术在健康监控系统中的作用	(336)

§ 16.3	先进传感器技术	(338)
§ 16.4	传感器数据确认	(343)
§ 16.5	发展对策	(345)
参考文献		(345)

附录 符号说明

第一章 绪 论

§ 1.1 引言

从人类发射第一颗人造地球卫星以来,航天技术的发展十分迅速并取得了举世瞩目的成就。30 多年来,世界各国已向空间发射了数千个各种用途的航天器,在通信、气象、导航、地球资源考察、月球和星际探测、科学试验和国防等方面取得了重大成就。现在,航天技术已成为当代一个国家科学技术发展水平的重要标志之一。美、俄、西欧和日本等国都在现有的航天技术基础上,制订了包括各种应用卫星、载人空间站和航天运载系统的航天技术发展规划,这充分展现了人类征服空间、开发和利用空间资源的壮志。

化学火箭发动机利用航天运载系统或航天器自身携带的推进剂作为能源和工质,工作不受环境的限制,是当前可以在大气层以外的空间工作的主要动力装置。液体火箭发动机由于具有性能高、适应性强、工作可靠和成本低廉等优点,因而在航天技术领域中得到了广泛的应用。

随着航天技术的迅速发展,液体火箭推进技术取得了巨大的进展。液体火箭推进系统在性能、适应性、可靠性、经济性、寿命和重复使用等方面取得了重大突破。为了更好适应航天技术发展的需要,液体火箭推进技术领域对以下各方面的技术进行了大量的探讨和研究。

(1) 高能、高密度的推进剂组合;

(2) 闭式动力循环;

- (3)大面积比喷管;
- (4)工作适应性;
- (5)寿命、可靠性和重复使用性能;
- (6)燃烧效率、燃烧稳定性;
- (7)高速涡轮泵系统;
- (8)新材料、新工艺。

产品的质量与可靠性是产品的生命,可靠性对航天产品尤为重要。现在国际上几大运载器每次发射的费用都在几亿美元(包括卫星和运载器)以上。载人航天飞行除考虑经济性外,更重要的是航天员的生命安全问题。例如,1986年1月28日美国航天飞机失事炸毁了耗资12亿美元的“挑战者”号航天飞机,七名航天员全部遇难,成为人类航天史上一次空前的大灾难。1990年2月22日欧洲的“阿里安”火箭发射时发生爆炸事故,炸毁了日本的两颗通信卫星,造成的经济损失约3亿美元。

根据对美国发射的各种运载火箭的统计,动力系统发生的故障约占运载火箭总故障的60%以上。欧洲“阿里安”火箭到1990年2月止共发射了36次,其中5次失败,而失败全部都是由发动机故障引起的^[1]。由此可见,发动机工作的可靠性在运载火箭中占有多么重要的地位。

为了保证发动机工作时能达到规定的各种性能指标,控制系统已成为液体火箭发动机不可缺少的重要组成部分。20世纪80年代中后期以来,随着载人航天技术发展的需要和计算机、人工智能、传感器等技术的进步,液体火箭发动机控制研究出现了一些新的方向和领域,研究较多的有发动机健康监控系统^[2]、智能控制系统^[6]、延寿控制^[6]等。这些新的课题仍在继续研究之中。

80年代以来,对液体火箭发动机的健康监控系统(Health Monitoring System, HMS)或状态监控系统(Condition Monitoring System, CMS)进行了大量的研究工作^[8]。这些监控系统不论对多

次重复使用的液体火箭发动机还是对一次使用的液体火箭发动机,在地面试验和飞行任务中监控发动机的工况,对于提高发动机和飞行器的可用性、可靠性、安全性和降低费用方面,都起着很重要的作用。从80年代后期以来,随着健康监控技术的发展,无论研制新的推进系统,还是提高现有推进系统的性能,健康监控系统都是不可缺少的重要组成部分。

近年来,许多机械系统和电子系统研制出了新的故障监控系统,其故障检测算法、监控技术、传感器技术及故障监控系统等在理论及实践上都取得了巨大进展,包括匹配滤波器、贝叶斯检测器、自适应学习网络、人工智能、监控专用传感器、监控技术选择等,特别是数字处理器计算能力的持续而巨大的进步,使一些复杂动力系统的故障监控能力与水平大大提高^[11~20]。

基于我国航天技术发展的需要,在其他动力系统故障监控技术进步的推动下,开展液体火箭发动机健康监控技术的研究,不仅有重要的理论意义,更具有巨大的工程实用价值。

§ 1.2 发展与现状

液体火箭发动机的健康监控技术在早期的发动机系统中就得到了应用。例如,Titan 及 Atlas 上的液体火箭发动机就对一些关键参数采用了上下限控制^[9]。这些监控技术主要针对大型泵压式液体火箭发动机的涡轮泵系统和推力室,目的在于防止或减少严重事故的发生。由于主要依靠模拟仪表实现监控,因而只可能对个别关键参数(例如涡轮泵转速、涡轮进出口温度、燃烧室冷却套温度等)进行门限检测。

飞船及卫星上的推进系统普遍采用冗余设计技术以提高可靠性和运行寿命。在没有专门用于推进系统故障监控计算机系统的条件下,由飞行器控制计算机利用门限检测方法进行自动冗余备

份管理^[22]。

20 世纪 70 年代研制成功的航天飞机主发动机(Space Shuttle Main Engine, SSME)首次配备了发动机专用的数字计算机控制器。SSME 是一种重复使用的可变推力发动机,其控制器负责开关机过程的阀门顺序控制、推力控制、组元比控制,同时进行发动机系统及其本身的运行状态监控。SSME 的控制器提供了进行发动机系统故障检测、诊断与控制的手段。最初的 SSME 故障检测主要限于工作参数的检测与报警。对可能引起严重后果的几个主要参数进行红线(Red-lines)关机监控^[21]。为了避免因误诊断引起的误关机,对红线参数的监控采用了冗余设计和表决逻辑^[21]。所监测的红线参数主要集中在涡轮泵系统上。SSME 的初期故障监控系统采用的是门限检测方法,在进行故障检测时反应不快、功能简单,并且主要针对发动机的稳态主级工作过程,不能对启动、关机及改变推力级等瞬变过程的故障进行有效的检测^[29]。

80 年代以来,为了改进 SSME 的故障监控系统,对 SSME 的故障检测与诊断技术进行了大量新的研究^[8],并称之为发动机的健康监控技术。Rocketdyne 研制并应用了用于 SSME 地面试车过程监控的“异常与故障检测系统”(System for Anomaly and Failure Detection, SAFD)^[23]。该系统采用统计置信区间检测方法进行故障检测,可以检测出发动机早期故障,改进了红线关机监控的检测能力。该系统主要适用于 SSME 稳态工作阶段的故障检测。

80 年代后期,United Technologies Research Center(UTRC)发展了一个用于 SSME 的健康监控系统框架^[26]。该研究工作包括了故障检测算法、先进传感器技术和监控系统硬件研制。研究目标是五年内用于地面试车,然后过渡到飞行使用。该框架中故障检测算法综合运用了时间序列模型(Auto Regressive Moving Average, ARMA)分析、非线性回归(Recursive Structural Identification, RESID)分析及模式识别技术中的聚类(Clustering)分析方法^[27]。