



液体火箭发动机故障 检测诊断理论与方法

Theory and Method of Fault
Detection and Diagnosis for
Liquid-Propellant Rocket Engines

吴建军 黄强 程玉强 谢廷峰 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

液体火箭发动机故障 检测诊断理论与方法

Theory and Method of Fault Detection and
Diagnosis for Liquid – propellant Rocket Engines

吴建军 黄 强 程玉强 谢廷峰 著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书在总结分析液体火箭发动机故障检测与诊断领域国内外研究现状和发展趋势的基础上,着重介绍了作者在这一方向的研究成果,主要包括:基于统计信号分析处理的发动机工作过程实时故障检测方法、基于不确定性分析理论的发动机故障检测与诊断方法(包括模糊理论、云模型、云—神经网络方法等),以及基于智能知识处理的发动机故障检测与诊断方法(包括神经网络、人工免疫、符号有向图、时间因果图和定性偏差模型方法等)。

本书不仅可以为从事液体火箭发动机结构设计、健康监控与故障诊断、容错控制等方向的科研人员、工程应用单位的技术人员提供有益参考,而且也可以作为高等院校相关专业博士生、硕士生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液体火箭发动机故障检测诊断理论与方法/吴建军等
著. —北京:国防工业出版社,2013. 8

ISBN 978-7-118-09032-1

I. ①液... II. ①吴... III. ①液体推进剂火箭发
动机—故障检测—研究 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 184433 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 21 字数 430 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717



前 言

液体火箭发动机是运载火箭的动力装置和关键组成部分。然而,恶劣的工作条件(高温、高压、强腐蚀、高密度能量释放)常使其成为运载火箭中故障的敏感多发部位,而且其故障的发生和发展具有快速与破坏性极大等特点。因此,为有效提高航天发射活动的可靠性与安全性,保护发动机地面试车和飞行过程中人员和设备财产的安全,避免危险性或灾难性事故的发生,迫切需要深入开展液体火箭发动机故障检测与诊断技术的研究。

作为有效提高运载火箭和航天发射活动可靠性、安全性的重要手段,液体火箭发动机故障检测与诊断技术自诞生之日起就受到了高度的重视,并已经发展成为航天推进技术的一个专门领域。事实上,故障检测与诊断系统现已成为研制新型和改进现有运载火箭和发动机不可缺少的关键组成部分。

液体火箭发动机故障检测与诊断技术的研究,其主要目的是基于测量得到的流量、温度、压力、转速、加速度等信号,利用所建立的数学模型、规则、网络结构等知识,并结合信号处理、模型计算、智能推理等方法,对发动机可能的运行故障进行检测、识别、定位和评估,从而为发动机地面试车和飞行过程中故障的实时判断与控制以及试后和飞行后的故障分析与工作状态评价,提供科学合理的决策依据。

液体火箭发动机故障检测与诊断技术的核心和关键是故障检测与诊断的理论与方法。特别是近年来,先进测试技术、计算机技术、自动控制理论与技术、非线性科学、信号处理、人工智能、可靠性理论与工程、统计分析处理等学科技术的不断发展及其在故障检测与诊断中的应用,为液体火箭发动机故障检测与诊断提供了坚实的理论和技术应用基础。

国防科技大学航天科学与工程学院是国内最早开展液体火箭发动机故障检测与诊断技术研究的单位,本书正是反映了作者多年来在该领域的研究成果。本书不仅适合于从事液体火箭发动机控制、结构设计、健康监控与故障诊断等技术研究的科研人员、工程应用单位的技术人员使用,也可作为高等院校相关专业博士生、硕士生的学习参考书。

全书共分为 11 章。第 1 章详细介绍了液体火箭发动机故障检测与诊断技术的基本概念和内涵,并对国内外研究现状和发展趋势进行了分析综述。第 2 章以统计信号分析理论为基础,分别研究发展了适用于发动机稳态工作过程故障检测的自适应阈值算法和自适应相关算法,以及适用于发动机瞬变工作过程故障检测

的包络线算法。第3章首先介绍了发动机故障检测的神经网络理论基础,然后研究建立了发动机基于BP和RBF神经网络结构的模型辨识与故障检测方法。第4章基于T-S模糊模型和自适应神经模糊推理系统,建立了发动机启动和稳态工作过程的模糊辨识模型,并以此为基础,研究发展了基于模糊模型的发动机故障检测与隔离方法。第5章首先介绍了有机集成随机性和模糊性等不确定性的云模型基础理论,然后研究并实现了基于云关联规则的液体火箭发动机启动阶段故障检测方法和基于云分类器的故障诊断方法。第6章结合神经网络强大的数据处理能力和云模型在不确定性信息处理方面的优势,研究发展了液体火箭发动机工作全过程基于云-神经网络的实时故障检测方法和基于云-模糊神经网络的故障诊断方法。第7章首先介绍了人工免疫系统的基本原理,然后研究并提出了适用于液体火箭发动机稳态工作阶段故障检测的反向选择算法,以及基于免疫实值和克隆选择的故障检测与诊断方法。第8章首先建立了液体火箭发动机基于SDG的故障诊断基础理论和诊断知识获取与表示模型,然后分别从基于深浅规则知识、多模式诊断以及集成定量知识等几个方面对基于SDG的诊断推理方法进行了分析和实现。第9章首先分析了与TCG模型相关的系统动态特性的一般问题,并给出了发动机TCG模型的获取方法及基于TCG模型的诊断机制,然后通过建立液体火箭发动机的无因次小偏差方程和TCG模型,进行了发动机故障状态下过渡特性的定性仿真和诊断分析。第10章基于求解约束满足问题的思想,研究和建立了发动机基于模型知识的一致性故障诊断推理理论,然后通过以定性偏差的形式建立液体火箭发动机的模型知识,并结合一致性诊断推理理论进行了液体火箭发动机的故障诊断。第11章通过集成逻辑描述、时间信息和模糊信息,研究建立了液体火箭发动机基于扩展知识的故障诊断理论和方法,并结合发动机的试车数据进行了分析验证。

特别感谢国际宇航科学院院士、国防科技大学原校长陈启智教授多年来的悉心培养和指导。特别感谢国防科技大学原校长张育林教授在液体火箭发动机健康监控领域所做的开创性工作,以及长期以来对作者在该领域的研究给予的高度关注和精心指导。在本书的撰写过程中,还参考引用了吴建军指导的多位博士生和硕士生所做的部分研究工作和学位论文,他们是博士生李艳军、刘洪刚,硕士生郑威、刘垠杰、丁伟程等,博士生李艳军还参与了本书第4章的撰写工作。在此,一并表示感谢。感谢博士生晏政、聂饶、彭小辉在本书格式编排和内容校对等方面付出的辛勤劳动。感谢国家自然科学基金委对相关研究工作的资助,感谢国防科技大学学术专著出版专项资金以及国防工业出版社对本书的出版给予的大力支持。

本书内容涉及的范围较广,由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 基本概念与内涵	3
1.2.1 液体火箭发动机故障的特点	3
1.2.2 发动机故障诊断的基本概念	4
1.2.3 发动机故障诊断技术与其他领域诊断技术的联系与区别	6
1.3 发动机故障诊断方法研究现状	7
1.3.1 基于信号处理的方法	7
1.3.2 基于数学模型的方法	10
1.3.3 基于人工智能的方法	11
1.4 发动机故障诊断技术的发展趋势分析	16
1.4.1 集成不同层次领域知识的智能故障诊断	17
1.4.2 集成不同方法的综合故障诊断	19
1.4.3 集成不确定性信息的鲁棒故障诊断	21
参考文献	23
第2章 基于统计分析的发动机故障检测方法	30
2.1 引言	30
2.2 故障检测统计学基础	30
2.3 自适应阈值故障检测算法	31
2.3.1 算法原理	31
2.3.2 算法验证与考核	37
2.4 自适应相关故障检测算法	40
2.4.1 算法原理	40
2.4.2 算法的验证与考核	44
2.5 瞬变过程故障检测的包络线算法	47
2.5.1 算法原理	47
2.5.2 算法的验证	48

2.6 本章小结·····	51
参考文献·····	51
第3章 基于神经网络的发动机故障检测方法 ·····	53
3.1 引言·····	53
3.2 神经网络基础·····	53
3.2.1 神经网络简介·····	53
3.2.2 BP 网络·····	54
3.2.3 RBF 网络·····	55
3.3 液体火箭发动机的神经网络辨识模型·····	56
3.3.1 稳态工作过程的辨识模型·····	56
3.3.2 启动过程的辨识模型·····	63
3.4 神经网络故障检测算法的实现与验证·····	66
3.4.1 故障检测逻辑·····	66
3.4.2 神经网络故障检测系统·····	67
3.4.3 稳态工作过程的神经网络故障检测算法·····	68
3.4.4 启动工作过程的神经网络故障检测算法·····	70
3.5 神经网络故障检测算法实时在线考核·····	72
3.6 本章小结·····	74
参考文献·····	74
第4章 基于模糊理论的发动机故障检测与诊断方法 ·····	75
4.1 引言·····	75
4.2 模糊故障诊断理论基础·····	76
4.2.1 基于模糊模型的故障诊断方法·····	76
4.2.2 T-S 模糊模型·····	77
4.2.3 自适应神经模糊推理系统·····	79
4.3 发动机工作过程模糊辨识模型·····	81
4.3.1 稳态过程模糊辨识模型·····	81
4.3.2 启动过程模糊辨识模型·····	85
4.4 基于模糊辨识模型的发动机故障诊断实例·····	88
4.4.1 基于模糊辨识模型的故障检测·····	88
4.4.2 基于模糊辨识模型的稳态过程故障隔离·····	96
4.5 本章小结·····	98
参考文献·····	99

第5章 基于云理论的发动机故障检测与诊断方法	100
5.1 引言	100
5.2 云理论基础	101
5.2.1 基本概念	101
5.2.2 云的数字特征	102
5.2.3 云发生器	103
5.2.4 虚云	106
5.2.5 云变换	110
5.3 基于云关联规则的发动机故障检测方法	113
5.3.1 云关联规则	113
5.3.2 基于云关联规则的故障检测算法	116
5.3.3 算法实现与结果分析	117
5.4 基于云分类器的发动机故障诊断方法	121
5.4.1 云分类器	121
5.4.2 基于云分类器的发动机故障诊断算法	124
5.4.3 诊断实例分析	125
5.5 本章小结	129
参考文献	129
第6章 基于云—神经网络的发动机故障检测与诊断方法	131
6.1 引言	131
6.2 基于云—神经网络的发动机实时故障检测方法	132
6.2.1 网络结构	132
6.2.2 前向传播过程	133
6.2.3 反向传播学习算法	134
6.2.4 故障检测方法	135
6.2.5 实时性改进	136
6.3 基于云—神经网络的发动机瞬变过程故障检测实现与验证	137
6.3.1 启动过程的云—神经网络算法实现与验证	137
6.3.2 额定工况到高工况的云—神经网络算法实现与验证	138
6.3.3 高工况到高工况高混合比的云—神经网络算法实现与验证	140
6.3.4 高工况高混合比到高工况的云—神经网络算法实现与验证	142

6.4 基于云—神经网络的发动机稳态过程故障检测实现与验证	144
6.4.1 额定工况的云—神经网络算法实现与验证	144
6.4.2 高工况的云—神经网络算法实现与验证	146
6.4.3 高工况高混合比的云—神经网络算法实现与验证	148
6.5 基于云模型的神经模糊系统故障诊断方法	150
6.5.1 相关研究评述	150
6.5.2 基于云模型与神经网络的发动机故障诊断方法	153
6.5.3 诊断实例分析	156
6.6 本章小结	161
参考文献	162
第7章 基于人工免疫的发动机故障检测与诊断方法	163
7.1 引言	163
7.2 人工免疫原理	164
7.2.1 人工免疫系统的仿生机理	164
7.2.2 人工免疫系统模型与算法	165
7.3 基于反向选择的发动机稳态过程故障检测方法	167
7.3.1 算法流程	167
7.3.2 检测实例	168
7.4 免疫实值故障检测与诊断方法	170
7.4.1 免疫实值故障检测算法	171
7.4.2 IRVR - NSA 故障检测与诊断算法	173
7.5 基于克隆选择的发动机故障诊断方法	178
7.5.1 克隆选择原理	178
7.5.2 基于克隆选择的故障诊断方法	179
7.5.3 诊断实例	181
7.6 本章小结	182
参考文献	183
第8章 基于符号有向图的发动机故障诊断方法	186
8.1 引言	186
8.2 基于SDG的故障诊断基础理论	187
8.3 基于SDG的发动机诊断知识获取和表示	196
8.3.1 诊断对象	196
8.3.2 发动机诊断知识获取和表示	199

8.4 基于 SDG 的发动机故障诊断推理	204
8.4.1 基于深浅知识规则的故障诊断推理	204
8.4.2 集成定量知识的故障诊断推理	209
8.4.3 基于 SDG 的多模式故障诊断推理	210
8.5 本章小结	214
参考文献	214
第 9 章 基于时间因果图的发动机故障诊断方法	216
9.1 引言	216
9.2 液体火箭发动机基于时间因果图的诊断方法	217
9.2.1 与 TCG 模型相关的发动机动态特征信息	220
9.2.2 发动机 TCG 模型的建立	222
9.2.3 发动机基于 TCG 模型的诊断机制	223
9.3 诊断实例与分析	227
9.3.1 发动机部件 TCG 模型的建立	227
9.3.2 发动机的 TCG 模型	233
9.3.3 发动机故障状态过渡特性的定性仿真	235
9.4 本章小结	237
参考文献	238
第 10 章 基于定性偏差模型的发动机故障诊断方法	239
10.1 引言	239
10.2 基于模型知识的发动机故障诊断理论和方法	240
10.3 发动机诊断模型知识的获取和表示	249
10.3.1 定性偏差模型	249
10.3.2 故障效应分析	252
10.3.3 模型知识的表示	253
10.4 基于模型知识的发动机故障诊断方法	255
10.4.1 基于 QDM 的故障诊断	255
10.4.2 与基于浅层知识的故障诊断方法比较	256
10.4.3 诊断结果	256
10.5 本章小结	259
参考文献	259
第 11 章 集成扩展知识的发动机故障诊断方法	261
11.1 引言	261

11.2 集成扩展知识的发动机故障诊断理论和方法·····	262
11.2.1 基于逻辑描述的发动机故障诊断理论和方法·····	262
11.2.2 基于时间信息的发动机故障诊断理论和方法·····	264
11.2.3 基于模糊信息的发动机故障诊断理论和方法·····	266
11.3 发动机故障诊断扩展知识的获取和表示·····	267
11.3.1 发动机观测信息的表示·····	267
11.3.2 发动机诊断知识的表示·····	268
11.4 诊断方法实现与实例分析·····	270
11.4.1 基于逻辑描述的诊断方法实现与实例分析·····	270
11.4.2 基于时间信息的诊断方法实现与实例分析·····	273
11.4.3 基于模糊信息的诊断方法实现与实例分析·····	277
11.5 本章小结·····	280
参考文献·····	281

第1章 绪 论

1.1 引 言

航天技术是20世纪人类科技发展最为重要的成果之一。自从1957年10月4日苏联发射第一颗人造卫星以来,在短短几十年的时间内,人类就已经实现了载人航天飞行,实施了登月计划和火星探测,成功研制了航天飞机,建立了空间站,并向空间发射了数千颗各种应用卫星和深空探测器。

随着航天技术的迅猛发展,以液体火箭推进系统作为主要动力装置的运载火箭变得更加复杂,故障发生的概率也随之增大。而液体火箭发动机(Liquid-propellant Rocket Engine, LRE)作为当今运载火箭中最重要的分系统,恶劣的工作条件(高温、高压、强腐蚀、高密度能量释放)常使其成为运载火箭中故障的敏感多发部位,而且其故障的发生和发展具有快速与破坏性极大等特点。根据统计,在美国,动力系统发生的故障约占运载火箭总故障的60%以上^[1]。其中,仅航天飞机主发动机(Space Shuttle Main Engine, SSME)等7种泵压式发动机,在试验和飞行过程中,就出现了84379次故障^[2]。此外,在1990年—2002年世界各国发生的54起航天运载器故障中,由发动机引起的故障就有26起^[3]。例如,1999年11月15日,日本H-2型运载火箭发射多功能运输星(Multi-function Transport Satellite, MTSAT)时因第一级发动机故障而失败,损失达2.28亿美元^[4];2002年11月11日,“阿里安”5ECA型火箭在发射总价值为6.34亿美元的两颗卫星时,因主级发动机Vulcain-2故障,在起飞456s后自毁爆炸^[5]。另外,2006年7月10日,印度的地球同步轨道卫星运载火箭(Geo-synchronous Satellite Launch Vehicle, GSLV)在发射印度星4A后不久,由于发动机推进剂调节器故障导致空中爆炸^[6]。因此,可以说,液体火箭发动机的安全可靠运行是运载火箭可靠性和安全性工程中最关键的部分。

提高液体火箭发动机的可靠性,除了应立足于研制过程中对组件和整机可靠性的严格控制、监测和试验验证外,在实际使用中还很大程度地依赖于健康监控技术(Health Monitoring Technology, HMT)。健康监控技术是伴随着航天领域需求的推动而逐步发展起来的,其起源于1967年美国执行阿波罗登月计划时出现的一系列严重设备故障。之后,美国海军研究室在航空航天管理局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)倡导下,进行了一系列研究开发工作^[7]。

作为一种能有效提高液体火箭发动机可靠性和安全性的高新技术,健康监控技术自诞生之日起就受到了高度的重视,并已经发展成为航天推进技术的一个专

门领域。特别是 20 世纪 70 年代以来,为了降低 SSME 等液体火箭发动机故障的影响,提高航天飞行的可靠性与安全性,NASA 每年都增加了在健康监控科研与项目管理财政预算方面的投入,并相继研制开发了多种发动机健康监控系统。当前世界主要航天国家,不论是研制新的发动机,还是提高现有发动机的性能,健康监控系统都已成为其中不可缺少的重要组成部分,同时也获得了巨大的收益^[8]。例如,NASA 马歇尔飞行中心(Marshall Space Flight Center, MSFC)和波音-加诺加帕克(Boeing - Canoga Park, BCP)公司,针对 Block II 型 SSME 研制了先进健康管理系统(Advanced Health Management System, AHMS)^[9,10]。结果表明,与 SSME 型号的改进相比,AHMS 在降低航天飞机升空损失概率方面的效果远远高于 SSME 型号本身改进的效果,如图 1.1 所示。同时,AHMS 还使航天任务的成功概率提高了三倍。

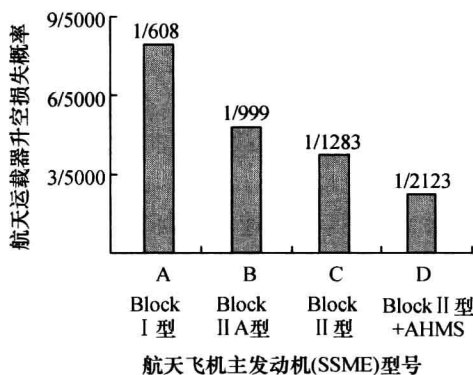


图 1.1 SSME 中 AHMS 的使用对航天运载器升空损失的影响

近年来,在集成空间运输计划(Integrated Space Transportation Plan, ISTP)的指导下,NASA 正在深入开展先进健康监控技术的研究和系统的研制。如 2001 年,美国 NASA 空间发射计划(Space Launch Initiative, SLI)就对运载器健康监控系统和长寿命运载火箭结构等关键技术领域进行了大量投资,以降低火箭发射的成本和危险性。同时,健康监控和综合健康管理系统也被列为可重复使用运载器(Reusable Launch Vehicle, RLV)技术试验平台和 X-33 等演示验证计划的关键技术进行重点研究。此外,俄罗斯针对 RD-170 和 RD-120、日本针对 H-2 等大型液体火箭发动机,都加大了在健康监控与寿命评估预测等方面的研究力度,欧空局在未来运载器技术方案(Future Launcher Technology Project, FLTP)中也对发动机健康监控进行了重点研究^[11,12]。

液体火箭发动机健康监控技术主要涉及故障检测、故障诊断和故障控制等内容^[1,13-15]。其主要目的是通过对液体火箭发动机的故障进行检测、隔离、识别和定位,并采取控制发动机系统参数、故障报警、紧急关机、启动冗余备份等故障控制措施,保证发动机系统的安全性并将由故障引起的损失降到最低程度。目前,对于

一次性使用大型液体火箭发动机而言,其既没有冗余备份,也很难进行系统重构,以此为基础的容错控制技术很难在工程中应用,而以减损与延寿为目标的主动状态控制技术当前还处在初步探索研究阶段^[16,17]。因此,当前液体火箭发动机健康监控更多的是针对故障检测和诊断技术的研究。

1.2 基本概念与内涵

1.2.1 液体火箭发动机故障的特点

为了实现液体火箭发动机故障检测与诊断的任务,务必分析清楚发动机故障的特点,只有这样才能根据其不同特点及诊断要求发展相应的诊断方法。大型泵压式液体火箭发动机的故障类型与模式非常复杂,但一般可将其按如下两种方式分类。

1. 按故障性质分类

(1) 缓变性故障(Incipient Faults)。这类故障有时也称为软故障,其幅值和在被诊断对象上引发的故障效应一般都比较小。但该类故障会随着发动机运行时间的增加而缓慢发展(如磨损引起的故障),并使发动机功能逐渐退化以至完全失效,从而引起严重的后果。因此,故障诊断的一个重要任务就是对该类故障在其发展到需要操作者或系统自动干预之前及时准确地诊断。

(2) 中断性故障(Intermittent Faults)。是指出现时间极短但会带来灾难性后果的故障,如涡轮叶片断裂等。因此,对这类故障的控制、诊断和防护尤为重要。目前,这类故障通常由提高设计水平、生产工艺水平和组装技术水平来加以控制。

(3) 突变性故障(Abrupt Faults)。突变性故障对发动机性能影响较大且持久,其主要后果是使发动机偏离工作平衡点,达不到预定的要求,如管路阻塞、泄漏等。这类故障同样会对发动机工作产生致命性后果。

2. 按发动机工作阶段分类

(1) 启动过程的故障。发动机的启动过程包括了各种阀门的开启、推进剂管路的充填、推力室与预燃室的压力建立过程以及流动状态由亚临界向超临界的转化等复杂瞬态过程。虽然启动过程时间短暂,但许多故障却发生在启动过程,并且大部分是由启动装置(启动器、启动活门)引起的。由于各种物理参数、各种元件及构件的工作特性大范围变化,启动过程基本上难以依赖于机理性数学模型进行故障的检测与诊断,所以,启动过程的故障检测与诊断既重要又困难。

(2) 主级工作阶段的故障。发动机主级工作阶段主要受供应系统的流体和机械运动以及燃烧室、发生器的能量转换过程的控制。一般而言,发动机主级工作阶段主要有两种不同类型的工作模式。一种是发动机在整个主级工作阶段工况唯一,只处于稳定的额定工况工作;而另一种则是发动机在整个主级工作阶段除了额定工况以外,还会存在多个工况的转变过程。例如,国内研制的某高压补燃液氧煤

油发动机,在其主级工作阶段就包括额定工况、高工况、高工况高混合比、低工况低混合比等多种不同的工况类型^[8]。图 1.2 根据主涡轮泵转速的变化情况,给出了该发动机包含全部工况转换的工作过程描述示意图。不过需要注意的是,根据任务的不同,发动机在试车或飞行过程中的工况变化也会有所不同,并不是每次试车或飞行过程都会发生上述所有的工况变化。

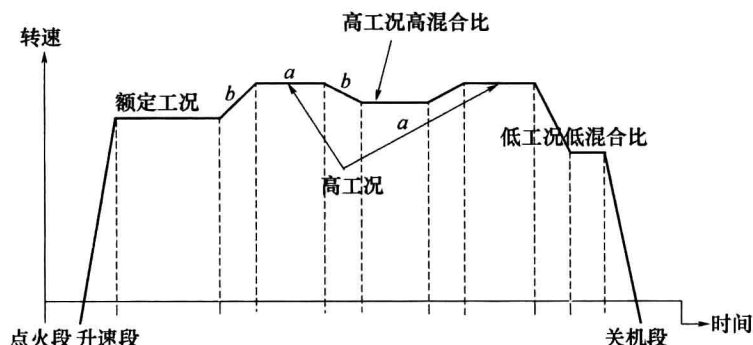


图 1.2 液氧煤油发动机工作过程工况示意图

发动机主级工作阶段主要易发生阻塞、泄漏和涡轮泵系统故障等。一般而言,对于主级工作阶段工况唯一的稳态工作过程,由于可从物理规律建立发动机的定性或定量等数学模型,因而可采用基于模型的诊断方法进行诊断。然而,对于包含了多个工况转变过程的主级工作阶段而言,则需要对其分别进行处理。例如,对于图 1.2 中所示的过程 *a*,可将其视为一个稳态过程进行处理,但对于过程 *b*,则需要将其作为一个类似于发动机启动过程的瞬变过程进行处理。只是发动机的启动过程更加复杂,包含了各种阀门的开启、推进剂管路的充填等。

(3) 关机过程的故障。在关机过程中易发生主活门、断流活门等不动作或关闭不严的故障。

1.2.2 发动机故障诊断的基本概念

对液体火箭发动机而言,其故障检测与诊断通常包括故障检测、故障隔离和故障辨识等几个方面的内容。故障检测是指利用由传感器测量得到的反映发动机当前工作状态的测量数据,经过特征提取后,作出二元决策,即判断发动机是否出现了异常,或者一切正常。故障隔离是指根据已有的异常状态信息,确定故障发生的位置和类型,例如判断是哪段管路出现故障,是泄漏还是阻塞等。故障辨识则是用于估计故障的程度、大小和属性。

虽然对上述三方面任务相对重要性的划分具有主观性,但是仍然需要指出的是,故障检测对任何一个实际系统而言是绝对要完成的任务,故障隔离同样也十分重要,而故障辨识并非是一定要去做的工作。对于液体火箭发动机而言,要完成故障辨识任务通常比较困难。原因主要在于:发动机工作过程复杂,难以建立精确的数

学模型;发动机试车尤其是故障数据有限,缺乏足够的先验知识;现有的各种故障检测与诊断方法存在局限性(如实时性、鲁棒性)等。

目前在故障检测与诊断领域,对故障诊断概念的表述存在两种不同的方式。第一种方式中,故障诊断概念只包含故障隔离和故障辨识两个方面的内容,而另一种方式中,则把故障检测、故障隔离和故障辨识等内容全部统称为故障诊断。本书为叙述方便,在不引起混淆的前提下,将同时采用上述两种表述方式,而并不加以区分。

此外,在具体实际应用过程中,针对液体火箭发动机故障检测与诊断的性能、可靠性和可实现性等问题,还需要考虑其检测率、及时性和实时性等主要指标。

(1) 检测率。指检测到故障的可能性或概率,一般要求对发动机工作过程所发生的故障以及模拟故障数据做到百分之百的检测率。

(2) 及时性和实时性。动态系统尤其是液体火箭发动机某些类型的故障,通常会在极短时间(数秒钟)内造成严重后果并导致任务的失败,所以必须对这类故障进行及时检测,才能有效发挥故障检测与诊断技术的安全性效应。同时故障检测与诊断技术还应具备对诊断对象的工作状态和故障特性等,进行实时在线计算和分析的能力。

(3) 早期故障的敏感性。该性能指标对于液体火箭发动机来说同样十分重要,因为发动机故障的发生和发展都非常迅速,只有在故障的早期及时发现,才有利于后续故障控制策略的实施。

(4) 误诊率和漏诊率。误诊率和漏诊率是衡量故障检测与诊断技术的重要性指标。误诊将导致不应该的任务终止,造成不可弥补的经济损失、社会影响。在具有冗余备份的系统中,误诊将导致冗余备份的不必要切换,从而使系统失去宝贵的应急能力。即使最小的误诊率也将产生对系统正常运行的不必要干扰,从而导致用户对故障检测与诊断技术失去信心,因而误诊是最不能被接受的诊断错误。最理想情况是要求误诊率和漏诊率都最小,但实际应用中这通常很难实现,而且误诊率、漏诊率以及及时性和敏感性等在一定程度上是相互矛盾的。因此,这就需要合适的诊断策略在误诊率、漏诊率、及时性以及对早期故障的敏感性等之间进行折中,并根据任务要求和实际可能性来具体确定误诊率和漏诊率。

(5) 鲁棒性。由于发动机结构和工作过程的复杂性,使得无论是用经验的方法还是解析的方法对其进行描述,都必然存在着不精确之处。这些不精确是由模型的不准确、线性化处理以及外界干扰等所造成的不确定性引起的。此外,还存在着由于经验认识的局限性所造成的未知类型故障的影响。因此,如何在具有不确定性因素的影响时,故障检测与诊断技术仍能有效保持其性能不变的鲁棒性至关重要。一般要求其应该具有对参数不确定性、非线性不确定性、干扰和噪声以及对故障类型的鲁棒性。

(6) 可行性。可行性与发动机系统的复杂性、运行环境以及故障检测与诊断所采用的软硬件技术水平密切相关。例如,由于各种因素的限制,液体火箭发动机

监测参数极其有限,而这将导致有些诊断方法无法实现。

(7) 可靠性。一般要求发动机故障检测与诊断系统的可靠性不能低于发动机本身的可靠性。

总之,由于发动机工作过程与环境的复杂性以及各种故障检测与诊断方法性能的局限性,对于液体火箭发动机这样复杂的机械—流体—热动力系统,要完全解决发动机的故障诊断问题是不现实的。因此,必须对其诊断任务、诊断性能指标和各种故障检测与诊断方法进行综合分析,提出恰当的诊断策略,并不断优化诊断系统的性能。而这一切都建立在对液体火箭发动机故障检测与诊断技术深入研究的基础之上。

1.2.3 发动机故障诊断技术与其他领域诊断技术的联系与区别

液体火箭发动机既是一种复杂技术系统(Technical System),又是一种重要安全系统(Safety - critical System)。针对这类系统的特点,目前已提出各种不同的故障检测与诊断方法。为了弄清发动机诊断技术与其他领域诊断技术的联系与区别,有必要对其复杂性进行比较,即系统的相互关联性(Interactions)和耦合性(Coupling)。为此,下面利用 Perrow 图^[18]描述各领域系统的复杂特性,如图 1.3 所示。它对诊断系统采用何种合适的诊断方法有着重要参考意义。

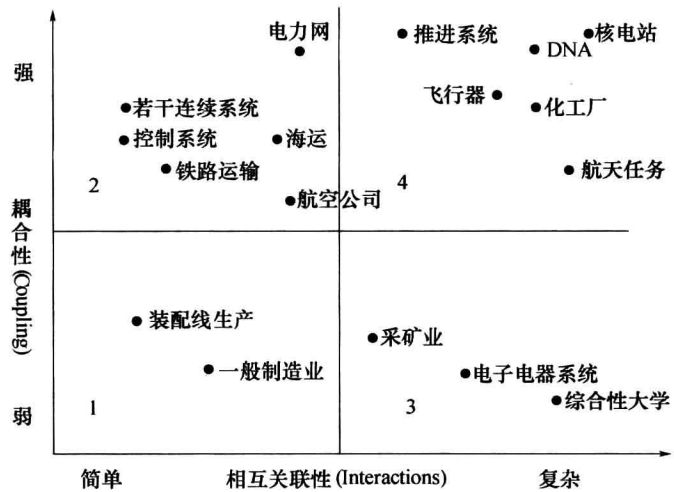


图 1.3 相互关联性/耦合性图 (Perrow's Interactions/Coupling Chart)

由图 1.3 可以看出,系统复杂性大致可分为四类。区域 1 内的系统是比较简单的一类系统。区域 2 内的系统是耦合性较强而结构较简单的一类技术系统。其物理关系清晰,系统静态模型、动力学模型已知或容易通过相应的辨识技术得到,如部分连续系统、一般工业控制系统、电力系统等。对于此类系统,基于数学模型的检测与诊断方法是较好的选择。区域 3 中的系统结构较复杂,元部件数量大,但子系统间的耦合性较弱,如数字电路系统等。该类系统体系结构清晰、各部件功能