

Failure Characteristics Analysis and Fault
Diagnosis for Liquid Missile Engines

液体导弹发动机 故障特性分析与诊断

张 炜 田 干 徐志高 杨正伟 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

液体导弹发动机故障特性 分析与诊断

**Failure Characteristics Analysis and Fault
Diagnosis for Liquid Missile Engines**

张 炜 田 干 徐志高 杨正伟 著

国防工业出版社

· 北京 ·

88500010

图书在版编目(CIP)数据

液体导弹发动机故障特性分析与诊断/张炜等著.
—北京:国防工业出版社, 2014.4
ISBN 978-7-118-09314-8

I. ①液... II. ①张... III. ①液体推进导弹—发动机—
故障诊断 IV. ①TJ761.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 025745 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)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22¼ 字数 405 千字

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序

航天技术是一项探索、开发和利用太空以及地球以外天体的综合性工程技术,是一个国家现代技术综合发展水平的重要标志。军事航天技术是我国国防工业的重要组成部分,对于国家安全以及军队信息化水平的提高具有重要的作用。航天飞行器结构庞大、空天飞行环境复杂,成功地发射、回收飞行器并非易事;而且载人航天技术的发展对飞行器的安全、可靠运行也提出了越来越高的要求,如何保障飞行器的安全性与可靠性是极具挑战性的课题。

大型航天飞行器通常由液体推进剂火箭发动机提供动力。液体火箭发动机是复杂的热流体动力系统,其运行状态往往对飞行器整体的安全性与可靠性起决定性作用,因此,液体火箭发动机的故障诊断和预测研究与应用是提高航天活动安全性的重要手段。其主要目标是提高发动机运行可靠性,并在不降低发动机固有可靠性的基础上提高航天器的飞行安全性,综合运用推进理论、信号处理、模式识别、人工智能与传感器技术以及计算机技术等多个领域的研究成果。近年来,我国液体火箭发动机故障诊断与预测研究取得了重要进展,形成了以液体火箭发动机为背景的故障诊断与预测理论体系,并成功应用于航天飞行器、液体导弹发动机的试验研究。但是,迄今为止国内尚无系统展现液体导弹发动机故障特性与诊断技术的学术专著。非常高兴看到,本书作者在多年科学研究和工程实践的基础上,对液体导弹发动机的故障特性、诊断与预测的基本理论和方法进行了系统的归纳总结,形成了一本难得的学术专著,本书的问世对促进我国液体导弹发动机故障诊断研究和工程应用很有意义。

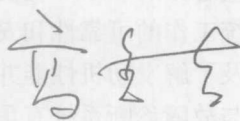
论著在研究发动机故障模型和特性分析方法的基础上,着重介绍了液体导弹发动机的故障特性和诊断技术等研究成果,特别是将人工神经网络、小波分析、生物智能计算、模糊理论、统计学习理论、时间序列分析以及灰色系统模型等

方法应用于发动机的故障诊断与预测,在导弹发动机实际的故障诊断中取得了显著的成效,为武器装备的创新设计、科学维护与安全运行提供了有效的技术支持。

深信本书的出版能够在推广和普及液体导弹发动机及航天器故障诊断技术,培养更多从事故障诊断的工程技术人才和后备力量方面发挥重要作用。

是为序。

中国工程院院士
中国设备管理协会副会长



前 言

液体导弹(火箭)发动机(Liquid Missile Engines, LME)是一种复杂的动力系统,由大量相互联系且同时进行着不同工作过程的组件和部件构成,能够为各种航天器在大气层外飞行提供动力,在导弹和航天领域中具有广泛的应用。但是其恶劣的工作环境使其成为航天器系统故障的敏感多发部位,为了提高推进系统工作的可靠性和安全性、降低其研制成本和工作成本、实时监控发动机状态以及了解发动机性能并及时采取必要措施,建立先进的液体火箭发动机状态监控与故障诊断系统有重要的意义。液体火箭发动机健康监控技术涉及多门相关学科和技术领域,其核心是故障检测及故障诊断技术。而近十年来,在数字计算机技术、自动控制理论与技术、信号处理、人工智能、可靠性理论与工程等学科中出现的专门的故障检测与诊断分支理论为故障检测与诊断技术的发展提供了理论基础。

本书在介绍导弹动力系统故障模式、故障模型及故障特性的基础之上,着重研究了多种故障诊断方法。故障诊断所采用的算法,按通行的分类方式可分为基于数学模型的方法、基于信号处理的方法和基于人工智能的方法三大类。基于数学模型的故障诊断方法以现代控制理论和现代优化方法为指导,以系统的数学模型为基础,利用 Luenberger 观测器(组)、等价空间方程、Kalman 滤波器、参数模型估计与辨识等方法产生残差,然后基于某种准则或阈值对残差进行分析与评价,实现故障诊断。由于该方法能与控制系统紧密结合,是实现状态监控、容错控制、系统修复与重构等的前提,所以得到了高度重视。根据残差的产生方式可细分为状态估计诊断法、参数估计诊断法和等价空间诊断法等;基于信号处理的故障诊断方法不需要对象的准确模型,因此适用性强。虽然目前大多数方法都是针对线性系统提出的,但很容易推广到非线性系统。这类算法主要有利用 Kullback 信息准则检测故障方法、基于小波变换的故障诊断方法、基于时间序列特征提取的诊断方法和基于信息融合的诊断方法等;基于人工智能的故障诊断方法具有很好的应用前景。当前的控制系统变得越来越复杂,不少情况下要想获得系统的精确数学模型是非常困难的,而基于人工智能的方法恰不需要精确的数学模型。这类算法主要有神经网络方法、专家系统方法、模式识别方法、进化计算方法、模糊逻辑方法以及它们之间的综合应用等。

液体导弹发动机是一种在高温、高压、强腐蚀和高密度的能量释放等条件下

运行的复杂系统,因此基于解析模型的故障诊断方法在实际应用中受到了很大的限制;基于信号处理的方法和基于智能的方法在处理对象的复杂特性方面具有较大的优势。本书结合当前液体导弹发动机故障诊断的研究特点与发展趋势,将小波变换、生物智能、模糊理论、统计学理论、灰色理论等的基本理论应用于液体导弹发动机的故障诊断中。

本书从液体导弹发动机的故障模式和机理分析入手,介绍了故障模型和特性的分析方法,结合相应的导弹发动机故障实例研究多种故障诊断方法。作者努力使本书具有以下特点:

(1) 先进性。总结了作者在本领域内的最新研究成果,内容具有先进性和新颖性。

(2) 实用性。本书主要介绍导弹发动机故障特性分析与诊断技术,着重于应用,对科研人员和工程技术人员具有参考价值。

(3) 可读性。书中内容深入浅出,结构编排合理,既有基本原理,又有综合方法,工程应用背景明确,案例分析典型,便于加深读者对书中内容的理解。

本书的内容取材于作者在第二炮兵工程大学的科研积累,以及田干、徐志高、杨正伟、李明、林祥金、高正明、刘重阳、田路、徐海波、明安波等研究生的创新成果。特别感谢书中所引用文献的作者,是他们为本书提供了丰富营养,使我们受益匪浅。在此,对本书出版提供帮助的所有人员深表谢意!

本书是为高等学校“航空宇航科学与技术”学科的研究生编写的教材,同时考虑到从事装备管理、使用技术、工程技术等人员的需要,在编写过程中,既注重系统、全面地介绍理论知识,又力求反映本领域的最新研究成果,强调工程实际应用。

由于水平有限,涉面不广,书中难免存在不当之处,我们诚恳地欢迎广大读者批评指正。

作者

2014年1月

目 录

第1章 概述	1
1.1 液体导弹发动机故障诊断与建立监控系统的必要性	1
1.2 液体导弹发动机故障诊断技术的历史与发展	3
1.3 液体导弹发动机故障诊断的发展趋势	8
第2章 液体导弹发动机的故障模式和机理分析	10
2.1 引言	10
2.2 液体导弹发动机的结构组成	10
2.3 液体导弹发动机的故障模式分析	11
2.4 液体导弹发动机的故障机理分析	12
2.4.1 推力室及燃气发生器	12
2.4.2 涡轮泵	15
2.4.3 密封件	22
2.5 液体导弹发动机标准故障模式的建立	24
第3章 液体导弹发动机故障模型的分析方法	28
3.1 引言	28
3.2 液体导弹发动机工作过程	28
3.3 液体导弹发动机稳态过程模型	29
3.3.1 液体在管路中的流动分析	29
3.3.2 发动机部件工作特性方程	30
3.3.3 发动机参数平衡模型	35
3.3.4 发动机部件故障特性方程	36
3.3.5 一级发动机稳态过程模型的建立	41
3.3.6 二级发动机稳态过程模型的建立	41
3.4 液体导弹发动机动态过程模型	42
3.4.1 推力室	42
3.4.2 燃气发生器	44
3.4.3 涡轮泵系统	44

3.4.4	液体管路系统	46
3.4.5	自生增压系统	49
3.4.6	一级发动机动态过程模型的建立	53
3.4.7	二级发动机动态过程模型的建立	53
第4章	液体导弹发动机故障特性分析	54
4.1	稳态故障模式特性分析	54
4.1.1	发动机稳态模型的数值解法	55
4.1.2	静态特性仿真分析	55
4.1.3	基于 Hopfield 神经网络的数值解法	56
4.1.4	发动机稳态故障分析	60
4.1.5	基于蚁群算法的二级发动机稳态故障分析	63
4.1.6	基于进化计算的发动机故障特性分析	67
4.1.7	发动机稳态故障模式获取	77
4.2	动态故障模式分析	78
4.2.1	发动机动态模型的数值解法	78
4.2.2	发动机动态故障分析	80
4.3	综合故障分析	87
4.4	故障的可分离性与可检测性	89
4.4.1	故障的可分离性	90
4.4.2	故障的可检测性与可诊断性	90
第5章	基于人工神经网络的导弹发动机故障诊断方法	91
5.1	人工神经网络理论概述	91
5.1.1	神经网络的基本知识	92
5.1.2	BP 网络及其改进算法	93
5.2	神经网络的故障诊断原理	96
5.3	神经网络输入数据的模糊前置处理	97
5.4	基于 BP 神经网络的故障诊断方法	99
5.5	基于 RBF 神经网络的故障诊断方法	107
5.5.1	RBF 神经网络	107
5.5.2	应用实例	111
5.5.3	计算结果及分析	113
5.6	基于改进型 ART2 神经网络的故障诊断方法	114
5.6.1	无师学习网络模型的选择	115
5.6.2	ART 神经网络的基本结构及其理论	117

5.6.3	ART2 算法的改进	119
5.6.4	改进 ART2 算法的实现	121
5.6.5	故障诊断实例	122
5.7	基于 FTART 神经网络的故障诊断方法	124
5.7.1	FTART 结构及基本理论	124
5.7.2	FTART 网络的改进及其数学描述	125
5.7.3	FTART 网络的设计	127
5.7.4	FTART 网络诊断实例及分析	128
第 6 章	基于小波变换的故障诊断方法	130
6.1	小波变换理论	130
6.1.1	概述	130
6.1.2	小波分析的基本理论	132
6.2	基于小波分析的液体导弹发动机故障诊断	140
6.2.1	小波包分解及特征提取	140
6.2.2	时序建模方法及其应用	140
6.2.3	谐波小波及其应用	144
6.2.4	涡轮增压振动异常趋势的监测与诊断方法	150
6.2.5	基于小波分析的涡轮系次同步进动故障分析	151
6.2.6	基于小波神经网络的发动机故障诊断	153
第 7 章	基于人工免疫系统的故障诊断方法	157
7.1	人工免疫系统	157
7.1.1	生物免疫系统	157
7.1.2	人工免疫系统	160
7.2	否定选择原理在液体导弹发动机故障检测与诊断中的应用	162
7.2.1	否定选择算法	162
7.2.2	应用实例与分析	164
7.3	克隆选择原理在液体导弹发动机启动过程仿真中的应用	171
7.3.1	克隆选择原理与算法	171
7.3.2	应用实例与分析	173
第 8 章	基于模糊理论的故障诊断方法	180
8.1	模糊故障诊断理论	180
8.1.1	模糊理论基础	180
8.1.2	基于模糊理论的故障诊断	181

8.2	基于模糊模式识别技术的故障诊断方法	182
8.2.1	模糊模式识别基本理论	182
8.2.2	基于样本法构造隶属函数的模糊模式识别	185
8.2.3	基于多元隶属函数法的模糊模式识别	188
8.3	基于模糊聚类分析的故障诊断方法	191
8.3.1	模糊等价矩阵动态聚类分析法	192
8.3.2	模糊 ISODATA 聚类分析法	194
8.3.3	基于 $\max - \odot$ 传递性的模糊聚类分析故障诊断	197
8.4	基于模糊神经网络的导弹发动机故障诊断方法	199
8.4.1	模糊神经网络	200
8.4.2	模糊 RBF 神经网络在液体导弹发动机故障 诊断中的应用	203
第 9 章	基于统计学习理论的故障分析与诊断方法	211
9.1	统计学习理论与支持向量机	211
9.1.1	机器学习	213
9.1.2	统计学习理论	214
9.1.3	支持向量机	216
9.1.4	核函数及其参数优化	218
9.2	支持向量机在液体导弹发动机故障诊断中的应用	223
9.2.1	基于 SVM 的液体导弹发动机稳态故障特性 分析及诊断	223
9.2.2	基于 GA - SVM 的液体导弹发动机故障诊断	227
9.2.3	基于 SVM 的液体导弹发动机故障建模与分析	228
第 10 章	基于隐 Markov 模型的故障诊断方法	235
10.1	基于隐 Markov 模型(HMM)的故障诊断方法	235
10.1.1	HMM 基本思想	235
10.1.2	HMM 基本算法	238
10.1.3	HMM 的类型	242
10.1.4	HMM 在实际应用中的改进措施	242
10.1.5	基于 HMM 的涡轮泵故障诊断实例	245
10.2	HMM - SVM 混合故障诊断模型及应用	253
10.2.1	SVM 训练	253

10.2.2	HMM-SVM 故障诊断应用实例	253
第 11 章 液体导弹发动机故障预测方法		
11.1	基于时间序列的导弹发动机故障预测方法	256
11.1.1	时间序列分析	256
11.1.2	应用与分析	263
11.2	基于灰色模型的导弹发动机故障预测方法	264
11.2.1	灰色系统概述	264
11.2.2	灰色系统的基本原理	265
11.2.3	灰色预测方法及其在导弹发动机故障预测的应用	266
11.3	基于神经网络的导弹发动机故障预测方法	274
11.3.1	基于 BP 网络的导弹发动机动力参数多步预测方法	274
11.3.2	基于 RBF 网络的导弹发动机预测方法	279
11.3.3	基于 Elman 网络的导弹发动机预测方法	282
11.4	基于 SVM 方法的导弹发动机故障预测研究	289
11.4.1	基于支持向量机的回归估计	290
11.4.2	基于支持向量机的预测流程与评价标准	295
11.4.3	基于 SVM 方法的液体导弹发动机故障预测实例	296
附录		301
参考文献		327

Contents

1	Introduction	1
1.1	Fault diagnosis of Liquid Missile Engines (LME) and necessity of condition monitoring systems	1
1.2	History and progress of fault diagnosis for LME	3
1.3	Development trends of the fault diagnosis for LME	8
2	Failure pattern and corresponding mechanism analysis of LME	10
2.1	Introduction	10
2.2	Structure of a LME	10
2.3	Failure pattern analysis of the LME	11
2.4	Failure mechanism analysis of the LME	12
2.4.1	Thrust chamber and Gas generator	12
2.4.2	Turbo pump	15
2.4.3	Seal components	22
2.5	Standard failure pattern of the LME	24
3	Analysis method of failure model for LME	28
3.1	Introduction	28
3.2	Operation process of LME	28
3.3	Steady state process model of the LME	29
3.3.1	Flow analysis of the liquid	29
3.3.2	Characteristic equation of a motor	30
3.3.3	Balance model of LME parameters	35
3.3.4	Characteristic equation of the sub – composition with failure	36
3.3.5	Steady state process model of I – level	41
3.3.6	Steady state process model of II – level	41
3.4	Dynamic state process model of LME	42
3.4.1	Thrust chamber	42
3.4.2	Gas generator	44
3.4.3	Turbo pump system	44
3.4.4	Liquids pipeline system	46
3.4.5	Self – Pressurization System	49

3.4.6	Dynamic state process model of I – level	53
3.4.7	Dynamic state process model of II – level	53
4	Failure characteristics analysis of LME	54
4.1	Characteristics analysis of a failure pattern in steady state	54
4.1.1	Numerical solution of a steady – state model	55
4.1.2	Simulation analysis of the LME in static characteristic	55
4.1.3	Numerical solution based on the Hopfield Artificial Neural Network (ANN)	56
4.1.4	Failure analysis in steady state	60
4.1.5	Failure analysis for the II – level LME in steady state based on ant colony algorithm	63
4.1.6	Failure characteristic analysis based on evolutionary algorithm	67
4.1.7	Acquisition of failure pattern in the steady state	77
4.2	Failure pattern analysis in dynamic state	78
4.2.1	Numerical solution of a dynamic model	78
4.2.2	Analysis of a dynamic model	80
4.3	Hybrid failure analysis	87
4.4	Separability and detectability of the failure	89
4.4.1	Separability of failure	90
4.4.2	Detectability and diagnosability of failure	90
5	Fault diagnosis of LME based on ANN	91
5.1	Theory of ANN	91
5.1.1	Basics of ANN	92
5.1.2	BP ANN and improved algorithm	93
5.2	Diagnostic mechanism of ANN	96
5.3	Fuzzy pre – processing of the input data for the ANN	97
5.4	Fault diagnosis method based on BP ANN	99
5.5	Fault diagnosis method based RBF ANN	107
5.5.1	RBF ANN	107
5.5.2	Cases	111
5.5.3	Results and analysis	113
5.6	Fault diagnosis method based on improved ART2 ANN	114
5.6.1	Selection of the unsupervised learning net model	115
5.6.2	Basic structure and theory of ART ANN	117
5.6.3	Improvement of ART2 algorithm	119
5.6.4	Implementation of the improved ART2 algorithm	121