



航天发射故障 诊断技术

HANGTIAN FASHE GUZHANG ZHENDUAN JISHU



徐克俊 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

图书在版编目 (CIP) 数据

航天发射故障诊断技术 / 徐克俊编著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 9

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05267 - 1

I. 航... II. 徐... III. 航天器发射—故障修复—教材
IV. V554

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 103251 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 14 1/4 字数 410 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

内 容 简 介

本书系统论述了航天发射故障诊断的基本概念、基本原理及应用技术。第1、2、3章阐述航天发射故障诊断概念、内涵以及发展历史,介绍与故障密切相关的设备质量特性和维修理论,论述航天发射故障的基本原理和故障分析方法;第4章介绍了9种常用航天发射故障诊断技术;第5、6、7章阐述航天发射中电磁干扰、潜在电路和软件3种典型故障的诊断技术;第8、9章介绍了基于故障树和基于故障字典的两种故障诊断技术;第10、11章阐述多种方法融合的故障诊断技术和航天发射故障诊断技术的应用前景。全书各章节列举了大量典型实例。

本书理论与实践相结合,理论性强,实用性好,具有很好的针对性,既可作为航天发射试验工程技术人员的培训教材和参考用书,也可作为高等院校相关专业的教学用书。

序

我国航天事业五十年来,成功发射了几百个航天器,其中包括“神舟”五号和“神舟”六号载人航天飞船。这些成就使中国成为世界上具有重要影响力的航天大国。为了确保这一个个的发射圆满成功,我国航天科研、试验人员付出了艰辛的劳动,解决了大量的运载火箭和航天器在测试发射过程中出现的故障,积累了宝贵的故障诊断经验和案例,如若认真总结提高,有望发展成一门新的技术学科——航天发射故障诊断技术。

航天发射故障诊断的作用,就是及时地发现系统故障,排除故障,防止发生严重后果;同时,为改进设计、改进生产、工艺,从根本上提高产品和发射设施的可靠性提供信息,保证航天发射活动的顺利进行。

《航天发射故障诊断技术》一书系统总结了我国几十年航天发射和武器装备试验故障诊断的经验教训,并分析了大量的案例,从理论上科学归纳出我国航天发射故障诊断技术,理论性强、可操作性好。案例剖析思路清晰,理论与实践结合紧密,对工程技术人员具有很好的指导作用。

该书紧紧围绕航天发射特点,重点突出工程实用的故障诊断技术,成功地将科学前沿技术和多学科技术有机地融合进航天发射故障诊断的理论之中,阐明了航天发射故障机理、故障规律以及航天发射故障分析方法、监测技术和诊断理论,同时运用大量案例阐释故障诊断技术的应用问题,使读者不仅能学理论、懂方法,又能够很快运用所

学知识分析和解决工程技术问题,对加速培养航天发射故障诊断工程技术人才具有重要的意义。

该书是航天发射工程领域一本很好的专著,也是一项很有价值的学术研究成果,对我国航天发射故障诊断技术的发展与应用将产生重要的作用。

王永志

二〇〇七·五·五.

前 言

航天发射故障诊断是自现代运载火箭诞生以来,就伴随而出现的一项重要专业技术,它是适应航天发射工程、保证发射活动成功需要而形成的多学科交叉的综合学科。著者有幸参加了我国首颗“东方红”卫星发射以来的数十次航天发射任务,特别是亲历了“神舟”五号和“神舟”六号载人飞船发射,主持和参与了排除数以百计的故障,积累了一定的航天发射故障诊断经验。为了系统地总结我国近五十年航天发射故障诊断的经验,将其提炼、升华为理论和方法,在载人航天工程高级顾问、工程院院士王永志的指导下,历时两年的研究和辛勤著述,本书终于付梓。本书是我国近五十年航天发射故障诊断实践活动的理论总结,是所有参加航天发射一线工程技术人员的智慧结晶,是航天产品研制单位、试验单位、生产厂以及航天发射工程总体研究单位共同努力的成果。

全书共 11 章。第 1 章介绍航天发射故障诊断技术的概念、内涵、特点和发展过程,第 2 章介绍与故障诊断密切相关的设备质量特性与维修理论,第 3 章介绍航天发射故障诊断基本原理和基本方法,包括:故障机理、故障规律及故障分析基本方法,第 4 章介绍 9 种航天发射常用故障诊断方法,第 5 章介绍航天发射电磁干扰故障诊断方法,第 6 章介绍规范和简化的潜在电路分析方法以及航天发射潜在电路故障诊断方法,第 7 章介绍软件故障机理、软件故障检测、软件故障诊断和软件故障预防,第 8 章介绍基于故障树定性分析和定量分析的故障诊断方法,第 9 章介绍故障字典构建方法和基于故障字典的故障诊断方法,第 10 章介绍故障树与专家系统结合、模糊逻辑与遗传算法结合、信息融合与神经网络结合的故障诊断技术,第 11 章介绍正在研究应用中的航天发射故障诊断技术及其发展前景。

在本书编写过程中,酒泉卫星发射中心郑永煌高级工程师参加了第

3、9、10 章的编写,王军高级工程师参加了第 4、6、11 章的编写,单锦辉高级工程师参加了第 7 章的编写,李兵高级工程师参加了第 5 章的编写,杜建洲高级工程师参加了第 8 章的编写,赵炳昆高级工程师承担了排版和校对工作,他们为本书的出版作出了重要的贡献。

著者要非常感谢王永志院士、赵宇琪研究员、佟连捷教授、陈新华教授、陆晋荣研究员、孙凝生研究员、冉隆燧研究员、袁昕荣研究员、张贤文研究员,他们对本书提出了许多富有建设性的修改意见。著者还要感谢总装备部司令部军训局、教材办领导和酒泉卫星发射中心领导的关心和支持,感谢太原卫星发射中心和西昌卫星发射中心给予的支持和帮助,感谢酒泉卫星发射中心司令部办公室程军为本书所做的录入和制图工作。

由于本书涉及多学科前沿技术,限于水平,难免有错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

二〇〇七年四月

于酒泉卫星发射中心

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天发射故障诊断的作用与意义	1
1.1.1 航天发射活动和发射过程	1
1.1.2 航天发射对象和发射设施	2
1.1.3 故障诊断的作用和意义	3
1.2 故障诊断与航天发射故障诊断	4
1.2.1 故障诊断的一般概念	4
1.2.2 航天发射故障诊断概述	7
1.3 航天发射故障诊断技术的形成与发展过程	11
1.3.1 故障诊断技术的形成与发展	11
1.3.2 航天发射故障诊断技术的发展过程	14
第 2 章 设备质量特性与维修理论	17
2.1 与故障诊断密切相关的设备质量特性	17
2.1.1 故障诊断与设备效能的关系	17
2.1.2 可靠性	23
2.1.3 维修性与测试性	31
2.1.4 保障性	39
2.2 以可靠性为中心的维修理论	41
2.2.1 维修概述	41
2.2.2 以可靠性为中心的维修理论主要内容	45
2.2.3 以可靠性为中心的维修理论要点	50
2.3 故障分布函数及其应用	52
2.3.1 威布尔分布	53

2.3.2	指数分布	53
2.3.3	正态分布与对数正态分布	55
第3章	航天发射故障诊断基本原理和基本方法	57
3.1	航天发射故障诊断基本原理	57
3.1.1	诊断原理	57
3.1.2	故障机理	58
3.1.3	故障规律	64
3.1.4	故障检测与检测技术	66
3.1.5	故障分析与隔离	69
3.1.6	故障判据与故障处理	70
3.2	航天发射故障诊断基本方法	73
3.2.1	故障诊断基本程序	73
3.2.2	故障诊断基本分析方法	75
3.2.3	故障诊断基本方法	86
第4章	航天发射常用故障诊断技术	89
4.1	跟踪寻迹法	89
4.1.1	基本原理	89
4.1.2	检查方法	90
4.1.3	诊断实例	90
4.2	隔离检查法	93
4.2.1	基本原理	93
4.2.2	检查方法	93
4.2.3	诊断实例	94
4.3	换元检查法	97
4.3.1	基本原理	97
4.3.2	检查方法	98
4.3.3	诊断实例	99
4.4	状态检查法	102
4.4.1	基本原理	103
4.4.2	状态检查的内容	103

4.4.3 使用注意事项	104
4.4.4 诊断实例	105
4.5 物理检查法	108
4.5.1 基本原理	108
4.5.2 检查方法	108
4.5.3 诊断实例	110
4.6 环境试验法	113
4.6.1 基本原理	113
4.6.2 检查方法	114
4.6.3 诊断实例	115
4.7 对比法	118
4.7.1 基本原理	118
4.7.2 检查方法	119
4.7.3 诊断实例	120
4.8 故障模拟检查法	126
4.8.1 基本原理	126
4.8.2 检查方法	126
4.8.3 诊断实例	128
4.9 综合诊断方法	130
4.9.1 基本概念	130
4.9.2 综合故障诊断模型与诊断策略	135
4.9.3 诊断实例	137
第5章 电磁干扰故障诊断技术	152
5.1 电磁干扰基础知识	152
5.1.1 电磁干扰概念	152
5.1.2 电磁干扰的特性与分类	157
5.1.3 接地与地线干扰	162
5.1.4 无线电干扰	169
5.1.5 静电干扰	175
5.2 航天发射电磁干扰故障诊断方法	178

5.2.1	航天发射电磁干扰特点	178
5.2.2	航天发射中常见的干扰故障	179
5.2.3	电磁干扰故障诊断的基本方法及其特点	180
5.2.4	干扰源的确定	181
5.2.5	干扰途径的寻找	186
5.2.6	敏感设备抗干扰性分析	188
5.3	电磁干扰故障的纠正方法	190
5.3.1	净化电磁环境	190
5.3.2	改进抗干扰设计	191
5.3.3	地线干扰的抑制	194
5.3.4	静电的预防和消除	197
5.4	诊断实例	198
第6章	潜在电路故障诊断技术	206
6.1	潜在电路基本概念与特点	206
6.1.1	潜在电路基本概念	206
6.1.2	潜在电路特点	207
6.1.3	潜在电路表现形式	208
6.1.4	潜在电路根源分析	210
6.2	潜在电路分析	211
6.2.1	潜在电路分析技术产生与发展	211
6.2.2	规范的潜在电路分析	213
6.2.3	简化的潜在电路分析	221
6.2.4	规范和简化潜在电路分析比较	228
6.3	潜在电路故障诊断	229
6.3.1	航天发射中的潜在电路	229
6.3.2	航天发射中潜在电路故障诊断方法	230
6.3.3	诊断实例	232
第7章	软件故障诊断技术	239
7.1	软件失效机理与故障模式	239
7.1.1	软件的特点与可靠性指标确定	239

7.1.2	软件失效机理	245
7.1.3	软件故障模式	248
7.2	软件故障诊断的一般程序	254
7.2.1	软件故障诊断的含义	254
7.2.2	软件故障诊断过程	255
7.2.3	软件故障定位的过程	256
7.2.4	软件故障排除的过程	258
7.3	软件故障检测	262
7.3.1	软件测试	262
7.3.2	软件故障树分析	272
7.3.3	软件故障模拟	272
7.3.4	形式化方法	276
7.4	软件故障定位与排除	280
7.4.1	软件故障定位	280
7.4.2	软件故障排除	290
7.5	软件故障预防	295
7.5.1	软件容错设计	295
7.5.2	软件测试性设计	296
7.5.3	防御性编程	297
7.6	诊断实例	298
第8章	基于故障树分析的故障诊断技术	306
8.1	基于故障树分析的故障诊断技术形成与作用	306
8.1.1	基于故障树分析的故障诊断技术形成	306
8.1.2	故障树分析在故障诊断中的作用	307
8.1.3	基于故障树分析的故障诊断步骤	307
8.2	故障树基本概念	308
8.2.1	相关术语及定义	308
8.2.2	故障树符号	311
8.3	故障树建树步骤与方法	313
8.3.1	建树基本规则	314

8.3.2	收集资料	316
8.3.3	确定顶事件	316
8.3.4	在航天发射中建立故障树	317
8.3.5	故障树规范化	320
8.3.6	故障树简化	324
8.4	故障树的定性和定量分析方法	331
8.4.1	故障树的数学描述	331
8.4.2	故障树的定性分析方法	334
8.4.3	故障树的定量分析方法	338
8.5	故障树分析常用软件工具	345
8.5.1	Relex 故障树分析模块	345
8.5.2	FaultTree + 软件	345
8.5.3	ITEM FTA 软件	346
8.6	基于故障树分析的故障诊断技术	346
8.6.1	适用时机与对象	346
8.6.2	诊断步骤	347
8.6.3	基于故障树定性分析的故障诊断	348
8.6.4	基于故障树定量分析的故障诊断	349
8.6.5	诊断实例	350
第9章	基于故障字典的故障诊断技术	359
9.1	故障字典基本概念	359
9.2	故障字典构建方法	360
9.2.1	一般故障字典	360
9.2.2	经典故障字典	361
9.2.3	模糊故障字典	363
9.3	基于故障字典的诊断方法	365
9.3.1	故障字典的结构	365
9.3.2	故障字典的表示	365
9.3.3	故障字典的动态管理	368
9.3.4	应用故障字典进行故障诊断	368
9.4	基于故障字典的诊断系统	370

9.4.1	故障诊断策略	370
9.4.2	分级故障字典建立	371
9.4.3	故障诊断搜索算法	372
9.5	诊断实例	373
第10章	多种方法融合的故障诊断技术	381
10.1	专家系统与故障树结合的故障诊断技术	381
10.1.1	故障诊断专家系统	381
10.1.2	基于故障树的知识库	382
10.1.3	推理机的设计	384
10.1.4	基于故障树的火箭伺服机构故障诊断专家 系统	385
10.2	模糊逻辑与遗传算法结合的故障诊断技术	392
10.2.1	模糊逻辑与遗传算法基本理论	392
10.2.2	用模糊逻辑理论对系统进行描述	395
10.2.3	用遗传算法对可能的故障传播路径进行搜索	396
10.2.4	模糊逻辑与遗传算法结合的故障诊断步骤	397
10.2.5	诊断实例	399
10.3	信息融合与神经网络结合的故障诊断技术	401
10.3.1	信息融合	401
10.3.2	神经网络	403
10.3.3	信息融合与神经网络结合的方法	404
10.3.4	诊断实例	411
第11章	航天发射故障诊断技术的发展前景	414
11.1	正在研究应用中的故障诊断技术	414
11.1.1	基于检测手段的故障诊断技术	414
11.1.2	基于知识的故障诊断技术	417
11.1.3	基于信号处理的故障诊断技术	426
11.2	航天发射故障诊断技术发展前景	431
11.2.1	我国航天发射故障诊断技术的研究应用	431
11.2.2	我国航天发射故障诊断技术发展前景	435
参考文献		437

第 1 章 绪 论

航天发射是一项高风险的科学试验活动,其成败对人类探索宇宙事业影响巨大,由此决定了航天发射故障诊断具有高可靠性、高准确性、技术复杂性、反应快速性和综合保障性等特点,并且要求故障诊断定位准确、机理清楚、措施有效、过程迅速。本章主要介绍航天发射故障诊断作用与意义、基本概念与内涵以及形成与发展过程。

1.1 航天发射故障诊断的作用与意义

1.1.1 航天发射活动和发射过程^[15]

自 1957 年 10 月 4 日世界上第一颗人造地球卫星发射成功之后,人类的活动疆域冲破了地球大气层,扩展到浩瀚的太空,近 50 年来,为探索宇宙奥秘,开发太空资源,推动科技进步,人类共向太空发射了 5000 余颗航天器。其中,包括苏联航天员加加林乘坐的“东方号”飞船、著名的“和平号”空间站,美国的“阿波罗”登月飞船、大型国际空间站,以及各种各样的人造地球卫星和空间探测器。这些将航天器送上太空的活动统称为航天发射活动。

航天发射是航天器及其运载器通过空运、海运或陆路运输进入航天发射场,依靠在发射场的设施、设备,完成装配、检测等技术准备后,运载器在发射装置上点火产生推力的过程;当运载器推力大于地球引力时,它就携带航天器离开发射装置升空,按一定的飞行程序进入空间预定轨道。原始火箭的发射是靠人眼瞄准目标,然后用手拽拉弓箭或点燃药捻让火箭飞出。现代航天器的发射要复杂得多。携带航天器的运载器,不仅要用瞄准设备使其对准发射方向,而且要用发射设备按一定程序使发动机

点火。更为重要的是,为了保证发射成功,在运载器点火前还要对运载器、航天器以及发射设施进行充分的检查测试,彻底排除故障,消除隐患后,才能点火发射。

由此可见,航天器的发射过程,是指发射人员运用测试技术、故障诊断技术和发射技术,按照一定的程序和规范对航天器、运载器以及发射设施,进行技术准备和实施发射的过程。它包括航天器及其运载器进入发射场后,与发射设施一起进行的全部装配、检查、测试、充填气液介质、注入发射参数等技术准备工作,以及转运、起竖对接、加注推进剂、瞄准、射前检查、点火发射等实施发射的全部工作和程序。

由于弹道导弹的发射过程与航天器的发射过程大致相同,所以,广义的航天发射活动也包括了弹道导弹的发射。

1.1.2 航天发射对象和发射设施

1. 航天发射对象

航天发射活动中发射最多的是人造地球卫星和弹道导弹,其次是一次性使用的运载火箭和可重复使用的航天飞机,再次是空间探测器和空间站。归纳起来,航天发射对象(又称航天发射产品,或简称为产品)主要包括以下4类:

(1) 人造地球卫星,是直接为人类服务的航天器。迄今为止,世界各国成功发射的5000多颗航天器中,有4000多颗是应用卫星。应用卫星按用途可分为三种类型:第一种是无线电中继卫星,包括各种通信广播卫星、数据传输卫星、导航定位卫星等;第二种是对地观测卫星,包括气象卫星、地球资源卫星、测地卫星、侦察卫星等;第三种是科学试验卫星,包括微重力试验卫星、生物试验卫星、工程试验卫星等。

(2) 载人航天器,是人类进入太空进行科学活动的航天器。包括能进行天地往返运输的载人航天器:飞船和航天飞机,小型空间实验室和大型空间站。

(3) 空间探测器,是对宇宙空间进行科学探测活动的航天器。包括月球探测器、对太阳及除地球外太阳系中其他行星进行探测的航天器。

(4) 运载器,是将航天器运载至太空预定轨道的工具。运载器一般

是一次性使用的运载火箭,包括液体运载火箭和固体运载火箭两种类型。美国的航天飞机不仅是载人航天器,同时也是一种运载器。

因为运载器担负着运载工具的职能,所以在应用发射前要进行多次发射试验。这些发射试验根据其发射性质和目的,又分为研制性发射试验、定型性发射试验、抽检性发射试验和训练性发射试验。

2. 航天发射设施

航天发射活动集中在航天发射场进行。发射场为航天发射活动提供全套技术先进的大型发射设施设备,以满足航天器及其运载器进行技术准备和实施发射的要求。航天器是在发射场发射升空的,因此发射场又称为航天发射中心或航天港。航天发射设施泛指发射场的设施设备,它是一个集机械、电气、电子、液压、自控、计算机及网络、通信、气象、计量、特燃、特气以及建筑结构等多种专业工程综合建成的大型复杂系统。

发射场的设施设备一般分布在发射指控中心、技术准备区、发射区、测控站以及技术勤务系统所在区域。围绕航天发射活动、发射试验技术和发射场的设施设备建设已形成了一门独立的工程技术学科——航天发射工程。这门学科正不断丰富、完善着自己的理论和技术。

1.1.3 故障诊断的作用和意义

航天发射故障诊断是自现代运载火箭诞生以来,就伴随而出现的一项重要工作,经过几十年的积累、总结,逐渐发展成一门新的科学技术——航天发射故障诊断技术,它是适应航天发射工程的需要而形成的多学科知识融合的综合技术。

航天发射系统,包括各种类型的应用卫星、载人航天器、空间探测器、运载火箭,以及发射它们的设施设备,都是现代科学技术前沿具有代表性的高技术产品,系统组成复杂,自动化程度高,软硬结合,信息技术融会贯通至零部件之中,系统内外互相紧密关联,协同动作,共同完成航天发射任务。因此,航天发射活动中,一处设备故障,就可能引起连锁反应,使系统不能正常工作,轻者使任务中止,造成发射失败,重者会带来箭毁人亡的灾难性后果。航天发射活动的每一次成功都激励着人类继续向宇宙奥秘探索,每一次失败都使人类探索宇宙的努力遭到挫折。例如:1999年