



军用车辆故障诊断学

□ 冯辅周 安钢 刘建敏 编著 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费支持

军用车辆故障诊断学

冯辅周 安钢 刘建敏 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

军用车辆故障诊断学 / 冯辅周, 安钢, 刘建敏编著.
北京: 国防工业出版社, 2007. 11
总装备部研究生教育精品教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 05296 - 1

I. 军... II. ①冯...②安...③刘... III. 军用车辆 - 故障
诊断 - 研究生 - 教材 IV. E923

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 113806 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 17¼ 字数 503 千字

2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 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

前 言

20世纪80年代以来,国内陆续出版了一批质量较高的设备故障诊断方面的著作,国外相关著作的译著也陆续在国内出版发行。它们中有的是以故障诊断丛书的形式,或以独立的主题小册子形式出版;有的是故障诊断专著,对故障诊断学科涉及的内容作了系统的论述;有的侧重于行业应用或某类检测手段的工程应用。毫无疑问,以上著作及译著在内容上都比较丰富,并各有自己的特色,对国内设备故障诊断技术的发展起到了十分重要的作用。但是,从军事装备应用与研究的角度来看,以这些著作中的任何一本作为军用车辆工程主干学科研究生的必修课程,均存在着适用性不强和立论起点不高,与标准、管理脱节的问题。军用车辆装备部队后,最重要的问题就是“管好、用好”,其实质就是如何科学合理地使用这些车辆。我军现行的使用维修管理体制仍旧延续“定期维修”的思想,实践证明定期维修必然存在“维修过量”或“维修不足”等不合理的问题。要实现合理维修,首先就要回答“该不该修”的问题,实质上就是看清楚军用车辆的当前状态及其未来发展趋势。随着我军装备向信息化、机械化方向的发展,对信息化人才的要求越来越高,军用车辆技术状态的判定、评估及预测是信息化的重要内容。但是,多年来,军队的车辆工程和武器系统与运用工程等专业的研究生基本上都套用地方大学的类似教材,结合笔者多年的教学实践经验,使用这类教材必然导致研究生在学习过程中的兴趣不浓厚、学习效果不佳,在课题研究和走上工作岗位后,遇到军用车辆故障分析诊断的具体问题时仍旧无从下手。从培养我军未来高素质的技术保障与管理人才的角度出发,迫切需要编写一本结合军用车辆实际的状态监测与故障诊断的研究生教材。

本书的特色是反映了军用车辆故障诊断的学科体系。首先以设备故障诊断学科领域的经典理论和最新研究成果为切入点,密切结合我军军

用车辆故障诊断与装备技术管理的实际特点,全面系统地阐述了军用车辆的常见故障及其机理、军用车辆状态参数的确定及其获取方法、军用车辆状态信号的特征量提取与选择、军用车辆状态识别方法;然后以军用车辆关键部件的典型故障分析案例来说明军用车辆故障诊断技术的应用;最后以军用车辆动力传动部分综合测试与分析系统的设计为例来介绍故障诊断系统的构成、主要模块以及尚待解决的问题。

参加本书编写的有冯辅周、安钢、刘建敏、乔新勇、樊新海、张小明。其中,第4章和5.1节、5.2节、5.3节、6.3节由冯辅周编写,第1章、第8章由安钢编写,第3章由刘建敏编写,第2章由张小明编写,5.4节、6.1节和6.2节由乔新勇编写,6.4节和第7章由樊新海编写。全书由冯辅周统稿,并由装甲兵工程学院技术保障工程系丁汉哲教授审稿。

本书得到军队“2110工程”军用车辆工程重点建设学科项目及研究生精品教材建设项目的支持下,并得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助。装甲兵工程学院机械工程系主任刘建敏教授自始至终对于本书的编著给予了极大的关心和支持,装甲兵工程学院刘雨发教授审阅了全书,并提出了宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

受知识面和水平所限,书中难免存在不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正。

冯辅周

于北京卢沟桥畔

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 故障诊断学的意义	1
1.1.1 系统的功能和故障.....	1
1.1.2 故障诊断的意义和故障诊断学	1
1.2 故障诊断技术的现状及其发展概况	4
1.2.1 故障诊断技术的发展史	4
1.2.2 故障诊断技术的发展趋势	5
1.3 车辆的基本构成及特点	6
1.3.1 通用车辆的基本结构	6
1.3.2 特种车辆的基本结构及特点	6
1.4 车辆故障诊断学的特点、研究目的和范围	8
1.4.1 车辆故障诊断的特点	9
1.4.2 车辆故障诊断学的研究目的和范围	9
第 2 章 军用车辆常见故障的模式及其机理	11
2.1 概述.....	11
2.2 军用车辆故障的基本概念	12
2.2.1 故障的概念.....	12
2.2.2 军用车辆故障的分类	13
2.2.3 军用车辆零件的常见故障.....	15
2.3 军用车辆典型故障的机理分析	20
2.3.1 军用车辆故障统计分析	20
2.3.2 故障机理分析方法	26
2.3.3 柴油机振动机理分析	29
2.3.4 柴油机噪声机理分析	40

2.3.5	柴油机高压油路故障机理分析	61
2.3.6	柴油机机敲缸故障机理分析	65
2.3.7	柴油机拉缸故障机理分析	68
2.3.8	柴油机主轴瓦拉伤故障机理分析	70
2.3.9	转子振动机理分析	71
2.3.10	不对中故障机理分析	85
2.3.11	转轴裂纹故障机理分析	93
第3章	军用车辆状态参数测试技术	98
3.1	概述	98
3.1.1	测试技术的概念	98
3.1.2	军用车辆状态测试的重要性	99
3.2	军用车辆状态参数的确定	100
3.2.1	军用车辆状态参数分类	100
3.2.2	测试参数的选择原则	100
3.3	军用车辆状态的常用检测方法及传感器	101
3.3.1	功能参数的常用测量方法及传感器	101
3.3.2	结构参数的常用测量方法及传感器	116
3.3.3	响应参数的常用测量方法及传感器	135
3.3.4	其他参数的测量	188
3.4	军用车辆状态信号的预处理及采集	190
3.4.1	信号预处理及采集的基本步骤	190
3.4.2	连续时间信号的采样及采样定理	192
3.4.3	量化和量化误差	199
3.4.4	截断、泄漏与窗函数	202
第4章	军用车辆状态信号的特征选择与提取	210
4.1	概述	210
4.2	离散信号的幅域分析及其特征参量计算	211
4.2.1	简单统计特征参量	212
4.2.2	高阶统计特征参量	213
4.2.3	幅域无量纲特征参数	215

4.2.4	随机信号的概率密度函数	217
4.3	离散信号的时域分析方法及其特征参量计算	219
4.3.1	时域波形分析	219
4.3.2	键相器分析	220
4.3.3	相关分析	222
4.3.4	时间序列分析——ARMA 模型	231
4.4	离散信号的频域分析方法及其特征参量计算	241
4.4.1	离散傅里叶变换	241
4.4.2	阶次比分析	247
4.4.3	频谱的三维分析	253
4.4.4	相干函数	257
4.4.5	倒频谱	259
4.4.6	极大熵谱	261
4.5	时频域分析方法及其特征参量计算	264
4.5.1	从傅里叶变换到时频域分析	265
4.5.2	短时傅里叶分析	268
4.5.3	小波变换	274
4.5.4	Hilbert-Huang 变换	284
4.5.5	各种变换之间的比较	290
4.5.6	分形及其计算方法	292
4.6	常用的特征选择与提取方法	298
4.6.1	概述	298
4.6.2	基本概念	299
4.6.3	类别可分离性判据	301
4.6.4	几种常用的特征选择方法	311
4.6.5	Karhunen-Loeve 变换特征提取	319
4.7	特征选择的几种新方法	323
4.7.1	模拟退火算法	323
4.7.2	遗传算法	325
4.7.3	基于人工神经网络的特征选择与提取	329

4.8	特征选择与提取方法在军用车辆检测诊断中的 应用实例	336
第5章	军用车辆状态的识别方法	340
5.1	概述	340
5.2	经典的故障诊断方法	341
5.2.1	基于人工经验的状态识别	341
5.2.2	模式匹配分析法	342
5.2.3	模型分析法	343
5.2.4	故障树分析法	343
5.2.5	逐步判别分析法	350
5.3	故障诊断的数学方法	357
5.3.1	贝叶斯分类法	357
5.3.2	距离函数分类法	364
5.3.3	灰色理论诊断法	367
5.3.4	模糊诊断法	374
5.3.5	人工神经网络	380
5.3.6	统计学习理论与支持向量机	402
5.4	故障诊断专家系统	419
5.4.1	专家系统概述	419
5.4.2	专家系统的基本结构	420
5.4.3	专家系统的几种典型类型	424
5.4.4	专家系统实现步骤	430
5.4.5	装备故障诊断专家系统实例	431
第6章	军用车辆关键系统的状态评估与典型故障诊断技术	435
6.1	军用车辆发动机的状态评估	435
6.1.1	坦克柴油机技术状况评估的基本内容	436
6.1.2	坦克柴油机技术状况诊断参数的确定	437
6.1.3	坦克柴油机技术状况基准样本模式的建立	440
6.1.4	坦克柴油机技术状况诊断参数的不解体检测	442
6.1.5	坦克柴油机技术状况诊断的模糊模型	449

6.2	军用车辆发动机失火故障诊断	464
6.2.1	柴油机排气噪声的测量	464
6.2.2	柴油机排气噪声的特点	464
6.2.3	信号预处理	465
6.2.4	失火前后噪声信号的对比分析	466
6.2.5	提取噪声峰—谷值间隔信号	468
6.2.6	特征参数提取	469
6.2.7	失火故障模糊判别	469
6.3	军用车辆传动系统典型故障的检测与诊断	470
6.3.1	滚动轴承的监测诊断	471
6.3.2	齿轮的监测诊断	477
6.3.3	军用车辆传动系统故障诊断实例	483
6.4	坦克变速箱工作挡位齿轮故障诊断研究	485
6.4.1	变速箱状态参数的测量	485
6.4.2	振动信号包络的提取	486
6.4.3	包络信号的抽取	489
6.4.4	包络信号的细化谱分析	490
第7章	计算机辅助测试与分析系统	495
7.1	概述	495
7.2	计算机辅助测试与诊断系统的基本组成	496
7.2.1	计算机辅助测试与诊断系统的硬件部分	496
7.2.2	计算机辅助测试与诊断系统的软件部分	498
7.3	数据采集装置的类型与选用	498
7.3.1	数据采集装置的基本类型	499
7.3.2	多路采集装置的通道设计方案	502
7.3.3	数据采集装置的选用	504
7.4	计算机测试系统总线技术	506
7.4.1	总线及其标准化	506
7.4.2	测试系统常用总线	507
7.5	车辆综合电子信息系统总线技术	510

7.5.1	CAN 现场总线	510
7.5.2	1553B 总线	511
7.6	坦克底盘集成测试与分析系统实例	512
7.6.1	系统组成	512
7.6.2	综合测试系统的软件功能	514
7.7	综合测试系统的应用实例	521
7.7.1	柴油机技术状况评估和寿命预测软件	521
7.7.2	装甲车辆振动与加速性检测平台	527
7.8	系统的展望	530
第 8 章	军用车辆故障诊断与装备技术管理	532
8.1	军用车辆故障诊断在我军装备技术管理中的 地位与作用	532
8.1.1	装备技术管理的意义	532
8.1.2	军用车辆故障诊断在装备技术管理中的作用	533
8.2	军用车辆故障诊断尚待解决的问题	534
8.2.1	技术问题	534
8.2.2	制度问题	536
8.2.3	人才问题	537
参考文献	539

第1章 绪论

1.1 故障诊断学的意义

1.1.1 系统的功能和故障

从最基本的概念和内涵分析,故障和功能相关,功能和系统相关。研究故障必须研究系统及其实现的功能。在地球上,人类能观察到两类典型的系统:一类是由有机物组成的生命系统,如植物、动物,它们经历诞生、发育、生长、衰老、死亡过程;另一类是人类为了实现某种目的制造的各种系统,它们经历研制、设计、制造、使用、报废的过程。两类系统在其寿命周期中都发挥和执行着各种特定的功能。若功能不能正常发挥,则称为失常,只不过对生命系统称为“生病”,对人类制造的非生命系统称为“故障”。所以对生命系统进行“看病”、“治病”和对非生命系统进行“状态检测”、“维修”,其目的、过程、行为是完全一样的,只不过对象、具体方法和手段不同。理解这一点,对于掌握人类制造的各种功能系统的故障诊断非常有益。事实上,“诊断”一词就来源于医学。

1.1.2 故障诊断的意义和故障诊断学

1. 故障诊断的意义

从最直接的意思上说,故障诊断的目的就是查找出系统功能失常的原因和部位,通过维修活动,排除故障,恢复其原有功能。但是,“故障诊断”作为一个新的科学技术领域的提出和形成,自然有其特殊的背景和原因。随着人类社会科学技术的发展,在当今世界上人类制造的系统遍布地球的各个角落,地上、地下、海上、海下、空中、外空无不活动着各种人

造系统。大到航空母舰、航天飞机,小到微机电系统,系统越来越复杂,技术越来越精密,制造成本越来越高,系统失效造成的损失和危害也越来越大。美国“挑战者”号、“哥伦比亚”号航天飞机发生故障,造成机毁人亡的悲惨事件;苏联切尔诺贝利核电站发生爆炸,毁灭大量生命的空前灾难,给人类敲起了永久不灭的警钟。因此,从更广泛的意义上讲:故障诊断,不仅仅是恢复原系统的原有功能,还相关到别的系统;不仅仅是技术和经济问题,还相关到人的生命和社会问题。在人类制造系统中,机电系统占了相当大的比重。一般来说,从事机电设备系统的故障诊断研究,其目的和意义表现在以下几方面。

(1) 提高设备的可靠性,保证设备具有足够高的完好率。人类制造的一切机电设备,无论大小、复杂程度如何,都是为了实现一定的功能。车辆、船舶、航天器执行运载任务;武器设备执行作战任务;机床生产零件;火电、水电、核电设备用于转化能量;石油、化工设备生产各种燃油、化工产品;农业机械用于耕种、收获庄稼。这些设备如果可靠性低,频发故障,就很难持久地发挥其应有的功能。设备的固有可靠性是设计属性,但其生长可靠性在很大程度上是由管理水平决定的。对设备开展卓有成效的故障诊断研究工作,可以显著地降低故障率,提高可靠性,保证设备经常处于完好状态,直接获得持久不断的产出效益。

(2) 降低维修费用,获取间接的经济效益。设备一旦发生故障,不能正常发挥其应有的功能,必然要进行维修工作,而且需要投入相当的人力、物力对设备进行检修,以排除故障。随着现代设备精密度和复杂度的提高,投入的设备维修保障费用也是相当可观的。设备的寿命周期费用可以表达如下,即

$$\text{设备寿命周期费用(LCC)} = \text{研制费用} + \text{生产费用} + \text{使用、维修费用} = \\ \text{购置费用} + \text{使用、维修费用}$$

设备购置费用是一次性投资,又称非再现性费用,是设备寿命周期费用中的重要成分;设备的使用、维修费用又称再现性费用,通称维持费用。对于可靠性低、又没有开展有效故障诊断的设备系统,其维持费用可以达到设备购置费用的几倍,甚至几十倍。

(3) 避免重大事故的发生,获取社会效益。随着科学技术的发展和人类生产力水平的提高,现代机电设备功率、所占空间、活动范围越来越大,一旦发生故障,轻则设备不能工作,重则伤人、影响环境,造成的间接经济损失和社会危害有时是难于估量的。近几十年来,在世界各地由设备事故造成的灾难性后果的例子,举不胜举。

2. 故障诊断学

对设备故障诊断不断增长的需求和故障诊断实践活动的广泛开展,使故障诊断逐渐发展为一门新的应用学科。由于诊断对象不同,具体诊断技术也会有所差别。但是,作为一门学科,有其相对独立的概念体系和理论基础。

1) 故障诊断的基本概念

故障: 设备功能失常的原因。一般来说,设备的故障可以排除,并恢复其原有功能,如果设备失效,不能再恢复其功能,则称为报废。

诊断: 查找和确定故障的活动。

故障模式: 故障的外在表现形式。如:机械零件的磨损、断裂、锈蚀;电器零件的老化、击穿、烧毁。

故障机理: 故障产生和发生的物理、化学原因。如:机械零件的疲劳、过载、电化学环境;电器零件的高电压、大电流等。

故障隔离和定位: 在复杂的机电系统中确定故障发生的具体部位行为。诊断的要求不同,隔离和定位的层次也不同。

故障识别率: 诊断出的故障和总故障数的比。

故障隔离时间: 故障从诊断开始到隔离定位所经历的时间。

故障等级和危害度: 根据故障对设备失常的影响程度而划分的等级。

故障层次: 复杂系统中发生故障的子系统的级别和层次。

2) 故障诊断的理论基础

试验理论: 在故障诊断实践、故障模拟和故障仿真研究中,以试验设计理论、相似理论为基础。

测试理论: 故障信息的获取、转化、传输,以测试理论为基础。

信号分析和处理理论: 故障特征的提取,以信号分析和信号处理理

论为基础。

统计分析理论:故障诊断过程和结论是一个概率问题,以概率统计理论为基础。

模式识别理论:故障隔离、定位和等级确定是一个分类识别问题,以模式识别理论为基础。

1.2 故障诊断技术的现状及其发展概况

1.2.1 故障诊断技术的发展史

从故障和诊断概念所含的基本意义上讲,故障诊断技术是随着人类自然科学技术和思维科学发展而发展的,因为它是一种主动的、有意识的行为,起源于医学领域的疾病诊断就是明证。而对机电设备的故障诊断,作为一项科学技术进行系统的探索和研究是近几十年的事。一方面,由于工业化和科学技术的发展,大量技术含量高、系统复杂、价格昂贵的机电设备得以广泛应用,人们对其可靠性、可用性、维修性、经济性与安全性的认识和期望都提到了新的高度;另一方面,信息科学、计算机科学、传感器技术、微电子技术和信号分析与处理理论、人工智能理论得到了快速发展和大规模推广应用。故障诊断学科的形成,不但满足了生产力发展的需求,而且具有了强大的理论和技术支撑。在故障诊断技术的发展过程中,有两项科学技术起了强大的推动作用:一项是FFT(快速傅里叶变换)技术;另一项是计算机技术。经典的傅里叶分析在对信号进行理论分析中的重要作用是人所共知的,但在工程中的实时应用却遇到了困难,因为涉及到大量数据的采集和快速分析工作。20世纪60年代,数字计算机的快速发展和FFT算法的发明解决了这个难题,加之传感器、人工智能等相关科学技术的发展,使故障诊断技术在近40年间快速发展起来,并迅速渗透和应用到各工业领域,获得了巨大的经济效益和社会效益。

以美国为代表的工业化强国,开展机电设备故障诊断的机构主要分布在国家主管部门、高等院校、研究机构和技术公司,应用领域覆盖航天、

航空、核动力、军事和普通民用等各种设备,研究领域包括故障诊断的理论和 技术、故障评价标准两个方面。我国故障诊断技术的研究和国外先进国家相比,落后 20 余年。研究机构、研究领域、应用领域的分布和国外相仿,相对故障诊断技术本身而言,对设备故障诊断评价标准的研究则落后得更多一些。

1.2.2 故障诊断技术的发展趋势

机电设备故障诊断技术,经过几十年的研究、发展和应用,取得了相当大的成果,但它毕竟是一个年轻的新兴学科,从工程应用情况分析,其未来的发展趋势,应当集中在以下几个方面。

(1) 设备的测试性研究和设计。现代大型机电设备的寿命周期都在几十年以上,而故障诊断技术的研究和应用,大都针对已有的设备。这些设备在当初研制和设计时,很少考虑测试性属性,结果导致设备的状态特征信号难于获取。根据故障诊断的研究成果和碰到的问题,在设备研制和设计阶段,把测试性作为和可靠性等一样的性能指标进行系统的设计,是一个极为重要的研究方向。

(2) 故障隔离、故障定位理论和技术的深入研究。对于典型的机电设备来说,故障都发生在零件、元件级别上,但机电设备又是一个复杂的系统,系统的层次性和零部件的关联性,给故障的隔离和定位造成了极大的困难。研究在什么级别上分析和隔离故障及其相关理论,是故障诊断工程必须解决的课题。

(3) 故障机理、故障模式和故障特征参数的表达研究。研究故障产生的原因和机理,研究故障模式和故障特征参数表达,是提高故障诊断率和改进设备设计的基础。

(4) 故障评价标准的研究。设备的功能失常,是个模糊的概念。分析功能失常的原因,确定故障的部位、不同故障对设备和环境造成的危害度,研究和制定故障评价标准是故障诊断的目的,也是指导设备使用的法规。

(5) 设备的故障诊断和维修制度密切结合。设备的维修制度和故障诊断技术的发展是密切相关的。现行的大型设备大都实行的是定期维修

制度,结果容易造成维修过度和维修不足的后果。故障诊断技术的发展和应用,必将促进维修制度的改革。采取何种诊断策略,何时进行适度维修,是设备管理必须研究和解决的课题。

1.3 车辆的基本构成及特点

车辆是一类极为重要的机电设备,其特点是通过轮系驱动行驶,具有机动性。其功能是在陆地上执行运载和特种作业任务。从行驶的约束条件来看,有轨道车辆、道路车辆、越野车辆;从动力源来看,有燃油发动机车辆、电力车辆以及简单的人力车、兽力车。随着科学技术的发展和人们对车辆机动性要求的不断提高,现代车辆已发展成为集机械、电器、电子、液压于一体的复杂系统。现代车辆由于具有相当高的机动性,其故障发生率比固定式机电设备要高;而出于安全的原因,人们又要求其故障率要尽可能的低。这种矛盾的解决则要求车辆的故障诊断研究需具备相当高的水平。

机动车辆有各种各样的分类方法,为了论述方便,本文把主要执行运输任务的车辆归为通用车辆,把主要执行其他任务的车辆归为特种车辆,且重点分析以燃油发动机为动力源的机动车辆。

1.3.1 通用车辆的基本结构

执行运输任务的通用车辆结构由两大部分组成:底盘和车厢。底盘起驱动行驶和支撑作用,车厢起盛装物体(人或货物)作用。底盘零部件多、组成复杂、技术含量高,而且承受车辆全部的动、静载荷,故发生的故障率也高。通用车辆故障诊断的重点和难点也在底盘部分。通用车辆的底盘一般由动力子系统、传动子系统、操纵子系统、行动子系统和相互间的支撑连接件组成。从专业技术领域来看,现代通用车辆的底盘涉及到发动机、机械、液压、气动、电气、电子、计算机、仪器仪表等学科。

1.3.2 特种车辆的基本结构及特点

特种车辆在机动行驶的过程中,还要完成各种特殊的作业。对于