



国家重点出版项目

★ ★ ★  
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

国防现代化建设

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

# 装甲车辆 故障诊断技术

Armored Vehicle Fault Diagnosis Technology

郑长松 冯辅周 张丽霞 江鹏程 编著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家出版基金项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

国之重器出版工程

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

# 装甲车辆故障诊断技术

郑长松 冯辅周 张丽霞 江鹏程 编著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书系统全面地介绍了装甲车辆的常见故障及其机理、性能及状态检测技术,分析归纳了装甲车辆常用的状态信号分析处理方法、故障诊断方法及其关键系统的状态评估与典型故障的诊断案例等内容。最后介绍了几种典型的针对装甲车辆发动机、综合传动装置及底盘机械液压系统的故障诊断系统的功能、特点及系统结构,提出了装甲车辆故障预测与健康管理系统的发展展望。本书具有系统性强、原理与应用并重、通俗易懂、实用性强等特点,可作为高等院校机械、车辆、兵器、舰船等专业师生的教学用书,以及工程技术人员进行继续工程教育的教材,也可作为机械工程及设备维护管理方面工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆故障诊断技术/郑长松等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2019. 5

国家出版基金项目“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程 陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

ISBN 978 - 7 - 5682 - 6964 - 3

I. ①装… II. ①郑… III. ①装甲车 - 故障诊断 IV. ①TJ811

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第075059号

---

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 固安县铭成印刷有限公司

开 本 / 710 \* 1000 mm 1/16

印 张 / 46.5

责任编辑 / 梁铜华

字 数 / 805千字

文案编辑 / 梁铜华

版 次 / 2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷

责任校对 / 杜 枝

定 价 / 198.00元

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》

## 编写委员会

名誉主编：王哲荣 苏哲子

主 编：项昌乐 李春明 曹贺全 丛 华

执行主编：闫清东 刘 勇

编 委：(按姓氏笔画排序)

马 越 王伟达 王英胜 王钦钊 冯辅周

兰小平 刘 城 刘树林 刘 辉 刘瑞林

孙葆森 李玉兰 李宏才 李和言 李党武

李雪原 李惠彬 宋克岭 张相炎 陈 旺

陈 炜 郑长松 赵晓凡 胡纪滨 胡建军

徐保荣 董明明 韩立金 樊新海 魏 巍



## 编者序

坦克装甲车辆作为联合作战中基本的要素和重要的力量，是一个最具临场感、最实时、最基本的信息节点，其技术的先进性代表了陆军现代化程度。

装甲车辆涉及的技术领域宽广，经过几十年的探索实践，我国坦克装甲车辆技术领域的专家积累了丰富的研究和开发经验，实现了我国坦克装甲车辆从引进到仿研仿制再到自主设计的一次又一次跨越。在车辆总体设计、综合电子系统设计、武器控制系统设计、新型防护技术、电子电气系统设计及嵌入式软件设计、数字化与虚拟仿真设计、环境适应性设计、故障预测与健康管理和新型工艺等方面取得了重要进展，有些理论与技术已经处于世界领先水平。随着我国陆战装备系统的理论与技术所取得的重要进展，亟需通过一套系统全面的图书，来呈现这些成果，以适应坦克装甲车辆技术积淀与创新发展的需要，同时多年来我国坦克装甲车辆领域的研究人员一直缺乏一套具有系统性、学术性、先进性的丛书来指导科研实践。为了满足上述需求，《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》应运而生。

北京理工大学出版社联合中国北方车辆研究所、内蒙古金属材料研究所、北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院、南京理工大学、中国人民解放军陆军军事交通学院和中国兵器科学研究院等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，策划出版了本套反映坦克装甲车辆领域具有领先水平的学术著作。本套丛书结合国际坦克装甲车辆技术发展现状，凝聚了国内坦克装甲车辆技术领域的主要研究力量，立足于装甲车辆总体设计、底盘系统、火力防护、电气系统、电磁兼容、人机工程等方面，围绕装甲车辆“多功能、轻量化、网



络化、信息化、全电化、智能化”的发展方向，剖析了装甲车辆的研究热点和技术难点，既体现了作者团队原创性科研成果，又面向未来、布局长远。为确保其科学性、准确性、权威性，丛书由我国装甲车辆领域的多位领军科学家、总设计师负责校审，最后形成了由14分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》（第一辑），具体名称如下：《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆制造工艺学》《装甲车辆悬挂系统设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲防护技术研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆试验学》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆故障诊断技术》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《坦克装甲车辆电气系统设计》《装甲车辆嵌入式软件开发方法》《装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术》。

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》内容涵盖多项装甲车辆领域关键技术工程应用成果，并入选“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目、“国之重器出版工程”和“国家出版基金”项目。相信这套丛书的出版必将承载广大陆战装备技术工作者孜孜探索的累累硕果，帮助读者更加系统全面地了解我国装甲车辆的发展现状和研究前沿，为推动我国陆战装备系统理论与技术的发展做出更大的贡献。

丛书编委会



## 前 言

装甲车辆故障诊断是装备运用与维修保障领域的重点研究内容，对装备的使用安全性、可靠性具有十分重要的意义。随着设备故障诊断技术的发展与应用，近年来有很多检测、信号分析处理、故障诊断及预测等新技术、新方法陆续在装甲车辆上得到应用。要想在一本书中详细介绍那么多的技术内容比较困难，为此，本书重点以坦克装甲车辆动力传动系统为对象，阐述其常见故障及机理、典型性能及状态检测参数、适用的信号处理及特征提取方法以及典型应用案例。本书是作者及所在单位多年来从事装甲车辆及其关键系统设计、试验与使用维修等技术相关的教学与科研工作成果的总结，以近 20 年来发表的学术论文和博士、硕士学位论文为基础，吸收了由国防工业出版社出版的原中国人民解放军总装备部研究生精品教材《军用车辆故障诊断学》的部分内容，同时融入了他人的最新研究成果，对装甲车辆动力传动系统故障诊断技术进行了全面系统的归纳和总结。

本书的特色是以设备故障诊断技术研究及系统实施的主要环节——故障机理、状态检测（监测）、特征提取、故障诊断等为主线，在融合设备故障诊断学科领域的经典理论、方法和最新研究成果的基础上，密切结合我军装甲车辆的结构原理、工作特点及部队装备运用与维修的实际，全面系统地介绍了装甲车辆的常见故障及其机理、性能及状态检测技术，分析归纳了装甲车辆常用的状态信号分析处理方法、故障诊断方法及其关键系统的状态评估与典型故障的诊断案例等内容。最后介绍了针对装甲车辆发动机、综合传动装置及底盘机械液压系统的几种典型故障诊断系统的功能、特点及系统结构，提出了装甲车辆



故障预测与健康管理（PHM）系统的发展展望。

全书共分7章，包括绪论，装甲车辆常见故障模式及机理、性能及状态参数检测技术、状态信号的常用处理方法、常用故障诊断方法和故障诊断技术的实施模式及典型应用等内容。其中郑长松完成了第4、5、6章的部分内容，张丽霞负责完成了第2章，江鹏程完成了第3、7章的部分内容，其余章节均由冯辅周负责完成，全书由冯辅周统稿，郑长松负责校对。

本书具有系统性强、内容全面、原理与应用并重、通俗易懂、实用性强等特点。它不仅可作为高等院校机械、车辆、兵器、舰船等专业师生的教学用书以及工程技术人员进行继续工程教育的教材，也可作为机械工程及设备维护管理方面工程技术人员的参考书。

本书在编写和出版过程中得到了国家自然科学基金、武器装备预研基金及军队计划科研项目的支持，还得到了北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院等单位各级领导的大力支持和帮助，特向他们表示衷心的感谢。

受水平和经验所限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请读者予以批评指正。

作者



# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	001
1.1 故障诊断的相关概念 .....	004
1.1.1 故障模式 .....	004
1.1.2 故障模式、影响及其危害性分析 .....	005
1.1.3 故障诊断 .....	005
1.1.4 故障机理 .....	005
1.1.5 测试性 .....	006
1.1.6 故障检测率 .....	006
1.1.7 故障隔离率 .....	007
1.1.8 虚警率 .....	007
1.1.9 故障等级和危害度 .....	007
1.1.10 平均故障间隔时间 .....	008
1.1.11 检测参数 .....	008
1.1.12 特征参量 .....	008
1.1.13 评估指标 .....	008
1.1.14 状态评估 .....	008
1.1.15 故障预测与健康管理 .....	009
1.1.16 故障与失效 .....	009
1.2 设备故障诊断的意义 .....	009



1.2.1	提高设备的安全性和可靠性, 保证设备具有足够高的完好率 .....	010
1.2.2	降低维修费用, 获取间接的经济效益 .....	010
1.2.3	避免重大事故的发生, 将带来显著的社会效益 .....	011
1.3	故障诊断技术国内外研究状况 .....	011
1.3.1	国外设备故障诊断技术研究状况 .....	012
1.3.2	国内设备故障诊断技术研究状况 .....	015
1.3.3	故障诊断技术的发展趋势 .....	018
1.4	装甲车辆的基本构成及特点 .....	019
1.4.1	环境恶劣、危险 .....	021
1.4.2	工作载荷复杂多变 .....	021
1.4.3	必须具备持续作战的能力 .....	021
1.5	装甲车辆故障诊断的特点、研究目的和范围 .....	022
1.5.1	装甲车辆常见故障模式及故障诊断的特点 .....	022
1.5.2	装甲车辆故障诊断的研究目的和范围 .....	023
第2章	装甲车辆常见故障模式及其机理 .....	025
2.1	常用的动力学建模分析方法 .....	027
2.1.1	有限元模型 .....	028
2.1.2	ADAMS 建模 .....	029
2.1.3	集中质量参数模型 .....	030
2.1.4	状态变量模型 .....	030
2.2	装甲车辆柴油发动机常见故障模式及机理 .....	033
2.2.1	柴油发动机常见故障 .....	033
2.2.2	柴油发动机轴瓦磨损机理分析 .....	035
2.2.3	柴油发动机敲缸故障机理分析 .....	037
2.2.4	柴油发动机拉缸故障机理分析 .....	039
2.2.5	柴油发动机高压油路故障机理分析 .....	042
2.3	装甲车辆变速箱常见故障模式及机理 .....	045
2.3.1	变速箱常见故障模式 .....	045
2.3.2	齿轮裂纹故障机理分析 .....	048
2.3.3	齿轮断齿故障机理分析 .....	061
2.3.4	传动轴松动故障机理分析 .....	064
2.3.5	轴不平衡机理分析 .....	073



2.3.6	轴不对中故障机理分析 .....	074
2.3.7	轴承振动故障机理分析 .....	076
2.4	装甲车辆综合传动装置常见故障模式及机理 .....	079
2.4.1	综合传动装置常见故障模式 .....	079
2.4.2	综合传动装置典型液压系统故障机理 .....	082
2.4.3	锥齿轮磨损故障机理 .....	092
2.4.4	箱体的固有频率耦合问题 .....	094
2.4.5	带排故障机理 .....	098
2.4.6	汇流行星排滚针轴承磨损故障机理 .....	099
<b>第3章</b>	<b>装甲车辆状态参数测试技术 .....</b>	<b>105</b>
3.1	概述 .....	106
3.1.1	测试技术概念 .....	106
3.1.2	装甲车辆状态测试的重要性 .....	107
3.2	装甲车辆状态参数的确定 .....	107
3.2.1	装甲车辆状态参数分类 .....	107
3.2.2	测试参数的选择原则 .....	109
3.3	装甲车辆主要性能参数测试技术 .....	110
3.3.1	转速测试 .....	110
3.3.2	扭矩测试 .....	115
3.3.3	运动速度测试 .....	124
3.3.4	油耗测试 .....	127
3.4	装甲车辆振动测试 .....	132
3.4.1	概述 .....	132
3.4.2	振动加速度传感器 .....	133
3.4.3	振动速度传感器 .....	149
3.4.4	振动测试的应用实例 .....	151
3.5	装甲车辆噪声测试 .....	155
3.5.1	概述 .....	155
3.5.2	声学测试仪器 .....	155
3.5.3	噪声测试应用实例 .....	161
3.6	装甲车辆油液分析技术 .....	164
3.6.1	概述 .....	164
3.6.2	油液理化指标分析 .....	166



3.6.3	颗粒计数法	167
3.6.4	光谱分析法	167
3.6.5	铁谱分析法	175
3.7	装甲车辆压力测试	183
3.7.1	常用的压力检测仪表	184
3.7.2	机油压力测试	187
3.7.3	进气真空度	188
3.7.4	气缸压缩压力	189
3.7.5	液压系统压力	192
3.7.6	柴油发动机燃油压力	193
3.8	其他参数测试技术	195
3.8.1	温度测试	196
3.8.2	位移测试	201
3.8.3	气体成分分析	207
3.8.4	烟度测量	208
3.8.5	起动电流测试	208
第4章	装甲车辆状态信号的常用处理方法	211
4.1	概述	212
4.1.1	特征计算或形成	213
4.1.2	特征提取	213
4.1.3	特征选择	213
4.2	装甲车辆状态信号的预处理及采集	214
4.2.1	信号预处理及采集的基本步骤	214
4.2.2	连续时间信号的采样及采样定理	215
4.2.3	量化和量化误差	221
4.2.4	截断、泄漏与窗函数	224
4.3	信号的幅域分析及其特征参量计算	229
4.3.1	简单统计特征参量	229
4.3.2	高阶统计特征参量	231
4.3.3	幅域无量纲特征参数	233
4.3.4	随机信号的概率密度函数	234
4.4	信号的时域分析方法及其特征参量计算	236
4.4.1	时域波形分析	236



4.4.2	时域相加平均	239
4.4.3	自相关分析	240
4.4.4	互相关分析	244
4.4.5	时间序列分析——ARMA 模型	249
4.4.6	信号的熵特征分析	257
4.4.7	信号的包络分析	265
4.5	信号的频域分析方法及其特征参量计算	270
4.5.1	离散傅里叶变换	270
4.5.2	阶次比分析	275
4.5.3	频谱的三维分析	279
4.5.4	相干函数	282
4.5.5	倒频谱	285
4.5.6	极大熵谱	287
4.6	时频域分析方法及其特征参量计算	289
4.6.1	从傅里叶变换到时频域分析	290
4.6.2	短时傅里叶分析	292
4.6.3	小波变换	297
4.6.4	Hilbert - Huang 变换	305
4.6.5	各种变换之间的比较	309
4.6.6	分形及其计算方法	311
第 5 章	装甲车辆的常用故障诊断方法	319
5.1	概述	321
5.1.1	按诊断的目的和要求划分	321
5.1.2	按故障诊断和状态识别方法提出及应用的先后 顺序划分	322
5.1.3	按故障诊断模型的实现途径划分	323
5.1.4	机器学习	324
5.2	基于数据驱动的故障诊断方法	328
5.2.1	贝叶斯分类法	328
5.2.2	距离函数分类法	333
5.2.3	灰色理论诊断法	336
5.2.4	时间序列模型分析法	341
5.2.5	逐步判别分析法	341



5.2.6	随机森林分析方法	346
5.2.7	模糊诊断法	353
5.2.8	支持向量机模型	359
5.2.9	聚类分析	373
5.2.10	隐马尔可夫模型 (HMM)	376
5.2.11	人工神经网络模型	407
5.2.12	量子神经网络模型	416
5.3	基于知识的故障诊断方法	425
5.3.1	基于人工经验的状态识别	425
5.3.2	模式匹配分析法	425
5.3.3	基于案例推理的诊断	426
5.3.4	故障树分析法	430
5.3.5	基于测试性分析的诊断策略构建	437
5.3.6	专家系统	443
5.4	故障诊断技术的发展趋势	446
5.4.1	复合智能故障诊断技术研究	446
5.4.2	基于因特网和无线数据传输技术的远程协作 诊断技术研究	446
5.4.3	复合智能仿生故障诊断技术研究	447
第6章	装甲车辆关键系统的状态评估与典型故障的诊断	449
6.1	装甲车辆典型状态信号的特征分析及应用	451
6.1.1	基于瞬时转速信号的柴油发动机原位加速性能 指标提取	451
6.1.2	基于振动信号的烈度特征计算	461
6.1.3	柴油发动机起动性能相关的特征提取	465
6.1.4	燃油喷射系统性能检测及特征提取	468
6.2	装甲车辆柴油发动机的状态评估	474
6.2.1	装甲车辆柴油发动机技术状况评估的基本 内容与步骤	475
6.2.2	装甲车辆柴油发动机技术状况检测参数与评估 指标的确定	476
6.2.3	装甲车辆柴油发动机技术状况基准样本模式的建立	480
6.2.4	装甲车辆柴油发动机技术状况评估指标获取	482



6.2.5	装甲车辆柴油发动机技术状况的评估模型 .....	487
6.3	装甲车辆柴油发动机失火故障诊断 .....	498
6.3.1	柴油发动机排气噪声检测 .....	498
6.3.2	柴油发动机排气噪声的特点 .....	499
6.3.3	信号预处理 .....	499
6.3.4	失火前后噪声信号的对比分析 .....	501
6.3.5	提取噪声峰-谷值间隔信号 .....	503
6.3.6	特征参数提取 .....	504
6.3.7	失火故障模糊判别 .....	504
6.4	装甲车辆传动箱典型故障的检测与诊断 .....	505
6.4.1	概述 .....	505
6.4.2	滚动轴承的检测诊断 .....	505
6.4.3	齿轮的检测诊断 .....	511
6.4.4	军用车辆传动系统故障诊断实例 .....	517
6.5	装甲车辆变速箱典型故障的诊断 .....	519
6.5.1	概述 .....	519
6.5.2	变速箱的基本结构 .....	525
6.5.3	基于包络解调分析的变速箱齿轮断齿故障的诊断 .....	527
6.5.4	基于支持向量聚类的变速箱状态判别 .....	531
6.6	装甲车辆行星变速箱的故障特征提取与诊断 .....	541
6.6.1	概述 .....	541
6.6.2	行星变速箱结构及振动响应仿真 .....	541
6.6.3	行星变速箱典型故障模拟试验 .....	559
6.6.4	行星变速箱典型故障特征提取 .....	564
6.7	装甲车辆综合传动装置的状态评估与故障诊断 .....	574
6.7.1	概述 .....	574
6.7.2	某型综合传动箱结构 .....	577
6.7.3	某型综合传动箱振动信号分析 .....	579
6.7.4	综合传动箱状态评估标准的建立 .....	582
6.7.5	综合传动箱劣化规律研究 .....	594
第7章	装甲车辆故障诊断技术的实施模式及典型应用 .....	597
7.1	设备状态检测与故障诊断系统的基本原理与组成 .....	599
7.2	便携式综合传动装置检测与诊断系统 .....	600



7.2.1	系统的功能与特点	601
7.2.2	系统硬件组成	604
7.2.3	系统软件组成	608
7.2.4	系统的应用	612
7.3	装甲车辆底盘集成测试与分析系统	617
7.3.1	系统组成	617
7.3.2	综合测试系统的软件功能	618
7.3.3	系统状态评估与故障诊断软件	623
7.4	集成式通用装备机械液压系统综合检测平台	625
7.4.1	平台的功能及特点	625
7.4.2	平台的主要硬件组成	628
7.4.3	平台软件应用及操作步骤	630
7.5	装甲车辆 PHM 技术及应用展望	637
7.5.1	故障预测与健康管理的概念内涵及关键技术	637
7.5.2	装甲车辆 PHM 系统的应用需求及总体方案	640
7.5.3	装甲车辆 PHM 系统样机	648
7.5.4	装甲车辆 PHM 技术研究与应用展望	667
	参考文献	676
	索引	687



## 第 1 章 绪 论

人类为了实现某种目的制造的各种设备或系统，都要经历研制、设计、制造、使用、维修、报废这样一个全寿命周期过程。人们在设计和制造设备或系统的时候，要求设备或系统在其寿命周期内应发挥和执行各种特定的功能，功能不能正常发挥时就称设备有“故障”（fault）。关于故障这一概念，目前没有一个严格、统一的定义。基于不同的文献资料或不同的应用环境往往有不同的解释。按照 GJB451