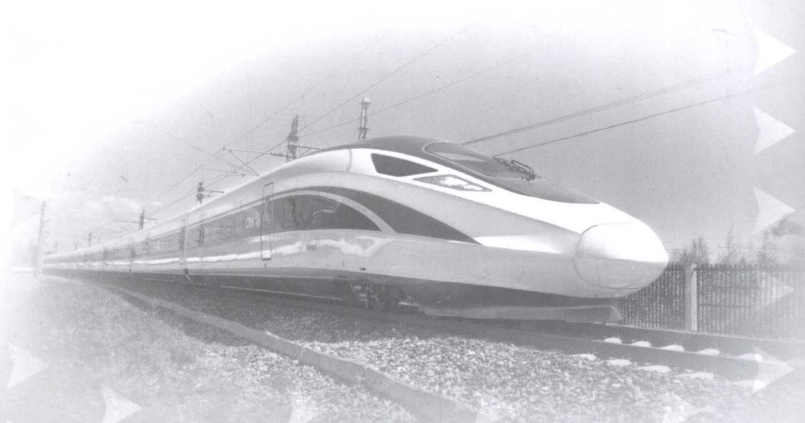


可靠性工程与 故障诊断技术

郭其一 冯江华 刘可安 著
周桂法 姚晓阳 黄世泽



科学出版社

可靠性工程与故障诊断技术

郭其一 冯江华 刘可安 著
周桂法 姚晓阳 黄世泽

科学出版社

北 京

内 容 简 介

RAMS (可靠性、可用性、可维修性和安全性) 理论诞生于美国的军工设备体系, 并且逐步发展完善, 该理论进入我国后已经成为工业设备和重大装备的质量保障基础; 系统的故障诊断技术是保障重大设备可靠运行的重要技术支撑。这些理论和技术经过我国科学工作者和工程师的研究探索, 形成了丰富的理论、技术与应用成果。本书总结了作者在该领域的科研成果, 讨论了 RAMS 体系的基本概念, 阐述了故障诊断的基本概念、基础理论和实现诊断的技术过程, 并将其应用于轨道交通车辆领域, 给出了相应的实践应用与规范要求。同时, 对所涉及的技术标准也做了比较完整的介绍。

本书适合于高等院校交通、铁路及轨道控制等专业的高年级本科生和研究生阅读, 也可供从事研究设计、生产制造、技术诊断、维护保养以及质量体系管理研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程与故障诊断技术/郭其一等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050311-4

I. ①可… II. ①郭… III. ①机车-可靠性工程②机车-故障诊断
IV. ①U268.3②U269.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 256595 号

责任编辑: 姚庆爽 张海娜 高慧元 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 33 3/4

字数: 680 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

由于铁路运输的高效、安全，我国的货物运输和人员运输还是以铁路运输作为主要的运输工具。同样，由于城市轨道交通列车（包括地铁、轻轨以及其他形式的有轨车辆）的高效、高速、正点与安全等特征，目前已成为各个特大型城市以及部分大城市和中型城市解决地面交通压力的主要选择。

列车（含机车、高速动车组）和城市轨道交通列车均由轨道线路系统、车辆系统、供电系统（包括电气化铁路供电系统和地铁的牵引供电系统）、信号控制系统（又称为列车控制系统）和行车调度系统以及其他各类辅助系统组成。而其中的轨道车辆系统是轨道交通实现人员运输和货物运输的唯一载体。

轨道车辆系统同样也是一个结构非常复杂的大系统，它的组成包括车体、走向机构（转向架）、车钩与缓冲器、牵引与制动控制系统、诊断系统和旅客信息系统等。而其中的牵引控制系统是实现列车运行速度控制、安全控制以及舒适性控制等的技术核心，故障检测诊断系统是保障列车安全运行的重要的技术辅助控制之一。随着现代微电子技术、电力电子技术、计算机技术、网络通信技术、现代传感器技术、现代信号处理技术和现代数学以及控制理论的发展，现代的列车牵引控制系统和故障诊断系统就是建在这些理论与技术之上的数字化、智能化与网络化的电子电气系统。

该系列包括《现代列车控制技术与应用》和《可靠性工程与故障诊断技术》。两册书的内容有所区别，但是立足点都是列车状态检测控制技术与应用系统的论述，相互补充，构成现代列车检测、控制、诊断、测试认证等完整的技术体系。《现代列车控制技术与应用》的主要内容为列车状态信息检测与控制的理论基础和技术实践，包括交流传动理论和现代列车车载通信网络技术、工程应用以及测试认证技术等。而《可靠性工程与故障诊断技术》的主要内容包括故障诊断的基础理论体系与实现方法，可靠性工程、故障诊断的实践应用和实验测试结果等。

该书的第一个特点是吸收和汇集了现代列车检测、控制、诊断与测试领域近年来的丰富研究成果。列车（机车）车载电传动控制系统从初期的变压器级间调压到相控整流输出的直流电机调速技术，发展到目前建立在直接转矩控制或者旋转磁场控制理论基础之上、普遍采用以 IGBT 构成的变流器系统可控变频变压输出的三相交流异步电机速度与力矩控制技术。从以变流器为核心的速度调节技术，到目前的以车载计算机控制网络为基础的分布式控制系统，不仅实现速度控制，还实现安全控制和充分利用黏着的力矩控制与防滑控制。从常规的普通列车控制到高速列车控制、重载重联列车同步控制。以现代传感技术和信号处理技术为基

基础的故障诊断技术不断完善并且实用化,而成为保障列车安全运行的重要技术基础之一。列车(机车、动车组)的RAMS体系构建、实践和实现不断进步,并且贯穿列车设计、制造、运营、管理和处置的整个生命过程,因此现代列车的技术性能与功能、可靠性、安全性不断提高,一个往返运行交路从以前的一二百公里到目前的一千多公里。整个的列车(机车)牵引控制理论和控制实现技术发生了重大的变化,并且还在不断的进步之中。该书就是将这些崭新的理论与技术形成完整的体系。

该书的第二个特点是以基本理论为基础,以应用实践为目的展开讨论和叙述。列车控制从检测技术、控制理论、车载网络到交流传动控制技术形成体系,列车诊断从RAMS体系的建立,引出故障诊断的信息获取与检测控制理论、信号处理、可诊断性理论、故障可分离性理论到部件诊断和系统诊断等构成完整的体系。全书贯穿的思想是建立理论基础,并且由理论指导实践,为实践服务。

该书的第三个特点是对系统的测试、认证和一致性检测技术与系统设计实现作为一个整体进行介绍。由于列车的运行环境非常特殊,其海拔、粉尘、盐雾、温度、冲击振动、电磁兼容性等均与地面环境相差非常大,所有的车载设备必须适应这样恶劣的运行环境才能够稳定正常地工作。牵引控制系统和故障诊断系统作为电子电气设备必须通过相关的国际标准或者国家标准、行业标准的测试认证,才能够成为合格的车载设备。因此,测试认证技术应当成为控制理论与技术的一部分。作为牵引控制系统与故障诊断系统核心的车载网络系统,它必须与所有与之相连接的设备实现无缝的互联互通,而网络的一致性检测测试技术就是保障其可靠安全运行的基础。因此,网络的一致性检测认证技术也必须成为该书的组成部分。这样的体系构成也就成为该书的重要特点。

该书的作者一直从事电力牵引与传动控制领域的教学、研究、技术开发和工程实践工作,理论扎实,经验丰富。该书的内容是他们几十年工作的积累和总结,也是对牵引控制和诊断应用行业的一份贡献与一种新的探索。全书阅览广泛,内容丰富,见解独特,可以作为该领域工作者的指导与引领。特此作序。

中国工程院院士



2016年8月于湖南株洲

前 言

随着计算机控制技术、列车车载通信网络、大功率电力电子器件与现代微电子技术、现代传感器技术和检测测量技术以及列车控制理论的发展、不断完善和相互融合，逐步形成了以交流传动为基本传动方式、以车载列车通信网络为平台和以计算机数字化检测控制为核心的现代列车检测、控制和诊断技术体系。

随着现代交流拖动与控制理论体系的建立和不断深化，电气化机车（包括列车与电动车组）从以变压器级间调压和以可控硅为核心的相控调压实现的直流拖动电传动系统，发展成为现代的以 IGBT 为主的大功率电力电子器件构成的变流器机组与交流传动体系。

20 世纪 80 年代，西门子、ABB、三菱、东芝等列车车载设备生产企业相继研发了列车计算机检测控制系统，并且实现工程化和产业化，由此机车车辆的控制从模拟电子技术为主的检测控制体系向以微型计算机为核心的数字化、智能化和网络化检测控制体系发展，不仅实现了检测控制的自动化，而且形成了基本完整的故障诊断体系。

20 世纪 90 年代，西门子、庞巴迪（原 ABB 的 Aditrans）等企业提出了基于现代网络技术的列车通信网络技术标准 TCN（IEC 61375），并且成为目前国际上广泛采用的车载通信网络标准，由此列车检测控制走向网络化。更重要的是，原来以变流器为核心的列车牵引控制系统，发展成为以列车通信网络为基础平台和核心的牵引控制体系，所有的检测控制系统或装置就成为现代车载通信网络上的一个节点或者接口装置。

牵引电机技术也从直流电机发展成为可靠性更高的异步交流电机，目前各个大型生产企业开始建立生产永磁同步直驱电机拖动系统体系。同时，交流拖动的理论体系也不断发展完善，从早期的滑差控制，到目前的旋转磁场矢量控制和直接转矩控制技术，以及基于状态估计理论的无速度传感器控制技术都已非常成熟完善，并且完全实现工程化和产品化。

目前，列车控制诊断技术以安全为主题，节能、高效和高可靠性为发展方向；干线铁路列车控制技术以安全、重载和高速为主要内容；而高速电动车组与城市轨道交通列车控制向更安全、更加智能化、节能以及舒适性服务等方向发展。

本书试图就以计算机的数字化智能化技术为核心、以列车车载通信网络为平台、以交流传动理论为基础的现代列车控制检测与诊断技术的理论体系、技术实现和工程应用等作一个比较完整的研究与阐述。本系列中的《现代列车控制技术与应用》的主要内容包括检测与控制理论基础、交流传动理论与技术、列车通信

网络技术、工程应用以及测试认证技术等。而《可靠性工程与故障诊断技术》的主要内容包括可靠性工程的理论、技术标准以及工程实践，故障诊断技术的基础理论与方法，故障诊断的实践应用和实验测试结果等。两册书的内容有所区别，但是立足点都是列车检测控制技术与应用。

本书作者几十年来一直从事轨道交通牵引装备的技术研究，尤其在列车RAMS 体系研究与实践、状态检测技术、牵引控制理论与技术、交流传动系统研究设计以及状态诊断等领域有着多年的研究探索。而作者所在单位中车株洲电力机车研究有限公司以及下属的株洲时代电气股份有限公司是我国在该领域的最大研发基地和产品生产供应商；同济大学在我国的轨道交通基础理论和技术研究领域都取得了应有的成绩，几十年来为我国的轨道交通现代化作出了自己的贡献，因此为本书的成稿积累了丰富的素材。

另外，在本书的准备与完成过程中，中车株洲电力机车研究有限公司以及下属的株洲时代电气股份有限公司的刘军、王益民、刘群欣、杨四清、谷丰、吕杰、杨卫峰、冯昊、刘智聪、倪大成、刘琳等，同济大学的黄世泽博士和舒露丝、徐秋勇、余亮亮、陈聪等众多研究生做了大量的实验准备、试验认证和文字工作，在此为他们所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。本书还引用了大量在公开刊物上发表的从事该领域基础研究与应用技术等工作的科研技术人员的成果以及他们的文献，在此向他们表示深深的谢意！

本书的出版得到国家 863 计划项目 N863CF-G0104-01 等多个国家项目的支持和资助，再次深表谢意！

由于作者水平有限，而且长期局限在此单一的领域内从事研究开发工作，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月

目 录

序

前言

第 1 章 系统的故障与可靠性问题	1
1.1 概述	1
1.2 系统的故障与失效	5
1.2.1 故障的特性	7
1.2.2 故障的四要素	8
1.3 系统的 RAMS 问题	12
1.4 小结	15
第 2 章 系统的可靠性原理	18
2.1 概述	18
2.2 RAMS 要素的定义及其相互关系	19
2.2.1 可靠性	19
2.2.2 可维修性	21
2.2.3 可用性	30
2.2.4 安全完整性	33
2.2.5 全寿命费用	33
2.3 RAMS 的相关标准	35
2.4 RAMS 与可靠性模型、分析与计算	38
2.4.1 事件发生的概率	38
2.4.2 可靠度与故障的分布函数	41
2.4.3 可靠性框图的建立示例	44
2.4.4 地铁列车牵引系统供应商的可靠性应用示例	49
2.5 小结	53
第 3 章 风险与安全完整性问题	54
3.1 概述	54
3.2 与安全相关的若干基本问题	55

3.3	风险	56
3.4	风险管理	57
3.5	安全与安全完整性	64
3.6	安全完整性等级的确定	68
3.7	安全性的若干问题	75
3.7.1	危险侧失效与安全侧失效	75
3.7.2	安全相关系统的故障-安全属性	76
3.7.3	安全完整性等级的使用	76
3.7.4	系统安全、安全寿命与认证维护	77
3.8	城轨车辆系统集成商的安全性管理实例	79
3.8.1	基本原则	79
3.8.2	危害识别及其管理	79
3.8.3	风险评估方法	81
3.8.4	安全性综合分析报告	83
3.8.5	安全管理流程图	83
3.8.6	故障报告、分析及纠正措施系统	83
3.8.7	文件资料/可交付的文件	85
3.9	小结	86
第4章	全生命周期及其相关因素	87
4.1	概述	87
4.2	因素评估	88
4.3	人的因素	89
4.4	系统的生命周期	91
4.5	系统生命周期各个阶段的任务说明	95
4.5.1	第1阶段：概念	95
4.5.2	第2阶段：系统定义和应用条件	96
4.5.3	第3阶段：风险分析	98
4.5.4	第4阶段：系统需求	99
4.5.5	第5阶段：系统需求的分配	101
4.5.6	第6阶段：设计和实现	103
4.5.7	第7阶段：制造	104
4.5.8	第8阶段：安装	105
4.5.9	第9阶段：系统确认（包括安全验收和调试）	106
4.5.10	第10阶段：系统验收	107
4.5.11	第11阶段：运营和维修	108

4.5.12 第 12 阶段：性能监控	109
4.5.13 第 13 阶段：修改与更新	109
4.5.14 第 14 阶段：停用及处置	110
4.5.15 生命周期 RAMS 流程内的责任	111
4.6 RAMS 规范概要与规划	111
4.6.1 RAMS 规范概要	111
4.6.2 RAMS 规划建设	113
4.6.3 工具清单	114
4.7 小结	116
第 5 章 系统 RAM 工程的用户需求	119
5.1 概述	119
5.2 RAMS 的总体要求	119
5.3 系统安全性要求	121
5.4 风险分析及危害（隐患）登记要求	122
5.4.1 危害（隐患）和可操作性研究	122
5.4.2 接口危害（隐患）	123
5.4.3 安全原则及规范要求的符合性评估	124
5.4.4 量化风险评估	124
5.4.5 故障树分析要求	124
5.4.6 可容忍的危害（隐患）发生率	125
5.4.7 安全关键项清单	125
5.5 可靠性、可用性及可维修性指标要求	125
5.5.1 故障定义	125
5.5.2 可靠性指标	126
5.5.3 可用性指标	126
5.5.4 可维修性指标	127
5.5.5 RAM 全寿命分析和管理	128
5.5.6 RAM 指标分配	128
5.6 可靠性、可用性及可维修性证明及报告	131
5.7 故障认定与故障审查委员会	133
5.8 关联责任故障与非关联责任故障	133
5.9 可维护性技术要求	134
5.10 用户需求信息的格式化附件	136

第 6 章 系统 RAM 工程的供应商行为	151
6.1 概述	151
6.2 牵引系统的 RAMS 工程	154
6.2.1 车辆牵引系统的基本描述（供应商建议）	154
6.2.2 产品功能及组成建议说明	155
6.2.3 主要部件的维护建议	156
6.2.4 可靠性指标要求	162
6.2.5 牵引系统可靠性建模	164
6.2.6 牵引系统可靠性分配	167
6.2.7 质保期内 RAMS 验证	171
6.3 车辆系统的 RAMS 工程	173
6.3.1 车辆系统供应商的一般建议说明	173
6.3.2 可靠性、可用性及可维护性的建议要求	174
6.3.3 供应商将提供的相关资料	179
6.3.4 车辆系统建议的保证计划	180
6.4 小结：应用示例	183
第 7 章 系统 RAMS 工程的低压电器实践	185
7.1 概述	185
7.2 低压电器可靠性问题的研究	187
7.2.1 美国情况	187
7.2.2 日本情况	190
7.2.3 其他国家的低压电器可靠性工作	198
7.2.4 IEC 的可靠性标准及其低压电器标准中的可靠性要求	198
7.3 国内低压电器的可靠性工作发展	200
7.4 可靠性指标确定	201
7.4.1 可靠性指标确定	201
7.4.2 保护类电器的可靠性指标	201
7.4.3 控制类电器可靠性指标	203
7.5 低压电器的可靠性特征参数与失效分布	204
7.5.1 低压电器的可靠性特征参数	204
7.5.2 失效分布类型及确定方法	206
7.5.3 可靠性特征参数的估计方法	207
7.6 可靠性试验	207
7.6.1 抽样试验	208

7.6.2	可靠性测定试验	211
7.6.3	可靠性验证试验	211
7.6.4	可靠性验证试验的方法介绍	212
7.6.5	保护类电器(低压断路器)可靠性验证试验方案	219
7.6.6	控制类电器(接触式继电器)可靠性验证方案	223
7.7	可靠性分析方法	227
7.7.1	失效分析	227
7.7.2	数理分析方法	229
7.8	小结	233
第 8 章	故障状态诊断的数学基础	235
8.1	概述	235
8.2	傅里叶变换	235
8.2.1	傅里叶变换的形式	236
8.2.2	离散傅里叶级数	238
8.2.3	离散傅里叶变换	239
8.3	快速傅里叶变换	245
8.3.1	直接计算 DFT 的问题及改进的途径	245
8.3.2	时间抽取基-2FFT 算法	246
8.3.3	频率抽取基-2DFT 算法	253
8.4	快速小波变换	257
8.5	小波变换及小波分析	264
8.5.1	小波变换	264
8.5.2	小波分析的基本理论	272
8.5.3	多分辨率分析	274
8.5.4	小波包变换	275
8.5.5	小波包的频带分析技术	276
8.6	小结	277
第 9 章	故障诊断与可诊断问题基础	278
9.1	概述	278
9.2	故障诊断	279
9.2.1	故障诊断的要素	280
9.2.2	系统的状态迁移	281
9.2.3	故障诊断的任务与意义	282
9.2.4	技术诊断的过程	283

9.3	诊断机问题	284
9.3.1	有限自动机问题	284
9.3.2	诊断机问题	287
9.3.3	诊断过程	292
9.4	可诊断问题概述	293
9.5	系统描述	294
9.6	系统的状态可诊断问题	296
9.7	实际可诊断	301
9.8	状态故障的可分离问题	302
9.9	存在过程扰动时状态故障可分离问题	305
9.9.1	存在过程扰动时基于观测器方式的线性系统状态故障可分离	305
9.9.2	存在过程扰动时基于观测器方式的非线性系统状态故障可分离	307
9.10	基于投影算子方法的故障可分离性条件	310
9.10.1	实现故障分离的投影算子方法	310
9.10.2	投影算子存在的条件	312
9.11	小结	313
第 10 章	诊断中的检测控制与传感器诊断技术	314
10.1	概述	314
10.2	诊断信息获取方法	316
10.3	传感器的基本特征	317
10.4	诊断信息处理	322
10.4.1	故障信号处理	324
10.4.2	传感器的匹配	324
10.4.3	基本的信号处理	327
10.5	诊断信息的量度	331
10.6	检测控制策略问题	333
10.7	测量策略问题求解	335
10.8	检测控制技术实践	337
10.9	传感器分布优化方法	339
10.9.1	传感器分布优化方法概述	339
10.9.2	基于诊断重要度的传感器分布方法	339
10.9.3	实例	340
10.10	融合部件的测试代价	341
10.10.1	费用诊断重要度	341
10.10.2	融合了测试代价的诊断决策算法	342

10.11 传感器自身故障问题的提出	342
10.11.1 传感器故障类型	343
10.11.2 传感器故障数学模型	343
10.11.3 传感器故障常用的诊断技术	345
10.12 基于分析性冗余的传感器故障诊断技术	347
10.12.1 基于分析性冗余的传感器故障诊断推理	348
10.12.2 说明	349
10.13 基于鲁棒观测器的解析性冗余传感器故障诊断	350
10.13.1 基于冗余关系的鲁棒观测原理	350
10.13.2 基于鲁棒观测器的解析冗余诊断技术	353
10.14 小结	355
第 11 章 基于状态观测的控制系统诊断问题	356
11.1 概述	356
11.2 控制系统的故障问题	359
11.3 连续线性系统的诊断观测器问题	360
11.3.1 诊断中的观测器问题	360
11.3.2 诊断系统的观测器设计	361
11.3.3 观测器的收敛性及稳定性条件	363
11.4 离散系统诊断观测器的结构与设计	364
11.4.1 基于 Kalman 滤波器的残差计算	364
11.4.2 基于自适应滤波器的残差计算算法	365
11.5 基于神经网络的故障诊断问题	367
11.5.1 基于构造式神经网络的诊断观测器模型	368
11.5.2 基于系统模型的构造型补偿神经网络观测器	369
11.5.3 串联补偿结构的构造式神经网络状态观测器设计	371
11.6 传动系统的诊断实践	372
11.7 小结	375
第 12 章 牵引变流器系统故障分析与诊断	377
12.1 概述	377
12.2 故障诊断分析及故障特征提取	377
12.2.1 故障类型及机理分析	377
12.2.2 故障诊断要求和方法	378
12.2.3 变流器故障检测方法	379
12.2.4 牵引变流器故障特征提取	382

12.3	IGBT 器件的故障分析与诊断	384
12.4	牵引变流器系统的故障分析实践	388
12.4.1	典型变流系统介绍	389
12.4.2	牵引变流器系统的故障分析、诊断与处理	392
12.5	牵引变流器故障诊断与识别	399
12.5.1	基于神经网络的牵引变流器故障识别	399
12.5.2	基于支持向量机的牵引变流故障诊断实践	406
12.5.3	基于故障树的牵引变流器故障识别	409
12.6	机车牵引变流器故障诊断处理系统	410
12.6.1	传动控制单元硬件介绍	410
12.6.2	牵引变流器故障典型案例介绍	414
12.7	小结	422
第 13 章	电机的故障分析与诊断	423
13.1	概述	423
13.1.1	电动机机械故障	423
13.1.2	电动机电气故障	425
13.1.3	从引起的原因看电动机的故障	426
13.2	电动机的故障诊断技术概述	427
13.3	电动机继电保护和故障诊断原理	429
13.3.1	定子绕组匝间短路故障诊断原理	429
13.3.2	转子断条故障诊断原理	430
13.4	电动机故障诊断方法综述	431
13.4.1	定子绕组匝间短路故障诊断	431
13.4.2	转子断条研究故障诊断	434
13.5	基于 Petri 网的电动机的离线故障诊断实例	436
13.5.1	离线故障诊断问题	436
13.5.2	Petri 网	436
13.5.3	系统的输入信息	439
13.5.4	专家知识的概括	441
13.5.5	专家知识的表示	444
13.5.6	基于 Petri 网的离线故障诊断模型	445
13.5.7	离线故障诊断测试	447
13.6	基于 FNN 的电动机的在线故障诊断实例	448
13.6.1	模糊神经网络	448
13.6.2	故障特征信号的提取	451

13.6.3 试验系统及样本的选取	455
13.6.4 网络构建及仿真应用	457
13.7 小结	464
第 14 章 机车走行部件的故障诊断	465
14.1 概况	465
14.2 机械故障诊断技术	466
14.2.1 滚动轴承的振动监测技术	466
14.2.2 故障诊断的原理与仿真	474
14.3 机车走行部件故障诊断系统设计	481
14.3.1 系统方案设计	481
14.3.2 工作原理	486
14.3.3 车载软件结构	495
14.3.4 地面分析软件	498
14.4 地面机车轴承故障诊断系统	500
14.4.1 工作原理	501
14.4.2 硬件设计	502
14.4.3 软件设计	504
14.4.4 试验验证	507
14.5 机车走行部件故障诊断实例	508
14.5.1 某机务段 DF11G-0165 机车踏面故障分析	508
14.5.2 某机务段 SS4G-0446 机车振动报警数据分析	510
14.5.3 某机务段 SS9G-0210 机车轴承故障分析	511
14.6 小结	512
参考文献	513

第 1 章 系统的故障与可靠性问题

1.1 概 述

随着现代科学技术的发展，系统的投资越来越大，工程技术设备的结构越来越复杂，从而对社会和经济效益的要求也越来越高。因此系统的高可靠性也就成为迫切的需要。组成系统的任何部件（硬件、软件等）发生故障或失效，都可能带来灾难性的后果，从而造成巨大的经济损失和社会伤害。

因系统的低可靠性或者部件疲劳引起故障而导致的机毁人亡事故数不胜数，例如，运载火箭因部件失效而爆炸，汽轮发电机组因主轴断裂或轴承故障而导致的机毁人亡，以及铁路列车因燃轴、车辆损坏、轴承故障、轮对疲劳断裂等引起的颠覆事故，飞机因某些关键部件故障导致解体和坠毁、甚至因一段导线短路引燃燃油而使飞机空中爆炸解体等，令人触目惊心。

1995 年 6 月 3 日，德国汉诺威至汉堡的 ICE884 次高速列车（图 1.1），在埃舍德小镇附近因车轮故障（公布的事调查结论：可能是车轮轮箍疲劳破裂）所导致的列车颠覆事故，巨大的财产损失以及对全球高速铁路发展带来的不良影响且不说，仅人员伤亡就有几百人，现场惨不忍睹（图 1.2）。



图 1.1 德国 ICE 高速列车