

Fault-Diagnosis Technology
and its Applications in Railway Track Circuit



↓

故障诊断技术 及其在轨道电路中的应用

赵林海◎编著

↑



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

故障诊断技术及其在轨道 电路中的应用

赵林海 编著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以轨道电路这一列车运行控制系统中的关键设备为研究对象,分别介绍了基于模型、信号处理和知识等3类故障诊断方法的基本原理及其在轨道电路中的应用。其内容主要包括:离散二进小波分解、小波包分析、经验模式分解等信号采集和调理技术;观测器和卡尔曼滤波器、等价空间和参数估计等基于模型的故障诊断方法;主成分分析、自适应最优核时-频分布、连续小波变换等基于时域、频域和时-频域(时间-尺度域)信号处理的故障诊断方法;专家系统、神经网络、故障树、遗传算法和信息融合等基于知识的故障诊断方法,以及铁路综合检测车系统、机车信号记录器数据地面分析系统及机车信号远程监控系统等当前与轨道电路故障诊断密切相关的主要诊断系统。本书所列举的实例主要来自于作者在北京交通大学电子信息工程学院运输自动化研究所工作近20年来所承担的相关科研项目。

本书可作为轨道交通智能控制与故障诊断领域的研究生教材,也可供铁路信号控制领域相关科研与工程技术人员使用和参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

故障诊断技术及其在轨道电路中的应用/赵林海编著. —北京:北京交通大学出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-5121-1593-4

I. ①故… II. ①赵… III. ①高速列车-运行-控制系统-轨道电路-故障诊断 IV. ①U284.48

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第198643号

责任编辑:陈跃琴

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印刷者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×235 印张:16.75 字数:279千字

版 次:2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1593-4/U·149

印 数:1~2000册 定价:48.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

轨道电路作为列车运行控制系统的重要组成设备,其通过与车载机车信号设备相配合,在实现列车占用检查和地-车连续信息传输等方面发挥着重要作用。目前,随着列车运行速度的提高,对列车运行控制系统在保证行车安全、提高运输效率等方面提出了更高的要求。因此,提高列车运行控制系统中轨道电路的可靠性、维护性和可用性,保证其安全运用是十分迫切的工作。

故障诊断作为 19 世纪末期独立发展起来的一门技术,在提高系统性能与设备管理水平、避免重大事故的发生等方面具有十分重要的意义。因此,本书针对轨道电路故障诊断这一主题,系统介绍了故障诊断技术及其在轨道电路中的应用。

全书共分 5 章,第 1 章主要介绍了故障诊断的基本概念和轨道电路的基本工作原理,而第 2~4 章以轨道电路为例,分别介绍了相应的故障诊断方法。其中,第 2 章介绍了信号采集和调理技术以及基于时域、频域和时-频域(时间-尺度域)信号处理的故障诊断方法;第 3 章介绍了观测器、等价空间和参数估计等基于模型的故障诊断方法;第 4 章主要介绍了专家系统、神经网络、故障树、遗传算法和信息融合等基本知识的故障诊断方法;第 5 章则重点介绍了铁路综合检测车系统、机车信号记录器数据地面分析系统及机车信号远程监控系统等当前与轨道电路故障诊断密切相关的主要诊断系统。

本书内容是作者工作 20 多年来在这一领域科研成果的总结,其中的实例全部来自作者所承担的科研项目。此外,本书的相关研究和撰写工作还得到了北京交通大学的汪希时教授、唐涛教授、程荫杭教授、闻映红教授、蔡伯根教授、赵会兵教授、清华大学吴建平教授和张毅教授,以及中国铁道科学研究院的段武研究员和北京全路通信信号研究设计院的赵自信教授级高工的指导,同时还得到了“轨道交通控制与安全”国家重点实验室、北京铁路局电务处、上海铁路局电务处、

南宁铁路局电务处、广州电务段、天津电务段、南宁电务段、上海铁路通信工厂和北京铁路信号工厂的大力支持，特在此一并表示感谢！此外，还要感谢张才林、李茂蛟、任磊、毕延帅、陆桥、李溪林和吴蒙等同学对本书书稿的编辑和校验工作，以及任磊、毕延帅、刘伟宁、李占魁、冉义奎、许俊杰、张才林、李茂蛟、孙伟等同学分别对第2章、第3章和第4章实例所进行的仿真。最后，还要特别感谢北京交大思诺科技有限公司的邱宽民董事长，以及徐迅、赵胜凯、张民、王永和、赵明、张然、吕志卿和李俊鹏等对本书出版所给予的大力支持。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

赵林海

2013年5月于北京交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 故障与故障诊断	1
1.1.1 故障诊断的意义	1
1.1.2 故障与故障类型	2
1.1.3 故障诊断及其实现过程	8
1.2 故障诊断方法分类	10
1.3 故障诊断与 RAMS 的关系	15
1.3.1 性能指标	15
1.3.2 RAMS 的基本概念	16
1.3.3 维护方式分类	20
1.3.4 故障诊断与系统可靠性的关系	22
1.3.5 故障诊断与系统维修性和可用性的关系	22
1.3.6 故障诊断与系统安全性的关系	23
1.4 轨道电路及其故障诊断的意义	23
1.5 本书结构体系与特色	29
第 2 章 基于信号处理的故障诊断方法	31
2.1 引言	31
2.2 信号采集技术	32
2.2.1 信号及其分类	32
2.2.2 传感器及其分类	35
2.2.3 传感器的性能参数及要求	38
2.3 信号调理技术	39

2.3.1	模拟/数字转换	39
2.3.2	基于数字滤波器的信噪分离	40
2.3.3	基于离散二进小波的信号降噪	46
2.3.4	基于小波包分析的信噪分离	52
2.3.5	基于 EMD 的信号分解与趋势去除	56
2.4	基于信号时域分析的故障诊断	58
2.4.1	诊断流程	58
2.4.2	信号的幅值域分析	59
2.4.3	信号的相关域分析	61
2.4.4	信号的非线性分析	66
2.5	基于信号频域分析的故障诊断	72
2.5.1	诊断流程	72
2.5.2	信号的频域分析	73
2.5.3	轨道电路信号频谱及其特点	74
2.5.4	轨道电路信号异常的频谱表现	77
2.6	基于时-频域分析的故障诊断	78
2.6.1	诊断流程	78
2.6.2	短时傅里叶变换	82
2.6.3	连续复小波变换	83
2.6.4	Wigner-Ville 分布	88
2.7	实例 1: 基于时-频分析的补偿电容故障诊断方法	92
2.7.1	补偿电容故障对机车信号感应电压幅值包络的影响分析	92
2.7.2	机车信号感应电压幅值包络的等效回归模型	93
2.7.3	补偿电容断线故障诊断方法	95
2.7.4	实验验证	96
2.8	实例 2: 基于信号奇异性的轨道电路信号畸变分析	99
2.8.1	轨道电路信号的奇异性分析	99
2.8.2	基于 Coif5 小波的轨道电路信号奇异性分析	100
2.8.3	实验验证	102

2.9	实例 3: 基于虚拟仪器的轨道电路信号综合检测方法	104
2.9.1	概述	104
2.9.2	系统硬件构成	106
2.9.3	系统软件设计	107
2.9.4	实验验证	110
第 3 章	基于模型的故障诊断方法	112
3.1	引言	112
3.1.1	解析冗余与系统故障模型	112
3.1.2	基于模型的故障诊断原理	116
3.2	基于状态估计的故障诊断	123
3.2.1	基于观测器的故障诊断	124
3.2.2	基于 Kalman 滤波器的故障诊断	131
3.2.3	基于未知输入观测器的故障诊断	133
3.3	基于等价空间的故障诊断	136
3.4	基于参数估计的故障诊断	140
3.5	实例: 采用基于模型的故障诊断法对无绝缘轨道电路单个补偿 单元的故障诊断	144
3.5.1	补偿单元建模	144
3.5.2	基于观测器的补偿单元故障诊断的实现	147
3.5.3	基于等价空间的补偿单元故障诊断的实现	151
3.5.4	基于参数估计的补偿单元故障诊断的实现	153
第 4 章	基于知识的故障诊断方法	159
4.1	基于专家系统的故障诊断	159
4.1.1	概述	159
4.1.2	专家系统基本结构	160
4.1.3	专家系统基本工作原理	164
4.1.4	基于专家系统的故障诊断实现方法	168
4.2	基于神经网络的故障诊断	170
4.2.1	概述	170

4.2.2	神经网络的基本原理	170
4.2.3	基于神经网络的故障诊断实现方法	179
4.3	基于故障树的故障诊断	181
4.3.1	概述	181
4.3.2	故障树的建造	182
4.3.3	故障树的数学模型	184
4.3.4	故障树的定性分析	187
4.3.5	故障树的定量分析	189
4.3.6	基于故障树的轨道电路故障分析示例	191
4.4	基于遗传算法的故障诊断	193
4.4.1	概述	193
4.4.2	遗传算法基本原理	194
4.4.3	基于遗传算法的故障诊断基本原理	202
4.5	基于信息融合的故障诊断	203
4.5.1	概述	203
4.5.2	基于 D-S 证据推理的信息融合	205
4.5.3	基于信息融合的故障诊断基本原理	207
4.6	实例 1: 基于 BP 神经网络的调谐单元故障诊断	210
4.6.1	调谐单元故障下的机车信号感应电压幅值包络的仿真分析	210
4.6.2	基于 BP 神经网络的调谐单元故障诊断算法	212
4.6.3	实验验证	216
4.7	实例 2: 基于专家系统的轨道电路信号故障诊断方法	219
4.7.1	机车信号管理信息系统	219
4.7.2	系统结构	220
4.7.3	检测流程	222
4.7.4	实验验证	223
4.8	实例 3: 基于遗传算法的补偿电容综合故障诊断	224
4.8.1	补偿电容对机车信号感应电压幅值包络的影响	224
4.8.2	基于遗传算法的补偿电容故障诊断基本原理	225

4.8.3	算法验证	229
第 5 章	与轨道电路相关的故障诊断系统	232
5.1	铁路综合检测车系统	232
5.1.1	轨道电路检测子系统	232
5.1.2	补偿电容检测子系统	236
5.2	机车信号记录器数据地面分析系统	238
5.2.1	系统构成	239
5.2.2	记录信息	240
5.2.3	基本功能与轨道电路故障案例分析	241
5.3	机车信号远程监控系统	246
5.3.1	系统构成与工作原理	246
5.3.2	与轨道电路相关的状态信息监测	248
参考文献		250

第 1 章

绪 论

1.1 故障与故障诊断

1.1.1 故障诊断的意义

目前,随着生产的发展和科技的进步出现了许多大型系统,虽然这些系统对可靠性、安全性都有很高的要求,但由于各系统普遍具有规模大、功能多、集成度高和结构复杂等特点,使得系统故障的种类繁多,且任何一个故障都可能会产生一系列的连锁反应,导致整个系统不能正常运行,轻者造成停机、停产,重者会产生严重的甚至灾难性的人员伤亡和经济损失。近年来,主要灾难性事故有:

第二次世界大战期间,美国空军由于飞机故障而损失飞机达 21 000 架,是整个“二战”期间被击落飞机的 2.5 倍;

从 1998 年 8 月到 1999 年 5 月的短短 10 个月内,美国“大力神”、“雅典娜”和“德尔它”三种运载火箭共发生了 5 次发射失败事故,造成了近 30 亿美元的直接经济损失;

1986 年 4 月,前苏联乌克兰切尔诺贝利核电站放射性泄漏事故,造成 2 000 多人死亡,几万名居民撤离原居住区,损失达 30 亿美元;

1986年1月,美国“挑战者”号航天飞机由于其固体火箭发动机装配接头和密封件失效,造成航天飞机爆炸,导致7名宇航员全部遇难,总计损失达12亿美元;

1984年12月,印度博帕尔农药厂毒气泄漏事故,造成2000多人死亡,成为目前为止世界工业史上空前的特大事故;

2003年2月,美国“哥伦比亚”号航天飞机在着陆前发生意外,航天飞机解体坠毁,7名宇航员全部罹难;

2011年3月,由于地震和海啸,使得日本福岛核电站的核电厂断电、外部冷却系统完全失效,导致核反应堆快速升温爆炸,安全壳破裂,部分人工放射性核素外溢到大气,以及随着冷却水流入海洋,造成了巨大的污染和经济损失;

2011年7月,北京南站开往福州站的D301次动车组列车,由于地面控制设备故障在甬温线永嘉站至温州南站间,与前行的D3115次动车组列车发生追尾事故,造成40人死亡,约200人受伤。

从以上这些灾难性的事故可以看出,提高系统的可靠性、维护性和可用性,保证系统的安全运行是一项十分重要和迫切的工作。

故障诊断技术可以为提高系统可靠性、维护性和可用性提供帮助。尽管故障的发生难以避免,但通过开展有效的故障诊断工作,可利用各种监测手段判别系统运行状态是否正常。一方面,在故障发生之前,对可能发生的故障进行预报,以便于管理人员尽早采取措施,降低故障发生率和故障严酷度,避免重大事故的发生,减少事故危害性;另一方面,对于已发生的故障,则可经过分析与判断,确定故障相关信息,评估故障危害,并以此决定所采用的维修方式,降低维护成本。

可见,故障诊断在提高系统性能与设备管理水平、避免重大事故的发生等方面具有十分重要的意义,而开展故障诊断的研究还可获得潜在较大的经济效益和社会效益。

1.1.2 故障与故障类型

1. 故障及其特性

通常,故障是指在规定的条件下,系统至少有一个特性或参数出现较大偏差,

并超出可接受的范围,使系统性能明显低于正常水平,以致难以完成其预期的功能。这里,规定条件主要是指系统在其全寿命周期内所处的预先规定的全部外部条件,主要包括环境条件、使用条件和维修条件等。

需要强调的是,故障是系统的一种异常状态,与系统是否运行无关。总体来说,故障特性主要表现为层次性、传播性、相关性、随机性和可预测性。

1) 层次性

由于系统可按子系统、设备、部件和元件等划分为多个层次,如图 1-1 所示。因此,其相应的故障也可按此层次关系划分为系统级故障、子系统级故障、设备级故障、部件级故障和元件级故障等。一般情况下,高层次的故障可以由低层次故障引起,而低层次故障则必定引起高层次故障。

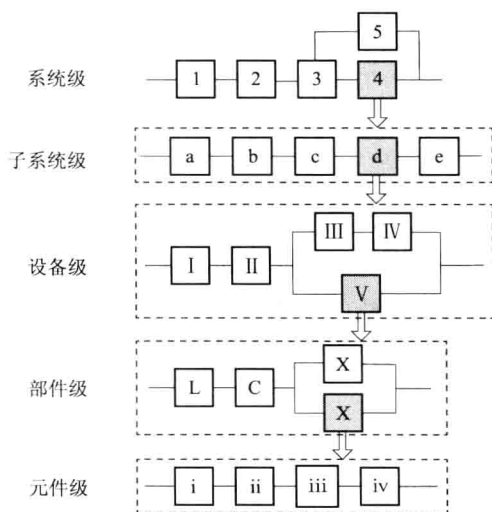


图 1-1 系统及其故障的层次划分

2) 传播性

故障有横向和纵向两种传播方式,所谓故障的横向传播就是指某故障所引起的同层次其他故障的发生。例如,某一元件故障引起元件层内部其他元件的失效;故障的纵向传播就是指某故障所引起的不同层次间的故障。例如,某元件故障相

继引起其上层部件、设备、子系统甚至系统级的故障。

3) 相关性

故障与征兆之间存在复杂的相关性,即一种故障可能对应多种征兆,例如,无绝缘轨道电路发送端调谐区的极阻抗调谐单元发生断线故障(见本书4.6节),不但影响到本区段轨道电路信号的传输,同时还可造成相邻的下一个区段轨道电路信号的越区传输,形成相应的邻区段干扰。此外,一种征兆可能对应多种故障,例如,对于轨道电路接收器所收到的信号幅度偏低的故障,其原因可能是道砟电阻过低,或是某个补偿电容断线。这种故障与征兆之间的复杂关系,给故障诊断的实现带来一定困难。

4) 随机性

突发故障通常具有随机性,例如,由于高速列车运行时对钢轨的振动和冲击而导致钢轨间补偿电容的突然断线,这一情况在发生前没有明显征兆,因此具有很大的不确定性。

5) 可预测性

对于非突发故障,一般在出现故障前都会有一定征兆。例如,钢轨间的补偿电容会受到温度、湿度等周围环境的影响而出现容值逐渐下降的故障,而该故障会逐步影响轨道电路信号在钢轨中的传输强度,因此只要及时捕捉这一征兆信息,就可以对这种故障进行有效的预测和防范。

2. 故障分类

由于系统及其应用领域的多样性,使得相应的故障模式各有不同,通常其故障分类如图1-2所示,主要有以下几种。

1) 按故障性质

(1) 自然故障

自然故障指系统因自身原因而造成的故障,分为正常自然故障和异常自然故障。其中,正常自然故障主要是指系统在正常情况下出现的故障,如机械磨损、

设备老化等。异常自然故障一般是由于设计、材料、生产工艺或装配不符合技术条件所造成的故障。显然，异常自然故障带有偶然性和随机性，而正常自然故障则一般具有规律性。



图 1-2 故障分类

(2) 人为故障

人为故障是指由于操作者违规操作或技术水平不达标、工作疏忽等人为因素所造成的故障。人为故障在实际中占有相当大的比例，为避免该类故障，除了制定相应的规章制度外，还要在系统设计中，参考人机工程学并利用容错技术，以尽可能消除操作者因误操作所造成的影响。

2) 按故障发生进程

(1) 突发性故障

突发性故障一般由多种内在不利因素及偶然性外部因素综合作用引起，其发

生时间很短，事先无明显征兆，往往导致整机功能失效，甚至危及人身安全。由于该类故障难以靠早期试验或测试来预测，因此对于此类故障常需要采用相应仪器进行连续监测。

（2）渐进性故障

渐进性故障通常是指系统零部件因疲劳、腐蚀或磨损等而造成其性能的逐渐降低，最终超出其允许值而引发的一类故障。这类故障通常发生在元件有效寿命的后期，由于其性能的降低存在一个时间过程，并具有一定的规律性。因此，该类故障可通过状态监测和故障预报来进行预防。

3）按发生故障时期

（1）磨合期故障

磨合期主要是指系统开始投入运行的早期，相当于人的幼年时期。该时期的故障主要由设计、原料和制造中的缺陷造成，其特点是初始工作时的故障率较高，随着故障的暴露、处理和完善，故障率迅速下降。在这一时期需要加强质量管理，并采用老化筛选和增加负荷试验等方法加速这一时期故障的暴露，同时还要提高操作人员的技术水平和责任心。

（2）使用期故障

使用期主要是指系统磨合期之后正常运行的稳定阶段，相当于人的青、中年时期。该时期的故障主要是由一些偶然因素引起的，其故障率相对较低且基本恒定。在这一时期要尽力做好系统的维护和保养工作，使这一阶段尽量延长。

（3）耗散期故障

耗散期主要是指系统使用期之后到报废之前的这个阶段，相当于人的老年时期。该时期故障主要由零部件磨损、疲劳和老化等造成系统功能退化，其系统故障率呈上升趋势，容易发生突发性的、危险性的和全局性（系统级）的故障，需要通过状态监测和故障诊断提高预防性维修水平，及时更换故障部件，以避免事故的发生。

4) 按故障关系

(1) 关联故障(间接故障)

关联故障主要是指本故障非自身原因产生,而是由系统其他部件故障所引起的。例如,由补偿电容故障造成轨道电路被分路后的短路电流幅度降低,当其低于机车信号接收灵敏度时,则会造成机车信号设备无法给出相应的信号显示。

(2) 非关联故障(直接故障)

非关联故障即故障是由自身的直接因素引起。

5) 按故障后果严重程度

(1) 破坏性故障

破坏性故障主要是指故障后果往往危及系统和人身安全的故障,是系统运行过程中应重点预防的故障。

(2) 非破坏性故障

非破坏性故障主要是指故障的后果影响轻微,不会危及系统和人身安全的故障。

6) 按故障持续时间

(1) 间歇性故障

间歇性故障是指在特定条件下产生的功能故障,而当条件不满足时,该故障自动消失。例如,电力机车升弓和降弓过程所产生的电磁干扰可对机车信号设备的地-车电磁感应过程产生影响,进而有可能会干扰机车信号设备正常的信号接收,而当升弓和降弓过程结束后,所产生的电磁干扰消失,对机车信号设备的影响也随之消失。再如,若某补偿电容与钢轨连接线发生接触不良,则随着列车经过时对钢轨的振动和冲击,可能会使得补偿电容和钢轨的连接状态出现时好时坏的情况。