



轨道交通车辆关键零部件系列丛书之六

轨道交通齿轮箱 状态监测与故障诊断技术

GUIDAO JIAOTONG CHILUNXIANG ZHUANGTAI
JIANCE YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU

主编 \ 周平



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

轨道交通车辆关键零部件系列丛书之六

轨道交通齿轮箱 状态监测与故障诊断技术

GUIDAO JIAOTONG CHILUNXIANG ZHUANGTAI
JIANCE YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU

主 编 \ 周 平



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

图书在版编目 (C I P) 数据

轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断技术 / 周平主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2012.10
(轨道交通车辆关键零部件系列丛书; 6)
ISBN 978-7-5643-2001-0

I. ①轨… II. ①周… III. ①轨道交通 - 齿轮箱 - 设备状态监测②轨道交通 - 齿轮箱 - 故障诊断 IV.
①U260.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 230162 号

轨道交通车辆关键零部件系列丛书之六
轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断技术

主编 周 平

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	赵雄亮
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	18
字 数	322 千字
版 次	2012 年 10 月第 1 版
印 次	2012 年 10 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2001-0
定 价	35.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

随着高速铁路的快速发展，轨道交通越来越贴近人们的生活，轨道交通安全也越来越受到人们的关注。作为轨道交通关键零部件的齿轮传动系统，其安全性直接影响到列车的行车安全。如何检测其运行状况及对常见故障进行诊断，已经成为轨道交通安全需要研究解决的关键技术之一。

《轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断技术》是作者为机械行业特别是轨道交通业的工程技术人员以及相应专业人士撰写的一本工程应用类参考书籍。书中凝聚了作者多年从事轨道交通行业，参与状态监测与故障诊断的工作经验及研究成果。

本书针对性强，结合工程实践，全面、系统地对轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断进行了阐述，对直接从事轨道交通业的技术人员，是难得一见的良书益友。本书具有针对性的同时，也从设备的更高角度，系统总结了许多一般性知识，由对齿轮箱状态监测与故障诊断的一般流程可以类推到许多装备的诊断流程，具有一定的普遍性，不失为从事设备状态监测与故障诊断的技术人员的有价值的参考资料。

通过本书，可以了解、学习并掌握轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断技术；另一方面，本书对状态监测及故障诊断技术做了普遍性介绍，对于该技术在轨道交通设备的逐渐普及与广泛应用起着一定的积极意义。希望本书的出版能够在深入研究、广泛交流、大力推广诊断技术在轨道交通设备应用以及促进诊断技术学科的建设和发展等方面起到积极作用，为经济建设及轨道行业的发展作出有益贡献。

王奉涛

2012年5月于大连理工大学

前 言

随着高速铁路的迅速发展，服役中的轨道装备数量激增。齿轮箱作为轨道装备驱动系统中的关键零部件之一，其故障或失效不仅会带来重大的经济损失，也会对轨道装备安全、平稳及正常运作带来巨大隐患，对社会及轨道行业造成不利影响。因此，对轨道交通齿轮箱的工作状态进行监测及故障诊断，以明确齿轮箱工作服役状况、判断其服役的安全性就显得十分重要。

设备工作状态监测及故障诊断技术是一门多学科交叉和融合的新型技术，现代微电子技术、检测技术、信息技术、计算机技术等为这一新技术提供了先进的、多样化的技术手段，使之不断地完善和充实。近二三十年来，国内外对设备的监测、诊断技术的研究开发及应用异常活跃，多种诊断方法已在工厂中实际应用，取得非常良好的效果。

基于轨道交通齿轮箱状态监测及故障诊断的工作经验，编者在参考了一批设备故障诊断方面的专著和译著后，结合轨道交通自身的特点，编制本书。其主要内容如下：

第 1 章绪论部分，介绍了轨道交通齿轮箱的应用特点，并对轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断的意义进行了阐述，最后总结了其发展趋势；第 2 章总结了状态监测和故障诊断的常用术语；第 3 章介绍了轨道交通齿轮箱典型故障与振动噪声产生机理；第 4 章介绍了轨道交通齿轮箱典型故障振动信号特征；第 5 章介绍了目前轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断仪器；第 6 章介绍了轨道交通齿轮箱故障诊断方法；第 7 章介绍了故障诊断专家系统原理；第 8 章针对齿轮箱状态监测的评价标准进行了阐述；第 9 章描述了轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断流程；第 10 章介绍了轨道交通齿轮箱状态监测及故障诊断的具体应用实例；附录 A 中列举了几种常用的在线监测分析系统；附录 B 中介绍了风电齿轮箱振动分析案例。

第1章、第4章、第7章、第9章由陈维金执笔，第2章、第5章、第8章、第10章、附录由金思勤执笔，第3章、第6章由赵永强执笔。全书由周平负责审核及统稿。

本书的编写得到了南车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司的大力支持，特别是王育权、王本涛、叶小芬、吴成攀和黎康康等为本书的编写与出版做了大量的工作，在此一并表示谢意。

由于编写人员较多，各人文风不一，加之本人的学术水平及工作经验有限，教材难免存在不妥之处，希望读者不吝指正。

编 者
2012年5月

目 录

1 绪 论	1
1.1 轨道交通齿轮箱的应用特点	1
1.2 齿轮箱状态监测与故障诊断的意义和任务	2
1.3 齿轮箱状态监测与故障诊断的现状与发展趋势	3
1.4 齿轮箱状态监测与故障诊断的常用方法	6
2 状态监测和故障诊断的常用术语	12
2.1 机械振动	12
2.1.1 按时间历程及信号特点振动的分类	12
2.1.2 按动力学特点振动的分类	17
2.2 涡动和进动	18
2.3 绝对轴振动和相对轴振动	19
2.4 振 幅	20
2.4.1 峰-峰值、单峰值、有效值	20
2.4.2 振动位移、振动速度、振动加速度	21
2.4.3 振动烈度	22
2.5 频 率	22
2.5.1 频率、周期	22
2.5.2 工频、倍频	23
2.5.3 故障特征频率	24
2.6 相 位	25
2.6.1 相位的定义	25

2.6.2	相位差、相对相位	26
2.6.3	相位的应用	27
2.7	刚度、阻尼	30
2.7.1	刚度	30
2.7.2	阻尼	30
2.8	临界转速和共振	31
2.8.1	临界转速	31
2.8.2	共振	33
3	轨道交通齿轮箱典型故障与振动噪声产生机理	34
3.1	齿轮箱故障的主要形式	34
3.2	齿轮振动机理分析	36
3.2.1	齿轮的简化振动模型	36
3.2.2	齿轮的啮合刚度	38
3.3	齿轮啮合调制机理分析	38
3.3.1	齿轮振动信号的啮合频率及其各次谐波	39
3.3.2	齿轮振动信号的啮合频率调制现象	40
3.4	齿轮箱噪声产生的机理	45
3.5	齿轮箱冲击振动的几种形式	46
3.6	齿轮箱轴承振动的产生与特点	47
3.6.1	滚动轴承基本参数与特征频率	47
3.6.2	正常轴承的振动信号特征	49
3.6.3	故障轴承的振动信号特征	50
3.6.4	滚动轴承振动信号的分析频带选择	52
4	轨道交通齿轮箱典型故障振动信号特征	54
4.1	齿轮常见失效形式	54
4.2	齿轮故障的特征信息	56
4.3	典型故障振动信号特征	58
4.3.1	齿形误差	58

4.3.2	齿轮均匀磨损	60
4.3.3	断 齿	61
4.3.4	齿轮不平衡	62
4.3.5	轴不对中	63
4.3.6	轴弯曲	64
4.3.7	轴横向裂纹	65
4.3.8	支承系统连接松动	67
4.3.9	箱体共振调制	69
4.3.10	轴承故障	69
5	轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断仪器	71
5.1	传感器	71
5.1.1	压电式加速度传感器	71
5.1.2	磁电式速度传感器	75
5.1.3	电涡流传感器	77
5.1.4	传感器的选用原则	78
5.2	简易振动监测仪器	79
5.2.1	SKF 简易式测振笔	80
5.2.2	盛迪振通测振表	81
5.3	简易噪声测试仪	82
5.3.1	传声器	82
5.3.2	声级计	82
5.4	在线监测分析系统	83
6	轨道交通齿轮箱故障诊断方法	85
6.1	轨道交通齿轮箱振动信号处理方法	85
6.1.1	振动信号的分类	86
6.1.2	振动信号时域处理方法	88
6.1.3	振动信号频谱分析方法	93
6.1.4	振动信号倒频谱分析	109

6.1.5	振动信号细化谱分析	110
6.1.6	振动信号解调分析	112
6.1.7	振动信号小波分析	113
6.1.8	振动信号启停机分析	114
6.2	轨道交通齿轮箱模态分析	116
6.3	轨道交通齿轮箱噪声分析	118
6.4	轨道交通齿轮箱滚动轴承故障诊断方法	118
6.4.1	低频信号接收法	120
6.4.2	包络分析法	120
6.4.3	冲击脉冲法	121
6.4.4	尖峰能量法	122
6.5	故障程度的评估	123
6.6	故障部位的诊断	125
6.7	故障趋势的预测	126
7	故障诊断专家系统原理	127
7.1	故障诊断专家系统概述	127
7.1.1	专家系统与人工智能	127
7.1.2	设备故障诊断专家系统特点	128
7.1.3	专家系统的几个概念	128
7.2	专家系统的基本结构及功能	130
7.2.1	专家系统的基本结构	130
7.2.2	专家系统各部分功能	131
7.2.3	设备故障诊断专家系统	133
7.3	设备故障的灰色诊断技术	134
7.3.1	基本概念	135
7.3.2	灰色关联度及其故障诊断技术	136
7.4	设备故障的模糊诊断技术	141
7.4.1	模糊集合的基本概念	142
7.4.2	基于模糊变换的故障诊断技术	145

7.4.3	基于模糊综合决策的故障诊断技术	147
7.4.4	灰色诊断与模糊诊断的比较	148
8	齿轮箱状态监测评价标准	150
8.1	建立标准的方法	150
8.2	齿轮箱振动评价标准	151
8.2.1	轴承座振动评价标准	152
8.2.2	转轴振动评价标准	165
8.3	齿轮箱噪声评价标准	171
8.3.1	声强法测量标准	173
8.3.2	声压法测量标准	176
8.3.3	声功率级评价标准	178
9	轨道交通齿轮箱状态监测与故障诊断流程	184
9.1	状态监测及故障诊断的流程及任务	184
9.2	齿轮箱基本参数获取	185
9.2.1	齿轮箱系统简图	186
9.2.2	整合齿轮箱故障及维修记录	186
9.2.3	现场技术人员的信息输入	186
9.3	齿轮箱特征频率分析	188
9.4	振动监测系统数据库设置	189
9.4.1	建立齿轮箱故障诊断程序树型结构	190
9.4.2	建立机器图	191
9.4.3	数据库设置	192
9.5	振动监测系统搭建	198
9.6	振动信号采集及故障分析	201
9.6.1	振动信号采集	201
9.6.2	故障分析	204

10	轨道交通齿轮箱状态监测及故障诊断应用实例	208
10.1	地铁齿轮箱振动分析案例	208
10.1.1	地铁齿轮箱振动试验	208
10.1.2	振动试验结果及分析	209
10.1.3	地铁齿轮箱振动特征	217
10.2	动车组齿轮箱振动分析案例	217
10.2.1	概 述	217
10.2.2	参数计算	218
10.2.3	试验结果	220
10.2.4	结果分析	226
10.3	地铁齿轮箱模态分析	226
10.3.1	概 述	226
10.3.2	齿轮箱基本结构	227
10.3.3	模态试验理论	228
10.3.4	箱体模态测试和分析	229
附录 A	在线监测分析系统	236
A1	SKF	236
A1.1	SKF IMX-P 测试系统	236
A1.2	SKF@plitude Observer 分析软件	238
A2	LMS	238
A2.1	LMS SCADAS 数据采集前端	239
A2.2	Test. Lab Desktop-Standard 分析软件	242
A3	NI	243
A4	B&K	246
A4.1	LAN-XI——新一代采集硬件	246
A4.2	PULSE Reflex 软件	249
A5	Commtest	251
A6	CRYSTAL instruments (CI)	254
A7	东 华	257

附录 B 风电齿轮箱振动分析案例	260
B1 齿轮箱故障类型及振动频率组成部分	260
B1.1 故障类型	260
B1.2 振动频率组成部分	261
B2 风电增速齿轮箱特征频率	261
B2.1 齿轮特征频率	261
B2.2 轴承缺陷特征频率	262
B3 风电增速齿轮箱振动测试及分析	263
B3.1 共振点扫描分析	263
B3.2 加速度信号分析	265
B3.3 速度信号分析	267
B3.4 拍频振动分析	269
B4 结果分析	270
参考文献	272

1 绪论

1.1 轨道交通齿轮箱的应用特点

近年来，在国家宏观政策的指引下，铁路行业进入快速发展时期。全国先后建设了武广高铁、郑西高铁、沪宁高铁、京沪高铁等多条高速铁路客运专线，同时轨道交通事业也迅猛发展，全国有 20 多个城市相继获批开工轨道交通建设。高速铁路和轨道交通的迅速发展，给铁路机车车辆装备制造制造业带来了新的契机。

目前轨道交通工具有地铁、轻轨、市郊铁路、有轨电车以及悬浮列车等多种类型，其中以地铁最为常见。高速铁路指的是运营时速 200 公里及以上的铁路线路，目前主要包括时速 200 公里及以上的客运专线及城际快速铁路等。

铁路机车车辆由于在轨道上运行，其走行特点和传统的交通车辆区别很大但高速铁路和轨道交通车辆存在一定的相似性。下面以轨道交通车辆中的地铁车辆为例，介绍铁路机车车辆的主要特点。地铁车辆是一种电传动动车组，即是以电力传动方式来实现能量转换及传递的机车。和其他公共交通相比，地铁具有以下特点：占地少，运能大，输送能力是公路交通运输能力的近 10 倍；每一单位运输量的能源消耗量少，因而节约能源；采用电力牵引，对环境的污染小。在轨道交通车辆的运行过程中，频繁的启动与制动，加上众多的弯道，运行条件十分恶劣，轮对和轨道间冲击振动，转向架一系、二系悬挂振动，齿轮箱与转向架间的冲击振动，电机振动等非平稳振动普遍存在。这种普遍存在的异常振动冲击可能造成比较大的危害：一方面，严重影响旅客乘坐舒适性；另一方面，容易导致车辆零部件松动或者过早疲劳损坏，对轨道交通车辆的安全运行构成潜在威胁。北京

交通大学夏禾等认为,在地铁系统中,地铁车辆(包括车辆跳动、车轮在钢轨上的滚动、车辆侧滑等对轨道的附加脉动冲击)、车轮(包括车轮不同心、轮对不平衡、车轮表面的缺陷、轴载荷过重等都会增加振动的扰动)和轨道系统(包括钢轨非均匀支承、钢轨接缝、不同道砟道床支承、枕木下局部间隙等轨道影响所增加的振动扰动)三者的动力相互作用产生振动,并通过结构(隧道基础和衬砌或桥梁的墩台及其基础)传递到周围的地层,进而通过土壤向四周传播,诱发了附近地下结构以及建筑物(包括其结构和室内家具)的二次振动。可以说,车辆振动是监测车辆运行状况的重要因素,通过监测振动能快速掌握车辆及各部件的工作状况,同时在对振动信号进行深入分析后还能排除故障提供依据,此外,在车辆设计阶段,振动分析结果也是一项重要参考资料。

1.2 齿轮箱状态监测与故障诊断的意义和任务

齿轮箱是轨道交通车辆的关键部件,其自身容易产生不平稳振动并通过转向架传递振动,属于故障多发件。一旦齿轮箱出现故障,将直接威胁到轨道交通车辆的安全运行,因此,对轨道交通齿轮箱的典型故障进行分析研究具有重大意义。

齿轮箱一般为多轴系系统,安装隐蔽、结构复杂、难于拆卸,工作环境一般比较恶劣,在工作过程中,由于存在多对齿轮和滚动轴承同时工作的情况,频率成分多且复杂,各种干扰较大,加之测试条件的限制,故障诊断难度相当大,所以,在状态监视和故障诊断过程中,若条件允许,应采用多种方法来进行综合诊断。

齿轮箱的状态监测及故障诊断是建立在多个学科基础上的交叉学科,它综合了机械、力学、电子、数学、物理、计算机等学科的精华,具有工程应用性强、技术基础可靠、与高新技术发展密切相关的特点。采用这一先进技术对齿轮箱进行状态监测与故障诊断,可实现齿轮箱由事后维修、定期维修到视情维修的根本转变,减少一些不必要的经济损失,从而创造更大的经济效益和社会效益,具有重大的意义。

状态监测与故障诊断的任务主要有:

(1) 提供齿轮箱状态的准确描述。在正常运行时,判断出主要零部件的劣化程度,为齿轮箱的检修提供针对性的依据。当齿轮箱发生故障时,反映故障的位置、造成故障的零部件及故障的程度,为是继续运行还是拆解检修提供决策依据。

(2) 反映被监测齿轮箱的运行状态并对异常状况发出警告。通过监测与诊断系统对齿轮箱进行监测,并通过与正常状态的特征值比较,判断是否发生异常,若发现或判定异常,则提出故障警告。

(3) 预测齿轮箱状态的发展趋势。通过对齿轮箱状态特征参数的时间历程的趋势分析,描绘出状态特征参数的时间历程曲线和趋势拟合方程曲线,对齿轮箱状态发展进行预测,以提供制订齿轮箱后期大修内容的依据,避免欠维修或过维修现象发生。

1.3 齿轮箱状态监测与故障诊断的现状与发展趋势

诊断技术发展几十年来,产生了巨大的经济效益,成为各国研究的热点。从诊断技术的各分支技术来看,目前美国处于领先地位。美国的一些公司,如 Bently、HP 等,他们的监测产品基本上代表了当今诊断技术的最高水平,不仅具有完善的监测功能,而且具有较强的诊断功能,在航天、军事、化工等方面具有广泛的应用。美国西屋公司的三套人工智能诊断软件(汽轮机 TurbinAID、发电机 GenAID、水化学 ChemAID)对其所产机组的安全运行发挥了巨大的作用。另外,还有美国通用电器公司研究的用于内燃电力机车故障排除的专家系统 DELTA,美国 NASA 研制的用于动力系统诊断的专家系统,Delio Products 公司研制的用于汽车发动机冷却系统噪声原因诊断的专家系统 ENGING COOLING ADCISOR 等。近年来,由于计算机特别是便携式计算机的迅速发展,基于便携式计算机的在线、离线监测与诊断系统日益普及,如美国生产的 M6000 系列产品应用非常广泛。

英国于 20 世纪 70 年代初成立了“机器保健与状态监测协会”，到了 20 世纪 80 年代初，它在发展和推广设备诊断技术方面做了大量的工作，起到了积极的促进作用。英国曼彻斯特大学创立的沃森工业维修公司和斯旺西大学的“摩擦磨损研究中心”在诊断技术研究方面都有很高的声誉。英国原子能研究机构在核发电方面，利用噪声分析对炉体进行监测以及对锅炉、压力容器、管道进行无损检测等，起到了英国故障数据中心的作用。目前英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面仍具有领先的地位。欧洲国家的诊断技术发展各具特色，如瑞典 SPM 公司的轴承监测技术，AGEMA2 的红外热像技术，挪威的船舶诊断技术，丹麦 B&K 公司的振动、噪声监测技术等，都各有千秋。

日本在钢铁、化工等民用工业中的诊断技术占有优势。东京大学、东京工业大学、京都大学、早稻田大学等高等学校着重基础性理论研究，而其机械技术研究所、船舶技术研究所等国立研究机构重点研究机械基础件的诊断，三菱重工等民办企业在旋转机械故障诊断方面开展了系统的工作，所研制的“机械保健系统”在汽轮发电机组故障监测和诊断方面已经起到了有效的作用。

我国诊断技术的发展始于 20 世纪 70 年代末，而真正的发展是从 1983 年的南京“首届设备诊断技术专题座谈会”开始。我国诊断技术虽起步较晚，但经过近几年的努力，加上有关部门多次组织外国诊断技术专家来华讲学，已基本跟上了国外诊断技术的步伐，在某些理论研究方面已和国外不相上下。目前，我国在一些特定设备的诊断研究方面很有特色，形成了一批自己的监测诊断产品。全国各行业都很重视在关键设备上装备故障诊断系统，特别是智能化的故障诊断专家系统，如在电力系统、石化系统、冶金系统以及高科技产业中的核动力电站、航空部门和载人航天工程等系统上安装。工作比较集中的是大型旋转机械故障诊断系统，已经开发了 20 种以上的机组故障诊断系统和十余种可用来做现场故障诊断的便携式现场数据采集器。透平发电机、压缩机的诊断技术已列入国家重点攻关项目并受到高度重视。西安交通大学的“大型旋转机械计算机状态监测与故障诊断系统”，哈尔滨工业大学的“机组振动微机监测和故障诊断系统”，东北大学设备诊断工程中心的“轧钢机状态监测诊断系统”、“风机工作状态监测诊断系统”均取得了可喜的成果。