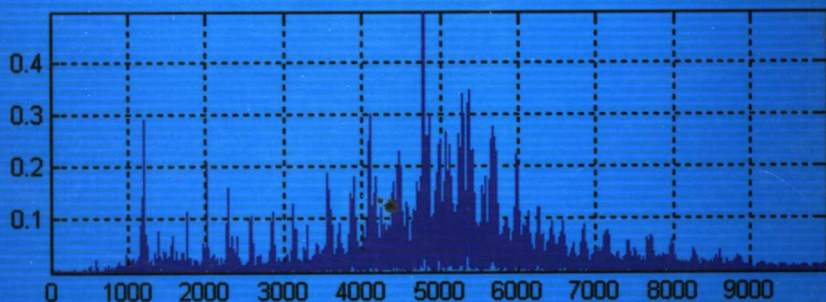
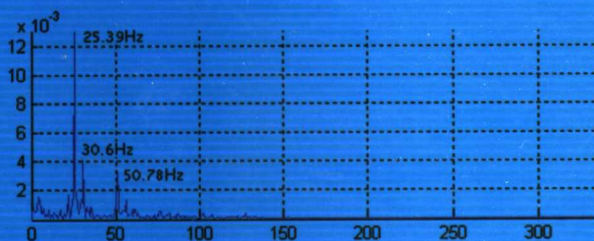


设备诊断现场实用技术丛书

# 齿轮及齿轮箱 故障诊断实用技术

丁康 李巍华 朱小勇 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



设备诊断现场实用技术丛书

# 齿轮及齿轮箱故障 诊断实用技术

丁 康 李巍华 朱小勇 编著

机械工业出版社

本书系统论述了齿轮箱中的三大零部件——齿轮、滚动轴承和轴的常见失效形式, 振动噪声产生的机理和故障的主要形式, 调制现象和边频带分布特点, 齿轮及齿轮箱振动信号的时域、频域和现代解调分析的各种处理方法, 提取了十种典型故障振动信号特征。从现场诊断技术需要的角度出发介绍了齿轮箱故障诊断常用的振动噪声故障诊断方法、扭振故障诊断方法和润滑油分析技术, 以及使用这些方法和技术进行齿轮箱故障诊断的常用仪器和系统, 判别标准建立方法和一些典型标准, 最后分类介绍了齿轮箱故障诊断的工业应用实例。

本书可作为从事齿轮箱和齿轮机械设备故障诊断的工程技术人员和科研人员的参考书, 也可供高等院校相关专业高年级本科生、研究生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术/丁康等编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.5

(设备诊断现场实用技术丛书)

ISBN 7-111-16347-8

I. 齿... II. 丁... III. ①齿轮—故障诊断②齿轮箱—故障诊断 IV. ①TH132.429②U260.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023727 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李万宇 责任编辑: 曾红 版式设计: 张世琴  
责任校对: 樊钟英 封面设计: 陈沛 责任印制: 陶湛

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·9.25 印张·356 千字

0001—4000 册

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

## 《设备诊断现场实用技术丛书》编委会

主编 黄昭毅  
编委 袁宏义 邢开明 杨其明  
叶晓明 莽克伦 吴柏青

# 序

随着现代化生产的高速发展，设备不仅是作为重要的物质基础，而且还在其中起着越来越重要的作用，诸如生产的提高、质量的改善、成本的降低、资源的节约、环境的保护以及效益的增长等，都无一不和它有着密切的关系。然而当这些现代化设备一旦发生了故障，所带来的严重后果也非过去可比，有的还会成为人类历史的悲剧。过去的—个世纪里，曾在世界范围内发生的重大设备事故，是很值得我们予以充分重视的。

在20世纪80年代初，世界上一些发达国家在总结经验教训的基础上，开发和创立了一种叫作“设备诊断技术”的高新技术，它能在设备运行中或基本不拆卸全部设备的情况下，掌握设备运行状态，判定产生故障的部位和原因，并预测预报未来的技术状态，从而可在早期有效地发现，以及在后期及时地抑制故障，保障生产的可持续发展。1983年1月，国家经委采纳了各方建议，及时地在国营工业交通企业设备管理试行条例中作了明确规定，强调采用这项技术，发展以状态监测为基础的预防维修体制。

二十多年来，在国家倡导、企业重视以及各级有关管理部门、大专院校、科研单位和群众团体的大力支持、共同努力下，设备诊断技术已经兴旺发达，得到了广泛共识，取得了众多效益，不仅在理论研究、科研试验、产品开发及工程应用上达到了较高水平，而且在保证设备安全、防止突发事件、保障设备精度、提高产品质量、节约维修费用以及防止环境污染上，也都体现出重要的地位与作用。

为了把这项先进技术成果充分肯定，努力推向未来并与世界接轨，国内的设备工程界人士，特别是在现场从事设备诊断的广大技术人员，长期以来盼望能有一套诊断丛书是由我们自己的现场人员，在消化吸收国外经验，并经过充分生产考核认定的基础上写作出来，它们应当有别于当前一些教科书、专著，具备为现场维修服务的明确观点，能够采用通俗易懂的语言和图表，总结介绍丰富的现场经验与工作案例，以求达到更好地适合企业技术人员学习和使用的目的。

在机械工业出版社的大力支持下，经过了充分酝酿和多方论证，进行了必要性与可行性研究，终于在1999年秋于北京筹组了一个七人的小型编委会，负责确定丛书的题目，提出编写内容及特点要求，落实各分册作者的任务。与此同时还多方面地收集了丛书的编写意见，从而为这一工作的良好进展提供了条件。

编委会成立后，首先明确了丛书的名称为“设备诊断现场实用技术丛书”，

按照诊断技术及对象设备的综合分类,初步定为十个分册,每册30万字左右,分期发行;其次明确了读者对象为在现场从事设备诊断技术应用的初、中级技术人员(包括技术员、技师和工程师),大中专院校有关专业的教师和学生以及有关管理人员;再次明确了编写人员的要求,主要邀请有十年以上现场经验、并具有一定理论基础、善于总结和有写作能力的工程师们参加,但也要吸收那些理论联系实际较好,并有一定现场体会的教授们,以及仪器公司和生产厂家中从事技术开发及咨询服务的工程师们。

为了统一编写,编委会还制定了“通用写作导则”以及“分类编写参考意见”,其中对写作特点强调了要以现场性、实用性和系列性为主,既不同于学报,也有别于教科书。现在丛书的编写进展顺利,作者们都把此书作为自己一生经验的总结,广泛收集资料,认真比较分析,以此作为对伟大的社会主义建设的积极贡献,读者们不难从书中内容有所理解。

此套丛书共分为十个分册,分别为《简易振动诊断现场实用技术》;《精密振动诊断现场实用技术》;《油液监测分析现场实用技术》;《红外诊断现场实用技术》;《无损检测诊断现场实用技术》;《电气设备诊断现场实用技术》;《往复机械诊断现场实用技术》;《大型回转机械诊断现场实用技术》;《滚动轴承诊断现场实用技术》;《齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术》。

此套丛书的创式有别过去,尚少经验可供借鉴,更限于作者的水平,不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

**《设备诊断现场实用技术丛书》编委会**

# 前 言

齿轮及齿轮箱作为机械设备中一种必不可少的连接和传递动力的通用零部件，在金属切削机床、航空、电力系统、农业机械、运输机械、冶金机械等现代工业设备中得到了广泛的应用。但由于其本身结构复杂，工作环境恶劣等原因，齿轮及齿轮箱容易受到损害和出现故障。本书内容包括开展齿轮箱故障诊断工作的简易和精密诊断方法，采用的设备，测试系统构成和测试中的注意事项，诊断判别标准的建立和一些典型标准，常用信号处理方法，振动、噪声和润滑油分析技术，大量现场诊断实例等内容，并介绍了一些齿轮箱故障诊断的现代信号分析技术，包括幅值和相位调制的解调方法、小波分析诊断实例等。

本书的主要目的是为从事现场故障诊断的技术人员提供一种开展齿轮箱故障诊断工作和进行故障分析判别的实用参考书，推动齿轮箱状态监测与故障诊断的开展与普及，实现齿轮箱由事后维修、定期维修到视情维修的根本转变，减少很多不必要的经济损失，创造更大的经济效益和社会效益。本书在编写过程中力求贯彻以齿轮箱故障现场实用诊断技术为重点，理论联系实际，引入很多工程分析实例。齿轮箱的运行状态监测及故障诊断技术是建立在多个学科基础之上的交叉学科，它综合了机械、力学、电子、数学、物理、计算机等学科的精华，因此本书同时介绍了一些现代齿轮箱故障诊断的信号处理和分析方法。

本书共分九章。第1章是概论，介绍了齿轮及齿轮箱故障诊断在设备故障诊断中的作用和意义，诊断技术的发展与现状。第2章介绍了齿面磨损，齿面胶合和擦伤，齿面接触疲劳，弯曲疲劳与断齿，轴不平衡、不对中和弯曲，滚动轴承的失效等齿轮箱中零部件的常见失效形式。第3章介绍了齿轮及齿轮箱振动噪声产生的机理，故障的主要形式，齿轮和轴承产生故障时的调制现象和边频带分布特点，齿轮箱冲击振动的几种基本形式等内容。第4章是齿轮及齿轮箱振动信号处理方法，介绍了时频统计特征及无量纲参数，同周期相加平均，频谱分析与离散频谱分析校正技术，倒频谱分析，细化谱分析，传递函数和解调分析等内容。其中离散频谱分析校正技术和现代解调分析是现代信号处理较新的内容，是提高齿轮箱故障诊断成功率的较好的分析方法。第5章介绍了齿形误差、齿轮均匀磨损、轴不对中、箱体共振、断齿、轴轻度弯曲、轴严重弯曲、轴向窜动、轴有较严重的不平衡、轴承疲劳剥落和点蚀共十种齿轮箱典型故障的振动信号特征。这些典型故障特征可为从事现场诊断的技术人员提供有价值的参考，使他们可以根

据从现场齿轮箱提取的振动故障信号的特征,提出行之有效的诊断方法。第6章介绍了齿轮箱振动与噪声的测试方法,常用的传感器及其二次仪表,以及齿轮箱振动与噪声标准的建立方法和一些典型标准。第7章介绍了齿轮箱故障诊断常用的振动与噪声故障诊断方法,扭振故障诊断方法,润滑油分析技术。第8章介绍了齿轮箱故障诊断的仪器和系统,包括简易振动诊断常用仪器、精密振动与噪声诊断常用仪器和润滑油分析常用仪器,为从事这方面工作的技术人员提供了一些仪器设备的性能和生产厂家。第9章是齿轮及齿轮箱故障诊断的工业实例,包括机床主轴箱、汽车变速器、大型水泥磨机齿轮箱、旋转机械中齿轮箱、工程机械中齿轮箱的故障诊断实例,以及齿轮箱的噪声诊断实例和齿轮箱的油液诊断实例。

本书由丁康编写第1章、第4章、第5章、第7章、第8章、第3章的3.3节和第6章的6.4节,李巍华编写第9章,朱小勇编写第2章、第3章的3.1节、3.2节、3.4~3.6节和第6章的6.1~6.3节。

最后要感谢所有在编写本书过程中给予我们帮助和支持的人们,在此特别感谢黄昭毅先生,黄先生为本书查阅和提供了很多齿轮箱故障判别的标准和现场诊断实例。同时还要感谢我的研究生孔正国、潘成灏、曹荡荡和何志达,他们在本书的编写过程中帮我查阅了大量的资料,并做了文字校正工作。本书引用了多本参考书和文章的部分相关内容,特别是齿轮箱故障诊断的工业实例部分引用了其他学者的文章内容,在此表示感谢。

本书中离散频谱分析校正技术和现代解调分析的研究工作分别获得了国家自然科学基金(编号:50075049和编号:50475095)的资助,特此深表感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

丁 康



# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 齿轮及齿轮箱故障诊断在设备故障诊断中的作用和意义 .....	1
1.2 齿轮及齿轮箱诊断技术的发展与现状 .....	2
<b>第 2 章 齿轮箱中零部件的常见失效形式</b> .....	5
2.1 齿面磨损 .....	5
2.2 齿面胶合和擦伤 .....	6
2.3 齿面接触疲劳 .....	6
2.4 弯曲疲劳与断齿 .....	8
2.5 轴不平衡、不对中和弯曲 .....	8
2.6 滚动轴承的失效 .....	9
2.7 小结 .....	9
<b>第 3 章 齿轮及齿轮箱振动噪声产生的机理</b> .....	10
3.1 齿轮振动机理分析 .....	10
3.1.1 齿轮的简化振动模型 .....	10
3.1.2 齿轮的啮合刚度 .....	11
3.2 齿轮箱故障的主要形式 .....	12
3.3 齿轮产生故障时的调制现象和边频带分布特点 .....	13
3.3.1 齿轮振动信号的啮合频率及其各次谐波 .....	14
3.3.2 齿轮振动信号的啮合频率调制现象 .....	14
3.3.3 齿轮振动信号的齿轮固有频率调制现象 .....	19
3.3.4 箱体固有频率调制现象 .....	20
3.3.5 激振能量对不同调制振动的影响 .....	22
3.3.6 齿轮振动信号中的其他成分 .....	22
3.4 齿轮箱中滚动轴承冲击振动的产生与特点 .....	24
3.5 齿轮箱冲击振动的几种基本形式 .....	25
3.6 齿轮箱噪声产生的机理 .....	26
<b>第 4 章 齿轮及齿轮箱振动信号处理方法</b> .....	28
4.1 时域统计特征及无量纲参数 .....	28

4.2	同周期相加平均 .....	30
4.3	频谱分析与离散频谱分析校正技术 .....	31
4.3.1	傅里叶变换 .....	31
4.3.2	频谱分析 .....	33
4.3.3	提高频谱分析精度的措施——多段平均、加窗 和离散频谱校正技术 .....	35
4.3.4	频谱分析小结 .....	50
4.4	倒频谱分析 .....	51
4.5	细化谱分析 .....	52
4.5.1	传统的复调制细化选带频谱分析方法 .....	53
4.5.2	基于复解析带通滤波器的复调制细化选带频谱分析方法 .....	56
4.6	传递函数 .....	60
4.6.1	互谱 .....	60
4.6.2	传递函数 .....	61
4.7	解调分析 .....	63
4.7.1	齿轮箱发生故障时的振动信号模型 .....	64
4.7.2	希尔伯特变换解调分析的原理和局限性 .....	65
4.7.3	广义检波滤波解调分析的原理和局限性 .....	67
4.7.4	循环平稳解调分析的原理和局限性 .....	73
<b>第 5 章</b>	<b>齿轮箱典型故障的振动信号特征 .....</b>	<b>91</b>
5.1	齿形误差 .....	91
5.2	齿轮均匀磨损 .....	94
5.3	轴不对中 .....	96
5.4	箱体共振 .....	97
5.4.1	壳体共振 .....	97
5.4.2	箱体共振调制 .....	98
5.5	断齿 .....	98
5.6	轴轻度弯曲 .....	101
5.7	轴严重弯曲 .....	102
5.8	轴向窜动 .....	104
5.9	轴有较严重的不平衡 .....	105
5.10	轴承疲劳剥落和点蚀 .....	107
5.11	小结 .....	108
<b>第 6 章</b>	<b>齿轮箱振动与噪声测试方法与监测标准 .....</b>	<b>110</b>
6.1	箱体振动的测试 .....	110

6.1.1	磁电式振动速度传感器及其二次仪表 .....	111
6.1.2	压电式振动加速度传感器及其二次仪表 .....	114
6.1.3	磁电式或光电式转速传感器及其二次仪表 .....	120
6.1.4	滤波器 .....	121
6.1.5	A/D转换器 .....	123
6.1.6	记录装置 .....	123
6.1.7	分析仪器 .....	123
6.2	轴扭转振动的测试 .....	124
6.3	噪声的测试 .....	126
6.3.1	噪声测量常用仪器 .....	126
6.3.2	声压级的测量 .....	128
6.3.3	声功率级的测量 .....	128
6.3.4	声强的测量 .....	129
6.4	齿轮箱振动与噪声标准的建立方法和一些典型标准 .....	132
6.4.1	建立标准的方法 .....	132
6.4.2	现有的一些测量参考标准和方法 .....	133
<b>第7章 齿轮箱故障诊断方法 .....</b>		<b>146</b>
7.1	振动与噪声故障诊断方法 .....	147
7.1.1	齿轮箱故障的振动与噪声诊断策略 .....	147
7.1.2	振动与噪声故障诊断方法 .....	149
7.1.3	齿轮箱故障简易诊断方法 .....	150
7.1.4	齿轮箱故障精密诊断方法：人工精密诊断和自动诊断方法 .....	153
7.2	基于扭振信号的故障诊断方法 .....	164
7.2.1	齿轮扭振信号测试 .....	164
7.2.2	扭振信号与箱体诊断信号的比较 .....	165
7.2.3	扭振信号处理及故障诊断 .....	165
7.3	设备故障诊断中的润滑油分析技术 .....	166
7.3.1	润滑油的理化性能检测方法 .....	167
7.3.2	光谱分析法 .....	169
7.3.3	铁谱分析法 .....	174
7.3.4	利用油液分析技术进行设备故障诊断实例 .....	183
<b>第8章 齿轮箱故障诊断的仪器 .....</b>		<b>187</b>
8.1	简易振动诊断常用仪器 .....	187
8.2	精密振动与噪声诊断常用仪器 .....	196
8.2.1	传感器和二次仪表 .....	196

8.2.2	数据采集器	205
8.2.3	磁带记录仪	207
8.2.4	频谱分析仪	209
8.2.5	声级计	213
8.3	润滑油分析常用仪器	214
<b>第9章</b>	<b>齿轮及齿轮箱故障诊断的工业实例</b>	<b>217</b>
9.1	机床主轴箱齿轮故障诊断实例	217
9.1.1	机床传动系统轴故障的诊断	217
9.1.2	立式车床传动箱轴弯曲故障的诊断	218
9.1.3	车床传动箱齿轮故障的诊断	222
9.1.4	立车传动箱齿轮磨损和轴弯曲故障的诊断	222
9.1.5	内圆磨床电动机转子故障的诊断	224
9.2	汽车变速器故障诊断实例	229
9.2.1	某EQ140变速器出现齿轮均匀磨损故障的诊断	229
9.2.2	东风4型机车起动变速器故障诊断	232
9.3	大型水泥磨机齿轮箱故障诊断实例	236
9.3.1	某厂水泥磨机的故障诊断	236
9.3.2	水泥球磨机传动系统的故障诊断	239
9.3.3	水泥磨机减速器齿轮故障的诊断分析	241
9.4	旋转机械中齿轮箱故障诊断实例	243
9.4.1	风机机组增速器齿轮故障的诊断分析	243
9.4.2	煤气鼓风机增速器齿轮故障诊断分析	246
9.4.3	空压机组增速器故障的诊断分析	250
9.5	工程机械中齿轮箱故障诊断实例	253
9.5.1	精轧机齿轮故障的诊断	254
9.5.2	齿轮箱螺栓拉断故障的诊断	257
9.6	齿轮箱的噪声诊断实例	260
9.6.1	齿轮故障诊断实例	260
9.6.2	基于声测法的齿轮箱齿轮故障诊断	263
9.6.3	汽车变速器齿轮制造缺陷的声频特征提取	265
9.7	齿轮箱的油液诊断实例	267
9.7.1	卸船机减速齿轮箱故障的诊断	267
9.7.2	应用油液分析技术诊断掘进机减速器故障	275
9.7.3	应用铁谱分析技术诊断大型提升机减速器	278
<b>参考文献</b>		<b>280</b>

# 第 1 章 概 论

## 1.1 齿轮及齿轮箱故障诊断在设备故障诊断中的作用和意义

齿轮及齿轮箱作为机械设备中一种必不可少的连接和传递动力的通用零部件，在金属切削机床、航空、电力系统、农业机械、运输机械、冶金机械等现代工业设备中得到了广泛的应用。在今天科学技术飞速发展的时代，机械装备向着大型化、高效率、高强度、自动化和高性能的方向发展，作为传递运动和动力的齿轮装置几乎在任何大型设备中都具有重要的作用。

但由于其本身结构复杂，工作环境恶劣等原因，齿轮及齿轮箱容易受到损害和出现故障。齿轮失效又是诱发机器故障的重要因素。据统计，传动机械中 80% 的故障是由齿轮引起的，旋转机械中齿轮故障占其故障的 10% 左右<sup>[1]</sup>。齿轮故障将直接影响设备的安全可靠运行，降低加工精度和生产效率。随着设备的不断大型化、复杂化、自动化和连续化，齿轮箱的故障和失效给整个生产和社会造成的损失将越来越大，行驶中汽车的齿轮箱故障将直接造成人身伤亡；而一些处于连续工作状态的设备，如电力行业的发电机组、钢铁行业的轧辊机组，由于齿轮箱的意外故障造成的停机停产的损失难以估计。我国的水泥行业，水泥磨齿轮箱故障使水泥产量每年减少 200 万吨以上<sup>[2]</sup>。我国某科学测量船在一次航行中发生主减速器传动齿轮局部折断，只得被迫减速航行，以致整个船队的行动受到影响。十年前，一家很有声望的美国齿轮公司所生产的提升机，在进行建筑物外表清洁作业时齿轮箱轮齿发生断裂，造成清洁工人从高空坠落，这一事故的发生使这家公司的产品质量信誉受到了很大的影响。1986 年 10 月，一架英国斯威士兰公司的直升机在英国北海油田上空执行任务时，传输动力的弧齿锥齿轮突然断裂，造成飞机失事。

齿轮和齿轮箱的运行状态监测及故障诊断技术是建立在多个学科基础之上的交叉学科，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、与高技术发展密切相关的特点。采用这一先进技术对齿轮及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。

齿轮及齿轮箱的故障诊断技术近年来得到了飞速的发展, 到目前为止, 希尔伯特变换和广义检波滤波解调分析方法已成为齿轮箱故障诊断的主要分析手段之一, 循环平稳解调分析、小波分析和希尔伯特-黄变换等现代时频分析方法也开始应用到齿轮箱故障诊断中。

## 1.2 齿轮及齿轮箱诊断技术的发展与现状

早在一个世纪前, 人们就已经开始对齿轮箱的振动和噪声进行研究。但直到 20 世纪 60 年代中期, 齿轮的振动和噪声问题才成为评价一个齿轮装置好坏的重要因素, 引起了世界范围内的广泛关注。英国学者 H. Optiz 在 1968 年就齿轮振动与噪声的机理, 发表了一些著名的研究曲线, 阐述了齿轮箱的振动和噪声是传动功率和齿轮传动误差及齿轮精度的函数<sup>[3]</sup>。另外, 美国的 Buckingham 和德国的 Niemann 也对齿轮箱的振动和噪声提出了自己的见解和看法。

20 世纪 70 年代初开始出现了一些简单的齿轮箱故障诊断, 仅仅限于直接分析测量一些简单的振动参数, 如振动峰值  $P_k$ 、均方根值  $RMS$  等, 通过观察这些参数的变化来掌握齿轮的运行状态。为了排除机器载荷变化的影响, 还可采用一些无量纲参数, 如峰值系数  $CF$  等。用一些简易的方法诊断齿轮和齿轮箱的故障, 虽然取得了一定的成功, 但对齿轮箱故障的诊断灵敏度不高, 诊断准确率很低。从 20 世纪 70 年代末到 20 世纪 80 年代中期, 齿轮箱故障诊断的频域法发展很快, 其中 B. Randall 和 James I. Taylor 等人做了很多有益的研究, 积累了一些故障诊断成功的实例, 对齿轮磨损和齿断裂等故障诊断较为成功<sup>[4,5]</sup>。

如果把齿轮诊断和滚动轴承诊断作一对比可知, 齿轮故障诊断的困难在于信号在传递中经过的环节较多(齿轮—轴—轴承—轴承座—测点), 高频信号(20kHz 以上)在传递中大多丧失。由于这一原因, 齿轮故障诊断通常还需借助于较为细致的信号分析技术, 以达到提高信噪比和有效地提取故障特征的目的。目前的齿轮箱故障诊断研究主要集中在齿轮箱状态监测仪器和分析系统的开发、信号处理和分析、故障机理研究和典型故障特征的提取、诊断方法研究和人工智能的应用等几个方面。

人们在监测分析系统的开发方面已进行了大量的研究, 并研制了许多相应的仪器和设备, 如美国、日本和丹麦的一些仪器生产厂家生产的磁带记录仪、数据采集仪和信号分析仪等。近年来, 由于微机, 特别是便携机的迅速发展, 基于便携机的在线、离线监测与诊断系统日益普及, 如美国生产的 M6000 系列产品。特别值得一提的是, 我国已开发出一些基于微机的在线、离线监测分析和故障诊断系统等。

用于齿轮箱状态监视和故障诊断的信号处理和分析方法也取得了相当大的发

展,传统的分析方法,如时域波形分析、转速同步分析、功率谱分析、细化谱分析、相关分析、相干分析、倒频谱分析、解调分析、瀑布图、伯德图中的很多方法的精度和速度在近些年得到了很大的提高和发展。采用离散频谱校正技术提高频谱分析的精度;采用基于复解析带通滤波器的复调制细化选带频谱分析方法提高细化谱的分析精度和速度;采用基于复解析带通滤波器的优化希尔伯特变换解调方法以克服解调分析的三种局限性。一些较新的信号处理方法,如 Wigner-Ville 分布技术、小波分析、循环平稳理论解调分析和希尔伯特-黄变换解调等时频分析方法已开始得到应用,并取得一定的效果,出现了一些新的分析方法。近年来,在进行了充分的理论分析和大量实践经验的基础上,国内一些专家提出了基于建立档案的时频域得分法来进行诊断的故障诊断方法<sup>[6]</sup>。所谓时频域得分法,是综合考虑各种故障和由此产生的特征频率(症状)之间的对应关系。基于建立档案的时频域得分法由建立档案和得分法诊断两部分组成。齿轮箱因其振动的频率成分很多,故一定要在建档的基础上来判断是否存在故障,并依此进行故障诊断。诊断是采用对加速度和速度进行两时域(时域信号和包络时域信号)特征值和三频域(频谱分析、细化分析、窄带细化包络谱分析)分析,最后根据由特征值对应的得分计算总得分的方法来诊断故障。这样,综合考虑了时域和包络时域的能量、冲击指标以及频域特征参数的影响,从而提高了诊断的成功率。如果总分达到一定值,则认为此项故障已经发生。利用该方法实际进行齿轮故障诊断,已解决了工程中很多齿轮、轴和滚动轴承的故障诊断问题,因此可以认为该方法是当前齿轮故障诊断中的一种比较有效和实用的方法。

在齿轮箱典型故障机理研究和特征提取方面,由于齿轮箱的结构复杂,工作环境一般比较恶劣,各种干扰较大,涉及问题较多,国内外学者虽然取得了一定的成绩<sup>[7]</sup>,但对于齿轮和轴的故障机理研究仍然不够深入,需要进一步的完善和研究。

当前齿轮箱的故障诊断方法很多,如振动诊断、噪声分析、扭振分析、油液分析、声发射、温度及能耗监测等。齿轮箱中的轴、齿轮和轴承在工作时会产生振动,若发生故障,其振动噪声信号的能量分布就会发生变化,振动噪声信号是齿轮箱故障特征的载体。对其振动噪声状况分析,可实现不停机操作状态下的故障诊断,大大减少了由于停机所造成的巨大经济损失,而且基于振动噪声分析的故障诊断系统性能可靠,价格便宜,操作简单方便,所以,振动噪声诊断是一种行之有效的故障诊断方法,在我国及世界范围内得到了广泛的应用。振动噪声诊断方法又可分为简易、精密和自动诊断三种方法。由于齿轮箱振动频率复杂,需要定位诊断故障,所以工程实际中大多数情况下都需要进行精密诊断,其精密诊断方法在近年来也有很快的发展。目前我国齿轮箱故障诊断仍然是以手工分析为主,现有的仪器和分析系统仅仅为我们提供了必要的手段,但对人的依赖程度较大。国内外通用的能综合诊断齿轮箱故障、实用简便的自动诊断或智能诊断系统很少,研制一套

通用的齿轮箱故障自动诊断或智能诊断系统可以填补该领域空白。

齿轮箱的故障,如齿轮点蚀、断齿、轴轻度弯曲以及滚动轴承的疲劳剥落等,会产生周期性的脉冲冲击力,从而产生振动信号的调制现象,在频谱上表现为在啮合频率或固有频率两侧出现间隔均匀的调制边频带。因此,在齿轮箱的故障诊断中,对调制信号进行解调是一项重要的工作。常用的方法有:希尔伯特变换、广义检波滤波、共振解调方法。广义检波滤波有高通绝对值分析、检波滤波和平方滤波三种方法。高通绝对值分析是对时域信号的绝对值的中线包络作 FFT 谱分析,不是真实包络的真实幅值;检波滤波则是对时域信号的正半周包络作 FFT 谱分析,也不是真实包络的真实幅值;平方滤波是对时域信号的平方包络作 FFT 谱分析,同样不是包络的真实幅值,所得到的信号包络幅值与信号真实包络频率成分幅值都差一个常数关系,而且这三种方法由于取绝对值、检波过程或平方过程都会使载波频率有可能出现高次谐波而产生混频效应<sup>[8]</sup>,在解调谱上会出现无法分析的频率成分。希尔伯特变换解调分析是对调制信号绝对值作 FFT 谱分析,其幅值代表真实包络的幅值,且不出现混频效应。鉴于上述原因,目前工程技术界多采用希尔伯特变换进行解调分析,一些算法由于只对选抽点作带通滤波和希尔伯特变换而无法在细化分析的选抽时进行数字低通滤波,从而细化倍数很大时会出现调制频率的高次谐波成分发生频率混叠而反折到低频部分的现象。针对这种局限性,目前已经有了解决的新算法——基于复解析带通滤波的优化希尔伯特变换解调分析新方法<sup>[9]</sup>。针对齿轮箱振动信号中出现的一类特殊的信号(信号的统计特征是周期变化的)——循环平稳信号,采用循环平稳分析解调。该方法目前正处于研究过程,利用这种方法可对齿轮箱振动信号中的幅值调制和频率调制(相位调制)信号进行解调<sup>[10,11]</sup>。

由于齿轮箱的结构复杂,工作条件多样,诊断中涉及的问题较多,现有的故障诊断系统都不同程度的存在着一些问题,主要有以下几个方面:

1) 对齿轮箱故障和振动产生机理研究不够透彻,大多是定性的结论。要建立完整的数学力学模型,进行定量分析存在着相当大的困难。

2) 目前一般将齿轮箱作为一个线性系统进行研究,但实际研究和工程实践证明,齿轮箱的振动涉及很多非线性因素。

3) 现行的诊断方法多是以箱体振动信号进行研究,没有充分利用其他分析方法,所以其诊断成功率较低。

4) 齿轮箱故障诊断的专家知识库很缺乏,知识库可靠性和推广性差,很多诊断实例无法表达成通用的知识规则。

从以上分析可知,研究有效的诊断方法,多种方法的融合诊断,分析故障机理,建立数学力学模型,研究非线性振动问题,构造专家知识库,进行人工智能、模式识别和神经网络方面的探索,是当前齿轮箱故障诊断的发展方向。



## 第2章 齿轮箱中零部件的常见失效形式

齿轮箱中一般都包含有齿轮、滚动轴承和轴，而且在这三类主要零部件失效时产生的故障通常会互相影响，所以分析齿轮、滚动轴承和轴的主要失效形式对齿轮箱故障诊断具有重要意义。

通常齿轮投入使用后，由于齿轮制造不良或操作维护不善，会产生各种形式的失效，致使齿轮失去正常功能而失效。失效形式又随齿轮材料、热处理、安装和运转状态等因素的不同而不同，常见的齿轮失效形式有：齿面磨损、齿面胶合和擦伤、齿面接触疲劳、弯曲疲劳与断齿。

在齿轮箱中，轴和轴系常见的失效形式有：轴有较严重的不平衡、轻度弯曲和严重弯曲，轴系通过联轴器连接时存在不对中现象。

在齿轮箱中，滚动轴承的失效形式有：内环、外环和滚动体的点蚀和疲劳剥落，保持架损坏。

在齿轮箱中，轴的失效和滚动轴承的失效形式多数情况下也会引起齿轮的啮合状态变化，表现为齿轮的失效。

### 2.1 齿面磨损

齿轮在啮合过程中，往往在轮齿接触表面上出现材料摩擦损伤的现象。凡磨损量不影响齿轮在预期寿命内应具备的功能的磨损，称为正常磨损。齿轮正常磨损的特征是齿面光亮平滑，没有宏观擦伤，各项公差在允许范围内。如果由于齿轮用材不当，或在接触面间存在硬质颗粒，以及润滑油供应不足或不清洁，往往引起齿轮的早期磨损，有微小的颗粒分离出来，使接触表面发生尺寸变化，重量损失，并使齿形改变，齿厚变薄，噪声增大<sup>[2]</sup>。严重磨损的结果将导致齿轮失效。磨损失效形式可分为：磨粒磨损、腐蚀磨损和齿轮端面冲击磨损。

#### 1. 齿轮磨粒磨损

在齿轮啮合过程中，若润滑油供应不足或工作齿面上有外来的微小颗粒，则齿面将发生剧烈的磨粒磨损。齿轮齿面受到磨粒磨损，沿滑道方向，有细而均匀的条痕，齿面发暗。磨粒磨损进一步发展的结果，会使齿形改变，齿厚变薄，甚至出现“刀片”状齿尖，啮合间隙增大，传动时噪声增大，有时还由于齿厚过度减薄导致断齿。

#### 2. 腐蚀磨损