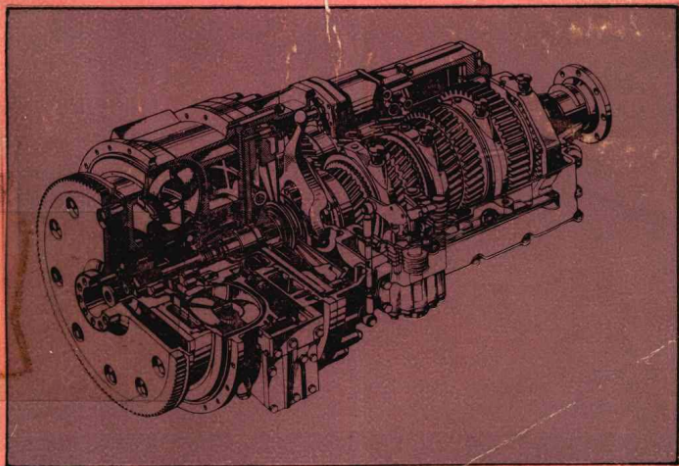




机械故障诊断丛书

# 齿轮故障诊断 润滑油在线监测

刘仲川 张志伟 陈宝佳



16

西安交通大学出版社

封面设计：方 黎

## 机械故障诊断丛书书目

- |                    |      |         |
|--------------------|------|---------|
| 机械故障诊断基础知识         | 雷继尧  | 何世德     |
| 故障树原理和应用           | 朱继洲  |         |
| 应力腐蚀与环境氢脆          |      |         |
| ——故障分析及测试方法        | 薛 锦  |         |
| 机械故障诊断FORTRAN源程序汇编 | 沈玉娣等 |         |
| 计算机辅助监测与诊断技术       | 屈梁生等 |         |
| 国外机械振动冲击标准摘编       | 赵卓贤  | 范裕健 蒋庄德 |
| 轴承故障诊断             | 雷继尧  |         |
| 液压系统故障诊断           | 葛思华  |         |
| 机械制造过程的工况监视与故障诊断   | 黄 仁  | 钟秉林     |
| 机械故障诊断案例选编         | 黄昭毅  | 何正嘉     |
| 机械故障诊断的时序方法        | 杨叔子  | 吴 雅     |
| 人工智能与诊断专家系统        | 杨叔子  | 郑晓军     |
| 转子监测和诊断系统          | 刘 雄  | 赵振毅 屈梁生 |
| 振动传感器              | 孙玉声  |         |
| 模糊诊断原理及应用          | 张涵埤  | 何正嘉     |
| 齿轮故障诊断润滑油在线监测      | 刘仲川  | 张志伟 陈宝佳 |

ISBN7-5605-0475-2/TH·25

定 价： 3.45 元

机械故障诊断丛书之十六

# 齿轮故障诊断与润滑油在线监测

西安交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书由齿轮故障诊断和润滑油在线监测两部分内容构成。它系统地介绍了齿轮运行状态监测、故障诊断技术的发展和在生产实际中的应用,以及润滑油在线监测的理论与实践。本书可作为工厂企业从事机械设计、制造、设备管理和维修的工程技术人员参考用书,亦可作为高等院校机械专业和设备管理专业的教学参考书。

(陕)新登字 007 号

### 齿轮故障诊断与润滑油在线监测

刘仲华 张恩伟 陈建群

责任编辑 孙文所 高国军

西安交通大学出版社出版

(邮政编码: 710049)

西安交通大学出版社电脑排版

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经销

开本 787×1092 1/32 印张 5.875 插页 1 字数: 118 千字

1992 年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—5000

ISBN7-5605-0475-2/TI·25 定价: 3.45 元

## “机械故障诊断丛书”总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广应用不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备运行状态的监测，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射、红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学等新兴学科在机械故障诊断技术中也找到了用武之地。

近年来，在国家计委中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在各行各业中推广应用。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本书是为满足广大工程技术人员的迫切需要而编写的；同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

在组织编写这套丛书时要求既注意科学性，又注意实用性。内容有一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，努力避免过多的数学推导，既能为广大实际工作者所接受，对研究人员和高等学校的师生也有参考价值。为了尽量节省读者的精力和时间，每本就一个专题编写，简洁明了，以便于读者阅读和使用。

由于各类产业机械既有各自的特点，又有某些共同点，机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，本丛书在

编写时着重讨论多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，同时尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向，以开阔视野。丛书也注意总结作者的理论研究成果和实际经验，以促进这些成果和经验在生产中发挥应有的作用。

本丛书和广大读者见面之后，编者和作者衷心希望能得到广大读者的反馈信息，以便改进我们的工作，提高丛书的质量。

“机械故障诊断丛书”编辑委员会

1988年2月

# 前 言

随着科学技术的进步，对机器运行状态的监测从用眼睛看、耳朵听、用手摸等原始方法已经发展到应用各种新颖的传感器和电子仪器进行科学的监测诊断。用于监测的参量是多方面的，通常围绕机器系统的振动、噪声、温升、压力、润滑油中的磨粒等进行，选择其中最重要的工况因素，使用最可靠的传感器及测试仪器进行测定及分析。

随着监测和诊断技术的发展，工业发达国家已经将机器的定期维修制度改变为根据机器的运行状态进行维修，这样既能进一步防止恶性事故的发生，又大大节约了维修费用。

本书第一部分着重介绍重要机器不可缺少的齿轮监测技术。

齿轮装置广泛用于各工业部门，如石化、冶金、矿山、交通运输和轻纺等行业，在大型成套设备中起着传输动力的作用。齿轮装置的运行状态直接影响着企业设备及人身安全和生产的效益。

齿轮装置通常由齿轮、轴、轴承、箱体及润滑油等组成，是机械基础部件中比较复杂的一种。齿轮装置的故障多发生在运动部件如齿轮和轴承上，而齿轮的故障又以点蚀剥落、严重磨损、胶合和齿根疲劳断裂为主要形式。由于制造和安装不良引起的不对中、偏心等缺陷也是重要的故障因素，所有这些因素都影响机器运行过程的振动与噪声，或者说，可以通过机器运行过程的振动与噪声的测定及分析发现齿轮的上述故障及其演变过程。因此，使用科学的方法对齿

轮装置的运行状态进行监测及判断，从而了解运行质量，防止故障发生，对企业的设备管理和经济效益都具有重要的价值。这个方法就是近来发展起来的齿轮故障诊断技术。

作为机械故障诊断理论与实践的重要部分，齿轮故障诊断一开始就受到人们的重视，通过多年来基础理论的研究和大量的实践，人们积累了不少的经验。书中介绍了齿轮故障诊断的监控技术、信号处理方法和工业实践，同时也介绍了作者的一些实验研究和经验，可以供企业中从事设备管理及维护的工程技术人员和工人参考。

本书的第二部分主要介绍润滑油的在线监测技术。

润滑油是机器正常运行的关键工质，现代设计技术将润滑油看作机器中的一个重要部分来考虑。同时，润滑油中又由于机件磨损颗粒的存在而拥有机器运行状态的丰富讯息。对这些磨损颗粒进行检测，从它们的形状、大小和分布规律，同样可以发现该机器的各种故障及运行状态。磁塞及铁谱仪就是对润滑油中的颗粒（特别是铁磁性颗粒）进行测定和分析的重要工具。但是磁塞过于简单，铁谱仪要取样进行线外分析，不能及时发现机器故障。因此又在此基础上发展了对润滑油的“在线”监测分析技术和装置。

由于这一技术正在发展完善之中，还不能认为它已达到成熟的阶段。但是它的应用前景和经济效益都是令人鼓舞的。本书介绍了国外在这方面的研究情况和一些典型的传感器及其试验结果，以引起有关工程技术人员和管理人员的注意，促进在线润滑油监测技术的发展，为我国的工业监测、安全管理提供新的技术保证。

本书的齿轮故障诊断技术部分由刘仲川和张志伟同志编



写，润滑油在线监测技术部分由陈宝佳同志编写。

多年以来，西安交大屈梁生教授对齿轮装置运行状态监测与诊断和润滑油在线监测技术的发展一直予以关注，对我们的工作给予了热情的指导和帮助，我们在此表示衷心的感谢。

西安交大吴序堂教授为本书“齿轮故障诊断”部分作了全面的审阅，提出了宝贵的意见，在此我们表示衷心的感谢。西安交大出版社的鼓励和关怀使得这本小册子得以与读者见面，作者也深表感谢。由于作者水平有限，书中不妥之处请读者批评指正。

刘仲川 张志伟 陈宝佳

1991年12月于郑州机械研究所

# 目 录

## 第一部分 齿轮故障诊断

### 第1章 概论

- 1.1 现代工业中的齿轮 ..... (1)
- 1.2 齿轮运动的特点 ..... (4)
- 1.3 齿轮故障诊断技术的意义与发展 ..... (7)
- 1.4 齿轮故障的基本类型及原因 ..... (10)

### 第2章 齿轮的振动

- 2.1 齿轮振动的简化模型及产生机理 ..... (14)
- 2.2 齿轮载荷冲击的周期性 ..... (17)
- 2.3 齿轮传动误差 ..... (18)
- 2.4 轮齿的啮合刚度 ..... (23)
- 2.5 节点处摩擦力方向突变所形成的摩擦力脉动... (25)

### 第3章 齿轮运行状态的监测方法

- 3.1 齿根应力的监测 ..... (27)
- 3.2 齿轮噪声的监测 ..... (30)
- 3.3 齿轮轴振动的监测 ..... (38)
- 3.4 齿轮箱振动的监测 ..... (40)
- 3.5 齿轮轴扭转振动的监测 ..... (48)
- 3.6 齿轮箱温度监测 ..... (52)

### 第4章 齿轮故障的信号处理

- 4.1 总振级的监测 ..... (54)
- 4.2 频谱分析 ..... (55)

4.3	倒频谱分析 .....	(58)
4.4	时域平均技术 .....	(61)
4.5	希尔伯特变换和解调技术 .....	(63)
<b>第5章</b>	<b>齿轮运行状态监测与诊断的仪器和系统</b>	
5.1	基本的齿轮运行监测与诊断系统 .....	(71)
5.2	GTS 齿轮试验系统 .....	(76)
5.3	G-3000 齿轮故障检测装置 .....	(79)
5.4	5050 型跟踪倍乘器 .....	(81)
5.5	2050 型永久性监测系统 .....	(81)
<b>第6章</b>	<b>齿轮典型失效形式的诊断试验</b>	
6.1	试验台和试验齿轮 .....	(82)
6.2	齿轮齿根疲劳裂纹和断齿的诊断分析 .....	(84)
6.2.1	简述 .....	(84)
6.2.2	试验过程 .....	(86)
6.2.3	诊断分析结果 .....	(86)
6.2.4	小结 .....	(89)
6.3	齿轮胶合的振动诊断分析 .....	(89)
6.3.1	简述 .....	(89)
6.3.2	试验过程 .....	(90)
6.3.3	诊断分析 .....	(90)
6.3.4	小结 .....	(97)
6.4	齿轮点蚀破坏的振动诊断分析 .....	(98)
6.4.1	简述 .....	(98)
6.4.2	诊断分析 .....	(100)
6.4.3	小结 .....	(101)

## 第7章 齿轮故障诊断的工业实例

- 7.1 水泥磨机减速箱的故障诊断 ..... (103)
  - 7.1.1 简述..... (103)
  - 7.1.2 例1 ..... (105)
  - 7.1.3 例2 ..... (111)
- 7.2 冶金矿山用减速器的诊断 ..... (120)
- 7.3 ZDT200A型蜗轮减速器疲劳试验的监测 ... (122)
- 7.4 石化设备中齿轮装置监测及诊断 ..... (126)
- 7.5 应用结构分析进行齿轮箱故障诊断 ..... (127)
- 7.6 采煤设备齿轮箱疲劳寿命试验的监测 ..... (131)
- 7.7 重型矿山设备中齿轮箱的故障诊断 ..... (134)
- 7.8 冷却水塔风机减速箱的监测诊断 ..... (139)
- 7.9 其它例子 ..... (143)

## 第二部分 润滑油在线监测

### 第8章 润滑油在线监测

- 8.1 在线磁性探测装置 ..... (146)
  - 8.1.1 基本原理..... (146)
  - 8.1.2 传感器的结构..... (147)
  - 8.1.3 传感器中的磁敏元件 ..... (148)
  - 8.1.4 在线磁性探测装置的应用 ..... (150)
- 8.2 在线感应探测器 ..... (151)
  - 8.2.1 基本原理与结构 ..... (152)
  - 8.2.2 灵敏度..... (153)
  - 8.2.3 基本规格..... (157)
- 8.3 在线铁谱仪 ..... (158)

8.3.1	基本原理	(158)
8.3.2	对比性试验	(161)
8.4	在线超声探测仪	(162)
8.4.1	基本原理	(162)
8.4.2	传感器	(163)
8.4.3	试验用系统及试验结果	(164)
8.4.4	电路及讯号处理	(165)
8.4.5	特点及存在的问题	(167)
8.5	在线监测系统的建立	(168)
8.5.1	简述	(168)
8.5.2	确定摩擦副的润滑状况	(168)
8.5.3	确定磨粒尺寸大小的分布	(169)
8.5.4	用“取样”方法校验在线监测系统	(170)

## 参考文献

# 第一部分 齿轮故障诊断

## 第1章 概 论

### 1.1 现代工业中的齿轮

齿轮装置广泛应用于国民经济各部门。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。

据不完全统计，仅原机械工业部系统内从事齿轮生产的企业就达 590 个，拥有各种齿轮加工机床 5 000 余台，年产量约 1 680 万件，产值达 3.24 亿元。其中每年生产高速齿轮约 2 000 件；重载齿轮 10 万件；通用机械齿轮 10 万件；机床齿轮 200 万件；汽车齿轮 1 250 万件；其余各类齿轮 210 万件。

齿轮的应用渗透到了各行各业，齿轮的结构与形式也是多种多样的。从齿形上看，渐开线齿轮仍是应用最广泛的一种齿轮，这是因为它具有传动平稳、承载力大、使用寿命长、制造容易和维护方便的优点。圆弧齿轮是另一支生力军，目前已生产出在强度和寿命等方面与渐开线齿轮相当的齿轮装置。从结构上看，除了大量的平行轴传动外，行星机构、摆线针轮和谐波减速器等齿轮传动装置也大量应用于工业部门。蜗轮、双曲线齿轮、圆锥齿轮等轴线相互垂直的齿

能在需要改变运动方向的场合发挥着重要作用。

新型齿轮材料的使用和热处理工艺的不断完善，使齿轮的性能得到了很大提高，突出的例子是渗碳淬火的合金剂齿轮，其承载能力较传统的调质齿轮有了显著的提高。在齿根圆角部分作喷丸硬化处理，可进一步增加齿轮的抗弯曲疲劳强度。高频淬火、火焰淬火、氮化以及碳、氮共渗等齿面硬化工艺都能较好地增加齿轮承载能力。

以一些典型的产品为例，可以看出目前齿轮传动的几个特点：

1) 传递功率大，运行速度高。目前世界上蒸汽透平齿轮最大功率达到 25 000kW，燃气透平齿轮最大功率达到 47 000kW。高速齿轮圆周速度一般在 70~110m/s，目前正向 150~200m/s 发展，个别已达到 250~300m/s。

2) 可靠性高。高速齿轮装置设计寿命要求在 10 万小时以上，在这个周期内要求齿轮长期稳定运行，特别是在诸如核设施、电力系统、航空工业等要害部门的齿轮装置的运行，要求绝对安全可靠。

3) 具有很强的超负荷能力。在有些场合下使用的齿轮装置受驱动机和拖动机动力特性的影响，在起动、停机或运动中可能会产生超过额定值 8~10 倍的扭矩。

4) 工作环境恶劣。例如安装在大型舰船上的齿轮减速器，运行速度高达 80~120m/s。除了由于舰船颠簸而使整个轴系产生挠动变形外，还要经受海洋盐雾的侵蚀。

5) 结构复杂。许多机械设备上安装了新型减速器如行星减速器、多级分流或齿轮箱。汽车变速器也朝着结构更加紧凑的方向发展。图 1-1 和图 1-2 分别为应用在大型水泥

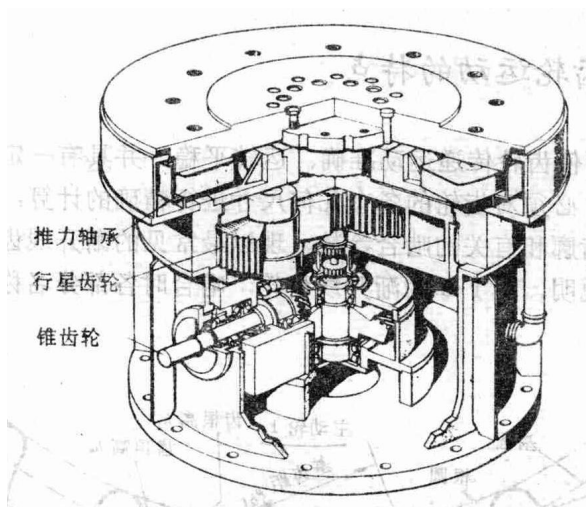


图 1-1 大型立式传动水泥磨齿轮箱

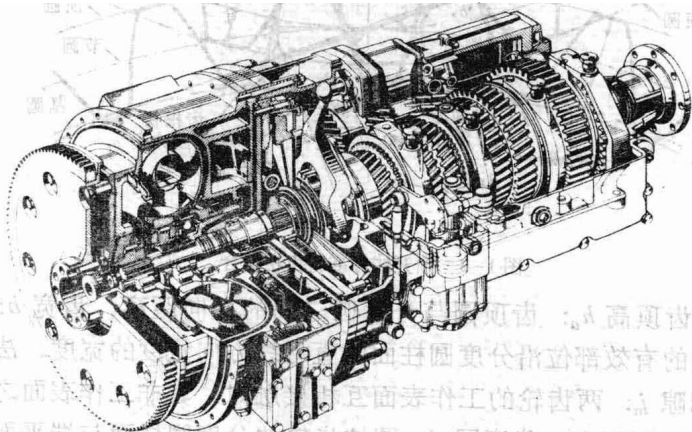


图 1-2 重型卡车传动齿轮箱



磨和重型汽车上的齿轮箱。

## 1.2 齿轮运动的特点

为了使齿轮传递运动准确、运转平稳，并具有一定的承载能力，必须对齿轮的各个几何尺寸进行精确的计算，合理地选择齿廓和有关的啮合参数。现以最常见的渐开线齿轮为例加以说明。图 1-3 为渐开线齿轮，啮合时各部分名称、符号如下：

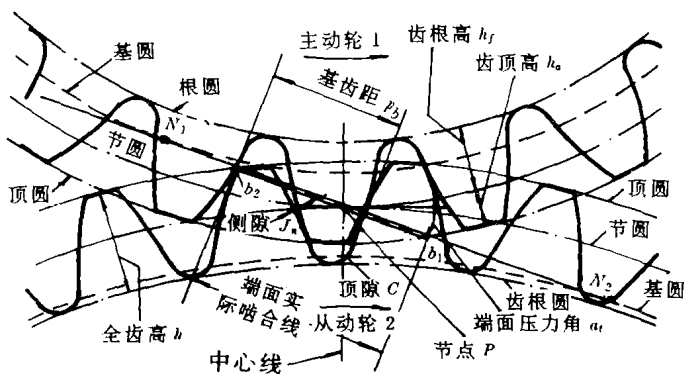


图 1-3 渐开线标准制齿轮啮合

齿顶高  $h_a$ : 齿顶圆与分度圆之间的径向距离。齿宽  $b$ : 齿轮的有效部位沿分度圆柱面的直母线方向量度的宽度。法向侧隙  $j_n$ : 两齿轮的工作表面互相接触时，其非工作表面之间的最短距离。分度圆  $d$ : 圆柱齿轮的分度圆柱面与端平面的交线。节圆  $d'$ : 圆柱齿轮的节圆柱面与端平面的交线。