

● 设备诊断现场实用技术丛书

大型回转机械诊断 现场实用技术

陈大禧 朱铁光 编著



机械工业出版社
China Machine Press



ISBN 7-111-10125-1/TH·1220

- 《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》
- 《齿轮和齿轮箱诊断实用技术》

ISBN 7-111-10125-1



9 787111 101253 >

定价: 27.00元

地址: 北京市百万庄大街22号 邮政编码: 100037
联系电话: (010) 68326294 网址: <http://www.cmpbook.com>
E-mail: online@cmpbook.com

设备诊断现场实用技术丛书

大型回转机械诊断 现场实用技术

陈大禧 朱铁光 编著



机械工业出版社

设备诊断
现场实用技术
陈大禧 朱铁光 编著
PDF

本书按照理论—技术—案例—进展的线索编写，结合作者多年现场设备诊断体会，对大机组故障诊断技术进行了比较全面的论述。选材突出应用要点，讲解通俗易懂，具有比较明显的特色。可作为设备诊断技术培训的参考教材使用，尤其适于工厂设备维修有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型回转机械诊断现场实用技术/陈大喜, 朱铁光编著. —北京: 机械工业出版社, 2002.6

(设备诊断现场实用技术丛书)

ISBN 7-111-10125-1

I. 大… II. ①陈…②朱 III. 机械-故障诊断 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 019629 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李万宇 张亚秋 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李汝庚

封面设计: 陈沛 责任印制: 付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·9.375 印张·364 千字

0 001 - 3 000 册

定价: 27.00 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) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

《设备诊断现场实用技术丛书》编辑委员会

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。过去的一个世纪里，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。

十八年来，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、防止突发事故，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，经过了充分蕴酿和多方论证，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，以负责确定丛书的题目，提出编写内容及特点要求，以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、善于总结和具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。

这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》；《齿轮和齿轮箱诊断现场实用技术》。

这套丛书的创式有别过去，尚少经验可供借鉴，更限于作者的时间和水平，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

设备故障诊断技术是一门工程与理论紧密结合的实用技术。它的工程性是显而易见的，没有工程的需求，就不会有诊断技术的成功应用，正因为设备故障诊断技术能给生产创造出巨大的经济效益，它才获得了茁壮成长的根基，并且随着生产技术的发展而迅速完善和提高。它从生产过程中汲取养分，不时地显示出它的工程实践和经验技艺的个性特色，设备诊断人员对现场设备的了解和个人经验往往决定这门技术应用的效果。但从渊源考察，设备故障诊断技术又确实确实是建立在当代科学理论基础之上的一门学科，具有严谨的科学依据。因此，设备诊断人员必须理论和实践并重，只有不断地吸取相关理论成果，又不断地总结实践经验，统一于现场设备管理工作之中，才能跟上生产需求的步伐。作者多年从事现场设备诊断技术的应用研究，对此感受颇深。基于以上认识，本书按照理论——技术——实例——发展趋势这一线索进行编排，希望对同行有所帮助。

全书共分八章。第1章是全书内容的概括；第2章是机组诊断实践中需用到的一些基础理论要点和作者对这些理论的理解和体会，从某种意义上说它是设备故障诊断的问题求解法或思考方法；第3章介绍设备诊断常用的分析方法，因为有关这方面的论述国内已有相当多的专著，本书不拟过多重复，仅就应用重点及规范化操作方法作一些通俗的讲解；第4章介绍现场大机组常见故障的机理和诊断方法，其中融合了一些作者在诊断中验证过的见解，对实际工作者可能会有所帮助；第5章是设备故障诊断案例，是第4章的具体化，多数案例是从作者多年诊断实践中筛选出来的，部分案例选自有关期刊及会议论文等，具有一定借鉴作用；第6章介绍了当前大机组诊断中已得到应用的一些监测诊断系统，这些系统功能比较完善，可供建立诊断系统时参考；第7章简述故障诊断技术应用的更高层次——状态预报的技术，主要内容选自作者完成的一项科研成果，实践表明，状态预报对提高设备开工率及确保设备长周期安全运行可起到极好的作用；第8章是设备诊断技术在当前考虑的一些问题和发展趋势，从中可了解一下本技术的开发方向。

本书由作者共同商议篇章结构，分别执笔、共同修改定稿。中国石油化工集团公司长岭炼化公司设备研究所的同行是本书素材来源的参与者，陈鹏同志对书稿的录入付出了辛勤的劳动，在此表示感谢。中国机械工程学会高级会员黄昭毅

教授级高工对本书的写作给予了热情的指导和鼓励，西北工业大学肖植教授协助编写了部分章节，天津石化公司金包生高工、长岭炼化公司李东高工、高桥石化公司李玮高工等同行为本书提供了宝贵的案例，在此一并表示衷心的感谢。

作者理论水平有限，信息不广，书中的谬误肯定不少，敬请读者指正。

作者

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 大型回转机械故障诊断工作的作用与意义	1
1.2 回转机械故障的原因	2
1.3 现场设备诊断常用分析方法	3
1.3.1 振动分析法	3
1.3.2 油液分析法	5
1.3.3 综合分析法	6
1.4 大型回转机械故障诊断技术的发展现状及趋势	6
1.4.1 大型回转机械诊断技术发展简史	6
1.4.2 大型回转机械诊断技术发展现状	7
1.4.3 大型回转机械诊断技术发展趋势	9
第 2 章 大机组诊断的理论基础	10
2.1 概述	10
2.2 振动基础理论	10
2.2.1 振动形式的描述	11
2.2.2 影响振动的两大要素	11
2.2.3 振动的分类	12
2.2.4 振动和冲击信号的特点	14
2.2.5 振动的动力学特征	20
2.2.6 非线性系统振动的特征	26
2.2.7 多自由度振动	29
2.2.8 扭转振动	31
2.3 大机组运行的动力特性	32
2.3.1 转子—轴承系统的临界转速	32
2.3.2 转子轴承系统的稳定性	35
2.3.3 压缩机气体流动分离问题	36
2.4 磨损的类别和识别	40
2.4.1 设备的磨损系统及设备的磨损过程	40
2.4.2 磨损的分类	41
2.4.3 各类磨损的特点	42

2.4.4	磨损类型的识别	43
2.4.5	小结	45
2.5	大机组故障诊断的特点	46
第3章	机组故障基本分析方法	48
3.1	概述	48
3.2	振动分析法	49
3.2.1	振动信号的采集	49
3.2.2	信号的确认	67
3.2.3	信号的预处理	68
3.2.4	信号的变换	70
3.2.5	常用的振动信号分析方法	76
3.2.6	全息谱分析法	81
3.2.7	起停过程分析	87
3.2.8	趋势分析	87
3.2.9	振动故障分析的程序	88
3.2.10	小结	88
3.3	油液分析法	89
3.3.1	润滑油液的作用及性能要求	90
3.3.2	油液分析的内容、原理及仪器配置	90
3.3.3	铁谱分析技术	92
3.4	综合分析法	98
第4章	机组常见振动故障的机理与诊断	99
4.1	故障诊断的层次性及故障类型	99
4.2	不平衡的故障机理与诊断	100
4.2.1	不平衡的种类	100
4.2.2	不平衡振动的机理	101
4.2.3	不平衡故障的诊断	101
4.3	转子弯曲的故障机理与诊断	103
4.3.1	轴弯曲的种类	103
4.3.2	轴弯曲振动的机理	103
4.3.3	轴弯曲故障的诊断	103
4.4	偏心故障的机理和诊断	105
4.5	热变形故障的诊断	105
4.5.1	机组热变形的原因	105
4.5.2	振动特点	106
4.5.3	诊断实例	106
4.6	转子不对中故障的机理与诊断	106
4.6.1	转子不对中的类型	106

4.6.2	不对中振动的机理	106
4.6.3	不对中的诊断	108
4.7	联轴器卡死故障的诊断	110
4.8	转轴横向裂纹的机理与诊断	110
4.8.1	轴裂纹故障机理	110
4.8.2	横向轴裂纹的诊断	111
4.9	转子支承系统连接松动故障的机理与诊断	112
4.9.1	松动振动故障的机理	112
4.9.2	松动故障的诊断	112
4.10	动静碰摩的机理与诊断	113
4.10.1	径向动静碰摩的振动机理	113
4.10.2	碰摩故障的诊断	114
4.11	叶轮与转轴之间配合失效的故障机理与诊断	115
4.11.1	轴配合失效振动的机理	115
4.11.2	轴配合失效的诊断	116
4.11.3	故障甄别	118
4.12	滑动轴承油膜涡动和油膜振荡的机理与诊断	118
4.12.1	振动机理	119
4.12.2	油膜轴承故障的诊断	120
4.12.3	故障甄别	120
4.12.4	油膜振荡故障的原因	121
4.13	旋转失速的故障机理与诊断	121
4.13.1	振动机理	121
4.13.2	旋转失速故障的诊断	123
4.13.3	故障原因	123
4.14	喘振	123
4.14.1	振动机理	123
4.14.2	喘振的诊断	124
4.14.3	喘振的故障原因	124
4.15	不稳定强迫振动的诊断	124
4.15.1	不稳定强迫振动的机理	124
4.15.2	不稳定强迫振动的诊断	126
第5章	大机组故障诊断实例	130
5.1	工频类故障的诊断	130
5.1.1	不平衡故障诊断实例	130
5.1.2	轴弯曲的诊断	143
5.1.3	由角度不对中引起的工频振动故障的诊断	148
5.1.4	壳体变形故障的诊断	153

5.1.5 气隙偏心故障的诊断	154
5.1.6 流道异物故障的诊断	158
5.2 不对中故障的诊断	160
5.3 油膜振荡故障的诊断	166
5.4 动静碰摩故障的诊断	170
5.5 松动故障的诊断	173
5.6 流体激振故障的诊断	180
5.7 管道共振故障的诊断	189
5.8 构件共振	192
5.9 磨损故障的诊断	194
5.10 综合类故障诊断	200
5.11 不稳定工频振动故障的诊断	206
5.12 早期故障的诊断	208
第6章 大机组监测诊断系统	213
6.1 MD3905 网络化在线监测与故障诊断系统	213
6.2 DM-NT 集散监测网络和 RD-ES 远程诊断系统	224
6.2.1 DM-NT	224
6.2.2 RD-ES 远程诊断系统	226
6.2.3 MFDES 机械故障智能诊断系统	226
6.3 汽轮发电机组分布式监测诊断系统简介	229
6.3.1 系统结构	230
6.3.2 系统硬件结构分析与设计	231
6.3.3 系统软件结构分析与设计	233
6.4 CSI 数据采集、分析及自动诊断专家系统	235
6.5 其它监测诊断系统简介	238
第7章 大机组振动状态预报技术简介	242
7.1 概述	242
7.1.1 机组振动状态预报的意义	242
7.1.2 振动状态预报应具备的条件	242
7.1.3 科学预测的途径	243
7.2 几种常用的预测方法	243
7.3 各种预测方法的优缺点	248
7.4 神经网络预报技术简介	249
7.4.1 神经网络预测原理	249
7.4.2 大机组振动预测神经网络模型的建立	250
7.5 神经网络预报技术的现场应用	256
7.5.1 长周期振动趋势预报	256
7.5.2 上升的振动趋势预报	256

7.5.3 下降的振动趋势预报	257
7.5.4 剧烈变化的振动趋势预报	257
7.5.5 预报技术在装置改造中的作用	258
7.6 小结	260
第8章 大机组诊断中的现代信号分析方法	261
8.1 前言	261
8.2 时变信号分析方法	261
8.2.1 短时傅里叶变换	261
8.2.2 Wigner 分布	262
8.2.3 小波变换	264
8.3 非线性分析方法	265
8.3.1 分形几何	265
8.3.2 混沌	267
8.4 信号降噪方法	269
8.4.1 神经网络自适应滤波	269
8.4.2 基于奇异谱的降噪方法	269
8.5 应用实例	271
附录 故障诊断常用标准	274
1. 振动标准	274
2. 动平衡标准	282
3. 对中标准	284
参考文献	286

第 1 章 概 论

1.1 大型回转机械故障诊断工作的作用与意义

随着科学技术的迅猛发展，现代工业生产的机械设备正朝着大型化、复杂化、高速化、自动化及大功率方向发展。设备的生产效率越来越高，机械结构也日趋复杂，设备中不同部分之间的相互联系、耦合也更加紧密，一个部件出现故障，将引起整个生产流程中断。现代化的生产设备虽然大幅度地提高了劳动生产率，节省了人力和物力，但同时也大幅度地增加了设备的维修费用，设备故障单位时间造成的损失也成倍地增加。

大型回转机械，如乙烯装置的三机（裂解气透平压缩机组、乙烯透平压缩机组、丙烯透平压缩机组）、化肥装置的五机（原料气压缩机组、合成气压缩机组、空气压缩机组、氨压缩机组、二氧化碳压缩机组）、炼油厂的三机（烟气轮机、主风机组、石油气压缩机组）及电厂的大型汽轮发电机组等，作为化工、石化、电力等行业的关键设备，由于价格昂贵，很多均没有配备备用机组，一旦出现故障，将给企业和国家带来巨大的经济损失。例如，一个年加工原油 500 万吨的炼油厂，停产 1 天的经济损失达近两千万元；一个年产 30 万吨的合成氨化肥厂停产一天的损失也达 60 多万元。另据我国十一个化肥厂提供的不完全资料统计，1976 年到 1985 年由于大机组事故停车损失近 100 万吨尿素，折合人民币四亿七千万元；1985 年山西大同电厂 2# 机组联轴器断裂事故，1988 年秦岭电厂 5# 机组主轴断裂，这两次事故的直接经济损失均达亿元，并严重影响了华北和西北地区的供电。从 1984 年到 1991 年间我国 50MW 以上的汽轮发电机组转子严重破坏等重大事故就达六起之多，1985 年浙江镇海石化总厂机组转子毁坏和南京栖霞山化肥厂机组转子断裂，两次事故损失也达一千万以上。以上仅是事故造成的直接经济损失，而由事故带来的间接经济损失和社会影响，更是难以估量。

为掌握设备运行状态，避免设备事故的发生，20 世纪 80 年代以来，国内外相继开展了设备诊断技术工作，特别是对于生产中的主要关键机组实行在线监测和诊断，较好地保障了设备的安全运行，取得了显著的经济效益和社会效益。

例如，在采用故障诊断技术后，日本每年节省维修费用 3 亿英镑，扣除由于故障诊断工作的投入 0.5 亿英镑，净获利 2.5 亿英镑；英国节约维修费用约 7.5 亿英镑；美国的一些知名大企业，如杜邦、通用汽车、3M、M&M、Mars、德

州仪器等的维修费用都平均减少 50%，宾州电厂开展预知维修后，每年平均节约维修费用 200 万美元，等等。我国开展故障诊断的时间较短，但也取得了显著的效果，例如铁路系统采用故障诊断技术后，1979 年至 1986 年共发现和防止车辆燃轴达 291 万件，1986 年与 1978 年相比，燃轴事故减少到 1/14，按经济效益计算，相当于增加年收入 2 亿多元；泸州天然气化学工业公司应用设备故障诊断技术，使机组的大修开缸率由 1990 年的 89% 逐步下降到 1994 年的 57%，机组连续运行记录由 1992 年以前的历史最高记录 150 天，提高到 1997 年的 332 天，创造的直接经济效益达 7600 万元；乌鲁木齐石化总厂在采用监测诊断技术以后，每年增产节支达一千万元以上，等等。

大型回转机械的设备状态监测与故障诊断技术对工业企业的作用和意义，主要可归结为如下几个方面：

1) 及时掌握设备运行状态异常或故障的早期征兆，以便采取相应的措施，将故障消灭在萌芽状态，避免或减少重大事故的发生。

2) 一旦发生故障，能自动记录下故障过程的完整数据和信息，以便事后进行故障原因分析，缩短维修时间和费用，提高设备利用率，避免再次发生同类事故。

3) 通过对设备状态异常的原因和性质进行分析，采取适当措施，对设备状态实行在线调理，延长设备运行周期，为生产和维修决策提供科学依据。

4) 通过监测得到的大量机器状态数据，可以更充分地了解机器的性能，为改进设备设计、制造水平及产品质量提供有力的依据。

5) 随时掌握设备运行状态的变化情况、各部分性能的劣化程度和机械性能的发展趋势，对设备状态变化情况做到心中有数，提高设备管理现代化水平。

1.2 回转机械故障的原因

设备故障是指设备不能按预期指标工作的一种状态，也可以说是设备未达到其应该达到的功能，原因主要包括：

1) 能使设备或系统立即丧失其功能的破坏性故障，如转轴断裂、油膜振荡、转子上零件脱落或异物卡附引起的突发性转子不平衡等；

2) 由于设计、安装或与设备性能有关的参数不当造成设备性能降低的故障，如对中曲线设计不当、基础刚度过小、轴瓦间隙过大等；

3) 由于操作不当引起的故障，如喘振、暖机不充分造成热胀不均引起强振等等。

造成大型回转机械故障的原因很多，故障来源和主要原因如表 1-1 所示。

表 1-1 回转机械故障来源及主要原因

故障来源	主要原因
设计、制造	①设计不当，动态特性不良，运行时发生强迫振动或自激振动 ②结构不合理，有应力集中 ③工作转速接近或落入临界转速区 ④运行点接近或落入非稳定区 ⑤零部件加工或制造不良，精度不够 ⑥零件材质不良，强度不够，有制造缺陷 ⑦转子动平衡不符合技术要求
安装、维修	①机器安装不当，零部件错位，预负荷大 ②轴系对中不良（考虑轴系热态下的对中补偿量有偏差） ③机器的几何参数（如配合间隙、过盈量及相对位置）调整不当 ④管道应力大，机器在工作状态下改变了动态特性和安装精度 ⑤转子长期放置不当，破坏了动平衡精度 ⑥安装或维修过程中破坏了机器原有的配合性质和精度
运行操作	①机器在非设计状态下运行（如超速、超负荷或低负荷运行），改变了机器的工作特性 ②润滑或冷却不良 ③回转体局部损坏或结垢 ④工艺参数（如介质温度、压力、流量、负荷等）不当，机器运行失稳 ⑤起动、停机或升降速过程操作不当，暖机不够，热膨胀不均匀，或在临界区停留时间长
机器劣化	①长期运行，转子挠度增大 ②回转体局部损坏、脱落或产生裂纹 ③零部件磨损、冲刷、点蚀或腐蚀等 ④配合面受力劣化，产生过盈不足或松动现象，破坏了配合性质和精度 ⑤机器基础沉降不均匀，壳体变形等等

1.3 现场设备诊断常用分析方法

1.3.1 振动分析法

振动分析法是回转机械故障诊断中应用最广泛、也最行之有效的办法。这是因为，一方面，振动问题是回转机械运行中的最主要问题，另一方面振动信号包含了丰富的机械运行状态信息，且信号易于拾取，便于在不影响机器运行的情况下实行在线监测和诊断。

采用振动分析法，可以对回转机械大部分的故障类型进行准确的诊断，如转子不平衡、转轴弯曲、轴承松动、轴系不对中、动静件摩擦、油膜振荡、旋转失