



# 旋转机械故障诊断 若干关键技术 研究及应用

刘晓波 著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 旋转机械故障诊断 若干关键技术研究及应用

刘晓波 著



机械工业出版社

本书对水轮发电机组和风机典型故障的机理进行了分析和总结。应用小波分析方法提取了旋转机械三类常见故障以及叶片裂纹故障的特征,并通过实例分析说明运用小波分析方法可以较好地诊断旋转机械故障,且把小波和聚类分析相结合对旋转机械典型故障进行了诊断,进而实现了在故障类层次上的模糊模式识别的自动诊断方法。采用 Visual C++ 语言和 Access 数据库工具开发了功能完善、运行速度快、操作简单、界面友好的水轮发电机组故障诊断系统(HGSFDS)和风机在线状态监测与故障诊断系统(FDMS),并给出了系统运行实例。本书的研究成果对旋转机械故障诊断理论与应用的发展具有积极的促进作用。

本书可作为机械、冶金、矿业、化工、能源等领域从事机械设备监测和故障诊断、设备维修和管理的工程技术人员以及高校教师、研究生进行科研、教学和学习的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

旋转机械故障诊断若干关键技术研究及应用/刘晓波著. —北京:机械工业出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-111-39132-6

I. ①旋… II. ①刘… III. ①旋转机构—故障诊断 IV. ①TH210. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150861 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:沈红 责任编辑:沈红 高依楠

版式设计:霍永明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.25 印张·222 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-39132-6

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑(010) 88379778

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着现代化生产的发展，对大功率旋转机械的需求量越来越大，因而对设备的可靠性要求也越来越高。旋转机械是机械设备的重要组成部分，如鼓风机、空气压缩机、航空发动机、汽轮发电机、水轮发电机等，被广泛地应用于机械、冶金、矿业、化工、航空、能源等行业。它的安全运行直接关系到企业的正常生产，一旦在运行中出现了故障，就可能导致整个生产无法正常进行，甚至关键设备的损坏。既可能危及人身安全，也会造成重大的社会、经济损失。

旋转机械设备故障诊断是依靠设备在运行过程中，伴随故障必然产生的振动、噪声、温度、压力等物理量的变化来判断和识别设备的工作状态和故障，对故障的危害进行早期预报、识别，降低事故的发生率、做到预知维修、降低维修费用、减少维修时间，增加运行时间、保证可靠地高效地发挥设备应有的功能。应用故障诊断技术对机械设备进行监测和诊断，可及时发现设备的故障和预防设备恶性事故的发生，从而避免人员的伤亡和重大的经济损失。

本书以水轮发电机组和风机为对象研究旋转机械状态监测和故障诊断若干关键技术，对水轮发电机组和风机典型故障的机理进行分析，总结了旋转机械振动故障的特征和识别。从工程应用角度出发，研究了小波变换的意义，通过将小波分析方法与传统信号分析进行深入比较，体现小波分析不同于传统信号分析方法的良好时频分析性能，应用小波分析方法提取了旋转机械三类常见故障以及叶片裂纹故障的特征，并通过实例分析说明运用小波分析方法可以较好地诊断旋转机械故障。把小波和聚类分析相结合对旋转机械典型故障进行诊断，对提高故障诊断准确率做了有益的尝试；把粗糙集约简和神经网络相结合对旋转机械故障知识进行识别，消除了冗余成分，提高了诊断速度。以机组振动信号的频率成分结构、频率幅值和测点表现特征，利用典型故障频谱在频率结构方面的信息和测点表现，建立了具有通用性一般结论的水轮发电机组振动故障原因征兆模糊关系。并在此基础上，运用核函数对矩阵变换结果进行聚类分析，实现了在故障类层次上的模糊模式识别的自动诊断方法。为了充分体现表征机组运行状态和稳定性的多种信息进行故障诊断，对基于知识的诊断系统进行了系统研究。针对故障诊断经验知识模糊性的特点，采用了加权模糊逻辑推理进行多种信息的融合。为了建立知识库管理机制，结合故障征兆表示方法，研究了基于数据库的知识库建立和维护机制，为诊断知识的交流，修改及运用提供了一条新思路。研究了基于 ADO 数据库访问技术的诊断推理控制策略，简化了诊断系统的推理，提高了诊断效率，也为建立具有大容量知识的专家系统提供了一种有效的方法。采用 Visual C++ 语言和 Access 数据库工具开发了功能完善、运行速度快、操作简单、界面友好的水轮发电机组故障诊断系统 (HGSFDS) 和风机在线状态监测与故障诊断系统 (FDMS)。FDMS 系统采用基于 C/S 模式的状态监测与故障诊断系统和基于 B/S 模式的 Web 子系统。还介绍了系统的结构和各个模块的功能

#### IV

及特点，并给出了系统运行实例，结果表明：系统能够满足故障诊断的有效性和实用性要求。本书的内容为作者十余年来研究成果，研究所取得的成果对旋转机械故障诊断理论与应用的发展具有积极的促进作用。

感谢清华大学褚福磊教授、华中科技大学黄其柏教授对本文内容的修改意见。感谢我 10 余年来指导的研究生，正是他们做了大量的工作，才使本书成稿。感谢南昌航空大学学术文库专项基金资助。

由于时间仓促，且作者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，在此诚恳地欢迎广大读者提出批评和指正。

刘晓波

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 旋转机械在线监测与故障诊断的研究意义 ..... 1
- 1.2 故障诊断技术的发展概况 ..... 2
- 1.3 故障诊断的方法与技术 ..... 4

## 第 2 章 旋转机械振动故障机理研究 ..... 7

- 2.1 旋转机械振动故障的特点 ..... 7
- 2.2 旋转机械振动故障的特征和识别 ..... 9

## 第 3 章 信号分析方法及旋转机械故障分析实验设计 ..... 31

- 3.1 信号分析方法 ..... 31
- 3.2 旋转机械故障分析实验设计 ..... 38

## 第 4 章 基于小波分析技术的旋转机械故障分析 ..... 43

- 4.1 几类常见故障的特征提取 ..... 43
- 4.2 叶片裂纹故障特征提取 ..... 50

## 第 5 章 基于小波和聚类分析相结合的旋转机械故障诊断 ..... 56

- 5.1 聚类分析 ..... 56
- 5.2 基于小波和聚类分析相结合的转子故障诊断 ..... 60

## 第 6 章 基于粗糙集和神经网络的旋转机械故障知识识别 ..... 65

- 6.1 知识系统的构建 ..... 65
- 6.2 粗糙集属性约简 ..... 73
- 6.3 数据化知识识别 ..... 80

## 第 7 章 基于模糊聚类分析的自动诊

## 断 ..... 87

- 7.1 水轮发电机组振动特征分析 ..... 87
- 7.2 模糊诊断方法 ..... 89
- 7.3 基于核函数的聚类理论与方法 ..... 91
- 7.4 基于核函数聚类分析的综合自动诊断 ..... 93

## 第 8 章 基于知识的故障诊断方法研究 ..... 96

- 8.1 故障诊断专家系统 ..... 96
- 8.2 诊断知识的表示 ..... 96
- 8.3 诊断系统的模糊推理与控制策略 ..... 100
- 8.4 基于数据库的知识库管理系统 ..... 104

## 第 9 章 旋转机械状态监测与故障诊断硬件系统设计 ..... 109

- 9.1 中小型水轮发电机组状态监测与故障诊断硬件系统设计 ..... 109
- 9.2 风机状态监测与故障诊断硬件系统设计 ..... 114
- 9.3 PCI-1713 卡编程方法的选取 ..... 115
- 9.4 PCI-1713 卡的测试 ..... 116

## 第 10 章 旋转机械状态监测与故障诊断系统应用研究 ..... 118

- 10.1 水轮发电机组故障诊断系统 (HGSFDS) ..... 118
- 10.2 基于网络的风机在线状态监测和故障诊断系统 (FMDS) ..... 125

## 参考文献 ..... 135

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 旋转机械在线监测与故障诊断的研究意义

随着科学技术的进步，机械设备的工作性能不断提升，自动化程度和生产效率也越来越高；同时其组成和结构也日趋复杂，集成化程度不断提高。一旦设备的某个部分或某一环节在运行中出现了故障，就可能对整个生产流程无法正常进行，进而会造成巨大的社会、经济损失，甚至会危及人身安全。例如：英国 CEGB 公司的 55 万 kW 和 60 万 kW 发电机组因故障停机而造成的发电损失每年达 750 万英镑。日本海南电厂的一台 600MW 超临界火力发电机组进行超速实验时，因机组轴承失效和临界转速下降引起机组共振，造成机毁事故，直接经济损失达 45 亿日元。1985 年大同电厂 2 号机组联轴器螺栓断裂；1988 年秦岭电厂 5 号机组主轴断裂，这两次事故的损失均达亿元。因此，如何有效地避免和预防机器设备出现故障，杜绝重大事故的发生，提高大型机电设备运行的安全性和可靠性，就成为人们越来越关心和重视的问题。

由于我国水电资源丰富，所以水电建设发展迅速。进入 20 世纪 90 年代以来，每年的水电装机容量都在 300 万 kW 以上。到 2004 年我国的水电装机已突破 1 亿 kW。随着水轮发电机装机容量的增多及其结构的日趋复杂，随之而产生的水机组的安全、稳定性问题也日益突出。机组振动、摆度、水压力脉动等是衡量机组运行稳定性的重要指标，它们不仅影响机组的性能和寿命，而且直接影响机组的安全运行。许多电厂（特别是中小型水电厂）自投入运行以来，一直沿用人工读数等传统测试方法对机组振动、摆度进行测量。由于测量精度低，不能及时掌握、分析机组振动等的运行状态，发生事故和故障后也不能及时报警。

设备故障诊断的意义主要表现为降低事故的发生率、降低维修费用、减少维修时间，增加运行时间、保证可靠高效地发挥设备应有的功能。它依靠设备在运行过程中，伴随故障必然产生的振动、噪声、温度、压力等物理量的变化来判断和识别设备的工作状态和故障，这样可以对故障的危害进行早期预报、识别，进而做到预知维修，保证了设备安全、稳定、长周期、满负荷优质运行，也避免了“过剩维修”造成的不经济、不合理现象。应用故障诊断技术对机械设备进行监测和诊断，可以及时发现设备的故障和预防设备恶性事故的发生，从而避免人员的伤亡、环境的污染和重大的经济损失。据资料介绍，应用故障诊断技术可以减少事故发生率的 75%，降低设备维修费用的 25%~50%。如果全国企业普遍开展设备故障诊断，改善设备维修方式，一年的经济效益就可达几十亿，因此故障诊断技术在工业生产中占据着越来越重要的地位。

旋转机械是机械设备的重要组成部分，如机械、冶金、矿业、化工、石油、航空、电力等行业的鼓风机、空气压缩机、航空发动机、汽轮发电机、水轮发电机等都是典型的旋转机械。这类机械是企业的核心设备，它们主要由转子、支撑转子的轴承、定子或机器壳体、联轴器组成，此外还有齿轮传动件、叶轮叶片、密封等。由于旋转机械转子、轴承、壳体、联轴器、密封和基础等部分的结构及加工和安装方面的缺陷，使机器在运行时产生振动，过大

的振动又往往是机器损坏的主要原因。又由于振动这个参量比起其他状态参量（如润滑油或内部流体的温度、压力、流量或发电机的电流等）更能直接地、快速准确地反映机器运行状态，利用振动信号对设备进行诊断，也就成为设备故障诊断中最有效、最常用的方法之一。机械设备和结构系统在运行过程中的振动及其特征信息是反映系统整体变化规律的主要信号，通过各种动态测试仪器拾取、记录、分析动态信号，是进行系统状态监测和故障诊断的主要途径。英国故障诊断专家 Thomas 认为，若进行旋转机械振动量的监测，其利润和成本之比可高达 17:1，因此，无论从安全的角度还是从经济效益出发，通过在线监测旋转机械的振动参量，对其进行状态和故障振动监测，就显得十分重要。

在线监测是运用现代测试技术，测量和监视伴随设备运行的振动、噪声、温度、压力、流量等参量，并利用信号分析与数据处理技术，对这些参量的模拟或数字信息进行分析处理，进而建立动态信号与设备故障之间的联系，再通过模式识别等识别方法判断系统的工况状态。它不影响生产系统的正常运行，有助于进行预知维修和预知管理。

长期以来，以统计理论为基础依据的有一定主观色彩的按计划定期进行小修、中修、大修的计划维修体制，对风机和水轮发电机组的正常运转发挥了极其重要的作用，且至今仍然是占压倒性的设备维修体制。从可靠性的角度来说，计划定期维修体制有其必要性，但是生产实践有大量事例说明这种维护体制较普遍地存在着过维修和不足维修，即维修的代价仍然十分昂贵。风机和水轮发电机组迫切要求提高维修的针对性，降低设备维护的代价，使设备的安全性、可靠性更高、更好。因此，建立适合风机和水轮发电机组的实时在线监测及故障诊断系统正成为新的趋势和方向。对重要的运行参数进行及时分析、对有关性能指标进行及时评估，对机组故障进行及时预测预报和原因分析，是保证机组安全运行的重要措施，这对提高风机和水轮发电机组运行效率有着十分重要的意义。

## 1.2 故障诊断技术的发展概况

现代设备的状态监测与故障诊断技术的研究，是由航天、军事工业的需要而发展起来的。自 1961 年阿波罗计划实施后，发生了一系列由设备故障酿成的悲剧，引起了美国军方和政府有关部门的重视。1967 年，在美国宇航局（NASA）的倡导下创立的机械故障预防小组（MFPG, Machinery Fault Prevention Group）和 20 世纪 70 年代初英国成立的以 R. A. Collacott 博士为首的机械保健中心（Mechanical Health Monitoring Center）等机构就开始有组织、有计划地对机械故障诊断技术进行专题研究。由于故障诊断技术的应用产生了巨大的经济、社会效益，从而得到迅速发展。

设备状态监测与故障诊断技术的发展和在不同国家和地区不尽相同。欧洲其他国家的研究虽不具有英、美的广泛性，但在某一方面却具有特色或占有领先地位，如瑞典 SPM 仪器公司的轴承监测技术、丹麦 B&K 公司的传感器制造技术等。日本在军事、航空等方面的研究没有英、美各国有优势，但它将状态监测与故障诊断技术的研究充分应用在民用工业（如钢铁、化工、铁路等行业）中，并具有明显优势。日本密切注视世界各国的动向，努力发展自己的诊断技术，且特别注重研制本国的诊断仪器。

我国对设备状态监测和故障诊断技术的认识、研究和应用相对较晚，1979 年以前，一些大学和科研单位结合教学和有关设备诊断技术的研究课题，开始进行设备状态监测和故障

诊断技术的理论研究及小范围的工程实际应用研究。经过三十多年的发展,我国的设备状态监测和故障诊断技术水平同发达国家的差距已大大缩短,并在某些方面,如计算机监测与诊断软件开发等,完全可以满足实际生产的需要,且达到世界先进水平。目前,许多科研单位和大专院校已经陆续开发研制了数十套离线或在线状态监测与故障诊断系统,并在工业生产中发挥了巨大的作用。

故障诊断技术发展到今天,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术。它是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科。

### 1.2.1 水轮发电机组故障诊断技术的研究现状

水轮机组的转速较低,其故障机理具有特殊性,尤其是水力振动、气蚀等引起的故障,其机理及表现形式还没有研究透彻;而且水轮机组的结构与汽轮机组差别较大。在大多情况下,水轮发电机组的故障率远没有汽轮发电机组大,且一般不会造成像汽轮发电机组故障那样严重的后果,这使得人们对水轮机组的安全运行没有给予足够的重视。国内外所做的研究大部分是集中在火电系统,因此对于汽轮发电机组的故障诊断系统开发得较多,技术上也较成熟,而针对水轮发电机组的故障诊断系统却较少。

在水电设备的故障诊断方面,目前国内外已取得了一些成功的尝试,如国外公司产品包括加拿大 FES 公司的“水轮发电机局部放电分析仪”、日本日立公司研制的“水力发电设备状态监测系统”、日本东京电力公司和东芝公司共同研究开发的“抽水蓄能发电机组自动监视系统”、瑞士 VM 公司研制的“发电机气隙监测装置”等,还有俄罗斯研制的水轮发电机专家诊断系统(ESCONT)能对机组振动和定子绕组热固性绝缘状态进行监测和评估,德国申克公司的 Vibrocontrol 4000 系统主要用于水轮机振动的监测和分析,加拿大 VibroSystem 公司的 AGMS 和 ZOOM2000 系统,分别用于监测发电机气隙和水轮发电机组的振动,以及瑞士 VIBRO—METER 公司的 VM600 系统、美国本特利·内达华公司的 Hydro VU 系统、德国西门子公司的 Scard 系统等。

近年来,由于水电站计算机监控系统的推广,国内水电机组的状态监测与故障诊断技术亦被提到了议事日程,且先后在三门峡、潘家口、黄龙滩、隔河岩等电站得以实施,并取得了一定的经验,为今后综合状态监测与诊断系统的研究奠定了一定的基础。

国内有清华大学开发的水轮机运行稳定性跟踪分析系统(PSTA—1),该系统是在对机组振动机理研究的基础上对机组运行状态进行在线监测、报警、分析和诊断;华中理工大学研制的水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统及 HSJ 型系列多功能水力机械监测分析系统;北京英华达公司的 EN—8000 系统等。

### 1.2.2 风机故障诊断技术的研究现状

风机广泛用于工厂、矿井、隧道、冷却塔、建筑物的通风、排尘和冷却;锅炉和工业炉窑的通风和引风。风机的性能参数主要有流量、压力、功率、效率和转速;另外,噪声和振动的大小也是风机的主要技术指标。随着机械工业的发展,风机设备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度也越来越高,各子系统的关系也越来越密切,一旦设备的某个部分在运转过程中出现故障,就很可能中断生产,造成巨大的经济损失,甚至带来灾难性的后

果。目前，国内外都对风机故障诊断技术展开了积极的研究。

从故障诊断技术的各分支技术来看，美国占有领先地位，美国的许多权威机构如美国机械工程师学会（ASME）、美国宇航局（NASA）等都参与了这一领域的研究，且投入了大量的资金；不少的高校和企业也都设立了诊断技术研究中心，美国的一些公司如 Bentley、HP、Scientific-Atalanta 等，它们的检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，而且具有较高的诊断功能，在军事、化工等方面具有广泛的应用；其他一些国家故障诊断技术方面的发展和应用也是各有特色、各具优势，如英国在摩擦诊断方面、丹麦在振声诊断方面等。

我国的故障诊断技术发展于 20 世纪 70 年代末，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。西安交大、华中科技大学、哈尔滨工业大学、南京理工大学等高校的研究成果较为先进，如西安交通大学研制的“大型旋转机械计算机状态监测系统及故障诊断系统 RMMD”、华中科技大学开发出的“汽轮机工况监测和诊断系统 KBTGMD”、哈尔滨工业大学的“微计算机化机组状态监视与故障诊断专家系统 MMMDES”、南京理工大学 CIMS 研究所承担的国防科工委长春 FMS 实验中心检测监控系统的研制任务等。综合我国系统设备诊断技术的现状，其应用主要集中在化工、电力、冶金、矿井等行业。

从 20 世纪 70 年代至今，我国的设备诊断技术从早期偏重故障机理与诊断方法的研究发展到今天的故障诊断专家系统，许多学者为此做了有益的工作，但我们也看到目前我国水电机组和风机运行状态在线监测系统仍然存在监测点少、功能单一、缺乏系统性和综合性等问题，这将严重妨碍水电机组和风机状态信息的集中和综合，妨碍了从单一诊断向综合诊断的过渡。对于如何实现水电机组和风机状态信息的系统监测，确定出水电机组和风机状态监测系统的结构模式，仍然有许多问题需要研究。同时，诊断技术所诊断的故障也比较单一，尚不能综合利用各类监测装置的信息以提高诊断能力。因此，研制能够系统运用各机组状态监测数据，具有自动知识获取能力且能进行高速推理的水电机组和风机状态在线监测与故障诊断专家系统，已经成为今后研究开发的一个主要方向。

### 1.3 故障诊断的方法与技术

设备故障诊断方法可简单地划分为传统诊断方法、数学诊断及智能诊断方法。传统诊断方法包括振动检测技术、油液分析技术、噪声检测技术、红外测温技术、声发射技术以及无损检测技术等。数学诊断方法包括基于贝叶斯决策判别以及基于线形与非线形判别函数的故障诊断法、模糊诊断原理、灰色系统诊断法、故障树诊断法、小波分析法以及混沌分析与分形几何法等。智能诊断方法包括模糊逻辑、专家系统、神经网络、支持向量机、进化计算方法等。

设备故障诊断技术是一种了解和掌握设备在使用过程中的状态，确定其整体或局部是否正常，可以在早期发现故障及其原因，并能预报故障发展趋势的技术。设备故障诊断技术发展至今，已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术，设备故障诊断技术主要包括三个基本环节：故障信息检测、信号分析处理、故障诊断。

### 1.3.1 故障信息检测

设备故障诊断技术属于信息技术范畴，其诊断依据是被诊断对象所表征的一切有用信息。没有信息，故障诊断就无从谈起。对设备来说，主要通过传感器（如振动传感器、压力传感器等）来采集信息，因此传感器的类型、性能和质量、安装方法以及位置往往是决定诊断信息是否会失真或遗漏的关键。

在故障信息检测方面，国内在传感器设计方面已趋成熟，也有批量生产。但在传感器材料、生产工艺以及可靠性、长期稳定性方面与国外相比尚存在较大差距。故障信息检测与传感器技术的发展趋势是高可靠性与长期稳定性的检测与传感技术，固定植入式和介入式检测与传感技术，故障信息遥测技术，振动测量用光纤传感技术，声发射技术。传感器技术将继续是状态监测和故障诊断的重要内容。随着微电子技术、光电技术和精密机械加工技术的发展与传统的传感器技术相结合，传感器将向微型化、多参数化、数字化、实用化方向发展。

### 1.3.2 信号分析处理

由传感器获得的信息往往是杂乱的，其特征不明显、不直观，很难加以判别。信号分析处理的目的是把采集的信号通过一定的方法进行变换处理，从不同的角度获取最敏感、最直观、最有用的特征信息。分析处理方法的选择、结果的准确性以及表示的直观性都会对诊断的结论产生较大影响。

信号的分析处理提取故障特征是故障诊断的核心，对于确诊故障起着十分重要的作用。在故障诊断学科的发展过程中，最关键同时又是最困难的问题就是对信号的分析处理提取故障特征，它直接关系到故障诊断的准确性和故障早期预报的可靠性。深入研究设备故障的信息，分析处理并获取故障的特征信息，是故障诊断学科今后发展的重要方向。

在信号处理领域正朝着非线性、非平稳信号处理及其特征提取研究，包括小波分析、支持向量机、希尔伯特-黄变换、经验模式分解（EMD）、盲源分离法，周期平稳（Cyclostationary）信号处理、故障特征提取方法，微弱故障信号的提取理论等方向发展。

### 1.3.3 故障诊断

故障诊断包括对设备运行状态的识别、判断和预报。它充分利用信号分析处理所提供的特征信息参数，运用故障诊断知识和经验，对设备状态进行识别、判断，并对其发展趋势进行预测、预报，为设备维修决策提供技术依据。

在诊断理论、方法和技术方面，面向设备的故障诊断正朝着人工智能理论及系统，基于 Internet 的分布式智能状态监测与故障诊断技术及系统，基于行为与基于知识的诊断理论及其应用研究，多代理（Multi agent）诊断理论、方法及应用研究，多变量、非线性系统建模、预报、辨识与控制研究，人工智能技术应用基础研究（包括 GA、模拟退火算法、神经网络、数据融合）等方向发展；由于每种方法都有其适用范围，在故障诊断方面总有其局限性，为了提高故障诊断准确性和效率，通过将两种或两种以上的故障诊断方法进行优势集成已逐渐成为故障诊断领域的发展趋势。

### 1.3.4 故障诊断技术的发展趋势

目前故障诊断技术已取得了较大发展，但由于设备结构复杂，集成化程度高导致的设备故障的复杂性以及故障原因与征兆之间关系的复杂性，使故障诊断具有一种探索性过程的特点。所以在设备故障诊断中仍存在以下一些不容乐观的问题：

1) 诊断方法重理论推导，轻实践检验，或理论与实践没有有机结合。新的诊断方法往往是不完善的，即使理论推导正确也要经过实践的检验。由于故障诊断的复杂性，诊断方法应该不断经过实验、改进、再实验，最后完善的过程。现有方法有很多经不起实践检验，往往是基于理想的软件仿真所判断的结果，这和真实的转子或实验台诊断不能相比，在一定程度上掩盖了某些方法误诊率高的缺点。

2) 诊断中运用手段单一，难于揭示复杂的故障规律。故障诊断过程必不可少的内容有信号检测、信号处理、特征提取、故障确认。在旋转机械故障诊断中，监测信号一般使用振动信号，而振动信号的分析一般采用以 FFT 为核心的信号处理方法，也就是通常所说的频谱分析方法，提取 1 倍频、1/2 倍频、2 倍频等特征，然后通过这些特征和故障间的关系，采用模糊和神经网络来确认故障。频谱分析方法要求信号是平稳的，而当机械设备出现故障时，所测得的信号就包含了大量的非平稳信号成分。对非平稳信号也可以进行频谱分析，然而分析的结果是在整个被分析时间段上的平均，不能反映信号突变的细节，难以揭示复杂的故障规律。

3) 诊断的准确率还不是很高。据国内外公开文献报道，现有工程用故障诊断软件的故障诊断的正确率还不高，对故障的误诊可能直接影响运行人员的操作，有时更会延误时机，这在很大程度上限制了故障诊断软件的工程应用。

故障诊断技术是随着当代前沿科学的发展而发展的。其发展趋势应是传感器的精密化、多维化，诊断理论、诊断模型的多元化，诊断技术的智能化，具体表现在以下几个方面：

① 采用现代信号处理方法。如小波分析、支持向量机、希尔伯特—黄变换、经验模式分解 (EMD)、盲源分离法、联合时频分析、维纳分布等时频分析法将信号同时变换到时域和频域，对非稳态信号的处理获得了较好的效果。

② 与现代智能方法的融合。随着智能技术的不断发展，采用各种智能方法以及多种智能方法的综合，对机组实施状态的智能监测和故障的智能诊断，将是机组监测与诊断技术的最终目标。

③ 与多传感器信息的融合。为了对水电机组的运行状态有整体的、全面的了解，必须对机组进行全方位、多角度的监测。因此，可采用多个传感器同时对机组的多个参数进行监测，然后按照一定的方法对这些信息进行融合处理。

④ 诊断系统将由集中式向分布式、网络化方向发展，利用各种通信手段将故障诊断系统与数据采样系统结合起来组成网络，有利于对机组的管理，减少设备投资，提高系统利用率，并与企业的 MIS 系统相连接，进一步促进企业管理现代化。

## 第2章 旋转机械振动故障机理研究

### 2.1 旋转机械振动故障的特点

#### 2.1.1 水轮发电机组振动故障的特点

根据振动诱发原因，水轮机组的振动原因分为三类：机械、电磁、水力脉动。电气及机械的缺陷引起机组振动的机理是由于电磁及机械所产生的激励力的频率与机组转动的频率形成共振致使机组振动，因此在振动理论中可将电磁及机械引起的振动归为激励力的作用，由这类原因引起振动的重要特征是振动频率等于转频或转频的整数倍。而水力脉动所引起的振动是机组振动的主要原因（其也是由于作用于转轮上的激励力所引起的振动），其表示形式如下：

① 水流绕流叶片引起的水力脉动。它包括由于工况不好引起的和叶形不好引起的两种情况。这是最主要、也是最常遇到的激振原因。转频、叶频及导叶频率三个系列的压力脉动均属此类。

② 卡门涡，它只在叶片形状及尺寸不适当时才易出现。

③ 尾水管涡带，该形式多发生在螺旋桨式水轮机及转桨式水轮机螺旋桨工况下。

④ 蜗壳进水不均匀，流道不对称。

⑤ 其他。如由上述原因激发的其他水力脉动等。原理也是由于上述原因所引起的频率与机组转动频率形成共振而产生振动。

水轮发电机组振动故障的特点还表现在以下几个方面：

1) 水轮发电机组振动故障的渐变性和耗损性。水轮发电机组的转速与其他旋转机械的转速相比明显较低，因此水轮发电机组振动故障的发展一般属于渐变性或耗损性故障，有磨损和疲劳特征，突发的恶性事故较少。如水轮机部件因空化或泥沙磨损等原因导致的振动，这是水轮发电机组振动故障的一个主要特点。正是由于故障的发展有一个从量变到质变的渐进过程，使得利用状态监测和趋势分析技术，捕捉事故征兆，早期预警，防范故障变得相对容易和准确。

2) 水轮发电机组振动故障的复杂多样性。水轮发电机组是一个涉及机械、电磁和水力的复杂系统。在机组运行中，除了机械因素外，还有电磁和水力因素的影响，使得机组某些部件产生振动，而且机械、电磁、水力这三者在机组运行中是相互影响的。因此，机组振动可能是机械、电磁、水力三者中的某一个因素引起的单一振动，也可能是几种因素共同作用的耦合振动，振动机理比较复杂，直观判断和简单的测试手段有时还很难找到主导性故障原因。

3) 水轮发电机组振动故障的特殊性。整个水电站的设计、施工受地理位置、地质状况和经济技术等多方面的影响，因此每个水电站都是专门设计的。同时水电机组运行条件还会受到电网、水温、气候和现场安装等诸多因素的影响，有些影响是不可预知的。这就使得不

同电站，甚至同一电站的不同机组的振动情况很不一样，特殊案例比比皆是。这对通用型故障诊断系统的研究是一个极大的挑战。

为了讨论问题的方便，通常根据水轮发电机组主要三类振源所导致的不同类型的振动分别进行分析研究。

### 1. 机械原因引起的振动

机组转动部件因不平衡、弯曲或部件脱落等原因造成的振动。

机组对中不良、法兰连接不紧或固定件松动所引起的振动。

机组固定部件与转动部件产生碰摩所引起的振动。

导轴承间隙过大或推力轴承调整不良等原因而引起转子的不稳定运动等。

机械原因引起的振动的机理，振动的各种特征以及对机组的影响都和一般旋转机械的振动没有本质上的差别。值得注意的是，大中型水轮发电机组一般是立轴的，从理论上讲各部导轴承不承受静载荷，轴颈无静偏心，这与一般卧轴的旋转机械不同，所以有些情况不能照搬。

### 2. 水力原因引起的振动

由于设计或制造的原因，导叶或叶片的出口边产生卡门涡，引起中频和高压脉动，其振动频率与导叶或叶片数有关。

叶片进口水流冲角太大，导致叶片头部脱流，形成叶道涡和二次流，引起高频和中频压力脉动，压力脉动的频率为叶片数的倍数。

叶片出口流速的圆周分量过大，在尾水管内产生强烈的旋涡流动，引起低频压力脉动，压力脉动的频率一般为  $1/6 \sim 1/3$  转频。

由于转轮止漏装置中的压力脉动，其脉动频率接近转频；在小负荷工况下，许多机组存在一个小负荷振动区，其振动频率略高于转频。

其他一些偶然因素引起的水力共振，如阀门、调速器的液压系统等。

水轮发电机组水力振动的特点是水力振动随工况而变化，当机组的工作水头不变时，水力振动的幅值随流量或负荷的改变而变化；在同样的负荷下，水头的不同水力振动也不一样：在某些条件下，相同的水头和流量的情况下，机组的气蚀系数不同，水力振动也不同。这就使得趋势分析变得比较困难。水电机组水力振动的另一个特点是模型与原型机组之间的换算关系难以确定。当模型和原型相似时，在相应的工况点运行，性能的静态值是可以换算的，如水轮机的效率。而动态值的测量却并非如此，即使是水力相似的系统。在模型水轮机上进行压力脉动测量时，测量的结果是模型和整个试验台系统的特性。通常，力的作用和它的响应之间可以用一种换算关系表达。一座模型试验台只有一个唯一的换算关系，它将产生唯一一种与激振力有关的响应。如果这种换算关系不是唯一的，那么就可能出现激振力的放大或衰减，从而产生与激振不同的响应。由模型的动态响应来预测原型的动态响应，必须确定模型和原型之间的换算关系。通常，水流通道的动态模拟应包括引水管、尾水管和所有有关的边界条件，这实际上是很难达到的。这就使得通过实验室的模型试验来确定原型的水力振动变得比较困难。

### 3. 电磁力引起的机组振动

发电机定子和转子间气隙不均匀。

转子及磁极线圈匝间短路。

发电机转子主极磁场对定子几何中心不对称等。

这些作用力不但引起发电机转动部分的振动，也将激起发电机定子及支承等固定部件的振动。

### 2.1.2 风机振动故障的特点

风机构成部件有叶轮、转子轴、轴承、密封、联轴器、定子或机器壳体等。风机的主要功能是由旋转部件来完成的，转子是其最主要的部件，旋转机械发生故障的主要特征是机器伴有异常的振动和噪声，其振动信号从幅域、频域和时域反映了机器的故障信息。了解风机在故障状态下的振动特点和机理，对监测机器的运行状态和提高诊断故障的准确率非常重要，风机运行过程中常见故障为转子不平衡、不对中、碰摩、松动、油膜涡动及振荡，轴裂纹，失稳，喘振与旋转失速等。

## 2.2 旋转机械振动故障的特征和识别

### 2.2.1 水轮发电机组振动故障的特征和识别

故障机理的研究中，为了掌握故障征兆参数与故障原因之间的对应关系，据此建立起故障样本数据库，并作为系统诊断知识的有效来源。因此，认识并把握机组振动故障的特点和识别方法是故障诊断研究工作的首要任务。

#### 1. 转子不平衡

由于转子部件质量偏心或转子部件出现脱落缺损造成的故障，它是机组最常见的故障。这种不平衡的惯性力可用式 (2-1) 计算：

$$R_0 = mr_c \omega^2 \quad (2-1)$$

式中  $R_0$ ——不平衡离心惯性力；

$m$ ——偏心质量；

$r_c$ ——偏心质量质心与转轴的距离；

$\omega$ ——转子的角速度。

因此，水轮机组运行时就会产生不平衡的离心力。实践表明，不平衡所引起的离心力远比不平衡磁拉力小，但它容易扩大定子和转子间隙的不均匀程度。例如，定子某一部位向内腔突出时，转子离心力方向与定子向内腔突出部位相遇，会扩大不平衡磁拉力。

转子质量不平衡引起的振动，其特征是以转频为主振幅，对机组转速变化较敏感，振幅与转速的二次方成正比；机组水平方向振动较大；转子的轴心轨迹为圆或椭圆。而且，不平衡的离心惯性力越大，机组振动越剧烈。振动幅值的变化与不平衡产生的原因有关。

1) 发电机转子不平衡。根据发电机的大小，磁极的质量约为 2270 ~ 4540kg，凸极低速发电机的平衡质量是根据转子的速度和质量决定的，一般需要 9 ~ 68kg (20 ~ 150lb) 的平衡质量，在进行磁极更换检修时，当无法精确称量磁极质量时，将导致发电机转子不平衡。其特征是在上、下机架产生转频 (1 倍) 的振动，而且上、下机架导轴承的相位不变。由于这种初始的不平衡，在运行初期机组的振动就处于较高的水平 (图 2-1a)。

另外，大中型水轮机组的主轴的尺寸比较大，由于其材质不均、毛坯有缺陷、加工和安

装误差、结构设计不合理等原因，也会造成初始不平衡。

2) 涡轮叶片不平衡。严重的气蚀或水流中的泥沙等颗粒对轮叶的不均匀磨损导致涡轮叶片金属缺失，不均匀的焊接修理或是石块进入涡轮叶片之间都可以引起涡轮叶片不平衡。这种不平衡为渐变不平衡，其振动特征是在运行初期的机组振动较低，但随着时间的推移，振动幅值将逐步升高（图 2-1b）。

3) 转子部件脱落与转子质量偏心引起的不平衡的故障机理是相同的。但转子部件缺损的故障特征是在机组运行过程中振动会突然发生变化而后趋于稳定，振动的幅值一般有较明显的增大（图 2-1c）。

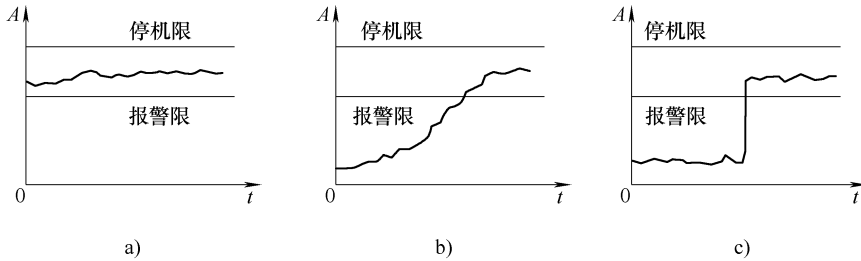


图 2-1 几种不同性质不平衡的振幅变化趋势  
a) 初始不平衡 b) 渐变不平衡 c) 转子部件脱落

### 2. 转子不对中

由不对中导致的水轮发电机组的振动是很常见的故障。机组通常由法兰连接主轴和发电机轴，轴系用来传递运动和转矩。转子不对中则是指这两转轴的轴线不在同一条直线上，许多轴承的不对中是由于轴承磨损和漏水封闭的侵蚀造成过大的间隙而形成的。具有不对中故障的转子系统，在其运转过程中将产生一系列对机组有害的动态响应，例如引起机组的振动、联轴器的偏转、轴承的磨损和油膜的失稳、轴的挠曲变形等，危害极大。

常见的轴系不对中有 3 种情况（图 2-2）：平行不对中、角度不对中、综合不对中。

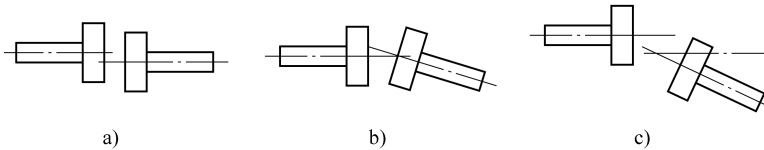


图 2-2 转子不对中的三种形式  
a) 平行不对中 b) 角度不对中 c) 综合不对中

产生转子不对中故障的原因是多方面的，主要原因如下：

1) 制造误差。在联轴器加工过程中，端面与轴心线不垂直或端面螺栓孔的圆心线与轴颈不同心。

2) 安装及其他影响。在排除了加工误差引起的不对中后，实际上可以将不对中分为冷态不对中和热态不对中两种情况，其中冷态不对中主要是指在室温下由于安装误差造成的对中不良，热态不对中指机组在运行过程中由于高温等因素造成的不对中，其主要原因包括基础受热不均；机组各部件的热膨胀变形和扭曲变形；机组热膨胀时由于滑动表面的摩擦力及导向键磨损引起轴承座的倾斜；由于转子的挠性和质量分配不均匀，转子在安装之后产生原始弯曲，进而影响对中；地基下沉不均。上述热变形的影响，导致转子轴颈中心在轴承中的

位置发生变化。一旦轴颈与轴承的相对位置发生改变，轴承油膜的特性会随之发生改变，而且会导致在联轴器处产生附加弯矩。

在水轮发电机组中，法兰连接的转子对中不良时，由于强制连接所产生的力矩，不仅使转子发生弯曲变形，而且随转子轴线平行位移或轴线位移的状态不同，其变形和受力情况也不一样，如图 2-3 所示。

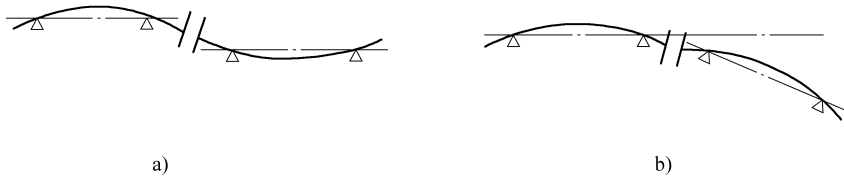


图 2-3 刚性联轴器（法兰）连接不对中

a) 轴线平行位移 b) 轴线角度位移

用刚性联轴器连接的转子不对中时，转子往往是既有轴线平行位移，又有轴线角度位移的综合状态，转子所受的力既有径向交变力，又有轴向交变力。

弯曲变形的转子，由于转轴内阻现象以及转轴表面与旋转体内表面之间的摩擦而产生的相对滑动，使转子产生自激旋转振动，而且当主动转子按一定转速转动时，从动转子的转速会产生周期性变动，每转一周变动两次，因而其振动频率为转子转动频率的 2 倍。

转子所受的轴向交变力如图 2-4 所示，其振动特征频率为转子的转动频率。

因此，转子不对中故障的基本振动征兆如下：

- 1) 振动信号的时域波形为畸变的正弦波。
- 2) 径向振动信号频谱图中，以 1 倍频和 2 倍频分量为主，轴系不对中越严重，其 2 倍频分量所占的比例就越大，多数情况超过 1 倍频分量。
- 3) 轴向振动的频率以转频为主。
- 4) 振动对负荷的变化比较敏感，一般振动幅值随负荷的增加而升高。

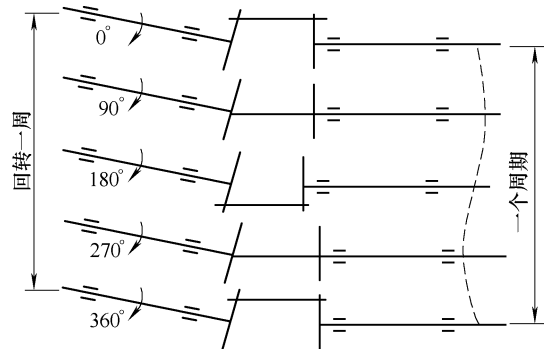


图 2-4 转子不对中的轴向振动

### 3. 转子弓形弯曲

转子质量不平衡是由于转子各横截面的质心连线与其几何中心线存在偏差，而转子弓形弯曲是指各横截面的几何中心连线与旋转轴线不重合（图 2-5），两者都会使转子产生偏心质量，从而使转子产生不平衡振动。弯曲转子具有与质量不平衡转子相似的振动特征，所不同的是弯曲转子在转子两端产生的锥形运动在轴向有较大的工频振动。

另外，转轴弯曲时，由于弯曲产生的弹力和转子不平衡力所产生的离心力相位不同，两者之间会有所抵消，即在某个转速上，转子的振幅会产生一个“低谷”。

转子弓形弯曲的原因有设计制造缺陷（转子结构不合理、材质性能不均匀），转轴长期停放不当、热态停机时未及时盘车或遭凉水急冷，升速过快或局部碰摩产生温升致使转子热变形不均匀等。