



“十二五” 江苏省高等学校重点教材

水力机组状态监测 与故障诊断

郑源 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



“十二·五” 江苏省高等学校重点教材

水力机组状态监测 与故障诊断



郑 源 主 编

屈 波 潘 虹 葛新峰 副主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统讲述了水力机组状态监测与故障诊断技术的原理、方法、实施技术和应用。全书共分6章,主要介绍了状态监测常用传感器,水力机组状态监测技术,状态监测信号的采集与特征提取,水力机组故障机理分析,水力机组智能故障诊断模型等内容。

本书可作为能源与动力工程专业(水动方向)及相关专业的本科生教材,也可供水利水电工程、流体机械及工程等方向的研究生使用,还可供从事水轮发电机组安装检修、试验研究、运行管理的广大科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力机组状态监测与故障诊断 / 郑源主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2016.6
“十二五”江苏省高等学校重点教材
ISBN 978-7-5170-4519-9

I. ①水… II. ①郑… III. ①水力机组—设备状态监测—高等学校—教材②水力机组—故障诊断—高等学校—教材 IV. ①TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第197972号

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2015—2—073)

书 名	“十二五”江苏省高等学校重点教材 水力机组状态监测与故障诊断
作 者	郑源 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 243千字
版 次	2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

截至 2014 年年底,我国水电总装机容量已经突破 3 亿 kW,居世界第一。随着金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、黄河上游干流等 6 个大型水电基地以及雅鲁藏布江等河流上重点水电站的开工建设,预计 2020 年我国水电装机容量将达 4 亿 kW。随着水电开发程度的不断扩大,水力机组也日趋向高水头、高效率和大容量发展。另一方面,由于水力机组启、停迅速,负荷调整快速方便,在电网中承担了大量的调峰、调频、调压和事故备用任务,对于设备的工况切换要求愈加频繁。这些都对机组的安全稳定运行提出了更高的要求。

随着传感技术、信号处理与分析技术、网络及远程控制技术、计算机技术以及相关科学技术的快速发展,从 20 世纪 90 年代,我国开始探索以状态检修为特征的维修模式。水电站以先进的监测技术为前提,有针对性地开展机组运行设备监测,以智能诊断技术为手段,准确可靠的对运行设备的故障、缺陷、寿命进行分析决策,实施预测维修制度,给水电站及电网带来了显著的经济效益和社会效益。目前,水力机组状态监测与故障诊断已成为当今水电站运行保障技术发展的必然趋势。

本书共分 6 章,系统地介绍了水力机组状态监测与故障诊断相关的传感器监测及信息分析处理的基础知识和水电站实际运行过程中的状态监测技术和故障类型,同时增加了近年来新知识、新理论、新技术在水力机组状态监测与故障诊断专业领域的应用内容,充分反映了专业与学科前沿的发展趋势,结合工程实例对主要的技术难点和研究方向进行了介绍。主要内容有:第 1 章绪论,阐述了水力机组状态监测与故障诊断的任务和技术发展;第 2 章状态监测常用传感器,介绍了传感器的选用原则和工作原理等基础知识;第 3 章水力机组状态监测技术,介绍了水力机组监测项目和主要技术难点;第 4 章状态监测信号的采集与特征提取,介绍了信号采集和特征提取的常见方法和图谱;第 5 章水力机组故障机理分析,介绍了水轮机和发电机发电机的振动机理;第 6 章水力机组智能故障诊断模型,介绍了机组故障诊断的智能算法并列举了相关应用实例。

本书由郑源主编，屈波、潘虹、葛新峰副主编。郑源编与第1章与第5章，潘虹编写第2章、第3章与第4章，葛新峰编写第6章，屈波对全书进行了审核与校队。本书参阅了国内外大量著作与文献资料，在此表示衷心谢意。

由于编者水平和精力有限，书中难免有不妥之处或错漏的地方，请广大读者批评指正。

编者

2016年2月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 水力机组状态监测与故障诊断的研究	1
1.2 水力机组状态监测与故障诊断的任务	2
1.3 水力机组状态监测与故障诊断的相关技术	3
1.4 国内外状态监测与故障诊断技术发展及应用状况	5
1.4.1 国外状态监测与故障诊断技术发展及应用状况	5
1.4.2 国内状态监测与故障诊断技术发展及应用状况	6
第2章 状态监测常用传感器	7
2.1 传感器选用原则	7
2.2 电阻式传感器	9
2.2.1 变阻式传感器	9
2.2.2 应变式传感器	10
2.2.3 应用注意事项	17
2.3 电感式传感器	18
2.3.1 自感式传感器	18
2.3.2 互感式传感器	21
2.3.3 电涡流式传感器	22
2.3.4 应用注意事项	24
2.4 电容式传感器	24
2.4.1 工作原理和分类	24
2.4.2 测量电路	26
2.4.3 应用注意事项	27
2.5 磁电式传感器	27
2.5.1 磁电感应式传感器	28
2.5.2 霍尔式传感器	29
2.6 压电式传感器	31
2.6.1 工作原理	31
2.6.2 测量电路	32
2.7 光电式传感器	33

2.7.1	工作原理	34
2.7.2	应用注意事项	37
2.8	热电式传感器	37
2.8.1	接触式热电传感器	37
2.8.2	非接触式热电传感器	40
2.8.3	应用注意事项	40
第3章	水力机组状态监测技术	42
3.1	稳定性监测	42
3.1.1	水力机组固定部件振动监测	43
3.1.2	导轴承及转子轴系状态监测	44
3.1.3	过流部件水力稳定性监测	45
3.1.4	键相监测	46
3.2	效率监测	47
3.2.1	流量监测	47
3.2.2	工作水头监测	49
3.2.3	发电机有功功率的测定	50
3.2.4	效率计算	51
3.3	空化空蚀监测	52
3.3.1	空蚀类型及产生的原因	52
3.3.2	空化空蚀监测方法	54
3.4	气隙与磁场强度监测	56
3.4.1	气隙监测	56
3.4.2	磁场强度监测	58
3.5	局部放电监测	58
3.5.1	局部放电类型及产生的原因	58
3.5.2	局部放电的表征参数	60
3.5.3	局部放电监测方法	60
3.6	轴电压监测	63
3.6.1	轴电压产生机理	63
3.6.2	轴电压监测方法	64
3.7	主要技术难点及研究方向	65
3.7.1	低频振动监测	65
3.7.2	水轮机关键部件应力与裂纹监测	67
3.7.3	水轮机过流部件泥沙磨损监测	68
3.7.4	发电机转子绕组温度监测	69
第4章	状态监测信号的采集与特征提取	70
4.1	状态监测信号的采集	70

4.1.1	信号预处理	70
4.1.2	A/D 转换	72
4.1.3	信号的截断及窗函数	75
4.2	状态监测信号的特征提取	79
4.2.1	时域分析	79
4.2.2	频域分析	82
4.2.3	信号的时频域分析	88
4.2.4	短时傅里叶变换	90
4.2.5	小波变换	92
4.2.6	Cohen 族时频分布	98
4.2.7	经验模式分解	100
4.3	状态监测常用图谱	101
4.3.1	波德图	101
4.3.2	极坐标图	102
4.3.3	瀑布图	103
4.3.4	极联图	104
4.3.5	轴心位置图	104
4.3.6	轴心轨迹图	104
第 5 章	水力机组故障机理分析	106
5.1	机组振动故障	106
5.1.1	机械振动	107
5.1.2	电磁振动	107
5.1.3	水力振动	109
5.1.4	振动分析及测振	115
5.2	水轮机空蚀与泥沙磨损破坏	118
5.3	发电机故障	118
5.3.1	发电机定子故障	118
5.3.2	发电机转子故障	119
第 6 章	水力机组智能故障诊断模型	121
6.1	故障树法	121
6.1.1	故障树分析的基本理论	122
6.1.2	故障树生成和故障源搜寻	122
6.1.3	故障树的定性分析	123
6.1.4	故障树的定量分析	124
6.1.5	故障树重要度分析	125
6.2	专家系统	126
6.2.1	专家系统的基本理论	126

6.2.2 水力机组故障诊断专家系统	127
6.3 人工神经网络	129
6.3.1 人工神经网络的发展	129
6.3.2 BP 算法及网络结构	130
6.3.3 BP 神经网络模型	131
6.3.4 BP 神经网络模型的局限性及优化策略	132
6.4 基于免疫系统的故障诊断	133
6.4.1 免疫系统的故障诊断概述	133
6.4.2 水力机组运行状态空间描述	133
6.4.3 故障诊断系统与人工免疫系统的映射关系	133
6.4.4 基于免疫应答机制的水轮发电机组典型故障故障诊断	134
6.5 贝叶斯网络	136
6.5.1 概述	136
6.5.2 贝叶斯网络的概率论基础	137
6.6 混合模型	138
6.6.1 遗传-神经网络	138
6.6.2 粗糙集-神经网络	141
6.6.3 故障树分析与智能模型的融合	143
6.7 应用举例	144
6.7.1 Zernike 矩-粗糙集-神经网络轴心轨迹模式识别模型	144
6.7.2 基于 GA-BP 的水力机组故障诊断专家系统	147
附录 模拟轴心轨迹数据	151
参考文献	155

第 1 章 绪 论

能源紧缺是当今世界面临的共同问题。随着经济的发展,我国对能源的需求日益增加,电源总量存在巨大缺口。为解决电力紧缺问题和节能减排,水电作为一种可再生的清洁能源,势必承担起我国电力建设和能源结构调整的重任。中国无论是已探明的水能资源蕴藏量,还是可供开发的水能资源,都居世界第一。根据 2005 年全国水力资源复查成果,我国大陆水能资源理论蕴藏量在 1 万 kW 及以上的河流共 3886 条,经济可开发装机容量 40180 万 kW,年发电量 17534 亿 kW·h。2004 年,中国水电装机容量突破 1 亿 kW,超过美国成为世界水电装机第一大国。但是与欧美发达国家 70% 的水电开发率相比,我国总的水电开发率还处于较低水平,尚有很大的发展空间。截至 2010 年底,东部地区水电开发占全国的 13.8%,开发程度为 90% 以上;中部地区占全国的 29.8%,开发程度为 78.4%;西部地区占全国 56.4%,开发程度仅为 24.9%。因此,近年来我国加紧了西部水电开发的步伐,随着金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、黄河上游干流等 6 个大型水电基地以及雅鲁藏布江等河流超过 60 个重点水电站的开工建设,预计 2020 年我国水电装机容量将达 4 亿 kW 左右。届时水电装机在电网中比重将大幅提升,水电站的安全稳定运行对整个电力系统的可靠运行和国民经济健康发展将起到至关重要的作用。

随着水电开发程度的不断扩大,水力机组也日趋向高水头、高效率和大容量发展。另一方面,由于水力机组启、停迅速,负荷调整快速方便,在电网中承担了大量的调峰、调频、调压和事故备用任务,对于设备的工况切换要求愈加频繁。这些都对机组的安全性和稳定性提出了更高的要求。为保障水力机组安全稳定运行,从 20 世纪 90 年代,我国开始探索以状态检修为特征的维修模式。状态检修避免了传统事后检修或计划检修带来的检修不足和检修过剩问题,对于减少设备维修费用、延长设备使用寿命,起到了事半功倍的效果。状态检修的顺利实施有两个基本条件:一是具备先进的状态监测技术,二是具备可靠的故障诊断方法。目前,我国在水力机组状态监测与故障诊断技术的研究与应用方面,已经取得了不少成果,技术相对成熟,研制开发了一批实用产品,被广泛应用于新建大型水电站和已建成电站的技术改造,为开展状态检修提供了基础保证。

1.1 水力机组状态监测与故障诊断的研究

研究状态监测与故障诊断技术的意义,从美国德克萨斯州达拉斯电厂安装的专用诊断系统的运行情况更容易得出结论。该电厂安装的专用诊断系统(PDS)用于 7 台发电机的监测及诊断。1985 年 1 月 25 日,诊断系统发现发电机上一处发生股线破裂,该系统将仪表读数记录下来,并转换成置信度。专用系统显示这个高置信度值比报警早两个半小时。

经检查股线断裂处正是专用诊断系统的位置。修好后，1月28日开始盘车启动。若该事故继续发展下去或误诊的话，需要停机很长时间。1984年9月，诊断系统发现发电机某处导体导电不连续，因事态不太严重，机组仍继续运行三个星期直至计划停机。此时修理准备工作已完毕，三周后观察说明诊断正确。此外，该诊断系统还成功地诊断出一些小事故：如仪表失灵、修正值不佳、励磁机冷却器问题和励磁机外置出现凝结水等问题。

机组故障停机对电厂造成的经济损失用日发电量来计算是相当可观的，只要可以使每台机组每年非正常停机时间减少一天，则一次性的系统硬件投资和一年的维修费就能得到补偿。由此可见，故障诊断系统给电站带来的经济效益，既可避免维修不足造成的设备损坏，还可节省因维修而产生的巨额费用。

随着国民经济的高速发展，社会对电力的需求日益增长，担任发电、调峰、调频及事故备用任务的水电站，在系统中起着越来越重要的作用，因此原来计划检修和事后检修制度已不再适应新形势的发展，主要表现为：

(1) 新水力机组增多，并且以大容量机组为主，大部分机组运行小时数降低。

(2) 由于采用了新技术、新工艺和新材料，使得设备检修质量大大改善，检修间隔有所增长。

(3) 国外先进设备和先进技术的引进，使机组运行质量和可靠性及自动化程度大幅度提高，也使得机组大修间隔延长。

(4) 由于集中检修的推广，大多数新建水电厂不再设检修队伍。

(5) “无人值班（少人值守）”运行方式的推广，要求设备延长检修间隔，提高可靠性。

(6) 计算机的普及，使设备管理水平日益提高，对设备的管理已不再停留在记录上，而是反映在生产管理信息系统上。

因此，研究设备状态监测与诊断技术，对于确保机组安全经济运行、推进“状态检修”机制，具有重要意义。归纳起来，有以下明显作用：

(1) 及时准确地发现设备运行过程中可能出现的异常状态和故障，预防事故发生，实行状态检修，提高机组运行可靠性、安全性和有效性。

(2) 通过运行数据分析和性能评估等手段，为机组安装、制造、运行提供数据积累和信息，逐步形成实际运转特性曲线等机组性能指标，得到优化的运行工况区，指导机组高效运行，延长设备使用寿命，降低设备寿命周期费用。

(3) 促进和实现水电站的综合自动化和现代化，提高水电站的科学管理水平。

1.2 水力机组状态监测与故障诊断的任务

1. 水力机组状态监测任务

状态监测技术包括两项任务：一是获取监测对象的实时状态信号；二是对状态信号进行存储与预处理，提取实时有效信号，为状态分析提供可靠依据。水力机组状态监测对象包括机组的振动、摆度、压力脉动、能量与效率，发电机气隙、局部放电、磁通量、线棒振动以及机组各导轴承瓦温、油温、定子温度等参数。随着近年来机组状态监测技术的快

速发展,水轮机效率监测、空化空蚀监测、发电机转子温度监测等技术也开始在生产实践中投入使用。

水力机组状态监测技术的顺利实施首先需要解决以下几个技术问题:一是合理布置测度;二是正确选择测量使用的传感器;三是根据信号特点,有效采集状态信号,实现信号预处理和存储管理。只有正确实施这些关键环节,才能获得准确可靠的机组状态信号。

2. 水力机组故障诊断任务

故障诊断是利用状态监测获得的各种数据和其他信息来识别机组运行状态,分析故障产生的原因并确定故障发生的部位和严重程度,预测机组的使用规律、趋势和使用寿命。水力机组故障诊断技术多年来也取得了长足发展,除了传统的“变励磁”“变转速”“变负荷”等机组试验法、根据信号频谱分析的频率判断法、根据机组振动部位判断振动原因的方法外,在机组故障智能诊断模型方面,也提出了神经网络、模糊理论、专家系统、支持向量机等诸多诊断决策方法,建立了大量的专用故障诊断系统。

水力机组故障诊断技术的顺利实施有三个关键技术:一是机组状态信号的特征提取;二是不同类型故障的机理研究;三是准确有效的智能诊断方法。

1.3 水力机组状态监测与故障诊断的相关技术

设备状态监测与故障诊断技术研究所涉及的学科领域十分广泛,并在不断扩展。其研究内容主要有信号采集技术、信号获取技术、故障机理研究、故障诊断模型研究、故障预测与寿命分析技术、诊断决策技术。

1. 信号采集技术

信号采集是对机电设备实现状态监测与故障诊断的第一步,是故障诊断工作的重要基础,信号采集技术是对机电设备本身的工作参数、性能指标、相关物理量等信息的信号进行检测和量化的技术,而传感器则是获取各种信息并将其转换成易测量和处理的信号(一般为电信号)的器件,是信号采集的关键和主要手段。

故障信息检测与传感器技术的发展趋向如下:

- (1) 发展以高可靠性和长期稳定性为代表的检测与传感器技术。
- (2) 发展固定植入式和介入式检测与传感技术。
- (3) 发展故障信息的遥测技术。
- (4) 发展振动测量用光纤传感技术。
- (5) 发展声发射检测技术。

随着微电子技术、光电技术和精密机械加工技术与传统的传感技术相结合,传感器将向微型化、多参数、数字化、实用化发展,与之配套的二次仪表将向多功能、智能化方向发展,将导致集微传感器、微处理器于一体的智能前端微系统的问世和应用。

2. 信号获取技术

传感器采集的信号中,含有反映对象运行状态的信息,如何经过信号处理,剔除干扰,尽可能多地获得对象的状态信息,是信号获取技术研究的主要目的。信号获取技术包

括通常的信号滤波技术和信号处理技术。

概括起来,信号处理技术中状态监测参数的提取方法主要有统计分析和时域参数、谱分析和频域参数、时-频分布、高阶谱分析、小波分析技术、分形与混沌特征量等。

信息获取技术新的发展方向是传感器故障滤波证实技术和多传感器信息融合技术。

(1) 传感器故障滤波证实技术。在长时间的工作过程中,由于自身可靠性的限制和所处环境的影响,传感器同样会发生故障,其输出的畸变信号往往与监测对象的工况变化或故障信号相混淆,被诊断系统误认为是对象故障或掩盖了对象的故障,从而使监测诊断系统失去其监测诊断的功能。因此,对传感器故障进行滤波和证实(即通过检测和诊断隔离故障传感器,并通过其他正常传感器信号恢复得出剔除故障传感器后失去的特别重要的信号)是设备状态监测与故障诊断的重要环节之一。

现有的传感器故障滤波证实方法主要有系统观测器/滤波器方法、解析冗余与贝叶斯信息融合方法、人工神经网络方法、多层流模型方法、基于知识的传感器故障柔性检测方法等。

(2) 多传感器信息集成与融合技术。在设备故障诊断领域,多传感器信息集成指将多个单维的同样性质的传感器信息集成为一个多维的信息。多传感器信息融合指利用多个不同类型的传感器获取的关于对象运行状态的多角度信息,采用适当的方式和准则进行组合,以得到关于对象运行状态的精确描述。

3. 故障机理研究

故障机理研究是对机械设备进行故障诊断的基础。深入研究机械设备在运动时的动力学特性及各部件之间的相互关系,研究设备正常运行时和发生故障后产生的各种症状与可能性,是对机械设备进行状态监测和故障诊断的前提。理论研究主要有与机械设备相关的振动理论、摩擦理论、空气动力学理论、材料失效理论等。

4. 故障诊断模型研究

故障诊断模型以如何应用各种知识的诊断策略作为研究目标。一般来说,人类专家在诊断问题求解时,通常使用三种知识:一是常识性知识;二是基本的领域知识,即深知识;三是启发性知识,即浅知识。专家能按照被诊断对象的实际情况以高度集成的方式使用这三种知识。相应地,故障诊断模型可分为深知识模型、浅知识模型和深浅知识混合模型。但对复杂系统,新的研究方向是层次诊断模型。

5. 故障预测与寿命分析技术

故障预测是设备诊断的重要任务之一。通过对整个设备的状态变化趋势和维修状况进行分析,计算其残余寿命,可有效确定设备的整个服役寿命和报废时间,为系统的维修、报废和改进设计奠定基础。

预测与分析的策略和方法主要有基于状态模型的故障预测方法、基于过程的长期预测方法以及集成故障预测系统等。

6. 诊断决策技术

通过对故障进行诊断,可以判明故障的部位,分析故障的原因,提出排除故障的方法,从而可以提高设备维修的可适性和设备完好性,减少设备的寿命周期费用。

1.4 国内外状态监测与故障诊断技术发展及应用状况

自状态监测与故障诊断概念提出以来,一直是国内外科研机构和专家学者研究的热点。近年来,国内外状态监测与故障诊断系统更是取得了可喜的进步,国内外均有一批比较成熟的产品投入实际应用。国内外状态监测与故障诊断产品的发展经历了以下三个发展阶段。

(1) 基本摆度、振动监测系统。这类系统主要完成机组振动、摆度的实时测量和监测报警功能,主要以替代人工百分表测量为目的,大部分该类产品不提供或提供简单的分析功能,此类产品在早期应用较多,目前只有少数电厂还在使用。

(2) 一般状态监测系统。这类系统不仅可以实现机组振动、摆度的监测,而且还可以完成气隙、磁通量、发电机局部放电、水轮机空化空蚀等多种对象的监测,并将不同的监测装置接入同一系统中,进行数据的整合,统一操作,规范功能。但是这类系统的故障诊断功能还处于探索阶段,故障诊断面向对象为实验机构和行业内专家,其复杂的故障机理很难被水电站的维护人员所掌握,作为一套功能强大的实时在线监测系统来说,在水电站尚未真正发挥出指导状态检修的作用,只能在专家的帮助下做些针对性的机组试验,这是目前普遍存在的现象,也是状态监测与故障诊断系统在水电站未得到普及和认可的根本原因。

(3) 远程分析及智能化综合故障诊断系统。为了使不同层次的工程技术人员在不具备专业背景的情况下掌握状态监测与故障诊断系统的使用,这类系统不仅能实现上述(1)、(2)中具有的功能,由于具备智能化、自动化、实用化、易操作等使用特点,还能针对机组经常出现的故障特征进行指标的量化评价,使一般的维护人员在此基础上了解机组运行状态和判断故障是否发生。

同时,网络化远程通信技术的发展使电力系统自动化越来越综合,远程分析诊断中心的建立是目前可以实现的状态监测与故障诊断系统发展的最新阶段,远程中心可以充分利用远程专家为机组的分析诊断服务,做到既分散又集中,国内目前已经形成以电力集团公司、发电流域公司、研发机构、各省中试所等机构为依托的远程分析诊断中心模式,而且其用途不但在技术层面,也为管理模式提供了新的思路。

1.4.1 国外状态监测与故障诊断技术发展及应用状况

国外状态监测与故障诊断技术的发展已有40年的历史。最早开展故障诊断技术研究的是美国,他们首先针对航空航天系统从故障机理、监测、诊断和预测的研究和开发,然后发展到电站发电机组。美国从事电站状态监测与故障诊断系统工作的主要公司有美国电力研究所(EPRI)、西屋公司(WHEC)、IRD公司、Bently公司、BEI公司等。以西屋公司为例,1976年开始在线计算机诊断工作,1980年投入了一个小型的电机诊断系统,1981年进行电站人工智能专家故障诊断系统的研究,1984年应用于现场,后来发展成大型电站在线监测诊断系统,并建立了沃伦多故障运行中心,通过该中心,可以看到分布在美国20多个电厂的数据信息。欧洲也有不少公司从事状态监测与故障诊断技术的研究、

产品开发及应用,如丹麦的 B&K、德国的申克、瑞士的 ABB 公司等。以瑞士 ABB 公司为例,1971 年引入第一个计算机辅助数据采集系统 (CADA),目前正在大力发展以计算机为前终端核心的人机联系振动观察系统,并以诊断软件为模型精确诊断机器故障。

近年来,国外在水力机组状态监测与故障诊断方面做了大量研究及应用工作,在原有的振摆监测诊断产品基础上,研制开发了一批实用产品,如加拿大 VibroSystM 公司的 AGMS 系统和 ZOOM2000 系统,分别用于监测发电机的气隙和水轮发电机组的振动;加拿大 FES 公司的水轮发电机局部放电分析仪、德国申克公司的 Vibrocontrol4000 系统,主要用于水轮机振动的监测和分析;此外还有美国本特利内华达公司的 Hydro VU 系统,瑞士 VIBRO—METER 公司的 VM600 系统,德国 Simens 公司的 SCARD 系统,日本日立公司研制的水力发电设备状态监测系统、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等。总的来说,国外状态监测与故障诊断技术的研究发展较快,产品测量元件精度高、可靠性好,可实现机组在线连续状态监测和部分故障自动诊断功能,取得了良好的经济效益。

1.4.2 国内状态监测与故障诊断技术发展及应用状况

我国状态监测与故障诊断技术发展相对于国外较晚,国内开展设备故障诊断从 20 世纪 80 年代初开始,但发展较为迅速。目前,我国的故障诊断技术水平已接近国际水平,并且具有廉价化和使用化等特点。已开发的适合于电站水力机组的故障诊断系统达数十种以上。例如,北京华科同安监控技术有限公司的 TN 8000 监测诊断系统、华中科技大学研制的 HSJ 系统、北京奥技异电气技术研究所的 PSTA 系统、中国水利水电科学研究院研制的 HM 9000 系统、周立达电子有限公司生产的 YSZJ 系统、清华大学研制的电力设备分布式监测与诊断系统等。此外,状态监测与故障诊断系统也已经从单纯的设备监测发展到基于局域网、基于远程监测诊断的集成系统,在实时监测机组运行状态的同时,实现监测、诊断、管理、维修一体化过渡,形成了更高级预测诊断、判断决策、正确评估的平台。

尽管国内已开发出了多种状态监测与故障诊断系统,但与国外同类系统相比仍还存在着一定的差距。主要表现在:测振传感器抗高温、抗电磁干扰能力差、性能不稳定、使用寿命短;对常见故障有了共识,但某些疑难的故障机理还有待于深入研究;各种诊断方法和技术之间的内在联系的研究和多参数综合应用较少;故障诊断系统的质量较差、可靠性较低。此外,虽然通过国外合作引进等方式,国内已经从过去振摆监测为主的单一系统发展到现在的摆度、振动、气隙与磁场强度、局部放电等多种功能并存的综合系统,但是目前国内还是缺少针对机组空化、气隙、局部放电的具有自主知识产权的监测技术,这些技术仍依赖国外进口。

第2章 状态监测常用传感器

传感器是一种能感受到被测量的信息并且能将感受到的信息按照一定的规律转换成信号输出的器件或装置,可以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器处于电测系统的输入端,通常被称为一次仪表,其精度和可靠性直接影响着整个监测系统的工作可靠性和测量精度。其分类方法很多,目前常用的有两种:一种是按传感器输入量性质来划分,可分为加速度、速度、位移、温度、压力传感器等;另一种是按传感器变换原理来划分,可分为电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式、光电式、热电式传感器等。

在水力机组状态监测系统中,通过传感器将被测对象的力、位移、速度、加速度、温度、压力等参数转换为可以传输处理的信号(如电压信号、电流信号等)。许多水力机组监测系统不能正常工作,其主要原因是传感器选型不当导致输出失准,因此掌握传感器的原理、结构和安装对水力机组状态监测与故障诊断工作有重要现实意义。本章从传感器变换原理分类的角度阐述常用传感器的工作原理、结构、特性及应用注意事项。

2.1 传感器选用原则

传感器的品种繁多。同一物理量可用多种不同类型传感器进行测量,而同一种传感器也可测量不同物理量。事实证明,传感器选择不当导致试验失败的例子屡见不鲜。了解传感器的性能对合理选择传感器十分必要。衡量传感器的性能指标有静态特性和动态特性两个方面。静态特性是指传感器在输入量处于稳定状态时的输入输出关系,主要包括灵敏度、线性度、重复性和精度;动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性,它决定了被测量的频率范围,必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件。一般来说,传感器的合理选择要从静态特性、动态响应特性和测量方式(接触测量与非接触测量)三个方面综合考虑。此外,还要注意使用条件和安装方式。

1. 量程

传感器能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围称为传感器的量程。在选用传感器(包括测量仪表)时首先要对被测值有大致的估计,务必使被测量值落在传感器的量程之内,否则会破坏传感器。

2. 精确度(精度)

精确度是指测量某物理量的测定值与真值相符合的程度。传感器处于测试系统的输入端,因此,传感器能否真实地反映被测量值,对整个测试系统具有直接影响。然而,也并非要求传感器的精确度越高越好,还应考虑到经济性。传感器精确度越高,价格越昂贵,

应从实际出发来选择。

水电站的测试参数，按试验内容要求的不同，有的进行静态测量，有的则需进行动态测量。

(1) 静态测量是指机组在稳定工况下准确地测量参数的稳定值。例如水轮机效率试验中的功率、水头、流量等参数的测量。静态测量要求高度精确地测量参数的稳定值，因此对传感器的要求是有较高的精确度。

(2) 动态测量是指机组在过渡过程中测量参数随时间的变化过程。例如甩负荷试验中转速与水压的测量。对动态测量的要求是真实地测出参数随时间的变化过程、特征值的大小及其出现时间以及各参数在过渡过程中的相互关系。测量精度相对较为次要。因此，要求传感器具有良好的响应特性，这样才能真实、完整地记录参数变化的全过程。

3. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下输出量变化对输入量变化的比值。

一般来说，传感器的灵敏度越高越好。因为灵敏度高，表示传感器所能感知的变化量越小，即被测量稍有微小变化时，传感器就有较大输出。但灵敏度越高，与测量信号无关的外界噪声也容易混入，并且随测量信号一起被放大。所以要求传感器信噪比越大越好，即要求传感器本身噪声小，又不易从外界引进干扰噪声。

灵敏度过高往往导致在输入信号增大时，传感器进入非线性区域，所以，灵敏度过高会影响其适用的测量范围。

4. 线性度

线性度表示传感器的输出与输入之间的关系曲线与选定的工作曲线的偏离程度。

传感器的线性度是用特性曲线与其选定的工作曲线（也叫拟合直线）之间的最大偏差与传感器满量程输出之比来表示。任何传感器都有一定的线性范围，在线性范围内输出与输入成比例关系。线性范围越宽，则表明传感器的工作量程越大。

传感器工作在线性区域内，是保证测量精确度的基本条件，然而，任何传感器都不容易保证其绝对线性，在允许限度内，也可以在其近似线性区域应用。例如变间隙式的电感传感器，就是采用在初始间隙附近的近似线性区内工作。选用时必须考虑被测物理量的变化范围，令其非线性误差在允许的范围内。

5. 迟滞

迟滞表示传感器输入量由小到大与由大到小所得输出不一致的程度。迟滞在数值上是用同一输入量下最大的迟滞偏差与满量程输出之百分数表示。产生迟滞的原因是传感器的敏感元件存在弹性滞后。选用传感器时要求此值越小越好。

6. 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向做全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。根据误差理论知，重复性误差是属于随机误差性质的。因此应根据标准差来计算重复性误差。

7. 零点漂移

零点漂移表示在零输入的状态下，输出值的漂移。一般有如下两种零漂。

(1) 时间零漂，指在规定时间内，在室温不变的条件下零输出的变化。