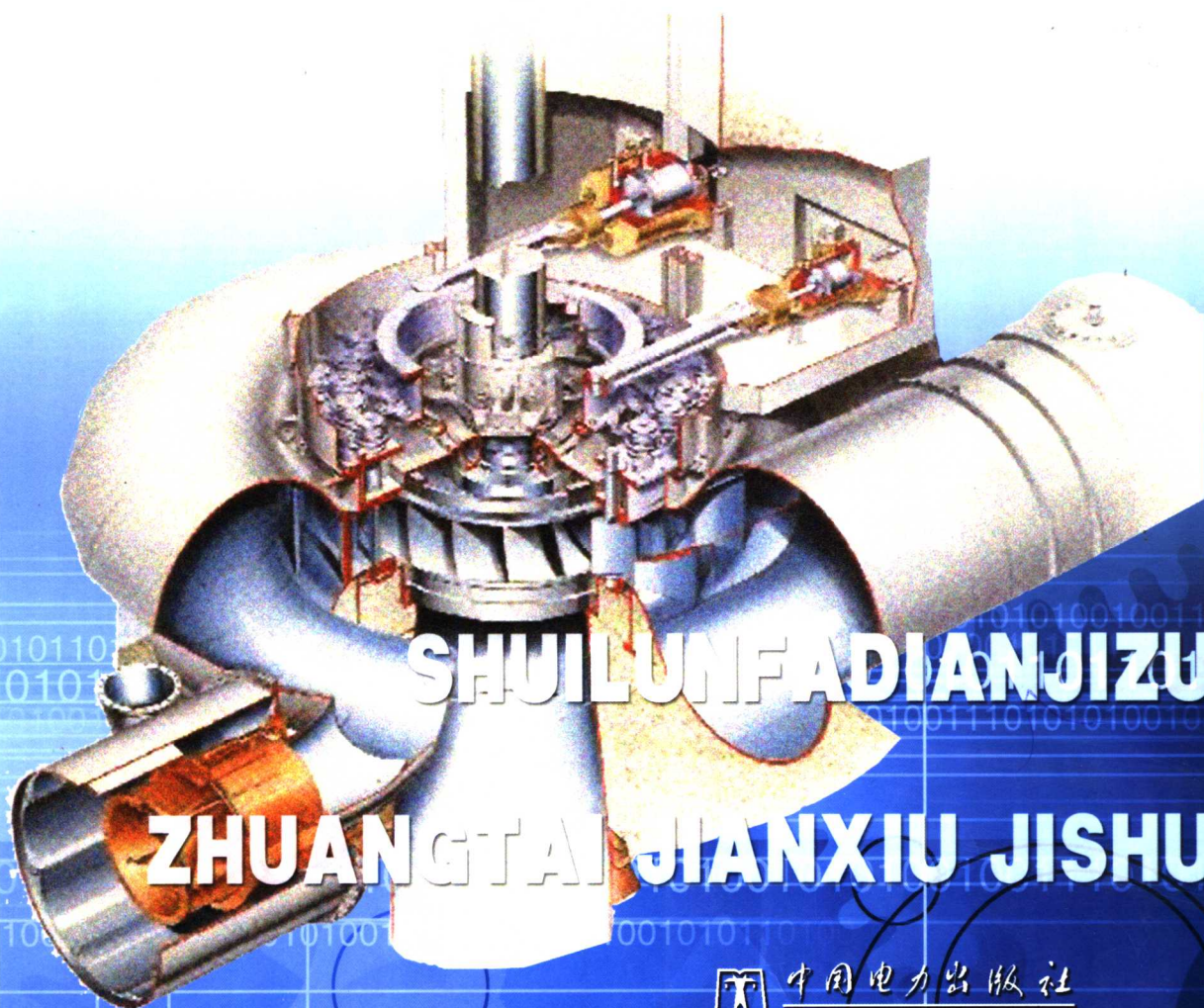


王海 著

水轮发电机组

状态检修技术



SHUILUNFADIANJIZU

ZHUANGTAI JIANXIU JISHU



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

水轮发电机组

状态检修技术

王海 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内容提要

本书介绍了水轮发电机组的状态监测、性能试验、数据分析、故障诊断、状态分析、维护决策等技术及其应用,深入浅出、理论联系实际地论述了水轮发电机组的状态检修技术。本书以作者开发的水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析等系统为例,该系统已应用于我国十余座大中型水电厂,多次获奖,从而为本书提供了具有说服力的案例。

本书可作大专院校相关专业的教材,也可作水电厂技术人员的远程培训教材或远程自学读物。

图书在版编目(CIP)数据

水轮发电机组状态检修技术 / 王海著. —北京: 中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-2510-9

I. 水… II. 王… III. 水轮发电机-机组-检修 IV. TM312.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 085974 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 10 月第一版 2004 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 166 千字

印数 0001—3000 册 定价 15.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

水力发电在我国能源生产中扮演着极为重要的角色，国家有关部门对水力发电的安全稳定生产提出了较高的要求。水轮发电机组是水电厂的关键主设备，它的运行状态直接关系到水电厂能否可靠、经济地提供电力，也直接关系到水电厂的安全。

过去，我国水电厂水轮发电机组主要采用“按计划检修”或“出事故后检修”的方式，这两种检修方式都存在着不同程度的弊病，而国外部分发达国家已将在线故障诊断技术成功地应用于发电机组。为了填补我国水轮发电机组检修科技领域的这一空白，作者与同事一起组成了华中科技大学能源与动力工程学院流体机械教研室水机测试及诊断课题组（文中简称课题组），从 20 世纪 80 年代末即开始致力于水轮发电机组各项性能试验和非电量状态监测的研究，已完成相关的科研课题或项目 20 余项，开发出水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统，进而对水轮发电机组状态检修系统及其相关技术进行深入研究。

由于对发电机组运行状态的实时监测和对机组状态的正确评估是保证机组安全和经济运行的重要措施之一，也是电厂实现“无人值班、少人值守”的现代管理模式的需要，所以上述研究成果已引起有关方面的高度重视，已在三峡、二滩、葛洲坝、刘家峡、李家峡、八盘峡、隔河岩、高坝洲、五强溪、大朝山、天荒坪、天生桥一级、富春江、十三陵、丰满、白山、青铜峡、陈村等十余座大中型水电厂实际应用。

上述系列研究成果获得用户的好评，并已分别获（原）国家教育委员会科技进步二等奖（1996 年 6 月）、国家级科技进步三等奖（1996 年 12 月）、国家电力公司科技进步二等奖（2001 年 10 月）、湖北省科技成果推广二等奖（2001 年 12 月）。由作者参与设计开发的产品被国家电力公司列入水电工程主要机电设备推荐名录（2000 年 11 月）。这套系统的研究、实施和完成将有利于建立科学可靠、切实可行、经济实用的监测和故障诊断系统，有利于我国大中型水电厂实现水电机组检修的技术革命。

本书是作者多年研究工作与实际应用的总结，书中内容结合现场应用实例，深入浅出，理论联系实际，毫无保留地介绍了作者在水轮发电机组状态检修技术方面的研究成果。

本书主要包含以下几个方面的内容：

- （1）水轮发电机组状态检修系统的总体设计。
- （2）小波分析方法在状态检修系统中的应用研究。
- （3）尺度熵原理及其应用研究。

- (4) 轴心轨迹特征自动识别方法研究。
- (5) 水轮发电机组转子动平衡方法及应用研究。
- (6) 水轮发电机组低频振动异常信号分析研究。
- (7) 惯性式低频振动传感器信号重构研究。
- (8) 水轮发电机组摆度信号的相位校正。
- (9) 水轮发电机组导叶漏水量计算分析实例。
- (10) 水轮发电机组振动分析实例。

目前在水轮发电机组状态检修技术方面的研究和应用还有待不断地完善,笔者殷切希望与各类水电厂、有关研究单位和其他有关部门合作,殷切希望大专院校相关专业的师生关注上述研究,共同深入探讨适于各类情况下的水轮发电机组状态检修技术,最终实现真正意义上的故障诊断和状态检修(联系人:武汉市华中科技大学能源与动力工程学院流体机械教研室 王海 邮编:430074)。

作 者

2004年5月

目 录

前言

➡ 1	绪论	(1)
1.1	中国水电事业的发展与展望	(1)
1.2	研究水轮发电机组状态检修系统的目的与意义	(3)
1.3	国内外状态监测、故障诊断技术的现状及发展	(5)
1.4	水轮发电机组的主要故障及其特点	(9)
1.5	水轮发电机组状态检修技术的研究方法	(11)
1.6	小结	(12)
➡ 2	水轮发电机组状态检修系统总体设计	(13)
2.1	水轮发电机组的特点及主要问题	(13)
2.2	用户需求与系统定位	(15)
2.3	系统测点布置与传感器选型	(16)
2.4	系统硬件设计	(19)
2.5	系统软件设计	(21)
2.6	小结	(29)
➡ 3	小波分析及其应用研究	(30)
3.1	小波发展历史及应用概况	(30)
3.2	小波在信号分析领域中的应用基础	(31)
3.3	监测及试验数据压缩应用	(35)
3.4	奇异信号检测及去噪应用	(39)
3.5	小结	(43)
➡ 4	尺度熵原理及其应用研究	(44)
4.1	尺度熵原理及定义	(44)
4.2	尺度熵在水轮发电机组状态检修系统中的应用实例	(46)
4.3	小结	(48)
➡ 5	轴心轨迹特征自动识别方法研究	(49)
5.1	水轮发电机组轴心轨迹的特点及重要性	(49)

5.2	轴心轨迹自动识别原理	(51)
5.3	基于人工神经网络的轴心轨迹自动识别系统的实现	(56)
5.4	小结	(58)
	6 水轮发电机组转子动平衡方法及应用研究	(60)
6.1	综合平衡法的有关原理	(60)
6.2	综合平衡法的步骤和实施方法	(62)
6.3	特殊问题讨论	(64)
6.4	应用实例	(65)
6.5	小结	(67)
	7 水轮发电机组低频振动异常信号分析研究	(68)
7.1	异常振动信号问题的提出	(68)
7.2	惯性式速度传感器的工作原理	(69)
7.3	顶盖摇动对 DP 振动传感器输出的影响	(71)
7.4	DPS 振动传感器性能参数及讨论	(73)
7.5	小结	(75)
	8 惯性式低频振动传感器信号重构研究	(76)
8.1	水轮发电机组振动信号波形畸变现象	(76)
8.2	振动信号重构原理	(77)
8.3	信号重构算法的实现	(78)
8.4	信号重构实例分析	(79)
8.5	小结	(81)
	9 水轮发电机组摆度信号的相位校正	(82)
9.1	水轮发电机组动平衡试验中摆度信号的相位偏差	(82)
9.2	信号相移的软件校正基本原理	(83)
9.3	软件滤波器设计	(83)
9.4	初始条件选择和误差分析	(85)
9.5	Matlab 仿真结果	(86)
9.6	小结	(87)
	10 水轮发电机组导叶漏水量计算分析实例	(88)
10.1	导叶漏水量计算分析的原理	(88)
10.2	导叶漏水量测试及计算分析实例	(89)
10.3	小结	(92)
	11 水轮发电机组振动分析实例	(93)
11.1	机组主要试验数据	(93)
11.2	机组振动原因分析	(97)
11.3	上机架有限元计算	(97)

11.4	试配重试验	(100)
11.5	小结	(101)
12	总结与展望	(102)
12.1	水轮发电机组状态检修技术及其应用的总结	(102)
12.2	进一步研究的展望	(103)
附录一	读者参考资料	(104)
附录二	作者所在课题组承担的科研项目	(105)
附录三	部分科研项目获奖证书	(106)
后记		(108)
参考文献		(109)

1

绪 论

1.1 中国水电事业的发展与展望

中国大地的地势高差极大，地形复杂多样。西南部的青藏高原是世界上地势最高的地区，延伸出许多高大山脉，向东逐渐降低。在这广袤的国土上，河流众多，径流丰沛、落差巨大，蕴藏着非常丰富的水能资源。据统计，中国河流水能资源蕴藏量 $6.76 \times 10^5 \text{ MW}$ ，年电量 $5.92 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；可能开发水能资源的装机容量 $3.78 \times 10^5 \text{ MW}$ ，年发电量 $1.92 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。不论是水能资源蕴藏量，还是可能开发的水能资源，中国在世界各国中均居第一位^[1]。

建国以来，我国水电事业取得了辉煌的成就。

从整体上看，1949 年全国水电装机容量仅 360 MW ，然而仅 1997 年一年，我国的水电在建规模即达 $3.6 \times 10^4 \text{ MW}$ ，为 1949 年全国已有水电装机容量的 100 倍；1997 年世界水电在建规模为 $11 \times 10^4 \text{ MW}$ ，我国当年水电在建规模约占世界的 1/3；1998 年全国水电装机容量已达到 $6.5 \times 10^4 \text{ MW}$ ，为 1949 年的 180.6 倍，平均每年递增 11.2%；到 1998 年底，我国水电装机容量仅次于美国、加拿大，位居世界第三；近年来，我国水电事业飞跃发展，2000 年我国水电装机容量达到了 $7.5 \times 10^4 \text{ MW}$ ，2001 年已达到 $8.3 \times 10^4 \text{ MW}$ ；据预测，到 2005 年，全国水电装机容量将达到 $9.5 \times 10^4 \text{ MW}$ ，届时，我国水电装机容量将居世界第一，成为名副其实的水电大国；到 2010 年，三峡水电站将全部投产，全国水电装机容量可望达到 $12.5 \times 10^4 \text{ MW}$ ；2015 年我国水电装机容量预计达到 $15 \times 10^4 \text{ MW}$ 。

至于全国水电装机容量占全国发电设备装机总容量的比重，1949 年仅为 17.6%，1998 年提高到 23.5%，2000 年为 24.4%。据预测，到 2005 年，全国水电装机容量占全国总装机容量的比重将提高到 27%，2010 年以后将约为 28%。

我国水能资源的开发利用按容量计，1998 年为 16.5%，2001 年已达到 23%，2015 年将达到 40%。

从具体项目上看，20 世纪 50 年代，我们依靠自己的力量，建成了全国第一座坝高 102m、总库容 220 亿 m^3 、装机容量 662.5MW 的新安江水电站，开创了建造高坝、大型水电站的历史。20 世纪 60 年代，又以较优的质量和较快的速度建成了甘肃刘家峡

(1160MW)、湖北丹江口(900MW)等一批大型水电站。20 世纪 70 年代,相继建成了湖南凤滩(400MW)、甘肃碧口(300MW)、四川龚嘴(700MW)等水电站。20 世纪 80 年代,我国水电建设有了更大的发展,陆续建成了贵州乌江渡(630MW)、吉林白山(900MW)、青海龙羊峡(1280MW)、湖南东江(500MW)、广西大化(400MW)以及万里长江第一坝——葛洲坝(2715MW)等大型水电站。进入 20 世纪 90 年代以来,我国水电建设步入了一个快速发展的时期,被誉为“五朵金花”的岩滩(1210MW)、漫湾(1250MW)、广州抽水蓄能(一期 1200MW)、隔河岩(1200MW)、水口(1400MW)水电站相继投产。由于引进了新的机制,施工周期大大缩短,造价得到控制,质量不断提高,5 座水电站在主体工程开工后,分别仅用 4~5 年就投产发电。此外,江西万安(400MW)、云南鲁布革(600MW)、四川铜街子(600MW)、陕西安康(800MW)、湖南五强溪(1200MW)、贵州东风(510MW)、黑龙江莲花(550MW)、四川宝珠寺(700MW)、吉林松江河梯级(510MW)、青海李家峡(1600MW)、四川二滩(3300MW)、天生桥二级(1320MW)、天生桥一级(1200MW)等大型水电站也先后投产发电。

20 世纪 90 年代,我国抽水蓄能电站的建设取得了重大突破。除广州抽水蓄能电站投产外,还有北京十三陵(800MW)、浙江天荒坪(1800MW)、河北潘家口(270MW)、安徽响洪甸(80MW)、浙江溪口(80MW)等抽水蓄能电站也相继投产,并在西藏高原建成了水头高达 840m 的羊卓雍湖抽水蓄能电站(90MW)。

为了加快水电建设,我国从能源构成的战略出发,正逐步改变水电比重偏低的局面,提出了“大力发展水电,继续发展火电,适当发展核电,积极发展新能源发电,同步发展电网,促进全国联网”的能源政策。“十五”期间,国家计划重点开工建设的大型和特大型水电项目有红水河龙滩(4200MW)、澜沧江小湾(4200MW)、黄河上游公伯峡(1500MW)、沅水三板溪(1000MW)等。目前,金沙江溪洛渡(12000MW)和向家坝(6000MW)水电站正积极开展前期工作;同期,在华东、华北和东北地区筹备建设一批抽水蓄能电站,具体为浙江桐柏(1200MW)、江苏钢官山(1200MW)、安徽响水涧(1000MW)、山东泰山(1000MW)、辽宁蒲石河(120MW)、河北张河湾(1000MW)、山西西龙池(1200MW)、北京板桥峪(1200MW)、内蒙古呼和浩特(1200MW)、黑龙江荒沟(1200MW)抽水蓄能电站等。这一大批水电站和抽水蓄能电站的开工建设,将再一次把中国水电建设推向一个新的高潮。

同时,我国水电站的装备水平也在不断提高。目前,我国最大的轴流转桨式机组单机容量达到 170MW(葛洲坝),最大的轴流定桨式机组单机容量为 50MW(红石),最大的混流式机组达到 550MW(二滩),最大的冲击式机组为 36MW(以礼河三级),最大的灯泡贯流式机组达到 34MW(广西京南),最大的抽水蓄能机组为 300MW(广州和天荒坪),在建的三峡混流式机组单机容量 700MW。

在今后的 20 年内,我国将要建成世界上最大的水电站(三峡工程),世界上最高的拱坝(小湾工程),世界最高的碾压混凝土坝(龙滩工程),世界最高的混凝土面板坝(水布垭工程)。届时,不管从水电规模上,还是在技术等各个方面,我国水电工程都将雄居世界之首。

随着我国加入世界贸易组织,随着全球经济一体化的到来,中国的改革开放政策正在深入进行。中国水电积极响应和落实党和政府提出的“走出去”战略,在过去“经援、经贸”的基础上,近几年来在东南亚、非洲、中亚、南美等地区,通过水电项目入手,建立信誉,达到不断开拓市场、扩大市场占有率的目的。更重要的是,同时培养了一批涉外经营的水电专业人才,具有深远的影响。

1.2 研究水轮发电机组状态检修系统的目的与意义

水轮发电机组在运行中必须安全、可靠、平稳地生产电能,保证电力生产的连续性。为了使参与水电厂电能生产的所有动力设备均具有很高的运行可靠性,保证设备经常处于良好的工作状态,须对设备进行检修和维护。

1.2.1 传统检修方式的缺点

传统的检修都是事后检修或是按计划进行检修,这两种检修方式都存在着不同程度的弊病,其中事后检修,是故障发生后才进行的,其危害是不言而喻的。

长期以来,水电站的机电设备检修工作一直执行的是原水利电力部颁发的《发电厂检修规程》中规定的,“水轮发电机组大修间隔,多泥河水电站为3~4年,非多泥河水电站为4~6年,小修间隔为每年两次”。同时还规定了检修工期、项目。也就是说,设备运行到了规定的检修周期,不论设备处于什么样的运行工况,也不论设备的制造厂商的不同、设计材质的优劣、工艺质量的好坏、运行方式的区别、河流水质的差异、有无影响安全运行的缺陷,都必须一律到期检修。

从保证设备安全运行的角度来看,计划检修不会出现大的问题,但从综合管理的角度看却不尽合理。它的不合理表现在“到期必修”上,所谓“到期必修”,就是到期必须要按固定模式大拆大装。计划检修存在如下弊端。

(一) 无针对性

计划检修针对性不强,盲目性检修过多,降低了设备使用率。在计划检修制度下,发电企业对检修工作的安排无权作主,不能根据设备实际状况决定检修时间、工期和项目。这势必造成设备应该修的得不到及时处理,使大量的一般缺陷扩大成事故。但也有大量运行状况良好的设备到期必须检修,造成不应有的浪费。这种被动的管理,淡化了设备管理人员的责任,设备出了问题,怕追查责任,往“设备事故”上一推了之,既浪费了大量的人力、物力和时间,又无谓地增加了检修费用,影响了企业的经济效益。

(二) 技术老化

落后的检修制度容易使设备管理人员思维僵化、不求进取。在这种检修制度下,到期必修,周而复始,没有任何灵活的余地,必然导致生产技术人员对知识更新、应用新技术不热心,没有压力和紧迫感,技术管理工作固步自封。

(三) 管理落后

计划检修制度不利于设备的科学管理,往往导致:

(1) 检修项目主次不突出, 重点不明确。

(2) 计划检修时间是确定的, 不管设备状况好坏, 缺陷大小都要修, 不利于调动技术管理人员参与科学管理的积极性。

(3) 过多的检修拆装, 加速了拆装磨损, 过多的破坏性试验(如机械甩负荷、过速、电器设备的耐压等), 人为地缩短了设备的使用寿命。

1.2.2 状态检修的概念及意义

为了适应新形势的需要, 改变以往旧的检修模式, 进一步挖掘水电机组的潜在容量, 提高企业的经济效益, 必须对水电机组实现状态检修。

状态检修从理论上讲, 是比预防检修层次更高的检修体制。1987 年水电部颁布的 SD230-1987《发电厂检修规程》指出, 应用诊断技术进行预知维修是设备检修的发展方向。

开展状态检修的目的是为检修管理提供依据, 以便有针对性地、根据不同的检修内容(如计划检修、事故抢修、临时性检修、状态检修等)采取不同的检修方式, 进行一系列的优化组合, 修改检修工作计划, 推迟预防性检修, 降低运行、检修和维护的成本, 改善运行状态, 延长设备使用寿命, 充分提高发电设备可利用小时数, 以增加发电量。状态(预知)检修可改变原检修方式的盲目、保守和浪费, 增强检修管理的科学性, 改变现有的发电厂检修模式——以预防性试验作为检修判据的计划性周期检修, 提高对设备的监测技术水平。特别是针对国内目前大多数水电厂的基地都远离发电现场的事实, 可为国家节约大量的人力、物力, 增加发电效益, 减小停电损失, 并将大大地提高水电厂的安全经济运行和现代化管理水平。

近百年来, 定期计划维修体制为水轮发电机组的正常运转发挥了极其重要的作用。定期计划维修体制是以统计理论为基础, 按计划定期进行小修、中修、大修, 具有一定的主观色彩, 但它至今仍然是世界各国主要的占压倒性的设备维修体制, 仍然在各个水电站发挥着重要作用。从可靠性的角度来说, 计划定期维修体制有其必要性。但是生产实践中有大量事例说明, 这种维修体制还不能满足日益增长的设备维护需求, 较普遍地存在着过维修和不足维修, 维修的代价仍然十分昂贵。特别是随着水轮发电机组的巨型化, 这种维修体制不断暴露出尖锐的矛盾, 电站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^[2~5]。

水轮发电机组是水电厂最关键的主设备, 它的运行状态如何直接关系到水电厂能否安全、经济地提供可靠的电力, 也直接关系到水电厂的安全。对机组运行状态的实时监测和对机组状态的正确评估是保证机组安全、经济运行的重要措施之一, 也是电厂实现“无人值班、少人值守”的必要手段之一。

状态检修包括状态监测和故障诊断两种具有不同目的和方法的技术。机组状态监测的目的是, 判断机组运行状态是否正常, 一旦出现异常可以报警或跳闸停机。对于水电厂的主要设备, 需要采用 24 小时连续监测的办法, 以确保设备安全。监测系统的诊断功能十分有限, 一般只能对机组运行正常与否作出判断, 但可以为进一步的故障诊断提供必要的

数据和信息。故障诊断的目的是,判断机组在运行中内部隐含的故障,识别主导故障以及主导故障的发展和转移,还需对机组的当前状态作出评估,并对其劣化趋势作出中长期预报。这样,在一般的情况下,不需要对机组进行 24 小时的连续诊断。诊断通常是在离线的状态下进行的。

1.3 国内外状态监测、故障诊断技术的现状及发展

状态监测、故障诊断技术是实现状态检修的关键技术,真正意义上的状态检修系统目前还没有成功的实例,但国内外已有大量的研究机构以及企业单位对相关技术进行了研究,并有大量相关产品问世。

现代机械设备的监测与诊断技术的研究,起源于 20 世纪 60 年代后期,由航天、军事工业的需要而发展起来,20 世纪 70 年代逐步完善,20 世纪 80 年代进入实用阶段。

美国是开发故障诊断技术最早的国家,早在 1961 年就成立了国家机械故障研究会(MFWG)。1967 年在国家宇航局(NASA)的倡导下,美国又成立了机械故障预防小组(MFPG),1971 年该小组划归美国国家标准局领导,从事故障机理研究、监测诊断研究、可靠性分析研究和耐久性评价。

英国在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初,以 R.A.Collacott 为首的英国机械保健中心开始研究故障诊断技术。后来曼彻斯特大学成立了沃福森工业维修公司(WIMU),在宣传、培训、咨询和技术交流方面很有成效。英国原子能机构(UKAES)设立了系统可靠性服务站(SRS),专门从事故障诊断技术研究。

日本于 1964 年在作为技术进步象征的新干线和东京奥林匹克体育场的建设等大工程的实施中开始认识到故障诊断技术的重要性和迫切性,由新日铁率先开展研究,发展迅速,很快投入使用。

同期,欧洲其他国家也开始各种测试仪器、测试技术和故障的分析及预防研究。

1968 年,美国的 J.S.米切尔根据其多年的工厂经验,在美国机械工程学会石油和机械工程年会上发表了题目为“高速涡轮机械运行问题(故障)的起因和治理”的论文^[6];20 世纪 70 年代初期,日本故障诊断专家白木万博也发表了大量故障诊断的文章^[7];美国本特利·内华达公司在 20 世纪 60 年代即开始了转子动力学的研究。这些成果是初期的监测与诊断技术的代表,对其后期的建设发展产生着巨大的影响。

从 20 世纪 70 年代初期开始,一些发达国家在现场安装使用状态监测与诊断系统。如日本三菱公司的振动健康监测系统(Vibration Health Monitoring System)^[8]和机器健康监测系统(Machine Health Monitoring System)^[9];美国中心发电部的涡轮监测设备(Turbine Supervisory Equipment);美国西屋公司的可移动诊断中心等。受到当时科技水平的限制,早期的系统规模小,测点数少,自动化程度低,数据处理速度慢,存储容量小。

到了 20 世纪 90 年代,电子技术、现代测试技术、计算机技术、信号处理技术以及相关学科的成就,促使了监测与诊断系统的飞速发展。各个发达国家相继研制成功了一些比较先进的系统,使故障诊断技术逐渐跨入了实用系统化的时代。

如美国西屋公司的 GEN-AID 系统,对得克萨斯州的 7 台发电机组进行在线监测和诊断,机组的强迫停机率从 1.4% 下降到 0.2%,机组的平均可用率由 95.2% 上升到 96.1%,取得了明显的经济效益。然后,该公司又研制出“人工智能集中诊断电站设备在线专家系统”,由诊断中心的中央计算机 VAX8530 同时监视 10 几个电厂的几十台机组,所有机组的运行数据通过网络传输到诊断中心。诊断中心配有专家系统软件和各方面的专家,对机组的异常故障进行综合诊断,并将结果返回电厂供运行人员参考^[10]。上述专家系统的使用取得了巨大的效益。

美国本特利·内华达公司推出的瞬态数据管理系统(TDM)可以用于采集和处理旋转机械瞬态和稳态的振动数据,以轴心轨迹图、时基图和频谱图的形式表示出来,也可以提供瞬态数据的波德图、极坐标图和三维谱图^[11]。该系统于 1988 年夏天在西拉太平洋动力公司(Sierra Pacific Power Co.)切阿丘发电厂投入运行。1992 年,该公司又根据多年的现场经验和研究成果开发了用于旋转机械故障诊断的工程师辅助系统(EA)。EA 从 TDM 数据库中获得状态参数,经过专家系统分析诊断,可以对质量不平衡、转子弯曲、不对中、碰磨、轴裂纹、油膜失稳、热弯曲等常见机械故障进行检查和判别。

又如丹麦 B&K 公司的产品 3540 型计算机控制预测、分析和安全系统(CAMPASS),能够提供各种旋转机械的全自动综合预防性和预测性监测,并可以基于振动参数和过程参数的组合,诊断各种轴系不平衡、不同轴度以及其他轴承和齿轮的故障。多个局域系统通过通信网络的互联,建成了一个覆盖面广,能高效地采集、加工、处理、存储、反馈信息的计算机网络,实现远程信息处理和资源共享。该系统已经在我国及全世界多个国家和地区广泛投入使用,拥有多次分析诊断成功的事例报告^[12]。

瑞士 VIBRO-METER 公司的机械状态监测和故障诊断系统 VIBRO501 采用分布式硬件组成,通过各个数据采集单元,接收和处理来自传感器、二次仪表或其他检测系统的信号,经网络接口将数据传输到中央工作站进行分析和诊断。

加拿大塞斯埃公司研制的 CSI3100 状态监测与故障诊断系统是一套网络化分布式在线监测与故障诊断系统。全系统的组成包括:一台 3130MD 诊断管理站(总站或 MD 站)、多个 3130C 数据采集站(简称 C 站)、多个 3126/3126 传感器站和 3100D 诊断站(简称 D 站)。MD 站为网络服务器,网络类型和传输距离可以根据现场实际情况选择配置。3100D 诊断站提供用户同时操作 MD 站系统数据库的能力,直接显示、分析、打印所有的历史数据,还可以通过网络远程采集实时频谱和时域波形或进行机械故障的实时分析和诊断。系统备有数据传输通道,可以将相关数据发送到管理信息系统(Management and Information System)和集散控制系统(Distributed Control System)。

美国的 ENTEK 科技公司从 1981 年起致力于开发机械故障监测、分析和诊断产品。其产品机械故障监测、诊断及预测维修系统(PM),旋转机械故障诊断专家系统(Explore)已广泛应用于电力、石油化工、船舶运输等部门。其中,PM 系统能够连续监测多种重要的振动及运行参数,具有趋势分析、故障捕捉、事件追忆、频谱分析、相位分析、报表生成、数据打印和多机联网等功能;Explore 能够对常见的机械故障(不平衡、不对中、松动、摩擦、齿轮损坏、轴承损坏等)进行分析和诊断。此外,ENTEK 的网络化在线监测

系统 Mpulse 及电厂辅机设备的离线分析与诊断系统也已经开始现场应用^[13]。

德国西门子公司公司的 Siemens/KMU 系统可用于对汽轮机、汽轮发电机及辅助设备进行全面监测,综合进行振动分析、运动状态分析、寿命估计、热力分析和效率分析,对机组轴系、汽轮机叶片、滑动轴承、止推轴承、主控制阀、机架、排气与冷凝部件、发电机冷却系统、导体和绝缘、励磁系统等进行故障的识别和诊断,代表了汽轮发电机组监测与诊断技术领域的先进水平和发展方向。该系统已经开始现场应用,并取得了可观的直接经济效益^[14]。

其他一些比较先进的系统,如美国的 IRD 公司的 Amethyst 自诊断系统、德国 SCHENCK 公司的机械状态监控和故障诊断产品 (VIBRO 产品系列)、英国拉迪夫能源技术中心的 Beran750/760 可移动式状态监测系统、芬兰赫尔辛基 IVO 维护中心的 Trendvib16 系统等,也在 20 世纪 90 年代陆续投入现场使用^[15]。

总的来看,国外机械设备监测与诊断的理论研究与实际应用都取得了很大的成果。其产品越来越复杂,越来越庞大,主要表现在:集中式的系统已经不能满足要求,被分布式并行系统所代替;系统的功能和性能都有了全面提高,单纯的监测与诊断向着监测、诊断、控制、管理、调度的集成化过渡;闭环监控逐步取代开环的监测与诊断;监测范围从机械振动等简单参量扩展到扭振、温度、压力、流量、电磁参量及其他各种工况参数和运行参数;监测的对象从单一的机组发展成为多个区域多台机组的监测网络;诊断内容从机械故障的简单诊断向全方位多层次的机械、电子、电气、热力的综合诊断扩展;应用领域已经迅速扩展到石油、化工、电力、交通、冶金、能源、航空、核工业等国民经济的主要行业。

国内自 20 世纪 80 年代初大规模开展故障诊断技术的研究工作,特别是智能化的故障诊断专家系统的研究^[16]。在电力系统、石化系统、冶金系统、航空航天等部门,已经开发了几十种故障诊断系统^[17]。

故障诊断技术已由单纯依靠个人经验和直观感觉逐步发展到依靠科学技术,实现由感性到理性的飞跃。机械故障诊断技术发展成为以机器学为基础的一门综合性技术,实质是机器运行状态的模式识别。它融合了当今最前沿的学科(主要是信息科学、系统科学、人工智能和计算机科学)^[18],应用了诸如神经网络、小波、混沌、分形以及模糊数学的技术手段。但是,故障诊断技术远还没有完全达到定量诊断的水平。利用机器运行中的物理现象(声音、振动、声发射、热现象等)来推断机器内部所隐含的故障,是一种典型的反向工程,其难度要比经典的力学方法大得多;另一方面,经验的积累也非易事,因为依靠正常的速度来积累故障案例需要很长的时间。

机械设备的诊断过程包括如下几个环节^[19]:

- (1) 信号监测。采集能反映设备运行状态的各种信息。
- (2) 信号分析。利用一定的数学方法,对检测到的信号进行分析处理。
- (3) 特征抽取。对处理后的信息进行分析,提取与设备状态有关的特征。
- (4) 故障诊断。根据提取的特征信息,对设备的状态进行判定、诊断和预测。
- (5) 决策。根据对设备状态的判定结果,确定应采取的措施和对策,然后对设备实施

相应的操作。

机械设备故障诊断系统所采用的方法有模糊逻辑法、故障树分析法、专家系统、人工神经网络技术等^[20]。其中,专家系统技术和神经网络技术是应用的热点。已开发出来的诊断系统大多数是非自主性的,即人工参与下的辅助诊断系统,其诊断过程需要人员的参与和干涉。诊断过程为非实时性的,虽然诊断系统本身能实现在线监测和诊断,由于诊断系统的非自主性,很难做到实时诊断。

为了提高和发展机械设备的故障诊断技术,必须加强以下关键技术的研究:

(1) 专家系统开发工具的研究。利用专家系统开发工具,可大大缩短专家系统的开发周期,节约大量的时间和资金。

(2) 人工智能理论的研究。人工智能研究所取得的新成果应用于故障诊断系统后,将使得诊断的智能化程度大大提高,从而提高诊断的自主性。

(3) 传感器技术的研究。各种多功能集成式传感器和智能化传感器的应用,将大大提高诊断对象的状态信息辨别能力,提高诊断结果的准确性。

当前,诊断系统在推理方法上的特点是单一的^[21],在求解复杂系统的诊断问题时受到很大的限制。未来的诊断系统是集成式故障诊断系统,该系统应根据不同子系统和不同问题的特点采用不同的推理模式,甚至采用几种不同推理模型进行混合推理。如:在同一个诊断系统中,集成了基于规则的推理模型、基于人工神经网络的推理模型、基于事例的推理模型等。在一个系统中,各种推理模型的优势都将得到充分发挥,从而达到提高推理速度和和解的准确性的目的。

未来的诊断系统是基于 Internet 的远程诊断系统^[22, 23]。最初的诊断系统都是面向单台、或单一类型的设备。随着企业规模的扩大,设备越来越复杂,单一的、各自独立的监测与诊断系统已不能满足要求。分布式监测与诊断系统应运而生^[24, 25]。这种系统以计算机网络为基础,把分散在各处的监测系统以及各种服务和管理系统联系起来。分布式故障诊断系统现在一般采用客户机/服务器模式^[26],把常用的、关键的计算和处理程序集中起来作为服务器端软件,在终端或者下位机运行客户程序调用服务器程序。上述的分布式监测与诊断系统的绝大多数目前运行在局域网,仍有一定的地域局限性。Internet 在人们之间、企业之间架起一座桥梁,使信息的流量得到空前的提高。Internet 最大的贡献可能就是资源共享,这其中包括诊断资源。将客户机/服务器的诊断模式应用于 Internet,并加上调动 Internet 上的诊断资源进行协作诊断的能力就形成了远程协作诊断系统。这样的系统做到了资源共享,能避免重复开发。另外,它能互通有无,从而有能力解决以前在有限的资源(局域网)下很难解决的问题。

目前,国外开发的水电机组的监测分析系统有: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 VibroSystM 公司的 ZOOM 2000 系统和 AGMS 系统,分别用于监测发电机的气隙和水轮发电机组的振动;瑞士 VIBRO-METER 公司 VM600 系统;美国本特利·内华达公司的 Hydro VU 系统;德国 Simens 公司的 Scard 系统等。国内的有华中科技大学的 HSJ 系统;北京英华达公司的 EN-8000;清华大学的 PSTA 系统等。

由于水电机组转速较低,过去对机组的安全运行没有给予足够的重视,使得在水电机组在线监测技术和故障诊断技术方面的研究落后于其他大型旋转机械。20 世纪末至 21 世纪初,我国十几座装机容量百万千瓦的水电厂相继建成投产,数十座装机容量百万千瓦的水电厂正在建设或筹建。机组的单机容量从 300MW、400MW、550MW 到 700MW。机组单机装机容量逐步增大,对电网稳定运行的影响也越来越大。特别是这些机组投运后,或多或少存在一些问题,将严重影响机组的正常运行和电网的稳定。因此,许多水电厂通过技术改造装备了状态监测系统,从国外引进先进技术建造的大中型水电厂基本上都装备了状态监测系统。然而大多数水电厂所安装的监测装置功能都比较单一,监测量较少,不能为进一步的分析提供必要的、可靠的数据。近年来,状态监测分析系统的功能日趋完善,上述系统基本上都有比较全面的监测和分析功能。由于水电机组的故障与一般旋转机械相比有其特殊性,除考虑机械方面的原因外,尚需考虑流体动压力及发电机电磁力的影响;而且机组运行时,这三者是互相耦合、相互影响的,关系复杂。因此,在水电机组的故障诊断方面,有待研究开发的工作还很多。

1.4 水轮发电机组的主要故障及其特点

水轮发电机组最常见、最主要的故障就是振动故障^[27],它直接威胁着机组的安全运行。认识并把握机组振动故障的特点是故障诊断研究工作的首要任务。

1.4.1 水轮发电机组振动故障的主要特点

(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到机械、电磁和水力的复杂系统。机组在运行中,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、水力三者 in 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不规则性。整个水电厂的设计、施工受地理位置、地质状况和经济技术等多方面的影响,因此每个水电厂都是专门设计的。同时水电机组运行条件还会受到电网、水文、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。这就使得不同电厂,甚至同一电厂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将是一个极大的挑战。