



# 水轮发电机组

SHUILUNFADIANJIZU ZHUANGTAI JIANCE JISHU

## 状态监测技术

潘罗平 桂中华 编著



华南理工大学出版社

# 水轮发电机组

SHUILUNFADIANJIZU ZHUANGTAI JIANCE JISHU

# 状态监测技术

潘罗平 桂中华 编著



华南理工大学出版社

·广州·

## 内 容 提 要

本书从提高水轮发电机组运行可靠性和降低维修费用的角度出发,在论述水轮发电机组状态监测中的传感器、数据采集及抗干扰技术等基础理论之后,着重介绍了水轮发电机组状态监测的各种技术和方法,内容涵盖了机组振动与稳定性、能量与效率、压力脉动、空化、局部放电、气隙与磁场强度等方面,总体上反映了当前国内外水轮发电机组状态监测的技术水平,具有很好的实用性。

本书可供在水电领域从事状态监测研究、运行管理等的工程技术人员参考,也可作为水利水电和水电自动化等专业科研人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

水轮发电机组状态监测技术/潘罗平,桂中华编著. —广州:  
华南理工大学出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-5623-3006-6

I. 水… II. ①潘…②桂… III. 水轮发电机-机组-运行-状态-  
监测 IV. TM312. 07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201411 号

总 发 行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: z2cb@scut.edu.cn

<http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑: 黄丽谊

印 刷 者: 广州市穗彩彩印厂

开 本: 850mm × 1168mm 1/32 印张: 4.875 字数: 132 千

版 次: 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

版权所有 盗版必究



## 前 言

安全生产是水电厂的第一要务,大型水轮发电机组一旦发生故障,将对电站、电网造成巨大的经济损失,其安全性尤为重要。为保障水轮发电机组运行安全,过去我国一直沿用“计划检修”的维修制度,在一定程度上收到了较好的成效,但“计划检修”针对性不强,且具有盲目性,更不能提前防范设备故障,其弊病越来越突出。随着计算机技术、电子技术、现代测试技术、信号处理技术以及相关科学技术的快速发展,20世纪90年代,“状态检修”初露端倪,作为一种设备针对性维修模式,它以先进的监测技术为前提,以日常的监测和定期检查分析为基础,正确了解和把握设备的运行状态,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。因此,研究水轮发电机组状态监测技术,将成为当今水电运行保障技术发展的必然趋势。

本书是作者在长期从事水轮发电机组状态监测的科研和现场测试工作的基础上,总结国内外近20年的研究成果,并结合中国水利水电科学研究院水力机电研究所的多年研究成果整理而成的。

本书共分为六章,各章的主要内容介绍如下:第1章分析了对水轮发电机组实施状态监测的必要性,以及国内外水轮发电机组状态监测技术的发展状况。第2章论述了水轮发电机组状态监测的基础理论,包括传感器、数据采集及抗干扰技术等。第3章着重介绍水轮发电机组振动与稳定性问题机理,关键监测技术及振动分析主要方法等。第4章分析了水轮机的各种状态(效率、



水压力脉动、空化) 监测技术及方法。第5章介绍发电机常见故障及重点监测内容, 详细分析了发电机局部放电、空气气隙与磁场强度、轴电压的监测方法。第6章分析了水轮发电机组状态监测系统的整体结构和系统的核心监测项目, 最后指出了水轮发电机组状态监测技术中存在的问题以及未来的发展方向。

水轮发电机组状态监测与一般旋转机械相比有其特殊性, 除了考虑机械方面的原因外, 尚需考虑流体及电磁的影响, 三者是互相耦合、互相影响的, 因此, 对可能出现的故障问题进行全面的监测仍然具有相当大的难度。近年来, 设备状态监测技术发展较快, 而编者水平和精力有限, 文中不足甚至错误之处在所难免, 恳请各位读者指正, 编者深表感谢。

本书第1、3章由桂中华编写, 第2、4章由潘罗平编写, 第5、6章由潘罗平、桂中华共同编写。本书的编写得到了三峡水力发电厂、加拿大 IRIS 公司、加拿大 Vibrosys<sup>TM</sup> 公司、北京华科同安监控技术有限公司等单位的同志的大力支持, 在此深表感谢。

编 者  
2008 年 5 月



# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1 绪 论 .....                 | 1  |
| 1.1 当前水电设备面临的主要问题 .....     | 1  |
| 1.2 水轮发电机组状态监测的必要性及意义 ..... | 3  |
| 1.3 水轮发电机组状态监测的目的与任务 .....  | 4  |
| 1.3.1 状态监测的目的 .....         | 4  |
| 1.3.2 状态监测的任务 .....         | 5  |
| 1.4 水轮发电机组状态监测技术现状 .....    | 5  |
| 1.4.1 国外的技术现状 .....         | 5  |
| 1.4.2 国内的技术现状 .....         | 7  |
| 2 状态监测技术基础 .....            | 9  |
| 2.1 状态监测常用传感器 .....         | 9  |
| 2.1.1 传感器基础 .....           | 9  |
| 2.1.2 电阻式传感器 .....          | 13 |
| 2.1.3 电感式传感器 .....          | 16 |
| 2.1.4 电容式传感器 .....          | 19 |
| 2.1.5 光电式传感器 .....          | 20 |
| 2.1.6 压电式传感器 .....          | 21 |
| 2.1.7 磁电式传感器 .....          | 22 |
| 2.1.8 热电式传感器 .....          | 23 |
| 2.2 状态监测中的数据采集 .....        | 26 |
| 2.2.1 信号预处理 .....           | 27 |

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 2.2.2 | A/D 转换         | 28 |
| 2.2.3 | 信号的截断、能量泄漏及窗函数 | 30 |
| 2.3   | 数据采集抗干扰技术      | 35 |
| 2.3.1 | 电源系统的抗干扰       | 36 |
| 2.3.2 | 数据采集系统硬件部分的抗干扰 | 37 |
| 3     | 水轮发电机组振动稳定性监测  | 38 |
| 3.1   | 常见振动故障机理       | 38 |
| 3.1.1 | 发电机常见振动故障分析    | 39 |
| 3.1.2 | 水轮机常见振动故障分析    | 50 |
| 3.2   | 水轮发电机组振动监测关键技术 | 52 |
| 3.2.1 | 机组振动状态特征参数     | 52 |
| 3.2.2 | 振动监测基本原理       | 55 |
| 3.2.3 | 机组大轴摆度监测       | 55 |
| 3.2.4 | 机架振动监测         | 57 |
| 3.2.5 | 振动测点数量与布置原则    | 58 |
| 3.2.6 | 轴心轨迹与轴心位置监测    | 59 |
| 3.2.7 | 振动相位监测         | 61 |
| 3.3   | 机组振动分析方法       | 63 |
| 3.3.1 | 时域波形分析         | 64 |
| 3.3.2 | 频谱分析           | 65 |
| 3.3.3 | 轴心轨迹分析         | 68 |
| 3.3.4 | 趋势分析           | 69 |
| 3.3.5 | 机组工况分析         | 70 |
| 3.4   | 水轮发电机组振动监测系统实例 | 72 |
| 3.4.1 | 系统总体结构         | 73 |
| 3.4.2 | 系统主要测点         | 74 |



|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 3.4.3 | 系统主要功能         | 76  |
| 3.4.4 | 现场应用           | 77  |
| 4     | 水轮机状态监测        | 83  |
| 4.1   | 水轮机效率监测        | 83  |
| 4.1.1 | 水轮机效率概述        | 83  |
| 4.1.2 | 流量             | 85  |
| 4.1.3 | 水轮机工作水头        | 94  |
| 4.1.4 | 功率监测           | 94  |
| 4.2   | 水轮机压力脉动监测      | 95  |
| 4.2.1 | 压力脉动成因及特征频率    | 95  |
| 4.2.2 | 压力脉动监测关键技术     | 96  |
| 4.3   | 水轮机空化监测        | 99  |
| 4.3.1 | 水轮机空化及其特性      | 99  |
| 4.3.2 | 水轮机空化监测方法      | 101 |
| 5     | 发电机状态监测        | 107 |
| 5.1   | 发电机常见故障及监测内容   | 107 |
| 5.1.1 | 发电机常见故障        | 107 |
| 5.1.2 | 主要监测内容         | 108 |
| 5.2   | 发电机局部放电监测      | 108 |
| 5.2.1 | 发电机局部放电概述      | 108 |
| 5.2.2 | 发电机局部放电在线监测方法  | 111 |
| 5.2.3 | 发电机局部放电信号的传播特性 | 119 |
| 5.2.4 | 发电机局部放电干扰信号特性  | 121 |
| 5.3   | 发电机空气气隙与磁场强度监测 | 124 |
| 5.4   | 轴电压监测          | 127 |
| 5.4.1 | 轴电压监测意义        | 127 |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.4.2 轴电压产生的机理 .....          | 128        |
| 5.4.3 轴电压在线监测 .....           | 129        |
| <b>6 水轮发电机组状态监测系统展望 .....</b> | <b>131</b> |
| 6.1 水轮发电机组状态监测系统设计 .....      | 131        |
| 6.1.1 状态监测系统与计算机监控系统 .....    | 131        |
| 6.1.2 状态监测系统体系结构 .....        | 131        |
| 6.1.3 状态监测系统网络结构 .....        | 134        |
| 6.1.4 状态监测系统的主要监测内容 .....     | 136        |
| 6.1.5 状态监测系统的主要功能 .....       | 139        |
| 6.2 当前状态监测技术存在的问题 .....       | 140        |
| 6.3 水轮发电机组状态监测系统展望 .....      | 143        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>144</b> |

# 1 绪 论

## 1.1 当前水电设备面临的主要问题

大容量、高效率的水轮发电机组是当前水电设备发展的主要方向。20 世纪 90 年代,中国、巴西等发展中国家的水电开发进入了前所未有的大发展时期,中国、巴西成为世界水电开发的中心。目前,国内外已建、在建装设大型水轮发电机组的电站主要有大古力、以泰普、三峡、溪洛度、龙滩、小湾等,机组容量基本上为 700MW 级,其中发电机容量最大的是三峡工程,约 840MW。未来一段时间内,我国的水电站机组容量将以 500 ~ 700MW 为主。除在建的三峡电站以外,一系列单机容量为 500 ~ 700MW、单机直径为 6 ~ 9m 的大型水电站,如溪洛度、水布垭、小湾、龙滩、拉西瓦和瀑布沟等,将在 2010 年前陆续建成。规划中的白鹤滩、乌东德水电站正在进行百万千瓦级水轮发电机组可行性研究,这些都将进一步推动世界特大型水电设备设计制造技术的创新和发展。

随着水轮发电机组单机容量的提高,其机组尺寸增加,相对刚度减弱,运行稳定性问题日益突出,主要表现为:

(1) 近期大型水轮机运行稳定性问题越来越多,问题越来越严重。我国大型电站如岩滩、二滩、小浪底、隔河岩、东江等,自投入运行以来,其机组均不同程度地出现影响正常运行的振动区域,尽管通过采取减振措施,振动情况有所缓解,但尚未根本解决;五强溪、小浪底、李家峡、东江电站转轮因振动引起的叶

片裂纹问题还没有办法彻底解决；因机组振动引起其他部件破坏的事例也时有发生。

(2) 在建和规划中的机组尺寸增大，影响机组稳定运行的未知因素相应增多。以三峡水电机组为代表的大型水电工程，预示着我国水电建设的发展进入一个新的时代，其显著特点是机组尺寸不断增大。正在规划中的许多电站的单机容量也都达到了500~700MW，此外，有些电站水头变幅很大，还有些电站随着水轮机参数的不断提高，其尺寸巨大、相对结构刚度降低，自振频率下降，影响机组安全稳定运行的未知因素也相应增多。因此，设计中预防和解决水轮机振动的措施更加复杂和困难，有必要深入研究机组的运行保障技术。

(3) 国内外尚无可靠的水轮机振动预估方法。水轮机的稳定性、效率和空化性能是水轮机的三个主要性能指标，其效率和空化性能通过水轮机模型试验，可按一定的公式进行换算后预测真机的性能；而稳定性问题，因诸多条件不具备相似性，真机与模型之间缺乏可靠的换算方法，不能准确预估真机压力脉动大小。常规方法是测定水轮机模型的尾水管相对压力脉动值 $\Delta H/H$ ，但 $\Delta H/H$ 并不是表征机组稳定性的唯一因素。

(4) 大型老电厂机组改造中的稳定性研究至关重要。水轮机增容改造主要有两种途径：一是提高转轮和导水机构的水力效率；二是加大水轮机流量。因流道中的埋入部分无法进行改造，增加流量后，其尾水管压力脉动值以及各机械部件的振动值的增大在所难免。因此，项目改造后，机组运行稳定性问题尤为重要。

由于人们对水轮机稳定性的认识比较晚，加之问题本身很复杂，难点多，牵涉到多个学科，需要复杂的计算工具和先进的测试仪器，使得我们对稳定性的认识远没有对效率和空化现象的认识深刻，许多稳定性问题至今还没得到彻底解决。随着机组单机

容量的提高, 机组尺寸的增大, 相对刚度的减弱, 大机组面临的稳定性问题将更加突出, 迫切需要强有力的在线监测系统来保障机组安全稳定运行。

## 1.2 水轮发电机组状态监测的必要性及意义

在水电行业有计划地开展状态监测工作具有十分重要的现实意义, 主要体现在以下几个方面:

(1) 随着我国水电工程建设的高速发展, 近年来, 水轮发电机组的设计越来越向高水头、高转速、高效率和大容量的方向发展, 设计实践中材料强度更高, 构件更加灵活, 机组尺寸增大, 相对刚度减小, 必然会带来更多的问题。

(2) 大型水利枢纽工程的兴建, 使得水轮发电机组在整个电网中的比重越来越大。单机容量的增加, 严重威胁到电厂电网的安全运行。年平均发电时间延长, 而检修时间缩短, 一旦因事故停机, 造成的经济损失极为严重。

(3) 减人增效, 降低维修成本, 创一流电站; 厂网分家、竞价上网等一系列符合市场经济规律的现代管理和维修模式逐步形成和建立。这样电厂更加需要强有力的技术支持手段, 以降低事故率, 从而降低生产成本, 提高竞争力。而状态监测与诊断系统的报警保护、故障判断、大修评定、优化运行等功能正是针对当前的行业需要给出的技术解决方法。

(4) 机组在运行中经常由于机械、水力和电力等方面的原因使其结构和某些部件产生振动。强烈的振动将影响水轮发电机组的正常运行, 并降低机组和一些零部件的使用寿命。水轮发电机组的振动机理比较复杂, 直观判断和简单测试常常难以找到本质原因; 有些故障与运行参数有关, 出现的偶然性较大, 其故障特征不易捕捉, 难以铲除故障隐患。在线状态监测与诊断系统的使

用,可及时记录故障信息,分析产生振动的本质原因。

(5) 水轮发电机组在偏工况运行时,水力振动的影响尤为明显,由于水力振动而限制了水轮发电机的运行工况,从而影响机组在系统中合理发挥效益。同时由于机组的长期振动,导致机组部件的疲劳甚至遭到破坏,严重妨碍机组的安全运行和发电效益。

## 1.3 水轮发电机组状态监测的目的与任务

### 1.3.1 状态监测的目的

水电设备运行的安全性与可靠性取决于两个方面,一是设备设计与制造的各项技术指标的实现,为此设计中要采用可靠性设计方法,要有提高安全性的措施,这些工作主要由设计、制造厂家来完成。二是设备安装、运行、管理和维修措施的实施。研究设备状态监测技术的意义正是为这些措施的实施提供必要的技术手段。具体而言,水轮发电机组状态监测要实现如下目的:

(1) 应能及时正确地发现设备运行过程中可能出现的各种异常状态或故障状态,预防事故的发生,并对机组的稳定运行提供必要的指导,提高机组运行的可靠性、安全性和有效性,以期把故障损失降低到最低水平。

(2) 通过检测监视、数据分析、性能评估等,为机组生产运行、正确安装及设计制造提供数据和信息。

(3) 通过长期的数据积累,逐步形成实际的运转特性曲线和机组的其他性能指标,得到优化的运行工况点或运行区,从而指导机组尽可能运行在优良工况区。发挥设备最大的设计能力,延长服役期限和使用寿命,降低设备寿命周期费用。

总的来说,状态监测既要保证机组的安全可靠运行,又要获得最大的经济效益和社会效益。

### 1.3.2 状态监测的任务

水轮发电机组状态监测的任务是了解和掌握设备的运行状态,包括采用各种检测、测量、监视、分析和判别方法,结合系统的历史和现状,考虑环境因素,对设备运行状态进行评估,判断其处于正常或非正常状态,并对状态进行显示和记录,对异常状态作出报警,以便运行人员及时加以处理,并为设备的故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和基础数据。

## 1.4 水轮发电机组状态监测技术现状

状态监测是实现设备状态检修目标的关键技术。目前,真正意义上的状态检修系统还没有成功的实例,但国内外已有大量研究机构进行了设备状态监测技术的研究,并开发了相应的产品。

### 1.4.1 国外的技术现状

当前在国际上,以美国为主的西方发达国家在大型旋转机械在线监测与诊断技术的综合研究方面处于领先地位。一方面,美国的信号处理与数据分析技术发展较快,而这些处理机、分析仪和数据采集系统是机械设备状态监测的基础和核心,是发展后续技术(故障诊断)所不可分割的部分。另一方面,美国的电力研究所(EPRI)和众多的专业公司如 Bently、IRD、BEI 等,从事对大型电站机组的运行状态监测的研究,以及对机组可靠性、安全性、维修性与经济管理技术方面的研究,已有 40 多年的历史,建立了庞大的数据库管理系统,并开展了专家系统的研究,具有雄厚的数据与软件实力。此外,国际上还有许多著名的诊断仪器公司,如丹麦的 B&K、德国的申克及日本的武田理研等,生产有多种用于设备状态监测的分析仪器及软件系统。

近 20 年来,国外对水轮发电机组状态监测方面的研究及应用也进行了一些成功的尝试,研制开发出了一批实用产品。其中具有代表性的产品有:①加拿大维保公司 (Vibrosys<sup>TM</sup>) 研制的 ZOOM 2000 系统可监测发电机定、转子气隙及其磁场强度、机组振动、压力、温度、流量以及一些电量参数,且具有一定的分析、诊断功能。据称国外已有 100 多台水轮发电机组使用了 ZOOM 2000 系统。②加拿大 IRIS 公司致力于发电机局部放电监测技术的研究与开发,聚集了众多局放监测领域的专家,始终坚持局放信号的数字化处理、自动噪声分离和高频检测的技术方向,并在该领域获得了众多专利技术,走在了局部放电监测技术的前沿。该公司研发的一系列局放监测产品,已经成功应用于电力、水利、石油、化工、造纸、矿山等工业领域。③美国 GE Bently Nevada 公司的 Hydro X 系统,据资料反映,纽约电力局 St. Lawrence 水电站安装了由 GE Bently Nevada 与加拿大 IRIS 公司共同开发的 Hydro X 系统,实现了机组的在线连续状态监测和自动故障诊断功能。④美国西屋公司开发的发电机监测专家系统,将人工智能引入发电机的监测管理,模仿人类专家处理故障时的思维过程建立了推理体系,在人的要求下给出某一个判断的推理过程及每一步推理的可靠性系统,其推理规则也可以由专家进行删减或修改,系统采用了分布式结构。⑤德国申克公司的 Vibrocontrol 4000 系统,其特点是系统结构灵活,通过增加部分模块和软件,可方便地配置成振动分析系统,但系统仅仅局限于水轮发电机组振动监测分析,不具备诊断功能,该系统已在我国水口、天生桥、漫湾、万家寨和沙溪口水电站应用。⑥另外还有瑞士 Vibro-Meter 公司的 VM 600;日本东京电力公司和东芝公司共同开发的抽水蓄能发电机组自动监视系统,等等。

总的来看,国外在水轮发电机组状态监测方面做了大量工作,相关产品已经成功推广应用,并取得了较好效果。主要技术

特点与水平如下:

水轮发电机组状态监测技术的研究工作滞后于其他旋转机械,但近 20 年来发展较快,已成功研制出水轮发电机组稳定性监测系统、发电机气隙与磁场强度监测系统、局部放电监测系统等不同功能的状态监测产品。水轮发电机组状态监测产品的一次测量元件可靠性好、精度高;其产品普遍具有较好的分析功能,但大多还不具备诊断功能。状态监测产品的对象大都仅局限于水轮发电机组的某一方面或某部分,没有一个是针对机组的全状态监测,更没有形成多区域、多机组的监测与诊断网络系统。

#### 1.4.2 国内的技术现状

国内水轮发电机组状态监测技术的研究较国外晚,且大多是针对机组振动与稳定性的监测,对气隙和局部放电等其他监测技术的研究较少。机组振动量、摆度以及水轮机压力脉动值等是衡量机组运行稳定性的重要指标,它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、负荷合理分配以及电能的质量。近 10 年来,国内不少单位已就机组在线稳定性状态监测开展了大量的研究工作,取得了一些进展。其中具有代表性的水轮发电机组状态监测系统有:华科同安 TN 8000、华中科大 HSJ、奥技异 PSTA、中国水利水电科学研究院 HM 9000 等。这些系统都具有较强的振动监测与分析功能,但在诊断功能上还处于探索阶段,没有成型的产品。以往国内水轮发电机组状态监测系统的功能都比较单一,基本上就是振摆监测,对发电机状态以及辅机状态的监测分析很少。近年来,通过国外合作引进等方式,国内个别系统在原有的振摆监测功能上,进行了扩充,取得了较大的发展,从过去单一的振动、摆度监测发展到现在的振动、摆度、压力、温度、气隙与磁场强度、局部放电等多种项目的监测。但国内还缺少针对机组空化、气隙、局部放电的具有自主知识产权的

监测技术,目前这些技术基本上依赖国外进口。同时,国内也有单位成功研制了 B/S 结构的远程监测技术。这种模式通过将企业内部网接入 Internet,在远程诊断中心直接通过浏览器上网,可以对设备运行状况进行实时监测,也可以组织不同地域的专家对设备的故障进行网上会诊,并向企业反馈诊断结论和处理措施。从研究范围看,在远程监测技术的研究上,国内基本上跟踪了国外的发展。

近年来,随着我国十几座装机容量百万千瓦的水电站相继投产,数十座装机容量百万千瓦的电站正在建立或筹建,机组的单机容量从 300MW、400MW、500MW 发展到 700MW。机组单机容量的逐步增大,对电网稳定性的影响也越来越大,特别是这些机组投产后,或多或少发生的一些问题,将严重地影响机组正常运行和电网的稳定。以状态监测为基础的水电厂主设备维修方式得到了厂家的重视,越来越多的水电厂已着手进行状态检修系统的建立工作。其中三峡水力发电厂是世界上最大的水力发电厂,其地位之重要、设备之先进、自动化程度之高代表了中国发电企业的最高水平。经过几年的努力,三峡左岸电站在设备状态监测方面已经达到了世界先进水平。三峡左岸已经装设了多种先进的状态监测系统及监测装置,在此基础上,建立了统一的主设备运行状态在线监测技术平台,该平台以监控系统、趋势分析系统和数据仓库为核心,将各种分散的状态监测设备进行集中管理并进行 Web 发布,收到了较好的效果。

与国外相比,我国在水轮发电机组的状态监测方面还存在一定的差距,尤其是一次测量元件基本靠进口。需要国家电力部门及各电站加大投资,引进、吸收、消化国外先进技术和设备,并开发功能完善的国产监测与诊断软件。未来的水轮发电机组状态监测系统应朝着开放式、多层次的方向发展,向着监测、诊断、管理、维修一体化过渡,并建立一个多区域多机组的监测诊断网络系统。