

水电机组状态监测与故障诊断技术新进展

北京中水科水电科技开发有限公司（水力机电）

潘罗平、桂中华、周叶、安学利

1 概述

水电机组是水电厂的关键设备，机组运行状态的好坏直接影响水电厂安全运行。近年来，随着我国水电工程建设的高速发展，水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，机组尺寸增加，相对刚度的减小，必然会带来更多的稳定性问题，机组会不可避免地出现运行不稳定甚至故障。另外，随着我国电力企业实施“厂网分开、竞价上网”改革的深入，提高设备的可靠性和降低维修成本将成为发电企业经济效益的重要考核指标。为保障水电机组运行安全，过去我国一直沿用“计划检修”的维修制度，在一定的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年代设备“状态检修”初露端倪，作为一种设备针对性维修模式，以先进的监测技术和可靠的诊断手段为前提，以日常的监测和定期检查分析为基础，正确地了解和把握设备的运行状态，减少设备维修费，延长设备使用寿命，起到了事半功倍的效果。据欧美国家资料报道，以状态监测和故障诊断技术为基础的预测性维修，可使每年的维修费用减少25%~50%，故障停机时间减少75%。

开展水电机组运行状态监测与故障诊断技术的研究，根据机组状态监测和故障诊断系统提供的信息，经过统计分析和数据处理，来判断机组的整体和部件的劣化程度，并在故障发生前有计划地进行针对性维修，能明显提高水电机组运行的可靠性，延长机组维修周期，降低水电机组检修费用，对保障机组安全、经济运行，提高发电企业经济效益，增强企业竞争力都具有重大的现实意义。

2 水轮发电机组状态监测与故障诊断新进展

国内外众多研究机构对状态监测和故障诊断技术进行了研究，并相继研制开发出了一系列的较为先进的水电机组状态监测系统，这些系统大都具有较好的监测功能，但基本上不具备故障诊断功能，目前真正意义上的水电机组故障诊断系统还没有成功的实例。由于水力发电系统是一个水机电耦合的复杂非线性动力系统，其运行过程中水电机组故障的产生和发展包含大量的不确定性因素，难以用数学模型对其进行精确描述，使得水电机组故障诊断技术基本停留在理论研究方面，难以实现现场的切实可用。

而水电机组状态监测工作由巡检、离线向集成化实时在线发展，集成化监测平台监测内容丰富、信息量大、处理速度快，对监测结果可显示、存储、打印及报警，实现了状态监测的自动化，为及时、高效的“发现问题”，最终实现科学、智能的“分析问题”、“解决问题”奠定了坚实的基础。

2.1 状态监测系统结构进展

随着计算机和网络技术的发展，水电机组状态监测系统的平台结构也经历了从单机采集站到分布式远程监测中心的变迁，行业对监测系统的需求，不再限于能够看到机组的实时运行状态，而要求状态监测系统能提供分布式数据存储、远程管理和高级数据分析等功能。

2.1.1 单机结构

在电子技术发展初期，有些企业或单位将早期基于单片机、单板机的机组流量、水头和效率监测装置，用于水电机组的状态监测，如经常使用的 PLC（可编程控制器）等设备，由于硬件配套齐全，不用自己设计硬件，通用性强，因此，单机采集、保存数据文件的形式在许多电厂使用。

但这种单机存储文件的方式，无法进行数据的历史检索，也给长期的趋势分析和数据保存带来了困难。而单机结构的数据采集处理模式，无法发挥网络优势，只能在现场查看监测画面和数据，分析功能基本上是离线进行。

2.1.2 基于局域网的客户端模式

随着网络技术的兴起，许多电厂都构建了完整的厂区局域网，通过安置机旁柜工控机进行状态数据采集，再通过网络将数据送往厂级的数据库服务器（如

SQLServer、Oracle 等)，这就是基于局域网的客户端模式。这种模式有效的将数据采集与存储分离，用户计算机只要安装了分析监测软件，或者打开客户端网页，就可以连上局域网中的数据库服务器进行监测和分析。

但这种模式最大的缺点是，机组运行状态信息仅能实现企业或电厂范围内共享，一方面不利于集团公司对下属企业的设备管理和维护指导，另一方面，许多电厂自身并不具备机组故障诊断队伍，往往依靠千里之外的行业专家（电科院、中试所、制造厂和院校等），而局域网客户端模式不利于诊断专家即时掌握机组运行信息并做出分析和判断。

2.1.3 基于统一平台的分布式诊断中心

近年来状态监测技术得到了越来越多电厂的关注和认同，安装的状态监测系统也越来越多，但这些监测系统间相对比较独立，安装台数较多的系统虽然也会提供集成服务器，但监测内容一般为单个领域方向，如机组稳定性、发电机气隙等，不能全面的对整个水电厂或流域水电站的机组状态进行综合评估。

基于统一平台的分布式诊断中心采用统一的通讯接口协议，将现地各类监测数据进行转换与集成，并纳入开放的数据管理平台中，通过现地、厂级、中心三个层级的分布式数据存储，充分利用各层级的特点和优势，实现了对集团公司对下属电厂的统一管理和维护。

现地监测数据的采样率高，采用循环卷滚的方式，保存完整的波形数据，同时将初步处理过的特征数据发送至厂级数据服务器，使得各厂均有相对完整的系统数据，而诊断中心则主要存储多电厂、多机组、多系统的趋势数据，以便进行综合分析。统一平台分析软件提供开放的数据存取和程序集成标准，使得各厂家和专业人员都可以参与到功能软件的编写和集成中来，从而满足系统对底层子监测系统的扩展开和放性要求。

由于基于统一平台的分布式诊断中心对电厂网络环境的要求，以及状态监测技术的应用水平要求较高，目前主要在大型电厂或集团公司开展，但作为状态监测技术发展的趋势，其多层分布式系统构架、开放的数据接口和软件平台，必然在推行故障诊断和状态检修中得到更大的发展。

2.2 状态监测技术现状

目前，国内外研究较多的水电机组状态监测技术包括：机组振动稳定性在线监测技术，水轮机效率在线监测技术、水轮机空化监测技术，发电机绝缘局放监测技术、发电机气隙和磁场强度监测技术、主变压器油气监测技术等。国内外在水电站状态监测技术的应用方面，也做了大量的工作，研制开发出了一批实用产品。

2.2.1 机组振动稳定性监测技术

水电机组振动稳定性监测通常包括机组的结构振动、主轴摆度、水压脉动等参数。当前，水轮发电机组振动稳定性监测基本原理框图见图 2-1。振动监测由振动传感器和监测分析系统组成。传感器负责收集表征机组振动状态的各种非电量特征参数，并转化为可供监测系统使用的电量信号。监测分析系统主要包括数据采集、数据存储与数据分析三大功能。可获取较为全面的振动信息，包括幅值、相位、频率、振动波形、轴心轨迹和振动趋势等，这对于判定振动的起因和进行事故的分析是比较合适的选择。

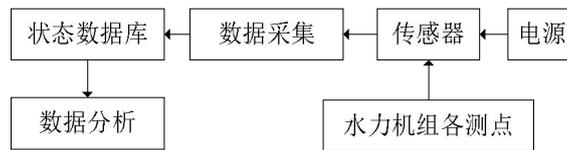


图 2-1 振动监测原理图

表 2-1 水电机组振动稳定性监测典型测点配置

测点名称	机组型式				备注
	混流式	轴流式	可逆式	灯泡式	
键相	1	1	1	1	
上导摆度	2	2	2		
下导摆度	2	2	2		
水导摆度	2	2	2	2	
组合轴承摆度				2	
上机架水平振动	2	2	2		
下机架水平振动	2	2	2		
上机架垂直振动	1~2	1~2	1~2		非承重组架可不设
下机架垂直振动	1~2	1~2	1~2		
定子机座水平振动	1~2	1~2	1~2		
定子机座垂直振动	1	1	1		
顶盖水平振动	2	2	2		

顶盖垂直振动	1~2	1~2	1~2		
组合轴承轴向振动				1	
组合轴承径向振动				1	垂直方向
水导轴承径向振动				1	
水导轴承轴向振动				1	
灯泡体径向振动				1~2	可选
定子铁芯振动	2~3 组	2~3 组	2 组	2 组	
轴向位移	1	1~2	1	1	
蜗壳进口压力脉动	1	1	1	1	
无叶区压力脉动	1~2	1	2	2	
顶盖下压力脉动	1~2		1~2		
尾水锥管压力脉动	2	2	2	1~2	
尾水肘管压力脉动			2		

机组结构振动监测通常采用低频振动速度传感器和加速度传感器，主轴摆度监测采用电涡流位移传感器或电容式非接触位移传感器，水压脉动监测采用具有良好动态特性的压力传感器。监测测点根据机组型式和容量，以及现场实际情况选择，表 2-1 为各种类型水轮发电机组的典型测点配置表。一般而言，并不是所有机组都需要对如此众多的状态进行在线监测，绝大多数机组容易产生故障的因素，在机组的安装和运行历史记录中都有反映，为此，可根据机组运行的实际情况选择其中最为关注的状态进行监测和分析。另外为了节约成本，对于那些不经常出现故障的项目还可以采用离线检测的方式。

近些年，随着发电机单机容量的增大，定子绕组所承受的电动力也因此成倍增加，因为这种电动力在两导体之间的作用是和电流的二次方成正比。特别是定子绕组端部，长期处于 100Hz 频率振动作用下，如果固定不好，短期就可能使绝缘磨损到击穿的程度。另外，转轮叶片和固定导叶卡门涡引起的共振，也越来越引起人们的重视，如大朝山电站因转轮叶片卡门涡共振引起转轮叶片快速出现叶片裂纹现象。因此，机组噪声和定子绕棒端部振动在线监测技术也开始在一些大型机组在线监测中得到应用。

目前，水电机组稳定性监测具有代表性的产品有：加拿大维保公司（VibroSystM）的 ZOOM2000 系统、美国 GE Bently 公司的 BN3500 系统、美国艾默生公司的 CSI4500 系统、瑞士 VibroMeter 公司的 VM600 系统，以及国内产品华科同安 TN8000 系统、北京奥技异 PSTA3000 系统、深圳创为实 S8000 系统、华中科技大学水机实验室 HSJ

状态监测系统、中国水科院机电所 HM9000 系统、英华达 EN8000 系统等。

从国内、外水轮发电机组振动稳定性监测的研究及应用情况来看，摆度监测技术已经成熟，而当前水电机组低频振动测量仍是个难点问题。机组振动测量可以采用非接触式的涡流传感器或接触式的低频速度传感器，另外还有加速度振动传感器。涡流传感器的精度较高，频率响应范围甚宽，低频下限可以为 0Hz，最适用于涡带频率较低的水电机组的振动测量，但涡流传感器用于振动测量时，安装十分不方便。加速度振动传感器的频响下限较高，通常应用于汽轮发电机组，不宜用于水电机组振动监测。接触式低频速度传感器安装方便，且能测量频率较低的振动，适合水电机组振动测量，但是这类传感器在遇到较大的突变情况如机组开机的冲击或晃动时，其输出信号会产生畸变。

2.2.2 水轮机效率监测技术

水轮机效率监测需要对水轮机流量、工作水头、有功功率、接力器行程、无功功率等参数进行采集测量，除流量外，其他参数在大中型水电厂已实现了自动监测采集，数据具有较高的精确度。水轮机过机流量的测量方法很多，但能适用于在线测量的通常只有两种方法：超声波法和蜗壳差压法。蜗壳差压法采用差压变送器测量蜗壳差压值，然后利用流量关系式 $Q = k\sqrt{\Delta H}$ 完成流量监测，因为其操作比较容易，造价低，因此较为实用。

超声波时差测量法是一种比较成熟的监测方法，国内、外一些公司在积极探索超声波流量测量的方法，并取得了一定的成果，但针对水轮机的特殊流道条件，其测量精度和稳定性方面有待进一步提高。近年来，超声波测流技术在规则管道中的成功应用，为在低水头电站尝试使用超声波法进行测流提供了有价值的借鉴。

近几年，美国 ACCUSONIC 公司开发了用于低水头电站的超声波测流系统，其原理是多声路时差法，主要是将 Gauss 积分技术引申到低水头渐变收缩流道的流量测量中。这一技术在美国、加拿大等多个电站得到了应用，并在美国宾夕法尼亚 SafeHarbor 水电厂与流速仪测流进行了同步对比试验。试验结果表明低水头超声波测流法与流速仪法具有同等测量精度。另外，美国田纳西河流域管理局（TVA）自行开发水力监测软件用于在线监测水轮机效率，保证水轮机运行于高效率区。2006 年，在国内，该测量技术在大型低水头泵站上进行了首次探索应用，并完成了水轮机绝

对效率试验，取得了良好效果。从应用结果来看，低水头不规则流道内流量测量精度在 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ 以内，为低水头电站超声波测量和机组效率的在线监测提供了可行方案。近年来，随着超声波测流技术的成本降低和可靠性提高，其在国内水轮机效率监测中得到了越来越多的应用。

2.2.3 水轮机空化在线监测

空化作为水轮机主要特性之一，它直接影响水轮机的能量特性，使其效率、出力下降；还可导致机组振动、水压脉动增加；尤其在泥沙磨损的联合作用下，其破坏更加强烈，严重威胁机组的稳定运行。大大缩短了水力机组的检修周期，增加了检修工作量，带来昂贵的维修成本和巨额的发电损失。因此，研究水轮机空化监测方法，并研制相应的系统，具有极大的学术价值和经济效益。世界各国对空化产生的机理进行了广泛深入的研究，清楚地了解了空化发生的条件及产生的结果。但如何在工程实际中监测空化现象的发生及判断空蚀程度，至今仍在不断的探索中。

水轮机空化的常用测量方法有能量法、高速摄影法、闪频观察法、声学法和振动法等方法。目前较好适合连续监测水轮机空化的方法有振动测试法和声学法（含噪声法和超声波法）。

水轮机发生空化时，会引起机组的振动，因此，测试机组高频振动是水轮机空化测试的最重要方法之一。空泡溃灭的瞬间会辐射冲量很大的高频机械振荡冲击力，这种声波属于脉冲性的，因此，一定程度上采用振动加速度计测量冲击力产生的加速度更为合适。通过加速度传感器拾取空化振动信号，再由数据采集系统采集到计算机进行分析处理，分别提取时域、频域的特征信号，再根据这些特征值的属性，可判断水轮机的空化空蚀的发生、发展以及严重程度，一定程度上还可预估空蚀的程度。由于振动加速度是通过水轮机机构传递的，因此，通过振动加速度传感器测试的信号基本上可以反映水轮机的空化的真实情况，总的趋势是空化空蚀越严重，所测得的振动加速度值越大。由于振动加速度传感器的感应频率范围与其灵敏度是一对矛盾，往往限制了其在更高频段的空化空蚀信号测试的应用，因此，目前振动加速度传感器一般用于水轮机的空化空蚀低频段信号的测试，尤其是在可闻听频段的空化测试。在水轮机空化空蚀实际测试现场，可将振动加速度传感器直接安装水车室的导叶拐臂套筒、支持盖或者下水导等处，但此处监测的信号由于受环境因素

的影响以及传播损耗，其信号的可用性和可信性必然受到影响，需要后续信号处理提取空化的真实信号。

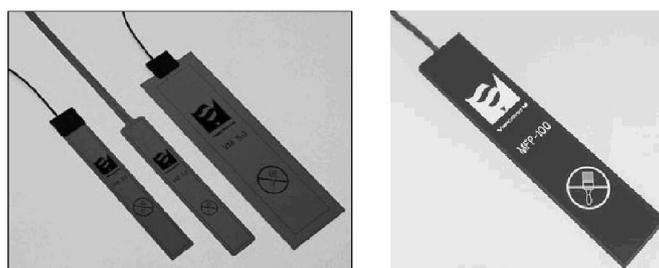
水轮机发生空化空蚀现象时，将产生大量的气泡。随着气泡的形成、膨胀、溃灭和反弹，产生超声波信号，随着空蚀的发展，汽泡的数量增多，溃灭速度加快，冲击强度增大，声波的振幅也随之增加。超声波法是利用水轮机空化过程中所伴随产生的声学方面的一些特征，将空化现象与这些声学特征联系起来，探明他们之间的内在联系的一种方法。用此方法测量空化特性，主要是测量与计算表征声学方面特征的参数，最主要的是声强这个参数。超声波传感器使用压电换能器，具有较宽的频率响应特性，定向性能好，受背景噪声干扰少，在一定的频段范围内能将声能线性转换成电压信号，比较适合监测空化空蚀信号的高频分量。目前学者普遍认为：在监测水轮机更高频段的空化空蚀声信号，尤其是监测空化初生的声信号，超声波传感器更为可靠，清华大学的蒲中奇以及法国空化学者 J.Forhly 在实验室研究空化空蚀时，便是采用超声波测试方法。国内清华大学、华中科技大学、西安理工大学等研究机构采用了超声波传感器，并配合使用加速度计对水轮机空化的在线监测技术进行了研究，开发了一些空化监测系统。华科同安公司开发的 TN8000 型空化空蚀在线测试系统，同时采用振动加速度传感器和超声波传感器测试了紧水滩水电厂水轮机的空化。为在线监测与诊断水轮机的空化现象提供了简捷易行的手段。但这种空化监测技术无法确定空化强度与空化特征参数之间的定量关系，其监测系统也只能作为一个运行的参考，还不能诊断机组空化强度及发生空蚀程度。

在国外，研究人员开发了一些比较实用的监测技术。卢森堡 Korto 水轮机气蚀多维监测与诊断公司在水轮机空化机理及监测方面做了大量的科研工作。Korto 的研究人员发现空化产生振动声场，能把空化水流及由其引起磨蚀信息从水传至水轮机无水侧，为识别空化提供了一种“指纹”。在此基础上研制了一项新的多维空化监测技术，并开发了水轮机多维气蚀监测系统。其基本做法是在水轮机的适当位置安放多个振动声响传感器，以测量在适当频带内的噪声强度，计算反映水轮机空化脉冲性能的噪声脉冲频率，或者比较在各种功率设定值下所收集的噪声频谱，进行多维水轮机空化评估。Korto 水轮机诊断和监测多维技术具有较高的灵敏度，可在空化发展的初期探测到破坏，并为优化运行提供了可靠的依据。另外，该技术提供的关于水轮机空化特性改变原因的大量数据，有助于可靠的诊断和优化维修计划。

2.2.4 发电机气隙和磁场强度监测技术

自 1982 年 7 月第一个气隙传感器在加拿大加利隆 (Carillon) 水电站投入使用以来, 发电机气隙监测技术不断改进, 美国、英国、瑞士、巴西等许多国家的水电站都安装了气隙监测系统。目前, 水轮发电机的气隙与磁场强度测量都是通过平板电容式传感器及配套前置器, 由计算机进行数据采集、存储和输出。气隙采用的电容式位移传感器, 是利用传感器平板与被测表面之间的等效电容的变化反映两个平面之间的距离, 同时, 传感器为平板形式, 适合于安装在定转子之间。典型传感器有加拿大 VibrosysTM 公司生产的空气气隙传感器 VM5 和磁场强度传感器 MFM-100 (图 2-2)。

水轮发电机气隙传感器监测数量可根据发电机的结构参数来配置, 一般转子直径小于 7.5m 时建议配置 4 个传感器, 大于 7.5m 时建议配置 8 个传感器 (图 2-3), 对于发电机转子高度较高的机组, 建议在定子上部和下部分两层分别安装 4 或 8 个。测点布置为沿周向均匀分布, 如布置 4 个测点, 通常布置在 +X、+Y、-X、-Y 方位。磁场强度传感器每台机组安装 1 个, 采用粘贴方式粘贴在紧靠气隙传感器的位置, 如图 2-3 所示。



(a) 气隙传感器 VM5.0 (b) 磁场强度传感器 MFM-100

图 2-2 加拿大 VibrosysTM 公司生产的气隙监测用传感器

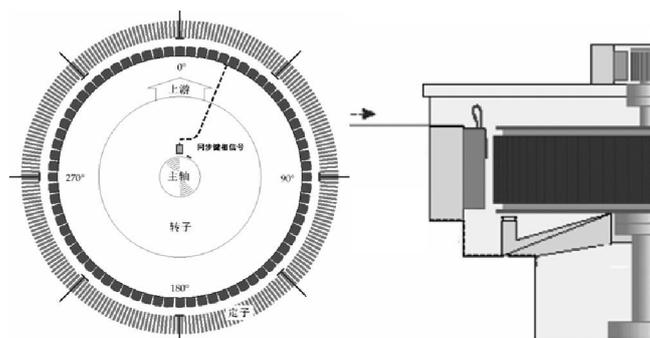


图 2-3 气隙测点布置示意图 (单层布置)

加拿大 VibroSyst^M 维保监测公司专为监测水轮发电机转子和定子结构的动态性

能而设计开发了 AGMS 发电机气隙监测系统，在国外大型水电机组与矿用电机中广泛使用，到 1997 年底，已有在 600 台以上的机组上安装了该系统。系统提供定、转子气隙的数值（最大值、最小值和平均值），而且还可进行详细分析，给出定、转子圆度等参数，是目前较为完善和成熟的气隙在线监测系统。

我国水轮发电机气隙的在线监测技术研究相对较晚，几乎没有成功应用的国产系统。近年来，随着在线监测系统的开发和应用，国内一些单位采用集成或引进的方式安装了 VibroSystM 公司的 AGM 系统，如国内三峡、岩滩、白山、二滩、沙溪口等水电厂进行了安装和应用，取得了一定的应用经验。

2.2.5 绝缘局放监测技术

据统计，水电机组有大约 50% 的故障来源于电气，其中 40% 的故障归咎于定子绕组绝缘的老化或退化。迄今为止，一致认为局放放电是电机常见事故之一。局部放电是指水轮发电机定子绕组绝缘层的内部或边缘发生的非贯穿性放电现象。在高压绝缘系统中，在绝缘内部小空隙里或者在绝缘的表面都有可能发生局部放电。由于定子绕组长期受高温、高电压、振动以及油污、潮湿和化学物质的作用，绕组绝缘将会逐渐恶化，并最终导致发电机定子绕组绝缘故障。通过在线监测发电机定子绕组局部放电，可及时评估发电机定子绕组的绝缘状态，提前发现故障早期征兆，避免恶性事故的发生。

发电机局部放电在线监测，目前以电测法的脉冲电流法为主流方法。主要方法有发电机中性点耦合射频监测法、便携式电容耦合监测法、发电机出口母线上成对耦合电容器法、发电机定子槽耦合器法以及定子槽埋置电阻式测温元件监测法。发电机出口母线上成对耦合电容器法适用于水轮发电机，因水轮发电机相对体积大，便于耦合器安装。

发电机出口母线上成对耦合电容器法的局部放电信号是通过安装在发电机定子绕组上各相汇流环或发电机出口母线上的高压耦合电容器获取的，每相各有一对耦合电容器，每对耦合器的安装位置有一定的空间距离，以便消除来自电机外部的干扰。实际上使两支路参数完全对称是很难的，因此应尽可能减少这种不对称或采用延时线进行补偿，以提高抑



图 2-4 80pF 环氧云母电容器

制干扰的能力。另外耦合电容的可靠性会影响到机组的可靠性。

在早期，用于局部放电信号监测的电容传感器容量一般都在 375~1000pF 范围内，在 1976 年，首次采用了 80pF 的电容传感器（EMC），如图 2-4 所示。此电容传感器的等效电路下限截至频率在 40MHz 左右，而干扰信号分量一般都远小于该频率，因此采用 80pF 的电容传感器，信号的信噪比较高，可以避免误警现象。而且电容容量小，传感器的体积小，寿命高，安装容易，保证了被测系统的安全性。据报道，加拿大 Iris 公司的 80pF 的电容传感器以及 HydroTracTM 局放监测系统已经在上千台发电机上使用。

国内在局部放电在线监测方面的研究起步较晚，发展也比较缓慢。特别是由于局部放电过程比较复杂，到目前理论仍很不完善，给该方面的研究带来了很大的困难。局部放电一般认为与超高压电气设备有关，对于发电机由于出口电压不高，没有引起更多的关注，其注意力集中于 220 kV 及以上的变压器等相关设备。发电机局放产品研发主要集中在一些重点大学，现场应用还未见有突出的表现。

2.2.6 主变压器油气监测技术

电力变压器的内部故障主要有过热性故障、放电性故障及绝缘受潮等多种类型，通过对变压器油中气体的色谱分析，是发现变压器内部的某些潜伏性故障及其发展程度的早期诊断最有效的方法。

主变色谱状态监测是通过在线监测变压器等油浸式高压设备油中溶解的故障特征气体的含量及其增长率，并通过故障诊断专家系统早期预报设备故障隐患信息，避免设备事故，减少重大损失，提高设备运行的可靠性。

目前变压器油气监测的主要方法有气相色谱分析和光声光谱分析法。气相色谱分析法（GC）是实验室离线分析中广泛采用的方法，也是较为成熟的分析方法，其代表产品有美国 Serveron 公司的 TM 系列 DGA（dissolved gas analysis）在线监测系统，主要产品有 TM8 和 TM3。TM8 主要用于关键变压器，可以在线监测 8 种关键故障气体 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂、O₂，可对故障气体、油中水分、油温、环境温度、变压器负载进行相关分析。由于该产品数据支持 IEEE 和 IEC 中的变压器诊断标准，因此得到了较为广泛的使用，国内目前在三峡电厂也有部分机组安装和应用。

英国凯尔曼有限公司的 TRANSPORT X 变压器油气监测系统是利用光声光谱技术原理开发的，也能够测量 8 种故障气体（包括乙炔、乙烯和氢气）加上微水，它的特点是最大程度上避免常规分析方法中的交叉干扰。光声光谱技术利用不同波长的红外线激发不同的气体分子，在密闭容器中产生强度对应于气体体积分数的压力波，最终得到其气体含量。

近年来随着电化学分析技术的发展，其检测时间短，精度高的特点，使其在世界范围内逐渐得到了应用。另外一些系统为了提高测量准确性，也开发了一些独特的功能和方 法，如系统自动校验，以及通过测量油中氮气浓度来修正测量结果等方法。

2.2.7 水电机组温度在线监测技术

机组运行温度是水轮发电机运行的一项重要指标，特别是定子线棒、汇流环管的温度。目前水轮发电机所用的测温方法有热电阻测温、热电偶测温和红外测温。热电阻和热电偶都需要金属导线传输信号，无法保证其具有稳定的绝缘性能，不能直接测量定子线棒和汇流环管铜的温度，只是测量绝缘层温度。红外测温为非接触式测温，只能测量设备的表面温度，易受环境温度及周围的电磁场干扰，需要人工操作，无法实现在线测量，且水轮发电机内的空间非常狭小，无法安装红外测温探头。

近年来，随着光纤测温传感器技术的发展，光纤测温用于水轮发电机温度检测成为可能。光纤温度传感器具有其他形式的传感器无法比拟的优点，如抗电磁干扰、安全、耐高电压、耐化学腐蚀、耐高温以及低损耗等，它们普遍应用于强电场、强磁场环境中。

（1）光纤测温技术原理与特点

目前光纤测温有两种形式：分布式光纤测温、点式光纤测温。

1) 分布式光纤测温技术

分布式光纤测温技术基于光的散射特性，即光束在介质中传播时部分光线会偏离原方向分散传播的现象。其核心理论依据有两个：一是光时域反射原理；二是后向喇曼散射温度效应。前者用于空间定位，后者用于温度的测量和数据传导，形成温度和空间位置一一对应的关系，从而达到分布式测温的目的。

分布式光纤测温能够沿光纤多点在线测量，即可感知温度信息又可传输温度信息，测量距离可达数千米，测量温度比传统的电阻测温要高很多，不足之处是成本相对较高。

2) 点式光纤测温

点式光纤测温是利用半导体材料吸收光谱随温度变化的特性来实现的。光通过半导体材料时，半导体材料会吸收光子能量，当光子能量超过禁带宽度能量时，吸收波长将发生变化，且吸收波长随禁带宽度能量的减小而变大。禁带宽度能量是温度的函数，当温度增加时，禁带宽度能量会下降。因此，当温度增加时，吸收波长会向长波长方向移动。当光源光强和光谱分布一定时，随着温度升高，半导体材料透过率曲线将向长波移动，这样光电探测器收到的光强度将减弱，由光信号的变化即可测得温度，据此可进行温度检测。

点式光纤测温由半导体吸收材料、光源、光纤、光电探测器及信号处理系统组成，它具有体积小、灵敏度高、时间响应快、工作可靠的特点。它的温度测量范围在 $-40\sim 225^{\circ}\text{C}$ 内，精确度小于 1°C ，温度从 15°C 突然变到 110°C 的响应时间为 25s 。对单点温度进行精确的测量，原理简单、性能稳定。

(2) 光纤测温技术在水轮发电机温度监测中的应用

田涛对光纤测温系统在三峡机组上的应用进行了试验研究。在机组汇流环安装光纤测温装置，并进行试验，分析了光纤测温的准确性、稳定性以及系统功能，结果表明光纤测温采集准确、稳定性好、满足三峡水电厂在线监测系统要求。目前三峡水电厂地下电站机组有2台机组的定子铜环测温系统采用了光纤测温装置，根据定子结构特点，每台机组配置了18个测温点，运行经验表明点式光纤测温用于大型水轮发电机温度检测是可行的和有效的手段。

三峡左岸电站机组为 700MW 水轮机组，机组容量大，对系统安全运行影响大。机组运行温度是发电机组运行的一个重要指标，温度监测能够及时发现发电机组运行中存在的问题，从而保证发电机组安全运行。三峡左岸电站目前以电阻温度探测器(RTD)测温方式为主，在运行中发现RTD易损坏，其引线导线绝缘易脱落，造成绝缘电阻降低，对测温造成了影响，也影响了发电机的安全运行。光纤测温具有抗电磁干扰，耐高压、耐化学腐蚀、抗震和防潮等优点，适合三峡左岸电站机组复杂的运行环境。由于光纤测温技术非常适合发电机定子线棒和发电机汇流环管温度

监测，将来在我国水电站机组温度监测中大有作为。

2.3 故障诊断技术

2.3.1 国内外诊断技术进展

设备故障诊断技术起源于 20 世纪中期，20 世纪 60 年代初，欧美等国家率先进行了研究，后在其他工业国家相继推广，但仅集中应用于宇航、原子能等尖端工业部门。二十世纪七十年代后，由于现代工业设备越来越复杂，自动化程序越来越高，相应表现出设备维修费用高，维修周期长，设备故障的损失大等一系列特点，这种发展趋势引起了设备故障诊断技术的迅速发展，并开始在航空、船舶、汽车、机械、冶金、电力以及石油化工等重要工业生产领域得到应用。

由于水轮机的故障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、动压力以及发电机电磁力的影响，机组运行时，这三者是互相耦合，相互影响的关系，对其进行全面的故障诊断具有相当大的难度，导致水电机组故障诊断的研究与应用，普遍滞后于其他旋转机械。

目前各个行业研究和应用的故障诊断方法很多，按照其诊断分析原理也提出了各种不同的分类，而故障诊断作为一个系统工程，前期的征兆获取和后期的分类识别，都可以应用不同的数学物理方法。在前期数据处理和征兆获取这一部分，可应用小波降噪、轴心轨迹识别、不变矩提取、奇异谱、分形几何等方法；而故障诊断技术更多的是关注分类识别和故障推理这一部分内容，这里按照分析方法的不同，将诊断方法分为基于知识的诊断方法和基于数据的诊断方法两类。

涉及研究领域的知识表达、处理和应用的方法，统称为基于知识的诊断方法，如故障征兆树方法、专家系统方法等，他们的特点是将专业知识通过语义和框架的方式进行表达，故障的诊断则采用推理和推理过程进行，如产生式规则推理、逻辑推理、模糊知识推理等。而基于数据的故障诊断方法，则利用设备不同的状态数据或故障模型，应用经典统计模式识别（贝叶斯估计方法、粒子滤波方法）、神经网络技术或支持向量机模型分类等方法，通过数据学习和建模，将设备状态进行分类，最终得到系统可能存在的故障。

国外故障诊断工作开展的相对较早，美国纽约电力局（NYPA）针对电厂状态检

修，开展了一项 HydroX 项目，开发了一套应用在 St.Lawrence 水电站的 HydroX 系统，集成了 GE Bently 公司的 System 1 资产状态监测平台，以及 RulePak 故障诊断模块，具有一定的故障诊断功能，已开发 67 种故障模式，是目前相对较好的故障诊断平台。另外，丹麦 Rovsing 公司的 OPENpredictor™ 旋转及摆动设备的开放预测系统，提供了关键机械部件故障和潜在故障的自动检测功能。

近年来，水电机组故障诊断技术领域投入较大，研究取得了一些进展，专家系统和神经网络技术作为两类诊断方法中具有代表性的技术，是研究与应用的热点，但还不能满足生产实际的需要。实际应用中，大多水电机组故障诊断系统只在故障诊断方面进行了初步尝试。总体而言，诊断方法研究比较多，开发应用系统较少，现有的诊断功能往往多为摆设，不实用。

2.3.2 专家系统与神经网络诊断技术

随着计算机科学和人工智能的发展，起始于 20 世纪 70 年代初期的专家系统故障诊断方法，成为人工智能应用最方便和发展最成熟的方法，并在许多领域得到了应用。不过，尽管专家系统利用了专家积累的丰富实践经验，能模仿专家分析问题和解决问题的思路，而且能够解释推理过程，但专家系统获取知识能力、容错能力不高，自我学习能力较差，现场实际应用中特别成功的事例并不多见。

而 20 世纪 50 年代初兴起的神经网络技术，虽然经历了 70 年代知识工程兴起带来的低谷，80 年代重新崛起的神经网络技术，通过神经元间的相互作用实现知识推理，具有自学习能力，为水电机组故障诊断提供了一种新的解决方案。

近年来出现的神经网络和专家系统相结合的诊断方法，把传统专家系统的基于符号的推理转化成知识网络结构，以数值运算实现逻辑推理，提高专家系统的执行效率并利用其学习能力解决专家系统的学习问题。到目前为止，这方面的研究还在发展和完善中，但多种诊断方法的融合应用，是当前诊断技术研究的趋势。

2.3.3 基于特征样本的诊断技术

水电机组故障样本较少，基于水电机组故障特征和故障样本的诊断方法，很难在短期内取得实用成果，如果能针对机组正常运行时监测的大量数据进行数据挖掘，建立机组健康运行状态模型，再将实时监测的机组状态与模型对比，可以得出当前机组状态与健康状态的异同，这就是基于特征样本的诊断技术，又称为基于指纹的

诊断方法。

对水电站机组主设备运行状态开展机遇特征样本的诊断识别，首先需要确定与电站主设备各运行状态对应的有代表性的特征参数，并建立主设备各运行状态的标准模型，最后在设备运行过程中，选择某些特征参数，跟踪其变化规律（趋势分析），并与健康运行标准模型相比较，根据设定的报警或者故障阈值，来评估和判别机组的运行状态。

目前国内外水电站设备故障诊断系统，还不能达到完全对现场故障进行自动诊断的程度，大量故障主要依靠有丰富经验的专家来进行诊断与处理。通过选择特征参数，建立设备健康运行标准模型，跟踪运行设备的状态变化趋势，可实现设备的运行正常、异常或故障的智能评估。我们将设备评估结果分为运行正常、异常（潜在故障）、已发故障三种，对评估结果正常的设备，只需自动生成常规运行状态报表，对出现异常（潜在故障）的设备，根据建立的趋势预测模型进行相关参数的状态识别和样本比较，给出潜在故障后期发展的趋势，并给出对应的处理和预防办法，对已经发生故障的设备，如故障特征明显，采用智能故障诊断系统自动识别，对于复杂故障将运用专家系统和人机交互式的远程专家诊断，最终确定故障类型、可能产生的原因，以及对应的处理和解决办法。

2.3.4 机组部件性能退化评估与预测

水电机组设备随着累积运行时间的增加，会出现缓慢的性能退化，这种性能退化在初期并不影响机组运转，但是在后期却会对机组稳定性造成巨大影响，甚至埋下安全隐患。即水电机组设备在运行过程中会经历由正常（健康）到退化直至失效的过程，如果能在设备退化过程中监测到它的退化程度，且能根据设备退化状态的历史和现状，及时预测未来的退化趋势，就能有针对性地组织生产和制定合理的维修计划，做到既能防止设备异常失效的发生，又能实现生产效率的最大化。设备性能退化评估正是基于这一设想而提出的一种主动维护技术，它侧重于对设备全寿命周期中性能衰退程度的度量，而不过多的注重某一时间点的故障类别诊断，与现有的故障诊断技术在理念上和方法上都有很大的不同。

研究水电机组设备性能退化评估与预测技术，以改变传统的被动维修模式，实现设备主动维护模式，避免因设备失效引起灾难性事故，从而提高设备的利用率，

缩短设备的停机维修时间。

3 存在的问题及建议

水电机组状态监测和故障诊断技术是实现机组状态检修的关键。目前国内外已有大量研究机构进行了水电机组状态监测和故障诊断技术的相关研究，取得了较好的成果，但还存在一些不足之处，有待进一步研究提高。

(1) 机组振动稳定性监测技术

从国内、外水轮发电机组振动稳定性监测的研究及应用情况来看，摆度监测技术已经成熟，而水电机组低频振动监测仍是个难点问题。国内水电机组的振动监测，一般采用低频振动速度传感器，具有较好的低频响应特性，安装使用也比较方便，但低频速度传感器在遇到较大突变如机组开机的冲击或晃动时，其输出信号会产生畸变。另外振动传感器的选型、压力脉动传感器的安装目前还缺少统一标准等。

(2) 水轮机效率监测技术

机组流量的测量是实现水轮发电机组能量指标实时监测与评估的基础，是一项困难而重要的工作。近几年，超声波测流技术在规则管道中的成功应用，为水头电站效率监测提供了新的可能。但针对水轮机的特殊流道条件，其测量精度和稳定性方面有待进一步提高。

(3) 空化监测技术

近年来，利用超声波和加速度传感器对空化监测进行了试探性的研究，积累了一些数据，但目前技术尚不成熟，监测数据仅能作为参考，还不能为空化诊断与机组检修提供依据。由于水轮机结构的问题，空化监测设备装置的安装固定也非常困难，目前国内外空化监测的研究成果还不多，也没有比较成熟的产品可以直接加以利用。需要从空化监测方法和监测传感器选择及布置等方面对空化监测进行研究完善。

较为全面监测空化应该采用振动法和超声波法相结合的监测技术，由于适当降低振动加速度频率响应范围，可以成倍提高其灵敏度，以保证振动加速度传感器有足够的灵敏度。因此，在空化可闻听频段范围内，采用振动加速度计监测 20 Hz~20 kHz 的信号，而大于 20kHz 频段内的空化空蚀声波信号采用超声波法，并尽可能选用宽频的超声波传感器，满足两类传感器对不同频段信号的频率响应特性，并从监

测传感器选择及布置等方面对空化监测进行研究完善,提高空化监测系统的可靠性。

(4) 气隙与磁场强度监测技术

目前,我国水轮发电机气隙监测的应用水平还相对较低,只有少量大型机组安装了气隙在线监测装置。如何根据气隙监测数据进行气隙偏心诊断,判定问题磁极位置,发现发电机潜在故障,还需要进行更深层次的研究。

(5) 局放监测技术

近些年国内一些水电厂安装的局放监测设备,在应用中如何确保测到的信号为局放信号还具有相当的难度。如果局放监测中抗干扰问题不能得到解决,局放监测就不能取得很好的效果,监测到的结果就只能作为检修工作中的参考,而不能作为依据。因此如何提高水轮发电机组局放监测的抗干扰能力,从大量局放监测信号中正确识别、分离出局放信号,是一个急需解决的技术难题,需要进行深入的研究。加拿大 IRIS 公司提出的时差法定时噪音分离技术,以及英国 IPEC 公司采用的“事件识别”软件分离噪音,都是针对局放监测信号的抗干扰和信噪分离问题上给出的解决方案,但目前在国内水电机组中似乎还没有很成功的应用实例。

(6) 主变油气监测技术

对主变油气监测分析技术来说,如何提高油气监测设备的精度,将是未来推行油气在线监测的关键。以三峡电站为例,当前应用安装的三种监测设备,均存在故障气体含量较高时,精确度较好;但故障气体含量低时,精确度与灵敏度均不足的问题,难以及时发现变压器潜在故障。而且部份测量数据不稳定,易出现误报,数据测量重复性差,经常出现与离线油化报告数据不一致情况。

(7) 故障诊断技术

目前国内水电机组还没有成功应用的自动诊断系统,诊断方法研究比较多,开发应用系统较少,大多只在故障诊断方面进行了有益的尝试。国外相关的诊断系统也很少。要实现比较完整意义上的水轮机组自动故障诊断,还需要从监测技术、信号处理、诊断模型以及故障机理等多方面进行深入研究。

随着电站状态监测系统的不断完善,应深入开展机组运行状态实时评估技术研究,充分利用机组已有海量状态监测数据资源,对机组状态进行实时评估,追踪水电机组运行状态随时间的演化过程,将异常参数隐含信息显性化,从机组运行监测参数的异常现象中挖掘出设备状态与潜在故障的关系,及时进行异常状态预警,减

少故障导致的停机损失，以解决当前水电机组故障样本少、难以对其开展有效的诊断的难题。

随着现代通信技术和计算机技术的迅速发展，如何利用计算机通信技术进一步提高诊断的精度、发挥多专家协同诊断的优点、避免重复开发是进一步的研究方向。为此，分布式水轮机组在线监测与故障诊断方式成为了将来热门话题。它通过计算机网络实现信息的远距离传输，使得地域性网络诊断中心可以在远离设备的地方随时监视设备的运行情况，必要时进行诊断并给出结论和对策，实现异地协同诊断，使得多个诊断系统服务于同一台设备，多台设备共享同一诊断系统，弥补了单诊断系统在领域知识上的不足，提高设备故障诊断的可靠性和智能水平。

这种以状态监测技术为基础，利用当今最流行的 Internet 网络通信平台，建立流域多个电站主设备状态监测、故障诊断、和检修管理于一体的设备远程管理方式，必将成为未来水电设备运行维护的主要模式。

参考文献

- 1 安学利. 水力发电机组轴系振动特性及其故障诊断策略. 博士学位论文, 华中科技大学, 2009
- 2 安学利, 潘罗平, 桂中华, 周叶. 抽水蓄能电站机组异常状态检测模型研究. 水电能源科学, 2013, 31(1): 157-160.
- 3 Bajic B., Methods for vibro-accoustic diagnostics of turbine cavitation, [J] Journal fo Hydraulic Research, 2003, 41(1):87~96
- 4 Bajic B., Multi-dimensional cavitation monitoring update [J]. International Water Power and Dam Construction. 2004,56(11):38~41
- 5 Bajic B., Multi-dimensional diagnostics of turbine cavitation, [J]. Transaction of the ASME-Journal of Fluids Engineering, 2002,124(12):943~950
- 6 Branko Bajic, Cavitation diagnostics and monitoring, INTERNATIONAL WATER POWER & DAM CONSTRUCTION FEBRUARY 2003
- 7 Branko Bajic, More on multidimensional cavitation monitoring, Hydro 2004 Conference
- 8 Branko Bajic, Multidimensional monitors for hydroelectric power plants, HYDRO 2002 Conference,2002
- 9 程养春. 发电机定子绝缘局部放电非接触式在线监测方法的研究, 华北电力大学博士学位论文, 2005.5
- 10 崔彦平, 王秉仁, 傅其凤等. 基于神经网络的综合智能故障诊断专家系统. 机电一体化, 2003, 9(4): 102~105

- 11 戴庆忠.当代水电设备技术进展述评.东方电气评论, 2002
- 12 董毓新.水轮发电机组振动.大连: 大连理工大学出版社, 1989: 10~30
- 13 桂中华.水轮机故障智能诊断及振动数字化预测研究.华南理工大学博士学位论文, 2005
- 14 桂中华, 韩凤琴, 张浩.小波包特征熵提取水轮机尾水管动态特性信息.电力系统自动化, 2004, 28(13): 77~79
- 15 黄群古.基于小波理论的电力系统电机故障信号分析方法研究.华南理工大学博士学位论文. 2001:1~10
- 16 Jiacong BAI, Xiuliang LIU and Chunrong XU etc. Ultrasonic flow measurements in a power station in river channel. ICEE2K, Kitakyshu City, Japan. July 24~28, 2000
- 17 J. Yu. Bearing performance degradation assessment using locality preserving projections and Gaussian mixture models. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25: 2573-2588.
- 18 蒋东翔, 黄文虎, 徐世昌. 分形几何及其在旋转机械故障诊断中的应用. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(2): 27~31
- 19 李启章.对大型机组振动、裂纹问题的探讨.大型水电机组技术研讨会论文, 2003
- 20 李启章.大型水轮发电机组的振动稳定性问题.湖北电力. 2000(10): 21~23
- 21 李友平, 任泽民等. 水电机组实时效率监测系统.水电自动化与大坝监测, 2004 (2) :4~5
- 22 刘万景.水电厂机组的状态监测.水力发电, 1999,(9): 55~57
- 23 林良有, 张伟, 吴玉林.基于临界空化曲面的空化监测系统.农业机械学报, 2006, 32(7): 58~60
- 24 刘秀良, 徐春荣, 刘永前.低水头电站流量在线监测新技术.第一届水力发电技术国际会议论文集(第二卷), 2006, 392~396
- 25 刘湘平, 孟玉禅.发电机变压器类电力设备的状态监测与故障诊断.广东电力, 2004(8):13~16
- 26 马宏忠.电机状态监测与故障诊断.机械工业出版社, 2007(6)
- 27 潘罗平, 桂中华等. 水轮发电机组状态监测技术, 华南理工大学出版社, 2008.12
- 28 蒲中期, 张伟等.水轮机空化在线监测系统.电力系统自动化, 2004,28(10): 62~64
- 29 孙才新.大电机主绝缘局部放电测量及老化特征研究, 重庆大学博士学位论文, 2004.5
- 30 沈东, 陈思.水轮发电机组振动故障诊断与识别.水动力学研究与进展, 2000,15(1): 129~133
- 31 沈维义, 吴培豪.大型混流式机组水力稳定性的若干问题.第十四次中国水电设备学术讨论会论文集, 2000.7
- 32 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用, 化学工业出版社, 2003(6)
- 33 田浩, 于石生.水轮机空化的超声检测技术研究.无损检测, 2003, 25(5): 250~251
- 34 田涛.光纤测温在三峡左岸电站机组中的应用. 2012.8, Vol. 36(4)
- 35 唐澍, 陆力, 马素萍.水力机械新技术的研究与应用.水利水电技术, Vol.30(11), 1999.11
- 36 唐澍, 吴培豪. 近代大型混流式水轮机稳定性不良和裂纹原因的探讨. 第十五次中国水电设

- 备学术讨论会, 2004.7
- 37 谭月灿, 韦彩新, 唐穗平等. 改善柘溪电站混流式水轮机水力稳定性的研究. 水力发电, 1998(2): 47~51
- 38 V. Tran, H. Pham, B. Yang, T. Nguyen. Machine performance degradation assessment and remaining useful life prediction using proportional hazard model and support vector machine. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 32: 320-330.
- 39 王海. 水轮发电机组状态监测诊断及综合试验分析系统研究. 博士学位论文, 华中科技大学, 2001
- 40 王珂纶. 水力机组振动. 北京: 水利电力出版社, 1986: 36~110
- 41 王剑锋, 隆元林. 水电厂的状态检修和故障诊断技术. 四川电力技术, 1999, 23(1): 20~24
- 42 王江萍, 宁延平. 机械设备故障智能诊断技术水平与发展预测. 石油机械, 第 33 卷第 8 期, 2005
- 43 王海. 水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统研究. 博士学位论文, 华中科技大学, 2001
- 44 王涛, 南海鹏, 王德意, 董开松. 水电机组空蚀在线监测系统的研究. 大电机技术, 2002.No6:44~46+66
- 45 王天正, 杨杰, 徐顺伟. 大型发电机局部放电在线监测的分析与探讨. 山西电力, NO.4(127), 2005.08:58~59+68
- 46 王伟, 李成榕, 王泽忠等. 发电机定子绝缘局部放电故障模式的试验研究. 现代电力. 2001, 2(1): 15~19
- 47 王善永, 钟敦美, 张启明. 水电机组状态参数趋势分析与在线识别. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 29~32
- 48 吴今培. 智能故障诊断技术的发展与展望. 振动测试与诊断, 1999, 19(2): 79~85
- 49 吴培豪, 唐澍. 混流式水轮机的水力不稳定现象与需要关注的若干新问题. 第十五次中国水电设备学术讨论会, 2004.7
- 50 杨春明. 水轮发电机定子绝缘局部放电的在线监测. 云南水力发电, Vol.18(1), 2001
- 51 杨迎化, 唐大全, 卢建华. 神经网络在智能故障诊断技术中的应用及其发展趋势. 测控技术, 2003, 22(9): 1~5
- 52 姚大坤, 李至昭, 曲大庄. 混流式水轮机自激振动分析. 大电机技术, 1998(5)
- 53 余涛, 王晶等. 水电机组故障诊断专家系统研究现状与发展前景. 云南电力技术, 1999, 27(2): 50~53
- 54 诸葛伟林, 刘光临, 将劲等. 弯肘型尾水管非定常涡旋流动数值模拟. 水动力学研究与进展(A). 18(2), 2003: 164~167
- 55 张凤鸣, 惠晓滨. 航空装备故障诊断学, 国防工业出版社
- 56 张伟, 诸福磊, 张正松. 300MW 抽水蓄能机组振动状态监测分析诊断系统研究, 清华大学学

报, 1998(4): 108~112

57 邹祖冰, 杜建国, 吴仲平. 光纤测温在大型水轮发电机上的应用. 水力发电, 2011年02期