

摘 要

水电站机组的运行特性主要包括三个方面的内容：一是能量特性，二是空化和空蚀特性，三是机组的稳定性。能量特性和空蚀空化特性关系到机组的利用程度和机组的使用寿命，但是稳定性不仅关系到机组的使用寿命而且关系到机组以至于电站能否正常运行。同时，由于机组振动诱发的水电站厂房结构的振动已经成为水电站运行和设计的关键问题。现有的传统分析方法可以对水电站机组和厂房振动信号进行有效的分析及机组和厂房振动故障的诊断，传统的傅里叶分析方法对平稳信号的分析已经成熟，能够有效的对平稳信号进行有效的分析，但是傅里叶分析方法对非平稳信号的分析则存在一定的缺陷，甚至显得无能为力。小波、信息熵技术等现代处理手段的出现和发展在信号处理方面显示出了其优越性和广阔的发展前景。本文就是以宁夏青铜峡水利枢纽机组的实测信号，利用小波分析理论的小波分解和小波能谱熵及多分辨率奇异谱熵理论对信号进行处理分析，研究水力机组运行的振动特性。具体思路和研究内容如下：

第一章绪论部分简要介绍水电站机组振动现状、存在的问题和发展动态，对小波、信息熵等现代信号处理方法及本课题所要解决的问题进行归纳和说明。

第二章主要具体结合青铜峡机组和厂房振动的实测信号，利用传统的傅里叶分析方法对机组的振动测试进行分析和研究，从不同角度综合评价机组的运行稳定性，指出诱发机组振动的多种因素，并结合实测信号的分析确定青铜峡机组振动的振源。

第三章简要介绍了小波和信息熵理论的发展历史及其理论，及小波和信息熵相结合的小波熵理论在信号分析当中的运用和发展趋势。

第四章，利用小波与信息熵理论对青铜峡机组部件和摆度实测信号进行分析，并结合对尾水管脉动压力信号的奇异谱熵分析结果对青铜峡振动信号进行分析，指出青铜峡机组尾水管压力脉动对机组振动的影响。

第五章总结和展望，指出在本论文中存在的及需要进一步加以研究和解决的问题。

关键词：机组振动，振动信号，小波，小波能谱熵、多分辨率奇异谱熵

Abstract

The operation characteristics of Water Turbine Generator Set mainly include energy, cavitation and stability. Energy is related to extent of water-power utilization; cavitation is related to service life of turbine; the stability not only has great effect to turbine life, but also is directly related to the normal operation of power station. Meanwhile, the vibration of plant structure induced by water-power set has become key problem in designing and operation. The traditional analysis method has good effect in the analysis of vibration signal of power station and damage diagnosis of Water Turbine Generator Set. Fourier transform which is mutual in the analysis of steady signal has limited application in the analysis of unsteady signal. The development of Wavelet analysis has been gradually presenting their advantage and extensive prospect in analysis of measured signal. Based on the actual measurement data of Qingtong-Gorge power station, this paper is aiming to study the vibration characteristics of water-power set with the wavelet decomposing of wavelet analysis theory, wavelet energy entropy and multi-resolution singular spectrum entropy.

In chapter 1, general situation, the development and existed conditions of vibration of water-power set are introduced, the new method of signal analysis such as wavelet analysis, information entropy and problems to be solved in this paper are summarized.

In chapter 2, according to the measured data of Qingtong -Gorge water-power set, with the application method of traditional Fourier transform, the operation stability of the water-power set is assessed from different angles, thus the factors and the sources that induced the vibration of the water-power set are pointed out according to the analysis result of the measured data.

In chapter 3, the development history and the theory of wavelet and information entropy are introduced briefly, then the utility and the development tendency in the signal analysis of the theory of wavelet entropy are summarized.

In chapter 4, the measured signal of the components of the water-power set and the throw are analyzed with the application of the theory of wavelet and information entropy theory, thus according to the analysis result above, the vibration signal of Qingtong-gorge power-set is analyzed and the influence of Qingtong-gorge power-set draft-tube pulsant pressure on the vibration of power-set is clarified.

The content of the chapter 5 is the summary and the prospect, some problems that are needed to be further studied and resolved in this paper are pointed out.

Keywords: vibration of water-power set, vibration signal, wavelet, wavelet energy entropy, multi-resolution singular spectrum entropy

独创性声明

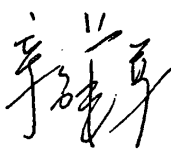
本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

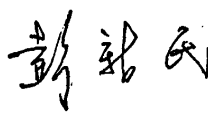
学位论文作者签名:  签字日期: 2007年6月11日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 
签字日期: 2007年6月11日

导师签名: 
签字日期: 07年6月13日

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

我国是水电大国，现在已有的装机容量已经居于世界首位。1949 年新中国成立时，水电装机容量为 36 万KW，居世界第 20 位，新中国成立后 50 多年，随着国民经济的发展，我国水电建设事业取得了飞跃发展，一些特大型和巨型的水利枢纽工程相继拟建和开工建设，其中有金沙江的溪洛渡、澜沧江小湾和糯扎渡、雅砻江锦屏一级和二级、向家坝、怒江流域开发等一批装机容量超过 300 万KW 的巨型水电站，至此水电装机容量已经突破 1 亿KW，这些大型和特大型水电站的建成将组成中国电网的骨干电源，推动中国经济的发展^[1-2]。

随着水电工程建设的高速发展，机组容量和尺寸的增大，水轮机比转速不断提高，机组运行的自动化程度也越来越高，因此对机组稳定性的研究也变得越来越重要。

1.2 水轮机组运行中存在的稳定性问题

水轮机和发电机是水电站的主要设备，其运行状况的优劣将直接影响着机电设备的安全性能及水电站的经济运行。水电站机组的运行特性主要包括三个方面的内容，一是能量特性，二是空化特性，三为机组的稳定性。其中，能量关系到水能的利用程度，空化和空蚀特性则关系到机组的使用寿命，而稳定性则关系到机组的使用寿命乃至电站能否正常运行。随着机组单机容量和水头的提高，其稳定性问题也日益突出。目前国内外的发电机组都存在一定的振动问题，有的甚至引起厂房及相邻水工建筑物发生共振，危及电站的安全运行。

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。

我国已投产的大型电厂如岩滩、二滩、小浪底、隔河岩、东江等大型水电站，自投入运行以来均不同程度的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，但是未根本解决；五强溪、小浪底、李家峡、东江水

电站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、我国在建和规划中的机组尺寸增大，要求有良好的运行稳定性。

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，其显著特点就是机组水头变幅大，还有电站随水轮机参数的不断提高，因其尺寸巨大、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，有必要进行深入分析和研究。

3、国内外水轮机振动预估方法

水轮机的稳定性是水轮机三个主要性能指标之一，但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，常规方法是测定水轮机模型的尾水管。通常水轮机稳定水平取决于两个因素，一是激振力的大小和频率，二是振动部件的静动力响应特性。如何预估水轮机真机的运行稳定性是值得深入研究的课题。

4、水头变幅大的水轮机稳定性尚需深入研究。

我国在建的三峡水电工程和规划中的溪洛渡、小湾、水布垭、引子渡等水电项目其水头变幅比常规大，水头变幅大的电站其机组在偏离设计水头运行特别容易发生高水头或低水头的不稳定现象，因此在水轮机的水力设计、选型及结构设计时就要对其运行稳定性进行深入研究^[3-8]。

1.3 水轮机振动研究方法概述

水轮发电机组的运行稳定性直接通过机组的振动状态反映出来，国内外已建电站中许多机组都曾发生过不同程度的异常振动。日本电气工程学会曾对日本在1925年以后投产运行的立式机组作了调查，大约有10%的机组出现异常振动。从振动部位，几乎都是“转轮振动”或“轴系整体振动”。究其振源，则属于“转动部分不平衡”或“水压脉动”约占总数的60%。前苏联、西欧一些国家也对振动问题进行了大量的研究，尤其是加拿大，其丰富的水力资源决定了水电在电力工业中的地位，国外一些大公司，如Quebec公司，对立式机组的振动问题进行了

大量的研究。我们国家早在 50 年代就发现并开始研究机组的振动问题，一些大中型机组，甚至小型机组均发生过不同程度的异常振动，如葛洲坝电站，刘家峡电站，渔子溪，富春江，密云等均出现异常振动^{[9][10]}。

国内外对水电站振动研究表明，水发电机组的振动主要有机械振动、电磁振动和水力振动三种类型，机械振动和电磁振动一般是可以消除或减轻的，由于引起水力振动的原因错综复杂，因此消除或减轻水力振动则要困难的多。特别是水发电机组在偏工况运行时，水力振动的影响尤为明显。正是由于机组的长期振动而导致机组部件的疲劳甚至遭到破坏，有的甚至引起厂房和相邻水工建筑物发生共振，严重影响机组的安全运行和发电效益。因此人们十分关心机组的异常振动情况。人们对水力机组的振动问题进行了大量的实验和研究，主要有以下四种方法：

1.3.1 理论分析

理论分析，主要是基于水轮机的基本理论、丰富的科研成果信息库和其它相关领域的基础知识，运用逻辑思维进行分析判断，定性分析水轮机的能量特性、空化性能，并分析可能引起水轮机水力振动的原因和提出改进措施。它是确定解决问题技术思路的主要依据，但由于水轮机内部流动的复杂性以及过流部件和水轮机轴系流固耦合的系统的复杂性，因此理论分析方法只能从定性的角度对水轮机的水力性能及稳定性进行分析^[11-13]。

1.3.2 模型试验

模型试验，主要是基于水轮机的模型试验装置、模型试验台和测试设备对水轮机流体运动进行模型试验，应用先进的测量设备和成像系统和对模型水轮机内部水力特性进行观察和测量，得到一些相关的数据和图像。这是研究水轮机水力性能及稳定性研究的重要工具，通过模型试验可以对模型水轮机效率、空化系数以及水压力脉动规律进行研究，从而提高水轮机的水力性能及稳定性。同时由于水轮机真机的水力效率和空化系数，可以通过经验公式对模型试验数据进行修正得到，因此模型试验是当代研究水轮机水力性能的重要途径^[14-15]。

1.3.3 真机试验

由于引起水轮机水力振动规律尚不十分清楚,模型和真机的某些水压力脉动关系也不能完全模拟及换算^[9]。因此,真机的水力振动特性及减小水力脉动的措施,必须在相应水电站真机上进行现场试验测试,弄清振动部位及分析其振动原因,才可以解决真机振动问题。近几年,随着科学技术的发展,尤其是计算机技术的发展,水电系统的状态维修工作已越来越受到重视。基于水轮机组现场测试基础上的监测技术、诊断技术的研究吸引了越来越多的科研工作者。

1.3.4 数值解析

数值解析就是利用CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术,对水轮机部件内部流动进行三维粘性解析,得到比较精确的数值解,从中找出水轮机不稳定工况是否与仿真出现的某些流动现象有关,从而达到预测和解决振动的目的。数值计算早期主要应用于水轮机的设计制造业和水力性能分析,随着计算机技术和CFD技术的发展,近几年来CFD技术也已应用于水轮机水力振动的研究。无论是对新建电站的水轮机设计还是对已建电站水轮机的水力振动分析,都涉及到能量特性,空化特性及稳定性等^{[10] [11]},在这方面CFD技术显示出极大的优势。随着计算机技术的发展和CFD 理论日趋成熟,CFD 技术的重要性正逐步被认识,水力机械内部流动的模拟正日益成为水力机械研究部门及制造厂的重要辅助手段。从CFD技术在水力机械中的应用现状和发展趋势来看,主要有以下两大方向,一是水力机械过流部件内部流场的定常解析,它主要用于分析水力机械各流道的内部稳定场流态,研究各部分水力损失及叶片表面的压力分布,以及对水力机械的优化设计^[16-17];二是水力机械内部流场的非定常解析,主要用于分析各流道内部的瞬时流态,并研究流道内各种不稳定因素引起的水力振动和水压力脉动,如导叶和转轮叶片尾部的卡门涡列、静止叶栅和导叶之间的静动翼干涉和尾水管内螺旋型涡带等不稳定因素对于水轮机稳定性的影响。

1.4 水轮机组监测与诊断研究现状与发展

1986年,第31届国际大电网会议就机组监测与诊断问题进行了专题发言,各国专家对监测对象以及如何监测提出了不同的见解,比较集中提及的监测内容

有机组振动、气蚀、发电机气隙等。1990年12月在武汉由能源部电力司主持主办了首届水电站诊断技术研究会,与会代表交流了国内外诊断技术发展情况,认识到在我国尽快开展这一工作的必要性。国家电力公司在1999年科技发展规划中,已明确提到有关水轮机组的故障监测和状态检修技术的发展计划,有关试点和攻关课题也正在筹备安排当中。在这种大趋势下,近几年,随着大中型水电厂的建设,水电系统的状态维修工作已越来越受到重视。水轮发电机的监测与诊断已经成为当今世界普遍关注和感兴趣的研究课题,目前我国一些研究所、中试所、高等院校也不同程度的开展了诊断方面的研究工作。国内智能诊断研究范围,一是对理论和方法的研究;二是实际技术和系统的开发与应用研究。根据近年在这一领域发表的论文、参与的人数、获奖的成果以及国家、地方各部门投入的资金看,国内本项研究的发展是迅速而规模庞大的。

但近十年来,随着我国十几座装机容量百万千瓦的水电厂相继投产,数十座装机容量百万千瓦的电厂正在建设或筹建,机组的单机容量从300MW, 400 MW, 500 MW 发展到750 MW, 机组单机容量地逐步增大,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。在状态监测和状态检修的具体技术方面,振动分析是最主要的研究内容。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。机组严重振动时,发出的刺耳噪声也将危及管理人员的身心健康。许多电厂自投产以来,一直沿用人工读表等传统的测试方法,对机组振动摆度值进行测量,劳动强度大,测量精度低,不能及时掌握、分析机组振动等运行状态,发生事故和故障时不能及时报警^[18-20]。近来,国内不少单位已就机组稳定性研究展开了大量的工作。相比而言,清华大学是工作较为全面、细致的一家。一方面组织了多个学科师生力量进行了广泛深入的机理研究,另一方面成立了研究所,专门从事成果的产品转化工作,把研究成果从实验室推向现场,直接为电力系统提供可靠的产品和优质的服务。

近年来发表了一些有关小波分析应用于故障诊断的报告,包括利用尺度谱和

相位谱来诊断某种特定故障^[21];利用小波或小波包分解与重构将分形用在小波分析中^[22]。从所公布的结果看,小波分析有一定的效果,但作为实用性的技术方法,还存在很大差距,需要对多种典型故障的小波特性和非线性特征进行研究。在非线性特征研究方面,有研究振动信号在伪相空间的相关维数。通过对不同的故障信号时间序列重构伪相空间,可以提取相关维数、分形维数等非线性特征量,得到不同故障的一些定量特征。但从已有的研究结果看,不同故障的这些非线性特征量存在重叠现象,说明该方法本身存有不足之处。另外,在重构相空间过程中时间延迟量和嵌入维数的确定有很大困难,大都采用试算的方法获取,使得上述特征量的计算时间较长,无法满足实时诊断的要求。

运用信息融合理论实现参量特征识别是近些年来发展的一个热点。进入 21 世纪以来,信息融合理论的发展为故障诊断领域带来了很多研究进展,研究者将不同测试信号分析方法和信息融合以及智能决策等系统分析方法有机结合^[23]^[31],并用于机械设备的多源信号分析和系统状态监测,为信号分析和诊断技术提供了新思路,较为典型的有:基于知识学习原理的故障诊断技术,如神经网络智能诊断方法用于系统状态识别、专家知识和模糊推理相结合用于故障状态评判等;基于多源测试信息融合的故障诊断方法研究,如用于可燃气体成分监测的多传感器融合系统、基于粗糙理论的设备信息融合诊断和预测方法等。

在国内信息融合技术已经运用到各种领域,如西安交通大学电气工程学院将小波熵和小波熵权应用于电能质量扰动识别^[24],江苏大学电气信息工程学院将小波变换小波熵应用于睡眠脑电信号变化特征研究中^[25],西南交通大学电气工程学院将小波熵理论应用于电力系统故障检测^[26],这些将信息熵技术应用到信号处理中都取得了一定的成果。同时也有越来越多的文献关于将信息融合技术用于旋转机械故障诊断和水轮机故障诊断中^[27-36],如华中科技大学将信息熵用于大型旋转机械振动状态评价^[34],华中科技大学能源与动力工程学院将尺度熵应用于水电机组监测诊断系统中^[21],武汉大学动力与机械学院将信息熵用于机组运行劣化度的综合评价中^[35],西安交通大学机械工程学院胥永刚、何正嘉提出了一种二维近似熵,并用此来度量轴心轨迹复杂性^[36]^[37],这些理论和方法的应用都为将信息熵应用于机械故障诊断和信号处理提供了非常宝贵的参考价值。

1.5 本文的主要工作

本文研究的重点就是将信息融合技术当中的小波能谱熵和多分辨奇异谱熵理论应用于机组振动信号处理当中，并且结合小波对机组振动信号的振动特性进行详细的刻画，来阐明机组振动信号的物理特性，并且将所得到的结果与传统的机组振动信号处理手段相比较，来描绘机组振动信号的复杂性，以及造成机组振动的根源之所在。

第二章 机组振动测试与分析

2.1 前言

青铜峡灌区是古老的灌区，早在公元前 262 年人们就在这里引黄河的水灌溉农田，所以有“自古黄河富宁夏”之说。在中华人民共和国成立之前，灌溉面积已经达到了 140 万亩。

青铜峡水利枢纽工程是以灌溉、发电为主兼顾航运、城市供水等多目标综合利用水利枢纽工程，位于宁夏回族自治区青铜峡市境内黄河上中游青铜峡峡谷出口处，距银川 80km，是 1954 年编制的《黄河综合利用规划技术经济报告》选定的第一期开发项目，灌区保证、扩灌面积 550 万亩，电站总装机容量 272MW，年发电量 12.8 亿 kW·h，为二等工程。

青铜峡谷全长 8km，位于贺兰山南端。水库正常蓄水位 1156.00m，总库容 6.06 亿 m³，面积 75km²，水库回水长度 45km。大坝全长 687.3m，最大坝高 42.7m，坝顶高程 1160.2m。

青铜水电站水流条件复杂，机组转速高，振动明显，对机组的稳定性影响较大，噪声污染严重。针对上述问题，天津大学于 2006 年 5 月先后两次对青铜峡水电站的 5[#]、7[#]、1[#]水轮发电机组稳定性进行测试。

2.2 试验方案与测试系统

2.2.1 试验目的和依据

1. 进行机组稳定性试验（振动、摆度），判断机组的运行状态；
2. 试验依据标准：IEC41—91；GB/T15468—1995；GB8564

2002 年《水轮发电机组启动实验规程》对振动提出的标准见表 2-1。《水力发电机组安装技术规范》（GB8564-88）对机组轴线的摆度标准见表 2-2。

表 2-1 水轮发电机组各部位振动允许值(mm, 双幅值)

名称	项目	额定转速			
		(r/min)			
		小于 100	100-250	250-375	375-750
水轮机	顶盖水平振动	0.09	0.07	0.05	0.03
	顶盖垂直振动	0.11	0.09	0.06	0.03
发电机	推力轴承支架垂直振动	0.08	0.07	0.05	0.04
	导轴承支架水平振动	0.11	0.09	0.07	0.05

表 2-2 机组轴线的允许摆度值

轴的名称	测量部位	摆度的允许值	
		转速(100r/min)	
		相对摆度 (mm/m)	绝对摆度 (mm)
发电机轴	发电机上、下导轴承处 周颈及法兰	0.03	0.123
水轮机轴	水轮机轴承处的轴	0.05	0.31
发电机上部轴	励磁机的整流子		0.04
发电机轴	集电环		0.05

注：1) 相对摆度=绝对摆度(mm)/测量部位至镜板距离

2) 绝对摆度是指在测量部位测出的实际摆度值

2.2.2 机组的基本技术参数

青铜峡水电站 7 号机水轮机主要参数：

型号：zz560-LH-550

最高水头：21.2m

最大出力：31.2MW

飞逸转速：235r/min

吸出高度：-5.7m

设计水头：18m

设计流量：250m³/s

额定转速：107r/min

最高效率：84.5%

转轮直径：φ550cm

青铜峡水电站 7 号发电机主要参数：

型号：TS900/95-56-107

额定容量：42.35MVA/36MW

额定转速：107r/min

飞逸转速：235r/min

功率因数：0.85

相数：三相

额定电流：1280A

额定电压：10500V

2.3 七号机组稳定性试验

2.3.1 测试内容

水力发电机组的振动测试主要包括机组的振动状态和机轴的摆度。

2.3.2 测点布置

表 2-3 青铜峡 7 号机组测点布置表

位置	传感器编号、敏感度	通道
上机架水平 A7	9908071 (5mv/ μm)	9
上机架垂直 A9	040618 (10mv/ μm)	10
顶盖水平 A14	9908080 (5mv/ μm)	15
顶盖垂直 A15	040614 (10mv/ μm)	16
下机架垂直 A17	9908074 (5mv/ μm)	17
下机架垂直 A18	040616 (10mv/ μm)	18
摆度 x(横河向)	(2mv/ μm)	19
摆度 y(顺河向)	(2mv/ μm)	20

说明：x 为横河向，y 为顺河向。测点水平向指的是顺河向

2.3.3 测试工况

1. 空载无励磁变转速工况试验：这是判断振动是否由机组转动部件质量不平衡所引起的一种试验。机组转速由额定转速的 50% 开始，分别测定机组转速的额定值的 50%，65%，80%，100% 时机组各有关部位的振动。

2. 空载变励磁工况试验：这是判断振动是否由机组电磁力不平衡所引起的一种试验。机组以空载额定转速运行，分别测定励磁电流为其额定值的 25%、50%、75% 和 100% 时机组各有关部位的振动。

3. 变负荷工况试验：

这是查明机组振动是否由过水系统的水力不平衡所引起的一种试验。机组以额定转速运行，分别测定在负荷为 0MW，4MW，8MW，1 MW，16MW，20MW，24MW，

28MW, 32MW, 36MW, 32MW, 28MW, 24MW, 20MW, 16MW, 12MW, 8MW, 4MW, 2MW 工况, 以及在提 13、14 号泄水管的条件下, 负荷为 2MW, 4MW, 8MW, 12MW, 16MW, 20MW, 24MW, 28MW, 32MW, 35MW 工况下各有关部位的振动。

表 2-4 青铜峡水电站七号机组稳定性测试工况对应表

工况号	测试内容	上游水位 m	下游水位 m	100HZ	300HZ	备注
1	停机空采			7qa1	7qa2	
2	机组开机过程			7qa3		
3	50%额定转速			7qa4	7qa5	空载无励磁
4	65%额定转速			7qa6	7qa7	空载无励磁
5	80%额定转速			7qa8	7qa9	空载无励磁
6	额定转速			7qa10	7qa11	空载无励磁
7	励磁电流 25% 额定值			7qa18	7qa19	空载变励磁
8	励磁电流 50% 额定值			7qa16	7qa17	空载变励磁
9	励磁电流 75% 额定值			7qa14	7qa15	空载变励磁
10	励磁电流 100% 额定值			7qa12	7qa13	空载变励磁
11	发电机出力 0MW	1155.82	1135.00	7qa20	7qa21	
12	4 MW		1134.98	7qa22	7qa23	
13	8 MW		1134.95	7qa24	7qa25	
14	12 MW		1135.00	7qa26	7qa27	
15	16 MW	1155.85	1135.00	7qa28	7qa29	
16	20 MW		1135.01	7qa30	7qa31	

第二章 机组振动测试与分析

17	24 MW		1135.03	7qa32	7qa33	
18	28 MW		1135.03	7qa34	7qa35	
19	32 MW		1135.04	7qa36	7qa37	
20	36 MW	1155.81	1135.05	7qa38	7qa39	
21	32 MW		1135.06	7qa40	7qa41	
22	28 MW		1135.06	7qa42	7qa43	
23	24 MW		1135.05	7qa44	7qa45	
24	20 MW	1155.81	1135.03	7qa46	7qa47	
25	16 MW		1135.01	7qa48	7qa49	
26	12 MW		1134.98	7qa50	7qa51	
27	8 MW		1134.95	7qa52	7qa53	
28	4 MW		1134.92	7qa54	7qa55	
29	2 MW	1155.84	1134.90	7qa56	7qa57	
	提 13、14#泄水管					
30	发电机出力 2 MW	1155.64	1135.14	7qa58	7qa59	
31	4 MW	1155.63	1135.28	7qa60	7qa61	
32	8 MW	1155.62	1135.30	7qa62	7qa63	
33	12 MW	1155.62	1135.30	7qa64	7qa65	
34	16 MW	1155.55	1135.35	7qa66	7qa67	
35	20 MW	1155.54	1135.35	7qa68	7qa69	
36	24 MW	1155.53	1135.35	7qa70	7qa71	
37	28 MW	1155.52	1135.35	7qa72	7qa73	
38	32 MW	1155.51	1135.40	7qa74	7qa75	
39	35 MW	1155.48	1135.40	7qa76	7qa77	
40	关 13、14#泄水管					
41	停机过程			7qa78		
42	卸仪器					

2.3.4 振动测试结果分析

表 2-5 青铜峡七号机组机械振动试验结果分析 (采用 95%双幅值, 单位: μm)

部 位 工 况 号		上机架		顶 盖		下机架	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
3	50%转速	3.9063	9.7656	1.9531	4.3945	2.4414	4.883
4	65%转速	3.418	10.254	1.9531	3.6621	1.9531	5.615
5	80%转速	3.9063	36.377	2.9297	7.0801	2.9297	9.522
6	额定转速	4.8828	22.461	5.8594	11.475	4.8828	18.799
7	25%电流	4.8828	27.1	6.3477	11.963	4.8828	18.066
8	50%电流	4.8828	28.32	6.8359	14.404	5.8594	18.555
9	75%电流	5.8594	25.146	6.8359	16.846	6.8359	19.289
10	额定电流	6.8359	24.17	6.8359	18.311	5.3711	19.043
11	出力 0MW	6.3477	25.879	6.3477	19.043	5.8594	17.578
12	4MW	8.3008	35.4	9.2773	37.109	6.8359	31.006
13	8MW	9.7656	35.156	10.254	50.049	7.8125	34.668
14	12MW	7.3242	25.391	3.9063	12.207	2.9297	5.615
15	16 MW	8.7891	26.855	3.9063	14.404	3.9063	6.592
16	20 MW	7.3242	23.438	4.8828	12.207	3.9063	7.080
17	24 MW	6.8359	23.926	5.3711	14.893	4.3945	7.324
18	28 MW	7.8125	22.461	6.3477	14.404	4.8828	9.033
19	32 MW	7.8125	22.705	7.8125	15.381	6.3477	10.01
20	36 MW	7.8125	24.902	8.7891	17.822	6.8359	11.23
21	32 MW	7.8125	25.879	7.8125	15.137	6.8359	10.01
22	28 MW	7.8125	24.17	6.3477	13.184	5.8594	8.789
23	24 MW	7.3242	26.123	4.8828	14.893	4.8828	7.568
24	20 MW	7.3242	22.705	4.8828	12.939	4.3945	7.568
25	16 MW	8.3008	28.809	3.9063	15.625	3.9063	6.836
26	12 MW	7.3242	26.367	3.9063	12.939	4.3945	6.592
27	8 MW	9.7656	37.842	12.207	58.594	8.7891	34.668
28	4 MW	7.8125	32.715	8.7891	31.494	6.3477	26.611
29	2 MW	7.3242	30.029	7.3242	28.809	6.3477	21.973
30	提 13、 14 号 泄 水 管	2MW	7.3242	26.611	7.8125	25.879	6.3477
31		4MW	6.8359	27.1	7.3242	22.461	6.3477
32		8MW	8.7891	46.875	10.742	49.805	8.3008
33		12MW	8.7891	25.879	3.9063	14.16	4.8828
34		16MW	8.3008	23.193	4.8828	15.625	5.3711
35		20MW	7.3242	26.611	4.8828	13.672	4.8828
36		24MW	7.3242	26.855	4.8828	14.893	4.8828
37		28MW	8.3008	24.658	6.8359	15.137	5.8594
38		32MW	7.8125	26.611	7.8125	17.334	6.3477
39		35MW	7.8125	25.391	5.8594	13.672	4.8828

2.3.4.1 变转速实验结果

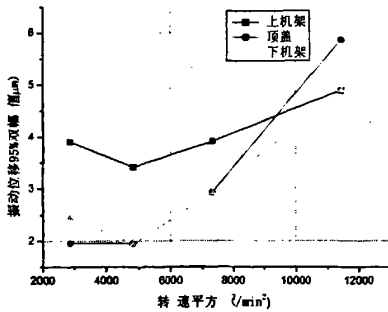


图 2-1 机组部件水平向振动与转速平方的关系曲线

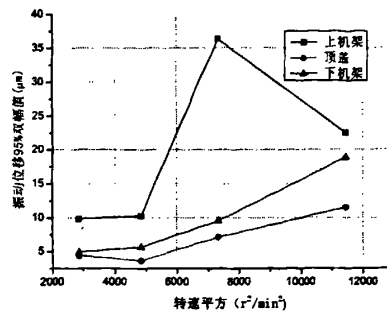


图 2-2 机组部件垂向振动与转速平方的关系曲线

上机架、顶盖和下机架水平向和垂向的振动幅度均满足规范要求, 见表 2-5。从图 2-1 和 2-2 中可以看出, 上机架水平向、顶盖和下机架水平向的振动随转速平方的增大而呈正比增大, 但增幅很小。上机架垂向振动随转速平方的增大而迅速增大, 达到峰值后减小, 顶盖、下机架垂向的振动随转速平方的增大呈正比增大, 增幅较小。说明机组各部件存在一定的动不平衡。

2.3.4.2 变励磁试验结果分析

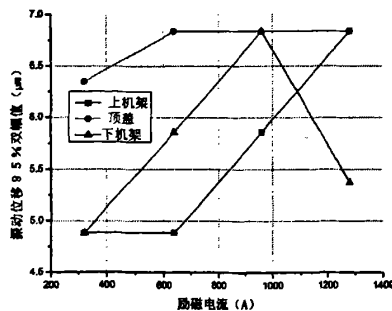


图 2-3 机组部件水平向振动与励磁电流的关系曲线

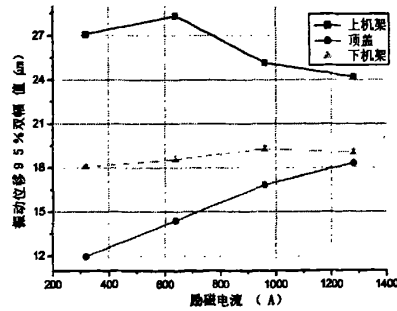


图 2-4 机组部件垂向振动与励磁电流的关系曲线

机组各部件水平向和垂向的振动位移均满足规范要求, 最大值为上机架垂向在 25%额定励磁电流工况下, 其值为 0.0271mm, 见表 2-5。从图 2-3 和图 2-4 可知, 机组部件水平向的振动位移均随励磁电流的增大变化很小, 机组各部件的垂向受变励磁的影响也不是很大, 说明该机组不存在明显的电磁力不平衡。

2.3.4.3 变负荷试验结果

第一种情况：机组负荷逐渐增大试验结果。

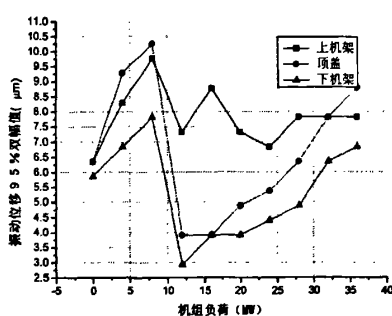


图 2-5 机组部件水平向振动与
机组负荷关系曲线

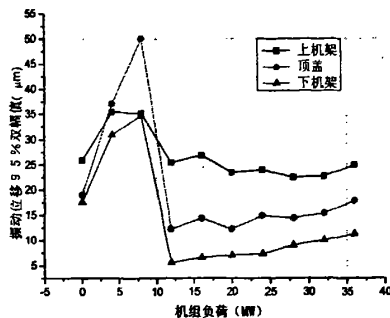


图 2-6 机组部件垂向振动与
机组负荷关系曲线

机组部件各方向的振动位移均满足规范要求。机组各部件振动位移随发电机出力由 0MW 变化到 12MW 时变化明显，振动位移急剧增大，达到峰值后迅速减小，然后趋于平稳（见图 2-5，图 2-6）。

第二种情况：机组负荷逐渐减小试验结果。

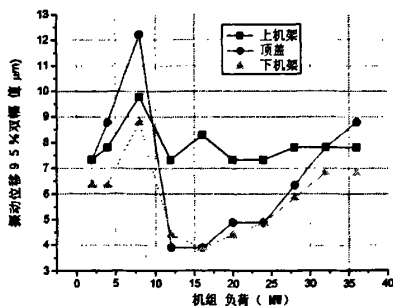


图 2-7 机组部件水平向振动与
机组负荷关系曲线

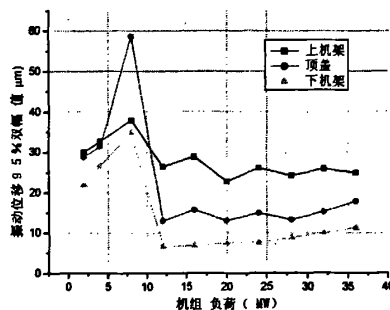


图 2-8 机组部件垂向振动与
机组负荷关系曲线

机组部件水平向和垂向的振动位移均满足规范要求。机组各部件的振动位移先随着发电机出力的减小变化平缓，发电机出力由 12MW 变化到 8MW 时，机组各方向的振动迅速增大，达到峰值后又回落（如图 2-7、2-8）。

第三种情况：提 13、14 号泄水闸变机组负荷试验结果。

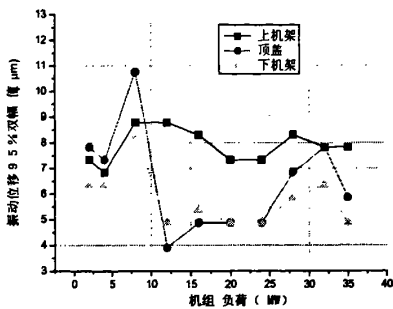


图 2-9 机组部件水平向振动与
机组负荷关系曲线

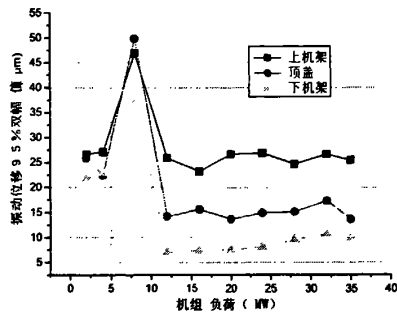


图 2-10 机组部件垂向振动与
机组负荷关系曲线

机组各部件的振动位移均满足规范要求。上机架垂向的最大振动位移为 0.0469mm，顶盖垂向的最大振动位移为 0.0498mm。机组各部件垂向的振动位移先随着发电机出力的增大而增大，达到峰值后随着发电机出力的增大而快速减小，趋于水平后呈现小幅度的波动。

2.3.5 机轴摆度测试结果分析

同样机轴摆度试验也按照变转速、变励磁、变负荷工况依次进行，试验结果见下表 2-6：

表 2-6 青铜峡七号机绝对摆度结果表（采用 95%双幅值，单位 μm）

部位 工况号	机轴摆度(μm)		部位 工况号	机轴摆度(μm)	
	X 方向	Y 方向		X 方向	Y 方向
3	8.5449	6.1035	22	119.63	39.063
4	9.7656	9.7232	23	95.215	40.283
5	34.18	12.207	24	104.98	40.283
6	89.111	34.18	25	96.436	40.283
7	89.111	31.738	26	91.553	32.959
8	84.229	34.18	27	92.773	35.4
9	95.215	36.621	28	75.684	31.738
10	102.54	32.959	29	68.359	26.855
11	95.215	458.98	30	83.008	36.621
12	111.08	390.63	31	79.346	34.18
13	113.53	396.73	32	97.656	40.283

14	109.86	295.41	33	83.008	30.518
15	120.85	261.23	34	93.994	37.842
16	123.29	50.049	35	108.64	43.945
17	114.75	41.504	36	81.787	32.959
18	137.94	47.607	37	128.17	48.828
19	133.06	47.607	38	125.73	48.828
20	183.11	67.139	39	128.17	53.711
21	134.28	48.828			

2.3.5.1 机轴变转速试验

机轴摆度全部满足规范要求，最大摆度为 0.089mm，机轴摆度随转速平方成正比增大（见图 2-11），说明存在一定的动不平衡。

2.3.5.2 机轴变励磁实验

机组轴承处摆度全部满足规范要求，最大摆度为 0.103mm，但是与变转速试验结果相比较不难发现，摆度幅值并没有明显增加（见图 2-12），所以机轴摆度受励磁力影响较小。

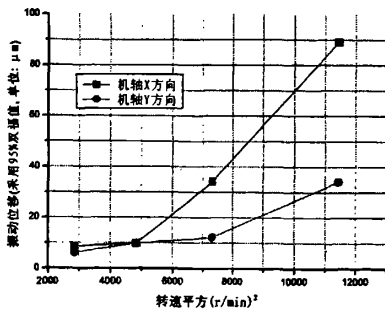


图 2-11 机轴摆度与转速平方关系曲线

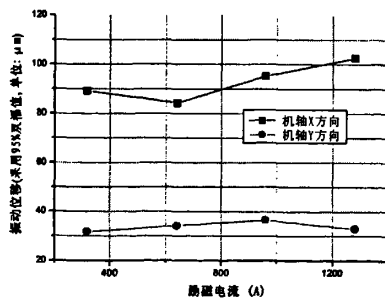


图 2-12 机轴摆度与励磁电流关系曲线

2.3.5.3 机轴变负荷（增大）试验

机轴 X 方向和 Y 方向的摆度在大多数的工况下均超标，机轴 X 方向的摆度在发电机出力为 36MW 时达到最大，其值为 0.183mm，而机轴 Y 方向的摆度在发电机出力为 0MW 时达到最大，其值为 0.459mm。

见图 2-13，机组负荷从 0-36MW 的过程中，机轴 Y 方向的摆度随发电机出力

的增大而减小，尤其在 0—16MW 负荷段，振动变化明显；机轴 X 方向的摆度随发电机出力的增大而减小。

2.3.5.4 机轴变负荷（减小）试验

本节试验是上节试验的逆过程，由表 2-6 可以看出 Y 方向的摆度全部满足规范要求，X 方向的摆度在 36MW 和 32MW 工况下超标，其它工况全部小于规范要求。

图 2-14 是机组负荷从 36MW 减为 2 负荷时的机轴摆度情况，从图中可以看出，机组负荷减小时机轴摆度在减小。

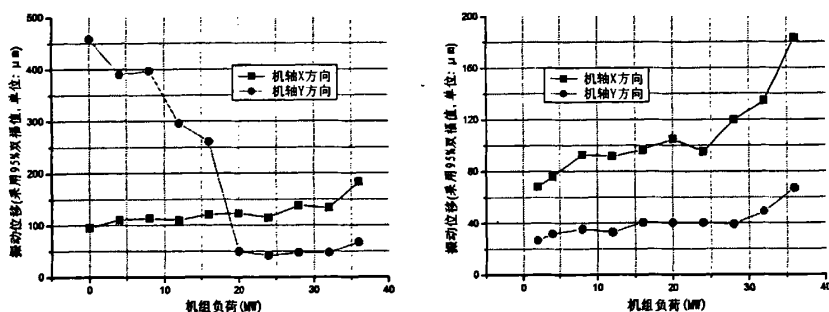


图 2-13 机轴摆度随机组负荷增加关系曲线 图 2-14 机轴摆度随机组负荷增加关系曲线

2.3.5.5 提 13、14 号泄水闸，机轴变负荷（增大）试验

提 13、14 号泄水闸在变发电机出力试验下，机轴 X 方向的摆度只是在 28—35MW 区段内超标，最大值为 0.128mm，而 Y 方向摆度全部满足规范要求。

从图 2-15 可以看出，无论是 X 方向的摆度还是 Y 方向的摆度均随发电机出力的增大而增大，同时在增大的过程中，摆度呈现波动，并不是随发电机出力的增大而出现平稳的增长趋势。

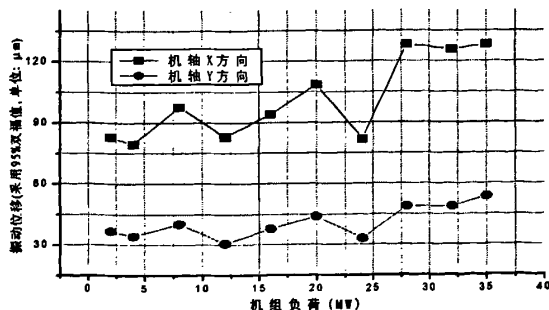


图 2-15 机轴摆度随机组负荷增加关系曲线

2.3.5.6 七号机轴心轨迹分析

1、变励磁轴心轨迹图

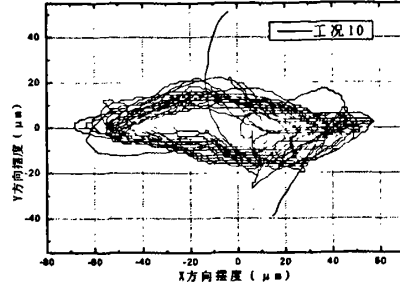
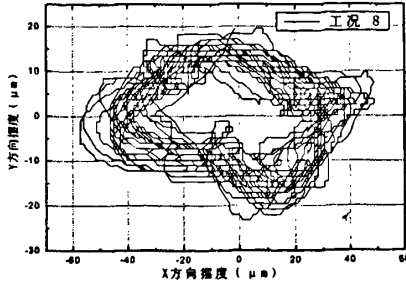


图 2-16 励磁电流为 640A 机轴轴心轨迹图 图 2-17 励磁电流为 1280A 机轴轴心轨迹图

2、负荷增大轴心轨迹图 (机组负荷从 0 增加到 36MW)

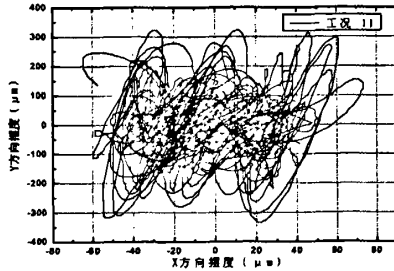


图 5-2-11 负荷为 0MW 时机轴轴心轨迹图

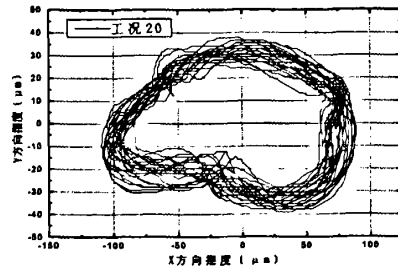


图 2-18 负荷为 0MW 时机轴轴心轨迹图 图 2-19 负荷为 36MW 时机轴轴心轨迹图

3、负荷减小轴心轨迹图 (机组负荷从 36MW 减小到 0MW)

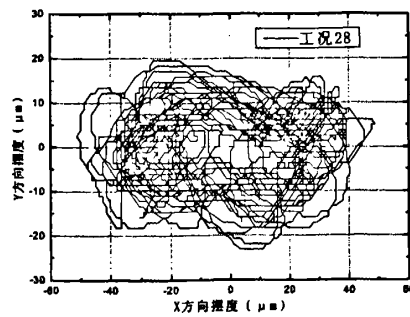
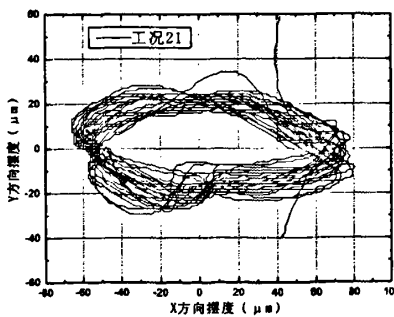


图 2-20 负荷为 32MW 时机轴轴心轨迹图 图 2-21 负荷为 4MW 时机轴轴心轨迹图

4、负荷增大轴心轨迹图 (提 13、14 号泄水闸, 机组负荷 2 从增加到 35MW)

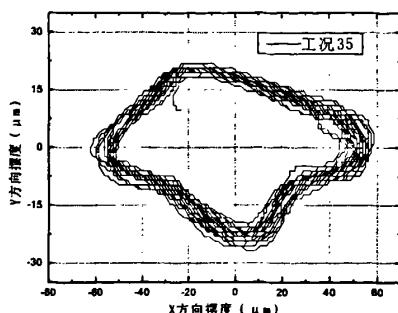


图 2-22 负荷为 20MW 时机轴轴心轨迹图

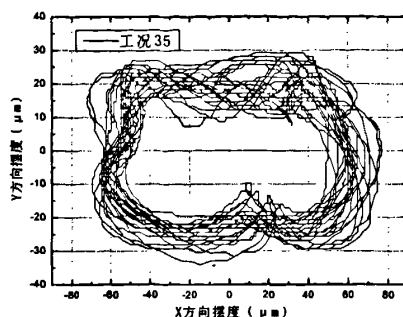


图 2-23 负荷为 35MW 时机轴轴心轨迹图

从上述图中不难看出，在变励磁工况下，虽然轴心轨迹图显得比较杂乱，呈不规则的椭圆形，或方形，但随着励磁电流的增大并没有发生太大的变化，因此励磁电流对机轴摆度的影响不是很明显。机组加上负荷以后，在低负荷区里，轴心轨迹十分的紊乱，呈絮团状，随着机组负荷的加大，轴心轨迹呈现出不规则的椭圆形和圆形，因此变发电机出力对机轴的摆度有较大的影响，特别在机组的低负荷区。

2.3.6 小结

1、变转速过程中，机组振动位移均满足规范要求。上机架、顶盖和下机架水平向的振动随转速平方的增大而呈正比增大，但增幅很小。上机架垂向振动随转速平方的增大而迅速增大，达到峰值后减小，顶盖、下机架垂向的振动随转速平方的增大呈正比增大，增幅较小。机组存在一定的动不平衡。

2、变励磁电流过程中，各测点振动均满足规范要求，并随电流增加变幅很小，可见机组不存在明显的电磁力不平衡。

3、变负荷试验过程中，各测点振动满足规范要求。各测点的振动，基本在负荷为 0~15MW 范围出现峰值。

4、摆度试验，各测点摆度值部分超标。在变励磁工况下，轴心轨迹图显得比较杂乱，呈不规则的椭圆形，或方形，但随着励磁电流的增大并没有发生太大的变化，因此励磁电流对机轴摆度的影响不是很明显。机组加上负荷以后，在低负荷区里，轴心轨迹十分的紊乱，呈絮团状，随着机组负荷的加大，轴心轨迹呈现出不规则的椭圆形和圆形，因此变发电机出力对机轴的摆度较大的影响，特别在机组的低负荷区。

2.4 振源分析

2.4.1 振源机理分析及其频率计算

机组振动的原因复杂，影响因素很多，其机理至今尚不完全清楚。引起机组振动的原因主要有水力、机械和电磁等三个方面。下面对各种振源进行定性和某些定量分析，给出了一些主要激振荷载的频率。

2.4.1.1 水力原因引起的振动

水力方面原因是引起机组振动的主要因素。由于涡流、涡带、水流脉动以及气蚀等引起的振动，情况复杂，目前尚难以从理论上加以确切分析。水轮发电机组或有关部件振动的水力原因，从定性上可初步认为：一是由于过流部件中流场的速度分布不均匀所产生的压力脉动；二是水流流过某些绕流体后，由于脱流旋涡所诱发出压力脉动；三是水力过渡过程引起的压力波动。由于水轮机进水流道与压力管道相联，因此，机组与管道之间，在振动上有水力耦联的相互作用。现就水力原因引起振动的几个主要方面分析如下：

(1) 尾水管内的涡带摆动和气蚀引起的振动

水轮发电机组在部分负荷运行时，在尾水管中有时出现一种不稳定流的涡带摆动现象，在转轮出口形成涡旋运动，它是水轮机功率摆动、机组转动部分及尾水管壁低频振动和噪音的主要根源，尤其在低负荷运行时，往往出现较大的振动和噪声。

尾水管涡带所造成的压力脉动频率，与许多因素有关，通常采用下述经验公式计算：

$$f_1 = \frac{n_H}{60} \mu s \quad (2-1)$$

式中， n_H —机组额定转速，r/min；

μs —系数，我国部分电站统计取 $\mu s = 1/3 \sim 1/6$ 。

对于青铜峡水电站 7 号机： $n_H = 107 \text{ r/min}$ ，分别取 $\mu s = 1/3$ 和 $\mu s = 1/6$ ，则：

$$0.297 = \frac{107}{60} \times \frac{1}{6} \leq f_1 = \frac{n_H}{60} \mu s \leq \frac{107}{60} \times \frac{1}{3} = 0.594 \text{ (Hz)}$$

$$f_1 = 0.297 \sim 0.594 \text{ Hz}$$

气蚀引起的振动:

水轮机的气蚀,涉及到物理和化学等诸多因素,其产生的机理至今尚不是很清楚,通常认为产生气蚀的主要原因是由于水轮机内部的水流压力降低到饱和蒸汽压力时,水发生汽化,出现大量气泡。在气泡的不断产生和凝结过程中,高速度的水流质点,象锐利的刀尖一样周期性打击叶片表面,使叶片产生麻点,甚至被击穿而形成空洞,同时产生振动。

根据经验,水轮机转轮叶片气蚀造成的压力脉动频率范围约为 100~300Hz;据此,青铜峡水电站 7 号机,初步取气蚀振动频率为:

$$f_1' = 100; 200; 300 \text{ (Hz)}$$

(2) 转轮叶片—导叶水力冲击脉动

水轮机的转轮叶片数与导水叶片数有相互作用的关系,在水由导水叶片进入转轮叶片的过程中,转轮叶片与导水叶片相遇一次,就引起一次水力冲击跳动。此种冲击力通过机墩而作用于水下结构而引起振动,并且振动随负荷增大而增大,其频率由转轮叶片和导水叶片在单位时间内相互作用而发生的脉冲次数决定,其频率按下式计算:

$$f_2 = \frac{n_H \cdot Z_1 \cdot Z_2}{60 \cdot A} \quad (2-2)$$

式中, Z_1 、 Z_2 —分别为转轮叶片数和导水叶片数;

A —为 Z_1 、 Z_2 的最大公约数;

n_H —机组额定转速, r/min。

对于青铜峡水电站 7 号机, $Z_1=5$, $Z_2=24$, $A=1$, 由此得

$$f_2 = \frac{107 \times 5 \times 24}{60 \times 1} = 214 \text{ (Hz)};$$

(3) 蜗壳中不均匀流场引起的振动

在某些工况下,由于进水不均匀,造成旋涡进入蜗壳,这些分散的小旋涡可汇集成较大的涡带进入转轮而引起振动,多数属中频振动,有时与发电机上架架自振频率吻合而产生共振,从而导致机墩振动。此种蜗壳不均匀流场引起的振动频率,按下式计算:

$$f_3 = \frac{n_H \cdot Z_1}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-3)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_3 = \frac{107 \times 5}{60} = 8.92 \text{ (Hz)}。$$

(4) 导叶水流不均匀引起的振动

由于导叶开口不均匀而造成水流的不均匀,使出水边界层脱流,形成涡带而引起脉动,其频率计算公式为:

$$f_4 = \frac{n_H \cdot Z_2}{60} \quad (2-4)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_4 = \frac{107 \times 24}{60} = 106.6 \text{ (Hz)}。$$

(5) 卡门涡所产生的振动

在水轮机中,卡门涡主要出现在导叶或转轮叶片的出水边。它是由水流流过导叶或叶片尾部时,所产生的旋涡脱流。卡门涡的频率可按下式计算:

$$f_5 = S \frac{W}{a} \quad (2-5)$$

式中, S —斯特鲁哈数, $S=0.18-0.22$;

a —导叶或转轮叶片出口边宽度;

W —出口边相对速度, m/s 。

卡门涡诱发的激振力,会使叶根断裂。当卡门涡频与叶片共振时,将激起更大的激振力,引起机组和机墩组合结构的强烈振动。

根据经验,卡门涡所产生的振动频率范围约为 80~150Hz;对于青铜峡水电站 7 号机初步取:

$$f_5 = 80; 115; 150 \text{ (Hz)}。$$

(6) 水轮机内的非线性自激振动

现场观测表明,由于轴流式水轮机内的压力振荡,产生了强烈的自激振动,例如由于水轮机的环形止漏装置中的压力变化引起的水轮机振动,以及由于水轮机转轮侧密封和顶盖下的旋转压力场所引起的转子横向自激振动等。产生自激振动的主要原因之一,是其止漏装置结构较复杂,间隙小,其前后的压差较大,当机组由于某种原因发出周期性偏心运动时,则在间隙中往往会产生相当大的压力脉动,当迷宫中的压力脉动达到一定程度时,就会引起水轮机的自激振动。

主要有以下两种自激振动:

①、导轴承油膜引起的自激振动:

$$f_6 = \frac{n_H}{120} \quad (2-6)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_6 = \frac{107}{120} = 0.89 \text{ (Hz)};$$

②、水轮机出力超过一定值时, 出现弓状回旋, 振动频率为:

$$f_7 = \alpha \frac{n_H}{60} \quad (2-7)$$

式中, α —系数, 范围一般为 2~4。

对于青铜峡水电站 7 号机, α 的值初步取为 $\alpha=2; 3; 4$ 。所以

$$f_7 = 3.57; 5.36; 7.14 \text{ (Hz)}$$

2.4.1.2 机械原因引起的振动

机械方面引起的振动, 主要是由于水轮机和发电机的制造、安装质量较差造成的, 例如轴线曲折、倾斜, 推力轴承安装不良以及导轴承间隙过大等。机械原因引起的振动与负荷的关系不大, 其振动主频率都与机组额定转速密切相关。具体有如下几种机械原因引起的振动。

(7) 机组转动部分偏心引起的振动

由于机组转动部分质量不均或机组中心线安装有偏差, 即机组转动部分质量中心与机组中心存在偏心距。这样, 在机组运行时, 要产生水平离心力, 使机组轴系统发生弓状回旋并引起机组支撑结构振动。此种因偏心而引起的振动, 常随转速上升而加剧, 与负荷无关, 其振动主频按下式计算:

$$f_8 = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)} ; \quad f'_8 = \frac{n_P}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-8)$$

式中, n_H —机组额定转速, r/min;

n_P —机组飞逸转速, r/min。

对于青铜峡水电站 7 号机, 机组额定转速 $n_H = 107 \text{ r/min}$, 飞逸转速 $n_P = 214 \text{ r/min}$ 。则

$$f_8 = \frac{107}{60} = 1.783 \text{ (Hz)}; \quad f'_8 = \frac{235}{60} = 3.92 \text{ (Hz)}$$

(8) 转动部分与固定部分碰撞引起的振动

当机组的转动部分与固定部分碰撞时, 机组会产生振动, 同时发生声响, 其振动主频为:

$$f_9 = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)}; \quad f'_9 = \frac{n_P}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-9)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_9 = \frac{107}{60} = 1.783 \text{ (Hz)}; \quad f'_9 = \frac{235}{60} = 3.92 \text{ (Hz)}$$

(9) 轴承间隙过大或主轴过细引起的振动

此类原因引起的机组振动, 会随负荷的增大而增大, 其主频为:

$$f_{10} = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)}; \quad f'_{10} = \frac{n_P}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-10)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_{10} = \frac{107}{60} = 1.783 \text{ (Hz)}; \quad f'_{10} = \frac{235}{60} = 3.92 \text{ (Hz)}$$

(10) 其它机械原因引起的振动

当机组安装时, 主轴法兰紧固不良, 推力轴承调整精度不够, 以及主轴弯曲, 有挠度等, 则在空载低速运行时也可能产生振动, 其主频为:

$$f_{11} = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-11)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_{11} = \frac{107}{60} = 1.783 \text{ (Hz)}$$

2.4.1.3 电气原因引起的振动

电磁振动主要是由于水轮发电机设计不合理或制造、安装质量不良所产生的电磁力造成的。水轮发电机在运行时, 由于磁拉力不平衡和三相不平衡, 推力瓦制造不良; 发电机定子与转子气隙不对称以及定子铁芯机座合缝不严等原因, 都会引起机组和机组支撑结构的振动。

(11) 不平衡磁拉力引起的振动

机组运行时，发电机定子发热而膨胀和转子动不平衡等原因，会增加定子和转子间气隙的不均匀度，从而产生不均匀磁拉力。不均匀磁拉力引起的振动频率为转动频率或其倍数：

$$f_{12} = K \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)}, K=1, 2, 3, \dots \quad (2-12)$$

机墩组合结构与高阶激振频率发生共振的可能性很小，故对于青铜峡水电站 7 号机，只取 $K=1, 2, 3, 4$ 四种情况。

$$K=1, f_{12}=1.78 \text{ (Hz)};$$

$$K=2, f_{12}=3.56 \text{ (Hz)};$$

$$K=3, f_{12}=5.34 \text{ (Hz)};$$

$$K=4, f_{12}=7.12 \text{ (Hz)}。$$

(12) 定子的极频转动

定子的极频振动为定子铁芯的一种固有振动，当加励磁时就会引发振动，其振动频率为：

$$f_{13} = \frac{P n_H}{30} \quad (2-13)$$

式中， P —磁极对数，青铜峡水电站 7 号机 $P=28$ ，则

$$f_{13} = \frac{28 \times 107}{30} = 99.87 \text{ (Hz)}。$$

(13) 推力瓦制造不良产生的电气振动

根据实际分析，当推力瓦不平衡时，会导致电器振动，其振动频率为：

$$f_{14} = \frac{Z \cdot n_H}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-14)$$

式中， Z —导轴承瓦块数。

对于青铜峡水电站 7 号机，导轴承瓦块数为 16 块，所以

$$f_{14} = \frac{16 \times 107}{60} = 28.53 \text{ (Hz)}。$$

(14) 发电机定子与转子间气隙不对称引起的振动

振动的频率为：

$$f_{15} = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)} \quad \text{或} \quad f'_{15} = \frac{2n_H}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-15)$$

对于青铜峡水电站 7 号机,

$$f_{15} = \frac{107}{60} = 1.78 \text{ (Hz)} \quad \text{或} \quad f'_{15} = \frac{2 \times 107}{60} = 3.56 \text{ (Hz)}。$$

(15) 发电机线圈短路时的振动

振动频率为:

$$f_{16} = \frac{n_H}{60} \text{ (Hz)} \quad (2-16)$$

对于青铜峡水电站 7 号机

$$f_{16} = 1.78 \text{ (Hz)}$$

(16) 发电机定子铁心机座合缝不严引起的振动

此种振动的频率范围约为:

$$f_{17} = 50 \sim 100 \text{ (Hz)} \quad (2-17)$$

对于青铜峡水电站 7 号机, 初步取:

$$f_{17} = 50; 75; 100 \text{ (Hz)}$$

以上对引起机组和机组支撑结构振动的振源, 从水力、机械、电气等三个方面进行了分析, 由于问题涉及到的因素非常复杂, 其振源机理有些至今尚不够清楚。因此, 某些振源频率的定量分析, 具有初步估计性质。

将上述已给出的有关青铜峡水电站厂房内结构的三类 16 种振源频率归纳成表 2-7。

表 2-7 七号机各类振源的频率统计

类别	编号	振动原因	激振频率 (Hz)
水力 原因 引起 振动	1	尾水涡带摆动; 叶片气蚀振动	0.297~0.594
	2	导叶与转轮叶片冲击跳动	214
	3	蜗壳不均匀流场	8.92
	4	导叶水流不均匀	106.6
	5	卡门涡	80; 115; 150
	6	导轴承油膜流激振	0.89
	7	水轮机轴弓状回旋	3.57; 5.36; 7.14
机械 原因 引起	8	机组转动部分偏心	1.783, 3.92
	9	转动部分与固定部分碰撞	1.783, 3.92
	10	轴承间隙过大; 主轴过细	1.783, 3.92

	11	主轴法兰、推力轴承安装不良；轴曲	1.783
电气 原因 引起 振动	12	不平衡磁拉力	1.78, 3.56,
	13	定子极频振动	99.87
	14	推力瓦制造不良	28.53
	15	发电机定子与转子间气隙不对称	1.78, 3.56
	16	发电机电线圈短路	1.78
	17	发电机定子铁芯机座合缝不严	50, 75, 100

2.4.2 七号机实测信号振源分析

通过对机组振动、摆度的频谱分析可以得出对机组稳定性影响较大的频率成分主要有：低频、转频、各种倍频、高频、自激频率及涡列、各种水流频率等。这里只对其主要的频率成分进行分析。

(一) 低频

这种频率通常是由于水力原因造成的，主要是由于尾水涡带的摆动和叶片气蚀振动所产生，成分不稳定，大致在 0.2~1.5Hz 之间，如图 2-24，这种频率主要体现在：这种低频在本次振动测试机组测点中以主频和次频的方式体现的并不明显，主要出现在顶盖水平向部分工况下。



图 2-24 七号机组顶盖水平向发电机出力 4MW 时程线与功率谱图

(二) 转频及其低阶倍频

青铜峡七号机组的转频对机组部件的振动的影响是很大的，特别是低阶倍频，如图 2-25，这种频率主要体现在：

1. 所有工况下的机轴摆度主频皆为转频。
2. 顶盖水平向、下机架水平向和垂向振动大部分工况下的主频皆为转频。
3. 二倍频，三倍频，四倍频及更高倍频几乎出现在机组所有测点上且作为主频。
4. 作为次频或更高阶频率，转频及其倍频的分布范围更为广泛。

（三）高频

七号机组振动测试中，对于大于 50Hz 以上的中高频出现的几率不大，在部分测点的部分工况中有所体现，但不是十分的明显，据分析，产生 50Hz 和 100Hz 频率的原因可能是测试信号受到厂房主变压器振动的影响。而大于 100Hz 以上频率出现很少。

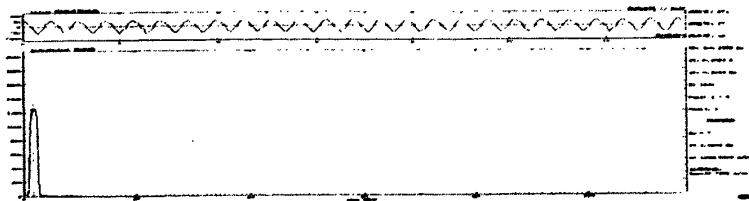


图 2-25 七号机组机轴 X 方向振动在发电机出力 12MW 时程线与功率谱图

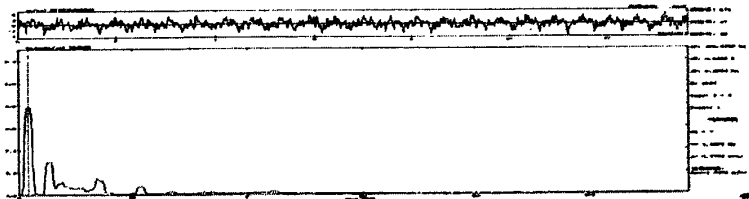


图 2-26 下机架垂向在发电机出力 12MW 时程线与功率谱图

（四）其它频率

青铜峡七号机组振动测试中，还出现其它频率：5.76, 9.09, 11.15, 11.44, 4.69, 14.96Hz 等频率，说明七号机组的振动相当复杂。

2.5 本章小结

本章主要对青铜峡七号机组振动测试信号进行了分析，通过机组变转速实验、机组变励磁实验、机组变发电机出力振动信号的幅值和功率谱分析，得出了在机组部件和摆度振动信号中的主要振动频率，并且通过对这些频率分析，结合可能诱发机组振动的振源，分析了机组振动的主要原因及振源之所在。

第三章 小波及信息熵技术原理

信号处理、信号特征提取、信号分析诊断是故障诊断系统的主要内容，特别是信号特征提取对诊断的结果影响很大。计算机处理信息的过程实质上是信息不断浓缩的过程，而对于一些较为复杂的，如谱图，机轴信号等计算机不易自动识别的信息则需要借助现代信号处理手段来完成。

小波分析和信息熵分析作为非线性理论的前沿科学，是处理非平稳、非线性的有效手段，在机械故障诊断、在线监测等方面得到了广泛的应用。水轮发电机作为旋转机械的一种，是水电站能量转化的水力原动机，其振动信号具有复杂的动力特性，用常规的欧几里几何难以描述。运用小波分析，可以有效的弥补傅立叶变换在非平稳信号处理中的不足。

小波分析概述

在传统的傅里叶分析中，信号完全是在频域展开的，不包含任何时域的信息，这对于某些应用来说是很恰当的，因为信号的频率的信息对其是非常重要的。但其丢弃了的时域信息可能对某些应用同样是非常重要的，所以人们对傅里叶分析进行了推广，提出了很多表征时域和频域信息的信号分析方法，如短时傅里叶变换，Gabor 变换，时域分析，Randon-Wigner 变换，小波变换等。其中短时傅里叶变换是在傅里叶分析基础上引入时域信息的最初尝试，其基本假定在于在一定的时间窗内信号是平稳的，那么通过分割时间窗，在每个时间窗内把信号展开到频域就可以获得局部的频域信息，但是它的时域区分度只能依赖于大小不变的时间窗，对于某些瞬态信号来说还是粒度太大。换言之，短时傅里叶分析只能在一个分辨率上进行。所以对很多应用来说不够精确，存在很大的缺陷。

而小波分析则克服了短时傅里叶变换在单分辨率上的缺陷，具有多分辨率分析的特点，在时域和频域都有表征局部信息的能力，时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态动态调整，在一般情况下，在低频部分（信号较平稳）可以采用较低的时间分辨率，而提高频率的分辨率，在高频情况下（频率变化不大）可以用较低的频率分辨来换取精确的时间定位。因为这些特点，小波分析可以控制正常信号中的瞬态成分，并展示其频率成分，被称为数学显微镜，广泛应用于各个

分析领域。

3.1 小波分析原理

时频分析的方法，其基本思想在于将能量有限的信号分解到一组正交基上，这组正交基是可数，或是不可数，都在给定的信号函数空间上稠密的。而短时傅里叶变换则在正交基上又加了一组时间窗，从数学上讲，也就是把分解后的信号再进行一次分解。那么在这样的思路下，我们是否可以找到一组函数，使其成为在能量有限的函数空间上稠密的正交基，并且单纯的由一个函数的伸缩和平移生成，伸缩的结果就在不同的分辨率下分解信号，平移的结果就是我们把信号作为窗来观察我们关心的部分，那么这样的函数一定要有紧支集（在有限的区域内迅速衰减到 0），这样的函数我们就称为母小波，由它生成的一组正交基我们就称之为小波函数。

定义：如果 $\psi(x) \in L^2(R)$ 满足“容许性”条件：

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3-1)$$

那么 $\psi(x)$ 叫做可允许小波（积分小波，基小波），其中 $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\psi(x)$ 的傅里叶变换。由基小波生成的小波函数系可表示为：

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3-2)$$

将信号在这个函数系做分解，就得到了连续小波变换的定义。

定义：设 $f(t) \in L^2(R)$ ，则对其可允许小波函数 $\Psi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换为：

$$(W_\Psi f)(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi_{a,b}(t)} dt \quad (3-3)$$

一维连续小波变换有如下的重构公式：

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [(W_\Psi f)(a,b)] \Psi_{a,b}(x) \frac{da}{a^2} db \quad (3-4)$$

由于连续小波变换的伸缩和平移系数是相互独立的，所以通过伸缩和平移得到的各个小波函数 $\Psi_{a,b}(x)$ 之间固定的相似性，由于系数之间的独立，就引入了冗余的信息。在分辨率一定的情况下，描述了多余的信息，使得反映信号特征的

一些参数相互重叠,给我们的分析带来了不便,但这个特点可以用在本身就有自相似性的信号上,可以让我们更清楚地看到信号自身的自相似性。

为了达到减小信息冗余的目的,就引入了离散小波变换的概念,其中的伸缩和平移系数是可数的。离散小波函数可表示为:

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j}t - kb_0), j, k \in Z \quad (3-5)$$

离散小波变换的系数可表示为:

$$W_{j,k}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt \quad (3-6)$$

$$\text{其重构公式为: } f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} W_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (3-7)$$

其中 C 为与信号无关的常数。如果选取的离散点满足 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$, 且函数 $\Psi_{j,k}(t) \in L^2(R)$, 如果存在两个常数 A, B , $0 < A < B < \infty$ 使得稳定性条件:

$$A \leq \sum_{j \in Z} \left| \hat{\Psi}(2^{-j}) \right|^2 \leq B \quad (3-8)$$

几乎处处成立, 如果 $A = B$ 则称为最稳条件, 那么函数序列 $\{W_{2j}f(k)\}_{k \in Z}$ 叫做函数 f 的二进小波变换。其中

$$W_{2j}f(k) = \langle f(t), \Psi_{2j}(k) \rangle = \frac{1}{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi(2^{-j}t - k)} dt \quad (3-9)$$

由小波变换重构原始信号:

$$f(t) = \sum_{j \in Z} W_{2j}f(k) * \Psi_{2j}(t) \quad (3-10)$$

由此可以看出, 通过选取不同的 a 值, 时间窗和频率窗的比例可以自行调节。这样小波分析就可以获得任何时间任何感兴趣的频谱, 不必像短时傅里叶变换那样只能获取固定频率段了。

但是二进小波变换虽然在离散的尺度上进行伸缩和平移, 但是小波之间没有正交性; 各个分量的信息掺杂在一起, 为我们的分析带来了不便。

真正使小波在应用领域得到比较大发展的是 Meyer 在 1986 年提出的一组小波, 其二进伸缩和平移构成了 $L^2(R)$ 的标准化正交基。在此结果上, 1988 年 S. Mallat 在构造正交小波时提出了多分辨分析的概念, 从函数的角度给出了正交小波的数学解释, 在空间的概念上形象的说明了小波多分辨率特性, 给出了通用

的构造正交小波的方法。

多分辨分析就是要构造一组函数空间，每组空间的构成都有一个统一的形式，而所有空间的闭包则逼近 $L^2(R)$ 。在每个空间中，所在的函数都构成该空间的标准化正交基，而所有函数空间闭包中的函数则构成 $L^2(R)$ 的标准正交基。那么，如果对信号在这类空间上进行分解，就可以得到相互正交的时频特性，而且由于空间数目是无限可数的，可以很方便地分析我们所关心的信号的某些特性。

定义：空间 $L^2(R)$ 中的多分辨分析是指 $L^2(R)$ 满足如下性质的一个空间序列 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ ：

(1) 单调一致性： $V_j \subset V_{j+1}$ ，对任意 $j \in \mathbb{Z}$ ；

(2) 渐进完全性： $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \Phi$ ， $\text{close}\left\{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j\right\} = L^2(R)$ ；

(3) 伸缩完全性： $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$ ；

(4) 平移不变性： $\forall k \in \mathbb{Z}$ ， $\phi(2^{-j/2}t) \in V_j \Rightarrow \phi_j(2^{-j/2}t - k) \in V_j$ ；

(5) Riesz 基存在性：存在 $\phi(t) \in V_0$ ，使得 $\{\phi_j(2^{-j/2}t - k) | k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 V_j 的 Riesz 基。且 $\phi(t)$ 是 V_0 的 Riesz 基，则存在常数 A ， B ，且使得：

$$A\| \{c_k\} \|_2^2 \leq \left\| \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k \phi(t - k) \right\|_2^2 \leq B\| \{c_k\} \|_2^2$$

对所有无限可平方和序列 $\{c_k\}$ ，即

$$\| \{c_k\} \|_2^2 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k|^2 < \infty \quad \text{成立}$$

满足上述条件的函数空间集合成为一个多分辨分析，多分辨分析构造了一组函数空间，这组空间是相互嵌套的，即

$$L \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 L$$

那么相邻的两个函数空间的差就定义了一个由小波函数构成的空间，即

$$V_j + W_j = V_{j+1}$$

在定义了多分辨分析后，则能把函数空间 $L^2(R)$ 分解成一组完全嵌套的函数空间集合，从这个角度上讲，当把信号从一个集合映射到它的子集的时候，就必然会丢失信息，那么如何描述这个丢失的信息，也就是如何找到一个子空间相对

于其临的父空间的补集, 如果 $\Psi \in L^2(R)$ 是多尺度分析 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 的生成元, 且满足:

$$(1) \{\phi(x-n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$$

$$(2) \phi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n \phi(2x-n)$$

记 $g_n = (-1)^n \bar{h}_{1-n}$

并定义 $\Psi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_n \phi(2x-n)$

定义 W_j 为 $\Psi_{j,n}$ 的线性张成, 即

$$W_j = \overline{\text{span}\{\Psi_{j,n}(x)\}_{n \in \mathbb{Z}}}$$

那么, 函数空间 W_j 满足如下的性质:

$$(1) W_j \perp V_j, W_j \oplus V_j = V_{j+1}, W_j \perp W_l, j \neq l;$$

$$(2) L^2(R) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j;$$

$$(3) \{\Psi_{j,n}(x)\}_{n \in \mathbb{Z}} \text{ 是 } W_j \text{ 的标准化正交基};$$

$$(4) \{\Psi_{j,n}(x)\}_{n \in \mathbb{Z}} \text{ 是 } L^2(R) \text{ 的标准化正交基};$$

则由以上性质则告诉我们, 我们要找的多分辨分析每个尺度的补集就由 W_j 给出, 而且 W_j 之间还是相互正交的; W_j 的闭包可以覆盖整个能量有限信号空间, 也就是说任何一个物理世界的信号都可以分解到这组空间上; 在每个函数空间内部函数的正交性质, 我们可以用一个构造一组 W_j 或 $L^2(R)$ 上的标准正交基, 并可以把信号分解到任意尺度。则正交小波变换为:

由于 $\{\Psi_{j,n}(x)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 是 $L^2(R)$ 的标准化正交基, 所以对于 $\forall f \in L^2(R)$, 都有

$$f(x) = \sum_{j,n \in \mathbb{Z}} \langle f, \Psi_{j,n} \rangle \Psi_{j,n}(x)$$

那么对 $f(x) \in L^2(R)$, 有

$$f(x) = V_{-1} \oplus W_{-1} = \bigoplus_{j=1}^N \omega_{-j} \oplus V_{-N}$$

3.2 信息熵分析原理

3.2.1 信息熵研究概况

信息论是 20 世纪 40 年代由美国科学家 C. E. Shannon 等为解决信息传递(通信)问题而建立的一系列理论^[37], 其中的重要概念之一就是信息熵。近代信息理论不断发展使得信息论早已超越了信息熵理论研究信息的定量描述方法及指标, 其发展来源于信息论思想。狭义的通信工程范畴, 广泛地渗透于其他科学技术领域。

广义通信系统泛指所有信息流通的系统, 诸如生物有机体的神经系统、人类社会的管理系统、工程物理系统等, 表达了信息传输过程的共同规律。它是一个单向通信系统, 即: 一个传递信息的系统是由发送端(信源)、发信器(把信息变换为物理信号的装置)、连接两者的通道(信道)、受信器(发信器的逆变换, 是把物理信号转换为信宿能够感知的信息的装置)、接收端(信宿)等部分组成。通信过程就是在随机干扰的环境中信源到信宿的传递信息过程, 信息源和干扰(噪声)都被理解为某种随机过程或序列。C. E. Shannon 指出: “信息就是用来消除(随机)不定性的东西, 信息量的大小, 用所消除的不定性的的大小来计量^[37]”。因此, 信息论的核心内容就是研究如何对信息传递过程中信宿相对于信源状态的不确定性进行描述、计量和分析等问题, 而其评定方法和准则就是信息熵。

具有激励—响应模式的机械动力系统也可以看作是一个广义通信系统, 系统的输入参量(激励)作为信源, 而系统的响应参量作为信宿, 机械系统本身即可视为由信源到信宿的通信信道。而对激励和响应参量进行检测的传感器可以分别视为广义通信系统的发信器和受信器。系统激励参量的变化可看作信源发出信息的变化, 而机械系统内部参数或运行状态的变化可看作是信道通信性能的改变。由此可见, 动力系统中的状态变化和信号传递规律可以采用广义信息论原理加以解释, 并有可能采用信息论分析方法实现对设备运行状态特征的描述和评价^[38], 广义通信系统从信息论角度描述了信息流通系统, 那么如何对系统中的信息传输和变换过程进行定量描述成为关键问题之一。1948 年 C. E. Shannon 运用概率论和数理统计学方法, 把熵的概念引入信息论思想, 首次从定量分析的角度给出了信息的量化描述、转换模型等理论框架, 提出用信息熵来度量事物所包含的信息量以及事物状态演化过程的信息传输量^[39], 实现对参量特征的定量描述、对比估计等

分析过程。

3.2.2 信息熵分析方法研究进展

信息熵概念的引入扩展了信息理论的研究领域和应用范围,此后信息熵理论和应用研究得到了人们的广泛关注,在信息熵的表达形式、演化机理及应用方法等问题均有研究报道^[40-41],在工业测试、军事分析、经济和社会统计等领域陆续出现了相关理论和应用研究^[42],引发了信息熵分析方法的研究开端。在此基础上,苏联数学家A. N. Kolmogorov给出了动力系统熵^[43]的概念,其后Kolmogorov和Chaitin将熵的概念进一步扩展^[44],提出用系统的复杂度来定义熵,其度量的是系统或信号的某一确定状态的复杂程度,而不是系统状态的不确定程度,这一定义的引申和推广使得信息熵应用于复杂系统的信号分析和状态识别成为可能。

二十世纪九十年代初,S. M. Pincus从衡量时间序列复杂性的角度提出并发展了近似熵(Approximate Entropy)的概念^[45],并应用于生理性时间序列的分析,如心率信号、血压信号等时间序列的复杂性研究^[46]。其后Y. L. Meng和裴文江分别研究了肌电信号和心电信号的统计复杂性分析^[47],上述信息熵概念的建立和发展为其后的进一步研究和应用奠定了基础。

自20世纪80年代以来,研究者将信息论思想和不同信号分析方法相结合,建立了多种信息熵特征指标用于工程信号分析和系统状态监测,主要研究内容有:运用信息论思想建立工程测试信息传输模型的研究、运用互信息熵等概念研究工程测试系统的精度评价方法^[48]、最大熵原理用于测试信号分析的方法研究^[49]、基于信号时、频分析的信息熵指标研究^[50]、信息熵在多传感器决策中的融合方法研究^[51]等。这些研究方法为信息论在工程测试领域的应用奠定了基础,并引发了信息熵分析和诊断技术的研究热潮。

20世纪90年代以小波变换、分形检测、神经网络等为代表的现代信号处理方法得到了广泛关注和快速发展,使得基于多种信号分析手段的信息熵理论得以深入研究,研究者在信号时频分析、模糊处理和信息融合理论等先进信号处理方法的基础上,结合信息熵基本理论,构建了不同种类不同层次的信息熵特征指标,实现对系统状态特征的综合描述和提取,以得到对设备运行特性更加客观、全面的刻画。

3.2.3 信息测度指标

1948年C. E. Shannon运用概率论和数理统计学方法,将熵的概念推广到信息理论,提出了信息熵的概念,把信息定义为“熵的减少”,即“系统或事物不确定性的减少”,因而首次提出了对信息进行定量描述的方法。其定义如下^[39]:

设由一个离散随机变量 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 所给定的信源,其出现的概率

$p_i = p(x_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 且 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则信源 X 的信息熵表示为:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (3-11)$$

上式中 $H(X)$ 是表征信源总体特征的一个量,为使信息熵和物理熵具有相同的量纲,信息熵可用自然对数表示,其中 $k = \log_2 e$ 为 Boltzmann 常数。

可见,信息熵是从平均意义上表征信源总体信息测度的一个量,同时又是信源输出信息的不确定性和事件发生的随机性的量度。故信息熵越大,信息量越多, X 越不确定。

由信息论基本原理可知, $H(X)$ 具有以下性质^[37]:

(1)有界性 $0 \leq H(X) \leq \ln n$;

(2)凸性 $H(X)$ 是关于概率矢量的上凸函数

(3)对称性 当概率矢量 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 的顺序任意颠倒时,熵函数不变,

即: $H_n(p_1, p_2, \dots, p_n) = H_n(p_k(1), p_k(2), \dots, p_k(n))$

(4)展开性

$$\begin{aligned} H_n(p_1, p_2, \dots, p_n) &= H_{n+1}(0, p_1, p_2, \dots, p_n) \\ &= H_{n+1}(p_1, p_2, \dots, p_k, 0, p_{k+1}, p_{k+2}, \dots, p_n) \\ &= H_{n+1}(p_1, p_2, \dots, p_n, 0) \end{aligned}$$

(5)肯定性 $H_2(1, 0) = H_2(0, 1) = 0$

(6)强可加性

$$\begin{aligned} &H_{m+n}(p_1 p_{11}, p_1 p_{21}, \dots, p_1 p_{m1}, p_2 p_{12}, p_2 p_{22}, \dots, p_2 p_{m2}, \dots, \\ &p_n p_{1n}, p_n p_{2n}, \dots, p_n p_{mn}) = H_n(p_1, p_2, \dots, p_n) + \sum_{i=1}^n p_i H_m(p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{mi}) \end{aligned}$$

式中, $p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{mi}$ 为 m 维概率向量;

(7) 可加性

$$H_{n+m}(p_1q_1, p_1q_2, \dots, p_1q_m, p_2q_1, p_2q_2, \dots, p_2q_m, \dots, p_nq_1, p_nq_2, \dots, p_nq_m) = H_n(p_1, p_2, \dots, p_n) + H(q_1, q_2, \dots, q_m)$$

式中, q_1, q_2, \dots, q_m 为 m 维概率向量;

(8) 递推性

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = H_{n-1}(p_1 + p_2, p_3, \dots, p_n) + (p_1 + p_2)H_2\left(\frac{p_1}{p_1 + p_2}, \frac{p_2}{p_1 + p_2}\right)$$

在工程测试信号分析领域, 可以应用信息熵来进行信号或系统的奇异性检测, 或者不规则程度的评判。如果被测试信号或系统存在多种状态 (可用状态参量 X 表示), 又假设得到的信号参量集合中每一个数据代表一个状态类别 x_i , 那么由信息熵的性质可知: $H(X)$ 越大, 说明集合中参量分布越均匀 (或不规则性越小), 信号或系统的奇异性越小。反之则说明奇异性成分越多 (或不规则性越大)。因此可以用 $H(X)$ 来表征信号或系统的总体特性或者不确定程度, 进而建立相应的检测和分析模型。

3.2.4 单变量信息熵特征提取

被测测试系统的状态参量往往包含着体现系统运行状态的重要特征, 因此在故障中通常采用相应的分析手段对测试信号进行必要的处理以得到被测对象的特征信息。研究者根据信息熵测度, 分别结合时域、频域、时-频域内的典型信号变换手段, 建立了单一信号不同空间中的信息熵特征提取方法, 如奇异谱熵、功率谱熵、多分辨率奇异谱熵等来实现不同层次内在特征的有效描述和定量表征, 尤其适用于对信号的非线性和非平稳性特征进行刻画, 为故障诊断和状态监测提供定量指标和评判依据。

3.2.4.1 时域信息熵特征提取

被测信号在形式上表现为离散时间序列, 在时域内进行信号分析和特征提取较为直接和简便, 可获得信号特征与时间状态点之间的良好对应关系。信号序列的时域分析方法有多种, 包括时域统计分析、相关分析、奇异谱分析和参数模型等分析, 它们共同思想是通过不同的参数计算或模型估计方法实现对信号时域分

布特性和规律的描述。

奇异谱分析是以动力学分析为基础的现代分析技术,其基本思想是通过对系统的时域序列进行相空间重构和奇异值分解,获得其内在复杂性特征进而对系统状态进行描述。因此,在信号奇异谱分析的基础上计算其复杂度信息熵——奇异谱熵,可以通过对时间序列的分析定量体现信号和系统的复杂状态特征。奇异谱分析方法,其基本思想如下:

首先采用延时嵌入重构相空间,以长度 M 、时延常数为 τ 的分析窗口将离散时间序列信号 $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 映射到嵌入空间,得到时刻 i 的轨迹矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_m^1 \\ x_{\tau+1}^2 & x_{\tau+2}^2 & \cdots & x_{\tau+m}^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{l\tau+1}^l & x_{l\tau+2}^l & \cdots & x_{l\tau+m}^l \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

根据信号奇异值分解原理,对于一个 $m \times n$ 维的实矩阵 A ,必然存在一个 $m \times l$ 的矩阵 U , 一个 $l \times l$ 维的对角矩阵 Λ 和一个 $l \times n$ 维的矩阵 V , 使得如下关系成立

$$A_{m \times n} = U_{m \times l} \Lambda_{l \times l} V_{l \times n}^T \quad (3-13)$$

式中, 对角矩阵 Λ 的主对角线元素 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 是非负的, 并按降序排列, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_l \geq 0$, 这些对角线元素便是矩阵 A 的奇异值。研究表明, 当信号无噪声或具有较高的信噪比时, 对其进行奇异值分解后得到的 Λ 矩阵可描述为

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, 0, \dots, 0) \quad (k < l, \text{ 且 } \lambda_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, k) \quad (3-14)$$

而当信号受到噪声干扰或者具有较低信噪比时, Λ 矩阵中对角线元素可能均为非零值。因此, Λ 矩阵中非零值主对角线元素的多少与信号所含频率成份的复杂与否有着密切的联系。非零值主对角线元素越多, 信号成份越复杂; 非零值主对角线元素越少, 则说明信号的频率成分越简单。因此, Λ 矩阵中非零奇异值的个数 k 反映了轨迹矩阵中包含的不同模式的数目; 而奇异值 λ_i 的大小反映了对应模式在总模式中所占的比重。对不受噪声污染的信号而言, 当其奇异谱达到饱和时所对应的奇异谱阶次 k 与信号的谐波频率数目 N 之间满足 2 倍关系^[52], 即: $k = 2N$ 。

由此, 根据信息熵的思想计算时域信号的奇异谱熵, 其计算步骤如下:

(1) 构造信号序列的轨迹矩阵: 选取分析模式窗口 m , 将时域信号序列 $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 顺序截取为 l 段模式数据, 得到轨迹矩阵如式(3-12), 其中,

$X_n(n=1,2,\dots,l)$ 即为各模式窗口中的信号序列。

(2) 计算奇异值谱：根据式 (3-13)、(3-14) 计算矩阵 A 奇异值谱 $\lambda_j(j=1,2,\dots,k)$ 。

(3) 计算奇异谱熵：将奇异值谱 $\lambda_j(j=1,2,\dots,k)$ 代入下式得到奇异谱熵 H_i ,

$$H_i = -\sum_{j=1}^l p_j \ln p_j \quad (3-15)$$

式中, $p_j = \lambda_j / \sum_{j=1}^l \lambda_j$, 表示第 $j(1 \leq j \leq k)$ 个奇异值在整个谱中所占的比例份额, 也表示第 j 个模式的组分概率。

由此可见, 奇异谱熵 H_i 反映了时域信号序列在奇异谱划分下各模式的不确定程度, 也体现了信号能量分布的时域复杂性。信号能量分布方式越简单, 能量越集中于少数几个模式, H_i 数值越小; 相反, 信号越复杂, 能量就越分散, H_i 数值越大, 信号所含的信息成分也就越丰富。当信号包含的频率成分越多, 即信号的时域波形越复杂, 其信息量达到饱和的奇异熵值也就越大。因此, 奇异谱熵体现了信号序列中奇异成分能量分布的复杂性程度, 因而可以定量刻画系统的动态特性。

3.2.4.2 频域信息熵特征提取

信号内部特征和状态变化常常体现在其频率组成结构和特征的变化, 因此将时域信号转化为频域信号进行频率结构的分析, 更有利于了解系统的动态及变化规律。频谱分析的基本思想是将信号从时域空间转化到频域空间, 得到的频谱中每个频率对应信号的一个周期谐波分量。通过对信号中各谐波分量的频率、幅值、相位等参数进行分析实现对信号特性的描述。

为实现信号在频域空间能量分布特性的定量描述, 可以采用复杂信息熵计算方法, 对信号的频谱特征进行定量描述。以下将基于功率谱讨论在频域变换空间中信息熵特征提取方法。

对于时域离散信号序列 $\{x_n | n=1,2,\dots,N-1\}$, 其功率谱估计的定义为

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (3-16)$$

上式又可表示为

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{N} |X(\omega)|^2 \quad (3-17)$$

式中, $X(\omega)$ 为序列 $\{x_n\}$ 的傅里叶变换, 实际计算时需要通过离散傅里叶变换得到频谱 $X(k)$ 和功率谱 $S_k (k=1,2,\dots,N-1)$ 。

同时由帕斯韦尔定理可知, 信号从时域变换到频域的过程中能量是守恒的, 即

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \quad (3-18)$$

因此, $S_k (k=0,1,2,\dots,N-1)$ 可以看作是原始信号在频域空间的一种能量划分。可得定义功率谱熵 H_f 为

$$H_f = - \sum_{k=0}^{K-1} p_k \ln p_k \quad (3-19)$$

式中, $p_k = S_k / \sum_{k=1}^N S_k$, 表示第 k 个功率谱在所有谱中所占的比例份额, 也表示第 k 个频率能量的组分概率。

功率谱熵刻画了被分析信号的谱形结构情况, 当信号的频率组成比较简单、谱线较少时, 其对应的组分概率越大, 计算得到的功率谱熵越小, 表示信号的不确定性和复杂性越小; 反之, 若信号能量在整个谱形结构上分布的越均匀, 则功率谱熵越大, 信号的复杂性和不确定性越大。因此, 功率谱熵体现了信号的频域能量分布复杂程度。

3.2.4.3 基于时-频分析的信息熵特征提取

系统在特殊运动状态下, 其信号参量往往表现出一定的非线性和非平稳性特征, 因此基于时域和频域的信息熵特征提取对于信号的分析则存在一定的局限性。

基于时-频分析的信息熵特征提取, 研究者先后构造了小波能谱熵、多分辨信息熵、多分辨分析复杂度熵、多分辨率奇异谱熵等。小波能谱熵作为定量衡量

时-频域中信号不确定性的信息熵特征指标，其计算方法如下：

首先对信号 $f(t)$ 进行连续小波变换如式 (3-3)。由有限能量信号函数 $f(t)$ 在小波变换前后能量的守恒性

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty a^{-2} E(a) da \quad (3-20)$$

式中， $E(a)$ 为函数 $f(t)$ 在尺度 a 时的能量值，称为小波能谱，且

$$E(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3-21)$$

可见，信号 $f(t)$ 经分解后在 n 个尺度上的小波能谱 $E = [E_1, E_2, \dots, E_n]$ ，就形成了对信号时-频域上能量的一种划分，从而可定义相应的小波能谱熵 H_ω 为

$$H_\omega = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (3-22)$$

式中， $p_i = E_i / \sum_{i=1}^n E_i$ ，表示尺度 i 的能量占整个函数能量的比例份额。

由于小波变换是等距地将一维信号映射到二维小波空间上，小波函数在频域与时域具有一定支撑区间，而且此支撑区间具有速降、可自适应变化的特点，因此小波能谱熵实现了在尺度空间上对信号能量的划分，同时也反映了信号在时域与频域上的能量分布特征。

多分辨率奇异谱熵与其它形式的信息熵相比，具有以下功能和特点：

(1) 在信号的小波包分解基础上计算不同频段小波系数的奇异谱熵；可以得到任意局部频段内的能量分布奇异性特征；

(2) 基于高阶累计量分析方法对提出的多分辨率奇异谱熵进行拓展，可以获得更好的非线性特征提取和噪声抑制能力；

(3) 通过参数选取和优化计算，可以提高测度模型的分析性能和计算效率。

多分辨率奇异谱熵计算方法：首先将信号进行小波包分解。由于小波包变换的实质是在多分辨率分析的基础上将没有细分的高频部分进一步分解以提高分辨率，因此仍按正交小波变换的 Mallat 算法实现序列的小波分解：

对于任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ ，引入记号

$$d_{j,k}^I = \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{u}_{I;j,k}(t) dt \quad (3-23)$$

则将 $f(t)$ 在小波包空间

$$U_j^m = \text{Closespan}\{u_{m,j,k}(t) = 2^{j/2} u_m(2^j t - k); k \in Z\} \quad (3-24)$$

上的投影可写成

$$D_j^m f(t) = \sum_{k \in Z} d_{j,k}^m u_{m,j,k} \quad (3-25)$$

可得小波包分解的 Mallat 算法公式

$$\begin{cases} d_{j,k}^{2m} = \sum_{l \in Z} \bar{h}_{l-2k} d_{j+1,l}^m \\ d_{j,k}^{2m+1} = \sum_{l \in Z} \bar{g}_{l-2k} d_{j+1,l}^m \end{cases} \quad (3-26)$$

因此信号 $f(t)$ 经过尺度 $1, 2, \dots, j$ 的分解, 频带被不断细分, 频率分辨率不断提高, 时间分辨率不断降低。当经过 j 层小波分解后, 第 j 层上的第 k 个结点系数为 $D_{j,k} = \{d_{j,k}(m), m = 1, 2, \dots, 2^{-j} N\}$ 。

然后计算各尺度结点系数的奇异谱值和奇异谱熵。以长度为 M 步长为 1 将节点系数 $D_{j,k}$ 加窗, 并映射到嵌入空间中, 即将该系数序列分为 $2^{-j} N - M + 1$ 个数据段, 构造状态矩阵

$$A_{j,k} = \begin{bmatrix} d_{j,k}(1) & d_{j,k}(2) & \cdots & d_{j,k}(M) \\ d_{j,k}(2) & d_{j,k}(3) & \cdots & d_{j,k}(M+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{j,k}(2^{-j} N - M + 1) & d_{j,k}(2^{-j} N - M + 2) & \cdots & d_{j,k}(2^{-j} N) \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

再将 $A_{j,k}$ 进行奇异值分解, 得到奇异值为 $\lambda_{j,k}^m (1 \leq m \leq \min(M, 2^{-j} N - M + 1))$, 则 $\lambda_{j,k}^m$ 即构成该层上信号的奇异值谱。若 m_0 为非零奇异值的个数, 则 m_0 值反映了特征矩阵 $A_{j,k}$ 包含的不同模式的个数, 奇异值 $\lambda_{j,k}^m$ 的大小反映了对应模式在总模式中占的比重; 因此, 基于信息熵理论, 该尺度系数序列的奇异谱熵为:

$$H_{j,k}(f) = - \sum_{m=1}^{m_0} p_{j,k}^m \ln p_{j,k}^m \quad (3-28)$$

$$p_{j,k}^m = \frac{\lambda_{j,k}^m}{\sum_{m=1}^{m_0} \lambda_{j,k}^m} \quad (3-29)$$

若信号 $f(t)$ 的频率分布范围为 $[\omega_d, \omega_g]$, 则根据小波包分解原理, $H_{j,k}(f)$ 体

现了 $\left[\omega_d + (k-1) \frac{\omega_g - \omega_d}{2^j}, \omega_d + k \frac{\omega_g - \omega_d}{2^j} \right]$ 频带内信号的能量分布奇异性情况。

同理可以得到其它频带内信号的奇异谱熵, 从而实现信号多尺度奇异特征的定量描述和有效提取, 为系统的状态监测和故障定位提供依据。

3.3 本章小结

本章主要就小波分析和信息熵技术的原理进行了说明, 并且对信息熵技术发展以及应用进行了阐述, 指出了小波和信息熵技术在信号处理当中的优越性。

第四章 小波与信息熵技术在信号处理当中的应用

4.1 实测信号的小波分析

下面仍以青铜峡七号机组测试数据为例,来说明小波技术在信号处理当中的应用,并将结合信息融合技术来说明七号机组振动信号的物理特性,及振动信号对机组振动的影响。

振动信号都可以解释为各种周期分量的总合,傅里叶变换可以实现在频域各种频率分量的物理特征,但是对于大型旋转机械,如水轮机等设备,其在故障运行时,振动信息中往往存在大量的非平稳和非线性信号,由此单纯的傅里叶变换反映不出这些蕴藏着设备故障信息的信号特征。而小波分解可以在时-频域上对信号进行分解,从而实现对设备故障信号的分析 and 诊断。

Daubechies小波函数^[53],阶数为4,简称db4小波。db4小波函数的优点是对于给定的支撑宽度具有极高的相位和最高的消失矩,也就是说,对于同样阶数的消失矩,其支集长度最短。阶数为4时,其消失矩为7。此外,该小波函数具有正则性和双正交性,其正则性随着阶数的增大而增大。因此利用db4小波对信号进行处理比较适当。

对试验测得的各种工况下的信号用db4小波进行7层小波分解。试验中信号的采样频率为300Hz,根据采样定理,奈奎斯特截断频率为150Hz,即信号的分析频率为150Hz。根据小波分析原理,对信号进行七层小波分解,将信号分解为低频和高频两部分,两部分的频带都为分解前信号频带的一半。原始信号 $S=a_7+d_7+d_6+d_5+d_4+d_3+d_2+d_1$,分解后的各频段宽度见表4-1。

表 4-1 各频段信号频率宽度

分解信号	a7	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1
频段(Hz)	0~ 1.17	1.17~ 2.34	2.34~ 4.68	4.68~ 9.38	9.38~ 18.75	18.75~ 37.5	37.5~ 75	75~ 150

结合第二章频率分析结果,小波分解把信号分解到不同的频段上,第一个频段 a7(0-1.17Hz)主要是尾水管涡带摆动和气蚀引起的振动频率,第二个频段

d7(1.17-2.34Hz)主要是转频, 第三个频段 d6(2.34-4.68Hz)主要是 2 倍的转频和类转频, 第四个频段 d5(4.68-9.38Hz), 第五个频段 d4(9.38-18.75Hz), 第六个频段 d3(18.75-37.5Hz), 主要为中高倍的转频, 第七个频段 d2(37.5-75Hz)主要是中高倍转频以及电磁频率, 第八个频段 d1(75-150Hz)主要是卡门涡列等高频脉动以及噪声信号、电磁频率倍频等。

对分解后所得的各频段的信号进行方差统计分析, 得出不同频段上的能量大小, 表 4-2 是以青铜峡七号机轴摆度水平 X 向在发电机变出力(增大)各工况下信号的小波分解后的各频段的能量值。

表 4-2 七号机组机轴摆度水平 X 向信号各频段能量百分比表

频段(Hz) 出力	a7	d7	d6	d5+d4	d3+d2+d1
0MW	19.59	62.86	13.35	3.23	0.98
4MW	19.14	63.19	12.45	4.31	0.91
8 MW	7.71	70.34	14.24	6.46	1.24
12 MW	24.08	62.45	12.34	0.88	0.26
16 MW	9.43	74.88	14.26	1.16	0.27
20 MW	23.22	64.79	11.02	0.80	0.16
24 MW	7.90	74.62	16.38	0.91	0.19
28 MW	12.10	73.46	13.38	0.88	0.18
32 MW	7.92	75.28	15.25	1.23	0.32
36 MW	5.88	78.17	13.77	1.85	0.33

从表 4-2 可以看出, 占能量比重较大的主要集中在第一、第二、第三频段, 也就是 0-4.68Hz 频带内, 这段频率成份主要为尾水管涡带频率, 机组的转频以及 2 倍的转频, 其中以机组的转频所占能量比重最大, 能量比重随发电机出力有一定的变化, 但相比第一频段(0-1.17Hz)而言要小。第一频段随发电机出力变化较为明显, 但没有一定的规律性可言, 显得较为随机。4.68Hz 以后的频段主要以 3 倍以上的转频和卡门涡列以及噪声、电磁频率为主, 但是从表中可以看到, 这些频率成份所占比重很小。就机组的其它部件, 包括上架、下机架、顶盖各向的振动信号分解所得的能量来看, 有着与机轴摆度类似的情况, 因此在青铜峡机组振动信号中, 主要以 0-1.17Hz 的低频、机组的转频和二倍的转频为主。

4.2 实测信号的小波能谱熵分析

在信息论中，熵表示每个符号所提供的平均信息和信源的平均不确定性，它能提供关于信号潜在的动态过程的有用信息。实际上，对于一个单一频率的周期信号，进行小波变换后，除了包含这个典型信号频率的小波尺度，所有的其它小波系数几乎都为零。对于这个特殊的尺度，小波系数将接近于 1，而此时信号的熵值将接近于 0 或者是一个很小的值。相反，由一个完全无序的过程生成的信号，在所有的频段上都有小波系数，而且数值大小并无明显差别，此时信号的熵值将接近于 1，同时信号的概率分布越接近这种无序的分布，其熵值也就越大，信号熵值的大小反映概率分布的均匀性，同时也反映了信号的复杂性和不确定性。具有不同熵值的信号在信号的表现形式上也存在一定的差异。因此信号成分越确定，则该成分所具有的熵值越低，信号成分越不确定，则该成分所具有的熵值越大。下面是具有不同小波能谱熵值的信号图形。



图 4-1 机轴摆度变发电机出力 OMW 时信号时域波形图



图 4-2 机轴摆度变发电机出力 4MW 时信号时域波形图形

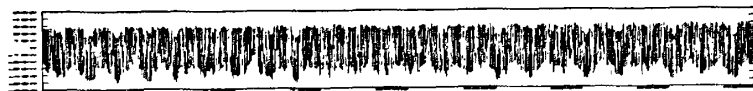


图 4-3 机轴摆度变发电机出力 12MW 时信号时域波形图



图 4-4 机轴摆度变发电机出力 16MW 时信号时域波形图

图 4-1、图 4-2、图 4-3、图 4-4 信号的小波能谱熵分别为 1.8009, 1.7335, 0.84763, 0.91785, 图 4-1 与图 4-2 的小波能谱熵相差很小，从时域波形图上可以看出，两者在图形的表现形式上差别不大，两者很相似，同时图 4-3 与图 4-4 的信号小波能谱熵相差也很小，两者的时域波形图也很相似。

振动信号经过小波变换后，可以在多个不同尺度（不同分辨率）下观察信号

的变化，因此本节结合小波变换，运用 db4 小波对信号进行六层小波分解，计算信号的小波能谱熵，并以此来描述不同工况下的振动信号熵值的变化趋势。表 4-3 给出了上机架、下机架、顶盖水平向在发电机变出力工况下的小波能谱熵值。

表 4-3 机组各部件水平向振动信号小波能谱熵值表

部 位 出 力		上机架	顶盖	下机架
		水平向	水平向	水平向
11	0MW	2.1622	2.3669	2.2314
12	4 MW	2.3637	2.7573	2.42
13	8 MW	2.3632	2.937	2.3785
14	12 MW	2.2887	2.0406	1.9007
15	16 MW	2.4163	1.9503	1.8332
16	20 MW	2.1896	1.9957	1.8596
17	24 MW	2.1956	2.0768	1.9144
18	28 MW	2.1597	2.2053	1.9884
19	32 MW	2.1983	2.3394	2.1744
20	36 MW	2.3088	2.5164	2.2305
21	32 MW	2.2648	2.3917	2.2447
22	28 MW	2.2844	2.2093	1.9959
23	24 MW	2.2308	2.1137	1.9537
24	20 MW	2.1955	2.0941	1.9451
25	16 MW	2.1989	1.9279	1.8741
26	12 MW	2.1934	1.994	1.9702
27	8 MW	2.3853	3.051	2.4607
28	4 MW	2.1592	2.4141	2.3258
29	2 MW	2.2331	2.4845	2.4192
30	提 13 、 14 号 泄 水 管	2 MW	2.0628	2.3509
31		4 MW	2.0667	2.2829
32		8 MW	2.2469	2.7783
33		12MW	2.2424	1.9298
34		16MW	2.2314	1.9568
35		20MW	2.1244	1.9236
36		24MW	2.1208	2.0379
37		28MW	2.1767	2.207
38		32MW	2.2137	2.3165
39		35MW	2.2359	2.2278

4.2.1 机组部件变发电机出力(增大)熵值结果

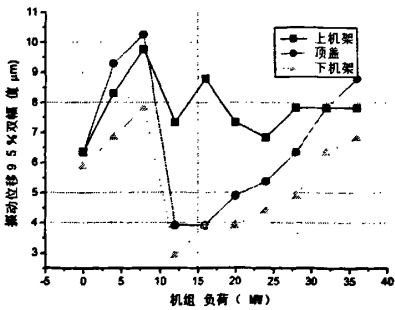


图 4-5 机组部件水平向振动幅值随发电机出力关系曲线

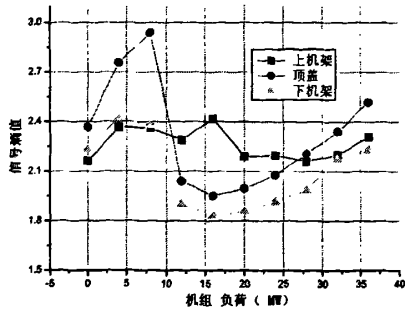


图 4-6 机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线

通过图 4-5 与图 4-6 的比较发现，机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线与机组部件振动幅值随发电机出力关系曲线基本相一致，两者在不同工况下变化趋势基本完全一致，振动幅值大的工况下的振动信号的熵值也大，振动幅值小的工况下振动信号的熵值也小，两图有着很好的对应关系。

4.2.2 机组部件变发电机出力(减小)熵值结果

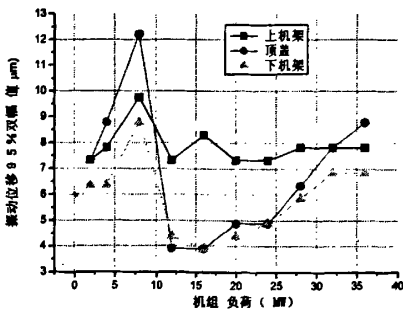


图 4-7 机组部件水平向振动幅值随发电机出力关系曲线

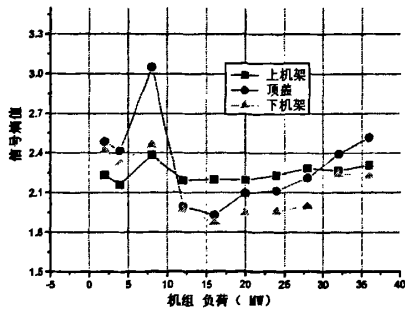


图 4-8 机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线

通过图 4-7 与图 4-8 的比较发现，机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线与机组部件振动幅值随发电机出力关系曲线基本相一致，两者在不同工况下变化趋势基本完全一致，振动幅值大的工况下的振动信号的熵值也大，振动幅值小的工况下振动信号的熵值也小，两图有着较好的对应关系。两者之间的区别是在发电机出力 32MW 工况下，振动幅值随发电机出力关系曲线上，此工

况下的振动幅值较前一个工况幅值要大，而在熵值随发电机出力关系曲线上，此工况下的熵值要较前一个工况的熵值要小。

4.2.3 提 13、14 号泄水管，机组负荷逐渐增大试验熵值结果

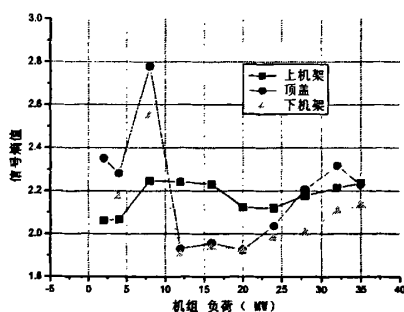
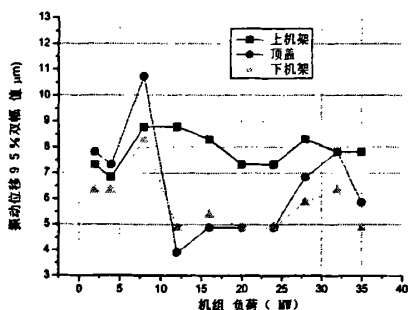


图 4-9 机组部件水平向振动幅值随发电机出力关系曲线 图 4-10 机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线

通过图 4-9 与图 4-10 的比较发现，机组部件水平向振动信号熵值随发电机出力关系曲线与机组部件振动幅值随发电机出力关系曲线基本相一致，两者在不同工况下变化趋势基本一致，振动幅值大的工况下的振动信号的熵值也大，振动幅值小的工况下振动信号的熵值也小，两图有着较好的对应关系。两者之间的区别是在发电机出力 2MW 工况下，上机架、下机架振动幅值随发电机出力关系曲线上，此工况下的振动幅值较前一个工况幅值要小，而在熵值随发电机出力关系曲线上此工况下比前一个工况要大。

机组部件熵值随发电机出力关系曲线，熵值都是在发电机出力 8MW 时达到最大，相对应的振动幅值达到最大，在 12MW 或 16MW 时熵值达到最小，而此时振动幅值也基本上达到最小。熵值的高低代表了信号确定性程度的大小，熵值越高，信号的不确定成份就越大，熵值越小，信号的不确定成份也就越小。因此可以在一定程度上认为，产生大的幅值的振动信号其熵值也大。

4.3 实测信号的奇异谱熵分析

仍然采用 db4 小波对实测信号进行静态小波分解，采用静态小波分解的原因是因为静态小波分解后各频段的信号长度相等，相互之间具有可比性。对信号进

行七层静态小波分解,分为八个频段,频段分别为 $a_7(0-1.17\text{Hz})$, $d_7(1.17-2.34\text{Hz})$, $d_6(2.34-4.68\text{Hz})$, $d_5(4.68-9.37\text{Hz})$, $d_4(9.37-18.75\text{Hz})$, $d_3(18.75-37.5\text{Hz})$, $d_2(37.5-75\text{Hz})$, $d_1(75-150\text{Hz})$ 。可以用奇异谱熵比较各频段信号的复杂程度。

图 4-11、图 4-12、图 4-13 分别为发电机出力 4MW, 20MW, 24MW 机轴摆度水平 X 向振动信号小波静态分解后的各频段的信号,从表 4-4 可以看到,发电机变出力 4MW 时机轴摆度水平 X 向振动信号各频段上的奇异谱熵值分别为 0.769, 0.541, 0.314, 0.242, 0.182, 0.176, 0.180, 0.177; 发电机变出力 20MW 时各频段上的奇异谱熵分别为 2.997, 1.030, 0.573, 0.228, 0.196, 0.185, 0.183, 0.199; 发电机变出力 24MW 时各频段上的奇异谱熵分别 2.739, 0.940, 0.526, 0.526, 0.193, 0.188, 0.178, 0.198。从图中可以看出,图 4-11 与图 4-12、图 4-13 在各频段上的信号都有着较大的差异,而前者与后两者各频段信号在奇异谱熵值上也存在较大的差异,后两者各频段上的信号具有很好的相似性,两者的各频段信号在奇异谱熵值上也相近,因此奇异谱熵有在数值上定量刻画信号复杂程度的功能。

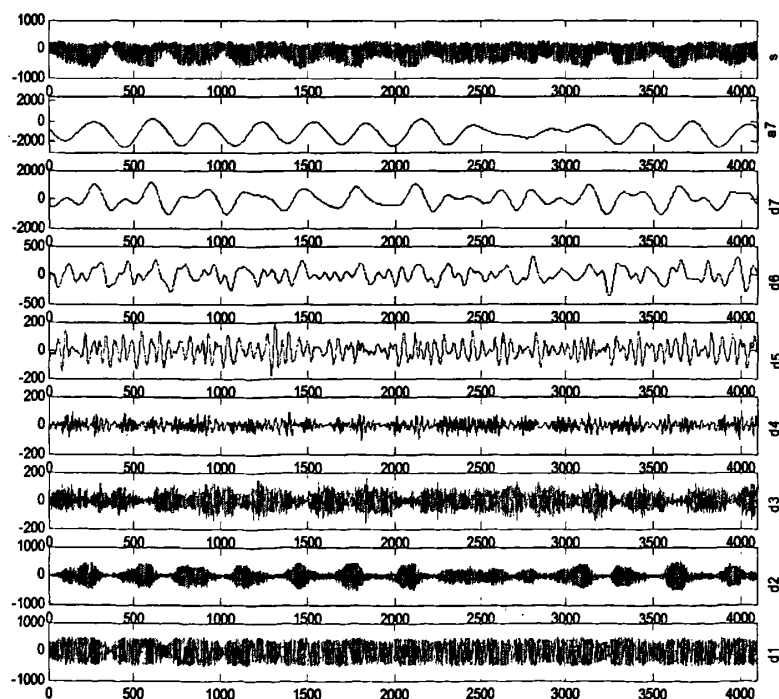


图 4-11 发电机出力 4MW 时机轴摆度静态小波信号分解

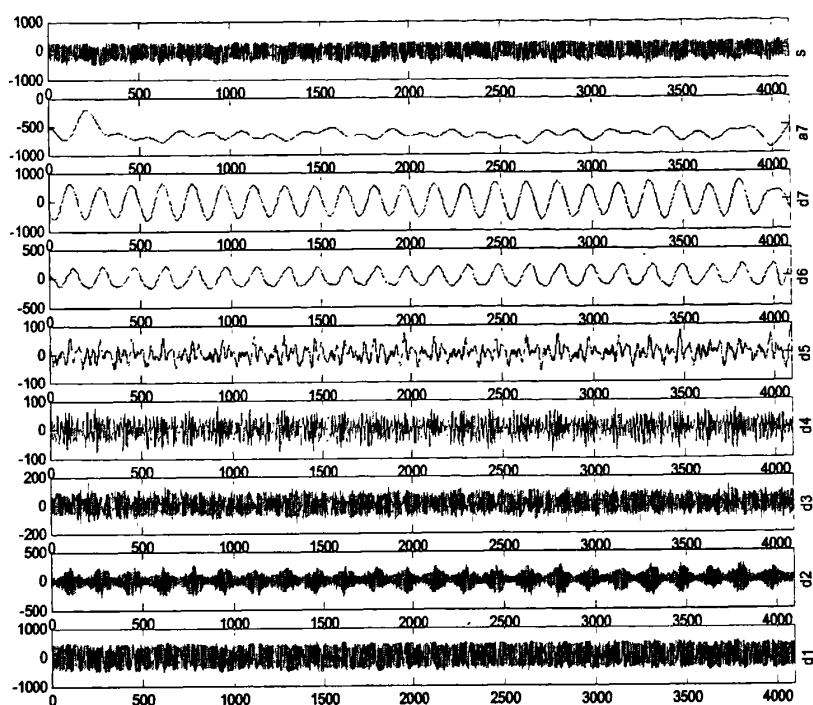


图 4-12 发电机出力 20MW 时机轴摆度静态小波信号分解

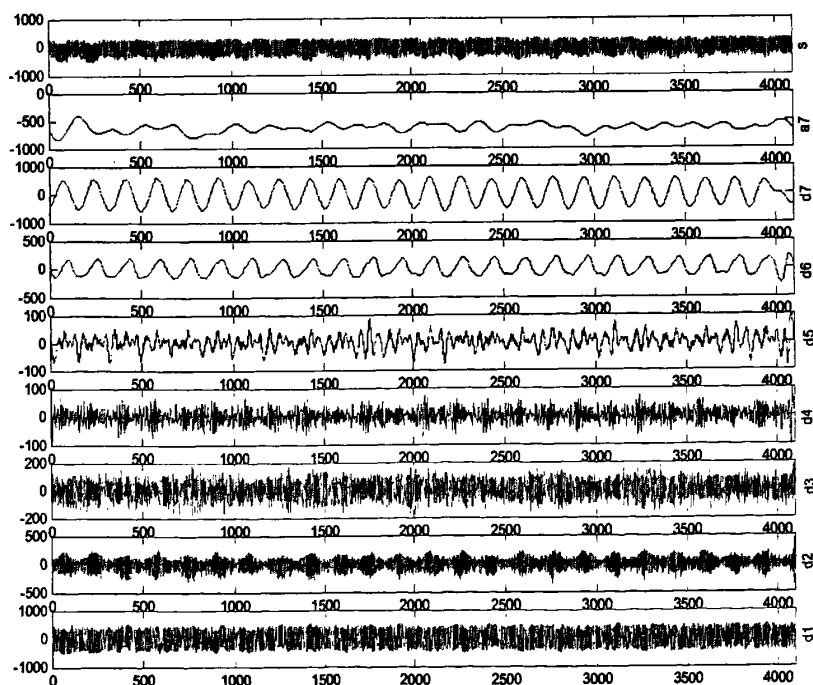


图 4-13 发电机出力 24MW 时机轴摆度静态小波信号分解

表 4-4 发电机变出力（增大）机组部件水平向振动各频段信号的奇异谱熵值。

频段 (Hz) 出 力	a7	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1
上机架 0MW	0.821	0.586	0.344	0.303	0.221	0.271	0.501	0.378
上机架 4 MW	0.724	0.678	0.339	0.300	0.217	0.239	0.439	0.351
上机架 8 MW	0.747	0.675	0.312	0.274	0.216	0.233	0.442	0.383
上机架 12 MW	0.746	0.790	0.445	0.380	0.238	0.270	0.452	0.343
上机架 16 MW	0.928	0.849	0.412	0.364	0.241	0.259	0.438	0.349
上机架 20 MW	0.922	0.742	0.408	0.370	0.233	0.260	0.475	0.372
上机架 24 MW	0.874	0.722	0.403	0.344	0.225	0.246	0.428	0.350
上机架 28 MW	0.878	0.762	0.405	0.333	0.226	0.255	0.497	0.390
上机架 32 MW	0.831	0.818	0.379	0.304	0.220	0.248	0.437	0.346
上机架 36 MW	0.881	0.786	0.389	0.323	0.220	0.241	0.422	0.353
顶盖 0 MW	0.456	0.378	0.332	0.258	0.216	0.252	0.388	0.327
顶盖 4 MW	0.467	0.371	0.305	0.249	0.214	0.216	0.327	0.285
顶盖 8 MW	0.476	0.375	0.300	0.249	0.213	0.204	0.290	0.280
顶盖 12 MW	0.628	0.384	0.272	0.265	0.227	0.250	0.329	0.273
顶盖 16 MW	0.551	0.576	0.298	0.263	0.222	0.231	0.307	0.278
顶盖 20 MW	0.533	0.696	0.315	0.279	0.225	0.236	0.315	0.294
顶盖 24 MW	0.548	0.669	0.317	0.267	0.220	0.224	0.300	0.280
顶盖 28 MW	0.519	0.714	0.326	0.273	0.222	0.229	0.325	0.295
顶盖 32 MW	0.482	0.681	0.311	0.262	0.216	0.220	0.296	0.267
顶盖 36 MW	0.543	0.568	0.310	0.296	0.225	0.216	0.280	0.262
下机架 0 MW	0.613	0.374	0.317	0.259	0.238	0.357	0.511	0.375
下机架 4 MW	0.567	0.369	0.312	0.262	0.228	0.335	0.503	0.355
下机架 8 MW	0.509	0.340	0.304	0.261	0.224	0.314	0.501	0.388
下机架 12 MW	0.547	0.644	0.374	0.270	0.286	0.389	0.482	0.346
下机架 16 MW	0.535	0.733	0.374	0.283	0.272	0.378	0.470	0.347
下机架 20 MW	0.691	0.793	0.388	0.278	0.264	0.374	0.490	0.370
下机架 24 MW	0.482	0.740	0.396	0.273	0.255	0.358	0.468	0.348

下机架 28 MW	0.595	0.806	0.397	0.272	0.258	0.368	0.527	0.390
下机架 32 MW	0.516	0.714	0.347	0.264	0.239	0.332	0.450	0.344
下机架 36 MW	0.591	0.724	0.342	0.280	0.240	0.322	0.436	0.350
摆度 0 MW	0.837	0.533	0.331	0.227	0.185	0.174	0.183	0.177
摆度 4 MW	0.769	0.541	0.314	0.242	0.182	0.176	0.180	0.177
摆度 8 MW	0.585	0.447	0.297	0.237	0.183	0.173	0.178	0.175
摆度 12 MW	2.226	0.935	0.511	0.244	0.202	0.192	0.183	0.202
摆度 16 MW	2.279	0.996	0.587	0.234	0.205	0.187	0.179	0.198
摆度 20 MW	2.997	1.030	0.573	0.228	0.196	0.185	0.183	0.199
摆度 24 MW	2.739	0.940	0.526	0.526	0.193	0.188	0.178	0.198
摆度 28 MW	2.149	0.990	0.551	0.233	0.188	0.181	0.177	0.192
摆度 32 MW	1.667	0.810	0.422	0.232	0.189	0.181	0.176	0.194
摆度 36 MW	3.246	0.986	0.512	0.251	0.188	0.178	0.179	0.186

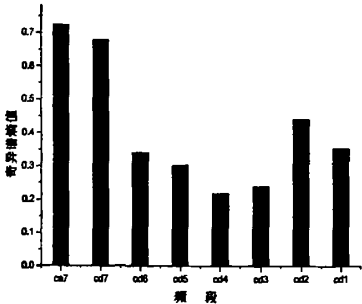


图 4-14 上机架水平向发电机变出力
4MW 时各频段信号熵值图

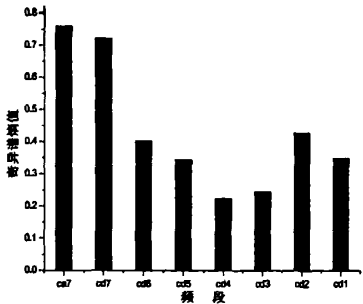


图 4-15 上机架水平向发电机变出力
24MW 时各频段信号熵值图

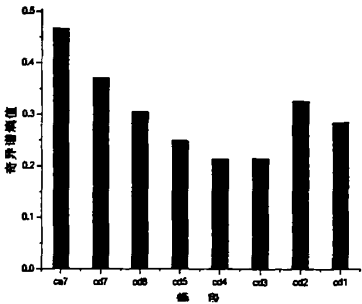


图 4-16 顶盖水平向发电机变出力
4MW 时各频段信号熵值图

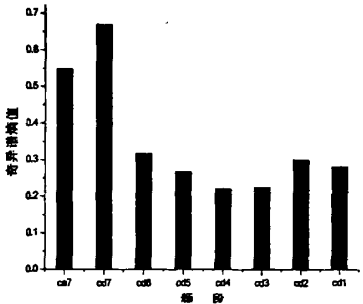


图 4-17 顶盖水平向发电机变出力
24MW 时各频段信号熵值图

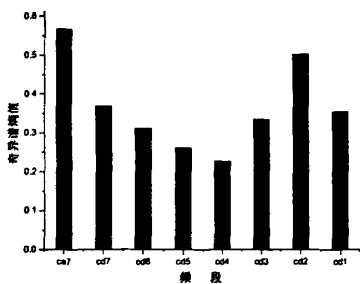


图 4-18 下机架水平向发电机变出力
4MW 时各频段信号熵值图

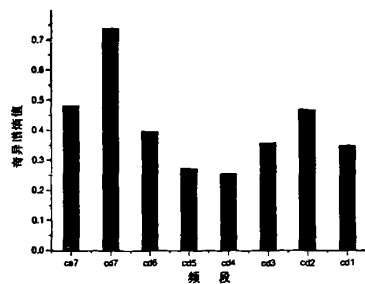


图 4-19 下机架水平向发电机变出力
24MW 时各频段信号熵值图

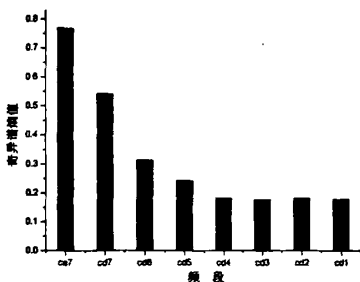


图 4-20 摆度水平向发电机变出力
4MW 时各频段信号熵值图

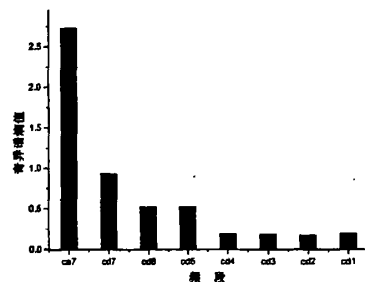


图 4-21 摆度水平向发电机变出力
24MW 时各频段信号熵值图

从图 4-14 至图 4-21 可以很清楚的看出各频段上奇异谱熵值的变化，上机架在 a7(0-1.17Hz)、d7(1.17-2.34Hz)、d2(37.5-75Hz)、d1(75-150Hz)频段上具有较大的熵值，其中以 a7 频段上具有奇异谱熵值最大；顶盖主要在 a7(0-1.17Hz)、d7(1.17-2.34Hz)频段上具有较大的熵值，其余各频段上的熵值都较小；下机架在 a7(0-1.17Hz)、d7(1.17-2.34Hz)、d2(37.5-75Hz)频段上奇异谱熵值较大，其余频段上的熵值都较小；摆度熵值较大的频段主集中在 a7(0-1.17Hz)、d7(1.17-2.34Hz)、d6(2.34-4.68Hz)频段上。

由以上的数据分析可以得到，机组部件的振动信号在 0-1.17Hz、1.17-2.34Hz、2.34-4.68Hz 频段上不确定性较大，也就是说机组在这三个频段上的振动信号较为复杂。这三个频段分别为低频振动，机组的转频振动以及 2 倍的转频振动。由前面的分析可知，低频振动主要由尾水管涡带摆动和气蚀所引起的，低频振动的频率范围为 0.297-0.594Hz，而且低频振动信号不稳定，具有很强的随机性，因此在熵值表现上较大。1.17-2.34Hz 频段主要为机组的转频振动，在此频段上，

信号奇异谱熵值均较大,以机组转频振动的信号主要有质量偏心引起的振动,转动部分与固定部分碰撞引起的振动,轴承间隙过大、主轴过细引起的振动以及其它原因引起的振动,在水轮机机组振动中,这些原因都会在一定程度上对机组部件的振动存在影响,只是各种振动所产生影响的大小不一样,在振动信号的幅值上所表现出来的数值大小也存在较大的差异,因而在振动信号幅值的表现上则显得比较混乱,但是这其中以一种引起的振动为最主要的,可能也是产生机组振动的主要原因之一,从频谱上反映出来基本上就是以 1.78Hz 为主的机组转频振动,并且在此频段内伴有其它频率的振动信号。从机组振动信号的静态小波分解后的各频段的奇异谱熵柱状图也可以看到在 2.34-4.68Hz 频段上也具有较大值,这一点与机组的转频振动有着类似的原因。上机架、顶盖、下机架水平向振动在 37.5-150Hz 频段也具有较大的熵值,这可能是因为机组在振动测试中混入了其它的高频的不稳定信号,如一些电磁频率和一些高频噪声。

上机架、顶盖、下机架及摆度振动信号的静态小波分解后各频段的奇异谱熵值表现的并不完全一样,上机架、顶盖和下机架奇异谱熵值较大的频段主要集中在 a7、d7、d2、d1 频段上,而其它的频段上相对较小;在机轴摆度上,奇异谱熵值较大的频段主要集中在 a7、d7、d6 上,其它频段上的奇异谱熵值均较小。从这一点上可以得出,虽然机组可能存在各种对机组产生振动的振源,但是这些振源在机组各个部件上作用所产生的效果也是不一样的。上机架、顶盖和下机架信号分解后的各频段的奇异谱熵值相差不是很大,因此上机架、顶盖和下机架的振动信号的复杂和奇异程度比较大,相比较而言,摆度的振动信号经过静态小波分解后所得到的各频段的奇异谱熵值相对比较集中,信号的奇异部分主要集中在信号的低频部分,因此上机架、顶盖和下机架振动信号的复杂程度从总体上要比机轴摆度大。

就摆度的振动信号分解后的奇异谱熵值在 a7、d7、d6 频段要大于上机架、顶盖、下机架相应频段上的奇异谱熵值,此体现了机轴摆度振动信号在低频段的信号要比上机架、顶盖和下机架在低频段的振动信号更复杂,信号所含的各种成分更多。同时,上机架、顶盖、下机架在振动信号的高频部分要相对于机轴摆度振动信号要复杂,所含奇异成分要丰富的多。

从表 4-4 中可以看到,无论是上机架、顶盖、下机架还是机轴摆度的振动信

号静态小波分解后的 $a_7(0-1.17\text{Hz})$ 频段的奇异谱熵在发电机出力 $0-8\text{MW}$ 较小, 而发电机出力 8MW 以上则较大; 从 $1.17-2.34\text{Hz}$ 频段内的各工况下的奇异谱熵可以看到, 在发电机出力 $0-8\text{MW}$ 时机组部件和机轴摆度的奇异谱熵值较为接近且值也较小, 而在 $12-36\text{MW}$ 时机组部件和机轴摆度的奇异谱熵值较为接近且值也较大, 只是在 8MW 到 12MW 时产生一个大的跳跃, 奇异谱熵值相对比较稳定, 因此这个频段内的振动信号对机组各部件的振动有着较为稳定的影响。

从表中可以看到机组部件和机轴摆度 d_6 频段 ($2.34-4.68\text{Hz}$) 有着与 d_7 ($1.17-2.34\text{Hz}$) 相类似的情况, 随发电机变出力没有出现大的波动, 只是在一定的范围内小规模波动, 因此此频段内的振动信号随发电机出力的变化较为稳定, 对机组部件和机轴摆度的振动幅值的影响也较为稳定。

通过以上对信号分别进行的能量分析、小波能谱熵分析、振动信号的多分辨奇异谱熵分析, 可以得到以下一些结论:

1、振动信号的振动能量主要集中在 $0-4.68\text{Hz}$ 频段内, 并且此段的振动信号对机组各部件的振动产生了很大的影响;

2、由机组部件振动信号的小波能谱熵分析可以看到, 振动幅值的大小与小波能谱熵有着较好的对应关系, 在大部分工况下, 小波能谱熵大的工况所对应的机组部件 95% 振动双幅值也相对较大; 因此小波能谱熵能够较好的刻画振动幅值的趋势变化;

3、通过多分辨奇异谱熵分析, 振动信号的复杂和奇异性主要在 $0-4.68\text{Hz}$ 的频段, 即信号在低频段内振动复杂, 并且不同的机组部件振动信号的复杂性程度存在一定的差异。

4、机组各部件的振动主要是由于信号低频频段内的振动所引起, 也就是在 $0-4.68\text{Hz}$ 频段内的振动所产生, 高频振动信号对机组产生的振动较小。

由以上综合分析, 青铜峡七号机组振动的振源非常复杂, 机组振动信号的复杂部分主要集中在低频频段, 这些低频频段的振动信号也是产生机组振动的主要原因。

4.4 尾水管压力脉动信号的奇异谱熵分析

众所周知尾水管压力脉动对于机组的振动有着极其重要的影响, 在很多的情

况下, 机组出现大的振动都是因为尾水管的压力脉动所引起。下面是某电站尾水管压力脉动的实测信号分析, 所测试的工况为发电机从 0-400MW 出力时, 每隔 20MW 测试一组数据, 其尾水管压力脉动随负荷变化见图 4-22。

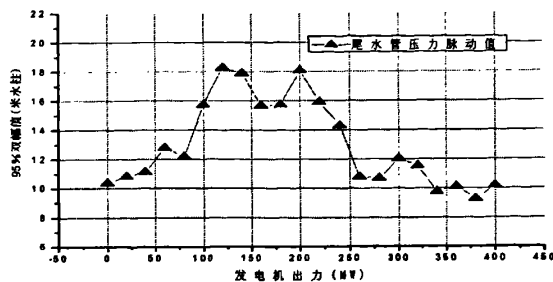


图 4-22 尾水管压力脉动随负荷变化关系曲线

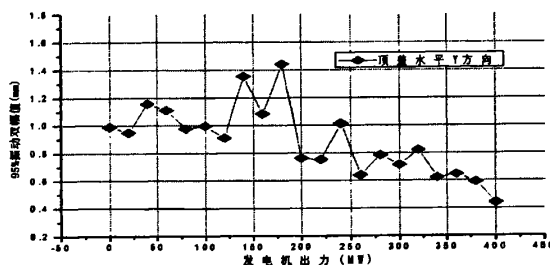


图 4-23 顶盖水平 Y 方向振动幅值随负荷变化曲线

在该电站的运行中, 水轮机的顶盖振动超标, 特别是顶盖处水平 Y 方向的振动超标严重, 其顶盖处水平 Y 方向 95% 振动双幅值随负荷变化关系曲线见图 4-23。由图 4-22 和图 4-23 可以看到, 在尾水管压力脉动值大的负荷处, 顶盖的振动位移较大, 而且波动也很大。后通过对机组振动的测试, 确认尾水管压力脉动所产生的低频尾水管涡带对机组的振动影响很大, 后采用水轮机主轴中心补气工作, 有效的减小了机组顶盖的振动。并且由尾水管压力脉动的 95 % 双幅值, 将此机组运行时尾水管水压脉动分为 3 个主要特征区:

- 1、转轮动静干涉、叶道涡等引起水系统水体整体或局部水体相互作用形成的主振频率在 6.7Hz 至 1.3Hz (见图 4-25) 的强水压力脉动区 (0MW~100MW), 振动频率随发电机出力增加逐渐降低。此负荷区水压脉动对整个引水系统乃至水轮机结构具有极强的破坏能力。

- 2、典型的尾水管涡带脉动区, 在 100 MW~320MW 负荷区水压脉动主频率为 1.10Hz (见图 4-26), 为水轮机转速频率的 0.26 倍; 水轮机尾水管低频涡带压

力脉动，具有巨大振动能量，是引起机组顶盖振动、摆度、尾水管结构破坏的主要振源，同时会引起机组负荷波动。

3、稳定运行区，320MW 以上出力，没有明显的主频（见图 4-27）。

对尾水管脉动压力信号进行七层静态小波分解，频段分别为 a7(0-1.46Hz)，d7(1.46-2.93Hz)，d6(2.93-5.85Hz)，d5(5.85-11.7Hz)，d4(11.7-23.4Hz)，d3(23.4-46.8Hz)，d2(46.8-93.75Hz)，d1(93.75-187.5Hz)，计算各频段奇异谱熵，各频段的奇异谱熵结果如表 4-5：

表 4-5 尾水管压脉动压力信号各频段奇异谱熵值表

频段 出力	a7	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1
0MW	6.653	0.334	0.293	0.245	0.205	0.181	0.166	0.155
20 MW	5.013	0.331	0.280	0.248	0.210	0.185	0.166	0.155
40 MW	7.072	0.363	0.288	0.243	0.204	0.182	0.166	0.155
60 MW	4.795	0.343	0.324	0.241	0.194	0.175	0.165	0.158
80 MW	6.087	0.382	0.325	0.243	0.200	0.175	0.162	0.159
100 MW	5.142	0.358	0.329	0.240	0.199	0.179	0.164	0.157
120 MW	2.938	0.377	0.290	0.239	0.203	0.183	0.165	0.155
140 MW	3.265	0.372	0.285	0.229	0.200	0.178	0.163	0.157
160 MW	1.617	0.390	0.287	0.230	0.196	0.175	0.162	0.159
180 MW	1.158	0.395	0.279	0.233	0.200	0.173	0.162	0.161
200 MW	0.917	0.384	0.284	0.231	0.199	0.174	0.162	0.161
220 MW	1.091	0.378	0.287	0.233	0.197	0.172	0.162	0.163
240 MW	1.686	0.386	0.286	0.230	0.198	0.172	0.161	0.165
260 MW	3.483	0.362	0.284	0.233	0.201	0.172	0.161	0.164
280 MW	2.529	0.374	0.288	0.237	0.197	0.174	0.161	0.162
300 MW	2.215	0.383	0.282	0.231	0.200	0.174	0.161	0.163
320 MW	2.638	0.374	0.331	0.232	0.198	0.175	0.162	0.164
340 MW	9.505	0.407	0.278	0.233	0.197	0.174	0.162	0.165
360 MW	15.37	0.338	0.272	0.232	0.199	0.173	0.161	0.166
380 MW	33.90	0.393	0.280	0.226	0.197	0.173	0.162	0.165
400 MW	25.80	0.354	0.274	0.229	0.197	0.173	0.161	0.166

从上表中可以看到，在尾水管压力脉动第一个特征区，即发电机出力 0-100MW 工况下，尾水管脉动压力信号 a_7 (0-1.46Hz) 低频段奇异谱熵值范围在 4.5-7 之间，第二个特征区，即发电机出力 120-320 MW 工况下，尾水管脉动压力信号 a_7 (0-1.46Hz) 低频段奇异谱熵值范围在 1-3.5 之间，第三个特征区即发电机出力 340-400MW 工况下，尾水管脉动压力信号 a_7 (0-1.46Hz) 低频段奇异谱熵值范围在 9-34 之间，而其它频段各特征区的奇异谱熵相差并不大，尾水管脉动压力信号 a_7 (0-1.46Hz) 低频段奇异谱熵值随发电机出力关系曲线见图 4-24。

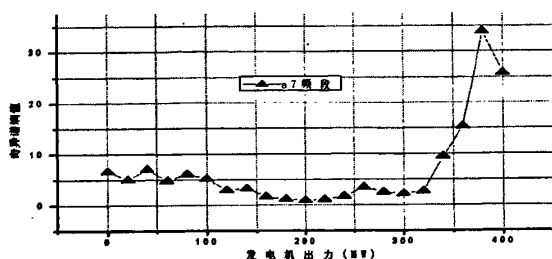


图 4-24 a_7 频段奇异谱熵值随发电机出力关系曲线

R. 齐亚拉曾在无空化条件下，将混流式水轮机尾水管涡带试验结果分为六种情况^[15]：

- 1、空转和负荷很小，死水区几乎充满整个尾水管，脉动压力很小，无涡带出现。
- 2、在 30%-40%负荷区，涡带稍有偏心，成螺旋形，螺旋角较大，为大压力脉动区。
- 3、在 40%-55%负荷区，螺旋形涡带严重偏心，压力脉动更大。
- 4、在 70%-75%负荷区，为无螺旋的同心涡带，压力脉动很小，对机组运行无扰动。
- 5、在 75%-85%负荷区，无涡带，无压力脉动。
- 6、负荷到超负荷区，涡带在紧挨工作轮后收缩，有很小的压力脉动，可能产生扰动，特别在超负荷区。

在第一个特征区 (0-100 MW)，转轮动静干涉、叶道涡等引起水系统水体整体或局部水体相互作用的强水压脉动区，主频在 1.3-6.7Hz 之间，也就是齐亚拉所划分的第一种情况，但并没有出现压力脉动很小的情况，相反脉动压力仍较大。

从功率谱图上,没有出现 1.10Hz 为主次频的尾水管涡带频率(见图 4-25),因而尾水管涡带没有出现,或者出现但没有以优势出现,而是尾水管涡带的摆动被淹没在转轮动静干涉、叶道涡等引起水系统水体整体或局部水体相互作用的振动之中。从奇异谱熵值上则反应为在此特征区, a_7 (0-1.46Hz) 低频段的熵值较大,也就是说在此特征区,各种低频振动信号比较复杂,没有一个能够占据主导地位的振动信号。

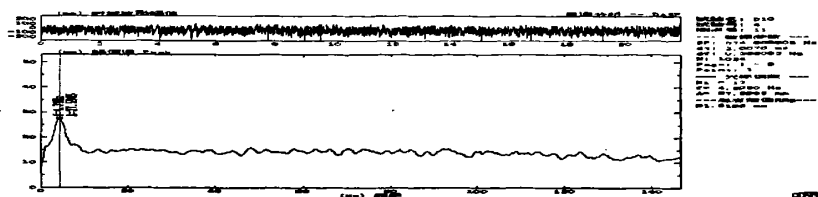


图 4-25 发电机出力 60MW 时尾水管压力脉动过程线与功率谱图

在第二个特征区 (120-320MW), 典型的尾水管涡带脉动区, 也就是齐亚拉所划分的第二、三、四种情况。在此区, 压力脉动明显变大, 出现较大的波动, 与齐亚拉划分的情况较为吻合。从功率谱图上看到明显的以 1.10Hz 为主频的尾水管涡带频率(见图 4-26)。在此特征区, 尾水管涡带频率以主频出现, 从奇异谱熵值上反应出, 在 a_7 (0-1.46Hz) 低频段熵值较第一个特征区明显减小, 也就是说在此低频段振动信号呈现一定的规律性, 随机性大为减小, 因而在熵值的表现上也较小。

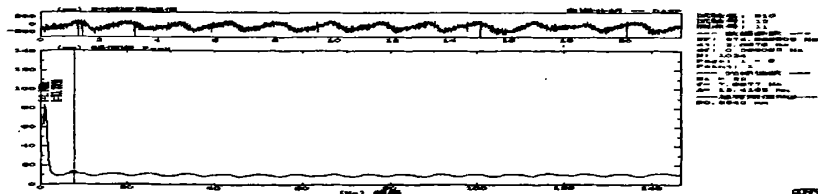


图 4-26 发电机出力 220MW 时尾水管压力脉动过程线与功率谱图

在第三个特征区 (340-400 MW), 为稳定区, 即为齐亚拉所划分的第五种情况。在此区, 尾水管压力脉动仍较大, 但相比第一、第二特征区尾水管脉动压力大为减小。从功率谱图上反应出, 整个频段都没有出现一个完全占据优势的主频出现, 即没有一个非常确定的信号出现, 也就是广谱频率(见图 4-27)。从奇异谱熵值的表现来说, 在此区的 a_7 (0-1.46Hz) 低频段, 信号熵值较第一、第二特征区高出许多, 信号的随机性和无规律性大大增强。

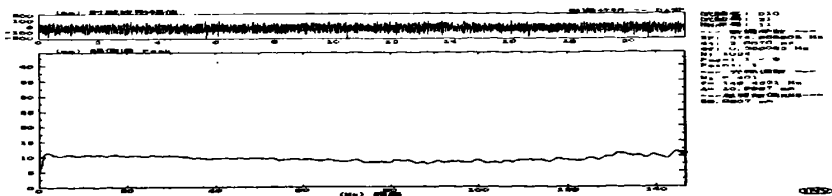


图 4-27 发电机出力 400MW 时尾水管压力脉动过程线与功率谱图

在此机组振动中已经明确，顶盖水平 Y 方向的振动是由于尾水管涡带的摆动所引起，因此可以通过分析顶盖水平 Y 方向振动信号分解后低频段的熵值，来确定顶盖水平 Y 向低频振动与尾水管压力脉动是否存在一定的关系。各频段熵值见表 4-6。

从表中可以看到，顶盖水平 Y 方向振动信号分解后的各频段的奇异谱熵随发电机出力变化并不大，特别是在低频 a7(0-1.46Hz)频段，奇异谱熵值随发电机出力没有呈现像尾水管脉动压力信号低频段随发电机出力那样明显的变化，这是二者之间明显的差别所在，并且熵值也要小的多。通过各工况下的功率谱图可以看到，各工况下的功率谱图上所表现出来的主频都是 1.10Hz 这个频率（见图 4-28），没有出现像尾水管脉动压力信号那样随发电机出力的不同，振动信号的主频也呈现一定的改变这种情况。从奇异谱熵的本质上来说，奇异谱熵是刻画信号复杂程度和确定性的一个度量，从各工况下低频振动信号奇异谱熵值相差不大这一点，从总体上说明了在各工况下信号低频振动比较稳定，随发电机出力变化不是很大。

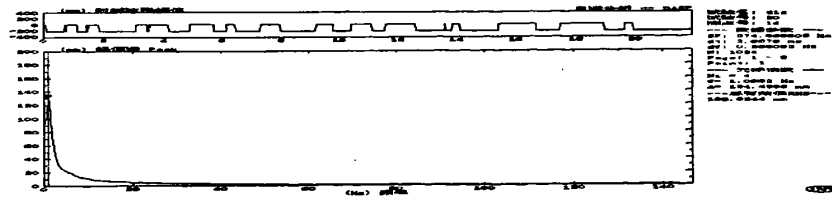


图 4-28 发电机出力 380MW 时顶盖水平 Y 向振动过程线与功率谱图

从表中还可以看到，顶盖水平 Y 向振动信号 a7(0-1.46Hz)低频段奇异谱熵值在发电机出力 0-80MW 时介于 0.515-0.555 之间，发电机出力 100-340MW 时介于 0.480-0.514 之间，发电机出力 340MW 以后，熵值介于 0.55-0.58 之间。虽然顶盖水平 Y 向振动低频信号熵值没有像尾水管脉动压力低频信号那样明显的将机组运行划分为三个区，但也呈现出一定的规律性，可见顶盖水平 Y 向振动低频信号与尾水管脉动压力低频信号存在一定的相似性，也就是顶盖水平 Y 向振动受

尾水管涡带的影响。

表 4-6 顶盖水平 Y 方向振动信号各频段奇异谱熵值表

频 段 出力	a7	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1
0 MW	0.515	0.418	0.317	0.249	0.207	0.182	0.164	0.156
20 MW	0.553	0.385	0.308	0.250	0.208	0.186	0.164	0.156
40 MW	0.531	0.391	0.323	0.256	0.210	0.185	0.165	0.156
60 MW	0.541	0.401	0.307	0.249	0.210	0.191	0.165	0.156
80 MW	0.538	0.409	0.302	0.254	0.213	0.193	0.165	0.156
100 MW	0.499	0.430	0.321	0.251	0.211	0.191	0.164	0.155
120 MW	0.491	0.397	0.306	0.245	0.206	0.194	0.165	0.156
140 MW	0.501	0.413	0.316	0.246	0.204	0.188	0.165	0.155
160 MW	0.505	0.379	0.316	0.251	0.206	0.185	0.166	0.156
180 MW	0.500	0.406	0.306	0.250	0.199	0.183	0.166	0.155
200 MW	0.488	0.448	0.312	0.256	0.203	0.182	0.167	0.156
220 MW	0.497	0.415	0.318	0.252	0.206	0.181	0.166	0.156
240 MW	0.512	0.430	0.314	0.260	0.209	0.179	0.165	0.157
260 MW	0.514	0.404	0.335	0.260	0.203	0.181	0.165	0.158
280 MW	0.507	0.390	0.330	0.267	0.206	0.184	0.166	0.158
300 MW	0.509	0.413	0.308	0.263	0.209	0.185	0.165	0.158
320 MW	0.518	0.408	0.315	0.266	0.209	0.189	0.166	0.158
340 MW	0.499	0.384	0.312	0.268	0.226	0.192	0.167	0.158
360 MW	0.579	0.433	0.312	0.264	0.207	0.181	0.166	0.157
380 MW	0.547	0.415	0.324	0.265	0.215	0.192	0.167	0.158
400 MW	0.558	0.380	0.317	0.258	0.213	0.192	0.166	0.158

综上所述，可以得到以下的结论：

1、从尾水管压力脉动信号随工况变化而划分的三个机组运行特征区上可以得出，不同特征区的振动信号的功率谱图，所体现的主频存在很大的差异，不同的特征区有不同的的主频。

2、尾水管压力脉动、尾水管涡带对机组部件，特别是对顶盖的振动存在非

常大的影响。

3、不同的机组运行特征区，尾水管压力脉动低频 a_7 (0-1.46Hz) 信号的奇异谱熵能够很好的对这三个特征区加以刻画，在第一特征区尾水管压力脉动低频信号熵值介于 4.5-7 之间，第二特征区尾水管压力脉动低频信号熵值介于 1-3.5 之间，第三特征区尾水管压力脉动信号熵值介于 9-34 之间，奇异谱熵对其有着非常明确的划分。

4.5 尾水管压力脉动对青铜峡机组振动影响分析

在青铜峡机组振动测试中，没有对尾水管压力脉动信号进行采集，因此也无法对尾水管压力脉动信号进行分析，这对于青铜峡水利枢纽机组振动信号的分析是不完整的。

在青铜峡水利枢纽机组振动分析中，尾水管压力脉动对机组部件的振动有无影响，在第二章的分析中没有明确，下面就尾水管压力脉动是否对机组部件振动产生比较大的影响进行一些分析。

无论是尾水管压力脉动信号还是机组部件和摆度的振动信号，其信号的低频部分都与水力因素引起的振动有着直接的联系。因而在信号的低频部分，尾水管压力脉动信号与机组部件和摆度的振动信号有着一定的共性，这一点在上节中已经得到了一定的证明。

由第二章机组部件 95% 振动双幅值随变发电机出力来看，机组部件水平向和垂向振动都是在 0-8MW 随发电机出力的增大而增大，在发电机出力 8MW 时达到最大，然后突然减小，此后水平向振动随发电机出力增大而增大，垂向振动随发电机出力变化不是很大，比较平缓。而且由图可以看到，顶盖在发电机出力 0-8MW 的振动要比上机架和下机架要大（见图 2-5—图 2-10）。如果这种振动确实是由于尾水管压力脉动或尾水管低频涡带所引起，就可以解释这一现象。因为就顶盖所处的位置来看，顶盖是属于水轮机转轮的支撑机构，而上机架和下机架都是发电机部件，相对于对水力因素引起的振动的敏感性而言，可以说顶盖比上机架和下机架要敏感的多。但是仅从机组部件的位置显然不足以说明这一现象。

从发电机变出力（增大）来看，0-8MW 出力工况下，顶盖水平向振动的功率谱图上可以看到，其主频为 0.88Hz（见图 4-29），为 0.5 倍的转频。从奇异谱

熵值上来看, 4-8MW 工况下的上机架、下机架、顶盖、摆度熵值要较其它工况下为小(见表 4-7), 并且基本上都是在发电机出力 8MW 时达到最小, 由第四节对尾水管压力脉动信号的分析结果来看, 此段工况可以归为第二特征区, 即为尾水管脉动区。在此区, 压力脉动所产生的低频振动较为明显, 存在着较为明显的尾水管低频涡带。

表 4-7 青铜峡机组部件 a7(0-1.17Hz)低频振动信号奇异谱熵值表

部 位 出力	上机架	顶盖	下机架	摆度
0 MW	0.821	0.456	0.613	0.837
4 MW	0.724	0.467	0.567	0.769
8 MW	0.747	0.476	0.509	0.585
12 MW	0.746	0.628	0.547	2.226
16 MW	0.928	0.551	0.535	2.279
20 MW	0.922	0.533	0.691	2.997
24 MW	0.874	0.548	0.482	2.739
28 MW	0.878	0.519	0.595	2.149
32 MW	0.831	0.482	0.516	1.667
36 MW	0.881	0.543	0.591	3.246

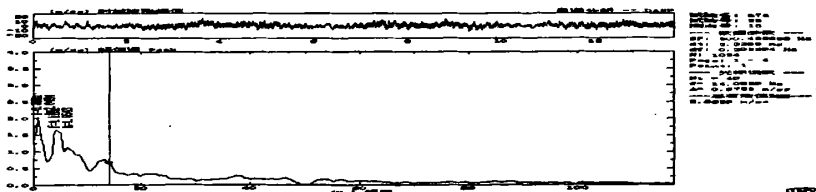


图 4-29 发电机出力 8MW 时顶盖水平振动波形与功率谱图

发电机出力 8MW 以后, 也就是 12-36MW 工况下, 顶盖水平向振动的功率谱图上可以看到其主频为 1.46Hz(见图 4-30), 没有出现 0.88Hz 这个频率。从奇异谱熵值上来看, 发电机出力 8MW 以后各工况下的上机架、顶盖、下机架、摆度熵值较发电机出力 8MW 之前的要大, 此段可以归为第三特征区, 即为平稳区。在此区, 低频段没有主频, 即没有一个占优的振动信号, 信号整体上显得较为随机, 由此对机组部件振动产生有限的影响。

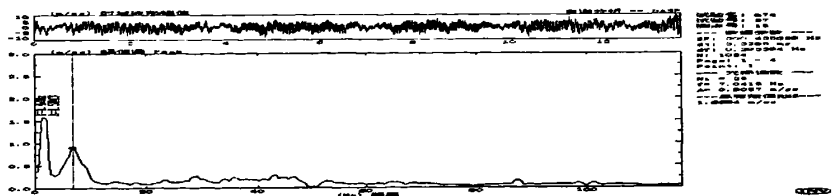


图 4-30 发电机出力 32MW 时顶盖水平振动波形与功率谱图

下面将机组部件水平向随发电机出力增大的振动信号进行七层小波分解，然后重构各部件各工况下的低频 a7 (0-1.17Hz) 的振动信号，原始信号和分解后重构的低频信号见图 4-31，再计算其 95%振动双幅值。

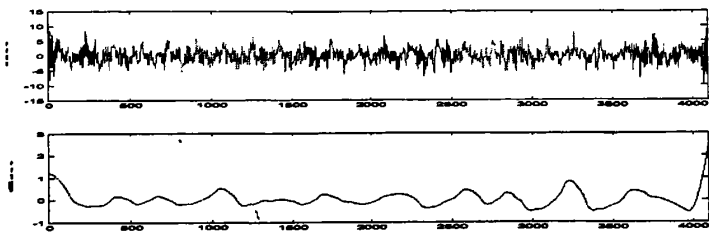


图 4-31 上架发电机出力 8MW 时原始信号和 a7 重构信号图

95%振动双幅值结果如表 4-8:

表 4-8: a7 频段振动结果分析 (采用 95%双幅值, 单位: μm)

部 位 出 力		上机架	顶 盖	下机架
		水平	水平	水平
3	0 MW	1.549	2.785	3.253
4	4 MW	1.546	5.336	3.982
5	8 MW	1.423	2.663	2.815
6	12 MW	1.168	1.150	1.164
7	16 MW	0.853	0.772	0.729
8	20 MW	0.912	1.122	0.923
9	24 MW	1.044	1.000	1.017
10	28 MW	1.088	1.075	0.908
11	32 MW	0.972	0.937	1.278
12	36 MW	0.474	1.341	1.219

从表中可以看到，上架架、顶盖、下机架水平向 a7(0-1.17Hz)低频振动信号的振动双幅值在发机机出力 0-8MW 时较大，8MW 以上各工况下振动幅值变化不大，幅值也较小，特别是顶盖水平向的低频振动信号 95%双幅值体现的尤为明显，

见图 4-32。

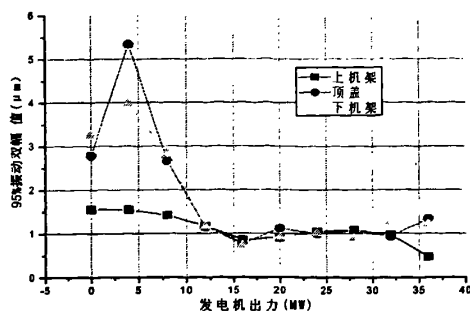


图 4-32 机组部件 a7 频段振动随发电机出力变化曲线

通过以上信号奇异谱熵、功率谱、低频信号重构后 95%双幅值的综合分析,可以得出,在青铜峡机组振动试验中,尾水管低频涡带对机组部件振动存在一定的影响,特别是在发电机出力 0—8MW 时存在较大的影响,此段工况区是机组运行的非稳定区。同时也可以得出,在青铜峡机组运行时,尾水管涡带并没有以优势频率出现在发电机额定出力 30%—70%的工况区,而是出现在发电机额定出力 10%—30%的工况区。

4.6 本章小结

本章主要通过对青铜峡水利枢纽七号机组振动信号的能量分析、小波能谱熵分析以及多分辨率奇异谱熵分析,详细阐述了机组振动信号各频段的能量分布情况,各频段的信号复杂和奇异性程度。

通过对某水电站尾水管脉动压力信号的奇异谱熵分析,得出奇异谱熵可以有效的用来对电站机组运行的三个特征区有着非常明确的划分。针对在青铜峡机组振动测试中没有对尾水管压力脉动信号进行测试,尝试对机组部件和机轴摆度的振动信号进行小波分解,由分解出的低频信号进行奇异谱熵分析,得到了与尾水管压力脉动信号相类似的结果,并且根据此结果与低频信号的重构计算得到的 95%振动双幅值,确定在青铜峡机组振动中,尾水管低频涡带对机组部件存在较大影响,尤其是发电机出力较小的工况下。

第五章 结论与展望

5.1 结论

水电站机组振动一直是困扰水电站安全运行的一个重要因素,水轮发电机组振动是最为复杂的动力学问题之一,横跨流体、机械、电磁三大学科,涉及面较广,同时由于流固耦合,使得机组振源相当复杂。本文结合黄河青铜峡水利枢纽机组振动测试,对青铜峡机组振动进行了分析,主要得出以下结论:

1、通过对机组的振动测试结果分析、机轴摆度测试结果分析,青铜峡机组存在明显的转动质量不平衡,这是引起青铜峡机组部件振动的主要原因之一,励磁电流对机组部件振动不明显。励磁电流对机轴摆度的影响不是很明显,发电机出力对机轴的摆度有着较大的影响,特别在机组的低负荷区。

2、通过对机组振动信号进行七层小波分解后的能量分析,信号的主要能量集中在 0-4.46Hz 频段,即 0-1.17Hz 的低频频段、1.17-2.34Hz 的转频频段、2.34-4.68Hz 的 2 倍的转频频段。

3、将信息熵技术当中的小波能谱熵运用于机组振动信号的分析当中,通过对机组部件随发电机变出力工况下的振动信号的小波能谱熵分析,小波能谱熵能从整体上刻画了信号的复杂程度的大小,并且振动幅值的大小与小波能谱熵的大小存在一定的对应关系。

4、通过对机组振动信号的多分辨率下的奇异谱熵分析,振动信号的复杂和奇异性主要集中在 0-4.68Hz 的频段,即信号在低频频段内振动相当复杂,各种信号成份相互混杂,并且不同的机组部件振动信号的复杂性程度存在一定的差异,各频段的振动信号对机组不同部件振动的影响也存在一定的差异。

5、对某水电站尾水管脉动压力信号的多分辨率奇异谱熵分析,不同的机组运行特征区,尾水管压力脉动低频信号奇异谱熵能够很好的对这三个特征区加以刻画,在第一特征区尾水管脉动低频信号熵值介于 4.5-7 之间,第二特征区尾水管压力脉动低频信号熵值介于 1-3.5 之间,第三特征区尾水管压力脉动低频信号熵值介于 9-34 之间,奇异谱熵对其有着非常明确的划分。同时进行该电站顶盖

水平 Y 向振动低频信号奇异谱熵分析, 其分析结果与尾水管压力脉动低频信号奇异谱熵分析结果相类似, 可以对机组运行特征区进行划分。

6、由于青铜峡机组脉动压力信号的缺乏, 采用小波对机组部件振动信号进行分解并重构得到低频振动信号, 并用多分辨率奇异谱熵计算分解后的低频段的熵值, 得到了与尾水管脉动压力低频信号相似的分析结果, 在青铜峡机组振动中, 机组运行也可分为典型的尾水管涡带特征区和平稳运行区, 多分辨率奇异谱熵同样可以用来对运行特征区进行划分。

7、通过对青铜峡机组部件振动信号的分解和重构的低频振动信号 a_7 (0-1.17Hz) 95%振动双幅值的计算结果与奇异谱熵值分析结果, 尾水管涡带对机组振动存在较大影响, 特别是对顶盖和下机架的振动存在大的影响, 尤其在发电机出力 0-8MW 时。在青铜峡机组振动中, 尾水管涡带所产生的振动不能忽略, 与机组转动质量不平衡一起是机组部件振幅和摆度过大的主要原因。

5.2 展望

机组振动是水电站运行后存在的主要问题, 特别是近年来, 高水头、大容量的机组相继投入使用, 由此产生的机组振动问题也越来越突出, 长期困扰着电站和厂房的安全。传统的分析方法能够有效的对机组振动进行分析, 但是传统分析方法也存在一定的局限性。本文在传统分析的基础上, 采用小波和信息熵对振动信号进行了一些初步的分析, 还有许多的问题需要深入研究和加以解决, 主要体现在以下方面:

1、小波能谱熵能够对机组振动的状态趋势加以刻画, 但熵值是从概率的角度出发来描绘信号的整体复杂性和规律性程度, 因而小波能谱熵能够刻画机组振动状态的内在机理需要深入研究。

2、多分辨率奇异谱熵能够对机组部件振动信号小波分解后的各频段信号的复杂性加以描绘, 但是各频段信号的复杂程度与机组部件振动大小存在的定量关系需要进一步深入研究和加以分析; 并且通过尾水管脉动压力信号的奇异谱熵分析得到了用熵值对机组运行特征区的划分, 然后将此结果运用于青铜峡机组运行中, 但是这种划分还只是停留在经验的基础上, 也就是不同工况下熵值之间的差异, 没有固定的标准, 同时影响熵值大小的因素等都需要进行深入的研究。

参考文献

- [1] 汪恕诚, 水电发展的出路何在, 水力发电, 1996(9): 2-4
- [2] 周大兵, 抓住机遇开拓进取为促进水电事业更大发展而努力—在国家电力公司水电发展研讨会上的讲话, 贵州水力发电, 1999, (增刊): 2-10
- [3] 谭月灿, 韦彩新, 唐穗平等, 改善拓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
- [4] 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
- [5] 朱耀泉, 三峡水轮机高水头运行水力稳定性研究, 水利水电技术, 1996(12): 6-10
- [6] 黄源芳, 三峡工程水轮机几个重大问题的决策水力发电, 1998(4): 36-39
- [7] 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): 56-60
- [8] 覃大清, 赵阳, 关于混流式水轮机稳定性的几点新认识, 1998(3): 24-28
- [9] 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
- [10] 王珂纶, 水力机组振动, 北京: 水利电力出版社, 1986: 36-110
- [11] 程良俊, 水轮机, 北京: 机械工业出版社, 1984
- [12] 张克危, 流体机械原理, 北京: 机械工业出版社, 2000: 2-10
- [13] 王泉龙, 浅谈水轮机振动的研究, 大电机技术 2000(7): 12-16
- [14] 于纪幸, 降低水轮机尾水管压力脉动措施的模型试验研究, 2001(4)
- [15] (德)R. 齐亚拉斯混流式水轮机在部分负荷和超负荷时的运行情况, 水轮机水力振动译文集, 北京: 水利电力出版社, 197(3): 59-78
- [16] 肖若富, 中比转速混流式水轮机内流场数值模拟及性能改善研究, 博士学位论文, 华中科技大学, 2004
- [17] 周凌九, 水轮机转轮流场计算及性能预测, 博士学位论文, 北京: 中国农业大学, 1999
- [18] 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

- [19]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
- [20]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
- [21]王海, 孙建平. 尺度熵及其在水电机组监测诊断系统中的应用, 水电能源科学, 2006(4), 24(2): 17-18
- [22]罗建书, 沙基昌. 分形信号的小波分析, 工程图学学报, 1999 (2): 27-34
- [23]谢平. 故障中信息熵特征提取及融合方法研究, 申请博士学位论文, 燕山大学, 2006
- [24]陈小勤, 何正友. 基于小波熵和小波熵权的电能质量扰动识别, 电力科学与工程, 2006(1): 1-5
- [25]肖余粮, 和卫星. 小波变换和小波熵在睡眠电信号变化特性研究中的应用价值, 中国临床康复, 2006(7), 10(25): 118-120
- [26]何正友, 蔡玉梅. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究, 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 38-42
- [27]姜建东, 屈梁生. 大机组振动信号复杂性的定量描述, 西安交通大学学报, 1998(6), 32(6): 31-34
- [28]蒋林, 高德远等. 转子运行稳定性—大型回转机械瞬时运行状态评价, 西北工业大学学报, 2000(8), 18(3): 457-460
- [29]卢晓莉, 罗键. 信息融合熵在机械故障诊断中的应用, 厦门大学学报, 2006(1), 45(1): 39-43
- [30]胡红英, 马孝江. 局域波近似熵及其机械故障诊断中的应用, 振动与冲击, 25(4): 38-40
- [31]杨文献, 姜节胜. 机械信号奇异熵研究, 机械工程学报, 2000, 36 (12): 122-126
- [32]李龙根, 刘桂雄. 熵概念的发展及其在工程测试中的应用, 机床与液压, 2003(3): 259-261
- [33]印欣运, 何永勇. 小波熵及其在状态趋势分析中的应用, 振动工程学报, 2004(6), 17(2): 165-169
- [34]申弢, 黄树红, 杨叔子. 旋转机械振动信号的信息熵特征, 机械工程学报,

- 2001, 37(6): 94-98;
- [35] 符向前, 刘光临, 蒋劲等, 基于信息熵的机组运行劣化度综合指标, 电力系统自动化, 2005, 29(7): 75-78
- [36] 胥永刚, 何正嘉, 基于二维近似度量轴心轨迹复杂性的研究, 西安交通大学学报, 2003(11), 37(11): 1171-1174
- [37] 胥永刚, 机电设备监测诊断时域新方法的应用研究, 申请博士论文, 西安交通大学, 2003(09)
- [37] 朱雪龙, 应用信息论基础, 北京: 清华大学出版社, 2001: 3-5
- [38] 卢文样, 杜润生. 工程测试与信息处理. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002: 40-44
- [39] C. E. Shannon. A Mathematical Theory of Communication. Bell Sys Tech 1948, 27: 379-433
- [40] 邢修三, 熵产生率公式及其应用, 物理学报, 2003, 52(12): 2969-2977
- [41] 邢修三, 物理熵、信息熵及其演化方程, 中国科学 (A 辑), 2001, 31(7): 78-86
- [42] 田玉楚, 非线性动态系统的宏观信息熵分析, 通信学报, 1997, 18(1): 47-53
- [43] A. N. Kolmogorov. Three Approaches to the Quantitative Definition of Information. Problem of Information Transmission, 1965, 1(1): 1-7
- [44] G. J. Chaitin. Information-Theoretic Computational Complexity. IEEE Trans Inform, Theory, 1974, IT20: 10-15
- [45] S. M. Pincus. Approximate Entropy as a Measure of System Complexity. Proc. Natl. Acad. Sci. 1991, 88: 2297-2301
- [46] S. M. Pincus. A Regularity Statistic for Medical Data Analysis. Journal of Clinical Monitoring, 1991, 7(4): 335-345
- [47] Y. L. Meng, Liu B Z. A Comprehensive Nonlinear Analysis of Electromyogram. Proceeding of IEEE 23th Annual Conf Biological and Medical Engin, 2001, Istanbul: 1078-1088
- [48] D. Erdogmus, J. C. Principe. Information Transfer through Classifiers and Its Relation to Probability of Error. Proceedings. IJCNN' 01, 2001, Florida: 50-54
- [49] Trebichi, K. Sobczyk. Maximum Entropy Principle and Non-stationary

- Distributions of Systems. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 11(3):169-178
- [50] S. Aviyente, W. J. Williams. Minimum Entropy Time-Frequency Distributions Signal Processing
- [51] Hagenauer, Z. Dawy. Genomic Analysis using Methods from Information Theory. Information Theory Workshop, IEEE, 2004, 24:55-59
- [52] 杨文献, 姜节胜机械信号奇异熵研究, 机械工程学报, 2000, 36(12):122-126
- [53] 林雯婷, 张克危, 小波变换及其在水轮机水压脉动信号处理中的应用, 大机电技术, 2002 (6): 47-54
- [54] 申弢, 大型旋转机械智能监测诊断中信息融合理论与技术的研究, 申请博士学位论文, 华中理工大学, 1999(04)
- [55] 张东胜, 李家峡水力发电厂 1 号水轮发电机组运行分析, 青海电力, 1998(3): 17-24
- [56] 黄河李家峡水电站双排机组真机试验研究, 天津: 天津大学建筑工程学院, 2004
- [57] 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
- [58] 马震岳, 董毓新, 水轮发电机组动力学, 大连: 大连理工大学出版社, 2003
- [59] 吕延光, 混流式水轮机稳定性研究, 申请硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2001
- [60] 周廷奎, 混流式水轮机压力脉动及水力振动研究, 申请硕士学位论文, 四川工业学院, 2002
- [61] 吴刚, 戴勇峰, 张克危, 混流式水轮机尾水管进口流场与水压力脉动的关系, 水能源科学, 2000, 18 (3): 58-61
- [62] 云南香格里拉冲江河、螺丝湾水电站机组测试报告, 天津: 天津大学水利水电工程系, 2005
- [63] 程正兴, 小波分析算法与应用, 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- [64] 彭新民, 郭航忠, 水流脉动压力的小波分析研究, 水利学报, 2003(8): 26-31
- [65] 丁世飞, 基于信息理论的数学模式识别及应用研究, [山东科技大学博士学位文], 2004: 435-436

- [66]桂中华, 水轮机故障智能诊断及振动数字化预测研究, 申请博士论文, 华南理工大学, 2005(04)
- [67]肖孝锋, 郑莉媛, 二滩水电站机组运行稳定性研究, 水力发电, 2006, 32(3): 76-78
- [68]陈造奎, 水电站测试技术, 北京: 中国水利水电出版社 1998: 74-77
- [69]倪传坤, 周建中, 基于 SVD 的水电机组轴心轨迹自动识别, 水电自动化与大坝监测, 2003(12), 27(6): 22-24

发表论文和参加科研情况说明

- 1、黄河积石峡闸门振动试验，2006
- 2、黄河青铜峡机组及厂房结构振动特性研究，2006
- 3、基于振动模态理论与人工神经网络的结构损伤识别的研究，2006

致 谢

本文是在导师彭新民教授悉心指导下完成的。导师渊博的学术知识、丰富的工程经验、严谨的治学态度和豁达坚强的性格以及宽厚善良的品质深深感染和影响着我，且是我一生学习的榜样。在硕士学习期间，导师不仅在学习上给予我耐心的帮助，而且在思想上、生活中给予极大的关怀，特别是在面对工作与论文的双重压力面前，导师不断的给予我鼓励和支持，不断的引导我。在此学生奉上最真诚的感谢和最崇高的敬意。

同时感谢练继建教授、杨敏教授、徐国宾教授，安刚工程师、黄津明工程师，感谢他们在学习和生活中给予我的教诲和帮助！

在此要特别的感谢王海军和王秀杰两位老师，感谢他们在我的论文完成期间所给予的热情无私的帮助和指导，同时也在向两位年轻的老师献上我诚挚的祝福。

感谢李松辉博士、张建伟博士、杨弘博士、马超博士等；感谢尚宪锋、刘明军、周通、李强、辜晋德、尹伟波等师兄；感谢同学李晶晶、刘喜珠、王奎超、石刚、雷春江、陈育权、徐文卓、王克彬、刘江川、许力伟、邓辉、田会静等，感谢他们在生活和学习中给予的帮助和支持。

特别感谢我已花甲之年的双亲，感谢他们的养育之恩和他们多年来对我的培养和支持，感谢我的兄弟姐妹，他们注视我的眼神将是我永远的动力！

感谢从百忙之中抽出时间评审本文的各位专家！

感谢所有帮助过我的人！

最后，向所有关心我、支持我的老师和朋友们表示感谢！祝他们工作顺利、家庭幸福！