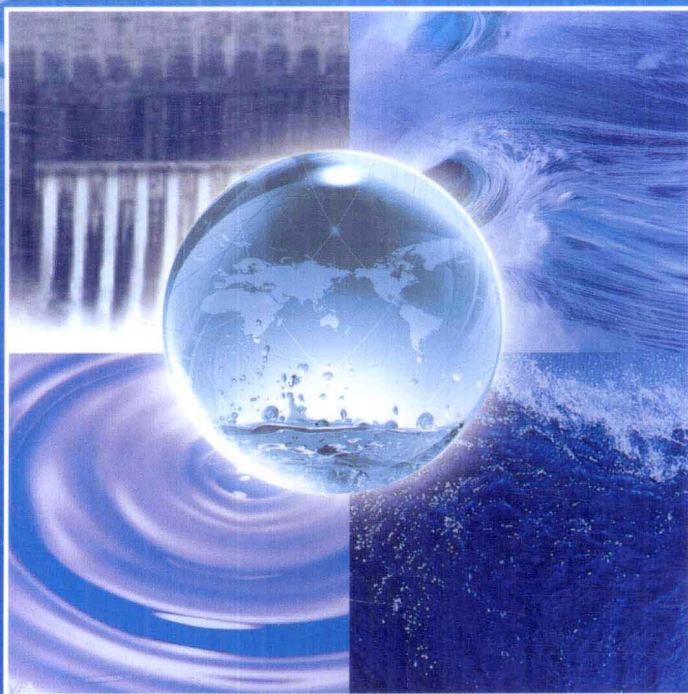


长输水系统电站 振动特性与稳定性分析

周建旭 著

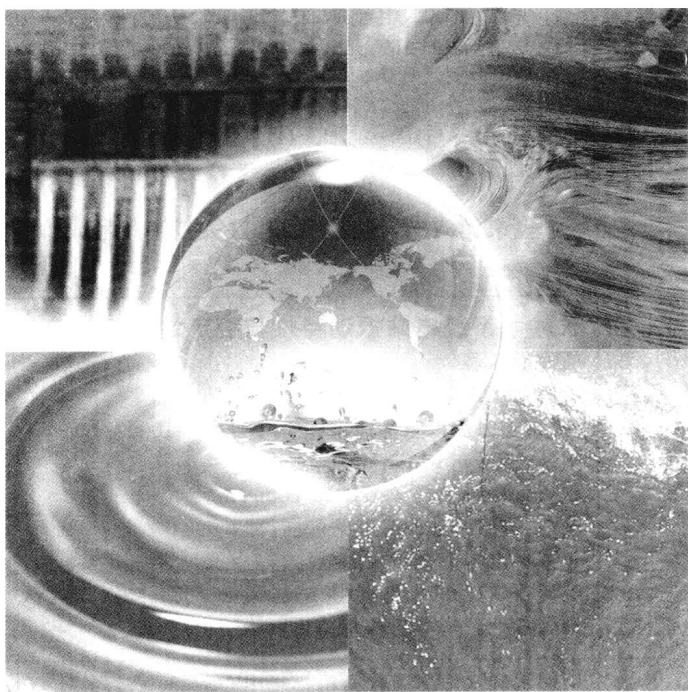


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



长输水系统电站 振动特性与稳定性分析

周建旭 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书结合长输水系统水电站的设计和运行特点,完善了水力振动理论和分析方法,提出压力管道内水体新弹性模型,全面研究和分析了水电站水机电系统的振动特性和稳定性问题,可广泛应用于诸多水电站水机电系统的动态特性分析以及水力振动现象分析。

全书共分为九章,第一章和第二章系统阐述了水电站振动特性和稳定性分析的基本理论和方法,第三章至第五章论述水电站水力—机械系统的水力振动问题,包括水力振动理论和分析方法的完善,第六章至第九章提出基于水力振动理论的压力管道内水体的弹性模型,系统论述水电站水机电系统振动特性和稳定性分析中的关键技术问题和研究分析方法。

本书不仅可供从事水利水电工程和流体机械工程专业的科研设计人员和研究生参考阅读,也可作为水电站运行管理者拟定现场运行与控制方案以及分析处置运行状况和突发事件时提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

长输水系统电站振动特性与稳定性分析 / 周建旭著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2011. 10

水利科技专著译著出版项目

ISBN 978-7-5084-9085-4

I. ①长… II. ①周… III. ①水力发电站—机电系统—研究 IV. ①TV734

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第212072号

书 名	长输水系统电站振动特性与稳定性分析
作 者	周建旭 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2011年10月第1版 2011年10月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国河流众多，水能蕴藏量丰富，但开发利用不足，开发潜力巨大。为实现经济社会的可持续发展，我国电力工业中长期发展规划已确定“大力开发水电，优化发展煤电，积极推进核电，适度发展天然气发电，鼓励新能源发电”的电力建设方针，水电建设将会有大的发展。同时，实行全面、协调、可持续发展战略为大力发展水电开辟了广阔天地，当前我国经济发展的良好态势为水电建设提供了前所未有的有利条件。因此，我国水能资源特点、能源结构与电力状况以及经济社会发展需求决定了我国水电建设良好的发展前景，今后15~20年是我国水电建设的良好机遇期。我国水能资源地区分布不均，与经济发展不匹配，能源紧缺已成为许多水能资源相对不足的东部地区地方经济进一步发展的主要制约因素。作为西部大开发标志性工程之一的“西电东送”建设工程是缓解能源紧缺和逐步改变东西部能源与经济不平衡状况的必由之路，一批大规模的骨干水电站工程相继开工建设或投入运行，将形成北、中、南三路送电格局。

随着“西电东送”工程的逐步实施和作为电网主要调峰电源的抽水蓄能电站的建设发展，我国建成或在建一批大型常规水电站和抽水蓄能电站，在水力发电新技术方面有了长足进步，特别是在水电站水锤基本理论、电站过渡过程与控制等方面取得了创新性的成果。但是，对于具有较长输水系统且远距离输电的水电站和抽水蓄能电站而言，迫切需要重视和解决与电站的运行稳定性、输供电可靠性密切相关的关键技术问题，如水电站的水力振动特性和水力稳定性、抽水蓄能技术和长输水系统的特殊水力学问题等。

水电站有压输水系统的水力振动是长输水系统水电站非恒定流计算分析的重要内容之一，现行设计中通常没有考虑因可能的水力振动引起的附加压力振荡的影响，而在有些情况下，这种影响是不可忽视的，因其可能引起有压输水系统的低频共振，危及电站的安全稳定运行，导致比较严重的后果。从长远来看，为了提高水力系统运行的可靠性和保证水电站的安全稳定运行，设计中对电站输水系统进行水力振动分析是必要的。此外，水力系统、机械系统和电力系统是构成水电站的有机统一体，在一定频率范围内，还应该考

虑各系统之间存在的必然联系，研究各系统动态特性的相互影响，开展水机电系统的整体振动特性和稳定性分析。目前，国内在这些方面进行的系统研究相对较少，也未见系统的研究成果。

《长输水系统电站振动特性与稳定性分析》一书结合长输水系统水电站的设计和运行特点，较全面和系统地研究和阐述了水电站水力系统、机械系统和电力系统的振动特性、稳定性分析和运行控制问题。该书涉及的知识面广泛，涵盖的知识点丰富，以理论分析、实验研究和数值模拟相结合形成了完整的理论研究体系，集中反映了多项创新性的研究成果，学科交叉特征明显，理论分析清晰透彻，既具有重要的学术理论意义，也具有广泛的实际应用价值，可为实际水电站输水系统的布置设计、运行和控制提供理论依据、建模方案和分析方法。对于水利水电工程等相关专业的科学研究人员、工程技术人员和运行管理者而言，是一本有价值的参考书籍。



2011年9月

前言

随着我国大中型常规水电站和抽水蓄能电站的发展,引水式电站的地位和作用日益突出,在水电站水力学问题以及运行控制方面也提出了一些新的研究课题,特别是在长输水系统电站的振动特性和稳定性分析方面,存在亟待解决的关键技术问题,需要开展深入研究。

水电站有压输水系统的水力振动是水电站水力非恒定流计算分析的一个内容,它不同于水锤现象,是一种周期性的压力、流量变化过程。国内外诸多水电站发生了明显的水力振动现象,有的甚至造成了较大的局部破坏,严重影响水电站的安全稳定运行,但是并没有引起足够的重视,很少开展与其密切相关的水电站水力振动问题的分析,主要原因是在大多数水电站中,水力振动可以通过相应的补气等措施合理地调控加以控制和解决。从长远来看,为了提高水力系统运行的可靠度,保证水电站的安全稳定运行,进行相应的水力振动分析是必要的。因此,本书在完善水力振动理论和分析方法的基础上,结合水力振动案例分析,全面论述了水电站水力系统振动特性的评估以及减振措施等。

近年来,作为主要调峰容量的抽水蓄能电站在我国迅速发展,可逆式机组是这类电站中普遍采用的机组形式。因可逆式机组的全特性曲线上存在不稳定的局部S形特性区域,当机组在这些位置运行或长时间停留时,可能发生自激振动,导致运行不稳定,影响电站的调峰能力,国内外有多座抽水蓄能电站存在类似的现象,在运行中必须加以重视,尽可能避开或快速通过相应的不稳定区域。因此,通过全面掌握可逆式机组的自激振动机理,以指导和控制抽水蓄能电站的安全正常运行是非常必要的。

水电站是水力系统、机械系统和电力系统有机的统一体(简称为水机电系统),由于三个系统之间存在密切的联系,相关关键技术问题涉及水力系统的水力共振、水力—机械系统稳定性、电力系统低频振荡和稳定性等各个方面。本书结合长输水系统水电站输水系统的实际布置,考虑水力系统的高阶振荡特性,分析水力系统的振动特性和电力系统动态特性的相互影响,包括较充分地考虑电力系统(包括负荷特性)对水力—机械系统稳定性的影响。

本书的具体内容包括基础理论研究和应用分析、数学建模方法研究和实际应用分析、模型实验研究与分析、工程案例等，其中第一章和第二章介绍水电站振动特性和稳定性分析的基本理论和方法，第三章至第五章论述水电站水力—机械系统的水力振动问题及其分析方法，第六章至第九章提出基于水力振动理论的压力管道内水体的弹性模型，系统论述水电站水机电系统振动特性和稳定性分析中的关键技术问题和研究分析方法。

本书的内容融合了国家自然科学基金项目“西部长输水系统远距离输电水电站的振动特性和稳定性研究”（编号：90610027）的研究成果，也是国家自然科学基金项目“长距离供水系统的水力振动特性和减振研究”（编号：51079051）的重要理论与技术支撑，主要学术成果的完成、积累和凝练得到了索丽生教授的精心指导和审阅，在此，谨向索丽生教授致以衷心的感谢。河海大学水利水电学院蔡付林教授详细审阅了本书的书稿，本书的撰写完成也得到了河海大学水利水电学院胡明教授、张健教授和刘德有教授的大力帮助和支持，尹延凯教授、严亚芳教授、王惜时教授、曲波副教授和朱粤东工程师为实验的顺利完成创造了良好的条件，并且给予悉心的指导和协助，谨致以诚挚的谢意，并感谢研究生王源、毕程敏和陈刚在研究成果整理和分析过程中所做的具体工作。

本书的出版得到了水利科技专著译著出版项目的资助，中国水利水电出版社的编辑也为本书的顺利出版给予了大力的支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

本书涉及的内容广泛，学科交叉特点明显，难免存在疏漏和错误之处，恳请广大读者批评指正。

周建旭

2011年9月

目 录

序

前言

 第一章 绪论	1
第一节 长输水系统电站的关键技术问题	1
第二节 水机电系统振动特性和稳定性分析	2
 第二章 基本理论与方法	7
第一节 振动特性分析的基本理论	7
第二节 基本数学模型	10
第三节 数值分析方法	18
第四节 稳定性分析的基本方法	21
 第三章 有压输水系统水力振动分析	30
第一节 水力振动现象及危害	30
第二节 水力元件的水力阻抗和传递矩阵	37
第三节 水力振动的可能振源	44
第四节 水力振动特性评估	46
第五节 水力振动模型实验研究	65
第六节 水力振动实例分析	72
 第四章 抽水蓄能电站自激振动分析	77
第一节 自激振动的特性及危害	77
第二节 可逆式机组产生自激振动的判别准则	78
第三节 水力—机械系统自激振动的分析方法	81
第四节 水力—机械系统自激振动的描述方程	83
第五节 自激振动描述方程的解析分析	88
第六节 实例分析	94
 第五章 有压输水系统减振措施分析	98
第一节 减振措施概述	98
第二节 集中水力元件的减振原理简析	100
第三节 盲管和蓄能器的减振特性分析	101
第四节 气垫式调压室的减振特性分析	107

第五节	掺气对水力振动特性的影响·····	110
第六节	减振措施的应用·····	111
第六章	压力管道内水体的稳定性分析模型 ·····	113
第一节	基于频域和时域的稳定性分析方法·····	113
第二节	稳定性分析中的零特征值·····	118
第三节	传统的压力管道内水体弹性模型·····	122
第四节	压力管道内水体的新弹性模型·····	124
第五节	新弹性模型的应用分析·····	131
第六节	水体弹性对水力—机械系统振动和稳定性分析的影响·····	137
第七节	上下游双调压室电站的稳定性分析·····	147
第七章	复杂输水系统的稳定性分析 ·····	151
第一节	常见的有压输水系统布置·····	151
第二节	含简单分岔管电站的稳定性分析·····	152
第三节	含环形管电站的稳定性分析·····	161
第八章	考虑电力系统影响的水电站稳定性分析 ·····	171
第一节	与机组运行方式相关的零特征值·····	171
第二节	压力管道内水体高阶振动特性对低频振荡分析的影响·····	172
第三节	机组扩大单元接线的稳定性分析模型·····	177
第四节	双机共管路电站低频振荡的阻尼分配规律·····	181
第五节	水力—机械系统和电力系统之间的耦合共振分析·····	184
第六节	压力管道内水体新弹性模型的扩展应用·····	188
第九章	水机电系统稳定性分析的实验研究 ·····	191
第一节	稳定性实验·····	191
第二节	稳定性实验装置·····	192
第三节	稳定性实验内容和步骤·····	194
第四节	稳定性实验成果和分析·····	196
第五节	电力系统及负荷特性对系统稳定性的影响分析·····	198
参考文献	·····	202

第一章 绪 论

第一节 长输水系统电站的关键技术问题

一、长输水系统的含义

“长输水系统”是水电站开发建设进程以及其他水利事业中经常用到的概念，就水电站水力学而言，从电站的运行水头、水锤传播特性、调压室设置条件和水力振动特性等不同角度分析，“长输水系统”的概念均具有不同的内涵，对应不完全一致的输水系统实际长度，但一直以来没有一个较为明确的界定。在实际应用中，“长输水系统”概念界定的不明确并不影响人们对实际水电站工程输水系统水力特性的准确分析和掌握，并且解决其中的关键技术问题。

鉴于水电站是水力系统、机械系统和电力系统的有机统一体（简称为水机电系统），需要考虑各系统动态特性的相互影响，本书第五章从考虑电力系统低频振荡影响的角度，给出了不同的压力管道长度下所需选择的压力管道内水体弹性模型的阶数，可以据此定义“长输水系统”为实际长度超过 800m 的引水管道或尾水道，此时至少应考虑压力管道内水体的三阶振动特性。虽然水电站的水力振动特性研究和稳定性分析主要以长输水系统水电站为对象展开，但并不局限于长输水系统水电站，而是包括一般意义上的引水式水电站，以及简单的单管单机系统。

二、关键技术问题

随着我国水能资源蓬勃有序地开发和发展，相继建成、在建或拟建多座规模较大的常规水电站，除了举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程以外，还有锦屏二级水电站、溪洛渡水电站、向家坝水电站、龙滩水电站等大型引水式水电站。同时，作为电网重要的保安电源，抽水蓄能电站的建设和相应关键技术也得到了迅速发展，充分发挥了在电网中的调峰填谷作用，主要有广州抽水蓄能电站、天荒坪抽水蓄能电站、宝泉抽水蓄能电站和西龙池抽水蓄能电站等。在我国水电开发的进程中，引水式电站的地位和作用日益突出，同时也提出了一些特殊的关键技术问题，涉及水电站水力学、结构力学、渗流力学及运行控制等各个方面，需要引起足够的重视，并深入研究分析和解决。就水电站水力学问题以及电站的运行控制方面而言，大型引水式常规水电站或抽水蓄能电站的输水系统布置和运行中的关键技术问题主要包括长输水系统的水锤传播特性、适应长输水道水力特性的调压室形式和相关参数设计、具有特殊水力特性和气体热力学特性以及布置要求的气垫式调压室关键技术和应用研究、上下游双调压室的水力共振可能性分析以及取消尾水调压室的可行性、小扰动和水力干扰的调节稳定性等。国内针对上述关键技术问题已开展了广泛而深入的研究，也取得了丰富的研究成果，并应用到工程实际中去，但在长输水系统电站的振动特性

和稳定性分析方面,尚具有以下特点和需特别关注的关键技术问题。

(1) 结合水力—机械系统中各水力元件的水力特性,准确建立相应的水力振动分析模型,以正确全面地评价输水系统的水力振动特性,进而判断系统本身的稳定性,同时分析各水力元件在发生水力振动时的作用机理,探讨防止或减轻水电站输水系统水力振动的工程措施。

(2) 可逆式机组是抽水蓄能电站常用的机组形式,其全特性曲线上可能存在不稳定的局部S形特性,当机组在该区域运行时,因系统本身不稳定,可能发生自激振动。

(3) 若压力管道较长,其相应的基频振动周期较长,而电力系统低频振荡的周期却相对较短,水力系统的高阶振动才有可能和电力系统的低频振荡周期相近;若压力管道较短,水力系统的低阶振动也有可能和电力系统的低频振荡周期相近。若水力系统的某一阶振动周期与电力系统的低频振荡周期相接近,电力系统的振荡特性和水力—机械系统的振动特性会相互影响,可能引起水机电系统的共振,导致水电站运行不稳定,酿成事故。

(4) 因水电站的输水系统较长,是否充分考虑压力管道内水体的弹性对水力—机械系统的稳定性分析存在一定的影响,采用传统的刚性理论或低阶弹性模型来描述压力管道内水体的水力特性存在一定的误差。

(5) 对于具有较长输水系统的水电站而言,通常需要设置上游调压室或尾水调压室,形成相应的水库—上游调压室子系统和尾水—尾水调压室子系统,除了需要分析调压室的水力共振可能性以指导调压室布置和体型设计以外,存在水力联系的引水道内水体和尾水道内水体同样存在水力共振的可能性。

(6) 对于单机容量较大和在电力系统中比重较大的水电站,长输水系统的高阶振动特性对电力系统低频振荡的阻尼分析,以及电力系统的负荷特性对水电站的水力—机械系统的稳定性均可能存在较大的影响。

因此,水电站的水力系统、机械系统和电力系统之间存在密切的联系,相关关键技术问题主要涉及水力系统的水力振动和水力共振、水力—机械系统稳定性、电力系统低频振荡和稳定性等各个方面。应结合长输水系统水电站输水系统的实际布置,在充分分析水力系统振动特性的基础上,合理考虑水力系统的高阶振荡特性,建立适合于水机电系统振动和稳定性分析的数学模型,以分析水力系统的振动特性和电力系统动态特性的相互影响,包括较充分地考虑电力系统(包括负荷特性)对水力—机械系统稳定性的影响。

第二节 水机电系统振动特性和稳定性分析

一、研究的目的和意义

随着我国国民经济和现代化建设的快速发展,以及电网峰谷差的增长,电力系统对各类水机组的性能、运行稳定性以及供电品质等提出了更高的目标,要求充分抑制水机电系统的振动现象,维持水机组的可靠稳定运行,以切实保证电力系统的安全性和稳定性。在国内外的水电站运行实践中,经常遇到涉及水机电系统振动特性和稳定性的问题,包括诸多因水力、机械或电气等方面的原因引起的振动和机组运行不稳定现象,甚至引起危害性的功率摆动。日本某扬程为580m的抽水蓄能电站,因其水力系统基频振动周期较

长,对于电力系统低频振荡,原型观测数据和压力管道内水体采用三阶弹性模型的数值模拟结果基本一致;加拿大 Bersimis 水电站的水力共振源于有压输水系统的较高次谐波,即阀门止水不良引起的自激振动,此时阀门的过流特性类似于可逆式机组的 S 形特性。在国内,刘家峡水电站压力钢管发生水力共振,其振源是尾水管内接近转频频率的高阶压力扰动;宁波溪口抽水蓄能电站机组在开机升负荷过程中出现振动现象,瞬时出现,可以复归,主要与机组的 S 形特性曲线有关;天荒坪抽水蓄能电站的机组振动试验也说明振动的原因可能是水力部分、机械部分或电磁部分,并且互相影响;另外,低频振荡在电力系统中时有发生,如广西的西坪电站、大湾电站、峻山电站等都先后发生过低频振荡,在海南、湖南、河南等地也有类似振荡现象发生,给水电站的运行和供电造成不同程度的影响。

上述事实表明,对于水力系统的振动分析而言,需要充分考虑压力管道内水体的高阶振动特性;水电站的水力系统、机械系统和电力系统虽然有相对独立的振动特性和稳定性问题,但在一定条件下各系统之间的动态特性会相互影响,引起水电站过大的振动和机组的不稳定运行,最终可能影响电力系统的安全稳定运行;同时,若考虑电力系统低频振荡对水力—机械系统动态特性的影响,应充分考虑水力系统的高阶振动特性。

对于水力振动而言,高水头水电站的水力振动比低水头水电站严重。在同一负荷下运行时,水力振动一般随水头的降低而减小,其原因是水力振动的能量来自水流,而单位质量的水流能量主要取决于水头,因此各种原因引起的水力振动,都会随水头的增加而加重;在水力—机械系统中,振源主要有高频扰动(属于机械扰动)、中频扰动和低频扰动。水电站水力系统中最常见的扰动源是尾水管涡带,当扰动的频率与发电机电磁频率一致或接近时,会直接引起功率摆动,即电力系统的低频振荡;当与压力钢管内水体的固有频率一致时,将引起钢管水压的强烈波动,进而产生功率摆动和钢管振动;当压力钢管的固有频率与扰动频率相等时,还可激发钢管的结构共振。因此,水电站的水力系统、机械系统和电力系统虽然有各自的振动特性和稳定性问题,对于水机电系统整体而言,基于水力系统、机械系统和电力系统之间存在的内在联系,各自的动态特性并不是孤立的,必然存在一定的影响关系,最终直接关系到机组或电力系统的安全稳定运行。

综上所述,在开展长输水系统电站的振动特性和稳定性分析时,不仅需要分别针对水力系统、机械系统和电力系统进行相对独立的研究,而且应考虑各系统之间存在的必然联系,研究各系统动态特性的相互影响,即进行水机电系统的整体振动特性和稳定性研究。

截至目前,分别针对水力系统、机械系统和电力系统进行相对独立的研究已经取得了较大进展,理论已趋于完善。但是单就水力系统而言,因各方面的原因,国内对于水力振动的研究较少,对于一些水电站事故过程的分析和研究也不够重视,把水力振动分析引入设计过程更是一片空白。若同时考虑电力系统和水力—机械系统的相互影响,由于涉及范围广泛,研究成果相对较少或不够成熟;另外,长输水系统水电站和采用可逆式机组的抽水蓄能电站中产生的振动和不稳定问题反映较多,但针对性的研究却很少。从长远来看,随着我国水电站及抽水蓄能电站的发展,长输水系统电站的振动特性和稳定性分析必将引起大家的重视。

长输水系统电站水机电系统振动特性和稳定性研究,需要充分了解和掌握水力—机械

系统的振动特性,建立能反映水力系统高阶振动特性的数学模型,完善水机电系统振动特性及稳定性研究的数学模型,为实现复杂系统的水机电联合分析奠定基础。在水电站稳定性研究中可以考虑水体弹性和电力系统(包括负荷特性)的影响,同时分析抽水蓄能电站中可逆式机组的S形特性和自激振动的机理。基于严密的数学推导和严谨的理论分析进行上述研究,为许多大型常规水电站或抽水蓄能电站的振动特性和稳定性分析奠定了扎实的理论基础,是实现水电站安全稳定运行的关键,因此水机电系统振动特性和稳定性研究具有重大的理论意义和实用价值。

二、研究现状与进展

(一) 水机电系统振动特性及稳定性的简化研究

在水电站的水机电系统中,鉴于水力系统的时间常数通常远大于电力系统的时间常数,研究水力系统的动态特性时可认为电力系统已进入稳态阶段,而研究电力系统的暂态过程时可近似认为水力系统处于稳态。分别针对水力系统、机械系统和电力系统进行相对独立的研究至今已经取得了较大进展,理论已趋于完善。若研究电力系统的长期动态过程,依据上述简化进行的研究则不能真实反映系统的动态特性。

国内外此类研究一般有所侧重,包括:

(1) 应用水力振动理论,侧重研究压力管道内水体振动特性^[1],包括水力振动特性的评价、流固耦合振动和水力振动的案例分析等。

(2) 简单考虑电力系统的影响,即电力系统等值为恒定电磁功率或线性变化的电功率,进行水力—机械系统的小扰动和水力干扰稳定性分析。

(3) 不考虑或考虑简化的水力系统,进行电力系统的低频振荡研究和稳定性分析。

至于水力系统振动特性对电力系统低频振荡阻尼的影响,或电力系统低频振荡对水力—机械系统的振动特性和稳定性分析有何影响,均未作具体的分析研究。

(二) 水机电系统联合分析的提出和研究进展

1989年,李敬恒等^[2]指出:在水电站的设计、运行过程中,涉及水力、机械、电力系统之间的固有联系,各机组之间存在水力联系,取决于水力系统的布置;同时,各机组之间必然存在电力联系,取决于水电站的接线方式以及在电力系统中的位置。基于此,进一步分块综述了各系统的数值模拟。

1991年,日本的谷口治人^[3]指出:由于核电站的开发和系统峰谷差的增大,抽水蓄能电站和大容量常规水电站迅速发展,因电站水头较高和输水道较长,必须充分考虑压力管道内水体的弹性模型阶数(三阶或三阶以上),以便能够较精确的分析水力系统和电力系统的动态特性,综合研究水力系统、机械系统和电力系统之间的相互影响,特别是抽水蓄能电站,由于发电工况和抽水工况特性的差异,这一点显得尤为重要。据此,谷口治人结合压力管道内水体的弹性模型(保留零点和极点的展开模型)及机组模型,分析了考虑电力系统影响时,压力管道弹性模型阶数的选择,通过数值计算和仿真实验,研究了水力系统、机械系统和电力系统之间动态特性的相关影响关系,并且初步讨论了水力系统模型对低频振荡阻尼分析的影响。

1992年,IEEE工作组^[4]在提出水力系统建模方法的基础上,着重指出:在特定条件

下,水电站稳定分析中必须考虑其他影响因素,即进一步研究包括尾水管水流压力脉动在内的水力—机械系统动态特性和电力系统振荡之间的相互作用,同时要求相应的数学模型必须尽可能反映水力—机械—电力系统的整体特性。

1993年,C. D. Vournas^[5]针对一管多机的水电站,研究了机组间的水力干扰现象,并初步讨论了不同的接线方式对各机组运行稳定性的影响,指出:对于一多机共管路的水电站而言,除了存在必然的水力干扰以外,若各机组的接线情况不同,如单机与无穷大母线连接、单机单独运行、多机均与无穷大母线连接或电站单独运行,水电站的运行稳定性存在较大的差别。C. D. Vournas以较复杂的水力系统作为建模对象,同时考虑机组间的水力联系和电力联系,以反映这一类水电站实际的运行状态。但是,研究中仅简单计及电力系统的影响,未引进发电机和励磁机的稳定性分析模型。

1995年,蒋文保等^[6]在考虑电力系统的影响时,分别考虑了单机系统、占系统比重小的多机系统和占系统比重大的多机系统三种方案,分析了在负荷扰动或水力干扰过程中电力系统的影响,即并网运行的大比重机组甩荷或断电后,共管路的运行机组除了受水力干扰影响以外,还受到电力干扰的影响,其转速、流量、出力等都会出现较大幅度的波动,研究中负载特性系数考虑与机组转速和负载的特性有关。

近年来,国内外在水电站的负荷扰动稳定性分析和运行控制方面,做了许多工作,特别是针对多机共管路系统,考虑运行机组参与调频或不参与调频的条件下,研究系统的水力干扰问题及各参量对系统稳定性的影响等,获得了许多较有意义的成果。

沈祖诒、支培法^[7]指出:水轮机调节系统分析是针对带孤立负荷这一最恶劣的工况进行的,而实际上绝大多数水轮发电机组是并在相当大的电网中运行的,必须研究并网运行水轮机调节系统的工作特性。若水轮发电机组是通过较长的输电线与大电网相连,电气联系相对较弱,输电线较长,阻抗较大,容易形成弱阻尼系统,产生低频振荡(机电振荡)。依据压力管道、调速器以及发电机和励磁机的稳定性分析模型,研究了单机无穷大系统的振荡模式,分析了水轮机力矩的阻尼作用,讨论了水轮机调速器PI调节对弱阻尼系统的影响,以及采用状态反馈控制以改善系统低频振荡。

曹荣章等^[8]基于压力管道的传递函数,以及线性水轮机模型、调速器改进的PID调节,分析了在电力系统发生低频振荡的情况下,三峡水电站水轮发电机组调速系统的动态特性,从电力系统低频振荡产生的机理出发,采用改进调速器控制算法的方法,寻求调速系统对低频振荡产生抑制作用的控制策略,并仿真研究了调速器参数不同取值和不同运行参数时对低频振荡的影响。结果表明:水轮机调速器对低频振荡具有一定的抑制作用,通过对水轮机调速器控制算法的改进,不但可以避免调速器对电力系统产生负阻尼,而且能对系统的低频振荡产生有效的抑制作用。

卫志农、潘学萍和陈舟等^[9-12]综合了水力系统和机械系统的几种线性或非线性模型,结合电力系统各部分的数学模型,探讨了水力系统对电力系统低频振荡的影响,讨论了系统的各振荡模式与状态变量之间的相关关系以及特征值关于其他参数的灵敏度,分析了不同水力系统模型及参数对水力系统及转子振荡阻尼的影响。

刘宪林^[13]建立电力系统直观线性化模型和水电站水力系统弹性水击线性化等效电路模型,研究抽水蓄能电站小扰动稳定的特殊问题,同时基于线性化水机电整体数学模型对

具有一元水力系统的并网或独立单机系统进行了研究。高慧敏^[14]基于水力系统的特征线法以及发电机、励磁机、电网模型，建立了水机电联合仿真的整体数学模型，进行了复杂水力系统的单机无穷大系统短路扰动过程仿真计算。赵桂连^[15]建立了包含水力瞬变过程、机械运动过程和电气过渡过程的完整的非线性数学模型，研究了负载阶跃扰动下，励磁调节、调速器调节以及水力系统对转速调节品质的影响，比较分析发电机分别采用恒定力矩、恒定功率和三阶模型时的小扰动仿真过程，还分析了运行机组分别与孤立小电网相联或与无穷大电网相联时的水力干扰过程。

综上所述可知：在水机电系统振动特性和稳定性研究中虽已尽可能考虑了各系统之间动态特性的相互影响，但仍存在不同程度的简化、侧重或不完善之处，特别是涉及各系统之间振动特性相互影响方面的研究较少。具体而言，这些研究或者侧重于电力系统的稳定性问题，即从简单的水力系统出发，考虑不同精度的压力管道内水体的数学模型，以及不同的机组模型，分析对电力系统低频振荡和暂态稳定的影响；或者简单考虑电力系统的影响，即引入发电机、励磁机以及无穷大电网的数学模型，进行水力—机械系统的稳定性分析。在研究过程中，水力系统一般采用从泰勒展开式或保留零点和极点的连乘式得到的弹性模型，相应的高阶弹性模型不易解耦，不能明确反映管道内水体的高阶频率特性，使其应用存在一定的局限性；水力系统和电力系统负荷特性对电力系统低频振荡及稳定性的影响研究不够完善；对于采用一管多机布置和扩大单元接线的系统，由于各机组之间存在水力联系，又存在电力联系，相应的水机电系统振动特性和稳定性研究相对缺乏。另外，抽水蓄能电站中因可逆式机组的S形特性引起的水机电系统振动和不稳定问题反映较多，研究很少。

第二章 基本理论与方法

第一节 振动特性分析的基本理论

一、水力振动理论

水力—机械系统振动特性研究的主要理论基础是水力振动理论^[1]。水力振动是有压输水系统中一种周期性的非恒定流，通常水电站有压输水系统的扰动，不管是因故障还是正常操作引起的，总会衰减并逐渐消失。但有时系统具有这样的特性，当系统受到扰动后，扰动随时间增强并不是衰减，并且导致剧烈的压力和流量振荡，这种有压非恒定流现象即为水力共振，亦称谐振。其产生的主要原因有两类，一是系统本身不稳定，如可逆式机组在 S 形特性区长时间运行，即为自激振动；二是扰动频率与水力系统的基振频率或高阶自振频率一致或相接近。经过许多学者的努力，水力振动理论从无到有，取得了比较大的发展，并且逐步趋于完善。

由于有压输水系统中可能出现的水力振动问题主要是自由振动问题（含自激振动问题）和强迫振动问题，水力振动分析主要分为自由振动分析和强迫振动分析两种。水力阻抗法和传递矩阵法能够解决与任何周期性的压力扰动或流量扰动问题相关的各种水力振动问题。基于水力阻抗法和传递矩阵法这两种解决水力振动问题的主要方法，可以对一个给定的有压输水系统作全面的水力振动分析。

二、水力振动理论的基本方程

在水力振动分析中，一般采用复数进行各种计算，如振荡水头 h' 和振荡流量 q' 均有下面的形式

$$h' = He^{st} \quad q' = Qe^{st} \quad (2.1)$$

式中： H 和 Q 分别为瞬时水头和瞬时流量； s 为拉普拉斯变量，在水力振动理论中亦称复频率， s 定义为 $s = \sigma + i\omega$ ，其中 σ 为衰减因子， ω 为角频率。

结合图 2.1 所示的单一计算管段，从流体瞬变的简化方程出发可以得到连续方程

$$H_x + \frac{1}{gA} Q_t + \frac{fQ^2}{2gDA^2} = 0 \quad (2.2)$$

运动方程

$$Q_x + \frac{gA}{a^2} H_t = 0 \quad (2.3)$$

式中：下标 x 表示对长度求导；下标 t 表示对时间求导； g 为重力加速度； A 和 D 分别为计算管段断面积和直径； a 为管道计算水锤波速。

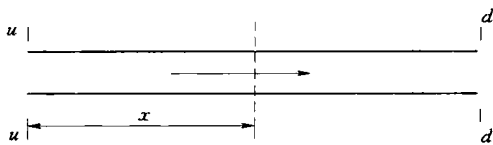


图 2.1 单一计算管段

瞬时水头可分解为平均水头 $\bar{H}$ 和振荡水头 h' 两部分, 瞬时流量亦可分解为平均流量 $\bar{Q}$ 和振荡流量 q' , 即

$$H = \bar{H} + h' \quad Q = \bar{Q} + q' \quad (2.4)$$

相应的偏微分关系为

$$\begin{aligned} H_x &= \bar{H}_x + h'_x & H_t &= \bar{H}_t + h'_t \\ Q_x &= \bar{Q}_x + q'_x & Q_t &= \bar{Q}_t + q'_t \end{aligned} \quad (2.5)$$

已知管道摩阻系数 f , 引入流阻 R (单位长度上线性化阻力)、流感 L 和流容 C , 具体定义为

$$R = \frac{fQ}{gDA^2} \quad L = \frac{1}{gA} \quad C = \frac{gA}{a^2}$$

在上述定义的基础上, 把分解式 (2.4) 以及相应的偏微分关系式 (2.5) 代入式 (2.2) 和式 (2.3) 中, 最后经化简可得到如下两式

$$h'_x + Lq'_t + Rq' = 0 \quad (2.6)$$

$$q'_x + Ch'_t = 0 \quad (2.7)$$

对式 (2.6) 和式 (2.7) 进行拉普拉斯变换, 可得

$$\frac{dH(s, x)}{dx} + (R + sL)Q(s, x) = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{dQ(s, x)}{dx} + sCH(s, x) = 0 \quad (2.9)$$

定义传播常数 $\gamma = \sqrt{Cs(R + sL)}$, 给定管路的特征阻抗 $Z_c = \frac{\gamma}{Cs}$, γ 和 Z_c 均为水力振动分析的重要参数。引进上述两个参数, 则式 (2.8) 和式 (2.9) 转化成

$$\frac{dH(s, x)}{dx} + \gamma Z_c Q(s, x) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{dQ(s, x)}{dx} + \frac{\gamma}{Z_c} H(s, x) = 0 \quad (2.11)$$

若已知边界条件 $x=0$ 时, $H(s, x) = H_u$, $Q(s, x) = Q_u$, 记 $H(s, x) = H(x)$ 和 $Q(s, x) = Q(x)$, 联立求解式 (2.10) 和式 (2.11), 引入双曲函数并且采用矩阵形式表示可得

$$\begin{Bmatrix} H_x \\ Q_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & -Z_c \sinh \gamma x \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_u \\ Q_u \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

式 (2.12) 中下标 x 表示给定计算截面和进口截面的间距, 如图 2.1 所示, 定义给定截面的水力阻抗为 $Z_x = \frac{H_x}{Q_x}$, 则进口截面的水力阻抗为 $Z_u = \frac{H_u}{Q_u}$, 并且考虑 $\tanh \gamma x = \frac{\sinh \gamma x}{\cosh \gamma x}$, 可得

$$Z_x = \frac{Z_u - Z_c \tanh \gamma x}{1 - \frac{Z_u}{Z_c} \tanh \gamma x} \quad (2.13)$$

上述推导得到的阻抗传递方程即为水力振动基本方程, 是水力阻抗法和传递矩阵法的