

SHUIDIANZHAN CHANGFANG HE JIZU OUHE DONGLIXUE
LILUN JI YINGYONG

水电站厂房和机组耦合动力学 理论及应用

马震岳 张运良 陈婧 张宏战 王刚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV731

3

本书由大连市人民政府资助出版

The published book is sponsored by the Dalian Municipal Government

水电站厂房和机组耦合动力学 理论及应用

马震岳 张运良 陈婧 张宏战 王刚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于作者多年的人才培养与科学研究成果,全面阐述了水电站水轮发电机组和厂房振动的理论与数值分析方法及成果,反映了目前水电站机组和厂房耦合振动理论与工程应用方面的前沿研究动态和最新成果,特别重视理论研究与工程应用的紧密结合,致力于水电站耦合动力安全问题的应用基础研究与工程实践经验的总结。主要包括:机组振源特性和振动控制标准,振动现场试验,动态识别和反分析,地面及地下厂房的振动分析与优化设计,机组-厂房的耦合振动分析等。

本书可供水电领域从事科研、设计和运行管理的技术人员参考,也可作为水利水电学科的研究生教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水电站厂房和机组耦合动力学理论及应用 / 马震岳等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-5170-1355-6

I. ①水… II. ①马… III. ①水电站厂房—耦合—动力学—研究②水电站—水轮发电机—发电机组—耦合—动力学—研究 IV. ①TV731

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第263189号

书 名	水电站厂房和机组耦合动力学理论及应用
作 者	马震岳 张运良 陈婧 张宏战 王刚 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 31印张 735千字
版 次	2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	98.00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

前言

水电是可再生的清洁能源,优先开发水电是世界各国能源工业的共有发展路线,更是中国能源发展和安全保障战略的重要组成。我国的水力资源蕴藏量巨大,水电装机容量跃居世界首位,水电开发的前景依然广阔,诸如溪洛渡、向家坝、白鹤滩、锦屏、墨脱等一大批大型和巨型工程正在和将要建设。随着水电站装机容量和引用水头的急剧提高,机组稳定性问题日益突出。同时,厂房结构尺寸也更加庞大,作为机组主要支承结构和流道结构的厂房结构的刚强度相对降低,机组振动诱发的厂房结构振动问题日益突出。因此,在设计阶段对机组稳定性和厂房结构振动加以预测和控制十分必要。

水电站水力发电系统是一个水-机-电-结构耦合的大系统。机组振动的主要振源是水力、机械和电磁振动,同时又存在强烈的耦联关系和非线性特性。机组运行荷载是厂房振动的主要激励源,厂房是机组的重要支承基础,机组-厂房构成一个复杂的耦合动力学系统。

水电站厂房是一个板梁柱和 underwater 大体积混凝土等组成的复杂空间大跨度结构,同时又包括机组支承基础和流道结构。河床式、厂顶厂内溢流式、地下式、双排机布置、板墙式机墩和钢管混凝土立柱、不同蜗壳埋设方式等特点使得结构形式更为特殊和复杂。建址于西北、西南地区的厂房面临着高地震烈度下的抗震设计问题。现行设计规范规定粗略,设计方法需要更新,完备的理论体系和成熟的分析模型方法广为设计和运行管理所期待。为此,本科研团队在国家自然科学基金和辽宁省自然科学基金、水利部科技创新项目和原国家电力公司重点科技基金等的支持下,结合我国设计建设的一系列大型、巨型水电站的建设实践,开展了系统深入的研究工作,取得了若干学术探索性和工程应用型科技成果,本书对近年的研究成果加以系统总结并以专著的形式付梓刊出,希望能对这一领域的学术研究有所裨益,也希望能为该领域的工程技术人员和研究生的科研工作提供借鉴与参考。

全书共分9章。第1章为绪论,全面介绍了本书撰写的目的意义,该领域的研究发展历程、现状和前沿动态,以及本书的主要内容概要和依托工程情况;第2章介绍了机组振源特性和机组-厂房振动控制标准,包括水力、机械和电磁振源的综合特性,以及基于建筑结构、动力机械、仪器仪表和人体保

健的机组—厂房系统振动控制要求的振动评价标准建议值；第3章介绍了水电站机组与厂房的现场振动试验信号分析技术，结合景洪和西龙池工程介绍了现场实验的方案设计、实验技术、信号分析和评价结果，最后简要论述了基于功率传导的大型水电站厂房结构脉动压力频响分析方法；第4章基于现场振动试验成果，重点介绍了水电站机组—厂房系统的动参数和动荷载的智能识别反分析方法及其应用；第5章结合若干大中型地面厂房的设计，论述了动力分析与动态设计优化的方法和成果；第6章从数值分析模型建立、整体刚度复核、共振复核和振动反应分析等方面阐述了常规水电站地下厂房的振动分析和动态设计方法，以及若干工程应用实例；在前几章的基础上，第7章重点针对高水头、大容量、高转速的抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析和优化设计，从整体振动分析、刚度复核、水力激励下的振动反应、机墩优化设计、副厂房振动分析等方面，结合若干工程实例，加以综合分析论述；对于巨型机组大型蜗壳结构，以往大多采用保压浇注方式，如采用垫层方案和直埋方案，对机组运行稳定性和流道结构、甚至厂房整体结构的刚强度，究竟有何不利影响以及其影响程度如何，均是需要研究和回答的关键问题，第8章即结合三峡和溪洛渡等工程重点分析了蜗壳不同埋设方式下水轮机流道结构刚强度和厂房振动特性，论证了巨型工程采用垫层蜗壳和直埋蜗壳方案的可行性；第9章介绍了在水轮发电机组和厂房结构耦联振动方面的一些探索性成果，包括机组轴系—支承体系的耦联动力特性、机组—厂房的耦联振动特性，以及作为厂房振源的机组动荷载的合理施加方式。

本书由马震岳、张运良、陈婧、张宏战和王刚联合撰写。第1章、第2章和第8章由马震岳、张运良撰写，第3章和第4章由张宏战撰写，第5章和第9章由王刚撰写，第6章和第7章由陈婧撰写。

本书由大连市人民政府资助出版。在成果研究和撰写过程中，得到有关设计和科研部门技术负责同志的大力支持和协助，多届研究生参与了研究工作，在此一并表示诚挚谢意！中国水利水电出版社为本书的出版给予了大力支持，谨表衷心感谢。由于水电站厂房和机组耦合动力学问题十分复杂，研究工作起步较晚，仍处于理论探索和实践创新阶段，本书的理论和方法有待于深入和丰富，书中的不完善甚至错误之处在所难免，敬请予以指正。

作者

2013年5月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 机组与厂房耦合动力学研究的发展和现状	8
1.3 本专著主要内容概要	22
1.4 主要依托工程概况	25
参考文献	38
第2章 机组振源特性和机组-厂房振动控制标准研究	58
2.1 水轮发电机组振源特性分析	58
2.2 水轮发电机组振动控制标准	74
2.3 振动对厂房建筑物的影响及允许振动标准	79
2.4 振动对机械设备的影响和振动控制标准	81
2.5 振动对仪器设备的影响和振动控制标准	83
2.6 振动对人体的影响和振动控制标准	83
2.7 水电站主厂房振动控制标准	90
2.8 厂房结构减振措施研究	93
2.9 本章结论	100
参考文献	100
第3章 水电站机组与厂房的现场振动试验研究	102
3.1 振动测试信号分析技术	102
3.2 景洪水电站机组与厂房的现场振动试验分析	107
3.3 西龙池抽水蓄能电站机组与厂房的现场振动试验分析	142
3.4 基于功率传导的大型水电站厂房结构脉动压力频响分析	161
3.5 本章结论	168
参考文献	168
第4章 机组和厂房结构振动反分析与动态识别	170
4.1 水电站厂房和机组振动测试中传感器的优化布设	170
4.2 水电站厂房及机组动态参数的识别研究	176
4.3 水电站厂房及机组动荷载的识别方法研究	182
4.4 水电站厂房与机组振动传导路径的识别研究	196

4.5	十三陵地下抽水蓄能电站的动态识别研究	204
4.6	西龙池地下抽水蓄能电站的动态识别研究	210
4.7	水电站机组轴系统动态参数识别及其在景洪水电站的应用	223
4.8	本章结论	229
	参考文献	231
第5章	地面厂房的动力分析与动态优化设计	233
5.1	基于结构刚强度控制的巨型工程地面厂房动态优化设计分析	233
5.2	水轮机脉动压力作用下的厂房动力反应特性分析	238
5.3	主厂房上部结构的动态优化设计研究	246
5.4	高地震区地面厂房结构的动力分析与设计优化	263
5.5	主副厂房连接形式对厂房抗震性能的影响分析	269
5.6	强震作用下厂房抗震性能分析研究	277
5.7	厂房结构平面非对称条件下的抗震性能研究	287
5.8	双排机厂房结构的振动分析	291
5.9	厂内溢流式水电站厂房的振动分析	297
5.10	主厂房采用钢—混凝土组合框架结构的可行性研究	304
5.11	水电站地面厂房的机组诱发振动及抗振加固研究	314
5.12	本章结论	323
	参考文献	325
第6章	常规水电站地下厂房动力分析	326
6.1	内源振动激励下的厂房数值模型研究	326
6.2	地下厂房结构整体刚度分析	331
6.3	地下厂房结构的固有振动特性分析	335
6.4	机组振动荷载作用下厂房动力反应分析	337
6.5	水轮机压力脉动作用下厂房振动反应分析	338
6.6	实际工程应用研究	339
6.7	本章结论	348
	参考文献	350
第7章	抽水蓄能电站地下厂房动力分析	351
7.1	主厂房结构整体振动分析	351
7.2	机墩结构整体刚度分析	356
7.3	水轮机压力脉动作用下的振动反应分析	359
7.4	机墩结构动态设计优化研究	364
7.5	副厂房振动分析	369
7.6	实际工程应用研究	371
7.7	本章结论	393
	参考文献	394

第 8 章 蜗壳不同埋设方式下水轮机流道结构刚强度分析和厂房振动研究	395
8.1 引言	395
8.2 水轮机蜗壳不同埋设方式的流道结构刚强度分析	396
8.3 巨型水轮机蜗壳结构不同埋设方式下的整体刚度分析	404
8.4 蜗壳不同埋设方式下的厂房自振特性分析和共振复核	407
8.5 蜗壳不同埋设方式下的厂房结构振动反应分析	413
8.6 脉动水压力作用下巨型水轮机流道结构疲劳分析	427
8.7 基于断裂力学的蜗壳外围混凝土裂缝扩展的数值模拟及其稳定性分析	431
8.8 基于损伤理论的蜗壳及厂房结构分析简介	441
8.9 本章结论	442
参考文献	444
第 9 章 水轮发电机组和厂房结构的耦联振动研究	446
9.1 水电机组轴系统的横纵耦合振动研究	447
9.2 考虑不平衡电磁拉力的偏心转子非线性振动分析	454
9.3 导轴承与推力轴承耦合作用下水电机组的横向振动研究	461
9.4 不平衡磁拉力作用下水轮发电机组转子系统碰摩动力学分析	466
9.5 考虑厂房耦联作用的机组轴系统动力特性研究	472
9.6 机组动荷载对厂房作用方式及其施加方法研究	477
9.7 本章结论	483
参考文献	484

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 水电站厂房

电力建设是国民经济的基础工业，也是工农业生产的先行工业，对我国四个现代化的建设有着十分重要的作用。水力发电是电力工业的一大支柱，它是开发河川或海洋的水能资源将水能转换为电能的工程技术。

开发水电是建设电力工程、防洪工程、输水工程、环保工程及山川秀美工程的综合任务，具有很高的综合效益。截至目前，中国水电装机容量已突破 2 亿 kW，标志着中国的水电建设实现了历史的跨越，创造了世纪的辉煌^[1]。

水电是清洁能源，中国的水电蕴藏量世界第一，水电装机容量也已跃居世界第一，但开发利用程度仍然很低（25%左右），已利用的能量仅为可利用水能的 12%^[2]，不但远远落后于美国、加拿大、西欧等发达国家，而且也落后于巴西、埃及、印度等发展中国家。随着经济社会的快速发展，电力供应是可持续发展和能源安全的重要支撑。因此，中国的水电开发大有可为。结合西部大开发，实施西电东送，一大批巨型和大型水电站正在建设和规划中，如三峡、溪洛渡、龙滩、小湾、向家坝、锦屏一级等，电站规模均达世界级，机组的单机容量达到 700MW。同时，为调整电源结构，急需建设大量的抽水蓄能电站，尤其对东、南诸省以火电和核电为主的电网。

把水能转换成电能的工厂称为水力发电厂或水力发电站（Hydropower Station）。抽水蓄能电站发电工况也是把水能转换成电能，所以也属于水电站的范畴。安装水轮发电机组及其他附属机电设备和辅助生产设施的建筑物称为水电站厂房（Power House of Hydropower Station）。通常由主厂房和副厂房组成，但小型水电站也有的不设副厂房。主厂房又分主机间和安装间。主机间装置水轮机、发电机及其附属设备；安装间是机组安装和检修时摆放、组装和修理主要部件的场地。副厂房包括专门布置各种电气控制设备、配电装置、电厂公用设施的车间以及生产管理工间。主厂房、副厂房连同附近的其他构筑物及设施，统称厂区，是水电站的运行、管理中心。

水电站厂房按其结构及布置特点分为地面式厂房、地下式厂房、坝内式厂房和溢流式厂房。地面式厂房，按其位置不同，又分为河床式厂房、坝后式厂房和岸边式厂房。地下式厂房位于地下洞室中，也有的地下厂房其上部露出地面。坝内式厂房位于坝体空腔内。溢流式厂房位于溢流坝坝趾，坝上溢出水流流经或跃过厂房顶，泄入尾水渠。厂房内安装的水轮发电机组的型式，由水电站的水头大小等因素确定。水电站厂房型式见图 1.1。

通过转轴连接的水轮机和发电机系统，称为水轮发电机组。转轴由轴承固定并支承在钢结构或钢筋混凝土结构上。机组运行时水轮机将水流的能量转换为旋转机械能带动发电机发电。

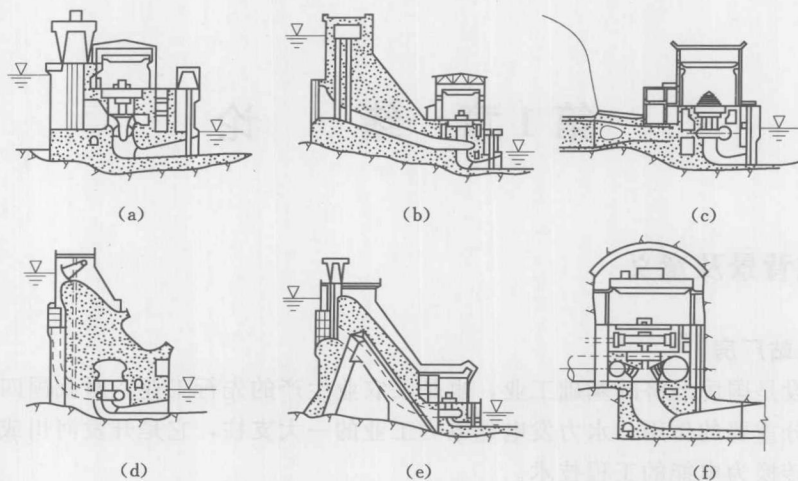


图 1.1 水电站厂房型式

(a) 河床式；(b) 坝后式；(c) 岸边式；(d) 坝内式；(e) 溢流式；(f) 地下式

水轮发电机组的布置型式有卧式和立式。通常小水头机组多采用卧式，中高水头大多采用立式^[22]，见图 1.2。立式机组是靠推力轴承承担竖向荷载。根据推力轴承位置的不同

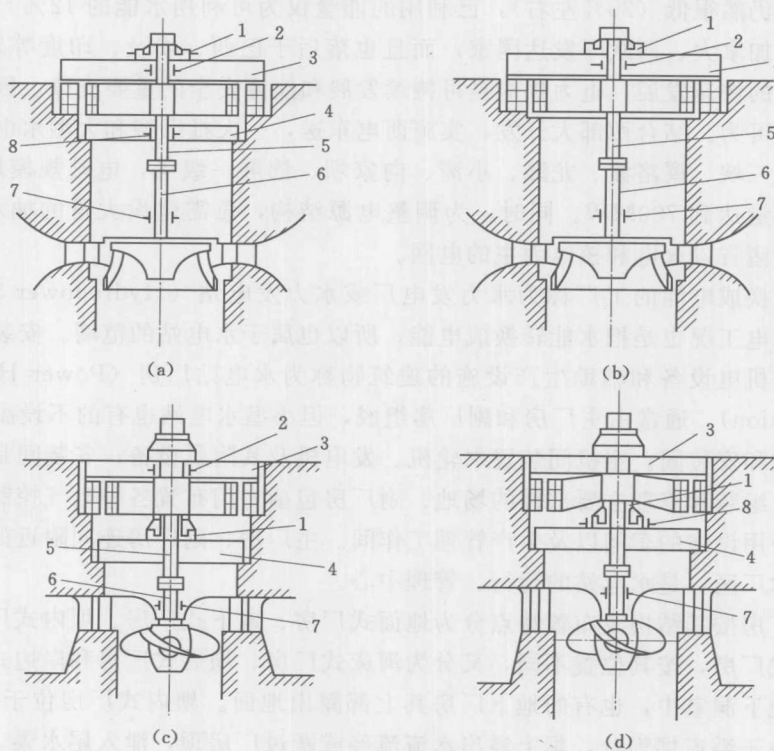


图 1.2 立式水轮发电机组结构型式

(a) 三导悬式；(b) 二导悬式；(c) 二导半伞式；(d) 二导全伞式

1—发电机推力轴承；2—发电机上导轴承；3—发电机上机架；4—发电机下机架；
5—发电机转轴；6—水轮机转轴；7—水轮机导轴承；8—发电机下导轴承



和导轴承个数的多少,立式机组又可以分为三导悬式,二导悬式、二导半伞式和二导全伞式机组。一般中低转速大容量机组多采用伞式结构,其优点是结构紧凑,机组高度较悬式低,利于稳定,还可以减轻定子和负重机架重量。

1.1.2 水电站厂房的振动问题

水电站厂房属于动力厂房,水轮发电机组是厂房中的核心设备。由于承受工况变化频繁的机组荷载和水力脉动荷载,运行中机组和厂房的振动问题非常普遍^[3-5]。水电机组振动是涉及水电机组安全稳定运行的重大问题。一方面,我国已投产的大型混流式水轮机的电站如岩滩、李家峡、二滩、五强溪、隔河岩、小浪底、大朝山等都出现了不同程度的水轮机组振动问题,导致叶片断裂、尾水管管壁撕裂,有的甚至引起厂房等建筑物发生共振,危及电站的安全稳定运行;另一方面,正在规划和建设中的巨型电站,有些电站水头变幅很大,有些电站结构尺寸巨大、结构刚度相对降低、自振频率降低,影响机组安全稳定运行的未知因素也会相应增多,预防和解决水电机组振动的措施更加复杂和困难^[6],同时,持续的水力脉动压力对厂房结构的耐久性也有很大的影响。对于抽水蓄能电站因为具有高水头、高转速、双向运转、过渡过程复杂等特点,与常规水电站相比,机组支撑结构所承受的机械离心力、电磁不平衡力矩以及流道压力脉动产生的振动都大得多。我国抽水蓄能电站建设起步较晚,设计经验不足,没有成熟的规范参考,随着国内几座大容量抽水蓄能电站的建成,机组振动和水力脉动诱发的厂房振动较为强烈,剧烈的振动不仅对结构有一定的破坏作用,影响电气设备的运行,还将产生噪声和恶化厂内工作环境。机组周围混凝土支撑结构的受力和振动问题是厂房结构设计的关键,越来越受到水电站设计者和运行者的高度重视。

我国 20 世纪五六十年代投入运行的一些机组,因提前发电、系统负荷少等因素,出现过长期低负荷运行,致使水轮机运行稳定性较差,但由于机组小,问题尚不突出;近 30 年来随着系统的扩大和缺电现象日趋严重,机组单机容量和尺寸不断增大,机组及厂房结构刚度相对降低,水轮机在高水头运行区普遍出现了水力不稳定现象,并不同程度地引起厂房甚至是大坝的强烈振动^[6]。国内外现阶段均出现了振动对厂房结构不利影响的实例,我国的刘家峡、岩滩、红石、丹江口、十三陵等电站的水工建筑物振动问题较为突出^[7]。

委内瑞拉的古里大坝和水电站建于 20 世纪 60 年代初,主要考虑工程量过大和电力需求有限,分两期建设。一期工程在 1[#] 厂房内安装了 10 台单机容量为 180~400MW 的立式混流式机组。最后阶段于 80 年代完成。二期工程在 2[#] 厂房内安装了 10 台 730MW 的机组,最终运行水头 113~146m。同时一期机组予以更换。在更换过程中,一期机组不得不在 50% 导叶开度范围内工作,尾水管涡动较为突出。若部分负荷运行时间短暂,破坏较轻,但当低负荷运行频繁时,水流旋转剧烈,作用在尾水管翼片顶部的不稳定压力梯度增大,引起空蚀、高频振动、钢衬和混凝土锚筋上的动应力,翼片与钢衬结合部会出现裂缝,钢衬也会被撕裂而与混凝土脱离。压力脉动的相位差加剧了钢衬破坏和裂缝的扩展^[8]。

铜街子水电站单机出力 150MW,水头 31m,水轮机型号为 ZZ40-LH-850,发电机型号为 SF150-16/12800,转速 88.2r/min。11 号机组自 1992 年投入运行后,摆度和振



动较大(最大达1.2mm),12个上机架支臂剪断销先后被剪断,影响电站安全运行。经分析认为:主要问题是运行时转动系统轴心偏移过大,定转子气隙不均匀;初始缺陷为加工质量和安装精度不良^[9]。

高坝洲水电站是清江流域开发的最末一级水电站,装有3台单机容量为84MW的轴流转桨式水轮发电机组,额定水头32.5m,设计定转子间隙21mm。3#机在启动试运行,随转速上升,机组各部位振动幅值略有上升,虽在规范范围内,但转频分量偏大;随着励磁电压的升高,机组各部位振动摆度的转频分量成倍增长,推力轴承处最大摆度达2.2mm,上机架径向振动达0.42mm,严重超标。经分析是由于3#机转子组装圆度不符合要求而引发的电磁不平衡振动^[10]。

红石水电站是白山水电站的下游梯级电站,为河床式厂房。机组自运行以来,一直存在较为明显的振动^[11],主要表现为大轴摆度过大,噪声和厂房结构振动较大。经过10余年的维护及研究处理,难以根治并有日渐加剧的趋势,厂房上下游立柱在发电机层以上2m左右的断面上出现周边裂缝,主副厂房的门窗及墙壁孔洞周边也均有裂缝出现。机组振动不仅直接影响到厂房及挡水结构,而且传递到挡水坝和溢流坝,引起大坝振动,造成大坝位移观测设备精度降低。

广西岩滩水电厂单机容量302.5MW^[12],1#机投运时,水位为50m左右;2#机投运时运行水位为60m。随着电厂运行水位提高,机组运行在小负荷(100MW左右)时尾水管出现强烈的低频压力脉动。当运行水头大于60m,机组接近最高出力时,机组和厂房均出现剧烈的振动。特别是在发电机层及副厂房,振动更为剧烈。振动产生时,中控室内有明显感觉,沉闷的共鸣声干扰了运行人员的正常工作,影响了监盘人员的注意力。机旁表盘柜由于振动曾发生保护回路压板松动掉落而引起误动作导致机组停机的事故。由于振动现象在某个区域内存在,因此为了避开振动区域,机组在高水头段被迫降负荷运行,使电厂不仅损失电量,而且调峰能力也大大减弱,还可能危及到电厂的安全运行^[13]。

以上几例简要介绍了一些常规水电站机组和厂房振动的情况。对于抽水蓄能电站,随着国民经济的发展已经成为电力工业的重要建设项目。试运行期或建成后,天荒坪、十三陵、广州抽水蓄能电站等,均出现过程度不同的振动危害。

十三陵抽水蓄能电站投入运行后,机组振动诱发的厂房振动主要是副厂房振动较为明显^[14]。虽然厂房支撑结构不可能遭到破坏,但是较强烈的振动仍是厂房结构安全的隐患。另外,较大的副厂房振动和噪声污染恶化了电站的工作环境,为此电站的中控室已迁至地上。

天荒坪抽水蓄能电站1#机运行初期,各导轴承摆度及机架振动都较大,尤以水导轴承处为最,甚至出现转动油盆与固定部件碰磨溅射火花的现象,测录值也严重超过合同及规范要求^[15]。在转子上下部位加置配重进行动平衡试验后,上、下导摆度能满足运行要求,但水导轴承处的振动和摆度仍无较大改善。后来通过适当减少水导间隙,对水导轴承处大轴摆度有所改善。

由此可见,水力、机械、电磁均是引起机组振动的主要原因^[16-20],机组振动严重时还会与厂房发生共振,危及厂房结构的安全。水力发电是一个多元系统,包括了引水系统(水力)、发电系统(机组)和输配电系统(电网),因此,各子系统相互作用相互影响是



不可避免甚至较为强烈的,水-机-电耦联系统振动和稳定性是目前研究的又一个热点和难点。

水轮发电机组系统的临界转速与机组动力特性直接相关。水轮发电机组轴系统的转速频率与其自振频率相重合时,将产生强烈的振动,即共振,此时的转速即为临界转速。机组长期在接近临界转速状态下运行,弓状回旋幅值较大,大轴会因发生塑性变形而破坏。当机组转速高于临界转速时,机组在开机和停机过程中,通过临界转速时将造成一定困难。因此临界转速的准确确定对机组轴系的设计和安全稳定运行有着重要意义。而确定临界转速的难点在于机组支承条件,即导轴承及其支承结构动力特性系数的确定。水轮发电机组靠安装在机架中心体内的水导轴承和机架支臂以及机墩混凝土结构约束其水平振动,推力轴承承担竖向力。导轴承间隙过大或推力轴承调整不良均会引起机组的振动。导轴承和推力轴承动力特性——刚度、阻尼系数是整个机组支承结构中的关键因素。改变轴承结构的参数,可使机组的支承刚度提高,从而提高机组的临界转速。但轴承刚度高到一定程度,便会达到‘饱和’,临界转速不再提高^[21]。因此综合考虑各种因素,研究轴承的动力特性,对确定水轮发电机组轴系统的临界转速,研究机组的动力特性至关重要。

推力轴承是轴系中一个十分重要的部件。以往对机组轴系的研究往往忽略了机组的竖向自由度,即不考虑推力轴承的影响,只考虑机组在导轴承支承下的横向振动。近年来,一些学者对汽轮发电机组的推力轴承对转子的横向作用进行了研究,考虑了推力轴承产生的力矩造成的导轴承的偏载情况^[23]。由于其针对的是轴承荷载方向恒定竖直向下的汽轮卧式机组,导轴承偏载时的动特性——刚度和阻尼系数可以通过坐标变换直接得到,但对于荷载方向随时间变化的立式水电机组来讲,该方法不一定适用。因为立式机组多采用可倾瓦导轴承,当机组荷载方向改变时,导轴承各瓦由于分担的荷载分量相应改变造成摆动状态、油膜分布的改变,对瓦的油膜刚度与阻尼系数造成了影响,坐标变换的方法不一定适用。导轴承的动力特性系数及推力轴承对横向振动产生影响的力矩是大小、方向时刻在变化的,轴系统的振动分析就变为复杂了,目前尚没有成熟的分析方法。因此机组轴系的横向和纵向振动耦合特性是非常值得关注和研究的。

水轮发电机组,顾名思义,水是机组工作运行的前提,机组运动的所有能量来自流体,传动介质也是流体,因此水力振动是机组最主要的振源。由于机组周围蜗壳、尾水管混凝土结构流道形状和水轮机转动现象的复杂,使得水力振源最难以把握,研究开展的也最早、最多^[24-25]。同时机组的水轮机和发电机为大型旋转机械,其振动亦属机械振动的范畴,尤其是不平衡振动和回转振动,是最基本的振源,设计中也要考虑,其研究方法可参考机械动力学和转子动力学^[26-27]。水轮机的转动通过轴传递到发电机上,发电机作为机组最重要的部件之一,质量和尺寸最大,与电网连接构成电路系统,电磁振动在机组振动中也很重要。

由此看来,水轮发电机组轴系统振动是由水力、机械、电磁三种振源共同耦合引起的。国内外过去对机组振动的研究多是针对某一部位的振动状况或考虑某一振源因素,这对研究和处理一些振源引起的机组振动是非常必要的。但是,机组振动是水力、机械、电磁共同作用的结果,其中某些振源所引起的机组部件和部位的振动往往是相互耦合的,如机组轴系的不平衡响应会引发电机定转子间的空气气隙不均匀,从而引起不平衡磁拉力加大,加剧机



组轴系的振动幅值；导轴承间隙不当，大轴弓状回旋会使水轮机密封间隙偏斜，引发水力不平衡力等。因此，以上三种振动之间并不是孤立的，它们组成了一个有机整体，振动之间是必然联系的。当研究某一部件的振动及其振源时，很难将其从周围的关联体中独立出来。例如，有压引水系统的水力振动和不稳定流现象是受到机组水力振动的影响，尾水的压力脉动也可能向上传递，造成压力管道共振；尾水管的低频涡带可能引起电网的波动，而某些电磁振动的频率可能远高于水轮机和支承结构的频率，但由于它们是一个系统，各部位的振动是动态的、相互传递的。因此，研究机组振动问题必须将机组作为一个水力、机械、电磁耦联系统和有关轴承支承结构作为整体加以考虑，建立数学模型，加以分析。

在水电站厂房动力分析方面，国内外的重视程度相对于大坝地震动力分析而言相距甚远，主要是由于机组诱发的厂房振动破坏不能与大坝震害及安全相提并论。尽管如此，随着机组容量、转速、水头等参数的急剧增大，尤其是近年诸如三峡等巨型机组的投产和抽水蓄能等高水头电站的建设，对于厂房振动的研究日益引起重视。1980年代，比较重视地面厂房的抗震分析。近年，厂房振动的实例增多，研究得到加强，如岩滩电站机组诱发主厂房楼板振动导致辅机误动作而搬迁，红石水电站厂房立柱因振动疲劳破坏而出现裂缝^[28]；十三陵抽水蓄能电站副厂房中控室因振动和噪声较大而不得不迁至地面，桓仁电站机墩定子基础出现裂缝等。因此，厂房结构的振动复核和抗震设计是三峡等巨型和大型常规水电站，以及大量抽水蓄能电站的普遍要求和共识。以三峡为代表的一大批工程，开展了此方面深入细致的工作；原国家电力公司曾专门立项开展可逆式机组和厂房振动的研究，为蓄能电站地下厂房设计提供指导。

水电机组的耦合振动已有一些研究。例如，李兆军，蔡敢为等^[29-30]以混流式水轮发电机组主轴系统为研究对象，建立了发电机单元、水轮机主轴单元和水轮机转轮单元的耦联振动模型，研究了系统的水力参数、电磁参数和结构参数之间的内在联系，但没有考虑与厂房（基础）的耦联。宋志强等^[31-33]对厂房基础的耦联作用、轴系横纵耦合振动以及轴系—轴承系统的非线性振动特性进行了初步探讨，对非线性特性的考虑多是独立的，尚没有深入到系统综合非线性的深度。最近发生的俄罗斯萨扬舒申斯克水电站重大事故和我国某大型抽水蓄能工程机组失稳及机组基础破损事故，造成机组破坏，可能与运行失误有关，也可能与水—机—电耦合系统的稳定性有一定关联，厂房甚至上游坝面压力管道均遭受损害。甩负荷或超负荷运行会引起水力振荡^[34]，进而也会诱发机组振动和电网波动；同时，包括引水（尾水）系统在内的流道系统的压力脉动，也会诱发压力管道（尾水管）和厂房结构的振动。有关水机电耦联振动与稳定性研究，以及诱发的厂房结构振动反应，尚缺乏明确的机理研究和完善的数学表达，系统的极端复杂性和强烈的非线性特征是制约研究突破的瓶颈，亟待集中攻关。

由于机组机电系统的复杂性和相似关系的不易实现，整体系统的模型试验异常困难。原型真机振动试验多见于振动监测和故障诊断，很少专用于理论研究目的。但随着现代先进试验设备的不断更新和信号分析技术的快速发展，振动试验技术日益完备，正成为理论研究的重要支持手段。国内的华中科技大学、天津大学、中国水利科学研究院和大连理工大学等单位，结合水电机组振动故障诊断与治理、李家峡双排机厂房、三峡厂房、景洪厂房等的振动监测与评价，开展了系统的真机试验研究；抽水蓄能电站的真机振动试验研究



相对更受重视,如十三陵、广州、天荒坪和西龙池等工程均进行了系统的振动试验^[35-42]。基于智能算法的振动识别和反分析理论与技术发展很快,为系统建模和数值解析提供了新的工具支撑^[43]。

水电站机组及厂房结构的动力特性研究是一个非常复杂而涉及面很广的课题,研究对象是由水轮发电机主轴、轴承、机架和混凝土支承结构组成的复杂系统,还应考虑水力、电磁等与上述系统之间的相互作用。研究课题涉及结构动力学、转子动力学、电磁动力学、流体动力学等多学科的交叉与融合。研究方法上,要将各部件组成的系统进行综合分析,考虑各部件之间的相互作用。再加上水电站厂房结构复杂,荷载和结构参数以及边界条件等的不确定性,所有这些给精确分析模型的建立和机组厂房结构振动的预测和评价增加了难度。因此,利用理论分析、观测资料和数值计算相结合,对机组与厂房耦联结构进行系统的动力分析,探讨其耦合动力特性并深入研究影响因素,为以后水电站机组及厂房的结构设计和实际运行提供有益的参考,是十分有价值的研究课题。

我国大型和超大型水电站的建设对机组稳定性和厂房动力设计提出了新的更高的要求,必须加强理论研究,以适应建设水电大国和水电研究强国的发展要求。因此,研究机组与厂房耦合系统的动力学问题,揭示耦联振动的机理,构建数值分析模型,期待能够为这一关键科学与技术问题的研究解决提供应用理论基础和适用方法,并争取在我国大型工程的建设实践中得到应用,对我国水电事业的发展具有重大意义。

1.1.3 水电机组与水电站厂房结构动态识别

对机组轴系支承起关键作用的导轴承依靠机架支臂支承在机墩上,轴承中的油膜力对轴系统的稳定性有重要影响。实际上,系统运行时大都不能满足小扰动条件,所以以往八参数的线性化油膜力模型局限性很大。近年来,非线性油膜力及轴承的非线性特性的研究日益得到重视,得到的油膜力是轴颈位移和速度的非线性函数。随着转子转速的提高,油膜层流会发生变化,甚至不再满足层流而变成湍流,同时由于轴承温度随转速的增大和运行时间的增长而逐渐升高,这样就会导致润滑油动力粘度不再是常数,对油膜的动力特性产生影响^[45]。因此采用非线性油膜力模型模拟导轴承,对于建立水轮发电机组耦合振动数学模型是必不可少的。

关于水轮发电机组轴系的振动研究,目前有限元法已经逐渐取代了传递矩阵法^[45-49],也有一些转子动力学计算机软件的出现^[49-55],但这些算法对于支承结构和基础的弹性耦联作用尚无涉及。水电机组轴系是通过轴承—轴承座—机架(风罩,顶盖)支承在厂房机墩钢筋混凝土结构上的。在机组运行中,大轴和轴承之间还存在动力特性十分复杂的导轴承油膜,其刚度和阻尼对机组的自振频率和摆度均有重要影响。同时机墩作为机组的最外层支承结构,其刚度的计算为空间结构的刚度计算,也不易实现。水电站厂房是水轮发电机组振动的载体,水电站厂房结构所承受的动荷载与水电机组所承受的动态力是作用力与反作用力的关系,因此厂房的振动主要源于机组的振动。厂房振动分析的关键,即是对厂房主要振源——机组动荷载和水力脉动荷载的研究,而目前关于这方面的研究还没有成熟的结论。关于各种振源的产生、作用机理和传递途径等至今还缺乏清晰的理解和准确的处理,存在较多的简化和假设。而且,各种振源相互影响,相互耦合。以往水电机组的机组动荷载由机组制造厂家提供,主要是为机组支承基础设计服务,其形式为作用在每一个定



子基础或机架基础的分项荷载（一般是最大幅值），没有考虑荷载的动态特性和旋转效应，也没有考虑厂房结构的整体刚度效应。而对于水力振源荷载的表述，模拟和施加也存在一定的简化和假设。

从以上分析可知，对水电站厂房的振动研究应该从现场监测、理论分析、模型试验和数值计算分析等方面进行，但是由于模型试验的造价高，并且对厂房存在的某些振源以及结构特性不能准确地模拟等原因，而理论分析也不能较好地反映这样大型的、受力复杂的结构动态特性，所以，以有限元为代表的数值计算分析仍是目前广为应用的厂房结构动态分析的方法之一。然而，在结构的有限元计算中，建立可靠的分析模型和较为准确的数值计算方法对厂房结构的动态分析是非常重要的，如结构材料参数、边界条件和振动荷载以及机组和水力动荷载的传递和作用方式等。但是，这些决定结构数值计算准确与否的变量特性，很难通过理论分析和测试而得到。

因此，利用动力监测成果对水电站厂房进行系统识别和反分析，探讨合理的厂房分析模型和各种作用荷载，实现对厂房结构系统的整体、细致的研究和分析，对提高厂房的设计水平，减振降噪，预测和控制有害振动都具有非常重要的学术和现实意义。事实上，自从20世纪70年代中期就有很多学者已开始着手研究结构动态参数和荷载的识别问题，并广泛地运用于高层建筑物、桥梁和海洋石油平台等结构分析中。系统识别技术在机械、结构系统的力学计算、结构设计、故障诊断中是一个十分重要的问题，它为结构的设计、计算以及分析提供可靠的参数依据，为减小振动、提高结构的可靠性、安全性，提供确切的环境条件。因此，在发展直接测量方法，提高测量水平的同时，也应大力发展在使用上相对灵活、经济和适用范围更广的结构系统识别法。

1.2 机组与厂房耦合动力学研究的发展和现状

1.2.1 厂房结构振动研究的发展和现状

考虑厂房基础的水电机组振动研究迄今不多见，同样，考虑机组耦联作用的厂房结构动力分析目前为止也很少。目前，对于水电站厂房结构的研究主要集中在自振特性、共振复核以及对水力、机械和电磁振源荷载引起的厂房结构动力反应分析，忽略了厂房和机组之间的耦联作用，对二者的连接部件如轴承油膜、轴承座、机架等的动特性对厂房及机组可能造成的影响研究过少。

20世纪50年代以来，我国对水电站机墩和蜗壳钢筋混凝土结构多采取沿圆周切取单位宽度，对结构进行静力和动力计算。很明显，蜗壳、机墩、风罩和楼板梁等是一个空间结构，取其中某一结构进行平面处理，所得结果难以反映实际情况。随着电子计算机性能的迅速发展及大型有限元软件系统的成功开发，复杂结构的动力计算已由原来的偏重于解析、变分等手段改变为主要偏重于基于有限元的数值模拟方法。20世纪70年代初以来，国外进行了大比尺静力模型试验^[56]。20世纪80年代，大连理工大学等单位结合几项大型水电工程，通过模型试验、有限元计算和现场测试，研究了机组钢筋混凝土支承结构的动力特性和动力响应^[56-58]。随着人们对机组钢筋混凝土支承结构静动力反应认识的提高，特别是通过对众多工程的模型试验、有限元计算和现场测试之间的相互对比后，积累了大



量的工程分析经验,最终还是选择了有限元计算这一有效、快捷而又经济的工具来分析电站厂房的机组支承结构^[59-60]。近几年本课题组致力于机组和厂房振动分析模型和系统分析方法的研究,在振源机理探讨的基础上,通过振动理论与数值分析,借助国内外大量的机组和厂房水力、电磁和机械等方面的振动实例剖析,分析了各类振动产生原因,给出了详细具体的处理方案,有效解决了机组和厂房出现的各类振动问题,为机组及厂房的振动理论研究与实际应用奠定了坚实的基础^[61]。天津大学崔广涛教授、练继建教授等利用流固耦合理论,采用模型试验的方法更加深入的研究了水工结构在高速水流作用下的振动问题,提出了一套预测和模拟水流诱发结构振动的技术路线和方法,包括水力学和结构力学相结合的流激振动响应的正分析、反馈分析等^[62-63]。作为水轮发电机组支承结构的水电站厂房,对于其自振频率计算共振校核,机墩振幅复核和拟静力法和动力法等厂房振动反应分析迄今已经进行了相当多的研究^[18,63-67]。也有一些学者采用模型试验的方法或根据实际观测数据对厂房振动进行了研究分析^[69-74],并探讨厂房结构振动响应的评估问题。文献[74]指出,对于复杂的厂房结构和脉动荷载,必须通过施加各种动力荷载求出厂房结构的振动响应,在此基础上做出定量评估。但是目前关于水电站厂房的振动控制标准,国内外均无明确规定。

现行的SL266—2001《水电站厂房设计规范》^[75]给出了基于单自由度振动体系推导出的自振频率及振幅计算公式,并对厂房机墩结构所承受的动荷载及其组合作了一般性的规定。如此规定对于低水头、中小型发电机组的结构设计是适用的,国内多数电站都是按这套方法设计的。对已建成的厂顶溢流式厂房,如新安江、池潭、修文水电站,以及厂前挑流式厂房,如乌江渡、漫湾等水电站,进行原型观测表明,动水压力诱发厂房振动是微弱的,对厂房结构的运行和安全不会产生很大的影响^[76]。但对于大型水轮机的振动和高水头、大容量的抽水蓄能电站厂房结构的设计,现行的规范仍没有作明确的规定,只是强调了需要用有限元法进行复核。国外对水电站厂房的振动研究资料不多,主要也是以有限元数值模拟为主并借助相关振动标准予以预测和评估。

自振频率是水电站厂房结构振动研究中的基本问题。以往对机组支承结构的动荷载,往往是校核导水叶和转轮叶片数的组合迫振频率,以及转频等是否与结构自振频率发生共振,现有的厂房振动研究大都集中于此^[77-82]。文献[83]指出了在厂房进行自振特性分析计算中目前仍存在的一些问题,如忽略了对结构的具体振型分析等。而对于大型机组振动引发的水电站厂房结构振动问题,仅采用共振校核法进行厂房抗震设计,其方法粗糙,校核标准难以掌握。实际上,许多主要振源,如地震力、电的极频振动、尾水管中的低频涡带和中频脉动等,都会使支承结构某些部位产生不同程度的动荷载和动应力。所以,要进行减振控制,首先就必须对厂房结构振动进行定量分析。目前,国内对水电站厂房结构在动荷载作用下的振动响应,尤其是抽水蓄能电站的振动问题研究得不多,缺少对振源的深入研究和结构的原型实测数据,基本上限于根据厂家提供的动荷载和初步拟定的结构形式计算支承结构的自振频率以及动响应,缺乏对厂房结构振动特性系统的分析比较和对计算结果的验证。

对于水电站厂房振源的研究,一般从两方面展开,即水轮发电机组的振动和流道中的水力振动。主要是考虑水力激振诱发的机组振动,进而引起的厂房结构振动。目前对机组