



“十二五”
国家重点图书
出版规划项目

水利工程重大安全问题专题研究



■ 李同春 赵兰浩 邓东升 冯旭松 著

大型贯流泵泵站结构抗振 安全度评价及优化设计

Vibration Safety Evaluation and Optimiztion Design of
Large-capacity Tubular Pump Station



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



“十二五”
国家重点图书
出版规划项目

水利工程重大安全问题专题研究



■ 李同春 赵兰浩 邓东升 冯旭松 著

大型贯流泵泵站结构抗振 安全度评价及优化设计

Vibration Safety Evaluation and Optimiztion Design of
Large-capacity Tubular Pump Station



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

随着机组单机容量的提高和建设规模的扩大,电站或泵站等水力机组的振动问题日益突出。本书针对目前泵站结构设计中存在的一些不足及认识不清的问题,系统论述了大型贯流泵泵站结构抗振安全度评价及优化设计的理论和方法。全书共分十三章,主要包括大型泵房结构设计分析方法简介、基于大型泵房结构配筋设计需求的有限元内力分析、泵房结构设计分析软件开发、非定常不可压缩湍流数值模拟、不可压缩湍流与结构动力相互作用分析、大型贯流泵流固耦合振动分析软件开发、结构振动响应联合预测、淮阴三站结构分析与振动安全度评价、台儿庄泵站结构有限元内力分析、大型灯泡贯流泵房的橡胶垫减振措施研究、考虑橡胶垫减振的泵房非线性振动方法分析等内容。

本书可作为从事水利水电工程、土木和建筑工程等领域内的设计、施工、管理和科研等工程技术人员的参考书,也可作为水利水电、土木和工程力学及其相近专业的本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型贯流泵泵站结构抗振安全度评价及优化设计/
李同春等著. —南京:河海大学出版社,2013. 10
ISBN 978-7-5630-3478-9

I. ①大… II. ①李… III. ①水利工程—泵站—
抗振性—评价 IV. ①TV675

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 230274 号

书 名 / 大型贯流泵泵站结构抗振安全度评价及优化设计
书 号 / ISBN 978-7-5630-3478-9/TV·365
著 者 / 李同春 赵兰浩 邓东开 冯旭松
责任编辑 / 朱 辉 成 微
责任校对 / 冀晓宁 胡 健 张 砾
封面设计 / 黄 煜
出版发行 / 河海大学出版社
地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)
网 址 / <http://www.hhup.com>
照 排 / 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 / 南京工大印务有限公司
开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张 / 13
字 数 / 333千字
版 次 / 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷
定 价 / 65.00 元

序

泵站作为取水输水工程的一个重要部分,已在机电排灌、跨流域调水、城乡给水排水、工矿企业供水和排水等工农业生产和水利工程建设等方面得到广泛应用。南水北调东线工程需要兴建一大批扬程低、流量大、运行时间长、结构复杂的泵站。泵站的安全可靠性已日益成为衡量大型水泵机组质量的重要指标。

随着机组单机容量的提高和建设规模的扩大,电站或泵站等水力机组的振动问题日益突出,振动机理的描述和结构振动响应的数值模拟成为国内外研究的热点和难点问题。作为一种与流动水体发生相互作用的旋转水力机械,泵站的机组在运行过程中不可避免地要产生振动,这种轻微振动虽是允许的,但若超出一定的范围,就会影响电站功率的发挥和经济效益,缩短其检修周期和使用寿命,严重时还会引起引水管道和整个厂房结构的振动,导致结构局部损坏,影响整个电站的安全、稳定、高效运行。从已经建成并投入运行的泵站情况来看,机组和厂房结构的振动问题非常突出,其水力振动和噪音普遍偏大。

大型泵站泵房结构由壳、板、梁和块体结构组成,承受的外荷载通过底板等传递到地基当中,是典型的空間结构,变形和应力分布较复杂。对于建设在软土地基中的泵站,还需考虑复杂的桩与土的相互作用问题。现行泵站设计规范规定:泵房底板,进、出水流动道,机墩,排架,吊车梁等主要结构,可根据工程实际情况,简化为平面问题计算,必要时可按空间结构进行计算。但规范中并没有给出空间结构分析的具体算法。

灯泡贯流式机组作为开发低水头资源的既经济又适用的主导机型,已在国内外广泛使用。但从已经建成并投入运行的泵站来看,机组和泵房结构的振动问题非常突出。当前主要的研究手段仍是采用模型试验的方法,着眼点仍集中在解决机组本身的振动问题。在现有大型水轮机组普遍存在水力振动的情况下,如何描述机组水力激振力的特性并表达为结构振动的振源,还有待研究。有的研究工作试图从数值模拟方面解决振源问题,但由于影响因素繁多且复杂,并具有随机性,因此离实际应用还有相当大的距离。

李同春教授及其团队针对目前泵站结构设计方法和理论中存在的一些不足及认识不清的问题,进行了一系列深入研究。对现行规范平面设计方法的合理性进行了分析,比较了二维分析与三维分析的差异,并得出了一些有参考价值的结论;开展了泵站结构设计中的有限元实用化研究,并开发完成了具有自主知识产权的大型泵站结构受力分析软件;对大型泵站



机组及结构振动响应进行了多种方法的联合预测,开发了大型泵站全流道流固耦合振动分析软件,提出了大型泵站橡胶垫减振措施。研究成果不仅对大型泵站的设计有直接指导作用,而且对水闸等类似水工建筑物具有很好的推广应用价值。

南水北调工程是我国具有战略意义的水资源优化配置工程,是缓解我国北方地区水资源短缺,实现水资源合理配置,保障经济社会可持续发展,全面建设小康社会的重大战略性基础设施。本书在理论探索的基础上,深入结合南水北调工程实例开展研究、验证,其成果丰富、符合实际。相信本书的出版,必将为南水北调工程提供强有力的技术支持,对保障泵站安全运行具有重要的现实意义。

中国工程院院士 陈厚群

2013年9月

前 言

水利的发展关系到国民经济和社会发展的全局。南水北调工程是我国具有战略意义的水资源优化配置工程,是缓解我国北方地区水资源短缺,实现水资源合理配置,保障经济社会可持续发展,全面建设小康社会的重大战略性基础设施。随着南水北调东线工程的逐步开展,一大批扬程低、流量大、运行时间长、结构复杂的泵站机组需要安装建设。根据《南水北调东线一期工程总体可行性研究报告》,东线一期工程主要建设内容包括新建 13 个梯级 21 座泵站、开挖疏浚有关输水河道以及沿线截污导流工程等,工程静态总投资约 266 亿元。南水北调东线工程战线长、项目多、规模大,泵站均为低扬程、大流量,其中,有 70% 的泵站工作扬程低于 5.0 m,有 7 座泵站为贯流泵装置,国内缺乏成熟的建设经验,技术难点多,且泵站年运行时间长达 5 000 小时以上,泵站运行可靠性要求高。

1997 年国家技术监督局和建设部颁布了由水利部主编的国家标准《泵站设计规范》,该规范在十多年的泵站设计中发挥了重要作用,但规范中的泵站结构受力分析方法具有一定的局限性。大型泵站泵房结构由壳、板、梁和块体结构组成,承受的外荷载通过底板等传递到地基当中,是典型的空腔结构,变形和应力分布较复杂。对于建设在软土地基中的泵站,还需考虑复杂的桩与土的相互作用问题。现行泵站设计规范规定:泵房底板、进、出水渠道、机墩、排架、吊车梁等主要结构,可根据工程实际情况,简化为平面问题计算,必要时可按空间结构进行计算。但规范中并没有给出空间结构分析的具体算法,因此目前泵房结构计算主要采用简化的“截条法”进行,即沿着水流方向截取单位宽度的底板简化为横向(垂直水流方向)弹性基础梁或框架进行计算,实质上是把空间问题简化为平面应变问题。有限单元法作为一种比较成熟的数值计算方法,已在结构应力变形分析计算中得到广泛应用。但在泵站结构分析中采用的计算网格、地基模拟范围、成果整理方式等的不同对计算结果均有较大影响,同时由于结构配筋设计依据的是截面内力,常规有限元方法得到的是单元高斯点的应力,因此有限元成果难以直接应用于工程设计。

随着机组单机容量的提高和建设规模的扩大,电站或泵站等水力机组的振动问题日益突出,振动机理的描述和结构振动响应的数值模拟成为国内外研究的热点和难点问题。作为一种与流动水体发生相互作用的旋转水力机械,泵站的机组在运行过程中不可避免地要产生振动,若振动超出一定的范围,就会直接影响到机组的安全稳定运行,缩短其检修周期和使用寿命,严重时还会引起引水管道和整个厂房结构的振动,导致被迫停机。从已经建成并投入运行的泵站情况来看,机组和厂房结构的振动问题非常突出,其水力振动和噪音普遍



偏大。

灯泡贯流式机组作为开发低水头资源的既经济又适用的主导机型,已在国内外广泛应用。但从已经建成并投入运行的泵站来看,机组和泵房结构的振动问题非常突出。当前主要的研究手段仍是采用模型试验的方法,着眼点仍集中在解决机组本身的振动问题。在现有大型水轮机组普遍存在水力振动的情况下,如何描述机组水力激振力的特性并表达为结构振动的振源,还有待研究。有的研究工作试图从数值模拟方面解决振源问题,但由于影响因素多且复杂,并具有随机性,因此离实际应用还有相当大的距离。

作为“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”——大型贯流泵关键技术与泵站联合调度优化中的一个子题,大型贯流泵泵站结构抗振安全度评价及优化设计主要解决大型贯流泵机组和泵房结构的振动安全问题,包括:泵站结构设计受力分析方法;考虑流固耦合振动的机组和泵房结构在泵站运行过程中的应力变形分析方法;泵站运行过程中机组和泵房结构振动安全监测方法;基于实测振动参数的大型贯流泵机组和泵房结构的应力变形分析方法;贯流泵机组和泵房结构的抗振优化设计方法;针对淮阴三站及蔺家坝等具体工程,进行机组和泵房结构的抗振优化设计和安全度评价。通过对大型泵站结构振动问题开展一系列的研究,开发相应的分析软件,研究水力、机组和泵房结构振动特性,分析考虑水流、机组、泵房结构及地基相互作用下机组和泵房结构的振动响应,进行优化设计,保证泵站稳定、安全和可靠的运行。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.2 研究进展	5
1.3 研究目的、内容及技术路线	10
1.4 主要创新点与关键技术	11
1.5 研究成果概要	12
第 2 章 大型泵房结构设计分析方法简介	14
2.1 概述	14
2.2 泵房结构主要部件简化分析方法	14
2.3 泵房底板简化分析方法	17
2.4 有限单元法	20
2.5 几种方法的分析比较	21
2.6 小结	21
第 3 章 基于大型泵房结构配筋设计需求的有限元内力分析	23
3.1 概述	23
3.2 板、梁、柱有限元分析基本原理	23
3.3 半无限地基上结构有限元分析的半解析法	29
3.4 有限元内力分析方法	33
3.5 大型泵房结构任意截面内力求解	35
3.6 小结	39
第 4 章 泵房结构设计分析软件开发	40
4.1 概述	40
4.2 软件开发目标	40
4.3 使用说明	43
4.4 小结	55
第 5 章 非定常不可压缩湍流数值模拟	56
5.1 概述	56
5.2 ADINA 软件介绍	56
5.3 水力机械中三维非定常湍流数值计算	57
5.4 灯泡贯流泵站水轮机三维非定常湍流数值模拟	62
5.5 小结	74
第 6 章 不可压缩湍流与结构动力相互作用分析	75
6.1 概述	75



6.2	不可压缩湍流的有限元离散	76
6.3	结构的有限元离散格式	79
6.4	湍流-结构耦合方程的时域求解	83
6.5	算例分析	86
6.6	淮阴三站流固耦合动力时程分析	89
6.7	小结	97
第7章	大型贯流泵流固耦合振动分析软件开发	98
7.1	概述	98
7.2	基本理论	98
7.3	关键求解技术	105
7.4	数值离散	110
7.5	小结	113
第8章	大型贯流泵房结构振动响应联合预测	114
8.1	概述	114
8.2	大型贯流泵房结构振动振源分析	114
8.3	共振可能性判别的基本分析方法	115
8.4	随机振动分析理论	125
8.5	泵房振动安全评价标准探讨	139
8.6	小结	141
第9章	淮阴三站结构分析与振动安全度评价	142
9.1	概述	142
9.2	工程概况	142
9.3	泵站二维与三维模型的计算结果对比	143
9.4	联合预测振动安全度评价	148
9.5	小结	154
第10章	台儿庄泵站结构有限元内力分析	155
10.1	概述	155
10.2	工程概况	155
10.3	设计参数及荷载计算	156
10.4	有限元网格计算模型	158
10.5	主要计算成果	158
10.6	小结	163
第11章	大型灯泡贯流泵房的橡胶垫减振措施研究	164
11.1	概述	164
11.2	橡胶减震(振)器在工程中的应用	164
11.3	隔振基本原理	166
11.4	灯泡贯流泵房的减振设计	167
11.5	工程应用	170
11.6	小结	172



第 12 章 考虑橡胶垫减振的泵房非线性振动方法分析	174
12.1 概述	174
12.2 橡胶垫滞后非线性模型	174
12.3 非线性动力方程的求解方法	178
12.4 考虑橡胶垫减振的淮阴三站泵房非线性动力分析	182
12.5 小结	184
第 13 章 总结与展望	185
13.1 研究总结	185
13.2 展望	186
参考文献	187

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及研究意义

水利是国民经济的基础,而泵站是水利工程的重要组成部分。作为重要的工程设施,泵站在解决当今干旱缺水、洪涝灾害、水环境恶化这三大水资源问题中起着其他水利工程不可替代的作用。特别是大型泵站承担着区域性的调水、供水、灌溉和除涝的重任,在我国国民经济可持续发展和全面建设小康社会中占有非常重要的地位。

1.1.1 国内泵站的建设与大型灯泡贯流泵站的关键技术问题

随着科学技术的进步和工农业生产的发展,我国泵站工程得到了很大的发展。中国现有大、中、小型各类固定式排灌泵站 50 余万座,登记在册并实行正规管理的泵站有 33.5 万座,装机总功率 2 373.5 万 kW,占机电排灌总动力的 30%。属于大型泵站管理单位管理的泵站有 383 处、2 663 座,装机总台数 1.636 万台,装机总功率 448.88 万 kW,其中单座泵站达到大型泵站标准的有 158 座、2 514 台,装机总功率 153.9 万 kW;中型泵站有 2 384 处、4 895 座,装机总功率 618 万 kW。这些提水设施在防洪除涝、抗旱减灾、保障人民生命财产安全、保护城乡建设,以及在解决一些地区工业生产、城乡生活用水等方面发挥了极其重要的作用。

我国疆域辽阔、地形复杂,各地区自然条件的差异使得泵站的结构形式和所起的作用都有所不同。根据泵站结构和功能的不同,我国泵站工程基本上包括下列几种类型:跨流域调水泵站、抽水蓄能泵(电)站、机电排灌泵站、水轮泵站、大型潜水电泵站^[1]。大家熟知的引黄(河)济青(岛)工程,东(江)一深(圳)供水工程,引滦入津工程以及举世瞩目的南水北调工程都是跨流域调水工程,其中南水北调工程,整个规划宏伟浩大,分为东线、中线、西线三项工程。工程实施后,将从根本上解决我国北方的水资源短缺问题。2002 年,国务院批准《南水北调工程总体规划》,同年 12 月 27 日,江苏境内三阳河潼河宝应站工程和山东境内济平干渠工程开工建设,这标志着南水北调东线工程由规划阶段转为实施阶段。东线工程规划分三期实施:一期工程主要向江苏和山东两省供水,由已建成的江都站抽取长江水 500 m³/s 北上,送至黄河以南地区,新建和扩建泵站 21 座,目前各个调水单项工程仍在紧张有序地建设中;二期工程供水范围扩大至河北、天津,工程规模扩大到抽江水 600 m³/s,过黄河 100 m³/s,新建泵站 13 座;三期工程增加北调水量,以满足供水范围内 2030 年国民经济发展水平对水的需求,工程规模扩大到抽江水 800 m³/s,过黄河 200 m³/s,新建泵站 17 座。

东线一期工程新建和扩建的 21 座泵站中,扬程低于 5.0 m 的就有 11 座,这些大型泵站



的特点是扬程低、流量大、年运行时间长。在低扬程下,贯流式机组以其水力损失小、装置效率高而成为首选。贯流式机组包括轴伸贯流式、竖井贯流式、灯泡贯流式和全贯流式,许多专家对机组选型做了深入的研究。张仁田^[2]对不同结构型式的贯流式机组结构型式、水力性能和技术经济指标作了详细的比较分析;刘军等^[3]对贯流泵在我国的发展状况给出了全新的认识,并提出了低扬程泵站机组选型建议;谢伟东等^[4]也对东线一期低扬程泵站作了机组选型研究。大量的模型试验证明,灯泡贯流泵比其他几种型式的机组水力性能要好,因此,在一期新建的泵站中,江苏境内有 7 座泵站选用灯泡贯流泵。

到目前为止,国内外积累的关于灯泡贯流泵设计、加工、制造、安装及运行的经验都非常有限。国内建造最早的大型灯泡贯流泵站是江苏省的淮安三站,该站安装了 2 台直径为 3 192 mm 的直联后置灯泡贯流泵。由于淮安三站是根据灯泡式水轮发电机组结构设计制造的,设计过程中对水泵结构特点认识不够,在设计、结构和性能等方面均未能达到预期的指标,效率不高、振动问题突出,从而影响了灯泡贯流泵的进一步推广应用。在西方发达国家,采用大型灯泡贯流泵的泵站也不多,据公开报道,仅有荷兰的 IJmuiden 泵站安装了直径 3 940 mm 的大型灯泡贯流泵,采用永磁电动机和变频调节技术,泵站的装置效率较高,结构也较新颖。另外,日本的新川河口泵站安装了直径 4 200 mm 的竖井式贯流泵^[5],采用齿轮箱减速传动和叶片液压全调节。

国内在 20 世纪 70 年代开始为南水北调工程建设开展贯流泵的研究,自 20 世纪 90 年代以来,随着潜水电机密封技术和绝缘技术的进步,中小型潜水贯流泵有了较多的应用,但对贯流泵装置的水力性能认识不足。模型试验和现场测试表明,常用的井筒式潜水贯流泵装置效率普遍较低,只有 50% 左右。“八五”期间,水利部安排了轴伸式和灯泡式贯流泵装置的研究,取得了一批水力性能较优的水力模型,但对贯流泵装置结构方面考虑较少,工程上对贯流泵装置的可靠性仍存在疑虑,除了淮安三站外,一直没有在大型泵站上推广应用。“九五”和“十五”期间,水利部均立项对灯泡式贯流泵装置进行了研究,进一步强化了泵装置的概念,注重了泵装置各组成部分的相互影响。研究过程中开始采用 CFD 技术,但贯流泵装置的叶轮和流道设计主要基于一维流动理论的升力法和平均流速法,满足具体泵站应用要求的贯流泵装置的设计仍依赖模型试验优选。1999 年,结合淮河入海水道穿堤泵站的建设,扬州大学和江苏省水利勘测设计研究院有限公司对单向和双向灯泡贯流泵装置开展了较为全面的数值仿真和试验研究工作,发现灯泡体支撑结构对贯流泵装置性能有明显的影响,在充分考虑支撑结构时,贯流泵装置效率很难突破 75%。此后,大型灯泡贯流泵站关键技术研究又被列为“十一五”国家科技攻关课题,其研究内容主要有:

- (1) 大型贯流泵机组结构关键技术;
- (2) 大型贯流泵泵站结构抗振安全度评价及优化设计;
- (3) 泵站选型合理性评价体系;
- (4) 贯流泵装置水力性能优化理论与应用;
- (5) 灯泡式贯流泵引进方式和大泵检测技术;
- (6) 南水北调东线梯级泵站(群)优化调度方法。

1.1.2 泵站振动危害和振源分析

机组和厂房的振动是泵站和水电站运行中最为常见的问题,剧烈振动会影响到泵站或

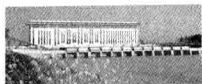


水电站的安全可靠运行。水电站中水力机组振动和稳定性问题早已引起人们的关注,国外的大古力、塔贝拉和古里电站机组的振动问题非常突出,我国已投产的装备大型混流式水轮机的电站,如岩滩、二滩、小浪底、五强溪、隔河岩、李家峡、大朝山、鲁布革等水电站,都出现了不同程度的水力机组振动问题,严重影响了电站功率的发挥和经济效益,有的甚至还引起厂房结构发生较剧烈的振动,导致结构局部损坏,影响整个电站的安全、稳定和高效运行^[6]。例如岩滩电站由于机组运行时引发的楼板强烈振动,使保护柜压板松动掉落引起误动,导致机组事故停机,严重危及电厂的安全运行。三峡左岸电厂 6F 机组在过速试验的关机过程中,出现了强烈的小开度工况异常振动现象^[7]。由于泵站的运用较为广泛,泵站运行中机组和结构的振动问题更为常见,关于泵站振动问题的文献很多,但多为中小型泵站,研究内容主要包括振动现象、原因分析、减振措施、防治对策等等。随着南水北调等一些重大调水工程的建设,大型泵站的振动问题引起了人们的广泛关注。

淮安三站是国内首个大型灯泡贯流泵站,1997 年建成投运后,机组和泵房存在振动较为剧烈的问题^[8],一定程度上影响了泵站的正常运行。对淮安三站的测试结果表明,振动较大的工况发生在发电工况两台机组同时运行时,2[#] 机组水导处加速度值(有效值)达到最大,为 0.17 m/s^2 ,径向振幅峰值为 0.710 mm ,振动主频率为 64.5 Hz ,其径向振幅峰值大大超过了规范的允许值(0.12 mm)。根据测试分析及运行观察,发电工况由于水头较低,机组处于较小负荷运行,抽水工况机组处于较大负荷运行。经过测试发现,发电工况机组振动大于抽水工况,说明引起机组振动的主要原因是水力激振。该工况下运行水流相对速度与叶片形成较大的负冲角,水流对叶片绕流条件很差,产生局部脱流,最后引起叶片汽蚀现象,汽蚀的产生必然伴随着水流流动不稳定,引起叶轮室内的压力脉动,最后导致机组振动。

皂河泵站位于江苏省宿迁市皂河镇北,装有上海水泵厂生产的 6HL-70 型立式全调节混流泵,配上海电机厂生产的 TL7000-80/7400 型立式同步电动机 2 台套,装机容量 $14\,000 \text{ kW}$,设计扬程 5.96 m ,设计流量 $195 \text{ m}^3/\text{s}$ 。主泵叶轮直径 $5\,700 \text{ mm}$,设计流量 $97.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。主电机单机容量 $7\,000 \text{ kW}$,电压 10 kV ,转速 75 r/min ,采用半伞型结构、液压减载启动装置、闭路循环空气冷却、可控硅励磁等。目前存在水泵老化、机组振动、噪声超标,水泵汽蚀严重、出水流量不足等问题,影响了该站效益的发挥^[9]。对皂河泵站振动进行现场监测,由测试结果可以看出,水泵机组振动主要发生在机组的转频上(1.25 Hz),振动主要是由轴系不平衡引起的。在 3 种工况下也都存在 2 倍频(2.5 Hz),其幅值相对转频幅值较小且变化不大,说明水泵轴系存在轻微的不对中故障。水泵在 -16° 工况运行时,机组振动比较大,出现 3 倍频、4 倍频,但是机组转频的振动仍为主要成分。

江都一、二站在进出口水位差 6.5 m 以上启动时即出现强烈振动不止的现象,无法进入稳定运行,只有被迫停机^[10]。此时虹吸管中负压基本形成,但距虹吸满管流时负压值约低 2 m 水柱,相应流量下的进出流道水力损失约 0.7 m ,计算水泵工作扬程约 9 m 。由于管中存在不易排除的残余空气囊,管中负压波动达 4.64 m ,引起水泵实际工作扬程波动达 3.8 m ,水泵扬程和流量大幅度的变化,将使虹吸管中本来就不易排除的残余空气囊更难排除,这就是虹吸式轴流泵站启动过程中水泵产生强烈振动且振动长期不止的原因。在江都站,这种振动如果超过 15 min 还不停止,根据经验,若上下游水位差不改变,振动会一直持续下去,只能强迫停机。据了解,湖南岩汪湖等泵站在启动中这种振动长达 100 min 以上仍不



停止。

YKSL2300-20/2150-1 型立式异步电动机由湘潭电机厂生产,与上海 KSB 公司 SEZ2200-187 型大型立式混流泵配套,1997 年首次应用在扬州第二发电有限公司的循环供水泵站上^[11]。电动机额定电压 10 000 V,转速 295 r/min,定子 20 极,转子为双鼠笼结构,水冷全封闭结构,上轴承由平面推力轴承、导向轴承组成,下轴承为滚柱轴承,2[#] 机组从安装开始就存在缺陷,机组振动较大,电机底座水平方向的振动在 0.03 mm 左右,且轴承甩油严重。随着运行时间的增加,振动逐渐增大,2002 年 6 月测得电机底座水平方向上的振动在 0.045 mm 左右。杭州小砾山泵站在机组运行过程中,操作人员在电机层楼板上有明显振感,特别是在南泵房 5[#] 机位置,管理人员十分关心泵站机组振动对泵房结构的影响,对振动进行了测试和分析,发现南泵房 5[#] 机楼板的水平振动位移最大值达 0.221 3 mm,垂直振动位移最大值达 0.166 6 mm,超过了规范允许标准。埃及广泛用于新区开垦的轴流泵站亦存在剧烈振动现象,振动造成钢筋混凝土结构的基础出现问题^[12];在为巴格达城市供水的泵站中,也出现了引起广泛关注的剧烈振动问题^[13]。

由以上工程实例可见,泵站振动问题日益突出,给泵站安全带来的威胁不容忽视。振动所带来的危害主要体现在:振动直接造成机组不能运行的事故;泵的振动引起电机振动,造成机毁人伤的恶性事故;振动使各连接部件松动,造成基础裂纹或电机损坏;振动造成机组轴承等零部件损坏;振动使与水泵连接的管件或阀门松动,造成管件、阀门裂纹或损坏;水泵振动还会产生噪声,严重时会导致工作人员心情烦躁、疲劳、反应迟钝,容易发生事故;振动还会使机组效率降低,扬程和流量下降。

研究泵站的振动问题必须先找出振动的根源所在,真正认识了振动产生的机理才可能对症下药,采取有效的措施来减缓振动。然而,泵站振动问题十分复杂,原因众多,通过对实际泵站工程振动现象的分析和总结,一般认为泵站振动主要包括机械、电磁和水力三个方面原因,其中水力振动是泵站厂房更为突出的振源。

(1) 机械方面的原因

机械方面的振动主要是由于机组的生产、安装质量较差引起的,例如,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,会产生水平离心力,使机组轴系统发生弓状回旋并引起厂房结构振动;机组转动部分与静止部分碰撞以及轴承间隙过大或主轴过细,都会造成机组的振动。

(2) 电磁方面的原因

转子磁极线圈层间短路、转子中心线与定子中心线不吻合、定子与转子间的空气隙不均匀、定子三相电流不稳定、定子铁芯合缝不严以及磁极的次序错误等,均可造成磁路系统的不对称,出现不平衡的磁拉力而产生振动。

(3) 水力方面的原因

水力方面的原因是引起机组振动和结构振动的主要因素。由于涡流、涡带、水流脉动以及汽蚀等引起的振动情况复杂,目前尚难从理论上加以确切分析。从定性上可初步认为:一是由于过流部件中流速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的压力脉动,如叶片尾流的卡门涡列,叶片脱流的涡旋,尾水管的低频涡带等;三是出口水流与导叶的水力干涉,这是产生压力脉动的主要原因,可直接诱发大部件和厂房振动^[14];四是水力过渡过程引起的压力波动。灯泡贯流泵站的进、出水口流道一般都



比较平顺,所以流速分布不均带来的压力脉动相对不大。据淮安三站现场工作人员反映,在机组运行时,转轮附近会产生较大的振动和轰鸣声,检修时发现转轮叶片汽蚀现象严重,叶片根部有裂纹,由此可以判断,在灯泡贯流机组中,转轮和固定导叶出水边脱流形成的卡门涡是水力振动的主要原因。

1.2 研究进展

1.2.1 泵站结构设计分析方法研究进展

泵站结构主要包括泵站底板,进、出水流动,机墩,排架,吊车梁等。从严格意义上讲,泵站结构是一个空间结构,只要某一局部受到荷载的作用,整个体系都要受到影响而产生一定的内力,因此要分析泵站结构的受力情况是一个比较复杂的问题。为了简化结构计算,通常将复杂的空间结构分解为若干平面结构进行分析计算,如对底板、侧墙简化为双向板进行计算。但是对于复杂结构来说,简化过程却难以把握。在这种情况下,工程设计往往只进行一些近似的分析,然后依靠设计者的经验、已建工程的类比、模型试验和适当加大安全系数等方法来保证工程的安全。这不仅会导致材料的浪费,甚至有可能使杆件系统遭到破坏。

国内泵站设计基本是仍遵从规范推荐的设计方法,即泵房底板,进、出水流动,机墩,排架,吊车梁等主要结构,可根据工程实际情况,简化为平面问题进行计算。必要时,可按空间结构进行计算。泵房底板应力可根据受力条件和结构支承形式等情况,按弹性地基上的板、梁或框架结构进行计算。肘型、钟型进水流道和直管式、屈膝式、猫背式、虹吸式出水流动道的应力,可根据各自的结构布置、断面形状和作用荷载等情况,按单孔或多孔框架结构进行计算。若流动壁与泵房墩墙联为一整体结构,且截面尺寸又较大时,计算中应考虑其厚度的影响。

已经有一些研究表明,对于大型泵站这种在几何上与荷载分布都比较复杂的空间结构,用平面算法进行结构设计是不妥当的,不同学者从不同的方面指出了目前结构设计方法存在的一些问题,如林毅峰^[15]对这种简化存在的问题进行了分析,并针对太浦河泵应用有限单元法对底板进行了空间三维和简化的平面二维结构分析,分析中考虑了底板、基础、墩墙和顶板的共同作用。其计算结果表明:垂直流向的应力和内力,平面解和空间解的数值和分布都存在很大差异;廊道部位底板平面解是上压下拉的正弯矩,而空间解是上拉下压的负弯矩;在底板流动跨中部位,平面解结果偏于安全,但在墩墙部位,平面解结果可能偏小。姚伟民^[16]对泵房地下部分结构采用有限元法和单元板法进行了比较,得出的弹性支承底板模型的有限元法的计算结果较单元板法的有限元计算结果有不同程度的减少,尤其是在壁板与底板连接的中部铅直向弯矩折减较大。陈能玉等^[17]对引黄工程总干线三级泵站主厂房采用空间有限元进行了分析,认为分析结果对设计配筋起到了很大的指导作用,有限元分析方法代替了传统的物理模型试验,节省了大量的人力、财力。这些研究结果表明简化平面分析结果与空间有限元分析结果是有差异的,但哪些部位差异较大,哪些部位简化平面分析结果可以采用目前还没有定论。更重要的是,至今还没有系统地提出解决这些问题的分析方法。



1.2.2 泵站振动的分析方法和抗振安全评价研究进展

灯泡贯流机组作为开发低水头资源的既经济又适用的主导机型,已在国内外广泛应用。但从已经建成并投入运行的泵站来看,机组和泵房结构的振动问题非常突出,其水力振动和噪音普遍偏大,如何减少机组和泵房结构的振动,是设计人员应当综合考虑的问题。在现有大型泵站机组(或水轮机组)普遍存在水力振动的情况下,如何描述机组水力激振力的特性并表达为结构振动的振源,还有待研究。有的研究工作试图从数值模拟方面解决振源问题,但由于影响因素多且复杂,因此离实际应用还有相当大的距离。随着南水北调工程的开工,一批大型泵站水泵机组即将投入长期运行,其安全可靠性能尤显重要。安全可靠性能已成为衡量大型水泵机组质量的重要指标。水泵机组工作安全可靠性能包括机组工作水头和出力的波动、压力脉动、机组支承部分的振动、机组转动部分的振摆,以及水泵的空蚀性能、机组内部不正常的噪声等^[18]。已有研究成果中针对水轮机的研究较多,而对泵站的研究相对较少。目前对于泵站振动问题的研究,主要有以下几种手段:模型试验、原型观测和数值计算。

模型试验仍是目前泵站振动的主要研究手段。由于泵站流道内水流的复杂性,以及计算流体力学理论的不完善,数值模拟结果的可靠性和准确性还不能满足工程要求,模型试验仍然是目前研究泵站水轮机组特性的最重要工具。泵站模型试验的研究内容主要是以提高泵站机组装置性能为目标,对机组叶片、导叶、支撑结构、流道等各项参数进行优化,考察装置的汽蚀情况,测试水流的脉动压力特性,研究机组的稳定性问题。另外,数值模拟的计算结果需要模型试验来检验,其理论也需要模型试验来完善。随着大型灯泡贯流泵的广泛应用,模型的稳定性试验也备受关注,同时也获得一些有意义的研究成果^[19-26]。

由于大型水泵机组工况复杂,振动部位广泛,影响因素较多,表现为不同形式的振动,因此,对振动的原型监测可以成为研究水泵机组安全可靠性的主要内容。虽然设计阶段对安全可靠性能进行了控制和分析,并且通过模型试验进行了检验和修正,但由于对水泵流道内的水力脉动规律尚不十分清楚,模型和真机之间的某些关系也不能完全模拟,因此在真机上仍然时常出现稳定性问题。现场监测包括测点的选择和布置、信号的采集和分析处理以及振动故障诊断,通过现场监测分析,可以针对振动原因及时采取相应的工程措施^[27-29]。现场试验还可以指导模型试验和数值计算,如原型和模型之间的各参数的相似率问题、数值计算方法的合理性、数值模型的修正等。

数值计算分析方法主要包括共振校核法、拟静力法、谐响应法、随机振动频谱分析方法^[30]和动力时程法,这些方法已经应用于水电站厂房的振动分析^[31, 32],但在泵房振动计算中很少见到,尤其对于研究较少的大型灯泡贯流泵房。按照规范规定,抗振设计通常的做法是通过求解简化结构的自振特性,与测得的水流脉动压力的主频相对比,来定性判别机组是否会发生共振,从而判断机组振动安全性,这就是通常所说的共振校核法,它是泵站设计人员在抗振设计时采用的方法,这一方法虽然简单,但是相当粗略,不能给出机组和结构振动响应的具体大小和分布;拟静力法是将各个动荷载幅值乘以动力系数后作为静荷载加到结构上,并将相应的静力计算结果当作动力响应幅值,在拟静力法中,考虑到动力系数的理论计算受一些假定的限制,不甚精确,三个方向的动力系数一般取同一个值,取值为安全起见往往偏大,这显然与实际情况不符,以往在缺少足够的实测和统计资料的情况下,只能采用



拟静力法对厂房结构动力响应可能出现的最大值进行粗略的计算;对泵站结构的振动产生重要影响的机组动荷载主要与机组的转频有关,可将其视为简谐荷载,这样泵站结构的动力响应计算就可以按谐响应分析来处理,采用谐响应分析方法时不用考虑各个方向的动力系数,也不必考虑自重、静水压力等静力荷载作用,其计算结果为结构的动位移和动应力;随机振动方法是对厂家提供或模型试验得到的流道内典型点的脉动压力时程曲线进行频谱特性分析,将测点水流脉动压力转换为有限元计算的结点荷载,由随机振动计算方法定量求解机组运行过程中流道内水体引起的流激振动动力响应。动力时程法基本上是将脉动水压力作为已知的外荷载,按照常规结构动力学方法求解结构响应。这两种定量的方法虽然可以给出响应的具体值,但忽略了泵站工程中广泛存在的流体和固体间强烈的相互作用,不能够反映实际情况。考虑非定常湍流与结构相互作用的泵房振动分析能够更合理地预测泵房的振动响应,是目前研究的热点,也是极具挑战性的难点。

1.2.3 水力机械计算流体动力学的研究进展

水泵内部的真实流动是三维、非定常、不可压缩、有旋、黏性湍流流动,其流动规律可用 Navier-Stokes 方程来描述。随着计算机技术和计算方法的发展,水泵叶轮内部流动计算取得了很大的进步,从二维势流、三维势流到准三维方法,三维无黏性欧拉法直至三维黏性法^[33, 34]。对水力机械转轮内部三维黏性流场的数值研究, Vu 的工作具有开创性^[35],他成功地将三维黏性流场数值模拟应用于水轮机过流部件的水流运动分析^[36-38]。Song, Sabourin, Ventikos 等^[39-44]分别对尾水管、复合尾水管和轴流式水轮机的整个装置进行了三维湍流计算。经过多年的发展,国外在这方面的研究与应用已较为成熟,并到了实用阶段,不少软件可以用来分析转轮在不同工况包括偏离最优工况时的流量、效率和功率等特性,从而获得所设计转轮的综合特性图,预测其运行特性。另一方面,通过对不同设计方案比较,可以得出一些指导性的设计经验,进一步提高效率。在国内,20 世纪 90 年代中后期我国水力机械研究领域的学者开始涉足三维黏性流场分析研究。曹树良^[45]、吴玉林^[46]、高忠信^[47]基于 $k-\epsilon$ 湍流模型和压力修正算法对混流式模型叶轮内部的流动进行了紊流数值模拟,并预估了水轮机水力效率。任静^[48]基于 N-S 方程和标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟了轴流式水轮机叶轮内的三维紊流场,采用 CAD-CFD 系统,依据三维紊流场的预测结果优化叶轮内相关的几何参数,使得叶轮内的流态接近理想流态,从而保证优化叶轮的良好性能。周凌九^[49, 50]研究了混流式转轮内流场与外特性间的联系。从数值计算结果可以得出转轮的最优效率区的位置和形状与进口冲角和出口环量密切相关,尾水管的压力脉动与转轮出口环量的大小密切联系,转轮进口压力脉动可能与进口处该旋涡区的不稳定性有关。刘胜柱^[51]结合龙滩水电站水轮机参数优化及稳定性研究项目,通过 CFD 分析,对模型水轮机的蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮、尾水管进行了全面的优化设计,经过优化的转轮延迟了小负荷区涡带和叶片正背面脱流的产生。刘树红等^[52]对三峡水轮机进行了三维非定常湍流计算,得到了水轮机的非定常流场,预测了各个部位的脉动压力。许多学者对离心泵过流部件的三维流动进行了数值研究^[53-55],用数值模拟方法研究泵内过流部件流场已成为改进和优化泵叶轮和其他过流部件设计的重要手段。郭鹏程等^[56]应用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型和壁面函数法对离心水泵叶轮内部的三维紊流流动进行了雷诺平均 N-S 方程的数值计算与分析,分析了