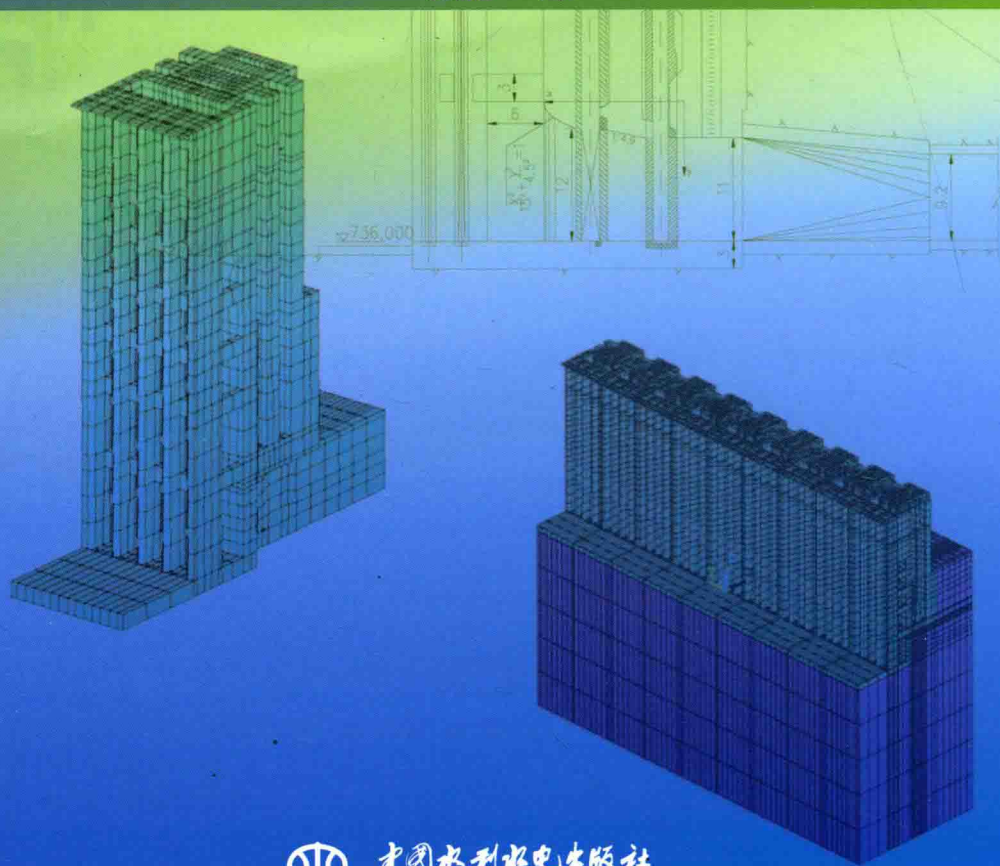


水电站薄壁式分层取水口 结构动力响应评价

黄虎 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电站薄壁式分层取水口 结构动力响应评价

黄虎 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书按现行相关国家标准、行业标准和最新规范编写,主要讲述水电站进水塔结构动力特性方面的相关研究内容,以动荷载作用下分层取水进水塔的结构特征为中心,以结构和水体之间的相互作用关系为基础,采用不同的研究方法,重点研究了大型水电站薄壁式高耸进水塔结构在动荷载作用下的响应特性,分析水体与薄壁式结构之间的相互作用关系,并针对不同的问题给出了相关的解决方法。全书共分6章,内容包括绪论、薄壁式进水塔静力分析、薄壁式进水塔动力分析、薄壁式进水塔群响应分析、薄壁式进水塔开裂及破坏模式研究以及流激振动作用下进水塔结构响应研究。其中,流固耦合作用下进水塔的动力特性研究、地震行波效应对整体塔群的影响以及进水塔破坏模式的研究等内容可为大型水电站设计提供相关的依据。

本书可作为高等学校水利水电工程以及结构抗震等相关专业的用书,也可供相关大专院校本科生、研究生、科研院所及水电行业设计研究院等有关专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水电站薄壁式分层取水口结构动力响应评价 / 黄虎
著. — 北京:中国水利水电出版社,2015.8
ISBN 978-7-5170-3557-2

I. ①水… II. ①黄… III. ①水力发电站—薄壁结构
—分层结构—进水塔—结构动力分析 IV. ①TV732.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第201972号

书 名	水电站薄壁式分层取水口结构动力响应评价
作 者	黄虎 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	北京美精达印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	39.00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

我国是一个多地震的国家，汶川特大地震的影响波及全国，其震中及周边地区震害十分严重，部分水利水电工程遭受到严重损失。这也对我国的水电工程建设提出了严峻的挑战，高烈度地区能否进行大规模水电开发，成为了一个焦点问题。现行的抗震规范设计已经不能完全满足大型结构抗震设计的要求，抗震防灾研究成为水电领域前沿性的重要研究课题，抗震安全成为工程建设的关键。

本书以动荷载作用下分层取水结构稳定性评价研究为中心，以结构和水体之间的相互作用关系为基础，重点研究了高耸进水塔结构在动荷载作用下的响应特性，分析水体与结构之间的相互作用关系，并针对不同的问题渴望寻找合适的解决方法。

本书在编写过程中，结合水利水电工程的相关规范及工程实际设计方案，总结多年来取水结构的相关资料，在此基础上对大型水电站的分层取水结构进行了全面的分析，结合当前前沿的研究方法对其进行研究。全书共分为6章，内容包括绪论、薄壁式进水塔静力分析、薄壁式进水塔动力分析、薄壁式进水塔群响应分析、薄壁式进水塔开裂及破坏模式研究、流激振动作用下进水塔结构响应研究。

本书可供水利水电工程专业稳定设计、规划与科研以及大专院校本科生、研究生与科研院所等有关专业技术人员参考使用。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请读者给予批评指正。

编者

2015年6月26日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及问题的提出	1
1.2 研究进展和现状	2
1.3 本书主要内容	6
参考文献	7
第 2 章 薄壁式进水塔静力分析	8
2.1 计算条件及参数	8
2.2 静力计算结果及分析	11
2.3 小结	19
参考文献	19
第 3 章 薄壁式进水塔动力分析	20
3.1 流体-结构的相互作用	20
3.2 流固耦合振动理论	22
3.3 基于流固耦合理论的进水塔结构动力分析	30
3.4 小结	39
参考文献	39
第 4 章 薄壁式进水塔群响应分析	41
4.1 结构地震反应分析方法	42
4.2 接触问题有限元基本原理	46
4.3 取水口整体塔群自振特性分析	51
4.4 考虑地震行波效应下的进水塔动力响应	58
4.5 小结	122
参考文献	123
第 5 章 薄壁式进水塔开裂及破坏模式研究	125
5.1 塔式取水口的结构特点	125
5.2 计算理论及研究方法	126
5.3 进水塔裂缝开展研究	134

5.4 塔体的破坏模式研究	140
5.5 小结	146
参考文献	146
第 6 章 流激振动作用下进水塔结构响应研究	148
6.1 流激振动的计算分析方法	148
6.2 计算模型及试验结果	156
6.3 基于随机振动功率谱法的流激振动计算	159
6.4 基于时程法的流激振动计算	177
6.5 小结	193
参考文献	193

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及问题的提出

随着科技的高速发展,地球资源的极大利用,资源已成为不可替代的产品,由于 20 世纪工业发展对能源的无节制使用,能源的占有成为每个国家的利益目标。我国物产丰富、能源分布广泛,特别是水电能源居世界前列,水电资源作为一种洁净能源对于促进我国国民经济发展具有重大的意义。但是,随着水电开发事业的快速发展,水电开发也带来了一些环境和生态问题,特别是对河流的原生态变化产生了不利影响。水电开发的环境问题及生态影响问题已引起人们和相关主管部门的极大关注,2005 年底由国家环保总局组织各主要科研机构和工程设计单位对水电开发中的主要环境问题进行了技术研讨,并发布了《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)》,其中对水库水温垂向分层研究技术方法进行了政策性引导。当前我国在水利水电工程建设开发中,把水库水温作为重点研究问题,同时在减缓下泄低温水方面开展多层进水口取水、叠梁门表层取水等分层取水措施的研究。

对于大型水电站的取水口结构,以塔式取水口较多,为了更好地满足下游河道的水温要求,一般采用设置分层取水口或采用叠梁门方式进行取水。对于塔式取水口来说,多数为高耸的独立结构且长期处于水下。为了保护水轮机不受水中漂浮物或潜移物的损伤,一般在闸室前设置拦污栅及拦污栅墩;为了保证拦污栅墩的稳定性,将相邻的拦污栅墩通过连系梁连接起来,组成结构复杂的混凝土框架结构;而对于闸室结构,由于闸门运行的需要,闸室内部往往设计成封闭式薄壁混凝土结构。在正常情况下,塔体内外均有水体包围,一般情况下水深较大,则地震时闸室内部水体可能产生晃动,从而造成对结构的影响增大,特别是对于塔体结构的上部,可能存在明显的动力放大效应。以往对进水塔的研究较少,而且研究方法较简单,一般采用简单的静力计算方法或简单的有限元数值方法,水体对结构的作用采用附加质量方法等效代替,这种方法忽略了结构-水耦合振动的影响,假定结构为刚性,忽略了水体晃动作用以及结构与水体之间的相互作用。实际上在受到地面运动和动水压力的作用时水中结构会产生变形,结构的变形反过来又改变水区域的边界条件,影响结构面动水压力的分布,结构和水体相互间是一种耦合关系。因此,在分析水中结构与水体的相互作用时,应该考虑结构-水体相互作用。对于长期位于水下的高耸进水塔结构而言,对于其特殊的封闭式箱式或筒式结构,高宽比较大,将其作为刚性结构而采用附加质量的方法等效模拟其与水体的相互作用显然存在一定的局限性。作为设计的一部分,结构在地震发生时能够承受多大的荷载,最终导致什么样的破坏方式,已经成为设计中不得不考虑的一个问题。然而,由于实测资料和实例的缺乏,数值模拟成为研究该问

题的一种最方便快捷的方法,通过合理的研究方式可以为设计提供一定的依据。多年以来,结构在荷载下的响应一直是工程界的研究重点,特别对于水中结构来说,由于水体的存在导致这种研究复杂化,不仅仅要考虑单个结构在单一荷载下的响应方式,还要综合考虑多个结构的相互作用以及外部多种荷载作用下结构的反应方式,这使得对地震作用下水中结构的研究更加复杂化。

进水塔作为水电站的取水结构,其安全性对整个水电站的正常运行有很大影响,取水条件的好坏、结构的安全稳定性等直接影响水电站的发电效益;同时,还对下游河道的生态等存在较大的影响。为了满足正常发电和下游用水要求,就必须在设计阶段综合考虑各种因素,使结构设计达到最优,使各种最不利因素的影响降为最低。这就要求我们对其可能存在的各种不利情况进行研究,从中寻求不利因素,避免不利因素造成的最大危害。

1.2 研究进展和现状

1.2.1 分层取水研究现状

近年来,随着人们环保意识的增强,水库环境问题成为水电界的重点关注对象,特别是高坝大库的建立对下游河道生态、下游农业灌溉等的影响问题,促使国内外研究者对水库水温分层对下游河道的影响给予关注。水库库区水温结构分布形式复杂,对于特大型水库和大型水库而言,水库水温表现为明显的三维空间结构分布特点。由于水库水温在垂向的分层会对水体水质、下游河道生态以及下游农业灌溉产生重要影响,因此,特大型水库和大型水库将水温的垂向分层问题作为重点问题进行研究。

从 20 世纪 30 年代起,欧洲一些国家就开始重视水库的水温和水质研究,并进行了水温的实地观测分析。而美国在水温数学模型的建立和应用方面一直处于领先地位;欧洲一些国家在现场实验方面取得了一定的研究成果。到了 70 年以后,国外水库水温研究进入了高峰期。

从 20 世纪 50 年代中期开始,我国开始进行水库水温观测,60 年代开始在水库水温特性的分析方面作出了相应的研究工作,70 年代一些生产单位在水库水温估算方面取得了一些成果,进入 80 年代后,水库水温研究工作得到了不断深入和扩大,并取得了众多实践经验和研究成果。

由于建坝后大中型水库水深加大,垂向温度分布呈 3 个层次:上层温度较高称为温上层;下层温度较低称为深水层;中间的过渡段称为温跃层。冬季表面水温不高,没有显著的温跃层;夏季水面温度较高,温跃层比较显著。深水层中温度低、溶解氧含量低,同时二氧化碳浓度增加,形成还原环境。如果采用单一的取水方式长期从库区深层取水,必然会对下游农业生产和生态环境带来许多不利的影响。因此,需要不断寻求最合理的取水方法以达到维持生态平衡,防止或减轻环境、水源、大自然的污染。同时,为保证从水库引用符合标准的水质,通过改进水库运用技术,以减少水库水质分层对下游水质的影响。当前主要的分层取水方法如下。

1. 设置不同高度的泄流孔

在大坝不同高程上设置泄水孔,从而达到泄放水库不同高程水层的目的,是一种最简

单、最常用的控制水质的分层取水方法。当前国内外取水的建筑物有以下几种形式。

(1) 深层取水: 深层取水通常与泄水建筑物相结合, 尤其是需要考虑到排砂和放空水库的目的时, 是一种较多见的取水方式。但由于深孔泄水带来的不良影响, 一些水库为了提高取水水温, 对深层取水方式做了相应的改进。

(2) 表层取水: 可以取到表层温暖、富氧的水。表层取水装置主要有水力自动取水装置, 即以水的自身压力为动力, 自动操纵取水装置。如浮子式取水塔; 在我国南方, 取水量较小时, 常采用机控斜卧管多层取水, 还有机控多节圆筒套迭式取水装置, 如日本的岩洞。

(3) 分层取水: 分层取水在美国和日本采用较多。大多数是利用取水塔, 塔壁上沿不同的高度开口取水, 利用机械为动力开启闸门, 这种方式能取得满足要求的较大流量的水。一般来说, 水库较深, 取水流量较大时, 多采用分层取水的方式, 日本的手取川水库坝高 76m, 取水流量 $180\text{m}^3/\text{s}$ 。美国的 Castaic 水库坝高 63m, 用流量 $107.3\text{m}^3/\text{s}$, 采用分层取水。

2. 人工掺混法

人工掺混法是采用人工的方法来改变水库分层, 通过上下层互相掺混来改变库水的温度分布, 使出库水流与进库水流的温度基本保持一致, 从而达到水库和下游河道中的水保持均匀的水质。这些人工方法有注气法和抽水法。注气法即对分层现象严重的水库, 利用空气压缩机把压缩空气注入水中, 可以有效地破坏分层。注气法虽然能破坏水库分层, 但对于大型水库, 效率相对较低。于是有人利用抽水法代替注气法, 他们利用机械水泵破坏水库分层。结果增加了水温, 使溶解氧含量、锰和硫的浓度减少到零。大型水库的初步试验结果证明, 大约只需要一半深层的冷水通过抽水泵就能使整个水库的水均匀掺混。因此, 水泵抽水产生的流动被认为是一种破坏水库分层行之有效的方法。

永定桥水库库区水温为典型的分层结构, 若采用单层取水方式, 下泄水温年平均温度为 14.40°C , 对灌区农田生产存在不利影响。要提高下泄水温, 可以对取水构筑物进行改进, 采取分层取水方式, 即修建多个不同高程的进水口, 随着水库水位的变化而启用不同高程的进水口, 尽可能取用表层水, 以提高夏季灌溉水温。光照水电站是北盘江干流上最大的一个梯级电站, 水库为不完全多年调节水库。光照水电站建成运行后下泄低温水会使下游河道的水温下降, 改变原河道的天然水温分布, 为减小下泄的低温水产生的不利影响, 提出了采用分层取水方案的要求。在原单层进水口结构上增加了一道钢筋混凝土墙而设计成叠梁门分层取水方案, 墙上开设取水孔, 各取水孔均设置叠梁门, 叠梁门门顶高程根据满足下泄水温和进水口水力学要求确定, 用叠梁门和钢筋混凝土墙挡住水库中下层的低温水, 水库表层水则通过取水孔叠梁门顶部进入引水道。根据水库运行水位变化情况或下游水温的需要, 提起或放下相应数量的叠梁门, 从而达到引用水库表层高温水、提高下泄水温的目的。位于日本群马县多野郡、利根川 (Tongawa) 水系神流川上的下久保坝, 最大坝高 129m, 水库总库容为 1.3亿 m^3 。表层引水口的闸门形式采用多节式半圆形定轮门, 顶部为喇叭口, 喇叭口装有拦污栅, 闸门高度可调整, 以使喇叭口随库水位变动经常处在水下 2m 的位置, 取水流量为 $12\text{m}^3/\text{s}$ 。另有底部放水孔, 装有锥形闸门。当库水位下降到 239.7m 时, 从底部放水孔取水, 取水流量也为 $12\text{m}^3/\text{s}$ 。一般来说, 多节式

取水设备多、投资大、管理较复杂,但安全稳定性高,能适用于深水大型取水建筑物。这种取水设施已被国际大坝会议环境特别委员会作为典型模式推荐,在我国也设计了几个圆筒多节式表层取水设施,流量均不超过 $20\text{m}^3/\text{s}$ 。

1.2.2 流固耦合研究现状

流固耦合力学是流体力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支,它是研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位形对流场影响这二者相互作用的一门科学。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间的相互作用,变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动,变形或运动又反过来影响流体,从而改变流体载荷的分布和大小。

流固耦合问题有着广阔的工程背景,大致可以分成3类。第1类问题的特点是流体与固体二者之间具有较大的相对速度,如航空、航天工程中的机翼与空气的动力耦合问题,称为气动弹性力学问题;第2类问题重点研究的是液体域与固体域的动力相互作用,其特点是二者之间相互作用时间较长,相对位移有限,称为流体弹性力学问题,一般的民用工程如坝体与库水、波浪与海岸结构、水塔、储液罐、渡槽等流固耦合,以及近年来发展起来的建筑结构减振装置 TLD(调频液体阻尼器)及 TSD(调频晃动阻尼器)等均为此类问题;第3类问题则为流体和固体间相互作用时间很短,流体的密度急剧变化的特殊问题。如域内爆炸,物体在液面高速溅落以及潜射导弹的出水过程。

Westergaard 对坝体与水库的相互作用进行了开创性的研究,他对河谷断面为矩形的坝面在地震时的动水压力进行了理论推导,给出了刚性重力坝在水平地震荷载作用下的动水压力分布,但是,Westergaard 解中只假定了刚性坝,把问题归结为半无限液体层界面处刚性墙壁微幅振动的声学问题。他的解并未从本质上涉及两相介质的耦合作用,只是求解了一个给定边界条件下的流体动力问题。此外,Westergaard 在此研究基础上提出了水体对结构作用的简化形式的附加质量法,他认为液体对结构的某一点产生的动水压力等效为在该点附加一定质量的液体与结构一起运动而产生的惯性力,而不再考虑其他部分液体在该点处对结构的动水压力贡献,这是一种解耦算法,为分析此类工程问题提供了方便。1957年,Housner 提出了一个基于刚性容器壁假设的容器晃动流体与固体耦合的质量-弹簧系统的简化模型,假设容器内液体为无黏、无旋、不可压缩的理想流体,将液体所产生的动水压力分成两部分,一部分是脉动分量,即随固体共同运动的那部分液体产生的脉动压力;另一部分是对流分量,即容器内液体晃动所产生的液压效应。Housner 理论给出了流体等效质量及其位置的公式。1970年,Chorpra 对坝体变形影响加以考虑,他采用单自由度解法分析了重力坝在4种不同情况下的位移与动水压力反应,使得这一问题真正成为弹性结构与液体的耦联振动问题。

国内研究者对水工结构工程的流固耦合研究多集中在附加质量方面,而将结构和水体直接相互作用研究的实例较少,在水工机械和高拱坝中有相应的研究。文献[12]基于运动控制体的雷诺输运定理,采用任意拉格朗日-欧拉描述推导控制流体运动的 Navier-Stokes 方程,提出了考虑流固耦合效应的水中结构物地震反应的计算方法,并以水中垂直板的地震反应为例,阐明流固耦合体系的求解方法,分析地震动频率和水深对场地土-结构-流水构成的流固耦合系统动力反应的影响,该方法计算结果表明:考虑流固耦合作用使得结构地震反应幅值明显增大,并使频谱特性发生改变;水深对流固耦合效应的影响

较大,并具有明显的非线性特征。文献 [13] 根据拱坝在地震作用下复杂的动态特性,对大型的高拱坝振动频率低、径向变位大等因素,结合小湾电站 290m 高拱坝,在考虑坝水流固耦合振动影响下,分析和计算了拱坝上游坝面承受的动水压力,并特别对自由表面重力波的影响问题、库底对压力波的吸收问题、水体压缩性的影响以及库水域的有效影响范围等进行分析。文献 [14] 对乌东德拱坝进行动力时程分析,不考虑流固耦合效应与考虑流固耦合效应时相比,坝体响应降低 20% 左右,得出动水压力的作用对乌东德拱坝的动力反应有着显著影响,对于大型的高拱坝,振动频率低,径向变位大,库水对坝体振动的影响变得更加重要。

1.2.3 进水口结构研究现状

进水口建筑物必须具有足够的强度,能承受水库静水荷载和各种动荷载。一般设计中采用刚性结构形式,可以是带有可靠止水闸门的布置在坝体上的连续式进水口,也可以是在不同高程布置有可靠止水的闸门的独立进水塔,同时也可以根据需要选用其他形式的进水口,如岸塔式、竖井取水口等。

目前国内大型水电站进水口较多采用塔式,塔体与岸坡和预留岩体紧密地连接在一起,影响进水塔稳定的不利荷载仅为风浪压力,一般只考虑其抗滑稳定和抗倾覆稳定性。如二滩水电站、天生桥一级水电站、小湾水电站等工程进水塔都采用这种结构形式。竖井式进水口结构简单,不受风浪和冰的影响,抗震和稳定性好;当地形条件适宜时,工程量较小,造价较低。缺点是竖井式开挖比较困难,竖井前的隧洞段检修不便。竖井式适用于地质条件好、岩体比较完整的情况,如洪家渡水电站就采用这种形式。但是这些进水口较多采用深层取水形式,对水温要求较高的河流而言,不能满足下泄水流的正常水温的要求。故对于大型水库来说,河道下泄水流水温影响较大,为了满足下游对水温的要求,需要采取一些措施提高取水水位。

进水塔作为一种水下高耸结构,其特有的结构特点如下:

(1) 周围被水体包围,塔体内部也充满水,相当于一个水下薄壁筒式或箱式结构,地震时与水体存在明显的相互作用。

(2) 进水塔作为一种特种高耸结构,既有别于重力坝等大体积结构也不同于工民建中的框架结构,由于混凝土结构的抗拉性能远小于抗压能力,如何合理设计能满足其最大抗震性能,对进水塔的抗震能力有较大影响。

(3) 对于塔式进水塔而言,由于拦污栅的存在,往往在塔前设计拦污栅墩,拦污栅墩的强度问题对整体结构存在较大影响;同时拦污栅墩与主塔体的变形协调问题对整体结构的稳定也存在相应的影响。

(4) 对于分层取水式进水塔,由于不同取水高程的变化,导致泄流过程中存在流激振动问题,特别是对闸门的影响是不可忽视的问题。

在以往的进水塔分析中,一般采用简单的静力分析或等效质量方式对进水塔进行动力分析,采用三维有限元分析塔体的稳定性,并将相应的结构应用于实际工程中。周鸿钧,胡良明等 [15] 学者对小浪底进水塔进行了静动力分析,并得出了有意义的结论,指导了设计和施工,保证了重要建筑物的安全性;文献 [16] 和文献 [17] 对小浪底工程进水塔的自振特性及其抗震能力进行了研究;文献 [18] 讨论了山体对进水塔的影响,但静力分

析不能充分反映构筑物与山体的动力耦联作用。这些研究成果推动了进水塔及其相关研究领域的发展。在抗震设计中,考虑结构的塑性是很有必要的,而且对结构在地震作用下,材料进入塑性状态后将会出现什么变化,结构裂缝的出现和发展将会是什么的方式等一些问题的研究,对其裂缝状态下的工作机理的理解将会指导设计,使结构的抗震可靠度得到进一步提高,从而使设计达到最优。但考虑塑性必然导致工作量的增加,这也是制约该研究领域发展的障碍之一。

以往有关进水塔的研究只是局限于简单的动静力分析,并未对这种特殊结构在地震作用下进水塔与水体的相互作用机理进行深入的研究,基于进水塔的结构特点,其与水体的相互作用较复杂,然而通过流固耦合方法可以很好地解决该问题;相对于单个塔体来说,整体进水塔群在地震作用下塔体相互之间又会存在怎样的作用方式以及塔体的破坏方式等,这些都是值得研究的问题。传统的静动力分析采用线弹性方法,对混凝土结构的安全评价采用单轴抗拉强度为标准的强度准则,这些已经不能满足深入研究的需要。根据不同的结构型式,通过分析可知,结构往往存在一部分高应力区远远超过材料的抗拉强度,由于混凝土力学性质复杂,在这种情况下混凝土将出现损伤甚至开裂。但由于线弹性模型不能考虑由此引发的应力重分布,不能准确评判局部不稳定部位,对混凝土结构安全判断出现失误,导致设计出现问题。为了反映结构的真实工作状况,必须采用非线性分析方法,考虑开裂后混凝土的行为以及对塔体整体抗力的影响,以便对塔体的抗震安全性作出科学的判断。目前水电工程建筑物抗震安全评价的一个趋势便是强震作用下对混凝土非线性地震响应和地震裂缝发展的数值模拟以及地震超载潜力的估计。

1.3 本书主要内容

进水口是水电站的重要组成部分,其安全性直接影响到水电站运行和发电效益。在运行期间,进水口结构大部分位于水下,当前塔式取水口多为高耸、单薄的箱式或筒式结构。在正常运行工况下,塔体结构一般能够满足正常的稳定要求,而当地震发生时,由于箱式或筒式结构与水体的相互作用现象明显,两者间表现为很强的流固耦合性,且作用机理复杂。本书在系统总结水电站分层引水进水塔的结构特点以及取水方式的基础上,对进水塔结构以及在取水过程中分层叠梁闸门的响应特征进行总结,分以下几部分进行了研究:

- (1) 对当前分层取水进水塔的研究方法及理论进行分析总结。
- (2) 对分层取水进水塔结构在静水荷载作用下的结构受力特点进行分析。
- (3) 将流固耦合理论应用于进水塔结构动力特性研究,通过考虑流固耦合时塔体结构自振特性和地震作用下的动力响应,分析塔体与水体的相互耦合作用,说明水体对塔体结构的影响程度;通过流固耦合作用研究塔体表面的动水压力分布特征。
- (4) 对于大跨度的进水塔群,采用行波激励方法分析了整体塔群在地震荷载下的动力响应,研究在地震荷载下各塔段之间可能出现的挤压碰撞,以此来综合评价高耸进水塔群整体的抗震安全性。
- (5) 根据当前有限元的计算特点,提出混凝土结构的破坏判断方法;对进水塔结构进

行地震荷载作用下的塔体裂缝开展方式和破坏模式的研究,得出进水塔在地震过程中的破坏规律。



参 考 文 献

- [1] W. C. Hube, D. R. EHarlemna. Temperature perdition in srtatified resevorirs [J]. ASCE, HY4 (98), 1972: 645-667.
- [2] 张仙娥. 大型水库纵竖向二维水温、水质数值模拟: 以糯扎渡水库为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [3] 赖民基. 日本的几种水库表层取水设施 [J]. 水利水电技术, 1983 (5).
- [4] 张引梅. 水库水质分布特征与分层取水 [J]. 西北水资源与水工程, 1991, 2 (3): 75-79.
- [5] 吴建军, 吴东利, 罗畅, 等. 永定桥水库水温预测及分层取水设计 [J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28 (5): 11-13.
- [6] 刘欣, 陈能平, 肖德序, 等. 光照水电站进水口分层取水设计 [J]. 贵州水力发电, 2008, 22 (5): 33-35.
- [7] 吴莉莉, 王惠民, 吴时强. 水库的水温分层及其改善措施 [J]. 水电站设计, 2007, 23 (3): 97-99.
- [8] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. Trans, Amer. soc. Civ. Eng, 1933, 98: 418-433.
- [9] Housner G W. The dynamic behavior of water tanks [J]. Bulletin of the Seismological of America, 1963, 53 (2): 381-387.
- [10] Chopra A K. Hydrodynamic pressures on dams during earthquake [J]. J. Eng. Mech. Div., ASCE, 1967, 93 (EM6): 205-223.
- [11] Chopra A K, Chakrabarti P. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam - water - foundation interaction [J]. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1981, 9 (4): 363-383.
- [12] 席仁强, 陈国兴, 王志华. 考虑流固耦合的水中结构物地震反应方法 [J]. 世界地震工程, 2009, 25 (2): 60-67.
- [13] 邱流潮, 张立翔. 地震作用下拱坝一库水耦合振动动水压力分析 [J]. 水动力学研究与进展 A, 2000, 15 (1): 94-103.
- [14] 王新, 潘树军. 流固耦合和地基辐射阻尼对乌东德拱坝地震响应的影响 [J]. 水电能源科学, 2007, 25 (2): 42-45.
- [15] 周鸿钧, 胡良明. 2号明流洞进水塔修改方案的静动力分析 [J]. 郑州工学院学报, 1994, 15 (4): 13-18.
- [16] 胡良明, 董跃星, 周鸿钧. 小浪底水利枢纽3号进水塔架的静动力分析 [J]. 郑州工业大学学报, 1998, 19 (4): 13-17.
- [17] 张伯艳, 杨佳梅. 小浪底3号进水塔的静动力分析 [J]. 土木工程学报, 1993 (1): 47-52.
- [18] 周鸿钧, 张五岳. 大型进水塔的三维有限元动力分析 [J]. 郑州工学院学报, 1992, 13 (3): 1-6.

第 2 章 薄壁式进水塔静力分析

目前国内大型水电站进水口较多采用塔式，塔体与岸坡和预留岩体紧密地连接在一起，进水塔作为一种水下高耸结构，其特有的结构特点如下：

(1) 周围被水体包围，塔体内部也充满水，相当于一个水下薄壁筒式或箱式结构。

(2) 进水塔作为一种特种高耸结构，既有别于重力坝等大体积结构也不同于工民建中的框架结构，混凝土结构的抗拉性能远小于抗压能力。

(3) 对于塔式进水塔而言，由于拦污栅的存在，往往在塔前设计拦污栅墩，拦污栅墩的强度问题对整体结构存在较大影响；同时拦污栅墩与主塔体的变形协调问题对整体结构的稳定也存在相应的影响。

针对进水塔的结构特点，确定结构在荷载作用下的结构应力应变特点，对结构设计有着重要的影响。本章的主要目标是对水电站进水塔设计方案进行数值仿真计算，确定其不同工况下的应力场、位移场，评价进水塔方案在强度、刚度上的安全性，进而对进水塔结构进行整体安全度的评价。

2.1 计算条件及参数

针对模型的结构特点，计算采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行建模与分析计算。在建立有限元模型的过程中，选取恰当的单元类型是很重要的，它直接关系到计算结果的可靠性和准确性，下面对本次建模过程中用到的单元类型进行简要的介绍。

Solid45 是一个三维六面体单元，适用于建立各向同性固体力学问题的模型。它有 8 个节点，每个节点有沿 x 、 y 、 z 方向的 3 个平移自由度，如图 2.1 所示。其中，分布式负荷可作用于这个单元的各个侧面。这个单元可用于分析大变形、大应变、塑性和屈服等问题。

用这个单元求解的输出结果包括节点位移， x 、 y 、 z 方向的正应力，剪应力及主应力。在对进水塔模型剖分网格时采用 Solid45 单元，八节点六面体可以蜕化成四面体。

为更好地模拟进水塔身大体积混凝土与塔后岩体之间的连接问题，对此，提出一种特殊的力学模型，即接触面单元（图

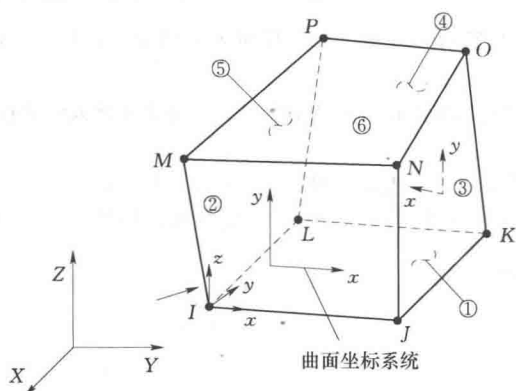


图 2.1 ANSYS 中的 Solid45 单元

2.2)。在 ANSYS 中应用有限元的普遍思想将位于实体单元表面的结合面离散为三维高阶八节点四边形单元并选用增广的拉格朗日算法进行计算。

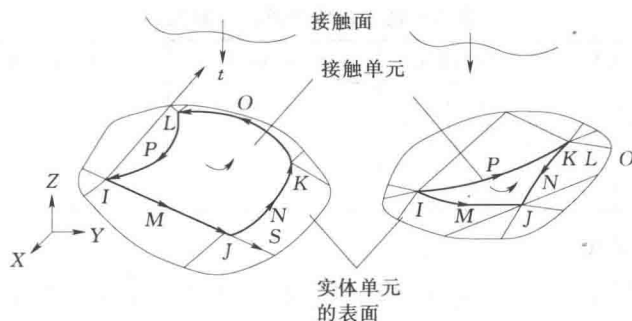


图 2.2 接触单元示意图

ANSYS 中为库仑摩擦模型定义了一个极限剪应力 τ_{lim} ，计算如下：

$$\tau_{lim} = \mu P + C \quad (2.1)$$

式中： τ_{lim} 为极限剪应力； μ 为摩擦系数； P 为法向接触压力； C 为摩擦黏聚力。

通过指定目标单元和接触单元建立了“接触对”，采用面—面接触单元来模拟进水塔与身后基岩的连接，程序通过一个共享的实常数号来识别“接触对”，为了建立一个“接触对”，必须给单元和接触单元指定相同的实常数号。选用接触单元，对研究进水塔与基岩连接的整体稳定问题是实用有效的方法。

2.1.1 计算荷载及工况

2.1.1.1 计算荷载

作用于进水塔的荷载主要有结构自重和静水压力。

(1) 静水压力。水压力施加在进水塔表面并且垂直于进水塔表面。水压力的大小，可认为在水库库水表面为零，沿竖直方向梯度为 9800N/m^3 。

$$P_w = \gamma_w H \quad (2.2)$$

式中： P_w 为计算点处的静水压强， kN/m^2 ； γ_w 为水的重度， kN/m^3 ； H 为计算点处的作用水头， m 。

(2) 结构自重。混凝土自重通过对模型材料赋密度值来实现。

2.1.1.2 计算工况

主要计算工况说明见表 2.1，包括正常运行、检修和事故等结构状态。

表 2.1 计算工况说明

结构状态	工况号	工况组合
竣工	一	结构自重
正常运行	二	正常蓄水位+结构自重
检修	三	检修水位+结构自重←检修闸门关闭
	四	检修水位+结构自重←事故闸门关闭

2.1.1.3 计算参数

塔体及地基的计算参数根据可研阶段设计文件的计算参数选取，详见表 2.2。

表 2.2 塔体及地基岩体物理力学参数

材料	弹模 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 c'/MPa	摩擦系数 f'
塔体	2.8×10^4	0.167	2400	—	—
回填	2.8×10^4	0.167	2400	—	—
地基	2.0×10^4	0.24	2650	—	—

2.1.2 三维有限元模型

(1) 计算模型范围。选取一个进水塔段作为计算模型，计算模型的边界面如下：

塔体部分——下部边界取至底板下表面，高程 733m；上部边界取至塔顶，高程 821.5m，计算模拟的总高度为 88.5m。

地基部分——向上游延长 20m，向下游延长 25m，总长度为 80.2m；左右两侧与塔体分缝一致；地基深度取一倍塔高。

(2) 坐标系的说明。取单个进水塔段的对称轴面、底板上表面和拦污栅柱迎水面等 3 个面的交点作为坐标原点，三轴的方向确定如下：

X 轴——水平方向，沿水流方向，指向下游为正；

Y 轴——垂直水流方向，以指向东为正；

Z 轴——竖直方向，向上为正。

(3) 网格划分。本次计算采用 SOLID45 实体 8 节点六面体单元及其退化的四面体单元，计算模型共分为 16692 个节点，23382 个单元。

(4) 边界约束条件。地基的下表面进行全约束，岩体四周表面为法向约束，塔段之间定为自由面。

根据水电站进水塔布置图建立进水塔的整体三维线弹性有限元计算模型，塔体及地基采用实体单元模拟，塔体与塔体背后的山体之间的接触关系采用接触单元模拟，模型对塔体内部的细部结构进行必要的简化。图 2.3 为实体模型，图 2.4 为离散模型，计算模型共分为 16692 个节点，23382 个单元。

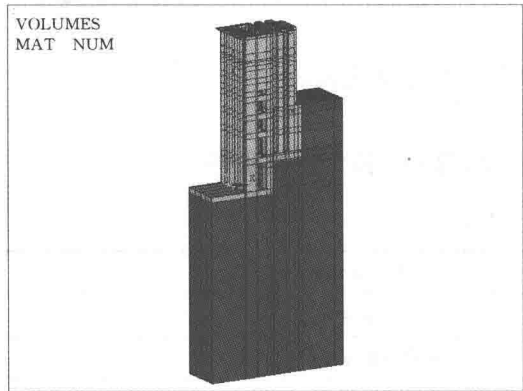


图 2.3 进水塔整体三维实体模型

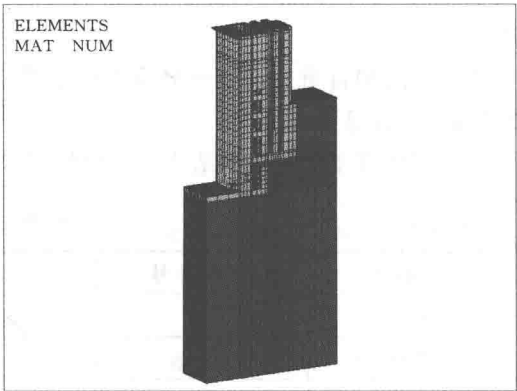


图 2.4 进水塔整体三维离散模型

2.2 静力计算结果及分析

选取单个进水塔段作为计算模型,为了清晰描述进水塔各部位的应力应变情况,有必要对进水塔的各部位结构的名称加以说明。拦污栅墩与进水塔塔体之间以及各拦污栅墩之间的连接块体,平行水流的称为顺水流向连系梁,垂直水流的称为垂直水流向连系梁。

2.2.1 工况一

本工况下结构主要荷载为结构自重,塔体应力主要由塔体自重引起。根据计算结果,拉应力主要出现在连系梁上,且随着高程的增加,连系梁上的拉应力减小。最大拉应力出现在高程 750.889~753.889m(最下层一排连系梁)的顺水流向连系梁的中部连系梁和拦污栅墩的连接处,该连系梁位于流道口的顶部,最大值为 3.60MPa,该层连系梁的拉应力主要分布为 1.31~3.60MPa,每层连系梁的最大值一般出现在靠近拦污栅墩处。压应力分布为自上而下逐渐增大,同一高程在顺水流方向逐渐减小。最大压应力出现在拦污栅墩底部,最大值为-12.9MPa,最大值的分布主要出现在拦污栅墩底部的角点,且并未向底板内和顺水流方向延伸。在进水口底部和两侧的边墙的压应力值分布为-6.98~-2.54MPa。同时在每层顺水流方向的连系梁与拦污栅墩连接处的下部也出现了压应力,其中以高程 750.889~753.889m(最下层)的压应力值最大,该部位压应力为-7.0MPa左右。

在塔体自重作用下,顺水流向位移表现为上部出现负向位移(逆水流方向),下部出现正向位移(顺水流方向),塔顶最大位移为-3.9mm,拦污栅墩底最大位移为 0.4mm;由于结构与荷载的对称性,垂直水流向位移分布呈现对称性,最大值出现在高程 741.0m 的拦污栅边墩的内侧,为 0.4mm;竖向位移主要是结构沉降,最大值位于拦污栅墩顶部,值为-8.8mm,底板的竖向位移为-3.7mm,可见竖向位移主要是由于地基沉降引起的。整体结构的综合位移主要是竖向位移,最大值位于拦污栅墩顶部,值为 9.6mm。

根据以上计算结果,在塔体的自重作用下,最大拉应力出现在进水口顶部的顺水流向连系梁上,由于进水口顶部竖向沉降与同一高程的拦污栅墩的沉降不一致,顺水流向连系梁顺水流方向的两端沉降不同,最大沉降差为 1mm 左右,中间的连系梁表现最为明显,造成该连系梁的拉应力最大。最大值达到了 3.60MPa,远远超出了混凝土的允许抗拉强度,不同层顺水流方向的连系梁的拉应力值均超出 1.0MPa。而对于拦污栅墩底部的压应力,最大值为-12.9MPa,但分布范围较小,主要集中在拦污栅墩的底部,对结构稳定影响不大。

塔底部应力分析:根据底板主应力分布,最大拉应力出现在顺水流方向底板中部,即拦污栅墩下部,最大拉应力值为 2.27MPa,出现在底板拦污栅墩下部两侧,范围较小;底板压应力范围较大,最大压应力为-3.99MPa,现在顺水流方向底板中部,即拦污栅墩下部。由地基应力等值线分布可知,地基以受压为主,拉应力范围很小,压应力值较小,满足岩基承载力要求。根据应力分布可知,在塔体上部荷载作用下,底板应力较大,但是由底板传到地基的应力较小。

整体结构的主应力云图和综合位移云图见图 2.5~图 2.7。