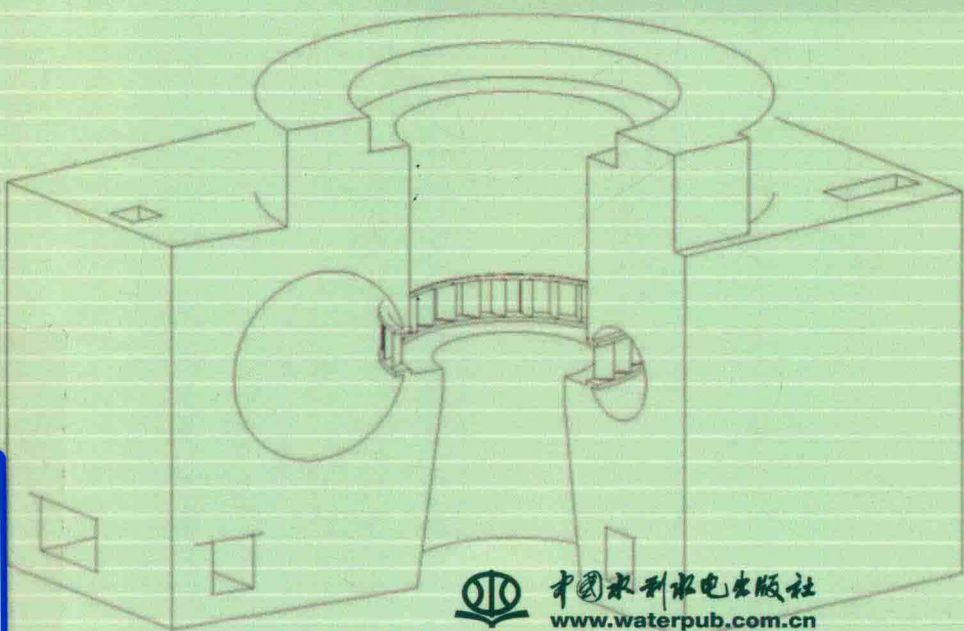


巨型水力发电机组 蜗壳埋设方式研究

陈琴 祁勇峰 龚亚琦 崔建华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

巨型水力发电机组 蜗壳埋设方式研究

陈琴 祁勇峰 龚亚琦 崔建华 著

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书对4个水电站不同埋设方式下的巨型水力发电机组蜗壳结构研究成果进行了比较详细的介绍,总结了不同电站及不同埋设方式蜗壳结构的受力特点。本书共分为11章。第1章总结了不同埋设方式蜗壳结构的特点,第2~6章为对三峡工程地面电站及地下电站的4种蜗壳埋设方式的研究;第7章为对溪洛渡电站蜗壳埋设方式的研究;第8章和第9章为对向家坝地面电站及地下电站不同埋设方式蜗壳结构的研究;第10章为对乌东德电站采取垫层蜗壳的研究;第11章对巨型机组蜗壳结构分析中的一些问题进行了探讨。

本书内容翔实、资料丰富,对水电站蜗壳结构的设计、技术研究等都有重要参考价值,可供水利水电行业广大工程技术人员及相关专业的高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

巨型水力发电机组蜗壳埋设方式研究 / 陈琴等著
— 北京 : 中国水利水电出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5170-6323-0
I. ①巨… II. ①陈… III. ①大型发电机—水轮发电
机—发电机组—壳体(结构)—埋设装置(水轮机)—研究
IV. ①TM312.1②TK730.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第030367号

书 名	巨型水力发电机组蜗壳埋设方式研究 JUXING SHUILI FADIAN JIZU WOKE MAISHE FANGSHI YANJIU
作 者	陈琴 祁勇峰 龚亚琦 崔建华 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 (营销中心)
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	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
定 价	80.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水电是世界各国优先开发的可再生的清洁能源。我国水电资源主要富集于大江大河，需要采用大型水力发电机组才能有效开发利用。蜗壳结构是水力发电机组的重要部件，是机组旋转轴系的支撑体系之一。对高水头、大容量的巨型水力发电机组，蜗壳埋设技术关系到机组稳定运行与厂房结构安全，是巨型电站建设中的重要技术经济问题。

从20世纪90年代以来，我国依托以三峡工程为代表的一批国家重大水电工程建设，通过创新，大型水电机组的制造能力和水平已进入世界先进和领先行列。三峡水电站蜗壳采用充水保压、垫层和直埋（组合）三种埋设方式，并做到安全运行，为我国大型蜗壳结构设计和建设积累了丰富的经验。

从三峡水电站提出设计方案开始，直至2012年包括三峡地下电站在内的32台机组全部建成投产的二十多年中，作者所在的科研团队面向工程实践，对三峡坝后电站及地下电站采用不同蜗壳埋设方式的机组结构进行了详尽的研究，并于2008年三峡工程实验性蓄水期间对真机监测成果进行了对比分析，所提供的研究成果均成为电站设计及工程实践的依据。从2009年至今，在三峡工程实践的基础上，又对溪洛渡、向家坝、乌东德电站的蜗壳埋设方式进行了研究，为蜗壳埋设方式的选择提供了科学依据。本书是对上述工作中巨型电站蜗壳及外围钢筋混凝土结构静态工作特性的总结，包括数值分析及模型试验。

作者所在的科研团队对巨型机组不同蜗壳埋设方式下的结构动力特性也做了研究，并做了基于三峡电站机组监测资料的反馈分析工作。由于条件限制，这些研究成果在本书中没有列出，待作者进一步地研究总结后再以论文或著作的形式与读者见面。

本书的研究与设计思想密切相关，在以上的研究工作中，作者所在的科研团队与长江设计院的同事们联系密切，讨论频繁，研究工作也受到了他们的启发，在此表示诚挚的谢意。

本书所反映的研究成果得到了林绍忠教授级高级工程师、苏海东教授级高级工程师的指导，林绍忠在20世纪90年代初亲自编写了大体积混凝土温度应力仿真计算程序，并在三峡工程各主要建筑物的数值分析中得到了应用及检验，本书2.2节及2.4节的研究即采用该程序。两位专家渊博的知识、严谨

求实的治学态度让作者所在的科研团队受益匪浅，在此对他们表示深深的敬意。

与作者共同参与研究工作的还有谢小玲高级工程师及张杰高级工程师，对他们的贡献，在此表示衷心的感谢。

全书共分 11 章，由陈琴策划、组织和统编，并编写了第 1~4 章、第 6 章、第 7 章、第 11 章；崔建华编写了第 5 章；祁勇峰编写了第 8 章、第 9 章；龚亚琦编写了第 10 章。

由于作者水平有限，本书内容不尽完善，不足与疏漏难免，热诚欢迎读者批评指正。

作者

2018 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 大型机组蜗壳埋设方式及其主要特点	1
1.1 充水保压埋设方式	1
1.2 垫层埋设方式	2
1.3 直埋方式及组合埋设方式	3
参考文献	4
第 2 章 三峡电站保压蜗壳结构数值分析	6
2.1 三峡工程概况	6
2.2 三峡左岸电站蜗壳保压浇筑混凝土方案仿真结构分析	7
2.3 右岸电站保压浇蜗壳流道及外围混凝土结构静力分析	14
2.4 三峡左岸电站 10 号机组蜗壳保压浇筑外围混凝土仿真计算	25
参考文献	32
第 3 章 三峡右岸电站垫层蜗壳结构数值分析	34
3.1 概述	34
3.2 计算条件	34
3.3 垫层方案优化研究	36
3.4 三维静力分析	39
3.5 垫层方案与保压方案成果比较	46
3.6 小结	47
参考文献	48
第 4 章 三峡电站 15 号机组直埋蜗壳结构数值分析及模型试验研究	49
4.1 概述	49
4.2 基本资料	50
4.3 计算模型	52
4.4 三维线弹性分析	52
4.5 配筋复核及结构措施研究	60
4.6 承载能力计算	77
4.7 不同蜗壳埋设方式下的结构开裂分析	78
4.8 座环柔度计算	80
4.9 15 号机组直埋蜗壳仿真模型试验研究及数值分析对比	81
4.10 混凝土软化曲线对裂缝的影响	90
4.11 重复荷载作用对裂缝的影响	92

4.12	温度变化对蜗壳与混凝土间缝隙的影响	95
4.13	小结	97
	参考文献	97
第5章	三峡地下电站标准机组段垫层蜗壳结构数值分析	99
5.1	概述	99
5.2	计算条件及计算模型	99
5.3	计算成果	104
5.4	小结	112
	参考文献	112
第6章	三峡地下电站 27 号机组蜗壳埋设方式研究	113
6.1	概述	113
6.2	结构设计控制标准	113
6.3	计算条件	114
6.4	线弹性计算	117
6.5	钢衬钢筋混凝土结构开裂分析	132
6.6	小结	142
	参考文献	143
第7章	溪洛渡地下电站蜗壳埋设方式研究	144
7.1	概述	144
7.2	结构控制标准分析	144
7.3	计算条件	145
7.4	三维线弹性分析	148
7.5	钢衬钢筋混凝土结构开裂分析	164
7.6	小结	173
	参考文献	174
第8章	向家坝地面电站不同蜗壳埋设方式研究	175
8.1	概述	175
8.2	计算条件及计算模型	175
8.3	三维线弹性分析	179
8.4	钢筋混凝土结构开裂分析	182
8.5	方案比较	192
8.6	推荐方案及工程实践	194
	参考文献	194
第9章	向家坝地下电站不同蜗壳埋设方式研究	195
9.1	概述	195
9.2	计算条件及计算模型	195

9.3	三维线弹性分析	198
9.4	钢衬钢筋混凝土结构开裂分析	201
9.5	方案比较	205
9.6	推荐方案及工程实践	207
	参考文献	207
第 10 章	乌东德地下电站蜗壳埋设方式研究	208
10.1	概述	208
10.2	控制标准及裂缝宽度控制计算方法	208
10.3	不同垫层材料及敷设范围比较研究	209
10.4	左、右岸机组结构计算成果比较	221
10.5	三维非线性配筋复核	223
10.6	小结	233
	参考文献	234
第 11 章	巨型机组蜗壳结构分析的问题探讨	235
11.1	数值分析中的计算模型	235
11.2	下机架基础相对上抬变形控制标准	236
11.3	裂缝对机组稳定运行的影响及裂缝宽度计算	236
11.4	蜗壳厚度减薄问题	237
11.5	温度的影响	237
11.6	非线性计算中混凝土的强度取值	237
	参考文献	238

第 1 章 大型机组蜗壳埋设方式及其主要特点

水轮发电机组蜗壳埋设技术关系到机组稳定运行与厂房结构安全。混流式水轮机蜗壳,特别是中高水头、大容量水轮机蜗壳,埋入混凝土的方式通常有 3 种,即保压埋入法、垫层埋入法和直接埋入法。3 种埋设方式在国内外的工程实践中均有应用,各国设计部门与制造公司有其惯用做法和自身经验。例如,苏联由于钢材的限制,多采用垫层方案和直埋方案;欧美由于蜗壳按压力容器标准控制,需要进行打压试验,以检验结构安全和消除安装应力,多采用保压方案;而在北欧高水头电站中采用直埋方案较多;我国以往多采用垫层方案,近期的抽水蓄能工程又多采用保压方案。经过三峡工程实践,又发展了一种新的埋入方式,即部分直埋+部分垫层的组合埋设方式,近年来在国内外多座巨型电站采用。

1.1 充水保压埋设方式

充水保压埋设方式是在钢蜗壳安装好后,在蜗壳进口焊接上闷头以及在座环内侧装上密封环,使蜗壳成为一个密封的压力容器,充水加压使蜗壳产生一定变形后,在维持一定内水压力的情况下浇筑外围混凝土,并对未填实的部分进行灌浆。外围混凝土凝固后,即可卸压放空钢蜗壳,并拆除闷头、密封环等装置。卸压后钢蜗壳与混凝土之间将产生间隙。

如果仅考虑内水压力的作用,保压埋设方式可能出现 3 种工作状态。

第 1 种工作状态:当运行水头低于保压值时,钢蜗壳的自由变形值小于保压浇筑混凝土时蜗壳的膨胀值,蜗壳与外围混凝土结构之间存在间隙,蜗壳基本不受外围混凝土约束,内水压力由钢蜗壳独立承担,因而处于独立工作状态。

第 2 种工作状态:当运行水头达到或略高于保压值时,钢蜗壳产生一定的自由变形后,大部分与混凝土结构接触,并开始向混凝土结构传递内水压力,蜗壳的变形开始受到混凝土结构的约束,结构刚度有较大提高。

第 3 种工作状态:当运行水头超过保压值较多时,蜗壳产生一定的自由变形后,进入与外围混凝土联合受力的工作状态,钢蜗壳与混凝土贴紧,超过保压值的那一部分水头由钢蜗壳和外围混凝土共同承担。

保压水头的选取与机组运行水头有密切的关系。对于库水位变幅较大或设计水头与初期运行水头相差较大的机组,选择合适的保压水头十分重要。如果保压水头太大,则在低水头运行时,钢蜗壳与混凝土之间可能存在较大间隙,虽然混凝土结构几乎不承担内水压力,可充分发挥钢蜗壳的承载能力,但整体结构的抗震性能差;如果保压水头太小,则在高水头运行时,混凝土结构分担的内水压力大,需要配置较多钢筋,既不能充分发挥钢蜗

壳的作用,还给混凝土浇筑带来不便。以上3种工作状态,第1种和第2种工作状态都是应当尽力避免的,第3种工作状态是比较理想的,但仍需要考虑发挥蜗壳的承载能力,减小混凝土承载比,使混凝土配筋合理,施工方便,节约工程造价。目前钢蜗壳是按承受最大内水压力设计的,在保压埋设方式中即使提高保压水头,增加了钢蜗壳的承载比,也有足够的安全裕度。从这个意义上而言,保压埋设方式更适用于运行水头变幅较小的机组。

除内水压力外,温度也是不可忽视的影响因素。运行期相对于混凝土浇筑期间的温差引起的混凝土和钢蜗壳的温度变形也会影响两者间的相互作用,两者分担的内水压力是随季节变化的,并与浇筑季节和保压水温有关,因此选择合适的浇筑季节和保压水温也同样重要。此外,在运行期没有闷头和座环密封圈,蜗壳的边界条件与保压浇筑混凝土时相比发生了改变,即使运行水头等于保压水头,钢蜗壳与外围混凝土之间也不可能正好既无间隙又不传力。若再考虑施工过程及混凝土弹模、徐变和水泥水化热随时间变化的影响,两者的相互作用实际上是十分复杂的,只有通过模拟施工过程的仿真计算才能分析清楚。

采用充水保压埋设方式,钢蜗壳与外围混凝土结构的受力界面清楚,结构受力相对均匀,蜗壳与混凝土完全接触,可减小机组振动,机组稳定性好,但也存在以下缺点^[1]:

(1)增加了设备费用。在保压浇筑过程中,需增加闷头、密封环等设备,如果不同季节运行水温变化大,施工时还需增加温度或压力补偿等辅助设施。

(2)增加了设计难度。在工程设计中,需要考虑布置闷头的位置和需要的吊装设施,需增加厂房尺寸,并且结构相对复杂(特别是地下厂房)。

(3)增加了施工难度及工期。在施工过程中,需安装和拆除闷头、密封环,蜗壳需充水、泄水和进行压力温度控制,施工程序相对复杂、工期较长。

鉴于上述情况,是否采用保压埋设方式,主要取决于蜗壳的尺寸和运行水头、增加辅助设施的费用和施工要求等因素。在施工程序复杂程度可接受的情况下,保压埋设方式较适合在运行水头变幅不大的机组中采用;对运行水头较高、蜗壳尺寸较小、外围混凝土方量不大,可采用调节蜗壳内压方式进行温度补偿的机组,或只要浇筑季节选择适当,可不考虑浇筑时温度补偿的机组,采用保压埋设方式较好。抽水蓄能电站一般蜗壳尺寸小、水头高,基本上都采用保压埋设方式,对地下厂房而言,还可利用岩体的约束作用,有利于机组的安全稳定运行。

1.2 垫层埋设方式

垫层埋设方式是在钢蜗壳安装完成后,在钢蜗壳表面敷设一定面积的弹性垫层,然后浇筑外围混凝土。垫层材料的弹性模量相对混凝土而言较小,钢蜗壳的振动变形被弹性垫层吸收部分振动能量后再传递至外围混凝土,因此,钢蜗壳承担较大的内水压力,混凝土的承载比小,从而配筋量少。钢蜗壳按承受全部设计内水压力设计及制造。我国以往的大中型电站,大都采用垫层埋设方式。

相对保压埋设方式,垫层埋设方式施工工期短、施工相对简单、节约工程投资,尤其是地下电站,可以减少主厂房洞室的开挖跨度、简化开挖体形,对洞室围岩稳定安全有着无法替代的作用。比如三峡电站,采用垫层埋设方式的机组相对保压埋设方式,缩短电站

厂房单机施工直线工期 1~2 个月, 平均提前发电 1.5 个月, 单台机组投资比保压埋设方案少 495.6 万元 (未考虑有些设施可重复使用), 社会效益显著。

对运行水头不太高, 水头变幅较大的大容量水轮机蜗壳, 适合采用垫层埋设方式。

垫层方案处于理想工作状态是蜗壳与混凝土或垫层全接触, 没有缝隙。采用这种埋设方式应注意以下问题:

(1) 由于蜗壳过渡板应力复杂, 在荷载作用下有明显的弯曲应力, 该范围内采用直浇混凝土措施较好, 不敷设垫层, 加强了混凝土对座环的约束作用, 可以改善过渡板的受力条件。

(2) 垫层材料的使用寿命必须得到保证, 应具有复原率高、吸水性小、耐老化、环保等特点。

(3) 垫层具有一定的变形模量, 其厚度有限, 且一般在钢蜗壳的下半圆未敷设垫层, 因此, 虽然钢蜗壳是按承受全部设计内水压设计, 但实际上仍有部分内水压力会传至外围钢筋混凝土结构上。外围钢筋混凝土结构承担水荷载的大小, 由垫层刚度及敷设范围决定。外围混凝土的安全及配筋数量的大小, 关系机组的稳定运行问题及工程投资, 需进行比较精确的分析。因此, 对于大型电站, 必须结合电站的具体情况对垫层材料参数及敷设范围进行优化后确定。

(4) 钢蜗壳与外包混凝土之间有垫层, 两者不能完全结合成刚性整体, 对机组抗振和钢蜗壳疲劳不利。

1.3 直埋方式及组合埋设方式

直埋方式是在钢蜗壳安装好后, 在既不充水加压也不敷设软垫层的条件下直接浇注外围混凝土。在运行中, 钢蜗壳与外围混凝土处于贴紧状态, 整体刚度较高, 处于理想的工作状态, 既减小机组振动又方便施工。在受力上, 直埋方式的钢蜗壳和外围钢筋混凝土结构总是联合承载, 由于蜗壳的钢板厚度有限, 因此钢蜗壳一般只承担小于 25% 的水荷载, 大部分水荷载由钢筋混凝土结构承担, 为满足裂缝控制要求, 需配置较多的钢筋, 且要求混凝土结构具有较高的强度。

同采用保压埋设方式和垫层埋设方式的蜗壳不同, 采用直埋方式的钢蜗壳既可以按承受全部内水压力设计制造, 也可以按小于设计内水压力制造, 钢板厚度可以适当减薄。

组合埋设方式是直埋及垫层两种埋设方式的组合, 即部分直埋+部分垫层。这种埋设方式可以充分发挥垫层和直埋方式各自的优点, 采用部分垫层, 可减少直埋方式混凝土承载比过高和发电机下机架不对称上抬量过大问题; 采用部分直埋, 可改善座环和过渡板受力条件, 增加结构整体刚度。

在三峡电站进行直埋方式的研究之前, 世界上已建成的单机容量 700MW 左右的巨型水电站中, 采用直埋方式的工程仅有苏联的萨扬舒申斯克水电站 (单机容量为 640MW, 蜗壳设计内水压力 2.86MPa)。

对于巨型机组, 由于进口段蜗壳直径大, 外围混凝土厚度小, 采用直埋方式时, 在高水头作用下, 混凝土承载比大, 在进口段区域引起较高的拉应力, 易产生贯穿性裂缝, 影

响机组的稳定运行。综合考虑,在进口段一般以敷设垫层为宜。三峡电站 15 号机组为边机组,在进口段的外围混凝土厚度较其他标准机组厚 4.1m,经过多方案的数值分析及模型试验研究,发现虽然腰部因为厚度增加不产生裂缝,但顶部的混凝土厚度并未增加,贯穿性裂缝难以避免,经多方论证后,最终将垫层敷设至 45° 断面。因此,严格意义上讲,15 号机组蜗壳实际上采用的是组合埋设方式。

对于组合埋设方式,应根据机组的容量和运行水头范围,确定合理的垫层敷设范围,求得垫层和直埋两种埋设方式的最佳组合,是有应用前景的理想埋设方式。尤其对于地下巨型电站,采用组合埋设方式不仅节约施工空间,而且可以减少开挖从而维持基岩的稳定性,并且可以利用基岩的支撑作用。

由于三峡电站 15 号机组的成功实践和其相对保压埋设方式施工简单的优点,组合埋设方式很快被认可,并在一定程度上取代了充水保压技术,在国内外多座巨型电站采用,如三峡地下电站 27 号机组、溪洛渡地下电站、向家坝地下电站。

参 考 文 献

- [1] 袁达夫,谢红兵.大型混流式水轮机组蜗壳的埋设方式[J].人民长江,2009,40(16):37-39.
- [2] 林绍忠,苏海东.三峡工程水电站蜗壳保压浇筑混凝土方案仿真结构分析成果报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2000.
- [3] 林绍忠,苏海东.水电站蜗壳保压浇筑混凝土结构的三维仿真分析[J].水利学报,2002(1):66-70.
- [4] 伍鹤皋,马善定,秦继章.大型水电站蜗壳结构设计理论与工程实践[M].北京:科学技术出版社,2009.
- [5] 钮新强,谢红兵,刘志明.三峡右岸电站蜗壳直埋方案研究[J].人民长江,2008,39(1):1-2,12.
- [6] 陈琴,苏海东.B2006110CL三峡右岸电站 15 号机组蜗壳直埋方案结构计算分析报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2006.
- [7] 武汉大学水利水电学院.三峡右岸电站蜗壳直埋方案结构研究[R].武汉:武汉大学,2006.
- [8] 河海大学土木工程学院.三峡右岸电站直埋式蜗壳配筋研究[R].南京:河海大学,2006.
- [9] 马震岳,张运良.长江三峡水利枢纽右岸右岸电站机组蜗壳埋设方式及流道系统刚强度研究报告[R].大连:大连理工大学,2006.
- [10] 李丹,廖远志,张新宇,等.三峡右岸电站 15 号机组蜗壳采用直埋方案探讨[J].人民长江,2007,38(8):17-19,23.
- [11] 陈琴,林绍忠,苏海东.大型机组直埋式蜗壳结构不同限裂措施的三维非线性分析[J].长江科学院院报,2008,25(6):101-105.
- [12] 陈琴,苏海东,崔建华.大型机组蜗壳不同埋设方式的结构开裂分析[J].长江科学院院报,2009,26(4):40-43.
- [13] 伍鹤皋,蒋遼超,申艳,等.直埋蜗壳三维非线性有限元静力分析[J].水利学报,2006,37(11):1323-1328.
- [14] 张运良,张存慧,马震岳.三峡水电站直埋式蜗壳结构的非线性分析[J].水利学报,2009,40(2):220-225.

- [15] 陈婧, 张运良, 马震岳, 等. 不同埋设方式下巨型水轮机蜗壳结构动力特性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2007, 47 (4): 593-597.
- [16] 张杰, 何英杰, 陈琴. 三峡右岸电站 15# 机组蜗壳直埋方案仿真模型试验研究报告 [R]. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2006.
- [17] 张杰, 兰道银, 何英杰. 三峡电站机组蜗壳直埋方案仿真模型试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2007, 24 (1): 47-50.
- [18] 陈琴, 林绍忠, 苏海东. 三峡电站直埋式蜗壳结构试验模型的非线性有限元分析 [J]. 长江科学院院报, 2007, 24 (2): 51-54.
- [19] 武汉大学水利水电学院. 三峡水电站 15 号机组直埋蜗壳结构模型试验 [R]. 武汉: 武汉大学, 2006.

第 2 章 三峡电站保压蜗壳结构数值分析

2.1 三峡工程概况

三峡水利枢纽位于长江西陵峡中段湖北省宜昌市三斗坪镇,距下游葛洲坝水利枢纽和宜昌市约 40km,控制流域面积 100 万 km^2 。三峡工程是治理开发长江的关键性骨干工程,为一等工程。工程主要开发任务,首先是解决长江中下游的防洪,其次是发电,第三是改善长江航运。工程主要建筑物包括大坝、电站厂房、双线五级船闸、升船机等,设计标准为 1 级,其洪水标准为 1000 年一遇洪水设计,1 万年一遇洪水加大 10% 校核,相应洪水流量分别为 $98800\text{m}^3/\text{s}$ 和 $124300\text{m}^3/\text{s}$ 。枢纽正常蓄水位为 175.00m (初期 156.00m),汛前防洪限制水位 145.00m (初期 135.00m)。

拦河大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 185m,最大坝高 181m,坝轴线全长 2309.5m。泄洪坝段位于河床中部,两侧为厂房坝段及非溢流坝段,坝后布置左右岸电站厂房,另在右岸地下布置地下电站,通航建筑物双线五级船闸和升船机均布置在左岸。

坝后电站(地面电站)安装 26 台水轮发电机组,其中左岸 14 台机组蜗壳全部采用保压埋设方式,右岸 12 台机组蜗壳中,4 台采用垫层埋设方式,7 台采用保压埋设方式,1 台(15 号机组)采用直埋(组合)方式。右岸地下电站 6 台机组中,5 台标准机组蜗壳采用垫层埋设方式,27 号机组(边机组)采用组合埋设方式。机组单机容量为 700MW,水轮机采用混流式,转轮直径 9.8m。蜗壳进口直径为 12.4m,设计内水压力为 1.395~1.56MPa,HD 值高达 1934m^2 。左岸电站第一批机组于 2003 年 7 月投产发电,2005 年全部机组投产发电;右岸坝后电站第一批机组于 2007 年投产发电,2008 年 10 月全部机组投产发电。2010 年水库水位达到设计蓄水位 175.00m,真机监测显示机组运行状况良好,性能稳定。右岸地下电站首批机组于 2011 年 6 月投产,2012 年 6 台机组全部投产。

三峡工程之前,我国国内最大的电站机组仅为 320MW。三峡工程设计施工中,通过创新思路,取得了许多关键技术,研究开发出世界首创的全空气冷却 700MW 级水轮发电机。通过三峡工程实践,我国实现了巨型水电机组的国产化,并推广应用至向家坝电站、溪洛渡电站等后期建设的大型水电站,为我国重大技术装备的发展作出了重要贡献。

三峡巨型机组蜗壳不同埋设方式在电站的成功实施以及完整设计体系与相关技术标准的形成,不仅保证了水电站引水发电建筑物及机组安全稳定运行,而且为巨型机组相关行业规范制定技术标准奠定了基础,提高了我国水电行业的竞争力。组合埋设技术完全取代了国外的充水保压技术,已被国内外后续的多座巨型电站采用。

2.2 三峡左岸电站蜗壳保压浇筑混凝土方案仿真结构分析

三峡左岸电站机组蜗壳全部采用保压浇筑的结构型式,装机高程 135.00m,正常设计水位 175.00m,考虑水锤的影响后,正常设计水位运行期蜗壳内水压力为 1.395MPa。根据有关研究工作,设计采用的保压水头为 70m,比初期运行静水头低 8m。如按常规计算,由钢蜗壳和外围混凝土共同承担的部分内水压力(即剩余水压)为 0.695MPa。三峡工程机组台数较多,由于工期要求,在不同季节都会有机组施工。一方面,由于保压水头较低,低温季节浇筑外围混凝土的机组在高温季节高水位运行时,混凝土结构分担的荷载较大;另一方面,由于初期运行水头较小,高温季节浇筑蜗壳外围混凝土的机组在低温季节低水位运行时,钢蜗壳与混凝土结构不能贴紧运行。前者可采取加大保压水头和(或)降低保压水温的措施。但闷头、座环密封圈以及打压设备均已按 70m±2m 水头设计制造,采取较大的保压水头已不现实;而蜗壳容量大(约 6000m³),在夏季要维持较低的保压水温也比较困难。为此,受设计委托,采用三维有限元仿真计算技术,分析冬季、夏季浇筑外围混凝土情况,在不同季节、不同水位运行期钢蜗壳与外围混凝土交界面的传力或可能存在的间隙,并研究冬季混凝土浇筑情况采用保压水温控制措施以及夏季浇筑外围混凝土情况采取低保压水头对传力和间隙的影响,为设计提供科学依据。

2.2.1 计算模型

坝后式电站剖面见图 2.2-1。

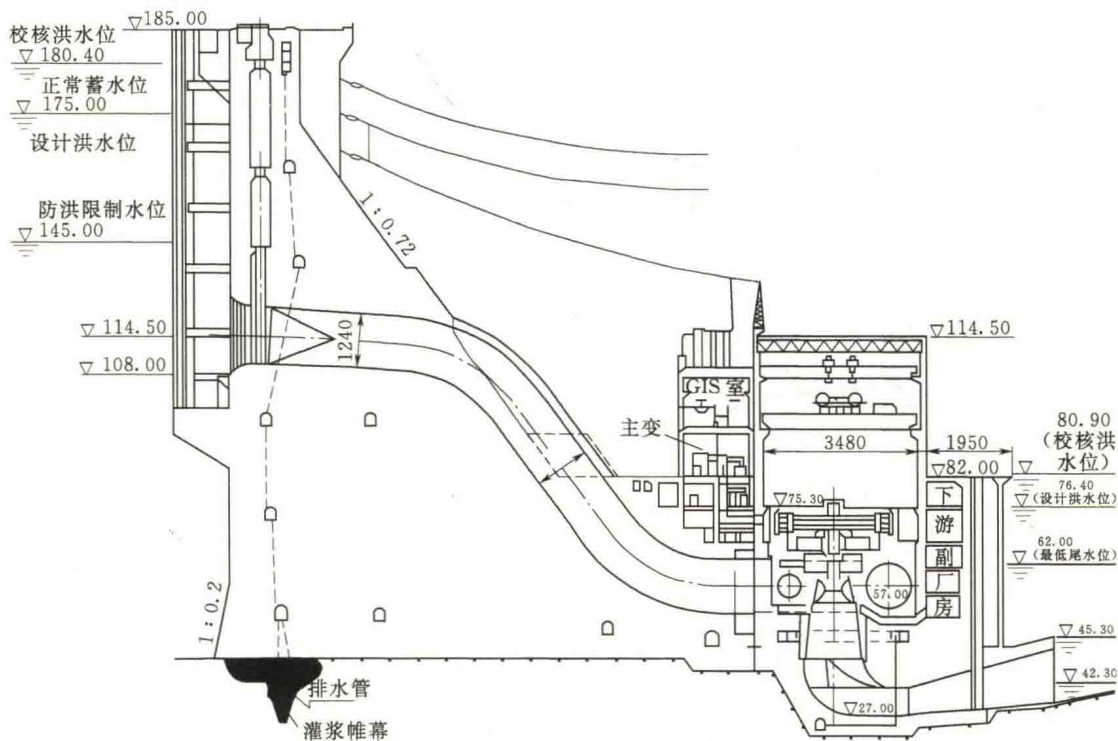


图 2.2-1 坝后式电站剖面图 (图中尺寸以 mm 计, 高程以 m 计)

取一左岸岸坡坝段机组为研究对象, 由于厂坝联结段引水压力钢管用垫层管取代了伸缩节, 且垫层管下游段未设止推环, 大坝的变形将通过垫层管影响到钢蜗壳的位移以及钢蜗壳与外围混凝土间的相互作用, 因此计算模型中包括了大坝, 坝体包括钢管坝块及实体坝块, 两坝块间为永久横缝。厂坝间分缝高程 51.00m 以下岩坡进行接缝灌浆。主厂房模拟至高程 67.00m, 上、下游副厂房只模拟下部实体部分。

垫层管布置见图 2.2-2。垫层管段钢板厚度 60mm，长 10m，其中坝内长 5.8m（位于上游副厂房下），厂内长 4.2m（穿厂房上游墙），垫层在钢管外围 360°全包，厚度 50mm。厂内段垫层管可分为两段，即一期混凝土 2.2m 和三期混凝土 2.0m 段。钢蜗壳进口位于垫层管下游端的下游侧 1.1m 处。闷头位于钢蜗壳进口段的上游，压力钢管的凑合节位于闷头段，凑合节的最后一道环缝在浇筑该部位三期混凝土前合拢。

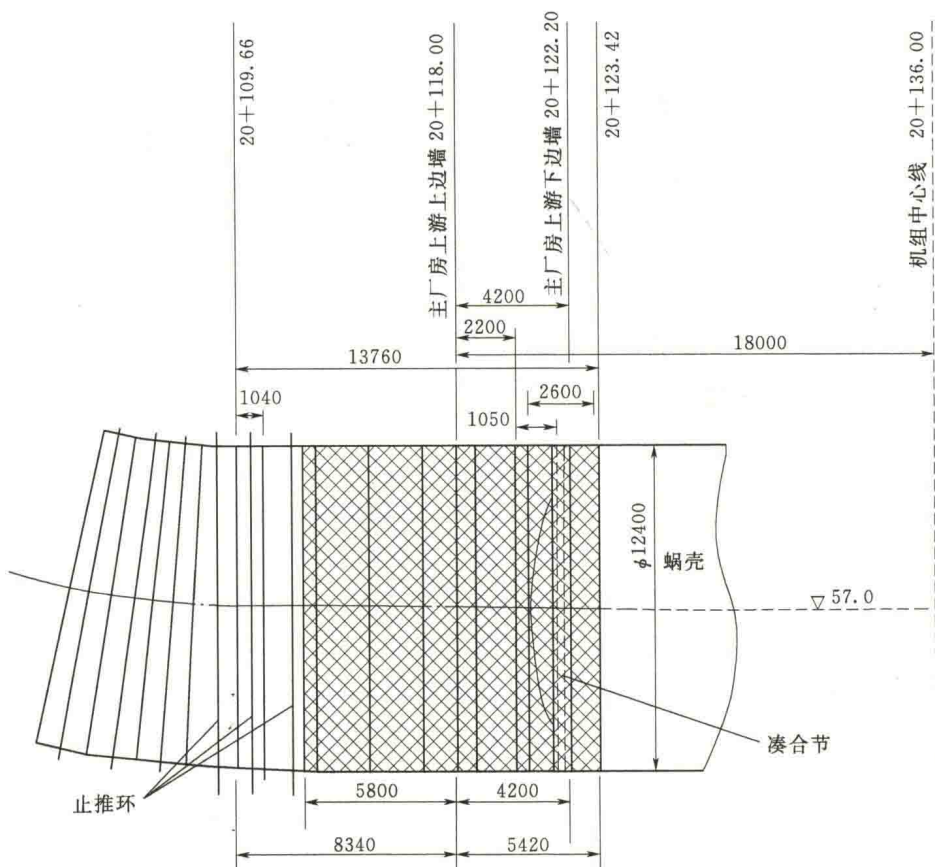


图 2.2-2 垫层管布置图 (图中尺寸以 mm 计, 高程、桩号以 m 计)

垫层管的上游端钢管与周围混凝土连在一起,下游端模拟厂房上游墙体下游侧至蜗壳进水口的 1.1m 钢管段上半圆 180°设垫层(厚度 30mm)、下半圆摩擦接触。此计算模型相当于上游端设止推环,下游端部设止推环。

计算模型见图 2.2-3。

2.2.2 计算条件

1. 材料参数

(1) 钢材：包括钢管、座环和固定导叶等，弹性模量 $E=210\text{GPa}$ ，容重 78.0kN/m^3 ，泊松比 0.30，线胀系数 $12.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ；蜗壳钢板厚度 $20\sim 64\text{mm}$ 。

(2) 基岩：厂房基岩变形模量 26GPa ；大坝基岩变形模量 $10\sim 26\text{GPa}$ ；泊松比 0.23，线胀系数 $8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，导温系数 $0.083\text{m}^2/\text{d}$ 。

(3) 大坝混凝土：弹性模量 26GPa ，泊松比 0.167，线胀系数 $8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，导温系数 $0.083\text{m}^2/\text{d}$ 。

(4) 钢蜗壳与外围混凝土交界面：摩擦系数 $f=0.5$ 。

(5) 厂房混凝土：泊松比 0.167，线胀系数 $8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，导温系数 $0.083\text{m}^2/\text{d}$ ，容重 24.5kN/m^3 ；弹性模量、绝热温升和徐变度分别见式 (2.2-1)～式 (2.2-3)，不计混凝土自生体积变形。

$$E(\tau)=33.0\tau/(5.12+\tau) \quad (2.2-1)$$

$$Q(\tau)=24.2/(1-e^{-0.837\tau^{0.849}}) \quad (2.2-2)$$

式中： $E(\tau)$ 为弹性模量，GPa； τ 为混凝土龄期，d； $Q(\tau)$ 为绝热温升， $^\circ\text{C}$ 。

$$C(t,\tau)=C_1(\tau)[1-e^{-0.3(t-\tau)}]+C_2(\tau)[1-e^{-0.005(t-\tau)}] \quad (2.2-3)$$

式中： $C(\tau)$ 为徐变度， $10^{-6}/\text{MPa}$ ； $C_1(\tau)=7.58+183.1/\tau$ ； $C_2(\tau)=12.4+35.3/\tau$ ； t 为混凝土龄期，d； τ 为加荷龄期，d。

2. 主要边界气温曲线 $T(t)$ 及表面放热系数 β

(1) 与大气接触的结构外表面：

$$T(t)=17.35+11.55\sin\omega(t-108.8), \beta=15.1\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2.2-4)$$

式中： $T(t)$ 为温度， $^\circ\text{C}$ ； t 为时间，d，以 1 月 1 日为原点； $\omega=2\pi/365$ ，下同。

(2) 泄压后、运行前蜗壳内表面和厂房锥管、尾水管表面：

$$T(t)=15.0+5.5\sin\omega(t-120.0), \beta=25.04\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2.2-5)$$

(3) 运行期引水压力管道和蜗壳内表面：

$$T(t)=17.53+8.5\sin\omega(t-130.0), \beta=2326\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2.2-6)$$

(4) 运行期上、下游副厂房内表面和主厂房高程 67m 表面：

$$T(t)=22.0+8.0\sin\omega(t-120.0), \beta=5.13\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2.2-7)$$

(5) 运行期正常水位库水温度（大坝上游表面）：运行期库水位以下的大坝上游表面采用库水水温边界条件，库水温度曲线随高程变化。

$$\text{高程 } 175.00\text{m}: T(t)=18.0+10.0\sin\omega(t-120.0) \quad (2.2-8)$$

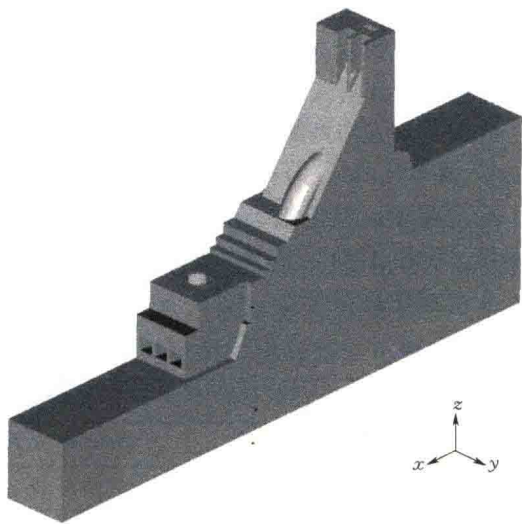


图 2.2-3 计算模型图