



水电站垫层蜗壳组合结构 研究与应用

张启灵 黄小艳 胡蕾 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水电站垫层蜗壳组合结构 研究与应用

张启灵 黄小艳 胡蕾 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以我国水电站工程实践中广泛应用的垫层蜗壳组合结构为对象,针对其在内水压力作用下的结构受力表现及调控问题,围绕垫层平面铺设范围的选取、垫层材料的压缩特性及钢蜗壳-混凝土的接触传力等3个焦点问题,开展了相关的基础研究和应用研究工作,以期提升当前工程界和学术界对垫层蜗壳组合结构受力特性的认识水平,推动蜗壳结构受力调控设计理念的普及与发展。本书共8章,主要内容包括:绪论,垫层蜗壳的座环结构特性,蜗壳垫层平面铺设范围确定原则,蜗壳垫层材料的压缩特性,垫层材料非线性应力-应变关系的影响,基于软接触关系描述蜗壳垫层材料的数值方法,垫层蜗壳结构中钢衬-混凝土间的接触传力和结语等。

本书可供从事水电站建筑物结构教学、设计及科研工作的高校师生和工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站垫层蜗壳组合结构研究与应用 / 张启灵, 黄小艳, 胡蕾著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2020. 9
ISBN 978-7-5170-9074-8

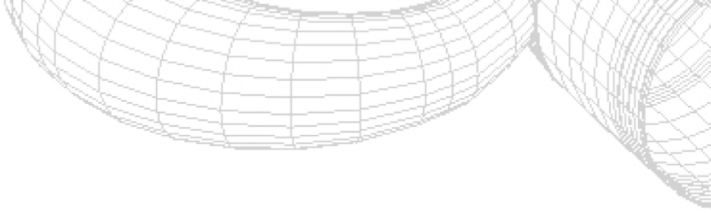
I. ①水… II. ①张… ②黄… ③胡… III. ①水力发电站—垫层料—壳体(结构)—组合结构 IV. ①TV74

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第213309号

书 名	水电站垫层蜗壳组合结构研究与应用 SHUIDIANZHAN DIANCENG WOKE ZUHE JIEGOU YANJIU YU YINGYONG
作 者	张启灵 黄小艳 胡蕾 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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 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	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	145mm×210mm 32开本 5.625印张 156千字
版 次	2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷
定 价	35.00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

伴随着近二十年来国内水电建设的高速发展，我国水电站的结构设计及相应机电设备的生产、制造和安装水平取得了长足的进步，部分关键技术指标（如机组单机容量、水轮机设计水头、流道管径等）不断创出新高，在诸多方面已走到了世界的最前列，其中蜗壳埋设技术水平已居世界领先地位。

水电站钢蜗壳位于引水发电系统的最末端，在其向水轮机提供沿圆周向流量均匀的水流用以发电的同时，自身也承受了巨大的内水压力。因此，工程师通常在钢蜗壳外围浇筑大体积混凝土将前者埋入其中，以确保电站的发电安全。与此同时，钢蜗壳外围的大体积混凝土又作为水电站厂房的下部结构，承受厂房上部结构及机墩与风罩传来的各类静、动力荷载。由此可见，无论是从发电还是结构功能看，钢蜗壳-混凝土组合结构（也称蜗壳组合结构）都在水电站中扮演了核心角色，因而其通常也被视为水电站的“心脏”。

在早期的水电站结构设计实践中，由于相关设计参数（如蜗壳内水压力）普遍相对较低，工程师一般倾向于使钢蜗壳与混凝土各自独立承载，即前者仅承受蜗壳内水压力，后者仅承受厂房上部荷载，以此简化蜗壳组合结构的设计过程、降低设计难度。然而，随着近年来

我国建设的水电站规模日益增大，蜗壳承受的内水压力及管径（即 HD 值）等设计参数不断提高，如继续沿用上述钢蜗壳与混凝土独立承载的设计理念，将导致钢蜗壳的设计壁厚过大，从而极大增加了其制造安装难度，也带来了经济浪费。在此背景下，钢蜗壳-混凝土联合承载的设计理念逐渐成为行业主流，其核心思想是在适当允许蜗壳外围混凝土出现开裂（即混凝土按限裂要求设计）的前提下，考虑其与钢蜗壳联合承担内水压力，以此降低后者承载从而减小壁厚。

蜗壳组合结构联合承载设计的核心问题是如何采取适当的工程措施优化内水压力在两种组合构件（即钢蜗壳与混凝土）之间的分担比例及传递路径，充分发挥两者各自的结构承载作用。以上即是近年来在工程界越来越受到重视的蜗壳组合结构“受力调控”设计理念。而在工程实践中，一般是采用合适的蜗壳埋设技术达到蜗壳组合结构“受力调控”的目的。在建设相对较早的二滩、三峡一期（左岸）等大型水电站中，采用较多的是从欧美发达国家引进的充水保压技术，通过优化调整保压内水压力实现蜗壳组合结构的受力调控，但这种技术仅能实现蜗壳内水压力在钢蜗壳与混凝土之间分担比例的控制，可被认为是一种“标量”层面的调控。

随着对水电站运行安全要求的不断提高，上述对蜗壳组合结构受力在“标量”层面上的调控已无法全方位满足多目标设计需求。为此，工程师开始寻求一种既能

控制蜗壳内水压力外传比例，又能调整其外传路径（方向）的新技术，以此实现蜗壳组合结构受力在“矢量”层面上的调控。在此背景下，蜗壳直埋-垫层组合埋设技术应运而生，其主要是利用在蜗壳上半表面的局部平面范围铺设垫层，以调整内水压力在相应局部区域的外传，从而在整体上实现对内水压力外传的定量和定向控制，达到调控蜗壳组合结构受力表现的目的。上述调控技术最具代表性的工程应用是在三峡二期（右岸）15号机组蜗壳的埋设中，随后又相继被成功应用于溪洛渡、向家坝等大型水电站的700MW及以上级机组中，目前已发展成为我国大型常规水电站（如乌东德、白鹤滩等）蜗壳埋设的首选技术。

可以看出，在直埋-垫层组合埋设技术框架下，垫层是被视为一种介于钢蜗壳和混凝土之间的结构受力调控工具，而科学地掌握垫层这种工具的“使用方法”则是应用此项技术实现蜗壳组合结构受力调控的首要前提。基于这一认识，本书作者近年来在国家自然科学基金（51679013、51309030、51609020）及中央级公益性科研院所基本科研业务费（CKSF2016015/GC、CKSF2012039/GC、CKSF2017067/GC）等项目的资助下，围绕垫层平面铺设范围的选取、垫层材料的压缩特性及钢蜗壳-混凝土的接触传力等3个焦点问题，开展了较为系统的物理试验及数值模拟工作，以期提升当前工程界和学术界对垫层蜗壳组合结构受力特性的认识水

平，为蜗壳工程实践中科学发挥垫层材料的“调控传力”功能提供科学依据。

本书3位作者在攻读研究生阶段均师从数十年来一直活跃于我国水电站压力管道行业一线的武汉大学伍鹤皋教授，书中多数的学术思想和观点是在作者就读伍教授门下及参加工作后向伍教授进一步请教的过程中逐渐形成的，作者也借此机会向伍教授长期以来无私的传道授业表示感谢！书中关于蜗壳组合结构的受力调控设计理念最早源于作者在2009年与时任中国水电顾问集团西北勘测设计研究院副总工程师的姚栓喜先生的多次交流，本书部分研究工作的出发点是受姚总当年比较超前的蜗壳设计理念的启发而形成，作者也借此机会向姚总当年的传经布道表示感谢并致以敬意！本书第4~7章内容为作者参加工作后完成，在此要特别感谢长江水利委员会长江科学院工程安全所李端有所长一直以来给作者提供的相对宽松的科研环境！本书部分内容已于近年在国内外学术期刊发表，值此，由衷地感谢各位匿名审稿人对作者工作提出的意见、建议和鼓励！最后，感谢中国水利水电出版社在本书出版过程中付出的辛勤工作！

目前，国内关于水电站建筑物尤其是专门针对蜗壳组合结构研究的专著还相对较少，作者谨将过去十多年的一些研究成果作为本书的主体内容，期望能给从事水电站建筑物结构研究的同行提供一些有益的参考，也期

望通过本书为蜗壳组合结构受力调控的设计理念在我国的普及与传播贡献绵薄之力。限于作者的水平及时间仓促，书中难免存在错误和不妥。凡此，敬请各位同行专家和读者不吝赐教。

作者

2020年4月于武汉



目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 中国水电开发的现状与趋势	1
1.1.2 水电站蜗壳组合结构简介	2
1.1.3 蜗壳结构的分类	3
1.2 垫层蜗壳埋设技术的发展	5
1.3 垫层蜗壳研究历程中的两个重要进展	7
1.3.1 钢蜗壳与外围混凝土联合受力	7
1.3.2 钢蜗壳与外围混凝土之间滑动摩擦	8
1.4 垫层蜗壳研究的新焦点	9
1.4.1 垫层的平面铺设范围	9
1.4.2 垫层材料的压缩力学性能及其数值描述	11
1.4.3 垫层蜗壳结构中的钢衬脱空问题	12
1.5 本书的主要工作	14
第 2 章 垫层蜗壳的座环结构特性	16
2.1 座环结构概述	16
2.1.1 座环简介	16
2.1.2 座环结构设计中的一般考虑	17
2.2 不平衡水推力	17
2.3 计算条件	19
2.3.1 工程概况	19
2.3.2 计算材料参数	19
2.3.3 计算模型	20
2.3.4 计算荷载	22

2.4	座环应力分布变化规律	23
2.4.1	混凝土开裂的影响	23
2.4.2	垫层变形模量的影响	28
2.4.3	摩擦系数的影响	31
2.5	座环位移和变形分布变化规律	34
2.5.1	座环竖向位移	34
2.5.2	座环径向变形	39
2.5.3	座环环向变形	42
2.6	座环抗剪性能	45
2.6.1	垫层变形模量的影响	45
2.6.2	摩擦系数的影响	46
2.7	本章小结	48
第3章 蜗壳垫层平面铺设范围确定原则		50
3.1	垫层平面铺设范围的两个影响方面	50
3.2	蜗壳内水压力竖向外传在平面上的分布	51
3.2.1	座环竖向位移	51
3.2.2	机墩结构竖向位移	52
3.3	蜗壳内水压力水平方向外传的分布	56
3.3.1	座环径向变形	56
3.3.2	机墩结构径向变形	58
3.3.3	座环抗剪性能	61
3.3.4	流道结构承受的扭转力比例	64
3.4	垫层适宜平面铺设范围	74
3.5	本章小结	75
第4章 蜗壳垫层材料的压缩特性		77
4.1	蜗壳垫层材料概述	77
4.1.1	垫层材料的应用基本情况	77
4.1.2	蜗壳垫层的实际工作状态	78
4.2	蜗壳垫层材料压缩特性的试验研究	79

4.2.1	垫层压缩试验的研究现状	79
4.2.2	其他工程泡沫塑料的力学性能	82
4.2.3	材料和加-卸压方案	84
4.2.4	试验结果	86
4.2.5	讨论	92
4.3	蜗壳垫层材料压缩特性的数值模拟	94
4.3.1	垫层数值模拟的研究现状	94
4.3.2	数值模型	96
4.3.3	对于4.2节试验的模拟结果	98
4.3.4	对于文献 [40] 试验的模拟结果	99
4.4	本章小结	101
第5章	垫层材料非线性应力-应变关系的影响	103
5.1	工程案例概况	103
5.2	蜗壳结构的平面轴对称简化	104
5.3	有限元模型	105
5.4	计算参数	107
5.5	荷载和边界条件	108
5.6	计算结果	108
5.6.1	垫层压缩应变	108
5.6.2	混凝土损伤	111
5.6.3	机墩结构上抬	112
5.7	本章小结	114
第6章	基于软接触关系描述蜗壳垫层材料的数值方法	116
6.1	垫层蜗壳结构的常规有限元数值模拟简介	116
6.1.1	数值建模过程	116
6.1.2	材料力学描述	117
6.2	垫层材料数值模拟的新技术	118
6.2.1	硬接触与软接触	118
6.2.2	模拟思路	119

6.2.3	新技术的优点	120
6.3	新技术的验证	121
6.4	新技术的应用	124
6.4.1	有限元模型	124
6.4.2	计算参数	125
6.4.3	荷载和边界条件	125
6.4.4	考虑垫层材料非线性压缩特性的结果对比	125
6.4.5	垫层材料残余变形的数值模拟试验	129
6.5	本章小结	131
第7章 垫层蜗壳结构中钢衬-混凝土间的接触传力		133
7.1	钢衬-混凝土间的接触/脱空问题	133
7.1.1	已有的认识	133
7.1.2	钢衬的两种潜在运动形式	134
7.1.3	钢衬下半部的半圆筒简化受力分析模型	134
7.1.4	两个关键影响因素	136
7.2	非线性有限元程序的验证	137
7.2.1	材料非线性	137
7.2.2	接触非线性	138
7.3	接触状态的有限元预测	139
7.3.1	计算条件	139
7.3.2	摩擦系数的影响	140
7.3.3	垫层铺设包角的影响	141
7.3.4	垫层压缩特性的影响	141
7.4	钢板焊缝构造对接触传力行为的影响	143
7.4.1	问题的描述	143
7.4.2	有限元建模及计算条件	145
7.4.3	混凝土损伤	146
7.4.4	钢衬的滑移	147
7.4.5	钢衬-混凝土间的传力	148
7.5	本章小结	152

第 8 章 结语..... 154

 8.1 主要的研究成果和新认识 154

 8.2 值得进一步研究的内容 156

参考文献 159

第 1 章



绪 论

1.1 引言

1.1.1 中国水电开发的现状与趋势

能源是经济社会发展的重要物质基础。工业革命以来，世界能源消费剧增，煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速，生态环境不断恶化，特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化，人类社会的可持续发展受到严重威胁。水能作为可再生能源的重要组成部分，资源潜力大，环境污染低，相关开发利用技术较为成熟，是一种有利于人与自然和谐发展且可持续获取的重要能源。

国际水电协会（International Hydropower Association）在其《2020 水电状况报告》中发布的数据显示^[1]，截至 2019 年年底，世界水电总装机为 1308GW，其中中国的装机达到 356GW，约占世界总装机数的 1/4，总量位居世界第一。尽管中国已成为世界上水电发电量最大的国家，但水电开发程度与发达国家相比仍有较大差距。从长远看，中国要兑现在巴黎气候大会上作出的承诺，水电作为可开发程度最高、技术相对成熟的清洁可再生能源，将是未来很长一段时期内国家推动能源生产和利用方式变革、应对气候变化的重要手段。

自“十二五”中后期以来，中国水电行业的发展逐渐从大规

模集中开发进入到适度有序开发阶段。随着经济可开发水资源的开发完毕，一些开发难度相对较大的工程逐步进入规划设计阶段。相比于此前，未来建设的水电站正向着单机容量大、运行水头高的方向发展，水电站的结构设计将面临诸多更具挑战性的问题。

1.1.2 水电站蜗壳组合结构简介

典型的水电站通常由两大类建筑物组成：①枢纽建筑物；②引水发电建筑物。枢纽建筑物主要包括挡水、泄水和过坝等用以发挥工程防洪、灌溉、航运等综合效益的建筑物，它们构成了水利水电工程的主体。引水发电建筑物又可分为引水建筑物和发电建筑物两类，前者包括进水口、引水管道、前池或调压室、尾水管等，后者包括水电站厂房及其附属建筑物（如变电站、开关站等）。库水通过引水系统进入厂房推动水轮机做功发电，即厂房是整个水电站完成水能向电能转化的场所，可被视作水电站的发电核心结构。

在结构设计实践中，水电站厂房在垂直方向通常被视作相对独立的三部分：上部结构、机墩与风罩、下部结构。上部结构与一般工业厂房类似，主要包括屋盖系统、起重机梁、构架、各层板梁柱、围护结构等，是机组运行和管理的主要工作场所；机墩与风罩位于上部 and 下部结构之间，外围与各层楼板连接，内部给水力发电机组提供结构支撑和封闭运行环境；下部结构以大体积混凝土为主体，内设水轮机蜗壳及尾水管等流道系统，水流在下部结构中完成与水轮机之间机械能的转移。水电站下部结构位于引水系统的末端，是整个引水发电系统中承受内水压力最大的部分，因而其内部（即蜗壳内壁）往往需设置一定厚度的钢衬，以此满足下部结构较高的承载要求。这种按照承受内压设计的钢衬也被称为钢蜗壳，其与外包大体积混凝土形成一种特殊的钢-混凝土组合结构，工程实践中为便于描述，通常将这种钢蜗壳-混凝土组合结构简称为金属蜗壳组合结构，或更简单地称之为金属

蜗壳结构。

上述的金属蜗壳结构通常用于中高水头电站，钢蜗壳的断面一般为圆形（少数也有椭圆形的情况）；而对于低水头的河床式电站，由于厂房下部结构承受内水压力较小，一般不专设承载的内衬，内水压力全部由钢筋混凝土结构承担，为增大过流能力，流道的断面一般设为梯形，这种蜗壳被称为钢筋混凝土蜗壳。由于钢筋混凝土蜗壳不在本书讨论范围，为简化描述，全书在文字中不对金属蜗壳和钢筋混凝土蜗壳作专门区分，所述“蜗壳结构”单指“金属蜗壳结构”，而非两种蜗壳结构型式的统称含义，在此特别说明。

1.1.3 蜗壳结构的分类

蜗壳结构承受的主要荷载为内水压力，其直接作用于钢蜗壳内表面，通过钢蜗壳膨胀变形向外围大体积混凝土结构传递，即内水压力被钢蜗壳和混凝土共同承担。与一般钢-混凝土组合结构类似，蜗壳结构设计中的核心问题是如何合理地发挥两种承载构件各自的承载能力。在工程实践中，工程师通常采用特殊的蜗壳埋入技术调控内水压力在钢蜗壳和混凝土之间的分担比例，以达到上述目的。由此蜗壳结构可按钢蜗壳埋入混凝土方式的不同分为3类：垫层蜗壳、充水保压蜗壳和直埋蜗壳^[2]。

垫层蜗壳是指在浇筑钢蜗壳外围混凝土之前事先在钢蜗壳上半部外表面除靠近座环上环板区域外铺设变形模量较小的材料，目的是更好地发挥钢蜗壳的承载能力，减小蜗壳内水压力外传至混凝土的比例。该技术已在我国龙滩、拉西瓦、三峡（部分机组）等单机容量700MW级的水电站中得到了成功应用。图1.1是某垫层蜗壳的施工实景。

充水保压蜗壳是指在钢蜗壳安装好后，蜗壳内充水加压，同时浇筑外围混凝土，待混凝土凝固后撤去内压，使得钢蜗壳和混凝土之间形成初始缝隙，这种特殊的埋设技术使得蜗壳结构的承载可被视为两个相对独立的部分，其中小于充水保压值的部分几

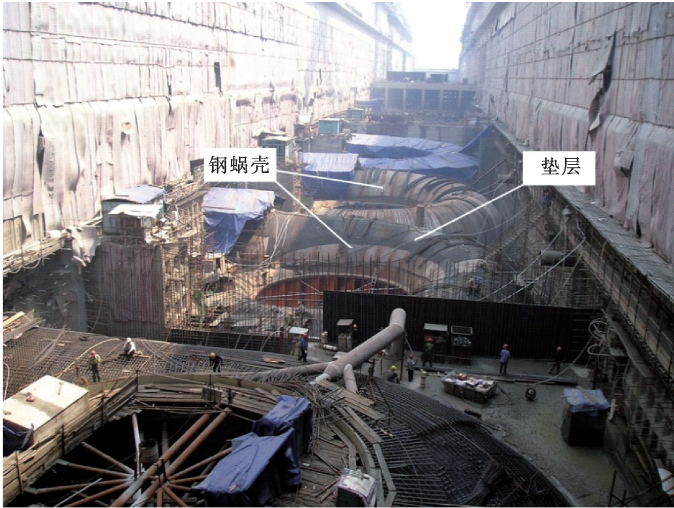


图 1.1 某垫层蜗壳的施工实景

乎全部由钢蜗壳单独承担，高出的部分由钢蜗壳和混凝土共同承担。这种埋设技术使得钢蜗壳和混凝土受荷分配明确，便于调控。该技术已在我国小湾、三峡（部分机组）等单机容量 700MW 级的水电站中得到了成功应用。图 1.2 是某充水保压蜗壳的施工实景。

直埋蜗壳也被称为完全联合承载蜗壳，是指在钢蜗壳安装好后，直接浇筑混凝土，使得机组运行时全部内水压力由钢蜗壳和混凝土联合承担。这种型式的优点是可以减薄钢蜗壳钢板厚度，降低钢蜗壳的制造难度，取得经济效益，且结构整体性较强。苏联是迄今实现了真正意义上完全联合承载蜗壳（即钢蜗壳减薄，采用中等强度钢板，不按承受全部内水压力设计）的唯一国家，此技术已成功应用于努列克（Nurek）、英古里（Inguri）和萨扬·舒申斯克（Sayano-Shushenskaya）等大型水电站。在日本和一些欧美国家，采用直埋技术的蜗壳也较多，但这些国家的钢蜗壳是按单独承受全部内水压力设计制造的，并不因其外围混凝土的