

# 不同埋设方式下巨型水轮机蜗壳结构动力特性研究

陈 婧\*, 张运良, 马震岳, 王 洋, 程国瑞

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 随着水电机组单机容量的提高,蜗壳日趋向巨型化发展,HD值很高.目前,关于巨型蜗壳结构动力特性的研究在理论和实践方面涉及较少,然而此问题在设计阶段尤其重要.为此,对典型的3种蜗壳埋设方式,即垫层、保压和直埋,以某巨型工程为实例,采用三维有限元方法,从优化设计的角度重点研究和比较了蜗壳结构的刚度、固有振动特性、脉动水压力作用下结构的振动反应和抗疲劳特性.计算与分析表明,蜗壳埋设方式对厂房结构的静、动力特性的影响不显著,不应成为蜗壳埋设方式选择的制约因素.

**关键词:** 蜗壳;埋设方式;动力特性;疲劳;数值模拟

**中图分类号:** TV 731; TU 311.3 **文献标识码:** A

## 0 引 言

中国正在建设和将要建设一批巨型水电站工程,如三峡、龙滩、小湾、拉西瓦、溪洛渡等,单机容量均为700 MW级,压力管道和蜗壳等引水系统的尺寸巨大,HD值(设计水头与钢蜗壳进口管径之积)高.例如,三峡水轮机蜗壳平面最大宽度为34.325 m,水轮机钢蜗壳进口直径达12.4 m,进口断面设计内水压力为1.395 MPa(含水锤压力),HD值将达到 $1\ 730\text{ m}^2$ ,是世界上混流式水轮机最大的蜗壳.

目前,国内外大中型中高水头机组厂房蜗壳埋设方式主要采取3种方案:①在钢蜗壳上部外侧一定范围内铺设软垫层后浇筑外围混凝土,简称垫层方案;②钢蜗壳在充水保压状态下浇筑外围混凝土,简称保压方案;③钢蜗壳外直接浇筑混凝土,既不设垫层也不充水保压,蜗壳与外围混凝土完全联合承载,简称直埋方案.这3种蜗壳埋设方式各有优缺点,在国内外不少工程中都有成功应用的实例.对于HD值特别高的蜗壳结构,国外采用保压方案(如伊泰普和大古力等)和直埋方案(如前苏联的萨扬舒申斯克等)的相对较多;国内以往大中型工程多采用垫层方案,单机容量最大的工程为李家峡水电站.以后更大的工

程,如二滩、三峡左岸电站、小湾以及所有大型抽水蓄能电站,均采用了保压方案,对此也有较多的研究<sup>[1,2]</sup>.

广义的水轮机流道结构是指由厂坝间伸缩节或止推环以后的蜗壳进口段、蜗壳、座环和座环立柱等组成的引水与导水系统.流道结构除承受巨大的内压水头外,还与外围钢筋混凝土结构共同组成机组的下部支撑体系,承受径向不平衡力和竖向荷载,同时还承受较大的切向水力不平衡推力.尤其是水轮机的机械和水力不平衡力等振动荷载,通过水导轴承和轴承支承结构传递到座环和蜗壳结构,由此再向外围钢筋混凝土结构传递.由上述各传力构件组成的支承体系的刚度对轴系统的支承刚度、临界转速和振动反应有重要影响;同时,水轮机流道的内部脉动压力也主要由蜗壳钢板和外围钢筋混凝土结构承担并对外传递.因此,蜗壳结构的埋设方式对厂房和机组动力特性的影响及其抗振优化设计,成为巨型工程迫切需要研究解决的关键课题之一.

垫层蜗壳由于钢板与混凝土间软垫层的存在,混凝土对钢蜗壳的约束作用降低,可能会导致对机组运行稳定性的不利影响,这是选择垫层蜗壳的重大疑问之一.国内过去对垫层蜗壳做过

收稿日期: 2005-12-15; 修回日期: 2007-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679009); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2003014018); 大连理工大学青年教师培养基金资助项目(893219).

作者简介: 陈 婧\*(1972-),女,博士生,讲师.

大量的研究<sup>[3-5]</sup>,但对于巨型工程动力特性的研究相对较少,对其他埋设方式的研究也不多<sup>[6-8]</sup>. 本文试图利用全三维数值模拟方法,以某巨型工程为计算实例,重点探讨采用不同埋设方式,对巨型蜗壳的自振特性、振动反应、刚度及疲劳特性的影响规律,为巨型蜗壳埋设方式的合理选择和优化设计提供理论依据和设计参考.

## 1 流道结构数值模拟方法

对于结构体型和组成异常复杂的蜗壳结构,有限元法数值模拟成为首选的分析工具. 当采用垫层蜗壳方案时,软垫层的模拟是其中的关键.

水电站厂房下部结构,尤其是机墩和蜗壳外围混凝土结构,是承受机组动荷载的主体结构,要求其具有足够的整体刚度来承受机组振动荷载. 本研究取某一巨型工程为计算实例,计算模型尽可能真实地模拟流道系统的主要结构,包括蜗壳钢衬、座环环板、固定导叶等,以及垫层、蜗壳外围混凝土和其余厂房水上水下混凝土结构. 这里主要考虑水轮机流道脉动压力的作用,其振动可能影响到地面厂房的上部结构,故对于动力问题需考虑厂房整体模型.

## 2 厂房下部结构整体刚度(柔度)分析评价

水轮机流道及其外围混凝土结构是机组轴系统的支撑体系的一部分,其径向刚度是水导轴承支承刚度的一部分,刚度大小对机组的运行稳定性有一定的影响. 采用垫层蜗壳后,由于钢板与混凝土之间的软连接,整体刚度会有所降低;而对于保压浇筑或直埋方案,若由于运行水头较低或混凝土的收缩等原因而形成间隙,也会降低其刚度. 因此,一定量级的支承刚度设计是机组运行稳定性的保证. 以下选择若干不同的模型加以对比分析.

工况一:蜗壳采用保压方案,认为蜗壳钢板与混凝土紧贴在一起,不考虑接触面之间的摩擦力;

工况二:蜗壳采用垫层方案,认为蜗壳钢板与混凝土和垫层紧贴在一起,不考虑它们之间接触面的摩擦力,软垫层用实体单元模拟;

工况三:蜗壳采用保压方案,考虑蜗壳钢板与混凝土之间的摩擦因数为 0.25,采用摩擦接触单元模拟;

工况四:蜗壳采用垫层方案,考虑蜗壳钢板与混凝土和垫层之间的摩擦因数为 0.25,采用摩擦接触单元模拟;

工况五:蜗壳采用保压方案,考虑蜗壳钢板与混凝土之间存在间隙,用间隙单元模拟.

根据巴西伊泰普电站的经验,认为座环的水平向最大柔度应不超过  $0.22 \mu\text{m}/\text{kN}$ . 计算方法是施加一个单位力,力的施加方式参考文献[5],并考虑作用力的方向分别指向 24 个固定导叶中心线,故共有 24 种作用方向. 计算结果归纳如下:

(1) 对于工况一和工况二,座环结构径向最大柔度均较小,最大柔度分别为  $0.0304 \mu\text{m}/\text{kN}$  和  $0.0319 \mu\text{m}/\text{kN}$ ,均满足要求. 分析认为,在垫层设计方案中,蜗壳靠近座环上环一侧,有一定范围不设垫层,相当于直埋方案,径向力可以通过座环上环和机墩向外传递,因此,垫层对径向刚度的不利影响得以大幅度消除;同时,垫层的厚度很小,因此对座环柔度的影响较小,与保压方案比较,增大值相对仅为 4.9%.

(2) 在前两种工况下,均表现为座环结构纵向柔度较大,横向柔度较小,主要是由于沿厂房纵向,蜗壳周围混凝土厚度较薄;而沿厂房横向,混凝土厚度较厚且下游侧有尾水平台下的楼板支撑,因此使纵向柔度相对较大.

(3) 在工况三和工况四下,座环结构径向最大柔度分别为  $0.0320 \mu\text{m}/\text{kN}$  和  $0.0339 \mu\text{m}/\text{kN}$ ,小于允许值. 与工况一和工况二比较,相对增大值仅为 5.3% 和 6.3%,说明是否考虑蜗壳钢板和混凝土、垫层之间的摩擦力,对座环的柔度计算结果影响较小.

(4) 考虑钢板与混凝土之间的间隙时,座环结构径向的最大柔度为  $0.0350 \mu\text{m}/\text{kN}$ ,仍小于允许值. 与无间隙无摩擦情况比较,相对增大约 15%,说明是否考虑蜗壳钢板与混凝土之间的间隙,对座环柔度有一定的影响,但不显著.

当不考虑蜗壳钢板与混凝土之间可能存在的间隙时,对于动态分析保压方案和直埋方案的结果是一致的,故可将这两种埋设方式合为一种.

## 3 自振特性分析和共振复核

为了研究不同蜗壳结构型式的动力特性,分别建立不同的数值模型对无垫层蜗壳(保压或直埋方案)、垫层蜗壳两种埋设方式进行自由振动和

强迫振动分析.

模型 I 蜗壳采用垫层方案,垫层与钢衬紧密接触且回弹良好.以径向链杆单元模拟垫层.

模型 II 蜗壳采用垫层方案,垫层与钢衬紧密接触且处于完全弹性状态.以实体单元模拟垫层,其他部分同模型 I.

模型 III 蜗壳钢衬与垫层接触部分自由(模拟垫层经长期运行后发生老化并与钢衬发生脱离),未铺设垫层部分的钢衬与混凝土仍协调连接.此模型不考虑止推环的局部加强作用,垫层钢管进口端为固定端.

模型 IV: 蜗壳采用保压(或直埋)方案,通过选择合理的充水保压值以保证机组运行时钢蜗壳与外围混凝土紧密贴在一起.

以上 4 种模型除模型 III 的蜗壳钢衬在铺设垫层范围局部为自由以及垫层钢管进口端全部固定外,其他边界条件设定为底边界固定,其余边界均为自由.

各模型的计算自振频率如表 1. 可以看出:  
 (1) 保压(直埋)方案蜗壳各阶自振频率略大于垫层方案,说明垫层的存在使蜗壳组合结构的整体刚度略有降低,振型则几乎完全相同.  
 (2) 垫层与钢衬紧密接触且回弹良好(模型 I 和模型 II)时,无论是采用链杆单元模拟还是实体单元模拟,蜗壳组合结构的自振频率差别不大.采用链杆单元模拟时计算的频率稍低些.  
 (3) 垫层与蜗壳钢衬局部脱空时,自振频率比正常状态或保压(直埋)方案要低.第 1 阶自振频率比保压方案降低约 15%. 振型与保压(直埋)方案差别也较大.第 1

表 1 蜗壳结构固有频率

Tab. 1 Natural frequencies of the spiral case Hz

频率阶次	垫层方案			保压(或直埋)方案(模型 IV)
	链杆单元(模型 I)	实体单元(模型 II)	钢衬与垫层脱空(模型 III)	
1	17.239	17.658	15.132	17.796
2	17.412	18.049	15.365	18.145
3	23.635	23.834	17.319	23.911
4	27.201	27.757	18.087	28.004
5	28.952	29.512	21.588	29.885
6	31.590	31.576	21.860	32.249
7	36.392	36.557	24.277	37.202
8	39.136	39.537	25.613	40.114
9	40.618	41.076	25.899	41.472
10	42.790	43.244	27.030	43.434

2 阶振型主要表现为进口段蜗壳钢衬的局部振动,混凝土结构的振型不明显.从第 3 阶开始出现蜗壳组合结构的整体振型.

对于共振复核,机组的振源频率从尾水管涡带的低频( $< 1$  Hz)到电磁振动的高频(100 Hz),分布较广,完全避开所有共振区较为困难.例如,第一阶频率与水轮机叶片数频率( $Zr \cdot f_n = 16.25$  Hz)就相距较近.但是,结构基频与主振源——不平衡振动的频率相距较远,不存在共振可能,满足厂房设计规范的要求.且对于不同的埋设方式,结构基频的变化并不显著,不会影响到共振复核结论.研究表明,从自由振动和共振复核方面评价,蜗壳 3 种埋设方案的动刚度相差不大,能够保证巨型机组的运行稳定性.

4 振动反应计算分析

采用水轮机模型试验测定的压力脉动数据,作为输入荷载,计算厂房结构的振动反应.两种埋设方式下的流道结构和厂房结构振动反应最大值汇总列于表 2.3. 由于座环上环板是推力轴承和水导轴承的主要支撑基础,在图 1 给出其横河向均方根加速度分布,以资说明.

表 2 各典型构件最大振动应力汇总

Tab. 2 Summary of vibration stresses for typical structural components M Pa

构件	保压方案		垫层方案	
	$e_{1max}$	$e_{3max}$	$e_{1max}$	$e_{3max}$
蜗壳钢板	0.791	- 0.496	4.894	- 3.296
过渡板	1.369	- 0.965	1.369	- 0.946
座环	1.254	1.169	1.037	1.478
固定导叶	1.386	- 1.193	1.324	- 1.133
蜗壳外围混凝土	0.210	- 0.140	0.136	- 0.095

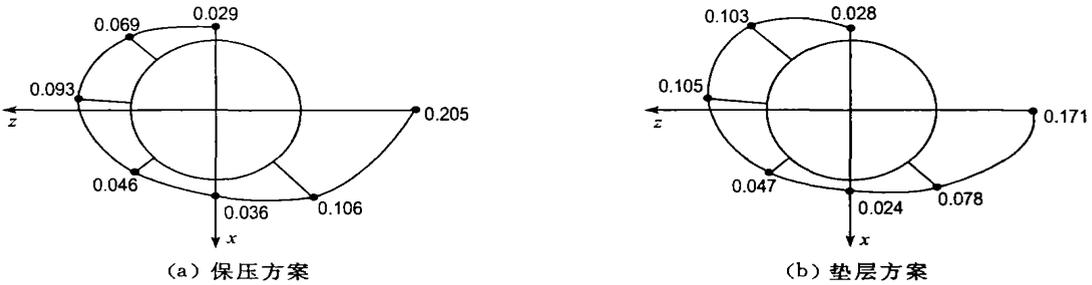
无论蜗壳采用保压方案还是采用垫层方案,水轮机流道结构和主厂房结构的振动应力均很小,远小于材料的允许抗拉和抗压强度.说明在脉动压力作用下,强度不是厂房结构的控制因素,主要应关注振动对机组主机和辅机设备、人体保健与环境等的影响,以及结构的疲劳破坏.

从计算结果中看出,当蜗壳采用垫层方案时,厂房混凝土结构大部分典型节点各方向的振动反应均比采用保压方案时的小一些,个别节点水平方向的振动反应略有增大,但增加的幅度非常小.参考相关的振动控制标准,振动的加速度、速度和位移反应均在允许范围内.

表 3 厂房混凝土结构振动反应最大值汇总

Tab. 3 Summary of vibration responses for concrete structures of the powerhouse

结构构件		振动位移 /mm		振动速度 /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		加速度 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	
		竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平
蜗壳外围混凝土	保压	0.036	0.039	2.366	1.622	0.529	0.372
	垫层	0.030	0.038	1.845	1.210	0.409	0.277
定子基础	保压	0.034	0.042	2.218	1.094	0.494	0.246
	垫层	0.028	0.041	1.742	0.951	0.385	0.179
发电机层楼板	保压	0.029	0.058	1.585	1.302	0.348	0.117
	垫层	0.029	0.058	1.280	1.299	0.278	0.101

图 1 两种方案下座环上环板横河向均方根加速度分布图 ( $\text{m/s}^2$ )Fig. 1 Distribution of effective acceleration ( $\text{m/s}^2$ ) across the stream for top ring plate of the stay ring

对于垫层铺设范围的敏感性,仅进行了垫层铺设起点距基坑里衬距离的分析,从 2.5 m 增大到 3.0 m 的分析结论是,对流道结构振动反应幅值的降低有一定作用,但不是特别显著. 鉴于流道结构和钢筋混凝土结构的振动反应均不突出,单纯从控制振动幅值的角度出发,增大在座环上环板附近的直埋范围,必要性不显著.

## 5 流道结构疲劳分析

在长期交变应力作用下,流道结构的疲劳破坏是设计和运行中重要问题之一. 疲劳分析的基本思路是,根据计算所得动应力时程曲线,统计出

应力曲线上各应力水平在给定时间内的循环次数,结合材料的  $S-N$  曲线,计算出每一应力水平在给定时间内的损伤,如果材料的某一应力水平低于材料的疲劳极限,则认为该应力水平不对材料产生疲劳损伤,即该循环应力水平下材料的疲劳寿命为无限长.

考虑静水压力造成的各部位的最大应力与脉动水压力造成的最大动应力的最不利组合时,各部位的 von Mises 应力水平见表 4. 可以看出,在应力最不利组合情况下各部位的应力水平远小于材料的疲劳极限,不会导致材料产生疲劳损伤,在使用寿命期不会产生疲劳破坏.

表 4 最不利组合下各部位的最大 von-Mises 应力

Tab. 4 Maximum von-Mises stresses in the worst load combination case /MPa

方案	部位	最大动应力	最大静应力	最大总应力	循环特征	疲劳极限
保压方案	钢蜗壳	0.676	174	174.676	0.996 1	490
	上环	0.579	129	129.579	0.995 5	295
	下环	0.573	126	126.573	0.995 5	295
	固定导叶	0.597	67.2	67.797	0.991 2	275
垫层方案	钢蜗壳	2.858	219	221.858	0.987 1	490
	上环	3.203	184	187.203	0.982 9	295
	下环	1.010	124	125.010	0.991 9	295
	固定导叶	3.203	81.4	84.603	0.962 1	275

注: 循环特征  $R = \sigma_s / \sigma_t$ ,  $\sigma_s$  为静应力,  $\sigma_t$  为总应力

## 6 结 语

(1) 水轮机支承结构的整体径向刚度,受蜗壳埋设方式的影响很小,计算实例表明,可以满足机组稳定运行要求。

(2) 蜗壳埋设方式对厂房结构自由振动频率有一定的影响,但对共振复核的结论没有本质影响。而如何保证蜗壳钢衬与混凝土之间结合良好,消除其运行期的间隙,是结构刚度保证的关键。

(3) 在水轮机流道脉动压力作用下,垫层方案下结构的振动反应与动应力和保压方案下的相比,没有显著的增大或变化,仅仅对外围铺设垫层的蜗壳钢板的振动影响较为突出。复核表明,振动反应幅值和疲劳强度均在允许范围内。

(4) 综合分析认为,从水轮机流道和厂房结构的刚度和动态强度评价,蜗壳埋设方式的影响不显著,不应成为蜗壳埋设方式选择的制约因素。

## 参考文献:

- [1] 秦继章,马善定,伍鹤皋,等. 二滩水电站钢蜗壳与外围钢筋混凝土联合受力三维仿真材料模型试验研究[J]. 水利学报, 1999, 30(6): 11-15
- [2] 伍鹤皋,马善定,白建明. 三峡水电站充水保压蜗壳平面非线性分析[J]. 水利学报, 2003, 34(5): 57-61
- [3] 董毓新,李彦硕. 水电站建筑物结构分析[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995
- [4] 付红霞,马震岳,董毓新. 水电站蜗壳垫层结构研究[J]. 水利学报, 2003, 34(6): 85-88
- [5] 李 丹,陈 坪. 三峡电站蜗壳敷设软垫层浇筑外围混凝土研究[J]. 人民长江, 2004, 35(4): 1-3, 48
- [6] 马震岳,董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004
- [7] 陈 婧,马震岳,刘志明,等. 三峡水电站主厂房振动分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 36-39, 21
- [8] 欧阳金惠,陈厚群,李德裕. 三峡电站厂房结构振动计算与试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 484-490

## Study of dynamic characteristics of a giant spiral case with different embedment manners

CHEN Jing<sup>\*</sup>, ZHANG Yun-tiang, MA Zhen-yue, WANG Yang, CHENG Guo-rui

(School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

**Abstract** With the increase of unit capacity of hydro-generators, the spiral case becomes a giant hydraulic structure with very high HD value, but its dynamic characteristics which should be paid particular attention to in the design stage have rarely been touched both in theory and practice. Three typical manners of steel spiral casing (SC) embedded in concrete, i. e., manner of SC embedded in concrete with soft cushion layer (MSCL), manner of SC embedded in concrete while holding a certain water head inside SC (MHWH) and manner of SC embedded directly in concrete (MD), were researched on the performances of a giant spiral case performed by 3-D finite element methods. To optimize the design of the giant spiral case, free-vibration and stiffness behaviors, dynamic responses under water pressure pulsation and anti-fatigue performance were analyzed and compared respectively. Results show that the influence of different embedment manners on the static and dynamic performances of the powerhouse is minor and should not be the control factor while selecting embedment manners.

**Key words** spiral case; embedment manner; dynamic characteristics; fatigue; numerical simulation