

高水头电站垫层式蜗壳自振特性分析

周 伟, 赵丽娟, 李道广

(四川大渡河双江口水电开发有限公司, 四川 马尔康 624000)

摘 要: 垫层蜗壳作为蜗壳结构形式中的一种,其结构形式复杂,内水压力传递比例不易控制,受力条件复杂,为分析探讨钢蜗壳在不同的垫层弹性模量和垫层包角作用下的自振特性,研究其自振频率与垫层弹性模量、垫层包角的关系,本文建立钢蜗壳的三维有限元模型,采用弹簧单元替代垫层和外包混凝土,考虑了垫层与钢板、混凝土与钢板接触效应,模拟了垫层和外包混凝土对钢蜗壳的作用。分析研究表明:钢蜗壳的自振频率随着垫层弹性模量的增大而增大,随着垫层包角的增大而减小,为机组的共振校核提供了一定的理论依据。

关键词: 垫层式蜗壳; 自振特性; 有限元; 高水头电站

中图分类号:TV734.21

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)04-0171-05

Analysis of self-vibration characteristics of cushion type volute chamber in high water head hydropower station

ZHOU Wei, ZHAO Lijuan, LI Daoguang

(Shuangjiangkou Hydropower Development of Sichuan Dadu River Co., Ltd. Maerkang 624000, China)

Abstract: The cushion type volute chamber is a form of spiral case structure, because of the complex configuration of spiral case of cushion layer and it is generally difficult to control the transfer ratio of internal water pressure. For the analysis of steel spiral case in different layer elastic modulus and cushion angle under the action of self-vibration characteristics, study on the natural frequency of the self-vibration and the elastic modulus of cushion package, angular relationship. In this paper, 3D finite element model of steel spiral case was established by using a spring unit replacement cushion and the cushion and the simulation of concrete, considering the contact effects of steel and concrete, Simulation of cushion and concrete of steel spiral case role. Research shows that the natural frequency of vibration increases as the elastic modulus increases, decreases with the increase of cushion angle, the frequency can provide certain theory basis for the resonance vibration of unit.

Key words: cushion type volute chamber; self vibration characteristic; finite element; high water head hydropower station

1 概 述

随着科学技术的不断进步,世界各国的水电建设正经历着日新月异的变化。高水头、大容量的水电站不断兴建,使得水轮机的单机出力也得到了迅猛的提高,单机容量已从 200 MW 左右提高到 700 MW 以上。随着国内外大型常规电站和抽水蓄能电站的兴建,蜗壳的 HD (H 是指蜗壳承受的水头, D 是指蜗壳进口断面的直径) 值急剧增长,蜗壳日趋向巨型和超巨型化发展。例如,前苏联布拉茨克电站,单机容量 23 万 kW, $HD = 935 \text{ m}^2$; 萨扬舒申斯克电站,单机容量 64 万 kW, $HD = 1\,710 \text{ m}^2$; 罗贡电站,

单机容量 61.5 万 kW, $HD = 2\,247 \text{ m}^2$, 也是世界上 HD 值最大的蜗壳; 我国的三峡水电站,单机容量 70 万 kW, $HD = 2\,135 \text{ m}^2$; 小浪底水电站,单机容量 30 万 kW, $HD = 1\,337 \text{ m}^2$; 李家峡水电站,单机容量 40 万 kW, $HD = 1\,296 \text{ m}^2$ 。

蜗壳是水电站结构中的重要组成部分,其结构形式不仅要满足使有效水头的损失达到最小的要求,而且还要有足够的强度,以保证水电站的安全运行。此外,还必须满足施工方便和造价低廉等要求。垫层蜗壳作为蜗壳结构形式中的一种,其结构形式复杂,垫层材料具有非线性特性,内水压力传递比例不易控制,尤其是随着水电站工作水头和单机容量

的急剧增大,结构尺寸更趋庞大,受力条件更为复杂,结构安全更显突出,这就对垫层蜗壳的应用提出了更高的要求,如何用有限元模拟垫层蜗壳的作用机理,是至今尚需要研究的课题^[1-4]。

2 蜗壳的基本类型

蜗壳是水电站水下部分的主要结构之一,其结构形式不仅要满足使有效水头的损失达到最小的要求,而且还要有足够的强度,以保证水电站的安全运行。此外,还必须满足施工方便和造价低廉等要求。按蜗壳组合结构设计划分,国内外水电站蜗壳结构设计可分为以下四种基本型式:混凝土蜗壳、有弹性垫层蜗壳、充水保压蜗壳和联合承载蜗壳。

(1)混凝土蜗壳。混凝土蜗壳结构主要特点为内水压力直接作用在钢筋混凝土上,未设内部钢衬和弹性垫层,空腔结构多为梯形。这类蜗壳结构主要用于水头小于40 m的小型水电站,按规范对其进行结构力学计算,在已建该类水电站中仅少部分采用了有限元法进行分析研究。

(2)有弹性垫层蜗壳。有弹性垫层蜗壳就是在钢衬与外围混凝土之间加一层弹性模量较小的材料,其作用主要为以下几个方面:①钢蜗壳独自承担大部内水压力,可充分利用钢材自身强度,减少混凝土的厚度;②在外围混凝土与钢衬之间,人为增加其间隔距离,为钢衬在运行中留下变形空间,而外围钢筋混凝土结构主要承受上部结构传递的荷载(如发电机层、母线层、水轮机层,定子基础负荷以及上下机架基础负荷等),达到充分发挥混凝土抗压强度,减少配筋的作用;③充分利用下半圆混凝土的握裹作用,减少蜗壳和座环的扭转变形,提高蜗壳的整体刚度和抗震性能;垫层可以有效削减蜗壳振动对上部结构的影响,本文主要针对此种形式蜗壳进行分析。

(3)充水保压蜗壳。充水保压蜗壳就是按某一水压力对钢蜗壳充水预压后,在保持这一压力状态下进行蜗壳外围混凝土浇筑,待混凝土完全凝固结束,卸掉其内部水压力,在钢衬与外围混凝土之间形成一层间隙。其作用是利用钢蜗壳自身的承载能力承担绝大部内水压力,减轻内水压力对外围混凝土的作用;当内水压力大于充水压力,混凝土与钢衬将为完全接触状态,形成联合承载作用,钢筋混凝土和钢衬共同承担超出予压的水头。这种蜗壳结构可改善混凝土中应力状态和减小配筋量,提高机组运行的稳定性,是高水头电站蜗壳设计的方向。但由于需要进行充水预压及多种结构处理,增加了成本和

工程量。

(4)联合承载蜗壳。联合承载蜗壳是在钢蜗壳外直接浇筑外围混凝土,不铺设任何垫层材料,这种结构型式刚度大,让外围混凝土承担一定比例的内水压力,这种完全联合承载结构可以充分发挥外围混凝土强度,达到减小钢衬厚度。前苏联对这种蜗壳结构型式的研究较多,并应用于努列克、英古里和萨扬舒申斯克等水电站中。北欧一些国家和日本在高水头电站中也采用此类蜗壳结构型式,而在我国大中型水电站建设中应用较少^[2]。

3 分析计算方法

随着蜗壳结构设计不断的改进,对蜗壳结构的研究也逐渐地深入,不同的国家和地区给出了多种形式的研究方法,大致可分为结构力学法、模型试验法和有限元法三种。本文主要通过 ANSYS 软件为平台结合实际工程,建立三维垫层蜗壳结构有限元模型,考虑了垫层与钢板、混凝土与钢板接触效应等因素,对垫层蜗壳自振特性进行了分析(限于篇幅,有限元原理在此不再赘述)。蜗壳可以近似视为一种循环对称结构,也称周期对称结构。周期对称结构分析的关键是施加周期对称相容条件,通常采用两种方法:扇区复制法(Duplicate Sector)和复艾尔米特法(Complex Hermitian)进行强制施加。ANSYS 采用扇区复制法,基本思想是:在求解阶段,ANSYS 在基本扇区位置复制一个同基本扇区完全相同的新扇区单元,称为复制扇区(Duplicate Sector),并在复制扇区上施加所有的荷载、边界条件以及约束和耦合方程,如图1所示。在基本扇区(和复制扇区)的“高”、“低”两侧的对应该两个结点通过施加位移耦合方程来实现周期对称相容条件。此处“高”、“低”两侧的对应该结点是指在空间几何坐标上仅相差一个扇角度的两个结点。

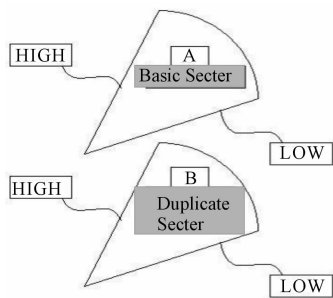


图1 基本扇区和复制扇区的“高”侧和“低”侧

结点位移耦合方程:

$$\begin{Bmatrix} U^A High \\ U^B High \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k\alpha & \sin k\alpha \\ -\sin k\alpha & \cos k\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U^A Low \\ U^B Low \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： $U^A High$, $U^A low$ 表示基本扇区“高”、“低”侧结点位移矢量； $U^B High$, $U^B low$ 表示复制扇区“高”、“低”侧结点位移矢量；当 N 为偶数时 $k = 0, 1, 2, \dots, N/2$ ；当 N 为奇数时 $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1/2$ ； N 表示扇区个数，为整数； α 为扇角（ $= 2\pi/N$ ）。

4 垫层式蜗壳自振频率计算分析实例

4.1 计算基本资料

(1) 计算模型。某水电站厂房钢蜗壳进口直径 $R = 6.42\text{ m}$ ，其圆距机组中心线 8.6 m ，钢板厚 6 cm ；座环上下环板厚 20 cm ，蜗壳垫层厚度取 3 cm 。计算模型取钢衬、水轮机上下环、导叶，钢衬从厂房上游面向上游延伸 6 m ，在与垫层相接的钢衬外面加径向的弹簧单元，用来模拟垫层对钢衬的作用，通过改变弹簧刚度来模拟不同的弹性模量垫层。计算模型见图 2、图 3。

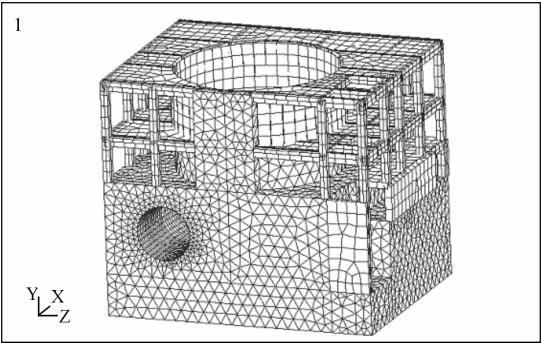


图 2 钢蜗壳结构整体有限元模型

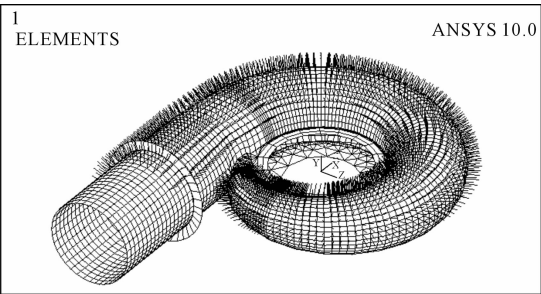


图 3 带弹簧单元的钢蜗壳有限元模型

(2) 本文主要通过 ANSYS 软件模拟垫层蜗壳，结构混凝土用 solid95 实体单元模拟；厚度变化的蜗壳钢板、座环上下环板由薄板单元 shell63 模拟；固定导叶由 beam188 单元模拟；垫层由实体单元 solid45 单元模拟。钢衬 - 混凝土、钢衬 - 垫层之间的接触为面接触，采用 contal174 和 targel170 单元模拟。整个模型共剖分单元 119 208 个，节点 152 897 个。

坐标取向以顺水流方向为 X 方向，向下游为正；竖直方向为 Y 向，向上为正；坝轴线方向为 Z 向，向右岸为正。

(3) 结构材料。固定导叶、钢蜗壳、座环：密度 $7\,800\text{ kg/m}^3$ ，泊松比 0.30 ，弹性模量 210 GPa 。

(4) 边界条件。约束上游延伸段，水轮机上下环，导叶，与混凝土交接的钢衬施加径向约束，与垫层交接的钢衬加三维弹簧单元。

(5) 受力情况。因进行空壳自振特性分析，考虑得相关荷载主要有自重、蜗壳的最大工作水压为 2.76 MPa 、厂房发电机层荷载为 85 kN/m^2 、电气夹层荷载为 20 kN/m^2 、设备重量如下：

发电机下机架：2400kN；发电机转子：18000kN；发电机定子：9500kN；水轮机转轮：2700kN；水轮机顶盖：2300kN。

(6) 计算分析方案。方案一：垫层厚度为 0.03 m ，包角为水平腰线上 30° ，垫层弹性模量分别为 0 、 0.1 、 1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.5 、 5.25 和 $28\,500\text{ MPa}$ 计算弹簧刚度。

方案二：垫层厚度为 0.03 m ，包角至水平腰线，即 0° ，垫层弹性模量分别为 0 、 0.1 、 1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.5 、 5.25 和 $28\,500\text{ MPa}$ 计算弹簧刚度。

方案三：垫层厚度为 0.03 m ，包角为水平腰线以下 30° ，垫层弹性模量分别为 0 、 0.1 、 1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.5 、 5.25 和 $28\,500\text{ MPa}$ 计算弹簧刚度。

其中以上弹簧单元刚度按下式计算：

$$K = \frac{A_i \times E}{h} \quad (2)$$

式中： K 为弹簧刚度； h 为垫层厚度； A_i 为节点所对应的有效面积； E 为垫层所对应的弹性模量。

(7) 计算步骤。获得弹簧刚度后，按以上方案修改模型中弹簧单元参数以达到模拟不同垫层弹性模量效果，利用 ANSYS 中动力分析模块，分别计算蜗壳自振频率。

4.2 计算结果

根据以上用弹簧单元模拟外包垫层和混凝土的空壳模型，通过改变弹簧刚度来模拟不同垫层弹性模量和不同包角对空壳自振频率的影响，其计算结果见表 1 ~ 表 3。

4.3 结果分析

对于方案一，其垫层包角为水平腰线向上 30° ，当垫层弹性模量为 0 时，即钢衬外面无垫层时，其一阶频率为 37.259 Hz ，第五阶频率为 54.234 Hz ，第十阶频率为 62.774 Hz ；当垫层弹性模量逐渐增大到 0.1

MPa 时,其一阶频率增大到 39.159 Hz,第五阶频率增大到 55.689 Hz,第十阶频率增大到 63.426 Hz,增幅

不大;当垫层弹性模量增大到 2.0 MPa 时其一阶频率

表 1 方案一(包角上 30°)方案结构的自振频率 MPa, Hz

阶次	垫层弹性模量							
	0	0.1	1	2	3	4.5	5.25	28500
1	37.259	39.159	53.028	61.896	62.897	63.424	63.589	69.820
2	40.035	42.037	56.895	65.501	67.749	67.998	68.110	73.950
3	51.848	53.275	60.950	67.586	69.839	69.863	69.871	74.917
4	52.870	54.292	66.093	69.565	71.794	72.207	72.296	77.704
5	54.234	55.689	67.078	69.904	74.857	75.513	75.546	78.346
6	56.538	57.982	67.225	72.064	75.675	76.707	76.739	84.318
7	57.467	58.902	68.841	75.365	76.623	82.284	82.345	84.708
8	59.384	60.757	69.625	76.384	80.264	82.578	82.642	94.262
9	60.321	61.781	69.964	77.131	82.176	85.683	89.258	94.398
10	62.774	63.426	70.998	77.486	82.497	91.848	92.025	107.67

表 2 方案二(包角 0°)方案结构的自振频率 MPa, Hz

阶次	垫层弹性模量							
	0	0.1	1	2	3	4.5	5.25	28500
1	32.629	34.958	50.943	59.099	60.852	61.751	62.017	69.829
2	35.115	37.147	51.439	63.913	66.94	67.202	67.318	73.953
3	45.087	46.668	57.84	64.773	69.4	69.631	69.668	74.917
4	49.018	50.531	61.201	66.775	70.397	70.883	70.978	77.704
5	50.667	52.222	62.543	69.55	72.304	75.01	75.089	78.346
6	51.667	53.058	64.751	70.705	74.375	76.207	76.241	84.318
7	52.303	53.81	65.877	71.545	76.059	81.089	81.754	84.708
8	54.600	56.09	66.401	72.268	76.348	81.664	82.157	94.262
9	55.951	57.35	67.215	74.634	79.921	82.106	84.607	94.398
10	56.319	57.835	68.262	75.537	80.686	88.268	91.295	107.67

表 3 方案三(包角下 30°)方案结构的自振频率 MPa, Hz

阶次	垫层弹性模量							
	0	0.1	1	2	3	4.5	5.25	28500
1	31.061	33.418	48.458	55.911	58.766	60.279	60.682	69.841
2	32.227	34.555	50.272	61.958	66.156	66.448	66.564	73.975
3	39.335	40.761	52.522	63.003	67.29	68.652	68.762	74.917
4	43.790	45.275	55.527	65.159	69.038	70.672	70.743	77.708
5	44.595	46.303	58.796	65.838	70.551	73.833	73.943	78.350
6	48.615	50.038	60.504	66.286	71.088	75.422	76.123	84.320
7	49.061	50.681	62.432	68.478	73.038	76.142	78.633	84.710
8	50.710	52.229	63.678	70.434	75.224	79.073	81.375	94.262
9	52.566	54.011	65.211	70.671	75.604	81.265	81.607	94.398
10	53.571	55.032	65.872	72.733	76.54	81.513	82.319	107.67

增大到 61.896 Hz,第五阶频率增大到 69.904 Hz,第十阶频率增大到 77.486 Hz,相对于垫层弹性模量从 0 增加到 0.1 MPa,垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较

大;当垫层弹性模量增大到 5.25 MPa 时其一阶频率增大到 63.589 Hz,第五阶频率增大到 75.546 Hz,第十阶频率增大到 92.025 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 2.0

MPa 增加到 5.25 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小;当垫层弹性模量增大到 28 500 MPa 时,即钢衬外面全是混凝土包围,其一阶频率增大到 69.82 Hz,第五阶频率增大到 78.346 Hz,第十阶频率增大到 107.67 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 5.25 MPa 增加到 28 500 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小。

(2)对于方案二,其垫层包角为水平腰线位置,当垫层弹性模量为 0 时,即钢衬外面无垫层时,其一阶频率为 32.629 Hz,第五阶频率为 50.667 Hz,第十阶频率为 56.319 Hz;当垫层弹性模量逐渐增大到 0.1 MPa 时,其一阶频率增大到 34.958 Hz,第五阶频率增大到 52.222 Hz,第十阶频率增大到 57.835 Hz,增幅不大;当垫层弹性模量增大到 2.0 MPa 时其一阶频率增大到 59.099 Hz,第五阶频率增大到 69.550 Hz,第十阶频率增大到 75.537 Hz,相对于垫层弹性模量从 0 增加到 0.1 MPa,垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较大;当垫层弹性模量增大到 5.25 MPa 时其一阶频率增大到 62.017 Hz,第五阶频率增大到 75.089 Hz,第十阶频率增大到 91.295 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 2.0 MPa 增加到 5.25 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小;当垫层弹性模量增大到 28 500 MPa 时,即钢衬外面全是混凝土包围,其一阶频率增大到 69.829 Hz,第五阶频率增大到 78.346 Hz,第十阶频率增大到 107.67 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 5.25 MPa 增加到 28 500 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小。

(3)对于方案三,其垫层包角为水平腰线向下 30°,当垫层弹性模量为 0 时,即钢衬外面无垫层时,其一阶频率为 31.061 Hz,第五阶频率为 44.595 Hz,第十阶频率为 53.571 Hz;当垫层弹性模量逐渐增大到 0.1 MPa 时,其一阶频率增大到 33.418 Hz,第五阶频率增大到 46.303 Hz,第十阶频率增大到 55.032 Hz,增幅不大;当垫层弹性模量增大到 2.0 MPa 时其一阶频率增大到 55.911 Hz,第五阶频率增大到 65.838 Hz,第十阶频率增大到 72.733 Hz,相对于垫层弹性模量从 0 增加到 0.1 MPa,垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较大;当垫层弹性模量增大到 5.25 MPa 时其一阶频率增大到 60.682 Hz,第五阶频率增

大到 73.943 Hz,第十阶频率增大到 82.319 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 2.0 MPa 增加到 5.25 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小;当垫层弹性模量增大到 28 500 MPa 时,即钢衬外面全是混凝土包围,其一阶频率增大到 69.841 Hz,第五阶频率增大到 78.35 Hz,第十阶频率增大到 107.67 Hz,相对于垫层弹性模量从 0.1 MPa 增加到 2.0 MPa,垫层弹性模量从 5.25 MPa 增加到 28 500 MPa 时,其各阶自振频率增大的幅度较小。

5 结 语

本文通过 ANSYS 软件为平台结合实际工程,建立三维垫层蜗壳结构有限元模型,模拟不同垫层、不同包角空壳自振特性分析,总结出钢蜗壳的自振频率与垫层弹性模量、垫层包角的关系如下,供机组的共振校核参考。

(1)钢蜗壳的自振频率与垫层弹性模量的关系:在同一垫层包角情况下钢蜗壳的自振频率都随着外包垫层弹性模量的增大而增大。当垫层弹性模量在 0.1~5.25 MPa 之间变化时,自振频率的变化较大,即在此区域垫层弹性模量的变化对自振频率的影响最大。

(2)钢蜗壳的自振频率与垫层包角的关系:钢蜗壳的自振频率随着垫层包角的增大而减小,当垫层包角从腰线位置到包角上 30°变化时,对于垫层弹性模量较小的钢蜗壳的自振频率影响较大,对于垫层弹性模量越大的钢蜗壳的自振频率影响较小;当包角从腰线位置到包角下 30°变化时,对于钢蜗壳的自振频率影响很小。

(3)钢蜗壳外面全部包混凝土,钢蜗壳的刚度最大,因此自振频率也最大,此时,无论包角为多少,其蜗壳结构的自振频率将都为定值,不会有变化。

参考文献:

- [1] 秦继章,马善定,伍鹤皋,等.三峡水电站“充水保压”钢蜗壳外围混凝土结构三维有限元分析[J].水利学报,2001,32(6):28-32.
- [2] 付洪霞,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.
- [3] 马震岳,张运良,陈靖,等.巨型水轮机蜗壳软垫层埋设方式可行性论证[J].水力发电,2006,32(1):28-32.
- [4] 黄光明,王忠勇,李立年.漫湾水电站压力钢管弹性垫层的设计与实践[J].水力发电,1997,23(1):25-27.