

大型水电站蜗壳及厂房结构动力分析问题探讨

张运良

(大连理工大学建设工程学部水利工程学院 辽宁 大连 116024)

摘要 介绍我国大型水电站蜗壳与厂房结构的动力分析研究现状,以及蜗壳与厂房结构和机组运行稳定性之间的关系,并就影响动力反应特性的几个因素,如垫层材料的非线性、蜗壳钢衬和外围混凝土间的非均匀接触、外围混凝土的已有损伤和开裂、流道内巨大水体的存在等进行论述,指出在内源荷载作用下地下厂房及蜗壳结构动力分析数值模型构建中所存在的问题。最后,结合汶川地震中地下厂房的震害,详细论证了进行地下蜗壳及厂房抗震研究的必要性和紧迫性。

关键词 水电站;厂房;蜗壳;动力分析;地震

中图分类号:TV312

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2010)06-0020-06

Dynamic analysis of spiral casings and powerhouses of large-scale hydropower stations//ZHANG Yun-liang (School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The research advances in the dynamic analysis of spiral casings of large-scale hydropower stations as well as the relationship between their dynamic characteristics and the safety operation of turbine generating sets were introduced. The necessity for conducting researches on some factors for the dynamic responses of the spiral casings and hydropower houses were discussed, including the nonlinearity of materials for cushion layer, the non-uniform contact between steel spiral casings and surrounding concrete, the existing damage and cracks in reinforced concrete and the giant water body in flow channels, etc. The existing problems in the establishment of numerical models for dynamic analysis of underground hydropower houses and spiral casings excited by internal forces of water and turbine generating sets were put forward. Finally, based on the seismic damage of large-and middle-scale underground hydropower houses in "Wenchuan Earthquake", the necessity and impendency of aseismic researches on the underground hydropower houses were demonstrated.

Key words: hydropower station; powerhouse; spiral casing; dynamic analysis; earthquake

随着我国近年来对电力能源的巨大需求以及西部大开发和西电东送战略决策的持续推进,一大批装机容量达世界级的巨型水电站已经完建、正在兴建或规划设计中^[1-2]。例如,长江流域的三峡和葛洲坝水电站,金沙江流域的溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德水电站,澜沧江流域的小湾、糯扎渡水电站,雅砻江流域的锦屏、二滩、两河口水电站,黄河流域的拉西瓦水电站,大渡河流域的大岗山、瀑布沟水电站,以及红水河流域的龙滩等水电站。这些巨型水电站单机容量高,例如三峡、溪洛渡、向家坝等电站单机容量分别达 756 MW、774 MW、800 MW,处在可行性研究阶段的白鹤滩、乌东德等水电站,单机容量拟为 1 000 MW。在西部水电建设中,我国还约需要百余台 700 MW 及以上的超大容量机组,水电机组朝着大容量、大尺寸、高可靠性发展已是必然趋势^[3-6]。

由于发展大容量机组可减少装机台数,能显著提高工程效益,并且有利于枢纽的总体布置,为了适应我国大江大河水电开发的需要,国内两大机组制造厂家东方电机股份有限公司和哈尔滨电机厂有限责任公司目前正加紧对 1 000 MW 级机组关键技术问题的研究,其中 1 个突出的问题就是如何保证大尺寸水轮机的安全和稳定运行。对于 1 000 MW 级机组,土建方面面临的问题包括:①水力流道中不稳定流的激振能量会随着直径的增大而增大;②流道部件的刚度和固有频率会随着直径的增大而下降,从而使共振的危险性增大;③我国的大江大河水量四季不均,水位大幅度涨落导致水电站水头变幅很大,造成水轮机偏离最优工况的几率大幅度增加。诸多不利因素的存在将会使机组的安全和稳定运行问题变得异常突出,这对安放水电机组的水电站厂

基金项目:国家自然科学基金青年基金(50809013);中国水利水电科学研究院开放基金(IWHR02009019)

作者简介:张运良(1973—),男,安徽亳州人,副教授,博士,从事水电站和核电站建筑物结构安全评价工作。E-mail:zhangyl@dl.cn

房的内部结构设计提出了更高的要求。

1 蜗壳及厂房结构

我国的蜗壳及厂房结构设计目前已达世界先进水平。作为表征蜗壳承受内水压力大小的设计参数 HD 值(D 为蜗壳进口直径, H 为设计作用水头)位居世界前列。例如三峡、拉西瓦、糯扎渡、溪洛渡、龙滩等水电站蜗壳 HD 值分别达 $1\,730\text{ m}^2$, $1\,900\text{ m}^2$, $1\,960\text{ m}^2$, $2\,048\text{ m}^2$, $2\,105\text{ m}^2$ 。未来 $1\,000\text{ MW}$ 级水电机组的建设和发展将对蜗壳的结构设计提出新的挑战。

作为水电站厂房内最重要的构件,蜗壳组合结构的功能是向水轮机提供平稳水流并承受水轮发电机组传来的静、动荷载(除承受巨大的内压水头和结构自重、温度荷载等静力荷载外,还直接或间接承受着来自水流和机组转动所产生的水力、机械力和电磁力等动力荷载)。从广义的角度讲,大型蜗壳组合结构是由座环环板、固定导叶、蜗壳钢衬以及外围钢筋混凝土(有时包括上部机墩和风罩及下部部分尾水管外围混凝土)等围成的空腔渐变复杂系统,形似蜗牛,构成了水电机组的结构支撑体系。为了适应当前高水头、大容量机组的发展,蜗壳在平面及竖向上的尺寸必须相应增大,这势必造成了蜗壳组合结构及厂房整体的静、动力刚度下降,从而对机组的运行稳定性产生不利影响。

另一方面,我国西部富集水电资源的大江大河流域大多处于强震频发的高烈度地震区^[7-14]。这些地区的特点是活动断层多,地震频度高、强度大、范围广。据统计,西部地区有活动断层 371 条,总长度为 2.8 万 km ,并有 11 个 8.5 级、45 个 8 级、208 个 7.5 级和 478 个 7 级潜在震源区^[13-14]。因此,这些巨型水电工程面临着严重的地震威胁。

由此可见,巨大的结构尺寸,超高多变的运行水头以及严酷复杂的荷载环境条件将给巨型蜗壳的结构设计和研究带来一系列新的问题,应尽早开展针对性的研究。

2 研究现状及若干问题探讨

下面将从土建设计方面对蜗壳结构的静、动力分析和计算,特别是动力分析所取得的进展、当前存在的问题以及未来所要开展的研究进行探讨。

2.1 蜗壳结构的埋设方式

蜗壳结构计算和分析一般是结合某种蜗壳埋设方式进行的。目前,国内外中高水头、大容量混流式水轮机蜗壳主要采取 3 种结构形式:①在钢蜗壳外上部一定范围内铺设软垫层后浇筑外围混凝土,即

垫层蜗壳;②钢蜗壳在充水保压状态下浇筑外围混凝土,即保压蜗壳;③在钢蜗壳外直接浇筑混凝土,既不设垫层也不充水保压,蜗壳与外围混凝土联合完全承载,即直埋蜗壳。总结国内外的工程实践,3 种蜗壳结构形式均有不少应用,各具优缺点,大量的文献对此都有论述^[15-34]。

保压蜗壳的研究和应用较多也较为成熟,而垫层和直埋蜗壳施工方便、工期短,符合我国经济快速发展对电力市场的需求。因此,近几年来我国结合三峡右岸、拉西瓦、景洪、溪洛渡等水电站对垫层和直埋 2 种蜗壳埋设方式的研究逐渐增加。经过多年的现场观测、室内模型试验、数值模拟等研究^[15-37],可以认为,借助现代数值分析方法如有限元方法等,蜗壳结构在静力方面的强度和变形问题目前已经基本解决。随着断裂和损伤等理论的应用和计算技术的发展,蜗壳外围钢筋混凝土的静力非线性分析进展很快,部分研究成果已被设计所采用。但由于实际计算工作量大且异常繁琐,限制了很多新理论和方法的应用^[18]。

2.2 蜗壳及厂房动力分析主要内容

对蜗壳结构进行动力分析,不能像静力分析那样取局部模型进行简化考虑,有时需取厂房整体甚至包括一部分岩石介质进行。对于动力分析,当前的研究内容主要集中在以下几个方面^[15-37]:①垫层参数如弹性模量、铺设厚度及范围的选择和优化对蜗壳局部和厂房整体动力特性(频率和振型)的影响。②在机械力、电磁力和水力等内源激励作用下,3 种埋设方式的蜗壳及厂房动力反应特点及比较研究。③针对直埋蜗壳,评价因流道内水压力导致蜗壳外围混凝土内贯穿性集中裂缝或分布式损伤的存在对蜗壳和厂房整体抗振(震)性能和机组运行稳定性的影响。④水轮机脉动水压力作用下的蜗壳流道疲劳分析。⑤机组-厂房的耦联振动问题。

经过大量的研究发现,蜗壳埋设方式不会对蜗壳及厂房的整体刚度造成太大的影响,从而不会对机组的运行稳定性起到控制作用。基于多家单位的研究成果,三峡右岸电站最终对 15 号机组段采用了垫层-直埋组合蜗壳结构形式;拉西瓦地下电站全部机组段均采用了垫层蜗壳结构形式;溪洛渡电站正在研究采用与三峡电站类似的结构形式。至此,蜗壳埋设方式的选择和讨论基本达成共识。

2.3 主要问题探讨

对于蜗壳及厂房结构的动力分析,综合目前国内外的研究现状,尤其是数值模拟方面的研究成果,认为在以下几个方面需要进行深入探讨。

2.3.1 垫层材料

对于应用在水电站压力管道和蜗壳上的垫层材料(以聚氨酯软木材料为代表),计算和设计中对其实压缩模量、残余变形及疲劳徐变等静力性能做了较多的研究,但对其在脉动水压力、机组振源和地震等动荷载作用下动力非线性应力-应变关系的研究,目前基本上还未曾开展。随着机组规模和蜗壳及厂房尺寸的增大,振动问题日益突出。垫层的存在是否会严重削弱蜗壳及厂房的结构动力刚度,从而给机组和厂房的振动带来何种程度的影响,需要结合垫层材料的动态应力-应变关系进行深入研究。目前的研究由于缺乏试验资料,在进行动力分析时关于计算假定、模型和方法的处理均较简单。例如,建立动力数值分析模型时基本上都假定垫层为线弹性材料,且采用基于静力线性应力-应变关系所得到的单一压缩模量。实际上,垫层属较软的弹塑性材料,高 HD 值时在蜗壳及厂房的振动过程中垫层必然具有动力非线性特征。

目前,对垫层材料动态力学性能的研究这一基础性的工作在国内外至今还未受到重视,这与我国水电建设的发展形势是不相适应的。深入了解垫层材料的动态力学特性,对开展特高 HD 值条件下大直径垫层蜗壳和大埋深、高水头压力管道等结构在复杂环境条件下动态特性的研究和评价不可或缺,也对新型垫层材料的研制具有启发和指导意义。

2.3.2 混凝土的损伤和开裂对蜗壳及厂房动力特性的影响

相对于垫层和保压蜗壳,直埋蜗壳的优点是施工程序最简单、工期最短,并且可提供较大的整体静力刚度,是近年来颇受关注的一种蜗壳埋设方式。对于巨型电站,直埋蜗壳因其尺寸巨大,刚度相对较弱, HD 值又特高,在蜗壳薄弱部位(常为混凝土厚度较薄处如腰线、顶板及其之间的部位)一般会产生若干分布损伤区和宏观可见的集中裂缝,有的甚至裂穿。虽然目前蜗壳的设计都按钢筋混凝土结构设计,但配筋并不能阻止裂缝的产生,只能限制裂缝的宽度、深度及在静力荷载作用下的进一步扩展。从静力变形和强度上讲,直埋蜗壳结构经过适当配筋可以满足现行规范的设计要求。然而,水电站厂房内作用有频带较宽但频率密集的水力振动荷载,以及从机组上部支撑结构所传来的具有类周期性质的机械和电气荷载,这些均属于长期持续的往复荷载;在高烈度地震区还可能发生持时较短的强地震作用。在这些动力荷载作用下,大量的损伤区及裂缝尤其是薄弱部位贯穿性裂缝的存在必然会严重影响巨型蜗壳及厂房上部结构的振动特性和抗震性能。一般

来讲,已有损伤和裂缝不仅改变结构和材料的力学和阻尼性质,而且改变结构的形状和尺寸,从而改变其振动特性。从本质上讲,已含损伤和裂缝的钢筋混凝土结构的动力响应问题具有非线性特征。针对在流道内脉动水压力和地震荷载作用下,结合三峡右岸某机组段,考虑混凝土开裂和损伤的地面式蜗壳结构的动力特性和动力反应研究已有一些初步成果。例如,蒋奎超等^[25]建立了轴对称蜗壳结构模型,基于混凝土各向同性损伤本构模型,研究了在脉动水压力作用下直埋蜗壳结构的动力响应。然而,采用轴对称模型并不能反映蜗壳及厂房的整体三维动力特性。马震岳等^[24]、张运良等^[30]建立了全三维厂房整体动力分析模型,研究了水力脉动荷载作用下厂房整体和蜗壳局部结构的动力响应特征,对蜗壳外围混凝土的损伤和裂缝进行了简化处理,即先进行静态内水压力作用下蜗壳外围钢筋混凝土的非线性有限元分析,然后,据此概化混凝土中的损伤和裂缝的分布范围及形态,在此基础上采用2种简化处理方案:一是将含损伤和裂缝的混凝土统一处理成正交各向异性材料,受拉方向的混凝土弹性模量折减为初始模量的 $1/2$;二是将损伤区或分布裂缝区的混凝土处理成正交各向异性材料,在受拉方向将弹性模量折减为初始模量的 $1/2$,而在集中裂缝处将缝两侧的结构分开,缝面边界自由。以上2种处理办法中混凝土未损区的弹性模量保持不变。欧阳金惠等^[34]对裂缝和损伤区混凝土采用弹性模量折减的办法进行了类似的研究,弹性模量折减量分别取未损混凝土弹性模量的 50% 、 63% 、 80% ,然后进行水电站厂房的抗震研究^[34]。张存慧等^[31, 33, 36]、张运良等^[32]基于混凝土的各向同性塑性损伤本构模型,考虑了不同加载速率对混凝土动力特性的影响,建立了直埋蜗壳-厂房结构的全三维整体有限元静动力组合分析模型,研究了脉动水压力和地震荷载作用下三峡厂房整体结构的时程非线性动力响应特性。综合以上研究表明,蜗壳外围混凝土损伤区和贯穿性集中裂缝的存在,仅对蜗壳局部的动态力学特性影响较大,对厂房上部结构影响较小。利用断裂和损伤力学理论进行水电站厂房及蜗壳的动力分析,还没有相对成熟的理论和实践经验可以借鉴,有待继续深入研究。

2.3.3 流-固耦合效应

巨型蜗壳流道内含巨大的水体,可能对结构的动力特性产生重要影响,其影响程度如何需要进一步深入研究。这就牵涉到流固耦合即流体-结构的动力相互作用问题。目前,考虑流固耦合的影响较多针对水轮机部件如导叶和叶片的振动特性研究,

对于蜗壳及厂房结构的振动特性研究则做了很多简化。现阶段,将水体的影响通常简化考虑为附加在流道内壁的动水质量。这种近似处理对于小断面的蜗壳结构尚可,对于巨型蜗壳结构而言,误差可能会较大。目前,这方面的研究还较缺乏^[17]。因此,将流固耦合动力学理论和方法引入到巨型蜗壳动力特性的研究,可以获得更具实际意义的认识和成果。

2.3.4 蜗壳钢板-混凝土间隙和接触特性的影响

由于混凝土的冷缩、徐变、季节水温变化、运行水位较低等原因,钢壳和混凝土之间会出现不均匀的间隙和非完全接触情况,并且2种性质截然不同的材料其变形也不协调,这将不利于混凝土对蜗壳钢板的嵌固作用,从而不利于机组的抗振。因此,有必要结合实测资料,深入研究蜗壳钢板和混凝土间的不均匀间隙和接触对机组运行稳定性的影响。

2.3.5 地下厂房的动力分析模型

这里主要针对水力脉动荷载和机组动荷载等内源激励作用下的数值模型构建问题。由于抽水蓄能电站的建设需要,以及我国西部地区巨型水电站地形和地质方面的限制,发电厂房多布置为地下式。尽管地下厂房在安全级别上不像大坝那么重要,但它是整个水电站的枢纽,无论是由机械振源、电磁振源和流道脉动水压力等厂房内部振源引起的振动,还是由外部振源如地震波和爆炸冲击波等引起的震动,一旦稳态或瞬时振动较强,都可能引起厂房甚至是周边围岩以及放置于其上设备的破坏。因此,地下厂房的动力特性逐渐受到重视。对于特高水头的抽水蓄能电站,厂房、机组与管道的振动问题近年来日益突出。

地下厂房与地上厂房的最大区别就是它们所处的环境不同。地上厂房修建于地表,而地下厂房则建于地下或山体的岩体介质中,在结构形式和构造上有其独特性。混凝土边墙紧贴洞室围岩浇筑而成,厂房下部结构的混凝土也与围岩浇在一起,因此,地下厂房结构与其周围连接的围岩是一个有机整体,其动力反应总是要受到厂房周围岩体不同程度的约束影响。目前,动力反应分析针对地面厂房的研究较多,而针对地下厂房则相对较少。地下厂房的动力分析比地面厂房复杂,涉及围岩-厂房的动力相互作用以及对远域的无限围岩介质的有效模拟。

在当前水电站地下厂房动力分析中,在围岩-厂房交界面或在截取一定范围的围岩外边界处施加法向和切向集中弹簧单元以模拟围岩对厂房的动力作用。这种处理是仿照静力分析的做法,认为围岩仅提供静态弹性支撑。另外,法向弹簧刚度系数是由

静态弹性抗力系数转化而来,而切向弹簧刚度的确定则无依据。很显然,对于动力分析,这样的做法在理论上是欠妥的。另外,这种处理方法没有考虑围岩介质的几何辐射阻尼对振动散射波的吸收作用,在截断边界处将产生虚假反射,若围岩范围取得不够大将使计算结果严重失真。研究表明,对结构动力反应不产生影响的围岩范围需满足:

$$D \geq \frac{C_{\max} T}{2}$$

式中: D 为计算边界至所考察结构边缘或中心的最短距离; $C_{\max}$ 为岩石介质内的最大波速; T 为计算总时长。

若考虑在截断围岩边界处另施加人工黏性阻尼以模拟波动的吸收作用,则围岩和厂房的动力相互作用系统在内源激励下的动力反应就可近似正确求解。这种做法比单纯模拟围岩对结构的弹性支撑作用在理论上要完善。目前,基于各类动力人工边界(包括黏弹性动力人工边界),考虑围岩介质-结构系统的动力相互作用对地下结构动力反应特性的影响,已在地震工程和岩土工程等领域中有了很多应用,而在水电站地下厂房动力研究中应用还比较少。

2.3.6 地下蜗壳及厂房的抗震研究

地下厂房的抗震研究进展十分缓慢,其受重视程度远逊于高坝、核电站、超高层建筑、大跨度桥梁等结构。在水电工程界,长期以来人们认为地下厂房的抗震性能优于地面厂房,按地上一般工业厂房对水电站厂房进行抗震设计即可满足要求。因此,研究大多针对地面式厂房及蜗壳结构并取得了一定成果。

然而,对地下结构如地下管道、地铁车站和山体隧道等抗震能力的认识局限性,在1995年日本阪神6.8级地震、1999年台湾的集集7.3级地震和土耳其的伊斯坦布尔大地震中完全暴露出来,不少地下结构遭受严重破坏,有的甚至发生坍塌。对于大型地下厂房及蜗壳所遭受的震害,世界各地的报道还不多见。1967年,印度柯以那水电站地下厂房遭受了6.5级地震,震后发现水轮机机墩混凝土块体间产生了相对位移,水轮机轴中心线也发生了偏转,影响了机组的正常运转^[37]。2008年我国汶川大地震后,映秀湾、太平驿、鱼子溪、天龙湖、耿达等中型水电站地下厂房均有不同程度的震损^[7],其中映秀湾地下厂房机墩和风罩位置虽然部分裂缝为震前裂缝,但震后裂缝开展较多(如1号机组风罩内壁裂缝),耿达电站的厂房为窑洞式,震损严重,厂房门口及一次、二次副厂房垮塌且全部被埋,调查人员无法进入厂房内部,厂房发电机层以下被水淹。需要指

出的是,汶川地震后被调查的地下厂房都是中小型电站厂房,单机容量最大的为太平驿电站,仅为65 MW,与西部地区许多如拉西瓦、溪洛渡、龙滩、小湾等单机容量达700~1000 MW级的超大型水电站厂房相比,在尺寸和规模上差别较大。因此,尽管汶川地震后中型地下蜗壳及厂房受损不是很严重,但不能说明未来超大型地下蜗壳结构在强地震作用下也具有相当的安全性。客观地讲,高烈度地震区内的巨型地下厂房的大规模兴建是最近若干年来在中国才出现的,并且大多数还在建设和规划设计中,还未曾受过大地震的考验,因此灾难性的震害记录尚较匮乏。

在当前的蜗壳结构设计中,因认为蜗壳是厂房下部大体积混凝土结构,在地震作用下其位移和应力等动力反应幅值很小,设计时几乎不考虑地震作用。但对于地下厂房的蜗壳结构,是否还可如此处理则值得探讨。对于地下蜗壳结构,因其外围钢筋混凝土与岩体直接发生接触,强地震发生时混凝土将与围岩发生运动相互作用和惯性相互作用,并可能对洞室周边围岩的地震动场及其地震反应产生重要的反馈影响。这与一般地下隧洞衬砌、管道以及地铁(一般为框架结构)等小尺度、小质量结构是不同的,它们在计算地震反应时惯性力一般较小而可以忽略不计,并且它们的存在对地震波场的影响也比较微小。因此,针对地下厂房及蜗壳结构的特点开展系统的抗震研究,在理论发展和工程实践方面均具有重要的意义。

迄今,地下厂房洞室群的抗震稳定性研究已引起了不少学者的注意^[38-44],但对地下厂房的抗震研究还刚开始。文献^[45]基于黏弹性边界理论和等效地震荷载输入方法,以小湾水电站地下厂房为例进行了竖直入射剪切波作用下的动力反应时域分析,认为地下厂房的地震反应特点明显与地面厂房的地震反应特点不同。究其原因,是大范围岩体的存在使得厂房-围岩系统的动力相互作用对地下厂房各结构的反应影响要比对地面厂房强得多。

由于地下厂房的抗震研究还未引起足够重视,因此其抗震安全评价标准目前尚无人涉及。地震动参数的确定及地震动输入方法的选择,是决定地震反应分析成果是否合理的关键。如何针对具体工程采用适当的方法以确定合适的地震动参数,目前在地震工程界依然是研究的热点和难点。对于地震动输入方法,目前大多可以考虑行波效应,假定地震入射波为体波,通过截取一定范围的计算域并施加人工动力边界如黏性边界、黏弹性边界、透射边界等,采用在人工边界上等效应地震荷载的方法进行地下结

构的地震反应分析。

鉴于地下厂房及洞室群埋深较大,损伤诊断和修复都非常困难,因此,在当前世界地震活动较为频繁的时期,充分重视地下厂房的抗震研究并吸收其他工程领域的相关研究成果,对完善和补充现行的规范具有重要的意义。SL266—2001《水电站厂房设计规范》和DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》对地下厂房的抗震设计规定均较为粗略。

3 结 语

综上所述,巨型水电站蜗壳及厂房结构的动力分析,将涉及地震工程学、水工结构及动力学、流体动力学、计算机仿真、工程地质、岩石力学与工程等多学科的交叉与融合,是难度较大、理论性较强的一个综合性问题。然而,随着工程地震动输入研究成果的不断积累,计算机软硬件和计算技术的飞速进步,混凝土及岩体材料动态性能研究的不断深入,界面静动力接触及流固耦合分析理论的不断深入,以上问题的解决有了可能性,为人们加深对蜗壳结构动力特性及抗震性能研究的了解提供了更为科学合理的依据,是当前和未来一段时期内值得研究的现实问题。

目前,在世界范围内,只有我国在建和将建一批世界级的巨型水电站,对于巨型蜗壳结构及厂房动力特性的研究,发达国家因水电开发程度较高而缺乏研究动力,国际上可以借鉴的工程经验和理论研究成果极少。同时,我国巨型水电站的建设对蜗壳及厂房结构的动力及抗震设计提出了新的更高要求,必须加强基础理论及其应用研究,以适应建设水电大国和水电研究强国的发展需要。因此,加强和深入巨型电站蜗壳及厂房结构动力特性及抗震性能的研究意义重大。

参考文献:

- [1] 郝凤山. 改革开放30年我国大型水电机组蓬勃发展(代序)[C]//中国水力发电学会. 大型水轮发电机组技术论文集. 北京:中国电力出版社,2008:1-2.
- [2] 程永权. 关于流域水电站滚动开发及开展百万千瓦级水电机组研究的思考[C]//中国水力发电学会. 大型水轮发电机组技术论文集. 北京:中国电力出版社,2008:3-7.
- [3] 唐澍,潘罗平. 1000MW级水轮机运行稳定性关键技术研究[C]//中国水力发电学会. 大型水轮发电机组技术论文集. 北京:中国电力出版社,2008:27-30.
- [4] 邵建雄,陈冬波,刘景旺. 1000MW水轮发电机组创新研究思路探讨[J]. 人民长江,2009,40(2):13-15.
- [5] 张超然,戴会超,高季章,等. 特大型水电工程建设和运行面临的主要科技问题[J]. 水利学报,2007,38(S1):7-14.

- [6] 钱钢粮.我国水力资源及主要特大型水电站规划设想 [C]/中国水力发电学会.大型水轮发电机组技术论文集.北京:中国电力出版社,2008:55-59.
- [7] 晏志勇,王彬,周建平,等.汶川地震灾区大中型水电工程震损调查与分析[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [8] 樊启祥,汪志林,苏立.汶川大地震给金沙江下游水电开发带来的思考[J].水力发电学报,2009,28(5):29-34.
- [9] 黄润秋.论中国西南地区水电开发工程地质问题及其研究对策[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):3-7.
- [10] 张楚汉.水利水电工程科学前沿[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [11] 林皋.混凝土大坝抗震技术的发展现状与展望- I [J].水科学与工程技术,2004(6):7-9.
- [12] 张楚汉.高坝-水电站工程中的关键科学问题[J].三峡大学学报:自然科学版,2004,26(3):193-197.
- [13] 国家自然科学基金委员会与工程材料科学部.学科战略发展研究报告(2006—2010年)之建筑、环境与土木工程卷[M].北京:科学出版社,2006.
- [14] 国家自然科学基金委员会与工程材料科学部.学科战略发展研究报告(2006—2010年)之水利科学与海洋工程卷[M].北京:科学出版社,2007.
- [15] 姚拴喜,陈婧,张运良,等.拉西瓦水电站700MW水轮机钢蜗壳埋入方式初步研究[R].西安:西北勘测设计研究院,2004.
- [16] 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.
- [17] 练继建,王海军,秦亮.水电站厂房结构研究[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [18] 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:科学出版社,2009.
- [19] 袁达夫,谢红兵.大型混流式水轮机蜗壳的埋设方式[J].人民长江,2009,40(16):37-39.
- [20] 李丹,廖远志,张新宁,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.
- [21] 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.
- [22] 陈琴,林绍忠,张杰.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.
- [23] 伍鹤皋,蒋逵超,申艳,等.直埋式蜗壳三维非线性有限元静力计算[J].水利学报,2006,37(11):1323-1328.
- [24] 马震岳,陈婧,张运良.长江三峡水利枢纽右岸电站15号机组蜗壳直埋方案结构静动力计算分析报告[R].大连:大连理工大学,2006.
- [25] 蒋逵超,伍鹤皋,申艳,等.脉动压力作用下直埋式蜗壳非线性动力响应[J].水力发电学报,2007,26(4):103-109.
- [26] 欧阳金惠,陈厚群,李德玉.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.
- [27] 马震岳,张运良,陈婧,等.巨型水轮机蜗壳敷设软垫层埋设方式可行性论证[J].水力发电,2006,32(1):28-32,56.
- [28] 张运良,马震岳,程国瑞,等.水轮机蜗壳不同埋设方式的流道结构刚度分析[J].水利学报,2006,37(10):1206-1211.
- [29] 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的动力特性分析[J].大连理工大学学报,2007,47(4):593-597.
- [30] 张运良,马震岳,王洋,等.混凝土开裂对巨型水电站主厂房动力特性的影响[J].水利学报,2008,39(8):982-987.
- [31] 张存慧,张运良,马震岳.内水压力重复加载作用下蜗壳外围钢筋混凝土的损伤分析[J].水利学报,2008,39(11):1262-1266.
- [32] 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.
- [33] ZHANG Cun-hui, ZHANG Yun-liang. Nonlinear dynamic analysis of hydropower house excited by pressure fluctuation [J]. Journal of Zhejiang University Science A,2009,10(9):1231-1240.
- [34] 欧阳金惠,陈厚群,张超然,等.三峡电站15号机组厂房结构动力分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2007(2):137-142.
- [35] 张辉东,王日宣,王元丰.大型水电站厂房结构地震时程响应非线性数值模拟[J].水力发电学报,2007,26(4):96-102.
- [36] 张存慧,马震岳,张运良.地震荷载作用下水电站厂房结构的振动应力分析[J].水电能源科学,2009,27(5):94-96.
- [37] 舒扬髯,王日宣.水电站厂房动力分析[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [38] 左双英,肖明.映秀湾水电站大型地下洞室群三维非线性损伤地震响应数值分析[J].水力发电学报,2009,30(3):721-728.
- [39] 隋斌,朱维申,李晓静.地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟[J].岩土工程学报,2008,30(12):1877-1882.
- [40] 李海波,朱莅,吕涛,等.考虑地震动空间非一致性的岩体地下洞室群地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1757-1766.
- [41] 李小军,卢滔.水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J].水力发电学报,2009,28(5):41-46.
- [42] 张运良,马艳晶.基于两类典型动力人工边界的水电站地下洞室群地震反应分析[J].水电能源科学,2010,28(3):70-73,145.
- [43] 张运良,马艳晶,韩涛.大型水电站地下洞室群三维地震反应时域分析[J].水力发电,2010,36(5):27-30.
- [44] 张运良,马艳晶.斜入射SV波作用下的水电站地下洞室群地震反应特点[C]//同济大学.第三届水工岩石力学会议论文集.上海:同济大学出版社,2010.
- [45] 张运良.大型水电站地下厂房应重视抗震研究[EB/OL].[2010-05-06]. <http://www.paper.edu.cn>.

(收稿日期:2010-03-30 编辑:骆超)