

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.04.011

锦屏一级水电站进水口叠梁门分层取水结构 对流态及结构安全的影响

游 湘¹ ,唐碧华¹ ,章晋雄² ,秦永涛¹

(1. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 ,四川 成都 610072 ; 2. 中国水利水电科学研究院 ,北京 100038)

摘要 :针对锦屏一级水电站进水口叠梁门分层取水结构布置 ,通过水力模型试验和三维有限元结构分析 ,对其水力特性及结构安全影响进行深入研究和论证。研究结果表明 ,工程分层取水结构布置水流流态较稳定 ,作用在叠梁门上的最大正的冲击压强小于 200 kPa ,轴向拉应力最大值为 5.861 MPa ,发生在纵撑部位。各部位的应力水平尚在正常范围内 ,均能通过局部加强配筋等措施解决 ,能够满足工程正常运行的要求。将叠梁门分层取水技术应用于电站进水口设计中 ,并提出改善水力特性和优化结构应力状态的措施和方向 ,使该技术得以在许多大、中型水电站中推广应用。

关键词 :叠梁门分层取水结构 ;水力特性 ;结构安全 ;锦屏一级水电站

中图分类号 :TV732.1 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2010)04-0046-05

Influences of multi-level intake structure of stoplog gate at inlet of Jinping 1st Stage Hydropower Station on river regime and structural safety / YOU Xiang¹ , TANG Bi-hua¹ , ZHANG Jin-xiong² , QIN Yong-tao¹ (1. Chendu Hydroelectric Investigation and Design Institute of China Hydropower Consulting Group , Chengdu 610072 , China ; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100038 , China)

Abstract : Hydraulic modes tests and 3D finite element analyses were performed for the multi-level intake structure of stoplog gate at the inlet of Jinping 1st Stage Hydropower Station. The influences on the hydraulic characteristics and structural safety were studied and demonstrated. The results indicate that the river regime under the structural layout of the multi-level intake is stable. The maximum positive impact strength on the stoplog gate is smaller than 200 kPa , and the maximum axial tensile stress is 5.861 MPa , occurring at the longitudinal supporting part. The stress levels at various parts are within the normal range , and the requirements of engineering operation can be satisfied by means of measures such as local reinforcement. For the application of the multi-level intake ethnology of stoplog gate in the design of inlet of hydropower plant , some countermeasures to improve its hydraulic characteristics and to optimize the structural stress conditions as well as the research trend are proposed so as to popularize its application in many middle and large hydropower stations.

Key words : multi-level intake structure of stoplog gate ; hydraulic characteristic ; structural safety ; Jinping 1st Stage Hydropower Station

锦屏一级水电站是雅砻江中、下游河段的“龙头电站”,经可行性研究论证,选择了 305 m 高混凝土双曲拱坝、坝身及右岸泄洪洞共同承担泄洪和右岸引水发电系统布置的枢纽总格局。引水发电系统主要建筑物由电站进水口、压力管道、主厂房、主变室、尾水调压室、尾水洞及其出口等组成。采用“单机单管供水”及“三机一室一洞”尾水的布置格局,6 条压力管道内径均为 9 m,最短压力管道约 461 m,单机引用流量为 337.4 m³/s。

锦屏一级水库正常蓄水位为 1 880 m,死水位为 1 800 m,年水位变幅达 80 m。雅砻江中、下游河段有

7 种省级保护鱼类,为减少低温水对鱼类生长发育的不利影响,经对天然河道水温和下泄水温进行分析论证,认为每年 3~8 月尤其是 3~6 月(鱼类产卵期)电站进水口须采取分层取水措施,尽量取表层水,提高下泄水温。3~6 月水库平均水位为 1 800~1 840 m,为此,比较研究了高低进水口、双层取水口等方案,经深入研究论证后首先提出并推荐采用叠梁门分层取水技术^[1-2]。

1 叠梁门分层取水结构布置

单孔进水塔前缘宽 26.00 m,顺水向长 31.00 m,塔

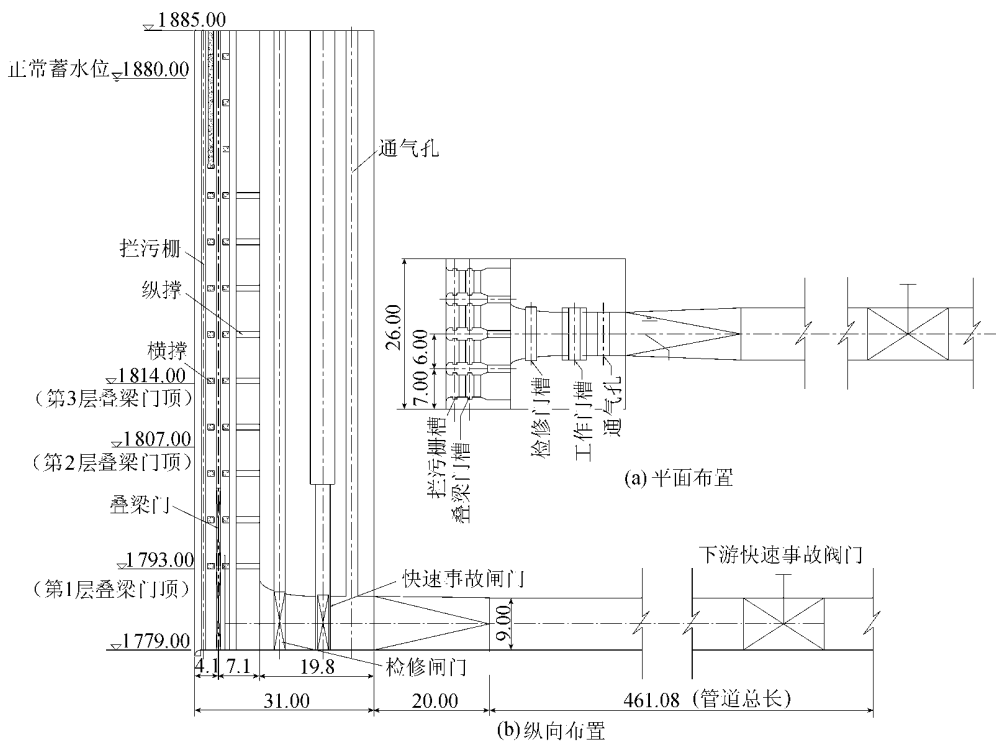


图1 进水口叠梁门分层取水结构布置(单位:m)

高112m。其叠梁门分层取水结构布置见图1。从上游到下游主要结构依次为:从拦污栅到叠梁门之间的拦污栅及隔水叠梁门段、叠梁门到检修闸门之间的取水前池段、检修闸门后的发电取水塔段3个部分。进水塔前半部拦污栅及叠梁闸门段长4.1m,每个进水口共设有4孔拦污栅4孔叠梁门,每孔净宽3.8m,过栅流速控制在0.5~1.0m/s。两栅墩间设置了拦污栅胸墙或横撑连接,以加强拦污栅结构的整体性。受进口狭小的场地条件限制,取水前池段长7.1m,后为发电取水塔段长19.8m,采用喇叭形进口,内设检修闸门槽、工作闸门槽和通气孔。拦污栅和主塔体之间采用隔墙和纵撑连接。

综合水库运行方式和分层取水下水温分析,叠梁门最大挡水高程经比较后确定为1814.00m,可分1814.00m,1807.00m,1800.00m,1793.00m,1786.00m,1779.00m高程6层取水。门叶尺寸为3.8m×35m(宽×高),门叶分3层,其中有2层高度分别为14m,另一层高度为7m,叠梁形式。水库水位在1835.00m以上时,门叶整体挡水,为第1层取水,水库水位在1835.00m与1800.00m之间时,3层叠梁门相互组合,可实现其他5层取水。

叠梁门分层取水技术应用于电站进水口设计尚无工程实践。为保证工程的安全,对进水口叠梁门分层取水结构设计中的2个关键技术进行深入研究论证。

a. 水力特性研究。取水前池段为水流过渡区,主要作用为使从水库取得的表层水在通过闸门后能

平顺地进入发电进水口。该段结构尺寸主要根据水流状态确定,需要深入研究池内流态及机组负荷变化时的池内水位变动情况和动水压强,尤其是在机组负荷变化时池内的“调压井效应”。

b. 结构安全性研究。拦污栅框架及塔体胸墙等钢筋混凝土结构尺寸和配筋设计还需结合机组负荷变化时池内的“调压井效应”情况深入综合考虑确定。

2 进水口水力特性研究

为系统研究机组正常引水和负荷变化时进水口叠梁门分层取水的水流流态及水力特性,论证水流对分层取水叠梁闸门及栅墩结构受力的影响,按重力相似准则建立了1:20大比尺水工模型,模拟了1号机组的进水口和压力管道段,并在压力钢管尾端设置了快速启闭阀门,模拟机组增减负荷工况。为简化模型及研究内容并为设计提供足够的依据,试验中研究了3层叠梁门组合时最不利特征水位的水力特性。试验模型的整体布置见图[3]。

2.1 机组正常引水时进水口水力特性

a. 进水口流态。进水口设置1层、2层及3层叠梁门取水时,即最低库水位依次分别为1814.00m,1828.00m,1842.00m,单机引水流量为337.4m³/s时,进水口来流能够平顺地从4孔叠梁挡水闸门门顶以上进入取水前池的竖向流道内,然后在喇叭形进水口经90°转弯后流入压力管道。在设计的最小控制水位以上的运行条件下,进水口水流通过叠梁门顶时水流平稳。

b. 动水压强特性。各种库水位下进水口叠梁门及栅墩上的时均动水压强沿水深近似线性增加,其大小主要由库水位决定,叠梁门的高度对其无明显影响。各种库水位下叠梁门及栅墩上的脉动压强均方根值在 0.6 ~ 4.2 kPa 之间,概率密度基本符合正态分布,其压力脉动的主频在 0.39 ~ 1.68 Hz 之间,属于低频窄带谱型。

c. 流速分布特性。各种库水位下进水口过栅流速为 0.5 ~ 1.0 m/s,边孔和中孔叠梁门上方同一高程来流方向水流流速大体相同,表层水流流速较小,门顶上方底部水流流速较大,最大水流流速在 3.53 ~ 4.02 m/s 之间。叠梁门后竖向流道内主流偏于进水口胸墙一侧,叠梁门附近水流流速较小。

d. 进水口水头损失。不设置叠梁门与分别设置 1 层、2 层、3 层叠梁门时,进水口段总的水头损失系数分别为 0.224、0.765、0.853、0.950,相应的水头损失分别为 0.32 m、1.10 m、1.22 m 和 1.36 m。设置叠梁门后,进水口段的水头损失有所增加,但在该高水头引水电站的水头中仅占很小的比例。

2.2 机组负荷变化时进水口的水力特性

2.2.1 门井及通气孔内的水位波动

机组丢荷时,水击波很快从下游向上游管道传播直至进水口段后,在检修门井、快速事故闸门井及通气孔等部位产生“调压井效应”,其水位迅速壅高,并在水流惯性作用影响下超过上游库水位而形成 1 个较大的峰值,随后水位以库水位为中心呈周期性上下波动,且逐步衰减,最终与库水位持平(图 2)。

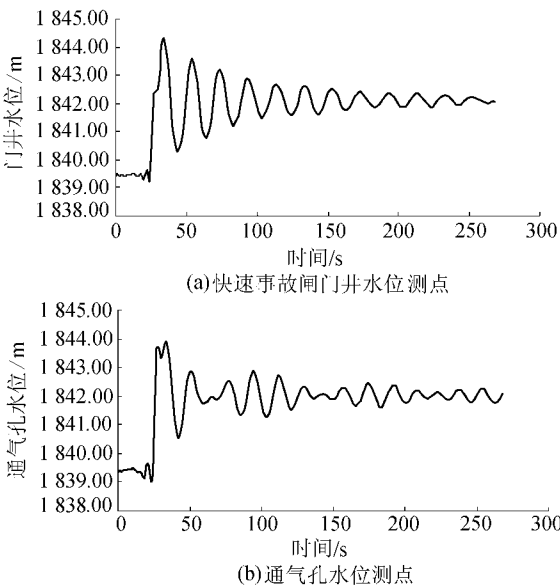


图2 库水位为 1842.00 m 时门井及通气孔水位波动过程线(机组丢荷工况)

机组丢荷时,同一运行工况下快速事故闸门井的水位波动幅度最大,通气孔水位波动幅度次之,检

修门井水位波动幅度最小。当设置 3 层叠梁门取水、库水位 1 842.00 m 机组丢荷时,检修门井、快速事故闸门井及通气孔水位正向最大波动幅度分别为 1.94 m、2.82 m 和 2.55 m,在同一取水层下,即叠梁门高度相同时库水位升高,检修门井、快速事故闸门井及通气孔内的水位波动幅度均有所减小,水位波动情况在正常范围。

机组增荷时,检修门井、快速事故门井及通气孔内的水位急剧降低,但随后水位波动衰减快,波动幅度较小。当设置 3 层叠梁门取水、库水位 1 842.00 m 机组增荷时,检修门井、快速事故闸门井及通气孔水位最大波动幅度仅分别为 0.74 m、0.73 m 和 0.90 m,波动幅度较小。

2.2.2 叠梁门及栅墩上的压力波动

机组增减负荷时,压力管道的流量及流速剧烈变化,并在进水口段产生压力波动。在这种非恒定流过程中,作用于进水口叠梁门及栅墩上的动水压强受到多种因素的影响,如引水流量、流速、流态、水击波速、阀门启闭速度等。研究中假设机组增减负荷过程中进水口段的动水压强符合重力相似准则,忽略了水击传播速度和过程的影响。

机组丢荷时,随着下游阀门的快速关闭,叠梁门及栅墩上各点动水压强迅速增大,然后急剧减小,形成 1 个较大的冲击压强峰值(图 3),动水压强总体呈波动变化,且持续波动较长的时间后逐渐趋于稳定。在机组发电引水流量一定时,库水位越高,叠梁门高度越大,阀门关闭速度越快,作用于进水口叠梁门及栅墩上的冲击压强越大。当阀门关闭时间为 9 s、设置 3 层叠梁门取水,在库水位 1 842.00 m 和正常蓄水位 1 880.00 m 下机组丢荷时,作用在叠梁闸门上的最大正冲击压强分别达 117.0 kPa 和

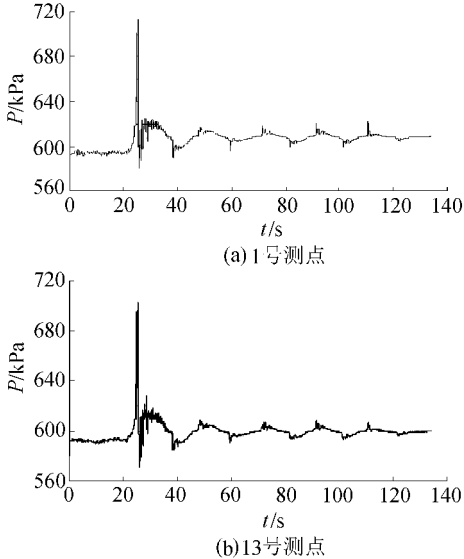


图3 机组丢荷工况下典型测点冲击压强过程线

143.6 kPa 栅墩侧墙底部的最大正冲击压强分别为 111.4 kPa 和 136.4 kPa ; 阀门关闭时间加快至 6 s 后 , 设置 3 层叠梁门取水 库水位 1842.00 m 和正常蓄水位 1880.00 m 下作用在叠梁闸门的最大正冲击压强为 145.4 kPa 和 173.1 kPa , 与阀门 9 s 快速关闭相比增大 30 kPa。

机组增荷时 , 下游事故阀门快速开启后 , 叠梁门上各测点压强随即快速下降 , 并随后上下波动 , 波动逐渐衰减直到最终水流流动趋于稳定。作用于叠梁门及栅墩上压强下降的负向最大幅值同样随库水位升高及取水叠梁门高度的增大而增大。阀门开启时间为 9 s、以静水压力为参考 , 各种取水工况下 , 叠梁门上压强下降幅度的负向最大值在 - 7.8 ~ - 19.2 kPa 之间 , 与机组丢荷相比 , 压强波动的幅度较小。

3 进水口结构安全性研究

为系统研究机组正常引水和负荷变化时进水口叠梁门分层取水结构的受力状况 , 采用通用有限元分析软件 ABAQUS 对进水口结构进行整体三维有限元计算分析。计算模型见图 4^[4]。模型中假定岩石基础底部为固定边界 , 岩石基础上、下游边及基础左、右两侧边按平面应变问题处理 , 并假定计算段岩石基础、混凝土结构为各向同性、均匀连续的弹性体。

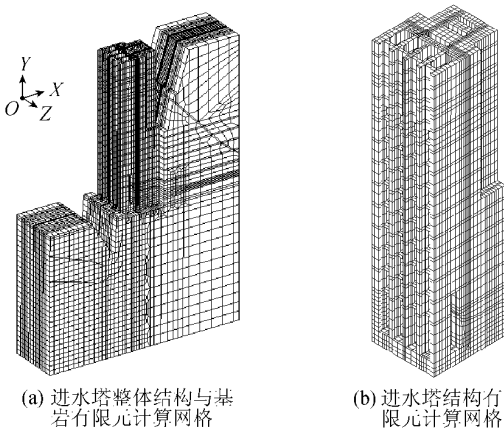


图 4 进水塔三维有限元计算模型

3.1 冲击压强的确定

进水口水力特性研究表明 : 机组正常引水时 , 叠梁门及栅墩前后的水压差很小 , 对结构受力没有太大的影响。机组负荷变化时 , 尤其是机组丢荷时 , 作用于进水口叠梁门及栅墩上的动水压强较大 , 对拦污栅框架及塔体胸墙等钢筋混凝土结构有较大影响。

比较阀门关闭时间分别为 9 s 和 6 s 时的丢荷工况下各个测点的最大正冲击压强可知 , 在叠梁门高度和库水位相同的条件下 , 各测点的最大正冲击压强均有一定程度的增大 , 其最大冲击压强增大幅度约为 20% ~ 25%。阀门关闭速度加快后 , 流道水体的惯性变化率增大 , 管道内水击压强的传播引起叠梁门处的压强波动增大 , 作用于叠梁门的冲击压强也相应增加。由于模型试验的水击波传播速度不满足相似条件 , 阀门关闭时流量的变化过程与原型丢荷的流量变化过程也有一定差异 , 为安全起见 , 在结构设计中考虑适当增大建筑物受力载荷的安全系数。根据 1:20 水力模型试验测量数据 , 拟合机组负荷变化压力管道非恒定流时 3 种计算工况及其冲击压强(试验值)。3 种计算工况均为水库正常蓄水时机组负荷变化工况(图 5)。在该工程有限元计算分析中考虑冲击压强计算值等于试验值与 1.2(增大的安全系数) 及 1.1(荷载作用分项系数) 的积 , 其他荷载按规范要求考虑。

3.2 结构变形及应力分析

a. 位移成果分析。各工况塔体及拦污栅框架沿横水流向几乎不产生相对变形 , 顺水流向水平位移最大仅 6.1 mm , 竖向位移最大仅 6.9 mm。

b. 应力成果分析。3 种工况与正常运行工况相比 , 大体积发电取水塔段各部位的应力变化比较小 , 影响幅度基本都在 5% 左右 ; 建基面处均受竖向压应力作用 , 满足塔体整体稳定要求。但 3 种工况对拦污栅框架部分的影响较大 , 其中 , 栅墩、纵撑顺水流向最大拉应力分别为 2.39 MPa 5.861 MPa , 横撑横水流向最大拉应力仅为 0.363 MPa , 最大拉应力发生在工况 1。

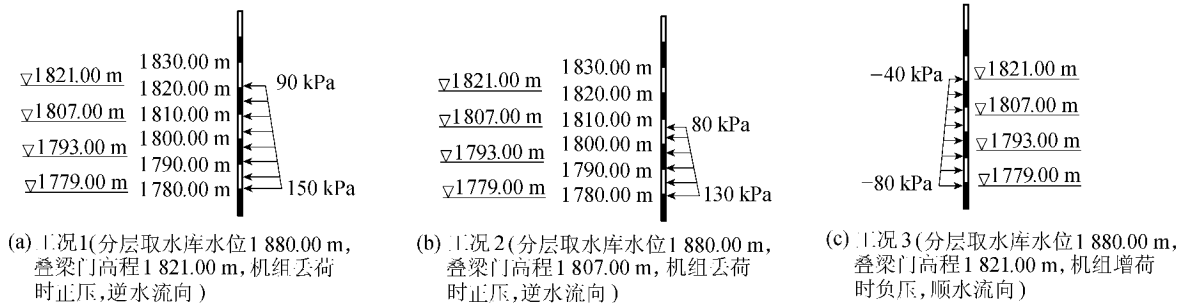


图 5 叠梁门及栅墩最大冲击压强分布

3.3 结构安全敏感性分析

叠梁门及栅墩的冲击压强对拦污栅框架应力的影响比对塔体应力的影响大些,对栅柱墩、纵撑而言,冲击压强对顺水流向拉应力影响较大,对横撑而言,冲击压强对横水流向拉应力影响较大。为确保工程安全,在计算分析中针对冲击压强的大小对拦污栅框架应力的影响开展了敏感性分析,见图6~8。敏感性分析结果表明,进水口采用叠梁门分层取水后,随着冲击压强增加,拦污栅框架拉应力有所增加,特别对纵撑的影响最为敏感。设计中应特别关注纵撑的布置及结构尺寸,并综合冲击压强测试等因素,根据敏感性分析成果预留一定的安全裕度。

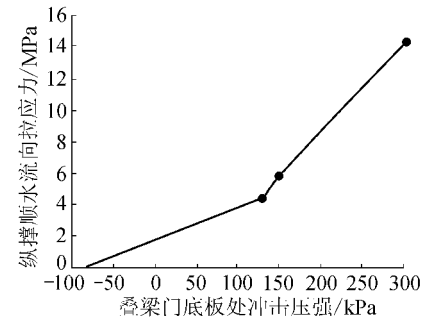


图6 纵撑顺水流向拉应力变化曲线

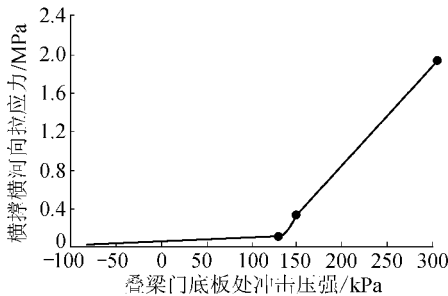


图7 横撑横河向拉应力变化曲线

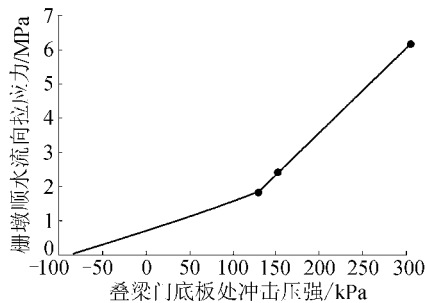


图8 栅墩顺水流向拉应力变化曲线

4 结论及建议

a. 锦屏一级电站进水口采用叠梁门分层取水后,机组正常引水时电站进水口水流流态较稳定,进水口叠梁门及门槽段压力分布合理,设计的最低控制运行水位能避免漩涡等不良流态,机组丢荷时,作

用在叠梁门上的最大正冲击压强小于 200 kPa,机组增荷时,其压强波动的负值不大,门井及通气孔水位波动均处于正常范围。水力特性研究结果表明,该工程进水口叠梁门分层取水结构布置能够满足工程正常运行的要求。

b. 通过对进水口进行有限元结构分析,机组负荷变化压力管道非恒定流时,冲击压强对结构影响最大的是拦污栅框架,尤其是纵撑,纵撑产生的轴向拉应力最大值为 5.861 MPa。总体看来,各工况下各部位的应力水平尚在正常范围内,均能通过局部加强配筋等措施解决。结构研究表明,锦屏一级电站进水口叠梁门分层取水结构布置形式在工程结构方面是安全的。

c. 叠梁门分层取水技术应用于电站进水口设计中,应综合进水口地形、地质条件和结构设计特点,研究取水前池段长度与叠梁门高度的适宜性。适当增大取水前池段的长度,可进一步优化水流流态,减少水头损失,降低冲击压强。在叠梁门及门槽设计中,可适当增加弹性垫层;在叠梁门及拦污栅框架结构设计中,可适当调整框架与塔体的连接形式(如将局部纵撑调整为局部隔墙等),或增加纵撑的数量、截面积等措施从而优化改善结构应力状态。

d. 叠梁门分层取水技术适用于水利水电工程的各种分层取水建筑物,降低了工程对场地的要求,尤其解决了高坝、深库、大流量、场地狭小的水电站的分层取水问题。该技术具有布置简单、运行灵活方便、可靠性较好且投资省、对枢纽布置影响小、对电站动能指标影响小等优点。该技术已在光照、溪洛渡、两河口、双江口、糯扎渡等许多大中型水电站中推广使用。

参考文献:

[1] 周钟,游湘,刘平禄,等.锦屏一级水电站厂房进水口分层取水设计专题报告[R].成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2006.

[2] 蒋红,卢红伟,游湘.雅砻江锦屏一级水电站水温特性及分层取水方案研究[C]//国际大坝委员会.水电2006国际研讨会论文集.北京:中国水电工程顾问集团公司,2006.

[3] 章晋雄,张东,吴一红,等.锦屏一级水电站进水口叠梁闸门分层取水试验研究报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2006.

[4] 徐远杰,潘家军,艾红雷,等.锦屏一级水电站厂房进水口分层取水设计专题报告:进水口三维有限元静动力分析[R].武汉:武汉大学,2007.

(收稿日期 2009-10-26 编辑:方宇彤)