

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0038

刘道桦,蔡付林,郭兰波,等.多孔弹性膜对调压室涌波的削减作用[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):152-158.  
LIU D H,CAI F L,GUO L B,et al.The effect of porous elastic membrane on reducing fluctuations in surge tank[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):152-158.(in Chinese)

## 多孔弹性膜对调压室涌波的削减作用

刘道桦,蔡付林,郭兰波,林 伟,周建旭

(河海大学 水利水电学院,南京 210098)

**摘要:**为减少调压室工程量并保证引水系统安全高效运行,提出了调压室内部布置多孔弹性膜方案,以削减调压室涌波幅度并使波动快速衰减。采用“U”型管水柱振荡模型进行物理试验对方案进行了验证,得到了涌波削减效果与多孔弹性膜的开孔面积成反比,与布置层数成正比的规律。通过CFD数值仿真计算对调压室内部的流场特性进行分析,以阐释其消能效果的原理。研究表明,布置多孔弹性膜扰动调压室内部的流场,产生涡带、旋滚和绕流,增大水体波动时的水头损失,使得调压室内水体能量得以耗散,达到快速削减调压室涌波的效果。数值仿真计算结果和物理模型试验具有较好的一致性。对于增加引用流量增效扩容的水电站,设置多孔弹性膜可作为不重建引水发电系统的改造方案。

**关键词:**调压室涌波削减;模型试验;CFD数值模拟;水体消能;水电站稳定运行;水电站调节保证

中图分类号:TV732.5 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### The effect of porous elastic membrane on reducing fluctuations in surge tank

LIU Daohua,CAI Fulin,GUO Lanbo,LIN Wei,ZHOU Jianxu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China)

**Abstract:**In order to reduce the work amount of engineering and to facilitate the safe and efficient operation of the water diversion system,a scheme of a porous elastic membrane inside the surge tank was proposed. This measure enabled to reduce the surge amplitude and rapidly damping water level fluctuations. The "U"-shaped water column oscillation model was used for the physical model test. The results showed that the surge reduction effect was inversely proportional to the open area of the porous elastic membrane and was proportional to the number of layers of porous elastic membrane. In order to explain the mechanism of energy dissipation effect,CFD numerical simulations were carried out to analyze the flow field characteristics of the surge tank. The study showed that the porous elastic membrane was arranged to disturb the flow field inside the surge tank,generating vortex,rolling and flow,and increasing the head loss when the water fluctuated. Under the combined action,the energy of the water in the surge tank could be dissipated,and the surge amplitude in the surge tank could be quickly damped. The results obtained by numerical simulation had good agreement compared to the physical model. A porous elastic membrane placed inside the surge tank could be an option instead of the reconstruction of the water conveyance system for the hydropower station in which the installed capacity could be increased by adding discharge.

**Key words:**fluctuation reduction;model test;CFD numerical simulation;energy dissipation;stable operation;surge tank;hydropower station

收稿日期:2019-05-30 修回日期:2019-08-22 网络出版时间:2019-08-29

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190829.0920.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51079051)

作者简介:刘道桦(1996—),男,四川盐边人,主要从事水电站泵站水力学研究。E-mail:dhlui@hhu.edu.cn

通信作者:蔡付林(1963—),男,湖南桃江人,教授,博士生导师,主要从事水电站泵站水力学研究。E-mail:flcainj@163.com

在大比降的河流水能开发中,引水式开发方式由于具有坝体高度低、建设成本省、生态环境影响小、淹没损失和移民数量少等优势而得到广泛采用<sup>[1]</sup>。引水式电站引水隧洞长、水流惯性大,为降低水击压力和改善机组运行条件,通常需设置调压室。长引水发电系统在过渡过程中存在调压室水位波动周期长、振幅大、衰减缓慢等问题,增加了水电站稳定运行的难度<sup>[2-8]</sup>。例如,锦屏二级因为采取长引水洞布置形式,调压室的涌动幅度大,波动时间长。在单机增负荷 27 万 kW 后,需要间隔 40 min 第二台机才能进行增负荷;单机甩负荷 40 min 后才能恢复开机,双机甩负荷 60 min 后才能恢复开机<sup>[9]</sup>。这种运行特性,降低了电站的调峰调频能力,并且调压室内水位波动引起的水头变化对电站发电质量有明显影响。

综上所述,调压室的涌波特性和在引水发电系统中具有重要影响。如能控制涌波振幅并快速削减涌波,不仅能够降低调压室高度、减小有压引水系统中的极限压力,而且能够提高水电站的调节能力和发电稳定性,更好的保证电能质量。

## 1 增设多孔弹性膜的物理模型试验和数值模拟方法

虽然水锤波和调压室涌波均是管道中流量和流速的改变引起的周期性变化,但水锤波是弹性波,压力变幅剧烈却在几秒或十几秒内快速衰减;而涌波是质量波,周期通常为几十秒甚至更长<sup>[10-12]</sup>。因两者的波峰一般不会叠加,所以在水锤波衰减后对调压室涌波进行适当限制,将在不影响水锤衰减的同时有效削减调压室涌波。如图 1 为某水电站 4 台机组同时甩负荷的蜗壳进口压力波动和调压室水位波动图,机组导叶关闭时间为 12 s。从图中可以看出,导叶从 38 s 时开始关闭,蜗壳进口处水锤压力在 50 s 时达到波峰,62 s 时水锤波趋于稳定;而调压室在 62 s 时水位为 983.7 m,在 123 s 时涌波才达到波峰。对于此工程若在调压室内 983.7 m 与 1 004.0 m 高程之间设置消能结构,将能在不影响水锤波反射的同时快速削减涌波。

多孔弹性膜在实际工程中,可采用耐久性橡胶材料在工厂预制再运至施工现场安装,可不影响工程施工进度并能保证单体工程质量。在调压室井壁内设置预埋件采用连接弹簧铰接,且与井壁间留有一小型水流通道的,便于安装和维护。当有压引水管道发生水锤现象时,压力管道内的水体进入调压室,上升至布置高程不断冲压多孔弹性膜,实现一次消

能;水体穿过膜孔与调压室井壁间的水流通道时,充分掺混旋滚,形成二次消能;水体振荡时多孔弹性膜往复阻碍水体运动,进行三次消能。由于调压室内属于阴凉湿润环境,弹性材料工作年限长,如经合理设计和定期巡检更新可长期工作。为验证该结构在调压室内的效能效果,同时进行了物理模型试验和 CFD 数值模拟分析。

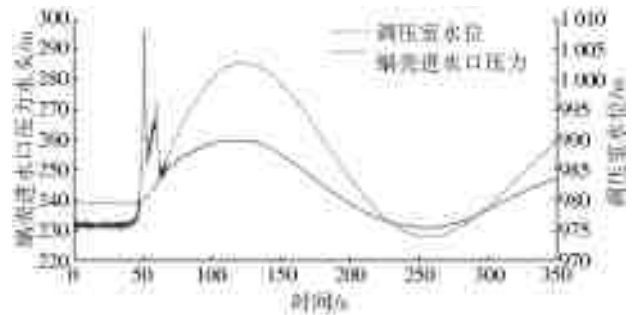


图 1 某水电站机组甩负荷时调压室水位及蜗壳进口压力变化过程线

Fig. 1 The water level inside the surge tank and the pressure at the inlet of the spiral case during load rejection in a hydropower station

### 1.1 物理模型试验

试验装置采用两根长 2 m、内径为 0.15 m 的有机玻璃管分别作为供水井和试验井,并由一根长 2 m 内径 0.05 m 的管道连通构成一个“U”型水柱振荡装置,见图 2。初始时将连通阀和放空阀关闭,分别向供水井和试验井注水,使二者之间形成水位差。突然打开连通阀构成试验井中的波动,以模拟调压室水位波动,开阀时间为 0.5 s。试验动态信息采集分析系统为 DHDAS 系统,使用液位传感器对水位进行监测,量程为 60 cm,满量程测量精度为 $\pm 0.5\%$ ,绝对测量误差在 0.3 mm 内。

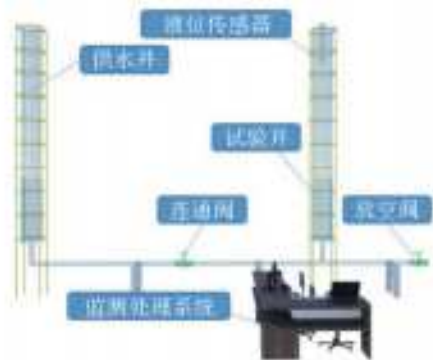


图 2 物理模型试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the physical model

安装在试验井中的多孔弹性膜采用弹性较好的硅胶膜,直径 10 mm 的开孔均匀分布在膜上。弹性膜上的开孔面积与调压室和引水隧洞之间连接管断面面积之比的无量纲数,称为膜孔面积比  $A_r$ 。试验测试了  $A_r$  分别为 0.6、0.8、1.0 三种多孔弹性膜衰减

涌波幅度的效果,对应的开孔数目为 15、20、25,示意图见图 3 示。试验中对设置 1 层和 2 层多孔弹性膜进行了对比,共试验了 13 个方案,其主要参数参见表 1。为防止偶然误差对试验结果的影响,每个方案进行 5 次试验。



图 3 不同面积比的开孔情况  
Fig. 3 Openings with different area ratios

表 1 试验方案  
Tab. 1 Test scenarios

方案编号	水位参数/cm			多孔弹性膜布置		
	供水井水位	试验井水位	水位差	膜层数	开孔数量	面积比 $A_r$
T1				0	—	—
T2	170	60	110	1	25	1.0
T3				1	20	0.8
T4				1	15	0.6
T5				0	—	—
T6	180	50	130	1	25	1.0
T7				1	20	0.8
T8				1	15	0.6
T9				0	—	—
T10	185	35	150	1	25	1.0
T11				1	20	0.8
T12				1	15	0.6
T13	180	50	130	2	20	—

### 1.2 CFD 数值模拟

在建立数值模型的过程中,将系统分为试验井、供水井、连通管三部分,在距试验井 40 cm 的上游处连通管内设置一个球形阀。球阀的数值模拟采用 moving mesh 滑移网格技术,阀体左右交界面定义为 interface,其控制规律由用户自定义函数(UDF)预先写入。见图 4,阀体初始与流道完全断开,开阀时间为 0.5 s。为研究试验井内涌波的变化情况,对试验井内水体进行液面监测。根据物理模型试验装置中各部分流道的体型特点,数值模拟计算中采用结构与非结构化网格:连通管的三岔连接处采用混合网格,四面体网格为主,六面体、楔形和锥形网格为辅;其余部分均采用结构化网格,六面体网格为主,楔形网格为辅。其中,除试验井中膜孔处网格尺寸为 0.1 cm 外,其余部分均为 1 cm,整个系统网格总数为 122 230,节点总数为 139 007,局部结构的网格划分情况见图 4。

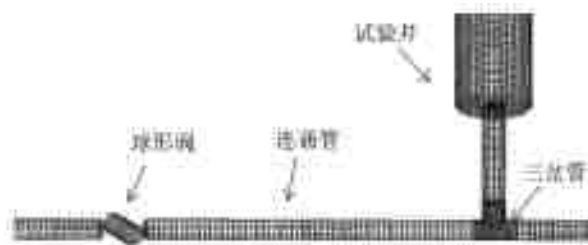


图 4 局部结构的网格划分情况  
Fig. 4 Partial meshes of the model

采用 Realizable  $k-\epsilon$  紊流模型进行非定常流数值模拟,该模型能较好的模拟强旋流及流线比较弯曲的流动情况,控制方程包括动量方程、连续方程、 $k$  方程和  $\epsilon$  方程,详见参考文献[13-14], $k$  和  $\epsilon$  的输运方程中  $\sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.2, C_2=1.9$ ,其余参数参照文献[13]选用。计算的时间步长为 0.01 s,采用有限体积法对控制方程进行空间离散。考虑到本文属于瞬态问题,故采用 PISO 算法来进行压力与速度的耦合[15-20]。采用 VOF 法对自由液面进行捕捉,并选用显示格式进行模拟。

供水井与试验井均存在自由液面,故在两井上开口处分别采用压力进口与压力出口边界,其相对压力值均设置为 0,其余为固体边壁,此时下游的放空阀为壁端。考虑管道壁面粗糙度的影响,采用标准壁函数进行模拟。

## 2 成果分析

### 2.1 物理模型试验数据分析

在试验中,所有涌波数据处理皆以平衡水位为波动基准点。如图 5 所示,在 1.3 m 水头时初始条件下,平衡水位为 1.15 m,图中第一个标红点为波动基准点。图 6 显示了第一次到达波动基准点后,1.3 m 水头下各方案相对于波动基准点水位的波动情况,图例中各部分的含义分别为:方案编号:供水井水位(单位 cm)-试验井水位(单位 cm)-弹性膜开孔数。

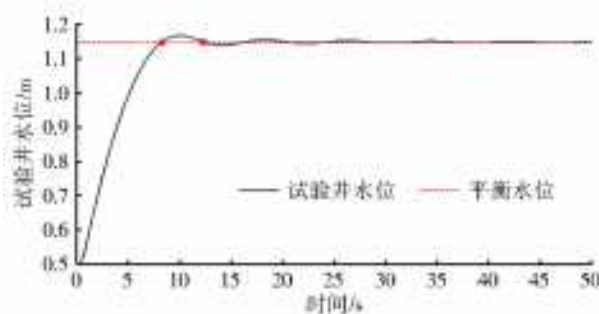


图 5 试验井中水位波动情况  
Fig. 5 Fluctuation of water level in the test well

“U”型管水柱振荡试验中分别在 1.1 m、1.3 m

和 1.5 m 三组水头下,对于不设置多孔弹性膜的试验井、设置 1 层不同膜开孔面积的试验井和设置多层膜的试验井进行了对比试验。

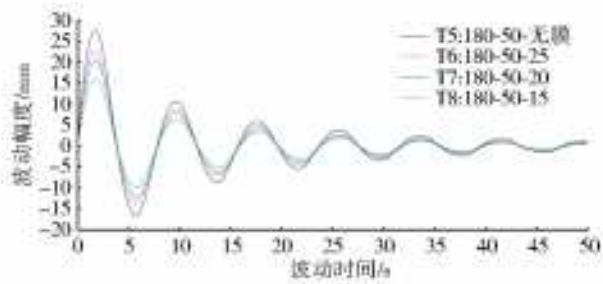


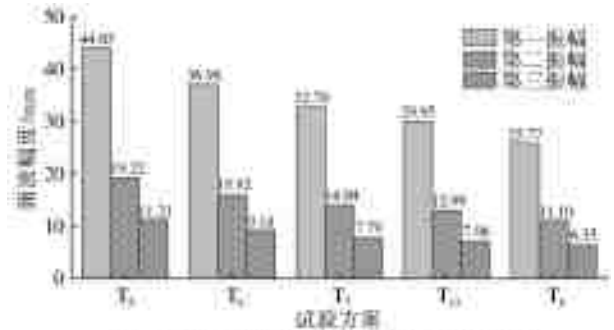
图 6 1.3 m 水头下不同面积比对水位波动的影响

Fig. 6 Effect of the area ratio on the water level fluctuation under 1.3 m head

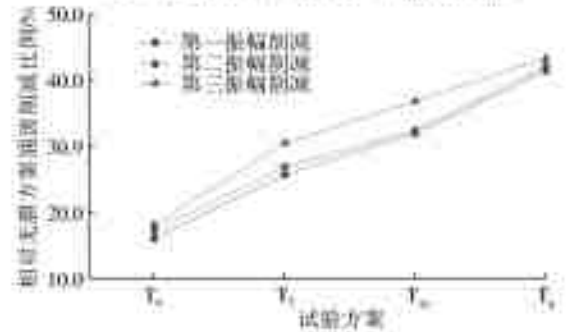
试验表明:增加多孔弹性膜对试验井中的水体产生明显的水流扰动,能够观察到水体旋流、贴壁扰流等紊流态。这些流态消耗了水体的一部分能量,减少转换为涌波位能的水体动能。另外,水体运动使多孔弹性膜压缩变形,水体另一部分动能转换为多孔弹性膜的弹性势能。之后,弹性势能又反馈作用到水体上,进一步促进了水体能量消耗,大大削减涌波的振幅,使波动快速衰减到平衡水位。物理模型试验得到不同工况下试验井中涌波幅值,选取 1.3 m 水头为例,分别列出第一、第二和第三振幅见图 7(a)。

由图 7(a)柱状对比图可以看出,相对不布置弹性膜的  $T_5$  方案,多孔弹性膜布置后的  $T_6$ 、 $T_7$ 、 $T_8$  和  $T_{13}$  方案涌波幅度有明显的削减。图 7(b)中,以不布置弹性膜方案  $T_5$  为对照组,定义涌波削减比例为各方案相对  $T_5$  方案的涌波削减值与  $T_5$  涌波幅

度的比值。1 层膜的膜孔面积比  $A_r$  为 1.0( $T_6$ )、0.8( $T_7$ )和 0.6( $T_8$ )时,对应的第一涌波振幅削减比例分别为 16%、26%、和 41%;2 层膜的膜孔面积比  $A_r$  为 0.8 时( $T_{13}$ ),涌波削减比例为 31%,呈现出开孔面积越小、布膜层数越多,涌波削减效果越明显的趋势。在后续第二振幅、第三振幅的波动中和不同水头下呈现出的规律也相同,对比分析见表 2。



(a) 1.3 m 水头下不同弹性膜对涌波削减情况



(b) 1.3 m 水头下不同弹性膜布置方案相对无膜方案的涌波削减比例

图 7 多孔弹性膜布置对涌波削减情况

Fig. 7 Fluctuation damp in the arrangement of porous elastic membranes

表 2 涌波削减幅度对比

Tab. 2 Comparison of surge reduction

方案编号	方案特征		对比基准	涌波幅度削减比例/%		
	水头	布膜方案		第一振幅	第二振幅	第三振幅
$T_1$	1.1 m	无膜	$T_1$	—	—	—
$T_2$		1层 $A_r=1.0$		16	17	19
$T_3$		1层 $A_r=0.8$		27	28	30
$T_4$		1层 $A_r=0.6$		41	42	41
$T_5$	1.3 m	无膜	$T_5$	—	—	—
$T_6$		1层 $A_r=1.0$		16	17	18
$T_7$		1层 $A_r=0.8$		26	27	31
$T_8$		1层 $A_r=0.6$		41	42	59
$T_{13}$		2层 $A_r=0.8$		31	33	38
$T_9$	1.5 m	无膜	$T_9$	—	—	—
$T_{10}$		1层 $A_r=1.0$		22	17	23
$T_{11}$		1层 $A_r=0.8$		28	26	32
$T_{12}$		1层 $A_r=0.6$		41	40	47

## 2.2 过膜流场流态 CFD 分析

三维数值模拟与物理模型试验呈现相同规律:

随水头增加试验井涌波幅值增大,随着膜孔面积比的减小和膜层数的增加,试验井涌波削减效果越明



显。如图 5 所示,供水井水位为 180 cm,试验井水位为 50 cm,水头为 1.3 m,波动基准高程为 1.15 m。第一次达到平衡水位后继续上涌为典型水位上升状态、第二次达到平衡水位后继续下降为典型水位下降状态,对不设弹性膜和增设 1 层膜、2 层膜、3 层膜后的流态进行对比分析。

由图 8(a)可见,在无多孔弹性膜时的水位上升状态,在试验井底部出现单个较大涡带,井上部流态均匀,水头损失主要为壁面摩阻和井底部水体局部损失,涌波水位较高且衰减较慢。图 8(b)为增加 1 层多孔弹性膜时的水位上升状态,试验井底部流态由单个较大涡变得分离和混乱。通过多孔弹性膜时,流线有先束窄再扩散的趋势,使流场更加紊乱并在膜后形成一个新的涡带。

图 8(c)为布置 2 层多孔弹性膜时的水位上升状态:井底部的旋流涡已经明显分裂为两个;过膜流线的收缩扩散现象更加明显,且通过第 1 层膜和第 2 层膜后各出现了一个局部涡。图 8(d)为设置 3 层多孔弹性膜的情况,试验井内的水流已经高度紊乱,在第 2 层和第 3 层膜之间产生了两个对称涡,水体掺混碰撞使能量得到充分耗散,其流线见图 8(d)。

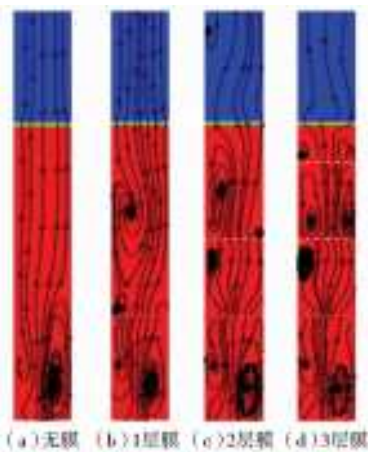


图 8 试验井水位上升状态气液两相分布和流线  
Fig. 8 Gas-liquid two-phase distribution and streamline diagram of rising water level in test well

在流速云图中,如图 9(a)无膜试验井进口处的流速速度较高,而后半段流速均匀,其速度明显下降,对应的壁面损失和局部水头损失随之而减小。图 9(b)为 1 层膜情况下流速云图,在过膜后速度明显增大,能量耗散增加。布置 2 层和 3 层膜后,流场速度分别如图 9(c)、9(d)所示,在每次通过多孔弹性膜时,流量不变,过水断面减小,流速增大使局部损失和沿程损失同时增大,动能衰减更快。但多层弹性膜的布置对水流进入调压室也有一定削减作

用,应该结合实际情况进行设计选用。

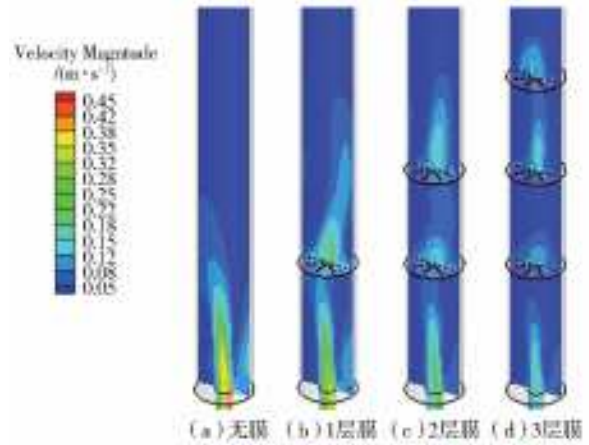


图 9 试验井水位上升状态速度云图

Fig. 9 Speed cloud diagram of test well water level rising state

图 10 和 11 分别为试验井水位下降状态的流线和流速云图。与水位上升状态相似,结果显示多孔弹性膜能够快速的消耗水体能量,使涌波快速的衰减并恢复水面稳定。但同样因为膜的存在,整体流量有减小趋势。



图 10 试验井水位下降状态气液两相分布和流线图  
Fig. 10 Gas-liquid two-phase distribution and streamline diagram of test well water level declining state

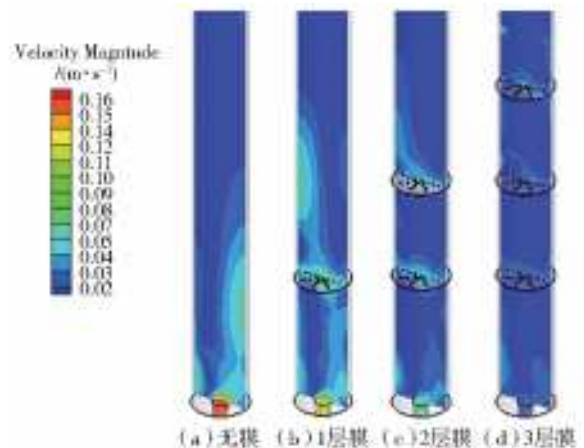


图 11 试验井水位下降状态速度云图

Fig. 11 Speed cloud of test well water level declining state

### 3 结 论

本文采用“U”型管水柱振荡试验和 CFD 数值模拟两种方法,研究了布置在调压室内的多孔弹性膜削减涌波的效果,并基于布置多孔弹性膜后井内的流速、流线分布情况进行了机理分析,得出如下结论。

(1)调压室内设置多孔弹性膜可以增加涌波水体的水头损失,加快调压室涌波的能量耗散过程,使之快速衰减。

(2)调压室涌波的能量消除效果与多孔弹性膜的开孔面积成反比,与布置层数成正比。

(3)布置多孔弹性膜会使调压室的过流能力有一定减弱,应该根据工程实际情况有针对性地设计布置多孔弹性膜的高程和形式。

多孔弹性膜可应用于新建调压室中以优化系统调节能力、降低其工程量,也可应用于增效扩容电站中引水发电系统的调压室改造。

#### 参考文献(References):

- [1] 缪明非.长距离引水式水电站调压室水力特性及多目标优化的研究[D].北京:清华大学,2008.(ZHAI M F. Research on hydraulic characteristics and multi-objective optimization of surge tank of long-distance diversion hydropower station[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [2] JAEGER C. Fluid Transients in Hydroelectric Engineering Practice[M]. Glasgow: Blackie & son, 1977.
- [3] CHAUDHRY M. H. Applied Hydraulic Transients[M]. Canada: Van Nostrand Reinhold Ltd, 1979.
- [4] 陈捷平,杨建东,郭文成,等.超长引水隧洞水电站调压室水力设计的探讨[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(2):212-217.(CHEN J P, YANG J D, GUO W C, et al. Hydraulic design of surge tank in hydropower station with long distance diversion tunnel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 212-217. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2016-02-009.
- [5] 付亮,杨建东,王建伟.超长引水隧洞水电站大波动过渡过程特殊问题[J].中国农村水利水电,2006(9):112-114, 117.(FU L, YANG J D, WANG J W. Special problems of large wave transition process of hydropower station in super long water diversion tunnel[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(9): 112-114, 117. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZNSD. 0. 2006-09-038.
- [6] 陈祥荣.长引水洞电站系统调节稳定性分析计算[J].红水河,1998(1):45-49,69.(CHEN X R. Analysis and calculation of regulation stability of power station

- system with long distance diversion tunnel [J]. Hongshui River, 1998 (1): 45-49, 69. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: HSHZ. 0. 1998-01-009.
- [7] 陈胜,张健,俞晓东.水电站输水系统相继甩负荷下调压室涌波叠加研究[J].水利学报,2015,46(11):1321-1328.(CHEN S, ZHANG J, YU X D. Surge superposition following successive load rejection in hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (11): 1321-1328. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150121.
- [8] 张健,卢伟华,范波芹,等.输水系统布置对抽水蓄能电站相继甩负荷水力过渡过程影响[J].水力发电学报,2008(5):158-162.(ZHANG J, LU W H, FAN B Q, et al. The influence of layout of water conveyance system on the hydraulic transients of pump-turbines load successive rejection in pumped storage station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008 (5): 158-162. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SFXB. 0. 2008-05-030.
- [9] 王伟,胡晨贺,邓兆鹏,等.长引水隧洞机组运行方式限制因素分析与解决措施[J].水电与新能源,2018,32(9):67-70.(WANG W, HU C H, DENG Z P, et al. On the limiting factors and solution measures of the operation modes of units with long water diversion tunnels [J]. Hydropower and New Energy, 2018, 32(9): 67-70. (in Chinese)) DOI: 10. 13622/j. cnki. cn42-1800/tv. 1671-3354. 2018. 09. 017.
- [10] 刘启钊,胡明,马吉明.水电站(第4版)[M].北京:中国水利水电出版社,2010.(LIU Q Z, HU M, MA J M. Hydropower station (4th Edition) [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 金钟元.水力机械(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,1992.(JIN Z Y. Hydraulic machinery (Second Edition) [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1992. (in Chinese))
- [12] 马善定,汪如泽.水电站建筑物(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,1996.(MA S D, WANG R Z. Hydropower station building (Second Edition) [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1996. (in Chinese))
- [13] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.(WANG F J. Computational fluid dynamics analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2005.(LI J X, ZHAO Z X. Hydraulics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 杨开林.长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学

- 问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435. (YANG K L. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 424-435. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20150824.
- [16] 杨开林. 现代调水工程的水力控制理论[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 1-7. (YANG K L. Theory of hydraulic control for modern water diversion projects [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 1-7. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2011.04001.
- [17] 陶永霞, 丁泽霖, 刘子祺. 活塞消能式调压室可行性研究[J]. 水力发电, 2017, 43(3): 65-67. (TAO Y X, DING Z L, LIU Z Q. Feasibility study of piston energy dissipation surge chamber[J]. Water Power, 2017, 43(3): 65-67. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLFD.0.2017-03-015.
- [18] 程永光, 陈鉴治, 杨建东, 等. 连接管长度对调压井水位波动和水锤压力的影响[J]. 水利学报, 2003(5): 46-51. (CHENG Y G, CHENG J Z, YANG J D, et al. Influence of lateral pipe length of surge tank on surge wave and water hammer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5): 46-51. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2003.05.008.
- [19] 徐逸, 蔡付林, 花玉龙. 带侧弯式连接管阻抗式调压室水力特性模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 93-95. (XU Y, CAI F L, HUA Y L. Simulation of hydraulic characteristics of impedance surge tanks with side-bending link pipe[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 93-95. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY.0.2013-04-025.
- [20] 蔡付林, 宋长福, 周建旭. 有长连接管调压室水头损失系数计算方法研究[J]. 水利水电科技进展, 2003(6): 27-29, 48. (CAI F L, SONG C F, ZHOU J X. Calculation method of head loss coefficient of long link pipe surge chamber[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003(6): 27-29, 48. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLSD.0.2003-06-009.
- .....
- (上接第 85 页)
- [29] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报, 2004(8): 8-14. (WANG H, QIN D Y, WANG Y, et al. The ecological environment and its evolution trend in the arid regions of northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8): 8-14. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2004.08.002.
- [30] 肖志强, 刘丽, 赵彦锋. 武都山区干旱气候特征与灾害风险区划[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(17): 7624-7626, 7734. (XIAO Z Q, LIU L, ZHAO Y F. Arid climate characteristics and disaster risk zoning in Wudu Mountain Area [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(17): 7624-7626, 7734. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2013.17.083.
- [31] 金朴, 任三学. 武都干旱气候特征[J]. 甘肃气象, 1998(2): 24-26. (JIN P, REN S X. Drought climate characteristics of Wudu[J]. Gansu weather, 1998(2): 24-26. (in Chinese))
- [32] 庞素菲, 魏伟, 郭泽呈, 等. 基于 TVDI 的甘肃省农业旱情特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1849-1860. (PANG S F, WEI W, GUO Z C, et al. Characteristics of agricultural drought in Gansu Province based on TVDI and its influencing factors [J]. Journal of ecology, 2019, 38(6): 1849-1860. (in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.201906.035.
- [33] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019(5): 1-10. (HAN L Y, ZHANG Q, JIA J Y, et al. China's drought intensity, frequency and duration and its north-south differences in the context of climate warming [J]. Chinese desert, 2019(5): 1-10. (in Chinese))
- [34] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186. (WANG Z L, HUANG Z Q, LI J, et al. Temporal and spatial evolution of meteorological drought and vegetation distribution in China basin based on SPEI and NDVI [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 177-186. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.0187.