

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20231146

大变幅浮船泵站输水系统停泵水锤防护研究

闫黎黎¹, 王梅芳¹, 李玲玲¹, 童保林¹, 高宇洋², 刘志勇²

(1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021; 2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 浮船泵站输水系统的停泵水锤防护除了需保证机组和输水管道安全外, 还要考虑水锤压力对活动摇臂和浮船的冲击, 保证浮船稳定。对云南省某大变幅浮船泵站输水系统的停泵过渡过程进行数值模拟研究。结果表明, 最低进水位工况为水锤防护的最不利工况; 泵出口阀拒动条件下, 若机组倒转转速超标且在停泵后 3 s 内即达到最大倒泄流量, 综合考虑阀门驱动能力需求、机组倒转转速和水锤压力, 泵出口阀推荐采用轴流式止回阀; 在“泵出口轴流式止回阀+岸上空气罐+中间止回阀+防水锤空气阀”的水锤防护方案中, 轴流式止回阀保证机组不倒转, 空气罐和防水锤型空气阀降低了输水管道内的最大水锤压力并改善了负压状况, 中间止回阀减小了水泵出口和摇臂段的压力振荡幅度和振荡时间, 有效解决了该浮船输水系统的停泵水锤防护问题。

关键词: 停泵水锤防护; 浮船泵站; 大变幅; 泵出口阀型式; 中间止回阀; 空气罐

中图分类号: TV675; TU991.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0105-04

1 引言

云南省因“山高水低”的典型特征, 很多引水工程从水位变幅较大的水库取水时采用了浮船泵站取水方式^[1], 该取水方式是将水泵安装在浮船上, 经活动摇臂管将水输送到岸边固定管道, 再输送到出水池。浮船泵站具有大水位落差下投资省、施工周期短、取水水质好、使用条件不受水位落差限制等优点。工程实践表明, 事故停泵水锤是威胁泵站输水系统安全运行的主要原因之一。常见的停泵水锤防护措施包括双向调压塔^[2]、单向调压塔^[3]、空气罐^[4]、空气阀^[5]等。与固定式泵站输水系统相比, 浮船泵站输水系统的水锤防护除了要考虑机组的倒转转速和管道水锤压力, 还要考虑水锤压力对活动摇臂接头和浮船的冲击, 以保证浮船的稳定; 要尽量减轻泵船上设备的重量; 要避免液压设备对水源水质造成污染。然而, 目前针对浮船泵站输水系统水锤防护的研究还不系统^[6-7]。鉴此, 本文结合云南省某浮船泵站输水系统, 从进水位对事故停泵过渡过程的影响、泵出口阀型式和关闭规律选择、中间止回阀设

置、空气罐和空气阀联合防护等方面开展研究, 提出适用于高原山区浮船泵站输水系统的水锤防护措施。

2 工程概况

云南省某供水工程从小湾电站库区取水, 设计取水流量 1.62 m³/s, 水库正常水位 1 240.00 m, 死水位 1 166.00 m, 水源水位变幅达 74 m, 出水水位 1 289.60 m。取水泵站采用浮船式泵房, 布置 3 台水泵机组(3 用 0 备), 均可变频调速运行, 单机设计流量 0.54 m³/s, 设计扬程 126 m, 单机功率 1 000 kW; 3 台水泵的出水支管在泵房内汇合至均压总管后, 经过三节串联连接的摇臂钢管(48 m/55 m/55 m, DN1200)与岸上的固定管道连接, 再经过约 156 m、单条 DN1100 的压力管道输送至出水池。各摇臂管间通过托管船坞相连。输水系统纵剖面布置见图 1。

3 数值计算模型

泵站输水系统的水锤计算基于管道一维瞬变

收稿日期: 2023-07-11, 修回日期: 2023-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3000205-06); 云南省高层次人才及创新团队(2018HC024)

作者简介: 闫黎黎(1982-), 女, 高级工程师, 研究方向为水利水电动力工程, E-mail: yllzws@126.com

通讯作者: 刘志勇(1972-), 男, 博士、副教授, 研究方向为流体输送及流体过渡过程, E-mail: Liuzy6107@whu.edu.cn

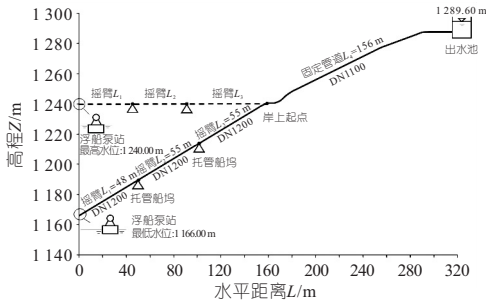


图 1 输水系统纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal profile of water-conveying system

流基本方程,并采用特征线法求解^[8]。

当在空气罐和主管道连接处的上游侧设置止回阀时,形成如图 2 所示的“中间止回阀+空气罐”布置方式,建立该边界条件的数学模型为:

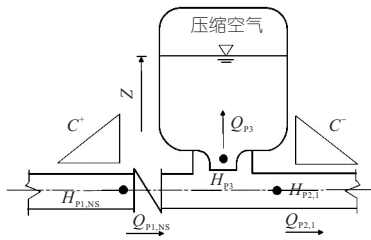


图 2 “中间止回阀+空气罐”布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of air chamber with upstream check valve

罐”布置方式,建立该边界条件的数学模型为:

$$\begin{cases} H_{P1,NS} = C_P - B_1 Q_{P1,NS} \\ H_{P2,1} = C_M + B_2 Q_{P2,1} \\ H_{P2,1} = H_{P1,NS} - \xi_{\text{阀}} Q_{P1,NS} | Q_{P1,NS} | \\ H_{P2,1} = H_{P3} + \xi_{\text{罐}} Q_{P3} | Q_{P3} | \\ Q_{P1,NS} = Q_{P2,1} + Q_{P3} \\ (H_{P3} - z + \bar{H}) [V - 0.5(Q_{P3} + Q_3)\Delta t]^n = C \\ z = z_0 + 0.5(Q_{P3} + Q_3)\Delta t / A_{\text{罐}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $H_{P1,NS}$ 、 $Q_{P1,NS}$ 分别为止回阀前点的测压管水头、流量的瞬态值; C_P 、 C_M 分别由相关节点前一时步的流量、测压管水头值得到; B_1 、 B_2 分别为空气罐上游主管、下游主管的特征常数; $H_{P2,1}$ 、 $Q_{P2,1}$ 分别为空气罐下游节点的测压管水头、流量的瞬态值; $\xi_{\text{阀}}$ 、 $\xi_{\text{罐}}$ 分别为中间止回阀、空气罐与主管道连接短管的阻力系数; H_{P3} 为空气罐出口的测压管水头; Q_{P3} 、 Q_3 分别为空气罐流入(出)流量的瞬态值、前一时步的已知值; z 、 z_0 分别为罐中水面高程的瞬时值、前一时步的已知值; V 为前一时步的罐内气体体积; \bar{H} 为当地大气压; n 为气体的可逆多变指数; C 为与罐中气体初始状态相关的参数; Δt 为计算时间步长; $A_{\text{罐}}$ 为空气罐的截面积。

式(1)共包括 7 个代数方程和 7 个未知量,即

$H_{P1,NS}$ 、 $Q_{P1,NS}$ 、 $H_{P2,1}$ 、 $Q_{P2,1}$ 、 H_{P3} 、 Q_{P3} 、 z 。方程个数和未知量个数相等,可采用牛顿-雷伏生方法迭代求解。

4 事故停泵水锤分析

4.1 进水水位的影响

本供水系统的水泵机组采用最低进水水位时工频运行、高进水水位时调速运行的流量调节模式,在不同进水水位、相同初始流量、3 台运行全部事故停泵、泵出口阀拒动工况下的过渡过程计算结果见表 1。图 3 为不同工况下无量纲流量 v 和无量纲转速 α 的变化过程。

表 1 泵出口阀拒动时不同进水位的计算结果

Tab. 1 Calculation results under different inlet water levels with outlet valve unclose

序号	进水水位/m	初始转速 / %	倒转转速		倒泄流量		水泵出口压力/m		全线最小压力/m
			最大 值/倍	最大 时刻/s	开始 时刻/s	最大 时刻/s	最大 初始		
1	1 166.00	100.0	-1.264	3.60	0.91	2.44	155.49	124.37	汽化
2	1 240.00	76.6	-0.795	5.86	1.76	4.13	61.72	50.37	-2.91

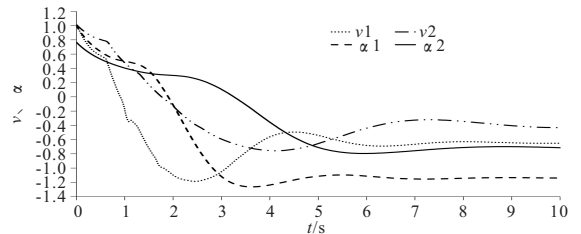


图 3 泵出口阀拒动时的无量纲流量和转速变化过程

Fig. 3 Dimensionless flow and rotate speed changing process under unclose outlet valve

由表 1、图 3 可知,在相同初始流量下,进水水位越低,事故停泵后,机组转速和流量下降越快,出现倒流和倒转的时刻越早,最大倒转转速越大;水泵出口最大水锤压力的绝对值(该点管线高程随进水位变化)和升压倍数越大,管线中的最小水锤压力越小。因此,最低进水水位工况为水锤防护的最不利工况。

4.2 泵出口阀关闭规律

为保证机组倒转转速满足《泵站设计标准》(GB 50265-2022)^[9]的要求,应确保事故停泵后泵出口阀可靠关闭。在最低进水水位、3 台运行全停、泵出口阀不同关闭规律下的过渡过程计算结果见表 2。由表 2 可知:①泵出口阀关闭越快,机组的倒泄流量和倒转转速越小。由于本系统在停泵后 2.4 s 即达到最大倒泄流量(泵出口阀拒动工况),当泵出口阀线性关闭时间超过 4 s 或两段关闭的快关时间超过 3 s 时,机组的最大倒转转速超过额定转速的 1.2 倍,不满足相关设计规范的要求。

表 2 泵出口阀不同关闭规律下的计算结果

Tab. 2 Calculation results under different closing scheme of pump outlet valve

序号	泵出口阀 关闭规律	最大倒转 转速/倍	最大倒泄 流量/倍	泵出口压力/m		全线最小 压力/m
				最大	初始	
1	不关闭	-1.264	-1.186	155.49	124.37	汽化
2	0.91 s (零流量时刻)			209.93	124.37	汽化
3	2 s		-0.916	354.67	124.37	汽化
4	3 s	-0.901	-1.137	345.65	124.37	汽化
5	4 s	-1.220	-1.173	262.04	124.37	汽化
6	10 s	-1.262	-1.185	186.47	124.37	汽化
7	3 s/80%— 7 s/20%	-1.221	-1.170	155.86	124.37	汽化

- ②泵出口阀的关闭对管线中的负压无改善作用。
- ③泵出口阀的关闭加剧了最大水锤压力的上升。
- ④泵出口阀在机组开始倒流但未达到最大倒泄流量前完成关闭时,阀门关闭越快,泵出口阀后点的最大水锤压力越小;泵出口阀在机组达到最大倒泄流量后完成关闭时,阀门关闭越快,最大水锤压力越大。

根据表 2 的计算结果,从控制机组最大倒转转速的角度出发,考虑液压驱动阀的最快关闭速度和驱动装置成本,本系统推荐采用可零流量关闭的水力驱动轴流式止回阀。

安装在水泵出口的轴流式止回阀的结构见图 4。该阀采用流线型流道,行程短,响应迅速,可在正向流速接近于 0 时自动关闭(即表 2 中的工况序号 2),从而完全防止机组的倒流和倒转。

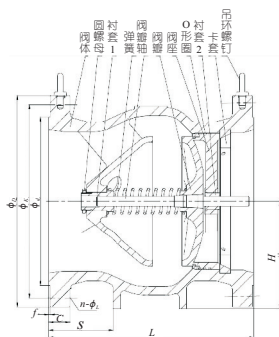


图 4 轴流式止回阀的结构

Fig. 4 Structure of axial-flow check valve

4.3 水锤防护措施

4.3.1 空气罐的水锤防护效果

为改善负压并缓冲倒流关阀导致的压力升高,必须设置水锤防护措施。由于管线处于山区且纵剖面较陡,不具备布置双向调压塔的条件。因此,采用空气罐进行水锤防护较合适。为减轻浮船的荷载,将空气罐布置在岸上干管起点处。

空气罐水锤防护效果影响因素包括罐体体积、连接管直径、初始水气比等^[10],通过大量试算分析,拟定的空气罐参数见表 3。

表 3 空气罐参数

Tab. 3 Parameters of air chamber

罐体 结构	安装 方式	罐体 直径/m	罐体 长度/m	有效 容积/m ³	连接管 径/mm	初始 水气比
水囊式	卧式	1.4	3.55	5.0	400	1:1

图 5 为设空气罐、泵出口设轴流式止回阀、3 泵全停条件下的管线压力包络线。由图 5 可知,水泵出口的最大水锤压力由表 2 中的 209.93 m 降至 140.38 m,为初始恒定流压力 124.37 m 的 1.13 倍,管线中的最小水锤压力由表 2 中的汽化压力升至 -3.32 m。说明空气罐的设置对管线中的水锤压力有显著的改善效果。

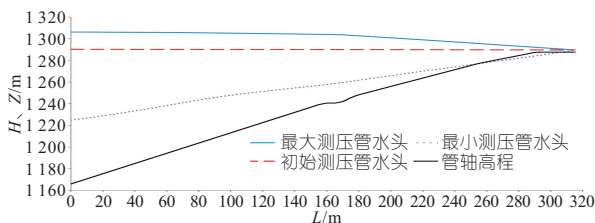


图 5 设空气罐后的管线压力包络线

Fig. 5 Pipeline pressure envelope after installation of air chamber

4.3.2 增加中间止回阀的防护效果

由于本供水系统进水位变幅较大,浮船和岸上干管之间的摇臂管长达 158 m,为了减小事故停泵过渡过程中水锤压力对浮船和摇臂段的冲击,提高浮船和中间托管浮坞的稳定性,拟在紧邻空气罐的上游(泵船侧)设水力自驱的中间止回阀。

中间止回阀距水泵出口约 158 m,根据分析,停泵降压波在停泵后约 0.15 s 传播至中间止回阀处,中间止回阀开始关闭。表 4 为中间止回阀不同速率关闭时的事故停泵水锤计算结果。

表 4 中间止回阀不同速率关闭的计算结果

Tab. 4 Calculation results under different closing scheme of intermediate check valve

序号	中间止回 阀线性全 闭时间/s	泵出口压力/m		最小压力/m		罐内最 小水深 /m
		最大	初始	泵—中间 止回阀	中间止回 阀—末端	
1	无中间阀	140.38	124.37	17.16	-3.32	0.425
2	0.5	124.46	124.46	汽化	-4.60	0.428
3	1.0	128.11	124.46	17.13	-3.30	0.428
4	3.0	132.28	124.46	17.18	-3.31	0.426
5	5.0	140.36	124.46	17.18	-3.31	0.426

由表 4 可知,若中间止回阀关闭速度较快,先于泵出口阀关死,则泵出口—中间止回阀的管段将出现汽化压力;若中间止回阀关闭速度过慢,则泵出口阀后点的压力将升高,失去中间止回阀的作用。根据表 4 的计算结果,本系统设定中间止回阀的关闭时间为 3 s。

图 6 为设“中间止回阀+空气罐”、中间止回阀 3 s 线性全闭和无中间止回阀条件下的水泵出口压力变化过程对比。

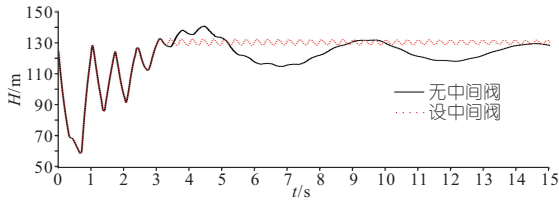


图 6 是否设中间止回阀条件下的泵出口压力变化过程

Fig. 6 Change process of pump outlet pressure with or without intermediate check valve

由图 6 可知,与无中间止回阀的工况相比,在中间止回阀关闭后,摇臂段和下游段的水体被中间止回阀隔开,泵出口的最大水锤压力由无中间止回阀工况的 140.38 m 降至 132.28 m,压力波动幅值明显减小,压力波动更早衰减至稳定状态,有利于浮船和摇臂管的稳定。

4.3.3 增加防水锤型空气阀的联合防护效果

由图 6、表 4 可知,设置空气罐后,受空气罐的容积和连接管直径的限制,空气罐的补水能力和负压保护范围有限,管线后段仍有一 3.31 m 的负压出现。为进一步改善该管段的负压状况,在拟定的空气罐参数条件下,在管线后段的拐点处(距岸上起点 130 m)增设 1 处 DN150 的防水锤型空气阀(缓排/快排的流量系数与过流面积乘积的比值设定为 1 : 100)。

表 5 为增设空气阀前后的事故停泵水锤计算结果对比,图 7 为增设空气阀后管线压力包络线图,图 8 为增设空气阀前后空气罐内水深变化过程对比。

表 5 增设空气阀前后的计算结果

Tab. 5 Calculation results with or without adding air valve

序 号	空 气 阀	泵出口压力/m		最小压力/m		罐内最小 水深/m
		最大	初始	泵—中间 止回阀	中间止回 阀—末端	
1	不设	132.28	124.46	17.18	-3.31	0.426
2	防水锤型	130.72	124.46	18.26	0.38	0.443

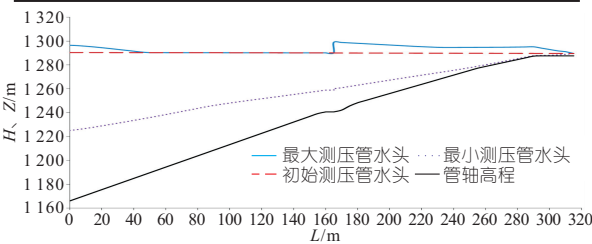


图 7 增设空气阀后管线压力包络线

Fig. 7 Pipeline pressure envelope after adding air valve

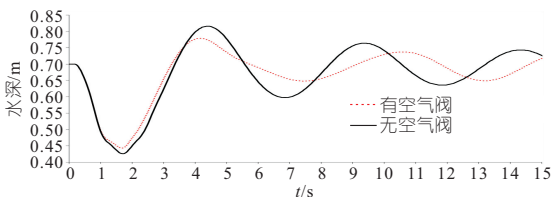


图 8 增设空气阀前后空气罐水深变化过程

Fig. 8 Change process of water depth in air chamber with or without adding air valve

由表 5、图 7 可知,增设空气阀后,管线后段的负压得到进一步改善,最小水锤压力为 0.38 m。由表 5、图 8 可知,增设空气阀后,空气罐内水深的波动幅度减小,相应空气罐内的压力波动减小。

4.3.4 水锤防护措施确定

综上所述,拟定本供水系统采用“泵出口轴流式止回阀+岸上空气罐+中间止回阀+防水锤空气阀”的水锤防护方案。该水锤方案下,机组倒转转速和管线水锤压力均满足相关控制标准,并提高了浮船在事故停泵过渡过程中的稳定性。

5 结论

对于高原山区的大变幅浮船泵站输水系统的停泵水锤防护,进水位越低,净扬程越大,机组出现倒流的时刻越早,最大倒转转速越大,管道最大水锤压力越大,负压越严重;若泵出口阀拒动工况下的机组倒转转速超标且在停泵后 3 s 内达到最大倒泄流量,泵出口阀推荐采用轴流式止回阀;为改善管线中的负压并缓冲正压水锤压力,推荐在岸上主管起点设置空气罐作为主防护措施,根据管线负压状况在适当位置设置防水锤型空气阀;为减小倒流水体对泵船和摇臂管的冲击,推荐在空气罐上游装设中间止回阀。

参考文献:

- [1] 肖玉平,邹茂娟. 某提水工程取水方式的选择[J]. 云南水力发电,2021,37(11):86-89.
- [2] 胡卫娟,胡建永,李柏庆. 长距离供水工程水锤联合防护研究[J]. 给水排水,2022,58(9):107-111.
- [3] 袁哲,王丰,周子旋,等. 长距离跨海管道供水工程的水锤防护研究[J]. 水电能源科学,2022,40(6):114-117,27.
- [4] 王开朗,张健,姚天语,等. 长距离加压重力流输水工程水锤防护研究[J]. 水电能源科学,2023,41(5):76-80.
- [5] 杨春霞,耿魏强,严杰,等. 不同开度防水锤空气阀的进排气特性数值模拟[J]. 水电能源科学,2022,40(8):181-185.
- [6] 袁芳,刘志勇,张阳. 高压大型浮船泵站水锤防护措施研究[J]. 水利规划与设计,2022(2):59-63.
- [7] 李玲玲,张迪,张波,等. 高扬程大型浮船取水泵站水锤防护措施探讨[J]. 中国农村水利水电,2023(5):136-140.
- [8] WYLIE E B, STREETER V L, SUO LISHENG. Fluid transient in systems[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 泵站设计标准:GB 50265-2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022.
- [10] 李琨,吴建华,孙一鸣,等. 空气罐敏感性参数对泵站水锤防护效果研究[J]. 人民黄河,2021,43(3):127-130.

息,给出了中小水电站水库面临不同量级洪水时的运行调度方法,达到了在中小洪水时增加发电效益和大洪水时减小洪灾损失的目的,对于变化环境下洪水资源化提供了一种可行的方法。

c. 由于中小水电站水库装机容量和满发流量一般较小,汛期运行调度增加的发电效益主要体现在小洪水时增加的发电水头上,减小的洪灾损失主要体现在遭遇超设计标准洪水时通过预泄为调度人员争取更多时间上。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[2] 张验科, 张佳新, 俞洪杰, 等. 考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J]. 水力发电学报, 2019,38(9):64-72.

[3] 王渤权, 李红刚, 艾显仁, 等. 基于动态可行域的梯级水库群优化调度研究[J]. 水电能源科学,

2022, 40(11):64-67,59.

[4] 张永波, 唐莉, 祝雪萍, 等. 气候突变对水库汛期分期及调度的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2):67-69,81.

[5] 郑玉婷, 王丽萍, 谢宇韬, 等. 改进的 VIKOR 决策模型在大隆水库汛期水位动态控制中的应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 38-41.

[6] LIU YUAN, JI CHANGMING, WANG YI, et al. Consideration of streamflow forecast uncertainty in the development of short-term hydropower station optimal operation schemes: a novel approach based on mean-variance theory[J]. Journal of cleaner production,2021, 304:126929.

[7] 顿晓晗, 周建中, 张勇传, 等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 209-217, 224.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范: GB/T 22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社,2009.

Multi-objective Risk Analysis for Operation Scheduling of Medium and Small Hydropower Station Reservoirs in Flood Season

ZHANG Yan-ke, ZHANG Jian-xin, LU Yao-jian, YU Qiang

(School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the fact that the reservoirs of medium and small hydropower stations usually operate at a lower level during the flood season because of the smaller regulating reservoir capacity, short decision time for flood regulation, maximum head of the unit and inundation limitation of the upstream reservoir area, etc., the flood resource utilization benefit is not fully utilized during the flood season regardless of the magnitude of the flood. The multi-objective risk analysis model for flood operation and scheduling of medium and small hydropower reservoirs is established with the objective of maximizing the power generation benefit and minimizing the flood risk, and the solution method for the optimal flood level is given when the forecasted incoming flood flow is in different ranges. The results show that when the reservoir faces different levels of floods, the optimal operation level can be obtained by coordinating the benefits and risks to increase the power generation benefits during small floods and reduce the flood losses during large floods, which provides a reference for the flood operation and scheduling of medium and small hydropower reservoirs under changing environment.

Key words: medium and small hydropower stations; flood operation and scheduling; multi-objective decision; risk analysis

(上接第 108 页)

Water Hammer Prevention of Floating Pumping Station Water-conveying System Under Large Range Variable Water Source Level

YAN Li-li¹, WANG Mei-fang¹, LI Ling-ling¹, TONG Bao-lin¹, GAO Yu-yang², LIU Zhi-yong²

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For the pump-stopping water hammer prevention of the floating pumping station water-conveying system, in addition to ensure the safety of the pump unit and the pipeline, the impact of the water hammer pressure on the movable rocker pipe and the floating boat should be considered to ensure the stability of the floating boat. The numerical simulation of the pump-stopping transient of a floating pumping station water-conveying system under large range variable water source level was conducted. The results show that the lowest inlet water level is the most unfavorable condition for water hammer prevention. Under the condition that the pump outlet valve refuses to close, if the unit's reverse speed exceeds the standard and the maximum reverse flow is reached within 3 s after the pump-stopping. The axial-flow check valve is recommended for the pump outlet valve considering the valve driving capacity requirements, the unit reverse speed and water hammer pressure. In the water hammer protection scheme of "pump outlet axial-flow check valve + air chamber on shore + intermediate check valve + hammer-prevention air valve", the axial-flow check valve ensures that the pump unit does not reverse, the air chamber and air valve reduce the maximum water hammer pressure and improve the negative pressure condition in the pipeline, and the intermediate check valve reduces the pressure oscillation amplitude and oscillation time in the pump outlet and rocker pipe. Therefore, the water hammer prevention problem in the floating pumping station water-conveying system is effectively solved.

Key words: pump-stopping water hammer prevention; floating pumping station; large range variable water source level; pump outlet valve style; intermediate check valve; air chamber