

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220577

拦河枢纽对水环境不利影响及优化调度研究

逢 敏^{1a}, 张 鹏², 尤佳艺^{1b}, 张 倩^{1b}, 陈志琦³

(1. 河海大学 a. 水文水资源学院; b. 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州 450046; 3. 江苏环保产业技术研究院股份公司, 江苏 南京 210036)

摘要: 为提高枯水期南昌市水环境承载力, 构建了赣江尾间水环境数学模型, 研究了不同水文条件的优化调度方案。结果表明, 在流量小于 1 020 m³/s 时, 赣江主干河流和下游主、北、中、南四个分支最佳调度水位在最低生态水位和警戒调控水位之间, 调度时间在 1.11 d 以内; 在流量大于 1 020 m³/s 后时, 警戒调控水位即为防洪限制水位, 主干河流和四个分支的最佳调度水位在最低生态水位和防洪限制水位之间, 调度时间在 4~7 d 内。建议各分支拦河枢纽靠近警戒调控水位运行, 既能保证河流控制断面水质达标, 又能最大限度的保持南昌市水资源可利用量。

关键词: 赣江下游; 水环境模型; 拦河枢纽; 优化调度

中图分类号: TV61

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0059-04

1 概况

赣江河道下游为冲积型分汉型河道, 干流在八一桥下约 2 km 处被分成左、右两汉道, 左汉被分成主支和北支, 右汉被分为中支和南支, 赣江尾间河道按主、北、中、南四支呈扇型汇入鄱阳湖。就水文而言, 2007~2017 年赣江尾间最枯月水位呈下降趋势, 水面面积锐减, 难以维持最小生态流量。丰、枯水期水资源分配不合理, 丰水期水资源量占全年的 60% 以上。就水质而言, 枯水期部分考核断面 NH₃-N、TP 超标。为维持南昌市水资源量, 在赣江四个分支上各建设水利枢纽工程来控制河道水位。研究区域内饮用水源地取水口、国省控断面、水文站见图 1。水利枢纽在发挥防洪排涝等积极作用的同时, 也带来很多环境问题^[1,2]。针对水利枢纽建设的优缺点, 优化调度就显得十分必要。方子云等^[3]提出闸坝合理调度、引水及提高水体循环能力三种方式改善水库水质; 张永勇等^[4]通过多闸坝调控来充分开发流域水资源利用率; SUH S W 等^[5]提出闸门联合调度方案增强 Shihwaho 湖的流动性。但目前的研究多聚焦于通过调水使水质稳定达标, 而忽略

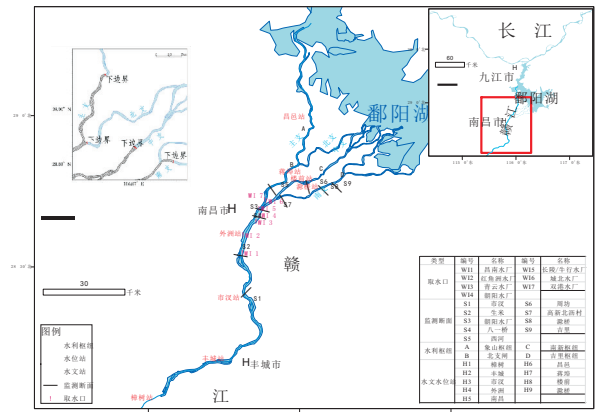


图 1 赣江及其取水口、监测断面、水文水位站、水利枢纽位置分布图

Fig. 1 Location of the Ganjiang River and water intakes, monitoring sections, hydrological stations and barrage junctions

了枯水期水资源利用量较小的问题。为此, 本文基于赣江规划提出的 4 个拦河枢纽, 利用二维水环境数学模型, 研究了不同水文条件的优化调度方案, 以期既能提高枯水期水资源利用量, 又能保证断面水质稳定达标, 研究结果对南昌市供水水量和水质安全具有重要意义。

2 研究方法

2.1 赣江二维水动力水质模型

收稿日期: 2022-03-25, 修回日期: 2022-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52000100)

作者简介: 逢敏(1988-), 女, 博士研究生, 研究方向为水资源管理与模型调控, E-mail: mia_pang@sina.com

通讯作者: 张鹏(1988-), 男, 博士、讲师, 研究方向为水体污染物迁移转化机理, E-mail: zhangpeng2019@ncwu.edu.cn

2.1.1 模型基本方程

水动力方程为不可压流体三维雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深方向积分的连续方程和动量方程,即:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} -$$

$$\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中, $h = \eta + d$ 为总水深=水位+静水深; t 为时间; u, v 分别为 x, y 方向上的速度分量; x, y 分别为横纵坐标; f 为哥氏力系数; ρ 为水的密度; S 为源项; S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} 为辐射应力分量。

水质模型方程为二维非均匀流中的对流扩散基本方程,即:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + K_i C_i + S_i \quad (4)$$

式中, C_i 为污染物浓度; E_x, E_y 分别为 x, y 向上的扩散系数; K_i 为污染物降解系数; S_i 为污染物底泥释放项。

模型的控制方程基于有限体积法原理,采用三角形无结构化网格进行空间离散数值求解。对二维水动力及水质输运扩散基本方程,从时间上积分考虑采用低阶积分 Euler 模式或高阶积分 Runge Kutta 模式。

2.1.2 模型构建

赣江二维模型计算网格 8 341 个,上边界为樟树站 2016 年逐日流量,下边界为昌邑、蒋埠、楼

前、滁槎站同期水位,气象参数来自南昌站同期数据。污染负荷根据污染源入河量,以概化排污口加入模型。以 2016 年赣江下游平均水位、水质为模型初始条件,计算时间步长 $t = 600$ s。

2.1.3 模型参数率定

(1) 水动力参数率定。利用 H2~H5 水文站实测值进行率定,率定结果显示水位绝对误差在 20 cm 以内(图 2),流量相对误差为 14.3%(图 3),率定得到河道糙率为 0.03~0.045。模拟得到不同来水流量下四分支的分流比符合实际^[6,7](表 1),可见构建的模型可用于赣江下游水动力模拟。

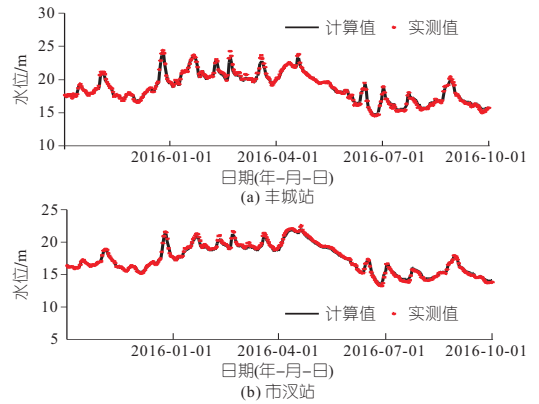


图 2 赣江水位站水位率定结果图

Fig. 2 Comparison between the calculated and predicted results of the water level station located on the Ganjiang River

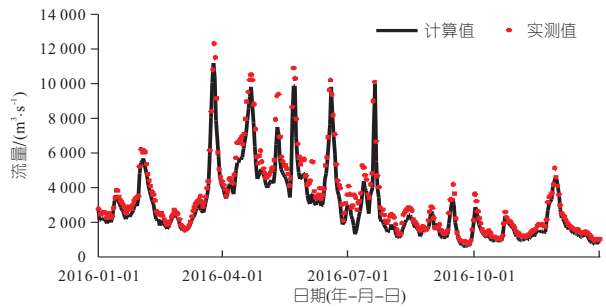


图 3 赣江外洲站流量率定结果图

Fig. 3 Comparison result of calculated and measured water discharge values of Waizhou station

(2) 水质参数率定。利用 2016 年逐月水质资料,选取 S1、S2、S4、S5、S7 断面进行率定。各断面水质相对误差小于 24%(表 2),率定得到 COD、NH₃-N、TP 降解系数分别为 0.1~0.15、

表 1 赣江下游四分支分流比率定结果表

Tab. 1 The calibration results of the ratio of four branches in the lower reaches of Ganjiang River

流量 (m ³ ·s ⁻¹)	主支		绝对 误差	北支		绝对 误差	中支		绝对 误差	南支		绝对 误差
	计算值	实测值		计算值	实测值		计算值	实测值		计算值	实测值	
743	83.60	95.00	-11.40	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	-1.70	16.40	3.40	13.00
1 340	81.40	91.00	-9.60	0.00	1.00	-1.00	0.00	2.80	-2.80	18.60	5.20	13.40
2 660	74.90	73.60	1.30	3.90	4.30	-0.30	9.80	8.20	1.60	11.40	13.90	-2.60

%

表 2 赣江模型水质率定点位计算值与实测值平均相对误差结果表

Tab. 2 Relative error results of calculated and measured water quality values of Ganjiang River

监测断面	平均相对误差/%			监测断面	平均相对误差/%		
	COD	NH ₃ -N	TP		COD	NH ₃ -N	TP
S1	14.37	16.61	14.08	S5	12.49	11.33	12.33
S2	8.52	18.05	20.78	S7	13.74	23.14	20.76
S4	14.32	11.79	11.49				

0.08~0.12、0.06~0.10 d⁻¹，可见所建水质模型能够反映赣江水质实际状况。

2.2 枢纽调度方案设计原则

警戒调控水位是指关闭闸门后水位抬升产生滞留，取水口和控制断面水质出现超标时的水位。防洪限制水位是指赣江下游允许蓄水的上限水位。最小生态流量取樟树站近 10 年年均流量的 20%，其对应的水位为最低生态水位。

本文重点研究枯水期优化调度，通过模型计算得到警戒调控水位和到达警戒调控水位所需时间。模型建立方法为：上游边界采用樟树站不同保证率下(99%、90%、85%、75%)枯水期流量，下游边界根据上游边界流量和分流比计算得到。建闸前后水质条件采用 2017 年枯水期实测值。根据枯水期的外洲水文站水位流量关系曲线确定不同流量下水位初始值。模型开始运行即关闭闸门蓄水，计算各控制点满足水质要求的最高水位值及到达此水位所需时间。警戒水位取最高水位和防洪水位较小值，到达警戒水位所需时间即为调控水位所需时间。拟合流量与警戒调控水位过程线、拟合流量与蓄水时间过程线，最终确定不同流量下满足水位调度范围(即最低生态水位(最低水位)和警戒调控水位(最高水位)之间的水位值)。

根据樟树站 2007~2017 年月均流量值进行 P-III 型曲线频率分析，选取枯水保证率在 12%~96% 之间的 43 个不同等级的流量作为上游边界水文条件，下游边界取四个分支水文站逐日水位实测数据，利于模型计算得到建闸前外洲站和下游四个分支水位流量响应关系，确定不同调度方案时外洲站和四个分支水位现状值。

3 结果与讨论

3.1 赣江枢纽建设对监测断面水文水质影响

表 3 为枢纽运行前后 S4、S5、S8 断面 NH₃-N、总磷浓度值计算结果。由表 3 可知，建闸前，90% 保证率枯水期赣江下游分汊处流速小于 0.16 m/s，主流流速在 0.04~0.16 m/s 之间，南支和中支流流速较小，低于 0.04 m/s。建闸后，关闸蓄水改变河流流向，并降低各分支流速，河道

内流速降低至 0.005~0.015 m/s 之间，90% 保证率时，S4、S5、S8 断面 NH₃-N、TP 存在超标，其中 S4 断面的 NH₃-N、TP 水质浓度增加 44%、52%，S5 断面 NH₃-N、TP 水质浓度增加 115%、70%，水位抬升导致水体滞留，降低水体自净能力和悬浮质的迁移能力^[10]，部分河流处于中度或重度污染。由此可知，建闸后若不合理调度会导致闸上水体滞留，取水口和控制断面水质恶化，存在水环境风险。

表 3 枢纽运行前后 S4、S5、S8 断面 NH₃-N、总磷浓度值计算结果

Tab. 3 Change of water quality factors(ammonia nitrogen (NH₃-N) and total phosphorus (TP)) in each section (S4,S5,S8) before and after the construction of the sluice

建闸条件	监测断面保证率/%	流量	S4 断面浓度值		S5 断面浓度值		S8 断面浓度值	
			NH ₃ -N	TP	NH ₃ -N	TP	NH ₃ -N	TP
前	90	629	0.54	0.134	0.54	0.107	1.30	0.139
后	99	473	0.82	0.242	1.16	0.192	1.00	0.142
	90	629	0.78	0.203	1.17	0.182	1.14	0.139
	85	797	0.68	0.178	1.05	0.169	1.08	0.135
	75	947	0.63	0.163	0.97	0.160	1.01	0.131

注：流量、断面浓度值单位分别为 m³/s、mg/L。

3.2 不同流量下闸坝调度的方案

3.2.1 允许调度的水位条件

图 4 为外洲站及赣江主、北、中、南分支不同流量下水位调度范围。由图 4 可看出，基于调度模型，得到当上游流量大于 1 020 m³/s 时(枯水保证率为 72%)，外洲站和下游四分支到达防洪水位之前出现水质超标，警戒调控水位低于防洪水位。在 72%、70%、65%、60% 保证率下关闸蓄

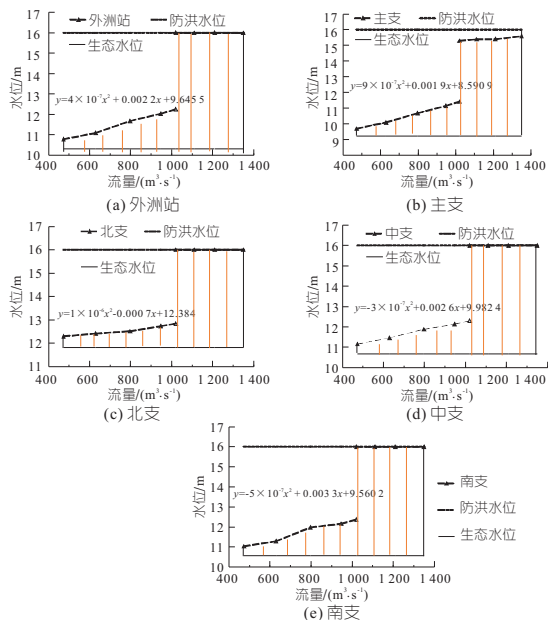


图 4 外洲站及赣江主、北、中、南分支不同流量下水位调度范围

Fig. 4 The figure shows the warning water level under different flow

水,外洲站和下游四分支水位增至防洪水位之前,取水口和断面水质均未超标,此时警戒调控水位取防洪水位。在枯水保证率大于 72%时,警戒调控水位与来水流量正相关,因为在相同污染物排放情况下,上游来水流量越大,出现水质超标的时间越延后,水位持续抬高,警戒调控水位随着流量的增大而变高。将外洲站和四个分支水位控制在最低生态水位和警戒调控水位之间,即为调度范围(图 4 中阴影部分),而最佳调度方案为调控水位在接近警戒调控水位时运行,此时既能满足水质要求,又能最大限度地保持过境水资源量。

3.2.2 允许调度的时间条件

基于允许调度水位结果,利用模型计算了允许调度时间(图 5、6)。由图 5、6 可知,在 99%、90%、85%、75%、72%、70%、65%、60%枯水保证率下,在达到防洪限制水位之前会出现水质超标现象,允许调度的时间较短,在 1.11 d 以内。在枯水保证率大于 72%时(流量小于 1 020 m³/s),随着流量增大,水环境承载力越大,警戒调控水位也会越高,到达警戒调控水位所需时间逐渐增加。在枯水保证率小于 72%时(流量大于 1 020 m³/s),警戒调控水位即为防洪限制水位,允许调度时间长,在 4~7 d 内,此时流量越大,水位抬升越快,到达警戒调控水位(即防洪水位)时间越短。

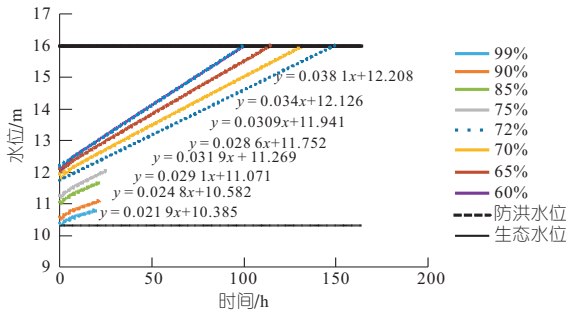


图 5 不同保证率下外洲站水位随时间变化曲线
Fig. 5 Diagram of water level change with time at Waizhou station under different assurance rates

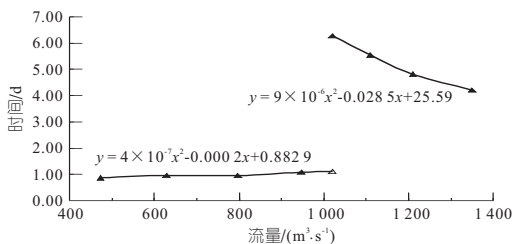


图 6 不同保证率下枢纽达到警戒调控水位所需的时间
Fig. 6 Time required for the hub to reach the warning water level under different assurance rates

3.2.3 优化调度方案

综合考虑调度要求、调度水位范围和调度时间,得到枯水期最优化调度方案(表 4)。由表 4 可知,外洲站、主、北、中、南四个分支水位调控范

围为最小生态流量对应的水位(最低水位)和警戒调控水位(最高水位)之间的水位值,通过模型进一步验证在闸坝联合调度下,赣江各四个分支在调度水位内运行下游水质均能达标。

表 4 不同枯水保证率下最佳调度方案结果
Tab. 4 Optimal scheduling schemes under different assurance rates

枯水保证率/%	外洲站 水位/m		主支水 位/m		北支水 位/m		中支水 位/m		南支水 位/m		从现状水位到达警戒调控水位所需时间/d
	警戒调控	最低生态	警戒调控	最低生态	警戒调控	最低生态	警戒调控	最低生态	警戒调控	最低生态	
99	10.8	10.3	9.7	9.2	12.3	11.8	11.2	10.7	11.0	10.6	0.9
90	11.1		10.1		12.4		11.5		11.3		1.0
85	11.7		10.7		12.5		11.9		12.0		1.0
75	12.0		11.1		12.7		12.1		12.2		1.1
72	16.0		15.3		16.4		15.9		16		6.3
70	16.0		15.4		16.4		15.9		15.9		5.5
65	16.0		15.4		16.3		15.8		15.8		4.8
60	16.0		15.6		16.2		16.2		16.2		4.2

4 结论

a. 构建了赣江水环境数学模型,模拟结果在合理误差范围内,模型能够预测赣江下游水动力水质时空变化规律。

b. 得到了枯水期最佳水位调度范围(最低生态水位与警戒水位之间),在流量小于 1 020 m³/s 时,调度时间在 1.11 d 以内,流量增大,警戒调控水位越高,调度时间逐渐增加。在流量大于 1 020 m³/s 后,警戒调控水位即为防洪限制水位,调度时间在 4~7 d 内,此时流量越大,水位抬升越快,到达警戒调控水位时间越短。

c. 本文确定最佳调度方案为赣江下游拦河枢纽水位在接近警戒调控水位时运行,既能满足水质要求,又能最大限度地保持过境水资源量,保障了枯水期南昌市供水量和水质安全。

参考文献:

- [1] 李林娟,邓鹏鑫. 三峡工程运行前后长江中游河段水质变化模拟[J]. 人民长江,2018,49(22):51-56.
- [2] 左婕. 三峡工程建设对洞庭湖区生态环境的影响[D]. 长沙:湖南师范大学,2012.
- [3] 方子云,谭培伦. 为改善生态环境进行水库调度的初步研究[J]. 人民长江,1984(6):65-67.
- [4] 张永勇,夏军,翟晓燕. 闸坝的水文水环境效应及其量化方法探讨[J]. 地理科学进展,2013,32(1):105-113.
- [5] SUH S W, KIM J H, HWANG I T, et al. Water quality simulation on an artificial estuarine lake Shihwaho, Korea [J]. Journal of marine systems, 2004, 45(3-4): 143-58.
- [6] 孙娇娇,逢勇,尤佳艺. 退圩还湖工程对固城湖取水口的溢油影响[J]. 水电能源科学,2020,38(11):40-44.
- [7] 钱程,逢勇,瞿一清,等. 基于洪泽湖(泗洪片区)国考断面超标的入湖河流污染源影响权重分析[J]. 水电能源科学,2020,38(10):21-24.

果表明,无论是外绝缘硅橡胶筒或内绝缘电容芯子发生损伤,特高压直流穿墙套管的基础特征频率均发生了明显的改变。

b. 在特高压直流穿墙套管运行监测中可收集其振动信号,然后基于数据实时分析对应的基础特征频率,从而判定套管是否发生故障。

参考文献:

- [1] 刘杉,宋胜利,卢理成,等. ±800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术, 2019,45(9):2928-2935.
- [2] 兰贞波,宋友,邓建钢,等. 我国特高压交直流套管研究现状[J]. 电瓷避雷器,2021(2):1-6,14.
- [3] 张启浩,吴德贯,马正霖. ±800 kV 特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法[J]. 高压电器,2019,55(4):239-244.
- [4] 周晔,魏俊梅. 1100 kV 硅橡胶套管绝缘结构优化设

- 计[J]. 电气制造,2010(10):72-74.
- [5] 张晋寅,杨旭,邓军,潘志城. ±800 kV 柔性直流穿墙套管温升特性研究[J]. 变压器,2021,58(12):38-41,45,77.
- [6] 黎斌,王日新,于欣,等. 超/特高压直流套管的研发新思路——±800 kV 电容式复合绝缘穿墙套管结构设计的探讨[J]. 高压电器,2021,57(7):1-11,17.
- [7] 狄谦,刘之方,李国富. 550 kV SF6 气体绝缘组合电器套管研制[J]. 中国电力,2010,43(10):16-19.
- [8] WU J R, LI Q S. Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements[J]. Engineering structures, 2004, 26(7): 979-990.
- [9] QIN Q, LI H B, QIAN L Z, et al. Modal identification of Tsing Ma bridge by using improved eigensystem realization algorithm [J]. Journal of sound and vibration, 2001, 247(2): 325-341.

Research on Vibration Monitoring on Ultra-voltage DC Wall Bushing

ZHANG Jin-yin¹, CHEN Xiao-dong², XIE Zhi-cheng¹, ZANG Chun-yan³,
WANG Ting-ting², YU Jie², ZHANG Song³, LIU Zhi²

(1. Overhaul Test Center of China Southern Power Grid Corporation EHV Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. Xi'an XD High Voltage Bushing Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. School of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: UHV DC wall bushing is the neck-jamming technology of China's power grid. At present, not only its core design and manufacturing technology still have many difficulties to be overcome, but also the state monitoring technology of its equipment operation is also a hot issue. This paper explores the application of an on-line monitoring technology based on vibration signals in UHV DC wall bushings. On the basis of analyzing the structure and common faults of UHV DC wall bushings, theoretical simulation research is carried out. It is found that when the outdoor insulation or inner insulation of the UHV DC wall bushing is damaged, the fundamental characteristic frequency of the bushing changes significantly. Afterwards, this paper carried out fault simulation and vibration tests on the cracking of capacitor core and the rupture of silicone rubber shed of the 800 kV UHV DC wall bushing. The results show that the fundamental characteristic frequencies of the bushing under different fault conditions are quite different. Therefore, the use of vibration monitoring technology can effectively identify the faults of UHV DC wall bushings, which can provide technical reference for UHV engineering construction and operation and maintenance personnel.

Key words: UHV DC wall bushing; outdoor insulation; inner insulation; vibration method; characteristic frequency

(上接第 62 页)

Study on Adverse Impact of River Blocking Project on Water Environment and Optimal Operation of the Project

PANG Min^{1a}, ZHANG Peng², YOU Jia-yi^{1b}, ZHANG Qian^{1b}, CHEN Zhi-qi³

(1a. College of Hydrology and Water Resources; 1b. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Jiangsu Academy of Environmental Industry and Technology Corp, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to improve the water environment carrying capacity of Nanchang during the dry period, this paper constructed a water environment model at the lower end of the Ganjiang River and proposed an optimal scheduling scheme. The results show that the optimal scheduling water levels for the Ganjiang main river and its four downstream branches—the main, the north, the middle, and the south—were between the minimum ecological water level and the alert control water level, and that the scheduling time was within 1.11 days when the flow rate was less than 1 020 m³/s. Conversely, when the flow rate was greater than 1 020 m³/s, the alert control water level was the flood control limit water level. The optimal scheduling water levels of the main river and the four branches were between the minimum ecological water level and the flood control limit water level, and the scheduling time was within 4-7 d. It was suggested that each branch barrage hub should be operated close to the alert control water level to ensure that the water quality of the river control section meet the standard, and to maintained the maximum amount of water resources available in Nanchang.

Key words: lower reaches of Ganjiang River; water environmental model; river junction; optimal scheduling