

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221563

基于负荷最优分配表的大型水电站站内经济运行研究

高 英¹, 徐 伟¹, 王燕玲², 闻 昕²

(1. 贵州乌江水电开发有限责任公司水电站远程集控中心, 贵州 贵阳 550002;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对水电站调度运行面临的大容量、大机组、机组不规则多限制区控制等新的调度特点和更为复杂的运行需求, 以电站安全、稳定、经济运行为目标, 建立站内经济运行模型, 实现水电站在各运行工况下机组间负荷的最优分配。分析了不同水头下各机组的最优出力范围, 研究了电站负荷优化分配规则, 建立了站内经济运行模型。在站内经济运行模型的基础上设计负荷最优分配表, 提出不同负荷、不同水头、不同开停机组合下, 电站的负荷最优分配成果表, 以指导电站站内经济运行实时调度。在洪家渡电站的应用表明, 优化模型能根据实时负荷指令, 合理安排机组启停次序、开机台数, 并实时给出机组的启停机建议。能够获得各工况下机组的最优负荷分配组合, 降低月平均耗水率 0.18%, 减少机组频繁启停、频繁穿越振动区等不利工况 9.5%, 保证机组高效运行, 提高电站经济效益。

关键词: 站内经济运行; 实时调度; 最优负荷分配; 不利工况; 并行动态规划

中图分类号: F426.2; [TV-9]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0197-05

1 引言

水电站厂内经济运行作为水电站经济运行方式的一种, 具有成本低、效益高的优点, 是实现水能资源优化利用的最佳方法之一^[1]。但目前厂内采用的自动发电控制系统(AGC)仅以耗水量为优化目标, 忽略了电站的发电效益; 此外, 平均分配负荷的方式未考虑各机组实际运行工况的差异, 极大限制了电站的经济运行效益。新时期的水电站调度呈现出大容量、大机组、机组不规则多限制区控制等新的调度特点, 需综合考虑电站耗水量、发电效益等目标^[2], 同时还要满足调度的实时性需要。加之近年来电力系统规模扩大、风光能源大规模接入及电力市场改革的不断深化推进, 水电系统规模、运行条件和水电协调关系等发生了重大改变^[3,4], 建立科学合理的经济运行模型、开发复杂多维问题的高效求解算法, 是对电站经济安全运行提出的更新、更高要求^[5,6]。另一方面, 新能源具有的波动性、不确定性和间歇性^[7], 给电力系统的稳定运行带来较大冲击, 导致电网对水电站负荷需求存在不确定性, 从而影响

水电站经济运行优化计算的精确性、时效性, 在一定程度上加剧了经济运行难度, 亦对水电站经济运行提出了更高的要求, 因此需要制定出更加合理、实用的优化策略来满足水电系统稳定、安全、经济运行等要求。近年来, 围绕水电站经济运行调度已展开了广泛研究^[8-10], 基于此, 本文统筹考虑电站的耗水流量和机组不利工况, 构建厂内经济运行模型, 并采用并行动态规划算法进行求解, 得到厂内经济运行负荷最优分配表, 旨在为厂内实时经济运行提供决策支撑, 提升水资源综合利用效率, 增加电站经济效益, 提高电站运行安全度, 实现电站实时最优运行。

2 站内经济运行模型

水电站厂内经济运行的基本任务是根据电站及机组特性, 在满足安全生产及电网负荷的要求下, 以全厂耗水量最小等为目标, 确定厂内工作机组最优台数、组合, 并将负荷在机组间实现优化分配, 从而降低电站的发电成本, 保证其经济效益。

2.1 目标函数

根据电网的负荷要求, 以耗水量最小和机组

收稿日期: 2022-07-29, 修回日期: 2022-08-26

作者简介: 高英(1978-), 女, 硕士、高级工程师, 研究方向为梯级水电站水库调度, E-mail: 807639149@qq.com

通讯作者: 闻昕(1987-), 男, 教授、硕导, 研究方向为水利水电系统调度运行、水风光储多能互补、智慧水利, E-mail:

运行工况最少为目标,合理安排机组组合和机组间的负荷分配。即:

$$Q_t = \sum_{i=1, t \in K}^n X_{i,t} Q_{i,t}(N_{i,t}, H_t) + q_{1,i} Q_{cfzd} + q_{2,i} Q_{cfqt} \quad (1)$$

式中, Q_t 为时段 t 的发电耗水; n 为机组台数; K 为由于故障或机组检修等原因,不参与经济运行的机组编号集合; $Q(N_i, H)$ 为机组 i 在水头为 H 、出力为 N_i 时所需的发电流量, Q_{cfzd} 、 Q_{cfqt} 分别为机组 i 在水头为 H 、出力为 N_i 时的振动区惩罚流量和启停惩罚流量; $q_{1,i}$ 、 $q_{2,i}$ 分别为振动区惩罚流量和启停惩罚流量对应的惩罚流量系数; $X_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的开机状态,开机取 1,停机取 0; $Q_{i,t}(N_{i,t}, H_t)$ 为水头为 H_t 时第 i 台机组承担负荷 $N_{i,t}$ 的耗水流量,可由机组的 NHQ 曲线查得。

2.2 约束条件

约束条件包括负荷平衡、振动区、机组出力、水量平衡、下游水位流量关系、库容、流量等。

(1)单站负荷平衡约束。其约束公式为:

$$N = \sum_{i=1}^n N_{i,t} \quad (2)$$

式中, N 为电站所承担的电网负荷任务; $N_{i,t}$ 为第 i 台机组承担负荷。

(2)振动区约束。机组振动区首先假设第 i 台机组在某水头下存在 j 个振动区,则机组避开振动区的出力范围可表示为:

$$\begin{cases} N_{i,t}^{\min} \leq N_{i,t} \leq N_{i,j,t}^L \\ N_{i,j,t}^H \leq N_{i,t} \leq N_{i,j+1,t}^L \\ N_{i,j,t}^H \leq N_{i,t} \leq N_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $N_{i,t}^{\max}$ 、 $N_{i,t}^{\min}$ 分别为第 i 台机组在 t 时段水头的最大、最小出力; $N_{i,j,t}^H$ 、 $N_{i,j,t}^L$ 分别为第 i 台机组在 t 时段第 j 个振动区上限、下限出力。

(3)机组出力约束。其约束公式为:

$$N_i = N(H_i, Q_i) \quad (4)$$

式中, N_i 为第 i 台机组的发电功率; H_i 为第 i 台机组的工作水头; Q_i 为第 i 台机组的发电流量。

(4)库容曲线约束。其约束公式为:

$$Z_{t+1} = f_{zv}[V(t+1)] \quad (5)$$

式中, Z_{t+1} 为 t 时段末水库上游水位; $f_{zv}(\ast)$ 为库容曲线函数。

(5)水库水量平衡方程。其约束公式为:

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t)\Delta t \quad (6)$$

式中, V_t 、 V_{t+1} 分别为电站在 t 时段始末蓄水量; I_t 、 Q_t 分别为电站在第 t 时段入库流量、发电用水量,暂不考虑弃水。

(6)下游水位流量关系约束。其约束公式为:

$$Z_{xy,t} = f_{zq}[Q_{ck,t}] \quad (7)$$

式中, $Z_{xy,t}$ 为 t 时段下游平均水位, m ; $Q_{ck,t}$ 为 t 时段平均出库流量; $f_{zq}(\ast)$ 为下游水位流量关系函数。

(7)水库库容约束。其约束公式为:

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad (8)$$

式中, V_{\min} 、 V_{\max} 分别为 t 时段允许的水库最小、最大蓄水量。

(8)出库流量范围约束。其约束公式为:

$$Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max} \quad (9)$$

式中, Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别为下泄流量最小、最大值。

(9)运行水头约束。其约束公式为:

$$H_{\min} \leq H_{yr,t} \leq H_{\max} \quad (10)$$

式中, H_{\min} 、 H_{\max} 分别为运行水头最小、最大值。

(10)上游水位约束。其约束公式为:

$$H_{up,\min} \leq H_{up,t} \leq H_{up,\max} \quad (11)$$

式中, $H_{up,\min}$ 、 $H_{up,\max}$ 分别为水库上游水位最小、最大值; $H_{up,t}$ 为 t 时段末上游水位。

(11)最小启停约束。其约束公式为:

$$t_{i,n,on} \geq T_{i,n,on} \quad (12)$$

$$t_{i,n,off} \geq T_{i,n,off} \quad (13)$$

式中, $t_{i,n,on}$ 、 $t_{i,n,off}$ 分别为 n 机组开停机持续时间; $T_{i,n,on}$ 、 $T_{i,n,off}$ 分别为 n 机组最小开停机时间约束。

3 并行动态规划算法

厂内经济运行是一个复杂的高维、非凸、离散、非线性、多约束问题,不仅要满足电网、电站和机组层面的水位、流量、出力等硬性约束,还需要兼顾规避机组出力振动区的任务。此外,调度的实时性对模型的求解方法也提出了更高的要求,因此寻求一种经济、安全、实时的求解方法具有重要意义。为了兼顾计算结果的精度及求解效率,在动态规划算法的基础上引入并行策略,提出并行动态规划算法对模型进行求解。并行计算是将求解问题尽量分解成相互独立的子任务,分配给不同处理单元,各自独立计算的时间重叠实现各子问题的并行处理,再将各子任务的处理结果汇总得到整个问题解。

3.1 最优负荷分配表

在同一水头下,同一负荷在同一机组组合分配是一个独立的过程。为实现不同负荷分配的水头、负荷、机组组合重叠,可以并行计算所有的负荷分配情况,从而快速算出最优负荷分配。求解

步骤如下。

步骤 1 根据不同水头确定电站的不同出力范围及所有允许的机组启停组合。

步骤 2 固定水头,设置 1 MW 为一个步长,根据出力范围生成负荷离散点,确定机组启停安排。

步骤 3 以耗水量最小为目标,采用并行动态规划算法对确定机组组合安排下所有负荷分配遍历搜索。

步骤 4 比较所有分配方案的耗水量,获得最优的负荷分配方案。

3.2 厂内经济运行实时调度

负荷动态分配、避免机组频繁启停及躲避振动区的主要策略为:①当电站状态更新后,根据预见期内各时段的电站总负荷确定各时段所有的可行机组启停情况,再在负荷分配总表中查找当前水头及当前总负荷下所有可行的机组出力组合情况。将预见期内各时段的机组分配情况进行排列组合形成数个预见期内的负荷分配方案。②根据上一时段的出力分配情况及各负荷分配方案内的机组出力组合确定预见期内的机组耗水量、穿越振动区惩罚流量及启停机惩罚流量,汇总后确定各预见期内负荷分配方案的总流量,选择流量最小的分配方案。该方案可有效避免机组频繁穿越振动区或频繁启停机。

4 案例研究

4.1 工程概况

洪家渡水电站坝址以上集水面积 9 900 km²,坝址多年平均流量 144 m³/s,多年平均径流量 45.4×10⁸ m³。洪家渡水库正常蓄水位 1 140 m,死水位 1 076 m,共 3 台机组,装机容量为 600 MW(3×200 MW),电站工作水头为 90~164 m,保证出力 159.1 MW,水库正常蓄水位 1 140 m,校核洪水位时最大下泄流量为 6 234 m³/s。

4.2 电站站内负荷分配总表

洪家渡电站共有 3 台机组,则机组组合的方式有(2³-1)种,定义组合方式的序号为 1~7。其中序号 1 转化为二进制为“001”,代表# 1、# 2 机组停机、# 3 机组开机;序号 7 转化为二进制位“111”代表 3 台机组全开机。遍历所有可行的机组组合,将洪家渡电站最小运行水头至最大运行水头的范围按 1 m 为离散步长,负荷从空载至机组最大出力限制以 1 MW 为离散步长,得到不同水头、不同负荷工况下电站所有可行的机组组合及对应的最优分配方案,由此制定电站最优负荷

分配表。以 117 m 水头为例,洪家渡电站在不同开机组合最优负荷分配结果见表 1。

表 1 洪家渡电站 117 m 水头下最优负荷分配总表(部分)
Tab. 1 Summary of optimal load distribution under 117 m head of Hongjiadu Hydropower Station (part)

负荷 /MW	组合	机组 1 /MW	机组 2 /MW	机组 3 /MW	发电流量 / (m ³ ·s ⁻¹)
150	001	0	0	150	141.00
	010	0	150	0	141.00
	100	150	0	0	141.00
300	111	63	56	31	187.10
	011	0	162	138	278.52
	101	162	0	138	278.52
	110	162	138	0	278.52
450	111	130	130	40	304.25
	111	162	158	130	417.00

对洪家渡电站静态最优负荷分配表进行分析,结果表明:①在 117 m 水头下,电站总出力为 300 MW,按等微增率原则平均分配时,总发电流量为 282 m³/s,而按表 1 中分配时,总发电流量为 278.52 m³/s,所以该表所示的分配方案较等微增率方法耗水量有所降低,经济效益较好。②在一定水头下,3 台机组在相同出力时耗水量相同。如 117 m 水头下,当单台机组负荷为 150 MW,3 台机组的耗水量均为 141 m³/s。③在负荷较大的情况下,遇到可以开 2 台机组也可以开 3 台机组时,开 2 台机组的耗水量较小,如在 117 m 水头下,当电站总负荷为 300 MW 时,开 2 台机组的耗水量为 278.5 m³/s,开三台机组的耗水量为 304.25 m³/s。

4.3 负荷分配表应用效果分析

以 2021 年 12 月为研究时段,利用电站最优负荷分配表模拟电站实际运行过程,优化机组启停组合及负荷分配策略,并与实际运行过程进行对比分析,见图 1~3(以 12 月 1 日为例)。

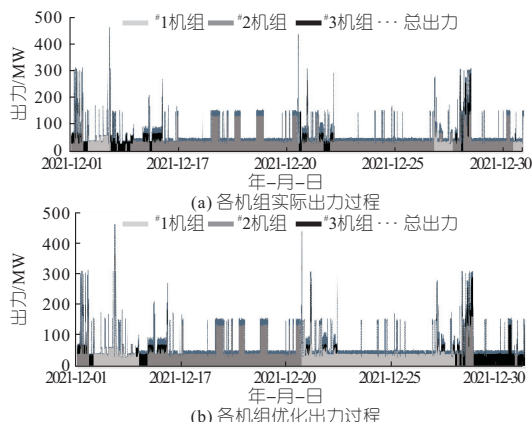


图 1 2021 年 12 月洪家渡电站各机组优化前后出力过程
Fig. 1 Output process before and after optimization of each unit of Hongjiadu Hydropower Station in December, 2021

(1)发电流量。2021 年 12 月,洪家渡电站发电流量分布在 0~440 m³/s 之间,下游水位主要在 976~980 m 之间波动。在实际运行中,平均

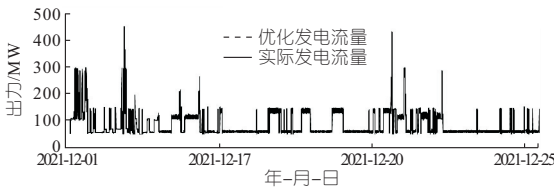
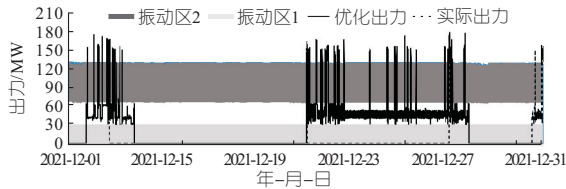
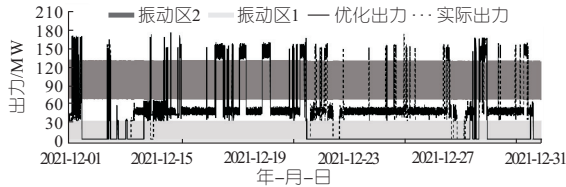


图 2 2021 年 12 月洪家渡电站优化前后发电流量对比

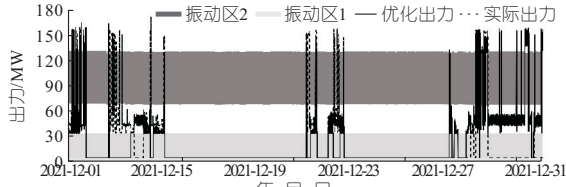
Fig. 2 Comparison of power generation flow before and after optimization of Hongjiadu Hydropower Station in December, 2021



(b) 1 机组优化前后出力变化及振动区示意图



(c) 2 机组优化前后出力变化及振动区示意图



(d) 3 机组优化前后出力变化及振动区示意图

图 3 2021 年 12 月洪家渡电站各机组优化前后出力变化及振动区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of output change and vibration zone before and after optimization of each unit of Hongjiadu Hydropower Station in December 2021

发电流量为 $80.76 \text{ m}^3/\text{s}$; 经过优化, 电站平均发电流量为 $80.63 \text{ m}^3/\text{s}$, 降低了 0.16% , 见表 2。

表 2 2021 年 12 月洪家渡电站优化前后耗水率及流量对比
Tab. 2 Comparison of water consumption rate and flow before and after optimization of Hongjiadu Hydropower Station in December 2021

指 标	模型优化	实际运行
发电流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	80.630	80.760
耗水量/ 10^8 m^3	2.159	2.163
耗水率/ $(\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	4.445	4.453

(2) 耗水率。洪家渡电站 2021 年 12 月实际运行过程中平均耗水率为 $4.453 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 优化后平均耗水率为 $4.445 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 降低了 0.18% 。见表 2。

(3) 不利工况。在实际运行中, 电站穿越振动区 43 次, 优化后同样为 43 次; 在实际运行中, 机组穿越振动区次数为 337 次, 优化后为 305 次, 降

低了 9.5% , 有效减少了机组的振动磨损, 保障机组的安全运行, 见表 3。

表 3 2021 年 12 月洪家渡电站优化前后不利工况对比表
Tab. 3 Comparison of adverse conditions before and after optimization of Hongjiadu Hydropower Station in December, 2021

机组	启停次数		穿越振动区次数		
	模型优化	实际运行	机组	模型优化	实际运行
# 1	4	7	# 1	124	50
# 2	16	21	# 2	92	176
# 3	23	15	# 3	89	111
合计	43	43	合计	305	337

5 结 论

a. 针对大型水电站枯水期经济运行实时调度难题, 构建了兼顾耗水率和运行工况为目标的厂内经济运行模型, 提出了不同负荷、不同水头、不同开停机组合下的最优负荷分配成果表, 指导电站厂内经济实时运行, 实现了电站运行效益最优化。

b. 以 2021 年 12 月调度运行为例, 通过模型模拟计算洪家渡电站的耗水量与机组运行情况, 与实际运行过程进行对比, 耗水率降低了 0.18% , 机组运行的不利工况有效减少了 9.5% 。

参 考 文 献:

- [1] 陆王琳, 陆启亮, 张志洪. 碳中和背景下综合智慧能源发展趋势[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1): 10-18.
- [2] 何飞飞. 不确定性负荷, 径流预测及其在水库优化调度中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [3] 周建平. 中国可再生能源发展增量几何[J]. 能源, 2020(1): 53-57.
- [4] 周建平, 杜效鹤, 周兴波. 全球水电开发现状及未来趋势[J]. 中国电业, 2020(7): 26-29.
- [5] 刘瑞, 王义民, 畅建霞, 等. 考虑分级振动区的水电站厂内经济运行研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 63-71.
- [6] 刘国富, 楼其禄, 陈海荣. 紧水滩水电站厂内经济运行分析[J]. 水电站机电技术, 2017, 40(11): 56-58.
- [7] 邵倩文, 姚璐, 谢威, 等. 多虚拟电厂接入的主动配电系统优化经济调度[J]. 电力大数据, 2020, 23(4): 62-70.
- [8] 马光文, 刘金焕, 李菊根. 流域梯级水电站群联合优化运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [9] 杨塋, 杨侃, 华萍, 等. 基于改进鲸鱼算法的三峡水电站经济运行模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 46-49.
- [10] 沈圣, 黄炜斌, 李基栋, 等. 巨型水电站厂内负荷准实时优化分配模型研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 162-165.

Study on Internal Economic Operation of Large Hydropower Station Based on Load Optimal Distribution Table

GAO Ying¹, XU Wei¹, WANG Yan-ling², WEN Xin²

(1. Hydropower Station Remote Centralized Control Center of Guizhou Wuyang Hydropower Development, Guiyang 550002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Dispatching operation of hydropower station is in face of the large capacity and large units, unit control new scheduling features such as irregular more limits and more complicated operation requirements. To aim at power station safe, stable and economic operation, a model of economic operation inside the station was established to realize optimal load distribution of hydropower station units under various operation conditions. The optimal output range of each unit under different head was analyzed. The optimal load distribution rule of the power station was studied, and the economic operation model of the station was established. Based on the economic operation model of the station, the optimal load distribution table was designed. The optimal load distribution result table of the power station under different loads, different heads, and different unit commitment was proposed to guide the real-time economic scheduling of the power station. Taking Hongjiadu station as an example, the results show that the model can reasonably arrange the start-stop sequence and number of units according to the real-time load instruction, and give real-time start-stop suggestions of units. It can obtain the optimal load distribution combination of the proposed unit under various working conditions, reduce the monthly average water consumption rate by 0.18%, reduce the adverse working conditions such as frequent start-stop and frequent crossing of the vibration zone by 9.5%, ensure the efficiency of the unit operation, and improve the economic benefits of the power station.

Key words: station economic operation; real time scheduling; optimal load distribution; adverse conditions; parallel dynamic programming

(上接第 113 页)

Research on Anti-scouring Characteristics Based on Ecological Slope Protection Jet Test

ZHANG Shi-an¹, LIU Ming-xiao², ZHEN Ying-hong³, LIU Ke⁴

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power,

Zhengzhou 450046, China; 3. School of Architectural Engineering, Kaili University, Kaili 556011, China;

4. River and Reservoir Work Center of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: The mechanical effect of plant roots on soil is an important factor in improving the erosion resistance of slopes, and the relevant research on the impact resistance of plant roots under water flow at home and abroad is in a blank spot. In this paper, the common soil and water conservation plants tall fescue and dogtooth roots were selected as the research objects, and the jet erosion test was carried out on the slope of the plant model, and the erosion failure mechanism of the root slope of different species of plants was compared. The main conclusions are as follows: the variation law of the average erosion depth ΔD_{AE} of high fescue slope, dogtooth root slope and plain soil slope under different working conditions is similar and consistent, and it increases exponentially as a function with the increase of erosion flow velocity and linear function with the increase of erosion angle. The average erosion depth under various working conditions was generally as follows: high fescue < dog tooth root < plain soil; The average erosion depth of high fescue at each flow rate decreased slightly ΔD_{AE} slightly greater than that of dog tooth root. When the scouring angle was fixed, the ΔD_{AE} of each angle was the largest when the flow rate was 1.6 m/s, and the flow rate was higher than 1.6 m/s, and gradually decreased. When the erosion flow rate is constant, there is a decreasing tendency ΔD_{AE} increase with the increase of the scouring angle.

Key words: plant slope protection; model test; water erosion; anti-scour performance

(上接第 122 页)

Structural Safety Analysis and Design Method for Different Types of Tunnel Plug of Large Diversion Tunnel

YAN Shuang-hong¹, ZHANG Lian², QI Zu-fang¹, CUI Jin-peng¹, ZHANG Yu-ting²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,

Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The diversion tunnel plug is a key project for the safety of water conservancy and hydropower projects. Wedge-shaped plugs are widely used in engineering. There are many calculation methods for columnar plug, but not so much for the wedge-shaped plug. Based on the design scheme of the diversion tunnel plug in Karot power station, this paper carried out the theoretical and numerical simulation analysis. Through the force analysis of the wedge, the calculation method of the hydraulic pressure bearing capacity of the wedge-shaped plug was proposed. The comparative analysis of wedge and columnar plug safety was carried out by three-dimensional elastoplastic numerical simulation. The result shows that the maximum deformation under the calibration water level of the wedge-shaped plug was 0.8 mm, and its overload safety factor was 1.08 times that of the columnar plug. By comparing the numerical simulation with the formula calculation results, the rationality and accuracy of the calculation method for the bearing capacity of the wedge-shaped plug were verified. The research results have important guiding value for the design of wedge-shaped block.

Key words: diversion tunnel; tunnel plug; wedge-shaped plug; columnar plug; numerical simulation