

湖北省蕲春抽水蓄能电站输水发电系统比选

钟信林, 郑争锋, 张晓健, 周浩, 张永昌

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司勘测工程公司, 武汉 430071)

摘要: 为研究蕲春抽水蓄能电站输水发电系统工程地质条件稳定性, 选取最优方案, 在工程区开展工程地质测绘、高密度电法、地应力试验, 定性和定量描述工程区地质条件, 并结合岩土应力状态分析多方案输水发电系统的优劣性。结果表明, 3条断裂降低了西线方案的工程地质稳定性, 因而选取东线方案。此外, 中部式和尾部式地下厂房地应力条件均满足工程地质和水文地质要求, 但中部式厂房地应力分布更加均匀, 且无断裂制约地质稳定性, 因而选取更优的中部式厂房方案。

关键词: 抽水蓄能电站; 输水发电系统; 地应力试验

中图分类号: X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)11-0054-07

随着社会经济快速发展, 能源需求日益攀升, 如何实现能源的可持续供应与环境保护的和谐共生成为全球性的挑战^[1-2]。在该背景下, 清洁能源的开发利用就显得非常重要, 其中抽水蓄能电站是成熟的、高效的储能技术, 在调节电网供需矛盾和绿色转型上具有重要意义^[3-5]。

抽水蓄能电站的建设和运营并非易事, 其选址、设计及安全运行都高度依赖于详尽精确的岩土工程勘察。岩土工程勘察作为工程地质学的一个重要分支, 旨在通过现场勘探、实验室测试以及理论分析等手段, 全面评估建设场地的地质结构、岩土性质及其稳定性, 为工程设计、施工方案制定及安全评估提供科学依据。对于抽水蓄能电站而言, 由于其特殊的运行机制涉及大规模的水体转移和高压环境, 对地基稳定性和边坡安全性有极高的要求, 因此, 岩土工程勘察的意义尤为凸显^[6-8]。不同的地理位置、地质条件、施工难度和运维成本等因素会影响电站的储能效率、安全性和运营成本。通过多方案比选, 可以选择出最优的地下厂房建设方案, 从而确保抽水蓄能电站能够高效、稳定、安全地运行, 为电力系统提供可靠的储能和调节能力。因此输水发电系统比选是抽水蓄能电站建设的重要环节^[9-10]。

基于此, 结合湖北省蕲春花园抽水蓄能电站项目, 从岩土工程地质的角度出发, 结合地应力成果分析, 系统阐述、分析输水发电系统比选研究, 旨在说明地质构造、地震、岩土工程特征如何影响输水发电系统的布置, 以期对相似抽水蓄能电站枢纽布置中输水发电系统比选提供参考。

1 研究区概况

蕲春花园抽水蓄能电站位于湖北省黄冈市境内, 距离武汉市约 130 km, 由上水库、输水线路、地下厂房、下游已建花园水库等组成。厂内安装 4 台单机容量 300 MW 的立轴单级混流可逆式水泵水轮机, 总装机容量 1 200 MW。该区域位于武鄂黄黄城市圈, 气候温暖湿润。电站建成后将承担湖北省电网调峰、填谷、储能、调频、调相、紧急事故备用等任务。比选阶段共两个选址分别为邓河村选址、赤藤港选址。

邓河村选址上水库位于蕲春县东北部狮子镇邓河村。邓河村上水库库区河谷宽阔, 为北、西、东三面环山的库盆, 具备天然库盆地形条件。大坝修筑于库区东侧拦沟成库, 大坝采用混凝土面板堆石坝, 最大坝高 69 m, 正常蓄水位 502.00 m(1985 国家高程基准, 下同), 死水位 460.00 m, 调节库容 1 647万 m³。库盆采用钢筋混凝土面板/塑性混凝

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 湖北蕲春花园抽水蓄能电站工程项目(AA00061K)

作者简介: 钟信林(1993—), 男, 湖北咸宁人, 博士, 工程师, 研究方向为地球化学、新能源发电; 郑争锋(1983—), 男, 湖北咸宁人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为火力发电、新能源发电; 张晓健(1979—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为建筑科学、地质学; 周浩(1995—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 工程师, 研究方向为地质灾害、新能源发电; 张永昌(1980—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水电勘测。

土防渗墙+垂直帷幕局部防渗形式,设置竖井式泄洪(兼导流)洞。输水线路布置在上水库右岸至下水库(花园水库北侧),总体布置方向为SN(南北)向,采用地下厂房布置方案,厂内安装4台单机容量300 MW的立轴单级混流可逆式水泵水轮机,总装机容量1 200 MW,单机最大发电引用流量 $91.95 \text{ m}^3/\text{s}$ 。电站引水系统采用两洞四机,尾水系统采用四机两洞布置,输水系统主要由上水库进/出水口、引水隧洞、尾水隧洞、尾水闸门室、尾水调压室以及下水库进/出水口等建筑物组成。上下水库进/出水口水平距离为2 153 m,距高比5.6。

下水库利用已建的花园水库。花园水库是一座以灌溉、防洪为主,兼顾发电、养殖等综合利用的大(2)型水利枢纽工程。

2 试验方法与分析

2.1 调查方法

为完成湖北蕲春抽水蓄能电站输水发电系统比选,采用的勘查方法包括小口径钻探钻孔、高密度电法、EH-4大地电磁法、岩土物理力学试验、地应力测试等。多方法的结合可以有效、详细地获取比选区域地质条件,为比选提供更准确的工程地质条件。

2.2 试验方法

水压致裂法地应力测试方法遵循《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2016)、《水电水利工程岩体应力测试规程》(DL/T 5367—2007)、《水电工程钻孔压水试验规程》(NB/T 35113—2018)和《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)。

水力劈裂试验步骤如下。

(1)确定压裂段。根据钻孔地质资料和合同要求选择压裂段。

(2)座封。采用两个可膨胀的特制橡胶封隔器,通过钻杆将其放置到选定的裂隙段,加压使封隔器膨胀座封于孔壁上,形成承压空间(压裂段长4 m)。

(3)注水加压。通过钻杆和液压泵对压裂段注水、分级加压(压力增量为1.0 MPa),裂隙面承受逐渐增强的水压作用。每级压力下持续加压足够时间(一般3 min左右)以使流量稳定至恒定流态。

(4)裂隙重张。当水压上升到某一临界压力时,流量急剧增加使裂隙面重张之后,再加1~3级压力或达到最大流量,重复步骤(3)。

(5)关泵。关闭压力泵后,泵压迅速下降,水渗入岩体中的速度缓慢下降。

(6)解封。压裂完毕后,使封隔器内液体通过钻杆排出,此时封隔器恢复原状,即封隔器解封。

3 研究区工程地质条件

3.1 地形地貌

邓河村库址位于湖北省黄冈市蕲春县狮子镇花园水库北侧的长林村到邓河村一带。工程区属于大别山脉蕲北山区,为中低山地貌,山脉总体呈北西向展布,西北高,东南低(图1)。工程区最高点位于西北部的孙垅水库附近的大王山,山顶高程930 m左右,工程区最低点为已建的花园水库地段,水库水面高程约86 m,最大高差约844 m。

3.2 地层岩性

工程区出露第四系覆盖层主要有冲洪积层(Q^{pal})、残坡积层(Q^{edl})、崩坡积层($Q^{\text{col+dl}}$)及人工堆

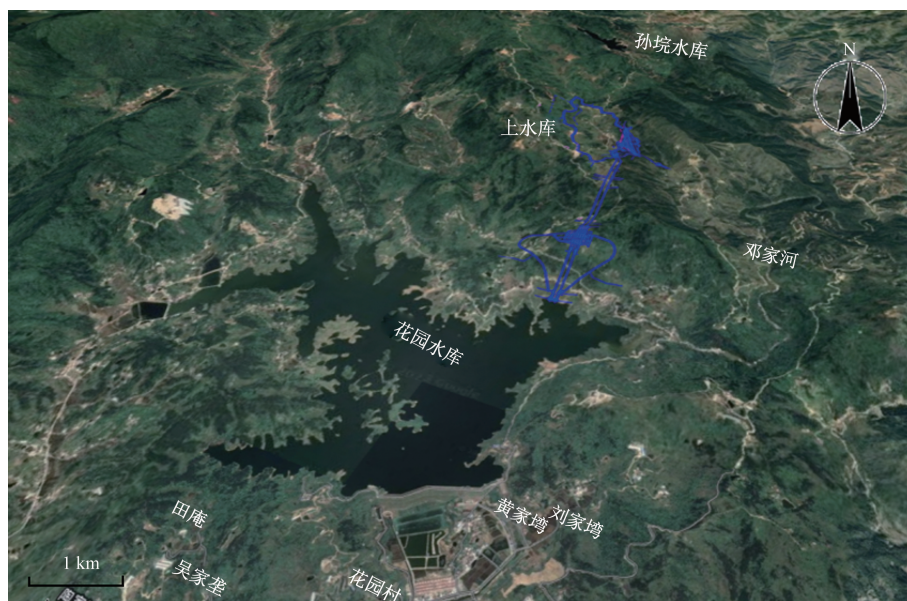


图1 邓河村库址地形地貌图

积层(Q^s)。下伏基岩地层为太古界大别群麻桥组上段(Arm²)斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩,局部夹黑云角闪斜长片麻岩及燕山期晚期(η_5^3)二长花岗岩、花岗闪长岩等,岩体中多见片麻岩捕虏体,呈脉状、条带状及团块状展布。岩脉零星分布,主要有花岗岩脉(γ)、伟晶岩脉(ρ)、正长岩脉(ξ)、斑状花岗闪长岩脉($\pi\gamma\delta$),以花岗岩脉分布较为广泛。

3.3 地质构造

工程区断裂构造有断层及节理裂隙等。在工程区发育 2 条北西向区域断裂,分别为年鱼地断层和夏家坞断层,工程区内断层构造明细见表 1。

3.4 岩体风化程度

工程区岩体风化类型主要为均匀风化型,均匀风化具有明显的垂直分带性,可大体分为全风化带、强风化带、弱风化带、微新岩体,局部可见球状风化或囊状风化。各风化的主要地质特征、各风化带地表典型照片如图 2 所示。

岩体风化主要受地形、岩性及构造等因素影响,出露的岩性以垂直风化为主,山脊地带风化更深,河床段全、强风化岩体多被河水冲刷搬运,表部揭露基岩即为弱风化岩体。

根据地质测绘及钻孔成果,工程区内全风化带岩体一般厚度 3~12 m;强风化层一般厚度 2~10 m;缓坡及斜坡地带弱风化层厚度一般为 2~15 m,陡坡及单薄山脊地带弱风化层厚度可达 20~25 m。

3.5 水文地质条件

工程区地下水主要有孔隙水和基岩裂隙水,前者赋存于冲洪积层及残坡积层中,后者赋存于岩体的节理裂隙中。地下水补给方式为大气降水补给、

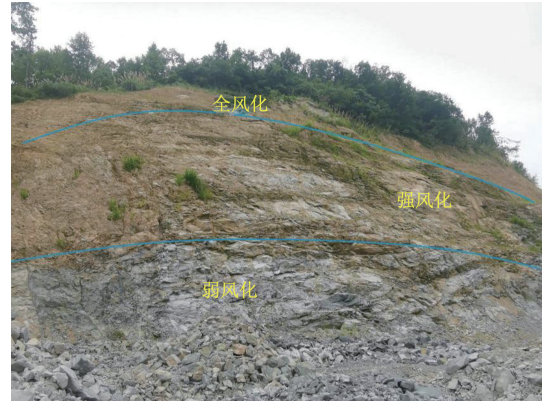


图 2 地表各风化岩体开挖断面

上游地下水补给、河流补给,排泄方式为泉排泄、蒸发排泄、径流排泄。

4 输水发电系统比选分析

输水发电系统主要建筑物包括上水库进/出水口、引水隧洞、主厂房、主变洞、尾闸洞、尾水隧洞、调压井、下水库进/出水口、开关站、出线洞和进场交通洞等。本文拟定了东、西线输水线路两个方案进行比较,其中东线方案布置中部式及尾部式厂房方案比选,比选方案位置如图 3 所示。

4.1 输水发电系统节理裂隙分析

工程区片麻岩地段受构造影响,片麻理产状不稳定,多见片麻理产状走向 60°~75°,倾向南东,倾角 15°~65°。根据地质测绘成果,主要发育 IV、V 级结构面。

通过对钻孔以及平硐内揭露的裂隙进行统计,工程区主要发育 4 组裂隙:L1 走向 335°~355°,倾向南西西,倾角 60°~70°,面平直稍粗;L2 走向 65°~85°,倾向南东,倾角 70°~85°;L3 走向 305°~315°,

表 1 输水发电系统断层特征统计

编号	产状			规模 宽度/m	主要特征	与工程关系
	走向/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)			
f _{断1}	270	180	65	0.5~0.8	出露于强风化岩体中,伴生宽 20 cm 左右云母条带,胶结差	尾水洞尾部
f _{断2}	270	180	21	0.8~1	出露于强风化岩体中,充填岩屑,局部夹长英质脉体,胶结差	
f _{断3}	300	210	75	0.8~1	出露于弱风化岩体中,充填岩屑,胶结差。局部风化加剧,断层带见滴水,100~150 滴/min	
f _{断4}	270	180	60	0.3	胶结差,岩体破碎,局部夹断层泥及岩屑。该断层为微新岩体与弱风化岩体界线,断层南侧为弱风化岩体,断层北侧为微新岩体	
f _{断5}	255	165	76	0.15	出露于微新岩体中,局部夹长英质脉体,胶结较差。	尾水洞中部
f _{断6}	75	345	46	0.2~0.6	出露于微新岩体中,裂隙面充填岩粉及断层泥,部分见绿帘石。顶拱部位见渗滴水	
f _{断7}	310	220	75~80	0.1	出露于微新岩体中,断面见黑云母等充填,局部见渗滴水	
f _{断8}	305	215	63	0.1	断层面见泥质、岩屑等充填,呈张开状,沿断层面见渗流水,流量为 0.5~0.8 L/min,断层两侧 0.5~1.0 m 岩体较破碎,显风化加剧特征	线路尾水段

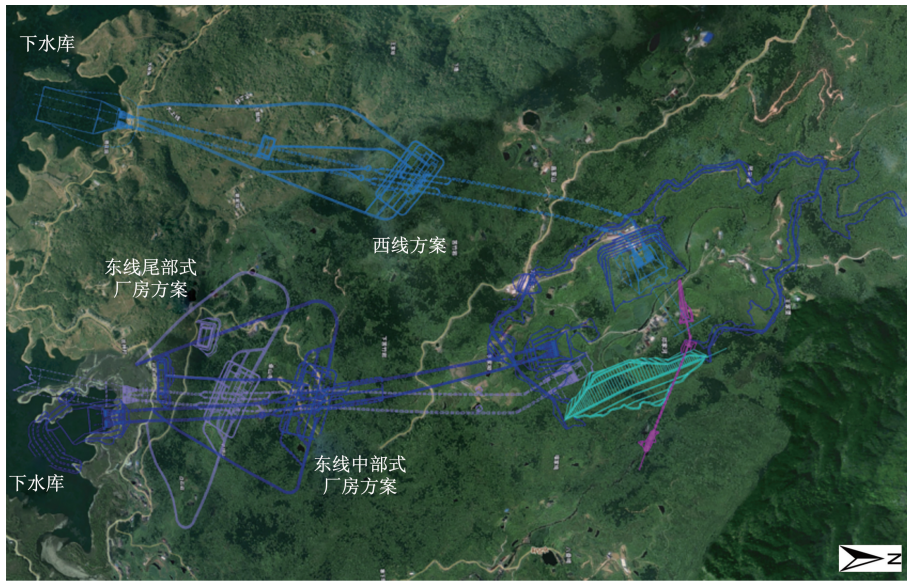


图3 输水发电系统比选平面布置图

倾向北东,倾角 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$,长为 $1 \sim 3$ m,宽 $0.1 \sim 0.5$ cm,间距 $0.2 \sim 0.5$ m,充填岩屑,面平直粗糙; L4 走向 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$,倾向北西(南东),倾角 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$,长为 $1 \sim 2$ m,宽 $0.5 \sim 1$ cm,间距 $0.5 \sim 1$ m,充填岩屑、次生泥,面平直粗糙,裂隙统计成果如图 4 所示。

4.2 输水线路系统工程地质条件比选分析

通过现场勘察、地质测绘及物探解译,绘制出东西两线地质剖面图,如图 5 所示。西线方案全长约为 2 532 m,高程为 $80 \sim 570$ m,坡度一般为 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$,东线方案全长为 2 280 m,高程为 $80^{\circ} \sim 510$ m,坡度一般为 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。东西两线沿线多基岩裸露,为燕山期晚期(η_7)³侵入二长花岗岩、花岗闪长岩及太古界大别群麻桥组上段(A_{r2})片麻岩。东西两线上/下水库进/出水口地形较缓,覆盖层厚度相似,为 $10 \sim 25$ m。东西两线地表水和地下水主要受大气降水补给,地下水主要赋存于裂隙和断层破碎带中;洞室围岩主要为微新岩体,透水性以微透水性为主。洞室开挖后在断层或裂隙发育洞段,可能出现短时间涌水现象。综合评价认为,东西线地形地貌、地层岩性、水文地质条件、上/下水库进/出水口条件基本相似。

此外,西线沿线分布有 F_1 (夏家塆断层)、 f_4 、 f_5 3 条断层,东线沿线分布有 f_1 、 $f_{\text{副}11}$ 2 条断层。并且,西线方案围岩主要为二长花岗岩及片麻岩, F_1 从尾调室附近穿过, f_4 从尾水调压井与尾闸室之间穿过;洞室围岩以 II、III 类为主,局部 IV、V 类;地下厂房埋深 259 m。东线方案中部式围岩主要为二长花岗岩, f_1 从尾闸室附近穿过;尾部式方案主要为花岗闪长岩, $f_{\text{副}11}$ 从地下厂房区穿过;洞室围岩以 II、III 类

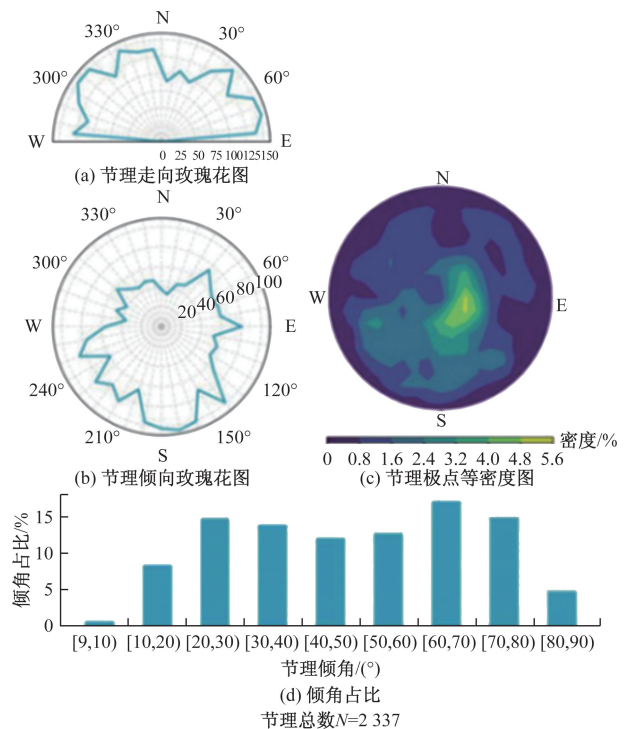


图4 工程区钻孔揭露裂隙统计玫瑰花图

为主,局部 IV、V 类;中部及尾部式地下厂房埋深分别约为 301 m 及 281 m。从稳定性角度来看,东线方案更优,地质条件更稳定。

综合比较东、西线输水线路方案工程地质条件,均无制约两方案成立的重大工程地质问题,均具备布置、修建输水发电系统的地形地质条件。东线方案线路较短,且主要建筑物避开了规模较大的 F_1 (夏家塆断层),地质条件优于西线方案,因此从工程地质角度考虑推荐东线方案。

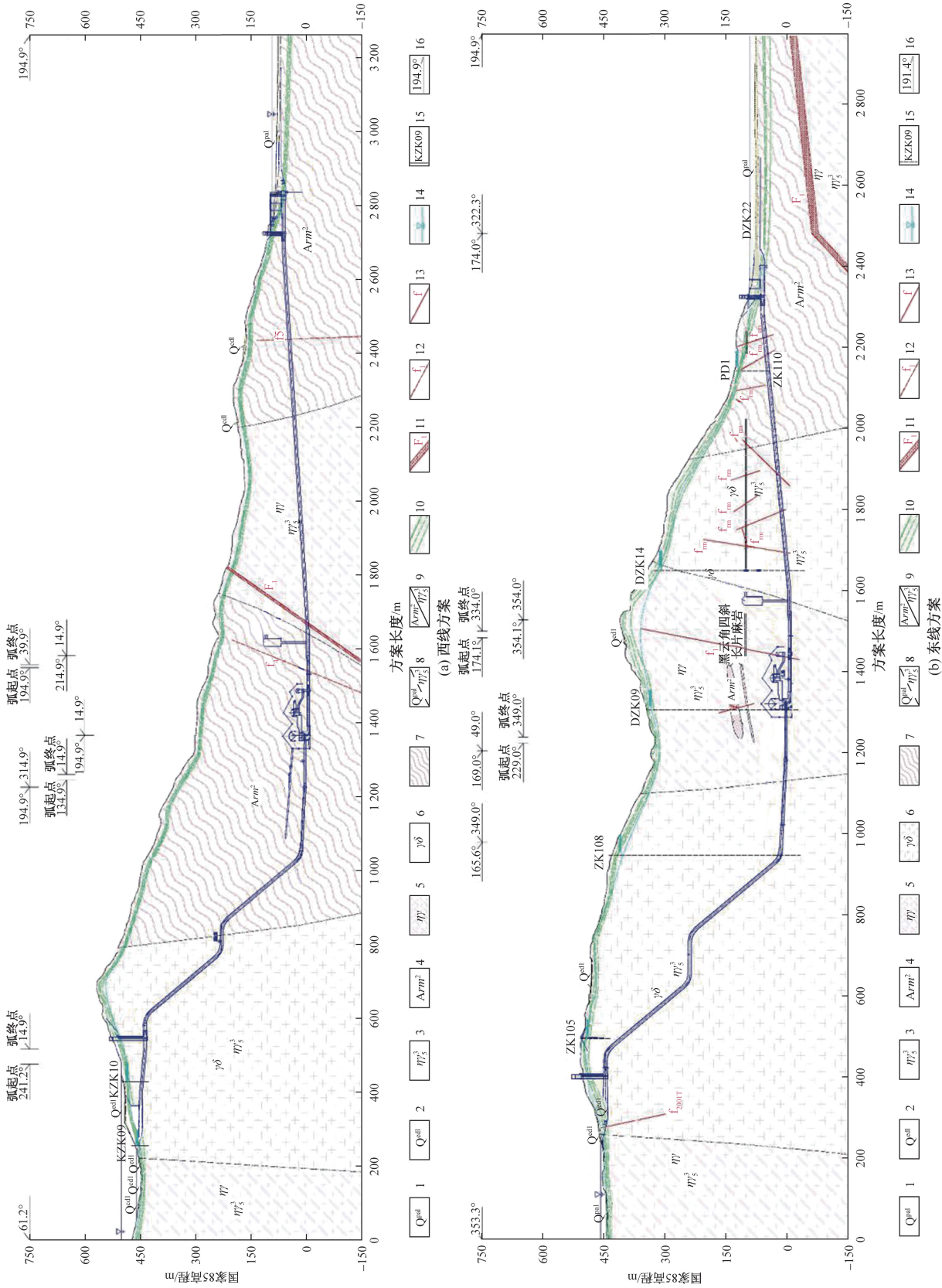


图5 输水发电系统工程地质剖面图

10为风化界线；11为断层及编号；12为物探推断断层及编号；13为钻孔揭露小断层；14为地下水位；15为钻孔及编号；16为剖面方向

4.3 地下厂房工程地质条件比选分析

在已选定的东线方案中, 布置两种类型地下厂房方案(中部式、尾部式), 中部式厂房设下游调压室, 引水系统较短、尾水系统较长, 通风安全洞等辅助洞较长。尾部式厂房设上游调压室, 引水系统较长、尾水系统较短, 通风安全洞等辅助洞较短。由于两种方案地形地貌、地层岩性、水文地质条件等均相似, 后文将从深孔地应力分析两种方案的差异性。

位于中部式厂房钻孔孔标为 345.12 m, 尾部式厂房钻孔孔标为 329.29 m, 两孔孔深均为 370 m。水压致裂法结果显示(图 6), 中部式厂房最大水平主应力 σ_H 为 7.03~22.12 MPa, 最小水平主应力 σ_h 为 5.48~13.25 MPa, 孔深 361 m 区域存在高地应力, 最大水平主应力方向: NW66.1°、NW52.3°。尾部式厂房最大水平主应力 σ_H 为 5.21~25.44 MPa, 最小水平主应力 σ_h 为 4.89~14.55 MPa, 孔深 317 m 区域存在最高地应力, 最大水平主应力方向: NW72.1°、NW48.3°。图 7 显示, 中部式厂房劈裂压力为 5.19~12.57 MPa, 尾部式厂房劈裂压力为 6.65~11.28 MPa。从结果来看, 中部式厂房和尾部式厂房地层应力水平相当, 围岩稳定满足抗水力劈裂能力, 且与诸多抽水蓄能电站厂房应力水平相当, 应力条件较好^[11-13], 但中部式厂房变化更加稳定, 尾部式厂房应力随深度变化波动性较大。此外, 陡倾断层 $f_{\text{断}11}$ 从尾部式主厂房下游穿过, 会显著降低围岩应力水平, 不利于下游边墙围岩稳定^[14]。综合来看, 中部式厂房更优。

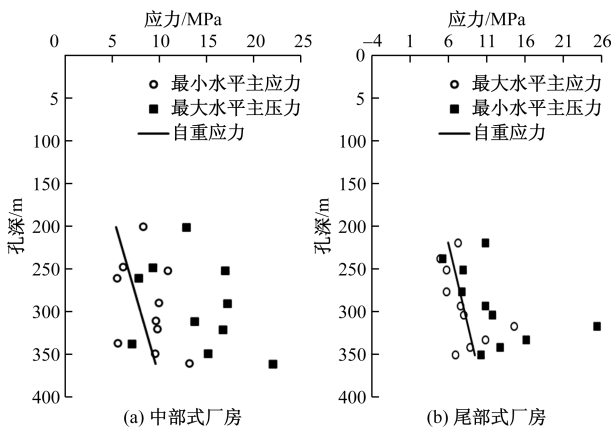


图 6 岩体水平主应力随深度分布曲线

5 结论

针对湖北蕲春抽水蓄能电站输水发电系统多方案比选研究, 采用钻孔、物探、试验等多手段, 系统剖析了不同方案的优劣势, 从工程地质和水文地

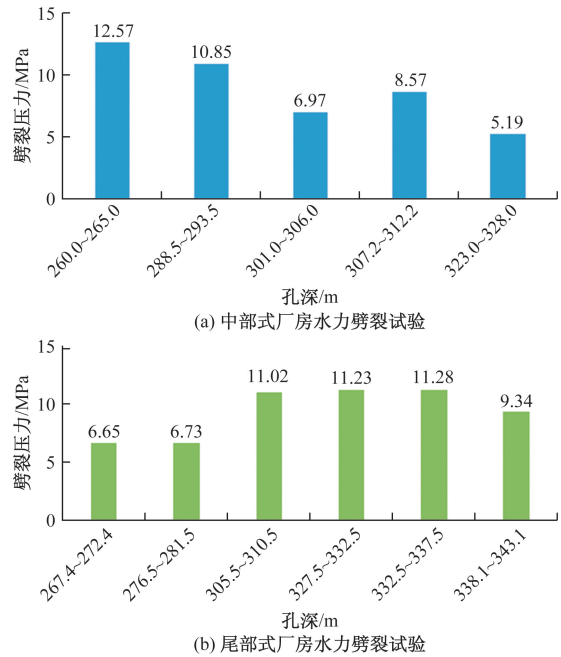


图 7 岩体劈裂压力随深度分布曲线

质条件角度探讨了抽水蓄能电站输水发电系统的稳定性, 得到以下结论。

(1) 东、西线输水线路方案均无制约两方案成立的重大工程地质问题, 均具备布置、修建输水发电系统的地形地质条件。但东线方案线路较短, 且主要建筑物避开了规模较大的 F_1 (夏家垸断层), 地质条件优于西线方案, 因此从工程地质角度考虑推荐东线方案。

(2) 中部式厂房方案最大水平主应力 σ_H 为 7.03~22.12 MPa, 最小水平主应力 σ_h 为 5.48~13.25 MPa, 孔深 361 m 区域存在高地应力, 最大水平主应力方向为 NW66.1°、NW52.3°, 应力随深度分布较为均匀。且无大断层制约, 满足地下洞室围岩地质和水文地质条件。

参考文献

- [1] 徐唯强, 陈全宝, 刘震震. 吉林省和龙抽水蓄能电站上水库坝型比选合理性分析[J]. 东北水利水电, 2024, 42(6): 1-2, 8.
- [2] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [3] 王兰普, 吕凤英, 王波, 等. 丰宁抽水蓄能电站二期地下厂房施工期围岩变形规律分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(2): 106-114.
- [4] 张建龙, 柴建峰, 安晓凡, 等. 基于三维地质建模的大型地下厂房岩体质量分级[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 43-47, 63.
- [5] 付俊, 周罕, 王凯, 等. 玉维高速科色特长隧道地应力特

- 征及工程地质意义[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 10106-10111.
- [6] 聂子攀, 肖立业, 邱清泉, 等. 地下抽水蓄能发展综述[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1606-1619.
- [7] 高学平, 袁泽雨. 抽水蓄能电站地下水库建设进展及关键水力学问题[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1058-1069.
- [8] 马建华, 尤著刚, 王化武, 等. 高地应力软岩隧道超前平行导洞开挖对主洞影响: 以玉龙雪山隧道工程为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4265-4275.
- [9] 李院忠, 付长明, 孙凯辉, 等. 清原抽水蓄能电站地下厂房工程地质条件[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 81-84.
- [10] 欧慧琳. 抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J]. 云南水力发电, 2023, 39(10): 310-313.
- [11] 毛鹏, 江志红, 夏遵全, 等. 长龙山抽水蓄能电站地下厂房岩体变形分析[J]. 水电与新能源, 2023, 37(7): 27-31.
- [12] 王波, 王灵, 任永政, 等. 扰动荷载作用下抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(3): 49-59.
- [13] 于新华, 王丽新, 陈建胜, 等. 某抽水蓄能电站地下洞室群围岩三维稳定分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32): 73-78.
- [14] 李鹏, 王启鸿. 缓倾岩层地下厂房洞室围岩稳定性评价: 以某抽水蓄能电站地下厂房为例[J]. 西北水电, 2023(2): 40-46.

Comparative Water Transmission and Power Generation System of Qichun Pumped Storage Power Station in Hubei Province

ZHONG Xinlin, ZHENG Zhengfeng, ZHANG Xiaojian, ZHOU Hao, ZHANG Yongchang

(Survey Engineering Company, Central Southern China Electric Power Design Institute Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to study the stability of the geological conditions of the water transmission and power generation system of Qichun pumped storage power station, and selecting the optimal scheme, engineering geological surveying, high-density electrical method, and geostress test were carried out in the engineering area to qualitatively and quantitatively describe the geological conditions of the engineering area. The advantages and disadvantages of multiple schemes of water transmission and power generation systems were analyzed based on the rock and soil stress state. The results showed that the three faults reduced the engineering geological stability of the western route plan, so the eastern route plan was selected. In addition, the stress conditions of both the central and tail underground power plants meet the requirements of engineering geology and hydrogeology. However, the stress distribution of the central power plant is more uniform and there are no fractures that restrict geological stability. Therefore, a better central power plant scheme is selected.

Keywords: pumped storage power stations; water transmission and power generation systems; geostress tests