

锦屏二级水电站尾部厂区枢纽布置方案研究

陈建林¹, 江 权², 周 辉²

(1. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 杭州 310014; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 锦屏二级水电站为一低闸、长隧洞、尾部地下厂房开发方式电站。水电站尾部厂址区域 II、III、IV 类围岩并存, 地质条件较复杂。根据现场地质特点, 从工程地质条件、水力学条件、洞室围岩稳定性、工程投资等多方面对厂区枢纽布置进行了分析, 论述了取消尾调室、采用二洞室方案的合理性以及选择 N35°E 的厂房纵轴线方案的优点。实践证明, 该方案一方面可以满足洞室群围岩稳定以及机组稳定运行要求, 另一方面又能较大幅度上节约工程投资、缩短工期, 是一种最佳的锦屏二级工程尾部厂区枢纽布置方案。

关 键 词: 岩石力学; 尾部厂区枢纽; 布置方案; 厂房轴线; 锦屏二级水电站

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Layout scheme of powerhouse at the end of power tunnel for Jinping II hydropower plant

CHEN Jian-lin¹, JIANG Quan², ZHOU Hui²

(1. East China Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China; 2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The Jinping II hydropower plant is made up of low sluice gate, long tunnel and powerhouse arranged at the end of the power tunnel, and the geological conditions at the powerhouse is quite complicated. II, III and IV surrounding rocks coexist in the area of powerhouse at the end of power tunnel. Considering the complicated engineering geological environment, engineering geological condition, hydraulic condition, stability of surrounding rock project, investment and so on are analyzed; the advantages of choosing powerhouse longitudinal axis of N35°E and the reasonabilities of canceling tailrace surge chamber and using two-cavern scheme are discussed. Constructing practice proves that the layout scheme not only can meet the criterion of cavern stability and operation safety of generating units, but also can save engineering cost and shorten the construction time.

Key words: rock mechanics; powerhouse at the end of power tunnel; layout scheme; powerhouse axis; Jinping II hydropower plant

1 引 言

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河湾上, 是雅砻江干流上的重要梯级电站。工程利用雅砻江卡拉至江口下游河段 150 km 长大河湾的天然落差, 通过长约 17 km 的引水隧洞, 截弯取直, 获得水头约 310 m。电站总装机容量为 4 800 MW, 单机容量为 600 MW, 额定水头为 288 m, 多年平均发电量为 242.3 亿 kW·h, 保证出力 1 972 MW, 年利用 5 048 h。它是雅砻江上水头最高、装机规模

最大的水电站。

工程枢纽主要由首部拦河闸、引水系统、尾部地下厂房三大部分组成, 为一低闸、长隧洞、大容量引水式电站(图 1)。首部拦河闸坝位于雅砻江锦屏大河湾西端的猫猫滩, 最大坝高 34 m, 上距锦屏一级坝址为 7.5 km。水库正常蓄水位为 1 646 m、死水位为 1 640 m。电站进水口位于闸址上游 2.9 km 处的景峰桥, 首部枢纽采用闸坝与进水口相分离的布置方案。引水洞线自景峰桥至大水沟, 采用“4 洞 8 机”布置。引水隧洞共 4 条, 洞线平均长度为 16.7 km, 隧洞一般埋深为 1 500~2 000 m, 最大埋深达

2 525 m, 为世界上规模最大的水工隧洞工程。地下发电厂房位于雅砻江锦屏大河湾东端的大水沟右岸山体内部, 形成一个由上游调压井、高压管道、主副厂房、主变室、尾闸室、尾水隧洞和其他附属洞室组成的复杂大型洞室群, 主副厂房洞长 352.4 m, 宽 25.8 m, 高 71.2 m。

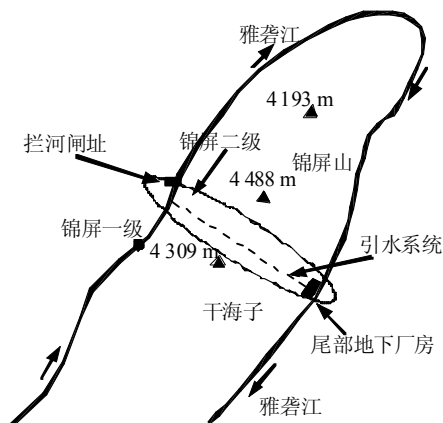


图 1 锦屏二级水电站工程枢纽总体布置示意图
Fig.1 General design of Jinping II hydropower plant

受引水系统工程布置制约, 尾部地下厂房枢纽的布置需考虑与引水隧洞间的紧凑性, 而不能依据传统的地下厂房布置那样选取最有利的工程地质条件和最有利的应力条件^[1-11]。这一因素决定了厂区枢纽必须布置在一个相对不利的陡倾河谷边坡山体内部, 也决定了厂房洞轴线方向将与岩层层理组向呈小夹角。因此, 本文综合考虑枢纽布置协调性、工程地质条件、水力学条件、洞室围岩稳定性、工程开挖量、工程投资等多种因素, 重点论述了在多种因素制约下如何抓住锦屏二级水电站尾部厂区枢纽的主要矛盾, 如何进行洞室组合方案的选择, 又如何进行厂房轴线方向选择, 提出了锦屏二级水电站最经济合理、安全可靠的尾部地下洞群布置方案, 其研究思路和最终布置形式可为后续同类工程设计提供有益参考。

2 厂址工程地质特点

锦屏二级水电站大水沟厂址区出露的地层均为中三叠统盐塘组(T_{2y})及第四系(Q)地层, 其中三叠统盐塘组 T_{2y} 主要为一套变质程度不同的碳酸盐岩, 按其岩性特征可分为 6 个岩性段, 与厂址有关的地层为 T_{2y}^4 , T_{2y}^5 , T_{2y}^6 , 上述地层均呈整合接触(图 2)。厂址区域内地质构造与区域构造基本吻合, 受近东南向(NWW~SEE)应力场作用, 主要发育 NNE 向的构造, 岩层走向亦均为 NNE 向, 同时受次一

级应力场影响, 厂区内还发育北东、北西向的构造形迹。厂区内无区域性断裂或次一级的大断层 I 类结构面发育, 唯发育一条 II 类结构面 F_7 断层。综合地层岩性、地质构造及水文地质特征等因素, 将厂区内含水层介质划分为 2 类 4 个含水层(组), 含水层界线和地层界线基本一致, 其中: T_{2y}^{5-1} 为强富水层, T_{2y}^{5-2} 为强富水层, T_{2y}^6 为较弱富水层, T_{2y}^4 为弱富水层。厂区内地下渗水量大, 根据厂房探洞揭示, 水量达 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[12]。据围岩工程分类研究成果, 地下洞室区围岩主要为 II、III、IV 三大类, 其中以 III 类为主, 具备成洞条件。

实测地应力表明厂房地应力地最大主应力量级一般在 $10.1 \sim 22.9 \text{ MPa}$ 之间, 以近垂直岸坡方向为主, 其平均方向为 $S43.1 \sim 47.4^\circ E$, 与区域最大主应力 NWW 方向基本一致, 属中高地应力区。

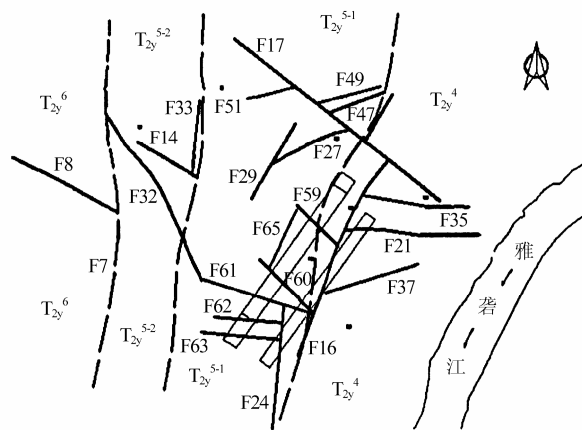


图 2 厂址区域岩层与断层示意图
Fig.2 Rock strata and faults in powerhouse junction region

3 厂区枢纽布置方案优化

在锦屏二级水电站尾部厂区枢纽布置中, 有两个关键性问题需要进行优化, 一个是厂房枢纽的洞室组合, 即采用两洞室方案还是采用三洞室方案; 另一个是厂房轴线的方位角, 即以什么方位角布置厂房及其他洞室。

3.1 洞室组合方案选择

根据本工程地形、地质条件, 结合水工枢纽布置设计一般原则, 厂区内枢纽布置方案拟定了两个可行方案, 即三洞室方案(主副厂房、主变室和尾水调压室)和二洞室方案(主副厂房、主变室)。二洞室方案厂区内枢纽是在三洞室方案的基础上, 为了简化地下洞群布置、进一步改善机组运行稳定性, 取消了尾水调压室, 把主厂房洞、主变洞两大平行

布置的洞室以及相关附属洞室整体往下游侧（雅砻江方向）移动（图 3）。移动的原则是在没有尾水调压室的前提下，保证机组尾水管进口真空度满足规范要求，并满足引水发电系统过渡过程稳定性要求，同时兼顾地形、地质条件，使洞室方案尽量布置于地质条件相对较好的位置。两个方案地下厂房位置均距离雅砻江较近，其中二洞室方案地下厂房洞室群更靠近雅砻江岸坡侧。

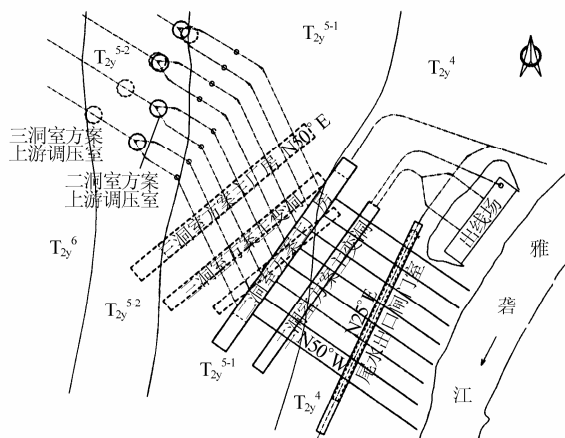


图 3 尾部厂房枢纽的二洞室方案与三洞室方案位置关系图

Fig.3 Relationship between two caverns layout scheme and three caverns layout scheme in powerhouse junction

从工程地质角度比较而言，三洞室方案和二洞室方案各有优缺点：（1）采用三洞室方案布置时，三大洞室都位于围岩岩体工程条件相对较好的Ⅲ类围岩中，而二洞室方案布置使得主变室局部位置处于Ⅳ类围岩中，因此可见三洞室方案略优于二洞室方案；（2）对洞室群而言，二洞室方案由于减少了一个大型尾水调压室，较大程度上避免了厂房多洞群围岩的相互影响，可有效地节约工程造价；

（3）二洞室方案虽使得主变室局部位处于Ⅳ类围岩中，但厂房均位于Ⅲ类围岩中，仍具有较好的成洞条件；（4）两洞室方案使得洞群埋深减小，一定程度上避免了高地应力和改善了岩溶裂隙水的影响，有利于开挖施工和洞室围岩稳定，且主变室局部工程地质条件相对较差的部位可通过支护手段加以解决。因此，综合考虑认为二洞室方案的总体工程地质条件略优于三洞室方案。

从水力学角度条件对比两种方案可见：（1）两种方案的大波动过渡过程、小波动稳定性和水力干扰稳定性的计算比较分析表明，三洞室方案和二洞室方案对应的水力过渡过程均满足调节，保证计算要求，且均是稳定的，其中二洞室方案的小波动稳

定性和水力干扰稳定性相对略好。（2）虽然二洞室布置的大波动尾水管最低压力比三洞室低，但二洞室方案的尾水管真空度仍然能够满足设计规范要求并留有裕量；（3）相比而言，二洞室布置更简洁明了，虽然采用了单机单洞并增加了 4 条尾水隧洞，但取消了高边墙的尾水调压室，不仅大大降低工程投资和运行操作复杂性，而且减少了一个水力干扰源，有利于引水发电系统的水力过渡过程稳定性。

从有利洞室围岩稳定性的角度看，二洞室方案与三洞室方案在围岩稳定的影响因素上略有不同：

（1）二洞室方案由于洞室群整体外移后，带来围岩分类等级有所降低，以及洞群轴线与岩层走向夹角较小、受 F16 断层切割等问题，这些都对洞室围岩稳定性带来一定的影响；（2）在三洞室方案中，虽然以上影响因素有所好转，但由于厂区初始地应力增大，且多了一个大型尾调洞室，增大了洞室群之间的相互影响，对围岩稳定带来不利（如表 1）；

（3）经数值计算分析，虽然二洞室方案的岩性、围岩类别相对较差，且与岩层走向夹角较小、受 F16 断层切割等，但由于少了一个大型尾水调压室的影响，洞群整体围岩稳定性比三洞室略好。

表 1 三洞室与二洞室方案的围岩变形对比（单位：mm）

Table 1 Contrast of deformation between two caverns layout scheme and three caverns layout scheme (unit: mm)

洞室方案	洞室	拱顶	上游边墙	下游边墙
三洞室	厂房	18.3	74.2	63.5
	主变室	16.7	22.5	41.0
二洞室	厂房	10.8	47.2	58.2
	主变室	5.2	26.2	58.3

另外，从施工组织、施工强度以及施工可靠度、工程投资等角度分析比较，由于三洞室方案多了一个大型尾调建筑物，显著增大了地下工程量、增长了整个厂房枢纽施工工期、增加了围岩支护费用，明显不如二洞室方案优越。

综合以上分析比较，选定二洞室方案为厂区枢纽布置方案。

3.2 厂房位置与洞轴线方位优化

鉴于锦屏二级电站厂区陡峻的地形地貌和复杂的边坡地质条件，为了避免地面明挖造成高边坡稳定问题，在厂房位置选择时，应尽量使得厂区各大建筑物均布置在地下，而且必须重视引水系统水力学条件与机组运行稳定性问题，并留有一定安全余地，还要兼顾枢纽总体布置的合理性与流道布置的顺畅性。引水发电系统水力过渡过程计算成果表明，

在地下厂房位置选择过程中,其限制条件之一是安全的尾水管真空度值,要满足规范^[13]对尾水管真空度的规定要求并留有一定安全余地,则尾水隧洞的极限安全长度约为 275 m,主厂房洞上游边墙离岸边的极限范围约为 330 m。所以在该段范围内厂房位置选择余地不大,而且在离岸坡 250 m 左右有一条影响比较大的 F16 断层,该断层走向为 N20E 左右,与厂房轴线夹角较小。在厂区洞室布置中,应尽量将主副厂房洞布置于 F16 断层的下盘。最终经技术经济比较,选定厂房位置位于离岸坡 300 m 左右。

一般,地下厂房纵轴线布置原则为:纵轴线与初始地应力最大主应力方向呈较小夹角,与主要结构面走向呈较大夹角,并满足各枢纽建筑物的布置协调和运行要求。

由于锦屏二级水电站地下厂区实测地应力方向以近垂直岸坡方向为主,其平均方向为 S41.2E,考虑到厂区的地形地质条件以及枢纽布置的规模、协调性,很难使地下厂房纵轴线满足与初始最大地应力方向小角度相交的基本原则。然而厂房位置岩体实测地应力第一主应力 σ_1 变化范围为 10.6~16.79 MPa,属于中等地应力场,而主厂房所处 T_{2y}^{5-1} 岩层 III 类围岩的湿抗压强度为 65~80 MPa,与平均地应力对应的岩石的强度应力比为 4.75~5.84,表明岩体具有较大的承载裕度。因此,选择一个与最大主应力方向呈大夹角(N30E~N60E),即与雅砻江流向呈小夹角的厂房轴线方位是具有可行性的。另外,通过合理的开挖施工顺序和支护方案,可以将地应力对洞室围岩稳定产生的不利影响降低到最有限的程度。在锦屏二级水电站地下厂房轴线选择上,主要从水工枢纽布置顺畅以及兼顾主要结构面产状的角度出发,比较了 N35E 和 N55E 两种厂房纵轴线方案,如图 4。

从洞轴线与结构面关系上来看,两者中以 N55E 方案略好,其与岩层走向及主要结构面夹角均在 35°以上。如对厂区规模比较大的 F16 断层而言, N55E 方案与其交角为 35.5°;而 N35E 方案与其交角仅为 15.5°。从洞轴线与厂区主要节理的相互关系来看,也以 N55E 纵轴线方案略好,其与最主要发育的裂隙(见图 5)的最小夹角为 30°左右,而 N35E 方案仅为 10°左右。因此,从厂房纵轴线与地质结构面相互关系出发, N55E 的纵轴线方案略优于 N35E 方案。但是,无论是洞轴线方位为 N35E 方案还是 N55E 方案,都无法从根本上避免不利断层和次发育结构面对洞室的影响。

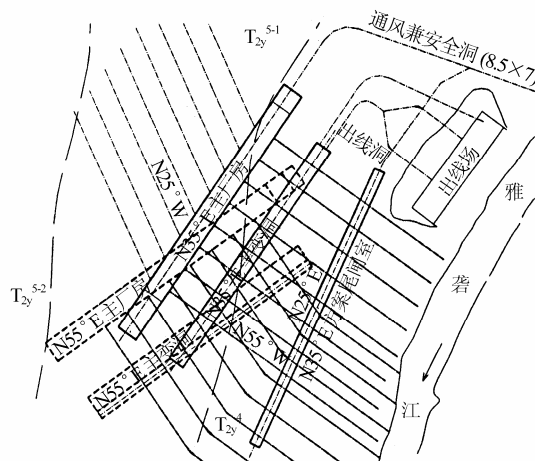


图 4 两种不同方位角厂房轴线位置示意图

Fig.4 Relationship between two different cavern axis directions

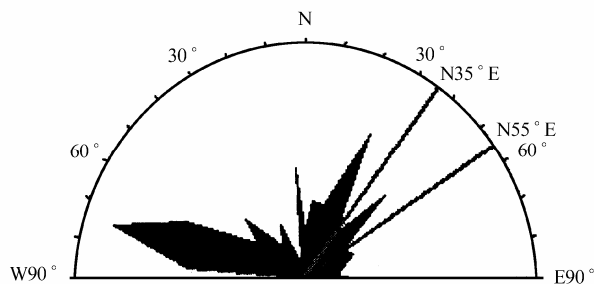


图 5 结构面玫瑰图

Fig.5 The rose picture of cranny

当采用 N55E 的纵轴线方案时,由于受到尾水管真空度限值的控制,尾水隧洞不能超过 275 m,其枢纽布置只有将主变洞与尾闸洞合二为一布置后,才能解决枢纽布置问题以及过渡过程要求。如此布置后,其缺点为:(1)主变洞与尾闸洞合二为一布置后,主变洞跨度加大到 29.5 m,甚至超过了主厂房的顶拱跨度 28.3 m,两个洞室均成为了巨型洞室,对洞室群的围岩稳定造成影响,而且约 1/4 主厂房洞和约 1/2 主变洞进入中薄层条带状云母大理岩 T_{2y}^4 地层;(2)厂房 N55E 纵轴线方案中的主厂房洞和主变尾闸洞虽然与中缓倾角 F16 断层夹角达到 35°左右,但两洞同时受其切割。因此,可认为采用 N55E 的纵轴线方案增加了主厂房防潮防水的难度,增大了支护设计难度以及支护工程量,也增加了大型地下发电厂房永久运行的不安全因素。

当采用厂房 N35E 纵轴线方案时,主厂房基本避开了 F16 断层的影响,仅使得主变室受断层 F16 切割,确保最关键的厂房的稳定性。另外,主变室和尾闸室分离使得主变室宽度减小到 19.8 m,有利

于主变室围岩稳定，也使得整个地下发电洞室群布置简洁通畅。

综上所述，虽然选择 $N35^{\circ}E$ 的厂房纵轴线方案在地质条件上略不如 $N55^{\circ}E$ 厂房纵轴线方案，但其布置避开了大型断层对厂房稳定性的影响，减小了主变室的跨度，节约了支护工程量，有利于整个地下洞室群的稳定性。对于 $N35^{\circ}E$ 的厂房纵轴线方案带来的地质方面的不利影响，只要通过合理的支护参数设计，施工过程中及时进行加强支护处理，洞群围岩稳定性完全可以得到保证。三维非线性弹塑性数值计算^[14]也证明了当采用合理的支护参数时，洞室开挖后围岩塑性区一般在 $2\sim 3\text{ m}$ 左右(图 6)。

综合上述厂区地形、枢纽布置的合理性、顺畅性、施工便利性、施工进度保证率以及工程投资等方面因素， $N35^{\circ}E$ 地下厂房纵轴线方案相对更合理。

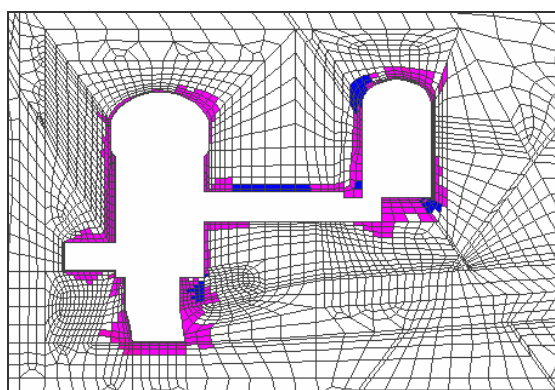


图 6 三维数值计算获得的洞室围岩塑性区

Fig.6 Plastic zone of wall rock calculated by 3D numerical simulation

4 现场开挖验证

自 2007 年 7 月，锦屏二级水电站地下厂房枢纽正式动工开挖以来，工程进展顺利。目前，厂房第 2 层开挖基本完成，主变室的第 1 层开挖也即将结束。从现场开挖过程中揭露的厂区工程地质来看：

(1) 厂房区域均为 II~III 类围岩，未曾遇到大的不利断层，爆破开挖后洞室成型也较好(图 7)，这表明厂房避开了不利地质条件，极大地方便了厂房施工和有效地减小了围岩支护费用；(2) 主变室开挖结果表明主变室区域岩体以 III~IV 类为主，工程地质条件相对较差，与工程布置时将主变室布置在相对较差的岩体中的规划相吻合；(3) 从开挖过程中出现的围岩失稳或破坏特征来看，除副厂房下游墙受断层影响出现一例局部围岩失稳外，其他区域围岩稳定性良好，未出现结构面控制型或应力

控制型围岩破坏现象；(4) 主变室受多组陡倾和缓倾结构面相互切割，开挖过程中曾发生了几次围岩局部掉块现象，但采取合理的围岩支护措施(如增加锚索、锚杆、挂网喷混凝土)并及时进行系统支护后，围岩稳定性良好(图 8)。

因此，根据现场施工揭露的工程地质条件和开挖过程中的围岩稳定状态，表明目前锦屏二级水电站尾部厂房枢纽的洞室组合方案和洞轴线方位选择是合理的。



图 7 主厂房第 2 层开挖后下游边墙

Fig.7 Lower side wall of powerhouse after excavation of layer 2 of main powerhouse



图 8 主变室第 1 层开挖与支护

Fig.8 Excavation of layer 1 and wall rock supporting of main transformer cavern

5 结 论

(1) 锦屏二级电站尾部厂区洞室群纵横交错，规模巨大，且地质条件复杂，如何抓住工程的关键技术问题进行尾部枢纽布置的合理布置，是锦屏二级电站水工设计的主要技术问题之一。本文通过多方面论证分析，阐述了目前锦屏二级水电站尾部厂房枢纽布置的合理性。

(2) 从工程地质条件、水力学条件、洞室围岩稳定性、工程投资等多方面论述了定二洞室布置方

案较三洞室方案更为合理;论述了 N35E 的厂房纵轴线方案的合理性。该厂房枢纽布置在可研审查以及项目评估审查阶段,国内同行权威专家一致认为尾部枢纽方案布置合理,厂房纵轴线方案选择准确。工程正式开工以来的洞室开挖揭示出的地质情况也表明目前选择的厂房枢纽布置较合理。

(3) 本文关于锦屏二级水电站尾部厂区枢纽布置方案研究的思路与成果也可为以后进行地下厂房枢纽布置提供一条思路,即不要完全拘泥地应力及结构面对枢纽布置的影响,应分析在不利因素作用下,洞群稳定有无问题。如通过加强支护手段能消除其不利影响,则在枢纽布置方案选择时,着眼点应放到枢纽布置是否顺畅、是否有利于过渡过程、是否提高机组运行稳定性以及能否精简洞室、减少工程投资等方面,从而抓住主要矛盾,选择出经济合理、安全可靠的厂区枢纽设计。

参考文献

- [1] YOSHIDA H, HORII H. Excavation analysis of a large-scale underground power house cavern by micromechanics-based continuum model of jointed rock mass[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3-4): 1—19.
- [2] 李锦飞. 琅琊山抽水蓄能电站厂房位置及洞轴线方向的优化选择[J]. *工程地质学报*, 2003, 11(4): 416—420.
- [3] 邵年, 费文平, 刘小江. 彭水水利枢纽电站厂房布置方案研究[J]. *人民长江*, 1999, 20(10): 23—25.
- [4] 盛谦, 黄正加, 邬爱清. 三峡工程地下厂房定位块体分析与厂方轴线选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(Supp.1): 1 958—1 961.
- [5] CALVELLO M, FINNO R J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31: 411—425.
- [6] PIERPAPLO ORESTE. Back-analysis technique for the improvement of the understanding of rock in underground constructions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20: 7—21.
- [7] SZWEDZICKI T. Rock mass behaviour prior to failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40: 573—584.
- [8] 冯明权, 冉隆田, 秦建彬, 等. 乌江彭水水电站地下主厂房选址工程地质研究[J]. *人民长江*, 2007, 38(9): 106—111.
- [9] 曾静, 盛谦, 廖红建, 等. 佛子岭抽水蓄能水电站地下厂房施工开挖过程的 FLAC^{3D} 数值模拟[J]. *岩土力学*, 2006, 27(4): 637—642.
- [10] 罗先启, 葛修润, 郑宏. 软硬相间岩层中地下厂房稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2002, 23(3): 297—300.
- [11] 朱维申, 刘建华, 杨法玉. 小浪底水利枢纽地下厂房岩体支护效果数值分析研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1 087—1 091.
- [12] 周春宏, 曹强, 张升峰. 雅砻江锦屏二级水电站可行性研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2005.
- [13] 电力工业部华东勘测设计研究院. DL/T 5058-1996 水电站调压室设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [14] 冯夏庭, 周辉. 雅砻江锦屏二级水电站大型地下厂房洞室群施工期快速监测与反馈分析阶段报告一: 锦屏二级水电站地下厂房区域地应力反演与洞室群开挖模拟分析[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.