

大型抽水蓄能电站主体工程施工工期影响因素及优化措施

谭 峰, 周洪云

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对当前抽水蓄能电站建设任务重, 建设工期紧的问题, 以大型抽水蓄能电站主体工程施工工期为研究对象, 分析主体工程施工工期的影响因素及其重要性, 并基于实地调研及统计分析, 通过编制布尔运算程序代码构建影响因素的解释结构模型 (ISM)。结果表明地形地貌条件是影响施工工期的主要因素, 针对不同施工线路, 从技术措施、组织措施、管理措施及经济措施等方面提出了具体的工期优化措施。

关键词: 抽水蓄能电站; 施工工期; 解释结构模型; 工期优化

中图分类号: TV743

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)S1-0101-05

Factors affecting the construction period of the main project of a large-scale pumped storage power station and optimization measures//TAN Feng, ZHOU Hongyun (Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: In response to the current heavy construction task and tight construction period of pumped storage power stations, this study focuses on the construction period of the main project of large-scale pumped storage power stations, analyzes the influencing factors and their importance on the construction period of the main project, and based on field research and statistical analysis, constructs an explanatory structural model (ISM) of the influencing factors through the development of Boolean operation program code. The results indicate that terrain and landform conditions are important factors affecting the construction period. Specific schedule optimization measures have been proposed for different construction routes, including technical measures, organizational measures, management measures, and economic measures.

Key words: pumped storage power station; construction period; interpretative structural model (ISM); time optimization

在全球气候变化的驱动下, 我国电力系统正逐步向新能源为主的新型电力结构转型, 而抽水蓄能作为一项成熟的储能技术, 可以有效实现电能和水能的转化, 保证电力系统安全、经济运行, 有效促进新能源消纳^[1]。

相比于其他储能技术, 抽水蓄能在储能容量、经济性、调峰时间、稳定性、技术成熟度与可靠性等方面皆具有明显优势^[2], 因此抽水蓄能电站在世界范围内的建设规模不断增大。据 IHA 发布的《2021 全球水电发展报告》^[3], 全球抽水蓄能装机规模为 1.59 亿 kW, 占储能总规模的 94%, 预计 2030 年全球抽水蓄能电站装机规模将在现有规模基础上增加 50% 以上, 2050 年将扩大一倍以上。Allbrecht^[4]认为目前的技术水平下, 抽水蓄能电站是唯一可靠、经济可行且生态无害的电力储存选择。在我国, 2014—2020 年为抽水蓄能电站蓬勃发展期, 体制机制不断

完善, 装机规模大幅跃升, 2017 年中国超越日本, 装机达到 2849 万 kW, 成为全世界抽水蓄能电站规模最大的国家。刘永珍等^[5]对我国抽水蓄能电站的建设现状进行了总结, 并针对存在的问题给予了建议。彭才德^[6]研究了抽水蓄能电站在新型电力系统中的功能和定位, 提出了促进抽水蓄能发展的意见和建议。面对如此庞大的建设需求和任务, 抽水蓄能电站的施工周期也逐渐成为人们的研究重点。

甘特图^[7], 又称为横道图, 1917 年由亨利·甘特 (Henry Gantt) 发明, 它以条状图的方式形象地表示出任何项目的工作顺序与持续时间, 已被广泛应用于现代项目的施工进度管理中。1956 年, 美国杜邦公司开发了关键线路法 (critical path method, CPM), 以 CPM 为基础的网络计划技术能够克服横道图的弱点。张玲宁等^[8]采用甘特图分析项目进度, 不仅可以看出项目实际进度与计划的差距, 同时

还可以得出项目计划需要改进的方向。刘婧^[9]对项目进度管理的 CPM 进行了系统探讨。何平等^[10]论述了 P3 进度软件在天荒坪抽水蓄能电站土建施工进度管理中的应用情况。周桂珠^[11]认为控制抽水蓄能电站施工工期的关键线路在于地下厂房系统的施工。周方^[12]发现保证抽水蓄能电站进度的最有效措施为组织、合同和技术管理措施。

综上,当前对抽水蓄能电站建造技术的研究较为完整、深入,施工工期理论研究方法较为完备。但是对于抽水蓄能电站工程建设各阶段的工期研究很少,尤其缺乏针对主体工程施工工期的系统研究。因此,本文针对当前抽水蓄能电站建设任务重,建设工期紧的问题,对大型抽水蓄能电站的施工工期展开研究,总结实际工期,分析影响因素及程度,构建工期影响因素的解释结构模型(interpretative structural modeling,ISM),得出合理的理论工期及优化措施,以期大型抽水蓄能电站建设进度管控提供较为科学的方法与理论依据。

1 主体工程施工工期影响因素

抽水蓄能电站建设总工期划分为4个阶段^[13],分别为工程筹建期、施工准备期、主体工程施工期以及完建期。其中,主体工程施工期是抽水蓄能电站施工耗时最长的阶段(图1),该阶段从关键线路上的主体工程项目施工开始,至第一台(批)机组发电或工程开始发挥效益为止,主要完成永久挡水建筑物、泄水建筑物和引水发电建筑物等土建工程及其金属结构和机电设备安装调试等主体工程的施工。

大型抽水蓄能电站的主体工程施工工期标准是基于关键线路工期指标,偏向于乐观的样本平均进行分析得出。然而,在实际的施工过程中,往往会受到各种因素的影响。从施工单位角度出发,对影响主体工程施工工期的主要因素及其影响程度进行深入分析,以期合理确定抽水蓄能电站的施工工期提供调整依据。

1.1 工期指标影响因素

一般抽水蓄能电站主体工程施工存在厂房、引水系统、上(下)库工程、送出工程和其他工程平行施工的5条主要施工线路。

线路1(地下厂房):厂房开挖支护施工→厂房发电机层以下混凝土(及埋件)施工→厂房发电机组安装→首台机组调试、试运行、投产发电。

线路2(引水系统):连接道路施工→平洞施工、支洞施工→平洞开挖支护施工和斜(竖)井开挖支护施工→上、下斜(竖)井钢管安装及混凝土回填施工,平洞钢管安装及混凝土回填,灌浆施工→施工支洞封堵施工→充排水试验。

线路3(上(下)库工程):连接道路施工→主坝坝基开挖与基础处理施工(开采与填筑生产性试验)→主坝填筑施工→主坝面板施工→面板缝面止水施工→安全鉴定→蓄水验收→水库蓄水→坝顶结构施工。

线路4(送出工程):高压电缆(出线)洞施工、支洞施工→电缆(出线)洞施工开挖→电缆(出线)洞施工衬砌→高压电缆安装及试验→系统倒送电。

线路5(其他工程)。

结合 Anondho 等^[14]提出的活动项模型进行计算,可以得出抽水蓄能电站主体工程施工工期一般为这5条施工线路中最长的线路(线路1)的工期。因此,重点研究对关键线路(地下厂房)影响较大的因素,从施工单位的角度对多个相关因素进行分析。

1.1.1 外部环境的影响

a. 征地移民影响:抽水蓄能项目的开展滞后于征地移民,需要遵循“先移民后建设”的原则,地方政府完成征地移民工作后,才能开展工程建设,因此会导致各项工程的实施进度存在较大差异。

b. 对外交通条件影响:抽水蓄能项目的进行受制于交通条件,项目建造过程中所需的设备及物料运输对施工工期具有较大影响。

1.1.2 自然条件的影响

a. 地形地貌的影响:工程现场的地形地貌会影响工程整体布置,地下厂房的位置方向、通风洞和交通洞的位置长度和方向会由于地形因素存在较大差异,进而导致工程量与工期的差异。

b. 水文地质条件的影响:水文地质条件决定支护与施工方法,不同围岩等级下的支护不同。丰富地下水或者塌方,会较大程度地影响施工进度。

c. 气候环境的影响:我国疆域辽阔,各地的温

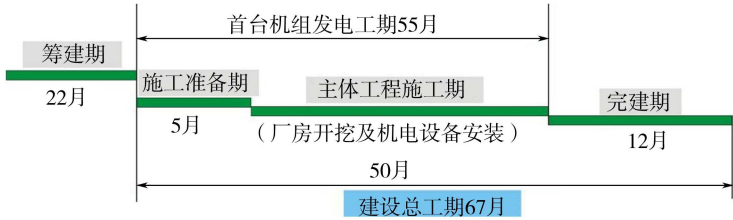


图1 施工分期示意图

差、海拔、时间都存在不同程度的差异,例如北方寒冷地区施工期短,南方存在较多夏季台风、暴雨现象,影响施工效率。

1.1.3 管理因素的影响

a. 工程发、承包模式的影响:经统计,国内外常用工程发、承包模式有 4 类 10 种,不同模式工程建设进程快慢不同。

b. 参建单位综合能力的影响:参建单位的组织机构模式、建设管理经验、管理人员协调能力对工程建设进度具有不同程度的影响^[12],大型抽水蓄能项目需要施工单位具有较高的专业化水平和组织协调能力。

c. 成本、质量的影响:在项目管理的全过程中,应同时考虑工期、成本和质量,并保持它们之间的平衡。不同的进度方案对应的工程费用和工期也有较大差异。

d. 创新理念的影响:技术的创新可以提高施工单位在建筑市场的竞争能力,加快工程的实施进度。

1.1.4 其他因素的影响

主体工程建设过程中是否遭遇不可抗力,施工单位施工设备、施工人员等主要资源投入数量及其他因素对工期均有影响。

1.1.5 影响因素指标体系

结合因子分析和开放式访谈结果,构建了包括建筑物结构尺寸、外部环境、自然条件、管理因素及其他因素这 5 个方面共 14 个主要影响因素的影响因素指标体系(图 2)。

1.2 工期指标的 ISM

ISM 最初是为分析复杂社会经济系统有关问题而开发的概念模型,特别适用于分析变量众多,关系复杂而结构不清晰的系统^[13]。而各影响因素对抽水蓄能电站施工工期影响是系统的复杂行为,本文

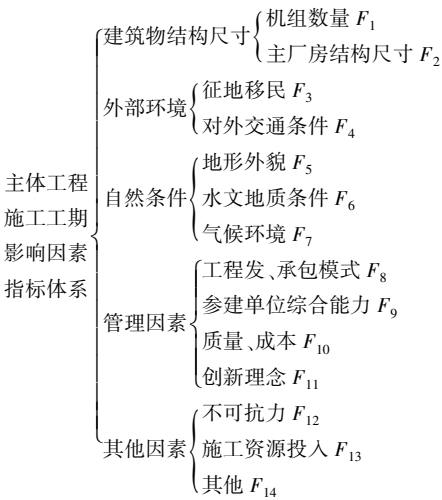


图 2 主体工程施工工期影响因素指标体系

通过 ISM 分析各影响因素的重要性。

设计一份 14×14 的问卷调查表,以国内典型大型抽水蓄能电站的建设工程为对象,对电站的建设单位、施工单位、勘察设计单位、监理咨询单位的代表(共计 60 人)进行问卷调查。表中填入 1,表示两因素之间存在关系,即当竖向的因素发生时往往会诱发横向某一因素的发生;填入 0,表示没有影响。收回问卷后,对问卷进行相应的处理,剔除无效数据,最终获得问卷调查结果,见表 1。

运用 Excel 表格进行编程,对建立的邻接矩阵进行布尔运算,得到可达矩阵(表 2)。

根据表 2 的可达矩阵,将其进行区域划分、级间划分和强连通划分。由各因素第一级影响分解可知,抽水蓄能电站主体工程施工工期影响因素的共同集为{2,4,8,10,13},则满足第一次层级划分要求的影响因素为 F₂、F₄、F₈、F₁₀ 和 F₁₃。删除可达矩阵中因素为 F₂、F₄、F₈、F₁₀ 和 F₁₃ 的行与列,对新的矩阵利用同样的准则确定第二级的影响因素,直到确定最后一级影响因素。经过 5 次重复层级划分,最终得到抽水蓄能电站主体工程施工工期影响因素的

表 1 工期影响因素问卷调查结果

影响因素	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄
F ₁	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F ₃	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F ₅	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
F ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
F ₉	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
F ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
F ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
F ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

表 2 工期影响因素问卷调查的可达矩阵

影响因素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}
F_1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
F_6	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
F_7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
F_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F_9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
F_{10}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F_{11}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0
F_{12}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
F_{13}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
F_{14}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1

第一层级集合为 $\{F_2、F_4、F_8、F_{10}、F_{13}\}$ ，第二层级为 $\{F_1、F_3、F_7、F_9、F_{12}、F_{14}\}$ ，第三层级为 $\{F_{11}\}$ ，第四层级为 $\{F_6\}$ ，第五层级为 $\{F_5\}$ 。根据影响因素层级的分析结果,可得大型抽水蓄能电站主体工程施工工期影响因素的ISM(图3)。

图3可以直观地反映主体工程施工工期指标影响因素之间的影响路径。由图3可知,第5层因素能够沿着箭头方向影响水文地质条件、创新理念、参建单位综合能力,直至影响主体工程施工工期,是影响主体工程施工工期长短的关键因素。因此,大型抽水蓄能电站在规划、勘察设计阶段需对地形地貌条件(工程选址)引起高度重视,在区域性资源普查基础上进行多方案比选,选择性价比大的作为理想站址。

综上,通过建立ISM,对主体施工工期的14个影响因素进行分析并划分了5个结构层次,确定地形地貌条件为影响施工工期指标的重要因素,可为抽水蓄能电站的建设提供一定参考,从而进行更加理性科学的选址。

2 主体工程施工工期优化措施

在工程实践中,加快施工进度需压缩关键线路

持续时间,同时需要确保质量和安全。工期管理不善会导致非关键线路变关键,制约总进度。施工单位应针对抽水蓄能电站主要线路,提出工期优化措施。

2.1 地下厂房施工工期优化措施

地下厂房施工所在的线路为抽水蓄能电站主体工程施工的关键线路,工程实践中可以从技术措施、组织措施、管理措施及经济措施等方面对施工工期进行优化。

2.1.1 技术措施

a. 开挖程序优化:主厂房开挖的常规施工程序为自上而下分层开挖,若探明无其他不良地质缺陷且围岩承载力满足施工要求,可对常规的开挖程序进行优化,采取预留部分岩体作为岩盖,岩盖上部、下部同步开挖,岩盖最后开挖的施工程序,从而缩短整体开挖工期。

b. 开挖分层与通道优化:厂房的开挖,分层高度及数量的差异对进度影响较大。应自上而下,逐层开挖支护,分层应综合考虑施工通道、设备作业空间,钻孔精度以及爆破有害效应控制等因素。

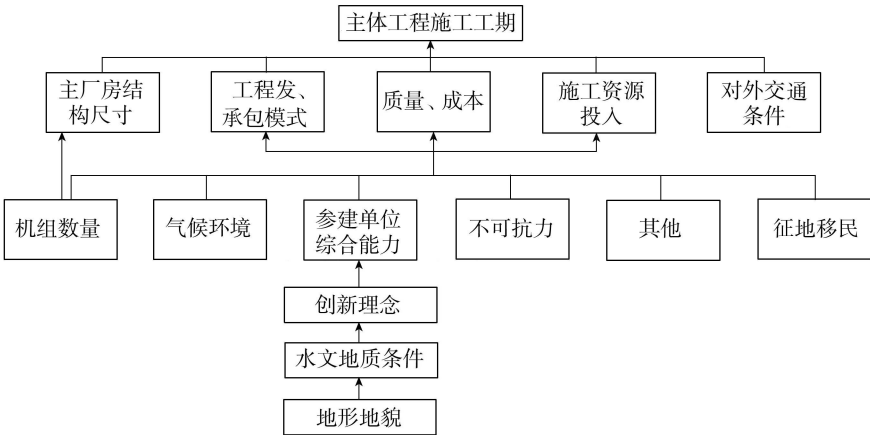


图 3 主体工程施工工期影响因素的ISM

c. 岩锚梁层开挖工艺优化:基于抽蓄地下厂房的地质条件,采用 100E 型潜孔钻钻孔,对岩锚梁边墙保护层实施深孔台阶光面爆破。

d. 隧洞锚杆凿岩台车造孔工艺:采用凿岩台车造锚杆孔可满足设计规范要求,且造孔速度快,对加快施工进度效果显著。

e. 湿喷台车喷混凝土工艺:常规工艺多采用干喷机,相对干喷工艺,湿喷回弹量要小得多(15%~20%)。采用湿喷台车工作效率大大提高,同时由于粉尘减少,对作业人员职业健康更有利。

f. 数码电子雷管应用:采用电子雷管取代导爆管雷管,在延时时间上具有更多的选择余地,同时更加安全。

g. BIM 技术应用:BIM 是一个富含工程信息的数据库,可以真实地提供造价管理需要的工程量信息。借助这些信息可以有效提高工作效率。

2.1.2 组织措施

施工单位在项目中标后需快速建立一个科学合理的项目部,根据工程任务的特点,组建与之相匹配的管理机构。

2.1.3 管理措施

①制定切实可行、科学合理的施工方法;②编制合理且经济的施工进度计划;③加强进度计划协调管理;④强化进度监测,定期检查实际进展情况;⑤监控施工过程中不确定因素,提高施工工程经济效益。

2.1.4 经济措施

为确保工程进度目标的实现,施工单位应编制资金和其他资源(人、材、机)需求计划,并根据工程进展情况及时做出调整。建立一定的奖励措施,激发工作人员的积极性。

2.2 引水系统施工工期优化措施

引水系统总的工作持续时间约为 46 月,比关键线路(地下厂房)总持续时间 50 月短 4 月,该线路的总时差只有 4 月,在实践中工期管理不善很有可能上升为关键线路,制约工程总进度目标的实现。因此同样从多个角度对其施工工期进行优化。

2.2.1 技术措施

a. TBM 的运用:TBM 即隧道掘进机,相较于传统钻爆法开挖工艺,采用 TBM 进行引水系统的开挖,在开挖进度、开挖质量、安全保障上均有明显优势,可以在平洞和斜井施工中作为加快施工进度、提高施工质量的技术措施。在平洞施工中主要运用于排水洞、排水廊道等平洞部位^[15],在斜井施工中目前还在试点运用阶段,主要应用于河南洛宁和湖南

平江两个项目。

b. 其他技术措施与地下厂房施工工期优化措施相同。

2.2.2 其他措施

其他措施主要包括组织措施、管理措施、经济措施等,与地下厂房施工工期相同。

3 结 语

构建了包括建筑物结构尺寸、外部环境、自然条件、管理因素及其他因素这 5 个方面共 14 个主要影响因素的主体工程施工工期影响因素指标体系,并根据影响因素层级的分析结果,建立抽水蓄能电站主体工程施工工期影响因素的 ISM,确定出地形地貌条件为影响施工工期指标的重要因素,最后从技术措施、组织措施、管理措施及经济措施等方面提出了施工工期的优化措施。

参考文献:

[1] 刘飞,车琰琰,田旭,等. 新型电力系统下的抽水蓄能电站成本疏导机制:综述与展望[J]. 上海交通大学学报, 2023,57(7):757-768. (LIU Fei, CHE Yanying, TIAN Xu, et al. Cost-sparing mechanism of pumped storage power plant under new power system: a review and outlook [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57 (7):757-768. (in Chinese))

[2] KOUKSOU T, BRUEL P, JAMILETC A, et al. Energy storage: Applications and challenges [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 120:59-80.

[3] International Hydropower Association (IHA). 2021 全球水电发展报告[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.

[4] ALBRECHT J P. A comparison of pump storage technologies[J]. Wasserwirtschaft, 2012; 102(7/8):29-34.

[5] 刘永珍,李允. 我国抽水蓄能电站的发展现状及建设特征分析[C]//2019 中国城市规划年会论文集(03 城市工程规划). 重庆:中国城市规划学会, 2019:315-322.

[6] 彭才德. 助力“碳达峰、碳中和”目标实现加快发展抽水蓄能电站[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6):4-6. (PENG Caide. Accelerating the development of pumped storage power plants to achieve the goal of “Carbon Peak and Carbon Neutrality” [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(6):4-6. (in Chinese))

[7] EVDOKIMOV I V, TSAREV R Y, YAMSKIKH T N, et al. Using PERT and Gantt charts for planning software projects on the basis of distributed digital ecosystems[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1074: 012127.

(下转第 124 页)

施工减小了最大仓面面积,仅投入 6 台碾压机和 4 台平仓机即可满足施工要求。根据拌和楼运行统计数据,单台楼最大强度 162.3 m³/h,平均每台楼强度 91 m³/h,若采用平仓铺筑法无法在设计要求覆盖时间内摊铺完成,而斜层减小了混凝土入仓强度,单层覆盖时间短,减少了资源配置,保证了层间结合质量。

e. 斜层碾压利于高温季节快速覆盖。根据智能系统监控数据,层间平均覆盖时间为 4.2 h,满足 5 h 内覆盖的设计要求,混凝土最高内部温度也满足设计要求。

4 结 语

通仓大斜层碾压施工方法是在现有拌和系统的生产能力下,能够实现高温季节大仓面连续浇筑,并保证碾压混凝土层间覆盖时间及温控满足设计要求。TB 水电工程大坝浇筑 17 仓斜层仓面,共 629 层,根据智能监控结果和现场检测数据,压实度合格率 100%,碾压遍数覆盖率 99% 以上,实现超过 10 000 m² 的 6 m 斜层仓面 10 d 一循环施工等的技术突破,充分发挥了碾压混凝土筑坝技术快速施工的优势。同时,该技术简化入仓手段、降低立模系数、动态调整仓面面积,利于高温多雨、寒冷等极端条件下施工管理,坏层覆盖时间缩短有利于温控及施工质量,仓面空间的加大及时间的延长有利于流水作

业,加快了施工进度,保障碾压混凝土层间胶结质量良好。

参考文献:

[1] 晏国顺,匡贞霖,杨光文. 智能碾压系统在 DG 水电站工程中的应用[J]. 水电与新能源, 2020,34(1):1-11. (YANG Guoshun, KUANG Zhenlin, YANG Guangwen. Application of intelligent rolling system in DG Hydropower Station Project[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(1): 1-11. (in Chinese))

[2] 郑爱武,肖海斌,迟福东,等. 高碾压混凝土坝建设管理数字化及质量智能监控系统的研发与实践[C]//中国大坝工程学会 2017 学术年会论文集. 北京: 中国大坝工程学会, 2017.

[3] 曾树全. 碾压混凝土斜层铺筑法施工技术浅谈[J]. 四川水利, 2018, 39(1): 45-48. (ZENG Shuquan. A brief discussion on the construction technology of roller-compacted concrete inclined layer paving method [J]. Sichuan Water Conservancy, 2018, 39(1): 45-48. (in Chinese))

[4] 王侃. 简述碾压混凝土筑坝施工新技术及应用实例[J]. 水利科技, 2018(4): 51-53. (WANG Kan. Brief description of new technology and application examples of RCC dam construction [J]. Water Science and Technology, 2018(4): 51-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 23 编辑: 彭桃英)

+++++

(上接第 105 页)

[8] 张玲宁,胡馨升. 甘特图:项目流程管控的技术革命[J]. 中国工业和信息化, 2021(9): 82-87. (ZHANG Lingning, HU Xinsheng. Gantt chart: a technological revolution in project process control [J]. China Industry and Information Technology, 2021(9): 82-87. (in Chinese))

[9] 刘婧. 项目进度管理方法研究:关键路径法[J]. 营销界, 2020(16): 152-154. (LIU Jing. Research on project schedule management methods: critical path method [J]. Marketing World, 2020(16): 152-154. (in Chinese))

[10] 何平,刘光明,吴强. P3 软件在抽水蓄能电站施工进度管理中的应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(6): 123-128. (HE Ping, LIU Guangming, WU Qiang. Application of P3 software in construction progress management of pumped storage power station [J]. Hydropower and pumped storage, 2017, 3(6): 123-128. (in Chinese))

[11] 周桂珠. 发展抽水蓄能电站的必要性及其建设工期分析[J]. 水利水电技术, 1994(8): 22-26. (ZHOU Guizhu. The necessity of developing pumped storage power station and its construction period analysis [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 1994(8): 22-26. (in Chinese))

[12] 龙方. 某抽水蓄能电站项目进度管理方法研究及应用[D]. 广州:华南理工大学. 2015.

[13] 许小婷,朱建君,惠胜. 建设工程施工进度延误影响因素分析及对策研究[J]. 建设科技, 2019(20): 88-92. (XU Xiaoting, ZHU Jianjun, HUI Sheng. Analysis of factors affecting construction progress delay and countermeasure research in construction project [J]. Construction Science and Technology, 2019(20): 88-92. (in Chinese))

[14] ANONDHO B, LATIEF Y, MOCHTAR K, et al. Simplified activities model for earned duration calculation [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 508(1): 012014.

[15] 叶复萌,于庆增,贺飞,等. 抽水蓄能电站地下洞室集群修建 TBM 关键技术研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(2): 14-21. (YE Fumeng, YU Qingzeng, HE Fei, et al. Research and application of key technology of TBM in underground cavern cluster construction of pumped storage power station [J]. Modern Tunneling Technology, 2023, 60(2): 14-21. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 25 编辑: 刘晓艳)