

李五勤, 吴彦, 张世伟, 等. 引调水工程融合建设抽水蓄能电站的“调水+”新模式探讨[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1184-1193, 1203. LI W Q, WU Y, ZHANG S W, et al. Discussion on the new model of "water diversion+" for the integration of water diversion projects in construction with pumped storage power stations[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1184-1193, 1203. (in Chinese)

引调水工程融合建设抽水蓄能电站的 “调水+”新模式探讨

李五勤¹, 吴彦¹, 张世伟², 左琪¹

(1. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 考虑当前发展阶段引调水工程投资回报率较低、水价普遍难以覆盖建设运营成本的实际, 提出“调水+”新模式, 以期通过多重项目功能, 发挥综合效益实现总体平衡, 解决单一引调水工程当前水价条件下市场化运作困难的问题。为科学计算“调水+”模式产生的经济效益, 主要采用单方调水成本比较法, 分别以引调水工程结合纯抽水蓄能电站以及结合非循环式抽水蓄能电站两种案例, 从年运行费、折旧费和利息支出方面测算“调水+”模式的调水成本, 与未使用“调水+”模式的引调水工程调水成本进行比较, 并结合各自特点提出水能融合应重点关注的主要条件。结果表明, 两种案例下采用“调水+”模式后, 引调水工程单方成本分别降低 0.32 元/m³ 和 0.16 元/m³。实际工程应用中“调水+”模式应当全面考虑区域抽蓄和引调水工程的建设需求、工程规模、开发时序、工程调度、运行成本等因素。研究成果可为充分发挥“调水+”模式经济效益提供新的思路。

关键词: 隧洞调水; 抽水蓄能; 水能融合模式; “调水+”; 调水成本

中图分类号: TV-9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2023.0117

我国基本水情是夏汛冬枯、北缺南丰, 水资源时空分布不均衡, 人多水少, 供需矛盾突出^[1]。进入新发展阶段, 构建新发展格局, 形成全国统一大市场和畅通的国内大循环, 促进南北方协调发展, 更需要加强水资源跨流域跨区域科学配置^[2]。2023 年 5 月, 中共中央、国务院正式印发《国家水网建设规划纲要》(以下简称《规划纲要》), 提出要完善水资源优化配置和供水保障体系, 实施一批重大引调水工程, 以南水北调工程为代表的调水工程拉开了加快国家水网建设的帷幕。

构建以风、光等新能源为主体的新型电力系统是贯彻落实国家“双碳”政策、有效支撑“双碳”目标实现的关键手段和途径。抽水蓄能是当前技术最成熟、适合规模化发展、经济合理、安全高效的储能方式^[3], 是新型电力系统不可或缺的重要组成部分, 也是实现提升风光发电质量的关键措施。随着

“双碳”目标的逐步推进、国家抽水蓄能中长期发展规划的发布、相关配套政策的逐步落地, 抽水蓄能行业出现井喷式发展, 到 2025 年和 2030 年投产总规模将分别达到 6200 万 kW 以上和 1.2 万亿 kW 左右^[4]。

《规划纲要》提出融合发展理念, 要求推进水网建设与电力等行业融合发展^[5]。隧洞是引调水工程的常见形式, 随着技术、装备的进步发展, 隧洞建设难度逐步降低, 应用更加广泛, 但仍存在环保、技术条件等约束和限制, 如能结合抽水蓄能电站协同实施, 既可节约社会资源, 也是打破行业边界、实现融合发展的创新途径。国内外已有专家学者^[6-13] 分别从概念、思路、线路方案等方面提出了两者融合创新模式, 如: 陈阳宇等^[8] 对“调水储能”的概念与内涵进行了归纳, 并认为调水储能方式融合了水资源配置与电力能源开发, 对我国水网建设、电网储能调节运行、可再生能源消纳与开发及基础设施投资

收稿日期: 2023-07-18 修回日期: 2023-11-12 网络出版时间: 2023-11-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231128.1729.008>

作者简介: 李五勤(1977—), 男, 甘肃陇南人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利水电工程管理研究。E-mail: 173481702@qq.com

通信作者: 吴彦(1984—), 女, 江西南昌人, 正高级工程师, 主要从事水利水电工程管理研究。E-mail: wuyan.1984@163.com

建设具有重大战略意义;Mahfoud等^[13]对现有抽水蓄能电站的能源来源、能源结构、电网连通性、与调水工程的融合方式等研究成果进行了综述,认为调水工程结合抽水蓄能电站建设不仅应当论证其工程建设的可行性,也应当对整体系统的经济效益进行合理评价。然而,上述相关研究仅是从理论层面提出了引调水工程结合抽水蓄能电站建设经济效益评估的必要性,未能结合我国工程建设实际,对这种新模式的经济效益进行科学计算。本文从工程投资经济角度,研究此种模式的可行性,探讨在合理的成本控制下实现工程经济效益最大化的方式,为实现引调水工程与抽水蓄能电站建设可持续融合发展提供技术支撑。

1 水能融合模式

1.1 建设模式

我国地形复杂多样,山区面积广大,引调水工程建设经常洞穿大型山体或山脉群,多数地区地质条件复杂,深埋长隧洞施工技术难度高,导致经济成本也偏高,且部分隧洞开挖可能受环保等非技术因素影响难以实施。抽水蓄能电站由于技术要求需在一定高差的山体之间建造,上水库一般新建于山体分水岭附近,下水库常利用已有天然河道拦筑而成,两者高差200~700 m,以地下输水系统联结,通过可逆式水泵水轮机组进行抽水、发电转换。

洞穿型引调水工程与抽水蓄能电站在地形条件、水力流向等方面存在诸多相似情形,两者结合建设主要有以下2种模式:第一种是与纯抽水蓄能电站结合,在流域分水岭建设电站上水库,水源区即分水岭水多的一侧建设电站下水库和地下输水系统等,形成抽水蓄能电站,在电站上水库或下水库开挖预留调水调节库容,调节库容规模根据调水频次、调水时长确定,利用电站的运行空闲时间,将暂存于上水库或下水库的水量,按时段调水要求,直接泄放至受水区,或提水至上水库后再泄放至受水区;第二种是与非循环式抽水蓄能电站结合,上水库位于两条河流的分水岭,下水库位于高差小且来水丰富的一侧,从高差小的一侧抽水后再放水至高差大的另一侧发电,形成非循环式抽水蓄能电站^[14-15]。该模式调水工程与电站完全结合,与电站抽水、放水为同方向运行,利用电站输水系统和机组,在电站运行的同时将水从水源区输送至受水区,中间或

末端通过调节水库进行水量调节,保证接受水区用水需求输送。根据地形还可在受水区低势处建设消能电站用以泄水发电和消能,在平稳调水流态的同时回收水流动能。现状模式及2种“调水+”模式原理见图1。

1.2 经济效益内涵

引调水工程和抽水蓄能电站结合建设,实现融合发展,技术可行性不是制约项目的主要因素,关键问题是投资财务平衡和经济可行性。考虑融合模式投资规模大、回收周期长的一般特点和当前发展阶段水价普遍难以覆盖建设运营成本的实际,引调水工程投资回报率较低。据此,提出“调水+”模式,以期结合调水工程协同开发抽水蓄能项目,通过多重项目功能,发挥综合效益实现总体平衡,解决单一调水工程当前水价条件下市场化运作困难的问题。

引调水工程与抽水蓄能电站统筹实施,将同时具备调水和抽蓄两大功能,在合理控制规模的前提下,由供水、抽蓄两方面的服务功能分担项目总体投资,在抽水蓄能投资及收益不变的基础上,承担调水功能的投资平摊到调水成本可能低于单独建设调水工程的调水成本,实际上相当于以更低的造价,建设同等规模的调水工程,降低了项目投资经营成本,大幅提升项目的财务能力。因此,“调水+”模式实现了水电联动,是“水能融合”的很好探索,具有较强的经济效益。本文通过案例对2种不同的“调水+”模式进行经济效益分析。

2 水能融合模式案例分析

2.1 案例1

2.1.1 项目背景

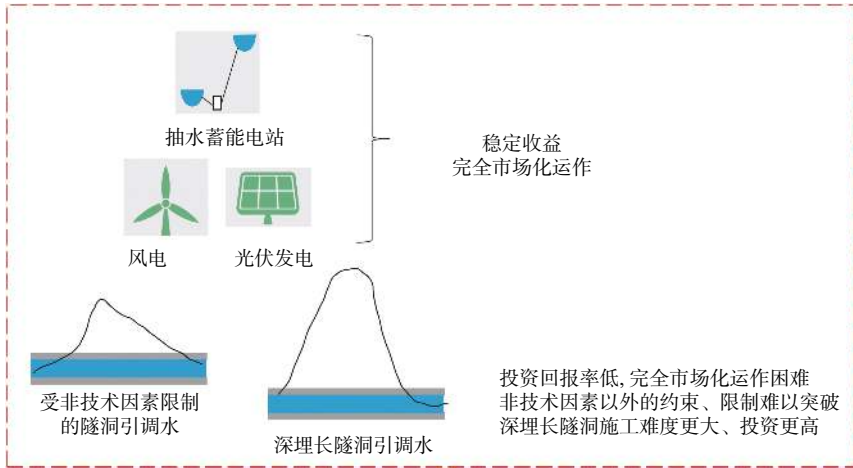
为构建稳定可靠、调度灵活、保障有力的城市水资源保障体系,某城市原规划建设一跨山体隧洞构建环型大规模水源管线,实现域外调水与本地水源的联合调度和优化配置。受城市国土空间总体规划、土地利用等多因素限制,隧洞方式不能实施。本次研究结合纯抽水蓄能电站融合模式探索建设方式,放弃原隧洞方式拟定其他工程方案。

2.1.2 工程布局

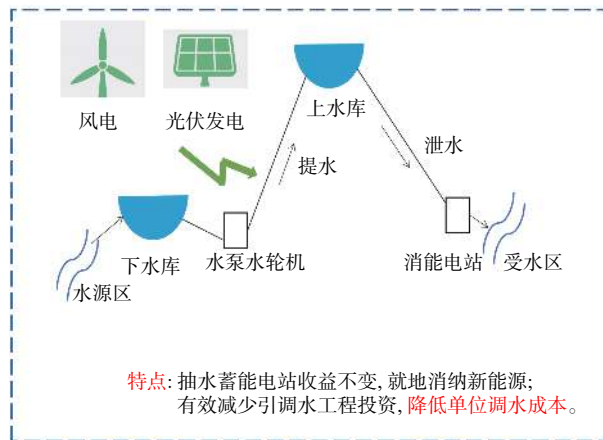
按照调水工程目标,以山体分水岭为界面,工程整体由两部分构成:一是建于分水岭西侧(水源区)的抽水蓄能电站系统,以拟规划建设水库为抽水蓄能电站下水库,向东约5 km有一支沟可拦沟筑坝形

成上水库,通过地下输水系统联结形成抽水蓄能电站;二是建于分水岭东侧(受水区)的辅助工程系统,沿东侧山体配套建设下泄管道和消能电站,与下游输水管线相接,将调水送至受水区。西侧(水源区)抽水蓄能电站按发电、储能等功能正常运行,并将

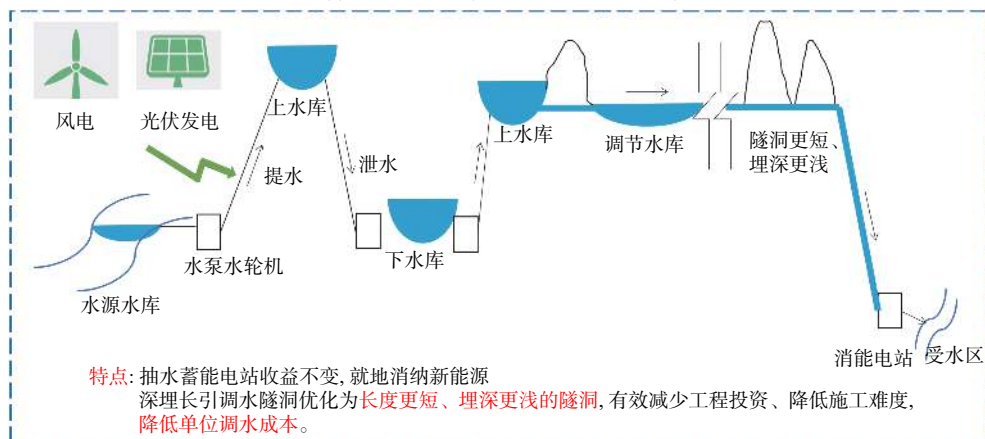
受水区所需水量从下水库输送至上水库;东侧辅助工程系统主要承接来自西侧的调水量,实现发电和泄水消能。东、西两侧系统通过抽水蓄能电站上水库作为连结工程,工程的建设实现了抽水蓄能与调水工程的充分结合。



(a) 现状模式(清洁能源项目、隧洞引调水工程分别独立投资建设运营)



(b) 调水+模式一(与纯抽水蓄能电站结合)



(c) 调水+模式二(与非循环式抽水蓄能电站结合)

图 1 现状模式及 2 种“调水+”模式原理

Fig. 1 Principle of current situation model and two "water diversion+" models

本案例仅作投资收益分析数据采用,暂不考虑建设工程外部环境敏感因素。“调水+”模式

(与纯抽水蓄能电站结合)布局见图 2。

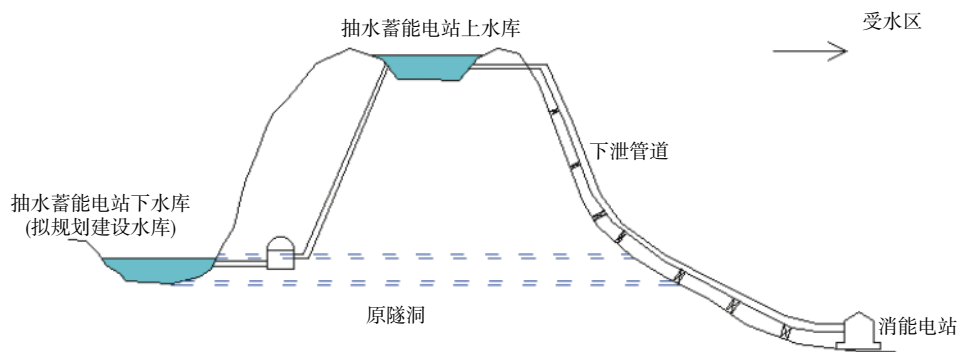


图2 “调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)布局

Fig. 2 The "water diversion+" model(Combined with pure pumped storage power station)

2.1.3 调水成本计算方法

单独建设隧洞的调水成本计算。引调水隧洞总成本费用计算公式^[15]为

$$T_{C_1} = C' + D_E + A_M + F_C \quad (1)$$

式中: T_{C_1} 为引调水隧洞工程总成本费用, 亿元; C' 为年运行费, 亿元; D_E 为折旧费, 亿元; A_M 为摊销费, 亿元; F_C 为财务费用, 亿元。

其中: 年运行费主要包含材料费、燃料及动力费、修理费、职工薪酬、管理费、库区基金、固定资产保险费和其他费用, 初步测算阶段按《水利建设项目经济评价规范》^[16]的费率取值计算; 折旧费按固定资产价值乘以综合折旧率计取, 综合折旧率取2.5%; 摊销费包括无形资产和递延资产的分期摊销, 本次计算按照固定资产投资全部形成固定资产考虑, 不计摊销费; 财务费用主要为利息支出。

引调水隧洞工程调水成本计算公式为

$$U_{C_1} = \frac{T_{C_1}}{A_{W_1}} \quad (2)$$

式中: U_{C_1} 为调水成本, 元/ m^3 ; A_{W_1} 为年调水量, 亿 m^3 。

“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)的调水成本计算。此种模式不再使用原隧洞方式, 而是直接依托纯抽水蓄能电站, 形成“调水+”工程, 通过扩挖一部分电站上水库或下水库库容及新建下泄管道、消能电站, 通过抽水蓄能电站的输水系统和机组运行, 将水输送至受水区。因此, 抽水蓄能电站因增加调水功能新增的总成本费用减去下游消能电站收入后等于分摊在调水功能上的总成本费用。其中, “调水+”工程和单独抽水蓄能电站工程总成本费用计算公式同式(1), 并同时参考《水电建设项目经济评价规范》^[17]。

“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)调水成本计算公式为

$$U_{C_2} = \frac{(T_{C_2} - T_{C_3} + E_{PEB})}{A_{W_1}} \quad (3)$$

式中: U_{C_2} 为“调水+”调水成本, 元/ m^3 ; T_{C_2} 为“调水+”工程总成本费用, 亿元; T_{C_3} 为单独抽水蓄能电站工程总成本费用, 亿元; E_{PEB} 为消能电站发电收入, 亿元。

2.1.4 效益分析

单独建设隧洞效益分析。以不存在限制性因素单独建设隧洞实现调水为对比分析方案测算投资和经营效益。结合实际地形, 隧洞最大埋深约500 m, 考虑调水量1.5亿 m^3 、长度10 km、坡降1%、糙率0.012, 初估直径约3 m, 并需在隧洞出口断面新开挖长度约4 km的引水明渠将调水输送至受水区, 初步匡算静态总投资约8亿元, 动态总投资约8.4亿元。

按资本金20%、贷款80%考虑, 调水成本 U_{C_1} 为0.54元/ m^3 。考虑调水工程准公益性特点, 也按不同财政资金出资比例分别计算调水成本 U_{C_1} , 结果见表1。

“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)效益分析。结合区域1:10 000地形图测算, 抽水蓄能电站可装机800 MW, 平均水头434 m, 距高比约12, 上水库发电库容467万 m^3 , 下水库利用拟规划建设水库, 结合天然地形条件、建设条件及地方工程造价水平, 初步匡算静态总投资约48亿元, 动态总投资约53亿元。

若在抽水蓄能电站的基础上叠加调水功能, 主要投资增加两部分: 一是因调水功能新增投资, 按年调水1.5亿 m^3 计, 上水库还需扩挖约40万 m^3 , 用以暂存调水时段内调节水量, 考虑土石方开挖、施工辅助、独立费用等, 静态总投资增加约1亿元; 二是下泄管道和消能电站新增投资, 按管道下泄流量6.2 m^3/s 、水头470 m、机组综合效率系数8.4计, 初估消能电站可装机约32 MW, 下泄管道直径约2.5 m,

则增加下泄管道和消能电站静态总投资约 4 亿元。 态总投资约 52 亿元, 动态总投资约 58 亿元。 合计上述“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)静

表 1 隧洞调水工程调水成本计算结果

Tab. 1 The water transfer cost for tunnel water diversion projects

项目	财政资金出资比例			
	0	20%	50%	70%
动态总投资/万元	84 181	83 345	82 091	81 254
总成本费用/万元	年运行费	3 645	3 645	3 645
	折旧费	2 105	1 684	1 052
	财务费用(利息支出)	2 344	1 875	1 172
	小计	8 094	7 204	5 869
调水成本 U_{C_1} /(元· m^3)	0.54	0.48	0.39	0.33

注: 计算期共 43 年, 其中, 建设期为 3 年, 运行期为 40 年; 折旧按平均年限法, 以 40 年计, 其中财政资金不计提折旧; 利息支出采用 25 年贷款期平均值, 贷款利率长贷采用 4.30%、短贷采用 3.65%。

对比单独抽水蓄能电站与“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)的总成本费用, 增加最多的是为实现调水功能产生的提水动力费, 经消能电站发

电效益消减部分成本后, 总成本费用为 3 236 万元, 分摊至 1.5 亿 m^3 的调水量后, 相当于利用“调水+”工程后, 单方调水成本 U_{C_2} 仅为 0.22 元。结果见表 2。

表 2 “调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)调水成本计算结果

Tab. 2 The water transfer cost for "water diversion +" model(Combined with pure pumped storage power station)

项目	单独抽水蓄能电站工程	“调水+”工程
动态总投资/万元	532 918	577 188
总成本费用/万元	年运行费	68 139
	折旧费	13 156
	财务费用(利息支出)	12 702
	小计	93 997
增加的总成本费用/万元		8 236
电站发电收入/万元		5 000
实际增加总成本费用/万元		3 236
调水成本 U_{C_2} /(元· m^3)		0.22

注: 计算期共 47 年, 其中建设期为 7 年, 运行期为 40 年; 折旧按平均年限法, 以 40 年计, 其中财政资金不计提折旧; 利息支出采用 25 年贷款期平均值, 贷款利率长贷采用 4.30%、短贷采用 3.65%; 对比年运行费, “调水+”工程增加的提水动力费按年提水 1.5 亿 m^3 、提水高程 434 m 计, 耗电量约 22 175 万 $kW\cdot h$, 按地区电网低谷电价 0.195 7 元/($kW\cdot h$)考虑, 计算得出年提水动力费为 4 340 万元; 增设的消能电站年运行费约 1 145 万元; 对于“调水+”工程, 增设的消能电站年发电量约 1.6 亿 $kW\cdot h$, 地区小水电上网电价为 0.303 元/($kW\cdot h$), 计算消能电站年发电效益为 5 000 万元。

对比分析。从经济效益来看, 按照“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)统筹建设引调水工程和抽水蓄能电站, 分摊于调水功能的调水成本 U_{C_2} 为 0.22 元/ m^3 , 与单独建设隧洞形式的引调水工程调水成本 U_{C_1} (0.54 元/ m^3)相比, 调水成本最大可节约 0.32 元/ m^3 , 最高可降低成本 59.2%。同时, 抽水蓄能电站相关设施在兼顾调水功能后, 增加的工程投资占比约 8.3%, 折旧利息支出仅增加约 8%。总体看, 该模式具有较强的经济性。从社会效益看, 相

比单独建设隧洞形式的引调水工程, 按照“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)统筹建设, 在与抽水蓄能电站同等投资下, 可实现双重功能, 既节约了土地、人力、物质等资源投入, 又降低了调水成本, 减轻国家财政负担和受水区承受压力, 社会效益显著。

2.1.5 存在问题

引调水工程规模受限。抽水蓄能电站一般装机规模为 800~1 400 MW, 若引调水隧洞规模过大, 增

加抽水蓄能电站上水库或下水库用以暂存时段调蓄的库容,以及下泄管道的规模等其他工程量,使得调水功能承担的投资将更高,折合调水成本可能不再低于单独建设调水隧洞,在电站地下输水系统不变的情况下,会增加机组运行时间,有可能影响到抽蓄电站自身运行。因此与纯抽水蓄能结合建设引调水工程,工程规模存在相互限制。

需额外新增提水成本。通过蓄能机组将受水区用水提至数百米高程,相比于隧洞自流工程将耗费大量电力,增加运行成本,因此需研究采用多种降低成本的方法,如增设消能电站、灵活采用新能源政策等,有效降低运行成本。

建设周期可能不匹配。引水隧洞工程受建设规模、地质等因素影响,其建设周期具有不确定性,而抽水蓄能电站建设周期一般为7年左右,因此两项工程需在前期工作、施工建设等方面进行多次协调,否则难以发挥最优综合效益。

2.2 案例 2

2.2.1 项目背景

在西北某风光资源富集地区,规划通过 100 km 隧洞引水至受水区,隧洞埋深约达 1 000 m,地质条件比较复杂,施工技术难度较大。受湖南慈利县赵家垭跨流域非循环式抽水蓄能电站启发^[18-19],为降低隧洞工程难度和造价,结合地区消纳新能源、保障电网供电安全、抽水蓄能电站需求突出的特点,

探索分析非循环式抽水蓄能电站与调水工程结合的经济可行性。初步计划从水源区至受水区沿途寻找合适地形建设 2 个非循环式抽水蓄能电站,将调水与电站结合运行,即利用抽水蓄能电站机组从河道提水至抽水蓄能电站上水库,水量不在抽水蓄能电站上水库和下水库之间循环使用,而通过新增输水系统、可逆式机组及厂房,以非循环式抽水蓄能电站的运行形式,结合新建隧洞、调节水库共同将水从水源区输送至受水区。同时,由于水位的抬高,改变了原引水隧洞位置,不但缩短原调水隧洞的长度,还可减小原引水隧洞数百米埋深,大幅降低工程实施难度。

2.2.2 工程布局

工程主要由 3 部分构成:一是建于隧洞沿途的两个非循环式抽水蓄能电站,主要包括 2 个上水库、1 个下水库、4 条输水系统、4 台可逆式水泵水轮机及配套厂房等设施;二是优化调水路线后,减少长度和降低埋深后的新引水隧洞;三是位于抽水蓄能电站末端与受水区之间的调节水库。根据调水目标,水源区利用可逆式机组抽水和泄水,将水通过 2 个非循环式抽水蓄能电站和新引水隧洞联合向受水区方向输送,在电站末端与受水区之间,需新建调节水库进行流量调节,根据调水需求再送至受水区。“调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)布局见图 3。

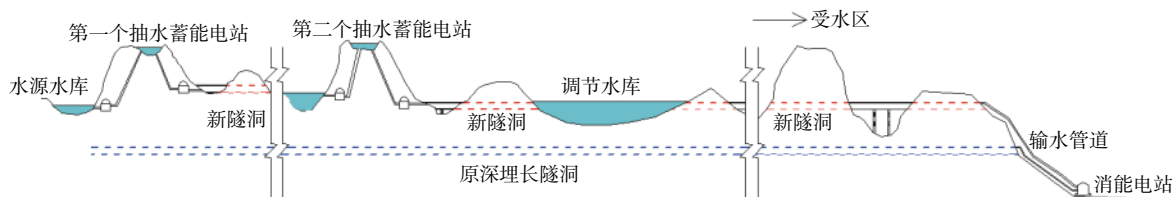


图 3 “调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)布局

Fig. 3 Illustration of the "water diversion+" model (Combined with non-cycle pumped storage power stations)

2.2.3 调水成本计算方法

单独建设隧洞的成本计算。单独建设隧洞的调水成本 U_{C_3} 计算公式同式(1)和式(2)。

“调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)的调水成本计算。采用隧洞与非循环式抽水蓄能电站结合的方式,总成本费用主要由 2 部分构成:一是新增非循环式抽水蓄能电站和调节水库的工程总成本费用;二是有效降低原隧洞埋深,相应减少原隧洞长度后,新开挖隧洞工程总成本费用。计算公式为

$$U_{C_4} = \frac{T_{C_4} + T_{C_5}}{A_{W_2}} \quad (4)$$

式中: U_{C_4} 为“调水+”工程调水成本,元/ m^3 ; T_{C_4} 为非循环式抽水蓄能电站和调节水库的工程总成本费用,亿元; T_{C_5} 为新开挖隧洞工程总成本费用,亿元; A_{W_2} 为年调水量,亿 m^3 。

2.2.4 效益分析

单独建设隧洞效益分析。本案例拟定受水区每年需引调水量约 10 亿 m^3 ,隧洞平均埋深约 1 000 m 测算。造价暂按 1.5 亿元/km 计,隧洞长度为 100 km,初步匡算静态总投资约 150 亿元,动态总投资约

178 亿元。

按资本金 20%、贷款 80% 考虑, U_{C_3} 为 1.23 元/ m^3 。

考虑调水工程准公益性特点, 按不同财政资金出资比例分别计算调水成本, 结果见表 3。

表 3 深埋长隧洞调水工程成本计算结果

Tab. 3 The water transfer cost for deep-buried long tunnel water diversion projects

项目	财政资金出资比例			
	0	20%	50%	70%
动态总投资/万元	1 783 677	1 426 942	891 839	428 082
总成本费用/万元	年运行费	30 650	26 150	19 400
	折旧费	44 592	35 674	22 296
	财务费用(利息支出)	49 668	39 734	24 834
	小计	124 910	101 558	66 530
调水成本 U_{C_3} /(元· m^3)	1.23	1.00	0.46	0.28

注: 计算期共 47 年, 其中, 建设期为 7 年, 运行期为 40 年; 折旧费按平均年限法, 以 40 年计, 其中财政资金不计提折旧; 利息支出采用 25 年贷款期平均值, 贷款利率长贷采用 4.30%、短贷采用 3.65%。

“调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)效益分析。该模式的工程投资包括以下 2 部分。

(1) 非循环式抽水蓄能电站和调节水库。抽水蓄能电站平均水头按 500 m 测算, 需抽水蓄能电站装机 600 MW, 可满足受水区年引调水量 10 亿 m^3 的需求。隧洞沿线建设 2 个非循环式抽水蓄能电站, 由于目前非循环式抽水蓄能电站可参考的静态投资较少, 因此本次非循环式抽水蓄能电站的静态投资初步匡算在参考纯抽水蓄能电站的基础上, 考虑新增其他设施后的投资合并计算, 即按 600 MW 及以下的纯抽水蓄能电站静态投资约 8 000 元/($kW \cdot h$) 计, 2 个装机规模 600 MW 的纯抽水蓄能电站静态总投资约 48 亿元, 考虑 1 个非循环式抽水蓄能电站比纯抽水蓄能需多建设 1 条输水系统、1 套可逆式机组及厂房设施, 按照图 3 的布局, 2 个非循环式抽水蓄能电站比单独建设 2 个纯抽水蓄能电站多增加 2 条输水系统和 2 套可逆式机组及厂房设施, 初步匡算 2 个纯抽水蓄能电站静态总投资约 96 亿元, 动态总投资约 107 亿元, 相应 2 个非循环式抽水蓄能电站静态总投资约 115 亿元。

考虑到抽水蓄能机组短时大流量输送的特点, 而引调水工程一日内输水时间较长, 约 15~20 h, 需要在抽水蓄能电站末端与受水区之间建设一个调节水库, 用于暂存因电站泄水与受水区用水流量差产生的水量, 估算水库调节库容规模约 8 000 万 m^3 , 初步匡算水库静态总投资约 17 亿元。

综合上述建设任务, “调水+”工程静态总投资约 132 亿元, 动态总投资约 165 亿元。考虑工程造

价和调水为主调度原则, 综合测算, 借鉴非循环抽水蓄能电站建设工程的调水工程比单独建设纯抽水蓄能电站的年总成本费用增加了 31 081 万元, 折合调水成本为 0.31 元/ m^3 。

(2) 新引水隧洞工程。利用抽水蓄能电站机组抬高水头输水, 改变了原引水隧洞位置, 可有效降低原隧洞埋深, 相应减少原隧洞长度。本案例按照较为保守的原则假定减少 30% 的隧洞长度, 降低埋深约 500 m, 综合测算可将引水隧洞建设静态投资由 150 亿元降低到 91 亿元, 动态总投资约 108 亿元。按此测算, 新引水隧洞的调水成本为 0.76 元/ m^3 。

综上, 本案例“调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)的调水成本 U_{C_3} 合计约为 1.07 元/ m^3 。结果见表 4。

对比分析: 从经济效益来看, 按照“调水+”模式统筹建设隧洞工程和非循环式抽水蓄能电站, 将工程相对纯抽水蓄能电站新增的所有投资都分摊至调水功能, 测算的调水成本 U_{C_3} 为 1.07 元/ m^3 , 与单独建设深埋长隧洞调水成本 U_{C_3} 1.23 元/ m^3 相比, 最多可节约 0.16 元/ m^3 , 最高可降低成本 13%, 也具有较强的经济性; 从社会效益来看, 相比于单独建设深埋长隧洞调水工程, “调水+”模式总体上降低了调水成本, 且保障了抽水蓄能电站效益指标不降低, 有效节约了资源投入, 社会效益显著。

2.2.5 存在问题

对建设条件要求较高。一是受水区需要找到合适地形, 能够建设连续 2~3 个抽水蓄能电站, 将水源区的水从低处逐级向上提, 否则只建一级抽水蓄

能电站,难以凸显模式的优越性,二是更适用于长距离、深埋隧洞,将其优化为浅层且距离更短的隧

洞,有效降低施工难度和投资,才能凸显出此种模式的优势。

表4 “调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)调水成本

Tab. 4 The water transfer cost for "water diversion +" model(Combined with non-cycle pumped storage power stations)

项目	单独建设 纯抽水蓄能	“调水+”	
		非循环式抽水蓄能电 站+调节水库	新引水隧洞
动态总投资/万元	1 065 835	1 646 058	1 082 098
总成本费用/万元	年运行费	97 712	20 170
	折旧费	26 313	27 052
	财务费用(利息支出)	25 404	30 133
	小计	149 429	77 355
增加的总成本费用/万元		31 081	
独立计算调水成本/(元·m ³)		0.31	0.76
调水成本 U_{C_4} /(元·m ³)		1.07	

注:计算期共47年,其中,建设期为7年,运行期为40年;折旧按平均年限法,以40年计,其中财政资金不计提折旧;利息支出采用25年贷款期平均值,贷款利率长贷采用4.30%、短贷采用3.65%。

需额外新建调节水库。此模式在优先满足抽水蓄能电站功能的基础上,顺势将水调入至受水区,但由于抽水蓄能电站运行时段、水量与受水区的用水时段、水量均不匹配,因此需在最后一级抽水蓄电站末端与受水区之间新建一个调节水库,用以调节水量变化、暂存额外水量,调节水库的库容要根据抽水蓄能电站规模、受水区调水量进行合理优化,否则将增大投资,影响水价。

3 需要关注的条件

是否适合按照“调水+”模式建设抽水蓄能电站,要结合地区条件、工程规模等因素确定,需要关注如下5个方面的条件。

一是区域抽蓄和引调水工程均有建设需求。青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙古、新疆等省(自治区)是我国加快推进“三地一区”大型风光基地主要布局区域^[20-22],也是抽水蓄能建设空间规模需求较大的区域,同时这些地区工程性缺水和资源性缺水明显,引调水需求迫切,结合适宜地形建设“调水+抽水蓄能”工程,可以满足区域内外引调水和储能双向需求,并利用抽水蓄能电站积极消纳地方风电、光伏富余电量,建设“风-光-蓄”一体化基地。

二是工程规模要相对适宜。与单独建设抽水蓄能电站相比,案例1“调水+”模式(与纯抽水蓄能电站结合)增加的投资主要是上水库或下水库扩容、

填筑等工程量,案例2“调水+”模式(与非循环式抽水蓄能电站结合)增加的投资主要是新增的输水系统、可逆式机组及配套厂房设施、调节水库,因此引调水工程是否能结合抽水蓄能电站经济合理建设,需要考虑两者规模是否适宜。按照案例1工程建设条件初步测算,若建设投资增加占原动态总投资26%以上,整体工程的建设运营将不再经济,该模式不再具有竞争力。

三是开发时序要相互匹配。同一地区抽水蓄能电站和引调水工程的规划水平年可能不同,一般装机1 200 MW的抽水蓄能电站建设周期约7年,引调水工程的建设周期受工程规模、地质条件、财政资金等较多因素影响,短至2~3年,长则10年,作为一体化工程建设需要充分做好前期规划设计、政府部门审批和实施主体的协同。近两年抽水蓄能在全中国范围内加快实施,规模和形式也在逐步变化,不再拘泥于普遍装机1 200 MW左右和地下厂房型,300 MW以下中小型、半地下式厂房等灵活布局、投资少、见效快的抽水蓄能电站,装机规模达2 400 MW的抽水蓄能电站也都在研究推进当中^[23-24],随着技术的发展,电站建设更加灵活可控,与引调水工程开发更易匹配。

四是工程调度要统筹协调。抽水蓄能电站重要功能之一是为电网安全稳定运行提供保障,包括调峰、调频、调相、紧急事故备用、黑启动等,要求运

行灵活,具备快速响应电网调度的能力,如在案例 1 中,拟规划建设水库在不承担防洪功能前提下,实际运行要将保障电网安全为首要功能,引调水时段、频率等可能会受到影响,因此工程规划设计阶段需要提前研究引调水与电站联合调度方式,最大程度减少相互影响和实现最优化联合调度。

五是提水成本需合理控制。案例 1 中引调水工程的提水用电成本是运行成本增加的主要部分,案例 2 中引调水通过机组提水与抽水蓄能电站抽水运行完全重合而不需额外消耗电量,因此“调水+”工程要充分控制好提水成本。分析案例 1 的模式,从降本层面看,如在青海、甘肃等“三地一区”大型风光基地区域建设“调水+”工程,利用抽水蓄能电站积极消纳当地风电、光伏富余电量,可有效降低提水用电成本;考虑选择在夜间低谷电价时段或用水低峰期抽水(夜间低谷电价可低至平段电价的 30%左右),以及探索分布式发电市场化交易方式^[25](俗称“隔墙售电”,2017 年国家发改委、能源局已出台相关政策^[26],江苏已有部分试点项目落地^[27])等降低成本。从增效层面看,建议结合地形再增设一个消能电站,在向受水区引调水的同时发电,若高差足够,可以大幅降低提水用电成本。

4 结论

本文提出了将引调水工程分别与纯抽水蓄能电站和非循环式抽水蓄能电站相结合的“调水+”建设模式,并分别结合 2 种案例,从投资经济效益角度,对比分析了隧洞工程和“调水+”工程的调水成本,主要结论如下:

引调水工程与纯抽水蓄能电站结合的“调水+”模式调水成本为 0.22 元/m³,与采用单一引调水工程相比,最大可节约 0.32 元/m³,可降低成本 59.2%。

引调水工程与与非循环式抽水蓄能电站结合的“调水+”模式调水成本为 1.07 元/m³,与单独建设深埋长隧洞引水相比,最大可节约 0.16 元/m³,降低成本 13%。

“调水+”模式可降低单独建设引调水隧洞工程的调水成本,有效提升工程经济效益,同时还可节省土地等资源,为投资人创造更多利润空间,实现政府和市场、水利和电力行业的共赢、多赢。

参考文献:

[1] 刘青山. 加快推进国家水网建设 提升水资源保障能力: 专访中国南水北调集团董事长蒋旭光[J]. 国

报告, 2023(3): 79-83.

- [2] 郇建强, 杨益, 何君, 等. 科学调水的内涵及实现途径初探[J]. 水利规划与设计, 2020(5): 1-4.
- [3] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4, 104.
- [4] 丁怡婷. 抽水蓄能中长期发展规划发布[N]. 人民日报, 2021-09-10(14). DOI: 10.28655/n.cnki.nrmrb.2021.009720
- [5] 国家水网建设规划纲要[J]. 中国水利, 2023(11): 1-7.
- [6] 谷兆祺, 马吉明. 抽水蓄能方式的南水北调大宁河济汉方案[J]. 水力发电学报, 2002(S1): 4-12.
- [7] 李肇桀, 张旺, 姜斌, 等. 利用引调水储能促进碳达峰碳中和目标实现的建议[J]. 水利发展研究, 2021, 21(12): 17-18. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2021.12.005.
- [8] 陈阳宇, 鞠茂森, 程敏, 等. 调水储能: 跨流域水资源配置新思路[J]. 中国水利, 2020(1): 22-24.
- [9] 闫大鹏, 刘红平, 李福生. 小江调水工程与抽水蓄能电站结合可能性研究[J]. 人民黄河, 2007(7): 63-64.
- [10] 刘泽洪, 梁旭明, 周原冰, 等. 基于新型抽蓄的绿色蓄能调水工程研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(6): 525-534. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.06.001.
- [11] 谢遵党, 唐梅英, 王建利, 等. 双碳目标下黄河流域水土风光资源一体化开发模式研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(5): 5-9, 14.
- [12] 刘泽洪. 新型抽水蓄能与西部调水[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023, 03.
- [13] MAHFOUD R J, ALKAYEM N F, ZHANG Y, et al. Optimal operation of pumped hydro storage-based energy systems: A compendium of current challenges and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 178: 113267. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113267.
- [14] 张克诚. 抽水蓄能电站水能设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 18-19.
- [15] 王璐琰. 浅析抽水蓄能发电[J]. *科技与企业*, 2016(7): 117. DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2016.07.104.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水利建设项目经济评价规范: SL 72—2013[S]. 北京: 水利电力出版社.
- [17] 国家能源局. 水电建设项目经济评价规范: DL/T 5441—2010[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [18] 陈金安, 孟有榕, 王人寿. 我国第一座跨流域抽水蓄能电站运行情况介绍[J]. 水力发电, 1992(1): 61-63.
- [19] 魏再勋. 建设跨流域抽水蓄能电站的探讨[J]. 水利经济, 1993(2): 46-48.
- [20] 国家发展改革委 国家能源局: 《“十四五”现代能源体系规划》印发[J]. 华北电业, 2022(3): 4.

- [21] 朝暮. “沙戈荒”风电光伏基地: 让沙海变“蓝海”[J]. 科学之友, 2023(8): 10-11.
- [22] 罗梅健. 大型风电光伏基地开发政策形势分析及有关建议[J]. 水力发电, 2023, 49(5): 1-3.
- [23] 于倩倩, 杨德权, 徐玲君, 等. 中小型抽水蓄能电站合理发展探讨[J]. 水力发电, 2021, 47(8): 94-98.
- [24] 蒋杏芬. 浙江省中小型抽水蓄能电站发展前景[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设论文集2012. 中国电力出版社, 2012: 94-96.
- [25] 刘秋华, 杨圣城, 刘鑫. 分布式储能商业模式分析与展望[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(1): 67-73.
- [26] 国家发展改革委 国家能源局印发. 《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-11/14/content_5239535.htm, 2017-11-24.
- [27] 本刊讯. 全国首家“隔墙售电”光伏试点项目建成投运[J]. 电器工业, 2021(2): 3.

Discussion on the new model of "water diversion+" for the integration of water diversion projects in construction with pumped storage power stations

LI Wuqin¹, WU Yan¹, ZHANG Shiwei², ZUO Qi¹

(1. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The water diversion project combined with the construction of pumped storage power stations can achieve multiple functions such as water diversion, energy storage and power generation, and new energy consumption. It is a new model of "water diversion+" exploring the integration of water and energy. Most domestic scholars and experts have proposed innovative models for the integration of the two in terms of concepts, ideas, and route plans, however, a feasible business model is the important foundation for achieving the integrated development of different industries. Therefore, the feasibility of this model is further studied from the perspective of the engineering investment economy. Considering the low return on investment of water diversion projects and the fact that water prices are generally difficult to cover construction and operation costs at the current development stage, the "water diversion+" business model is proposed, aiming to achieve overall balance through multiple project functions and comprehensive benefits and solve the problem of difficult market-oriented operation under the current water price conditions of a single water diversion project.

In order to scientifically calculate the economic benefits generated by the new mode of "water diversion+", the method of comparing the cost of single side water division was adopted. Two engineering cases are used, namely, the combination of water division projects with pure pumped storage power stations and non-circulating pumped storage power stations, to calculate the cost of single side water division under the "water diversion+" model from the aspects of annual operating costs, depreciation costs, and interest expenses, comparing the cost of water diversion projects without the use of the "water diversion+" model to obtain comprehensive benefits and propose the main conditions that should be focused on for water energy integration based on their respective characteristics.

The calculation results show that after adopting the "water diversion+" model in two different engineering cases, compared to the construction of separate water diversion projects and pumped storage power stations, the comprehensive investment and operating costs of the "water division+" project have been reduced. On the basis of not reducing the self-benefits of the pumped storage power station, the cost of sharing the single water division function has been reduced by 0.32 yuan/m³ and 0.16 yuan/m³, respectively, compared to the construction of separate water diversion projects, The overall balance of comprehensive benefits has been achieved.

(下转第 1203 页)

the test section, and five typical bridges of the test section were selected as the test objects. The numerical simulation and prototype observation test research methods were used to design and study the application effect of the bridge pier guide dome.

The basic type of the guide dome was designed according to the hydraulic theory. The 3D hydrodynamic model parameters were calibrated using the prototype observation data of the unguided dome. Meanwhile, the schemes of different guide dome sizes were further compared and selected by numerical simulation, and the optimal scheme was obtained. Through the prototype test, the optimization of the flow pattern and the improvement of the water transport capacity of the test section of five bridges after installation of the guide domes were analyzed and verified.

The results showed that after the installation of the guide dome, the flow pattern near the pier of the five bridges was obviously improved, the head loss of the test section was reduced by around 64.4%, the comprehensive roughness was reduced by around 8.0%, and the flow capacity of the test section was increased by around 8.71%, which further verified the reliability of the numerical simulation.

The method of bridge pier guide dome design and prototype observation can also be effectively applied to other similar long-distance open channel water transmission projects.

Key words: water transmission channel; low pattern optimization; guide dome; prototype observation test research method

(上接第 1193 页)

According to the research results, the water diversion project and pumped storage power station are implemented in a coordinated manner. The project has two major functions: water diversion and energy storage. Under the premise of reasonable control of scale, the overall investment of the project is shared by the service functions of water supply and energy storage. The cost of evenly spreading to a single cubic meter of water volume under certain conditions will be lower than the cost of constructing a separate water diversion project. In fact, it is equivalent to constructing a water diversion project of the same scale at a lower cost, reducing project investment and operating costs, and significantly enhancing the financial capabilities of the project. There are certain conditions for using the "water diversion+" model, and comprehensive consideration should be given to factors such as the construction needs, project scale, development timing, project scheduling, and operating costs of regional pumping and water diversion projects. At the same time, research results can provide new ideas for fully leveraging the economic benefits of the "water diversion+" model.

Key words: tunnel water diversion; pumped storage power station; water energy integration mode; "water diversion +"; cost of water diversion