

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221654

# 基于卫星遥感地形数据的抽水蓄能电站 上下水库选址方法研究

费香泽, 顾克, 刘佳龙, 张琰

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 抽水蓄能电站是目前电力系统中最为成熟的大规模储能工具, 具有灵活的调峰、调频性能, 在以新能源为主体的新型电力系统中具有重要的作用。在抽水蓄能电站选址过程中, 上下水库的选择是决定其蓄能能力和投资效益的关键因素, 针对传统的人工现场勘察选址方法存在工作量大、效率低和容易漏点等问题, 提出了一种基于卫星遥感地形数据的抽水蓄能电站上下水库选址方法, 并通过浙江省缙云抽水蓄能电站进行试验验证。结果表明, 该方法利用卫星遥感地形数据和计算智能技术可高效筛选出目标区域内可能的上下水库建设区域, 极大提高了选址工作的效率, 显示出卫星遥感在抽水蓄能电站选址中具有巨大的应用潜力。

**关键词:** 抽水蓄能; 卫星遥感地形数据; DEM; 上下水库; 工程选址

**中图分类号:** TV743

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)02-0079-04

## 1 引言

抽水蓄能电站是目前电力系统中最为成熟的大规模储能工具, 具有调峰、填谷、调频、调相和事故备用等多种作用, 在以新能源为主体的新型电力系统中, 是平抑新能源的随机性和波动性、提高电网调节能力的重要手段<sup>[1]</sup>, 对实现碳达峰、碳中和具有重要作用。抽水蓄能电站以水为储能介质, 利用两个海拔高低不同的水库实现水的势能与电能的循环转换, 在电网负荷低谷期间, 由下水库利用电力将水抽到上水库实现蓄能; 在电网负荷高峰期间, 通过上水库向下水库放水驱动发电设备发电, 将势能转换为电能。因此, 在抽水蓄能电站选址过程中, 上下水库位置的选择是抽水蓄能电站的蓄能能力和投资成本的重要影响因素。现有抽水蓄能电站选址大多依据地形图并结合人工核查的方式进行, 该方法需要设计人员具有多年的选址经验积累, 而抽水蓄能电站大多位于人烟稀少的山区, 交通不便、通视条件差, 且因地形起伏因素和地表植被附着物的影响现场勘查范围受限, 工作量大, 选址效率较低<sup>[2]</sup>。卫星遥感技术以其高分辨率、大范围、周期性观测等特点及多维

度信息提取能力, 在区域性工程勘察方面具有重要的应用优势<sup>[3]</sup>, 通过卫星不同角度的摄影, 可高效地获得地面目标区域大范围的地形起伏信息, 无需额外的野外勘测、数据采集等费用, 具有很高的经济价值, 可为相关工程选址提供依据。为此, 本文开展了基于卫星遥感地形数据的抽水蓄能电站上下水库选址方法的研究, 将抽水蓄能电站上下水库地形特征与地形数据相结合, 极大地提升了抽水蓄能电站备选上下水库选址效率, 对拓展卫星遥感技术在抽水蓄能电站建设中的应用具有重要意义。

## 2 总体方案设计

### 2.1 卫星遥感地形数据

目前常用的光学卫星遥感摄影测量主要包括单线阵、双线阵和三线阵3种机制<sup>[4]</sup>。其中, 资源三号(ZY-3)卫星是我国首颗民用高分辨率光学传输型立体测绘卫星, 搭载了一台地面分辨率2.1 m的正视全色TDI CCD相机、两台地面分辨率3.6 m的前视和后视全色TDI CCD相机、一台地面分辨率5.8 m的正视多光谱相机, 能够提供丰富的三维几何信息, 经过RPC模型平差后所

收稿日期: 2022-08-11, 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 中国电力科学研究院有限公司创新基金项目(GC83-21-010)

作者简介: 费香泽(1977-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为电力卫星遥感与水工结构安全监测, E-mail: fxz@

提取的 DEM 定位精度在山地区域平面精度为 2.87 m,高程精度为 1.39 m,能够满足 1 : 50 000 比例尺地形图的测图标准要求<sup>[5]</sup>。基于资源三号立体影像数据获取数字表面模型示意图见图 1。



数字表面模型(DSM)是以规则网格表达地表起伏形态的数据集,一般以晕渲图方式表达,通过不同色带显示一个区域地形地势的变化,使其具有立体感。上图是陕西境内黄河流域 DSM 晕渲图。  
产品等级:PSB 获取时间:2020年8月2日 黄河 格网大小:5 m

图 1 资源三号光学立体影像提取数字表面模型示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of 3D image extraction digital surface model by ZY-3

近年来,全球范围覆盖的数字高程模型迅猛发展,比较具有代表性的卫星遥感地形数据包括美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)发布的 SRTM 地形数据、日本 MET 和美国 NASA 联合发布的 ASTER GDEM 地形数据、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发布的 AW3D30 地形数据<sup>[6]</sup>。其中,AW3D30 同时适用于地势起伏大和地势起伏小区域的数据源,能够准确描述河口区域水系结构关系,在汇流分析和通视性分析等水文应用中建议采用 AW3D30 数据<sup>[7]</sup>。

### 2.2 抽水蓄能电站上下水库地形特性分析

抽水蓄能电站选址的基本要求需综合考虑电站功能、建设条件和工程投资,影响因素包括地理位置、地形条件、地质条件、水源条件、征地移民、环水保及施工条件,其中上下水库的选择对抽水蓄能电站的经济性影响最大,需具有足够的库容和合适的高差以保证有充足的储能规模。

(1)为保证抽水蓄能电站具有基本的成库条件和足够的蓄水能力,上下水库地形构成的基本特点是库心对应的库区内部区域地形平顺,且高度低于库周区域,整个库区呈明显的凹型。从地形特性角度分析,低坡度区域可对应平坦的库心区域,高坡度区域可对应水库库心向水库库围过渡区域,从而快速获得可能的底部平坦的水库库心区域,作为备选水库提取的基准。同时,为减少水库开挖和筑坝的工程量,自然地形形成的蓄水区域外围应包含尽量少的缺口区域,具有良好的

封闭性。其原理见图 2。

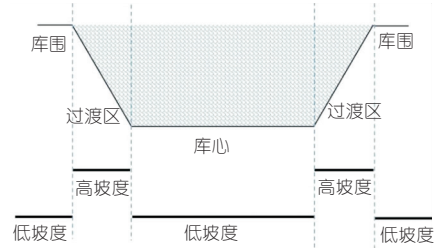


图 2 水库坡度分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reservoir slope distribution

(2)上下水库之间的垂直高差和水平距离要求比较合适,一般采用落差和距高比来评价。按目前国内主流机型条件,上下水库落差基本在 300~700 m。距高比是指蓄能电站上、下水库水平距离与垂直高度的比值,距高比小表明连接上下库的输水系统短,可节省工程投资,水头损失也小,但若距高比过小,说明上下库之间地形陡峭,不利于输水系统和地下主厂房的布置,一般距高比在 3~10 之间。从三维地形角度分析其空间位置关系的基本特点,上下水库作为抽水蓄能电站相互连接的两个部分,在空间上具有邻接关系,且具有一定的高度差,应呈现一定的空间倾斜角度,连接部分的山体具备足够的覆盖层厚度,以便于输水隧洞及发电厂房的布置。其原理示意图图 3。

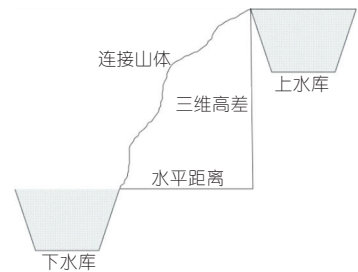


图 3 上下水库三维空间位置示意图

Fig. 3 Three-dimensional location diagram of upper and lower reservoirs

### 2.3 上下水库卫星遥感选址技术方案设计

基于对抽水蓄能电站上下水库地形特点和空间位置关系的分析,以卫星遥感获取的大区域 DEM 地形数据为基础,通过计算智能手段,依据上下水库具有的特性,自动获取备选的上下水库区域,具体设计方案流程见图 4。

抽水蓄能电站上下水库选址的卫星遥感影像数据处理步骤如下。

**步骤 1** 基于坡度信息,通过设置低坡度范围,初选库心区域  $C_0$ 。结合上下水库最低高差要求,以评估区域最低海拔为基准,设置上水库库心最低海拔要求。一般来说,下水库位于谷底,水库范围可相对较大,地形坡度可相对较缓,而上水库

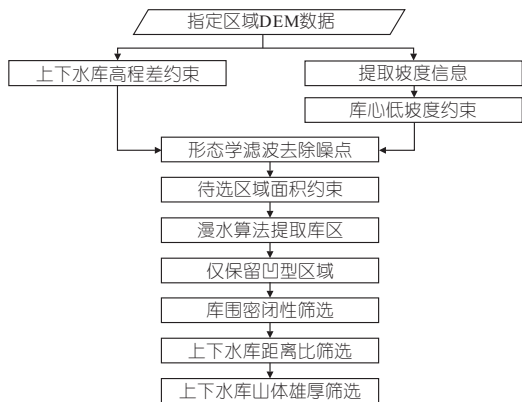


图 4 基于卫星遥感的抽水蓄能电站上下数据选址总体流程

Fig. 4 Overall site selection process of pumped storage power station based on satellite remote sensing

位于山体上,布置范围受限,因此上水库库心坡度略大于下水库库心坡度。

**步骤 2** 进行形态学闭运算及候选区域连接和形态学开运算,去除噪点影响,进一步优化库心区域  $C_1$ 。

**步骤 3** 根据区域面积进行待选区域筛选,去除零散的区域,得到待选库心区域  $C_2$ 。

**步骤 4** 以步骤 3 提取候选区域  $C_2$  各个位置高程中位数的位置为基准,进行漫水处理,提取待选水库蓄水区域  $S_0$ 。

**步骤 5** 待选水库蓄水区域  $S_0$  外围平均高度应高于待选库心区域  $C_2$  的平均高度,从而去除“凸型”台面干扰区,仅保留“凹型”待选水库蓄水区域  $S_1$ 。

**步骤 6** 评估库围封闭性,通过统计待选水库蓄水区域  $S_0$  外围平均高程作为基准,低于此外围平均高程区域即为蓄水缺口。

**步骤 7** 基于步骤 1~6,可分别获得待选的上水库区域和下水库区域。作为完整的抽水蓄能方案,还需考虑上下水库的连接关系,基于上下水库之间的距高比约束,确定上下水库之间的横向距离及高度为差值要求。

**步骤 8** 考虑到输水系统和地下厂房的布置及施工条件,要求连接部分的山体雄厚,从而进一步约束待选上下水库区域。利用覆盖层厚度计算来评价山体雄厚程度,将上水库高点和下水库低点连线,从高点向低点按水平距离等间隔取采样点,计算其对应地形处的水平距离与高程之比是否小于等于距高比,小于或等于说明该点地形在高点与低点连线的斜边之上,说明山体覆盖厚度初步判断满足条件,不存在陡降情况,满足计算条件的采样点占全部采样点的比例达到 50%~80%以上,即可认为上下水库之间山体延续性较

好且山体覆盖层厚度满足要求。

### 3 试验验证

本文以浙江省缙云抽水蓄能电站为例,其覆盖范围达到横向 100 km、纵向 110 km。使用 AW3D30 数据作为地形基准数据,该数据水平分辨率约为 30 m,由高级陆地观测卫星 ALOS 上搭载的全色遥感立体测绘仪 PRISM 获取。

对指定区域提取坡度信息,按上下水库落差基本要求,设置上水库库心海拔高度应高于区域地形最低高度 300 m 以上。基于上水库库心坡度略大于下水库库心坡度,设置上水库库心坡度小于  $10^\circ$ ,下水库库心坡度小于  $20^\circ$ 。

去除区域面积小于  $10\,000\text{ m}^2$  的散碎候选区域,设置漫水处理下阈值为 10 m,上阈值为 40 m,并根据水库库围密闭性原则,要求缺口数少于 10 个,从而得到优化后待选上水库区域和下水库区域,见图 5。

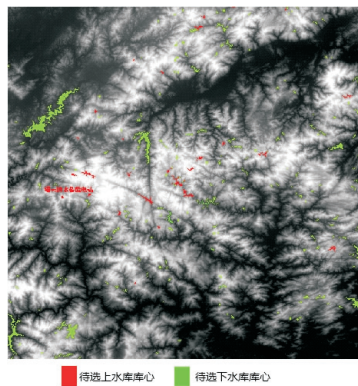


图 5 优化后待选上水库和下水库区域

Fig. 5 Optimized upper reservoir and lower reservoir areas to be selected

结合实际工程距高比一般取值经验,当上下水库落差在 300~700 m 之间时,上下水库之间水平距离应介于 1 000~7 000 m 范围,并要求选定上下水库连接线采样点中 50% 以上满足山体雄厚程度阈值条件,共得到 14 个可选抽水蓄能电站上下水库方案,见图 6(F1~F14),图 6 中深色部分为上水库位置,浅色为下水库位置,每个选址方案相对应的上下水库位置用连接线相连,除方案 F1 的山体雄厚指标为 50% 以外,其余方案均在 80% 以上。浙江省缙云抽水蓄能电站主体工程于 2020 年 8 月正式开工建设,实际选定上下水库区域如图 6(a) 所示,其中,待选上下水库连线上标注数字为待选抽蓄方案“山体雄厚程度”的计算结果。本文提出的基于卫星遥感抽水蓄能电站上下水库自动选址方法有效涵盖实际工程选址区域。

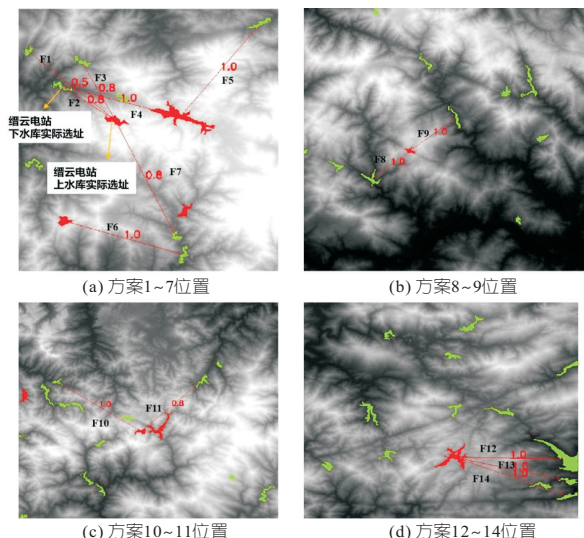


图 6 筛选得到 14 个待选上下水库位置及雄厚程度评分  
Fig. 6 14 selected upper and lower reservoir locations and their scores

卫星遥感可同时反映区域三维空间和二维地表覆盖信息, 通关地理空间信息系统工具可在三维可视化环境下进一步人工解译和评估待选上下水库区域的合理性, 见图 7。由图 7 可知, 通过卫星遥感结合计算智能技术可高效地实现大范围内可能建设区域筛选, 极大地提升外业核查效率, 浙江省缙云抽水蓄能电站相关区域覆盖面积 11 000 km<sup>2</sup>, 自动提取 14 个待选上下水库位置花费时间共计 21 min, 极大地提升了抽水蓄能电站上下水库选址效率。

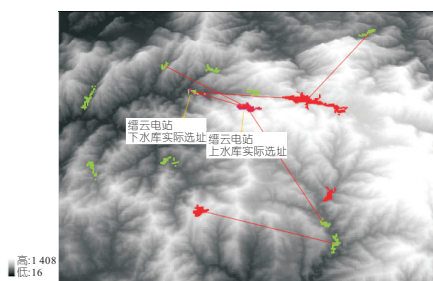


图 7 对应待选上下水库三维场景展示  
Fig. 7 3D scene display corresponding to upper and lower reservoirs to be selected

## Study on Site Selection of Upper and Lower Reservoirs of Pumped Storage Power Station Based on Satellite Remote Sensing Terrain Data

FEI Xiang-ze, GU Ke, LIU Jia-long, ZHANG Yan

(China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** Pumped storage power station is the most mature large-scale energy storage tool in power systems. Because of its flexible peak and frequency modulation performance, it plays an important role in the novel power systems with new energy as the main body. The selection of upper and lower reservoirs is the key factor to determine its energy storage capacity and investment benefit in the process of site selection of pumped storage power station. However, the traditional site selection method of manual site investigation has the problems of heavy workload, low efficiency and easy leakage. In this paper, a method for site selection of upper and lower reservoirs of pumped storage power station based on satellite remote sensing terrain data was proposed, and experimental verification was carried out by Jinyun pumped storage power station in Zhejiang Province. The results show that the possible upper and lower reservoir construction areas within the target area can be efficiently screened out by using satellite remote sensing terrain data and computational intelligence techniques, which greatly improves the efficiency of site selection and shows the great application potential of satellite remote sensing in site selection of pumped storage power station.

**Key words:** pumped storage; satellite remote sensing terrain data; DEM; upper and lower reservoirs; project site selection

## 4 结论

a. 本文基于卫星遥感地形数据和计算智能技术, 从地形构造角度分析了影响水库选址区域的关键因素, 给出了基于卫星遥感地形数据的抽水蓄能电站上下水库选址处理流程。在浙江省缙云抽水蓄能电站相关区域进行实际测试, 整体运行效率仅需 21 min 即可选定 14 个待选的上下水库区域, 并准确包含了实际工程选址确定的上下水库区域, 缩小了电站选址范围, 极大提高了选址工作的效率。

b. 抽水蓄能电站上下水库其他开发类型还有很多, 如利用已建水库、天然湖泊以及海洋等, 在地形特点上与利用山间沟谷有所区别, 后续还需针对不同开发类型, 进一步完善在卫星遥感地形数据上的特征提取技术。同时, 还可结合卫星遥感强大的地信息获取能力, 进一步完善抽水蓄能电站选址的考虑因素。

### 参考文献:

- [1] 马良. 碳达峰、碳中和背景下抽水蓄能建设发展研究[J]. 中国工程咨询, 2021(9): 35-38.
- [2] 石硕. 抽水蓄能电站 GNSS 施工控制网设计与建立[J]. 中国水能及电气化, 2019(12): 25-28.
- [3] 宋云丽, 严云籍, 翟林博, 等. 抽水蓄能电站建设的地理要素分析及 GIS 选址[J]. 云南水力发电, 2022, 38(4): 131-134.
- [4] 莫凡, 曹海翔, 刘希刚, 等. 大比例尺航天测绘系统体制研究[J]. 航天器工程, 2017(1): 12-19.
- [5] 兰穹穹, 郝雪涛, 齐怀川. 资源三号卫星影像 DEM 提取与精度分析[J]. 遥感信息, 2015(3): 14-18.
- [6] 秦臣臣, 陈传法, 杨娜, 等. 基于 ICESat/GLAS 的山东省 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价与修正[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 351-360.
- [7] 王欢, 刘九夫, 谢自银, 等. 基于水文应用的多源数字高程模型精度分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 30-38.