

杨房沟水电站地下厂房开挖支护设计施工实践

焦 凯， 李 俊， 张 晓 辉
(雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051)

摘 要:杨房沟水电站地下厂房属于典型的大跨度、高边墙地下洞室,工程区地质条件复杂,第一主应力方向与厂房轴线方向大角度相交,洞室岩体开挖卸荷变形明显。根据厂房的结构特点、地质条件及施工影响因素,制定科学的开挖支护设计和施工方案,合理地安排开挖顺序、布置施工通道,在开挖过程中采用控制爆破、安全监测、动态设计等技术措施,开挖施工质量得到有效保证、结构安全稳定得到有效控制,为同类型地下厂房开挖提供了丰富的经验。
关键词:地下厂房;支护设计;施工方案;处理措施;效果评价
中图分类号:TV7; TV731.5;U455.41+2 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2019)02-0083-05

0 引 言

随着西部开发战略的实施,我国水能资源开发集中在西部高山峡谷地区,区域地质条件复杂,工程建筑物布置难度大,建造技术难度高。由于地下厂房具有枢纽布置占地少、与挡水泄水建筑物相对独立、受施工导流影响小、抗震性能好、环境和谐友好、工程造价经济等优点,我国目前开发的水电工程中约有半数采用了地下厂房。

随着金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江等流域水力资源的大规模集中开发,水电行业逐步形成了相对完整的超大洞室群建设技术体系,地下厂房洞室群建设技术及工程建设规模均处于世界领先地位。

杨房沟水电站为雅砻江流域中游河段一库七级开发的第六级,总装机容量 1 500 MW。枢纽工程区属高山峡谷地貌,河谷狭窄,岸坡陡峻,地震烈度高,坝身泄洪量大,不具备修建坝后式地面厂房及引水式地面厂房的条件。经可行性研究对比分析,引水发电系统布置于工程区左岸山体内,地下厂房采用首部开发方案。

1 开挖支护设计

杨房沟水电站地下厂房上覆岩体厚度 197~328 m,水平岩体厚度 125~320 m,岩性为花岗闪长岩,岩体完整,岩质坚硬,以次块状~块状结构为主,局部镶嵌结构,岩体较完整~完整性差。总体成洞条件较好,围岩整体稳定,但局部存在块体稳定问题,局部稳定性较差,主要为Ⅱ、Ⅲ₁类围

岩,其中Ⅱ类占 52.5%,Ⅲ₁类占 38.8%,局部Ⅲ₂类,占 8.7%。岩石饱和单轴抗压强度在 80~100 MPa 之间,厂区最大主应力 σ_1 值为 12~15.48 MPa,最大主应力方向为 N61°W~N79°W,属于中等地应力区。

厂房纵轴线方向为 N5°E,采用圆拱直墙型断面,在平面布置上采用“一”字型布置,从左至右依次为副厂房、主厂房和安装场,洞室开挖尺寸为 230 m×30 m(28 m)×75.57 m(长×宽×高)。杨房沟水电站引水发电系统地下洞室群三维布置如图 1 所示。

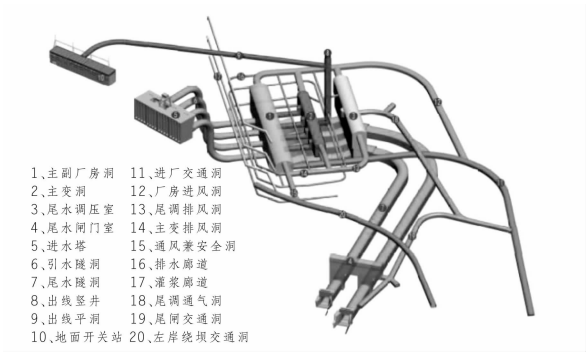


图 1 地下洞室群三维布置图

根据杨房沟水电站地下厂房的规模和特点,支护设计遵循“根据工程特点,以已建工程经验和工程类比为主,岩体力学数值分析为辅”的原则,并根据开挖施工期所揭露的实际地质条件和围岩监测及反馈分析成果对围岩支护参数进行及时调整,进行“动态支护设计”以满足围岩的稳定要求。厂房结构系统支护参数见表 1。

收稿日期:2018-12-25

表 1 地下厂房系统支护参数

部位	支 护 参 数
顶拱	普通砂浆锚杆 $\varphi 28, L=6\text{ m}$ / 普通砂浆锚杆 $\varphi 32, L=9\text{ m}, @1.5\times 1.5\text{ m}$ 挂网 $\varphi 8@20\times 20\text{ cm}$, 龙骨筋 $\varphi 12@2\times 2\text{ m}$, 喷混凝土厚 15 cm
拱座	预应力锚杆 $\varphi 32, L=9\text{ m}, @1.0\times 1.0\text{ m}$ 挂网 $\varphi 8@20\times 20\text{ cm}$, 龙骨筋 $\varphi 12@2\times 2\text{ m}$, 喷混凝土厚 15 cm
边墙	普通砂浆锚杆 $\varphi 28, L=6\text{ m}$ / 普通砂浆锚杆 $\varphi 32, L=9\text{ m}, @1.5\times 1.5\text{ m}$ 挂网 $\varphi 8@20\times 20\text{ cm}$, 龙骨筋 $\varphi 12@2\times 2\text{ m}$, 喷混凝土厚 15 cm 安装间段上下游墙各 2 排无黏结预应力锚索 $T=2\,000\text{ kN}, L=20/25\text{ m}@4.5\text{ m}$ 机组段上下游墙各 5 排无黏结预应力锚索 $T=2\,000\text{ kN}, L=20/25\text{ m}@4.5\text{ m}$ 副厂房段上下游墙各 6 排无黏结预应力锚索, $T=2\,000\text{ kN}, L=20/25\text{ m}@4.5\text{ m}$
端墙	普通砂浆锚杆 $\varphi 28, L=6\text{ m}$ / 普通砂浆锚杆 $\varphi 32, L=9\text{ m}, @1.5\times 1.5\text{ m}$ 挂网 $\varphi 8@20\times 20\text{ cm}$, 龙骨筋 $\varphi 12@2\times 2\text{ m}$, 喷混凝土厚 15 cm
基坑之间岩柱	预应力锚杆 $\varphi 32, L=12\text{ m}, @1.5\times 1.5\text{ m}$ 挂网 $\varphi 8@20\times 20\text{ cm}$, 喷混凝土, 厚 10 cm

2 地下厂房开挖施工方案

2.1 分层开挖及施工方法

根据厂房结构特点、围岩稳定条件、施工机械性能、运输通道条件及支护方式等因素,按照“立体多层次、平面多工序的”总体原则,洞室开挖支护施工总体共分九层,并根据现场情况采取层内分层、分区进行爆破开挖。分层分区布置见图 2,具体方案如下:

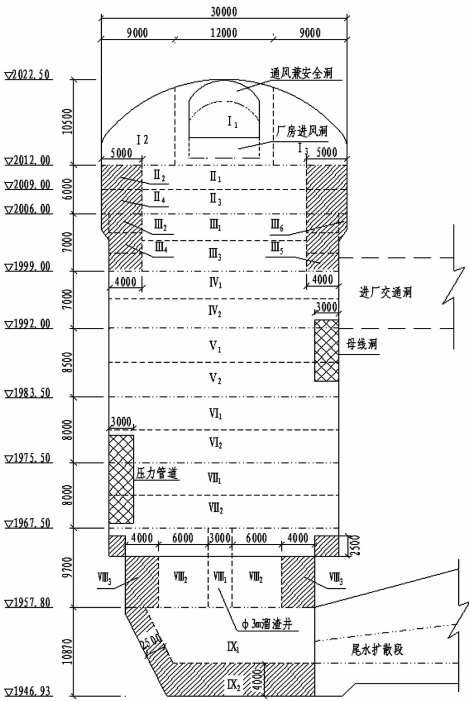


图 2 主副厂房洞开挖分层分区示意图

- (1)第 I 层采用先中导洞开挖,后两侧扩挖的方式,通过通风兼安全洞出渣。
- (2)第 II ~ VII 层均采用中间拉槽,两侧预留保

护层的开挖方式,成“品”字型推进,根据开挖进展情况分别通过通风兼安全洞、进厂交通洞、母线洞和压力管道下平段出渣。其中,母线洞和压力管道范围内采用“先洞后墙”的开挖顺序,提前进入厂房后对 3 m 范围内进行加强支护。

(3)厂房第 VIII ~ IX 层(机坑)分导井、上游保护层、下游保护层、岩柱顶面保护层四序开挖,通过导井溜渣至机坑底部,通过尾水扩散段出渣。其中,第 IX 层通过尾水扩散段提前进行中导洞开挖。

施工过程中遵循“新奥法”理念,开挖钻爆遵循“预支护、短进尺、弱爆破,及时支护、早封闭、勤量测”的施工原则,以确保洞室的稳定。

施工过程中,设计根据结构安全稳定计算和数值分析成果,制定厂房分层开挖变形预警标准。根据围岩变形安全监测数据的变化,当围岩变形为安全状态时,可以进行正常施工;当围岩变形超过警戒状态,需暂停开挖,增加监测频次并进行加强支护;当围岩变形达到危险状态,立即停止开挖,并采取加强支护措施保证洞室结构安全。

2.2 开挖质量控制措施

根据厂房地质条件及岩性、技术规范要求、开挖方法及类似工程经验,采用孔间微差爆破技术,轮廓线用预裂或光面爆破。地质条件差的洞段(断层破碎带)和喷锚支护、混凝土衬砌结构附近,特别是岩锚梁、机坑等特殊部位,爆破设计按“短进尺、弱爆破、少扰动”的原则进行,减少围岩爆破松动圈深度,确保结构成型质量。厂房开挖以控制第 III 层岩锚梁岩台成型质量、第 IV ~ V 层爆破对岩锚梁混凝土质量影响以及 V III ~ IX 层机坑围岩松弛深度为重点。

开挖爆破均严格控制爆破规模,控制单响药量,确保洞室开挖质量和围岩稳定安全。同时,通过采用爆破震动监测、声波测试和地质素描等手段,掌握爆破开挖情况,适时调整钻孔及装药参数,不断合理优化爆破设计。并且通过采用顶拱周边孔全站仪精准定位、边墙竖直孔及岩锚梁岩台孔采用钢管样架导向定位、高边墙深孔预裂等综合技术措施,保证开挖质量。

3 主要工程问题及处理措施

- 杨房沟水电站地下厂房结构及地质特点:
- (1)第一主应力方向与厂房轴线方向大角度相交,夹角约为 $66^{\circ}\sim 84^{\circ}$ 。
 - (2)受河谷应力场特征影响,厂房洞室围岩应力集中,开挖后应力释放较强烈;开挖揭露的小断层数量较多,伴随断层局部发育有一定范围的蚀变岩体。
 - (3)围岩顺洞向中陡倾角不利结构面发育,主要优势节理与洞轴线成小夹角,易形成不稳定块体。
- 上述因素对厂房结构和围岩安全稳定造成了一定不利影响。

3.1 顶拱缓倾角断层 f49 影响带

根据开挖施工揭示情况,中导洞顶拱上厂左 0+01 m 处出露缓倾角断层 f(49),产状 $N75^{\circ}\sim 80^{\circ}E\ SE\angle 25^{\circ}$,充填碎块岩、岩屑,少量泥膜,带内岩体挤压破碎,上游侧拱顶附近岩体有蚀变现象,蚀变带宽 10~40 cm 不等。施工排险过程中,断层下盘出现数米长的坍塌破坏,块体方量约 $30\ m^3$,断层 f49 影响区域地质纵剖面如图 3 所示。

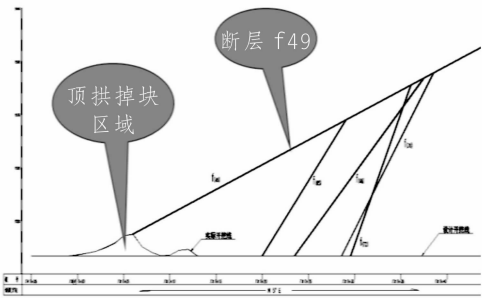


图 3 顶拱 f49 断层影响区域地质纵剖面

针对断层 f49 和其他断层组合的不利影响,设计进行了块体分析和数值计算,根据分析成果,采取加强支护和增设位移计等相关措施,保证不利组合块体安全稳定系数均满足规范要求。顶拱受影响区域加强支护参数如下:锚杆全部调整为

带垫板的普通砂浆锚杆($\varphi 32$ 、 $L=9\ m$),水平和垂直间距达 0.75 m;增设 4 列 5 排锚索,共 20 根。

3.2 下游边墙岩锚梁区域断层节理密集带

第Ⅲ层开挖过程中,1~2#机组段下游边墙揭露断层 f83 及其影响带,围岩顺洞向中陡倾角不利结构面发育,岩体节理面见蚀变现象,表层岩体较破碎。加上受洞群效应影响,变形问题相对突出,且对下游边墙和岩锚梁稳定不利。该部位多点位移计测值随开挖过程呈“台阶状、跳跃式”上升趋势,浅层岩体变形量级整体较大,深层岩体变形也具有一定量级。该部位典型地质剖面如图 4 所示。

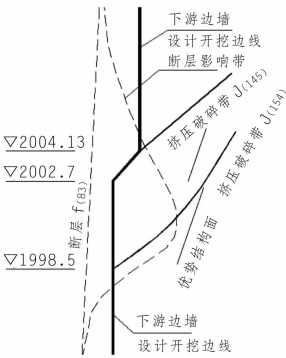


图 4 1~2# 机组段下游边墙典型地质剖面图

根据该部位声波检测、钻孔取样试验及围岩稳定计算、块体结构复核分析等成果,为保证下游边墙和岩锚梁结构安全,设计对该部位进行了加强支护,确保厂房后续开挖期间和永久运行期岩锚梁结构安全、稳定。具体措施为:

- (1)针对岩锚梁以上区域岩体存在沿结构面蚀变现象、存在约 2 m 深的低波速区($<3\ 000\ m/s$)、发育挤压破碎带问题,在原系统锚杆的条件下采取加密预应力锚杆的措施,加强支护后,预应力锚杆与带垫板的普通砂浆锚杆净间距为 0.75 m;采用钢筋混凝土板+预应力锚索的措施,增设一排预应力锚索, $T=2\ 000\ kN$, $L=20\ m$,如图 5 所示。
- (2)针对岩锚梁以下区域岩台基础局部发育节理密集带、岩锚梁抗滑稳定安全裕度不足、岩锚梁下拐点以下发育挤压破碎带等问题,为提高围岩承载能力和完整性,保证岩锚梁抗滑稳定,采取扶壁墙+预应力锚索的措施,如图 6 所示。

3.3 厂房下游侧母线洞裂缝

受厂房开挖卸荷变形、下游边墙挖空率高及

顺洞向陡倾优势结构面发育等因素影响,在第Ⅶ层开挖阶段,母线洞内靠厂房侧发生了喷层开裂现象,表现为靠厂房侧 10 m 区域内环向锯齿状裂缝及右侧拱肩水平向刀刀状裂缝,环向裂缝开展宽度相对较宽。典型裂缝分布情况如图 7 所示。

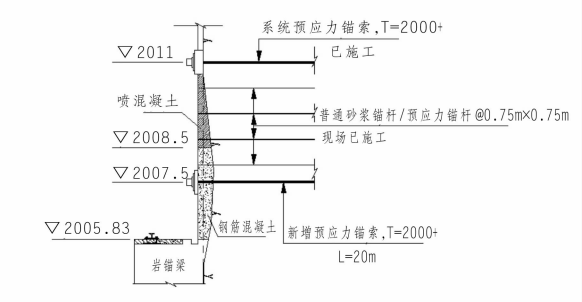


图 5 岩锚梁以上区域加强支护典型剖面图

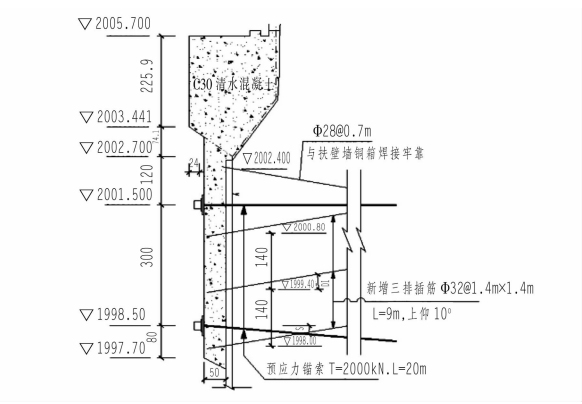


图 6 岩锚梁以下区域加强支护剖面图

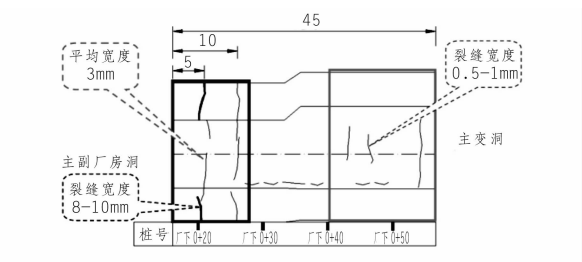


图 7 母线洞喷层裂缝典型分布图

根据下游边墙母线洞范围内岩体声波检测、对穿孔孔内电视等补充物探和安全监测情况分析,结合数值计算成果,在系统支护的基础上,设计拟定加强支护方案,具体如下:

(1)在每条母线洞底板以下 1 983.5 m 增设两根预应力锚索, $L=40\text{ m}$, $T=2\,000\text{ kN}$;1 979 m、1 976 m 增设 4 根预应力锚索, $L=35/40$, $T=2\,000\text{ kN}$,如图 9 所示。

母线洞底板(距离厂房 0~20 m 区域)增设倾向下游系统锚杆 $\varphi 28@1.5\text{ m}$, $L=4.5\text{ m}$,倾角 60° 。

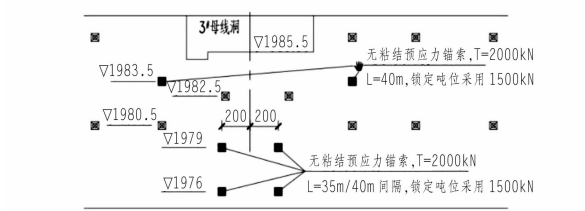


图 8 下游边墙母线洞底板以下锚索加强支护典型示意图

(2)在厂房与主变室之间增设对穿锚索, $L=45.5\text{ m}$, $T=2\,000\text{ kN}$,如图 9 所示。

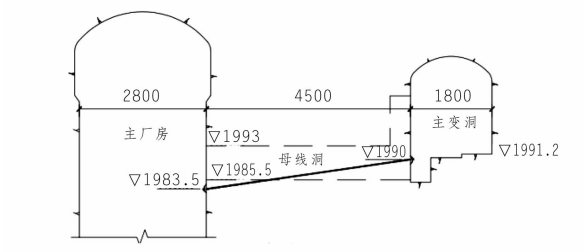


图 9 厂房下游边墙对穿锚索典型示意图

(3)采取固结灌浆措施,对厂房下游边墙母线洞内松动围岩进行固结、对张开的结构面进行封闭,满足永久运行期稳定和防渗要求。固结灌浆孔深 5 m,灌浆压力 0.5~1.0 MPa,排距 2.5 m,如图 10 所示。

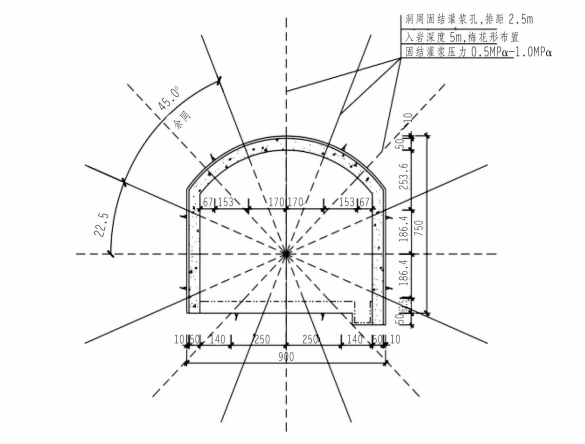


图 10 母线洞围岩固结灌浆布置图

4 施工效果评价

4.1 工期评价

杨房沟水电站地下厂房于 2016 年 4 月开工,于 2018 年 6 月全部完工,其中岩锚梁混凝土浇筑

期间 3 个月未进行爆破开挖,开挖支护施工直线工期 23 个月,相比合同要求的节点目标“2018 年 12 月底完成厂房开挖支护施工”提前 6 个月时间完成。

4.2 变形控制评价

围岩变形监测共布置 64 套多点位移计,累计变形测值在 -3.41 mm~70 mm 之间,小于 30 mm 的测点占比 73.44%,大于 50 mm 的测点占比 6.25%。最大变形发生在 1# 机组段监测断面下游边墙岩锚梁上部,该部位在爆破开挖前通过排水廊道预埋了多处位移计,实现了爆破开挖全过程变形量监测。

爆破开挖施工期间,围岩变形主要发生在监测断面及附近岩体开挖期间,变形曲线总体符合硬岩台阶状特征。截至 2018 年 12 月底,经过半年时间的持续监测,数据表明各部位监测变形已基本控制。类比国内同等规模水电站地下厂房,杨房沟水电站厂房变形控制属于中等偏上水平。

4.3 开挖质量评价

地下厂房开挖成型良好,质量优良。厂房总开挖量为 36.5 万 m³,总超挖量 7 454 m³,超挖率 2%,其中地质超挖量 1 274 m³,扣除地质超挖量后的平均超挖 11.9 cm。开挖面平均半孔率 93%,整体平均平整度 6.7 cm,平整度检测合格率 96%。岩锚梁岩台开挖平均半孔率 96%,整体平均平整度为 4.6 cm,平均超挖 7.3 cm。

5 结 语

杨房沟水电站地下厂房开挖施工过程中揭露的工程地质条件及工程地质问题与前期勘察成果基本一致,但下游边墙部分洞段开挖揭示的地质条件偏差。开挖支护施工过程中,结合工程的实际地质条件、现场监测数据,设计及时开展了厂房结构安全稳定复核及动态支护设计工作,并建立围岩安全监测变形管理标准。通过精细化管理和控制,围岩应力调整变形得到了有效的控制,目前

洞室结构整体处于稳定状态。地下厂房工程施工方法、工艺水平、施工质量、围岩变形控制水平均处于行业先进水平。

杨房沟水电站作为我国首座采用设计施工总承包模式建设的百万千瓦级大型水电站,设计施工高度融合、优势互补,工程建设管理水平处于行业领先水平,为总承包模式在水电行业的进一步推广积累了宝贵的经验。

参考文献:

[1] 水电站地下厂房超大洞室群建设技术综述[J].水力发电. 2016,8:1—11.

[2] 我国水电站地下厂房的发展[J].水力发电.2015,6:65—68.

[3] 向家坝水电站大型地下厂房洞室群施工和监测[J].岩石力学与工程学报.2011,4:666—675.

[4] 小湾水电站引水发电系统地下厂房安全监测及施工期监测成果[C].隧道、地下工程及岩石破碎理论与应用.

[5] 二滩水电站地下厂房围岩的变形特征[J].水电站设计. 2000,4:54—61.

[6] 官地地下厂房洞室群施工期围岩位移特征分析[J].岩石力学与工程学报.2012,2:3911—3919.

[7] 锦屏二级水电站地下厂房设计和工程实践[J].水力发电. 2016,7:53—57.

[8] 大岗山水电站地下厂房安全监测成果分析[J].人民长江. 2012,22:73—76.

[9] 长河坝水电站地下厂房围岩变形特征[J].四川水力发电. 2016,1:49—53.

[10] 某水电站地下厂房施工期开挖监测反馈分析[J].人民长江.2014,17:94—98.

[11] 猴子岩水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形与破坏特征[J].岩石力学与工程学报.2014,11:2291—2300.

[12] 瀑布沟水电站地下厂房开挖施工综述[J].水力发电.2010, 6:56—59.

作者简介:

焦 凯(1986-),男,湖北当阳人,高级工程师,硕士,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事水电站工程建设管理工作;

李 俊(1989-),男,河南南阳人,工程师,硕士,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事水电站工程建设管理工作;

张晓辉(1991-),男,云南姚安人,工程师,学士,现于雅砻江流域开发有限公司从事水电站工程建设管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

美国风电光伏的全成本比煤电厂运行成本还低

根据美国 VCE(Vibrant Clean Energy)公司的数据,2018 年美国绝大多数燃煤电厂的运行成本介于 33 美元~111 美元/兆瓦时(不考虑投资成本);2018 年太阳能光伏的平准化成本(考虑投资、运维全生命周期内成本)在 28 美元~ 52 美元 /兆瓦时之间,而风电平准化成本区间更大(因地点资源质量不同),介于 13 美元~88 美元/兆瓦时之间。

(北极星电力网 2019 年 4 月 3 日)