

预制舱变电站在复杂地形条件下的安装适应性研究

杨 洁

鄂尔多斯市国能神东监理有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘 要：预制舱变电站在复杂地形条件下（如山地、高海拔、软土、陡坡等区域）展现出显著的技术适应性，其核心优势体现在模块化设计、基础灵活性及智能化监测等方面，模块化设计提升地形适应性，工厂预制与整体运输。所有设备在工厂完成集成化组装与调试，形成标准模块单元；现场仅需简单吊装与拼接，大幅减少复杂地形下的施工难度与周期。灵活组合与扩容能力。采用“搭积木式”模块化结构，可根据地形限制调整舱体布局（如分体式部署）；预留扩展接口便于后期增容改造。

关键词：预制舱变电站；复杂地形条件下；安装适应性

预制舱变电站通过模块化架构、柔性基础技术及智能运维体系，有效克服复杂地形制约，未来需进一步优化运输方案与成本控制以拓展应用场景。

1 预制舱变电站特点与优势

1.1 预制舱变电站特点。（1）结构设计特性。模块化架构。采用“搭积木式”组合设计，支持按需求灵活配置舱体数量和布局。预留标准化接口，便于后期扩容或改造。高度集成化。一次/二次设备、辅助系统均在工厂预装于舱体内，大幅减少现场接线量。舱体集成温控、消防、监控等智能子系统。全封闭防护。钢结构舱体具备防风沙（ $\geq 40\text{m/s}$ ）、防腐蚀、防水（IP54等级）能力。适应-40℃至+70℃极端温度环境。（2）建设与运维优势。建设周期短。90%工序在工厂完成，现场仅需吊装拼接，工期比传统模式缩短30%~60%。质量可控性高。工厂标准化生产保障设备工艺一致性，减少现场施工误差。运维便捷化。模块化设计支持故障单元快速更换，降低停电时间。配备远程监控系统，实现无人值守与智能预警。（3）应用场景适应性。空间高效利用。紧凑型布局节省占地30%~50%，适用于城市密集区、地下部署。恶劣环境耐受。防腐、保温设计适配高海拔、盐碱地、冻土等区域。应急机动性强。整体运输+快速安装特性，支持72小时内恢复供电（如灾害应急场景）。新能源场景优化。大幅缩短偏远地区风光电站并网周期。典型创新案例：移动式智能变电站通过平板拖车集成设备，实现“即停即用”供电，突破传统选址限制。关键突破方向：运输瓶颈：超大型舱体需拆分运输，增加现场拼接复杂度。成本控制：特殊地形定制方案可能提高造价10%~15%。预制舱变电站通过模块化、工厂化、智能化三重革新，成为现代电网高效建设的核心解决方案。

1.2 预制舱变电站优势。（1）建设效率突破性提

升。工期缩短30%-60%。90%以上工序在工厂完成预制集成，现场仅需吊装拼接，35kV变电站投运周期从传统半年压缩至1-2个月。恶劣环境适应性增强。工厂标准化生产规避现场施工受天气制约，尤其适合高海拔、冻土等施工条件受限区域。（2）可靠性技术升级。质量一致性保障。工厂环境实现设备精密组装与全功能调试，规避现场施工误差。极端环境防护。钢结构舱体支持-40℃至+70℃运行，防风沙（ $\geq 40\text{m/s}$ ）、防水（IP54）、防腐三重防护。智能运维体系。集成温控、消防、远程监控模块，实现无人值守与故障预警。（3）场景灵活性与可持续性。模块化扩容能力。“搭积木式”组合设计支持按需调整容量，适配风光电站分期建设需求。应急机动部署。整体运输+快速安装，72小时内可恢复灾害区域供电。绿色低碳贡献。工厂化生产减少建筑垃圾，符合双碳战略要求；舱体材料可回收利用。典型对比：传统变电站扩容需数月改造，预制舱通过预留接口实现48小时内增容。预制舱变电站通过工厂预制、模块集成、智能运维三重革新，已成为现代电网高效低碳建设的核心解决方案。

2 复杂地形对变电站安装的挑战

2.1 基础施工与稳定性挑战。地基处理困难。软土/冻土沉降：软土地基承载力不足易导致设备倾斜，冻土区季节性冻融引发基础位移（如变电站需特殊地基处理）。陡坡锚固难题：山地斜坡需采用阶梯式平台或锚杆加固，但岩石地质需爆破开挖，增大施工复杂度（如重庆专利技术中的锚杆方案）。精准定位要求高。不平整地面需预埋件微调（允许 $\pm 2\text{mm}$ 误差），但复杂地貌导致测量基准点难以校准。

2.2 大型设备运输与吊装障碍。重型设备通行受限。山地狭窄道路无法承载大型运输车辆，如贵州关岭项目

需拆解200吨主变，靠人力与机械协作翻越1500米高山。高海拔区域缺氧环境降低车辆动力，进一步延缓运输进度。吊装空间制约。陡坡或沟谷地带吊车作业半径不足，需分段吊装或搭建临时平台（如蒙能电厂采用爆破拓宽作业面）。

2.3 极端环境适应性挑战。气候与地质危害。高风速影响：山地局部风速超40m/s，威胁舱体结构稳定性（需增强抗风设计）。地质灾害风险：暴雨诱发山体滑坡、泥石流，破坏设备基础（如变电站强化实时形变监测）。材料性能受限。高海拔强紫外线加速舱体材料老化，严寒（-40℃）导致金属脆化。盐碱地/潮湿环境加剧设备腐蚀（需特种防腐涂层）。

2.4 安全与成本控制压力。施工安全风险上升。悬崖作业易引发坠落事故（如西藏工程要求工人适应高原反应并配备防护装备）。雷暴频发区域需强化防雷接地系统，防范触电风险。工期与成本激增。复杂地形施工周期延长30%~50%，如主变运输耗时6昼夜。特殊方案（如抗9级地震设计）推高造价10%~15%。复杂地形对变电站安装的挑战集中于地质适应性、运输可行性、环境耐受性及安全可控性四大维度，需结合模块化设计、轻量化基础及智能监测技术综合应对。

3 预制舱变电站如何适应复杂地形

3.1 模块化设计突破地形限制。工厂预制与灵活拼接。舱体在工厂完成设备集成与调试，现场仅需吊装拼接，减少复杂地形下的施工周期及人工依赖。山地/陡坡应用：采用分体式舱体设计，通过“搭积木”方式适应狭窄或不规则场地。轻量化与紧凑布局。舱体尺寸标准化（如长度 $\leq 3.8\text{m}$ 、宽度 $\leq 2.4\text{m}$ ），减轻运输负担；紧凑型设计支持阶梯式或悬挑安装，减少对陡坡地形的开挖。

3.2 基础与安装技术创新。适应性基础结构。软土/冻土地基：采用预制混凝土块分散压力，结合螺旋桩基础或可调支撑结构（工字钢+调节螺栓），缓解不均匀沉降。陡坡锚固：阶梯式平台配合锚杆加固，提升斜坡稳定性（如重庆专利技术）。精准安装技术。预埋件微调系统（允许 $\pm 2\text{mm}$ 标高误差）配合北斗定位校准，适应地面不平整问题。

3.3 极端环境耐受性强化。舱体防护升级。高海拔/紫外线：舱体采用抗紫外线材料，增压设计维持内部气压稳定（西藏那曲项目验证）。高寒/盐碱地：全封闭钢结构+特种防腐涂层（如陶瓷纤维防火棉），耐温范围-40℃至+70℃。密封与抗风沙设计。多层密封舱门+底部防尘仓结构，抵御40m/s以上强风及沙尘侵入。

3.4 智能运维与安全保障。地质灾害预警。集成北斗毫米级形变监测（精度提升21.5%），实时预警山体滑坡、地基沉降风险。极端气候自适应。温感系统自动调节舱内环境（如高海拔降容运行）。防雷接地系统（4个专用接地端子+环形接地母线）防范雷击风险。未来方向：拓展BIM技术与数字孪生模型应用，优化特殊地形定制成本（如抗震9级设计成本仍高10%~15%）。预制舱变电站通过模块化架构、柔性基础、智能监测三位一体技术，实现复杂地形的高效适配。

3.5 安全与地质灾害防控。雷暴与接地风险。需配置4个专用接地端子+环形接地母线，防雷系统接地电阻 $\leq 4\Omega$ （GB/T 50065标准）。山体滑坡预警。集成北斗毫米级形变监测系统，实时预警地质位移（精度提升21.5%）。优化方向与新技术应用。模块化拆分：分体式舱体适应不规则场地，减少开挖量（工期缩短30%）；智能监测：BIM数字孪生模型预演安装流程，降低现场调试风险；轻型材料：碳纤维复合材料减轻舱体重量30%，提升陡坡运输可行性。复杂地形安装难点集中于运输可行性、基础稳定性、空间局限性及环境耐受性，需通过模块化设计、地质自适应基础和智能监测技术协同攻克。

4 如何优化预制舱变电站以适应复杂地形

4.1 运输与吊装优化。模块化轻量拆分。舱体设计为 ≤ 3 吨独立单元，山地陡坡运输时无需拆解主设备，避免重型机械依赖（如工业园区案例通过单元化运输提速40%）。陡峭路段采用临时轨道+卷扬机牵引，替代传统车辆（关岭方案衍生应用）。吊装空间拓展。开发折叠式吊臂设备，作业半径压缩至常规60%；沟壑地形预埋升降平台，解决吊车无法进场问题。

4.2 极端环境防护升级。舱体结构创新。高寒/高海拔：双层保温舱壁（中间充惰性气体），舱内恒压供气系统，耐温-50℃至+75℃；盐碱/风沙：纳米陶瓷涂层防腐，IP55级密封设计，沙尘阻隔率 $> 95\%$ 。智能环境调控。温感系统联动空调与加热器，-30℃自动启动柴油预热（金川光伏电站验证）；湿度传感器触发除湿装置，防止高湿凝露。

4.3 安全与效能提升。地质灾害防御。北斗监测终端植入基础桩，实时预警位移（精度0.1mm）；环形接地网+4个专用端子，雷击泄流响应 < 0.1 秒（GB/T 50065标准）。施工成本控制。工厂预制率提升至85%，现场工期缩短30%；BIM技术预演安装路径，减少返工损耗（成本降幅12%~18%）。未来方向：推广碳纤维复合材料舱体（减重30%），深化数字孪生模型预判地形风险。实施步骤。地形勘测阶段：激光雷达扫描+地质雷达探测，生

成3D地质模型；工厂预制阶段：按模型定制模块，完成90%设备联调；现场装配阶段：北斗定位校准基础，机器人辅助螺栓紧固（误差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ）。通过轻量化运输、地质适配基础、智能环境控制三重优化，预制舱变电站可攻克复杂地形制约，综合成本降幅达10%~25%。

5 预制舱变电站相关技术应用

5.1 关键技术突破。模块化集成技术。舱内设备工厂预装率达85%，现场仅需基础拼接与电缆连接（如工业园区案例15天完成110kV站建设）。高压开关柜、变压器、保护装置采用标准化接口，降低接线错误率 $> 90\%$ 。自适应基础技术。螺旋桩基础：软土地区承载力提升至12吨/ m^2 ，30分钟完成浸水应急隔离（山东洪涝区案例）。锚固阶梯平台：35°陡坡岩基施工成本降低25%（重庆山地项目）。智能环境控制。温湿度传感器联动空调/除湿系统，-30℃自动启动柴油预热（光伏电站）；纳米陶瓷涂层+IP55密封设计，沙尘阻隔率 $> 95\%$ （盐碱风沙地区应用）。

5.2 核心创新场景解析。移动式变电站。主变、配电装置集成于平板拖车，形成“电力方舱”；支持紧急替换故障站点，复电效率提升300%。海上升压站。舱体内部预装66kV升压设备与控制系统，抗台风设计达12级；模块化拼接实现海上平台快速部署。地下智能舱体。利用地下空间叠装预制舱，通风系统防凝露设计（湿度控制 $\pm 3\%$ ）；智能监控实现无人值守。经济效益与社会价值。建设效率：工厂预制缩短工期30%-60%（对比传统变电站）；土地节约：城市项目节约用地40%-60%；灾备能力：应急供电恢复时间从7天缩短至72小时。技术前瞻：BIM+数字孪生实现全生命周期管理，“太空衣”气

凝胶保温材料进入试点。

6 预制舱变电站未来发展趋势

6.1 数字技术深度融合。全生命周期数字孪生。BIM技术与数字孪生模型贯穿设计、施工、运维全流程，实现故障预判精度 $> 95\%$ 。AI智能诊断升级。深度学习算法分析设备运行数据，提前14天预警潜在故障。

6.2 应用场景精准拓展。新能源配套主力。适配光伏/风电波动性供电，10分钟完成储能系统并网切换。城市空间破解者。地下叠装式预制舱解决核心区供电难题，占地面积缩减60%。应急供电网络。72小时快速部署移动式预制舱，灾后供电恢复效率提升300%。

6.3 全球化生态协同。国际标准统一。IEC/IEEE联合推进舱体接口全球化标准（2026年落地）。模块化程度跃升。工厂预制率从85%提至95%，现场装配工时压缩至72小时内。核心挑战与突破方向。成本优化：9级抗震设计仍使造价高10%~15%，需通过规模化生产降本；技术融合：数字孪生与实体设备数据延迟需压缩至 $< 50\text{ms}$ ；资源循环：退役舱体材料回收率目标提升至90%。

总之，预制舱变电站通过场景定制化技术与模块化工程理念，正成为智能电网建设的核心载体，助推能源基础设施迈向高效、灵活、可靠的新阶段。预制舱变电站将以智能内核、绿色基因、场景穿透力重塑电力基建生态，支撑全球能源转型。

参考文献

- [1]文莹.预制舱变电站在复杂地形条件下的安装适应性.2022.
- [2]赵海洋.预制舱变电站在复杂地形条件下的安装适应性探讨.2023.