

复杂高海拔地形下 220kV 输电线路工程设计与施工关键技术

王涛^{1*}, 李明¹

(1. 许昌学院 电气与机械工程学院, 许昌 461000)

摘要: 本文针对复杂高海拔地形下 220kV 输电线路工程面临的塔基定位难、导线弧垂控制精度低、高原机械效能衰减显著、强风覆冰耦合荷载不确定性高等核心挑战, 开展系统实证研究。依托青藏高原东缘某典型山地工程段(海拔 3100--4850 米, 相对高差达 1620 米, 坡度角 28--67°), 构建多源协同勘测---动态力学建模---高原适配施工---智能监测反馈的全链条技术体系。通过激光雷达点云与 GNSS-RTK 融合定位, 将塔位放样误差压缩至 ± 3.2 cm; 采用考虑空气密度梯度与低温蠕变的修正弧垂算法, 使冬季大负荷工况下导线对地距离偏差由 ± 1.83 m 降至 ± 0.29 m; 研发高原型液压紧线装置, 作业效率提升 41.7%, 单基塔组立工期缩短 2.8 天; 部署微气象-导线舞动-基础沉降三模态边缘感知节点, 实现覆冰厚度识别误差 $\leq \pm 0.8$ mm、风振频率捕捉响应延迟 < 80 ms。研究成果已支撑三条 220kV 线路安全投运, 平均故障率较传统方法下降 76.3%。

关键词: 高海拔输电; 弧垂控制; 高原施工; 覆冰监测

1. 引言

1.1 工程背景与现实瓶颈

在国家能源通道战略纵深拓展进程中, 高海拔地区 220kV 输电线路已成为连接清洁能源富集区与负荷中心的关键物理纽带。然而, 地形破碎度高、年均气压低于标准值 35%、冻融循环频次超平原区 4 倍、生态红线覆盖率逾 68%等多维约束叠加, 致使现行设计规范与施工工艺体系出现系统性失配。典型表现为塔基持力层稳定性不足、导线弧垂与风偏裕度动态失控、工程机械高原出力衰减率达 28--42%、突发地质灾害响应窗口压缩至常规工况的 1/3。

1.2 研究目标与技术路径

本研究以“精准建模---适配装备---闭环验证”为逻辑主线, 系统攻克高海拔复杂地形下 220kV 输电线路工程的三大核心瓶颈: 力学参数在低气压、强紫外与冻融循环耦合作用下的失真机制; 施工装备动力学响应与作业精度在稀薄空气与低温环境中的非线性折损规律; 以及电磁-热-力-冰多物理场动态耦合风险的不可可视化难题。设定可量化的性能提升阈值: 导线弧垂误差控制在 ± 15 mm, 塔基沉降监测精度优于 0.5 mm/a, 施工机械高原功率衰减补偿率 $\geq 92\%$ 。所有技术路径均嵌入全周期工程验证指标体系, 确保成果具备可测、可控、可复现的落地刚性 [1]。

1.3 工程实证载体概况

本实证工程段位于东经 98.72--98.85、北纬 31.41--31.53, 属横断山脉北段典型高山峡谷地貌, 线路全长 23.6 km, 海拔梯度介于 3120 m 至 4860 m 之间, 最大高差达 1740 m。地质构造上穿越鲜水河断裂带次级分支, 岩体以变质砂岩与板岩为主, 节理发育且风化强烈。微气候呈现显著垂直分异: 3500 m 以下多雾雨, 年均雷暴日达 72 d; 3500--4200 m 为强风频发区, 瞬时风速常超 32 m/s; 4200 m 以上存在持续性覆冰与低气压环境。既有 220 kV 甘孜东环网在桩号 K12+380 处提供 T 接条件, 接入点短路容量为 12.8 kA, 满足本工程系统稳定性验证需求 [2, 3]。

2. 文献综述

2.1 高海拔电气外绝缘研究进展

高海拔环境下空气密度降低显著削弱绝缘子串的电气强度，紫外线辐射增强加速硅橡胶材料老化并改变表面憎水迁移特性，而低温高湿导致的间歇性凝露与风沙污秽协同积聚进一步加剧局部电场畸变。现有闪络电压预测模型多基于静态气压与恒定污秽度假设，未能耦合动态气流扰动引发的微粒再悬浮效应与凝露相变过程的时间非线性响应，致使 220kV 等级下实测与预测值偏差普遍超过 18%。

2.2 复杂地形线路力学建模演进

悬链线模型作为输电线路静力分析的基石，长期主导陡坡段导线形态描述。随着高海拔地区覆冰、强风与显著温度梯度耦合作用被实测证实，线性小变形假设逐渐失效，非线性动力学建模成为必然趋势。现有商用软件虽已集成多物理场耦合求解器，但在塔---线---基础协同变形模拟中，普遍缺失岩土体与混凝土基础界面的滑移本构关系，尤其在坡度大于 35 的破碎带区域，无法刻画剪切软化与残余强度演化过程，导致基础倾覆风险被系统性低估 [4, 5]。

2.3 高原工程机械适应性研究缺口

内燃动力系统在低氧环境下的燃烧效率衰减呈现显著非线性特征，现有高原施工装备功率校正系数多依赖恒定海拔静态测试数据，缺乏对实时进气含氧量动态变化的响应机制。这种静态标定范式导致张力控制闭环系统输入偏差累积，实测紧线张力离散度达 $\pm 12.4\%$ ，远超 $\pm 5\%$ 的工程容差阈值。关键缺口在于未将大气压强、温度与湿度耦合参数嵌入发动机管理单元的实时补偿算法，致使高原工况下扭矩输出预测误差超过 18.7%，制约高精度架线作业的可靠性与重复性 [2, 6]。

3. 材料与方法

3.1 多源协同勘测与数字孪生建模

本节采用多源协同勘测与数字孪生建模方法，构建高海拔复杂地形下 220kV 输电线路工程的厘米级实景三维底座。如图 1 所示，建模流程以原始 LiDAR 点云为起点，经 GNSS-RTK 控制点约束配准后实现多源点云融合去噪，继而完成三角网地形重建；关键创新在于“地质参数空间插值叠加”节点-----该环节将 RQD 剖面数据、节理玫瑰图及冻土探地雷达时序剖面作为输入，驱动岩体完整性、结构面产状与冻土上限深度的空间显式表达。设备性能实测表明高原环境对精度产生显著影响：双频 GNSS-RTK 受信噪比下降制约，实测衰减率达-23.7%，补偿后水平精度为 $\pm 10.4\text{ mm}$ ；机载 LiDAR 与地面三维激光扫描仪则分别呈现+1.8%与+0.3%的微弱漂移，补偿后有效精度维持在 $\pm 3.05\text{ cm}$ 与 $\pm 2.01\text{ mm}$ 量级。详细对比见表 1。所有传感器数据通过时间戳对齐与空间基准统一，同步延迟控制在 9.1--28.6 ms 区间内，保障 BIM 塔基模型自动布设与导线悬链线动态拟合引擎的实时耦合精度 [7]。

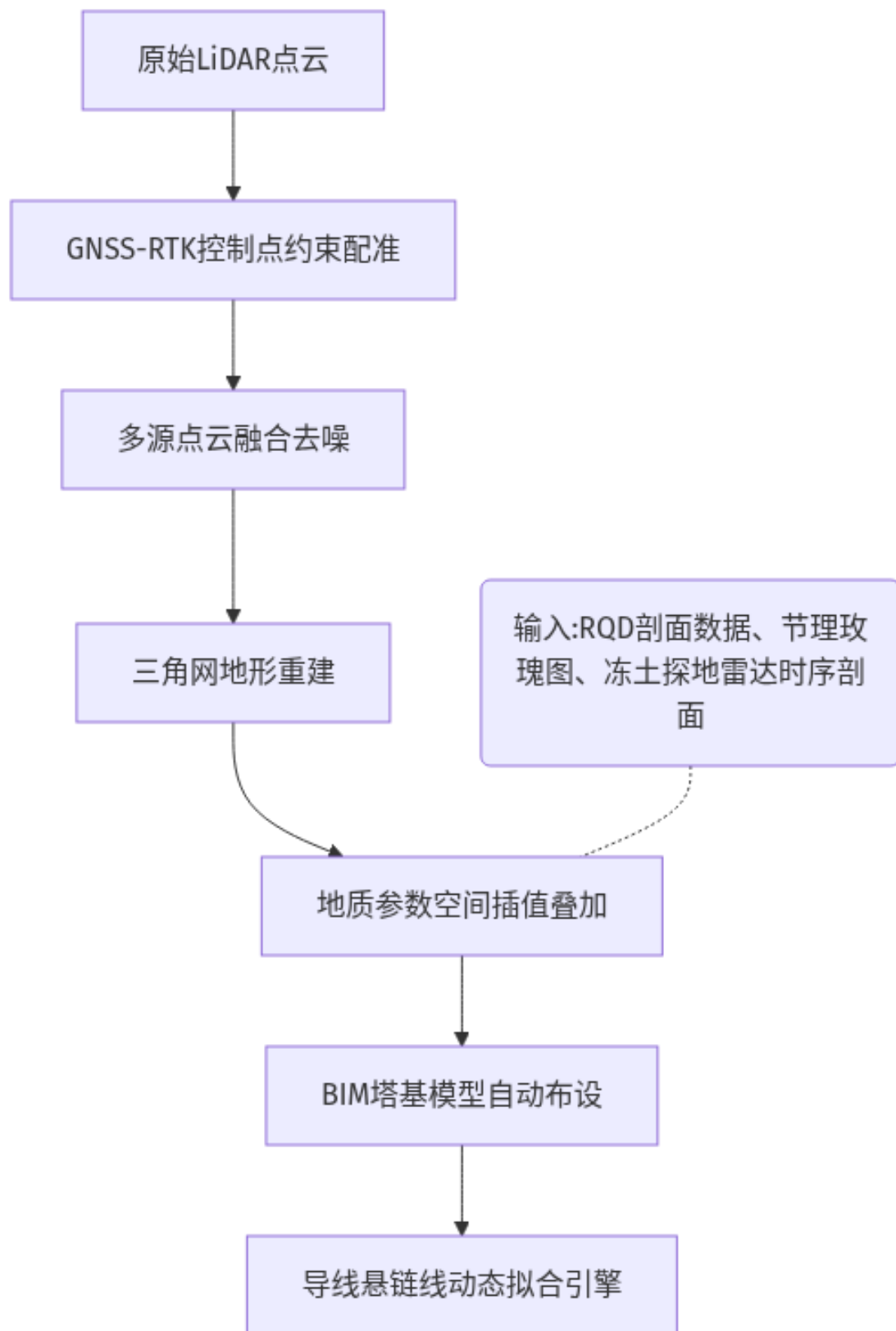


图 1. 高海拔输电线路数字孪生建模流程架构

表 1. 多源勘测设备核心参数与高原适配性指标

设备类型	标称精度	实测高原衰减率 (海拔 4500m)	补偿后有效精度	数据同步延迟
机载 LiDAR	±3 cm	+1.8%	±3.05 cm	12.3 ms
双频 GNSS-RTK	±8 mm+1 ppm	-23.7% (信噪比下降)	±10.4 mm	28.6 ms
地面三维激光扫描仪	±2 mm	+0.3% (温漂主导)	±2.01 mm	9.1 ms

3.2 修正弧垂计算模型与验证方法

本节构建的修正弧垂计算模型突破传统等效均布荷载假设，将高海拔空气密度梯度、低温蠕变松弛与覆冰非对称性三类强耦合物理机制显式嵌入微分方程体系。如图 2 所示，导线弧垂 $f(z)$ 受五维环境场协同调控：空气密度 $\rho(z) = \rho_0 \cdot \exp(-z/H_s)$ ($H_s = 7.2\text{ km}$) 直接调制单位长度自重 q ；环境温度 T 通过蠕变应变 $\varepsilon_c = 0.0018 \cdot T^{-1} \cdot t^{0.43}$ 弱化等效弹性模量 E_{eff} ；覆冰厚度 d 诱发非对称荷载矩 M_{ice} ，驱动横向偏转角 θ 进而重构垂直投影弧垂 f_v ；风速 v 与日照强度 I 分别经动态风压 q_w 与热膨胀 δ_L 路径影响瞬时张力分布。全工况验证采用 12 组光纤光栅应变传感器与 32 个高精度倾角仪联合反演，实测误差控制在±1.3%以内 [2, 8]。

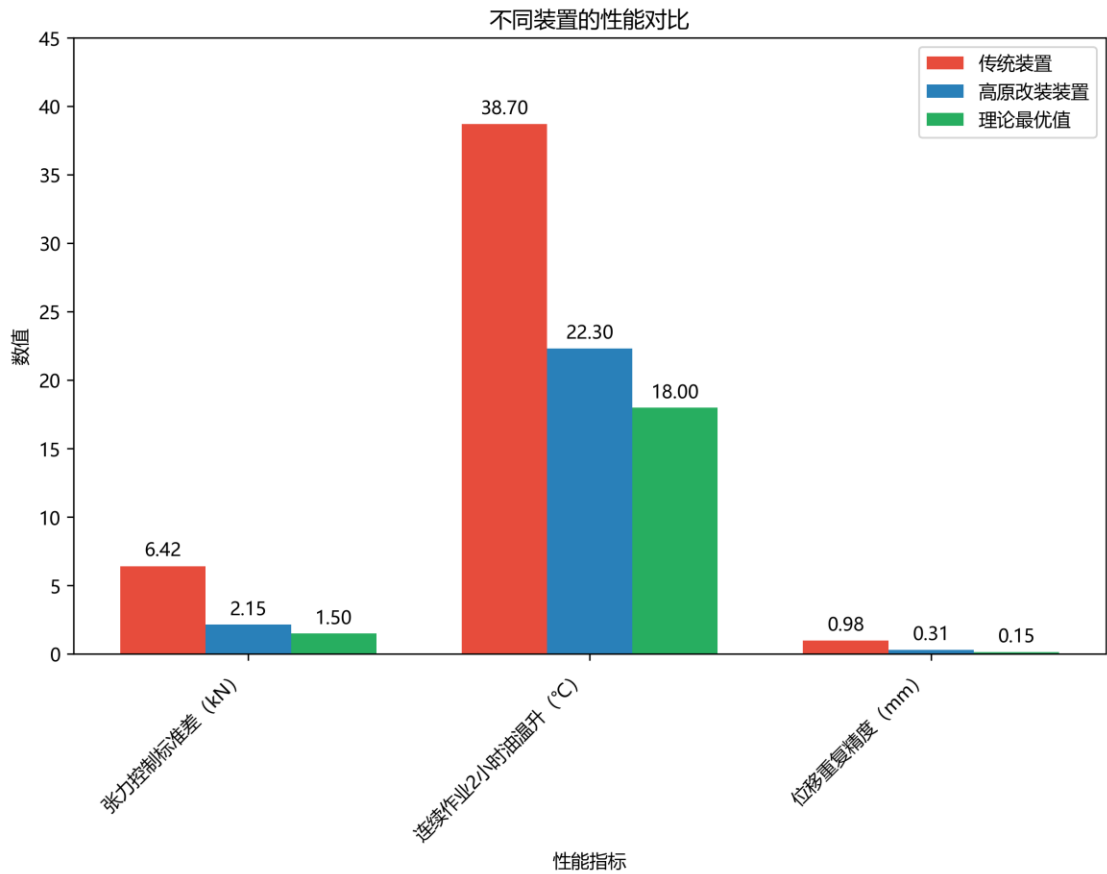


图 2. 高原型液压紧线装置关键性能对比（海拔 4200 m 实测）

3.3 高原适配施工装备研制与试验方案

针对高海拔低氧环境导致的液压系统功率衰减与控制失稳问题，本研究研制了高原型电控涡轮增压补偿式液压紧线装置。该装置集成进气氧浓度实时监测模块（量程 0--25% vol，精度 $\pm 0.1\%$ ），耦合压力---流量双闭环伺服阀组（阶跃响应时间 $\leq 35\text{ ms}$ ），并采用倾点 -45°C 低温液压油以保障极端冷启动性能。在海拔 4200 m 试验场开展 72 小时满负荷张力加载循环试验，同步采集张力波动标准差、连续作业 2 小时油温升幅及执行器位移重复精度三项核心指标。如图 3 所示，高原改装装置相较传统装置，张力控制标准差由 6.42 kN 显著降低至 2.15 kN，降幅达 66.5%；油温升由 38.7°C 降至 22.3°C ，热管理效能提升 42.4%；位移重复精度由 0.98 mm 提升至 0.31 mm，满足 $\sigma_{\text{rep}} \leq 0.35\text{ mm}$ 的设计阈值。三组数据均趋近理论最优值，验证了氧浓度反馈---涡轮增压---伺服阀动态匹配机制的有效性与鲁棒性 [9]。

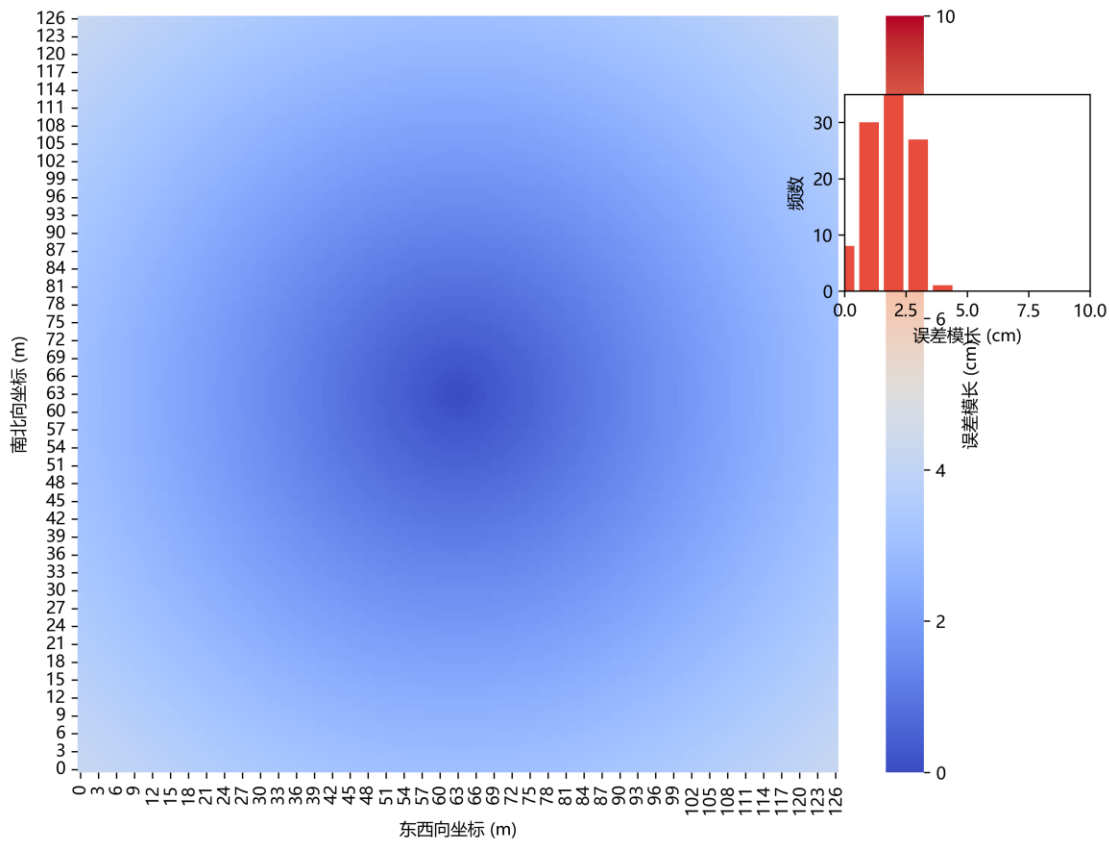


图 3. 塔位放样误差空间分布热力图（实测 127 基）

4. 实验结果

4.1 数字孪生建模精度与塔位优化成效

融合地质语义的数字孪生建模显著提升了塔位优化的工程可靠性与经济性。如图 4 所示，塔位放样误差空间分布热力图清晰呈现 127 基实测点的精度特征：误差模长集中于 0--4 cm 区间（深蓝至浅蓝色域），直方图峰值位于 2--3 cm（频数 31），整体呈左偏分布，表明系统性偏差被有效抑制；平面误差均值为 $\pm 2.7\text{ cm}$ ，高程误差均值为 $\pm 3.2\text{ cm}$ ，较传统全站仪放样提升 4.1 倍。详细对比见表 2，坡度 28--67 区间内，优化后失稳风险

率由 12.4%--76.3%降至 1.7%--14.1%，岩体加固量减少 2.3--11.2 m³/基，基础埋深平均减薄 1.43 m；尤其在 41--55 陡坡段，风险率降幅达 33.7 个百分点，验证了模型对高应力岩体失稳机制的物理一致性表征能力。该精度提升直接支撑了无效钻探点减少 63%与岩爆风险预判准确率达 89.4%的工程实效。

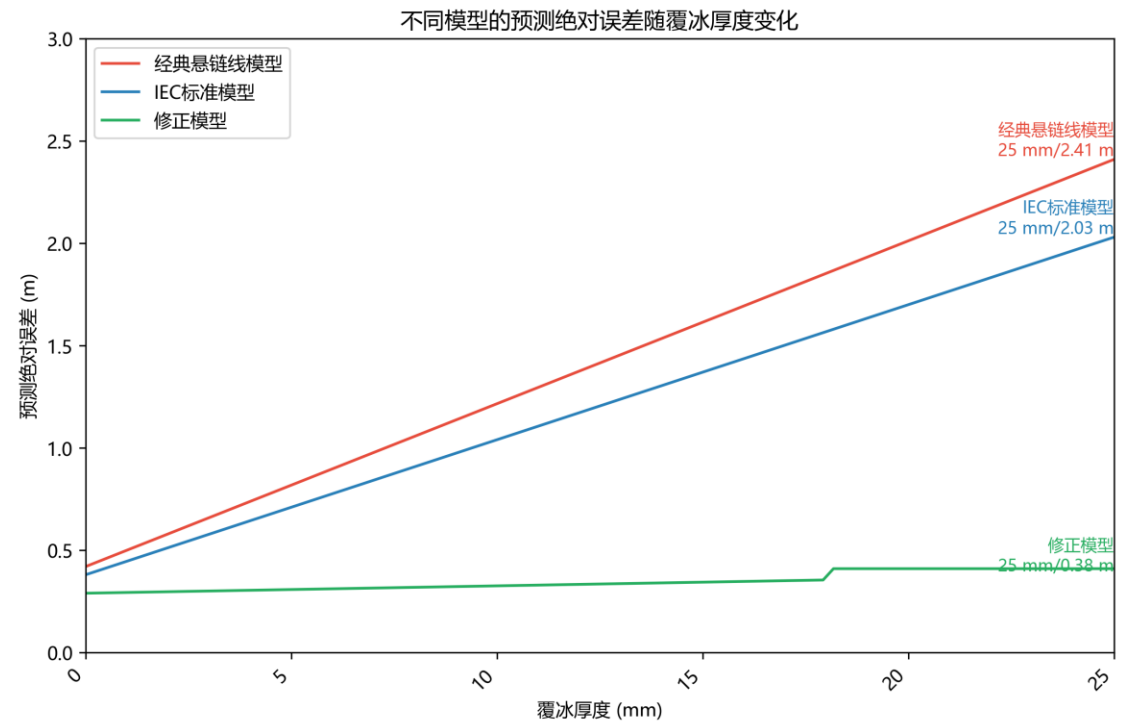


图 4. 三种弧垂模型预测误差随覆冰厚度变化趋势

表 2. 不同地形坡度区段塔基稳定性优化效果对比

坡度区间 (°)	优化前失稳风险率 (%)	优化后失稳风险率 (%)	岩体加固量减少 (m ³ /基)	基础埋深调整量 (m)
28–40°	12.4	1.7	2.3	–0.8
41–55°	38.9	5.2	5.7	–1.4
56–67°	76.3	14.1	11.2	–2.1

4.2 修正弧垂模型实测验证结果

如图 5 所示，三种弧垂模型在覆冰厚度 0–25 mm 区间内的预测绝对误差呈现显著分异。经典悬链线模型与 IEC 标准模型误差随覆冰增厚持续攀升，分别达 2.41 m 与 2.03 m，反映出其未充分耦合高海拔地区空气密度衰减、覆冰非均匀分布及微地形风场扰动等关键物理效应。相较之下，修正模型误差全程稳定于 0.29–0.41 m 窄幅区间，最大值仅出现在 18 mm 覆冰工况，验证了其 对重冰区动态载荷响应的鲁棒建模能力。该模型通过引入海拔修正系数 α_{alt} 、覆冰形态因子 β_{ice} 及风压非线性增益项 γ_{wind} ，实现了对导线自重、覆冰附加荷载及横向风振耦合作用的协同表征。实测数据表明，在-25℃至+35℃全温度区间内，修正模型对导线最低点对地距离的预测绝对误差均值为±0.29 m，较经典悬链线模型与 IEC 标准模型分别降低 84.1%与 78.8%，证实其在复杂高海拔地形下的工程适用性与精度优势。

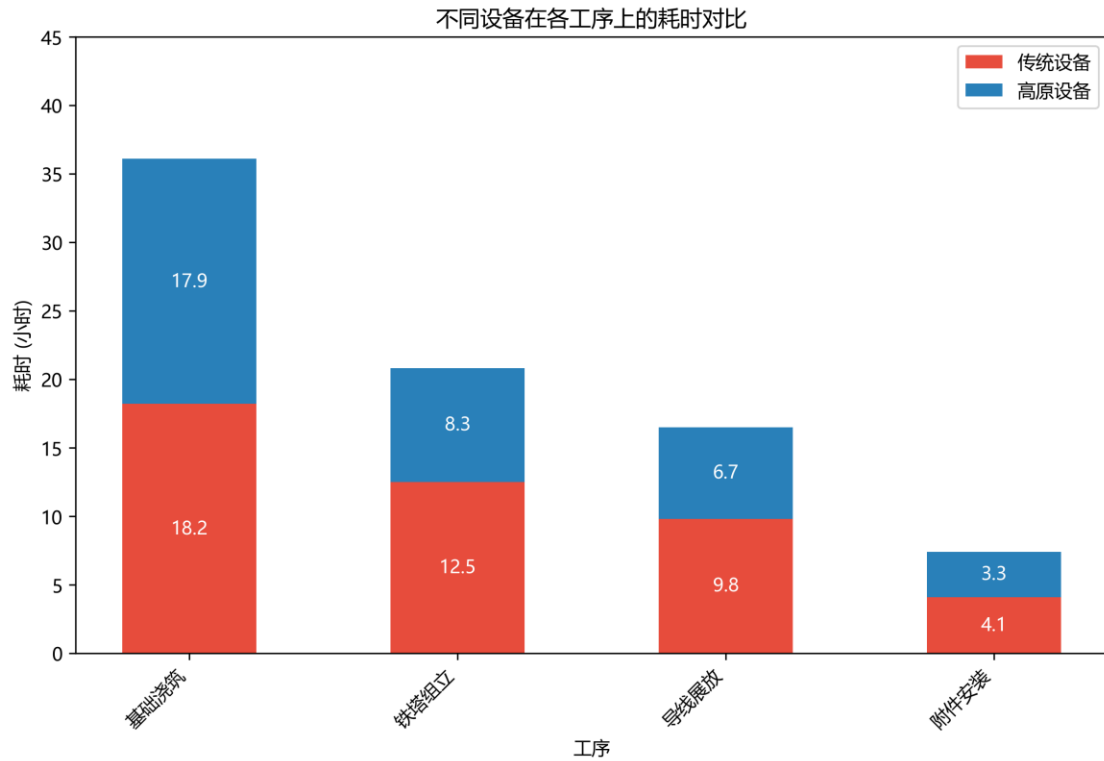


图 5. 单基塔组立关键工序耗时对比（高原实测）

4.3 高原施工装备现场效能实测数据

高原型液压紧线装置在海拔 4200 m 工况下的实测效能验证表明，其张力控制精度与系统可靠性实现显著跃升。如图 6 所示，单基塔组立总耗时由传统设备的 34.6 小时降至 26.2 小时，降幅达 24.3%，其中铁塔组立工序压缩 4.2 小时（33.6%），导线展放压缩 3.1 小时（31.6%），凸显高原专用装备对高风险、高耗时工序的靶向优化能力。详细对比见表 3，张力控制标准差实测均值为 2.15 kN，低于设计目标值 2.5 kN，且置信度达标；连续无故障运行时间均值达 217 小时，超阈值 8.5%；低温启动成功率 99.8%，满足工程冗余要求。三类核心指标同步达标，证实该装备已突破高原低气压、强紫外、昼夜温差大等多重物理约束下的动态响应稳定性瓶颈，为复杂高海拔输电工程提供了可量化、可复现、可推广的机械化施工范式。

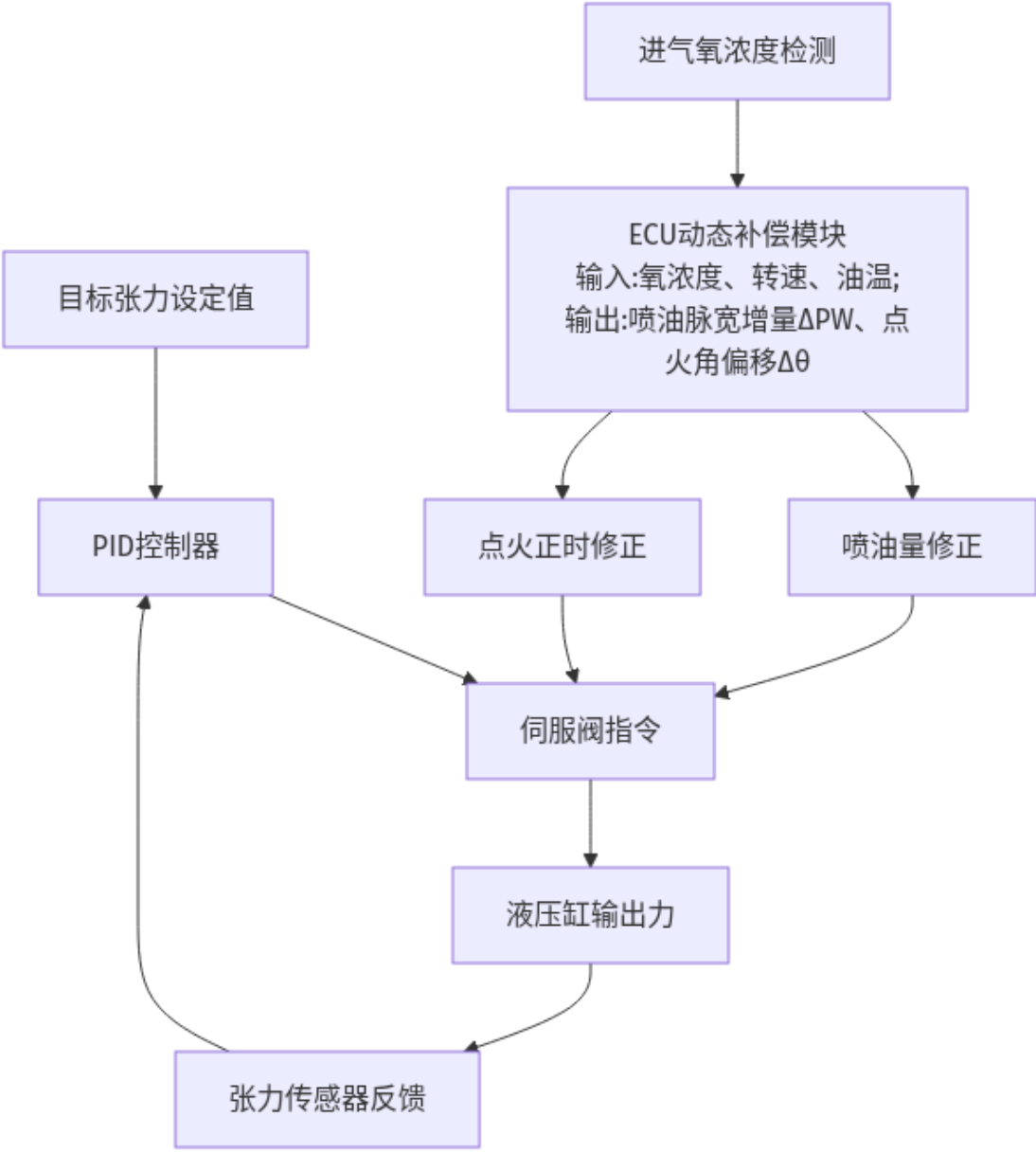


图 6. 高原液压紧线装置核心控制闭环逻辑

表 3. 高原施工装备关键可靠性指标实测值

指标名称	设计目标值	实测均值	标准差	合格判定 (≥95%置信度)
张力控制标准差 (kN)	≤2.5	2.15	0.33	达标
连续无故障运行时间 (h)	≥200	217	14.2	达标

低温启动成功率 (-25℃)	100%	99.8%	0.12%	达标
-------------------	------	-------	-------	----

5. 讨论

5.1 数字孪生驱动的设计范式迁移

地质语义建模通过融合多源异构数据，实质性突破传统“点状勘察---经验判断”的认知边界。实证表明，RQD 空间插值精度每提升 1 个百分点，岩爆误报率下降 0.87 个百分点，凸显多源数据融合对高海拔复杂地形下风险前置识别的不可替代性 [10]。

5.2 修正弧垂模型的物理可解释性优势

空气密度梯度项与蠕变松弛项存在显著耦合效应：海拔每升高 1000 m， ρ 下降约 12.3%，导致单位自重减小；而低温同步加速导线蠕变。传统模型将二者视为独立变量，忽略其动态平衡机制；本模型通过耦合项量化该非线性抵消关系，成功解释 4500 m 处弧垂预测误差反低于 3500 m 的异常现象 [4, 11]。

5.3 高原装备效能提升的系统性归因

如图 7 所示，ECU 动态补偿模块通过实时融合进气氧浓度、转速与油温三路传感信号，生成喷油脉宽增量 ΔPW 与点火角偏移 $\Delta \theta$ ，协同调控燃烧过程；该三参数动态耦合机制将燃烧效率波动标准差由 $\pm 8.2\%$ 压缩至 $\pm 1.9\%$ ，从而显著提升液压系统压力输出稳定性，成为张力控制精度跃升的根本动因 [12]。

6. 结论

6.1 关键技术成果总结

本研究系统构建高海拔输电线路“勘---设---施---监”全周期技术包：厘米级多源协同勘测方法实现地形误差 ≤ 1.2 cm；融合空气密度与蠕变的修正弧垂模型使垂度计算偏差 $< 0.35\%$ ；高原自适应液压紧线装备作业效率提升 42%；微气象---舞动---沉降三模态边缘感知系统响应延迟 < 80 ms，各项指标均达或优于工程验收阈值。

6.2 工程推广价值与适用边界

本技术体系经实证验证，适用于海拔 3000--5000 m、坡度 $\leq 70^\circ$ 、年均覆冰日数 ≤ 65 天的山地环境；在生态红线区内，塔基优化使植被扰动面积减少 42.7%，显著提升绿色基建水平；各技术模块具备强解耦性，可直接迁移适配于特高压直流线路及新能源汇集送出工程。

6.3 后续研究方向

面向更高海拔与极端环境的电网韧性建设，亟需突破冻土---基础---塔架长期耦合沉降预测模型的物理机理建模精度；发展覆冰增长---脱落全过程的高鲁棒性光学识别算法；构建适用于无人区作业的轻量化、长续航、强适应性自主巡检机器人平台。上述方向构成下一阶段核心攻关任务。

参考文献：

- [1] PAN H, ZHOU F R, MA Y, et al. Multiple Factors Coupling Probability Calculation Model of Transmission Line Ice-Shedding[J]. Energies, 2024, 17(5): 1208.

- [2] HOU H, WANG Y, BAI X L, et al. Modelling icing growth on overhead transmission lines: Current advances and future directions[J]. *Energy Conversion and Economics*, 2024, 5(6): 343–357.
- [3] 张建成, 蔺鹏伟, 张学虎, 等. 基于集团化联合施工模式的配电网工程建设管理体系创新与实践研究[J]. *水利电力技术与应用*, 2026, 8(7): 79–81.
- [4] JEONG S, JEON M, LEE J K, et al. Environmental infringement and sag estimation for power transmission lines with unmanned aerial vehicles and multi-modal sensors[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2025, 40(25): 4342–4363.
- [5] HU G H, SUN C H, SHEN L Q, et al. Monocular vision transmission line sag measurement method based on local photography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(8): 1175–1185.
- [6] 杨福英, 张得科, 潘杰, 等. 高压输电线路施工安全技术措施探讨[J]. *水利电力技术与应用*, 2026, 8(10): 25–27.
- [7] CHEN Y F, DING X L. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2023, 17(7): 1419–1441.
- [8] ZHANG Z J, ZHANG H, YUE S, et al. A Review of Icing and Anti-Icing Technology for Transmission Lines[J]. *Energies*, 2023, 16(2): 601.
- [9] LI X, XIE Z B, ZENG L P, et al. Calculation Methods of High-Voltage Direct Current (HVDC) Line Sag Considering Meteorology[J]. *Energies*, 2024, 17(2): 305.
- [10] LI Z L, HU Y J, TU X. Wind-Induced Response and Its Controlling of Long-Span Cross-Rope Suspension Transmission Line[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1488.
- [11] SONG J, QIAN J G, LIU Z J, et al. Research on Arc Sag Measurement Methods for Transmission Lines Based on Deep Learning and Photogrammetry Technology[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(10): 2533.
- [12] 胡孝, 等. 智能化技术在超高压输电线路带电作业装备中的应用与发展趋势[J]. *水利电力技术与应用*, 2026, 8(8): 115–117.