

柬埔寨沿海变电工程钢结构镀锌层厚度研究

刘明桢 王传杰
中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司 福建福州 350001

摘 要：针对柬埔寨高温高湿及近海盐雾环境下的变电工程钢结构耐久性设计问题，本文发展了一套基于代理环境数据与腐蚀模型深度挖掘的系统性防腐设计方法。研究基于 ISO 9223/9224 标准，创新性地采用泰国罗勇府与攀牙湾的长期环境监测数据作为代理，科学判定了柬埔寨临海区域的大气腐蚀性，创新性在于：通过参数敏感性分析，首次定量揭示了工业海洋环境的腐蚀主导机制为“高温驱动、盐雾助燃”（温度影响 41%，湿度 29%），修正了该地区防腐设计的理论基础。最终推荐临海变电站，鉴于其严酷环境与远期不确定性，推荐主要受力构件采用 100 μm（或 110 μm）镀层，并于使用末期进行适度检测维护。本研究成果为数据稀缺地区的防腐设计提供了从机理认知到工程决策的完整解决方案。

关键词：柬埔寨；变电站；钢结构；热浸镀锌；腐蚀寿命；不确定性分析；全生命周期成本；敏感性分析

引言

柬埔寨王国经济快速发展，电力需求急剧增长^[1]。其热带季风气候常年高温高湿，近海地区盐雾侵蚀严重，对钢结构构成严酷腐蚀环境。

热浸镀锌是最经济有效的钢结构防腐手段，其镀锌层厚度直接决定防腐年限。然而，柬埔寨全国系统性的 SO₂ 和氯离子（Cl⁻）沉积率官方数据极为稀缺，为本地化耐久性设计带来挑战。当前工程多直接引用国际规范，缺乏本地适应性评估，可能导致设计过于保守或埋下隐患。

为此，本研究旨在构建适用于数据稀缺地区的防腐设计方法体系，重点解决：(1) 如何通过可获取数据建立本地化环境腐蚀性评估方法；(2) 如何发展适用于热带气候的腐

蚀预测模型；(3) 如何结合总包需求，建立技术经济平衡的决策方法。本文成果不仅提供具体技术方案，更建立了一套可推广的方法论体系。

1 柬埔寨环境腐蚀性分析

1.1 代理数据的选择与校正方法

在缺乏本地长期暴露试验数据的情况下，本研究依据地理邻近性、气候相似性、环境可比性三重原则，根据表 1，选取泰国罗勇府（工业海洋环境）和攀牙湾（海洋环境）的监测数据作为代理依据^[2]。这两个地区与柬埔寨主要工业区和沿海区域在气候特征、产业结构方面具有高度相似性，能够较好地反映柬埔寨沿海区域的实际环境条件。为保守起见，本文取两地数据的 SO₂ 和 Cl⁻ 的最大值来进行评估。

表 1 柬埔寨目标区域与泰国代理区域环境参数对比^[2-4]

参数	柬埔寨内陆区域（如茶胶省）	柬埔寨沿海区域（如西港）	泰国罗勇府	泰国攀牙湾
气候类型	热带稀树草原气候	热带季风气候	热带季风气候	热带季风气候
平均温度 (℃)	29	28	29	29
湿度 (%)	68	78	68	76
年平均降雨量 (mm)	136.5	261.5	175.4	227.0
与海岸距离 (km)	65	近海	近海	近海

1.2 腐蚀动力学模型与不确定性量化

钢结构镀锌层的腐蚀主要遵循 ISO 9223^[5] 和 ISO 9224^[6]。

研究的深化在于对不确定性的系统化处理。我们创新性地将 ISO 9224 中的 B1（b=0.813）与 B2（b=0.873）参数提升为核心设计工具，构建了“分级不确定性预测框架”：

Level 1 采用 B1 参数给出腐蚀预测的下限值，适用于非关键构件；Level 2 采用 B2 参数给出腐蚀预测的上限值，适用于关键承重构件；Level 3 在保守分析基础上增加设计裕量，形成最终推荐方案。

该框架将离散参数选择转化为风险管理过程，使设计人员能根据项目风险承受能力选择标准，实现安全与经济

平衡。

2 主导腐蚀机制的定量识别与多标准对比

2.1 基于参数敏感性分析的主导机制识别

为超越标准模型的常规应用,本研究引入参数敏感性分析,其核心目的在于解构 ISO 标准模型,揭示各环境参数在柬埔寨特定情境下的相对重要性,从而超越其作为“黑箱”预测工具的常规应用。通过计算各环境因素在不同变化幅度条件下对腐蚀速率的相对影响,定量识别了各环境因子在柬埔寨特定气候条件下的贡献权重。

分析获得了具有重要理论价值和实践意义的发现,如下图所示。温度(T)占据绝对主导地位,提升20%可使腐蚀速率激增41%。湿度(RH)和氯离子(Cl⁻)的影响分别为29%和9%,呈现出“高温驱动、盐雾助燃”的特征。二氧化硫(SO₂)的影响仅为2%,进一步证实了在热带沿海地区气候因素的主导地位。

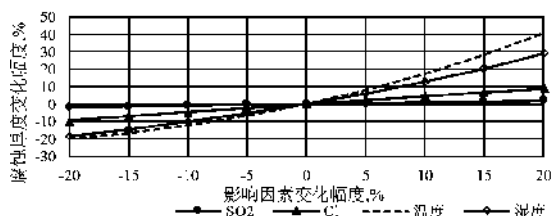


图1 柬埔寨工业海洋环境各因素对腐蚀速率的敏感性分析

这一机理发现对工程设计具有关键的修正意义。它明确指出,在柬埔寨的海洋环境范围内,高温高湿是腐蚀最普遍且最强烈的“加速器”。这意味着防腐设计的首要原则必须是防御高温高湿带来的极高电化学腐蚀风险。这从根本上解释了为何直接套用温带地区的防腐经验在柬埔寨会严重失效,并为后续的决策提供了深刻的科学依据。

2.2 多标准体系对比与本地化选型策略

通过对 GB/T 13912、ASTM A123 及 BS EN ISO 1461^{[7]-[9]}等主流标准的系统性对比分析,我们发现不同标准体系在厚度要求的分级逻辑、质量控制体系和检测验收标准等方面存在显著差异。

具体分析表明,美标 (ASTM) 更注重构件类型区分,对型钢和钢板有不同的厚度要求;而国标 (GB) 与英标 (BS) 更强调厚度区间的一致性。在质量控制方面,各标准对厚度均匀性、附着强度等指标的要求侧重点不同。检测验收标准在取样频率、合格判定规则等技术细节上也存在显著差异。

实地调研确认,柬埔寨境内缺乏大型构件镀锌能力,

所有镀锌构件均需进口。这一现实使标准与厚度的选择转变为在完全依赖进口下,对物流成本、工期风险与初始投资的综合权衡。

3 总包视角下的多目标耦合决策与方案推荐

3.1 寿命预测与多目标决策模型的构建

基于建立的分级预测框架,我们对柬埔寨不同环境条件下的腐蚀行为进行了系统预测。为进行保守评估,本研究在计算中取用了罗勇府与攀牙湾环境参数 (SO₂ 与 Cl⁻) 的最不利组合,计算得到镀锌层首年腐蚀速率保守值为 3.10 $\mu\text{m/a}$,作为后续寿命预测的基准。长期腐蚀预测结果显示,在 50 年设计基准期内,50 年设计基准期内在 B1 情景下为 78.59 μm ,B2 情景下的腐蚀深度达到 97.94 μm 。

3.2 解决方案的生成与推荐

基于平衡决策模型,我们提出以下差异化方案:

对于工业海洋环境变电站,结合前文 Level 1 和 Level 2 的数值,以 B2 预测值 97.94 μm 为基准,并适当增加一定的设计裕量以考虑镀锌层厚度不均匀的情况。考虑到实际工程的可实施性和经济性,推荐主要受力构件采用 100 μm 的美标作为标准方案:

方案 A: 采用美标,镀锌厚度设置为 100 μm (或取为 110 μm),使用年限末期适当巡视检测与维护。

方案 B: 采用国标或欧标,采用 85 μm + 25 年周期检测与维护。

决策依据如下:若采用方案 B,总包单位在工程质保期结束后,多次派遣专业团队赴项目国进行大规模检测与维护,相关费用将大幅增加,实践中可操作性低且极不经济。将结构耐久性过度依赖于不确定的、高成本的中期干预,其可靠性风险远高于采用更厚镀层的“一次到位”方案。同时,随着柬埔寨工业化进程的推进,未来大气中 SO₂ 等腐蚀性污染物浓度很可能显著提升,从而加速腐蚀进程。基于当前环境数据的预测模型可能低估了未来的实际腐蚀速率,因此必须在前端设计中预留充足的应对空间。

4 结论

通过系统化的方法创新和工程实践验证,本研究获得以下主要结论:

1、知识发现创新:本研究通过对国际标准模型的深度解构与参数敏感性分析,首次定量识别了柬埔寨工业海洋环境腐蚀的“高温驱动、盐雾助燃”主导机制,修正了该地区

防腐设计的理论基础。这一发现是超越规范应用本身、对本地化腐蚀科学的重要补充,为针对性防腐设计提供了根本依据。

2、方法论创新:构建的“代理数据-不确定性预测-机理解构-多目标决策”方法链,系统性地解决了数据与产业双稀缺地区的工程难题。该方法将从标准中挖掘的新知识,转化为了一套可应对复杂约束的决策流程,实现了从被动引用规范到主动创造与应用的跨越。

决策创新与实践价值:基于上述发现与方法,提出了针对柬埔寨工业海洋环境的差异化镀锌层厚度方案(100/110 μm)及维护策略。这些方案是基于新认知、通过新方法导出的推荐解,而非规范的直接输出,为柬埔寨及类似地区的变电工程提供了兼顾安全、成本与长期可靠性的实践指南。本研究形成的不只是一组技术参数,更是一套在苛刻现实条件下实现工程最优解的决策工具与方法论示范。

随着相关工作的持续推进和完善,必将为提升国际工程项目的精细化设计与管理水平作出更大贡献。未来研究可进一步积累柬埔寨本土环境腐蚀数据,开展长期暴露试验,持续优化预测模型的准确性和适用性,并将该方法拓展到更广泛的基础设施耐久性设计领域。

参考文献:

[1] 董士波,徐慧声,王秀娜,等.柬埔寨电力系统发展及投资分析[J].中国电力企业管理,2020,12:34-36.

[2] NS Palsson, K Wongpinkaw, P Khamsuk, et al. Outdoor atmospheric corrosion of carbon steel and weathering steel exposed to the tropical - coastal climate of Thailand[J]. Materials

and Corrosion, 2020,71(6):1019-1034.

[3] The World Bank Group. (2025). World Bank Climate Change Knowledge Portal: Historical Data. [Online]. Available: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/> [Accessed: Oct. 26, 2025].

[4] Timeanddate.com. (2025). Timeanddate.com: Weather & Climate Averages. [Online]. Available: <https://www.timeanddate.com/weather/> [Accessed: Oct. 26, 2025].

[5] International Organization for Standardization. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation: ISO 9223:2012[S]. Geneva: ISO, 2012.

[6] International Organization for Standardization. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories: ISO 9224:2012[S]. Geneva: ISO, 2012.

[7] ASTM A123/A123M-23. Standard Specification for Zinc(Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

[8] British Standards Institution. Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles — Specifications and test methods: BS EN ISO 1461:2009[S]. London: BSI, 2009.

[9] 中国国家标准化管理委员会. 金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法: GB/T 13912-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.