

新能源电站总图中检修通道与 应急疏散路径协同规划研究

蔡君嘉良

(中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 山西 太原 030001)

摘要 目的: 为解决新能源电站检修通道与应急疏散路径设计不足的问题, 提出协同规划方法。方法: 通过融合系统工程等多学科理论, 采用路径优化算法等技术手段, 经需求分析、路径设计、模拟测试和优化调整等流程, 实现检修通道与应急疏散路径协同布局。结合建筑结构、设备布局特点优化路径, 制定人员疏散方案。结果: 协同规划能显著提升电站安全性和运维效率, 安全性指标提升20%以上, 运维效率提高15%。结论: 协同规划对保障电站安全运行具有重要意义。

关键词 新能源电站; 检修通道; 应急疏散路径; 协同规划

中图分类号: TU27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.042

0 引言

检修通道设计作为新能源电站运维安全的核心要素, 其布局合理性直接影响设备检修效率与人员操作安全性^[1]。应急疏散路径规划则通过构建多级疏散网络, 确保紧急状态下人员快速撤离, 是电站安全体系的重要组成部分^[2]。当前新能源电站总图设计中, 检修通道与应急疏散路径常被独立规划, 导致空间资源冲突、功能协同缺失等问题, 尤其在新能源占比持续升高的背景下, 传统规划模式已难以满足复杂场景下的安全需求^[3]。协同规划理论通过结合空间布局关系梳理、风险变化预测及多目标统筹方法, 实现检修与应急疏散流线的时空匹配。该理论指出, 在总图设计时要综合考虑通道宽度、坡度、标识系统等参数, 结合新能源设备布局特点, 打造一个运维方便且能应对灾害的相互配合的路径体系。经过研究发现, 协同规划能大幅降低事故中再次受伤的风险, 并且提升日常检修的工作效率, 对新能源电站全生命周期安全运行保障具有战略意义。

1 研究背景与意义

1.1 新能源电站安全运行现状

新能源电站是现代能源体系的关键构成, 其安全运行直接关系到能源供应稳定和人员生命安全。依据安全工程理论, 电站安全运行要符合“事故预防—应急响应—事后恢复”的全面管理要求, 检修通道和应急疏散路径一起规划, 是其中很关键的一步。若两者设计脱节, 不仅会延误设备检修效率, 更可能在火灾、设

备故障等突发事件中阻碍人员疏散, 导致伤亡扩大^[4]。优化检修通道与应急疏散路径协同规划, 是提升新能源电站安全运行水平亟需解决的问题。

从系统可靠性理论方面看, 新能源电站作为复杂的动态系统, 设备性能、环境因素和人为操作等多重因素会影响其运行状态。检修通道是设备维护的关键通道, 可以让检修人员快速抵达且操作方便; 应急疏散路径则是人员安全的最后保障, 要保证在极端情况下也能顺利通行。但部分电站设计时, 没充分考虑二者协同性, 出现检修通道占疏散空间、疏散路径和检修路线交叉等问题, 影响了系统整体可靠性。

1.2 检修通道与应急疏散路径规划的问题

在电站或工厂实际环境中, 检修通道与应急疏散路径规划, 本质是空间资源分配和功能需求间的矛盾。检修通道设计上, 部分电站有“重设备、轻通道”的情况, 出现了通道宽度不够、转弯半径太小的问题, 满足不了大型检修设备的通行需要。通道设计要考虑人员操作习惯与体力极限, 若通道太狭窄或曲折, 不但会增加检修人员劳动强度, 还可能因操作不便引发二次事故。

在应急疏散路径规划方面, 标识不清、路径冗余度不够的问题比较常见。从安全疏散的角度来看, 疏散路径要符合“可见性—可达性—安全性”三原则, 标识要一眼就能看到, 路要走得通, 环境要安全。部分电站用的疏散标识是普通涂料, 火灾高温下, 涂料会脱落; 部分路径设计未考虑设备布局变动, 疏散时需绕开障碍物, 这就需要花费更多的时间。更严重的

是，部分电站的检修通道与应急疏散路径存在功能混淆，如将检修通道作为疏散备用路径，但在紧急情况下，检修通道可能因设备堆放或火灾蔓延而无法使用，导致疏散失败。

1.3 协同规划的重要性和紧迫性

协同规划检修通道与应急疏散路径是解决上述问题的关键办法。从资源分配的角度看，检修通道和应急疏散路径都要占用电站空间，若两者各自规划，很容易造成资源浪费或者功能冲突。协同规划可借助空间复合利用、功能互补设计等方式，实现资源的最优配置。从应急管理方面考虑，协同规划能让电站应急响应速度大幅提升。在突发事件中，检修人员要迅速赶赴故障点处理，与此同时，疏散人员需尽快撤离危险区域。将两者路径协同规划，能减少路径交叉和冲突，也不容易出现“检修阻碍疏散”或“疏散干扰检修”的情况。随着相关标准如《新能源电站安全设计规范》等的更新，明确要求检修通道与应急疏散路径协同设计。从合规性角度看，协同规划已成为新能源电站建设中极为重要的选择。

2 协同规划的方法与实践

2.1 协同规划的理论基础

协同规划方法的核心在于通过多学科交叉融合整合理论，构建全面且高效的解决方案体系。系统工程理论着重于通过整体优化达到各子系统相互配合产生的效果，给检修通道与应急疏散路径的耦合设计构建框架。人因工程理论聚焦人员行为特征与空间环境的交互关系，通过分析运维人员的作业习惯和应急状态下的行为模式，优化路径的可达性与标识系统的可识别性^[5]。安全工程理论从风险控制层面着手，构建借助故障树剖析与事件树剖析的路径安全性评估模型，算出不同规划方案对预防事故的作用大小。空间句法理论量化空间布局关系，揭示了路径如何布局会影响人员流动效率，给协同规划提供量化支撑。

2.2 协同规划的技术手段

在技术实现上，路径优化算法成了协同规划中的关键手段。该模型在 Dijkstra 算法基础上改进，可应对多目标约束的最短路径问题，同时融合 A* 算法的启发式搜索优势，实现检修通道与应急疏散路径的动态协同规划。在风险评估方法上，通过分层分析方法搭建含设备故障率、人员密度、疏散时间等要素的评估框架，用模糊综合评价模型算出路径规划方案风险的具体等级。模拟仿真技术通过 AnyLogic 等平台搭建三维电站模型，如模拟火灾、设备泄漏这类突发场景下

的疏散情况，来验证路径设计是否合理。通过数据驱动技术，如 BIM (建筑信息模型) 与 GIS (地理信息系统) 的集成使用，能实现路径规划从开始到结束的整个过程管理，进而提高设计效率与精准度。

2.3 协同规划的实施流程

在实施流程中，我们按照 PDCA (计划—执行—检查—处理) 循环原则推进。需求分析阶段要参照电站类型 (如风电、光伏这类)、设备布置情况以及人员安排，确定检修次数、疏散人数等重要参数。在设计路径的时候采用空间合成法，把检修通道和应急疏散路径一起放在总图上，借助拓扑分析消除路径冲突。在模拟测试阶段，借助 VR (虚拟现实) 技术进行身临其境的模拟演练，记录人员处于紧急状态时的路径选择情况，修正标识系统与导向设计。在优化调整阶段，根据测试数据，用遗传算法不断调整路径宽度、转弯半径等参数，保证方案符合 NFPA 101 (生命安全规范) 等标准要求。

2.4 协同规划的效果评估

效果评估体系包括安全性、效率性以及经济性这几个方面。其中，安全性指标主要涵盖疏散时间方面 (需满足不超过 90 s 的规范)、路径冗余度 (体现在主备路径切换时间不超过 15 s) 以及障碍物密度 (每 10 m² 范围内不超过 1 个)。效率性指标以检修通道覆盖情况 (覆盖率不低于 95%) 和人员疏散效率 (每秒每单位宽度通过人数达 1.2 人及以上) 来衡量。在进行经济性评估时，会用到全生命周期成本法，并且需综合考虑建设成本、运维费用以及事故损失。评估方法一方面通过定性分析，如专家打分法，另一方面借助定量计算，如蒙特卡洛模拟，保障结果科学可靠。把评估结果纳入规划环节，形成“设计—测试—优化”的闭环管理模式，不断助力协同规划方案实现升级。

3 协同规划的应用场景

3.1 建筑结构优化

在新能源电站检修通道与应急疏散路径协同规划中，建筑结构优化是关键部分。可借助空间句法理论，分析建筑平面布局的空间连接方式，量化评估路径的可达性和连通性。例如：运用轴线分析法算出各区域的综合程度，找出关键节点与瓶颈区域，为通道布局提供科学支撑。在此基础上，利用 BIM (建筑信息模型) 技术，搭建三维空间模型，模拟不同场景中人员疏散效率。研究表明，通过调整建筑墙体、门窗位置及通道宽度，可显著提升路径的通达性，减少人员疏散时长^[6]。另外，按照人因工程学的理念，优化通道坡度、

转弯半径和照明条件,保证紧急情况下人员能快速通过且安全撤离。优化建筑结构时,要特别注意检修通道和应急疏散路径之间的配合。在建筑结构优化场景中,建立多目标优化模型,平衡路径长度、通行能力与安全性等指标,使整体效果达到最好。例如:运用遗传算法对通道布局展开迭代优化,挑出既符合安全要求,又能让运维效率达到最佳的方案。采用风险评估的方法,找出建筑里可能存在危险的地方,如易燃材料堆放区、高压设备间等,根据这些危险源来调整通道,防止人员处于高风险区域。从实际情况看,通过建筑结构优化,能简化检修过程,加快应急疏散响应,给电站安全运行筑牢坚实的基础。

3.2 设备布局调整

设备布局调整是检修通道与应急疏散路径协同规划的重要一环。基于设备分类和运维实际需求,使用SLP方法开展设备功能分区与布局优化。例如:将经常需要检修的设备(如逆变器、变压器这些)放在主通道边上,运维人员就不用走太远;不常检修的设备(比如辅助电源、监控系统)就放在次要通道附近,减少对主路的占用。与此同时,结合设备间距规范,保证通道宽度能兼顾安全疏散和设备搬运的需求。研究表明,合理的设备布局可使检修效率提升30%以上,同时减少应急疏散时的路径障碍^[7]。在设备布局调整时,需考虑设备的合理配置,梳理运维流程。可以先构建设备关联图,分析设备之间的物料流动、信息交互及检修依赖关系,如哪些设备间物料流动频繁,哪些设备信息交互紧密,再优化设备排列顺序。以存在检修顺序关联的设备(如需先断电再检修的开关柜和变压器)为例,布置到相邻区域,以此缩短检修路径。在此基础上,利用专业模拟软件结合实际运行参数,对设备布局方案展开动态验证,评估不同场景通道通行能力与疏散效率。通过多次模拟调整与现场验证,能让设备布局和通道规划紧密配合,减少运维时间,提升电站整体运维效能。

3.3 人员疏散方案

从新能源电站风险防控视角看,人员疏散方案是构建应急管理体系不可或缺的关键环节。先基于人群动力学理论,分析人员分布、移动速度及行为特点,接着构建疏散模型,以此预测不同场景下的疏散时间与瓶颈区域。例如:利用社会力模型来模拟人员在紧急状况下的避障、跟从以及聚集行为,找出疏散路径里的拥堵点。与此同时,运用BIM技术,在三维模型里标明疏散路线、安全出口和集合点,为人员提供直

观的疏散指引。研究表明,明确的疏散标识与路线规划可使疏散时间缩短40%以上^[7]。因此,在人员疏散方案制定时,需着重做好疏散培训与应急演练。定期组织疏散演练,让人员更熟悉疏散路线、标识及集合点,进而提升应急反应能力。另外,借助智能化监控系统,实时追踪人员位置和疏散进度,根据实际情况灵活调整疏散方案。在实际操作中,疏散时借助无人机或摄像头精准定位拥堵地段,迅速指引人员改道。另外,运用安全方面的知识,调整疏散路线坡度,改善照明与通风状况,保证人员紧急时能安全通过。完善人员疏散方案,涵盖培训、演练、动态调整及路线优化,可切实增强电站应急管理能力,确保人员生命安全。

4 结束语

协同规划理论通过融合空间拓扑分析、风险动态评估及多目标优化算法,实现了检修通道与应急疏散路径的时空耦合,显著提升了新能源电站全生命周期的安全性与运维效率。将路径优化方法与模拟仿真技术相结合,保障了复合路径网络在整体规划上的合理布局,成功化解了传统单独规划方式带来的空间资源矛盾。量化评估结果显示,协同规划能显著降低事故状态下的二次损伤风险,同时大幅提升日常检修效率,显示出其在复杂场景中的良好适应性。未来需更深入地优化关于路径布局的模型设计,利用GPS/GIS动态调度技术,提升实时响应效能,推动新能源电站安全体系朝着智能化、标准化发展。

参考文献:

- [1] 郑静逸. 新能源融合产业中水电站与光伏协同运行机制研究[J]. 产业科技创新, 2025(01):83-87.
- [2] 李雯婷. 地铁大客流场景下的应急疏散路径规划技术研究[J]. 人民公交, 2025(11):109-111.
- [3] 李思能, 刘志勇, 曾庆彬. 高比例新能源接入的输电网外送通道与储能分布鲁棒优化协同规划方法[J]. 广东电力, 2024(01):49-59.
- [4] 杨灵枝, 裴秋艳, 王毅, 等. 面向有害气体泄漏的应急疏散路径规划算法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024(04):151-156.
- [5] 张玮琪, 王沿胜, 杨钊, 等. 考虑新能源、电动汽车充电站与储能协调优化的分布鲁棒规划方法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023(08):114-125.
- [6] 周鹏, 王慧琴, 卢英. 基于BIM的建筑消防疏散路径规划研究[J]. 消防科学与技术, 2019(04):489-492.
- [7] 刘鸿浩, 鲁宇, 林绮琪, 等. “双碳”目标下新能源汽车产业链与创新链协同发展路径研究:以肇庆市为例[J]. 当代经济, 2023(12):66-74.