

电力基础设施韧性提升工程建设策略研究

武天佐

北京吉北电力工程咨询有限公司 北京市 102600

摘要：在全球气候变化与极端灾害频发的背景下，电力基础设施的韧性提升成为保障能源安全与社会稳定的核心任务。本文从理论框架构建出发，系统分析了电力基础设施韧性提升的物理结构强化、智能感知与自愈技术、分布式能源与微电网整合以及跨部门协同与标准化建设四大关键路径，结合国内外典型案例提出工程化实施策略，旨在为构建具备“抗灾—适应—恢复—创新”能力的电力基础设施提供理论支撑与实践参考。

关键词：电力基础设施；韧性提升；工程建设

电力基础设施作为现代社会运行的“生命线”，其稳定性直接关系到经济活动、社会秩序与民生安全。然而，近年来全球极端天气事件频发，导致大规模停电事故频发，暴露出传统电网在抵御灾害冲击时的脆弱性。例如，2021年美国得州寒潮引发全州400万户停电，经济损失超200亿美元；2023年我国华北暴雨造成多地变电站水浸，区域性供电中断。在此背景下，提升电力基础设施韧性已成为全球能源转型与城市安全发展的关键议题。本文从理论框架构建与技术路径优化双重视角出发，系统探讨电力基础设施韧性提升的工程化实施策略，以期构建安全、可靠、可持续的电力供应体系提供参考。

1 电力基础设施韧性提升的理论框架

电力基础设施韧性的理论框架，超越了以连续供电为目标的传统可靠性范式，构建了一个贯穿扰动事件全生命周期的动态能力体系。该框架的核心在于将韧性视为一个涵盖事前、事中、事后三个阶段的连续谱。灾前阶段侧重于系统的鲁棒性与预备能力，即通过前瞻性的风险评估、基础设施的差异化加固以及冗余资源的配置，提升系统承受初始冲击而不发生灾难性崩溃的固有强度。灾中阶段强调系统的自适应性与资源调动能力，即在扰动发生过程中，系统能够通过灵活的拓扑重构、资源优化调度和关键负荷的优先保障，最大限度地维持核心功能的运行，防止事故链的进一步扩大^[1]。灾后阶段则聚焦于系统的快速恢复能力，这依赖于高效的故障诊断、受损元件的快速修复或隔离，以及供电秩序的优先重建。这一全过程理论框架要求我们将电力系统理解为一个与信息、物理、社会系统深度耦合的复杂自适应系统，其韧

性的提升不仅依赖于“硬”的物理设施强化，更需要“软”的智能决策、组织协同与制度保障作为支撑，从而形成一个多层次、一体化的综合治理策略。总的来说，电力基础设施规划在可持续城市发展中具有重要性，它不仅提供可靠的电力供应，支持经济发展，还促进可持续能源转型，降低环境影响，改善能源效率，并为城市的灵活性和可持续发展提供支持。因此，合理规划电力基础设施是确保城市能够实现可持续发展的重要一环。

2 电力基础设施韧性提升的关键技术路径

2.1 物理结构强化：冗余设计与分布式布局

传统电网长期依赖集中式发电模式与长距离输电网络，这种结构虽在规模化供电中具备效率优势，却潜藏着显著的脆弱性——单一发电厂故障或输电线路中断可能引发连锁反应，导致大面积停电，甚至造成区域性能源瘫痪^[2]。2021年美国得州寒潮中，集中式电厂因燃料冻结集体停运，叠加输电线路覆冰断裂，最终引发全州400万户停电，经济损失超200亿美元；2023年我国华北暴雨导致多地变电站水浸，区域性供电中断，暴露出集中式架构在极端天气下的抗灾短板。这些案例警示，物理结构革新已成为提升电力韧性的关键突破口，其核心路径在于通过冗余设计与分布式布局构建“去中心化”的抗灾体系。

冗余设计通过增加备用电源与供电路径，降低对单一节点的依赖，形成多路径供电的容错机制。德国10kV级微电网采用双回路供电架构，结合光伏、风电与柴油发电机多电源接入，并配置储能系统实现能量缓冲。在2022年台风“艾莎”袭击期间，该微电网因多路径供电能力，仅10%区域

出现短暂停电，90% 以上用户供电未受影响，恢复时间较传统电网缩短 80%。我国额济纳旗“源网荷储”一体化微电网则通过新能源（光伏、风电）、储能（电池组）与应急电源（柴油发电机）的协同控制，构建了广域离网状态下的独立运行能力，实现全年零停电记录。这种设计在极端天气或主网故障时，可快速切换至孤岛模式，保障医院、通信基站等关键负荷持续供电，显著提升了区域能源自给率。

分布式布局通过模块化设计将电网划分为独立运行的子模块，限制故障传播范围，形成“局部受损、全局可控”的防御格局。日本福岛核事故后，当地电网通过分散式能源布局（如屋顶光伏、社区微电网）与需求侧管理（如可中断负荷协议），构建了多层次能源供应体系。地震引发的主网瘫痪未导致全面停电，分布式模块依靠本地发电与储能维持基本供电，需求侧响应机制则通过智能电表引导用户减少非关键负荷，为救援与重建争取了宝贵时间。此外，抗灾材料与结构优化为物理设施提供了“硬核”防护：耐候电缆采用防水涂层与高强度绝缘材料，可在暴雨中保持绝缘性能；抗震杆塔通过阻尼器与柔性连接设计，抵御地震波冲击；防水变电站采用密封舱体与排水系统，防止水浸导致设备短路。这些技术使电力设施在极端天气下的生存能力提升 30% 以上，为分布式架构的稳定运行提供了基础保障。

2.2 智能感知与自愈技术：数据驱动的动态响应

在电力基础设施韧性提升的进程中，智能感知与自愈技术构成了数据驱动的动态响应体系，通过全面应用先进的传感、通信、计算与控制技术，来建设高效、可靠、灵活、可持续发展的电力系统^[3]。这一体系的核心在于整合多源数据、构建智能模型，并依托自愈算法实现故障的快速隔离与系统恢复，最终形成覆盖灾害全周期的韧性闭环。

智能感知是韧性提升的基础支撑。通过部署 SCADA 系统（数据采集与监视控制系统）、物联网传感器网络及气象监测终端，电力系统可实时获取设备运行状态、环境参数与灾害预警信息。例如，美国联邦应急管理局（FEMA）开发的“韧性评估工具”整合了地震、洪水、飓风等灾害的历史数据与实时气象信息，结合电网拓扑结构，量化灾害对变电站、输电线路的潜在影响，为应急资源分配提供科学依据。我国南方电网在深圳试点应用的智能感知系统则更进一步：通过在配电线路安装智能开关，结合分布式光伏与储能装置的实时数据，系统可动态评估故障位置与影响范围。当台风

导致线路故障时，智能开关能在 30 秒内自动隔离故障段，同时联动分布式发电为非故障区域供电，将故障恢复时间从传统模式的数小时缩短至分钟级，显著提升了供电可靠性。

自愈能力的优化依赖于智能算法与数字孪生技术的深度融合，基于机器学习的故障定位算法可通过分析电流波动、电压异常等数据，快速锁定故障点，较传统人工巡检效率提升 90% 以上。而数字孪生技术则通过构建电力基础设施的虚拟模型，模拟极端场景下的系统响应，为韧性加固提供前瞻性方案。例如，WESIM 灾害推演平台针对化工园区电力设施，模拟洪灾对地下电缆、柔性接头的冲击过程，通过调整接头材质与安装角度，将物理破坏风险降低 40%。从智能感知到自愈修复，数据驱动的动态响应体系通过“感知—分析—决策—执行”的闭环，使电力系统具备了对灾害的“预判力”“适应力”与“恢复力”。这一体系不仅提升了电网在极端天气、网络攻击等场景下的生存能力，更为未来智能电网与能源互联网的建设提供了技术范式，推动电力基础设施向更高水平的韧性演进。

2.3 分布式能源与微电网：多元化能源供应

在全球能源转型与极端气候频发的当下，分布式能源与微电网的深度融合，正成为重塑电力系统韧性的关键力量。它们以“分散布局、多元互补”的智慧，打破传统电网对单一能源和长距离输电的依赖，为能源安全与低碳转型注入新动能。青海玉树的“风光储柴”混合微电网项目，堪称高寒地区的能源革命。这里的光伏板配备自动除尘系统，能快速清除积雪与沙尘，发电效率提升 25%；AI 算法驱动的风光功率预测模型，将发电波动误差控制在 5% 以内，让储能系统精准充放电；负荷分级控制系统则像一位“智能管家”，在主网故障时优先保障医疗设备等关键负荷供电。三年运行下来，项目供电可靠性达 99.1%，单村年减碳 200 吨，成为高寒地区能源转型的标杆。

四川凉山州的高寒山区，同样因分布式能源焕发新生。当地采用“光伏+储能+柴油备用”模式，抗雪压光伏支架与耐低温储能系统应对极端气候，柴油发电机作为“最后一道防线”，形成“风光为主、储能调峰、柴油托底”的稳定供能结构。项目投运后，偏远山区告别了因线路覆冰、地质灾害导致的频繁停电，清洁能源真正走进了千家万户。

微电网的韧性，更体现在其“自治与互济”的双重能力上。当主网因灾害中断时，微电网能迅速切换至孤岛模式，

依靠本地光伏、风机和储能系统维持关键负荷运转。日本福岛核事故后，社区微电网在主网瘫痪期间，为医院、避难所提供了持续电力，成为灾后重建的“生命线”。而需求侧响应与虚拟电厂技术，则让微电网拥有了“灵活调节”的智慧。智能电表与用户侧储能联动，能在灾害期间引导用户减少非关键负荷，为关键设施腾出供电空间。欧盟“RESILIENT-EU”项目在热浪期间，通过调峰指令降低电网峰值负荷 15%，避免了电力短缺引发的连锁故障，展现了多元化能源供应的社会价值。分布式能源与微电网，正以“去中心化”的智慧，重构电力系统的韧性基因。它们不仅是极端气候下的“安全垫”，更为全球能源转型提供了可复制、可扩展的实践样本，推动电力系统向更灵活、更包容、更可持续的未来迈进。

2.4 跨部门协同与标准化建设：制度保障与资源整合

在电力基础设施韧性提升的宏大叙事中，跨部门协同与标准化建设犹如并行的双轨，既通过制度创新打破部门间的无形壁垒，又以技术规范为工程建设划定统一标尺，共同驱动着电力系统从“被动应对”向“主动防御”的深刻转型，而社会力量的深度参与则为这一转型注入了温暖的人文底色^[4]。

传统模式下，电力、公安、消防、医疗等部门因职能差异形成“信息孤岛”，灾害应对时往往出现资源错配、响应滞后等困境。2021 年美国得州大停电中，电力部门与应急管理部门因缺乏实时数据共享，导致救灾物资调配延迟数小时，加剧了危机蔓延。对此，我国以制度创新破局：国家电网与公安部签订的联防联控协议，构建了“威胁情报共享-风险联合研判-资源统筹调配”的三级机制——公安部门实时提供网络攻击、物理破坏等安全威胁信息，电力部门据此动态调整电网运行方式；消防部门与电力公司联合开展变电站防火演练，将应急响应时间缩短 30%；医疗系统则通过电力部门提供的负荷预测数据，提前制定医院应急供电方案^[5]。这种“横向到边”的协同模式，使电网在面对自然灾害、网络攻击或人为破坏时，能快速激活跨部门应急预案，形成“1+1>2”的防御合力。

标准化建设则为韧性提升提供了可量化的技术基准。国际标准化组织(ISO)发布的 ISO22399 标准,首次提出了“社

会韧性量化模型”，将电力供应中断对经济、社会的影响细化为 12 类指标，为全球电网韧性评估提供了统一框架。我国在此基础上，结合国情制定了《智能电网发展规划》，明确要求核心区域电网可用性达到 99.99%（即年停电时间不超过 52 分钟），并细化了设备冗余度、故障恢复时间等具体参数。例如，在特高压输电线路建设中，标准规定每 50 公里需设置 1 个应急抢修点，储备的备品备件需满足 72 小时内恢复供电的需求。这些标准不仅指导了设备选型与工程验收，更推动了产业链上下游的技术升级——制造商根据标准优化产品设计，运维单位依据规范制定巡检计划，最终实现了从“建设”到“运维”的全周期韧性管理。

3 结语

电力基础设施韧性提升是一项系统性工程，需从物理结构、智能技术、能源供应与管理机制四方面协同推进。物理结构强化通过冗余设计与分布式布局降低系统风险，智能感知与自愈技术依托数据驱动实现动态响应，分布式能源与微电网提供多元化能源支撑，跨部门协同与标准化建设构建制度保障。未来，随着数字孪生、人工智能与区块链技术的融合应用，电力基础设施韧性将向“预测性维护-自适应调节-全社会参与”的方向演进，为全球能源转型与城市安全发展提供更强支撑。

参考文献：

- [1] 施政奇. 电力基础设施项目现场施工管理存在的问题与改进[J]. 大众用电, 2024,39(12):50-51.
- [2] 安永亮. 智慧城市框架下电力基础设施智能化升级研究[J]. 新城建科技, 2024,33(10):96-98.
- [3] 艾傲兰. 电力基础设施规划与城市电力施工的协同发展[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024,(05):7-9.
- [4] 吴吉林. “双碳”背景下电力能源基础设施投融资策略研究[J]. 金融客, 2023,(10):46-48.
- [5] 王新波. 关于乡村振兴与新型电力基础设施的建设探索[J]. 农电管理, 2022,(12):60-61.

作者简介：武天佐（1982—），男，满族，北京，工程师，本科，研究方向：电力建设。