

极端天气下高速公路自洽能源系统 应急资源优化调度方案

李艳波^{1,2}, 张云锐², 杨凯³, 陈楚润², 吕浩楠², 武奇生², 陈俊硕^{1,2}

(1. 长安大学陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室, 710018, 西安; 2. 长安大学能源与电气工程学院, 710064, 西安; 3. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 250101, 济南)

摘要: 针对近年来频发的极端天气灾害对高速公路交通及电力网络基础设施造成严重破坏, 导致灾后应急资源调度困难的问题, 提出了一种考虑交通网(TN)-电力网(PN)耦合网络的高速公路应急资源优化调度方案。分别搭建 TN 和 PN 模型以及 TN-PN 耦合网络模型; 结合历史气象数据构建极端天气模型并利用蒙特卡罗模拟抽样方法模拟故障场景, 得到极端天气运行情况以及线路故障率曲线; 利用 Dijkstra 算法分析应急资源移动路径并构建其调度模型, 求出灾后最优调度路线; 结合河南某高速公路自洽能源系统的相关数据进行灾后应急资源调度仿真。结果表明: 所提优化调度方案比目前常用的两种方案能够提前 1~2 h 完成故障线路维修, 故障负荷的平均负荷恢复量提高了 5.95% 和 2.27%, 恢复至正常运行状态所需时间缩短了 31.38% 和 16.28%, 可进一步提高应急资源调度效率和高速公路自洽能源系统弹性。

关键词: 自洽能源系统; 极端天气; 交通网-电力网耦合网络; 应急资源调度

中图分类号: U418 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601019 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0190-11

Optimized Emergency Resource Scheduling Strategy for Highway Self-Consistent Energy Systems Under Extreme Weather Conditions

LI Yanbo^{1,2}, ZHANG Yunrui², YANG Kai³, CHEN Churun², LÜ Haonan²,
WU Qisheng², CHEN Junshuo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Shaanxi Province for Development and Application of New Transportation, Chang'an University, Xi'an 710018, China; 2. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: To address the severe damage caused by frequent extreme weather disasters to highway traffic and power grid infrastructure in recent years, which leads to difficulties in post-disaster emergency resource scheduling, this study proposes an optimized emergency resource scheduling strategy for highways considering the coupled transportation network (TN) and power network (PN). Separate models for the TN and PN, as well as a TN-PN coupled network model, are established. An extreme weather model is constructed using historical meteorological data, and the Monte Carlo simulation sampling method is applied to simulate fault scenarios, yielding the

收稿日期: 2025-03-14。 作者简介: 李艳波(1980—), 男, 教授, 博士生导师; 陈俊硕(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB1600202); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2025JC-YBMS-457)。

网络出版时间: 2025-07-01

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250630.1936.004>

operational status under extreme weather conditions and the line failure rate curves. The Dijkstra algorithm is employed to analyze emergency resource mobility paths and construct the scheduling model, determining the optimal post-disaster scheduling routes. A post-disaster emergency resource scheduling simulation is conducted using data from a self-consistent energy system on a highway in Henan Province. Results indicate that the proposed optimized scheduling strategy completes fault line repairs 1—2 h earlier compared to commonly used schemes, increases the average load recovery of fault loads by 5.95% and 2.27%, and reduces the time required to restore normal operations by 31.38% and 16.28%, further enhancing the efficiency of emergency resource scheduling and the resilience of highway self-consistent energy systems.

Keywords: self-consistent energy system; extreme weather; transportation network and power network coupling network; emergency resource scheduling

近年来,台风、暴雨、冰雪等极端天气灾害频频发生,严重影响我国高速公路自洽能源系统安全稳定运行,进而引发区域性停电以及交通瘫痪事件,给社会正常运转以及人民生命财产安全造成极大威胁^[1-2]。例如,2023年7月,台风“杜苏芮”登陆,京津冀地区超30条高速公路路段中断,沿线40%供电线路受损,直接经济损失超149亿元^[3]。为了增强自洽能源系统应对极端天气的能力,在灾后就应急资源进行合理调度是保障系统及时恢复正常运行的重要手段^[4-5]。受极端天气侵袭时,道路交通基础设施也将遭到严重破坏^[6],因此如何在交通电力耦合网络中及时且准确地调度应急资源来完成灾后恢复工作是亟需解决的重要问题。

目前已有不少学者在应急车辆最优路径规划问题上进行研究。文献[7]提出了一种元启发式的应急车辆调度和路线规划方法来解决车辆线路规划问题。文献[8]提出一个基于多阶段的“多事件点-多队伍驻点-多应急资源类型”的应急资源动态调度模型来提高汛期道路突发事件应急资源调度的效率和合理性。为了应对交通事故,文献[9]中提出了一种两阶段随机规划方法以及一种可变邻域搜索方法,来解决不确定性的背景下部署多种类型的应急车辆的问题。

上述研究为部分突发事件发生后应急车辆的调度提供了有效可行的方案,但高速公路自洽能源系统受灾后的恢复工作不仅受交通网络状态的影响,还需要考虑电力网络的受损情况^[10]。因此,部分学者针对极端天气灾害带来的多重不确定影响,提出了在耦合信息网络中对应急资源进行优化调度。

文献[11]通过对燃料交换路径优化与维修路线协同建模,提出了一种基于移动资源动态路由的应急调度策略。文献[12]考虑到耦合交通运输和配送系统的约束,提出了一种在极端天气事件后移动电

源(MPS)的最佳调度方案。文献[13]考虑到配电信息物理系统中信息侧与物理侧的交互耦合,从灾后恢复的角度提出了一种配电网信息侧与物理侧协同恢复方法。文献[14]针对灾后城市电网(UPN)负荷应急恢复过程中存在应急资源(ER)总量有限、故障元件(FC)数量繁多、多电压等级电网故障元件的协同抢修存在信息壁垒等问题,提出了UPN灾后ER与FC的集中匹配-分布调度策略。

上述研究主要是以城市或其他特定系统为算例,针对高速公路区域的理论研究和工程实践还有所欠缺^[15],因此本文基于交能融合理念,在交通(TN)-电力(PN)耦合网络中探究极端天气灾害后高速公路应急资源优化调度方案。搭建TN模型、PN模型以及TN-PN耦合网络模型。构建极端天气模型和线路故障率模型,并利用蒙特卡罗模拟抽样方法模拟故障场景。采用Dijkstra算法求解最优路径并构建应急资源调度模型。对比仿真结果可知,本文提出的考虑耦合网络的优化调度方案有更好的灾后恢复能力,有利于提高高速公路自洽能源系统弹性。

1 交能融合背景下的 TN-PN 耦合网络

TN-PN 耦合网络框架图如图1所示,在高速公路区域内,服务区是TN的重要节点,也是PN的主要用能场景,因此两网之间的交集主要集中在服务区内,可以视为TN节点与PN节点一一耦合对应。

1.1 TN 模型

TN模型可用无向连通图 $G_T = (N_T, A_T)$ 表示,其中, N_T 和 A_T 分别为TN中节点和路段的集合。在TN模型中,应急资源从一个起点出发并在指定的目的地停止,形成了所谓的O-D(Origin-Destination)对,表示为 $w \in W$ 。每个OD对包含有限条可行路径,可行路径集合可表示为 $l \in L_w$,每

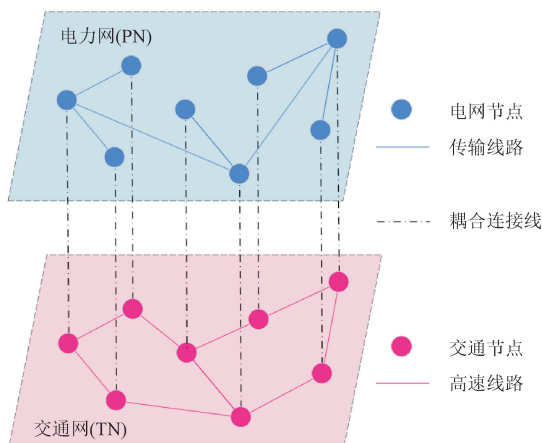


图1 TN-PN耦合网络框架

Fig. 1 TN-PN coupling network frame

条路径上交通流量的总和即为该 O-D 对间总交通流量,则路段交通流量可表示为

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{l \in L_w} f_{w,l} \delta_{w,a,l}, \forall a \in A_T \quad (1)$$

式中: x_a 为路段 a 的交通流量; $f_{w,l}$ 为 OD 对 w 之间路径 l 的交通流量; $\delta_{w,a,l}$ 为可变的辅助变量,若 OD 对 w 中路径 l 通过路段 a ,则 $\delta_{w,a,l} = 1$,否则 $\delta_{w,a,l} = 0$ 。

考虑到极端天气情况下,仅仅依靠路段长度和交通流量来定义行驶时间难以反映 TN 模型的实际情况,因此本文引用美国公路局(BPR)函数^[16]来衡量路段行驶时间,其函数形式为

$$t_a = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

式中: t_a 为通过路段 a 的时间; t_a^0 为交通流量为 0 时,通过路段 a 的时间,即自由流行驶时间; c_a 为路段 a 的容量,即其通行能力; α, β 为待定常量,典型取值分别为 0.15 和 4.0。

此外,由于各处高速公路类型不一致,在此将 TN 模型划分为主干道、次要干道以及支路 3 种类型,各类型道路对应的 α, β 取值^[17]如表 1 所示。

表1 不同道路类型待定常量取值

Table 1 Undetermined constant value of different road types

道路类型	α	β
主干道	0.5	5.0
次要干道	1.0	4.5
支路	2.0	3.5

1.2 PN 模型

类似 TN 模型的建模方法,PN 模型可以考虑用一个径向连通图 $G_E = (L_E, N_E)$ 表示,其中, L_E 和 N_E 分别为 PN 中的线路集合和母线集合。PN 模型可

采用以下等式来建立交流最优潮流(ACOPF)模型

$$P_{ij,t} + P_{n,t} + P_t^{pv} = \sum_{k \in (i,j)} P_{ik,t} + P_t^d \quad (3)$$

$$Q_{ij,t} + Q_{n,t} + Q_t^{pv} = \sum_{k \in (i,j)} Q_{ik,t} + Q_t^d \quad (4)$$

$$U_{ij,t} = R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t} \quad (5)$$

式中: $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻 PN 中线路 (i, j) 的有功功率和无功功率; $P_{n,t}$ 和 $Q_{n,t}$ 分别为 t 时刻母线 n 的有功功率和无功功率; k 为线路 (i, j) 的中间节点; P_t^{pv} 和 Q_t^{pv} 分别为 t 时刻光伏发电发出的有功功率和无功功率; P_t^d 和 Q_t^d 分别为 t 时刻总的有功功率负荷和无功功率负荷; $U_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 (i, j) 上的电压降; R_{ij} 和 X_{ij} 分别为线路 (i, j) 上的电阻和电抗。

式(3)和(4)确保了 PN 的有功、无功功率平衡,式(5)则建立了 PN 线路上电压降和功率之间的关系,相关约束条件如下

$$P_{ij,t} \geq 0; Q_{ij,t} \geq 0; P_t^{pv} \geq 0, \forall (i, j) \in L_E \quad (6)$$

$$P_{n,\min} \leq P_{n,t} \leq P_{n,\max}, \forall n \in N_E \quad (7)$$

$$Q_{n,\min} \leq Q_{n,t} \leq Q_{n,\max}, \forall n \in N_E \quad (8)$$

$$U_{ij}^{\min} \leq U_{ij,t} \leq U_{ij}^{\max} \quad (9)$$

式中: $P_{n,\max}$ 和 $Q_{n,\max}$ 分别为母线 n 的最大传输有功、无功功率; $P_{n,\min}$ 和 $Q_{n,\min}$ 分别为母线 n 的最小传输有功、无功功率; $U_{ij}^{\min}$ 和 $U_{ij}^{\max}$ 分别为线路 (i, j) 上的电压幅值下界和上界。

1.3 TN-PN 耦合网络模型

考虑到 TN 和 PN 模型分属不同的运营商管理,本文设置一个非盈利性的独立系统运营商来统一规划管理耦合网络。该运营商既可在 TN 模型上设置并收取通行费,又可在 PN 模型上调度发电机,从而达到最小化耦合网络运行成本的目标,其表达式如下

$$\min(F_T + F_E) \quad (10)$$

式中: F_T 为 TN 模型出行成本; F_E 为 PN 模型运行成本,主要包含发电成本和从主电网购电成本。

2 极端天气模型

本节建立了台风、覆冰和降雨这 3 种常见且关联性较强的极端天气模型,采用统一的线路故障率模型进行表述并进行故障场景模拟。

2.1 台风模型

多数极端天气均伴随着风力的影响,本文采用 Batts 台风模型^[18]来模拟台风对耦合网络的影响

$$V_t = \begin{cases} V_r^{\max} \frac{r_t}{r_{\max}}, & r_t \leq r_{\max} \\ V_r^{\max} \left(\frac{r_{\max}}{r_t} \right)^{0.7}, & r_t > r_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_t 为台风影响范围内 t 时刻某位置的风速; $r_{\max}$ 为台风最大风速半径; $V_r^{\max}$ 为台风最大风速半径处的最大风速; r_t 为 t 时刻该位置与台风中心处的半径。

2.2 覆冰模型

雨雪天气情况下, PN 输电线路可能会存在覆冰情况, 从而导致线路质量增加。本文考虑覆冰强度、风速和空气湿度等因素, 调整并建立如下覆冰质量模型^[19]

$$M_t = \int_0^t \frac{4}{\pi} r_{ij}^{\text{ice}} \left(1 + \frac{1.6B}{V_t r_{ij}} \right)^{-1} V_t \rho C \sin^2 \theta_1 dt \quad (12)$$

式中: M_t 为 t 时刻输电线路上的覆冰质量; r_{ij}^{ice} 为覆冰后输电线路半径; B 为空气运动指数; r_{ij} 为输电线路半径; ρ 为空气中液态水的密度; C 为冰收集系数, 用来描述冰在输电线路表面上形成和积聚的能力的重要参数; θ_1 为风向与输电线路之间的夹角, 其值在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

2.3 降雨模型

降雨天气中, 往往也伴随着风力的影响, 因此考虑到两者的共同影响, 采用 Tuleya 模型^[20]来表述降雨模型, 表达式为

$$H_t = \begin{cases} H_0 + (H_m - H_0) \frac{r_t}{r_{\max}}, & r_t < r_{\max} \\ H_m \exp\left(\frac{r_{\max} - r_t}{r_e}\right), & r_t \geq r_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: H_t 为 t 时刻降雨强度; H_0 和 H_m 分别为 $r_t = 0$ 和 $r_t = r_{\max}$ 处的降雨强度; r_e 为降雨区域的半径。

2.4 线路故障率模型及故障场景模拟

2.4.1 基于载荷效应理论的线路故障率模型

上述极端天气会对 PN 线路产生载荷效应, 当线路承受外力作用过大时会发生断裂故障, 这与线路的抗拉强度相关, 根据 IEC60826 标准, 可用正态分布概率密度函数来表示其抗拉强度^[21]

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{ij}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ij} - \mu_{ij}}{\delta_{ij}} \right)^2\right] \quad (14)$$

式中: $f(\sigma_{ij})$ 为线路抗拉强度 σ_{ij} 的概率密度函数; δ_{ij} 和 μ_{ij} 分别为抗拉强度 σ_{ij} 的标准差和均值。

线路的载荷效应表现为线路可承受的应力 η 的大小, 其定义为线路最高悬挂处所受张力 T 与线路受力面积 S 的比值, 表达式如下

$$\eta = \frac{T}{S} \quad (15)$$

$$T = \sqrt{T_0 + \frac{Z^2 d}{\cos^2 \theta_2}} \quad (16)$$

$$S = \pi \left(\frac{D_{ij}}{2} \right)^2 \quad (17)$$

式中: T_0 为线路最低处的张力; Z 为线路所受载荷; d 为线路最高悬挂处与最低处之间的水平直线距离; θ_2 为线路两侧悬挂点间连线与水平方向的夹角; D_{ij} 为线路外直径。其中, 线路所受载荷 Z 可表示为

$$Z = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \quad (18)$$

$$Z_1 = \frac{1.2V_t^2}{1.6} D_{ij} K_{ij} \sin^2 \theta_1 \quad (19)$$

$$Z_2 = (M_t + m_{ij})g \quad (20)$$

式中: Z_1 为水平载荷分量, 主要受风速影响; K_{ij} 为线路长度; Z_2 为垂直载荷分量, 主要受雨雪天气产生的覆冰质量 M_t 以及线路自身质量 m_{ij} 影响。由此可得线路脆弱性模型为

$$p_{ij} = \int_0^\eta f(\sigma_{ij}) d\sigma_{ij} \quad (21)$$

式中: p_{ij} 为线路故障概率。

2.4.2 故障场景模拟

蒙特卡罗模拟法是一种基于随机抽样的计算技术, 其优点是能够处理复杂的问题, 尤其是多变量和不确定性极高的情况, 易于实现且适用于不同的领域和用途^[22]。因此, 本文利用实际取得的极端天气下的历史数据, 结合蒙特卡罗模拟法来模拟高速公路耦合网络收到极端天气影响后的故障场景, 流程图如图 2 所示。

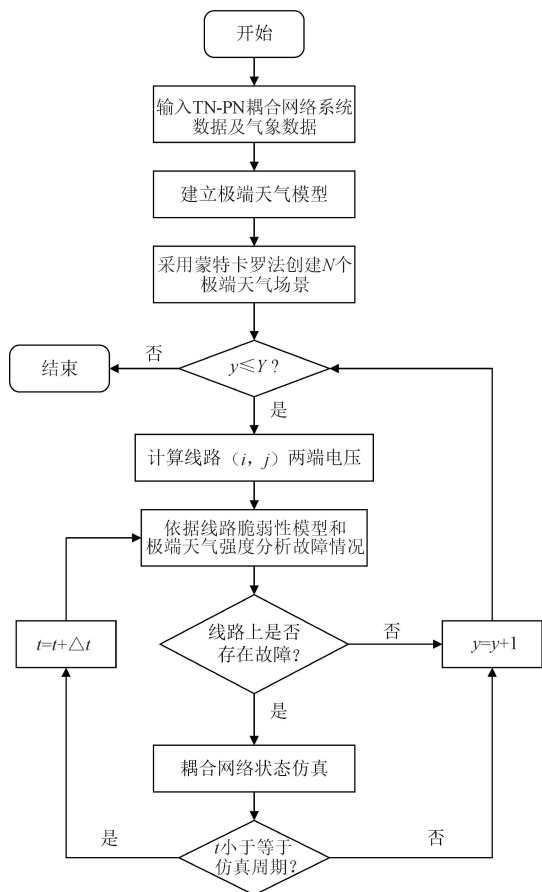
3 考虑耦合网络的灾后应急资源调度

应急资源调度可以描述为一个最优路径规划的问题, 本文采用最为经典的 Dijkstra 算法来求得应急资源在耦合网络节点之间的路径选择。

3.1 基于 Dijkstra 算法的最优路径选择

Dijkstra 算法的主要特点是从起始点开始, 应用了贪心算法的思想, 每次遍历到起始点距离最近且未访问过的顶点的邻接节点, 直到扩展到终点为止^[23], 其主要步骤如下所示。

(1) 初始时令所有顶点集合为 o , 已求出最短路径的顶点集合为 v , 尚未确定最短路径的顶点集合为 z , 且 $z = o - v$ 。初始时 v 中只包含起点 v_0 , z 中包含除起点以外的顶点, 记录顶点 v_i 到起点 v_0 的距离, 若顶点与起点不相邻, 则该距离为 ∞ 。



Y—总场景数; y—模拟仿真完成的场景数。

图2 极端天气下 TN-PN 耦合网络故障场景模拟流程图

Fig.2 Flow chart of TN-PN coupling network fault scenario simulation under extreme weather

(2)从 z 中选取一个距离值最小的顶点 s 并加入 v ,从 z 中移除顶点 s ,计算 z 中顶点 v_i 到起点 v_0 的距离,若加入 s 作中间顶点后,从 v_0 到 v_i 的距离比不加 s 的路径短,则修改此距离。

(3)重复上述步骤,直到 v 中包含所有顶点,即 $v=0$ 为止(说明最外层是除起始点外的遍历)。

3.2 应急资源调度模型

考虑到高速公路在受到极端天气侵袭的情况下,应急资源的主要功能可大致分为维修抢险以及应急供电两类,因此本文设置维修抢险队和移动电源车两类应急资源。为便于后续表述和仿真,设置维修抢险队对应Ⅰ类应急资源,主要职责是对受损线路进行评估抢修;移动电源车对应Ⅱ类应急资源,主要职责是为故障负荷提供紧急电力支持,从而保障重要设施正常运行。

3.2.1 目标函数

极端天气侵袭后,耦合网络必然会受到不同程度的破坏从而导致一系列故障问题,这其中停电故

障是最为主要且恢复优先级较高的故障之一,而应急资源调度的目的也是为了在尽可能短的时间内恢复正常供电,降低停电损失。因此,本文设置的目标函数为最大化负荷恢复水平 $\max \sum_t \sum_{k \in N_T} \xi_k P_{k,t}$,其中 ξ_k 为节点 k 的负荷权重, $P_{k,t}$ 为 t 时刻节点 k 的负荷功率恢复值。

3.2.2 TN 交通流约束

路段通过时间与交通流量约束可表示为

$$0 < t_a \leq t_a^0, \forall a \in A_T \quad (22)$$

$$0 < x_a \leq x_a^{\max} \quad (23)$$

式中: $x_a^{\max}$ 为路段 a 的最大交通流量。

3.2.3 PN 潮流约束

高速公路 PN 模型多数为辐射状运行,因此本文采用 DistFlow 潮流方程来线性化潮流模型,则潮流约束可表示为

$$0 < P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq h_{ij,t} U_{ij,t}^2 I_{ij,t}^2 \quad (24)$$

$$0 \leq I_{ij,t}^2 \leq h_{ij,t} I_{ij,\max}^2 \quad (25)$$

$$0 \leq \frac{\sum_{L \in \Omega_L} P_{L,t}}{\sum_{N \in \Omega_N} P_{N,t}} \leq 0.5 \quad (26)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ I_{ij} - U_i \end{matrix} \right\|_2 \leq I_{ij} + U_i \quad (27)$$

式中: $h_{ij,t}$ 为可变的辅助变量,表示 t 时刻线路的通断状态,当 $h_{ij,t}=1$ 时表示线路正常运行,当 $h_{ij,t}=0$ 时表示线路故障断开; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 (i,j) 上的电流; $I_{ij,\max}$ 为线路 (i,j) 上的最大电流; Ω_L 为耦合网络内停电负荷的集合; Ω_N 为耦合网络内所有负荷的集合; $P_{L,t}$ 为 t 时刻某故障负荷缺失的有功功率; $P_{N,t}$ 为 t 时刻某负荷所需有功功率。

式(24)~(26)分别为潮流约束、线路电流约束以及耦合网络内负荷的失负荷率约束,式(27)运用二阶锥松弛方法将式(24)转化为二阶锥约束以简化模型求解难度。

3.2.4 维修抢险队约束

极端天气灾害发生前,维修抢险队会被提前预置于某线路节点处,灾害发生后将会根据耦合网络信息前往故障线路进行维修抢险,这期间维修抢险队的行驶情况、线路状态等均需设置约束条件,表达式如下

$$\sum_{l \in l_w} \gamma_{e,l,t} \leq 1 \quad (28)$$

$$\sum_{e \in J^T} \gamma_{e,l,t} \leq G_l^{\max} \quad (29)$$

$$\sum_{e \in J^r} \sum_t \gamma_{e,l,t} = 1 \tag{30}$$

$$h_{ij,t} \leq h_{ij,t+1} \tag{31}$$

$$h_{ij,t+1} < \frac{\sum_{\tau=1}^t \gamma_{e,l_{ij},\tau}}{l_{ij}t}, \forall l_{ij} \in l_{w,ij} \tag{32}$$

式中： $\gamma_{e,l,t}$ 为维修抢险队 e 在 t 时刻路径 l 上的行驶情况； J^r 为维修抢险队的集合； $G_l^{\max}$ 为路径 l 上最大维修抢险队数量； l_{ij} 和 $l_{w,ij}$ 分别为故障线路的路径及其集合。

式(28)~(29)表示维修抢险队在 TN 模型上的行驶情况；式(30)~(32)表示故障线路的维修状态。

3.2.5 移动电源车约束

极端天气灾害发生前,移动电源车已经在某负荷节点处等待,灾害发生后需要依据耦合网络信息前往重要负荷节点进行应急供电,这期间移动电源车的运行状态、连接状态限制以及出力状态也需设置约束条件,表达式如下

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{re}} \leq q_t P_{i,t}^{\text{l}} \tag{33}$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{\text{re}} \leq q_t Q_{i,t}^{\text{l}} \tag{34}$$

$$\sum \varphi_{b,i,t} \leq 1 \tag{35}$$

$$0 \leq P_{b,t}^{\text{in}} \leq P_{b,\max}^{\text{in}} \tag{36}$$

$$0 \leq P_{b,t}^{\text{out}} \leq P_{b,\max}^{\text{out}} \tag{37}$$

$$0 \leq Q_{b,t}^{\text{in}} \leq Q_{b,\max}^{\text{in}} \tag{38}$$

$$0 \leq Q_{b,t}^{\text{out}} \leq Q_{b,\max}^{\text{out}} \tag{39}$$

$$E_{b,\min} \leq E_{b,t} \leq E_{b,\max} \tag{40}$$

式中： $P_{i,t}^{\text{re}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{re}}$ 为 t 时刻节点 i 的故障负荷有功、无功恢复量； $P_{i,t}^{\text{l}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{l}}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷有功、无功功率； q_t 为可变的辅助变量,若 t 时刻 $q_t = 1$ 表示线路未恢复,移动电源车需继续供电, $q_t = 0$ 表示线路已恢复； $\varphi_{b,i,t}$ 为移动电源车 b 在 t 时刻与接入节点

i 的连接状态； $P_{b,t}^{\text{in}}$ 和 $P_{b,t}^{\text{out}}$ 分别为 t 时刻移动电源车 b 充、放电有功功率； $Q_{b,t}^{\text{in}}$ 和 $Q_{b,t}^{\text{out}}$ 分别为 t 时刻移动电源车 b 充、放电无功功率值； $P_{b,\max}^{\text{in}}$ 和 $P_{b,\max}^{\text{out}}$ 分别为移动电源车 b 充、放电有功功率最大值； $Q_{b,\max}^{\text{in}}$ 和 $Q_{b,\max}^{\text{out}}$ 分别为移动电源车 b 充、放电无功功率最小值； $E_{b,t}$ 为 t 时刻移动电源车 b 的容量； $E_{b,\max}$ 和 $E_{b,\min}$ 分别为移动电源车 b 容量的最大、最小值。

式(33)~(34)表示故障负荷在考虑线路恢复情况时的恢复需求约束；式(35)表示移动电源车的连接状态限制；式(36)~(40)表示移动电源车的出力状态约束。

4 算例分析

本文算例采用河南某高速公路自洽能源系统进行验证,其简化耦合网络拓扑图如图 3 所示,其负荷节点参数见表 2。

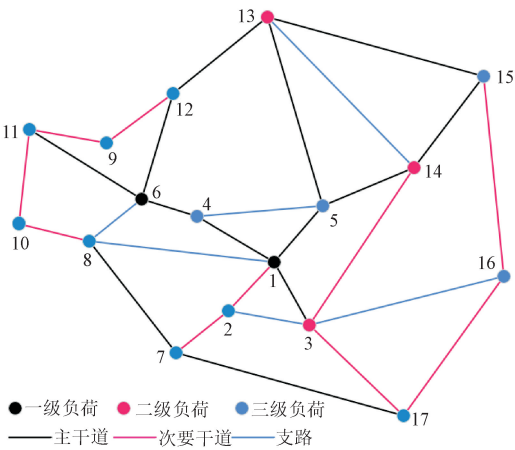


图 3 河南某高速公路自洽能源系统 TN-PN 耦合网络拓扑图

Fig. 3 TN-PN coupling network topology of a highway self-consistent energy system in Henan Province

表 2 负荷节点参数

Table 2 Load node parameters

节点	负荷复功率/(kV · A)	单位负荷损失成本/元	节点	负荷复功率/(kV · A)	单位负荷损失成本/元
1	120+j80	10	10	60+j30	1
2	60+j30	1	11	90+j40	1
3	90+j40	7	12	60+j40	1
4	60+j40	1	13	100+j60	7
5	60+j40	1	14	60+j40	7
6	90+j50	10	15	60+j25	1
7	90+j40	1	16	60+j20	1
8	60+j20	1	17	60+j20	1
9	60+j35	1			

4.1 算例设置

本文仿真算例使用 Matlab R2020a 中 Yalmip 工具包建立前文所提数学模型,调用 Cplex 求解器进行求解。本文以 1 h 为周期,共统计极端天气灾害后 10 h 内应急资源在耦合网络中的状态。为验证本文所提调度方案的有效性,设置 3 种方案进行对比分析。

方案 A 即本文所提方案,根据故障场景模拟结果对应急资源进行预定位,并基于 TN-PN 耦合网络进行灾后调度。

方案 B 依据目前常用方法^[24-25],将 I 类应急资源预定位至道路交汇较多的节点处,II 类应急资源预定位至负荷等级较高的节点处,并在不考虑耦合网络的情况下进行灾后调度。

方案 C 是应急资源的预定位,采用与方案 A 相同的方法,其他条件与方案 B 相同。

此外,根据上述拓扑图将 PN 划分为一级负荷、二级负荷以及三级负荷。将 TN 划分为主干道、次要干道以及支路 3 种类型,各道路均可双向通行,其道路参数见表 3。

表 3 TN 道路参数

Table 3 TN road parameters

道路类型	最大车速/(km·h ⁻¹)	最大交通流量/(辆·h ⁻¹)
主干道	80	1 500
次要干道	60	900
支路	40	650

依据 3.2 节内容,本文设置 3 个 I 类应急资源(记为 I-1、I-2 和 I-3),1 个 II 类应急资源。其中 II 类应急资源部分采用一台容量为 600 kW·h、容量限制为 0.10~0.95 的移动电车。

考虑到算例中高速公路沿线有不少光伏发电设施,PN 模型中也将光伏发电系统出力计入其内,因此此处设置光伏发电系统出力为 400 kW。同时,设置高速公路 PN 输电线路电阻为 0.08 Ω/km,电抗为 0.32 Ω/km。

4.2 故障场景生成

本文气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI),依据其中的部分极端天气数据结合 2.4 节介绍的故障场景模拟方法进行 500 次仿真,每个故障场景均随机生成灾害中心且至少模拟 2 h,建立的极端天气场景部分特征参数见表 4。

依据上述参数进行仿真,最终统计得到各路段线路故障概率如图 4 所示。

表 4 极端天气场景特征参数

Table 4 Characteristic parameters of extreme weather scenarios

特征参数	数值
最大风速半径 $r_{\max}$ /km	40
最大风速 $V_r^{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	35
移动方向角 $\theta/(\text{°})$	0
移动速度 $u_m/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	20

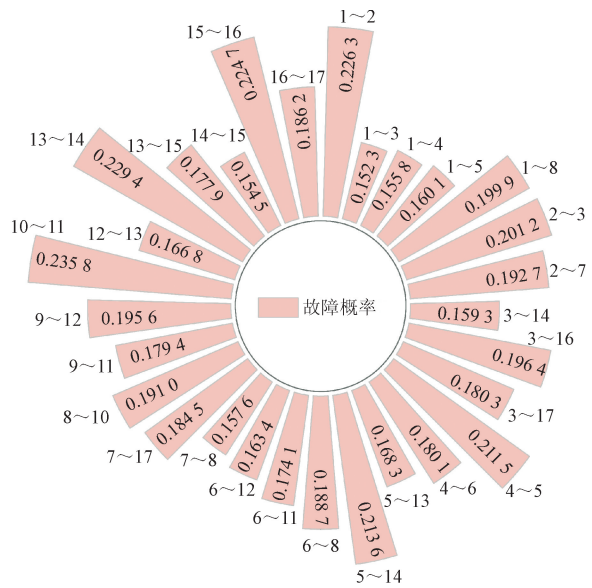


图 4 灾后各路段间线路故障概率

Fig. 4 Probability of line failure between sections after disaster

从图 4 可以看出,由于极端天气侵袭时间、灾害中心以及天气强度等条件不同,各路段间线路的故障概率也有所不同,其中路段 1~2、10~11、13~14 以及 15~16 间的线路有着较高的故障概率。以路段 1~2 为例,其时变故障概率曲线如图 5 所示,表示该路段线路在不同时间段遭受不同条件的极端天气侵袭时的故障概率,即路段 1~2 间线路的脆弱性曲线。

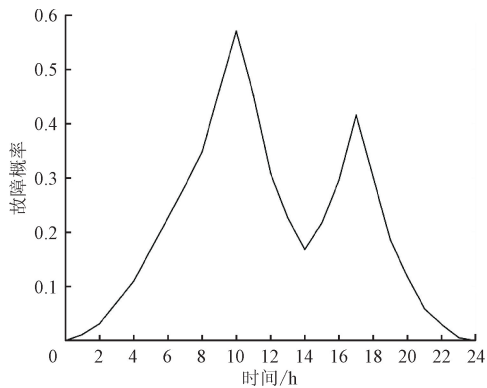


图 5 线路时变故障概率曲线

Fig. 5 Time varying fault probability curve of transmission line

基于上述内容对应急资源进行预定位,其中 I-1、I-2、I-3 以及 II 类应急资源预定位节点分别为节点 1、6、14 和 3。

采用蒙特卡罗模拟抽样方法生成极端天气后的故障场景,可得某次灾害发生后,路段 1~2、3~17、6~8、9~12、10~11、13~14 以及 15~16 间共 7 条线

路发生故障。其中,路段 1~8 在灾后由于遭到破坏导致无法通行,经 4.74 h 后恢复通行能力。

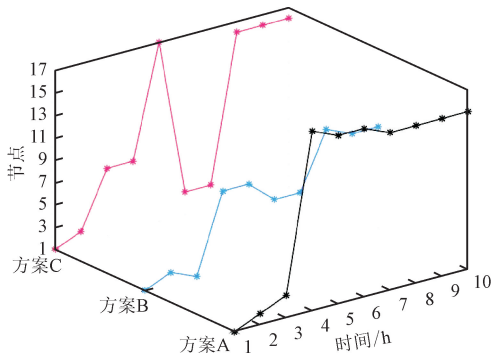
4.3 应急资源调度结果

根据 4.1 和 4.2 节的内容,可得灾后 10 h 内应急资源调度情况,如表 5 所示,其路径可视化如图 6 所示。灾后负荷恢复情况如图 7 所示。

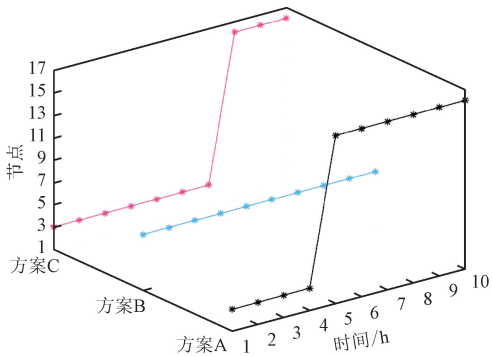
表 5 灾后应急资源调度情况
Table 5 Post disaster emergency resource scheduling

应急资源编号	方案 A	方案 B	方案 C
I-1	1→2→3→17→16→15	1→2→1→8→6→11→10	1→2→7→17→3→16
I-2	6→8→10→11	3→17→16→15	6→8→10→11→9→12
I-3	14→13→12→9	13→14→13→12→9	14→13→15
II	3→16	6	3→16

注:箭头表示应急资源的移动路径。



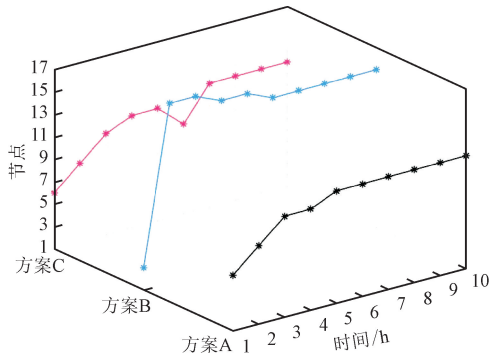
(a) I-1



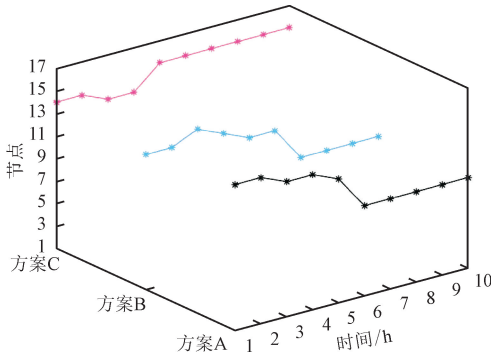
(d) II

图 6 灾后应急资源行驶路径

Fig. 6 Driving path of emergency resources after disaster



(b) I-2



(c) I-3

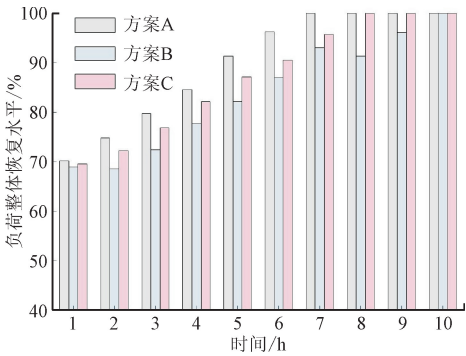


图 7 灾后负荷整体恢复水平

Fig. 7 Overall recovery level of post disaster load

由图 6 可知,针对 I 类应急资源,本文所提方案 A 考虑了灾害前应急资源预定位以及耦合网络信息交互情况,在调度过程中 I-1、I-2 和 I-3 均不存在原路折返以及在多处路段长期停留等延误行为,8 h 即可完成对故障线路的修复。方案 B 二者均未

考虑,因此存在等待路段1~8维修完成后再通行的延误行为,同时也是修复进度最为缓慢的方案,10 h才完成故障修复工作。方案C虽然考虑了灾前预定位,但未考虑耦合网络信息交互,因此I-1、I-2和I-3任务分配较为混乱,甚至出现两队同修一条故障线路的情况,9 h才完成维修任务。

针对Ⅱ类应急资源,因为考虑了灾前预定位,本文所提方案A和方案C能够更快到达重要负荷节点进行应急供电,但是方案C因为Ⅰ类应急资源维修工作进度缓慢,所以在7 h后才前往下一负荷节点供电,负荷恢复较慢。方案B则在统计时间内仅对一级负荷节点6进行供电且并未进行移动,因此负荷恢复情况落后于另外两种方案。

由4.1节算例设置可知,3种方案均考虑了PN负荷分级,因此一、二级负荷可在灾后第一时间得到维修或应急供电,负荷恢复水平均能达到100%。

由图7可知,3种方案的负荷整体恢复水平均能在统计时间内达到100%,本文所提方案A和方案C同时考虑了灾前预定位,因此整体负荷分别在7 h和8 h恢复至正常运行,方案B则10 h才可恢复至100%。因为本文所提方案A还考虑了耦合网络信息交互,所以整体负荷相比方案B和C能更快恢复正常运行,在恢复周期内平均负荷恢复量分别提高了5.95%和2.27%。

多次仿真结果中方案A、B、C整体负荷恢复至100%的平均时间分别为6.43、9.37和7.68 h,本文所提方案A的恢复时间相较于方案B和C分别缩短了31.38%和16.28%,再次验证了其优越性。

5 结 论

应急资源合理调度在提高调度效率的同时,还可以减少负荷恢复所用时间,有利于提高高速公路自洽能源系统弹性。本文针对应急资源优化调度问题,提出了一种考虑TN-PN耦合网络的灾后优化调度方案,通过分析其调度过程和负荷恢复情况,得到如下结论。

(1)在TN-PN耦合网络中进行调度,能够提高应急资源响应速度,减少其在某一节点长时间停留的情况,相比另外两种方案能够提前1~2 h完成故障线路的维修工作,提高了灾后调度效率。

(2)在考虑耦合网络的调度过程中,故障负荷相比另外两种方案平均负荷恢复量分别提高了5.95%和2.27%,且恢复至正常运行所需时间分别缩短了31.38%和16.28%。

本文主要探讨了灾后应急资源的优化调度,后续工作可以在考虑耦合网络的基础上,从灾前以及灾中的角度出发,制定相应的优化方案来进一步提高高速公路自洽能源系统的弹性。

参考文献:

- [1] 李艳波,刘妙阳,杨凯,等. 极端天气下高速公路自洽能源系统移动电源车的优化调度[J/OL]. 吉林大学学报(工学版). (2024-04-15) [2024-10-19]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240224>.
LI Yanbo, LIU Miaoyang, YANG Kai, et al. Optimal scheduling of mobile power vehicles for highway self-consistent energy systems in extreme weather conditions [J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). (2024-04-15) [2024-10-19]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240224>.
- [2] 袁家海,彭可欣,张浩楠,等. 电力系统气候适应性的探索、挑战与展望[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(2): 256-272.
YUAN Jiahai, PENG Kexin, ZHANG Haonan, et al. Climate resilience of power systems: explorations, challenges and prospects [J]. Climate Change Research, 2025, 21(2): 256-272.
- [3] 颜昕. 京津冀晋领导调度防汛工作 强调切实发挥好气象防灾减灾第一道防线作用[EB/OL]. (2023-07-31) [2024-10-19]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxw/202307/t20230731_5685641.html.
- [4] 刘瑞环,陈晨,刘菲,等. 极端自然灾害下考虑信息-物理耦合的电力系统弹性提升策略: 技术分析与研究展望[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 9-23.
LIU Ruihuan, CHEN Chen, LIU Fei, et al. Power system resilience enhancement strategy considering cyber-physical interdependence under disasters: development and prospects [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 9-23.
- [5] 陈艳波,刘镇湘,田昊欣,等. 高速公路绿色能源系统研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3016-3030.
CHEN Yanbo, LIU Zhenxiang, TIAN Haoxin, et al. A review and prospect of expressway green energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3016-3030.
- [6] FAN Jiale, HE Ping, LI Congshan, et al. A sequential repair crew dispatch strategy for distribution systems coordinated with transportation systems [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(4): 5866-5876.
- [7] GIRI A R, CHEN Tianjian, RAJENDRAN V P, et al. A metaheuristic approach to emergency vehicle dis-

- patch and routing [C]//2022 IEEE International Conference on Smart Mobility (SM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 27-31.
- [8] 马帅豹, 张健钦, 沈博, 等. 面向汛期道路突发事件的多阶段应急资源动态调度方法 [J]. 公路, 2024, 69(11): 236-245.
- MA Shuaibao, ZHANG Jianqin, SHEN Bo, et al. A multi-stage emergency resource dynamic scheduling method for road emergencies in flood season [J]. Highway, 2024, 69(11): 236-245.
- [9] ZHEN Lu, WU Jingwen, CHEN Fengli, et al. Traffic emergency vehicle deployment and dispatch under uncertainty [J]. Transportation Research: Part E Logistics and Transportation Review, 2024, 183: 103449.
- [10] 付伟, 谢海鹏, 王鹤峰, 等. 混合量子-经典算法的配电网灾后拓扑重构方法 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 1-16.
- FU Wei, XIE Haipeng, WANG Hefeng, et al. Post-disaster topological reconfiguration approach for distribution networks using hybrid quantum-classical algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 1-16.
- [11] WANG Wei, HE Yufei, WANG Hongbin, et al. Improving interdependent urban power and gas distribution systems resilience through optimal scheduling of mobile emergency supply and repair resources [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 250: 110303.
- [12] ERENOĞLU A K, ERDİNÇ O. Post-event restoration strategy for coupled distribution-transportation system utilizing spatiotemporal flexibility of mobile emergency generator and mobile energy storage system [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 199: 107432.
- [13] 董申, 周步祥, 臧天磊, 等. 考虑快速响应应急资源的配电信息物理系统灾后协同恢复方法 [J/OL]. 中国电机工程学报. (2024-12-26) [2025-03-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241688>. DONG Shen, ZHOU Buxiang, ZANG Tianlei, et al. Post-disaster coordinated restoration method for power distribution cyber-physical system considering rapid response emergency resource [J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2024-12-26) [2025-03-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241688>.
- [14] XU Yuhang, WANG Wanyuan, XIONG Guangwei, et al. Network-flow-based efficient vehicle dispatch for city-scale ride-hailing systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5526-5538.
- [15] CHEN Fangjian, XIA Mingchao, CHEN Qifang, et al. Resilience enhancement method against persistent extreme weather with low temperatures in self-sustained highway transportation energy system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 996-1009.
- [16] Bureau of Public Roads. Traffic assignment manual for application with a large, high-speed computer [M]. Washington D. C., USA: Urban Planning Division, US Department of Commerce, 1964.
- [17] 温旭丽, 吴恣, 曹蕊. 几种典型路阻函数的特性比较及参数选择研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 205-208.
- WEN Xuli, WU Min, CAO Rui. Study on characteristic comparison and parameter selection of several typical road resistance functions [J]. Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition), 2014, 10(2): 205-208.
- [18] BATTS M E, SIMIU E, RUSSELL L R. Hurricane wind speeds in the United States [J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2001-2016.
- [19] HOU Yanruo, YANG Ruixi, XIONG Yaqi, et al. Simulation of cascading faults of power grid under extreme ice and snow weather based on BPA [C]//2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 298-302.
- [20] TULEYA R E, DEMARIA M, KULIGOWSKI R J. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for U. S. landfalling tropical storms [J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(1): 56-70.
- [21] 刘鑫蕊, 孟庆坤, 侯敏, 等. 基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略 [J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3375-3384.
- LIU Xinrui, MENG Qingkun, HOU Min, et al. Distribution network resilience improvement strategy based on time-space optimal scheduling of mobile energy storage [J]. Control and Decision, 2024, 39(10): 3375-3384.
- [22] 张译心, 狄晨烨, 赵男, 等. 面向复合极端天气的新能源渗透率电网风险评估技术 [J]. 电力建设, 2024, 45(10): 34-46.
- ZHANG Yixin, DI Chenye, ZHAO Nan, et al. Risk assessment techniques for grids with high penetration of new energy under extreme weather conditions [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 34-46.
- [23] WANG Huijuan, YU Yuan, YUAN Quanbo. Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning [C]//2011 Second International Conference on Me-

- chanic Automation and Control Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1067-1069.
- [24] 许寅, 王颖, 和敬涵, 等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 123-131.
- XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 123-131.
- [25] LEI Shunbo, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2030-2041.
- (编辑 武红江)

(上接第 189 页)

- [18] CHEN Tianqi, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2016: 785-794.
- [19] ZHANG Xiawen, JU Yaping, LI Zhen, et al. Metamodel-interpreted data mining for stability and efficiency enhancement of multistage axial-flow compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 2023, 145(4): 041001.
- [20] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based non-dominated sorting approach: part I solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- [21] 陈玲, 琚亚平, 李震, 等. 多级轴流压气机末级串列静子三维优化设计与分析 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 164-174.
- CHEN Ling, JU Yaping, LI Zhen, et al. Three-dimensional design optimization and analysis for last stator of multi-stage axial flow compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 164-174.
- [22] 张倩, 黄秀全, 王丁喜. 针对叶轮机流场分析的不同 Spalart-Allmaras 湍流模型评价 [J]. 推进技术, 2022, 43(4): 75-87.
- ZHANG Qian, HUANG Xiuquan, WANG Dingxi. Evaluation of different Spalart-Allmaras turbulence models for turbomachinery flow field analysis [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(4): 75-87.
- [23] PORRO M, JEFFERSON-LOVEDAY R, BENINI E. Axial flow compressor stability enhancement: circumferential T-shape grooves performance investigation [J]. Aerospace, 2021, 8(1): 12.
- [24] SUDER K L. Blockage development in a transonic, axial compressor rotor [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 465-476.
- [25] FIDALGO V J, HALL C A, COLIN Y. A study of fan-distortion interaction within the NASA Rotor 67 transonic stage [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051011.
- (编辑 武红江)