

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241005

基于二维水动力模型与数据融合的电力设施淹没风险 动态评估及预警方法

于浩¹, 张健¹, 朱广杰², 瞿舜克³, 肖克江^{2,4}, 雷兴炜², 陈亮²

(1. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 华中师范大学人工智能教育学部, 湖北 武汉 430079; 3. 国网黑龙江省电力有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090;
4. 数字教育湖北省重点实验室(华中师范大学), 湖北 武汉 430079)

摘要: 为应对暴雨引发的电力设施淹没导致电网系统故障和供电瘫痪的问题, 提出了一种基于二维水动力模型与数据融合的动态评估与预警机制。首先, 结合芝加哥降雨模型与二维水动力模型, 精确模拟关键电力设施位置的积水深度, 提高预测准确性。其次, 考虑积水深度、设备类型和可能的故障模式等因素, 开发了一个综合评价体系, 以量化电力设施因淹没而发生风险。此外, 构建了融合变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)的短期负荷预测模型 VMD-LSTM, 为暴雨期间的电网负荷变化提供精准预测, 并作为风险评估的重要依据。最后, 设计了一套风险预警等级方案, 能够准确标记需预警的电网节点, 为管理者提供科学决策支持。通过具体区域电网案例分析, 展示了该方法的有效性和实用性, 为防灾减灾提供了坚实的技术支撑。

关键词: 暴雨淹没; 电力设施; 风险评估; 负荷预测; 二维水动力模型

Dynamic assessment and early warning method of power facility flood risk based on a 2D hydrodynamic model and data fusion

YU Hao¹, ZHANG Jian¹, ZHU Guangjie², QU Shunke³, XIAO Kejiang^{2,4}, LEI Xingwei², CHEN Liang²

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China;
2. Faculty of Artificial Intelligence in Education, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
3. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150090, China; 4. Hubei Key
Laboratory of Digital Education (Central China Normal University), Wuhan 430079, China)

Abstract: To address the issue of power system failures and power outages caused by the flooding of power facilities during rainstorm, this paper proposes a dynamic assessment and early warning mechanism based on a two-dimensional (2D) hydrodynamic model and data fusion. First, by combining the Chicago rainfall model with a 2D hydrodynamic model, the depth of water accumulation at key power facility locations is accurately simulated, significantly improving prediction accuracy. Next, a comprehensive evaluation system is developed to quantify the risk of power facility failures due to flooding, taking into account factors such as water depth, equipment type, and potential failure modes. In addition, a short-term load forecasting model (VMD-LSTM) integrating variational mode decomposition (VMD) and long short-term memory (LSTM) is constructed to provide accurate forecasting of grid load changes during rainstorm as an critical input for risk assessment. Finally, a risk warning level scheme is designed to accurately identify the power grid nodes requiring warning, providing scientific decision-making support for operators. Through the analysis of specific regional power grid cases, the effectiveness and practicality of the proposed method are demonstrated, providing solid technical support for disaster prevention and mitigation.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 62173158 and No. 62377023).

Key words: storm flooding; electric power facility; risk assessment; load forecasting; 2D hydrodynamic model

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(62173158, 62377023); 湖北省自然科学基金创新发展联合基金重点项目资助(2025AFD195); 中央高校基本科研业务费资助(CCN25ai013); 数字教育湖北省重点实验室开放研究基金项目资助(F2024G01); 国家电网有限公司科技项目资助(52243723000D)

0 引言

在气候变化和城市化共同作用的背景下, 极端降雨洪涝对城市的影响日益显著^[1-3], 灾害的极端性、复杂性、连锁性和放大性给电力设施正常运行带来巨大的潜在威胁^[4-7]。极端暴雨洪涝事件发生日趋频繁, 对灾害的实时监测与准确预报提出了更高要求。同时, 在自然灾害威胁下, 电力设施抵抗小概率-高风险灾害事件的脆弱性逐渐凸显^[8-9], 使得电力设施外部安全风险预警^[10]及防灾减灾举措^[11-12]的科学实施成为重点研究课题。

经研究发现: 对于电力设施暴雨淹没风险动态评估研究方面, 主要根据监测数据对各类设施在暴雨等自然灾害影响下的运行风险进行评估^[13], 常用方法有统计分析、模拟分析和预测评估三大类。统计分析方法即基于电力设施长期运行可靠性数据, 通过数理统计分析方法进行统计分析得到风险估计值, 如文献[14]基于历史故障及缺陷数据, 运用统计方法构建输电线路的风险评估模型, 旨在对线路各组成部分的状态进行量化处理, 并据此计算出具有明确故障概率指示意义的线路风险评估数值。模拟分析方法基于结构可靠性建模, 对不同灾害强度下电力设施故障情况进行模拟, 如文献[8]针对地震灾害下配电网抵御能力弱的问题, 通过寻找地震中概率最高的配电网故障重数进行故障场景模拟, 利用复杂网络理论中的网络中心性指标评估配电网网架的受损程度, 随机地进行震后配电网的风险评估; 文献[15]基于二维水力学模型和比例风险模型, 构建了极端暴雨灾害下考虑直接、间接影响的城市配电网设备综合时变失效模型, 进行配电网风险评估。预测评估方法通过将天气预报、灾害预警等外部环境信息与电力设施自身运行参数相结合以预测未来的风险水平, 如文献[16]基于云理论对输变电设备故障进行不确定推理预测, 构建了一种基于云推理的输变电设备故障率预测模型。

国内外已有大量研究者致力于借助水文模型与水动力模型开展淹没的模拟工作。例如: 土壤和水分评估工具(soil and water assessment tool, SWAT)^[17]、MIKE 系列^[18-20]、暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)^[21]等经常被用于洪涝灾害模拟。国内外研究者对于水动力模型的数值求解方法已经有了较为深入的研究。比如: 丹麦水力学研究所开发的 MIKE 11 模型^[18]、四川大学研发的立面二维水温分析模型(west water-lateral, WWL)^[19]均使用的是有限差分法; MIKE 21 模型^[20]、MIKE Flood 模型^[22]均使用有限体积法; 而文献[21]建立的洪水

风险分析系统(flood risk analysis system, FRAS)模型能够将水文模型与水动力模型进行耦合, 结合上述两种方法的数值格式, 可以很好地对一维水动力方程和二维水动力方程进行求解。这种将一维和二维水动力模型耦合的方式也是目前热门的研究方法, 比如: 文献[23]基于水文和水动力耦合模型进行洪水淹没模拟; 文献[24]基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 的耦合模型进行城市内涝模拟。

考虑到电力设施节点负荷量的大小直接决定了电力设施节点在电网系统中的重要性, 暴雨淹没的关键节点负荷越大, 对于整个电网运行的影响就越大^[25]。由于电力设施节点的负荷量也是随时间变化的, 所以利用节点的失负荷量作为电力设施节点风险评价指标需要精确的短期负荷预测方法来获取节点完全停运的切负荷量。现有研究普遍采用深度学习算法对短期负荷进行预测, 如文献[26]将深度学习方法与经典机器学习方法进行对比分析, 提出一种基于时间卷积网络的短期电力负荷预测模型; 文献[27]提出了一种基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络集成的短期负荷预测方法。

综上所述, 许多专家学者已在暴雨淹没模拟、短期电力负荷预测以及电力设施暴雨淹没风险评估领域取得丰富研究成果。然而, 当前成果中基于水动力模型的淹没模拟^[28]、电网节点短期负荷预测、电力设施淹没风险识别和动态评估相结合的研究较少, 缺乏暴雨淹没灾害与电力设施风险的关联性建模, 对于电力设施在不同强度暴雨影响下的淹没风险动态分析仍有研究空间。基于此, 提出一种基于二维水动力模型与数据融合的电力设施淹没风险动态评估及预警方法, 运用模拟分析与预测评估技术, 结合数据挖掘和快速精准的模型算法, 及时防范电力设施洪涝风险, 提升效率并降低灾害损失。

1 雨水淹没对电力设施的影响因素分析

暴雨天气对于电力设施的影响主要分为 3 类^[29]: 一是城市地区被洪水淹没导致城区电网系统故障^[30]; 二是山洪、泥石流等暴雨引起的次生灾害冲坏输电线路杆塔引起输电线路中断^[31-33]; 三是雨水长期淋到电力设施上破坏了绝缘层, 引发雨闪事导致短路故障^[34-35]。

近年来, 由于城市建设带来的城镇地形变化以及城市人口的持续增加, 城市居民的用电水平逐年上升, 城市内涝逐步成为城市安全的重大威胁^[36]。针对暴雨所致电力设施淹没问题, 亟需采取解决措施。因此本文仅针对暴雨引发的城镇内涝对于电力设施

的影响机理开展后续研究。连续多日的强降水天气会使得城市面临内涝威胁,这种情况下,地下水位上升可能对位于地下的配电设施构成严峻挑战,引起重大设备故障^[15]。尽管单个配电室的受损仅限于影响其供电范围内的区域,即一个台区,但值得注意的是,城市中广泛分布着众多地下配电室^[29],且这些设施往往位于易遭水淹的低洼地带,呈现出点多面广的特点,增加了整体电网系统的脆弱性和修复难度。同时,处在地势低洼地带或站区排水性能较差的变电站也极易受到内涝的冲击而造成不可估量的损失。具体来说,电气设备的绝缘性能会被内涝产生的积水严重破坏,同时内涝还会导致整个继电保护装置无法正常工作。当情况严重时,整个变电站可能会停运^[37]。

根据《防洪标准 GB50201-2014》、《变电站布置设计技术规程 DL5056-2007》等标准,进行雨水淹没对于电力设备的影响分析:电力设备一般安装在离地一定高度处,当积水深度到达此高度后,雨水就会淹没电力设备底部并可能引发故障,因此本文将对电力设备底部可能遭受雨水淹没影响的高度设置为二级淹没阈值高度。当积水超过二级淹没阈值高度后,淹没影响的第一阶段随即开始,而随着积水高度的上升,淹没高度对于电力设备的影响也随之增加,电力设备的失效部件随之增多。当淹没到电力设备的上方,此时设备的大部分元件都浸泡在雨水中,可能导致整个电力设备完全失效,因此本文将此淹没高度设置为一级淹没阈值高度,当超过一级阈值后,淹没影响的第二阶段开启,此阶段中整个电力设施基本停运,积水继续上升或下降都不会造成更严重的后果。综上,本文会根据电力设备的两级淹没阈值高度来构建其失效概率模型。

2 电力设施暴雨淹没建模

2.1 芝加哥雨型模型

遵循《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》的指导原则,本文研究采纳了短历时暴雨雨型的分析手段,具体采用了著名的芝加哥雨型模型^[38]。该模型核心在于运用统计学方法建立的暴雨强度公式来合成设计级别的降雨序列,专注于模拟在均匀降水条件下、具有相同均值强度的极端降雨事件。通过此模型,能够生成详尽的降雨量随时间变化的过程线,这一过程被细分为多个百分比阶段,确保了对降雨事件动态的精确把控。尤为关键的是,在构建过程中,模型允许在特定时段人为增设雨量峰值,以模拟自然降雨中的高强度突发情况;而此峰值的设定需考量前期的空气湿度条件,

因为它直接影响到所能达到的最大径流强度的准确度,体现了模型对自然水文循环复杂性的考虑。雨量过程线的形式对所有暴雨历时的雨量类型都适用,只不过平均强度有所不同。采用芝加哥雨型模型的暴雨强度与时间的乘积,来估计在某时段的降水量,如式(1)所示。

$$H(\Delta t) = q \cdot \Delta t = \sqrt{2} \frac{A + C \lg P}{(T + b)^n} \Delta t \quad (1)$$

式中: $H(\Delta t)$ 为 Δt 时段的降水量; Δt 为降雨持续时间; q 为芝加哥雨型模型的单位时间降雨强度 (A 、 C 、 b 、 n 为待定系数, T 为降雨历时, P 为设计重现期)。

2.2 二维水动力电力设施淹没模型

根据数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据地图,将电力设施所在附近区域进行网格化处理,如图 1 所示。图 1 中圆点表示电力设施节点,每个电力设施节点位于一个单元格内,根据电力设施周围的地形高程的不同,暴雨天气的降水会从高处单元格流向低洼处单元格,图 1 中颜色越深的地方表示地势越低,更容易积水。

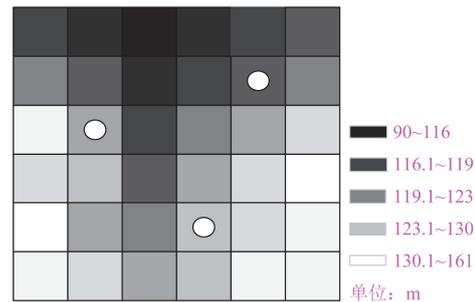


图 1 电力设施区域网格化示意图

Fig. 1 Grid diagram of power facilities locations

如图 2 所示,假设电力设施节点为 Z 单元格,根据网格划分其周围有 8 个相邻单元格,分别为 Z 单元格的上北 N 、下南 S 、左西 W 、右东 E 和西北 NW 、东北 NE 、西南 SW 、东南 SE ,但 Z 单元格的积水只会通过 N 、 S 、 W 、 E 4 个方向的单元格流进或者流出,具体流向根据两个单元格的高程差判

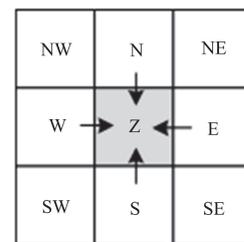


图 2 雨水流向示意图

Fig. 2 Stormwater flow diagram

断, 通过这种积水流动的原理, 本文认为积水在垂直方向上受力平衡, 所采用的二维水动力模型只考虑水平方向的受力, 包括地表对积水的摩擦阻力和周围水对积水的压力。

设单元格的宽、高分别为 Δx 、 Δy ; 其积水深度 D 与时间有关, 即 $D = D(t)$; 则积水的质量 $m = \rho \Delta x \Delta y$, 其中 ρ 为水的密度。由式(2)得到周围水的压力合力。

$$f_1 = -\rho g D \Delta x \Delta y \nabla h = -m g \nabla h \quad (2)$$

式中: f_1 为周围水的压力合力; g 为重力加速度; ∇h 为水面高程, 具体而言是地面高度水深的和。由式(3)得到地面摩擦力。

$$f_2 = m g k^2 n^2 R_h^{-4/3} V^2 \quad (3)$$

式中: f_2 为地面摩擦力; k 为单位转化系数; n 为 Manning 系数; V 为水流速度; R_h 为水力半径, 它量化了流体截面积与水流宽度的比值, 在本文的讨论之中, 它等同于水深 D , 值得注意的是, 水流中遇到的阻力总是作用于流速方向相反的方向。综上所述, 得到式(3)的矢量形式为

$$f_2 = -m g k^2 n^2 D^{-4/3} |V|^2 \frac{V}{|V|} \quad (4)$$

考虑到新降下的雨水的水平速度需要从 0 快速加速到积水的水流速度 V , 已知净降雨强度为 q , 根据式(1)和积水质量公式推导, 在 Δt 时段内, 降到单元格内的雨水质量为 $m = \rho \Delta x \Delta y H(t) = \rho q \Delta x \Delta y \Delta t$ ^[39]。由动量守恒定律可得到积水流动方程^[15]如式(5)所示。

$$(f_1 + f_2) \Delta t = m(V - 0) = \rho q \Delta x \Delta y \Delta t V \quad (5)$$

展开可得到

$$-\left[\rho g D \Delta x \Delta y \nabla h + m g k^2 n^2 D^{-4/3} |V|^2 \frac{V}{|V|} \right] = \rho q \Delta x \Delta y \Delta t V \quad (6)$$

式(6)是一个关于 $|V|$ 的一元二次方程, 求解略去负根可得到水流速度 V 。结合建筑覆盖率 θ 对于水流的影响, θ 为计算单元格中建筑物所占面积比例, 则水可以流过的宽度占单元格宽度的比值近似计算为 $\lambda = 1 - \sqrt{\theta}$, $\bar{\theta}$ 取水流方向上两个单元格 θ 的平均值。则计算出 Δt 时段内相邻网格间的径流量为

$$Q_* = \lambda V_* D L_* \Delta t \quad (7)$$

式中: Q_* 表示雨水沿*方向的水流量; *指代单元格 Z 周围的 4 个方向 NZ、SZ、WZ、EZ; Q_* 为正时表示雨水流入 Z 单元格, 为负则表示流出; V_* 表示雨水沿*方向的水流速度; L_* 表示沿*方向的径流宽度, NZ、SZ 取 Δx , WZ、EZ 取 Δy 。

同时考虑排水因素, 本文从雨水井和地下渗水

两方面考虑排水, 并将排水量看作负的水流量, t 时刻的排水量 $P(t)$ 计算公式如式(8)所示。

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) \quad (8)$$

式中: $P_1(t)$ 为 t 时刻雨水井的排水量, 通过式(9)计算; $P_2(t)$ 为 t 时刻地形渗水量, 通过式(10)计算。

$$P_1(t) = c \mu S_p \sqrt{2gD(t)} \quad (9)$$

式中: c 为单元格内排水井个数; μ 为排水系数, 取 $[0, 1]$; S_p 为排水井的井口面积。

$$P_2(t) = (1 - \theta) \beta \Delta x \Delta y V_s t \quad (10)$$

式中: β 为下渗系数; V_s 为下渗速度。

根据式(7)—式(10), 结合 t 时刻的积水高度, 迭代计算可以得到 $t + \Delta t$ 时刻的电力设施所在单元格 Z 的积水深度为

$$D(t + \Delta t) = D(t) + q \Delta t + \frac{Q_{NZ} + Q_{SZ} + Q_{WZ} + Q_{EZ} - P(t)}{\Delta x \Delta y} \quad (11)$$

3 电力设施淹没风险概率方法

在考虑了多种影响因素之后, 淹没风险的概率评估及其风险划分原则主要基于预设的风险等级阈值。具体而言, 随着淹没风险概率的增加, 一旦该概率超过了预先设定的某个阈值, 就会将此区域或设施归类为特定的淹没风险等级。这种划分方法旨在提供一种标准化的方式, 以便于管理和决策者能够更有效地评估和应对潜在的淹没风险。

此外, 本文中所讨论的风险评估主要集中在暴雨引发的淹没事件对输电线路可能造成的直接损害上。虽然经济损失确实是衡量风险后果的一个重要方面, 并且它反映了输电线路受损后对经济活动和社会生活的影响程度, 但从直接关联的角度来看, 本文选择专注于直接影响输电线路安全的因素。因此, 在进行风险等级划分时, 本文未将经济损失作为考量指标。

传统的风险评估方法要求给出部件的失效概率, 这在实际应用中很难实现。本文根据淹没模拟得到的积水深度数据, 结合电力设施的两级淹没阈值和设备特点, 提出一种考虑 3 种影响因子(积水淹没因子、设备类型因子、故障类型因子)的加权综合评估法^[40], 计算积水淹没电力设施发生故障事件的风险概率。

$$P = (F_d \cdot W_d) \times \sum_1^i (F_{ei} \cdot W_{ei}) \times \sum_1^j (F_{ij} \cdot W_{ij}) \quad (12)$$

式中: P 表示风险概率, 即事故发生的可能性; F_d 为积水淹没因子; F_e 为设备类型因子; i 代表电力

设施中参与风险评估的设备数量; F_f 为故障类型因子; j 代表某设备可能发生故障的数量; W_d 为积水淹没因子的权重; W_e 为设备类型因子的权重; W_f 为故障类型因子的权重。

3.1 电力设施淹没风险因子

通过分段指数函数拟合积水深度与电力设施被积水淹没关系的失效概率, 积水淹没电力设施的风险因子计算公式为

$$F_d = \begin{cases} 0, & d \leq a \\ 1 - e^{-\left(\frac{d-a}{\sigma}\right)^2}, & a < d \leq b \\ 1, & d > b \end{cases} \quad (13)$$

式中: d 为积水深度, 对应前述的 $D(t)$; σ 为概率系数; a 为二级淹没阈值; b 为一级淹没阈值。

3.2 电力设施设备类型因子

电网的设备类型因子按其设备类型得分进行分类^[41], 设备类型得分见表 1。同一塔上的双传输线视为单线长度。如果同时包含不同类型的设备, 取设备类型得分最高者。

表 1 设备类型因子

Table 1 Device type factor

设备	变电站设备		交流线			直流 线路	母 线
	变压器	总线	电缆	架空线	同塔 双线		
分值	0.8	0.4	0.8	1	0.5	0.9	1

3.3 电力设施故障类型因子

电网故障事件的故障类别符合电力系统安全稳定导则中的三级电网故障^[38]标准。由于每种故障类型发生的频率不同, 其取值范围见表 2。不同故障类型的具体数值如下: 一级故障主变压器 $N-1$ 故障取 1, 线路 $N-1$ 故障取 0.8; 二级故障母线 $N-1$ 故障取 0.5, 同一塔上所有线路停电取 0.5; 三级故障主变压器 $N-2$ 故障取 0.1, 母线 $N-2$ 故障取 0.15。

表 2 故障类型因子

Table 2 Fault type factor

故障类型	第一级故障	第二级故障	第三级故障
分值	0.8~1	0.1~0.6	0~0.2

4 电力设施淹没风险的评估指标、计算和预警方法

电力设施淹没风险概率是计算不同类型设备被雨水淹没后发生故障的可能性, 还需要考虑故障发生的后果, 即严重度指标。虽然现在许多自然灾害

风险评估方法里用到经济损失指标来评估电力部门的直接经济损失^[42], 但是该指标没有具体地反映电力设施的故障本质。因此, 本文通过电力设施的失负荷严重度指标来表征电力设施淹没灾害的严重程度。

考虑到负荷量大的电力设施节点在整个电网中的重要性以及节点电力负荷随时间变化的特点, 本文采用基于神经网络算法的短期负荷预测来预估电力设施节点在被雨水淹没时可能要切除的负荷量。然后利用风险理论^[43]计算电力设施淹没的总体风险值, 根据该风险评估值和经验统计得来的风险阈值范围, 对其划分三级风险等级和相应的预警等级, 并且根据电力设施节点的经纬度坐标在地理信息系统(geographic information system, GIS)地图上采用不同颜色对相应预警等级进行标记。

4.1 失负荷评价指标

电力设施被雨水淹没后引发故障, 造成输电线路潮流转移, 导致节点失去负荷。而电力设施节点的负荷量具有随时间变化的特点, 因此本文用预测的负荷量作为节点淹没风险的失负荷严重性评价指标。本文利用电力设施节点的历史负荷数据以及气温和天气数据, 基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和 LSTM 结合的方法进行电力设施节点的短期负荷量预测。

VMD 为一种自适应性的模态信号分解的估计方法^[44], 其进行模态分解的公式为

$$\min_{v_k, f_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta_t + \frac{j}{\pi f_k} \right) * v_k(t) \right] e^{-j2\pi f_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (14)$$

式中: $v_{k(t)}$ 表示在 t 时刻第 k 个分量信号的值; f_k 表示信号经过分解处理后的第 k 个中心频率; K 表示模态分解的总数量; δ_t 表示单位脉冲函数; $*$ 代表卷积运算。

LSTM 因为其对时间序列的敏感性, 被广泛应用于处理时间序列预测问题上, 其核心网络结构包括以下计算单元。

1) 遗忘门

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (15)$$

2) 输入门

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (16)$$

$$\tilde{c}_t = \sigma(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (17)$$

3) 细胞状态

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * \tilde{c}_t \quad (18)$$

4) 输出门

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (19)$$

$$h_i = o_i * \tanh(c_i) \quad (20)$$

式(15)—式(20)的参数含义与文献[41]中的一致, 此处不再赘述。

本文采用 VMD 方法来处理节点过往的电力负荷数据, 通过这一分析手段, 原始数据被细致地分解为多个组成元素, 每个元素都携带独特的频率特性和振幅属性。随后, 本文将这些由分解得到的分量与一系列外在变量, 包括温度变化、特定天气状况及不同的日期类型进行综合分析, 以此来深度挖掘负荷模式与这些因素之间的内在联系。这样做的目的是为了能够更好地利用这些信息, 以提高对负荷数据的预测能力。基于此, 将融合后的数据输入到 LSTM 模型进行训练, 最终得到电力设施节点负荷预测量。

4.2 总体风险值计算

根据风险理论, 计算电力设施淹没总体风险值, 其公式为

$$R_{risk} = P \cdot S_{sev} \quad (21)$$

式中: R_{risk} 表示风险理论中的风险值; S_{sev} 表示电力设施节点的失负荷严重程度, 其值为 4.1 节中的短期负荷预测算法预估的节点负荷量。

通过式(12)和式(13)不难看出, P 是一个关于时间 t 的变量函数, 并且通过预测的方法得到的失负荷严重程度 S_{sev} 也是随时间变化的, 因此总体风险值 R_{risk} 的计算方法是一个随时间变化的动态风险评估算法。

4.3 淹没风险等级划分和预警方法

根据设置的三级风险阈值判断对应的电力设施淹没风险等级, 并且确定相应的预警等级。通过电力设施淹没风险 R_{risk} 与设置好的 3 个等级的风险阈值 (R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}) 进行比较, 则淹没风险等级评估和预警等级判断结果包括如下 4 种情况。

1) 若最终电力设施淹没风险 R_{risk} 预测值大于一级淹没风险阈值 R_{z1} , 则电力设施的预报风险等级结果为一级风险, 相应地进行 I 级预警。

2) 若电力设施淹没风险 R_{risk} 预测值大于二级淹没风险阈值且小于一级淹没风险阈值, 则电力设施的预报风险等级结果为二级风险, 相应地进行 II 级预警。

3) 若电力设施淹没风险 R_{risk} 预测值小于二级淹没风险阈值, 则电力设施的预报风险等级结果为三级风险, 相应地进行 III 级预警。

4) 若电力设施淹没风险 R_{risk} 预测值为 0, 则不进行风险预报, 不进行预警。

因此有: 一级风险 > 二级风险 > 三级风险; I

级预警 > II 级预警 > III 级预警。

可视化 GIS 预警地图展示具体为: 根据电力设施节点的经纬度坐标定位到地图中具体位置, 将对应的预警等级在 GIS 地图上定位的位置用不同颜色的圆圈标记出来, 然后通过大屏展示给电力部门管理人员。

5 算例分析

本文以某区域的电网为例, 结合该区域的 90 m 分辨率的 DEM 数字高程数据, 构建如图 3 所示的网络节点拓扑图。图中方格为 90×90 m 的区域, 方格中填充的颜色表示绝对高程的高度范围, 具体包括: 颜色最深的深黑色为 90~116 m; 浅黑色为 116.1~119 m; 灰色为 119.1~123 m; 浅灰色为 123.1~130 m; 颜色最浅的灰白色为 130.1~161 m。颜色越深表示地势越低, 该区域的电力设施节点更容易被雨水淹没, 反之则不容易被淹没。本算例将通过模拟降雨、淹没、故障等活动并进行分析, 来说明所提模型和风险评估及预警方法的效果。

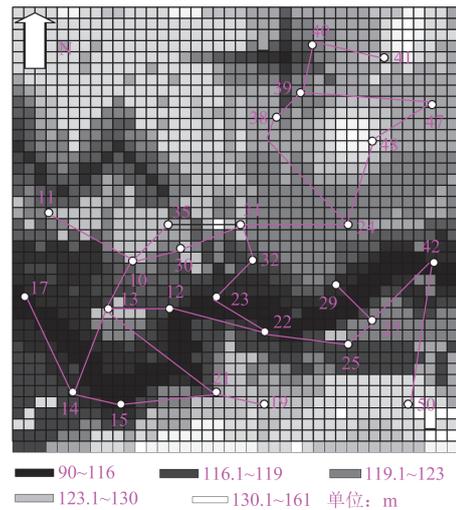


图 3 某区域电网网络节点拓扑结构及绝对高程
Fig. 3 Topology and absolute elevation of a regional power network node

5.1 降雨及节点淹没模拟计算

采用芝加哥雨型模型进行该区域的 2 h 降雨模拟, 如图 4 所示, 平均降雨强度约为 4.8 mm/min, 在 48 min 时达到峰值约 32 mm/min, 降雨总量利用式(1)进行计算累加得到, 2 h 总计降雨约 580 mm。

在模拟降雨过后, 采用二维水动力模型模拟计算算例区域部分节点的积水深度, 如图 5 所示。节点所在网格的积水深度先随时间逐渐增大后逐渐减少, 在 48 min 降雨强度到达峰值过后的一段时间内

积水深度上升得更快, 节点 17 由于处于地下, 在 70 min 时积水深度达到最深约 908 mm。从图 5 中可以看出, 节点 45 和节点 10 处的积水深度大约在 54 min 后就开始下降, 而其余节点则是在持续增加后, 于 70 min 左右才减少。结合图 3 中的高程范围, 得出这一现象的原因为: 节点 10、45 所处的地势相较于周围网格较高, 雨水随着斜坡流向地势较低的网格, 而其他节点则处于最低位置, 类似于盆地, 在强降雨过后, 形成径流, 周围高地势的雨水随着时间推移, 流入到这些节点所在网格内。积水深度在到达最高点后逐渐降低, 一是由于降雨强度在逐渐降低, 二是由于人工排水系统和土壤入渗在排出积水。

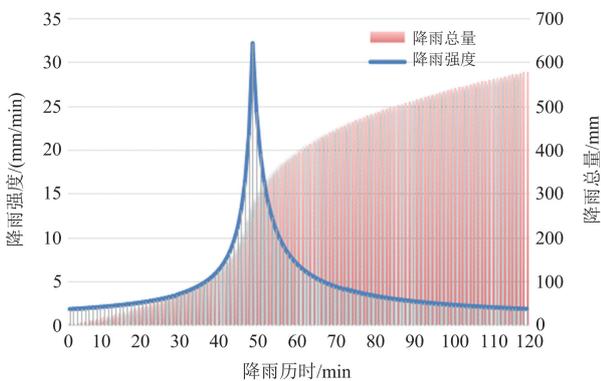


图 4 2 h 降雨模拟

Fig. 4 2-hour rainfall simulation

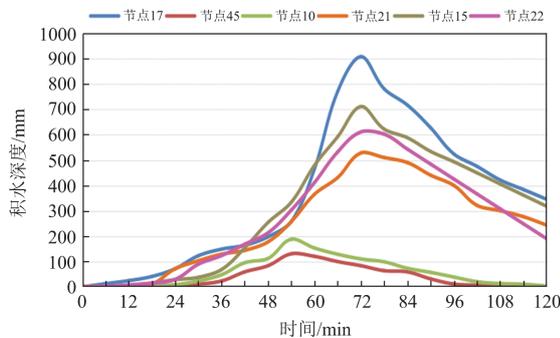


图 5 部分节点所在的网格积水深度

Fig. 5 Depth of water in the grid where some nodes reside

5.2 电力设施节点淹没风险概率计算

先根据电力设施节点的两级淹没阈值参数(如表 3 所示)计算积水淹没因子。

由 3.1 节的公式计算得到积水淹没电力设施的风险因子如图 6 所示, 该因子反映积水淹没影响电力设施的失效概率。在两级淹没阈值范围内呈现出随着积水深度增加而上升的趋势, 在此不考虑电力设备的绝缘层影响, 当积水深度超过一级淹没阈值后, 统一按照完全失效计算。由于节点 10 和节点

45 所在方格的淹没水深未达到其二级淹没阈值, 因此其淹没风险因子一直为 0, 所以未在图中体现。节点 17 相比其他节点, 其淹没风险因子最晚开始增长, 这是由于其二级淹没阈值是最大的。

表 3 节点两级淹没阈值参数

Table 3 Two-stage flooding threshold parameter of the node

节点	二级阈值/mm	一级阈值/mm	节点类型	设备位置
10	300	750	变电站	地上
15	200	550	箱式变电站	地上
17	400	800	变电所	地下
21	200	500	配电所	地上
22	200	500	牵引变电所	地上
45	300	500	发电厂	地上

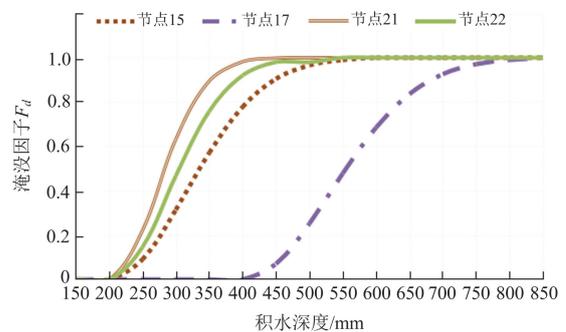


图 6 积水深度对节点淹没因子的影响

Fig. 6 Effect of submergence factor on failure probability of nodes

在计算出淹没风险因子后, 再根据设备类型因子和故障类型因子进行分析。这里以单个节点的某个设备发生特定故障为例, 相关算例参数如表 4 所示。

表 4 设备和故障参数

Table 4 Equipment and fault parameters

节点	故障类型	设备类型因子	故障类型因子
15	Transformer $N-1$	0.8	1
17	Line $N-1$	1	0.9
21	Bus $N-1$	0.4	0.5
22	Transformer $N-2$	0.8	0.1

考虑电力设施节点中设备类型因子和故障类型因子, 利用式(12)计算出电力设施的淹没风险概率, 如图 7 所示。

可以看出电力设施节点的淹没风险概率在某一时刻开始随时间推移快速上升, 但在一定时间后基本趋于稳定并维持在峰值水平。而节点 15、17 对比节点 21、22, 前面两个节点的某些设备发生故障的可能性比后两个节点的大很多, 因此在图 7 中表现为节点 15、17 的淹没风险概率曲线明显高于节点 21、22 的。

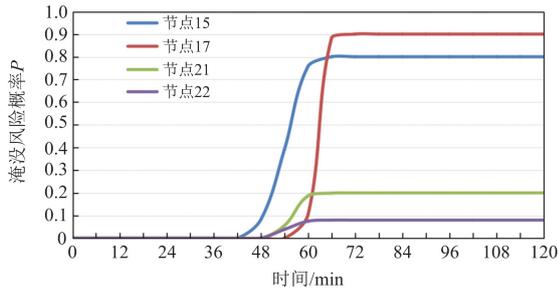


图 7 考虑 3 种影响因子的淹没风险概率

Fig. 7 Submergence risk probability considering three influence factors

5.3 风险评估指标及总体风险计算

采用某区域电网 2 年内的历史负荷数据用于模拟电力设施在不同时间的负荷量，数据采集时间间隔为 30 min。气温数据利用气象网站进行获取。处理完数据后，将数据划分为训练集 80%、验证集 10%、测试集 10%。为了验证所提算法的效果，将本文所提 VMD-LSTM 算法与当前较流行的负荷预测算法 CNN-LSTM、Attention-LSTM、GRU-RNN 进行比较。算法精度比较如表 5 所示，从中可以看出，本文所提算法精度在 RMSE、MAPE 上低于其他 3 种，在 R^2 上高于其他 3 种，说明本文算法更佳。

表 5 算法精度比较

Table 5 Algorithm precision comparison

指标	本文算法	CNN-LSTM	Attention-LSTM	GRU-RNN
RMSE/MW	388.28	405.31	537.45	597.06
MAPE/%	2.94	3.58	4.87	5.11
R^2 /%	97.05	96.10	96.35	95.54

取算例时间段内部分节点的历史负荷数据，输入到基于 VMD 和 LSTM 的电力设施节点的短期负荷量预测模型中，得到的负荷量预测值随时间变化的曲线如图 8 所示。节点 21 是一个重要的节点，其负荷量是最高的。节点 17 是一个边缘节点，由节点

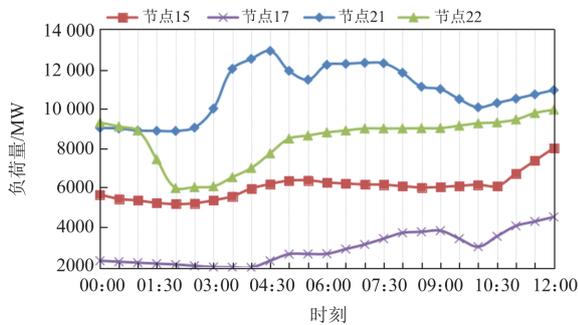


图 8 节点短时负荷预测

Fig. 8 Short-term load prediction of nodes

网络拓扑图可以看出其仅与节点 14 连通，因此其负荷量是 4 个节点中最低的。

本文以节点故障后的失负荷量作为节点被暴雨淹没的严重程度指标，而由于节点的负荷是随时间变化的，因此本文从以下两个方面来比较和分析暴雨淹没电力设施节点的总体风险评估值。

1) 比较同一时间段不同节点的风险评估值。这里负荷量取 07:00—09:00 这一时间段内的预测值，并对计算后的值进行归一化处理，如图 9 所示。观察几个节点的总体风险值趋于稳定的一个时刻 66 min，可以看出节点 17 的淹没水深虽然是最高的，但是由于其负荷量比较小，即使节点 17 的淹没风险概率高于节点 15，但是节点 17 评估出的总体风险值明显低于节点 15。对比节点 21 和节点 22，从风险概率和负荷量比较，节点 21 均高于节点 22，同时两个节点的风险评估值也保持着这种大小比较趋势。综上得出，节点损失的负荷量会影响到风险评估的结果，故将节点负荷量作为风险评估指标是合理的。

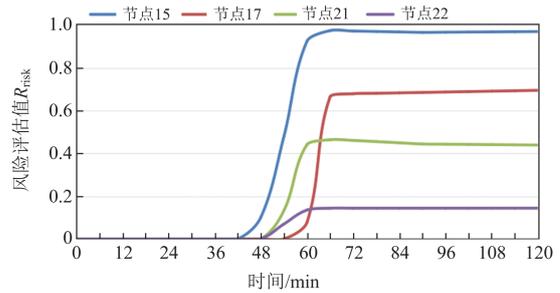


图 9 同一时间段各节点风险评估值

Fig. 9 Risk assessment value of each node in the same time period

2) 比较不同时间段同一节点的风险评估值。取两段 2 h 的负荷预测量，第一段 2 h 取 00:00—02:00，第二段 2 h 取 10:00—12:00。在节点 15 分别计算总体的风险评估值进行对比分析，如图 10 所示。

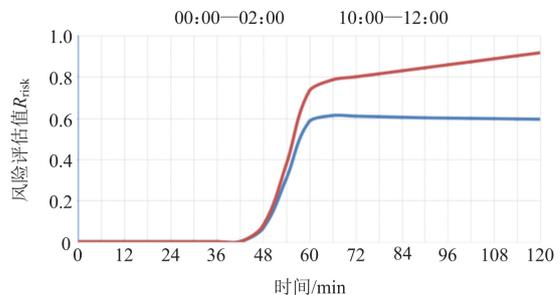


图 10 不同时间段节点 15 的风险评估值

Fig. 10 Risk assessment value of node 15 in different time periods

从图 10 中可以看出, 在相同的风险概率情况下, 同一个节点在不同时段的失负荷量计算出来的风险评估值变化趋势虽然一致, 但数值大小不同。10:00—12:00 的电力负荷明显高于 00:00—02:00 时间段的电力负荷, 因此 10:00—12:00 时间段内暴雨淹没导致电力节点停运完全失负荷对于整个电力系统造成的影响来说, 风险更高。

5.4 风险评估结果和预警分析

根据图 9 中计算的总体风险值和三级风险阈值范围, 在 66 min 时, 对于各节点的风险等级和预警等级划分如表 6 所示。

表 6 风险和预警等级划分

Table 6 Classification of risk and warning levels

	R_{21}	R_{22}	R_{23}	
风险范围	0	0.01~0.3	0.31~0.6	>0.6
风险等级	无风险	三级风险	二级风险	一级风险
预警等级	不预警	III 级预警	II 级预警	I 级预警
节点 10	✓			
节点 15				✓
节点 17				✓
节点 21			✓	
节点 22		✓		
节点 45	✓			

本算例中对于节点 10、节点 45, 其地势相对周围较高, 模拟的降雨量未达到其淹没阈值, 因此评估为无风险, 相应地也不需要做出预警。对于节点 15 和节点 17, 它们的风险评估值都超过了 0.6, 因此其风险等级划分为一级风险并进行 I 级预警。节点 21 在 66 min 时的风险评估值大约为 0.46, 按照表中的风险阈值范围 R_{22} , 划分为二级风险节点, 相应进行 II 级预警。同样地, 节点 22 划分为三级风险等级以及进行 III 级预警。

根据电力设施节点的经纬度坐标, 以及评估的风险预警等级, 在 GIS 地图上采用不同颜色进行风险预警标记。图 11 为算例区域的 6 个电力设施节点淹没风险的预警分布情况, 其中未标预警颜色的为无需预警, 标红色的表示 I 级预警, 标橙色的表示 II 级预警, 标蓝色的表示 III 级预警。

6 结论

本文分析了暴雨灾害对于电力设施节点的淹没影响机理, 利用芝加哥雨型模型模拟降雨以及基于二维水动力模型来模拟雨水的径流, 对电力设施的暴雨淹没进行建模。不仅研究了考虑积水淹没因子、设备类型因子、故障类型因子 3 种影响因素的电力设施风险概率计算方法, 此外, 采用二维水动力模型模拟雨水的径流, 对电力设施的暴雨淹没过程进

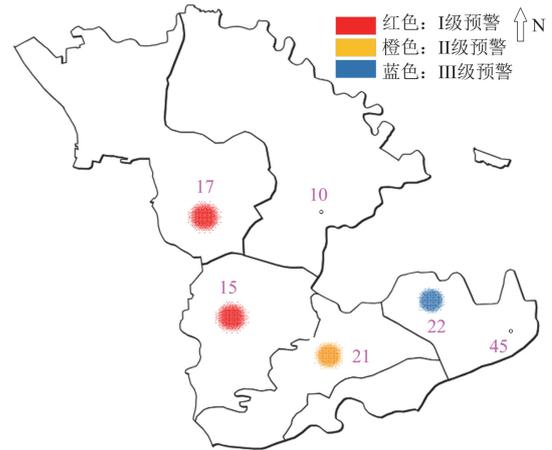


图 11 电力设施淹没预警分布

Fig. 11 Distribution of flood warning of power facilities

行建模, 而且考虑到雨水淹没电力设施引发电网各种故障, 建立了失负荷严重度指标的风险评价指标算法体系。通过基于 VMD-LSTM 的短期负荷预测算法来预测动态变化的电力设施节点负荷量, 以此确定节点完全切负荷的严重程度。以我国某区域的局部电网作为算例, 研究暴雨积水淹没电力设施对于电网的影响, 对比分析了不同节点的淹没失效概率和节点故障对于整个电网的影响程度, 对于不同节点的风险值进行等级划分, 设定相应的预警等级, 识别出电网中对于暴雨淹没的脆弱节点, 有助于电力企业提前做出相应防护措施, 并在节点失效后快速制定恢复方案。

参考文献

- [1] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 16-26.
WANG Jian, XIONG Zhangmin, NAN Dongliang, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 16-26.
- [2] CHEN L, YAN Z, LI Q, et al. Flash flood risk assessment and driving factors: a case study of the Yantanxi River Basin, Southeastern China[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13(2): 291-304.
- [3] 许剑川, 杨定光, 喻澍霖, 等. 考虑极端自然灾害影响下的输电线路风险评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 84-90.
XU Jianchuan, YANG Dingguang, YU Shulin, et al. Risk assessment method for transmission lines considering the

- influence of extreme natural disasters[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(11): 84-90.
- [4] 邱建, 朱煜昆, 张建新, 等. 基于安全强化学习的电网稳控策略智能生成方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(10): 147-155.
QIU Jian, ZHU Yukun, ZHANG Jianxin, et al. Intelligent generation method of power system stability control strategy based on safe reinforcement learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 147-155.
- [5] 孙小军, 林圣, 张强, 等. 一种牵引供电系统地震灾害风险评估方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(23): 4970-4980.
SUN Xiaojun, LIN Sheng, ZHANG Qiang, et al. A method of seismic disaster risk assessment for the traction power supply system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(23): 4970-4980.
- [6] 王凯丰, 张洪斌, 力刚, 等. 城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(11): 77-88.
WANG Kaifeng, ZHANG Hongbin, LI Gang, et al. Advances in urban flood resilience study and its key supporting technologies review[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering (Chinese and English)*, 2023, 54(11): 77-88.
- [7] 张译心, 狄晨焯, 赵男, 等. 面向复合极端天气的高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.
- [8] 郑国鑫, 雷霞, 王湘, 等. 地震灾害模拟及配电网的风险评估[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(24): 5218-5226.
ZHENG Guoxin, LEI Xia, WANG Xiang, et al. Earthquake simulation and risk assessment of distribution network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(24): 5218-5226.
- [9] 雷霞, 郑国鑫, 胡益. 地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3674-3680.
LEI Xia, ZHENG Guoxin, HU Yi. Vulnerability analysis and resilience improvement of distribution network under earthquake disasters[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3674-3680.
- [10] 姚福星, 苗世洪, 涂青宇, 等. 考虑强对流天气的乡镇配电网树线矛盾风险预警及优化处理[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(22): 6188-6203.
YAO Fuxing, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. Risk warning and optimization processing for tree-line contradiction in rural distribution network considering severe convective weather[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(22): 6188-6203.
- [11] 李明轩, 魏韡, 许寅, 等. 基于预演算法的灾后配电网应急抢修决策优化[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 85-94.
LI Mingxuan, WEI Wei, XU Yin, et al. Rollout algorithm-based post-disaster distribution system emergency repair optimization[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 85-94.
- [12] 曹辰, 王增平. 极端天气对新型电力系统的影响及应对措施思考[J]. *南方能源建设*, 2025, 12(1): 43-57.
CAO Chen, WANG Zengping. Reflections on the impact of extreme weather on new power systems and countermeasures[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(1): 43-57.
- [13] 杜岩, 谢从珍, 李彦丞, 等. 基于加权马氏距离型TOPSIS算法的10 kV配电网雷害风险评估[J]. *中国电力*, 2022, 55(4): 108-116.
DU Yan, XIE Congzhen, LI Yancheng, et al. Lightning risk assessment of 10 kV distribution line based on TOPSIS algorithm improved by weighted Mahalanobis distance[J]. *Electric Power*, 2022, 55(4): 108-116.
- [14] 刘珂宏, 刘亚东, 盛戈峰, 等. 基于输电线路全工况信息的风险评估方法[J]. *高压电器*, 2016, 52(3): 23-28.
LIU Kehong, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. All conditions information based risk assessment method for transmission line[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(3): 23-28.
- [15] 梁振锋, 闫俊杰, 李江锋, 等. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 4180-4190.
LIANG Zhenfeng, YAN Junjie, LI Jiangfeng, et al. Risk assessment method of urban distribution network under extreme rainstorm disasters[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4180-4190.
- [16] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 35-42.
- [17] LIU G, SCHWARTZ F W, TSENG K H, et al. Discharge and water-depth estimates for ungauged rivers: combining hydrologic, hydraulic, and inverse modeling with stage and water-area measurements from satellites[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6017-6035.
- [18] RENE J, MADSEN H, MARK O. A methodology for probabilistic real-time forecasting-an urban case study[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2013, 15 (3): 751-762.

- [19] 陈凯麒, 江春波. 地表水环境影响评价数值模拟方法及应用[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [20] WARREN I R, BACH H K. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. *Environmental Software*, 1992, 7(4): 229-240.
- [21] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1393-1400.
WANG Jing, LI Na, CHENG Xiaotao. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1393-1400.
- [22] 刘杨, 张瑞海, 韩岭, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的西北城市河道橡胶坝群洪水风险分析研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(6): 113-119.
LIU Yang, ZHANG Ruihai, HAN Ling, et al. Flood risk analysis of rubber dams group in the urban rivers of northwest China based on MIKE FLOOD model[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(6): 113-119.
- [23] 余富强, 鱼京善, 蒋卫威, 等. 基于水文水动力耦合模型的洪水淹没模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 37-43.
YU Fuqiang, YU Jingshan, JIANG Weiwei, et al. Flood inundation simulation based on coupled hydrologic-hydrodynamic model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 37-43.
- [24] 邓成, 夏军, 余敦先, 等. 基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(8): 912-921.
DENG Cheng, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban waterlogging simulation in a typical area in Shenzhen based on hydrological-hydrodynamic coupling model[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(8): 912-921.
- [25] 钮厚敏, 贾科, 刘鑫, 等. 光伏直流升压场站并网整体协同低电压穿越控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(8): 1-12.
NIU Houmin, JIA Ke, LIU Xin, et al. Overall coordinated low voltage ride-through control strategy for grid connection of a photovoltaic DC booster station[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(8): 1-12.
- [26] 赵洋, 王瀚墨, 康丽, 等. 基于时间卷积网络的短期电力负荷预测[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(5): 1242-1251.
ZHAO Yang, WANG Hanmo, KANG Li, et al. Temporal convolution network-based short-term electrical load forecasting[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(5): 1242-1251.
- [27] RAFI S H, NAHID-AL-MASOOD, DEEBA S R, et al. A short-term load forecasting method using integrated CNN and LSTM network[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32436-32448.
- [28] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 334-344.
HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 334-344.
- [29] 刘金, 李更丰, 孙思源, 等. 暴雨灾害下配电网预警与风险评估技术研究综述[J]. *东北电力大学学报*, 2022, 42(6): 1-7, 111-112.
LIU Jin, LI Gengfeng, SUN Siyuan, et al. A review of early warning and risk assessment technologies for distribution networks under rainstorm disasters[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2022, 42(6): 1-7, 111-112.
- [30] 李冰冰, 戎学锋, 钟宇军, 等. 海岛配电网防灾减灾提高供电可靠性研究[J]. *供用电*, 2016, 33(9): 6-11, 23.
LI Bingbing, RONG Xuefeng, ZHONG Yujun, et al. Research on the improvement of power supply reliability in the disaster prevention and mitigation of island distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2016, 33(9): 6-11, 23.
- [31] 刘永清, 王健. 配电网洪涝地质灾害的灾损特点及防灾技术研究[J]. *供用电*, 2016, 33(9): 12-18.
LIU Yongqing, WANG Jian. Research on the characteristic of distribution network loss caused by floods and geological disasters and their prevention technologies[J]. *Distribution & Utilization*, 2016, 33(9): 12-18.
- [32] 邓创, 刘友波, 刘俊勇, 等. 考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3825-3834.
DENG Chuang, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. A risk assessment method of power grid considering secondary geological hazards caused by rainfall weather[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3825-3834.
- [33] 王增平, 相禹维, 王彤. 台风暴雨灾害下的 110 kV 线路倒塔与断线事故评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 59-66.
WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 59-66.
- [34] 许广虎, 金铭, 张陵, 等. 500 kV 变压器高压套管闪络事故模拟试验分析与预防[J]. *电瓷避雷器*, 2022(5): 178-185.
XU Guanghu, JIN Ming, ZHANG Ling, et al. Simulation

test analysis and prevention of high voltage bushing flashover accident of 500 kV transformer[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(5): 178-185.

[35] 杨放南, 赵隆乾, 白伟, 等. 750 kV 变压器(电抗器)高压套管雨闪事故分析及防范措施[J]. *电瓷避雷器*, 2019(3): 212-215.

YANG Fangnan, ZHAO Longqian, BAI Wei, et al. Analysis of the rainstorm accident of 750 kV high voltage bushing for transformer (reactor)[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(3): 212-215.

[36] 赵凯旭, 王建明, 闫茜, 等. 西安市老城区暴雨内涝模拟及其灾害风险评估[J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(4): 1-12.

ZHAO Kaixu, WANG Jianming, YAN Xi, et al. Urban waterlogging simulation and its risk assessment in the old area of Xi'an[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(4): 1-12.

[37] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757-768, 778.

CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 757-768, 778.

[38] 孙翀, 王春婷, 张泽玉, 等. 芝加哥降雨过程线模型的改进[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 157-162.

SUN Chong, WANG Chunting, ZHANG Zeyu, et al. Improvement for the linear Chicago rainfall model[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(1): 157-162.

[39] 苏伯尼, 黄弘, 张楠. 基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(6): 684-690.

SU Boni, HUANG Hong, ZHANG Nan. Dynamic urban waterlogging risk assessment method based on scenario simulations[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(6): 684-690.

[40] 孙章丽, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(3): 125-130.

SUN Zhangli, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Flood risk analysis: progress, challenges and prospect[J]. *Journal of Calastrophology*, 2017, 32(3): 125-130.

[41] LIU Sha, SHI Xiaoqiang, WANG Tianhua, et al. Power grid risk assessment method based on risk probability engineering and its application[C] // *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, September 28-October 1, 2016, Wollongong, NSW, Australia: 1-5.

[42] 于小兵, 吴雪婧, 陈虹, 等. 基于灾害 CGE 模型的台风灾害间接经济损失评估——以广东省台风“山竹”为例[J]. *灾害学*, 2022, 37(2): 21-28.

YU Xiaobing, WU Xuejing, CHEN Hong, et al. Comprehensive assessment of typhoon disaster economic loss based on disaster-CGE model——take typhoon Mangkhut in Guangdong province as an example[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(2): 21-28.

[43] 郑国, 李华强, 李明军, 等. 基于运行可靠性和元件重要度的灾难性事故风险评估方法[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(8): 16-22, 29.

ZHENG Guo, LI Huaqiang, LI Mingjun, et al. A catastrophic accident risk assessment method based on operational reliability and importance of components[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(8): 16-22, 29.

[44] LÜ Lingling, WU Zongyu, ZHANG Jinhua, et al. A VMD and LSTM based hybrid model of load forecasting for power grid security[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(9): 6474-6482.

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2025-01-16

作者简介:

于浩(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力设施灾害评估与预警、特高压直流输电技术、电能质量分析与控制等; E-mail: yuhao_sagittarius@163.com

肖克江(1984—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为数据融合、人工智能、物联网、智能电网。E-mail: xiaokj@ccnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)