ICS 29.240
CCS F 24

T/GDEIIA

团　体　标　准

T/GDEIIA XXX-2025

输电防灾减灾点云预警技术规范

Specification for point cloud early warning technology of transmission disaster prevention and mitigation

（征求意见稿）

2025-00-00 发布　　2025-00-00 实施

广东省电子信息行业协会　发布

目　　次

前　言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由XXXXX提出并归口。

本文件主要起草单位：XXXXXXX、XXXXXXXX、.....。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX.....。

本文件为首次发布。

输电防灾减灾点云预警技术规范

1 范围

本文件规定了输电防灾减灾点云预警的总则、云预警系统架构、数据采集与处理、模型构建与优化、预警模型与算法、预警系统运行与管理、预警效果评估与应急响应、系统测试与验收、安全性与保障措施。

本文件适用于输电防灾减灾点云预警工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

DL/T 5630 输变电工程防灾减灾设计规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

输电防灾减灾点 transmission disaster prevention and mitigation point

用于监测输电线路周围灾害风险的关键点位，通过传感器、遥感等技术实时获取环境数据，以支持预警和应急响应。

3.2

云预警 cloud-based early warning

基于云计算的灾害预警系统，利用多源数据分析和智能算法，对输电线路风险进行实时监测和预警。

3.3

覆盖区域 coverage area；CA

给定的预警设备能够以足够高探测效率(DE)和/或精度提供预警的地理区域。

[来源：GB/T 38121-2023，定义 3.1.3]

3.4

预防措施 preventive action

根据预警信息并基于应急预案而采取的、宜在提前时间结束之前实施的临时性防护措施。

[来源：GB/T 38121-2023，定义 3.1.19]

3.5

点云数据 point cloud data

利用激光雷达或摄影测量技术获取的三维坐标点集合，用于输电线路及周围环境的精确建模和灾害评估。

3.6

风偏 wind-induced deviation

风力作用导致输电线路导线或杆塔发生偏移的现象，可能影响线路安全运行。

3.7

污闪 pollution flashover

绝缘子表面污染在潮湿环境下形成导电路径，导致电力设备闪络击穿并引发输电故障。

4 缩略语

CA：覆盖区域（coverage area）

DE：探测效率（detection efficiency）

GPU：加速并行计算（graphics processing unit）

TPU：张量处理单元（tensor processing unit）

5 总则

5.1 基本要求

5.1.1 多源数据融合与点云数据应用

5.1.1.1 通过激光扫描技术、无人机、卫星遥感等手段，定期获取输电线路及其周围环境的三维点云数据。

5.1.1.2 点云数据应进行去噪、过滤和精确配准，确保其空间精度。

5.1.1.3 结合气象数据、历史灾害数据和地理信息系统数据，利用数据融合技术进行多维度分析。

5.1.1.4 可通过机器学习和深度学习技术来优化灾害风险预测模型,提升灾害发生概率的预测准确性。

5.1.2 灾害风险评估与实时预警

5.1.2.1 在风偏、山火、台风等灾害预测中，使用气象数据（如风速、风向、气温、湿度）与地理环境数据，建立灾害风险评估模型。

5.1.2.2 在风偏和山火的监测中，应通过多维度数据（点云、气象、历史火灾数据等）实现精确的风险评估。

5.1.2.3 应通过实时监测的气象数据、点云数据等，评估当前环境对电力设施的影响。

5.1.2.4 如果监测数据超出设定的安全阈值，系统应自动发出预警，及时通知相关部门和人员采取应对措施。

5.1.2.5 预警信息应包含灾害的类型、发生位置、影响范围以及可能的风险等级。

5.1.3 应急响应与灾后恢复能力

5.1.3.1 系统应具备自动化的应急响应能力，一旦预警条件触发，能够自动启动灾害响应计划，调度现场维修队伍，协调供电恢复，保障应急措施的快速执行。

5.1.3.2 灾后恢复应包括系统自恢复能力和人工干预能力，保障受灾电力设施的修复和恢复。

5.1.3.3 灾后系统评估应通过点云数据和其他监测数据评估输电线路受损情况，评估恢复进度，并提出修复方案。

5.1.3.4 系统还应支持设备的安全检查、修复记录存档和后续追踪。

5.1.4 系统冗余设计与容错能力

5.1.4.1 系统的关键数据采集模块、数据存储模块、通信模块等应具备冗余设计。
5.1.4.2 宜采用多个传感器同时监测风速、风向等数据，并通过数据冗余技术进行对比分析，数据应保持准确性和完整性。
5.1.4.3 系统应能够自动检测到设备故障或异常，并通过备份方案自动切换至备用设备或通道。
5.1.4.4 系统部分故障的情况下，应仍能保持全系统的稳定运行。

5.1.5 智能化与自动化预警机制

5.1.5.1 通过机器学习算法训练灾害预测模型，系统应能够在每次灾害事件中不断优化预测精度。
5.1.5.2 系统应实现预警到响应的自动化，减少人工干预时间。
5.1.5.3 灾害发生时，系统应能够自动向相关人员发送预警通知，并启动相关的应急响应措施。

5.1.6 持续优化与技术创新

5.1.6.1 应定期对灾害预测模型进行更新，融入新的气象数据和灾害数据，并优化现有的算法。
5.1.6.2 随着新技术的出现（如更高精度的气象预测、改进的传感器等），系统应及时进行升级。
5.1.6.3 宜采用创新技术，例如结合无人机、卫星遥感、人工智能等手段，加强灾害预警和监测的智能化水平，不断提升系统应对复杂灾害场景的能力。

5.2 适用领域和场景

场景与应急响应包括但不限于以下内容：

a) 风偏影响评估与预警。根据气象数据与点云数据预测风偏对输电线路的影响，特别是在风速较大的地区。通过实时监控风速、风向、气象变化等因素，提前识别潜在的风偏风险。
b) 山火预警。在山火高风险区域，利用气象数据、历史火点数据及地理信息系统数据进行山火发生概率预测，提前发布预警，避免山火对输电线路造成的破坏。
c) 台风影响评估。台风灾害的预测通过实时监测台风路径和风力变化，并结合气象数据和历史灾害信息，为台风影响区域的输电系统提供精确的风险评估和应急响应方案。

5.3 基本原则

5.3.1 预防

5.3.1.1 通过精准的灾害风险预测和及时的预警措施，减少自然灾害的发生或减轻其对输电系统的影响。
5.3.1.2 在灾害发生前，系统应能够综合气象、环境、历史灾害等数据，准确预测灾害发生的风险，及时给出应对措施，并启动预警机制。

5.3.2 防、抗、救相结合

5.3.2.1 通过灾害监测系统，实时获取数据，及时预测并减少灾害发生的概率。
5.3.2.2 在灾害发生时，系统应具备强大的抗灾能力，通过调度系统的冗余设计和自动化恢复机制，最大限度地减少灾害对电网的影响。
5.3.2.3 灾害发生后，系统应能够迅速启动应急响应机制，通过应急处理方案、恢复方案等措施，电力系统应能尽快恢复。

5.3.3 数据共享与协同工作

5.3.3.1 系统应整合来自气象部门、环境监测站、遥感卫星、历史灾害数据等多个数据源的信息，为决策者提供全面的灾害风险分析，帮助做出科学、有效的决策。
5.3.3.2 预警系统应与各相关部门（如电力公司、气象局、应急管理部门等）进行数据共享，形成灾害应对的协同工作机制。

5.3.4 智能化与自动化

5.3.4.1 通过机器学习和深度学习算法优化灾害模型，提高系统的预测精度和响应速度。
5.3.4.2 自动化应急响应机制的引入，能够在灾害发生时迅速做出反应，减少人为操作的延误和失误。

5.3.5 持续优化与技术创新

5.3.5.1 所有预警系统应具备持续优化能力，结合新兴技术，定期更新灾害预测模型，并应用最新的数据处理技术（如深度学习、人工智能等）进一步提高系统的准确性与灵活性。
5.3.5.2 对于灾害类型的变化，系统应能够适应并及时调整预测方法和策略。

6 云预警系统架构

6.1 需求分析

6.1.1 灾害对输电系统的影响

6.1.1.1 自然灾害，如山火、台风、风偏、污闪等，可能对输电系统造成严重影响，导致设备故障、电力中断等问题。
6.1.1.2 山火可能会损坏输电线路和设备，尤其在林区高风险地区。
6.1.1.3 台风和风偏会导致输电线路的震荡、断裂或设备损坏，特别是对高风速地区的输电线路。
6.1.1.4 污闪则通常在潮湿环境下发生，严重影响电力设备的正常运行。

6.1.2 现有技术的局限性与需求

6.1.2.1 目前，许多输电系统依赖传统的灾害监测手段，存在响应迟缓、数据处理精度不足的问题。
6.1.2.2 在灾害发生前，缺乏全面的监测与预警能力。
6.1.2.3 为了提升输电系统的灾害防范能力，迫切需要集成点云数据、实时气象数据、历史灾害数据等多源数据，构建智能化、自动化的灾害预警系统。

6.1.3 技术与系统需求

6.1.3.1 实时数据采集与处理。能够从各类传感器和监测设备中实时获取气象数据、点云数据及环境监测数据。
6.1.3.2 精准的灾害风险评估。通过多维度数据分析，进行灾害发生概率和风险评估，预测灾害对输电线路的潜在影响。
6.1.3.3 高效的预警响应机制。一旦灾害风险达到预设阈值，系统应快速触发预警，并自动调度应急响应。

6.2 系统结构

6.2.1 系统总体架构

6.2.1.1 数据采集模块。负责实时采集点云数据、气象数据和环境监测数据等多源信息。
6.2.1.2 数据处理与分析模块。对采集的数据进行预处理、清洗，并通过数据融合技术进行分析和风险评估。
6.2.1.3 预警模型与算法模块。基于历史数据和实时监测数据设计灾害预警模型，并计算风险评估结果。
6.2.1.4 应急响应模块。在预警条件满足时，自动启动应急响应，调度资源并发布预警通知。
6.2.1.5 监控与可视化模块。实时显示灾害风险情况，提供数据可视化界面，支持决策者快速做出响应。

6.2.2 数据源接口

6.2.2.1 系统应整合来自不同来源的数据，包括但不限于气象数据、地理信息系统数据、历史灾害数据、点云数据、实时监控数据等。
6.2.2.2 了实现数据的高效集成，系统应设计开放的接口，并能够与其他电力系统、气象监测系统及应急管理平台无缝连接，形成信息共享和协同工作机制。

6.3 工作流程

6.3.1 数据采集与预处理

6.3.1.1 数据采集是系统的第一步，涉及点云数据、气象数据、环境监测数据的获取。
6.3.1.2 点云数据通过激光扫描、无人机和卫星遥感技术获取，并实时传输至数据处理中心进行预处理。
6.3.1.3 数据预处理包括去噪、归一化、数据补全等操作，确保数据质量和分析的准确性。

6.3.2 灾害风险评估

6.3.2.1 风偏分析。基于实时气象数据和历史风偏数据，分析风速、风向变化对输电线路的影响。
6.3.2.2 山火风险分析。结合历史火点数据和气象条件，预测山火发生的概率，并评估其对输电线路的潜在威胁。
6.3.2.3 台风影响评估。通过台风路径预测和风速监测，评估台风对电力设施的影响。
6.3.2.4 污闪风险分析。基于湿度、污染物浓度等数据，评估污闪发生的概率，并预测其对设备的潜在危害。

6.3.3 预警发布与响应机制

6.3.3.1 一旦灾害风险评估结果超出设定的阈值，系统将自动触发预警并发布通知。
6.3.3.2 预警信息将包括灾害类型、风险等级、影响范围等详细内容，并通过短信、邮件、APP 推送等方式及时通知相关部门和人员。
6.3.3.3 统将启动应急响应程序，调度应急资源，采取相应的灾后处理措施，并能尽快恢复稳定运行。

6.3.4 监控与反馈

6.3.4.1 系统需具备实时监控功能，实时跟踪灾害的发展进程。
6.3.4.2 当灾害风险变更或评估结果更新时，系统应自动更新预警信息，并将变化情况反馈给相关部门，应急响应方案应及时调整。

6.4 系统技术要求

6.4.1 精度与响应时间要求

6.4.1.1 系统的数据采集精度应达到毫米级，点云数据应能精确描述输电线路和周围环境的情况。
6.4.1.2 对于灾害风险评估和预警发布，系统响应时间不应超过 5 分钟，并能在灾害发生的初期及时预警，并启动应急响应。

6.4.2 系统稳定性与冗余设计

系统的关键组件（如数据处理、预警发布、应急响应等）应设计冗余机制，并在部分组件故障时，系统能够正常运行并继续提供服务。

6.4.3 数据安全与隐私保护

6.4.3.1 系统应严格遵守数据安全法规，采集和存储的数据不应泄露或被篡改。
6.4.3.2 数据传输过程中应加密，数据应具有完整性与保密性。

7 数据采集与处理

7.1 数据采集

7.1.1 数据采集范围

7.1.1.1 采集输电线路沿线的点云数据，包括杆塔、导线、周围植被、地形及其他环境信息。
7.1.1.2 结合遥感、激光雷达、无人机摄影测量等多种技术，实现多维度数据采集。
7.1.1.3 采集雷电、山火、台风、地质灾害、风偏、污闪等高风险区域的环境数据，建立长期监测机制。

7.1.2 传感器配置

7.1.2.1 应采用高精度三维激光扫描设备，空间分辨率应能满足预警分析需求。
7.1.2.2 在关键区域布设气象监测传感器，包括风速、风向、温湿度等，以支撑风偏、台风、山火、污闪等风险评估。
7.1.2.3 部署多光谱与红外成像设备，用于山火预警、植被水分含量监测。

7.1.3 采集评率与数据传输

7.1.3.1 应采用自动化巡检无人机，每周对输电线路进行一次例行巡检，高风险区域提高至每日或实时监测。
7.1.3.2 应通过 5G 或卫星通信技术，保证数据的高速、低延迟传输。

7.2 数据预处理

7.2.1 数据清洗

7.2.1.1 应采用标准分数、箱型图方法检测异常值，剔除异常数据点。
7.2.1.2 对于不完整数据，可使用线性插值、均值填充或随机森林回归填补。
7.2.1.3 对高度、密度、温度、湿度等数据进行归一化或标准化处理，以消除尺度影响。

7.2.2 数据配准

7.2.2.1 应采用迭代最近点算法算法进行多时相点云数据的高精度配准。
7.2.2.2 结合地理信息系统数据，实现点云数据与输电线路结构的精准对齐。

7.2.3 数据降噪

7.2.3.1 应采用自适应滤波算法对传感器数据进行信号增强，提高有效信息的提取精度。
7.2.3.2 对气象数据、地质监测数据进行时序分析，剔除异常波动。

7.3 分类与识别

7.3.1 点云数据分类

7.3.1.1 使用深度学习模型对点云数据进行自动分类，识别杆塔、导线、树木、建筑物等对象。
7.3.1.2 结合语义分割技术，标注输电线路周边地物类型。

7.3.2 火山风险数据提取

7.3.2.1 结合实时火点数据、气象数据、点云数据，提取山火特征信息。
7.3.2.2 应采用机器学习方法训练山火风险预测模型，提高识别准确度。

7.3.3 台风风险分析

7.3.3.1 基于台风历史数据、输电线路受损情况，构建台风影响预测模型。
7.3.3.2 结合风偏影响评估，预测台风可能造成的线路偏移情况。

7.3.4 雷电风险分析

7.3.4.1 应采用雷电定位系统进行雷电临近预警，确定雷电预警参数。
7.3.4.2 应结合雷电数据与输电线路状态数据，建立雷击风险评估模型。

7.3.5 地质灾害监测

7.3.5.1 应采用三维地形重构技术，分析输电线路沿线地质隐患。
7.3.5.2 应结合地质灾害预警模型，实时评估线路稳定性风险。

7.3.6 污闪风险评估

7.3.6.1 采集输电线路表面污秽程度、空气湿度、大气污染物浓度等数据。
7.3.6.2 应采用污闪分析模型评估不同环境因素对污闪风险的影响。

7.3.7 风偏影响分析

7.3.7.1 采集风速、风向、杆塔结构特性等数据，预测输电线路受风力影响程度。
7.3.7.2 应采用风偏仿真模型，模拟不同风速下杆塔和导线的偏移情况。

7.4 同步与校准

7.4.1 时间同步

7.4.1.1 应采用全球定位系统授时技术，实现各类监测设备数据的时间同步。

7.4.1.2 应通过卡尔曼滤波技术滤波技术修正数据时间偏差，多源数据融合应具有时效性。

7.4.2 传感器校准

7.4.2.1 对激光雷达、摄像机、惯性测量单元等设备应进行周期性校准，并保证数据精度。
7.4.2.2 应采用多传感器数据融合方法，提高灾害预警模型的精度和稳定性。

7.5 安全与储存

7.5.1 数据加密与访问控制

7.5.1.1 应采用高级加密 256 等加密算法，并保证数据传输安全。
7.5.1.2 设置分级访问权限，防止未经授权的数据访问。

7.5.2 数据储存与备份

7.5.2.1 应采用分布式存储系统，并保证数据高可用性和容灾能力。
7.5.2.2 设定定期数据备份机制，防止关键数据丢失。

8 模型构建与优化

8.1 杆塔建模

8.1.1 点云数据获取与预处理

8.1.1.1 应采用激光雷达、无人机摄影测量获取杆塔点云数据。
8.1.1.2 应通过迭代最近点算法算法进行点云数据配准，提高建模精度。
8.1.1.3 应利用深度学习模型对杆塔结构进行自动分类和识别。
8.1.1.4 应结合杆塔的历史运行数据、风偏影响数据，优化杆塔建模参数，保障模型适应不同环境条件。

8.1.2 杆塔结构特征提取

8.1.2.1 应采用图像分割技术从点云数据中提取杆塔主体、横担、基础等关键结构。
8.1.2.2 应结合有限元分析，模拟杆塔在不同荷载（风、雨、冰）下的力学响应。
8.1.2.3 应深度学习网络，对杆塔缺陷（腐蚀、裂纹、变形）进行自动检测。

8.1.3 杆塔稳固性评估

8.1.3.1 应结合风偏模拟模型，预测杆塔在强风作用下的倾斜角度和稳定性。
8.1.3.2 应采用雷电定位系统数据，分析杆塔遭受雷击的概率及其影响。
8.1.3.3 应结合地质灾害数据，评估杆塔基础可能面临的沉降或滑坡风险。

8.2 导线建模

8.2.1 导线三维建模

8.2.1.1 应采用激光点云数据构建高精度导线模型，并通过曲线拟合算法优化导线形态。
8.2.1.2 应结合风偏预测模型，模拟不同风速下导线的偏移量和振动特性。
8.2.1.3 应采用有限元分析法，计算导线受力状态，预测可能的断裂或松弛风险。

8.2.2 污闪影响建模

8.2.2.1 应采集导线表面污秽程度、空气湿度、大气污染物浓度等数据，构建污闪风险评估模型。
8.2.2.2 应采用污闪分析模型，评估污闪发生概率，并提出预防性清洗或更换方案。
8.2.2.3 应结合人工智能预测模型，分析历史污闪数据，优化污闪建模精度。

8.2.3 雷电影响建模

8.2.3.1 应采用雷电定位系统数据，分析输电线路遭受雷击的高风险区域。
8.2.3.2 应结合雷暴活动历史数据，建立雷电预警模型，预测可能的雷击时间和位置。
8.2.3.3 应采用雷电耐受性分析，优化导线材料和绝缘设计，提高抗雷电能力。

8.3 环境建模

8.3.1 地质灾害建模

8.3.1.1 应采用遥感影像、三维地形重构技术，建立输电线路沿线的地质灾害模型。
8.3.1.2 应结合地震、滑坡、泥石流历史数据，预测地质灾害可能影响的杆塔和导线范围。
8.3.1.3 应采用机器学习算法，构建地质灾害风险评估模型，提高预警准确性。

8.3.2 山火影响建模

8.3.2.1 应结合红外遥感、无人机监测，构建输电线路周围的山火风险区域模型。
8.3.2.2 应采用深度学习分析历史山火数据，预测山火发生的概率。
8.3.2.3 应结合风偏预测，模拟火焰传播路径，评估山火对输电线路的潜在威胁。

8.3.3 台风影响建模

8.3.3.1 应结合历史台风数据、气象模拟，构建台风路径预测模型。
8.3.3.2 应采用计算流体动力学模拟，分析台风对杆塔和导线的冲击力。
8.3.3.3 应结合风偏仿真模型，预测台风期间输电线路的受力情况，并制定加固措施。

8.4 模型优化

8.4.1 多源数据融合

8.4.1.1 应采用数据同化技术，融合气象、地质、点云、雷电、风偏等数据，提高模型预测精度。
8.4.1.2 应结合贝叶斯优化算法，动态调整模型参数，提高模型的泛化能力。
8.4.1.3 应采用时间序列分析，提升模型在灾害预测中的时效性。

8.4.2 机器学习优化

8.4.2.1 应采用深度神经网络、随机森林等算法，提高模型对复杂环境的适应性。
8.4.2.2 应结合迁移学习，将已有的雷电、风偏预测经验迁移到新建线路上，提高预测精度。
8.4.2.3 应采用超参数优化，优化模型的训练参数，提升分类与回归的准确率。

8.4.3 计算效率优化

8.4.3.1 应采用云计算与边缘计算架构，加速大规模点云数据处理。
8.4.3.2 应结合分布式计算，提高大规模风偏、雷电模拟仿真的计算效率。

8.4.3.3 应采用 GPU 加速并行计算，优化机器学习模型的训练速度。

8.5 模型验证

8.5.1 真实数据验证

8.5.1.1 应采用历史灾害案例（山火、台风、雷击等）对模型进行回测，评估预测准确性。
8.5.1.2 应结合现场巡检数据，验证模型输出结果与实际情况的匹配度。
8.5.1.3 应采用独立测试集评估模型的泛化能力，避免过拟合。

8.5.2 模拟实验验证

8.5.2.1 应采用风洞实验模拟不同风速下杆塔和导线的稳定性。
8.5.2.2 应结合雷击实验室数据，评估雷电模型的预测准确度。
8.5.2.3 应采用高温燃烧试验验证山火模型的火焰传播路径预测能力。

9 预警模型与算法

9.1 灾害预警模型

9.1.1 预警模型框架

9.1.1.1 应采用多层级预警体系，包括短时预警（0～6 h）、中期预警（6～24 h）、长期预警（24 h～7 天）。
9.1.1.2 应结合风偏、雷电、山火、地质灾害、台风、污闪等风险因素，构建融合性预警模型。
9.1.1.3 应采用人工智能+物理仿真联合建模，提高预警结果的可信度与可解释性。

9.1.2 预警模型类型

9.1.2.1 应使用时间序列分析，结合历史输电线路灾害事件数据进行趋势预测。
9.1.2.2 应采用计算流体动力学、有限元分析等方法，模拟台风、风偏等对杆塔和导线的影响。
9.1.2.3 应使用转换器模型、组合模型等模型，融合点云、气象、地质数据进行智能分析。

9.2 预警算法设计

9.2.1 风偏预警算法

9.2.1.1 应采用多源数据融合（气象数据、杆塔倾斜监测数据、历史风偏数据）进行风偏预测。
9.2.1.2 应使用风偏仿真模型，评估风速变化对导线偏移的影响，结合实测数据进行修正。
9.2.1.3 设定风偏预警阈值：

a）Ⅰ级预警（严重）。杆塔倾斜角度≥15°或导线偏移量≥2 m。
b）Ⅱ级预警（中度）。杆塔倾斜角度 10～15°或导线偏移量 1～2 m。
c）Ⅲ级预警（轻度）。杆塔倾斜角度 5～10°或导线偏移量 0.5～1 m。

9.2.2 雷电预警算法

9.2.2.1 应结合雷电定位系统与气象雷达数据，分析雷电发生的概率及影响范围。
9.2.2.2 应采用深度学习模型训练雷电预警系统，提高识别准确率。
9.2.2.3 设定雷电预警等级：

a）Ⅰ级预警。未来 1 h 内雷击概率＞80%，输电线路周边 5 km 内存在高能雷击活动。
b）Ⅱ级预警。未来 1～3 h 雷击概率 60～80%，5～10 km 范围内有雷击活动。
c）Ⅲ级预警。未来 3～6 h 雷击概率 40～60%，10～15 km 范围内有雷击活动。

9.2.3 山火预警算法

9.2.3.1 应结合红外遥感、无人机监测、历史山火数据，建立山火风险评估模型。
9.2.3.2 应采用长短时记忆网络+随机森林算法，分析气象条件对山火发生概率的影响。
9.2.3.3 设定山火预警阈值：
a）Ⅰ级预警。温度＞35 ℃，湿度＜20%，风速＞15 m/s，近 24 h 有过火点。
b）Ⅱ级预警。温度 30～35 ℃，湿度 20～30%，风速 10～15 m/s，存在潜在火点。
c）Ⅲ级预警。温度 25～30 ℃，湿度 30～40%，风速 5～10 m/s，区域内植被干燥。

9.2.4 地质灾害预警算法

9.2.4.1 应采用遥感影像+三维地形建模，分析滑坡、泥石流、沉降风险。
9.2.4.2 应结合历史地震、降雨量、土壤湿度等数据，构建地质灾害预测模型。
9.2.4.3 设定地质灾害预警等级：
a）Ⅰ级预警。近 48 小时内降雨量＞200 mm，土壤含水率＞70%，地表位移＞30 cm。
b）Ⅱ级预警。降雨量 100～200 mm，土壤含水率 50～70%，地表位移 10～30 cm。
c）Ⅲ级预警。降雨量 50～100 mm，土壤含水率 30～50%，地表位移 5～10 cm。

9.3 预警模型训练与优化

9.3.1 训练数据集

9.3.1.1 应采用多源数据（气象、雷电、点云、遥感）构建高质量训练数据集。
9.3.1.2 应采用数据增强技术，扩充训练样本，提高模型鲁棒性。

9.3.2 超参数优化

9.3.2.1 应采用贝叶斯优化，动态调整模型超参数，提高预警模型的泛化能力。
9.3.2.2 应结合网格搜索+随机搜索，优化神经网络结构。

9.4 预警精度评估

9.4.1 误报率与漏报率评估

9.4.1.1 计算真正率、假正率、假负率，优化模型阈值设定。
9.4.1.2 应采用 F1 分数衡量模型整体预测性能，预警应具有准确性。

9.4.2 现场验证

9.4.2.1 应采用历史灾害案例回测，评估预警系统的实际应用效果。
9.4.2.2 应结合无人机巡检与人工巡视数据，验证预警模型的有效性。

9.4.3 计算效率优化

9.4.3.1 应采用边缘计算+云计算架构，加速大规模数据处理，提高预警系统响应速度。
9.4.3.2 应结合分布式计算，优化灾害预警系统的计算效率。

10 预警系统运行与管理

10.1 预警系统架构设计

10.1.1 系统层级架构

10.1.1.1 应采用云-边-端协同架构，由数据采集层、数据处理层、模型计算层、预警决策层组成。
10.1.1.2 应结合分布式计算，优化大规模点云数据和灾害信息的处理效率。

10.1.2 预警子系统

10.1.2.1 数据采集子系统。集成激光雷达、遥感、无人机、雷电探测器、气象站等多源传感设备，支持自动化巡检。
10.1.2.2 数据处理与存储子系统。支持高效点云数据管理、深度学习数据清洗与标注。
10.1.2.3 预警分析子系统。采用深度学习、物理仿真、统计模型进行灾害分析与风险评估。
10.1.2.4 实时报警与应急管理子系统。提供多渠道预警信息发布（短信、APP、邮件、监控大屏）。

10.2 数据存储与管理

10.2.1 数据存储架构

10.2.1.1 应采用分布式数据库，支持海量点云数据、灾害监测数据的存储和高效检索。
10.2.1.2 应结合对象存储，管理历史影像数据和三维地理数据。
10.2.1.3 应使用区块链存证技术，确保预警数据的不可篡改性，提高数据可信度。

10.2.2 数据管理策略

10.2.2.1 应设定数据生命周期管理（短期存储、长期归档、备份），提升存储效率。
10.2.2.2 应采用数据清洗机制，定期去除冗余数据，保障数据存储空间优化。
10.2.2.3 应结合人工智能数据标注系统，提升点云数据的分类准确度，优化模型训练数据集。

10.3 实时预警与报警机制

10.3.1 预警级别划分

应采用多级预警系统：
a）Ⅰ级预警（红色）。灾害事件即将发生，影响极严重，必须立即采取措施。
b）Ⅱ级预警（橙色）。灾害风险较高，需密切关注并提前应对。
c）Ⅲ级预警（黄色）。存在潜在灾害风险，建议加强监控。
d）Ⅳ级预警（蓝色）。轻微风险，仅需常规巡检。

10.3.2 预警信息发布

10.3.2.1 应采用全球定位系统+可视化大屏，直观展示预警区域、风险级别和推荐处置措施。
10.3.2.2 应结合多渠道通知机制（短信、微信、APP、邮件），相关人员应在 5 分钟内接收预警信息。
10.3.2.3 对于Ⅰ级预警，预警系统需在 10 秒内触发应急响应机制，并通知电网调度中心。

10.3.3 自动化响应

10.3.3.1 应结合无人机巡检系统，在重大预警发生后，30 分钟内部署无人机进行现场复核。

10.3.3.2　应采用智能巡检机器人，执行高风险区域巡检任务，减少人工干预。
10.3.3.3　应接入数据采集与监控系统，在预警触发时自动调整输电线路负载，降低灾害影响。

10.4　应急响应与反馈机制

10.4.1　预警处置流程

10.4.1.1　应采用闭环管理模式，预警触发后需经历检测-确认-响应-复盘全过程。
10.4.1.2　应预警触发后，系统需自动生成应急处置建议报告，指导决策人员采取行动。
10.4.1.3　应设立应急响应中心，并在Ⅰ级预警发生时，电网调度和抢修团队 10 min 内响应。

10.4.2　事件跟踪与回溯

10.4.2.1　应采用区块链存证技术，记录所有预警数据及处置过程，确保责任可追溯。
10.4.2.2　应结合人工智能分析系统，自动生成灾害报告，提供预警准确性评估。
10.4.2.3　应设定预警复盘机制，对误报、漏报情况进行分析，并优化预警算法。

10.5　预警系统安全性

10.5.1　网络安全防护

10.5.1.1　应采用零信任架构，确保不同用户的权限隔离。
10.5.1.2　应部署分布式拒绝服务防护、入侵检测系统，保障预警系统的网络安全。
10.5.1.3　应采用安全套接字层或传输层安全协议加密，保证数据在传输过程中不被篡改。

10.5.2　数据安全管理

10.5.2.1　应采用高级加密 256 位密钥加密，对敏感数据（如灾害预测数据、电网状态数据）进行加密存储。
10.5.2.2　应设定多重身份验证，防止未经授权的数据访问。
10.5.2.3　应采用数据脱敏技术，保护用户隐私，防止敏感信息泄露。

10.6　预警效果优化

10.6.1　预警准确性优化

10.6.1.1　应采用混淆矩阵分析，衡量预警系统的误报率和漏报率。
10.6.1.2　应结合 F1 分数、受试者工作特征曲线，优化预警模型的阈值设置。

10.6.2　系统运行效率优化

10.6.2.1　应设定预警响应时间指标：

a）Ⅰ级预警。10 s 内触发应急机制。
b）Ⅱ级预警。5 min 内完成通知。
c）Ⅲ级预警。15 min 内完成通知。

10.6.2.2　应采用分布式日志分析系统，实时监测系统运行状态。
10.6.2.3　应设定预警系统维护周期，并定期升级算法、优化数据库结构。

11　预警效果评估与优化

11.1 预警准确性与实时性评估

11.1.1 预警准确性评估

11.1.1.1 应采用混淆矩阵计算真正率、假正率、假负率，衡量预警系统的准确性。

11.1.1.2 应结合 F1 分数、受试者工作特征曲线，评估预警模型在不同阈值下的分类性能。

11.1.1.3 应采用历史案例回测（如山火、台风、雷电、风偏等灾害），对比预警系统的预测结果与实际灾害发生情况，计算误报率 和漏报率。

11.1.1.4 应设定预警准确性目标：

a）Ⅰ级预警（高风险）准确率≥90%。

b）Ⅱ级预警（中度风险）准确率≥85%。

c）Ⅲ级预警（低度风险）准确率≥80%。

11.1.2 预警实时性评估

11.1.2.1 应计算预警系统平均响应时间：

a）Ⅰ级预警。≤10 s。

b）Ⅱ级预警。≤5 min。

c）Ⅲ级预警。≤15 min。

11.1.2.2 应采用日志分析系统，监控预警触发、处理、反馈的时间延迟。

11.1.2.3 应结合无人机巡检与人工巡视数据，验证实时预警信息的有效性。

11.2 应急响应流程评估

11.2.1 事件处置流程评估

11.2.1.1 应采用闭环管理模式，跟踪从预警触发到响应完成的全过程，处置流程应闭环。

11.2.1.2 应设定应急响应评估指标：

a）事件检测到响应启动时间≤5 mim。

b）预警通知传达率≥98%。

c）现场巡查完成率≥95%。

11.2.1.3 结合区块链存证技术，记录事件处置的详细过程，提高可追溯性。

11.2.2 预警信息反馈机制

11.2.2.1 应设立预警反馈系统，支持用户反馈误报、漏报信息，用于优化模型。

11.2.2.2 应结合人工智能分析，对预警响应过程进行自动化回顾，优化应急处理流程。

11.2.2.3 应采用专家系统，对预警处理结果进行综合评估，优化应急策略。

11.3 误报与漏报分析

11.3.1 误报分析

11.3.1.1 应采用因果分析，解析误报的成因，包括但不限于以下内容：

a）传感器误差。

b）环境干扰。

c）算法偏差。

11.3.1.2 应结合自适应阈值优化，降低误报率：

a）动态调整预警阈值，基于贝叶斯优化调整判别标准。

b）多模态数据融合，结合点云、红外、气象、雷电等数据进行综合判定，减少误报。

11.3.2 漏报分析

11.3.2.1 应采用回归分析，评估系统在历史灾害数据中的漏报情况，找出薄弱环节。

11.3.2.2 应结合强化学习，动态优化预警策略，降低漏报率。

11.3.2.3 应设定最大允许漏报率：

a）Ⅰ级预警≤5%。

b）Ⅱ级预警≤10%。

c）Ⅲ级预警≤15%。

11.4 预警系统优化

11.4.1 预警算法优化

11.4.1.1 应采用迁移学习，结合不同地区输电线路数据，提高模型适应性。

11.4.1.2 应结合图神经网络+时序模型，优化风偏、雷电、山火等预警的时空建模能力。

11.4.1.3 应采用自适应模型更新：

a）应按季度更新预警模型，模型应随环境变化优化。

b）对高误报区域进行局部微调，提高精度。

11.4.2 计算效率优化

11.4.2.1 应采用云计算+边缘计算架构，提高模型推理速度。

11.4.2.2 应结合分布式计算，优化大规模点云数据的并行处理能力。

11.4.2.3 应采用 GPU/TPU 加速，提高深度学习推理效率，并保持预警系统低延迟。

11.5 预警系统评估与升级

11.5.1 定期评估机制

11.5.1.1 应设定季度评估机制，每三个月对预警系统进行全面测试与调整。

11.5.1.2 应采用交叉验证，新算法优化后应具有稳定性。

11.5.1.3 应结合专家评审机制，邀请行业专家审核预警系统优化建议。

11.5.2 预警系统升级

11.5.2.1 应设立版本管理机制，算法更新后应具有兼容性和稳定性。

11.5.2.2 应采用灰度发布，在部分线路试点优化版预警模型，保证无重大误报后再全网推广。

11.5.2.3 应结合智能运维，实现自动故障检测、性能监控、异常预警，提高系统自愈能力。

12 系统测试与验收

12.1 系统功能测试

12.1.1 点云数据、气象数据、遥感数据等多源信息应具有完整性、准确性和实时性。

12.1.2 应验证数据去噪、分类、同步和配准等功能，数据格式应能标准化并支持后续分析。

12.1.3 应通过模拟山火、台风、地质灾害、风偏和污闪等场景，评估系统风险预测的准确性和稳定性。
12.1.4 应评估系统在不同灾害情境下的预警触发速度、信息推送效率及误报、漏报情况。
12.1.5 应检查数据可视化界面、预警信息展示和用户操作流程的便捷性与准确性。
12.1.6 应评估系统在数据异常、网络波动等情况下的稳定性、安全性及访问权限管理。

12.2 性能评估与验收

12.2.1 实时性

实时性要求如下：
a）数据采集到风险计算的全流程时延应≤5 s。
b）预警响应时间应≤3 s。

12.2.2 准确性与可靠性

准确性与可靠性要求如下：
a）误报率≤5%，漏报率≤2%。
b）历史灾害数据对比验证：预警模型的预测准确率≥95%。

12.2.3 系统稳定性

系统稳定性如下：
a）连续运行＞30 天，无崩溃或关键功能失效。
b）系统正常运行时间≥99.5%。

12.2.4 数据存储与备份

数据储存与备份要求如下：
a）应采用冗余存储，保障历史数据可追溯。
b）数据损坏恢复时间应≤1 h。

12.2.5 环境适应性

环境适应性要求如下：
a）系统在不同气象条件（如高温、潮湿）和恶劣网络环境下均能稳定运行。
b）适用于远程站点部署，可在低带宽网络（≤1 Mbps） 下正常使用。

12.3 测试结果报告

12.3.1 应记录测试设备配置、数据来源、测试时间及团队信息，测试条件应清晰可追溯。
12.3.2 应详细列出测试项目、测试方法、预期结果与实际测试数据，测试覆盖应全面。
12.3.3 统计并分析系统响应时间、误报漏报率、稳定性等关键指标，评估系统性能。
12.3.4 归纳测试中发现的系统缺陷，并提出优化改进方案，系统应持续优化。
12.3.5 依据测试结果判定系统是否符合标准，并决定是否进入正式运行阶段。

12.4 系统验收

12.4.1 由开发团队进行自测，修复初步问题，系统功能和性能应达到设计要求。

12.4.2　应在接近真实环境的条件下，模拟山火、台风、地质灾害、风偏等场景，评估系统的预警准确性和反应速度。
12.4.3　应邀请独立机构或专家进行审核，验证系统的可靠性、准确性及可操作性。
12.4.4　应在试点输电线路进行小范围试运行，收集运维人员反馈并优化系统。
12.4.5　应通过最终验收报告审核，确认系统符合标准后批准投入正式运行。

13　安全性与保障措施

13.1　系统安全性

13.1.1　数据安全

13.1.1.1　应采用分布式存储方式，点云数据、遥感影像、风偏预测、污闪分析等关键数据应具有完整性和可追溯性。
13.1.1.2　应采用数据加密传输保障数据在传输过程中的安全性，防止未经授权的访问或篡改。
13.1.1.3　应设置数据访问权限分级，仅允许不同级别的用户访问其权限范围内的数据，并保证系统数据安全可控。

13.1.2　网络安全

13.1.2.1　应采用虚拟专用网络加密通道或安全套接字层或传输层安全协议进行远程访问，防止数据泄露和未授权的远程控制。
13.1.2.2　应结合入侵检测系统和防火墙，实时监测并阻止恶意攻击。
13.1.2.3　系统应具备日志审计机制，详细记录用户访问、数据修改、系统异常等情况，安全事件应可追溯。

13.1.3　物理安全

13.1.3.1　关键服务器和数据存储设备应存放于具备防火措施的机房，机房的防火设计应符合 DL/T 5630-2021 中 3.5.7 条的要求。
13.1.3.2　机房应具备防潮措施，确保环境湿度符合设备运行要求，并采取防水、防渗漏设计，设计符合 DL/T 5630-2021 中 3.9.9 条的规定。
13.1.3.3　机房应配备完善的防雷系统，包括避雷针、等电位连接和浪涌保护装置，并应符合 DL/T 5630-2021 中 4.5.4、4.5.5、4.5.7 的要求。
13.1.3.4　机房应配备不间断电源和备用电力系统，灾害发生时系统应能正常运行至少 48 h。
13.1.3.5　应采用远程监控及报警系统 监测机房环境，如温湿度异常、设备故障、非法入侵等情况，并可自动通知运维人员。

13.2　冗余设计与容错机制

13.2.1　系统冗余

13.2.1.1　关键服务器应采用双机热备或云端备份方式，保障单点故障不会导致系统瘫痪。
13.2.1.2　关键数据（如风偏预测、山火预警、输电线路点云数据）应在多个存储节点上实时备份，并至少保留 90 天历史记录。
13.2.1.3　在高风险区域（如风偏影响较大地区），应设置双通道数据传输，防止单一路径故障影响数

据传输。

13.2.2 算法与模型容错

13.2.2.1 预警模型（如台风预警、污闪分析）需具备异常值检测机制，可自动剔除错误数据，防止误报。

13.2.2.2 应采用机器学习模型自适应优化，定期基于历史数据调整算法参数，提高预测准确性。

13.2.2.3 当核心算法或数据源出现异常时，系统应自动回滚至上一个可用版本，业务不应中断。

13.2.3 故障恢复与应急切换

13.2.3.1 在发生系统故障时，应支持自动故障转移，使备用系统应在 10 s 内接管任务。

13.2.3.2 预警系统应具备断网续传机制,断网期间数据不应丢失,并在恢复后自动上传未提交的数据。

13.2.3.3 发生严重系统故障时，应能在 30 min 内手动切换至备用系统，并恢复全部核心功能。

13.3 灾后评估与修复方案

13.3.1 灾害后系统状态评估

13.3.1.1 发生山火、台风、地震等灾害后，应第一时间检查输电线路预警系统的数据完整性和硬件运行状态。

13.3.1.2 应采用风偏影响评估方法，评估风偏对输电线路和通信设备的影响，并确定是否需调整传感器部署。

13.3.1.3 应结合污闪分析系统 评估绝缘子是否受污染影响，并判断是否需要进行清洗或更换。

13.3.2 数据恢复机制

13.3.2.1 若灾害导致数据损坏，应使用自动数据校验与恢复机制，利用冗余存储的数据进行修复。

13.3.2.2 应采用地质灾害多源监测数据分析技术恢复的准确性。

13.3.2.3 关键预警数据（如风偏预测结果）应优先恢复，并在 1 h 内完成恢复后重新发布预警信息。

13.3.3 设备检测与维修

13.3.3.1 发生灾害后，应立即对输电线路监测设备、通信链路 进行全面检测，必要时进行更换或维修。

13.3.3.2 当机房环境受到污染或损坏时，应优先恢复 UPS 电源、通信链路、数据库存储，保障系统可恢复运行。

13.4 应急响应与安全演练

13.4.1 灾害应急响应流程

13.4.1.1 发现系统异常后，应在 5 min 内 启动应急响应流程，并通知相关运维人员和管理部门。

13.4.1.2 重大安全事件（如地震影响供电系统、数据中心受损）需立即报告至电网调度中心，并启动应急预案。

13.4.1.3 应急方案应涵盖远程应急处置、现场抢修、灾后评估等环节，系统应快速恢复。

13.4.2 应急演练与培训

13.4.2.1　每季度进行应模拟灾害应急演练，涵盖 风偏影响、山火预警系统失效、机房故障 等典型场景组织运维团队应进行安全培训，人员掌握灾害响应流程和系统恢复方法。

13.4.2.2　应采用人工智能仿真技术进行应急响应测试，优化预警算法，提高系统自动化应对能力。

参 考 文 献

[1] GB/T 38121-2023 雷电防护 雷暴预警系统