



团 体 标 准

T/CES XXXX—XXXX

输电线路机巡视角图像小目标缺陷检测与 识别技术规范

Technical specification for small target defect detection and recognition in
transmission line inspection angle Images

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电工技术协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 图像采集	1
5 图像标注	3
6 样本库建设	6
7 算法设计	8
8 生产环境算法测试	12
9 算法上线	15
10 算法日常运维	16
附录 A（资料性） 常见缺陷及分级	18

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。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会带电作业与智能运检工作组归口。

本文件起草单位：贵州电网有限责任公司运行分公司、合肥中科类脑智能技术有限公司、南方电网人工智能科技有限公司、新疆中科类脑智算科技有限公司。

本文件主要起草人：蒲阳、高一峰、何茨、艾坤。

输电线路机巡视角图像小目标缺陷检测与识别技术规范

1 范围

本文件规定了输电线路机巡视角图像小目标缺陷检测与识别的图像采集、图像标注、样本库建设、算法设计、生产环境算法测试、算法上线和算法日常运维。

本文件适用于 35 kV 及以上输电线路无人机、巡检机器人可见光与红外图像采集、小目标缺陷识别算法的研发、测试、部署和运维相关工作。

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。

GB/T 2900.51 电工术语 架空线路

DL/T 664 带电设备红外诊断应用规范

DL/T 2691 电网设备缺陷智能识别技术导则

3 术语和定义

GB/T 2900.51、DL/T 2691 界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

小目标 small target

在输电线路机巡图像中，像素占比不超过图像总像素的 5%，且实际物理尺寸小于 5 cm×5 cm 的设备部件或缺陷区域。

3.2

多模态图像 multimodal image

针对同一检测对象，同步采集的可见光图像与红外图像的组合，用于互补提取缺陷外观特征与温度特征。

4 图像采集

4.1 可见光图像采集

4.1.1 设备要求

4.1.1.1 采集设备应满足图像数据精度要求，核心参数如下：

- 无人机：摄像头分辨率不低于 4K，帧率不低于 30 fps，支持防抖功能，续航时间不小于 30 min，具备 GPS/北斗双模定位，定位精度不超过 1 m；
- 手持终端：像素不低于 5000 万，支持（5~10）倍光学变焦，续航时间不小于 6 h，适配户外强光拍摄场景；
- 巡检机器人：配置 4K 可见光摄像头，传输速率不低于 10 Mbps，具备自主导航避障功能。

4.1.1.2 采集设备应按周期校准，确保参数稳定性，校准记录留存归档。

4.1.2 采集操作要求

4.1.2.1 采集时间宜选择上午 9:00~11:30、下午 14:30~17:00，避免逆光、强光直射和弱光环境。逆光拍摄时应调整拍摄角度，图像应无过曝、欠曝现象，目标对象应清晰可辨。

4.1.2.2 拍摄杆塔时宜采用垂直拍摄和侧方拍摄结合的方式，垂直拍摄用于呈现杆塔整体形态，侧方拍摄用于呈现杆塔侧面部件。拍摄绝缘子、金具等小型部件时，宜正面拍摄，拍摄角度与目标对象的夹角不小于 60°。

4.1.2.3 拍摄杆塔整体时，宜距离杆塔底部（5~10）m；拍摄绝缘子串、金具等部件时，宜距离目标对象（1~3）m，部件占据图像的 30%~70%。

4.1.2.4 单基杆塔应实现全角度覆盖，包括杆塔顶部、中部、底部。绝缘子串应拍摄每一片绝缘子，金具应拍摄所有连接部位，导地线应拍摄导线接头、地线支架等关键部位。

4.1.2.5 35 kV~110 kV 输电线路应每季度巡检采集一次，220 kV~500 kV 输电线路应每月巡检采集一次，特高压输电线路应每半月巡检采集一次。暴雨、台风、暴雪等恶劣天气过后，应增加采集频次，对受影响区域的输电线路进行全面采集，排查缺陷隐患。采集过程中，操作人员应遵守无人机飞行安全规范，不应在禁飞区域飞行，飞行高度不超过 120 m，避免与输电线路碰撞。

4.1.3 数据格式与存储要求

4.1.3.1 图像格式应支持 JPG、PNG、TIF 三种，优先选用 JPG 格式。原始图像应无压缩、无修改，图像分辨率不低于 4K，图像色彩真实，准确呈现部件的外观和缺陷特征。

4.1.3.2 元数据要求必录字段应包括：

- a) 采集时间：精确到秒，格式为“YYYY-MM-DD HH:MM:SS”；
- b) 经纬度：精确到小数点后 6 位；
- c) 线路名称；
- d) 杆塔号；
- e) 采集人员姓名；
- f) 采集设备型号；
- g) 采集天气情况。

4.1.3.3 元数据应与图像文件一一关联，嵌入图像文件的 EXIF 信息中，便于后续检索和追溯。

4.1.3.4 存储方式应采用本地临时存储与云端加密存储结合。采集现场通过加密移动硬盘进行本地临时存储，采集完成后 24 h 内，将图像数据和元数据加密传输至专用云端服务器。云端服务器宜采用分布式存储架构，支持扩容。

4.1.3.5 图像数据存储期限宜不低于 5 年，到期后应进行归档或销毁，销毁过程应留存记录，确保可追溯。

4.2 红外图像采集

4.2.1 采集设备

4.2.1.1 红外热像仪应满足温度测量精度要求，核心参数如下：

- a) 测温范围适配输电线路部件正常运行温度与缺陷发热温度，测温误差符合 DL/T 664 要求；
- b) 空间分辨率不低于 640×480 像素，帧频不低于 9 Hz；
- c) 具备温度自动校正功能，与无人机/巡检机器人配套工作稳定。

4.2.1.2 设备采集前应采用标准黑体炉校准，校准温度范围 - 20 °C~200 °C，误差不超过 ±1 °C；每季度应全面校准；每年应送专业机构检定，校准记录与检定报告留存归档。

4.2.2 采集操作要求

4.2.2.1 发射率应适配输电线路金属部件和绝缘子的发射率特性，设置为 0.9。背景温度校正采用现场环境温度。测温距离应根据目标对象大小调整：

- a) 拍摄绝缘子、金具等小型部件时，测温距离为（1~3）m；
- b) 拍摄杆塔、导地线等大型部件时，测温距离为（5~10）m。

4.2.2.2 红外图像应与可见光图像配准，同一缺陷区域同步采集双模态图像，红外图像中的缺陷区域与可见光图像中的缺陷区域一一对应。

4.2.2.3 采集过程中应避免大雾、大雨、强风、沙尘等恶劣天气。采集环境温度范围宜为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不超过 85%，无强电磁干扰，避免电磁干扰导致温度数据异常。拍摄角度应与可见光图像保持一致，确保目标对象在红外图像中完整呈现，温度分布清晰可见，缺陷区域的温度异常能够明显区别于正常区域。

4.2.2.4 采集过程中，操作人员应实时观察红外热像仪的温度显示，发现温度异常区域，应增加采集频次，多角度拍摄该区域，记录异常温度值和采集时间，同步采集对应的可见光图像，标注异常区域位置。

4.2.3 数据格式与存储

4.2.3.1 红外图像格式应采用 FLIR 专用格式（.irf）和通用格式（.png）双格式存储，专用格式用于保存原始热图数据和温度矩阵，通用格式用于可视化展示。温度矩阵数据应以 Excel 格式同步存储，包含图像中每个像素的温度值、坐标信息、采集时间、设备参数等，便于后续算法处理和温度分析。

4.2.3.2 红外图像中异常温度区域应进行初步标记，标记方式采用边界框标注，标注异常区域的位置和大致温度范围。标记信息应嵌入红外图像文件中，与元数据关联。

4.2.3.3 红外图像应与对应可见光图像、杆塔信息、采集信息一一关联，关联方式采用统一的文件命名规则，文件命名格式为“线路名称—杆塔号—采集时间—模态类型—图像序号”，例如“220 kV-东金线-T123-20240520103000-红外-001.irf”。

4.2.3.4 存储方式应与可见光图像一致，采用本地临时存储与云端加密存储结合，存储安全要求和存储期限应符合本文件 4.1.3.4 条和 4.1.3.5 条的规定，温度矩阵数据应与红外图像同步存储、归档。

5 图像标注

5.1 一般规定

5.1.1 标注对象

5.1.1.1 标注对象分为设备部件级和缺陷级，两者应同步标注。设备部件级标注应涵盖输电线路 8 大类核心部件，包括杆塔、绝缘子、金具、导地线、基础、附属设施、通道环境和接地装置，其中绝缘子应区分瓷绝缘子、玻璃绝缘子、复合绝缘子，金具应区分大尺寸金具和小尺寸金具，导地线应区分导线和地线。每个部件应精准标注其位置范围，不遗漏、不重复。

5.1.1.2 缺陷级标注应涵盖 91 类常见输电线路缺陷，输电线路 91 类常见缺陷明细及分级见附录 A。每个缺陷应精准定位到具体部件，明确缺陷类别和严重程度。

5.1.2 标注精度

5.1.2.1 针对设备部件和缺陷区域的边界框标注，框选偏差应不超过 5 像素，缺陷区域应完全被边界框覆盖，不应出现漏框、多框现象；边界框应紧贴目标对象边缘，不应超出目标范围或未覆盖完整目标。

5.1.2.2 针对部分复杂缺陷，应标注缺陷核心位置的关键点，关键点标记误差不超过 3 像素；关键点数量应根据缺陷类型确定，准确反映缺陷的形态和位置。

5.1.2.3 针对需要精准分割的缺陷区域，语义分割准确率应不低于 95%。分割区域应与真实缺陷区域吻合，不应出现分割不全、分割错误的现象。背景区域与缺陷区域、设备部件区域应清晰区分，确保算法能够准确提取缺陷特征。

5.1.2.4 同一标注人员对同类型缺陷的标注方式应保持一致，不同标注人员对同类型缺陷的标注一致性应不低于 98%。

5.1.3 标注质量

5.1.3.1 误标率、漏标率应不超过 1%。

注：误标指将正常区域标注为缺陷区域、将 A 类缺陷标注为 B 类缺陷；漏标指未标注图像中存在的缺陷区域。

5.1.3.2 每幅图像中的所有设备部件和缺陷区域均应标注，不应遗漏任何部件和缺陷。对于模糊不清、无法确定是否为缺陷的区域，应标注为“疑似缺陷”，并在标注说明中注明，由专业人员复核确认。

5.1.3.3 标注标签应选用标签库中的标准标签，不应自定义标签。边界框、关键点、分割区域的标注方式应统一。

5.2 标注操作要求

5.2.1 标注工具

5.2.1.1 标注工具应具备以下功能：

- a) 支持边界框标注、关键点标注和语义分割标注；
- b) 支持导入可见光、红外双模态图像；
- c) 支持标签库管理、标注记录留存、多人协同标注权限管理。

5.2.1.2 标签库导入标注工具后，应按场景、部件、缺陷分类排序。预标置信度阈值宜设置为 0.5，预标生成的标注框和标签应自动显示在图像上，支持标注人员直接在预标基础上进行修正。

5.2.1.3 标注工具应开启自动保存，每 5 min 自动保存一次标注结果，防止标注数据丢失；同时记录每一次标注、修改的操作。

5.2.2 标注流程

5.2.2.1 标注流程包括一级标注、二级复核和三级验收。

5.2.2.2 一级标注应包括 AI 预标和人工初步修正二级复核：

- a) 标注人员接收标注任务后，导入待标注图像和标签库，开启 AI 预标功能，由预标模型生成初始标注框和标签；
- b) 标注人员逐幅查看图像，对预标结果进行初步修正，删除误标标注框，补充漏标标注框，修正标签错误，调整边界框位置，确保初步标注结果的准确性；
- c) 一级标注完成后，提交至二级复核环节。

5.2.2.3 二级复核应由具备 3 年及以上输电线路缺陷标注经验、熟悉各类缺陷特征和判定标准专业标注人员全量复核：

- a) 专业标注人员接收一级标注提交的结果，进行全量复核，逐幅图像检查标注准确性、完整性和规范性，重点核查疑似缺陷区域和易误标、漏标的缺陷类别；
- b) 对复核中发现的问题，及时修正并记录；
- c) 二级复核合格，提交至三级验收环节；复核不合格，退回一级标注环节重新标注。

5.2.2.4 三级验收应由算法研发人员抽检验收：

- a) 算法研发人员接收二级复核提交的结果，按不小于 5% 的比例进行随机抽检验收，抽检样本涵盖所有场景、所有缺陷类别，重点核查标注精度和标注一致性；
 - b) 若抽检合格，确认标注质量达标，标注数据归档至样本库；若抽检不合格，退回二级复核环节重新复核，直至抽检合格。
- 5.2.2.5 整个标注流程应形成闭环，每个环节的完成时间、责任人、验收结果均应留存记录，便于后续追溯。

5.2.3 标注记录

标注记录应全面、详细，每幅图像的标注记录应至少包括：

- a) 图像 ID；
 - b) 文件名称；
 - c) 线路名称、杆塔号、采集时间；
 - d) 标注人姓名；
 - e) 一级标注完成时间、复核人姓名；
 - f) 二级复核完成时间、验收人姓名；
 - g) 三级验收完成时间、标注结果；
 - h) 修改记录；
 - i) 验收意见。
- 5.2.3.1 标注记录应与标注结果文件一一关联，便于后续质量核查和数据追溯。
- 5.2.3.2 标注记录应与标注结果文件同步存储、同步归档，存储期限与图像数据一致，到期后进行归档或销毁。
- 5.2.3.3 标注过程中产生的修改记录应完整留存，不应删除、篡改。

5.3 标注结果文件要求

5.3.1 文件格式

5.3.1.1 标注结果文件应采用 COCO 格式、VOC 格式、JSON 格式三种标准格式，三种格式同步输出，兼容主流算法训练框架。COCO 格式用于目标检测和语义分割标注结果的存储，包含图像信息、标注信息、类别信息等；VOC 格式用于目标检测标注结果的存储，采用 XML 文件格式，每幅图像对应一个 XML 标注文件；JSON 格式用于关键点标注和缺陷等级标注结果的存储，便于数据解析和处理。

5.3.1.2 标注结果文件应与对应图像文件一一对应，文件命名格式与图像文件一致，仅在后缀名前添加标注格式标识，例如“220 kV-东金线-T123-20240520103000-可见光-001_coco.json”。

5.3.1.3 标注结果文件应按场景、采集时间分类存储，建立清晰的文件夹目录结构，便于检索和管理。

5.3.2 字段定义

5.3.2.1 无论哪种标注格式，标注结果文件均应包含以下必选字段：

- a) 图像 ID：唯一标识，格式为“线路编码-杆塔号-图像序号”；
- b) 标注类别：采用标签库中的标准标签和编码；
- c) 坐标/区域：边界框坐标采用左上角 x、左上角 y、宽度、高度的格式，关键点坐标采用 x、y 坐标对的格式，语义分割区域采用像素坐标集合的格式；
- d) 缺陷等级：分为一般缺陷、严重缺陷和危急缺陷，分别用“1、2、3”表示；
- e) 置信度：标注置信度，人工标注为 1.0，AI 预标修正后根据修正程度调整为 0.8~1.0。

5.3.2.2 根据标注需求，可添加以下可选字段：

- a) 标注说明：用于说明疑似缺陷区域、标注难点等信息；
- b) 缺陷严重程度描述：简要描述缺陷的严重程度和影响；
- c) 拍摄备注：关联图像采集时的特殊情况，如光照异常、设备故障等；
- d) 标注人员联系方式。

5.3.2.3 所有字段的命名应规范统一，字段值准确、完整，不应出现空值或错误值。

5.3.3 版本管理

5.3.3.1 标注结果版本号采用“主版本号.次版本号.修订号”的格式，主版本号应与算法版本号一致，次版本号对应标注批次，修订号对应修改次数，例如“2.01.00”代表算法 V2 版本、第一批次标注、未修改的标注结果版本。标注结果修改记录应同步更新，确保版本号与标注结果一致。

5.3.3.2 当标注结果修改后出现质量问题，需回滚至之前的正确版本时，应由标注负责人提交版本回滚申请，注明回滚原因、回滚前版本号、回滚后版本号。经质量验收人员确认后，执行版本回滚操作。版本回滚后，应对回滚后的标注结果重新进行抽检，确保回滚后的标注质量达标。

5.3.3.3 版本更新记录应详细记录版本号、更新时间、更新内容、更新人、验收人等信息，与标注结果文件同步存储，便于后续版本追溯和管理。

6 样本库建设

6.1 整体规划

6.1.1 样本库宜采用“本地+云端”双库架构。本地样本库部署在算法训练服务器上，用于算法训练和调试，存储容量不小于 20 TB，采用 SSD 存储；云端样本库部署在专用云端服务器上，用于样本数据的长期存储、备份和共享，采用分布式存储架构，存储容量不小于 100 TB，支持扩容。本地样本库与云端样本库应实时同步，确保数据一致性。

6.1.2 样本库应按场景、模态、用途分类存储，建立清晰的文件夹目录结构，便于数据检索、增删改查和管理。

6.1.3 样本库应具备以下功能：

- a) 数据检索：支持按线路名称、杆塔号、采集时间、缺陷类别、标注版本等多条件检索；
- b) 增删改查：支持样本数据的批量导入、导出、删除和修改，修改后自动记录版本信息；
- c) 版本管理：支持样本数据的版本控制、回滚和更新记录查询；
- d) 权限控制：按岗位分配不同的操作权限。

6.1.4 云端样本库宜采用异地备份机制，每天进行一次全量备份，每小时进行一次增量备份，备份数据存储期限不小于 1 年；本地样本库应每周进行一次全量备份，备份数据存储专用备份硬盘上，防止本地服务器故障导致数据丢失。

6.2 样本库分类

6.2.1 按场景分类

样本库按输电线路 8 大类场景分为 8 个子样本库，每个子样本库按子部件/子缺陷进一步细分，形成层级化的分类结构：

- a) 杆塔类样本库：涵盖直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔等子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储杆塔相关的可见光和红外样本数据及标注结果；
- b) 绝缘子类样本库：涵盖瓷绝缘子、玻璃绝缘子、复合绝缘子等子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储绝缘子相关的样本数据及标注结果，重点存储双模态样本数据；

- c) 金具类样本库：涵盖大尺寸金具和小尺寸金具子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储金具相关的样本数据及标注结果，重点补充小尺寸金具的样本数据；
- d) 导地线类样本库：涵盖导线、地线等子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储导地线相关的样本数据及标注结果，红外样本重点存储发热类缺陷数据；
- e) 基础类样本库：涵盖杆塔基础、拉线基础等子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储基础相关的样本数据及标注结果，重点存储户外复杂环境下的样本数据；
- f) 附属设施类样本库：涵盖杆塔附属设施、线路附属设施子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储附属设施相关的样本数据及标注结果；
- g) 通道环境类样本库：涵盖树障、违章建筑、施工机械、异物悬挂等子类别，每个子类别按严重程度细分，存储通道环境相关的样本数据及标注结果，重点存储防外破相关的样本数据；
- h) 接地装置类样本库：涵盖接地体、接地线等子类别，每个子类别按缺陷类型细分，存储接地装置相关的样本数据及标注结果，重点存储近距离采集的样本数据。

6.2.2 按模态分类

6.2.2.1 样本库按图像模态分为可见光样本库、红外样本库、多模态融合样本库，三个子样本库应同步建设，双模态样本一一关联，确保算法能够实现多模态融合识别。

- a) 可见光样本库存储所有可见光图像及对应标注结果，占样本库总容量的 60%，重点存储外观类缺陷样本数据，用于算法识别缺陷的外观特征；
- b) 红外样本库存储所有红外图像、温度矩阵数据及对应标注结果，占样本库总容量的 30%，重点存储发热类缺陷样本数据，用于算法识别缺陷的温度特征；
- c) 多模态融合样本库存储配对的可见光和红外双模态样本数据及融合标注结果，占样本库总容量的 10%，每个融合样本包含一幅可见光图像、一幅对应红外图像、两套标注结果及融合标注信息，融合标注信息明确双模态图像中缺陷区域的对应关系、温度特征与外观特征的关联描述。

6.2.2.2 双模态样本的关联应采用唯一关联标识，关联标识与图像文件命名规则保持一致，确保能够快速调用配对样本，支撑算法多模态训练需求。

6.2.3 按用途分类

样本库按算法使用用途分为训练集、验证集、测试集和生产验证集四类，各类样本应严格区分、独立存储，无重叠样本，确保算法训练、调优和评估的客观性，具体要求如下：

- a) 训练集：样本满足均衡性要求，覆盖所有 8 大类场景、91 类缺陷，各类缺陷样本数量合理配比，经过严格的数据清洗和标注验收，标注准确率不低于 98%，图像质量达标，为模型学习提供充足、优质的特征信息，支撑算法模型的基础训练；
- b) 验证集：与训练集无重叠，样本选取兼顾场景多样性和缺陷全覆盖，涵盖不同采集环境、不同设备采集的样本，用于模型训练过程中的参数调优和性能监控，实时跟踪模型的训练效果，通过验证集指标调整模型超参数，防止模型出现过拟合、欠拟合现象，确保模型泛化能力；
- c) 测试集：采用独立采集方式生成，不参与模型训练和调优过程，样本来源为未纳入训练集、验证集的输电线路现场真实数据，涵盖各典型场景和缺陷，标注准确率不低于 98%，用于算法最终性能评估，客观判断算法是否达到核心性能指标，为算法测试环节提供标准化的测试数据支撑，测试完成后，测试集样本可根据需求补充至训练集，用于模型迭代优化；
- d) 生产验证集：独立于上述三类样本集，存储现场生产环境中采集的真实数据，随现场巡检持续补充，用于算法上线前的最终验证，模拟生产环境中的真实工况，验证算法在实际应用中

的适配性和性能稳定性，生产验证集样本后续可同步补充至样本库的其他三类样本集中，丰富样本库容量。

6.3 样本质量

6.3.1 所有入库样本应满足图像质量、标注质量双重要求。

6.3.2 样本入库前应进行全面数据清洗，剔除无效图像、重复图像、标注不合格图像，同时对图像的元数据进行核查，确保元数据完整、准确，与图像文件一一关联。数据清洗完成后，应留存清洗记录，注明清洗时间、清洗人员、剔除样本数量及原因，便于后续追溯。

6.3.3 样本库中各类样本应合理配比，避免样本偏斜，具体要求如下：

- a) 缺陷与正常样本配比：样本库中包含缺陷的正样本与不包含缺陷的负样本的整体配比控制在 1:4 左右，针对不同场景调整配比，通道环境类场景正样本占比可适当提高至 30%，基础类场景正样本占比可控制在 20%；
- b) 各类缺陷样本均衡：91 类缺陷的样本数量均衡，对于样本数量较多的常规缺陷，可适当筛选优质样本入库，避免样本冗余；对于样本数量较少的稀缺缺陷，通过生图挖掘、人工专项采集、数据增强等方式补充样本，确保每类缺陷样本数量能够满足算法训练需求，提升算法对稀缺缺陷的识别能力；
- c) 场景与模态均衡：8 大类场景的样本数量均衡分布，每类场景样本占比控制在 10%~15%，避免某类场景样本过多、某类场景样本过少，可见光、红外、多模态融合样本的配比符合本文件 6.2.2 条要求，确保算法能够兼顾不同模态、不同场景的缺陷识别需求，提升模型的通用性。

6.3.4 样本库应建立动态更新机制，结合现场巡检工作和算法迭代需求，定期更新样本数据，确保样本库的时效性和适用性：

- a) 定期更新：每季度进行一次样本库更新，将本季度现场巡检采集的合格图像、标注完成的样本数据导入样本库，按场景、模态、用途分类存储，同时更新样本库统计信息，更新完成后留存更新记录，注明更新时间、更新样本数量、更新人员等信息；
- b) 动态补充：针对算法测试和实际应用中发现的识别效果较差的缺陷类别，及时开展专项采集和生图挖掘工作，补充对应样本至样本库，同时调整样本均衡性，确保算法能够通过样本补充实现迭代优化，提升识别效果；
- c) 过期样本清理：对于存储期限满 5 年且不再适用于当前算法版本的样本，按公司数据管理规范进行清理，清理前进行备份，清理完成后留存清理记录，注明清理时间、清理样本数量、清理原因，确保样本库的整洁性和高效性。

7 算法设计

7.1 一般规定

7.1.1 算法应以输电线路 8 大类场景、91 类缺陷为识别目标，总体任务定义为“目标检测+语义分割”结合的双任务模式，实现缺陷的精准定位、类别识别和区域分割，兼顾算法识别效果与部署效率，适配输电线路无人机/巡检机器人现场巡检的实际需求，为输电线路缺陷排查提供高效、精准的技术支撑。

7.1.2 技术路线应选用轻量化、高适配性的深度学习算法框架，结合 CNN 与 Transformer 混合架构的优势，强化小目标缺陷、稀缺缺陷的特征提取能力；宜引入 TensorRT 推理优化技术，实现算法训练效果与部署性能的平衡。

7.1.3 算法设计应遵循模块化、可复用、可迭代的原则，便于后续版本更新、功能升级和维护。

7.1.4 应结合算法开发迭代需求，明确阶段性性能目标：

- a) 算法研发初期，核心指标召回率、精确率达到目标值的 80%；
- b) 研发中期，核心指标达到目标值的 90%；
- c) 研发完成后，核心指标、部署指标、稳定性指标全部达标，算法能够满足生产环境的实际应用需求。

7.1.5 算法应具备良好的泛化能力，适配不同采集设备、不同光照、不同天气条件下的图像数据，避免出现过拟合现象。

7.2 模块设计

7.2.1 数据预处理模块

7.2.1.1 数据预处理模块应对样本库中的可见光、红外双模态图像数据进行标准化处理，消除图像质量差异、尺寸差异等干扰因素，输出符合算法训练和推理要求的标准化数据，适配后续特征提取和模型推理模块的需求。

7.2.1.2 核心功能应包括：

- a) 图像去噪：采用高斯滤波、中值滤波结合的方式，消除图像中的高斯噪声、椒盐噪声，红外图像额外增加温度噪声去除功能，确保温度数据准确；
- b) 图像增强：针对过曝、欠曝、模糊图像，采用亮度调整、对比度优化、锐化、直方图均衡化等操作，提升图像质量和特征清晰度；
- c) 尺寸统一：将所有图像调整为统一分辨率，采用双线性插值法进行尺寸缩放，避免图像失真；
- d) 归一化：将图像像素值归一化至 $[0, 1]$ 区间，消除像素值差异带来的训练干扰；
- e) 通道调整：根据图像模态调整通道数，可见光图像保留 GB 通道，红外图像转换为温度灰度单通道，多模态融合图像保留 RGB+温度四通道。

7.2.1.3 预处理模块应支持不同格式的图像输入，自动识别图像模态，匹配对应的预处理策略；支持批量预处理操作，批量处理速度不低于 100 张/分钟，满足样本库大规模样本训练的需求；预处理参数支持灵活调整，根据不同缺陷类别、不同图像质量调整参数，提升预处理效果；预处理后的数据支持自动关联原始图像的元数据和标注信息，确保数据的完整性和可追溯性。

7.2.1.4 针对样本库中少量未完全清洗干净的图像，预处理模块应具备一定的容错能力，通过增强和去噪操作提升图像质量，避免直接丢弃样本；若图像存在严重质量问题，预处理模块应自动标记并剔除，同时记录异常信息，反馈至样本库管理环节，便于样本补充和清洗。

7.2.2 特征提取模块

7.2.2.1 特征提取模块网络架构设计如下：

- a) 基础特征提取采用 CNN 架构，负责提取图像的局部特征；
- b) 在 CNN 基础上，引入 Transformer 自注意力机制模块，负责提取图像的全局特征，捕捉小目标缺陷、稀缺缺陷的微弱特征。

7.2.2.2 可通过引入特征融合技术，将不同层级的特征进行融合，强化缺陷特征的表达能力，避免出现特征丢失；针对红外图像的温度特征，可单独设计温度特征提取分支，提取图像的温度梯度、异常温度区域等特征，与可见光图像的外观特征进行融合，提升多模态缺陷的识别准确率。

7.2.2.3 可引入注意力机制权重分配策略，对不同缺陷类别的特征赋予不同权重，对稀缺缺陷、识别难度大的缺陷特征赋予更高权重，提升算法对这类缺陷的识别效果。

7.2.2.4 特征提取模块的输出应为标准化的特征图，特征图尺寸与预处理后的图像尺寸保持对应，特征图通道数根据网络架构设定，特征图应包含图像的局部特征、全局特征、温度特征等核心信息，特征提取速度应与预处理模块、推理模块匹配。

7.2.3 模型推理模块

7.2.3.1 应兼容主流深度学习训练框架，推理过程采用模块化设计，支持目标检测和语义分割双任务同步推理。

7.2.3.2 应支持不同缺陷类别自定义置信度阈值，根据各类缺陷的识别难度和实际需求，调整置信度阈值，平衡召回率与精确率，可根据算法测试效果动态调整，阈值调整后应留存调整记录，便于版本追溯。

7.2.3.3 可引入推理优化引擎，对训练完成的模型进行量化、剪枝优化；可采用批量推理机制优化推理流程；推理过程中可引入异常检测机制，对推理失败、结果异常的图像进行自动标记，反馈至运维环节，便于后续排查处理。

7.2.4 后处理模块

7.2.4.1 后处理模块核心功能应包括：

- a) NMS 非极大值抑制：用于消除同一缺陷区域的重复检测框，保留置信度最高的检测框，避免重复标注，NMS 阈值设置为 0.3，可根据推理效果动态调整；
- b) 缺陷分级：根据缺陷类别、严重程度，结合本文件附录 A 的缺陷分级标准，自动对识别出的缺陷进行分级，标注缺陷等级，为缺陷处置提供优先级依据；
- c) 结果可视化：将缺陷检测框、分割区域、缺陷类别、置信度、缺陷等级等信息叠加至原始图像上，生成可视化结果图，便于人工复核和缺陷确认；
- d) 异常结果过滤：用于剔除置信度低于阈值、定位偏差过大、分割错误的异常结果，确保输出结果的准确性；
- e) 输出格式化：将识别结果转换为 JSON 格式，包含图像 ID、采集信息、缺陷类别、缺陷位置、置信度、缺陷等级、推理时间等完整信息，适配生产系统的数据接口需求。

7.2.4.2 后处理后的识别结果应准确、完整、规范，无重复、异常结果，缺陷分级准确，可视化结果清晰可辨，输出格式符合本文件 5.3 条的标注结果文件要求；后处理速度应与模型推理速度匹配，确保算法整体实时性，批量后处理速度应不低于 100 张/分钟。

7.2.4.3 后处理过程中应留存完整的处理日志，包括推理结果、优化内容、过滤的异常结果、处理时间、处理人员等信息。日志应采用文本格式存储，与识别结果文件一一关联。

7.3 模型训练与优化

7.3.1 训练环境

7.3.1.1 模型训练环境分为硬件环境和软件环境，应满足大规模样本训练和复杂网络架构训练的需求。

7.3.1.2 硬件环境应支持分布式训练，提升大规模样本训练速度；应配备专用备份硬盘，用于训练过程中模型文件和训练日志的备份。所有硬件设备应定期维护、校准。

7.3.1.3 操作系统应兼容分布式训练需求，支持 CNN、Transformer 混合架构训练和分布式训练；所有依赖库版本应锁定，生成依赖清单，确保训练环境的一致性和可复现性。

7.3.2 训练策略

训练策略应兼顾训练效率和训练效果，避免模型出现过拟合、欠拟合现象，确保模型能够精准识别各类缺陷，具体训练策略如下：

- a) 迁移学习策略：基于预训练模型进行微调训练，利用预训练模型已经学习到的通用图像特征，减少模型训练的迭代次数，提升训练效率，降低训练成本；

注：微调过程中，前期冻结预训练模型的底层网络参数，仅训练顶层特征提取和推理层参数；后期逐步解冻底层网络参数，进行全网络微调。

- b) 数据增强策略：在训练过程中，对训练集样本进行实时数据增强，扩充训练样本数量，提升模型的泛化能力，避免过拟合，数据增强的强度和概率可动态调整，训练初期增强强度较低，训练后期逐步提高增强强度，确保训练效果；
- c) 超参数调优策略：超参数包括学习率、批次大小、迭代次数、权重衰减系数、动量等，采用网格搜索法进行超参数调优，筛选最优超参数组合。

7.3.3 训练监控

7.3.3.1 应建立完善的训练监控机制，实时跟踪模型训练过程，及时发现训练过程中的问题。

7.3.3.2 应实时跟踪训练集和验证集的核心指标，包括 Loss 值（训练损失、验证损失）、召回率、精确率、F1-score 等，绘制指标变化曲线，直观呈现模型训练效果。

7.3.3.3 应启用早停机制，以验证集 F1-score 为监控指标，若验证集 F1-score 连续 10 轮提升幅度小于 0.1%，自动停止训练，保存当前最优模型。同时保存训练过程中的最优模型、最后一轮模型和每 50 轮的中间模型。

7.3.3.4 训练过程中应留存完整的训练日志，日志内容应至少包括：

- a) 训练参数：超参数、训练环境配置；
- b) 每轮训练的指标：Loss 值、召回率、精确率等；
- c) 硬件资源占用情况；
- d) 训练时间；
- e) 异常情况及处理结果；
- f) 模型保存路径。

7.3.3.5 训练日志宜采用文本格式和 Excel 格式双格式存储，文本格式用于详细记录，Excel 格式用于指标统计和曲线绘制。训练完成后，训练日志与模型文件应同步归档。

7.4 算法工程构建

7.4.1 算法工程化构建应遵循模块化、可复用、可测试、可部署的原则，将算法研发的各个模块进行工程化封装，形成可直接部署的算法包。

7.4.2 代码结构应采用模块化代码结构，将不同功能模块拆分至独立的代码文件，建立清晰的目录结构，包括数据预处理模块目录、特征提取模块目录、模型推理模块目录、后处理模块目录、工具类目录、配置文件目录、日志目录等。

7.4.3 梳理算法运行所需的所有第三方依赖库应明确依赖库版本，生成依赖清单，锁定依赖库版本，避免因依赖库版本变化导致算法运行异常；在工程构建过程中，集成依赖库自动安装功能，可通过一键安装脚本安装所有依赖库，提升部署效率；针对不同部署环境，生成对应的依赖清单。

7.4.4 应采用 Docker 容器化技术对算法进行封装，构建算法 Docker 镜像，镜像包含算法代码、依赖库、训练完成的模型文件、配置文件等所有运行所需的资源；镜像大小应控制在 10 GB 以内，便于镜像传输和部署；应生成 Dockerfile 文件，明确镜像构建流程和配置，确保镜像构建的可复现性；镜像构建完成后，应推送至镜像仓库，便于生产环境拉取和部署。

7.5 接口封装

为适配生产系统的调用需求，应对算法进行接口封装，提供标准化的 API 接口，确保算法能够与生产系统无缝对接，同时保障接口调用的安全性和稳定性，具体设计如下：

- a) 采用 RESTful/HTTP 接口，支持 GET、POST 两种请求方式，GET 请求用于获取算法版本、接口状态等基础信息，POST 请求用于提交图像数据、获取识别结果；
- b) 接口支持批量图像请求；
- c) 接口响应格式统一为 JSON 格式，包含响应码、响应信息、识别结果等内容，响应码遵循 HTTP 标准响应码；
- d) 接口采用 Token 验证+IP 白名单双重鉴权机制，保障接口调用安全；
- e) 接口调用过程中，采用 HTTPS 加密传输；
- f) 接口文档明确接口地址、请求方式、请求参数、响应格式、响应码说明、鉴权方式、调用示例等信息；
- g) 接口文档与算法包同步归档，及时更新，留存更新记录，确保接口文档与实际接口一致；
- h) 支持接口测试功能，提供测试用例和测试工具，便于接口调用前的测试验证。

8 生产环境算法测试

8.1 一般要求

8.1.1 测试工作应遵循“全面覆盖、客观公正、精准高效”的原则，覆盖算法全功能、全场景，确保测试结果真实、可靠。

8.1.2 应测试环境与生产环境完全一致，确保测试结果具有参考价值；测试环境网络配置应与生产环境一致，确保接口调用、数据传输的测试效果与生产环境一致。

8.1.3 测试数据应采用独立的测试集和生产现场采集的真实数据；测试数据应按场景、缺陷类别分类整理，建立测试数据集，标注测试数据的相关信息，便于测试结果统计和错误分析。

8.1.4 测试团队应由算法测试人员、专业巡检人员、算法研发人员组成：

- a) 测试人员负责测试执行和结果统计；
- b) 巡检人员负责现场数据采集和缺陷确认；
- c) 研发人员负责错误分析和算法优化。

8.1.5 测试流程分为测试准备、测试执行、测试结果分析、算法优化、回归测试五个阶段。每个阶段应明确责任人、完成时间和交付物，形成闭环管理，确保测试工作有序开展。

8.2 效果测试

8.2.1 效果测试方法如下：

- a) 采用全量测试集推理的方式，将测试集所有样本批量提交至算法接口，获取算法识别结果，将识别结果与测试集的标准标注结果进行对比，按缺陷类别、场景类别分别统计各项核心指标；
- b) 针对小目标缺陷、稀缺缺陷，单独抽取样本进行专项测试，统计这类缺陷的各项指标，评估算法对这类缺陷的识别能力；
- c) 针对多模态缺陷，抽取双模态样本进行专项测试，验证多模态融合识别的准确率；
- d) 采用生产现场真实数据进行测试，模拟生产环境，验证算法的泛化能力。

8.2.2 测试指标应符合以下要求：

- a) 召回率 $\geq 80\%$ ；
- b) 精确率 $\geq 75\%$ ；

- c) F1-score $\geq 77\%$;
- d) 误检比 ≤ 0.5 ;
- e) 误检率 $\leq 30\%$;
- f) 小目标缺陷、稀缺缺陷的召回率 $\geq 70\%$;
- g) 小目标缺陷、稀缺缺陷的精确率 $\geq 65\%$;
- h) 多模态缺陷的召回率 $\geq 85\%$;
- i) 多模态缺陷的精确率 $\geq 80\%$ 。

注：生产现场真实数据测试的各项指标应不低于测试集测试指标的 90%。

8.2.3 测试完成后，应对未达标的指标、漏检、误检样本进行专项错误分析，统计漏检、误检原因，主要分为四类：

- a) 样本不足：稀缺缺陷样本量少；
- b) 特征不明显：缺陷轻微、图像质量差；
- c) 环境干扰：光照异常、遮挡、电磁干扰；
- d) 算法设计缺陷：特征提取不足、推理阈值不合理。

8.2.4 针对每类错误，应选取典型样本进行分析，记录错误详情。错误分析完成后，应生成错误分析报告，明确错误类型、占比、典型案例和优化建议。

8.3 性能测试

8.3.1 性能测试方法如下：

- a) 采用模拟并发请求的方式，使用 JMeter 测试工具，模拟不同并发数下的图像请求，每类并发数持续测试 30 min，记录每一分钟的 QPS、平均响应时间、最大响应时间、GPU 利用率、显存占用等指标；
- b) 测试过程中，采用批量请求方式，单次请求提交 10 张图像，模拟生产环境的批量处理场景；
- c) 测试 TensorRT 加速前后的性能差异，对比加速前、后的各项性能指标，验证加速效果；
- d) 测试完成后，统计各项指标的平均值、最大值、最小值，绘制性能变化曲线，直观呈现算法性能表现。

8.3.2 各项性能指标应符合以下要求：

- a) QPS ≥ 10 ;
- b) 平均响应时间 ≤ 500 ms;
- c) 最大响应时间 ≤ 1000 ms;
- d) GPU 利用率 50%~80%;
- e) 显存占用 ≤ 10 GB。

注：不同并发数下，各项指标应保持稳定，波动幅度小于 10%；TensorRT加速后，QPS提升不低于 50%，平均响应时间降低 40% 及以上。

8.3.3 宜额外测试算法的部署效率，记录算法 Docker 镜像拉取时间、容器启动时间、接口初始化时间，网络正常情况下 Docker 镜像拉取时间应不超过 30 min，容器启动时间不超过 5 min，接口初始化时间不超过 1 min。

8.3.4 应测试不同部署环境下的性能差异，确保算法在不同生产部署环境下均能达到性能要求。

8.4 稳定性测试

8.4.1 稳定性测试方法如下：

- a) 采用长期不间断运行测试的方式，在测试环境中部署算法后，模拟生产环境的真实请求频率，持续运行 72 h，测试过程中不中断请求，不重启算法容器；
- b) 测试过程中，实时监控算法的运行状态，包括接口状态、GPU 利用率、显存占用、CPU 利用率、内存占用等指标，记录每小时的指标数据，同时监控算法是否出现崩溃、内存泄露、异常退出、接口调用失败等情况；
- c) 测试完成后，统计算法的可用性、异常次数、异常原因，评估算法的稳定性。

8.4.2 测试指标应符合以下要求：

- a) 不间断运行可用性 $\geq 99.9\%$ ；
- b) 测试期间异常次数 ≤ 1 次；
- c) 无崩溃、无内存泄露，显存、内存占用波动幅度小于 5%，无持续增长；
- d) 接口调用成功率 $\geq 99.9\%$ ，调用失败的异常情况能够自动恢复，恢复时间 $\leq 1\text{min}$ ；
- e) 测试期间，QPS、平均响应时间保持稳定，波动幅度 $< 10\%$ 。

8.4.3 应模拟生产环境中可能出现的异常情况，测试算法的异常处理能力，应符合以下要求：

- a) 算法准确识别异常情况，输出明确的异常提示，不出现崩溃、卡死现象；
- b) 网络中断、GPU 故障恢复后，算法能够自动重启接口，恢复正常运行，恢复时间 $\leq 5\text{ min}$ ，且不丢失之前的识别结果；
- c) 异常处理完成后，留存异常处理日志，便于后续运维排查。

8.5 功能/安全性测试

8.5.1 功能测试内容包括：

- a) 数据预处理模块的各种预处理操作是否正常；
- b) 特征提取模块是否能够准确提取缺陷特征；
- c) 模型推理模块的目标检测、语义分割功能是否正常；
- d) 后处理模块的 NMS 抑制、缺陷分级、结果格式化等功能是否正常；
- e) 测试算法的参数调整功能，确保参数调整后能够正常生效，指标能够随之变化。

8.5.2 功能测试采用黑盒测试与白盒测试结合的方式，覆盖算法所有功能点，无功能遗漏和逻辑错误。

8.5.3 安全性测试内容包括：

- a) 接口鉴权测试：验证 Token 验证、IP 白名单的有效性，测试非法 Token、非白名单 IP 是否能够调用接口；
- b) 数据传输安全测试：验证 HTTPS 加密传输的有效性；
- c) 接口防攻击测试：模拟攻击方式，测试算法接口的防御能力；
- d) 数据存储安全测试：验证识别结果、日志数据的存储安全性；

8.6 测试结果评估与优化

8.6.1 指标评估

8.6.1.1 测试完成后，应对各类测试的结果进行全面评估，对照各项指标要求，逐一核查功能测试、效果测试、性能测试、稳定性测试、安全性测试的达标情况。

8.6.1.2 应按缺陷类别、场景类别、测试类型分别生成测试报告，明确各项指标的实际测试值、目标值、达标情况，对未达标的指标进行重点标注，分析未达标原因。

8.6.1.3 应对比算法研发初期、中期的测试指标，评估算法的迭代优化效果，总结算法的优势和不足，为算法正式上线和后续迭代提供依据。

8.6.2 迭代优化

8.6.2.1 应针对测试中发现的未达标指标、功能缺陷、安全风险，制定针对性的算法迭代优化方案，明确优化内容、优化责任人、完成时间和预期目标。

8.6.2.2 优化方案主要分为三类：

- a) 样本优化：补充稀缺样本、清洗不合格样本、调整样本均衡性；
- b) 算法优化：优化特征提取模块、调整推理阈值、改进后处理逻辑、强化 TensorRT 优化；
- c) 部署优化：优化 Docker 镜像、调整硬件资源配置、优化接口调用逻辑。

8.6.2.3 优化完成后，应重新开展回归测试，验证优化效果，确保各项指标达到要求，直至所有测试项目均达标。

8.6.3 测试归档

8.6.3.1 测试工作全部完成后，应整理所有测试相关资料，包括测试计划、测试用例、测试数据、测试结果、错误分析报告、优化方案、回归测试报告等，进行归档。

8.6.3.2 测试报告应明确算法是否达到上线要求，给出明确的上线建议。所有测试资料应留存电子版和纸质版。

9 算法上线

9.1 上线前准备

9.1.1 算法上线前应进行灰度发布准备：

- a) 采用灰度发布策略，上线前选取（1~2）条试点输电线路，涵盖不同场景、不同缺陷类型，进行小范围试点部署，模拟生产环境的真实工况，验证算法在现场的适配性、识别效果和性能表现；
- b) 试点部署期间，安排专人负责监控算法运行状态，收集现场巡检人员的反馈意见，统计算法的实际运行指标；
- c) 发现问题，及时进行优化调整，确保试点部署效果达标；
- d) 试点部署时间不少于 7 d，试点达标后，方可开展全面上线工作。

9.1.2 算法上线前应进行回滚预案准备：

- a) 制定完善的上线回滚预案，确保上线过程中出现异常情况时，能够快速回滚至原版本，降低对生产的影响；
- b) 明确回滚触发条件、回滚步骤、回滚责任人、回滚时间窗口；
- c) 提前进行回滚预案演练，确保相关人员熟悉回滚流程，能够快速执行回滚操作；
- d) 备份当前生产环境的原版本算法包、模型文件和配置文件，防止回滚过程中出现数据丢失。

9.1.3 算法上线前应进行运维保障准备：

- a) 部署算法运行监控告警系统，明确监控指标，设置告警阈值，当指标超出阈值或出现异常情况时，能够及时发出告警，通知运维人员处理；
- b) 制定故障排查流程，明确各类故障的排查步骤、责任人、处理时限，确保故障能够快速排查解决；
- c) 对运维人员进行专项培训，使其熟悉算法部署架构、监控系统操作、故障排查方法和回滚流程，具备独立运维能力；
- d) 准备上线所需的所有资源，确保上线过程中能够快速调用。

9.2 上线流程

9.2.1 算法上线流程应遵循“准备—部署—验证—正式上线”的步骤。

9.2.2 环境部署流程如下：

- a) 登录生产环境服务器检查服务器硬件资源、软件环境是否正常；
- b) 拉取算法 Docker 镜像，执行部署脚本；
- c) 启动算法容器，配置接口参数、鉴权信息、监控指标等。

9.2.3 部署过程中，应实时监控部署状态，部署失败应及时排查原因，重新部署；部署完成后，应记录部署信息，包括部署时间、部署人员、算法版本、镜像版本等。

9.2.4 部署完成后，应开展现场验证工作：

- a) 选取不同线路、不同场景、不同缺陷类型的现场真实图像，提交至算法接口，获取识别结果，由专业巡检人员对识别结果进行人工复核，验证算法识别效果是否达标；
- b) 测试算法的 QPS、平均响应时间、接口调用成功率和稳定性，确保各项指标符合生产要求。

9.2.5 现场验证样本数量应不少于 500 张，覆盖 8 大类场景、91 类缺陷，验证合格率不低于 98%，方可进入正式上线环节；若验证不合格，应及时排查原因，进行优化调整，重新验证，直至验证达标。

9.2.6 现场验证达标后，发布算法正式上线通知，通知算法研发人员、运维人员、现场巡检人员等相关岗位，明确上线时间、算法版本、核心功能和注意事项。

9.2.7 正式上线后，应逐步扩大算法应用范围，直至覆盖所有目标输电线路。

9.2.8 上线初期（1 周内），应安排专人 24 h 监控算法运行状态，收集现场反馈，及时处理出现的问题，确保算法平稳运行。

9.2.9 上线完成后，应整理上线记录，包括上线时间、部署过程、现场验证结果、相关责任人等信息，与算法文档同步归档。

10 算法日常运维

10.1 运行监控

10.1.1 应建立常态化的算法运行监控机制，实时跟踪算法运行状态，及时发现和处理运行过程中的异常情况。

10.1.2 监控指标应涵盖核心性能指标、稳定性指标、硬件资源指标、接口状态指标、数据指标；所有监控指标应设置明确的告警阈值，告警阈值根据算法性能要求和生产实际情况设定，可动态调整。

10.1.3 应采用分级告警机制，将告警分为紧急告警、重要告警、一般告警三类：

- a) 紧急告警：立即通过短信、邮件通知运维人员和研发人员，10 min 内响应、1 h 内处理；
- b) 重要告警：通过邮件、系统提示通知运维人员，30 min 内响应、2 h 内处理；
- c) 一般告警：通过系统提示通知运维人员，1 d 内处理。

10.1.4 告警处理完成后，应留存告警处理记录，包括告警内容、告警时间、处理人员、处理步骤、处理结果等信息，便于后续追溯和分析。

10.1.5 应定期生成算法运行监控报告：

- a) 每日生成日报：统计当日算法运行指标、告警情况、故障处理情况、识别数据等；
- b) 每月生成月报：总结当月算法运行情况、指标变化趋势、故障统计、优化建议等。

10.1.6 监控报告宜采用 Excel 和 Markdown 双格式，Excel 用于指标统计，Markdown 用于详细分析和总结。

10.1.7 监控报告应提交至相关岗位负责人，为算法优化、运维决策提供依据。监控报告应留存归档。

10.2 持续优化

10.2.1 模型迭代

- 10.2.1.1 每季度应结合样本库更新的新样本，开展模型增量训练，迭代优化算法模型。
- 10.2.1.2 增量训练宜采用迁移学习策略，基于当前运行的模型进行微调，减少训练成本和训练时间。
- 10.2.1.3 迭代优化应重点针对识别效果较差的缺陷类别、现场反馈的问题，优化特征提取模块和推理逻辑，提升识别准确率。
- 10.2.1.4 模型迭代完成后，应进行回归测试，测试达标后，采用灰度发布方式更新生产环境的算法模型，迭代过程不应影响生产。
- 10.2.1.5 模型迭代记录应留存归档，包括迭代时间、迭代内容、训练数据、测试结果、相关责任人等信息。

10.2.2 性能调优

- 10.2.2.1 应结合算法运行监控结果，定期对算法性能进行调优，针对性能下降的情况，分析原因，采取针对性的调优措施。
- 10.2.2.2 应结合生产环境的业务量变化，动态调整算法部署配置，确保算法性能始终满足生产需求。
- 10.2.2.3 性能调优完成后，应记录调优内容、调优前后的指标对比，开展小范围验证，确认调优效果后全面应用，避免调优操作影响算法正常运行。

10.2.3 故障处理

- 10.2.3.1 应建立快速故障处理机制，运维人员接到告警通知或现场反馈的故障后，按照故障排查流程开展工作，快速定位故障原因，采取针对性的处理措施。
- 10.2.3.2 常见故障及处理方案如下：
 - a) 算法崩溃故障：立即执行回滚预案，恢复原版本算法运行，同时排查崩溃原因，优化后重新部署新版本；
 - b) 接口调用失败故障：检查接口鉴权信息、网络连接状态，修复异常后重启接口，验证接口可用性；
 - c) 识别效果异常故障：排查样本数据质量、模型泛化能力，补充相关样本或微调模型参数，开展回归测试后更新模型；
 - d) 硬件故障：及时更换硬件设备，恢复算法部署，确保业务连续性；
- 10.2.3.3 所有故障处理完成后，应进行故障复盘，分析故障产生的根本原因，制定预防措施，避免同类故障再次发生，故障复盘记录与处理记录同步归档。

10.2.4 版本管理

- 10.2.4.1 应建立算法版本全生命周期管理机制，明确版本命名规则，所有上线、迭代的算法版本均应留存完整信息，包括版本内容、迭代优化点、测试报告、部署记录等。
- 10.2.4.2 生产环境仅保留当前运行版本和上一版本，历史版本应按公司文档归档规范进行归档。
- 10.2.4.3 版本更新应采用灰度发布方式，先在试点线路部署新版本，验证达标后再全面推广，更新过程中实时监控运行状态，出现异常立即回滚。
- 10.2.4.4 应建立版本追溯机制，根据运行日志、部署记录，追溯任意版本的算法部署、运行、优化情况，便于故障排查和质量核查。

附 录 A
(资料性)
常见缺陷及分级

A.1 输电线路 8 大类场景、91 类常见缺陷及分级见表 A.1。

表 A.1 常见缺陷明细及分级

缺陷归属场景	缺陷描述	缺陷分级
杆塔类缺陷	杆塔鸟巢	一般
	杆塔基础外露	一般
	杆塔脚钉缺失	一般
	杆塔爬梯损坏	一般
	杆塔标识牌缺失	一般
	杆塔裂纹	一般/严重, 根据裂纹长度判定
	杆塔锈蚀	一般/严重, 根据锈蚀面积判定
	杆塔倾斜	严重
	杆塔混凝土脱落	严重
	杆塔焊缝开裂	严重
	杆塔外力碰撞损坏	严重/危急, 根据损坏程度判定
	杆塔雷击损坏	危急
绝缘子类缺陷	绝缘子均压环锈蚀	一般
	绝缘子弹簧销缺失	一般
	绝缘子开口销缺失	一般
	绝缘子污秽	一般/严重, 根据污秽程度判定
	复合绝缘子老化	一般/严重
	绝缘子破损	严重
	绝缘子均压环脱落	严重
	绝缘子串倾斜	严重
	绝缘子漏电	严重
	瓷绝缘子零值	严重
	复合绝缘子伞裙破损	严重
	绝缘子与金具连接松动	严重
	绝缘子爆裂	危急
	绝缘子掉串	危急
玻璃绝缘子自爆	危急	
金具类缺陷	防振锤损坏	一般
	均压环损坏	一般
	金具镀层脱落	一般
	金具锈蚀	一般/严重
	间隔棒损坏	一般/严重
	金具磨损	一般/严重
	金具松动	严重
	耐张线夹发热	严重
	悬垂线夹损坏	严重
	防振锤脱落	严重
	引流线夹松动	严重
	引流线夹发热	严重
	接续金具过热	严重
	线夹压板松动	严重
	线夹压板缺失	严重
金具变形	严重	
金具断裂	危急	

缺陷归属场景	缺陷描述	缺陷分级
	接续金具断裂	危急
导地线类缺陷	导地线接头氧化	一般
	导地线磨损	一般/严重
	导地线腐蚀	一般/严重
	导地线松股	严重
	导地线过热	严重
	导地线接头松动	严重
	导地线异物缠绕	严重
	导地线弧垂过大	严重
	导地线弧垂过小	严重
	地线断股	严重
	地线松股	严重
	导地线断股	严重/危急，根据断股数量判定
	导地线外力损伤	严重/危急
	导地线雷击断股	危急
基础类缺陷	基础混凝土老化	一般
	基础沉降	严重
	基础立柱淹没	严重
	基础冲刷损坏	严重
	基础钢筋外露	严重
	拉线基础松动	严重
	拉线基础损坏	严重
	基础开裂	严重/危急
附属设施类缺陷	接地引下线锈蚀	一般
	标识牌损坏	一般
	防护栏损坏	一般
	附属设备固定松动	一般
	避雷器损坏	严重
	避雷器泄漏电流超标	严重
	接地引下线损坏	严重
通道环境类缺陷	树障	一般/严重/危急，根据树木与线路距离判定
	施工机械靠近	严重
	线路下方焚烧	严重
	线路下方堆物	严重
	洪水浸泡	严重
	大风导致异物靠近	严重
	冰雪覆盖	严重
	通道内非法开挖	严重
	违章建筑	严重/危急
	异物悬挂	严重/危急
	山体滑坡	危急
泥石流	危急	
接地装置类缺陷	接地体锈蚀	一般/严重
	接地线松动	严重
	接地线破损	严重
	接地电阻超标	严重
	接地体断裂	危急