

ICS 19.100  
CCS F 24



团 体 标 准

T/CI 1153—2025

# 架空输电线路无人机 X 射线带电 检测技术导则

Technical guidelines for unmanned aerial vehicle X-ray live inspection  
for transmission lines

2025-08-25 发布

2025-08-25 实施

中国国际科技促进会 发布  
中国标准出版社 出版



## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 缩略语 .....	1
5 通用技术要求 .....	2
5.1 一般要求 .....	2
5.2 无人机适航管理 .....	2
5.3 无人机带电检测注意事项 .....	2
6 检测环境要求 .....	3
6.1 无人机工作环境要求 .....	3
6.2 辐射防护 .....	3
7 无人机X射线检测系统 .....	3
7.1 系统组成 .....	3
7.2 多旋翼无人机 .....	3
7.3 无人机挂载工装夹具 .....	3
8 检测方法 .....	3
8.1 检测方案 .....	3
8.2 X射线检测成套装置装配 .....	4
8.3 检测流程 .....	4
8.4 检测图片灵敏度要求 .....	5
8.5 检测图片存储及处理 .....	5
8.6 检测结果评价 .....	5
9 检测报告 .....	5
附录A(规范性) 电气安全距离 .....	6
附录B(规范性) 无人机X射线相间放电实验方案设计 .....	7
参考文献 .....	10



## 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》的规则起草。

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。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：广东粤电科试验检测技术有限公司、江苏方天电力技术有限公司、内蒙古电力(集团)有限责任公司锡林郭勒供电分公司、深圳南瑞科技有限公司、四川华航科技有限公司、河南四达检测技术有限公司、福建中试所电力调整试验有限责任公司、江苏方洋能源科技有限公司、广东电网有限责任公司韶关供电局、国网宁夏电力有限公司银川供电公司、深圳市输变电工程有限公司、山西晋缘电力化学清洗中心有限公司、深圳亨立测控技术有限公司、江苏天佑宸电力服务有限公司、上海西邦电气有限公司、广州迪测智能科技有限公司、云南电力建设监理咨询有限责任公司、国网能源研究院有限公司、曲靖国电电力新能源开发有限公司。

本文件主要起草人：钟飞、邓威、李欣、马君鹏、单华、唐一铭、裴晓东、刘家鹏、韩文举、李辉、郝后堂、刘晓铭、付贵、李攀、陈思贤、陈瑞斌、谭兴华、冯尚龙、郑良栋、孙中旺、王虹杰、曾智、崔宫、程晓冰、王海默、李虎、沈赟虎、王小平、邓亮、李鑫、孟令钊、胡宝林、王驰、徐家驹、郭浩、许航飞、罗晓、薛冬、温晓东、陈文贵、张德治、徐崧源、杨彪、刘键焯、吴兴沿、李关良。



# 架空输电线路无人机 X 射线带电 检测技术导则

## 1 范围

本文件规定了 35 kV 及以上交流架空输电线路开展耐张线夹和接续管无人机 X 射线带电检测的技术要求、检测环境、检测系统、检测方法和检测报告等。

本文件适用于 35 kV 及以上水平排列或垂直排列交流架空线路耐张线夹和接续管无人机 X 射线带电检测。35 kV 及以上其他排列方式,直流输电线路参照执行。

## 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 12325—2008 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 13035 带电作业用绝缘绳索
- GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 17626 电磁兼容 试验和测量技术
- GB/T 35388—2017 无损检测 X 射线数字成像检测 检测方法
- DL/T 409 电力安全工作规程 电力线路部分
- T/CEC 526 架空输电线路 X 射线检测线夹压接质量评价技术导则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**无人机电机的 KV 值** **KV value of drone motor**

输入电压增加 1 伏特,无刷电机空转转速增加的转速值。

注:单位为 RPM/V。

### 3.2

**整体式工装** **integrated tooling**

X 射线机和数字探测器安装在一起,由 1 台无人机悬吊。

### 3.3

**分体式工装** **split type tooling**

X 射线机和数字探测器分别由 2 台无人机分开悬吊。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

RTK:实时差分定位(Real-time kinematic)

## 5 通用技术要求

### 5.1 一般要求

- 5.1.1 检测前应充分了解被检测对象、线路电压等级、单导线或子导线数、运行工况、设计资料、金具规格、材料及施工工艺等。
- 5.1.2 在无人机可能坠落区域边界设立安全警示标识。
- 5.1.3 基本人员宜配置飞手、导航员、检测人员各不少于1人。飞手应具备民用航空管理部门认可的与使用飞机相对应的飞行执照。X射线检测人员应持有RT(D)射线检测资格证。
- 5.1.4 带电检测工装材料宜采用高强度、质量轻的导电材料。带电检测工装应采用法拉第笼原理,屏蔽检测仪器。
- 5.1.5 检测仪器应使用无线信号连接,仪器应满足电磁兼容性能要求,应保证无线信号数据传输。
- 5.1.6 无人机负载应满足整体工装、射线机、X射线平板探测器等需要挂载在工装上设备的质量要求,应保证无人机带设备续航不少于15 min。
- 5.1.7 电磁兼容性应符合下列规定:
- a) 无人机及检测设备在强电磁场环境下的抗干扰能力应符合GB/T 17626的规定,试验结果评定应达到A级;
  - b) 电弧放电抗扰度试验参照DL/T 2153执行;
  - c) 无人机X射线检测系统在进出等电位过程以及等电位工作时,不应由于进出等电位过程产生的电弧及等电位时强电磁场的作用导致功能失效、部件损坏或停止工作。
- 5.1.8 无人机带电X射线检测应制定应急方案,成立应急指挥领导小组,建立应急沟通机制。

### 5.2 无人机适航管理

- 5.2.1 适航管理和风险分类应符合《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》的规定。
- 5.2.2 中大型无人机不应跨越铁路、高速、航道飞行。

### 5.3 无人机带电检测注意事项

- 5.3.1 无人机吊装用绳索应使用无金属芯绝缘绳索,绳索绝缘应通过体积电阻检测,绝缘绳耐压试验应符合GB/T 13035的规定。
- 5.3.2 无人机宜选择不跨越带电线路安全航线,需要跨越时,应提高跨越带电线路时飞行高度,避免带电线路对飞行影响。
- 5.3.3 空气湿度 $\geq 80\%$ 时不宜带电作业。
- 5.3.4 无人机宜配置RTK模块,水平方向导航定位精度应优于10 cm,垂直方向导航定位精度应优于10 cm。
- 5.3.5 无人机应具备搭载X射线无损检测仪等负载的功能,整体式工装无人机载重不应小于20 kg,分体式工装无人机载重不宜小于6 kg,载重安全系数不应小于1.2。
- 5.3.6 带电作业安全距离应符合附录A的规定。
- 5.3.7 现场带电检测工艺首次使用前应通过实验室验证,无人机X射线相间放电实验方案设计应符合附录B。

## 6 检测环境要求

### 6.1 无人机工作环境要求

#### 6.1.1 飞行条件

无人机应能在温度不低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 、不高于 $45^{\circ}\text{C}$ 、湿度不大于95%的环境下稳定可靠运行。能见度不应小于2 km。不应在有雷、雨、雾、雪的环境下检测。

#### 6.1.2 风力限制

整体式工装检测时风力等级不应超过5级(10 m/s),分体式工装检测时风力等级不应超过4级(8 m/s),无人机宜携带风速仪实测。

#### 6.1.3 地形和障碍物

无人机应具有避障功能。应防止碰撞风险,不应在复杂地形或有大型障碍物的区域进行飞行。

### 6.2 辐射防护

检测仪器、设备采集应满足辐射防护要求。检测人员应做好辐射防护措施。

## 7 无人机X射线检测系统

### 7.1 系统组成

7.1.1 检测系统应至少包括多旋翼无人机、X射线发射器、X射线平板探测器、无线通信设备、工作站数据分析系统。

7.1.2 采用电池供电时,厂家应提供电池设计工作时长和维护建议。

### 7.2 多旋翼无人机

7.2.1 螺旋桨宜采用4旋翼或6旋翼。多个螺旋桨均应提供升力,同时应抵消螺旋桨的自旋。相邻的桨旋转方向应相反,正反也相反。有字的一面应向上,桨叶圆润的一面应和电机旋转方向一致。

7.2.2 信号接收器应接收遥控器的信号,给飞控板。通过飞控板供电。

7.2.3 遥控器应控制俯仰(Y轴)、偏航(Z轴)、横滚(X轴)、油门(高度),不应小于4个通道。

7.2.4 飞控板应通过XYZ方向的陀螺仪和XYZ轴加速度传感器控制飞行器的飞行姿态。

7.2.5 飞控与图传宜使用2.4 GHz或5.8 GHz频段。宜选择支持2.4 GHz+5.8 GHz的自动切换的无人机,应启用抗干扰模式。

### 7.3 无人机挂载工装夹具

工装夹具宜采用金属挂钩进入等电位。

## 8 检测方法

### 8.1 检测方案

8.1.1 检测前应收集被检测对象设计图纸和塔高、相间距、运行方式、排列方式等资料。勘察现场确定

无人机起飞、降落地点,应按现场情况选择安全飞行航线。应避开周围杆塔线路电缆等影响飞行的不安全因素。

8.1.2 检测工装应根据不同电压等级输电线路单导线或分裂数选择,X射线应避免被钢制螺丝等遮挡。

8.1.3 应急处置措施应根据风险分析结果和可能的缺陷位置提出。

8.1.4 检测方案应根据检测需求选择,应确保检测图像能清晰可见。应选择合适飞行航线并同设备管理部门共同协商确定。

8.1.5 无人机X射线带电检测宜采用等电位作业。无人机X射线带电检测时不必退出重合闸。

8.1.6 直接给客户供电的终端线路、用户专线不宜采用带电检测,如带电检测应制定客户停电的应急预案。

## 8.2 X射线检测成套装置装配

8.2.1 选择合适无人机,无人机应确保搭载检测设备后能正常飞行至少15 min并有足够电量返航。

8.2.2 无人机应有FPV(第一人称视角,First Person View)摄像头便于飞手观察无人机飞行情况,宜在视距内运行。必要时可增加一架或多架小型无人机辅助观察飞行路线或被检位置。

8.2.3 X射线检测装置应与地面工作站电脑通过路由器无线连接。

8.2.4 必要时可架设RTK基站确保飞行安全。

8.2.5 无人机应通电检查,确认GPS(全球定位系统Global Positioning System的简写)、指南针、RTK信号正常。查看无人机电机的KV值,无人机电机的KV值越大,电机在同样电压下转速越高,提供的扭力越小。

8.2.6 选择合适工装应避免被导线卡住导致测试设备检测后无法脱离。无人机携带检测机器人时,无人机和机器人宜设计脱钩装置。

8.2.7 确定检测位置时,应选择合适长度绝缘绳将无人机与X射线检测装置连接,连接绳两端应具备自锁挂钩防止绳索脱落。带电检测应测量带电导线间距及导线分布情况,无人机接近、检测、脱离过程应始终保证无人机及检测设备满足附录A的电气安全距离。

## 8.3 检测流程

8.3.1 无人机通电检查正常,检测设备自检合格,应确保在地面能正常拍摄X射线图片。

8.3.2 起飞无人机,应选择合适安全飞行路线将无人机飞至检测位置,或通过机器人运动至待检测位置,设备布置见图1。

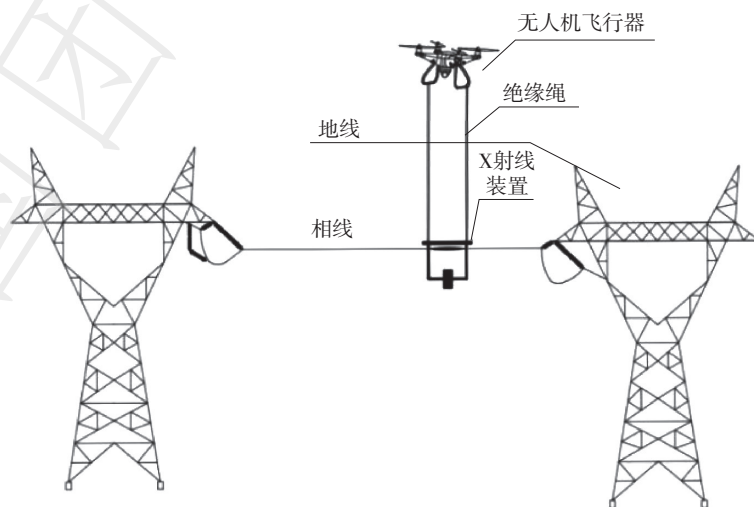


图1 无人机X射线检测现场设备布置示意图

8.3.3 控制辅助无人机运动至待测金具正前方或正后方,主无人机操作人员通过主无人机与辅助无人

机传回图像调整检测设备。检测设备应正确挂至待检测位置,或通过机器人运动至待检测位置。

8.3.4 检测设备挂好后工作人员开始在地面拍摄 X 射线检测图片,检测过程中无人机飞手应时刻观察无人机飞行姿态,注意无人机与其他线路及周围其他设备的距离,并随时调整。

8.3.5 控制检测用主无人机飞至辅助无人机对面处,主无人机通过辅助无人机视野安全摆放至检测目标处。完成图像采集后,应先由主无人机顺利返回起飞点,再将辅助无人机顺利返回起飞点。

8.3.6 检测过程中,无人机与检测设备之间的连接绳宜处于不受力状态。

8.3.7 地面工作站确认检测完成后,飞手将无人机飞回并选择合适地点降落。

#### 8.4 检测图片灵敏度要求

8.4.1 带电检测图像的丝型像质计灵敏度应达到 GB/T 35388—2017 规定的 A 级及以上。带电检测图像分辨率应采用双线型像质计测定,图像分辨率应达到 GB/T 35388—2017 规定的 A 级及以上。丝型像质计和双线型像质计宜选择铝材质,宜贴在 X 射线平板探测器侧,靠近检测区域中心位置但不得影响评定区的图像识别。

8.4.2 带电检测图像的灰度应符合 GB/T 35388—2017 的规定。图像归一化信噪比应符合 GB/T 35388—2017 中 7.9 的规定。透照几何参数的选择可参照 GB/T 35388—2017 中 7.2 执行,不清晰度应满足图像分辨率的要求。

8.4.3 耐张线夹带电检测图片应能分辨出钢锚空腔和钢芯分股,不应出现重影、线夹内部不清晰等问题。

#### 8.5 检测图片存储及处理

获取数字图像应采用不可更改的格式存储原图,原图格式存储宜为 RAW 格式,可另存为 BMP 或 JPG 格式,像素不宜低于  $1\,500 \times 3\,000$ 。必要时,可采用系统软件对数字图像进行灰度、对比度等进行调节,但不得更改关键图像信息。

#### 8.6 检测结果评价

缺陷判断及缺陷分级应按 T/CEC 526 执行。

### 9 检测报告

9.1 检测图像应规范保存,原始记录和检测报告也应同期保存。

9.2 检测报告应至少包括以下内容:

- a) 仪器型号;
- b) 透照参数;
- c) 检测日期;
- d) 检测地点;
- e) 检测单位及人员;
- f) 被检试件名称及型号;
- g) 被检试件编号;
- h) 检测部位;
- i) 缺陷描述;
- j) 图像资料;
- k) 电压等级;
- l) 温度;
- m) 湿度。

附 录 A  
(规范性)  
电气安全距离

### A.1 无人机、检测仪器带电作业

A.1.1 按照 DL/T 409, 检测仪器对地最小电气安全距离应符合表 A.1 的规定。

表 A.1 检测仪器对地最小电气安全距离

额定电压/kV	35	110	220	330	500	750	1 000
安全距离不小于/m	0.6	1.0	1.8(1.6)	2.6	3.4(3.2)	5.2(5.6)	6.8(6.0)
a) 220 kV 带电作业安全距离因受设备限制达不到 1.8 时, 经单位批准, 并采取必要的可采用括号内 1.6 m 的数值。 b) 海拔 500 m 以下, 500 kV 取 3.2 m 值, 但不适用于 500 kV 紧凑型线路。海拔在 500 m~1 000 m 时, 500 kV 取 3.4 m 值。 c) 5.2 m 为海拔 1 000 m 以下值, 5.6 m 海拔 2 000 m 以下的距离。 d) 1 000 kV 6.0 m 为边相值, 6.8 m 为中相值。							

A.1.2 无人机、检测仪器与相邻导线的最小电气安全距离应符合表 A.2 的规定。

表 A.2 无人机、检测仪器与相邻导线的最小电气安全距离

额定电压/kV	35	110	220	330	500	750
安全距离不小于/m	0.8	1.4	2.5	3.5	5.0	6.9(7.2)
注: 750 kV 对相邻导线的最小距离, 6.9 m 为边相值, 7.2 m 为中相值。						

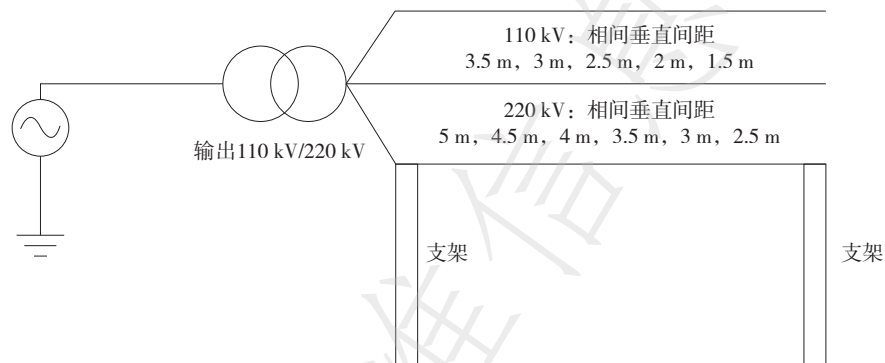
A.1.3 无人机、检测仪器对最小组合间隙应符合表 A.3 的规定。

表 A.3 最小组合间隙

额定电压/kV	110	220	330	500	750	1 000
组合间隙不小于/m	1.2	2.1	3.1	3.9	4.9	6.9(6.7)
注: 1 000 kV 最小组合间隙, 6.7 m 为边相值, 6.9 m 为中相值。						

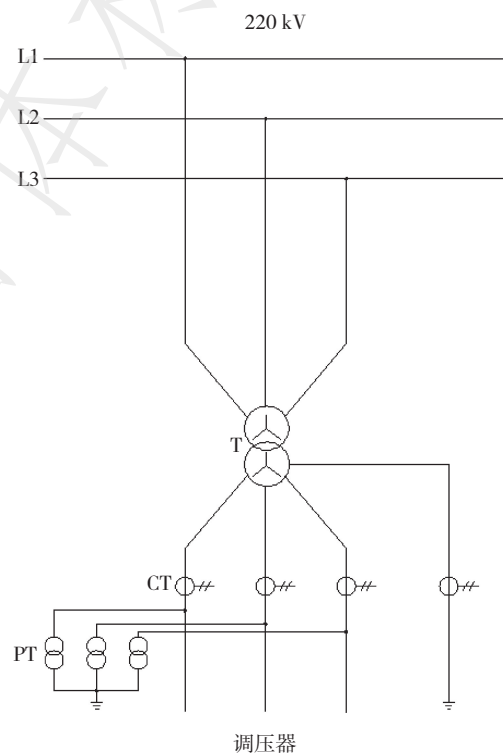
**附录 B**  
(规范性)  
**无人机 X 射线相间放电实验方案设计**

**B.1** 导线采用垂直排列,标称电压 110 kV 下分别调整垂直线间距离为 3.5 m, 3 m, 2.5 m, 2 m, 1.5 m。标称电压 220 kV 下分别调整垂直线间距离为 5 m, 4.5 m, 4 m, 3.5 m, 3 m, 2.5 m。以上场景下进行无人机挂线操作,通过变压器低压侧电气量、紫外光等检测是否相间放电。实验原理图如图 B.1 所示。



**图 B.1** 实验原理图

**B.2** 一次系统原理图如图 B.2 所示。



**图 B.2** 一次系统原理图

B.3 导线间距通过滑动绝缘子调节,如图 B.3 所示。支柱绝缘子滑动支架设计图如图 B.4 所示。

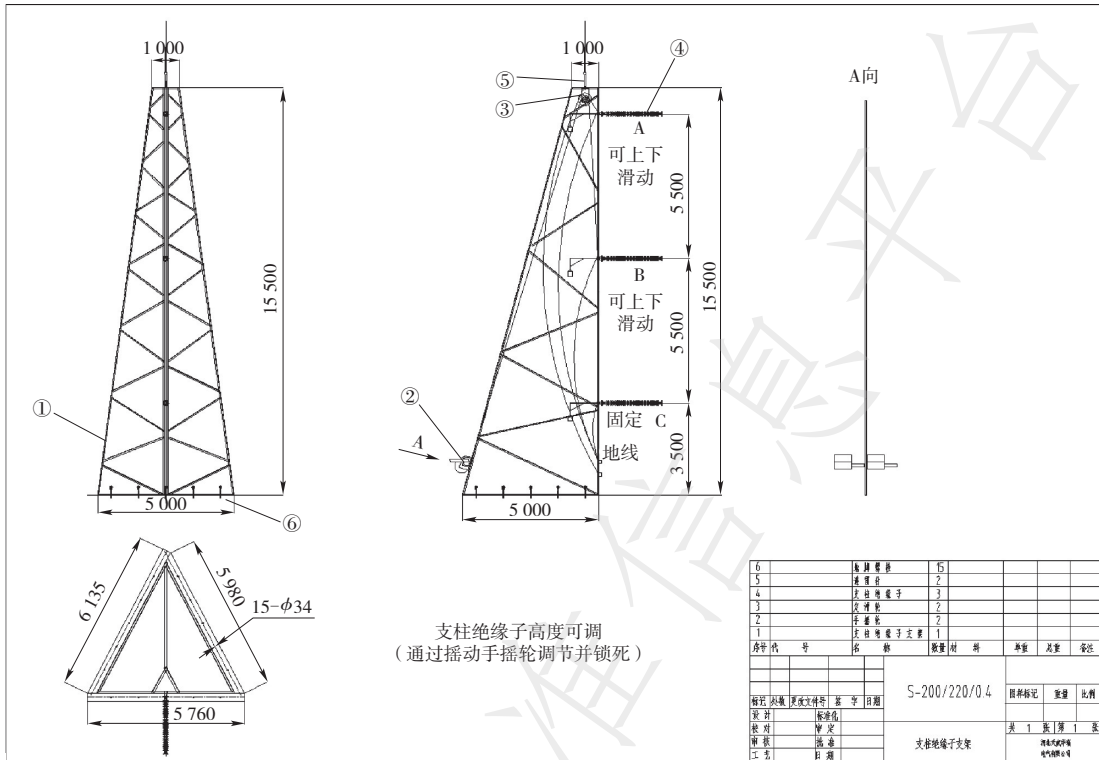


图 B.3 可调高度支柱绝缘子

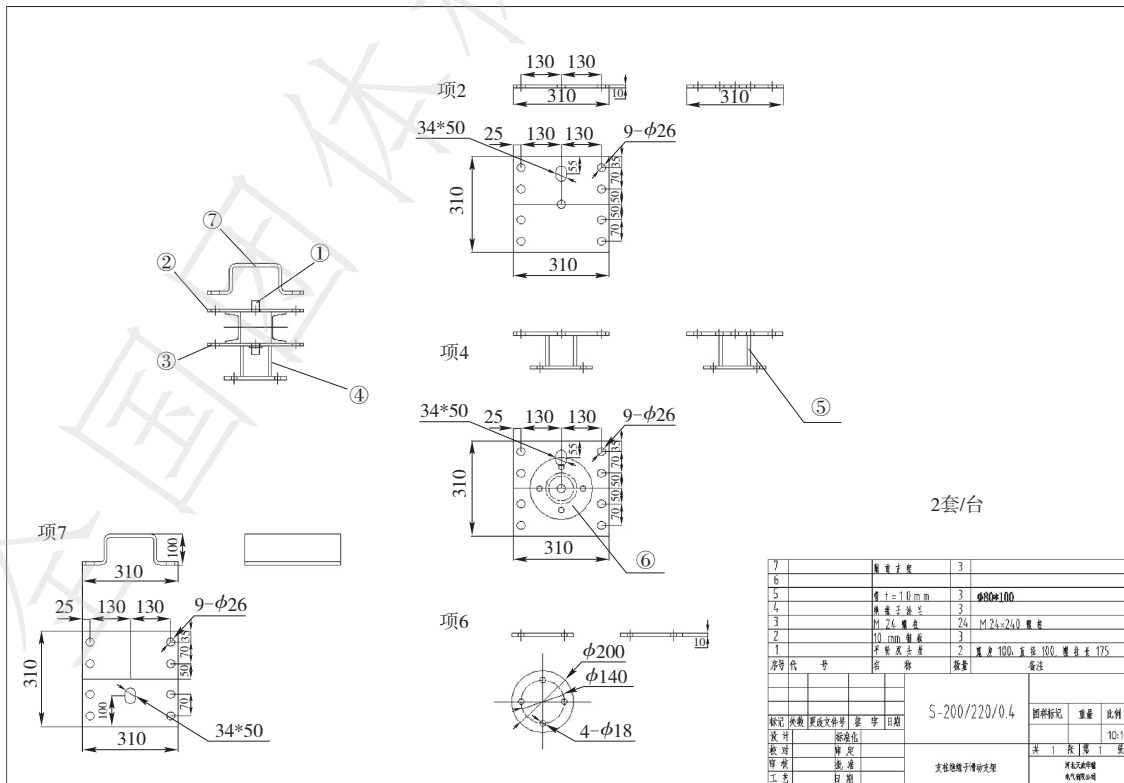


图 B.4 支柱绝缘子滑动支架设计图

**B.4** 线路长度设计不少于 25 m,采用钢芯铝绞线进行试验,设计图如图 B.5 所示。其中 A、B 相高度可调,C 相距离地面高度固定为 3.5 m。连接线示意图如图 B.6 所示。

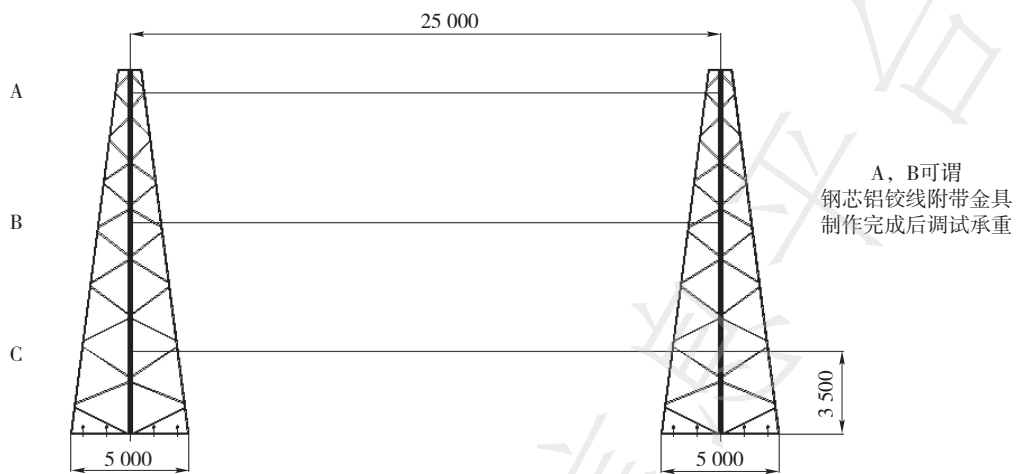


图 B.5 线路设计图

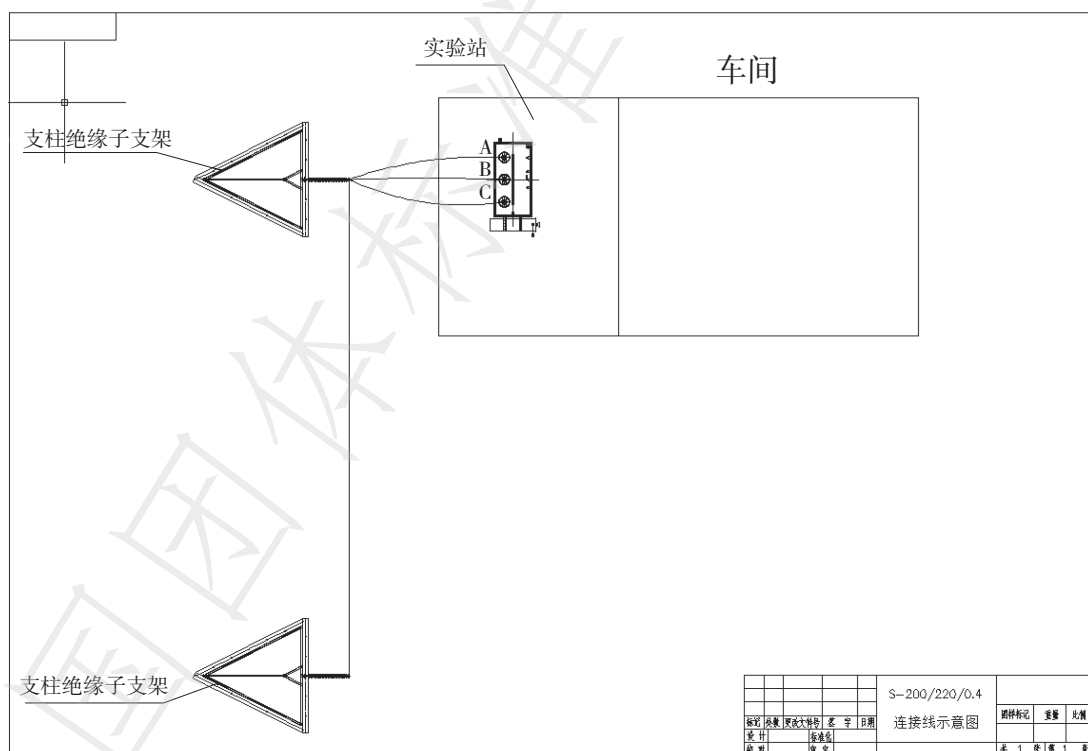


图 B.6 连接线示意图

**B.5** 35 kV 及以上供电电压正负偏差绝对值之和不应超过标称电压的 10%,符合 GB/T 12325—2008 中 4.3 的规定。

**B.6** 110 kV 电压等级的总谐波畸变率不应超过 2.0%,谐波含有率不超过 1.6%,偶次谐波含有率不超过 0.8%,符合 GB/T 14549—1993 中表 1 的规定。

参 考 文 献

- [1] DL/T 2153 输电线路用带电作业机器人
  - [2] 民用无人驾驶航空器运行安全管理规则(CCAR-92)
-







中国国际科技促进会  
团体标准  
架空输电线路无人机X射线带电  
检测技术导则

T/CI 1153—2025

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 23 千字  
2025年11月第1版 2025年11月第1次印刷

\*

书号:155066·5-17505 定价 43.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107



T/CI 1153-2025