

中国电工技术学会标准

电缆隧道四足机器人智能巡检技术应用 导则

Application Guidelines for Intelligent Inspection Technology of
Quadruped Robot in Cable Tunnel

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电工技术学会

发布

目 次

前 言	2
电缆隧道四足机器人智能巡检技术应用导则	3
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 巡检系统	3
4.1 巡检系统组成	3
4.2 巡检系统功能	3
4.2.1 基本要求	3
4.2.2 检测功能	4
4.2.3 异常告警功能	4
4.2.4 一键报告功能	4
4.2.5 历史数据查询功能	4
4.2.5 应急辅助研判功能	5
4.2.6 双向喊话通信功能	5
4.2.7 一套系统控制多个四足机器人功能	5
4.2.8 接口扩展功能	5
4.3 网络信息传输	5
4.4 硬件参数	5
4.4.1 电缆隧道四足机器人	5
4.4.2 双光谱云台	5
4.4.3 机械臂	5
4.4.4 局放设备	6
4.4.5 气体检测仪	6
4.4.6 双向语音通信设备	6
4.4.7 无线网络设备	6
5 巡检设备要求	6
6 巡检作业要求	6
6.1 人员要求	6
6.2 环境要求	6
6.3 作业要求	7
7 巡检方式	7
7.1 正常巡检	7
7.2 特殊巡检	7
7.3 应急辅助研判	7
8 巡检内容	7
8.1 正常巡检	7
8.2 特殊巡检	8
8.3 应急辅助研判	8
9 巡检资料整理	8

前 言

本指导性技术文件由国家电网公司设备部提出并解释。

本指导性技术文件由中国电工技术学会归口。

本指导性技术文件起草单位：国网浙江省电力有限公司、国网杭州供电公司、江苏明月软件技术股份有限公司。

本指导性技术文件主要起草人：×××、×××、×××。

★本指导性技术文件首次发布。

★本指导性技术文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电工技术学会。

电缆隧道四足机器人智能巡检技术应用导则

1 范围

本文件规定了电力电缆隧道四足机器人智能巡检的技术原则，主要包括巡检系统、巡检作业要求、巡检方式、巡检内容和巡检资料整理。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 2900.10 电工术语 电缆
- GB 26859 电力安全工作规程 电力线路部分
- GB/T 28706 无损检测 机械及电气设备红外热成像检测方法
- DL/T 1253 电力电缆线路运行规程
- DL/T 5484 电力电缆隧道设计规程
- GB/T 7354-2018 高电压试验技术 局部放电测量

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

电缆隧道四足巡检机器人 quadruped inspection robot in cable tunnel

由移动载体、通信设备和检测设备等组成，采用远程控制或全自主运行模式，用于电缆隧道设备巡检作业的移动巡检装置。

电缆隧道四足机器人巡检系统 quadruped robot inspection system in cable tunnel

由电缆隧道四足巡检机器人和监控后台组成，能够通过全自主或远程控制模式进行电缆隧道巡检作业的系统。

4 巡检系统

4.1 巡检系统组成

4.1.1 电缆隧道机器人巡检系统应至少配置巡检机器人、各种检测设备及监控后台等组件。

4.1.2 电缆隧道巡检机器人应至少配备可见光摄像机、红外热成像仪和局放检测装置、气体检测装置等检测设备。

4.2 巡检系统功能

4.2.1 基本要求

4.2.1.1 自主导航

四足机器人应具备自主导航定位功能，能实时定位并按照预先设定路线自主行进和停靠，进而达到按照预设路径开展巡检工作的要求。

4.2.1.2 运动性能

四足机器人应具有较强的运动稳定性，特别是在复杂的路段需要有较高的抓地能力和稳定性。

4.2.1.3 安全防护

a) 自主避障防碰撞

四足机器人应具备防碰撞功能，能在行走过程中遇到障碍物时及时停止或绕行。

b) 急停设置

手动操控时，在任何状态下，按下急停按钮都能使四足巡检机器人立即停止。

c) 设备自检

四足巡检机器人工作前和工作过程中可以通过自检方式监控当前状态下各个模块的功能是否正常，包括电池模块、网络连接模块、传感器等。

d) 故障记录

在机器人发生故障时能记录故障时间、故障模块及故障类型。

4.2.1.4 自主充电

四足巡检机器人具备自主充电功能，电池电量不足时能够自动返回充电装置，能够与充电设备配合完成自主充电。

4.2.2 检测功能

4.2.2.1 自主巡查巡视

四足机器人应具备可见光检测功能，能对设备外观、隧道环境等进行检测，并将照片、视频实时上传至监控后台。

4.2.2.2 高精测温

四足机器人应具备高精红外测温功能，能对电缆本体和接头温度等进行检测，能精准识别出电缆区域并找到电缆表面温升点，发现异常温升点时能实时将数据上传至监控后台并告警。红外测温分辨率不低于 $640 * 512$ 。

4.2.2.3 局放检测

四足机器人应具备移动式局放检测功能，可覆盖巡检路段的电缆接头及本体。局放传感器灵敏度应小于等于 $3Pc$ 。

4.2.2.4 气体检测

四足巡检机器人应携带气体检测仪，可以随时对隧道内的空气环境与温湿度进行分析并得出结果，气体分析包括检测空气含氧（O₂）量浓度、以及有毒气体（CO，H₂S，CH₄）浓度。

4.2.3 异常告警功能

四足巡检机器人在巡检过程中，若发现设备异常、检测数据异常等，应及时上传数据并在管理后台实时告警提示。

4.2.4 一键报告功能

每次巡检完成后应能够马上在管理后台看到巡检记录，并可以快速的一键生成巡检报告，方便运维人员进行及时汇报和处置。

4.2.5 历史数据查询功能

历史巡检中采集的所有检测数据，都应在数据查询模块中可查询。并可以按照不同检测数据类型来

查询数据，也可以按照隧道、或某相电缆的维度来查询数据。

4.2.5 应急辅助研判功能

在现场应急时，可以远程通过四足巡检机器人操控页面，操纵四足巡检机器人到达现场，利用可见光与红外的实时视频侦测现场状况。

4.2.6 双向喊话通信功能

巡检系统应具有双向通信功能，能实现管理后台和四足巡检机器人之间的实时双向喊话通信。

4.2.7 一套系统控制多个四足机器人功能

巡检系统应具有同一套系统管控多个四足机器人巡检终端的能力，以满足在不同隧道、或同一条隧道的不同巡检段，投放多台四足巡检机器人的场景。

4.2.8 接口扩展功能

巡检系统应具备一定的扩展能力，便于功能扩展及与其他系统进行接口及联动。

4.3 网络信息传输

隧道内通过无线控制器、工业交换机、双频无线接入点、光模块等设备，架设起无线网络。从无线网交换机以有线方式接入到指定专网。电缆隧道四足机器人在隧道内通过无线网络连接，达到实时数据上传、接收中控平台指令的目的。也可以通过 5G 网络实现数据传输，通过基站将数据上传到云端服务器，服务器迅速响应，进行数据分析、存储和反馈，让数据处理变得更加智能化和自动化。

4.4 硬件参数

4.4.1 电缆隧道四足机器人

本体重量不大于 50kg，确保电缆隧道四足机器人具备足够的不小于 20kg 负载能力同时保持轻巧，确保机器人能够在电缆隧道内灵活移动。单次充电正常运行不小于 2.5h，满电巡视加检测不小于 1.6h，保证巡检工作的连续性。具备快速移动能力，最大速度不低于 1.2m/s，确保机器人能够快速移动到巡检位置。

可爬行不低于 15° 的斜坡，具备不低于 20cm 高度的越障能力，适应电缆隧道内各种地形。具备不低于 IP66 的防护等级，确保机器人在潮湿、灰尘等恶劣环境下仍能正常工作，有效保护内部电子元件。采用先进的导航技术，为电缆隧道四足机器人提供精确的导航和避障能力。支持稳定、可靠的无线通信，外接通讯接口支持 Ethernet、WiFi、USB、RS485 或 RS232，保障数据传输的安全性。

4.4.2 双光谱云台

搭载双光谱云台，可见光图像分辨率不小于 2688*1520，热成像仪分辨率不低于 640*512，热灵敏度不低于 ±0.02℃，测温范围不低于 -20℃~150℃，能够清晰捕捉电缆及附件设施的图像，支持实时视频传输和存储。

4.4.3 机械臂

机械臂工作半径不小于 900mm，最大臂展不小于 1000mm，以适用隧道内不同范围的检测任务，自由度不小于 6 轴，自由度越高，才能够完成更加复杂的任务。重复定位精度不大于 ±0.05mm，以保证机械臂的工作精度和稳定性。

4.4.4 局放设备

局放设备具备带宽不低于100K—100MHz，采样频率不低于100Ms/S、同步分辨率不低于14位；检测通道灵敏度不大于3pC、同步频率不低于10Hz~1KHz，用于检测高频局放电磁波信号，可用于高压电缆的巡检。

具备不低于IP68的防护等级，确保局放设备在潮湿、灰尘等恶劣环境下仍能正常工作，有效保护内部电子元器件。检测设备应通过中国电科院认证，可以通过移动检测设备的方式并根据局放图形的极性 & 局放大小进行准确定位。

4.4.5 气体检测仪

能够检测多种气体，包括但不限于氧气(O₂)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H₂S)、甲烷(CH₄)、温度、湿度等，具体检测范围不低于以下范围：

氧气(O₂):0-30%VOL；一氧化(CO):0-1000ppm；

硫化氢(H₂S):0-100 ppm；

甲烷(CH₄):0-100%LEL；

温度:-40-120° C；湿度:0-100%RH

气体检测仪的精确度不大于±2%FS，以保证检测的准确性。气体检测仪具有数据记录和传输功能，可以将检测结果存储在内部存储器中，并通过以太网等方式将数据传输到计算机或其他设备。

4.4.6 双向语音通信设备

语音终端设备不限于自动应答、对讲、支持外部电源供电、壁挂式安装等功能。宽带不限于 ADC/DAC 16KHz 采样，窄带编码不限于 G. 711a/u, G. 729AB, iLBC、宽带编码不限于 G. 722, Opus，相关协议不限于 SIP2.0 over UDP/TCP/TLS、 RTP/RTCP/SRTP。

电话机具备不少于 20 条 SIP 线路，不限于视频来电、鹅颈麦克风、以太网供电，通话记录不少于 1000 条，内置蓝牙模块、支持 Wi-Fi Dongle、对讲功能、重拨、自动应答等功能。

4.4.7 无线网络设备

无线网络应不小于30M/S实时带宽，以满足视频等数据的实时传输。

5 巡检设备要求

- a) 投入巡检作业的四足巡检机器人应通过型式试验和出厂试验，检测合格。
- b) 四足机器人巡检系统应由专人负责，定期进行维护和保养。
- c) 供应商应提供完善的产品用户资料，包括巡检系统软硬件版本信息、出厂检验报告、使用手册等。

6 巡检作业要求

6.1 人员要求

- a) 作业人员应具有电缆隧道巡检经验，熟悉电力安全工作规程和有关技术标准。
- b) 作业人员应通过电缆隧道机器人巡检系统的相关操作培训。
- c) 作业人员应熟悉电缆隧道巡检机器人系统的基本工作原理、技术参数和性能，掌握系统的操作程序和日常维护方法。

6.2 环境要求

- a) 机器人巡检系统应能满足按照电力电缆隧道设计规程关于电缆隧道巡检的要求。
- b) 电缆隧道四足机器人应满足电缆隧道的坡度、弯度、尺寸等条件要求。
- c) 电缆隧道四足机器人应满足电缆隧道防火门通行要求，具备条件的可对防火门进行适应性改造，以配合电缆隧道四足机器人通过。
- d) 隧道内需检测的设备、仪表、环境缺陷不宜被遮挡。

6.3 作业要求

- a) 根据电缆隧道状态及巡检要求，提前编制机器人的巡检计划，指导巡检工作。
- b) 电缆隧道四足机器人巡检作业应满足电力安全工作规程的相关规定。

7 巡检方式

7.1 正常巡检

巡检系统按一定周期对电缆、电缆附属设备以及电缆隧道环境等进行的机器人自主巡检。

7.2 特殊巡检

在特殊情况下或根据特殊需要，安排四足机器人对电缆隧道进行自主巡检。

7.3 应急辅助研判

在应急情况下根据需要，远程操控四足机器人对现场进行侦测，及时了解现场实时状况，为应急处置提供辅助研判信息。

8 巡检内容

8.1 正常巡检

正常巡检内容及缺陷描述见表 1。

表 1 正常巡检内容及描述

工作内容	具体巡检内容	巡检方式
通道巡视	土建结构	可见光移动拍摄
	沉降裂缝	可见光移动拍摄
	渗漏水	可见光移动拍摄
附属设施检查	通风设施	可见光拍照确认
	排水设施	可见光拍照确认
	照明设施	可见光辅助确认
	支架	可见光移动拍摄
	槽盒	可见光移动拍摄
	爬梯	可见光移动拍摄
	井盖	可见光移动拍摄
	电子井盖	可见光拍照确认
	防火门	可见光移动拍摄
	出入口	可见光移动拍摄

	门禁	可见光拍照确认
	气体监测	可见光拍照确认
	消防设施	可见光拍照确认
电缆带电检测	红外测温	红外热像仪测温
	局部放电	移动式局部放电设备检测（如有）
	护层环流	移动式护层环流监测（如有）

8.2 特殊巡检

特殊巡检内容及故障描述见表 2。

表 2 特殊巡检内容及描述

工作内容	具体巡检内容	巡检方式
水情水患	渗漏水	可见光移动拍摄
	积水	可见光移动拍摄
	排水设施	可见光辅助确认
	出入口	可见光移动拍摄
	逃生口	可见光移动拍摄
	投料口	可见光移动拍摄
	土建结构	可见光移动拍摄
火情火警	消防灭火系统动作情况	可见光辅助确认
	消防报警系统动作情况	可见光辅助确认
	火情区域巡视	可见光移动拍摄
	有毒有害气体检测	气体检测设备（如有）
外力破坏	通风设施	可见光辅助确认
	土建结构	可见光移动拍摄
	沉降裂缝	可见光移动拍摄
	渗漏水	可见光移动拍摄
异常运行（电缆）	护层环流	移动式护层环流监测（如有）
	红外测温	红外热像仪测温
	局部放电	移动式局部放电设备检测（如有）
	有毒有害气体检测	气体检测设备（如有）
异常运行（附属设施）	护层环流	移动式护层环流监测（如有）

8.3 应急辅助研判

应急场景根据火情、电缆故障等情况不同，远程操纵四足机器人抵近现场侦测实时状况。可记录并实时上传后台照片、视频、有毒有害气体等数据。

9 巡检资料整理

- a) 电缆隧道四足机器人巡检作业后，巡检系统监控后台应能自动记录本次巡检数据和相关信息并存档，必要时能自动生成电缆隧道机器人巡检报告。
- b) 巡检作业完成后，应对巡检中发现的异常数据进行核实，及时处理设备缺陷和安全隐患。
- c) 宜定期利用巡检系统对巡检数据进行统计分析，了解电缆隧道运行状态，制定防范措施。