

ICS 25.040.30
CCS N 19

T/SHIIOTA

上海市工业互联网协会团体标准

T/SHIIOTA 012—2025

智能防爆巡检机器人设计指南

Design guide for intelligent explosion-proof inspection robots

2025 - 12 - 30 发布

2026 - 01 - 30 实施

上海市工业互联网协会 发布

目 次

前言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义、缩略语	2
4 需求分析与设计原则	2
5 功能设计	4
6 部件设计	6
附录 A （资料性） 智能分析系统技术架构参考	9
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。

本文件由上海市工业互联网协会提出并归口。

本文件起草单位：上海天然气管网有限公司、华东师范大学、上海仪电人工智能创新院有限公司、恒为科技（上海）股份有限公司、上海华东电信研究院、工业互联网创新中心（上海）有限公司、上海市质量和标准化研究院、华院计算技术（上海）股份有限公司、上海工程技术大学、上海墨百意信息科技有限公司。

本文件主要起草人：张鲁冰、叶峻、刘雨虹、孟令斌、陈晓轩、王英、凌欣、牛利伟、沈敏、常永波、彭莉、白亭亭、刘晶晶、张正敏、袁梦、石念、余炯、沈伟林、魏丹、陈云琳、陆敏敏。

智能防爆巡检机器人设计指南

1 范围

本文件给出了智能防爆巡检机器人在设计过程中的需求分析与设计原则以及功能设计和部件设计需考虑的因素。

本文件适用于智能防爆巡检机器人的初步设计。

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 3836.2-2021 爆炸性环境 第2部分：由隔爆外壳“d”保护的设备

GB/T 3836.3-2021 爆炸性环境 第3部分：由增安型“e”保护的设备

GB 3836.15-2024 爆炸性环境 第15部分：电气装置设计、选型、安装规范

GB/T 12643-2025 机器人 词汇

GB/T 26950.1-2011 防爆工业车辆 第1部分：蓄电池工业车辆

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 12643-2025、GB/T 26950.1-2011界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

机器人 robot

具有一定自主能力，执行运动、操作或定位的可编程机构。

[来源：GB/T 12643-2025, 3.1]

3.1.2

爆炸性环境 explosive atmospheres

可能发生爆炸的环境。

[来源：GB/T 26950.1-2011, 3.2]

3.1.3

防爆 explosion-proof

预防爆炸的发生和爆炸发生后减小危害程度的技术。

3.1.4

智能防爆巡检机器人 intelligent explosion-proof inspection robot

一种专为爆炸性环境中执行巡检任务而设计的具有防爆、导航定位、智能感知、智能数据分析、智能预警等功能的特种机器人。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BMS：电池管理系统 Battery Management System

IMU：惯性测量单元 Inertial Measurement Unit

4 需求分析与设计原则

4.1 需求分析

4.1.1 概述

基于场景应用进行需求分析可作为智能防爆巡检机器人设计的输入依据，具体包括环境与防爆需求、巡检任务需求、智能化需求、安全与可靠性需求等。

4.1.2 环境与防爆需求

环境与防爆需求分析包括但不限于：

- 爆炸性环境分析：识别目标场景中爆炸性环境的类型（参考 5.2.2），可据此进行防爆功能设计（参考 5.2.3）；
- 其他环境分析：评估环境的温度、湿度、腐蚀性、地形复杂度等条件，可据此进行防爆和作业功能设计；
- 电磁环境分析：评估作业区域的电磁干扰强度对机器人通信与传感系统的影响，可据此进行无线通信系统和智能传感器的抗电磁干扰设计。

4.1.3 巡检任务需求

巡检任务需求分析包括但不限于：

- 定位与导航功能分析：明确机器人的定位精度、复杂环境下的鲁棒性、系统可靠性及多机协同要求，可据此进行定位导航系统与相关传感器设计；
- 巡检目标分析：明确机器人的检测对象（如特定气体、温度、图像、声音、目标物等）及其特征，可据此进行传感器（信息采集设备）的选项和设计；
- 性能指标分析：明确巡检任务有关的信息处理精度、响应效率等要求，可据此进行部件设计和选型；
- 工作模式分析：明确自主、远程或协同作业的比例和要求，以确定信息传输、端云协同（云、端分别处理哪些信息）等技术选型。

4.1.4 智能化需求

智能化需求分析包括但不限于：

- 智能感知与识别能力分析：明确对巡检目标（如仪表读数、设备状态、气体泄漏源、异常声音、温度分布、入侵物等），可据此进行智能化技术（如自动检测、识别与分类）的准确率、置信度及响应速度等指标的设置；
- 自主决策与规划能力分析：明确机器人在复杂或动态环境中的作业要求，可据此设置自主决策与规划能力的性能要求；
- 自适应能力分析：明确机器人系统通过场景数据或运行数据进行自学习或模型优化以提升巡检效率与准确性的能力要求；
- 人机智能交互能力分析：明确机器人支持的自然语言交互、指令理解、任务示教、协同标注等人机交互模式与性能要求。

4.1.5 安全与可靠性需求

安全与可靠性需求分析应包括但不限于：

- 防爆安全分析：依据环境需求，确定机器人整体及各部件的防爆等级、保护类型（参考 GB/T3836.2-2021 和 GB/T3836.3-2021）和温度组别（T 组别）要求；
- 应急处理分析：识别可能的风险，考虑相应的安全风险应急处理相关功能（如急停、自主避障、灾难处置）的设计；
- 信息安全分析：综合评估信息安全需求（如敏感数据处理、数据安全传输等），进行通信加密、身份认证、访问控制及数据保护等信息安全设计；
- 可靠性要求分析：根据作业环境、巡检任务等设计机器人平均无故障工作时间、可用性、可维护性等方面的目标及其实现技术。

4.2 设计原则

4.2.1 环境适应性

基于工作环境的高风险性，根据具体环境要求进行智能防爆巡检机器人的功能设计，以确保机器人能在不同环境下正常工作。

4.2.2 本质安全性

重点考虑智能防爆巡检机器人的本质安全性，主要包括机械安全（如防爆结构、运动防护）和电气安全（如防爆电路、过载保护）等。

4.2.3 信息安全保护

重点考虑系统的通信安全、信息保护等信息安全能力，以实现信息安全保护目的。

4.2.4 功能完整性

系统考虑智能防爆巡检机器人的功能完整性，核心功能包括巡检作业功能、防爆功能、智能感知与分析功能、通信功能、电池管理功能等。

4.2.5 智能化

智能化是智能防爆巡检机器人的核心能力，采用先进智能技术以提升机器人的各项功能，如自主导航、智能分析、自主决策、故障诊断、智能交互等。

5 功能设计

5.1 巡检作业功能

5.1.1 概述

巡检作业需要实现对机器人的定位、导航、运动控制等基础功能的实现，还需要配合防爆机器人所携带的传感器对气体、图像等检测对象进行实时分析、采集和处理。

5.1.2 定位

5.1.2.1 定位的目的是确定机器人在环境地图中的位置，通过安装在机器人上的内部传感器或者外部传感器感知机器人自身状态以及外部环境。

5.1.2.2 机器人定位是通过环境感知信息（如视觉数据、激光雷达数据等）和里程计与 IMU 的位姿数据等多源信息融合实现在已构建的地图上确定机器人的位置。其步骤在于：

- a) 采集视觉信号或进行环境感知，确定机器人当前所在位置。在弱光、烟雾等复杂环境下，宜考虑采用视觉、测距等多传感器融合定位方式，以增强位置判断的鲁棒性；
- b) 融合里程与 IMU 传感器数据进行相对定位，对获取的位置进行修订，实现高精度定位。

5.1.3 导航

导航的目的是基于地图实现机器人移动到目标位置。导航需考虑的因素包括：

- 路径规划：机器人到达目标位置的路径规划；
- 实时避障：机器人在移动过程中根据局部动态状态进行局部路线设计。

5.1.4 运动控制

运动控制的目的是将定位和导航等信息转化成机器人的控制信号，从而驱动机器人运动。运动控制需考虑的因素包括：

- 移动控制：根据定位和导航对机器人进行的运动控制，包括机器人前、后、左、右运动方向的控制，以及机器人运动速率的控制；
- 作业控制：根据作业要求对机器人进行运动控制，比如旋转、上升、下降等控制。

5.2 防爆功能

5.2.1 防爆目的

通过设计防爆功能确保机器人在爆炸性环境中运行时，满足：

- 自身不成为点燃源（如避免电火花、高温表面引燃爆炸性物质）；
- 能稳定应对环境中潜在的爆炸风险，保障机器人自身及周边设备的安全；
- 维持巡检任务的连续性，确保爆炸性环境下的机器人能按计划完成工作目标。

5.2.2 防爆场景分类

智能防爆巡检机器人的应用场景依据爆炸性环境类型划分为：

- 爆炸性气体环境：存在可燃气体（甲烷、丙烷、汽油蒸气等）与空气混合形成的爆炸性环境；
- 爆炸性粉尘环境：存在可燃性粉尘（如粮食粉尘、金属粉尘、合成树脂粉尘等）与空气混合形成的爆炸性环境；
- 其他爆炸性环境：除了爆炸性气体、粉尘环境以外的可能存在其他爆炸物（如爆炸性蒸气、薄雾或可燃性纤维和空气的混合物等）或多种爆炸物混合的爆炸性环境。

5.2.3 防爆功能设计考虑因素

5.2.3.1 防爆外壳

5.2.3.1.1 概述

依据机器人作业环境的防爆场景分类（参考6.2）进行防爆外壳需求分析，设计机器人在爆炸性环境中确保自身安全的功能，宜通过表面设计、结构设计等功能设计实现机器人防爆功能。

5.2.3.1.2 爆炸性气体环境

机器人在爆炸性气体环境中的防爆功能设计需考虑的因素：

- 外壳与结构防爆功能可参考GB/T3836.2-2021或GB/T3836.3-2021的壳体设计要求进行设计，确保内部电火花不会引燃外部气体；
- 申请针对目标环境的防爆合格证。

5.2.3.1.3 爆炸性粉尘环境

机器人在爆炸性粉尘环境中的防爆功能设计需考虑的因素：

- 进行防尘侵入与表面防护，外壳须达到规定的防尘等级，防止粉尘侵入。外壳表面宜光滑，避免粉尘积聚；
- 进行防静电设计，采用抗静电材料、有效接地等措施防止静电积聚放电；
- 申请针对目标环境的防爆合格证。

5.2.3.1.4 其他爆炸性环境

当机器人应用于存在多种爆炸性物质或特殊介质的复杂环境时，设计宜综合考虑5.2.3.1.2和5.2.3.1.3的情形，采取更高等级的保护措施，并申请针对目标环境的防爆合格证。

5.2.3.2 引爆特征检测

具备可燃气体浓度、粉尘浓度、环境温度等环境参数的实时感知能力，以及烟雾、火焰等引爆特征的检测功能，且检测精度与响应速度满足及时性（先于爆炸发生时间）要求。

5.2.3.3 最高表面温度控制

需考虑机器人表面最高温度的控制，确保其符合适用爆炸性环境的温度组别（T组别）要求，可采用热源管理、散热优化与表面材料选型等措施，从而避免机器人表面成为潜在点燃源。

5.2.3.4 防爆应急与安全协同

防爆应急与安全协同功能：主要包括：

- 应急响应：宜根据风险等级设计分级报警与响应机制，如预警、停机、自主撤离等。当机器人检测到环境参数超标或自身防爆状态异常时，自动按照分级响应机制执行停机、断电、撤离危险区域等操作；
- 人机安全协同：支持与现场人员、监控中心实现安全信息交互，满足必要时人工介入与协同

处置的需求；

- 安全状态记录：持续记录安全相关事件与操作日志，支持事后分析；
- 追溯功能：具备防爆过程记录和追溯的功能，满足防爆认证与定期审核要求。

5.3 智能感知与分析功能

智能分析系统要求利用人工智能等技术实现机器人的全部作业过程的智能化，附录A.1给出了智能分析系统技术架构的一个实例。智能分析系统的核心功能包括：

- 智能感知：利用各种智能传感器，对环境信息、作业状态等数据进行采集和预处理；
- 环境分析：通过视觉分析等智能化手段分析环境，识别目标物，为机器人自适应导航和自动避障提供支持；
- 智能化作业：对作业要求采集的信息进行深度分析，进行智能化决策，实现智能化作业；
- 智能化状态识别：对传感器采集的信息进行综合智能化分析，实时识别机器人、作业环境等对象的状态；
- 人机智能协作：宜提供人机交互接口，支持人员标注、任务重定义、结果确认等协同操作。

5.4 无线通信功能

5.4.1 无线通信用于实现数据传输，主要包括：

- 机器人作业过程中采集的视频、声音、气味等数据；
- 控制中台的控制指令；
- 机器人与控制中台的交互信息；
- 其他重要数据，如机器人自身状态数据、机器人定位与轨迹数据、系统日志数据等。

注：机器人自身状态数据包括电量、续航预估、防爆部件状态、故障代码等；机器人定位与轨迹数据包括实时位置、巡检路径、坐标信息等。

5.4.2 无线通信功能设计需考虑的因素包括：

- 作业区域的网络覆盖情况：作业区域的网络覆盖有无、覆盖强弱是机器人无线通信系统的基础，尽可能利用已有网络实现机器人的通信，若作业区域无网络覆盖，则需要考虑重新设计；
- 不同作业区域的不同带宽需求：根据上一步的分析和作业需求（重点考虑5.4.1提及数据的信息体量），可选择组合型无线网络设计方案（如精度要求不高、传输信息体量小的区域使用更经济的低带宽方案，反之可选择高带宽方案）；
- 经济效益：在满足机器人作业时通信带宽需求的情况下，尽可能降低无线通信系统的成本，提高系统的经济性。

5.5 电池管理功能

移动电源是机器人的核心供能系统，电池管理的目的是自动化地检测电池状态，并进行电量告警、故障检测、自动充电等操作。电池管理需考虑的因素包括：

- 电池电量管理：实时监测电池电量，当电量低时进行电量告警；
- 电池故障检查：实时检测电池状态，当出现故障时进行故障告警；
- 自动充电管理：机器人自动导航到达固定的充电位置并实现自动充电。

6 部件设计

6.1 概述

智能防爆巡检机器人的核心组成部件包括机器人底盘、电源系统、电气装置、通信模块、气体探测器、红外摄像机、激光雷达、防爆激光雷达、温湿度变送器、拾音器、智能计算单元、报警器等。

6.2 机器人底盘

6.2.1 智能防爆巡检机器人底盘包括两个部分：

- 移动部件：实现机器人移动的功能部件；
- 搭载平台：用于搭载其他设备、仪器的平台部件。

6.2.2 机器人的移动部件主要包括轮式底盘、履带式底盘、足式底盘、轮足式底盘，宜根据环境要求

和技术水平进行选型：平坦地面宜选轮式底盘；复杂地形/爬坡宜选履带式或足式底盘；复合型地貌宜选择轮足式底盘。

6.2.3 平台部件宜综合考虑需要搭载的设备或仪器的数量和体积、通道大小等因素设计平台大小，并按照需搭载的设备或仪器设计固定装置或卡扣。

6.3 电源系统

电源系统为机器人运行持续提供能源。电源系统选择需要考虑的因素包括：

- 电源材质：需综合考虑环境要求、机器人运载能力、安全等因素确定采用何种材质的电源；
- 电源容量：电源容量需考虑机器人稳定作业的最长时限要求，以确保机器人每次任务正常运行；
- 电源组件：根据机器人的用电需求考虑电池模组、BMS 和充电接口（包括接触式/无线式）的设计和选型；
- 防爆封装：需考虑对电源系统进行防爆封装，确保电源在爆炸性环境中的安全性。

6.4 电气装置

电气装置涉及全部或部分利用电能的设备，电气装置设计、选型可参考GB 3836.15-2024第5章电气装置设计、选型。

6.5 通信模块

通信模块负责控制台与机器人信息交互、控制命令传达等，宜选择无线网络通信。通信模块设计需考虑的因素包括：

- 无线网络技术选型：根据机器人作业环境的网络基础条件（如网络覆盖、信号强度与稳定性等）选择通信技术，如5G、Wi-Fi6/7等，宜支持多模冗余或混合组网；
- 网络带宽规划：根据传输信息体量（如传感器数据、控制命令等）、实时性要求与系统成本，综合考虑并规划网络带宽；
- 防爆设计：在爆炸性环境中使用的通信模块，宜对外壳结构、电路的本质安全设计、接口的防爆处理、元器件温升控制等方面进行防爆设计；
- 抗电磁干扰设计：宜从设备与线缆的电磁屏蔽、滤波电路设计、接地系统优化以及抗扰度测试验证等方面对通信模块进行抗电磁干扰设计；
- 通信安全设计：根据信息在传输过程中的安全要求，采取相应信息安全技术（如数据加密、访问控制等），并满足相应等保要求。

6.6 气体探测器

气体探测器用于感知环境中特定气体的浓度和种类。气体探测器选型需考虑的因素包括：

- 是否需要：根据任务要求判断是否需要安装或集成气体探测器；
- 气体探测器选型：根据作业需求、实时性要求、精度要求、智能化要求、经济效益等因素综合考虑气体探测器的选型；
- 高湿或粉尘环境下，气体探测需要加设预处理系统，实现如泵吸、过滤、除水等功能，以确保气体探测器的采集精度。

6.7 图像与空间感知传感器

6.7.1 图像与空间感知传感器通常包括获取环境影像信息的视觉传感器和获取物体距离与空间信息的测距传感器。视觉传感器包括可见光摄像头、红外摄像头、热成像等。测距传感器包括激光雷达、超声波雷达等。

6.7.2 智能防爆巡检机器人的图像与空间感知宜采用多种传感器组合的方式，以实现不同环境条件下更精准地采集信息。

6.7.3 图像与空间感知传感器的选型可考虑以下因素：

- 是否需要：根据任务要求判断是否需要安装或集成图像与空间感知传感器；
- 方案设计：根据作业要求和环境条件，针对可能出现的各种情况选择相应的传感器并进行组合使用，以形成完整的图像与空间信息采集方案；

——设备选型：根据作业要求和经济效益，选择方案设计中备选传感器的参数，如采集精度，探测范围、成像元件、存储单元、智能处理单元等；

——辅助系统：方案中还需考虑辅助系统的设计，如补光灯、外接数据存储单元等。

注：如可见光摄像机适用于光照充足的情况，可见光摄像机经济效益更加明显；红外摄像机成像适用于光照不充分或无光照情况，红外摄像机对于热敏感，尤其适合对高温高热物体的视觉采集；激光雷达适用于需要进行3D成像的情况，对于物体位置更加精准。

6.8 温湿度变送器

温湿度变送器主要指装有湿敏和热敏元件的能够测量环境温度和湿度的变送器装置。温湿度变送器选型需考虑的因素包括：

——是否需要。根据任务要求判断是否需要进行温度或湿度的测量，如有则需要安装或集成温湿度变送器；

——温湿度变送器选型：根据作业需求、实时性要求、精度要求、经济效益等综合考虑温湿度变送器类型选型。

6.9 拾音器

拾音器主要指作业环境中声音的采集设备。拾音器选型需考虑的因素包括：

——是否需要：根据任务要求判断是否需要安装或集成拾音器；

——降噪：需根据环境噪声情况进行拾音器的降噪功能选型，降低环境杂音对需要采集声音信号的干扰；

——拾音器选型：根据作业需求、实时性要求、精度要求、智能化要求、经济效益等综合考虑拾音器选型。

6.10 智能计算单元

智能计算单元是对机器人的各种传感装置或采集器采集的信息（数据）进行智能运算并做出决策的单元。智能计算单元选型需考虑的因素包括：

——是否需要：根据前端进行智能计算的需求判断是否需要智能计算单元。通常对于复杂巡检任务采用智能计算具有响应快、精度高、成本低的特点，宜优先选择智能化方案，安装或集成智能计算单元；

——智能分析技术选型：根据巡检任务的目标采用相应的智能技术（如传统机器学习、深度学习、大模型等算法）。宜进行定制化研发，以提升精度；

——智能计算单元的安装：可采用云、边、端协同计算，宜根据数据体量、机器人运载能力、持续供电能力、网络通讯能力、环境等综合因素考虑智能计算单元的安装方案，均衡运算能力、数据传输能力制定云边端协同计算架构。

——数据保护：宜根据数据的重要程度，在智能计算单元中设计数据保护技术（如加密计算等）。

6.11 报警器

报警器是用于提醒和告知异常情况的电子装备。报警器选型需考虑的因素包括：

——报警器类型：根据作业环境和作业要求选择声音信号、光信号、电子信号等报警器类型，或者其组合形式；

——报警器传输内容：根据作业要求设计报警器可向控制台传输的信息，如报警类型编号等。

附录 A
(资料性)
智能分析系统技术架构参考

图B.1给出了一个智能分析系统的技术架构参考，分为端、边、云三部分。端侧指智能防爆巡检机器人、边缘侧指控制主机、云端指智能分析运算系统，边缘侧将采集并预处理后的数据上传到云端，在云端进行数据分析和模型训练，然后将模型下发到边缘侧，边缘侧再将模型下发到端侧机器人进行部署和运行。

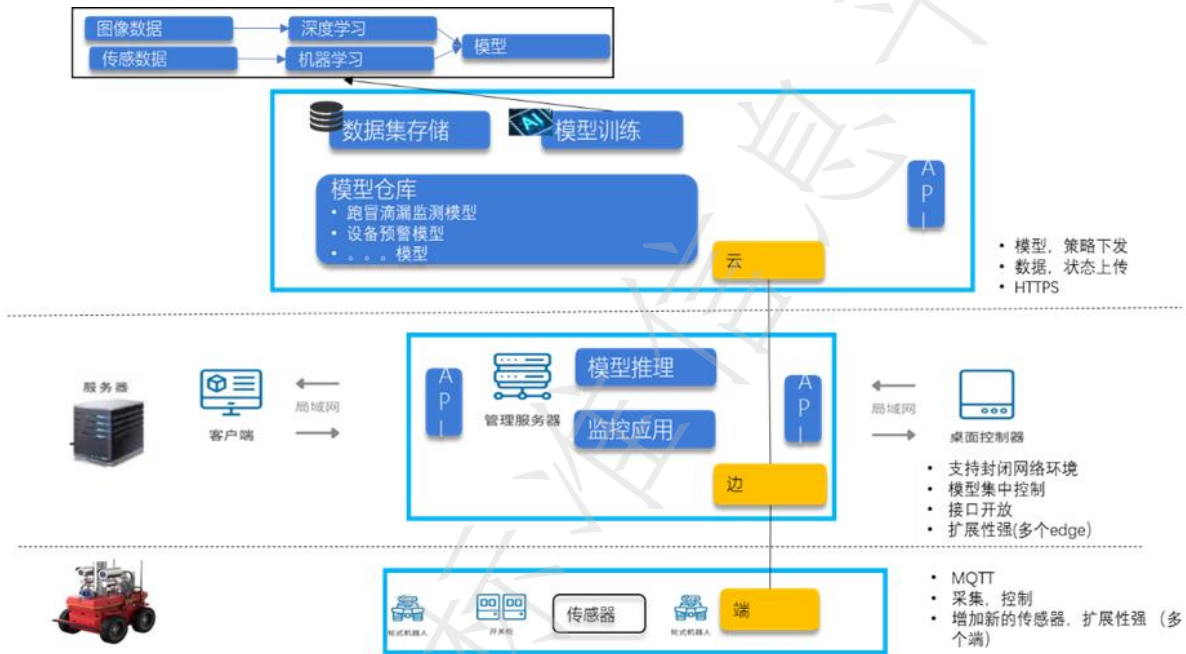


图 A.1 智能分析系统技术架构图

参考文献

- [1] GB/T 3836.1-2021 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求
 - [2] GB/T 20867.1-2024 机器人 安全要求应用规范 第1部分：工业机器人
 - [3] GB/T 39405-2020 机器人分类
 - [4] GB/T 44253-2024 巡检机器人安全要求
 - [5] GB/T 44312-2024 巡检机器人集中监控系统技术要求
 - [6] GB/T 45509-2025 工业机器人 动态稳定性试验方法
 - [7] GB/T 45579-2025 机器人智能化视觉评价方法及等级划分
 - [8] GB/T 46366-2025 自驱式管道内检测机器人通用技术规范
 - [9] DL/T 1722-2017 架空输电线路机器人巡检技术导则
 - [10] JB/T 14111-2020 电力场站巡检机器人通用技术条件
-