

ICS 25.040.30

CCS J 28



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2026

矿山井下巡检四足机器人

Quadruped inspection robot for underground mine

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 产品分类	1
4.1 矿井类别	1
4.2 功能配置	2
5 技术要求	2
5.1 一般要求	2
5.2 动力与续航要求	2
5.3 行走性能要求	2
5.4 感知与巡检功能要求	3
5.5 防爆与防护要求	4
5.6 通信与控制要求	4
5.7 环境适应性要求	4
5.8 可靠性要求	5
6 试验方法	5
6.1 试验基本条件	5
6.2 一般要求试验	5
6.3 动力与续航试验	5
6.4 行走性能试验	5
6.5 感知与巡检功能试验	6
6.6 防爆与防护试验	6
6.7 通信与控制试验	7
6.8 环境适应性试验	7
6.9 可靠性试验	7
7 检验规则	7
7.1 检验分类	7
7.2 出厂检验	7
7.3 型式检验	7
8 标志、包装、运输和贮存	8
8.1 标志	8
8.2 包装	8
8.3 运输	8
8.4 贮存	8

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

矿山井下巡检四足机器人

1 范围

本文件规定了矿山井下巡检四足机器人的产品分类、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于矿山井下巡检四足机器人的设计、生产、检验与验收。

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 191 包装储运图形符号标志
- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.5 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求
- GB/T 3836.2 爆炸性环境 第2部分：由隔爆外壳“d”保护的的设备
- GB/T 3836.4 爆炸性环境 第4部分：由本质安全型“i”保护的的设备
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
- GB/T 12643 机器人 词汇
- GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件
- GB 16413 煤矿井下用玻璃钢制品安全性能检验规范
- GB/T 16855.1 机械安全 安全控制系统 第1部分：设计通则
- GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 39360 工业机器人控制系统性能评估与测试
- GB/T 42982 工业机器人平均无故障工作时间计算方法
- GB/T 44251 腿式机器人性能及试验方法
- GB 50168 电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范
- MT/T 113 煤矿井下用聚合物制品阻燃抗静电性通用试验方法和判定规则
- MT/T 1200 矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求
- MT/T 1263 煤矿井下巡检机器人

3 术语和定义

GB/T 12643、MT/T 1263界定的术语和定义适用于本文件。

4 产品分类

4.1 矿井类别

考虑到煤矿与非煤矿山的防爆环境差异，具体分类如下：

- a) 煤矿井下用（I类防爆）：适用于有瓦斯、煤尘爆炸危险的煤矿井下，防爆标志为Ex d I Mb；
- b) 非煤矿井下用（II类防爆）：适用于金属非金属矿山井下一般性爆炸性气体环境，防爆标志为Ex d IIB T4 Gb。

4.2 功能配置

依据巡检功能的完备性与智能化水平，具体分类如下：

- a) 基础型：具备可见光摄像、温湿度及粉尘浓度检测、人工遥控行走等基础功能，满足简易巡检需求；
- b) 增强型：在基础型功能基础上，新增红外热成像检测、甲烷/一氧化碳/氧气多气体检测功能，适配复杂环境下的全面巡检；
- c) 智能型：在增强型功能基础上，新增AI图像识别、激光SLAM自主导航、自动充电、智能预警功能，支持全流程无人自主巡检。

5 技术要求

5.1 一般要求

5.1.1 外观

应满足以下要求：

- a) 外观表面应有保护涂层或防腐设计，外表应光洁、均匀，不应有伤痕、毛刺、裂纹等缺陷；
- b) 紧固件应有防止自动松脱措施（如防松螺母、开口销等）；
- c) 金属零部件应进行防锈和防蚀处理（如镀锌、镀铬、喷涂防腐涂层等）。

5.1.2 非金属部件

所有非金属部件（如外壳、密封件、线缆护套等）应符合MT/T 113的阻燃抗静电要求，其中玻璃钢制品应符合GB 16413要求。

5.1.3 应急急停

巡检机器人应具备手动应急停止功能，应急停止按钮应设置在明显、易操作的位置，且有醒目标识，按下后应能立即切断所有动力输出和电气回路。

5.2 动力与续航要求

5.2.1 电源核心要求

机器人应采用矿用防爆锂电池作为动力源，并满足以下要求：

- a) 电池应符合GB 3836.4、MT/T 1200的要求，并取得矿用产品安全标志证书；
- b) 电池额定电压宜选用24V DC或48V DC，其中48V DC电池容量 $\geq 100\text{Ah}$ ，24V DC 电池容量 $\geq 200\text{Ah}$ 。

5.2.2 续航能力要求

应满足以下要求：

- a) 空载连续工作时间 $\geq 4\text{h}$ ；
- b) 额定负载连续工作时间 $\geq 2.5\text{h}$ ；
- c) 最大行走速度（1.0m/s）额定负载工况下，连续工作时间 $\geq 1.5\text{h}$ 。

5.2.3 充电与保护要求

充电系统应兼顾效率与安全，具体要求如下：

- a) 充电方式：支持有线充电+无线自动充电两种方式，有线充电接口应具备IP65及以上防护等级（符合GB/T 4208），且具备防爆保护（符合GB/T 3836.2）；
- b) 充电时间：0~100%剩余电量（SOC）额定充电电流下，充电时间不大于3h；
- c) 充电保护：具备过充保护、过温保护、短路保护功能，电池SOC达到100%时自动切断充电回路；
- d) 低电量保护：SOC $\leq 20\%$ 时发出声光报警，智能型机器人自动触发返航功能；
- e) 电压保护：电池电压超出额定电压 $\pm 10\%$ 范围时，自动切断动力输出。

5.3 行走性能要求

5.3.1 行走速度

匀速行走速度0.3~1.0m/s，可无级调速；最大行走速度不小于1.0m/s。

5.3.2 爬坡能力

在干燥硬路面上，可稳定攀爬不小于15°的坡度，无打滑、倾倒现象。

5.3.3 越障能力

可跨越高度不小于150mm的垂直障碍物，可穿越宽度不小于200mm的沟槽。

5.3.4 转向性能

最小转弯半径不大于0.8m，转向灵活，无卡滞现象。

5.3.5 稳定性

在坡度不大于10°的路面上，可长时间稳定停放，无倾倒风险；行走过程中，机身颠簸幅度不大于10mm，无明显倾斜（倾斜角度不大于5°）。

5.3.6 适应路面

可在井下混凝土路面、碎石路面、泥泞路面等常见路面上稳定行走，不受路面轻微凸起、凹陷影响。

5.4 感知与巡检功能要求

5.4.1 可见光摄像系统（所有类型均要求）

应满足以下核心指标：

- 分辨率：不低于1920×1080（1080P），在5米处拍摄图像测试卡，图像清晰、无失真；
- 帧率：不低于25帧/秒，画面流畅，无拖影、卡顿现象；
- 变焦功能：光学变焦不低于10倍，数字变焦不低于20倍，变焦过程平稳，图像无明显模糊；
- 最低照度：不高于0.01lx（红外补光开启状态），在暗室环境中拍摄图像清晰，可识别物体轮廓；

e) 补光距离：红外补光有效距离不低于20米，补光均匀，无明显光斑、阴影；

f) 防护等级：摄像镜头防护等级不低于IP65。

5.4.2 红外热成像系统（增强型/智能型要求）

应满足以下要求：

- 分辨率：不低于320×240，热成像图像清晰，可识别细微温度差异；
- 测温范围：-20℃~150℃；
- 测温精度：不超过±2℃或±2%FS（满量程）；
- 测温距离：有效测温距离5~30米；
- 热灵敏度：不高于0.1℃，可识别设备微小温度变化，及时发现设备过热隐患。

5.4.3 环境检测系统（基础型/增强型/智能型差异化要求）

环境检测系统应实时监测井下关键参数，不同类型配置对应的检测指标见表2。

表2 环境检测参数要求

检测对象	量程范围	示值误差	响应时间	适用机型
环境温度	0~60℃	±0.5℃	—	所有机型
环境湿度	0~100%RH	±3%RH	—	所有机型
粉尘浓度	0~1000mg/m ³	±5%FS	—	所有机型
甲烷（CH ₄ ）	0~5.0%VOL	±0.1%VOL	≤10s	增强型、智能型
一氧化碳（CO）	0~100×10 ⁻⁶	±5×10 ⁻⁶	≤15s	增强型、智能型
氧气（O ₂ ）	0~25%VOL	±0.3%VOL	≤10s	增强型、智能型

注：当检测参数超出预设阈值时，应立即发出声光报警（声级不小于85dB），并将报警信息实时传输至地面监控后台，报警阈值可远程配置。

5.4.4 导航与定位系统（智能型要求）

智能型机器人应具备自主导航与定位能力，具体要求如下：

- 定位方式：激光SLAM+惯性导航组合定位；
- 定位精度：不超过±100mm，在井下复杂环境（如弯道、遮挡区域）中，定位偏差不超过±150mm；
- 建图精度：应不大于±50mm；

- d) 自主避障：具备自主避障功能，障碍物检测距离：前方不小于5米、两侧不小于3米、后方不小于2米；当与障碍物间距不超过3米时自动减速，间距不超过1米时立即急停并触发声光报警；
- e) 路径规划：支持预设巡检路径编辑、修改和保存，路径保存数量 ≥ 100 条。

5.5 防爆与防护要求

5.5.1 防爆性能

应满足以下要求：

- a) 隔爆外壳：应符合GB/T 3836.2的规定；
- b) 耐热性能：应符合GB/T 3836.1的规定；
- c) 隔爆接合面：平面型接合面间隙不大于0.5mm（容积不大于100cm³时不大于0.3mm）、圆筒型接合面间隙不大于0.3mm；有效长度平面型不小于25mm、圆筒型不小于20mm；表面粗糙度Ra不大于6.3 μ m，无损伤、无锈蚀，且需均匀涂抹专用防锈脂。

5.5.2 电气安全

应满足以下要求：

- a) 绝缘电阻：各电气回路之间、电气回路与外壳之间的绝缘电阻 $\geq 50M\Omega$ （500V兆欧表测试）；
- b) 介电强度：承受2kV AC工频电压，1min无击穿、无闪络；
- c) 漏电保护：漏电电流 $\geq 30mA$ 时，0.1s内自动切断电气回路；
- d) 接地要求：所有大于100cm²的金属部件都应连接到主体结构上，金属部件对地电阻不大于10 Ω 。

5.5.3 防护等级

防护等级不低于IP65。

5.6 通信与控制要求

5.6.1 通信方式与性能

通信系统采用多模设计，具体要求如下：

- a) 通信方式：井下工业Wi-Fi 6+5G+自组网三模通信，无Wi-Fi/5G信号区域自动切换至自组网；
- b) 通信距离：无遮挡环境下，工业Wi-Fi 6 $\geq 200m$ ，5G $\geq 500m$ ，自组网 $\geq 1000m$ ；有遮挡环境（井下巷道隔3个风门） $\geq 100m$ ；
- c) 数据传输：速率 $\geq 10Mbps$ ，支持可见光、热成像视频实时回传，无明显延迟；
- d) 丢包率： $\leq 1\%$ （连续传输10min），确保数据完整性；
- e) 断网重连：断网后自动重连，重连时间 $\leq 10s$ ，支持数据本地缓存与断点续传。

5.6.2 控制方式与响应

控制方式应兼顾灵活性与可靠性，具体要求如下：

- a) 控制方式：支持本地遥控、远程后台控制、自主控制三种模式，可无缝切换，切换优先级为本地遥控 $>$ 远程后台控制 $>$ 自主控制；
- b) 本地遥控：采用无线防爆遥控器，遥控距离 $\geq 100m$ ，操作便捷；
- c) 响应时间：遥控指令响应时间 $\leq 0.5s$ ，动作执行及时无延迟；
- d) 远程后台控制：支持机器人行走控制、参数设置、数据查看、报警接收等全功能操作。

5.7 环境适应性要求

机器人应耐受矿山井下高湿、多尘、振动等恶劣环境，应满足表3中各项适应性指标。

表3 环境适应性指标要求

项目	技术要求
工作环境温度	0℃~+40℃（无凝露）
贮存与运输温度	-20℃~+60℃
工作相对湿度	$\leq 95\%$ RH（+25℃条件下）
整机防护等级	$\geq IP65$ （防尘+防喷射水）
振动适应性	5Hz~150Hz，加速度10m/s ² ，每轴2h
冲击适应性	峰值加速度500m/s ² ，11ms，每轴3次
非金属件表面电阻率	$\leq 1 \times 10^9 \Omega$ （抗静电要求）

5.8 可靠性要求

平均无故障工作时间（MTBF）应不少于800h。

6 试验方法

6.1 试验基本条件

除环境适应性试验外，其余试验均在以下标准大气条件下进行，以确保试验结果的一致性：

- a) 环境温度：15℃~35℃；
- b) 相对湿度：45%~75%RH；
- c) 大气压力：86kPa~106kPa；
- d) 供电电源：额定电压±1%；
- e) 试验场地：平坦、干燥的混凝土路面，无电磁干扰、无遮挡。

6.2 一般要求试验

6.2.1 外观检查

目测检查机器人外观、零部件、电气线路布置，用手触摸检查紧固件是否牢固，查看标识是否清晰、牢固。

6.2.2 非金属部件性能试验

按MT/T 113、GB 16413的规定进行。

6.2.3 应急停止功能试验

按下应急停止按钮，检查机器人是否立即切断所有动力输出和电气回路，功能是否正常。

6.3 动力与续航试验

6.3.1 电源核心性能试验

应按照以下方法进行：

- a) 防爆性能验证：按GB/T 3836.4的规定进行；
- b) 电池参数检测：用精度0.5级的直流电压源和容量测试仪，测量电池额定电压（偏差不超过±2%），在25℃±5℃环境下以0.2C放电率放电，记录实际容量。

6.3.2 续航能力试验

应按照以下方法进行：

- a) 空载续航试验：电池满电后，机器人在标准环境下以0.6m/s匀速行走，记录从启动到低电量报警（SOC≤20%）的连续工作时间；
- b) 额定负载续航试验：加载15kg额定负载，其余条件同6.3.2.1，记录连续工作时间；
- c) 最大速度负载续航试验：加载15kg额定负载，机器人以1.0m/s匀速行走，记录连续工作时间。

6.3.3 充电与保护功能试验

应按照以下方法进行：

- a) 充电方式与防护试验：分别测试有线充电、无线自动充电功能，有线充电接口按GB/T 4208进行IP65防护等级测试（防尘2h、防水3min），检查接口无损坏、无短路；
- b) 充电时间测试：在25℃±5℃环境下，电池放电至SOC=0%后，按额定充电电流充电，记录从0%~100%SOC的耗时；
- c) 充电保护验证：分别测试过充保护、过温保护、短路保护功能，检查满电后是否切断充电回路、过温时是否停充、短路时是否切断输出；
- d) 低电量保护试验：将电池放电至SOC=20%，检查是否触发声光报警（声级测量不小于85dB），智能型机器人是否自动返航；
- e) 电压保护验证：通过电源模拟器模拟电池电压超出额定电压±10%，检查是否自动切断动力输出，无电气部件损坏。

6.4 行走性能试验

6.4.1 行走速度

按GB/T 44251的规定进行。

6.4.2 爬坡能力试验

按GB/T 44251的规定进行。

6.4.3 越障能力试验

按GB/T 44251的规定进行。

6.4.4 转向性能试验

按GB/T 44251的规定进行。

6.4.5 稳定性试验

按GB/T 44251的规定进行。

6.4.6 路面适应性试验

分别在混凝土路面、碎石路面、泥泞路面上，让机器人匀速行走，观察是否能稳定行走，无卡滞、打滑现象。

6.5 感知与巡检功能试验

6.5.1 可见光摄像系统

通过以下步骤验证摄像系统性能：

- a) 分辨率：5m处拍摄图像测试卡，控制机器人拍摄，用图像分析仪检测分辨率；
- b) 帧率：启动摄像系统，用图像分析仪实时检测输出帧率；
- c) 变焦功能：操作变焦控制功能，分别测试光学变焦（不低于10倍）和数字变焦（不低于20倍），观察变焦过程和图像清晰度；
- d) 最低照度：搭建暗室环境，调节照度至0.01lx，开启红外补光，控制机器人拍摄，观察图像清晰度；
- e) 补光距离：在暗室中设置不同距离（5~20米）的测试目标，开启红外补光，拍摄后观察补光效果，判断补光有效距离是否不低于20米。

6.5.2 红外热成像系统

通过以下步骤验证热成像系统性能：

- a) 分辨率：将黑体炉置于固定位置，启动热成像系统拍摄，用专用分析仪检测分辨率；
- b) 测温精度：黑体炉设置-20℃、0℃、50℃、100℃、150℃，机器人在5米处测温，每个温度点测量3次取平均值，计算测温误差；
- c) 测温距离：将黑体炉分别置于5米、10米、20米、30米处，机器人测温，记录数据。

6.5.3 环境检测系统

通过以下步骤验证环境检测系统性能：

- a) 气体传感器：通入标准气体（甲烷、一氧化碳、氧气），记录示值误差与响应时间；
- b) 温湿度传感器：温湿度校准箱设置不同值，记录示值误差；
- c) 粉尘传感器：粉尘发生器产生不同浓度粉尘，记录示值误差。

6.5.4 导航与定位系统

通过以下步骤验证导航定位性能：

- a) 定位精度：标记多个物理定位点，机器人定位后测量偏差 $\leq \pm 100\text{mm}$ ；
- b) 建图精度：激光SLAM 建图后与实际地图对比，偏差 $\leq \pm 50\text{mm}$ ；
- c) 自主避障：路径上设置障碍物，验证 $\geq 300\text{mm}$ 减速、 $\geq 100\text{mm}$ 急停。

6.6 防爆与防护试验

6.6.1 防爆性能试验

应按照以下方法进行：

- a) 隔爆外壳试验：按GB/T 3836.2的规定进行；
- b) 耐热性能试验：按GB/T 3836.1的规定进行；
- c) 隔爆接合面试验：用塞尺、粗糙度仪测量隔爆接合面的间隙、有效长度、粗糙度，检查是否无损伤、无锈蚀。

6.6.2 电气安全试验

按GB/T 5226.1、GB/T 3836.1的规定进行。

6.6.3 防护等级试验

按GB/T 4208的规定进行。

6.7 通信与控制试验

6.7.1 通信方式与性能

按GB/T 17626.3、MT/T 1263规定，测试Wi-Fi 6、5G、自组网三模自动切换功能，验证通信距离、传输速率、丢包率及断网重连时间。

6.7.2 控制方式与响应

按GB/T 39360规定，测试本地遥控、远程后台控制、自主控制三种模式的无缝切换与优先级，验证遥控距离及指令响应时间。

6.8 环境适应性试验

环境适应性试验应模拟井下恶劣环境，具体试验方法见表4。

表4 环境适应性指标试验方法

项目	试验依据标准
工作环境温度	GB/T 2423.1、GB/T 2423.2
贮存与运输温度	GB/T 2423.1、GB/T 2423.2
工作相对湿度	GB/T 2423.3
整机防护等级	GB/T 4208
振动适应性	GB/T 2423.10
冲击适应性	GB/T 2423.5
非金属件表面电阻率	MT/T 113

6.9 可靠性试验

应按照GB/T 42982的规定进行。

7 检验规则

7.1 检验分类

机器人的检验分为出厂检验和型式检验两类。

7.2 出厂检验

7.2.1 检验要求

每台机器人在出厂前均应进行出厂检验，由制造商的质量检验部门逐台检验，检验合格后方可出厂。

7.2.2 检验项目

出厂检验项目为本文件5.1规定的一般要求。

7.3 型式检验

7.3.1 检验时机

凡有下列情况之一者，应进行型式检验，检验项目为本文件第5章规定的所有技术要求：

- a) 新产品定型或首次批量生产时；
- b) 产品结构、材料、工艺有重大变更，可能影响产品性能时；
- c) 产品停产1年以上恢复生产时；
- d) 出厂检验结果与上次型式检验结果有较大偏差时；
- e) 产品每批量生产50台时，应进行一次型式检验。

7.3.2 抽样规则

型式检验的抽样应从出厂检验合格产品中随机抽取，按照GB/T 2828.1的规定进行。

7.3.3 合格判定

所有检验项目均符合本文件规定，判定为型式检验合格，任一项不符合规定时，判定为不合格，非安全要求项目不合格应进行返工处理，复检一次（仅限原不合格项），安全要求项目不合格应进行报废处理。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

设备本体应在醒目位置设置铭牌，内容包括：产品名称、产品型号、防爆标志、防护等级、整机质量、制造商名称、地址、联系方式、产品出厂编号、产品制造日期、矿用产品安全标志证书编号、防爆合格证书编号，应符合GB/T 191的相关规定。

8.2 包装

8.2.1 包装材料

机器人的包装应符合GB/T 13384的规定，采用防震、防潮、防尘、防碰撞的木质包装箱，包装箱内部应采用泡沫、珍珠棉等缓冲材料进行固定和防护，核心部件、易损部件应单独包装并固定。

8.2.2 包装标识

包装箱上应标注“小心轻放”、“防潮”、“防震”等标识。

8.2.3 随机文件与配件

包装箱内应有随机文件，随机文件包括：产品合格证、产品使用说明书、检验报告、防爆合格证书、矿用产品安全标志证书、配件清单、保修卡、售后服务联系方式等。

8.3 运输

8.3.1 运输方式

机器人可采用公路、铁路、矿山井下矿车等方式运输。

8.3.2 运输要求

应满足以下要求：

- a) 运输过程中应避免剧烈冲击、振动、碰撞、雨淋、暴晒、重压；
- b) 包装箱应固定牢固，防止运输过程中发生位移和倾倒；
- c) 运输环境温度应满足 $-20^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 95\%RH$ ；
- d) 严禁与腐蚀性介质、易燃易爆物品、尖锐硬物混装运输。

8.4 贮存

应满足以下要求：

- a) 机器人应贮存在通风、干燥、阴凉、无腐蚀性气体、无易燃易爆物品、无强电磁干扰的库房内，库房内应设置消防设施，严禁明火；
- b) 贮存环境温度应满足 $-10^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 80\%RH$ ，无凝露。
- c) 机器人的电池应单独贮存，且电池SOC保持在50%~80%；
- d) 长期贮存（超过3个月）时，应每月对机器人进行一次通电检查，电池每月补充充电一次，保持OC在50%~80%。