ICS 25.040.30
CCS J 28

T/CS

团 体 标 准

T/CS 312—2026

爬壁机器人施工规范

Construction specifications for wall-climbing robots

2026－01－28 发布 2026－01－28 实施

中国商品学会 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 基本要求 2
5 施工准备 2
5.1 技术准备 2
5.2 设备准备 3
5.3 现场准备 3
5.4 人员准备 4
6 施工流程 4
6.1 施工策划 4
6.2 设备调试 4
6.3 作业施工 4
6.4 过程检测 4
6.5 作业收尾 5
7 安全要求 5
7.1 人员安全 5
7.2 设备安全 5
7.3 环境安全 6
8 质量控制 6
8.1 施工质量标准 6
8.2 质量检测方法 6
8.3 质量缺陷处理 6
9 维护保养 6
9.1 日常维护 6
9.2 定期保养 6
9.3 年度检修 7
9.4 存储要求 7
10 应急处置 7
10.1 吸附失效应急 7
10.2 设备故障应急 7
10.3 环境突变应急 7

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。

本文件由广东中远海运重工有限公司提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：广东中远海运重工有限公司、悦鑫熠（上海）智能科技有限公司、艾攀（上海）智能科技有限公司。

本文件主要起草人：敖武平、刘向文、刘习贤、李伟京、赖访明、刘志爱、徐迎兴、王清平、方炜鑫、刘威、田银豪、廖银飞、王晓宇、王成、周文贵、马啸、丁昉晨、王宝玉、谢宝善、李恒。

爬壁机器人施工规范

1 范围

本文件规定了爬壁机器人施工的基本要求、施工准备、施工流程、安全要求、质量控制、维护保养、应急处置。

本文件适用于爬壁机器人在造船、石化、大型钢构等高空壁面的检测、涂装、清理、除锈、焊接等作业，其他类似场景的爬壁机器人作业可参照执行。

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 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB 9448 焊接与切割安全

GB 11291.1 工业环境用机器人 安全要求 第1部分：机器人

GB 11291.2 机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第2部分：机器人系统与集成

GB/T 12467.1 金属材料熔焊质量要求 第1部分：质量要求相应等级的选择准则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

爬壁机器人 wall-climbing robot

具备壁面附着、自主/遥控移动能力，可搭载作业工具（如喷枪、检测传感器、清洁装置等）完成指定高空作业的自动化设备。

3.2

智能轨迹规划 intelligent trajectory planning

基于结构三维模型或实时扫描数据，自动生成最优作业路径，具备避障、路径修正、作业重叠率控制等功能的智能化作业技术。

3.3

应急制动 emergency braking

当出现安全隐患时，通过手动或自动控制使爬壁机器人立即停止移动并保持吸附状态的功能。

3.4

应急防坠装置 emergency fall arrest device

独立于吸附系统的二次安全保护装置，包括防坠钢丝绳、电磁锁、缓冲器等，用于吸附失效时阻止机器人坠落。

3.5

作业面 working surface

爬壁机器人进行作业的壁面，包括平面、曲面及复杂结构表面。

3.6

载荷限值 load limit

爬壁机器人在安全作业前提下可搭载工具、物料的最大重量。

3.7

吸附压力 adsorption pressure

爬壁机器人吸附系统对作业面产生的压力，确保机器人稳定附着，真空吸附压力通常以负压值表示，磁吸附以吸附力数值表示。

4 基本要求

4.1 爬壁机器人应能够满足现场作业要求，满足 GB 11291.1、GB 11291.2 的安全要求。

4.2 爬壁机器人应符合下列规定：

a) 焊接作业机器人：符合 GB 9448 中焊接设备安全规定；
b) 打磨/除锈作业机器人：具备振动防护及粉尘隔离功能；
c) 喷涂作业机器人：具备涂料防泄漏、雾化稳定、漆雾回收功能；
d) 检测作业机器人：具备传感器精度校准及数据存储功能。

4.3 爬壁机器人应配备必要的附属设备、备品备件、专用工具和仪器。

4.4 爬壁机器人应具备曲面适配能力和智能轨迹规划功能，满足作业面的曲面曲率变化适配需求，并符合下列规定：

a) 焊接作业：轨迹跟踪精度不大于 2 mm；
b) 打磨/除锈作业：轨迹偏差不大于 3 mm；
c) 喷涂作业：路径重叠率控制精度±5 %；
d) 检测作业：检测点定位精度不大于 2 mm。

4.5 智能轨迹规划系统应支持三维建模、路径自动生成、障碍物避障及作业参数自适应调整，并符合下列规定：

a) 焊接作业：支持坡口跟踪、焊缝填充轨迹自动生成；
b) 打磨/除锈作业：支持交叉打磨/往复除锈模式切换；
c) 喷涂作业：支持涂层厚度自适应调整；
d) 检测作业：支持缺陷定位及数据标注。

4.6 爬壁机器人环境适应性应符合下列规定：

a) 通用环境：温度-10 ℃～45 ℃，相对湿度不大于 85 %；
b) 焊接作业：耐受焊接区域短时温度不小于 80 ℃；
c) 打磨/除锈作业：粉尘防护等级不小于 IP65；
d) 喷涂作业：适应涂料作业环境，无易燃易爆气体积聚；
e) 检测作业：传感器工作温度-5 ℃～50 ℃，抗电磁干扰等级不小于 3 级。

4.7 作业单位管理要求应包括下列内容：

a) 建立健全安全管理制度（含设备台账、作业许可、培训记录、应急演练等）和质量控制体系（三检制：自检、互检、专检）；
b) 作业人员需经专业培训（含设备结构、操作流程、应急处置、质量标准），并通过理论和实操考核合格后方可上岗；
c) 施工前应进行风险评估，制定专项施工方案和应急预案。

5 施工准备

5.1 技术准备

5.1.1 施工方案应明确作业范围、作业内容、爬壁机器人型号选择、作业参数（行进速度、作业间距、吸附压力、作业重叠率等）、作业进度计划、安全防护措施及质量验收标准，并符合下列规定：

a) 检测作业：检测类型、检测间距、数据采样频率、重叠率；
b) 喷涂作业：涂料型号及配比、雾化压力、喷涂距离、行进速度、重叠率、涂层厚度；
c) 除锈作业：除锈工具类型、磨料规格、作业压力、重叠率；
d) 打磨作业：砂轮转速、打磨压力、重叠率、粗糙度要求；
e) 焊接作业应明确焊缝类型、坡口尺寸、焊接层数、电流、电压、焊接速度，热输入控制在推荐范围。

5.1.2 对爬壁机器人应进行全面的安全性评估，确保其符合相关的安全标准和规范。评估内容应包括

下列内容：

a） 结构完整性：检查爬壁机器人主体框架、连接部件无变形、裂纹；
b） 控制系统：响应灵敏度、抗干扰能力测试合格；
c） 传感器精度：吸附传感器、距离传感器等误差不超过±2 %；
d） 稳定性验证：在作业面极限倾角（不小于 90° ）下保持吸附稳定不少于 30 min；
e） 可靠性测试：连续作业时间不低于 4 h 无故障。

5.1.3 应完成作业面的三维建模，明确作业边界、障碍物位置、薄弱部位、焊缝位置/坡口尺寸、打磨区域范围等关键信息，为智能轨迹规划提供基础数据。

5.1.4 各类作业专项技术准备应包括下列内容：

a） 焊接作业：按 GB/T 12467.1 要求进行焊接工艺评定，编制焊接工艺指导书，明确预热温度、焊接材料规格；
b） 喷涂作业：涂料相容性测试、试喷涂验证，明确稀释比例及固化条件；
c） 检测作业：传感器校准、检测方法验证，制定数据判读标准；
d） 除锈/打磨作业：明确表面清洁度目标、打磨深度及坡口尺寸要求。

5.2 设备准备

5.2.1 作业单位应根据作业面材质、作业高度、作业内容选择适配型号，确保爬壁机器人载荷限值、吸附能力、移动速度满足施工需求。

5.2.2 各类作业专项设备要求应包括下列内容：

a） 检测机器人：搭载对应检测传感器、数据存储模块、实时传输模块；
b） 喷涂机器人：搭载专用喷枪、涂料供给系统、涂层厚度监测传感器、防滴漏装置；
c） 除锈机器人：搭载除锈装置、磨料回收系统、粉尘收集装置；
d） 打磨机器人：搭载打磨工具、打磨压力调节功能、过载保护装置；
e） 焊接机器人：搭载焊接电源、送丝机构、焊缝跟踪传感器、气体保护模块、焊接电缆防烫保护套。

5.2.3 爬壁机器人作业前检查应符合下列规定：

a） 吸附系统：检查磁吸附单元性能、密封件完好性、吸附传感器精度，确保无泄漏；
b） 动力系统：检查电池电量/供电线路稳定性，电机运行正常，无异常噪音；
c） 控制系统：遥控器、无线通信模块信号稳定，自主导航系统校准准确；
d） 作业工具：喷涂设备、检测传感器等调试正常，参数符合施工要求；
e） 应急装置：防坠装置完好，缓冲器有效，应急制动功能正常。

5.2.4 辅助设备准备应包括下列内容：

a） 地面控制台（具备实时监控、参数调整、应急停机功能）；
b） 安全警戒设施（警示灯、警戒带、警示牌等）；
c） 电源供给设备（备用电池、充电器、防水电缆等）；
d） 作业面清理工具（高压水枪、毛刷、除油剂等）；
e） 应急救援装备（起重设备、救援绳索、安全带、急救箱等）。

5.3 现场准备

5.3.1 在爬壁机器人施工作业之前，应预先设定安全距离，并设立明确的安全警戒区域，以保障人机安全；作业期间，应禁止除工作人员外的其他任何人员在爬壁机器人作业区域内逗留或进行交叉作业，确保施工安全。

5.3.2 作业面勘察应确认作业面材质、平整度、裂缝情况、承载强度（能承受机器人吸附压力及作业载荷）及清洁度，评估爬壁机器人吸附适配性；对不平整、有油污或障碍物的作业面，应提前处理。

5.3.3 清理作业面及周边障碍物，确保爬壁机器人移动路径畅通；对作业面存在的尖锐凸起、裂缝等缺陷，需提前修补或规避。

5.3.4 检查作业环境条件包括下列内容：

a） 风力不应超过 6 级，无雨雪、大雾、雷电等恶劣天气；
b） 高空作业时，应确认作业面无松动构件。

5.3.5 高空作业时，应搭建作业平台或设置锚点（锚点强度能承受机器人总重量的 3 倍以上），爬壁机器人线缆应采用耐磨、防水型，长度预留充足，固定牢固，避免缠绕、拉扯。

5.4 人员准备

5.4.1 技术交底应采用书面形式，向施工人员、操作人员、安全监护人员、应急救援人员交底施工方案、安全要求及应急流程，相关人员签字确认，确保掌握操作要点。
5.4.2 操作人员、安全监护人员、应急救援人员应经专业培训并考核合格，操作人员应熟悉爬壁机器人的操作程序、安全规程和应急措施，能正确设置机器人参数、监控运行状态，并在必要时采取紧急措施；应急救援人员应具备高空救援资质。
5.4.3 作业现场应配备不少于 2 名作业人员（1 名操作人员、1 名安全监护人员），高空作业时应增加应急救援人员不少于 1 名。

6 施工流程

6.1 施工策划

6.1.1 根据施工任务要求，应确定作业范围、作业顺序、爬壁机器人型号和作业参数（行进速度、作业间距、吸附压力、重叠率等），明确各工序衔接要求。
6.1.2 绘制作业路线图，应标注作业起点、终点、关键控制点（转角、边缘、障碍物等）、避让区域，避开作业面薄弱部位和危险区域（如裂缝集中区、构件连接处）。
6.1.3 制定质量控制目标和检测方案，应明确各工序的质量验收标准、检测方法、检测频率及合格判定规则。

6.2 设备调试

6.2.1 空载试运行应符合下列规定：
a) 在作业面低风险区域进行不少于 30 min 的空载运行；
b) 测试爬壁机器人移动、转向、启停功能，确认移动精度符合要求；
c) 测试应急制动及防坠装置有效性（触发应急制动后机器人无位移、防坠装置可靠锁止）。
6.2.2 智能轨迹测试：应导入作业面三维模型，模拟作业路径运行，验证避障精度、路径重叠率，测试断点续作功能。
6.2.3 加载试作业：搭载作业工具进行不应小于 5 ㎡的小范围试作业，检查作业效果（如涂层均匀性、检测数据准确性、清理干净度），调整作业参数至最佳状态。

6.3 作业施工

6.3.1 爬壁机器人应按照施工方案划定的作业路径进行作业，行进速度均匀，避免急停、急转；作业过程中，保持爬壁机器人与作业面紧密贴合，无脱离现象。
6.3.2 操作人员应在安全区域通过遥控器或地面控制台实时监控作业过程，观察爬壁机器人运行状态（移动、吸附、作业工具工况）、吸附压力（真空吸附不小于-0.08 MPa，磁吸附不小于设计值 90 %）、作业效果，发现异常立即停机处理。
6.3.3 多台爬壁机器人协同作业时，应划定各机器人作业区域，保持安全间距不小于 1.5m，统一调度（设专职调度人员），确保作业同步有序，避免碰撞、干扰。
6.3.4 作业过程中，定期检查设备状态应符合下列规定：
a) 每 0.5 h 检查电池电量/供电情况、吸附压力；
b) 每 1 h 检查作业工具运行状态及应急装置有效性；
c) 发现参数异常（如吸附压力下降、电池电量低于 30 %）立即停机处理。
6.3.5 记录施工数据应包括作业时间、作业区域、爬壁机器人型号及运行参数（吸附压力、行进速度、作业重叠率）、环境参数（温度、湿度、风力）、作业效果检测数据、设备故障及处理情况等，形成施工日志。

6.4 过程检测

6.4.1 完成一个作业区域，应及时进行质量检测，如除锈质量检测、打磨质量检测、喷涂质量检测、附着力测试、检测数据采集等，检测结果不符合要求时，及时调整作业参数或进行返工。
6.4.2 对爬壁机器人的轨迹精度检测应随机选取 10 个检测点，测量实际作业路径与规划路径偏差，偏差不大于 5 mm 为合格。
6.4.3 专项检测要求应符合下列规定：

a) 除锈作业：按 GB/T 8923.1 评定，表面清洁度不低于 Sa2.5 级；
b) 喷涂作业：涂层均匀，无流挂、起皱、漏涂等缺陷，涂层厚度偏差不超过±10 %（设计值），附着力按划格法测试不低于 2 级；
c) 检测作业：检测数据准确可靠，检测覆盖率 100 %，无漏检、误检，数据误差不超过±5 %；
d) 清理作业：作业面无残留灰尘、油污、杂物，清洁度满足后续作业要求，无损伤；
e) 焊接作业：焊缝成型均匀，无裂纹、气孔、夹渣、未焊透等缺陷，无损检测合格。

6.4.4 检测结果不符合要求时，应立即停止作业，分析原因，调整作业参数或返工处理，重新检测合格后方可继续作业。

6.5 作业收尾

6.5.1 作业完成后，应控制爬壁机器人返回指定回收区域，关闭作业工具，卸载载荷，检查设备外观有无损伤。
6.5.2 作业完成后，应对爬壁机器人进行清洁，清理作业工具残留介质（涂料、锈渣等）、壁面附着杂物，擦拭设备表面，检查密封件、吸附垫有无污染、损伤。
6.5.3 作业完成后，应关闭爬壁机器人电源，拆除辅助设备（地面控制台、警戒设施、电缆等），整理作业现场，清理施工垃圾及废弃物（分类回收，避免环境污染）。
6.5.4 对作业效果进行初步验收，应形成验收报告（作业范围、质量检测数据、验收结论、签字确认），确认符合质量要求后，方可撤离现场；若存在质量问题，及时安排返工。

7 安全要求

7.1 人员安全

7.1.1 操作人员应经专业培训并考核合格后方可上岗，熟悉爬壁机器人结构、操作规程及安全要求，佩戴必要的防护装备。
7.1.2 高空作业人员应系挂安全带，在有防护措施的区域作业，不应在无防护边缘站立、行走；不应酒后、疲劳、带病或违规操作。
7.1.3 安全监护人员应全程在岗，密切关注作业环境（风力、天气变化）及设备运行状态（吸附压力、通信信号、电池电量），发现安全隐患立即通知操作人员停机，并采取处置措施；监护人员不应擅自离岗、脱岗。
7.1.4 作业过程中，操作人员不应直接接触运行中的爬壁机器人或作业工具，避免被移动部件（车轮、履带）或作业介质（涂料、除锈渣、高压气流）伤害。
7.1.5 应急救援人员应随时待命，熟悉救援流程和装备使用方法；发生紧急情况时，应按应急预案开展救援。

7.2 设备安全

7.2.1 爬壁机器人应定期进行维护保养，建立设备维护档案，不应超期服役或带病作业；设备运行过程中，不应擅自拆卸、改装吸附系统、应急装置、控制系统等核心部件。
7.2.2 吸附系统出现异常时，爬壁机器人应自动停机并启动应急防坠装置，操作人员立即排查原因，修复并测试合格后方可重新作业。
7.2.3 动力供给应稳定可靠，并符合下列规定：

a) 电池供电的机器人应配备备用电池，避免作业过程中断电；
b) 电缆供电的机器人应使用耐磨、防水电缆，设置漏电保护装置；电缆应架空或采取防护措施，避免碾压、磨损。

7.2.4 爬壁机器人存放应在干燥、通风、无腐蚀性气体的库房内，避免阳光直射、雨淋、受潮或剧烈

碰撞；长期存放（超过 1 个月）时，应每月充电一次，定期检查设备状态。
7.2.5　设备运输过程中，应固定牢固，避免颠簸、碰撞，防止吸附系统、作业工具受损。

7.3　环境安全

7.3.1　作业过程中产生的粉尘、废气、废液等污染物，应采取防控措施，禁止随意排放作业介质。
7.3.2　高空作业时，应在作业面下方设置接料装置（如防护网、接料布），防止工具、零部件、作业介质等坠物伤人；作业完成后，应及时清理作业面及下方区域的杂物。
7.3.3　临近带电设备作业时，应保持安全距离，采取绝缘防护措施，避免触电事故；在钢结构作业时，应确认结构接地良好。

8　质量控制

8.1　施工质量标准

8.1.1　检测作业：检测数据应准确可靠，检测覆盖率 100 %，无漏检、误检现象，检测报告完整规范。
8.1.2　涂装作业：涂层应均匀，无流挂、起皱、漏涂等缺陷，涂层厚度应符合设计要求，偏差不超过 ±10%，附着力达到规定标准。
8.1.3　除锈作业：表面清洁度不应小于 Sa2.5 级，无残留；作业面无灰尘、油污、氧化皮、锈渣，无损伤；凹凸偏差不应大于 5 mm/m。
8.1.4　打磨作业：表面清洁度不应小于 Sa2.5 级，坡口打磨无油污/铁锈；粗糙度符合设计要求，偏差不大于 ±1 μm；凹凸偏差不应大于 3 mm/m；坡口尺寸应符合 GB/T 985.1 要求，无毛刺、过度打磨。
8.1.5　焊接作业：焊缝成型均匀，无裂纹、气孔、夹渣、未焊透、未熔合、咬边等缺陷；焊缝长度、高度、余高符合设计要求；无损检测合格；焊接材料应符合设计要求，存放及使用符合规范。
8.1.6　清理作业：墙面清洁度应满足要求，无残留灰尘、油污、杂物，清理后作业面平整，无损伤。

8.2　质量检测方法

8.2.1　外观检测：应采用目视或放大镜观察，检查作业表面是否存在缺陷。
8.2.2　尺寸检测：应使用工具测量作业范围、涂层厚度等参数。
8.2.3　性能检测：应采用附着力测试仪、超声波检测仪等专业设备，检测涂层附着力、墙面结构强度等性能指标。
8.2.4　数据审核：应对检测数据进行统计分析，确保数据的准确性和完整性。

8.3　质量缺陷处理

8.3.1　发现质量缺陷时，应及时查明原因，制定整改方案，明确整改责任人和整改期限。
8.3.2　轻微缺陷（如局部漏涂、轻微划痕）可进行局部修补，修补后重新检测，直至合格。
8.3.3　严重缺陷（如涂层大面积脱落、检测数据严重偏差）应返工处理，返工后按原质量标准重新验收。
8.3.4　质量缺陷处理记录应纳入施工档案，存档备查。

9　维护保养

9.1　日常维护

9.1.1　作业前后应对爬壁机器人进行清洁，去除表面灰尘、油污、物料残留等，保持设备整洁。
9.1.2　应检查爬壁机器人各部件的紧固情况，及时拧紧松动的螺栓、螺母。
9.1.3　应检查磁吸装置的密封件、磁性元件等，如有磨损、老化应及时更换。
9.1.4　应检查移动机构的车轮、履带等，保持润滑良好，运行顺畅。
9.1.5　应检查电缆线、插头等电气部件，如有破损、老化应及时修复或更换。

9.2　定期保养

9.2.1　每周应对爬壁机器人进行一次全面检查，测试吸附力、移动精度、作业工具性能等关键参数，

确保设备处于良好状态。
9.2.2　每月应对爬壁机器人进行一次润滑保养，对移动机构、转动关节等部位加注润滑油。
9.2.3　每季度应对电池进行一次容量检测，及时更换容量衰减严重的电池。
9.2.4　每年应对爬壁机器人进行一次全面检修，由专业技术人员对设备进行拆解检查、维修和校准，确保设备性能符合要求。

9.3　年度检修

9.3.1　拆解爬壁机器人核心部件（如吸附系统、动力系统），应进行全面检测、清洁和维修，更换达到使用寿命的部件（如电池、电机等）。
9.3.2　应对爬壁机器人整体性能进行测试，包括吸附能力、移动精度、作业效率等，确保符合设备出厂技术指标。
9.3.3　应建立设备维护档案，记录维护时间、内容、更换部件等信息，作为设备报废、更新的依据。

9.4　存储要求

9.4.1　爬壁机器人应存放在干燥、通风、阴凉的库房内，避免阳光直射、雨淋、受潮。
9.4.2　存储时应将爬壁机器人吸附装置清洁干净，放置在专用支架上，避免吸附面受压变形。
9.4.3　电池应单独存储，定期补充充电，防止电池亏电损坏。
9.4.4　存储期间应定期检查设备状态，每月进行一次通电试运行，确保设备功能正常。

10　应急处置

10.1　吸附失效应急

10.1.1　若爬壁机器人吸附压力突然下降或出现脱离作业面迹象，操作人员应立即启动应急制动，同时通知下方人员撤离危险区域。
10.1.2　应急防坠装置启动后，应确认爬壁机器人稳定悬挂，不应盲目施救；组织专业人员使用起重设备将爬壁机器人安全回收，排查吸附失效原因（如密封件损坏、作业面杂质等），修复后方可重新作业。

10.2　设备故障应急

10.2.1　爬壁机器人出现电机故障、控制系统失灵等情况时，应立即停机切断电源，评估爬壁机器人状态；若爬壁机器人仍稳定附着于作业面，待故障排除后继续作业；若存在坠落风险，按 10.1 规定处置。
10.2.2　作业工具故障（如喷涂堵塞、检测传感器失效）时，应停机清理或更换工具，重新调试后再进行作业，避免影响施工质量。

10.3　环境突变应急

10.3.1　作业过程中遭遇大风、雨雪等恶劣天气，应立即停止作业，控制机器人返回安全区域，固定设备，并做好防护措施。
10.3.2　发生火灾、触电等突发事件，应立即切断电源，组织人员撤离至安全区域，按应急预案处置，同时上报相关部门。