

ICS 45.080

CCS S 04

团 体 标 准

T/CAQI XXX—2025

轨道机器人行驶轨道安全规范 与检测方法

Safety standards and testing methods for the movement of
orbital robots on tracks

（征求意见稿）

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国质量检验协会 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 2

4 轨道系统结构 2

 4.1 系统结构构成 2

 4.2 功能性指标 3

5 技术要求 3

 5.1 一般要求 3

 5.2 性能要求 4

 5.3 安全要求 5

6 检测方法 6

 6.1 环境适应性测试 6

 6.2 一般要求与轨道参数检测方法 7

 6.3 技术要求检测方法 7

 6.4 安全检测方法 9

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。

本文件由北京通标国信技术服务有限公司提出。

本文件由中国质量检验协会归口。

本文件起草单位：武汉中科创新技术股份有限公司、北京通标国信技术服务有限公司。

本文件起草人：乐志斌、夏卫彬。

轨道机器人行驶轨道安全规范与检测方法

1 范围

本文件规定了轨道机器人所依赖的行驶轨道的轨道系统结构、技术要求、检测方法等内容。

本文件适用于工业、城市轨道、能源、交通等场景中使用的轨道机器人行驶轨道的建设、检测与运维，也适用于新建或改造项目中轨道系统的技术验收。

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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 1031 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值

GB/T 1804 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差

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 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 2423.17 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾

GB/T 2585 铁路用热轧钢轨

GB 2894 安全标志及其使用导则

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3766 液压传动 系统及其元件的通用规则和安全要求

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 4339 金属材料热膨胀特征参数的测定

GB 4706.1 家用和类似用途电器的安全 第1部分：通用要求

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 7314 金属材料 室温压缩试验方法

GB/T 12444 金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验

GB/T 15822.2 无损检测 磁粉检测 第2部分：检测介质

GB/T 16823.3 紧固件 扭矩-夹紧力试验

GB/T 16855.1 机械安全 控制系统安全相关部件 第1部分：设计通则

GB/T 16916.1 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCCB） 第1部分：一般规则

GB/T 17421.2 机床检验通则 第2部分：数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定

T/CAQI XXX—2025

GB/T 18833 道路交通反光膜

GB/T 23821 机械安全 防止上下肢触及危险区的安全距离

GB/T 24338.1 轨道交通 电磁兼容 第1部分：总则

GB 28526 机械电气安全 安全相关电气、电子和可编程电子控制系统的功能安全

GB/T 30032.2 移动式升降工作平台 带有特殊部件的设计、计算、安全要求和试验方法 第2部分：装有非导电（绝缘）部件的移动式升降工作平台

GB/T 44253-2024 巡检机器人安全要求

JJF 1101 环境试验设备温度、湿度校准规范

JJG 1132 热式气体质量流量计检定规程

TB/T 2344.3 钢轨 第3部分：异型钢轨

TB/T 2488 轨道检测 道床应变、振动测试方法

TB/T 3147 铁路轨道检查仪

TB/T 3355 轨道检测 轨道几何状态动态检测

TB/T 3396.1 高速铁路扣件系统试验方法 第1部分：钢轨纵向阻力的测定

TB 10082 铁路轨道设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

轨道机器人 orbital robot

在工业、城市轨道、能源、交通等场景中，沿预设轨道行驶并执行检测、巡检、维护等任务的自动化机器人。

3.2

轨道机器人行驶轨道检测 track robot travel track detection

对轨道机器人所依赖的行驶轨道进行系统性检测活动，利用轨道机器人对轨道几何参数、结构状态及质量缺陷进行自动化检测与评估的技术过程。

3.3

轨道几何参数 track geometry parameters

用于描述轨道空间姿态与结构准确性的参数集合，包括轨距、高低差、方向差、水平度、垂直度等。

4 轨道系统结构

4.1 系统结构构成

轨道机器人所行驶轨道结构应包含以下子系统。

a) 轨及轨枕系统。采用符合GB/T 2585规定的U71Mn材质热轧钢轨，轨型选择应满足TB 10082对钢轨类型的规定；轨枕可选混凝土或高分子复合材质，布置间距不大于600 mm且应符合TB 10082对轨枕铺设密度的要求。

b) 道床支撑系统。轨道下部结构应设有碎石道床或整体道床。

c) 扣件系统。采用弹性扣件，应能提供可靠的纵向阻力。

- d) 导引与通讯系统。轨道两侧可附设导电条或传感通信组件，用于供电、定位、感知及通讯。
- e) 电气绝缘系统。若使用电流感应系统，轨道需设置绝缘节段。

4.2 功能性指标

轨道机器人所行驶轨道的功能要求应包括下列条件。

- a) 支撑载荷。轨道结构应承受动态轴载不小于8 t（单轮）且不产生永久变形。
- b) 导向精度。轨道偏移误差 $\leq \pm 1.5\text{ mm}$ ，全长方向高低差 $\leq \pm 2\text{ mm}/10\text{ m}$ 。
- c) 抗震能力。应承受1 g/20 ms冲击及5 Hz~50 Hz正弦振动，水平向加速度 $\geq 2\text{ m/s}^2$ 。
- d) 自洁与排水能力。轨道道床结构应具备良好的排水设计，坡度设置应满足排水需求，确保无积水。
- e) 模块化。轨道系统应满足模块化拼接、快换维护需求。

5 技术要求

5.1 一般要求

轨道结构应符合GB/T 2585的规定，具有足够的精度、强度、运行速度、刚度及稳定性，能承受轨道机器人运行过程中产生的动载荷及环境应力。轨道安装应牢固可靠，不应出现松动、变形现象。

5.1.1 轨道参数

轨道机器人所依赖的行驶轨道基本参数应符合表1的规定。

表1 轨道机器人行驶轨道基本参数

项目	技术指标	允许偏差
轨距（mm）	1435	± 1.5
轨高（mm）	152	± 1
轨头宽（mm）	70	± 0.5
曲率半径（m）	≥ 15	—
道床沉降量（mm）	≤ 2	—
弹性扣件安装扭矩（N·m）	≥ 80	—
扣件纵向阻力（kN）	≥ 9	—

5.1.3 表面质量

轨道运行面不应存在裂纹、气孔、凸起、塌陷、尖锐棱角等缺陷；表面粗糙度Ra不应大于6.3 μm 。

5.1.4 电气性能

绝缘段阻值不小于100 M Ω ，连接段导通阻抗不大于0.05 Ω 。

5.1.5 防护性能

系统电气接口与通信线路应满足GB/T 4208中IP54等级要求，必要区域达到IP65（如车库入口、露天段）。

5.1.6 稳定性

轨道系统应具备环境适应性、防护性能及抗干扰能力，具体要求应符合表2规定。

表2 稳定性要求

项目	技术指标
防水防尘	露天段IP65，室内段IP54
抗电磁干扰	满足轨道交通电磁兼容性三级要求
温度适应性	-40℃~+75℃环境下保持结构稳定性
湿度适应性	95% RH条件下不产生锈蚀及绝缘劣化
热膨胀补偿	线性膨胀系数 $\leq 11.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ (0-50℃范围)

5.2 性能要求

5.2.1 精度要求

5.2.1.1 几何精度

轨道安装后的几何参数应符合表3规定。

表3 轨道安装后的几何参数要求

项目	要求值
高低差	$\leq 3 \text{ mm/m}$
水平偏差	$\leq 2 \text{ mm/m}$
轨距误差	$\pm 1.5 \text{ mm}$
垂直度偏差	$\leq 2 \text{ mm/m}$
接缝错位	$\leq 1 \text{ mm}$

5.2.1.2 运行精度

轨道机器人运行精度应符合表4规定。

表4 轨道机器人运行精度要求

项目	指标要求
定位精度	$\leq \pm 3 \text{ mm}$
重复定位精度	$\leq \pm 1 \text{ mm}$
速度保持精度	$\pm 5\%$ 设定值
停止位置偏差	$\leq \pm 10 \text{ mm}$

5.2.2 刚度要求

轨道系统刚度性能指标应符合表5规定。

表5 轨道系统刚度要求

项目	技术指标
材料基础性能	钢轨材质：U71Mn热轧钢轨，符合GB/T 2585规定
静态刚度	加载8 t轴载时挠度 $\leq 1.5 \text{ mm/m}$
动态刚度	20 Hz振动下振幅衰减率 $\geq 85\%$
导轨硬度	260 HBW~340 HBW

热变形补偿能力	温度每变化1℃长度变化≤0.15 mm/m
力学性能	抗拉强度≥880 MPa、 屈服强度≥600 MP 冲击韧性≥27 J(-20 ℃)

5.2.3 运行速度

轨道机器人运行速度应符合表6规定。

表6 轨道机器人运行速度要求

项目	指标要求
最高持续运行速度	≥5 m/s
加速性能	0-5 m/s，加速时间≤15 s
速度波动率	≤±3%
紧急制动距离	≤2 m（5 m/s初速）

5.2.4 强度要求

轨道系统强度应符合表7规定。

表7 轨道系统强度要求

项目	技术指标
耐磨性	10万次循环磨损量≤0.2 mm
抗压强度	≥600 MPa
抗拉强度	≥880 MPa
抗冲击性能	50 J冲击后无裂纹
疲劳寿命	200万次循环无失效（8 t动态载荷）

5.3 安全要求

5.3.1 安全总则

轨道机器人在行驶轨道检测活动中，其安全活动应符合GB/T 44253-2024中5.7的规定及本章规定，确保检测过程的安全性，防止对人员、设备及环境造成危害。

5.3.2 安全检测项目

安全检测应符合表8规定。

表8 安全检测要求

检测类别	检测项目	技术指标要求
机械安全	外观完整性	1. 结构变形量≤3 mm/m 2. 裂纹长度≤5 mm且不贯穿
	运动部件防护	1. 防护装置覆盖范围≥200 mm 2. 防护网孔径≤8 mm
	急停装置功能	1. 响应时间≤0.5 s 2. 停机滑行距离≤1 m， 3. 机械保持力≥50 N
电气安全	绝缘性能	1. 带电体-外壳≥100 MΩ（500V DC）

		2. 潮湿环境 $\geq 10\text{ M}\Omega$
	接地连续性	1. 主接地线径 $\geq 4\text{ mm}^2$ 2. 接地电阻 $\leq 0.1\text{ }\Omega$
	漏电保护	1. 动作电流 $\leq 30\text{ mA}$ 2. 动作时间 $\leq 0.1\text{ s}$ （1倍额定电流）
控制系统安全	信号稳定性	1. 信噪比 $\geq 60\text{ dB}$ 2. 误码率 $\leq 1\times 10^{-8}$ （10V/m干扰下）
	故障诊断	1. 故障识别率 $\geq 99\%$ 2. 报警响应 $\leq 2\text{ s}$
	安全逻辑	1. 急停触发率100% 2. 故障安全模式切换 $\leq 500\text{ ms}$
人员防护	接近检测	1. 检测盲区 $\leq 50\text{ mm}$ 2. 分层响应：0.5 m预警/0.3 m制动
	安全标识	1. 可视距离 $\geq 15\text{ m}$ 2. 逆反射系数 $\geq 500\text{ cd/lx/m}^2$
	声光报警	1. 声强 $\geq 80\text{ dB}$ 2. 光闪频率2 Hz~5 Hz 3. 声光同步误差 $\leq 100\text{ ms}$

5.3.3 安全标识

轨道系统应在坡道、分岔、交汇段设置明显警示标识，反光等级应不低于GB/T 18833的R2级。

5.3.4 安全检测周期

轨道机器人在首次投入使用前应进行全面的安全检测。在正常使用过程中，应定期进行安全检测，检测周期根据轨道机器人的使用频率和环境条件确定，但不得少于每半年一次。

5.3.5 安全检测记录

每次安全检测应详细记录检测项目、检测方法、检测结果及检测日期等内容，并由检测人员签字确认。安全检测记录应妥善保存，保存期限不得少于轨道机器人的使用寿命。

5.3.6 安全检测结果处理

5.3.6.1 合格处理

经检测合格的轨道机器人，应张贴合格标识，方可继续投入使用。

5.3.6.2 不合格处理

经检测不合格的轨道机器人，应立即停止使用，并进行维修或更换。维修或更换后，需重新进行安全检测，直至合格为止。

6 检测方法

6.1 环境适应性测试

轨道机器人行驶轨道环境适应性检测应符合表9规定。

表9 轨道环境适应性检测条件

项目	条件	持续时间
高温	+70 °C	72 h

低温	-25 ℃	72 h
湿热	95% RH, 40 ℃	96 h
盐雾	5% NaCl, 35 ℃	48 h

6.2 一般要求与轨道参数检测方法

一般要求与轨道参数检测方法应符合表10规定。

表10 一般要求与轨道参数检测方法

项目	试验方法	执行标准
一般要求	检查轨道安装牢固性，采用手动或机械方式施加一定力矩，观察轨道是否松动、变形。	TB/T 2488
轨距	1. 使用轨距尺在每20 m区间测量5个点（含接头处） 2. 激光测距仪连续扫描轨距波动曲线	GB/T 1804
轨高	1. 激光断面仪获取轨道断面数据 2. 游标卡尺定点抽检（每50 m测3处）	GB/T 1804
轨头宽	1. 三维轮廓扫描仪获取轨头几何参数 2. 专用轨头卡板进行通过性检验	GB/T 1804
曲率半径	1. 全站仪坐标法计算曲线半径 2. 三维激光扫描逆向建模验证	TB 10082
道床沉降量	1. 精密水准仪建立高程基准网 2. 自动化监测系统连续观测（周期≥72 h）	TB/T 2488
弹性扣件安装扭矩	1. 预置式扭矩扳手抽检（每100套测5套） 2. 智能螺栓动态监测系统在线检测	GB/T 16823.3
扣件纵向阻力	1. 液压拉力试验机现场抽检 2. 动态阻力测试仪连续测量（速度0.5 m/s）	TB/T 3396.1

6.3 技术要求检测方法

6.3.1 稳定性检测方法

稳定性项目检测方法，具体要求见表11。

表11 稳定性要求

项目	检测方法	执行标准
防水防尘	采用喷淋试验箱和防尘试验箱模拟环境条件，验证防护性能	GB/T 4208
抗电磁干扰	进行辐射抗扰度试验（10 V/m，80 MHz～1 GHz）和传导抗扰度试验（10 V，150 kHz～80 MHz）	GB/T 24338.1
温度适应性	高低温循环试验（-40 ℃～+75 ℃，5次循环）	GB/T 2423.1 GB/T 2423.2
湿度适应性	恒定湿热试验（40 ℃/95% RH，持续96 h）	GB/T 2423.3
热膨胀补偿	采用热膨胀系数测定仪测量20 ℃～50 ℃区间变形量	GB/T 4339

6.3.2 精度要求检测方法

6.3.2.1 几何精度检测方法

轨道安装后的几何参数检测方法应符合表12规定。

表12 轨道安装后的几何参数检测方法

项目	检测方法	执行标准
高低差	1. 轨检小车连续测量法（动态） 2. 电子水平仪分段测量法（静态）	TB/T 3355
水平偏差	1. 全站仪三角高程测量法 2. 惯性基准轨道检测系统	GB/T 17421.2
轨距误差	1. 轨距尺人工抽检法 2. 激光扫描连续测量法	TB/T 3147
垂直度偏差	1. 全站仪三维坐标法 2. 激光垂准仪投影法	TB 10082
接缝错位	1. 塞尺直接测量法 2. 三维激光断面比对法	TB/T 2344.3

6.3.2.2 运行精度检测方法

轨道机器人运行精度检测方法应符合表13规定。

表13 轨道机器人运行精度检测方法

项目	检测方法	执行标准
定位精度	采用激光跟踪仪在轨道全长范围内进行多点定位测量	GB/T 17421.2
重复定位精度	在同一点位进行10次往复运行，记录最大偏差值	GB/T 17421.2
速度保持精度	使用多普勒雷达测速仪测试不同速度段（0.5 m/s~5 m/s）的实际速度波动	JJG 1132
停止位置偏差	设置10个典型停靠点进行停机位置标定，测量实际停靠偏移量	TB/T 3355

6.3.3 刚度要求检测方法

轨道系统刚度性能指标检测方法应符合表14规定。

表14 轨道系统刚度检测方法

项目	检测方法	执行标准
材料基础性能	1. 查验材质证明文件 2. 光谱分析化学成分 3. 金相组织检测	GB/T 2585
静态刚度	采用液压加载装置施加静载荷，用位移传感器测量形变量	TB/T 2488
动态刚度	施加20 Hz/±1 mm正弦振动，用加速度计测量振幅衰减特性	GB/T 2423.10
导轨硬度	使用布氏硬度计在轨头中央区域进行三点测量（轨顶、轨腰两侧）	GB/T 231.1
热变形补偿能力	在恒温实验室测量20℃基准值与±30℃温差下的长度变化率	GB/T 4339
力学性能	1. 标准试样拉伸试验（GB/T 228.1） 2. 夏比摆锤冲击试验（GB/T 229）	GB/T 228.1 GB/T 229

6.3.4 运行速度检测方法

轨道机器人运行速度检测方法应符合表15规定。

表15 轨道机器人运行速度检测方法

项目	检测方法	执行标准
最高持续运行速度	在直线段进行持续1km运行测试，记录稳定运行速度	JJG 1132
加速性能	使用加速度计测量从静止加速至额定速度的时间	GB/T 2423.10
速度波动率	在标准负载下连续运行30分钟，记录速度最大值与最小值差值	JJF 1101
紧急制动距离	触发急停装置后测量滑行距离	GB/T 44253

6.3.5 强度要求检测方法

轨道系统强度检测方法应符合表16规定。

表16 轨道系统强度检测方法

项目	检测方法	执行标准
耐磨性	使用摩擦磨损试验机（载荷500 N，频率2 Hz）进行往复磨损试验	GB/T 12444
抗压强度	取轨腰部位试样进行压缩试验	GB/T 7314
抗拉强度	按标准取样进行拉伸试验	GB/T 228.1
抗冲击性能	夏比V型缺口冲击试验（-20℃环境）	GB/T 229
疲劳寿命	使用液压脉冲试验机进行高频疲劳试验	GB/T 3075

6.4 安全检测方法

轨道机器人投入检测前应参照表17的规定进行安全检测。

表17 轨道机器人安全检测方法

检测类别	检测项目	检测方法	执行标准
机械安全	外观完整性	目视检查外壳、轨道连接处，测量结构变形量（ $\leq 3\text{ mm/m}$ ）	GB/T 44253
	运动部件防护	验证防护装置有效覆盖范围（危险区域 $\geq 200\text{ mm}$ 安全距离）	GB/T 23821
	急停装置功能	触发急停后测量响应时间（ $\leq 0.5\text{ s}$ ），验证停机滑行距离（ $\leq 1\text{ m}$ ）	GB/T 5226.1
电气安全	绝缘性能	500 V兆欧表测量带电部件与外壳间绝缘电阻（ $\geq 100\text{ M}\Omega$ ）	GB 4706.1
	接地连续性	测量任意接地点与主接地端子间电阻（ $\leq 0.1\text{ }\Omega$ ）	GB/T 5226.1
	漏电保护	模拟30mA漏电流验证保护装置动作时间（ $\leq 0.1\text{ s}$ ）	GB/T 16916.1
控制系统安全	信号稳定性	80MHz-1GHz频段内施加10V/m干扰，验证控制信号误码率（ $\leq 1\times 10^{-8}$ ）	GB/T 24338.1
	故障诊断	注入传感器断线、通信超时等故障，验证报警响应时间（ $\leq 2\text{ s}$ ）	GB/T 16855.1
	安全逻辑	模拟轨道异物入侵、人员闯入等场景，验证急停触发率（100%）	GB 28526
人员防护	接近检测	测试检测盲区（ $\leq 50\text{ mm}$ ），验证0.5 m预警/0.3 m制动分层响应机制	GB/T 30032.2
	安全标识	检测标识可视距离（ $\geq 15\text{ m}$ ）、反光强度（ $\geq 500\text{ cd/lx/m}^2$ ）	GB 2894
	声光报警	测量报警声强（ $\geq 80\text{ dB}$ ）、光闪频率（2 Hz~5 Hz）	GB/T 3766