

团 体 标 准

T/CIE XXXX—2025

矿山用无人车智能行进技术规范

Technical specifications for intelligent driving of unmanned vehicles in mines

（征求意见稿）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国电子学会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 系统组成 2

 4.1 无人车本体 2

 4.2 无人车电源系统 2

 4.3 智能行进通信系统 2

 4.4 环境感知系统 2

 4.5 动态路径决策和规划系统 2

 4.6 智能行进控制系统 3

 4.7 应急避险系统 3

5 无人车本体 3

 5.1 结构强度 3

 5.2 密封性 3

 5.3 防护性能 3

6 无人车电源性能 4

 6.1 电源容量 4

 6.2 电源稳定性 4

 6.3 电源适应性 4

7 智能行进通信 4

 7.1 通信可靠性 4

 7.2 通信延迟 4

 7.3 通信安全性 4

8 智能环境感知 4

 8.1 环境适应性 4

 8.2 环境感知 4

9 动态路径决策和规划 5

 9.1 决策规划性能 5

 9.2 动态路径规划 5

10 智能行进控制 6

 10.1 动力控制 6

 10.2 转向控制 6

 10.3 制动控制 6

 10.4 精确操作 6

11 应急避障 6

11.1 风险管理 6

11.2 特殊地形避障 7

12 试验方法 7

12.1 本体性能 7

12.2 电源性能 7

12.3 通信性能 7

12.4 环境感知 8

12.5 决策规划 8

12.6 控制性能 9

12.7 应急避障 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。

本文件由中国电子学会提出并归口。

本文件起草单位：太原工业学院、北京理工大学、太仓麦斯达夫技术研究有限公司、山西新华防化装备研究院有限公司、北京航空航天大学、国能神东煤炭集团有限责任公司、新疆准东经济技术开发区管理委员会、山西天地煤机装备有限公司、浙江远程新能源商用车集团有限公司、蘑菇车联信息科技有限公司、北京轻舟智航智能技术有限公司、陕西榆林能源集团榆神煤电有限公司、华阳新材料科技集团有限公司、中国矿业大学、北京中科赛新智能技术有限公司、麦斯达夫（山西）集团有限公司。

本文件主要起草人：乔俊福、黄刚、尉伟华、王步康、李华文、田俊康、赵飞、郑波、张惠棋、陈果。

矿山用无人车智能行进技术规范

1 范围

本文件规定了矿山用无人车智能行进技术的系统组成、无人车本体、无人车电源性能、智能行进通信、智能环境感知、动态路径决策和规划、智能行进控制、应急避障、试验方法等内容。

本文件适用于高等学校、科研院所、企业等从事矿山用无人车智能行进的技术研发工作。

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 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 2423.37 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验L：沙尘试验
GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
GB/T 4797.6 环境条件分类 自然环境条件 尘、沙、盐雾
GB 9656 机动车玻璃安全技术规范
GB 18384 电动汽车安全要求
GB 34660 道路车辆 电磁兼容性要求和试验方法
GB/T 38628 信息安全技术 汽车电子系统网络安全指南
GB/T 40429—2021 汽车驾驶自动化分级
TD/T 1072 国土调查坡度分级图制作技术规定
YD/T 3750 车联网无线通信安全技术指南
YD/T 4770—2024 车路协同 路侧感知系统技术要求及测试方法
《煤矿智能化建设指南（2021年版）》（国家能源局 国家矿山安全监察局）
《煤矿安全规程（2025年版）》（应急管理部发布）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

无人车 unmanned vehicle

具备环境感知、智能决策和自动控制，或与外界信息交互，乃至协同控制功能，无人人类驾驶操纵机构，可在矿山环境下自主完成指定任务的作业装备。

3.2

智能行进 intelligent marching

无人车通过自身搭载的传感器、控制器等设备，实现对环境的感知、决策和控制，从而在矿山环境下安全、高效地自主行驶的过程。

3.3

环境感知 environmental perception

无人车利用摄像头、激光雷达、毫米波雷达等传感器，获取无人车周围环境信息，包括道路状况、障碍物、特殊地形等信息的过程。

3.4

决策规划 decision-making planning

无人车根据环境感知信息，结合自身行驶目标和约束条件，运用算法和模型，制定行驶策略和路径规划的过程。

4 系统组成

4.1 无人车本体

无人车本体作为整个系统的核心承载平台，其结构强度、密封性及防护性应针对矿山特殊工况进行适应性设计，在振动、冲击、风沙、粉尘等矿山环境下稳定运行。

4.2 无人车电源系统

无人车的电磁兼容性应符合GB 34660中的规定，配备备用电源，在电源耗尽或断开时自动启动，为无人车各系统提供稳定、可靠的电源。

4.3 智能行进通信系统

4.3.1 无人车应具有蜂窝网络通信或短距离通信等功能，具备远程控制所要求的通信能力，应符合YD/T 3750 的规定。

4.3.2 应支持 V2V、V2I、V2P 通信，保障信息的实时交互。

4.4 环境感知系统

4.4.1 应集成多传感器融合系统，至少包括 RFID 自动识别系统、视觉传感器、激光雷达、毫米波雷达及自定位辅助传感器。

4.4.2 传感器配置需满足动态环境下的多模态数据采集需求，支持目标识别、距离测量、环境建模等功能。

4.4.3 关键传感器应冗余备份，单传感器失效时系统仍可降级运行，宜配置 IMU、GPS。

4.4.4 在寿命周期内，面对动态变化的外部环境因素，能够准确感知目标信息、维持功能稳定且不发生性能退化。

4.5 动态路径决策和规划系统

4.5.1 全局规划

4.5.1.1 应基于高精地图与静态环境信息，在任务起点与终点间规划最优或次优路径。

4.5.1.2 输入数据应包括但不限于：

- 高精地图数据；
- 任务起点与终点坐标；
- 实时路径状态。

4.5.1.3 输出要求包括但不限于：

- 车道级路径序列；
- 路径代价评估。

4.5.1.4 系统的全局规划应支持多目标优化与分级规划。

4.5.2 局部重规划

4.5.2.1 在全局路径基础上，应根据实时感知的动态障碍物及环境变化，生成局部避障路径。

4.5.2.2 输入数据应包括但不限于：

- 全局路径；
- 实时传感器数据；
- 动态障碍物预测轨迹。

4.5.2.3 输出要求包括但不限于：

- 标注路径上的障碍物位置，对近距离障碍物需额外输出避障动作；
- 对动态障碍物，需结合传感器数据更新其运动预测轨迹，输出规避策略。

4.5.2.4 系统的局部重规划应支持实时碰撞检测与路径平滑。

4.5.3 协同规划

4.5.3.1 无人车在共享环境中通过通信协作，优化全局与局部路径，规避路线冲突。

4.5.3.2 输入数据应包括但不限于：

——其他无人车位置、速度、意图；

——环境的约束条件。

4.5.3.3 输出要求包括但不限于：

——协同路径规划；

——冲突解决策略。

4.6 智能行进控制系统

4.6.1 具备纵向控制、转向控制、协同控制及特殊环境自适应调节功能。

4.6.2 纵向控制负责车辆的加速、减速与制动，能根据决策规划指令及实时路况，平滑调节车速，应与前车或目标位置保持安全距离。

4.6.3 转向控制依据规划路径实时调整转向角度，车辆应精准沿路径行驶。

4.6.4 协同控制通过协调纵向与转向控制动作，解决二者间的潜在冲突。

4.6.5 特殊环境自适应调节功能可根据环境感知系统反馈的信息，自动优化控制参数。

4.7 应急避险系统

4.7.1 故障检测与处理

4.7.1.1 无人车启动前，应进行系统异常检查、传感器异常检查。发现异常情况时，应向近场安全员、远程驾驶员和云控平台发出警告。

4.7.1.2 无人车应安装具有碰撞防护功能的装置，在运行过程中，应能持续探测自身功能完整性，当出现失效导致无法继续执行功能任务时，应执行最小风险策略。

4.7.2 紧急制动与避障

4.7.2.1 采用三级制动策略，由低到高依次为：

——低级策略：用于处理一般性碰撞风险的紧急制动与避障；

——中级策略：用于处理中等风险、综合判断的紧急制动与避障；

——高级策略：用于处理极端风险、实现最高安全目标的紧急制动与避障。

4.7.2.2 紧急制动与避障系统应与其他安全系统及外部系统协同工作。

4.7.3 通信中断应对

无人车应建立通信网络安全防护措施，其电子系统网络安全应满足GB/T 38628的要求。

5 无人车本体

5.1 结构强度

车辆本体的结构应具备足够的强度和刚度，能够承受矿山的各种载荷，如振动、冲击、风沙侵蚀等。在进行相关环境试验后，车辆结构不应出现变形、裂纹等损坏现象。

5.2 密封性

车辆本体应具备良好的密封性，防止雨水、沙尘等进入车辆内部，影响各系统的正常工作。车辆的门窗、舱盖等部位应采用密封胶条或其他密封措施，密封性能应符合GB/T 4208中相应防护等级的要求。电池防水等级不低于IP67。

5.3 防护性能

车辆本体应采取有效的防护措施，对车辆的底盘、车身等部位应进行防腐处理，对电气设备应进行防水、防尘、防潮、防盐雾等防护处理，防护性能应满足GB 18384的要求。车辆玻璃应满足GB 9656的要求。

6 无人车电源性能

6.1 电源容量

电源系统的容量应满足无人车在矿山单日连续运行 ≥ 20 h。

6.2 电源稳定性

电源系统应提供稳定的电压和电流输出，在车辆启动、加速、制动等工况下，电源系统应能保持稳定输出。

6.3 电源适应性

电源系统应能适应矿山的温度、湿度等条件，在高温、低温、高海拔等环境下，电源的性能满足车辆的正常运行需求。

7 智能行进通信

7.1 通信可靠性

通信系统应具备高可靠性，车与车、车与基础设施、车与人之间保持通信稳定、流畅。

7.2 通信延迟

通信系统的传输延迟应满足无人车智能行进的实时性要求。

7.3 通信安全性

通信系统应具备完善的安全防护机制，采用加密算法对通信数据进行加密。

8 智能环境感知

8.1 环境适应性

8.1.1 高温

无人车应能在温度为 ≥ 40 °C的环境下正常工作，连续运行时间 ≥ 5 h且各项性能指标应符合设计要求。试验后，车辆不应出现任何故障或损坏。

8.1.2 低温

无人车应能在温度为 ≤ -20 °C的环境下正常启动和工作，连续运行时间 ≥ 5 h，且各项性能指标应符合设计要求。试验后，车辆不应出现任何故障或损坏。

8.1.3 高海拔

无人车应能在海拔高度为 ≥ 3000 m的环境下正常工作，动力性能、制动性能等应满足设计要求，连续运行时间 ≥ 5 h。试验后，车辆不应出现任何故障或损坏。

8.1.4 雨雪

无人车在雨雪环境下应能正常行驶，具备良好的防水、防滑性能。在降雨导致能见度 < 200 m或积雪厚度为10 cm的条件下，车辆应能稳定运行，环境感知系统应能准确识别道路和障碍物，决策规划系统和控制系统应能正常工作。

8.1.5 沙尘

无人车在沙尘环境下应能正常运行，具备良好的防尘性能。在沙尘浓度为 1000 mg/m^3 的条件下，车辆连续运行时间 ≥ 5 h，且各项性能指标应符合设计要求。试验后车辆各系统应能正常工作。

8.2 环境感知

8.2.1 感知范围

应满足无人车在特殊环境下的行驶需求，水平感知范围 $\geq 360^\circ$ ，垂直感知范围 $\geq 15^\circ$ ，最远感知距离 $\geq 150\text{ m}$ 。

8.2.2 感知精度、

环境感知系统对障碍物的位置、尺寸、速度等参数的感知精度应满足决策规划和控制系统的要求。

8.2.3 感知实时性

环境感知系统应能实时获取车辆周围环境信息，从传感器采集数据到将处理后的信息传输给决策规划系统的时间间隔 $\leq 10\text{ ms}$ 。

8.2.4 实时数据处理

8.2.4.1 视觉感知计算芯片应用环境应包括但不限于：

- 气候环境：湿度、温度、热应力、光照、气压、水；
- 机械环境：机械振动；
- 化学与微粒环境：粉尘、化学气体和试剂；
- 电气与电磁环境：电气环境、电磁场。

8.2.4.2 视觉感知计算芯片的功能安全要求应贯穿产品的全生命周期，根据不同的应用场景要求，视觉感知计算芯片应满足相应的 ASIL 等级。

8.2.4.3 视觉感知计算芯片的算力和对应的算法应根据应用场景确定其精度和速度。

8.2.4.4 针对不同应用场景，可选取对应的精度指标，指标选取范围包括但不限于 top-1、top-5 算法准确率、mAP、mIoU、F-Score、FAR、FRR、Identification rate、WER、SER、Precision 和 Accuracy 等。

9 动态路径决策和规划

9.1 决策规划性能

9.1.1 决策正确性

决策规划系统应根据环境感知信息和车辆自身状态，做出正确的行驶决策。

9.1.2 路径规划合理性

路径规划算法应能为无人车规划出安全、高效的行驶路径，避免碰撞障碍物和违反交通规则。规划路径应满足车辆的动力学和运动学约束要求。

9.1.3 决策规划响应时间

决策规划系统的环境感知信息从接收到输出行驶指令的时间间隔 $\leq 10\text{ms}$ 。

9.2 动态路径规划

9.2.1 环境感知信息进行分析、决策和路径规划，为控制系统提供行驶指令，补充概括信息分析、路径规划的内容。

9.2.2 无人车应根据实时环境感知数据、任务目标及动态约束，通过算法实时生成最优或可行路径。

9.2.3 宜结合 A*算法的全局规划能力与动态窗口法的局部避障能力，形成全局路径和局部调整的动态规划策略。

9.2.4 宜基于 A*算法和动态窗口法，优先选择积雪较少、摩擦力较高的区域行驶，避免急转弯或急加速导致侧滑。

9.2.5 应依据具体任务需求选用地图表示方法。对于需要高精度几何信息的环境，宜采用栅格地图；对于强调节点间连通关系的大尺度环境，宜采用拓扑地图。结合激光雷达、摄像头等传感器数据动态更新地图信息。

9.2.6 当检测到突发障碍物或路况变化时，系统应自动触发路径重规划，优先选择安全距离最长、能

耗最低的替代路径。

10 智能行进控制

10.1 动力控制

动力控制系统应根据决策规划系统的指令，精确控制无人车的加速、减速和匀速行驶。

10.2 转向控制

转向控制系统应能实现无人车的精确转向，在行驶过程中应保持良好的行驶稳定性，不应出现跑偏、侧滑等现象。

10.3 制动控制

制动控制系统在紧急制动情况下，应能迅速、平稳地停车，不发生失控现象。

10.4 精确操作

通过技术手段对无人车运行状态、环境感知及任务执行等情况进行远程实时监控与干预，能够在矿山环境下按照预定路线安全可靠运行。矿山环境下的精确操作见表1。

表 1 矿山环境下的精确操作

技术维度	环境需求	技术实现要求	符合性要求
高精度感知与融合	煤矿粉尘、烟雾导致光学传感器失效； 地下矿井无GNSS信号，定位漂移风险高。	多模态感知：激光雷达、毫米波雷达、红外热成像融合，穿透粉尘或烟雾，障碍物识别精度 $\geq 99\%$ ； 无GNSS定位：采用激光检测、无线自组网、多系统融合联动等技术与装备，搭建具备激光、红外等先进检测传感器、无线传感器、多参数一体化传感器等先进设备的监控系统； 粉尘灾害感知：在矿井粉尘易超标区域，安装呼吸性粉尘和总粉尘浓度实时在线监测传感器、智能喷雾装置及智能降尘装置。	符合YD/T 4770—2024中对于“识别精度 $\geq 90\%$ ”的要求； 符合《煤矿智能化建设指南（2021年版）》实现系统低功耗、超远距离传输、高抗干扰能力的要求； 实现粉尘浓度智能监测及远程降尘控制的要求。
动态避障与路径规划	煤矿巷道狭窄，障碍物密集，应实时调整轨迹； 高原或深海通信延迟，影响决策实时性。	实时避障：无设计运行范围限制，执行风险减缓策略并自动达到最小风险状态； 通信容错机制：采用边缘计算+本地决策，通信中断时自主执行预设安全策略。	符合GB/T 40429—2021中“5级驾驶自动化”的要求； 符合《煤矿安全规程（2025年版）》的要求。
精细化控制	深海或高原低温导致电机效率下降，应精准控制扭矩； 煤矿地面不平，应稳定姿态避免侧翻。	姿态稳定控制：在俯仰/横摆角，支持最大坡度的稳定行驶； 抗干扰设计：基于电机扭矩调节的电子稳定程序，应对低温/沙尘导致的动力不足。	符合GB/T 33014中的规定。
环境适应性设计	沙漠高温、深海高湿高压等导致设备故障率升高。	硬件防护：耐高温材料、IP67或IP6K9K防护等级、抗冲击结构； 冗余设计：双电源、双通信链路，单点故障不影响核心功能； 自清洁与散热：摄像头或激光雷达配备雨刷或压缩空气吹扫，高温环境下主动散热。	符合GB/T 2423.37中的规定； 符合《煤矿安全规程（2025年版）》“设备防爆的要求”。

11 应急避障

11.1 风险管理

- 11.1.1 应通过多维度数据评估无人车行驶风险等级，为决策提供量化依据，降低事故发生概率。
- 11.1.2 应基于历史事故数据训练机器学习模型，预测不同场景下的风险等级，实现动态风险预警。
- 11.1.3 风险等级应划分为“高、中、低”三级，对应不同应对策略（见 4.7.2.1）。
- 11.1.4 应提供风险可视化输出，辅助驾驶员或远程监控人员快速决策。
- 11.1.4.1 涉水前应通过轻点制动的方式预热制动系统，以消除刹车盘上的水膜，恢复和保持制动效能。

11.2 特殊地形避障

- 11.2.1.1 应配备多模态传感器，通过点云融合和语义分割技术识别冰雪路面上的障碍物。宜采用红外热成像辅助识别被积雪覆盖的人或动物。
- 11.2.1.2 启用防滑控制和电子稳定程序，通过调节电机扭矩和制动力分配防范车辆打滑。
- 11.2.1.3 遇到连续弯道或陡坡时，应采用分段规划策略，提前减速并分阶段通过，不应大角度转向。
- 11.2.1.4 陡坡地形和涉水区域的分级与避障措施见表 2。

表 2 陡坡地形与涉水区域的分类与避障措施

特殊地形	分级	避障措施
陡坡地形	按TD/T 1072的规定对坡度陡缓分为不同等级，结合地形起伏程度、坡面稳定性等因素综合评估。	对坡道上的落石、土堆等动态障碍物，采用三维点云建模技术预测运动轨迹，提前规划避让路径； 通过传感器实时监测坡面状态，动态调整车速和行驶模式。
涉水区域	对涉水区域深度划分为不同等级，结合无人车防水等级、底盘等参数判断通行可行性。	轻度涉水（水深较浅）：允许通过，但需实时监测底盘传感器，防止刮碰或进水； 中度涉水（水深中等）：仅限防水等级IP67及以上的无人车通过，需关闭进气口，并开启涉水模式； 重度涉水（水深较深）：不应通行，系统自动规划绕行路线，避免发动机或电气系统受损。

12 试验方法

12.1 本体性能

12.1.1 结构强度

应对车辆本体进行静载荷、动载荷等结构进行强度试验。通过测量车辆结构在载荷作用下的变形和应力情况，评估车辆本体的结构强度。

12.1.2 密封性

按照GB/T 4208规定的方法，对车辆本体的密封性进行测试。检查车辆门窗、舱盖等部位是否有雨水、沙尘等进入，评估车辆本体的密封性。

12.1.3 防护性能

按照GB 18384规定的方法，对车辆本体的防护性能进行测试。对车辆底盘、车身的防腐性能进行检测，对电气设备的防水、防尘、防潮、防盐雾等性能进行测试，评估车辆本体的防护性能。

12.2 电源性能

12.2.1 电源容量

将无人车充满电或更换好电源后，在模拟的特殊环境下进行连续运行试验，记录车辆从开始运行到电量耗尽或电源无法满足运行需求的时间，作为电源容量指标。

12.2.2 电源稳定性

在无人车运行过程中，利用电压和电流测量设备，实时监测电源系统输出的电压和电流。计算电压波动范围和电流波动范围，评估电源稳定性。

12.2.3 电源适应性

将无人车在高温、低温、高海拔等环境下进行运行试验，同时监测电源的性能参数。对比不同环境下电源性能与常温环境下电源性能的差异，评估电源适应性。

12.3 通信性能

12.3.1 通信可靠性

在实际的通信环境中，模拟车与车、车与基础设施、车与人之间的通信场景，通过统计通信误码率和通信中断时间，评估通信系统的可靠性。

12.3.2 通信延迟

模拟通讯延迟的场景，利用高精度的时间测量设备，测量通信系统从信息发送到接收的时间，重复多次，取平均值作为通信延迟指标。

12.3.3 通信安全性

采用专业的网络安全测试工具，对通信系统的安全防护机制进行测试。模拟通信系统入侵，检查通信数据是否被窃取、篡改和伪造，评估通信系统的安全性。

12.4 环境感知

12.4.1 环境适用性

12.4.1.1 高温

按照GB/T 2423.2规定的方法，将无人车放入高温试验箱中，温度设置为 $\geq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保持5 h。试验过程中，观察无人车的运行状态，记录各项性能指标。试验结束后，检查车辆是否出现故障或损坏。

12.4.1.2 低温

按照GB/T 2423.1规定的方法，将无人车放入低温试验箱中，温度设置为 $\leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保持5 h。试验过程中，观察无人车的运行状态，记录各项性能指标。试验结束后，检查车辆是否出现故障或损坏。

12.4.1.3 高海拔

将无人车置于海拔高度 $\geq 3000\text{ m}$ 的试验场地进行试验，连续运行时间 $\geq 5\text{ h}$ 。试验过程中，监测车辆的动力性能、制动性能等指标，记录试验数据。试验结束后，检查车辆是否出现故障或损坏。

12.4.1.4 雨雪

在专门的雨雪试验场地，模拟降雨导致能见度 $< 200\text{ m}$ 或积雪厚度为 10 cm 的雨雪环境，观察无人车的行驶状态、环境感知系统的工作情况、决策规划系统和控制系统的响应情况等。试验结束后，检查车辆是否出现故障或损坏。

12.4.1.5 沙尘

在沙尘试验箱中，按照GB/T 4797.6的规定，无人车在模拟沙尘浓度为 1000 mg/m^3 以上的沙尘环境下连续运行5 h。试验过程中，观察车辆的运行状态，试验结束后，检查车辆内部的沙尘进入情况和各系统的工作状态。

12.4.2 环境感知

12.4.2.1 感知范围

在空旷的试验场地，设置多个不同位置的目标物，利用无人车的环境感知系统对目标物进行探测。通过测量目标物与无人车之间的距离和角度，确定环境感知系统的水平感知范围和垂直感知范围，以及最远感知距离。

12.4.2.2 感知精度

在试验场地设置多个不同尺寸和形状的障碍物，利用无人车的环境感知系统对障碍物进行感知。通过与实际测量的障碍物位置、尺寸、速度等参数进行对比，计算环境感知系统的感知精度误差。

12.4.2.3 感知实时性

按照GB/T 34590的规定，利用高精度的时间测量设备，测量从传感器采集数据到将处理后的信息传输给决策规划系统的时间间隔，重复多次，取平均值作为感知实时性指标。

12.5 决策规划

12.5.1 决策正确性

在模拟的矿山中，设置多种不同的行驶工况和障碍物情况，记录无人车决策正确的次数与总决策次数，计算二者比例。

12.5.2 路径规划合理性

利用专业的路径规划评估软件，对无人车规划的路径进行分析。评估路径是否安全、高效，是否满足车辆的动力学和运动学约束等。

12.5.3 决策规划响应时间

利用高精度的时间测量设备，测量决策规划系统从接收到输出行驶指令的时间间隔，重复多次，取平均值作为决策规划响应时间指标。

12.6 控制性能

12.6.1 动力控制

无人车按照设定的速度曲线进行加速、减速和匀速行驶。利用速度测量设备，测量车辆的实际速度，与设定速度进行对比，计算动力响应时间和速度控制精度误差。

12.6.2 转向控制

在试验场地设置转向测试轨道，无人车在轨道上进行转向行驶。利用角度测量设备，测量车辆的实际转向角度，与设定转向角度进行对比，计算转向响应时间和转向角度控制精度误差。同时，观察车辆在行驶过程中的稳定性，是否出现跑偏、侧滑等现象。

12.6.3 制动控制

无人车加速到设定速度后，进行紧急制动和正常制动试验。利用制动距离测量设备，测量车辆的制动距离。利用时间测量设备，测量制动响应时间，记录试验数据。

12.7 应急避障

12.7.1 应急安全性测试

应评估系统在应对各类潜在风险时的表现，包括但不限于：

- 碰撞检测与规避；
- 紧急制动功能的可靠性；
- 对网络安全威胁的抵御能力。

12.7.2 危险检测及时性

设置各种可能的危险场景，如突然出现的障碍物、道路塌陷、设备故障等，记录应急避险的时间，判断车辆是否受损。

12.7.3 应急决策准确性测试

在模拟的危险场景中，应记录危情况下无人车做出的应急决策，与预设的合理决策进行对比，评估应急决策的准确性和合理性。

参 考 文 献

- [1] T/CSAE 157—2020 合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第二阶段）
 - [2] T/CSAE 260—2022 智能网联汽车视觉感知计算芯片技术要求和测试方法
 - [3] T/CSAE 286.1—2022 功能型无人车 第1部分：术语和定义
-