CS-202616 · AGENT · 具身智能集群 · 矿山安全高效成套装备

基于 AI Agent 的井工煤矿巷道主动安全巡检智能装备方案

技术方案报告



01 多模态探测 → 02 边缘智能研判 → 03 自主清障处置 → 04 集群调度闭环

面向“三高一复杂”井工环境，打造能感知、会决策、可行动、能协同的成套具身智能装备

水陆两栖机器人 • 液压掘进清障 • 四类灾害预警
AI Agent 多机调度 • 固定/移动时空互补融合

榜单编号
CS-202616

所属领域
高端装备

完成日期
2026 年 9 月

中国青年科技创新“揭榜挂帅”擂台赛 • 高端装备领域

摘要

矿产能源是保障国家能源安全的战略资源，井工开采长期面临“三高一复杂”极端工况，高危巷道巡检依赖人工、灾后坍塌通道疏通困难，是矿山安全生产的两大核心痛点。针对“Agent • 具身智能集群矿山安全高效成套装备创新应用解决方案”课题（CS-202616）提出的目标，本方案选择井工场景，研制集多模态智能探测与液压掘进清障于一体的水陆两栖具身智能机器人，作为矿山具身智能集群中“感知型 + 执行型”异构装备本体，并完成装备本体设计、AI Agent 智能调度接入与主动式风险预警三大目标的成套响应。

装备本体采用船型防爆主体与水陆两栖双驱动移动机构（防爆履带 + 横向螺旋推进，水深20 cm内自动切换），配备履带自适应升降越障机构（升降行程150 mm以上，支持正/倒三角姿态动态切换）；车体前部集成“液压掘进机构 + 带齿切削滚筒 + 侧向旋转推土铲”三阶段协同清障装置，实现坍塌通道分钟级疏通。顶部平台集成 9 大类传感器，融合激光雷达—视觉 SLAM 自主导航与 AI 边缘推理（裂缝/渗水/人员识别），实现远程遥控、自主巡检、应急清障三种工作模式。

集群协同层面，构建“决策型智能体—感知型/执行型机器人—固定监测站”三类异构智能体协同体系，划分机载毫秒级实时决策与地面 Agent 秒级任务决策的分层自治边界，给出日常巡检与灾后清障两类多机协同时序及竞标式任务分配算法。调度与预警层面，装备预留标准 AI Agent 调度接口（HTTP/MQTT，支持自然语言任务派发与工单全闭环），定义监测窗口、风险结果、解释证据等七类数据契约对象；提出固定监测站（时间连续、空间稀疏）与机器人移动监测（空间连续、时间周期）时空互补融合框架及其预处理流水线，采用 XGBoost 主链 +MOA-Transformer 校验 +SHAP 可解释的双模型预警架构，对瓦斯、冲击地压与顶板、水害、火灾四类灾害实现动态评估与保守四级判定，预警生成后经“感知预警—知识检索—调度决策—资源评估—协同管控—反思迭代”六智能体链直接派发处置任务，将应急响应由分钟级压缩至秒级。报告同步给出六大软件分层降级机制、防爆与安全联锁设计、12 个月四阶段实施计划、预算与风险管理。

关键词：具身智能；水陆两栖清障机器人；AI Agent 集群调度；灾害智能预警

目录

摘要 **I**

第一章 项目概述 **1**

1.1 项目背景与场景痛点 1

1.2 政策导向 1

1.3 项目总体目标 4

1.4 选题意义 5

1.4.1 技术意义 5

1.4.2 经济与社会效益 6

第二章 总体技术方案 **7**

2.1 总体思路与技术路线 7

2.2 总体构型与布局 7

2.3 功能架构 8

2.4 工作模式 9

第三章 具身智能集群体系与多智能体协同 **11**

3.1 集群总体架构：大脑、神经与躯体 11

3.2 巡检机器人的具身智能闭环 12

3.3 多智能体协同机制：六智能体链的职责与接口 12

3.4 典型协同时序 15

3.4.1 日常巡检场景 15

3.4.2 灾后应急清障场景 15

3.5 集群任务分配与协同控制算法 16

3.5.1 竞标式任务分配 16

3.5.2 三类协同作业模式 18

3.5.3 冲突消解与一致性 18

3.6 人机协同与安全边界 19

第四章 机械系统设计 20

4.1 水陆两栖双驱动移动机构 20

4.2 履带自适应升降越障机构 21

4.3 船型主体与防爆壳体 22

4.4 掘进与清障装置（核心创新） 22

4.4.1 液压驱动掘进机构 23

4.4.2 带齿切削滚筒 23

4.4.3 侧向旋转推土铲与三系统协同 24

4.5 集成仓布局 25

第五章 多模态智能探测系统 26

5.1 感知单元组成 26

5.2 多模态监测指标体系 27

第六章 电控与智能控制系统 29

6.1 主控系统架构 29

6.2 自主导航与避障 29

6.3 AI 边缘推理 30

6.4 掘进清障协同控制 30

6.5 声光报警与安全联锁 31

6.6 电控系统详细设计补充 32

6.6.1 主控系统架构设计 32

6.6.2 分层双闭环运动控制系统 51

6.6.3 矿井巷道自主导航与建图技术 64

6.6.4 多源传感器融合感知 73

第七章 软件系统与 AI Agent 集群调度 75

7.1 嵌入式控制软件 75

7.2 集成通讯舱 75

7.3 AI Agent 调度接口与数据契约 75

7.4 与六智能体调度链的对接 77
7.5 地面监控平台 77

第八章 防爆与安全设计 79
8.1 防爆等级与壳体设计 79
8.2 隔爆腔体、电缆引入与本安充电 79
8.3 多级安全保护机制 79
8.4 软件六级分层降级机制 80

第九章 灾害风险监测与智能预警 82
9.1 四类灾害移动监测 82
9.2 移动—固定时空互补数据融合 82
9.3 坍塌通道应急清障处置 84
9.4 智能预警算法架构 85
9.4.1 多源数据预处理与融合 85
9.4.2 数据与实验设置 87
9.4.3 双模型并行与性能验证 88
9.4.4 SHAP 可解释性输出 90
9.4.5 保守四级判定与规则融合 92
9.4.6 从预警到处置的闭环 93

第十章 核心技术指标与创新点 94
10.1 主要技术指标 94
10.2 核心创新点 95
10.3 竞争优势 96

第十一章 实施计划与保障 97
11.1 实施阶段与里程碑 97
11.2 人力资源配置 97
11.3 预算规划 98
11.4 风险管理 98
11.5 质量保障与项目管理 100

第十二章 续航与作业能力综合论证 101

12.1 动力电池系统设计与选型 101

12.1.1 电池类型与参数选型依据 101

12.1.2 动力系统功耗分析与能量预算 102

12.2 续航性能指标评估 103

12.2.1 低速巡检工况续航估算与验证 103

12.2.2 建图/全负载工况能耗分析与续航预估 103

12.3 充电性能与电池管理 103

12.3.1 充电方案论证 103

12.3.2 过流、过放、短路等保护功能设计 103

12.4 综合能耗与节能策略分析 104

12.4.1 节能策略设计 104

12.4.2 节能效果量化分析 104

12.4.3 整机综合能耗评估 105

附录一：团队研发成果证明材料 106

插图

1.1 七部门矿山智能化指导意见报道 2
1.2 国家能源局加快煤矿智能化建设通知报道 3
1.3 新修订《煤矿安全规程》报道 4
1.4 项目总体目标与技术路线框架 5

2.1 机器人整机三维模型 8
2.2 机器人顶部传感器布局 8
2.3 产品功能架构框图 9
2.4 整机工作模式与状态迁移图 10

3.1 具身智能集群总体架构 12
3.2 巡检机器人的具身智能三重闭环 13
3.3 六智能体协同调度链与装备集群接入 14
3.4 日常巡检场景多机协同时序 15
3.5 灾后应急清障场景协同时序 16

4.1 螺旋式推进装置三维模型 20
4.2 机器人侧面剖视图 21
4.3 履带自适应升降越障机构正视图 22
4.4 液压驱动掘进机构三维模型 23
4.5 带齿切削滚筒三维模型 24
4.6 侧向旋转推土铲三维模型 24
4.7 掘进 • 切削 • 排导 • 推进四阶段协同清障流程 25

6.1 电控系统分层架构框图 29
6.2 掘进清障协同控制流程图 31
6.3 小车外设关系图 33
6.4 系统任务调度框图 33

6.5 F407 小车控制板原理图（1）：主控电路 34
6.6 F407 小车控制板原理图（2）：电源电路 35
6.7 F407 小车控制板原理图（3）：编码与下载电路 36
6.8 F407 小车控制板原理图（4）：接口电路 38
6.9 控制板 PCB 设计图：(a) 正面；(b) 背面 38
6.10 控制板三维模型图：(a) 俯视；(b) 轴测 39
6.11 Car_Mode 宏定义影响的程序模块 40
6.12 软件工程分层架构 41
6.13 systemInit() 启动初始化流程（外设初始化顺序与关键参数） 42
6.14 Balance_task 100 Hz 运动控制数据流 42
6.15 底盘控制模式分类 43
6.16 多车型运动学几何基础 43
6.17 四轮转角与轮速分配关系 44
6.18 前轮转角与舵机转角标定与拟合 44
6.19 主控状态显示屏信息 45
6.20 STM32 上行状态帧格式（厂家协议） 48
6.21 串口 1/3 速度控制命令通信协议 49
6.22 小车接收串口控制指令数据域 49
6.23 数据校验位计算函数 Check_Sum 50
6.24 11 字节指令帧发送示例 50
6.25 速度与位姿双闭环控制框图 51
6.26 运动学分析与速度闭环总体链路 52
6.27 ROS 机器人坐标系与旋转正方向 52
6.28 ROS 端功能包组成与 navigation 导航框架结构 53
6.29 感知接入与状态发布流程 54
6.30 IMU 信息 55
6.31 wheeltec_robot 节点启动参数配置 56
6.32 wheeltec_robot 节点发布与订阅关系 56
6.33 静态坐标与 TF 树结构 57
6.34 机器人 TF 坐标树运行实例 57

6.35 车体坐标系与静态 TF 变换关系 58
6.36 TF 坐标树运行实例（rviz） 58
6.37 分层滤波定位 TF 链结构 59
6.38 导航指令下发链路 60
6.39 Cmd_Vel_Callback 指令帧组装与下发 60
6.40 导航参数文件组织与代价地图配置示例 61
6.41 ROS 核心节点与话题计算图 61
6.42 模拟巷道地图导航运行实例 63
6.43 雷达驱动编译配置 65
6.44 gmapping 建图运行日志 66
6.45 ROS 多机通信环境配置 67
6.46 rviz 可视化端启动日志 68
6.47 地图参数与显示配置（rviz） 68
6.48 amcl 定位参数配置 69
6.49 多边形 footprint 顶点坐标 70
6.50 rviz 显示话题配置 71
6.51 全局路径与代价地图可视化 71
6.52 rviz 目标点发布节点信息 73

7.1 AI Agent 调度接口三层架构与数据契约 76

8.1 软件六级分层降级机制 80

9.1 移动—固定时空互补示意 83
9.2 时空互补数据融合架构 84
9.3 坍塌通道应急清障六步流程 84
9.4 训练集与测试集样本分布 88
9.5 卡尔曼滤波前后对比 88
9.6 特征 Spearman 相关性热力图 88
9.7 MOA-Transformer 训练过程 89
9.8 XGBoost 测试集四类风险混淆矩阵（Accuracy=0.9870，Macro-F1=0.9865） 90
9.9 候选模型横向性能对比 90

9.10 各特征 SHAP 值分布 91
9.11 关键特征 SHAP 依赖关系 91
9.12 四类风险 ROC 曲线 91
9.13 实时预警时间线示例 93

11.1 四阶段实施计划与关键里程碑 97

表格

3.1 机载决策层与地面 Agent 决策层的职责划分 13
3.2 六智能体的职责、输入输出与机器人交互 14

5.1 多模态监测指标体系 27

6.1 软件工程模块划分 41
6.2 环境数据融合机制 47
6.3 感知层传感器配置 47
6.4 串口状态帧格式 48
6.5 ROS 核心节点与话题 62
6.6 巡检任务链时序（停靠段） 64
6.7 SLAM 建图算法对比 67
6.8 导航关键配置参数（mini_mec 车型） 72

7.1 统一数据契约核心数据对象 76

8.1 软件六级分层降级机制 81

10.1 主要技术指标汇总 94

11.1 实施阶段主要工作与产出 97
11.2 项目预算规划 98
11.3 主要风险与应对策略 98

12.1 整机供电体系 101
12.2 典型巡检工况功耗预算 102
12.3 电池保护功能设计 104
12.4 节能策略效果估算 105

第一章　项目概述

1.1　项目背景与场景痛点

矿产能源是保障国家能源安全、支撑工业体系稳定运行的核心战略资源，矿山安全高效开采直接关系能源自主可控与经济社会高质量发展大局。矿山开采分为井工与露天两大模式，普遍存在作业环境恶劣、灾害风险隐蔽性强、传统装备智能化水平低、协同管控能力不足等突出问题，矿山安全装备亟需向智能化、集群化、自主化升级。

本作品聚焦井工场景。井工开采面临高瓦斯、高地应力、高地温与复杂地质构造叠加的“三高一复杂”极端工况约束，灾害类型多、防控难度大；加之作业空间狭窄、环境条件恶劣，传统人工巡检与常规装备已难以满足安全管控要求。井下高危巷道巡检依赖人工进入，面临瓦斯积聚、顶板冒落、透水等直接威胁；灾后巷道坍塌通道疏通更依赖人工与大型机械，狭窄巷道内大型设备无法进入，人工清障面临二次坍塌、有毒气体泄漏等致命风险。因此，亟需研发专用高端智能装备替代人工开展高危作业，真正实现“装备替人、减人增效、本质安全”。

当前矿山在用传统装备普遍存在三类共性短板：一是功能单一，或仅具备远程遥控探测能力、或仅具备简单处置功能，缺乏“感知—决策—执行”全流程闭环能力；二是协同联动差，装备之间、装备与固定监测系统及调度平台之间数据孤立，难以形成集群合力；三是人工依赖度高，智能化程度不足，无法适应矿山安全高效开采需求。本作品以具身智能集群高端成套装备为核心载体，通过“感知—决策—执行”全流程闭环协同，推动矿山安全装备从“被动处置”向“主动预防”、从“单机运行”向“集群协同”、从“人工辅助”向“自主作业”转型。

1.2　政策导向

榜题的提出并非孤立事件，而是国家层面推动矿山智能化、以装备替人保障本质安全这一政策脉络的自然延伸。近三年内三份文件从“建设目标—产业推进—作业规程”三个层面为本作品提供了直接依据。

（1）七部门《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》（2024

年 4 月）。国家矿山安全监察局、应急管理部、国家发展改革委、工业和信息化部、科技部、财政部、教育部联合印发的这份文件，从强化顶层设计、坚持创新驱动、加快数字化进程、拓展智能化场景、提高整体应用水平等方面提出 20 项具体举措，明确到 2026 年建立完整的矿山智能化标准体系，实现环境智能感知、系统智能联动与重大灾害风险智能预警，煤矿智能化产能占比不低于 60%，煤矿与非煤矿山危险繁重岗位作业的智能装备或机器人替代率分别不低于 30% 与 20%，全国矿山井下人员减少 10% 以上（图 1.1）。其中“危险繁重岗位机器人替代”与“重大灾害风险智能预警”两项目标，正是本作品装备本体与预警模型两条主线的政策原点。


人民日报图文数据库（1946-2026）

人民日报 2024年05月08日 星期三

01版：要闻	02版：要闻	03版：要闻	04版：要闻
05版：特别报道	06版：要闻	07版：要闻	08版：广告
09版：视觉	10版：评论	11版：综合	12版：政治
13版：文化	14版：国际	15版：生态	16版：广告
17版：综合	18版：产经	19版：消费	20版：副刊

返回目录　　放大　缩小　全文复制　　上一篇

推进矿山智能化建设

到2026年煤矿智能化产能不低于60%

《人民日报》（2024年05月08日　第 03 版）

本报北京5月7日电　（记者刘温馨）近日，国家矿山安监局等七部门印发《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》，提出到2030年，建立完备的矿山智能化技术、装备、管理体系，实现矿山数据深度融合、共享应用，推动矿山开采作业少人化、无人化，有效防控重大安全风险，矿山本质安全水平大幅提升。

意见从强化顶层设计、坚持创新驱动、加快数字化进程、拓展智能化场景、提高整体应用水平等方面提出20项具体举措，深入推进矿山智能化建设，推动矿山安全治理模式向事前预防转型。意见提出，到2026年，建立完整的矿山智能化标准体系，推进矿山数据融合互通，实现环境智能感知、系统智能联动、重大灾害风险智能预警，全国煤矿智能化产能占比不低于60%，智能化工作面数量占比不低于30%，智能化工作面常态化运行率不低于80%，煤矿、非煤矿山危险繁重岗位

图 1.1　《人民日报》2024 年 5 月 8 日第 3 版关于七部门印发矿山智能化建设指导意见的报道（网页截图，人民日报图文数据库）

（2）国家能源局《关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知》（国能发煤炭〔2024〕38 号，2024 年 5 月）。通知要求大型煤矿在 2025 年底前建成单个或多个系统智能化、具备条件的实现采掘系统智能化，鼓励 300 万吨/年以上的生产煤矿全面推进主要生产环节智能化改造，并把灾害严重煤矿以及海拔高于 2400 米或采深大

于 600 米的矿井列为加快智能化建设的重点（图 1.2）。截至 2024 年 4 月底全国累计建成智能化采煤工作面 1922 个，说明智能化基础设施（井下工业环网、集控平台、传感网络）已在大型矿井普遍具备，这为本作品机器人集群的通信接入与 Agent 平台部署提供了现实土壤；而通知点名的“灾害严重煤矿”正是本作品选定的“三高一复杂”目标场景。



返回目录 放大 缩小 全文复制 上一篇 下一篇

截至4月底，累计建成智能化采煤工作面1922个——

中国加快煤矿智能化建设

本报记者 廖睿灵

《人民日报海外版》（2024年05月29日 第 03 版）

位于陕西省榆林市榆阳区的陕煤曹家滩矿业有限公司，工作人员在全自动液压支架支撑的采煤工作面巡检。

新华社记者 邹竞一摄

煤炭是中国的主体能源，在保障国家能源安全中发挥“压舱石”作用，煤矿智能化对于促进煤炭产业转型升级、实现煤炭高质量发展具有重要意义。近日，国家能源局印发《关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知》（以下简称《通知》），提出大型煤矿要加快智能化改造，到2025年底前建成单个或多个系统智能化，具备条件的要实现采掘系统智能化。鼓励300万吨/年以上的生产煤矿全面推进主要生产环节智能化改造，力争率先建成全系统智能化煤矿。

国家能源局有关负责人表示，近年来，国家能源局会同有关部门，立足我国以煤为主的基本国情，加快新一代信息技术与煤炭行业深度融合，大力推进煤矿智能化建设，建成了一批技术先进、引领性强的智能化示范煤矿，减人增安提效成效显著，煤炭在能源安全中的兜底保障作用进一步夯实。据调度，截至今年4月

图 1.2 《人民日报海外版》2024 年 5 月 29 日关于国家能源局印发加快煤矿智能化建设通知的报道（网页截图）

（3）新修订《煤矿安全规程》（应急管理部令第 17 号，2025 年 7 月公布，2026 年 2 月 1 日起施行）。新版规程共 777 条，较上版新增 56 条、实质性修改 353 条。据国家矿山安全监察局新闻发布会介绍，考虑到安全监控技术的成熟和巡检机器人的发展，新版规程降低了井下瓦检员数量与检查频次方面的要求，并把瓦斯等级、冲击地压、煤层自燃倾向性等灾害等级鉴定纳入安全检测检验范围（图 1.3）。这意味着“机器人替代人工

瓦检”已从技术可能变为规程认可的合规路径，也意味着机器人采集的瓦斯、顶板、火灾数据需要与灾害等级鉴定体系对接——本作品第九章的四类灾害监测指标与四级风险判定正是按此设计。



新修订的《煤矿安全规程》明年2月施行

《人民日报海外版》（2025年08月15日 第 03 版）

据新华社北京电（记者黄韬铭）记者日前从国家矿山安全监察局举行的新闻发布会上获悉，新修订的《煤矿安全规程》将于2026年2月1日起施行。新版《煤矿安全规程》共777条，与上版相比新增56条，实质性修改353条。

随着煤矿安全监控技术的成熟完善和巡检机器人的不断发展，新版《煤矿安全规程》大幅减少了井下瓦检员数量和检查频次的要求。

重大灾害防治始终是防范煤矿事故的重点和难点。新版《煤矿安全规程》将瓦斯等级、冲击地压和煤层自燃倾向性、煤尘爆炸性、露天煤矿滑坡危险性等煤矿灾害等级鉴定纳入了安全检测、检验范围，同时要求鉴定机构应当具备国家规定的资质条件。

在水害区域治理方面，新版《煤矿安全规程》新增了煤矿防治水地面超前区域治理相关规定。

图 1.3 《人民日报海外版》2025 年 8 月 15 日关于新修订《煤矿安全规程》将于 2026 年 2 月施行的报道（网页截图）

三份文件形成合力：指导意见给出“替人、预警、少人”的量化目标，能源局通知给出大型矿井智能化基础设施的推进节奏，新版规程给出机器人替代人工巡检的合规空间。本作品的三大总体目标——异构装备本体、AI Agent 智能调度、主动式风险预警与应急辅助——分别对应这三条政策脉络的落点。

1.3 项目总体目标

围绕井工场景，本作品确立三大总体目标，并按图 1.4 所示的章节体系逐项落实：

（1） **异构具身智能体高端装备本体设计与场景适配。**研制感知型、执行型异构高端智能装备本体，满足防爆、低照度导航、多气体感知等井工要求，具备煤岩体结构识别等核心功能；建立装备—环境协同适配机制，验证装备自适应调整与容错重构能力。

（2） **AI Agent 驱动的高端装备全流程智能调度。**构建基于大语言模型的智能调度引擎接口，实现自然语言交互、装备任务自主规划与全流程调度管理，覆盖智能数据查询、任务动态分派、多渠道协同通知、工单闭环追踪等环节；优化装备任务分配与路径规划算法，实现多类型智能装备高效协同联动。

（3） **高端装备主动式风险预警与应急智能辅助。**融合智能装备移动监测数据与固定监测站点数据，构建多维度灾害智能预警模型，实现主要灾害风险早期识别、动态研判与主动精准预警；突发事件状态下依托装备集群秒级调取应急预案、模拟灾害演化过程、智能规划避灾路线、生成装备资源调度方案，将应急响应由分钟级压缩至秒级。

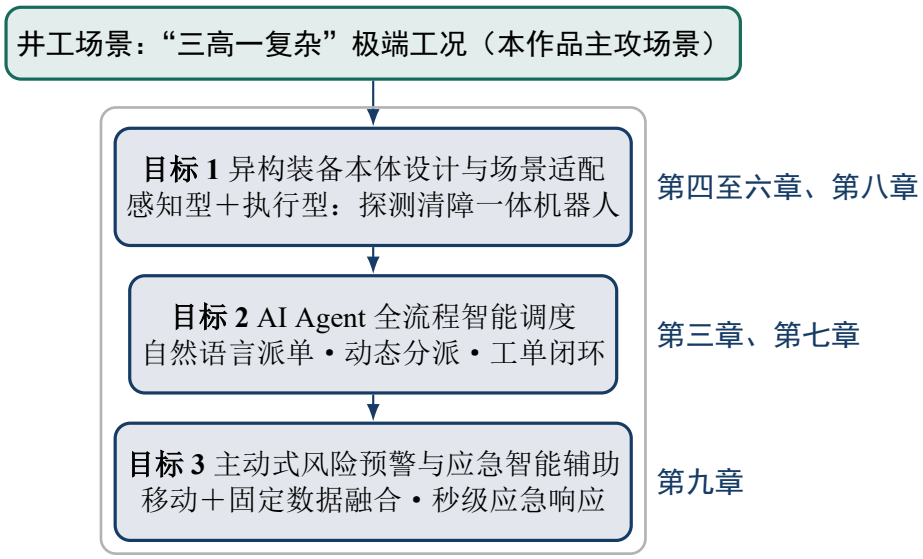


图 1.4　项目总体目标与技术路线框架

1.4　选题意义

1.4.1　技术意义

本作品以具身智能集群高端成套装备为核心载体，探索高端装备协同感知与 AI Agent 智能决策深度融合的全流程安全管控新路径，破解传统模式信息孤岛、协同效率低、人工依赖度高等瓶颈问题，提升矿山灾害预测预警与应急响应的时效性、精准度。通过研究井工典型场景下高端智能装备功能适配机制与集群协同作业规律，实现感知型、执行型装备分工协作与联动处置，达成主要灾害风险早期识别、主动预警与自主应急处置，最终实现减人化、少人化的本质安全目标。相关技术突破可显著提升矿山灾害风险监测、判识与预警能力，为矿山安全高效开发提供核心高端装备技术支撑。

1.4.2 经济与社会效益

装备规模化工程应用可为矿山企业带来显著的成本优化与生产效能提升：通过高端智能装备替代人工开展高危区域巡检、监测、应急处置等作业，可直接降低高危用工成本，大幅减少事故伤亡赔偿、医疗救治及停产停工等间接经济损失；装备可 24 小时连续稳定作业，有效提升巡检频次与监测精度，缩短灾害处置周期、降低设备损坏与生产中断损失，实现安全投入与经济回报的良性循环。

从社会价值看，本作品将从根本上保障从业人员生命安全与职业健康，改善矿工作业条件与工作环境，推动矿山安全生产由“人海战术”向“科技兴安”跨越式转变，提升行业社会形象与人才吸引力，有效缓解矿山企业招工难、留人难问题，助力提升国家能源安全与战略性矿产资源保障能力，支撑矿山行业智能化、绿色化、高质量发展。

第二章　总体技术方案

2.1　总体思路与技术路线

针对井工场景三大总体目标，本方案以“感知—决策—执行—反馈”全流程闭环为主线：以一台（并可扩展为一簇）防爆级水陆两栖具身智能机器人为装备本体，向上通过标准 AI Agent 调度接口融入矿井级六智能体协同调度体系，与决策型智能体（地面调度中心）及其他感知/执行型装备组网；向下融合固定监测站数据，接入矿井级灾害智能预警模型，实现“移动监测 → 预警研判 → 任务派发 → 自主执行 → 结果反馈 → 模型迭代”的完整闭环。总体技术要素与后续各章的对应关系为：具身智能集群体系与多智能体协同（第三章）、移动通行与掘进清障系统（第四章）、多模态智能探测系统（第五章）、电控与智能系统（第六章）、软件系统与 AI Agent 集群调度（第七章）、防爆与安全设计（第八章）、灾害监测与智能预警（第九章）。

2.2　总体构型与布局

本产品为面向井工煤矿复杂环境的防爆级水陆两栖具身智能探测与清障处置机器人。整机采用船型流线主体，以水陆两栖双驱动移动平台为基础载体，融合履带自适应升降越障机构、多模态智能探测系统与液压驱动掘进清障装置，整机三维构型如图 2.1 所示。

主体采用防爆铸铝与不锈钢材质，前后端面均设倾斜坡度，前端配置倾斜防卡板，既可避免与障碍物碰撞卡滞，又能提供额外浮力储备。顶部平台按功能分区精确定位 9 大类传感器（图 2.2）：顶部中央为防爆光谱一体化云台摄像机；顶部前侧上边缘为微型固态激光雷达与双目深度相机；顶部两侧左右边缘各 2 台防爆广角 AI 环视相机；顶部后侧边缘为倒车激光雷达与声光报警系统；前侧下方挡板处为漫射式防爆补光 LED。车体前部集成液压驱动掘进清障装置（带齿切削滚筒与侧向旋转推土铲）；车体左右两侧履带上方分别设置集成通讯舱（左侧）与气体检测装置（右侧）。

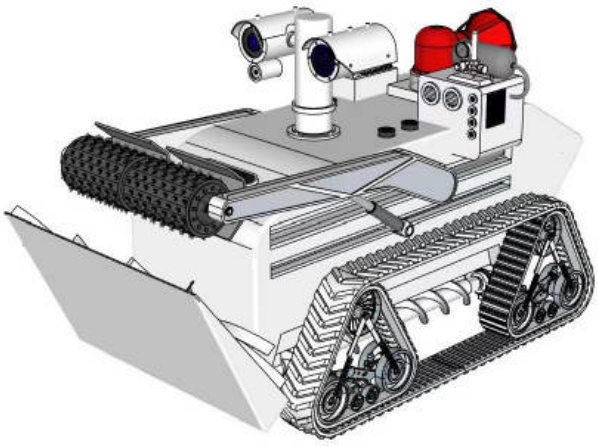


图 2.1　井工场景具身智能探测与清障处置机器人整机三维模型（船型主体、履带、液压掘进装置、带齿切削滚筒、侧向推土铲与顶部传感器布局）

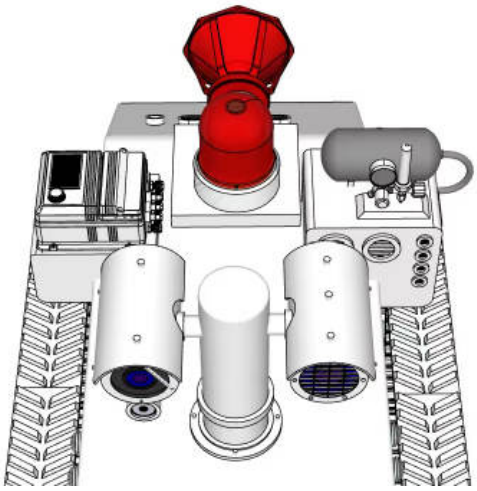


图 2.2　机器人顶部传感器布局（防爆光谱云台摄像机、双目深度相机、声光报警、液压系统与电气控制箱位置）

2.3　功能架构

产品整体功能架构分为五大系统：**移动通行系统**（水陆两栖双驱动移动机构、履带自适应升降越障机构、船型防爆主体）负责复杂地形下的移动通行与姿态调节；**掘进清障系统**（液压驱动掘进机构、带齿切削滚筒、侧向旋转推土铲）负责坍塌通道切削清障与碎屑排导；**多模态探测系统**（防爆光谱云台摄像机、激光雷达、双目深度相机、AI 环视相机、气体检测装置、红外热成像、温湿度传感器等 9 大类）负责环境感知、灾害探测与异常识别；**电控与智能系统**以嵌入式主控为核心，集成自主导航避障、AI 边缘推理、掘进清障协同控制、多传感器数据融合、声光报警与安全联锁；**通信与调度系统**由集成通讯舱、AI Agent 调度接口与地面监控平台组成，负责数据回传、指令接收与集群协同。系统数据闭环架构如图 2.3 所示。

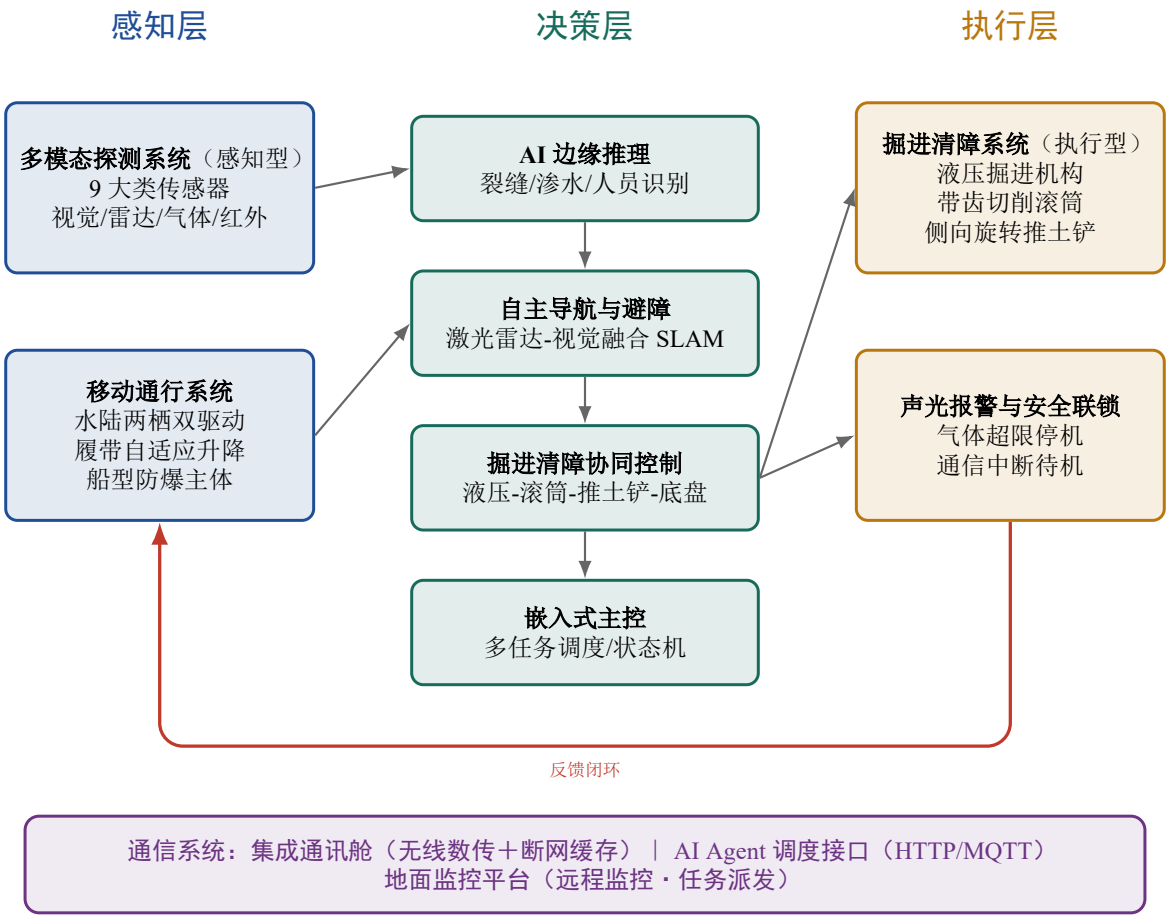


图 2.3 产品功能架构框图（感知层—决策层—执行层—通信层全流程闭环，红色为反馈闭环）

2.4 工作模式

产品支持三种工作模式，并可根据任务需求动态切换，模式间的状态迁移如图 2.4 所示。

（1） **远程遥控模式：**操作人员通过地面监控平台或手持终端实时查看视频画面与传感器数据，手动控制机器人行进、转向、升降、探测与掘进清障动作，适用于复杂未知区域的精细探查与应急处置。

（2） **自主巡检模式：**机器人接收 AI Agent 调度平台下发的巡检任务后，依据预设路径或全局路径规划指令自主执行巡检；激光雷达与视觉融合实现自主导航与避障，AI 环视相机边缘端实时识别裂缝、渗水、人员闯入等异常，气体检测装置持续监测环境参数，发现异常自动报警并回传数据。

（3） **应急清障模式：**灾害发生后，机器人接收应急调度指令，自主或遥控前往坍塌区域，液压驱动掘进装置前伸到位，带齿切削滚筒高速旋转切削坍塌泥土与石块，侧向旋转推土铲将碎屑甩向通道两侧，逐步疏通救援通道；作业全程持续监测环境气

体与巷道壁稳定性。

三种模式均支持实时数据回传与本地断网缓存，确保井下通信不稳定区域数据不丢失。

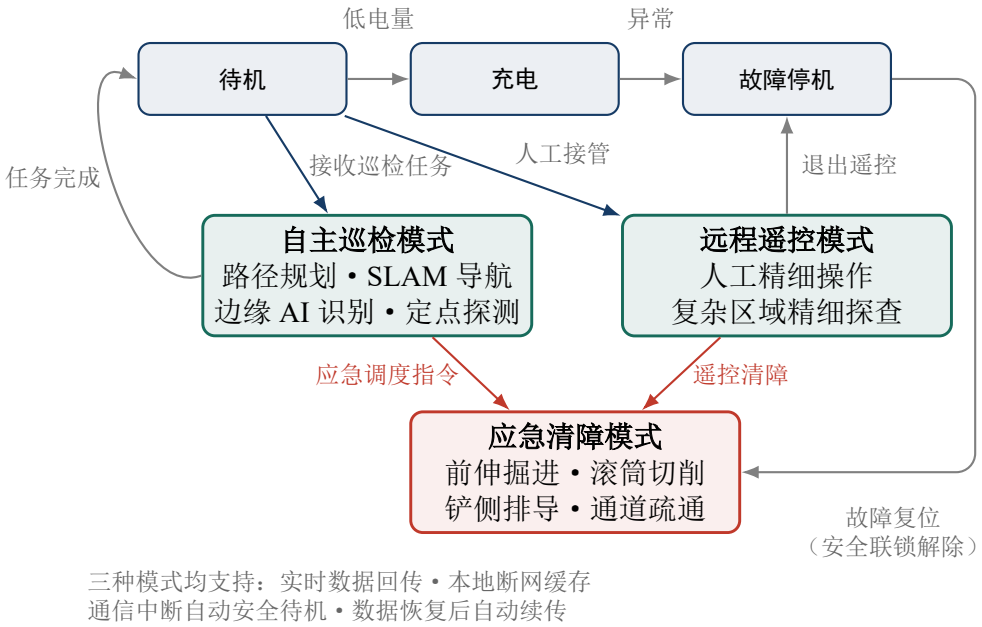


图 2.4　整机工作模式与状态迁移图

第三章　具身智能集群体系与多智能体协同

榜题的核心是“Agent • 具身智能集群”。本章回答一个贯穿全篇的问题：多智能体（Agent）系统与巡检/清障机器人究竟如何结合——谁是大脑、谁是躯体，两者在什么时间尺度上分工，通过什么接口对话，在日常巡检与灾后应急两类场景中如何一步一步协同，多台机器人之间如何分配任务，以及人在其中处于什么位置。第四至九章的装备本体、探测系统、电控、软件、防爆与预警设计，都是围绕本章确立的集群体系展开的。

3.1　集群总体架构：大脑、神经与躯体

本作品把矿山具身智能集群划分为三个层次、四类角色（图 3.1）。**决策层**位于地面调度中心或云端，由大语言模型驱动的决策型智能体承担，其内部按“感知预警—知识检索—调度决策—资源评估—协同管控—反思迭代”六个智能体环节组织，配合规程、案例、装备台账、巷道地图构成的知识库以及承担人工审批与可视化的地面监控平台，是整个集群的“大脑”。**通信层**由井下工业环网、5G/WiFi6 无线覆盖、MQTT/HTTP 标准接口和统一数据契约组成，是连接大脑与躯体的“神经”，所有指令与数据都以结构化契约字段而非自然语言在这一层流动。**感知/执行层**位于井下，包括感知型巡检机器人（多模态探测、边缘 AI 识别、移动监测）、执行型清障机器人（本作品研制的探测清障一体机同时具备感知与执行双重角色）、固定监测站（微震、应力、离层、瓦斯等固定测点）以及井下作业人员与救援队，是集群的“眼睛与手脚”。

这一划分刻意把“智能”拆成两处：地面的 Agent 负责跨装备、跨时间、需要知识与推理的决策；井下的机器人负责与物理环境直接交互、对时延和安全敏感的决策。两者之间不存在“Agent 遥控机器人每一个动作”的关系，而是“Agent 给任务与知识、机器人给事件与凭证”的委托—反馈关系。这种关系也决定了机器人本体在集群中的定位：它既是集群的传感器载体（感知型），也是集群的执行末端（执行型），是决策型智能体在物理世界中的“具身”。

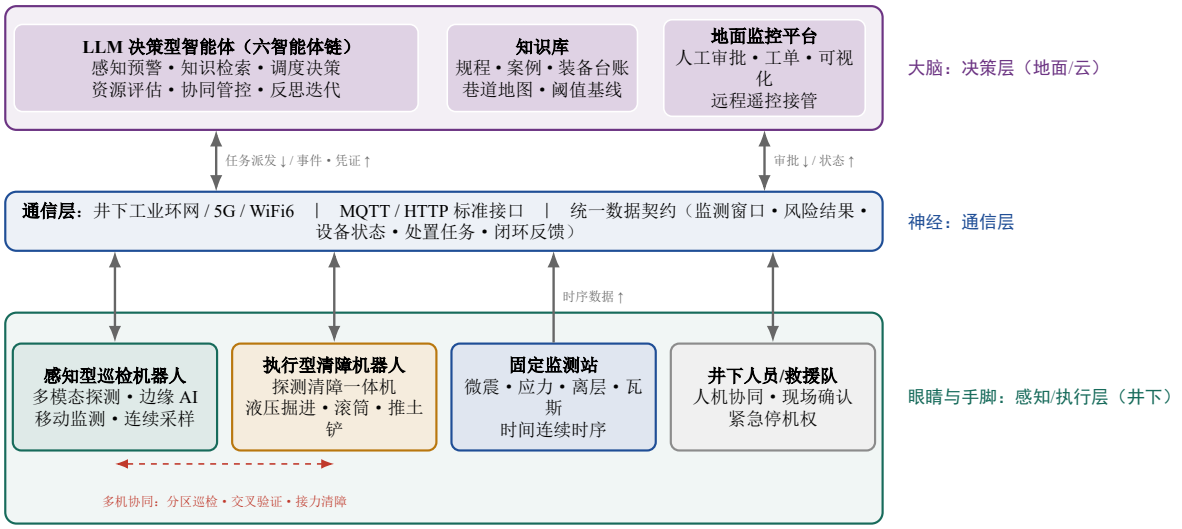


图 3.1 矿山具身智能集群总体架构：决策层（大脑）—通信层（神经）—感知/执行层（眼睛与手脚）

3.2 巡检机器人的具身智能闭环

单台机器人内部同样是一个完整的“感知—决策—行动”闭环（图 3.2）。感知层由第五章的 9 大类传感器与边缘 AI 模型构成，输出巷道三维点云、气体浓度、裂缝/渗水/人员识别结果与自身位姿；机载决策层解析来自 Agent 的结构化任务、在已知巷道地图上做局部路径规划、以状态机管理待机/巡检/探测/清障/后退/故障等工作状态，并由安全联锁规则拥有最高优先级的否决权；行动层驱动履带、螺旋推进、升降机构、云台与液压清障装置作用于环境；环境的变化又被感知层重新观测，形成毫秒到秒级的机载实时闭环。

在这个机载闭环之外还叠加了两层更慢的闭环。地面 Agent 平台以秒到分钟为周期向机载决策层下发任务、知识与全局路径，并从感知层接收事件、证据与状态，构成任务闭环；处置凭证经审核后进入再训练候选库，周期性生成新的模型与阈值并通过 OTA 推送到机器人，构成天到周级的学习闭环。三重闭环的时间尺度分离是 Agent 与机器人结合的关键设计：Agent 不在实时环内，因此其推理时延、幻觉风险与通信中断都不会直接危及井下安全；机器人不承担跨装备推理，因此机载算力可以集中于感知与运动控制。表 3.1 给出了两层决策的职责划分。

3.3 多智能体协同机制：六智能体链的职责与接口

决策型智能体并非单一的大模型对话体，而是按职责拆分为六个专用智能体，串成一条可审计的处理链（图 3.3）。拆分的目的有三：每个智能体只暴露有限的工具与字

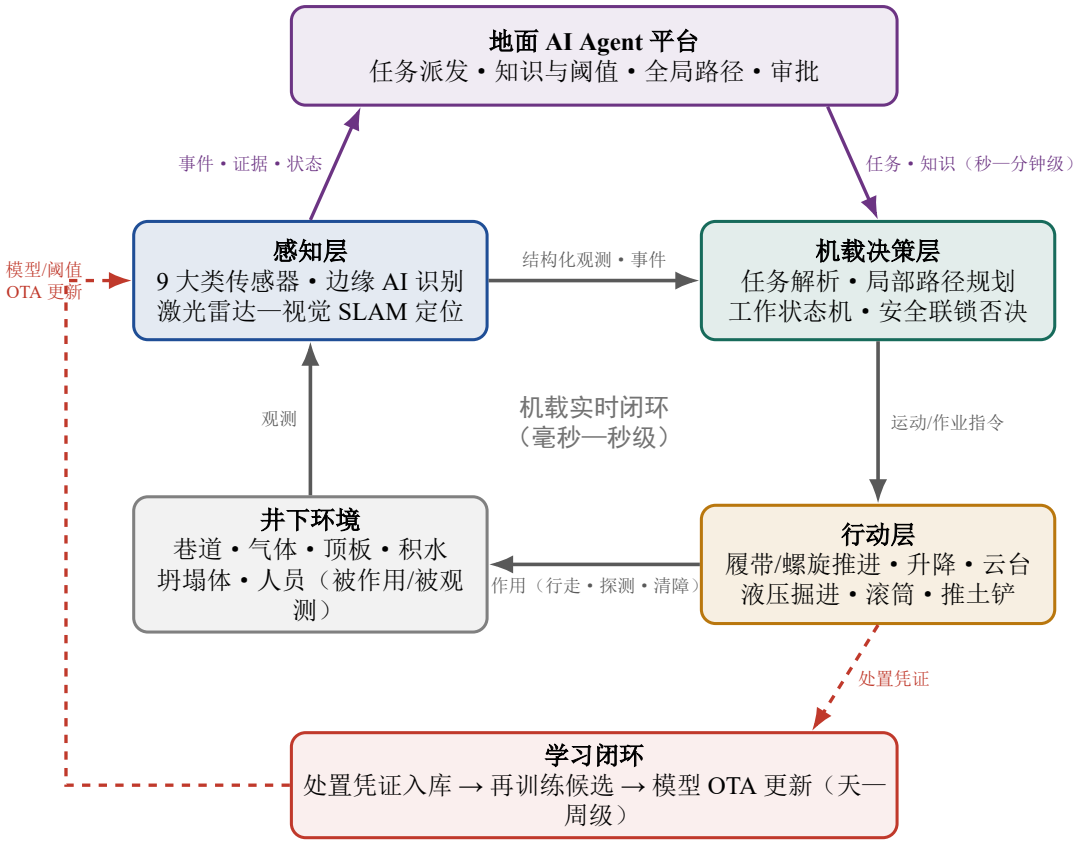


图 3.2　巡检机器人的具身智能闭环：机载实时闭环（毫秒—秒级）、地面 Agent 任务闭环（秒—分钟级）与学习闭环（天—周级）

表 3.1　机载决策层与地面 Agent 决策层的职责划分

层级	时间尺度	决策内容	通信中断时的行为
机载决策层（机器人“小脑”）	毫秒—秒级	局部路径与避障、切削负载自适应、状态机切换、气体/壁稳/过载安全联锁、后退遇人停机	继续完成已接收的自主任务，本地缓存数据，按规则基线本地告警；不接受新的远程指令
地面 Agent 决策层（集群“大脑”）	秒—分钟级	自然语言任务解析、多机任务分配与冲突消解、时空融合与风险分级、知识检索与处置建议、高风险动作审批流转、反思迭代	标记装备离线并重新拍卖其未开始任务；已在执行的任务等待恢复续传；风险展示不降级

段，降低幻觉扩散面；每一步的输入输出都写入结构化数据契约，便于回放与追责；不同智能体可以由不同能力的模型或规则引擎实现，例如感知预警与资源评估以确定性算法为主，知识检索与调度决策以大语言模型为主。六个智能体与机器人之间的交互关系见表 3.2。

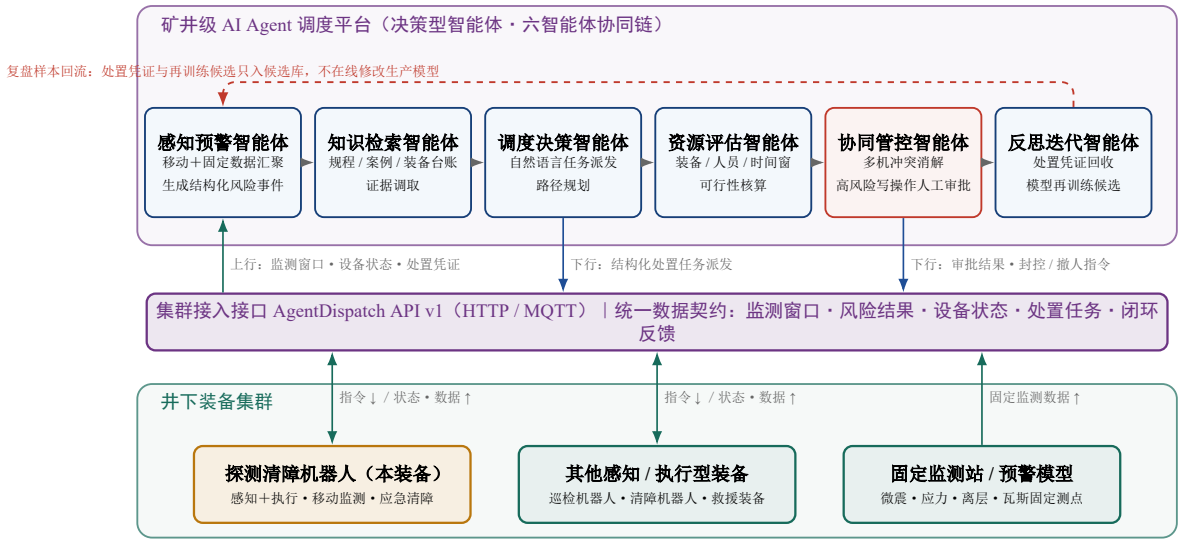


图 3.3　矿井级六智能体协同调度链与装备集群接入（上：决策型智能体六环节链与复盘回流；中：标准接口与统一数据契约；下：感知型 / 执行型装备与固定监测站）

表 3.2　六智能体的职责、输入输出与机器人交互

智能体	核心职责与实现方式	主要输入 / 输出	与机器人的交互
感知预警	汇聚机器人移动监测与固定站时序，做时空融合与四级风险判定；以 XGBoost/MOA-Transformer 模型＋确定性规则实现	输入监测窗口、设备状态；输出风险结果（概率、等级、置信度）与解释证据	订阅机器人上行的监测窗口与事件；向机器人下发加密监测请求
知识检索	从规程、案例、装备台账、巷道地图中调取与事件相关的证据；大模型＋向量检索实现	输入风险事件；输出引用来源的证据片段、阈值依据、历史处置方式	不直接与机器人通信，为任务描述补充地图与阈值参数
调度决策	把自然语言任务与风险事件转化为结构化处置任务，完成多机任务分配与路径规划；大模型生成候选＋算法求解	输入事件、证据、装备状态；输出处置任务（任务类型、步骤、目标点、优先级）	通过 AgentDispatch API v1 向机器人派单；接收任务受理/拒绝回执
资源评估	核算装备电量、载荷、通行能力、时间窗与路径风险的可行性；确定性算法实现	输入候选任务与设备状态；输出可行性评分、预计耗时、备选方案	读取机器人电量、位置、健康度字段
协同管控	解决多机冲突（同一巷道会车、同一点位重复探测），把高风险写操作送入人工审批	输入任务集合；输出批准/驳回、执行顺序、审批编号	向机器人下发带审批编号的执行指令；无审批编号的高风险任务机器人拒绝执行
反思迭代	回收处置凭证，比对预期与实际，生成再训练候选与规则修订建议	输入闭环反馈；输出复盘报告、候选样本、阈值修订建议	接收机器人回传的处置凭证与证据引用

3.4 典型协同时序

3.4.1 日常巡检场景

图 3.4 给出日常巡检的多机协同时序。调度员用自然语言下达“对 3 号回风巷做瓦斯加密巡检”类任务后，Agent 平台先向知识库检索巷道地图、阈值与历史事件，再把结构化任务派发给巡检机器人 A，并把相邻分区任务派发给机器人 B 以实现分区覆盖。机器人 A 在机载闭环内自主导航、定点探测与边缘识别，周期性回传位置、电量与模式；固定监测站同时以分钟级频率上传时序数据。当机器人 A 上报异常事件（裂缝扩展、瓦斯异常）并附证据图像时，Agent 在感知预警环节做时空融合与风险分级；若置信度不足或风险等级较高，Agent 向机器人 B 派发交叉验证任务前往同一点位复测；随后生成携带前三项触发因子的工单与处置建议提交调度员，调度员确认后任务归档，反思迭代环节把本次事件写入再训练候选。

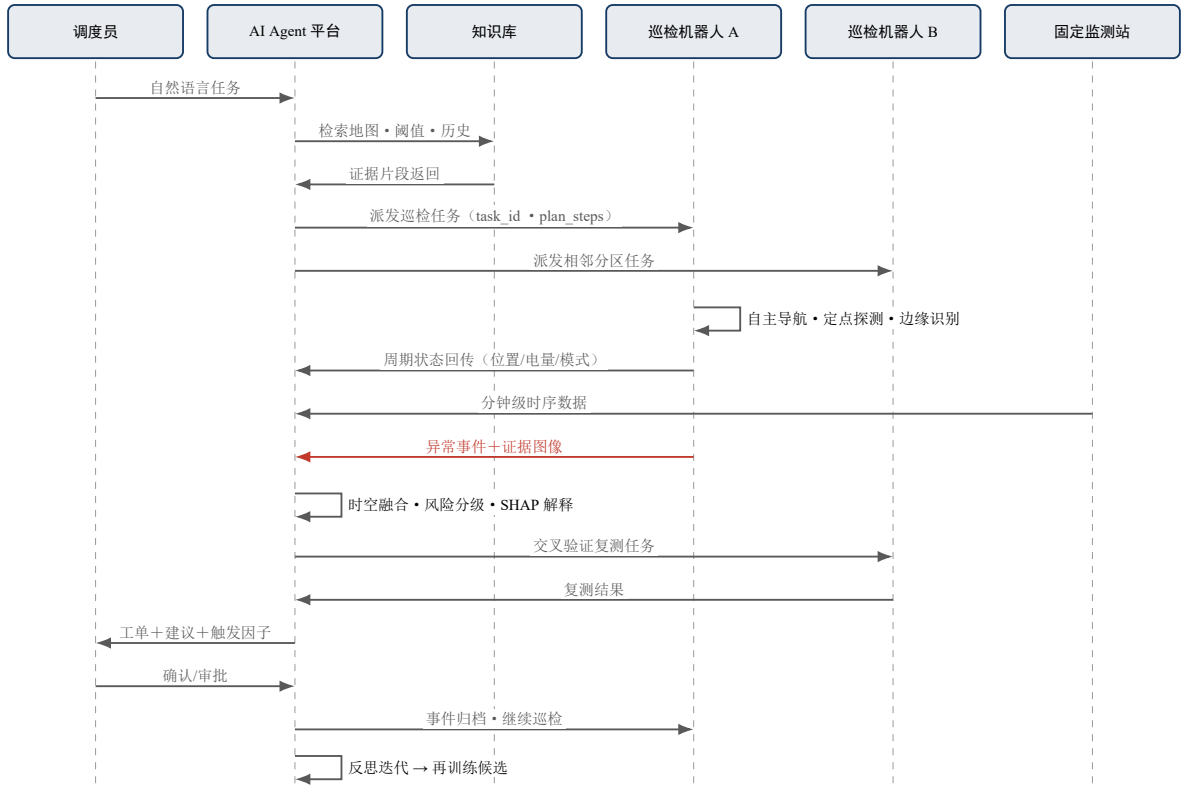


图 3.4 日常巡检场景的 Agent—机器人协同时序（分区巡检、事件上报、交叉验证与工单闭环）

3.4.2 灾后应急清障场景

图 3.5 给出灾后应急清障的协同时序。固定监测站的微震能量与应力突变经预警模型判定为重大风险事件后进入 Agent 链：知识检索环节调取应急预案与避灾路线；调度

决策环节先派巡检机器人前出探测坍塌区，回传坍塌体三维形态、气体浓度与被困人员位置；资源评估环节据此生成清障方案与路径；因清障属于高风险写操作，协同管控环节把方案与证据提交应急指挥员审批，获得审批编号后才向清障机器人派发任务。清障过程中，清障机器人回传切削负载、进度与气体数据，巡检机器人同步监测巷道壁稳定性，任一异常都会触发 Agent 下发暂停指令；通道贯通后回传处置凭证，Agent 向指挥员给出通道确认与救援进入建议，并把全过程写入再训练候选。整条链路把“预警 → 人工确认 → 人工调度 → 人工处置”的分钟级流程压缩为“预警 →Agent 生成方案 → 一次审批 → 机器人执行”的秒级响应，同时保留人在高风险节点上的最终决定权。

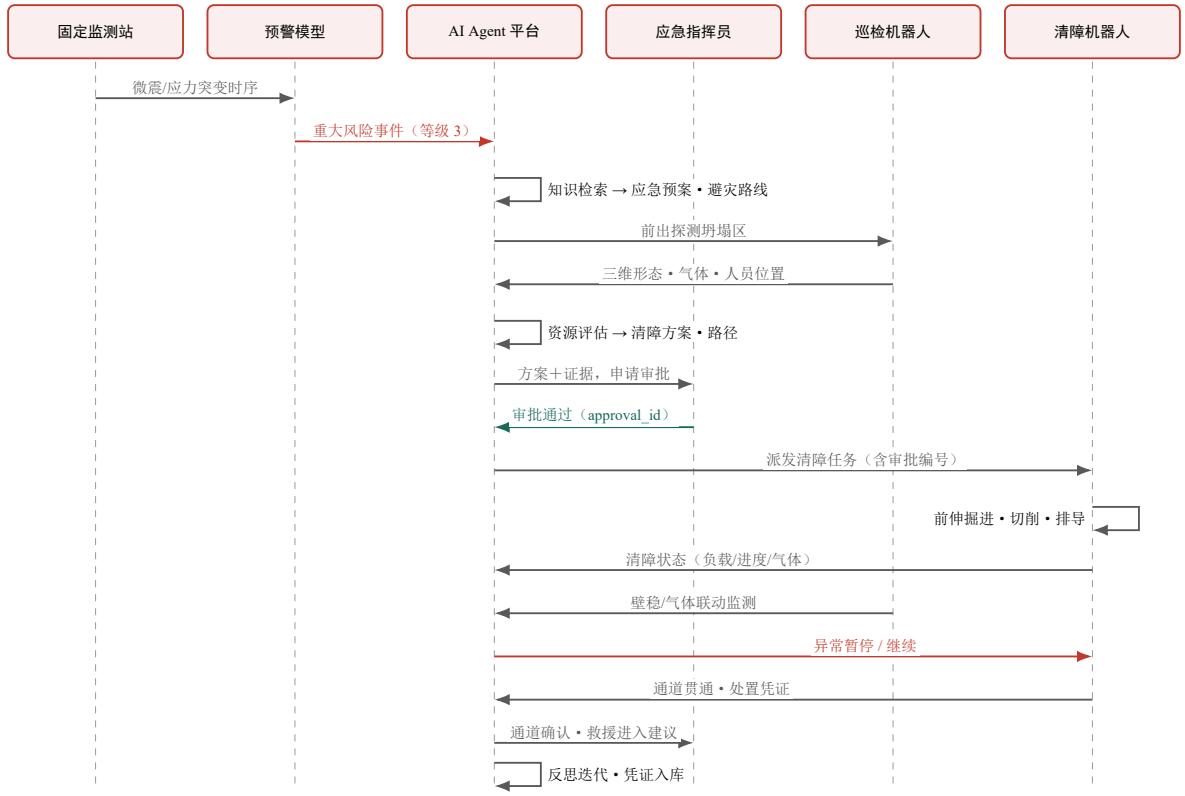


图 3.5 灾后应急清障场景的 Agent—机器人协同时序（预警触发、前出探测、审批派单、协同清障与凭证回流）

3.5 集群任务分配与协同控制算法

3.5.1 竞标式任务分配

当 Agent 同时面对多台机器人与多项任务时，调度决策智能体采用“集中评标、分散竞标”的分配方式：每台在线机器人根据自身状态对每项任务给出一个代价，Agent 求解全局最小代价的分配。设机器人集合为 $\mathcal{R} = \{1, \ldots, m\}$，待分配任务集合为 $\mathcal{T} =$

$\{1,\dots,n\}$，机器人 i 执行任务 j 的代价定义为

$$J_{ij} = w_1 \frac{d_{ij}}{v_i} + w_2\big(1-\mathrm{SOC}_i\big) + w_3 \frac{L_i}{L_{\max}} + w_4\, r_{ij} + M\cdot \mathbb{1}\big[\mathrm{cap}_i \not\supseteq \mathrm{req}_j\big], \tag{3.1}$$

其中 d_{ij} 为机器人当前位置到任务目标点的巷道路网最短距离，v_i 为额定行驶速度，SOC_i 为电量状态，L_i 为当前任务队列长度，r_{ij} 为路径穿越区域的当前综合风险值（取自第九章风险场 $R(x,t)$ 沿路径的最大值），cap_i 与 req_j 分别为机器人能力集合与任务能力需求（如“清障”只能由执行型机器人承担），M 为大常数以排除能力不匹配的组合，w_1 至 w_4 为矿方标定的权重。分配问题写为

$$\min_{x} \sum_{i\in\mathcal{R}}\sum_{j\in\mathcal{T}} J_{ij}\,x_{ij} \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i} x_{ij} = 1 \;\; \forall j, \qquad \sum_{j} x_{ij} \le 1 \;\; \forall i, \qquad x_{ij}\in\{0,1\}, \tag{3.2}$$

即每项任务恰好分配给一台机器人、每台机器人同一时刻至多接受一项新任务，采用匈牙利算法在多项式时间内求解；当 $n > m$ 时剩余任务按优先级进入等待队列。

任务优先级 $p_j \in \{3(\text{应急清障/人员搜寻}), 2(\text{加密监测/交叉验证}), 1(\text{日常巡检})\}$ 参与抢占判定：当新任务优先级高于机器人正在执行任务的优先级、且该机器人在式 (3.1) 下代价最小时，允许抢占，被中断的任务保存断点后重新入队。机器人以 $T_{\mathrm{hb}} = 30\,\mathrm{s}$ 的心跳周期上报状态，连续两个周期未收到心跳即判定离线，其未开始任务立即重新拍卖，已执行任务等待通信恢复后续传。代码 3.1 给出分配算法的核心实现。

```python
import numpy as np
from scipy.optimize import linear_sum_assignment

W = dict(dist=0.4, soc=0.2, load=0.2, risk=0.2)   # 矿方标定权重
BIG = 1e6                                          # 能力不匹配惩罚

def cost(robot, task, risk_field, graph):
    d = graph.shortest_path_len(robot.pos, task.goal)        # 巷道路网距离 (m)
    r = max(risk_field.at(p) for p in graph.path(robot.pos, task.goal))
    j = (W["dist"] * d / robot.v_nominal
         + W["soc"] * (1.0 - robot.soc)
         + W["load"] * robot.queue_len / robot.queue_max
         + W["risk"] * r)
    if not task.required_caps <= robot.caps:                 # 如清障需执行型
        j += BIG
    return j

def allocate(robots, tasks, risk_field, graph):
    """返回 {task_id: robot_id}；未能分配的任务进入等待队列。"""
    online = [rb for rb in robots if rb.heartbeat_age() < 60]  # 两个心跳周期
```

```python
    if not online or not tasks:
        return {}, list(tasks)
    J = np.array([[cost(rb, tk, risk_field, graph) for tk in tasks] for rb in online])
    rows, cols = linear_sum_assignment(J)                    # 匈牙利算法
    plan, pending = {}, []
    assigned = set()
    for i, j in zip(rows, cols):
        if J[i, j] < BIG:
            plan[tasks[j].id] = online[i].id
            assigned.add(j)
    for j, tk in enumerate(tasks):
        if j not in assigned:
            pending.append(tk)                               # 按优先级排队
    pending.sort(key=lambda t: -t.priority)
    return plan, pending

def maybe_preempt(robot, new_task, risk_field, graph):
    cur = robot.current_task
    if cur is None or new_task.priority <= cur.priority:
        return False
    robot.checkpoint(cur)                                    # 保存断点后重新入队
    return True
```

代码 3.1　竞标式多机任务分配（调度决策智能体核心逻辑）

3.5.2　三类协同作业模式

在任务分配之上，集群定义了三类多机协同模式。**分区巡检**把巷道网络按长度与风险划分为若干分区，每个分区一次只允许一台机器人进入，Agent 通过路网占用表实现会车避让，并在分区边界设置交接点，使巡检轨迹在空间上无缝拼接。**交叉验证**在单机事件的置信度低于 0.7 或风险等级不低于“较大”时触发，Agent 向第二台机器人派发同点位复测任务，两次观测的一致性作为风险升级或降级的依据，避免单传感器误报直接进入处置流程。**接力清障**用于长距离坍塌通道：感知型机器人在前方持续探测坍塌体形态与气体、执行型机器人在后方切削排导，两者保持安全间距并共享同一局部坐标系，Agent 根据切削进度动态调整前探距离，实现“边探边清”。

3.5.3　冲突消解与一致性

多机共享巷道时的冲突由协同管控智能体统一消解：路网占用采用“先申请、后进入、离开释放”的令牌机制，令牌携带任务优先级，高优先级任务可请求低优先级机器人让行到最近的避让点；所有机器人与固定监测站的数据统一写入矿井局部坐标系与统

一时间戳，任务目标点、探测结果与清障进度因此可以直接叠加比对；每条外部写操作使用幂等键约束，网络重试不会产生重复的处置命令。这些机制与第八章的软件分层降级共同保证：集群在部分装备离线、通信不稳定的井下环境中仍能维持一致、可恢复的协同状态。

3.6 人机协同与安全边界

Agent 与机器人的结合并不意味着人退出闭环，而是把人从“每一步都要操作”提升到“在关键节点做决定”。本作品在三个位置保留人的决定权：其一，撤人、停机、封控、清障等高风险写操作必须经身份鉴别、角色授权与人工确认，机器人只执行携带有效审批编号的指令；其二，井下人员与救援队拥有现场紧急停机权，任何机器人在收到现场急停或倒车雷达检测到人员时立即停机，且该停机优先级高于任何 Agent 指令；其三，Agent 给出的处置建议必须引用来源证据（规程条款、历史案例、监测数据），调度员据此判断而非盲从。反过来，机器人也对 Agent 保持“有条件服从”：机载安全状态机拥有否决权，当 Agent 下发的目标点位于气体超限区、或任务要求在切削负载超限时继续推进，机器人拒绝执行并回传拒绝原因。这种“Agent 建议、人审批、机器人守底线”的三方关系，是本作品把具身智能集群引入高瓦斯矿井而不放大风险的根本保证。

第四章　机械系统设计

机械系统是具身智能体的“躯体”：感知型装备要在积水、淤泥、坡道与坍塌体交错的巷道中把传感器送到需要的位置，执行型装备要在人无法进入的坍塌通道中真正“动手”处置。因此本章的每一个机构都对应第三章集群体系中的一项能力需求——移动机构对应“空间连续采样”，升降机构对应“复杂地形场景适配”，掘进清障装置对应“发现即处置”。以下按机构逐一给出三维模型与结构说明。

4.1　水陆两栖双驱动移动机构

针对井工巷道积水、淤泥、坡道起伏、空间狭窄等典型工况，移动机构采用水陆分离式双驱动设计，覆盖陆基与水基双模式，实现井工积水、淤泥以及陆地等多场景全场景通行。**陆基模式**采用防爆履带行走机构，双侧履带差速转向，可在狭窄巷道内灵活机动；履带表面采用人字纹路设计（纹路深度 20–30 mm），有效增大接地面积、提升抓地力，适应泥泞与碎石路面；履带框架采用高强度轻质合金，兼顾结构强度与整机轻量化。**水基模式**采用螺旋式推进装置，在履带内侧横向延伸设置螺旋推进结构；当机器人进入水深不超过 20 cm 的积水区域时，水深传感器实时监测，水位达到阈值后自动触发螺旋推进装置介入，螺旋结构旋转产生推进力，使机器人在浅水、淤泥区域保持正常行进，避免履带淤堵陷滞；装置具备良好密封防水性能。

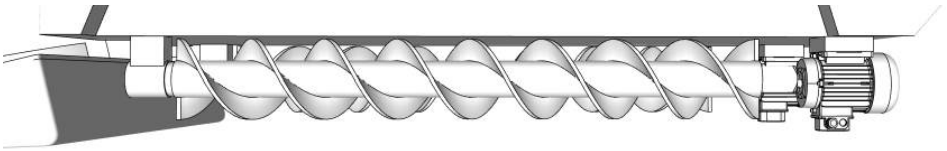


图 4.1　螺旋式推进装置三维模型（履带内侧横向螺旋结构，配防爆驱动电机，水深20 cm内自动介入）

结构说明：图 4.1 所示为单侧螺旋推进装置的三维模型。左端为防爆驱动电机与减速器，通过密封联轴节带动一根横向布置的螺旋叶片轴；螺旋叶片沿轴向连续布置，导程与叶片高度按 20 cm 水深下的推进效率优化，叶片末端设导流板以减少泥浆缠绕；整根轴由两端的防水轴承座支撑，轴承座与履带内侧框架刚性连接，使螺旋装置随履带升降机构一起抬升或下放。当履带在积水中打滑时，螺旋叶片旋转把水与淤泥向后推送产

生反作用力，机器人由此获得与履带无关的第二推进源。对具身智能集群而言，这套装置解决的是“感知型装备能否到达固定监测站覆盖不到的积水盲区”的问题——移动监测的价值在于空间连续，任何一段不可通行的巷道都会在风险场上留下空白。

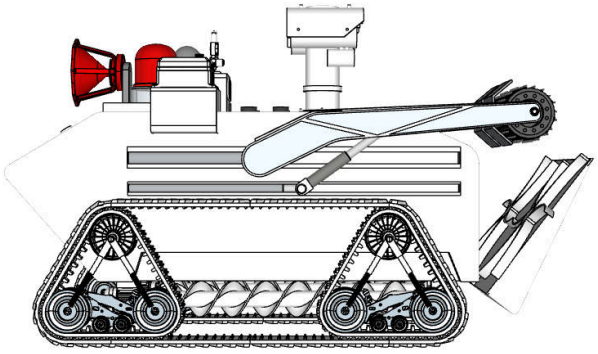


图 4.2　机器人侧面剖视图（防爆履带行走机构、螺旋推进装置、履带自适应升降机构与船型主体的内部布局）

结构说明：图 4.2 从侧面剖开整机，展示了移动系统各部件的相对位置：最下方是防爆履带行走机构，履带内侧紧贴布置螺旋推进轴，两者共用同一组升降支臂；升降支臂上端连接船型主体底板下方的螺旋升降装置；主体内部按前后分区布置液压站、电池舱与电气控制箱，重心落在履带接地中心附近以保证坡道稳定性；车体前部可见收纳状态下的掘进装置安装位。剖视图说明了本作品“移动—升降—清障”三套机构如何在一个紧凑船型本体内共存：升降机构改变履带与主体的相对高度，螺旋推进随履带联动，掘进装置则独立于移动系统前伸或收回，三者互不干涉。这种布局是执行型智能体在狭窄巷道中同时满足通行尺寸与作业能力的前提。

4.2　履带自适应升降越障机构

履带自适应升降越障机构为本产品核心创新点之一。在履带上方、机器人主体下方安装螺旋升降装置，实现履带姿态动态调节，升降行程不小于 150 mm，收纳原理类比飞机起落架升降机构；升降装置内侧设置挡水挡板（参考军工结构设计），可有效降低水中行进阻力。工作模式分为三类，可根据工况自动切换：**干燥平整巷道工况**下履带保持正三角形触地姿态，对应常规行进模式，运行功耗低，适用于日常巡检；**积水与淤泥区域工况**下履带切换为钝角三角形抬升，螺旋推进装置介入，主体浮于水面以减小行进阻力；**大坡度与障碍跨越工况**下升降装置自适应伸缩调节，保持本体水平稳定，通过姿态调整突破传统固定式履带底盘的越障高度限制。整体动力采用大马力防爆驱动电机，保障坡道、淤泥、掘进清障等重载工况下的动力储备。

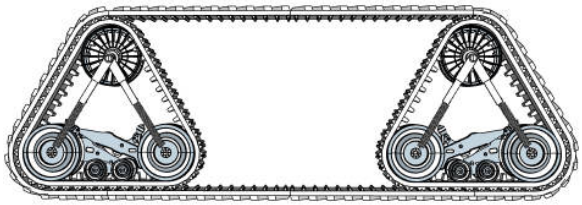


图 4.3 履带自适应升降越障机构正视图（三角形履带构型，升降行程150 mm以上，支持正/倒三角姿态动态切换）

结构说明：图 4.3 为升降机构的正视图，左右各一组三角形履带总成。每组总成由一个位于顶部的驱动轮、两个位于底部的承重导向轮和张紧机构组成，三轮呈三角形布置，履带绕三轮张紧；顶部驱动轮的轮轴同时是升降摆臂的转动中心，摆臂另一端通过螺旋升降装置与主体底板相连。当升降装置伸出时，主体相对履带抬升、三角形以正三角姿态触地；当升降装置收回并配合摆臂翻转时，履带切换为倒三角姿态、接地长度缩短而离地间隙增大。两侧升降装置独立控制，可在横向坡道上通过差动升降保持主体水平，也可在单侧遇障时抬起一侧越过障碍。对集群作业而言，这一机构使同一台机器人既能在干燥巷道以低功耗长时间巡检，也能在灾后堆积物与积水交错的路面上进入固定站与人员都无法到达的区域，是场景适配性的核心来源。

4.3 船型主体与防爆壳体

主体采用船型流线设计，前后端面均设倾斜坡度，前端配置倾斜防卡板，防止机器人被巷道突出物或堆煤卡住，同时在积水区提供额外浮力储备。主体材质采用防爆铸铝与不锈钢，满足井工防爆与耐腐蚀要求；电气腔体采用独立密封设计并配置防爆电缆引入装置；充电接口采用隔爆型设计，支持井下本安充电。壳体结构与隔爆腔体均按矿用防爆标准设计，可在高瓦斯等爆炸性环境中安全运行，详细的防爆等级、隔爆腔体与本安设计见第八章。

4.4 掘进与清障装置（核心创新）

掘进与清障装置为本产品区别于传统探测机器人的核心创新模块，使机器人从单纯的“感知型”装备升级为“感知＋执行型”异构具身智能体，实现榜题所要求的“发现即处置”。装置集成于车体前部，由液压驱动掘进机构、带齿切削滚筒、侧向旋转推土铲三大子系统组成。

4.4.1 液压驱动掘进机构

掘进机构采用双液压结构驱动，通过两组液压油缸实现掘进装置的前后移动与位置调节：作业时液压油缸推动掘进装置前伸至工作位置，带齿切削滚筒与推土铲进入工作状态；非作业状态下回收至车体前部收纳位置，减小整机外形尺寸，便于狭窄巷道通行与运输收纳。液压系统采用防爆型液压元件，配备独立液压油箱与防爆电机驱动的液压泵，液压管路采用防爆密封接头；系统压力与流量可根据切削负载自适应调节——遇硬质岩石时自动增大推力，遇松软泥土时降低输出以节约能耗。

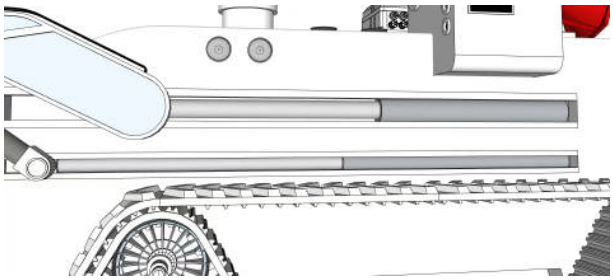


图 4.4 液压驱动掘进机构侧面三维模型（车体前部局部放大视图：双液压油缸驱动掘进装置前后移动与位置调节，非作业状态可回收收纳）

结构说明：图 4.4 为掘进机构处于前伸工作位置时车体前部的局部放大侧视图（整机全貌见第二章图 2.1）。车体前部固定一组导轨式支撑架，掘进臂沿导轨前后滑动；两组液压油缸并列布置在导轨两侧，缸体铰接于车体、活塞杆铰接于掘进臂后端，同步伸缩以推动或拉回掘进臂；掘进臂前端为切削滚筒安装座与推土铲铰点，臂上布置液压软管护套与负载传感器。前伸行程决定了切削滚筒能够到达的最远作业点，回收后整机纵向尺寸与不带掘进装置的巡检机器人基本一致。液压驱动而非电动推杆的选择，是为了在坍塌体切削这一高负载、多冲击的工况下获得足够推力储备，并通过溢流阀实现天然的过载保护。这一机构是执行型智能体“能作业”的力量来源，也是 Agent 派发清障任务时资源评估智能体核算“推力—硬度”可行性的物理依据。

4.4.2 带齿切削滚筒

切削滚筒安装于掘进装置前端，滚筒表面均布高强度切削齿，可高速旋转切削坍塌的泥土与石块，并将碎屑向下方推送。滚筒采用高强度耐磨合金材质，切削齿可更换设计，磨损后单独更换以降低维护成本。滚筒转速根据切削对象硬度自适应调节：切削松软泥土时采用高转速低扭矩模式，切削硬质石块时采用低转速高扭矩模式；滚筒配备过载保护机制，遇到无法切削的硬质障碍物时自动停机并报警，防止设备损坏。

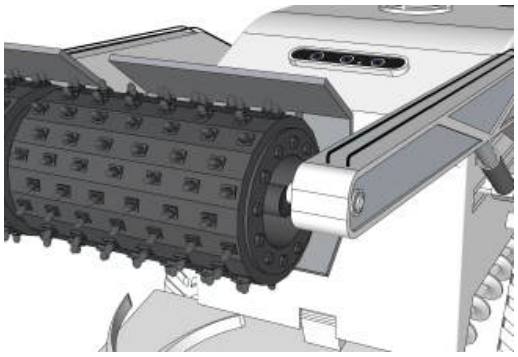


图 4.5 带齿切削滚筒三维模型（滚筒总成局部放大视图：滚筒表面均布高强度切削齿，高速旋转切削坍塌泥土与石块并将碎屑向下方推送）

结构说明：图 4.5 为切削滚筒总成的局部放大视图，聚焦滚筒本体与截齿排布（滚筒在整机中的安装位置见图 4.2 与图 4.4）。滚筒本体为空心圆柱，外圆面上按螺旋线排布数排截齿座，每个截齿座内装可拆换的合金截齿，螺旋排布使滚筒旋转时切削力沿轴向连续过渡、减小冲击；滚筒两端由防爆减速电机通过内置传动直接驱动，端盖处设迷宫密封防止煤泥侵入；滚筒上方的弧形护罩兼作导料板，把切下的碎屑向下方推土铲方向导出。滚筒转速与掘进臂进给由第六章的协同控制模块联动，切削电流与液压压力一起构成负载反馈。滚筒的作用是把“坍塌体”这一环境要素变为可被推土铲排导的碎屑，它与滚筒电流传感器共同构成执行型智能体在切削过程中的“触觉”——这是机载实时闭环中行动层反作用于环境、再被感知层观测的最直接体现。

4.4.3 侧向旋转推土铲与三系统协同

推土铲安装于切削滚筒后下方，由两组独立驱动的铲形结构组成，具有两种工作姿态：清障作业姿态下两铲向外侧旋转，将碎屑甩向通道两侧；推土作业姿态下两铲保持平行向前，将松散堆积物向前推移。推土铲的旋转角度与推进速度可根据通道宽度与碎屑量自适应调节。

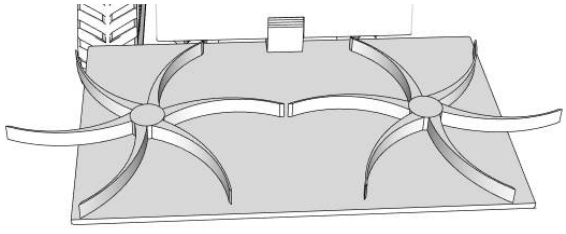


图 4.6 侧向旋转推土铲三维模型（两组独立驱动铲形结构，作业时向外侧旋转将切削碎屑甩向通道两侧）

结构说明：图 4.6 为推土铲总成的三维模型。中间为固定于掘进臂前下方的横梁与铲座，左右两片铲刀分别通过立轴铰接于铲座两端，每片铲刀由一台防爆摆动液压马达

或电动回转机构驱动，可在 0°（平行向前推土）至约 60°（向外侧甩料）之间独立调节；铲刀刃口采用硬质合金堆焊，铲面为弧形以利碎屑沿面滑出；横梁下缘略低于滚筒最低点，保证滚筒下推的碎屑落入铲刀作用范围。两铲独立驱动意味着在巷道一侧靠壁时可以只向另一侧甩料，也可以通过不对称角度把碎屑集中堆放到指定位置，为后续人工清运留出通道。推土铲完成的是清障链条的最后一步——让通道真正贯通，使巡检机器人、救援人员得以进入。三大子系统的协同工作流程如图 4.7 所示。

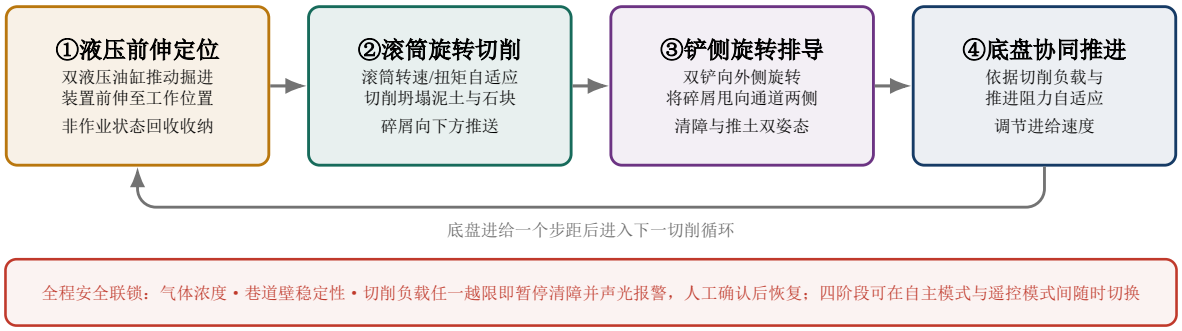


图 4.7　掘进 • 切削 • 排导 • 推进四阶段协同清障流程

流程说明：四个阶段构成一次切削循环：液压前伸决定作业位置，滚筒切削把坍塌体破碎，推土铲把碎屑排导到两侧，底盘按负载推进一个步距后进入下一循环。循环全程由第六章的协同控制模块统一调度，气体浓度、巷道壁稳定性与切削负载任一越限即暂停并报警。整个流程既可在自主模式下由机载决策层自动执行，也可由地面操作人员在遥控模式下精细操作，两种模式可随时切换；在集群层面，清障进度以“清障状态”数据对象持续上报 Agent，作为救援决策与接力清障调度的输入。

4.5　集成仓布局

车体左右两侧履带上方分别设置独立集成仓，实现功能分区与重量平衡：**集成通讯舱**（左侧履带上方）作为无线信号收发主节点，负责上传图像、气体、雷达数据，接收地面控制指令，同时承担线路规整与数据本地缓存功能，是机器人接入第三章通信层的物理端点；**气体检测装置仓**（右侧履带上方）内置微型气泵主动抽气，集成 CH_4、CO、O_2 与温湿度多参数传感器，采用开放式空气流通设计，保障检测响应速度与精度。两仓对称布置于履带上方，既平衡整机重心，又使通信天线与进气口远离前部掘进作业时的粉尘与飞溅。

第五章　多模态智能探测系统

多模态智能探测系统为本产品核心感知模块，共集成 9 大类传感器，全部精确定位、角度固定，完成线束走向规划，各模块各司其职、无功能重叠冗余。系统集视觉、激光雷达、气体、红外、探针五类感知能力于一体，可同步完成煤岩体结构识别与环境感知，实现多维数据交叉验证，满足井工防爆、低照度导航、多气体感知与煤岩体结构识别的装备要求，为灾害预警与应急清障提供感知支撑。

5.1　感知单元组成

防爆光谱一体化云台摄像机安装于顶部中央主视觉位，承担主视觉探测任务，可 360° 全向旋转监测；集成光谱分析能力，可识别电缆、支护、机电设备的过热隐患；云台集成雨刮器与保护罩，适应井下高湿高粉尘环境。配合多自由度检测平台，可实现检测端俯仰 ±30°、偏转 ±20° 的姿态调节及 ±5° 微角度精密微调。

微型固态激光雷达安装于顶部前侧上边缘，用于自主导航、前方障碍物识别与巷道断面测距；固态激光雷达在粉尘环境下的稳定性优于纯视觉方案，是井下自主导航的核心感知元件。**双目深度相机**与激光雷达集成安装于同一基座，提供视觉纹理信息，与激光雷达点云融合构建巷道三维地图。

防爆广角 AI 环视相机共 4 台，安装于顶部两侧边缘、固定朝向巷道壁，捕捉巷道壁裂缝、围岩渗水、人员违规闯入等异常，内置轻量化 AI 模型进行边缘端推理，仅在识别到异常时回传告警图像与位置，大幅降低通信带宽需求。**倒车激光雷达**用于倒车避障与后方成像，与**声光报警系统**联动，后退遇人立即警示。

气体检测装置安装于右侧履带上方，监测 CH_4、CO、O_2 与温湿度，内置微型气泵主动抽气，响应时间不超过 20 s（T90），检测精度 ±3%；标准支持同时检测 CH_4、H_2S、CO、O_2 四种气体，可选配 Cl_2、SO_2、HCl、NH_3 等。**漫射式防爆补光照明**支持白光＋红外双模式，向下倾斜安装避免直射镜头。**多自由度检测平台**（吸附式，专利技术）由圆弧滑轨、电动伸缩杆、舵机与微角度精密旋转台组成，可扩展搭载非接触式温湿度仪、微型探针（煤岩硬度与结构探测）、红外热成像、超声波与毫米波雷达（探测距离 0.1–10 m）等模块。

5.2 多模态监测指标体系

为实现多源数据的标准化管理与灾害预警模型的高效接入，本产品建立统一的多模态监测指标体系，将 9 大类传感器的输出按监测源、关键指标、采样周期、主要用途四维度规范定义（表 5.1）。

表 5.1 多模态监测指标体系

监测源	关键指标	采样周期	主要用途
防爆光谱云台摄像机	可见光图像、光谱特征、煤岩体结构	实时/帧级	主视觉探测、设备过热识别、裂缝剥落检测、清障视觉引导
微型固态激光雷达	点云距离、障碍物位置、巷道断面	10–20 Hz	自主导航、避障、断面变形监测、坍塌堆积物三维建模
双目深度相机	深度图像、三维点云、纹理特征	10–15 Hz	三维环境感知、与激光雷达融合建图、煤岩界面识别
防爆广角 AI 环视相机 ×4	巷道壁图像、裂缝/渗水/人员识别结果	实时/边缘推理	壁面异常检测、裂缝扩展监测、渗水识别、人员闯入告警、清障壁稳监测
倒车激光雷达	后方点云距离、后方障碍物	10–20 Hz	倒车避障、清障后退安全监测
气体检测装置	CH_4/CO/O_2 浓度、温湿度	1–5 s	瓦斯灾害监测、火灾预警、环境安全评估、清障气体扰动监测
声光报警系统	报警状态、报警等级	事件触发	异常警示、后退遇人报警、故障告警
漫射式防爆补光 LED	照明状态、白光/红外模式	实时控制	低照度环境补光、清障区域照明、隐蔽探测

监测源	关键指标	采样周期	主要用途
多自由度检测平台	平台姿态角、扩展模块数据	按需触发	精细探测姿态调节、煤岩硬度探针检测、红外热成像

所有监测数据写入统一记录结构：设备编号、采集时间、接收时间、空间坐标（机器人定位＋传感器偏移）、数值、单位、质量标识和来源。缺失、重复、乱序、漂移、突变和设备离线分别形成质量标记，质量不合格时输出 partial 或 failed，不伪造完整数据。该数据契约与矿井级灾害预警平台的输入格式完全对齐，机器人数据可直接接入预警模型（详见第七章）。

第六章　电控与智能控制系统

6.1　主控系统架构

电控系统采用分层架构，整体划分为感知层、决策层、执行层和反馈层（图 6.1）。感知层负责采集车体姿态、巷道环境、煤岩体状态、气体浓度、障碍物、切削负载等信息；决策层以工业级嵌入式主控为核心，完成多源数据汇集、控制算法运算、导航避障决策、掘进清障协同控制、AI 推理调度与通信指令分发；执行层由履带驱动、螺旋推进、升降机构、液压掘进、切削滚筒、推土铲、云台、补光、报警等执行单元组成；反馈层将设备运行状态、检测数据、切削负载与异常信息回传主控与地面平台。主控单元满足井下防爆与宽温运行要求，与各传感器、执行器之间通过标准化接口连接，支持模块化扩展与故障快速更换。

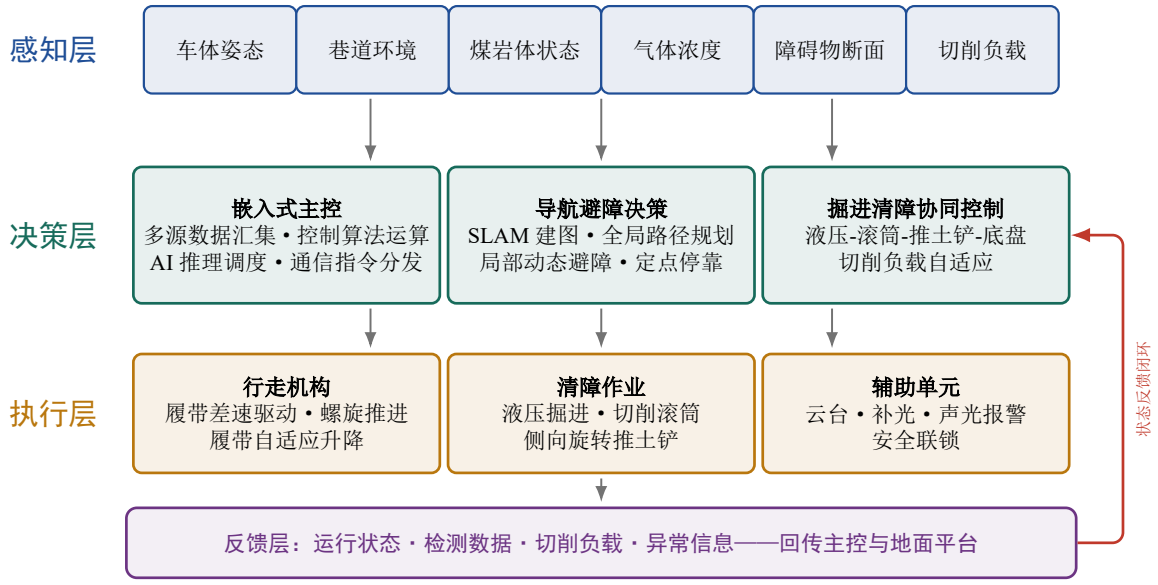


图 6.1　电控系统分层架构框图（感知层多源采集—决策层智能计算与调度—执行层运动与作业控制—反馈层状态回传）

6.2　自主导航与避障

自主导航系统融合微型固态激光雷达与双目深度相机数据，构建巷道三维点云地图，实现同步定位与地图构建（SLAM）。在已知巷道地图中，系统依据全局路径规划指令生成最优巡检路径，结合局部动态避障算法实时规避巷道内临时障碍物、堆积物与人

员。粉尘浓度较高的区域由激光雷达主动探测弥补视觉不足；结构复杂的岔道口与交叉点由双目视觉纹理信息辅助提升定位精度。系统支持路径跟踪与定点停靠，可按预设巡检路线依次到达各检测点，在检测点自动停靠并启动多模态探测。应急清障模式下，导航系统结合坍塌堆积物的三维点云数据，自动规划清障路径与切削进给策略。自主导航定位精度指标为 0.1 m 以内。

6.3 AI 边缘推理

AI 边缘推理系统部署于 4 台防爆广角 AI 环视相机的边缘端，采用轻量化深度学习模型实时完成三类异常识别：**裂缝识别**（位置、走向、长度与宽度，评估发育程度，为顶板与冲击地压灾害预警提供数据支撑）、**渗水识别**（围岩表面渗水痕迹与湿区范围，识别突水前兆）、**人员识别**（检测违规闯入人员，触发声光报警并回传告警）。边缘端推理仅在识别到异常时回传告警图像与位置，常规巡检数据本地存储，将异常响应延迟控制在秒级；模型支持远程 OTA 更新，可根据不同矿井的岩性与环境特征持续优化识别精度。

6.4 掘进清障协同控制

掘进清障协同控制系统实现液压掘进机构、带齿切削滚筒、侧向旋转推土铲与移动底盘的多系统协同控制，控制流程如图 6.2 所示。系统接收清障指令后，首先通过激光雷达与视觉系统扫描坍塌区域，构建堆积物三维模型，自动规划切削路径与进给策略；随后液压掘进机构前伸至工作位置，切削滚筒根据堆积物硬度自适应调节转速与扭矩，推土铲侧向旋转排导碎屑，移动底盘根据切削负载与推进阻力自适应调节前进速度，保持切削效率与设备安全的平衡。

安全保护机制包括：切削滚筒过载保护（遇无法切削的硬质障碍物自动停机报警）、液压系统压力监测与超压溢流保护、清障作业全程气体检测与巷道壁稳定性监测联动（发现气体浓度超限或裂缝扩展、掉矸等危险征兆立即暂停清障并报警）。

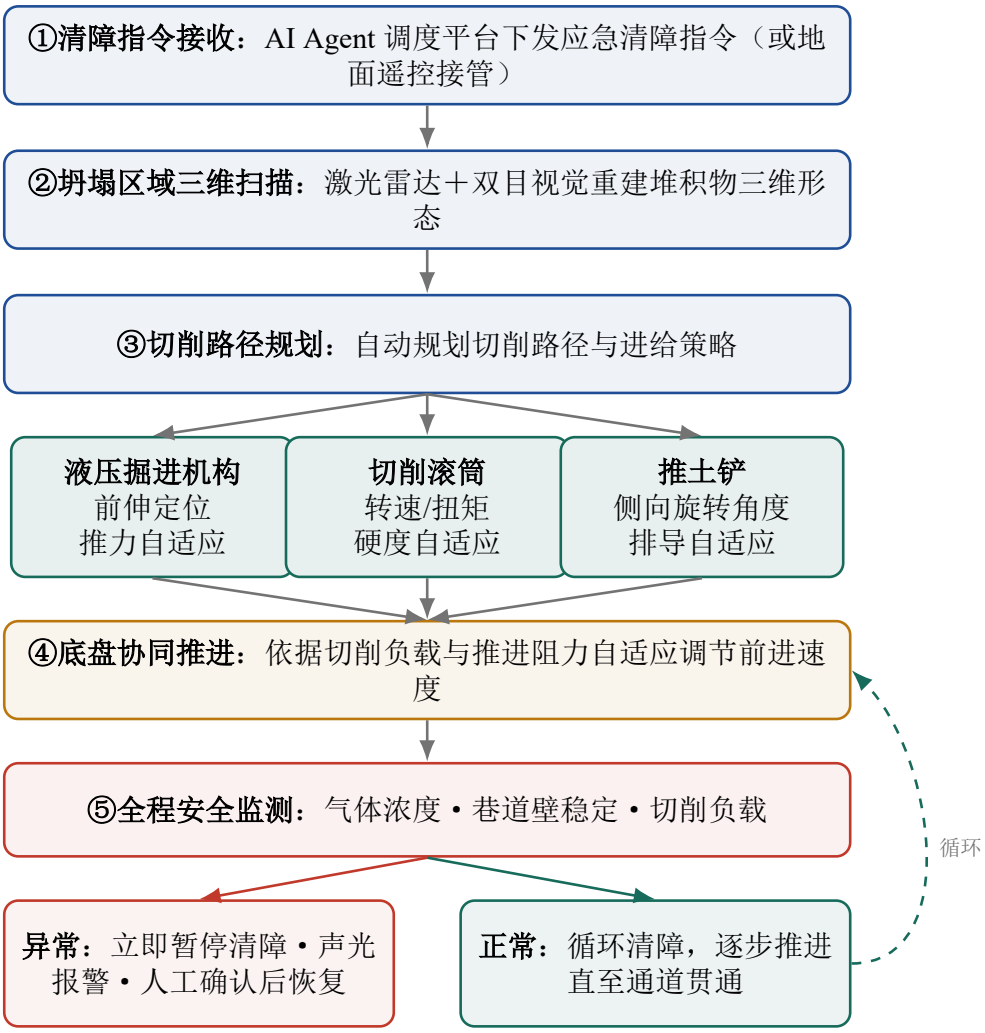


图 6.2　掘进清障多系统协同控制流程图（指令接收 → 三维扫描 → 路径规划 → 液压/滚筒/推土铲并行执行 → 底盘自适应 → 安全监测 → 异常暂停/正常循环）

6.5　声光报警与安全联锁

声光报警系统集成于顶部后侧，与倒车激光雷达联动，同时接收主控的全局异常告警指令；触发场景包括后退检测到人员、气体浓度超限、AI 识别到异常、切削滚筒过载、通信中断、低电量、机构故障等，警示音与闪光信号可根据异常等级调整频率与强度。

安全联锁机制保障设备在异常情况下的本质安全：气体浓度达到预警阈值时自动降低运行速度并加强监测，达到危险阈值时自动停机并发出最高等级报警；通信中断超过设定时间，机器人自动进入安全待机状态并持续本地缓存数据；检测到关键机构故障或切削滚筒过载时，立即切断动力输出并锁定当前姿态，防止次生事故。软硬两级安全机制（含六级软件分层降级）在第八章统一阐述。

6.6 电控系统详细设计补充

本项目面向矿井巷道黑暗环境下自主巡检需求，构建以 STM32 为运动底盘主控、树莓派为 ROS 导航主控的分层电控与智能控制系统。系统围绕巷道巡航、气体检测、裂缝识别和地图构建等巡检任务，将陀螺仪、编码器、气体传感器、摄像头及激光雷达等感知信息汇入控制端，经数据融合、路径规划和控制运算后，向行走底盘与巡检载荷分发指令，并通过运行状态反馈形成闭环，由此形成“多源感知—主控决策—协同执行—状态反馈”的控制链路，为黑暗环境自主巡航、气体与裂缝检测、手动建图模拟矿山环境提供统一控制基础。

针对主办方对环境感知与控制系统、自动导航、智能避障及全自主无人作业方案论证的要求，本节重点论证现有资料能够直接支撑的“STM32 底盘＋树莓派 ROS”分层控制、速度与位姿双闭环控制、激光雷达 SLAM 建图与多点巡航以及气体/裂缝多源感知方案。对于更复杂的井下越障、多机协同等能力，本节不将其表述为已经完成的样机功能，而是通过统一感知、决策和执行接口为后续系统深化提供控制基础，确保设计说明与现有样机、测试资料保持一致。

6.6.1 主控系统架构设计

本装置主控系统以 STM32F407VET6 运动底盘控制板为核心，主控程序基于 FreeRTOS 实时操作系统设计，采用多任务调度实现运动控制与数据通信并行处理，关键通信由串口中断实时响应；主控板与 APP 端通过串口 2（蓝牙）通信，与上位机/ROS 端通过串口 1、串口 3、串口 5 及 CAN 接口通信，整体形成“多源感知—主控决策—协同执行—状态反馈”的闭环控制链路。系统按四层划分：

1. **感知层**：采集车体姿态、巷道环境、气体浓度、壁面状态及周边障碍物信息，数据上行汇入主控端；
2. **决策层**：以 STM32 为控制中枢，完成多源数据融合、双闭环 PID 控制运算、多系统时序调度与通信指令分发；
3. **执行层**：由行走底盘以及补光摄像、气体检测等巡检载荷组成，指令下行驱动执行；
4. **反馈层**：将设备运行状态、作业参数及异常信息回传 STM32 与 APP 端，形成状态闭环。

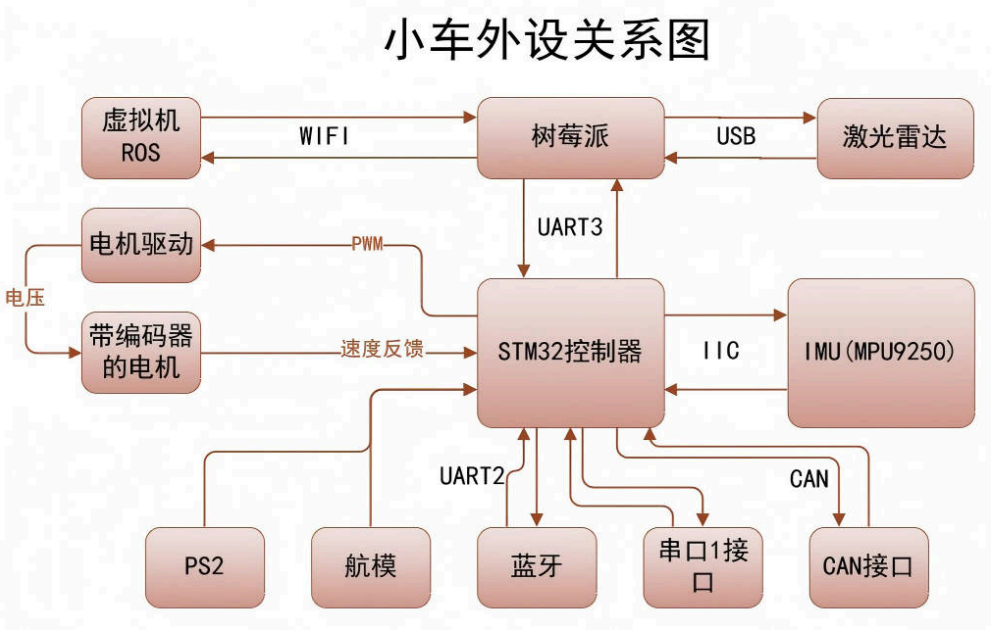


图 6.3 小车外设关系图（STM32 与树莓派、激光雷达、IMU、电机驱动及各遥控/通信接口的连接关系）

图 6.3给出小车外设关系图：STM32 控制器经 UART3 与树莓派通信，树莓派经 WIFI 与虚拟机 ROS 交互、经 USB 连接激光雷达；STM32 经 IIC 读取 IMU（MPU9250）姿态，输出 PWM 经电机驱动板驱动带编码器电机，电机电压与编码器速度反馈回主控构成速度闭环；PS2、航模遥控、蓝牙（UART2）、串口 1 接口与 CAN 接口作为控制指令输入通道接入主控。该图对应本节所述“感知层—决策层—执行层—反馈层”的总体架构，是后续硬件电路与软件任务设计的总体依据。

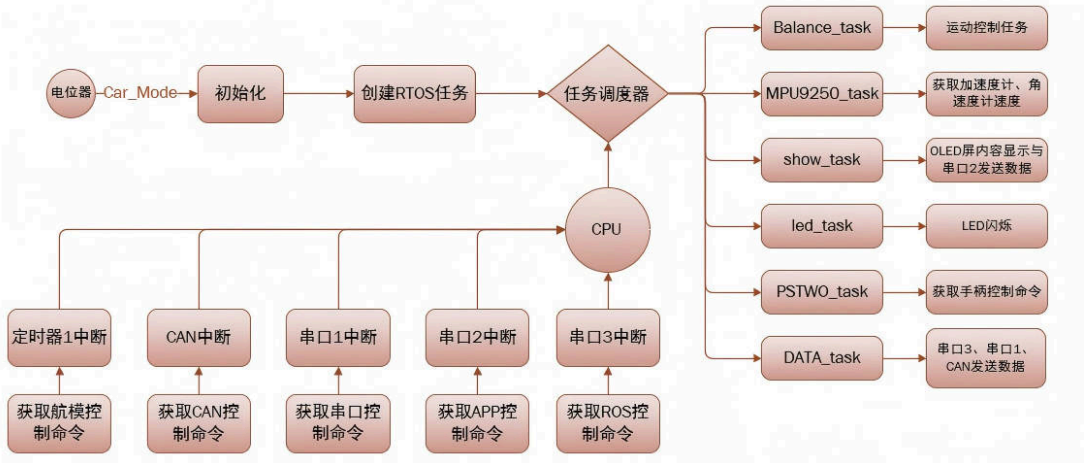


图 6.4 系统任务调度框图（各 RTOS 任务与中断由 CPU 分时调度）

图 6.4为系统任务调度结构：上电后由电位器读取 Car_Mode 车型编码，经初始化并创建 RTOS 任务后交由任务调度器管理；Balance_task 承担运动控制，MPU9250_task

获取加速度计与角速度，show_task 完成 OLED 显示与串口 2 数据发送，led_task 负责 LED 闪烁，PSTWO_task 获取手柄控制命令，DATA_task 经串口 3、串口 1 与 CAN 发送数据；定时器 1、CAN、串口 1/2/3 中断分别获取航模、CAN、串口、APP 与 ROS 控制命令，各任务与中断由 CPU 分时调度。

6.6.1.1　主控板硬件电路设计

主控板（F407 小车控制板）硬件设计基于四页原理图（SCH_Schematic1_2026-09-09）完成，围绕 STM32F407VET6 构建“主控电路—电源管理—通信与接口”三层电路架构，全部信号经板级连接器引出，便于整机装配、检测与二次扩展，硬件资源分配情况如下。

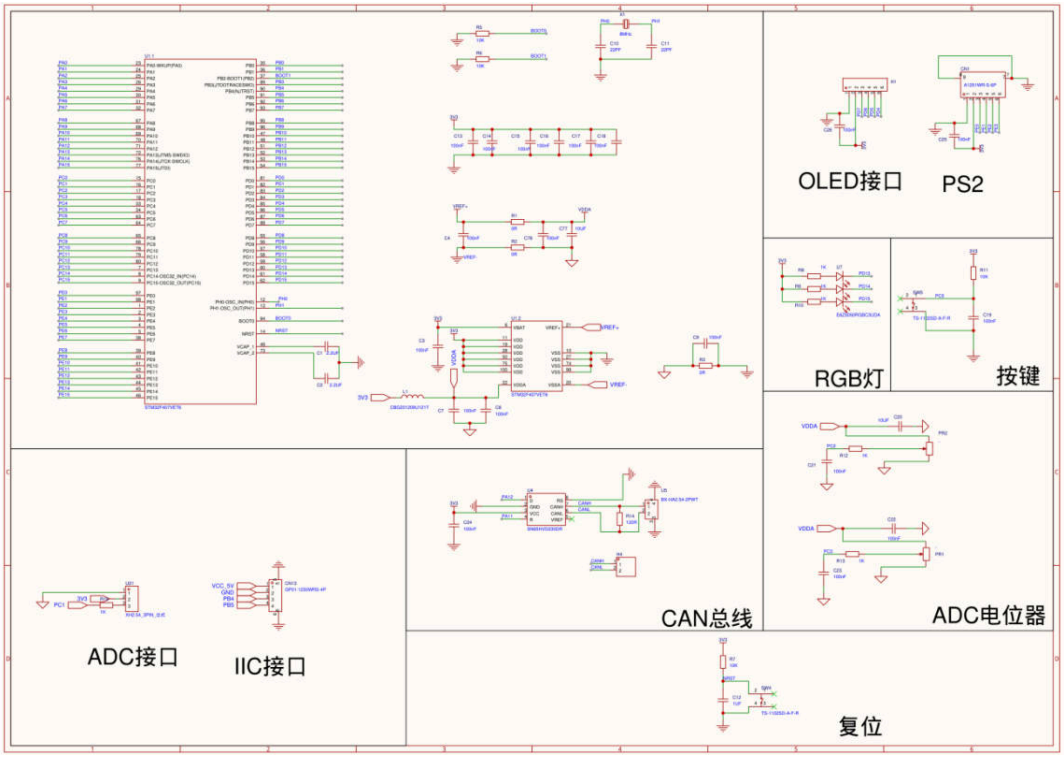


图 6.5　F407 小车控制板原理图（1）：主控电路

原理图第 1 页为主控电路，以 STM32F407VET6 为核心，给出 LQFP100 全引脚定义，并配置 8 MHz 高速晶振（22 pF 起振电容）、BOOT0/BOOT1 启动配置电阻、NRST 手动复位电路、VCAP_1/VCAP_2 核心稳压电容、VDD 去耦电容阵列以及 VDDA 磁珠隔离滤波模拟电源，为单片机提供可靠的最小系统；同页还包含 SWD 调试口、主控供电引脚（VBAT/VDD/VDDA/VSS）及全部 GPIO 引出排针，保证引脚级可扩展性。

1. 主控与时钟复位电路

主控芯片采用 STM32F407VET6（LQFP100 封装，Cortex-M4F 内核，主频 168 MHz，512 KB Flash/192 KB RAM）。外部高速晶振 X1 为 8 MHz，配 22 pF 起振电容，经 PLL 倍频作为系统主时钟；PH0/PH1（OSC_IN/OSC_OUT）为晶振接入引脚。复位电路由 10 kΩ上拉电阻 R7、1 μF滤波电容 C12 与轻触按键 SW4（TS-1102SD-A-F-R）组成，实现上电自动复位与手动复位；BOOT0/BOOT1 经 10 kΩ电阻下拉，配合 USB 串口一键下载电路可自动进入系统存储器模式。VCAP_1/VCAP_2 各接 2.2 μF稳压电容；VDD 外挂 6 颗 100 nF 去耦电容；VBAT、VDDA 单独供电，VDDA 经磁珠 L1（CBG201209U121T）与 10 μF/100 nF 电容滤波后为模拟外设供电，VREF+ 经 0 Ω电阻与 VDDA 相连，保证 ADC 采样精度；板载 SWD 调试口与 28P 预留 GPIO 排针（PZ254V-12-28P，引出全部 PA/PB/PC/PD/PE 端口及 NRST、BOOT0），便于程序调试与二次开发。

2. 多级电源与电量监测电路

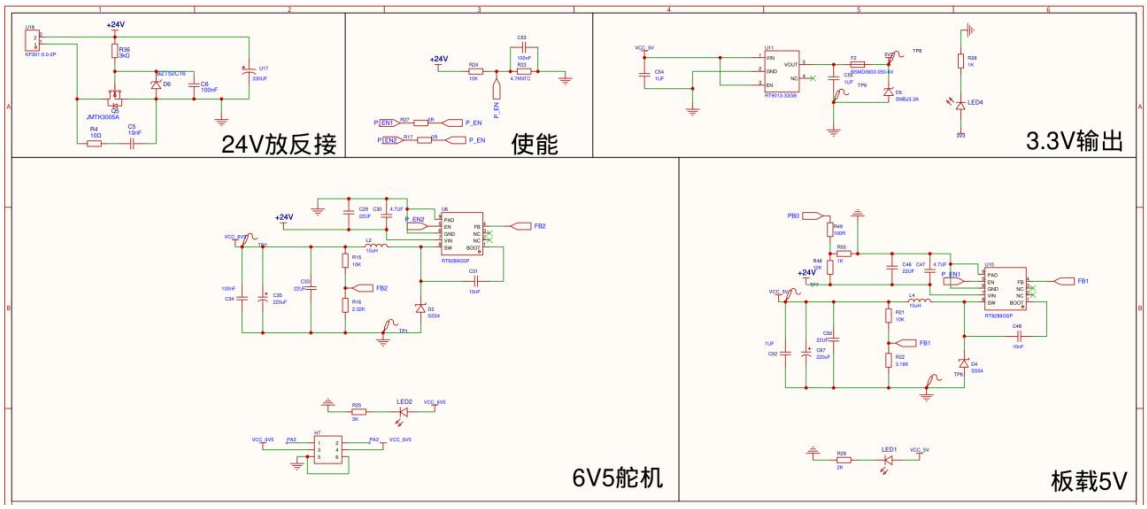


图 6.6　F407 小车控制板原理图（2）：电源电路

原理图第 4 页为电源电路：24 V 电池经 KF301 接线端子接入后，先经 JMTK3005A 防反接电路（配合 BZT52C16 稳压管与 330 μF储能电容）实现极性反接保护；再经两级 RT8289GSP 同步降压器分别输出舵机电源 VCC_6V5 与 5 V 板载电源，均由 P_EN 使能信号统一控制；3.3 V 数字电源由 RT9013-33GB LDO 二次稳压，配有自恢复保险丝与 SMBJ3.3A TVS 管过流、浪涌保护；24 V 电压经分压网络采样至 PB0，为电量监测提供依据。

电源电路采用“宽压输入—两级 DC-DC 降压—LDO 稳压”三级架构。24 V 电池经 KF301-5.0-2P 接线端子输入，前端设置 24 V 防反接电路（P-MOS 管 JMTK3005A 配合 BZT52C16 稳压管、10 Ω/3 kΩ泄放网络与 330 μF储能电容），防止极性反接损坏

板卡并抑制上电浪涌；硬件使能开关（SS12D00G3）与主控 P_EN 信号共同控制两路 RT8289GSP 同步降压电源输出。第一路输出 5 V（10 μH功率电感＋ SS54 肖特基续流＋ 220 μF/22 μF输出滤波）作为主控、传感器与上位机供电，第二路输出 6.5 V（VCC_6V5）为舵机等大电流执行机构供电；3.3 V 数字电源由 RT9013-33GB 线性稳压器将 5 V 二次降压获得，输入串接 500 mA 自恢复保险丝（BSMD0603-050-6V）与 SMBJ3.3A TVS 管提供过流与浪涌双重保护，输出经电源指示灯指示上电状态。24 V 电池电压经分压电阻网络取样至 PB0（ADC12_IN8）通道，由主控实现欠压分级报警与低压保护。

3. 串口与调试接口

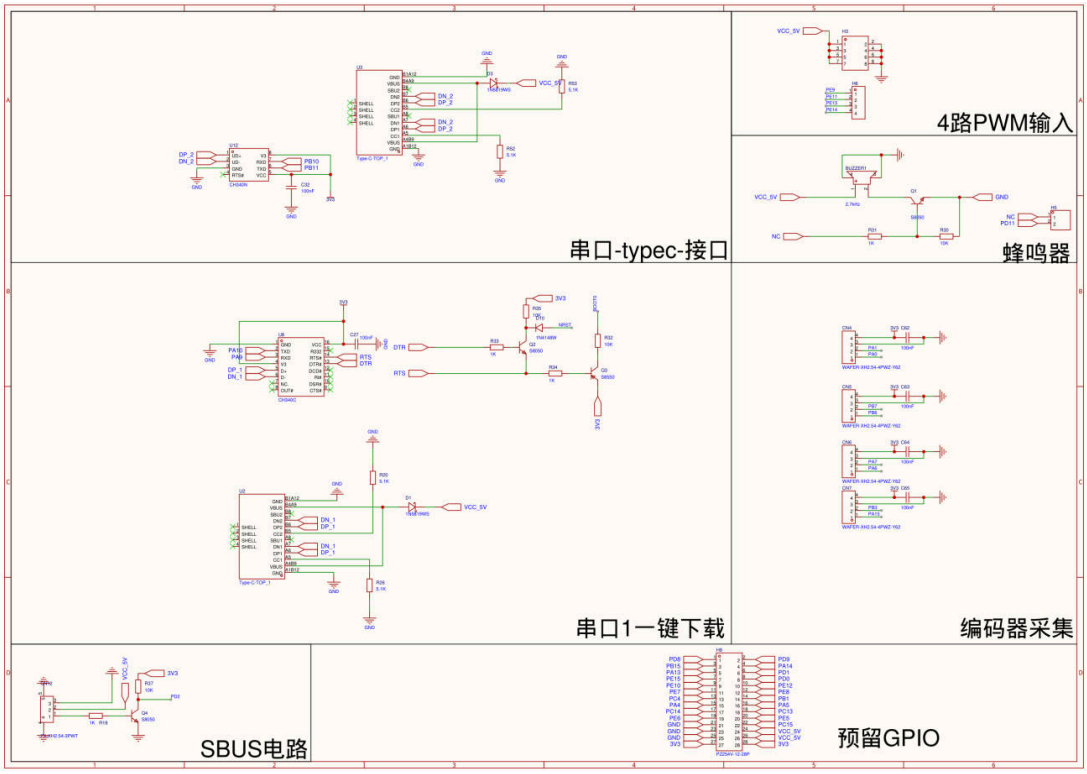


图 6.7　F407 小车控制板原理图（3）：编码与下载电路

原理图第 3 页为编码与下载电路：两路 Type-C 接口分别接 CH340C 与 CH340N USB 转串口芯片，一路承担程序烧录与一键下载（DTR/RTS 组合自动进入 BOOT0），一路提供稳定串口通道供 ROS 上位机通信；同页包含 4 路正交编码器采集接口（XH2.54-4P×4，带 100 nF 滤波）、SBUS 反相信号接收电路、4 路 PWM 遥控信号输入、蜂鸣器驱动电路与 28P 预留 GPIO 排针，兼顾多路编码反馈与遥控接入。

串口电路提供两路 USB 转串口通道：通道一由 CH340C 芯片经 Type-C 接口（DP_1/DN_1）引出，转换至 USART1（PA9/PA10），并利用 DTR/RTS 信号经 S8050/S8550 三极管组合控制 BOOT0，实现“一键下载”自动烧录，供固件调试与程序

升级使用；通道二由 CH340N 芯片经第二路 Type-C 接口（DP_2/DN_2）引出，转换至 USART3（PB10/PB11），作为主控与树莓派 ROS 上位机通信的标准通道（115200 波特率）。

4. 传感器与执行机构接口

1. **CAN 总线**：采用 SN65HVD230DR 收发器芯片，CAN1 控制器引脚（PA11/PA12）经收发器转换为差分 CANH/CANL，配 120 Ω总线终端电阻，经 BX-HA2.54-2PWT 接线端子引出，支持与外部控制模块多节点级联扩展；
2. **蓝牙通信**：蓝牙接口 CN11（GP01-1250WRS-4P，含 VCC_5V、GND 及数据线 PC10/PC11）适配 BT04 串口蓝牙模块，实现手机 APP 遥控、在线调参与紧急停车，备用串口（PD5/PD6）可作拓展；
3. **电机驱动**：两片 2×5 IDC 连接器（U22/U23）构成 4 路驱动接口，经 10 kΩ上拉/下拉电阻整形输出四路 PWM 与方向控制信号（分接 PC6–PC9 等定时器通道），可直接对接外部 H 桥直流电机驱动功率板；
4. **编码器采集**：CN4–CN7 四个 XH2.54-4P 接口分别引出 PA1/PA0、PB7/PB6、PA7/PA6、PA15/PB3 四组正交编码信号（配 3V3 供电与 100 nF 滤波），对应 TIM2/TIM3/TIM4 等定时器正交编码模式，为四轮速度闭环提供位置反馈；
5. **姿态感知**：板载 MPU6050 六轴姿态传感器经 I2C 总线（SDA=PB8、SCL=PB9，4.7 kΩ上拉电阻 R50/R51）接入主控，INT 中断输出接 PD3，REGOUT、CPOUT 外挂滤波电容（100 nF、2.2 nF），实现高刷新率姿态数据采集；预留 IIC 接口（CN9，PB8/PB9）支持温湿度、气体浓度等扩展传感器并联挂载；
6. **遥控与显示**：PS2 手柄接口（CN1，A1251WR-S-6P）、4 路 PWM 输入接口、SBUS 反相信号接收电路（CN12）满足多种遥控模式接入；OLED 显示接口、RGB 三色指示灯（PD13/PD14/PD15，1 kΩ限流电阻）、蜂鸣器（2.7 kHz，S8050 三极管驱动）、用户按键（PC5，10 kΩ上拉＋ 100 nF 消抖）、复位按键与急停按钮（CN10，2.54-2P，PE4 电平监测）构成完整的人机交互与安全电路；
7. **识别与扩展**：双 ADC 电位器（PR2→PC2、PR1→PC3，配 1 kΩ限流与电容滤波）作为车型识别档位输入，另有 1 路 ADC 外接接口（U21，XH2.54-3P，PC1）、OLED 显示接口及 28P 预留 GPIO 排针，为传感器扩展与二次开发预留充足硬件资源。

原理图第 2 页为接口电路：板载 MPU6050 六轴姿态传感器（I2C 接口、4.7 kΩ上拉，INT 中断接 PD3）；四路驱动接口经两片 2×5 IDC 连接器引出，信号经 10 kΩ电阻整

形；蓝牙接口（GP01-1250WRS-4P）提供 PC10/PC11 串口数据线；此外包含 OLED 接口、PS2 手柄接口（A1251WR-S-6P）、CAN 总线接口（SN65HVD230 收发器）、RGB 灯、按键、复位键与急停开关（CN10，PE4 信号）、ADC 电位器（PC2/PC3 车型识别）及预留 IIC 接口，构成完整的外设接口体系。

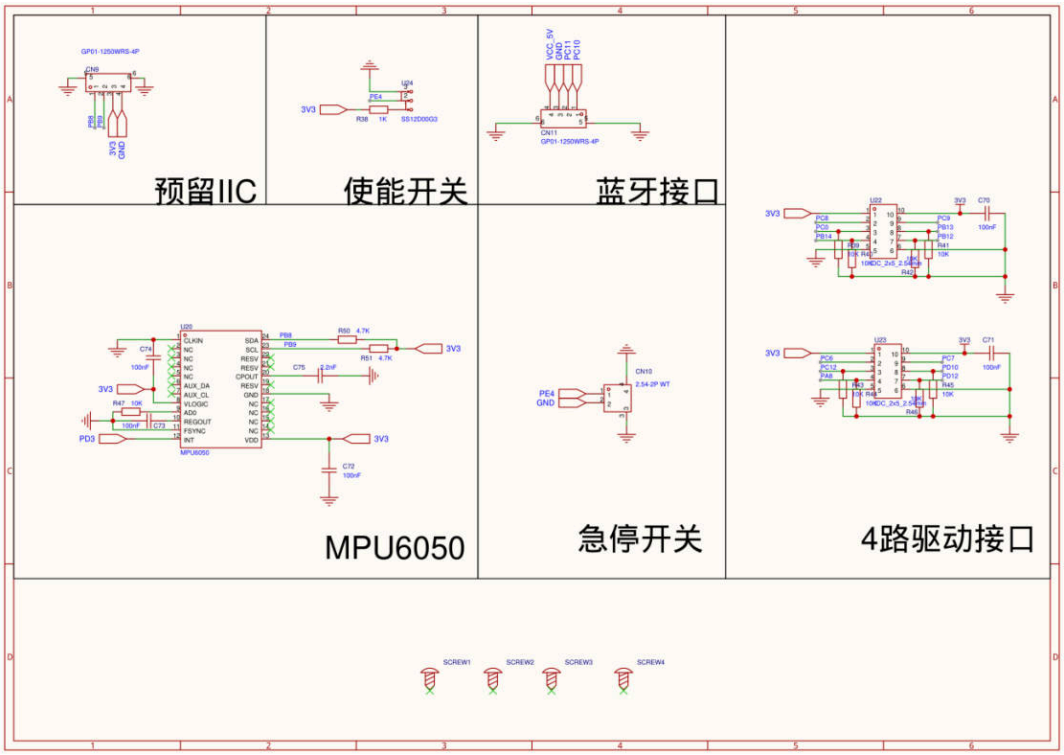


图 6.8　F407 小车控制板原理图（4）：接口电路

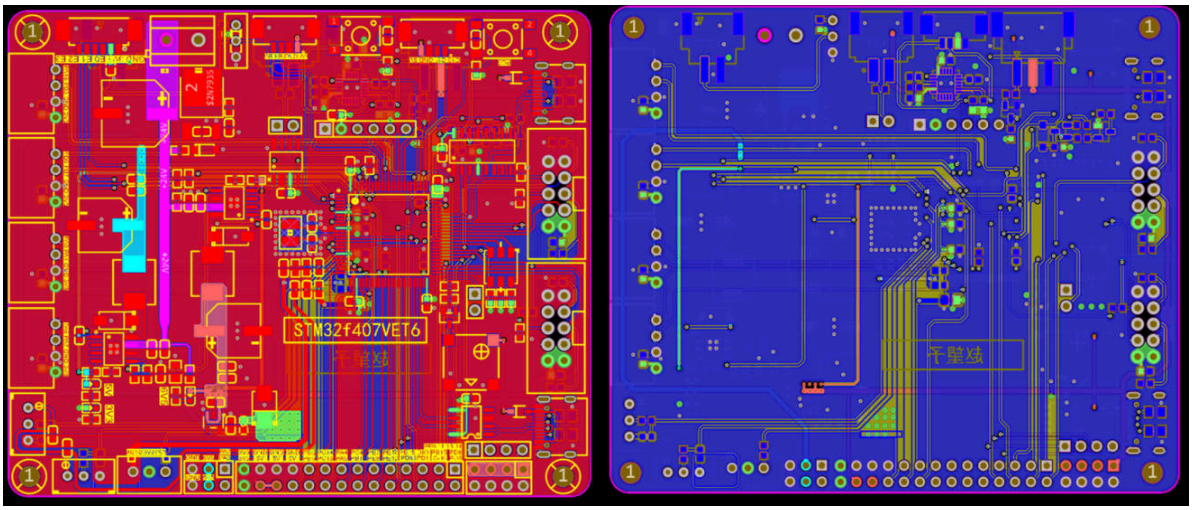


图 6.9　控制板 PCB 设计图：(a) 正面；(b) 背面

PCB 采用四层板设计，主体尺寸与车体电池仓匹配。正面（图 6.9a）以元件高密度布板为主：左侧为 24 V 接线端子与防反接电路，右上部为 RT8289GSP 与 RT9013 电源

变换电路，中部为核心 STM32F407VET6 与去耦电容阵列，板缘依次布设 OLED、PS2、CAN、编码器、蓝牙、4 路驱动接口等外部连接器，电源接口、连接器均沿板边引出，便于线束插拔与整机装配；背面（图 6.9b）以走线为主，铜箔大面积覆盖作为散热与电源回流平面，信号走线经时钟、差分（CAN/USB）等关键线路等长与包地处理，控制板背面与车体其它模块安装面无干涉。布局上按“强电与弱电分区、模拟与数字分地、连接器外置”原则设计：24 V/6.5 V 功率区布置在板角并远离接口，ADC 采样、MPU6050 陀螺仪等敏感模拟电路靠近接口端并用磁珠隔离，降低电机驱动高速开关对姿态采样与通信链路的干扰。

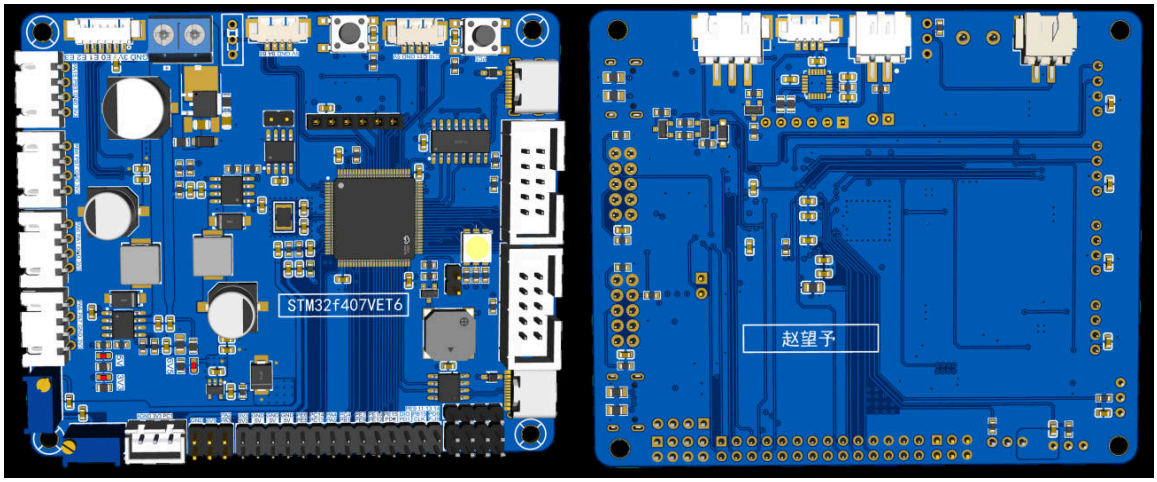


图 6.10　控制板三维模型图：(a) 俯视；(b) 轴测

三维模型直观展示了控制板的空间布局与舱位适配情况：板面核心为 STM32 主控芯片，HDMI 式编码器、COM 串口等板对板连接器采用贴板低矮封装，各外设接口沿板周边布置，板厚与安装孔位与车体底盘支架匹配，整板无超高元件；轴测图进一步表明电源接口与马达端子排位于板后侧，蓝牙模块、OLED 排针位于板前侧，走线无交叉冲突，可直接以四立柱螺装方式固定于车体电池仓上方，同时便于检修更换。整体布局满足“模块化、可维护、抗振动”的井下巡检工况要求。

6.6.1.2　核心控制器控制与多源数据融合

主控模块选用 STM32F407VET6 作为核心控制器，承担运动学解算、增量式 PI 速度闭环、多系统时序调度和通信指令分发等任务，并非仅用于单一电机启停。电机控制链路为：三轴目标速度 → 运动学逆解 → 各轮目标速度 → 增量式 PI 速度闭环 →PWM 输出 → 电机执行，编码器以 100 Hz 周期反馈实测速度形成闭环。主控程序基于 FreeRTOS 创建 6 个任务并行执行，其中 Balance_task 以 100 Hz 完成编码器测速、控制模式分发、

速度闭环与 PWM 输出，MPU6050_task 以 100 Hz 读取 IMU 数据，data_task 以 20 Hz 向外发送状态数据，其余任务负责 OLED 显示、LED 指示与 PS2 手柄解析，任务调度器按优先级切换执行。

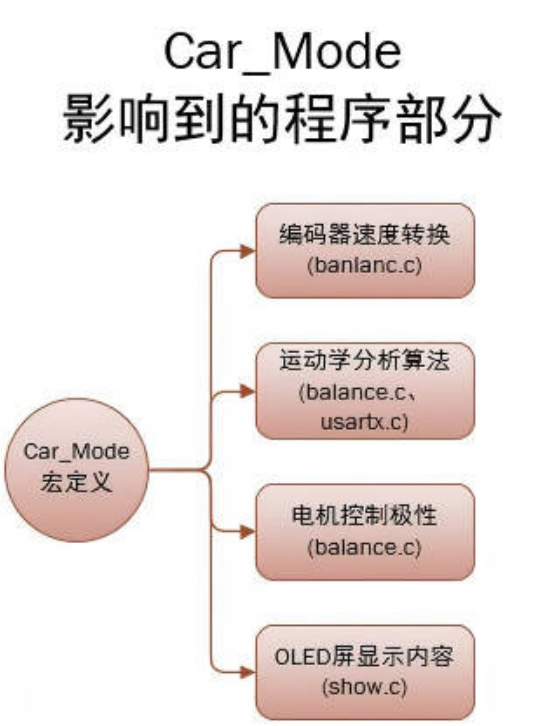


图 6.11　Car_Mode 宏定义影响的程序模块（车型参数自动匹配）

图 6.11给出 Car_Mode 宏定义对各程序模块的影响：Car_Mode 由电位器档位确定并自动匹配车型参数，编码器速度转换（banlanc.c）按其换算轮速与极性，运动学分析算法（balance.c、usartx.c）按其选择两轮差速、阿克曼、全向轮或麦轮模型，电机控制极性（balance.c）与 OLED 屏显示内容（show.c）也随车型切换。本装置为四轮麦轮全向底盘（mini_mec），对应 A、B、C、D 四电机解算。

（1）软件工程结构与模块划分

嵌入式软件工程基于 Keil MDK-ARM 开发环境与 STM32F4 标准外设库（FWLIB）构建，按“应用层—控制层—驱动层—底层支持—内核”五层组织（图 6.12、表 6.1）。应用层 main.c 经 systemInit() 完成外设初始化后，由 start_task() 一次性创建 6 个应用任务并启动 FreeRTOS 调度器；周期任务统一采用 vTaskDelayUntil() 饱和延迟，保证控制节拍不受任务负载漂移影响。

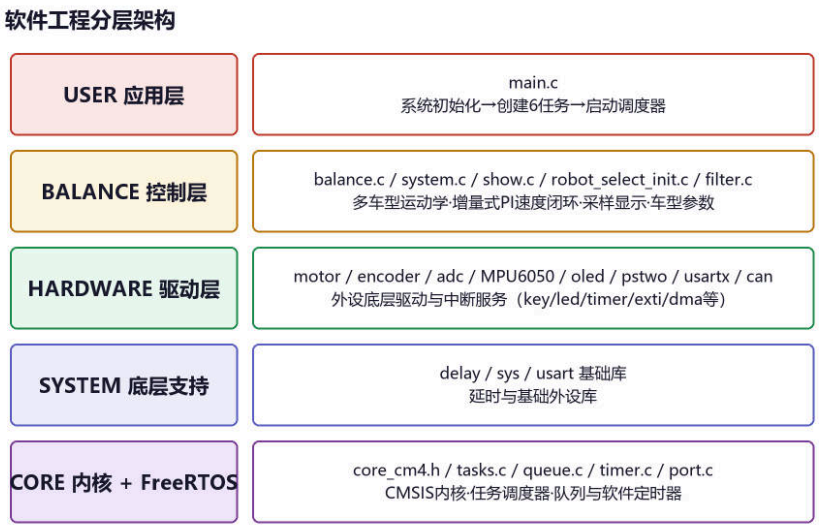


图 6.12　软件工程分层架构

表 6.1　软件工程模块划分

层次	主要文件	功能职责
应用层（USER）	main.c	硬件初始化、任务创建、调度启动
控制层（BALANCE）	balance.c、system.c、show.c、robot_select_init.c、filter.c	多车型运动学解算、速度闭环、参数匹配、采样显示
驱动层（HARDWARE）	motor、encoder、adc、MPU6050、oled、pstwo、usartx、can 等	外设驱动与中断服务
底层支持（SYSTEM）	delay、sys、usart	延时、基础外设库
内核（CORE + FreeRTOS）	core_cm4.h、tasks.c、queue.c、port.c	CMSIS 内核、任务调度、队列与软件定时器

（2）启动初始化流程（systemInit）

初始化按规定流程顺序执行（图 6.13）：串口 3 为默认 ROS 通信口（115200），串口 2 连接蓝牙 APP（9600）；ADC2 通道 8 采样电池电压（11:1 分压修正），ADC1 通道 9 读取电位器档位并经 Robot_Select() 自动匹配 6 种车型参数；电机 PWM 由 TIM1/9/10/11 产生（10 kHz），编码器由 TIM2–TIM5 正交接口采集，完成自检后进入任务调度。

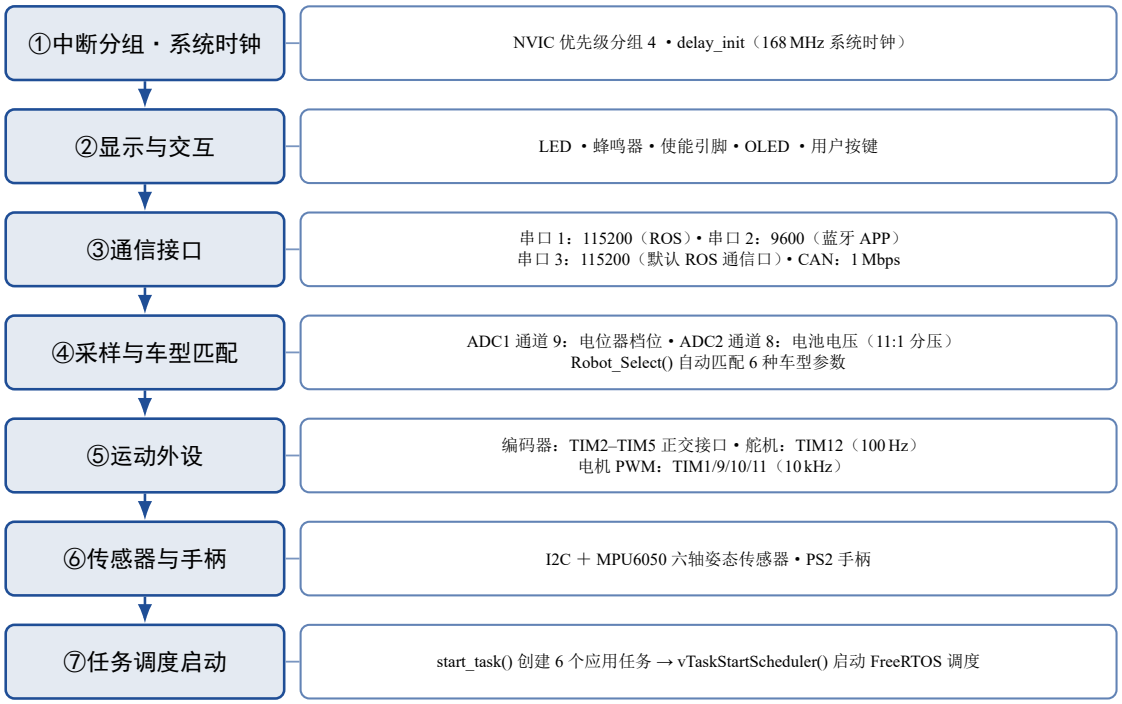


图 6.13　systemInit() 启动初始化流程（外设初始化顺序与关键参数）

（3）任务级数据流与运动控制链

Balance_task 以 100 Hz 执行“编码器测速 → 控制模式分发（APP/遥控/PS2/串口/CAN 优先级判定）→ 多车型运动学逆解 → 增量式 PI 速度闭环 →PWM 输出”主控链（图 6.14），控制律为

$$u(k) = u(k-1) + K_{\mathrm{P}}\,[e(k) - e(k-1)] + K_{\mathrm{I}}\,e(k) \tag{6.1}$$

式中 $u(k)$ 为 PWM 输出，$e(k)$ 为目标速度与实测速度之差，默认 $K_{\mathrm{P}} = K_{\mathrm{I}} = 300$，输出经 ±16700 限幅后按车型极性写入定时器寄存器；MPU6050_task 以 100 Hz 采集姿态，data_task 以 20 Hz 组帧上传 24 字节状态帧，show_task 以 10 Hz 完成电池电压 10 次平均与低压分级报警；电池电压低于 10 V、使能断开或软件失能时 PWM 强制清零。

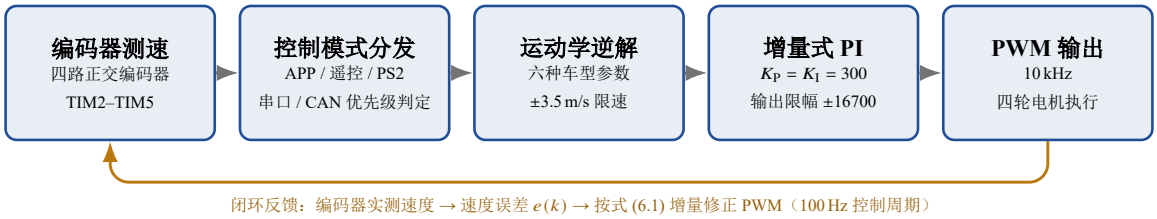


图 6.14　Balance_task 100 Hz 运动控制数据流

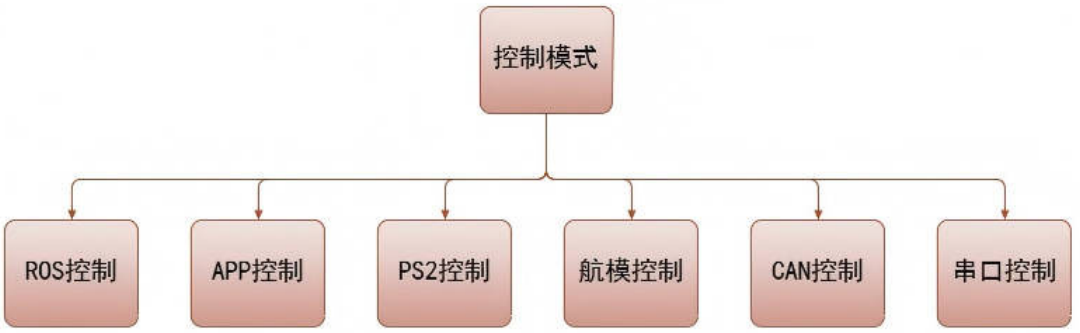
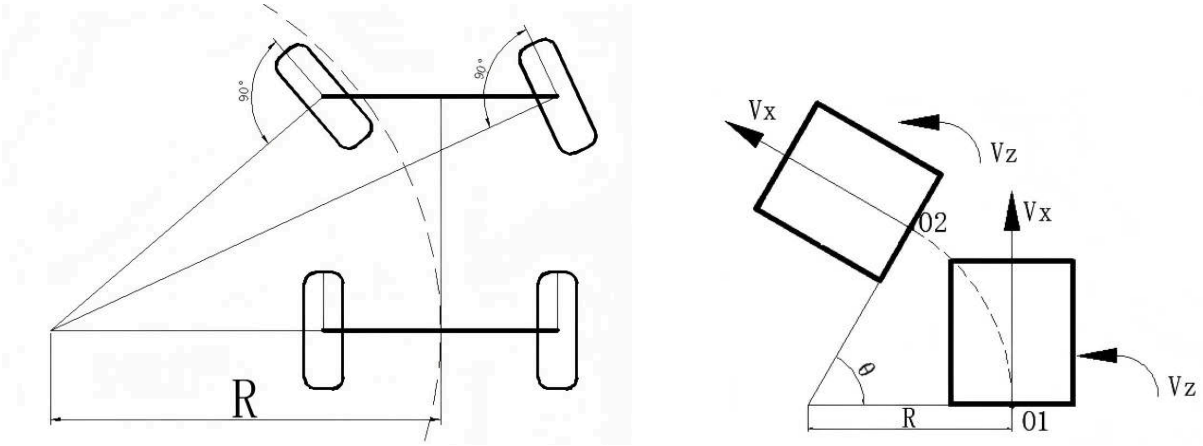


图 6.15 底盘控制模式分类（ROS/APP/PS2/航模/CAN/串口等指令通道）

图 6.15给出底盘的控制模式分类：主控支持 ROS 控制、APP 控制、PS2 控制、航模控制、CAN 控制与串口控制六类，对应源码中串口 3、串口 1、串口 5、CAN、蓝牙 APP、PS2 手柄与航模遥控的优先级判定；Balance_task 在每个 100 Hz 周期内完成控制模式分发，各路指令统一解算为三轴目标速度后进入运动学逆解与速度闭环。



(a) 阿克曼转向几何关系 (b) 转弯过程位姿与速度关系

图 6.16 控制器多车型运动学解算的几何基础：(a) 阿克曼转向几何；(b) 转弯过程位姿与速度关系

图 6.16a 为舵机转向车型的阿克曼转向几何：转向时四个车轮运动方向的垂线相交于同一转弯中心，四轮绕同一圆心旋转，前轮偏角与后轮差速需配合控制，否则前轮与地面摩擦力增大、加剧轮胎磨损；程序对转弯半径作最小限制，当目标速度要求的转弯半径 $|V_x/V_z|$ 小于最小转弯半径 $R_{\min}$ 时，将角速度修正为 $V_z = V_x/R_{\min}$。该几何关系是控制器多车型运动学解算库中舵机车型模型的基础，本装置为四轮麦轮全向底盘（mini_mec），实际运行按麦轮模型解算，舵机车型模型用于兼容其他车型。

图 6.16b 给出转弯过程中车体位姿与速度的关系：01 为转弯前位姿，02 为转过 θ 角后的位姿，车体以线速度 V_x 沿车头方向前进，同时以角速度 V_z 改变航向。设机器人

以 V_x、V_z 运动 t 秒，则圆弧长度 $s = V_x t$、姿态转角 $\theta = V_z t$，由圆的性质可得转弯半径 $R = s/\theta = V_x/V_z$；运动学解算按该关系把上位机下发的线速度与角速度分解到各车轮目标速度。

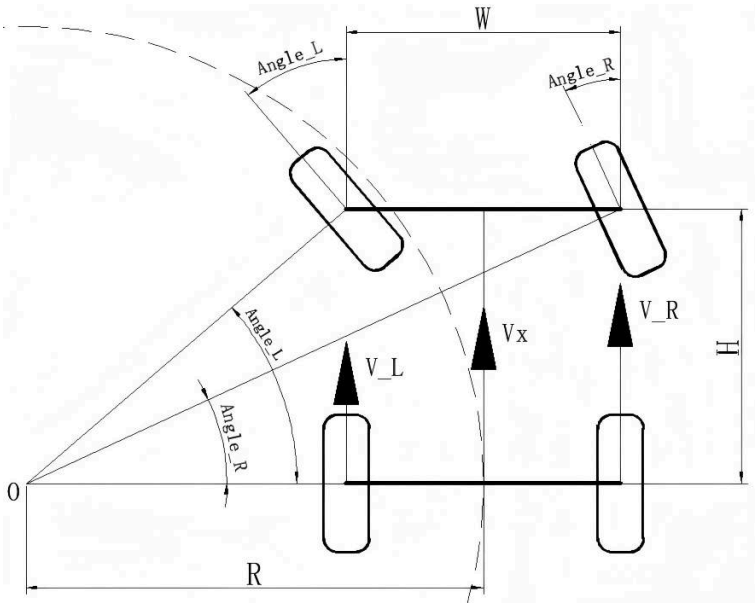
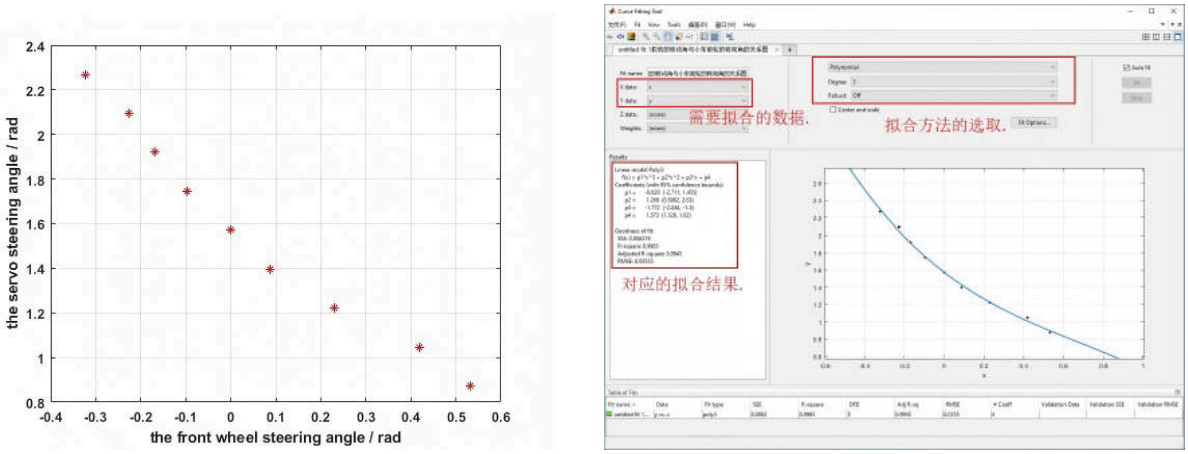


图 6.17　四轮转角与轮速分配关系（转向纯滚动条件）

图 6.17进一步给出四轮转角与轮速分配关系：设轮距为 W、轴距为 H，由转弯半径 R 可解出左右后轮速度 $V_L = V_x\,(R - 0.5W)/R$、$V_R = V_x\,(R + 0.5W)/R$，以及左右前轮偏角 $\angle_L = \tan^{-1}[H/(R - 0.5W)]$、$\angle_R = \tan^{-1}[H/(R + 0.5W)]$，并按各轮到转弯中心的距离分配内侧轮速与外侧轮速，保证转向过程中车轮纯滚动、不侧滑；其运动学正解为 $V_x = (V_L + V_R)/2$、$V_z = (V_R - V_L)/W$，可由轮速反馈估计车体线速度与角速度。



(a) 前轮转角与舵机转角标定数据　　(b) 前轮转角–舵机转角三次多项式拟合

图 6.18　前轮转角与舵机转角的实测标定与拟合补偿

图 6.18a 为前轮转角与舵机转角关系的实测标定数据：横轴为前轮目标转角（rad），

纵轴为对应舵机转角（rad），数据呈明显非线性下降趋势，说明舵机连杆机构存在非线性传动比；若按线性比例直接控制会产生较大转角误差，需按实测数据拟合补偿。图 6.18b 为 Curve Fitting Tool 对上述标定数据的拟合结果：采用三次多项式拟合 $f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$（$p_1 \approx -0.628$、$p_2 \approx 1.269$、$p_3 \approx -1.772$、$p_4 \approx 1.378$），$R^2 = 0.9965$、RMSE≈ 0.0355，拟合精度满足转角控制要求；拟合系数固化到固件中，运行时按前轮目标转角计算舵机输出。

数据融合过程中，主控端统一汇集编码器实测速度、MPU6050 姿态信息、电池电压以及经串行接口接入的各类感知传感器数据。编码器与 IMU 数据分别由 100 Hz 任务周期采集，经单位换算后进入控制运算；电池电压经 ADC 多次采样取平均后用于低压保护；姿态信息用于行驶方向纠偏，行驶状态与气体采样时机关联，视觉与激光雷达信息为裂缝检测与障碍感知提供输入，控制决策不再依赖单一信号。

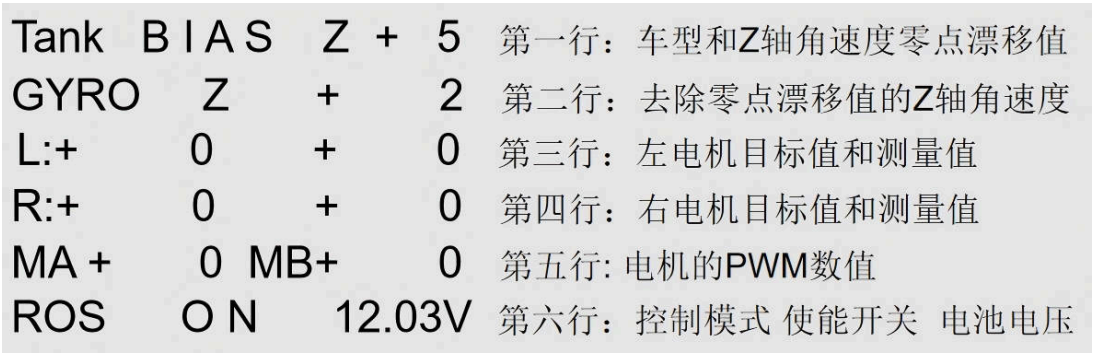


图 6.19 主控 OLED 状态显示屏信息（车型、角速度零漂、目标/实测速度、PWM、控制模式与电池电压）

图 6.19为主控 OLED 状态显示屏的实际显示内容：第一行显示车型与 Z 轴角速度零点漂移值（BIAS），第二行为去除零点漂移后的 Z 轴角速度，第三、四行分别为左、右电机的目标值与测量值，第五行为电机 PWM 数值，第六行显示控制模式（ROS ON）、使能开关与电池电压（12.03 V）。该界面把编码器、IMU 与电压等多源数据集中呈现，便于现场快速检查数据融合状态。

为保障多任务协同，主控系统按巡检任务组织控制指令：一类面向行走底盘，用于车速、转向和巡航修正；一类面向补光摄像与气体检测载荷，用于定点采样与裂缝拍摄；另一类面向报警与数据回传系统，用于超限报警和巡检数据上传。各功能既可独立工作，也可在统一时序下协同运行，兼顾模块调试、单项检测和全流程巡检需求。

6.6.1.3 感知层传感器配置与通信协议

矿井巷道环境参数具有“多来源、多量纲、时序异步”特点，单一传感器无法完整刻画环境状态，因此系统在现有“轮速＋姿态＋电量”底盘感知基础上，扩展一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO_2）、粉尘与温湿度四类环境感知要素。四类传感器均为市售标准工业级模块，接口形式归结为串行数字（UART/I2C）与模拟量（电压/脉宽）两类，主控侧无需新增专用外设，仅通过现有串口、I2C 与 ADC 通道即可完成接入，按巡检时序完成采集、标定与上传。

（1）数据的读取方式

针对不同类型的输出接口，主控采用差异化的读取时序：①串行数字型（如 CO、CO_2 浓度模块）：上位机按模块协议以指令帧格式发起查询（帧头、功能码、数据域、校验），模块应答后经帧头识别与校验（如 CRC 校验）解析浓度字段，读取周期与巡检进程自检节奏一致，避免对底盘 100 Hz 控制节拍产生冲击；② I2C 数字型（如温湿度传感器）：沿用现有板载 I2C 时序写入器件地址与读取寄存器组完成单次握手读，取得温湿度双组原始值；③模拟量型（如粉尘传感器）：采用定时器通道输出周期测量脉冲触发，同步经 ADC 采样端读取散射电平，再由标定回归公式换算为浓度值。为提高鲁棒性，各传感器原始值统一经“多点滑动平均＋限幅滤波”处理，剔除电机启停、振动引起的尖峰毛刺，并按各自标定系数归一化到规范量纲（气体 ppm、粉尘mg/m^3、温度°C、湿度%RH）；全部标定系数、量程边界以配置参数形式存入主控 Flash，可随车型/载荷配置在线更新，不写入死值，便于现场复标与更换模块。

（2）数据如何融合进系统 环境数据融入系统遵循“分级截流、按帧上行、联动处置”原则，与现有任务体系无缝衔接，具体融合机制见表 6.2。

运动底盘感知层传感器配置见表 6.3。MPU6050 经 I2C 接口以 100 Hz 读取三轴姿态、角速度与加速度，上电 10 秒内自动标定零点，运行中可单击用户按键更新零点，消除零点漂移；四路霍尔编码器通过定时器编码器接口采集原始脉冲，经“原始值 × 控制频率 × 轮周长/编码器精度”换算为车轮实时速度（m/s），按车型校正极性后进入速度闭环；ADC 采集电池电压（多次采样取平均）与电位器档位，电位器档位用于开机识别车型并初始化轮距、轴距、编码器精度等参数；气体传感器经预留 ADC 接口采集浓度信息，摄像头、激光雷达等感知数据经串行接口接入主控端，统一汇入 STM32。

感知数据通过串行通信上传至 STM32。主控配置 4 路串口：串口 2 连接蓝牙模块，与 APP 端双向通信，波特率 9600；串口 1、串口 3、串口 5 与上位机/ROS 端通信，波特

表 6.2 环境数据融合机制

融合环节	融合机制	具体实现	作用/效果
采集分流	独立低优先级采集任务	仅在巡检停留时段或定时窗位发起，数据写入全局环境变量结构体	避免与 Balance_task、data_task 争夺总线与 CPU 时间
上行链路	复用 24 字节状态帧	扩展数据域，将浓度、温湿度与电压、位姿同帧上传 ROS 端与 APP	与里程计同源同步，便于浓度—坐标绑定建档
报警联动	复用低压分级保护框架	一级阈值提示级：OLED/APP＋蜂鸣器预警；二级阈值危险级：软件失能标志位置位切断 PWM	与低压保护、急停开关同路径，实现双安全冗余
联合研判	ROS 端多源数据融合	温湿度温漂补偿，与激光雷达、视觉检测结果联合研判	形成位置—环境—结构三维安全评估记录

表 6.3 感知层传感器配置

传感器/接口	采集内容	控制用途
MPU6050（I2C）	三轴姿态、角速度、加速度	姿态反馈与零点漂移消除
霍尔编码器 ×4（TIM2/3/4/5）	车轮实时速度（m/s）	速度闭环反馈
ADC（电池电压采样）	电池电压	低压保护与状态回传
ADC（电位器档位）	车型识别档位	轮距/轴距等参数初始化
串行接口（预留）	摄像头、激光雷达等感知数据	裂缝检测与障碍感知输入
气体传感器（ADC）	可燃气体、CO 浓度	超限报警联动停车
补光灯（PWM 开关）	低照度巷道照明	黑暗环境成像补光

率 115200，其中串口 3 为默认 ROS 通信口；另配置 CAN 接口（1 M 波特率）用于外部控制扩展。串口参数统一为数据位 8、停止位 1、无校验位，通信双方波特率需保持一致。data_task 以 20 Hz 周期组帧，经串口 1/3/5 与 CAN 同步发送 24 字节状态帧（表 6.4），内容包括帧头帧尾、使能标志位、XYZ 三轴速度、三轴加速度、三轴角速度、电池电压及校验位，其中 2 字节（short 型）数据按高 8 位、低 8 位拆分为两个字节逐位发送。

表 6.4　串口状态帧格式

数据位	内容	说明
buffer[0]	帧头	固定 0x7B
buffer[1]	使能标志位	0 使能，1 失能
buffer[2]–buffer[7]	XYZ 三轴速度	各轴拆为高 8 位、低 8 位
buffer[8]–buffer[13]	三轴加速度	各轴拆为高 8 位、低 8 位
buffer[14]–buffer[19]	三轴角速度	各轴拆为高 8 位、低 8 位
buffer[20]–buffer[21]	电池电压	放大 1000 倍传输
buffer[22]	校验位	前 22 字节异或（BCC 校验）
buffer[23]	帧尾	固定 0x7D

数据内容	帧头	失能标志位	机器人X轴实时速度(单位：0.001 m/s)		机器人Y轴实时速度(单位：0.001 m/s)		机器人Z轴实时速度(单位：0.001 rad/s)		加速度计X轴加速度		加速度计Y轴加速度	
说明	固定值0X7B		高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位
占用字节	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

数据内容	加速度计Z轴加速度		角速度计X轴角速度		角速度计Y轴角速度		角速度计Z轴角速度		电池电压(单位：mv)		数据校验位	帧尾
说明	高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	异或位校验	固定值0X7D
占用字节	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

图 6.20　STM32 上行状态帧格式（厂家协议，与表 6.4逐字节对应）

图 6.20为厂家协议中 STM32 向上位机发送的状态帧格式：共 24 字节，依次为帧头 0x7B、失能标志位、机器人 X/Y/Z 三轴实时速度（各 2 字节，速度单位 0.001 m/s、角速度单位 0.001 rad/s）、加速度计三轴加速度、角速度计三轴角速度、电池电压（单位 mV）、数据校验位（异或校验）与帧尾 0x7D，与表 6.4所列状态帧一一对应，是 ROS 端解析里程计与 IMU 数据的依据。

1. **指令接收**：上位机下发 11 字节指令帧（帧头 0x7B、2 字节预留、三轴目标速度、校验位、帧尾 0x7D），异或校验通过后按 mm/s→m/s 完成单位换算，得到三轴目标

速度；开机 10 秒内不处理控制指令。

2. **控制模式**：支持串口 3（默认）、串口 1、串口 5、CAN、蓝牙 APP、PS2 手柄、航模遥控 7 种控制模式，串口/CAN 指令直接给定三轴目标速度，APP、PS2、航模指令经控制任务解算后统一进入运动学逆解。
3. **APP 通信**：串口 2 接收 APP 摇杆指令（0x41–0x48 八方向）、加减速指令（0x58/0x59，步进 ±100 mm/s）及调参帧（0x7B 起始、0x7D 停止，可在线调节速度、K_P、K_I 参数），突发情况下可紧急停机；作业数据经预留 4G 接口上传云端，形成“传感器—STM32—执行机构”现场控制链路和“STM32—APP/云端”人机交互链路。
4. **安全机制**：电池电压低于 10 V、使能开关关闭或软件失能标志位置位时 PWM 清零，禁止电机运动；上电 10 秒内电机强制失能，防止误动作，保障启动安全。

数据内容	帧头	预留位	预留位	机器人X轴目标速度(单位：0.001 m/s)		机器人Y轴目标速度(单位：0.001 m/s)		机器人Z轴目标速度(单位：0.001 rad/s)		数据校验位	帧尾
说明	固定值0X7B			高8位	低8位	高8位	低8位	高8位	低8位	异或位校验	固定值0X7D
占用字节	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

图 6.21　串口 1/3 速度控制命令通信协议（11 字节指令帧，厂家协议）

图 6.21为厂家的串口 1/3 接收速度控制命令通信协议：共 11 字节，依次为帧头 0x7B、2 字节预留位、机器人 X/Y/Z 三轴目标速度（各 2 字节，单位 0.001 m/s 或 0.001 rad/s）、数据校验位（异或校验）与帧尾 0x7D。上位机按该协议下发目标速度，STM32 解析后进入运动学逆解与 100 Hz 速度闭环。

表 1-7 小车接收串口控制指令

数据域	帧头	tx[0]	tx[1]	tx[2]	tx[3]	tx[4]	tx[5]	tx[6]	tx[7]	tx[8]	帧尾
内容	0X7B	预留位	预留位	小车X方向控制量高8位	小车X方向控制量低8位	小车Y方向控制量高8位	小车Y方向控制量低8位	小车Z方向控制量高8位	小车Z方向控制量低8位	BCC校验位	0X7D

图 6.22　小车接收串口控制指令数据域（指令帧逐字节定义）

图 6.22为小车接收串口控制指令的数据域划分：帧头 0x7B、预留位 tx[0] 与 tx[1]，

tx[2]–tx[7] 依次为 X/Y/Z 三轴控制量的高、低 8 位，tx[8] 为 BCC 校验位，末尾为帧尾 0x7D。该图与图 6.21互为补充，给出指令帧逐字节的数据域定义，STM32 按此顺序解析三轴速度。



图 6.23 数据校验位计算函数 Check_Sum（usart.c）

图 6.23为 usart.c 中的校验位计算函数 Check_Sum：函数以异或方式逐字节累加，Mode=1 时累加发送缓存 Send_Data.buffer，Mode=0 时累加接收缓存 Receive_Data.buffer，返回校验结果；发送时用于计算帧校验位，接收时用于逐帧校验比对，保证指令帧与状态帧在串口传输中的完整性。

```
usart2_send(0X7B); //帧头
usart2_send(0X00); //预留位
usart2_send(0X00); //预留位
usart2_send(0X01); //X轴速度高8位
usart2_send(0X10); //X轴速度低8位
usart2_send(0X00); //Y轴速度高8位
usart2_send(0X00); //Y轴速度低8位
usart2_send(0X00); //Z轴速度高8位
usart2_send(0X00); //Z轴速度低8位
usart2_send(0X6A); //BBC校验位
usart2_send(0X7D); //帧尾
```

图 6.24 11 字节指令帧发送示例（X 轴目标速度 272 mm/s）

图 6.24为 11 字节指令帧的发送示例：依次发送 0x7B 帧头、2 字节预留位、X 轴速度高/低 8 位（0x01、0x10，即 272 mm/s）、Y 轴与 Z 轴速度高/低 8 位、BCC 校验位 0x6A 与帧尾 0x7D，与图 6.21协议一致，是速度指令经串口下发 STM32 的典型数据帧。

6.6.2 分层双闭环运动控制系统

矿井巷道巡检要求机器人在狭窄黑暗的空间中行驶平稳、启停准确，并能够精确停靠在巡检点完成检测。如果将底盘控制与导航控制割裂，仅靠底层速度闭环无法消除定位累计误差，仅靠上层路径规划也无法保证速度指令被精确执行。为此，项目将底盘速度控制与上位机导航控制关联为速度与位姿双闭环（图 6.25）：内环由 STM32 控制板在 100 Hz 控制周期内实现电机速度闭环，稳定各轮实际转速，对外环速度指令实现快速、准确的跟踪；外环由树莓派 ROS 端的 move_base 导航框架实现位姿闭环，以激光雷达、里程计与 IMU 融合位姿为基础，依据规划路径与定位误差持续修正目标速度。内外环通过 11 字节目标速度指令帧与 24 字节状态帧（协议见表 6.4）衔接，形成“内环保证执行精度、外环修正定位与路径误差”的分层控制结构，使机器人在黑暗狭窄巷道中保持平稳行驶并准确停靠巡检点。

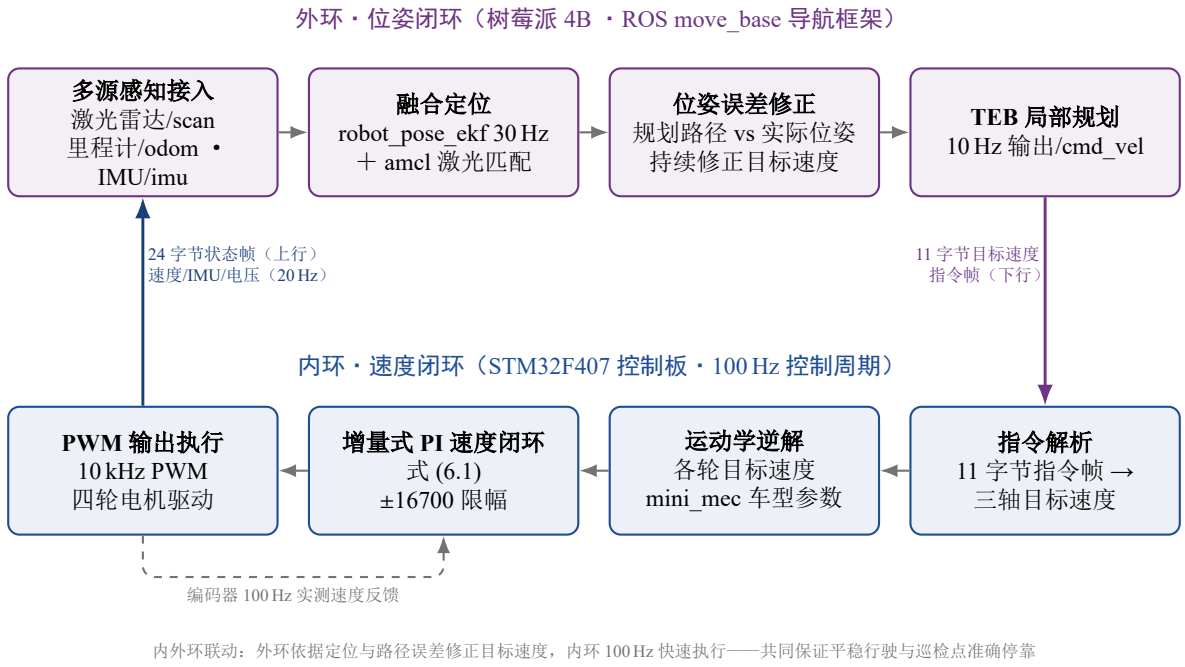


图 6.25 速度与位姿双闭环控制框图

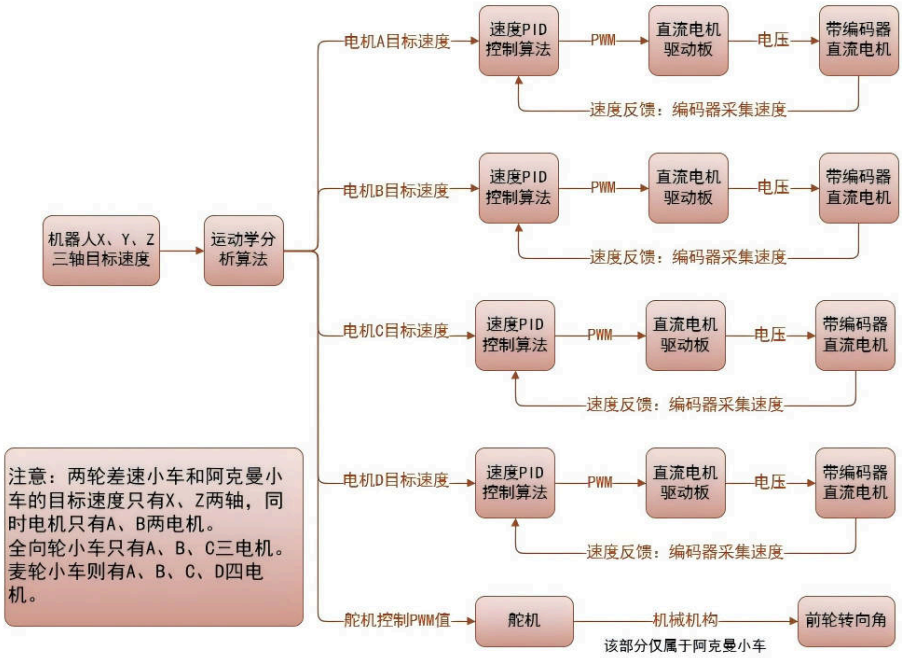
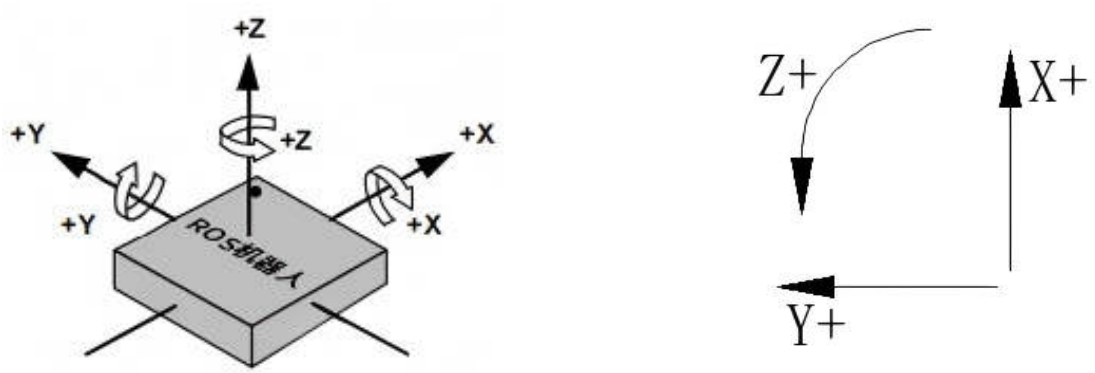


图 6.26　运动学分析与速度闭环总体链路（多车型逆解与单轮速度闭环）

图 6.26为运动学分析与速度闭环的总体链路：上位机或遥控器给出机器人 X、Y、Z 三轴目标速度，经运动学分析算法逆解为各电机目标速度——两轮差速与阿克曼车型仅有 X、Z 两轴、对应 A、B 两电机，全向轮车型为 A、B、C 三电机，麦轮车型为 A、B、C、D 四电机；阿克曼车型另有“舵机控制 PWM 值 → 舵机 → 机械机构 → 前轮转向角”支路；每个电机目标速度经速度 PID 控制算法输出 PWM，驱动直流电机并带动编码器，编码器采集速度作为反馈构成单轮速度闭环，即本节速度内环的整体结构。



(a) ROS 机器人坐标系定义　　(b) 车体三轴方向与旋转正方向

图 6.27　ROS 机器人坐标系定义与三轴旋转正方向约定

图 6.27a 为 ROS 机器人坐标系定义：以车体中心为原点，+X 指向车体前方、+Y 指向车体左方、+Z 指向上方，绕 X/Y/Z 轴的旋转分别为 roll、pitch 与 yaw。上位机下发的线速度 *x*/*y* 与角速度 *z* 均在该坐标系下描述，经运动学逆解后分配为四轮目标转速，速

度内环的跟踪控制也以该坐标系为准。图 6.27b 给出车体三轴方向与旋转正方向的关系：X 轴、Y 轴与 Z 轴满足右手定则，绕 Z 轴逆时针旋转为正方向。底盘状态帧上报的三轴角速度与/cmd_vel 下发的三轴目标速度使用同一方向约定，保证位姿外环下发的指令与底盘实际运动方向一一对应，避免方向相反导致的闭环发散。

6.6.2.1　电机速度闭环与导航位姿闭环

（1）速度内环：STM32 100 Hz 增量式 PI 闭环

速度内环是外环执行的基础，运行于6.6.1.2节所述的 Balance_task（100 Hz），主要环节包括：编码器测速（定时器编码器接口采集原始脉冲，按“原始值 × 控制频率 × 轮周长/编码器精度”换算为车轮实时速度，按车型校正极性；本装置为四轮麦轮全向底盘，对应 mini_mec 车型参数）、多路轮速采集与单位换算、增量式 PI 控制器与 PWM 输出。控制律同式 (6.1)，默认 $K_P = K_I = 300$，输出经 ±16700 限幅后写入 PWM 定时器寄存器（PWM 频率 10 kHz），使车轮实际速度快速跟随目标速度，速度环参数可经蓝牙 APP 在线调整并掉电保存。该闭环的控制效果直接决定外环轨迹跟踪精度：速度指令响应时间越短、稳态误差越小，导航终点停靠与避障路径跟踪越准确。

（2）位姿外环：树莓派 ROS 端定位与规划闭环　位姿外环运行于树莓派 4B（Ubuntu 18.04、ROS Melodic），由 turn_on_wheeltec_robot 功能包与 navigation 框架共同实现，分“感知接入—滤波定位—定位修正—路径规划”四个环节。

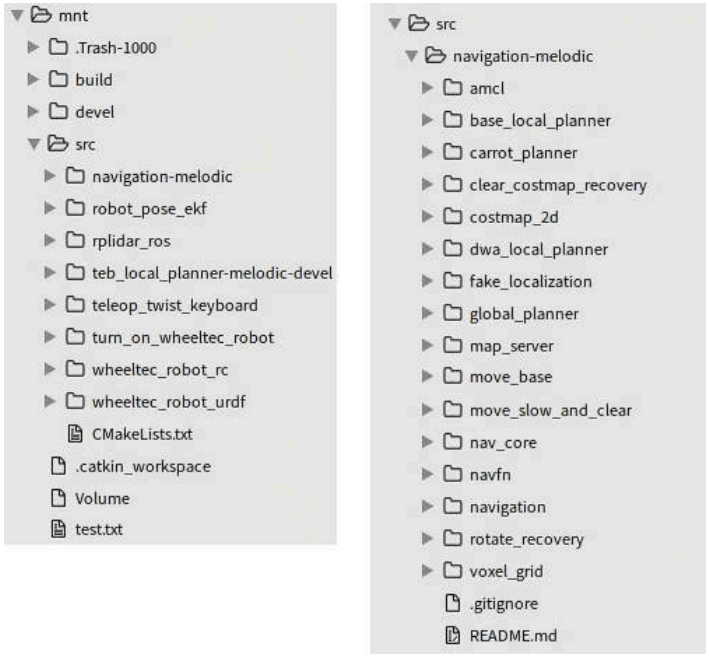


图 6.28　ROS 端功能包组成（左）与 navigation 导航框架内部结构（右）

图 6.28为 ROS 端工作空间 src 目录下的功能包组成与 navigation 导航框架结构：左图列出工作空间功能包，turn_on_wheeltec_robot 负责底盘串口通信与状态发布，robot_pose_ekf 提供里程计与 IMU 融合定位，navigation-melodic 与 teb_local_planner-melodic-devel 构成路径规划与局部规划框架，rplidar_ros 为激光雷达驱动，teleop_twist_keyboard、wheeltec_robot_rc 与 wheeltec_robot_urdf 分别提供键盘遥控、遥控器控制与 URDF 模型；右图为 navigation-melodic 内部结构，move_base 作为导航调度核心，amcl 与 map_server 分别承担蒙特卡洛定位与静态地图加载，global_planner 与 navfn 提供全局路径规划，costmap_2d、voxel_grid 及 clear_costmap_recovery、rotate_recovery 等构成代价地图与恢复行为模块。上述功能包经 catkin 编译后由 launch 文件统一组织，对应位姿外环“感知接入—滤波定位—定位修正—路径规划”四个环节，并构成6.6.3.2节导航配置的软件基础。



图 6.29 感知接入与状态发布流程（环节 1：底盘 24 字节状态帧经串口上行、逐帧校验、单位换算后发布 ROS 话题）

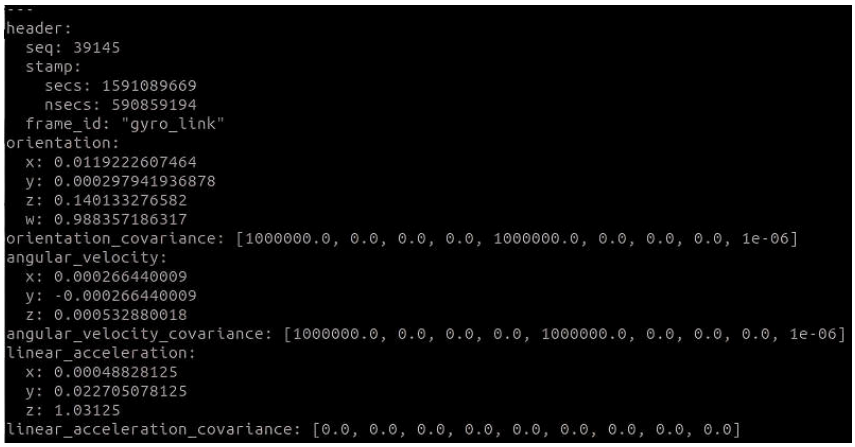


图 6.30 IMU 信息（rostopic echo /imu 输出的姿态、角速度与加速度）

环节 1 感知接入与状态发布：turn_on_wheeltec_robot.launch 根启动 base_serial.launch，其中节点可执行文件为 wheeltec_robot_node、运行时节点名 wheeltec_robot，通过 USB 串口/dev/wheeltec_controller（波特率 115200，经 udev 规则固定串口号）与 STM32 通信。wheeltec_robot.cpp 内采用“逐字节接收＋帧头 0x7B 定位＋帧尾 0x7D 校验＋前 22 字节 BCC 异或校验”的逐帧校验方式，校验出错时记录错位位置实现数据重同步；校验通过后解析三轴速度（Odom_Trans 按 mm/s→m/s 换算）、IMU 三轴加速度（量程 ±2 g，按 19.6 m/s^{2}换算）、三轴角速度（量程 ±500°/s 换算）与电池电压（mV→V）。其中 Z 轴角速度默认取编码器推算值，源码中可切换为 MPU6050 陀螺仪 z 轴数据（编码器高速时可能打滑、陀螺仪静止时存在零点漂移，按导航精度要求选用）。随后按“速度 × 时间间隔”积分得到位移，并用四元数表示航向，分别以约 20 Hz 发布/odom（frame_id=odom_combined、child_frame_id=base_footprint）与/imu（frame_id=gyro_link），/PowerVoltage 每约 11 帧发布一次（约 2 Hz）。里程计与 IMU 协方差矩阵按车速自动切换：速度为零时认定编码器更可靠，运动时认定 IMU 更可靠，为扩展卡尔曼滤波提供加权依据。STM32 以 20 Hz 将三轴速度、IMU 与电压封装为 24 字节状态帧经串口上传，wheeltec_robot 节点逐帧校验并完成单位换算后，积分得到里程计、解算四元数姿态，以 20 Hz 发布/odom、/imu 与约 2 Hz 的/PowerVoltage，完成“底盘感知数据上行—ROS 状态发布”的感知接入（图 6.29、图 6.30）。

```
<launch>
  <!--打开节点wheeltec_robot，初始化串口等操作-->
  <node pkg="turn_on_wheeltec_robot" type="wheeltec_robot_node" name="wheeltec_robot" output="screen">
    <param name="usart_port_name"    type="string" value="/dev/wheeltec_controller"/>
    <param name="serial_baud_rate"   type="int"    value="115200"/>
    <param name="robot_frame_id"     type="string" value="base_footprint"/>
    <param name="smoother_cmd_vel"   type="string" value="smoother_cmd_vel"/>
    <param name="product_number"   type="int"    value="0"/>
  </node>
</launch>
```

图 6.31　wheeltec_robot 节点启动参数配置（turn_on_wheeltec_robot.launch）

图 6.31为 turn_on_wheeltec_robot.launch 中 wheeltec_robot 节点的启动参数：串口设备指定为/dev/wheeltec_controller（由 udev 规则固定），波特率 115200，机器人坐标系设为 base_footprint，速度指令经 smoother_cmd_vel 平滑后输入。该配置与本环节所述“逐字节接收＋帧头 0x7B ＋帧尾 0x7D ＋ BCC 校验”的串口协议一一对应，是底盘与 ROS 端建立通信的入口。

```
passonl@passonl:~$ rosnode info /wheeltec_robot
--------------------------------------------------
Node [/wheeltec_robot]
Publications:
 * /PowerVoltage [std_msgs/Float32]
 * /mobile_base/sensors/imu_data [sensor_msgs/Imu]
 * /odom [nav_msgs/Odometry]
 * /rosout [rosgraph_msgs/Log]
 * /tf [tf2_msgs/TFMessage]

Subscriptions:
 * /amcl_pose [unknown type]
 * /smoother_cmd_vel [geometry_msgs/Twist]

Services:
 * /wheeltec_robot/get_loggers
 * /wheeltec_robot/set_logger_level
```

图 6.32　wheeltec_robot 节点发布与订阅关系（rosnode info）

用 rosnode info 命令查询 wheeltec_robot 节点的运行信息（图 6.32）：节点发布/odom、/mobile_base/sensors/imu_data（对应/imu）、/PowerVoltage 与/tf，订阅/amcl_pose 与/smoother_cmd_vel。可见底盘节点既向上提供定位与姿态状态，又接收规划速度指令，是内外环数据交汇的枢纽，与表 6.5所列节点话题一致。

环节 2 静态坐标与 TF 树：robot_model_visualization.launch 按 mini_mec 车型启动 URDF（mini_mec_robot.urdf，由 joint_state_publisher 与 robot_state_publisher 发布轮系坐标），并以 static_transform_publisher 周期发布静态变换：激光雷达安装于车体前部（$x = 0.06\,\text{m}$、$z = 0.20\,\text{m}$，绕 Z 轴旋转 180° 安装），base_footprint→laser 变换以 100 ms 周期发布；base_link、gyro_link 与 base_footprint 原点重合，相机变换 $x = 0.12\,\text{m}$、$z = 0.15\,\text{m}$，构成包含车轮、雷达与 IMU 的完整 TF 树。**总结：**URDF 描述车体与轮系几何，静态坐

标给定雷达、相机、IMU 的安装位姿，使底盘上报数据与各传感器帧坐标对齐，配合 20 Hz 的 odom_combined→base_footprint 变换，构成机器人完整的 TF 坐标树（图 6.33、图 6.34）。

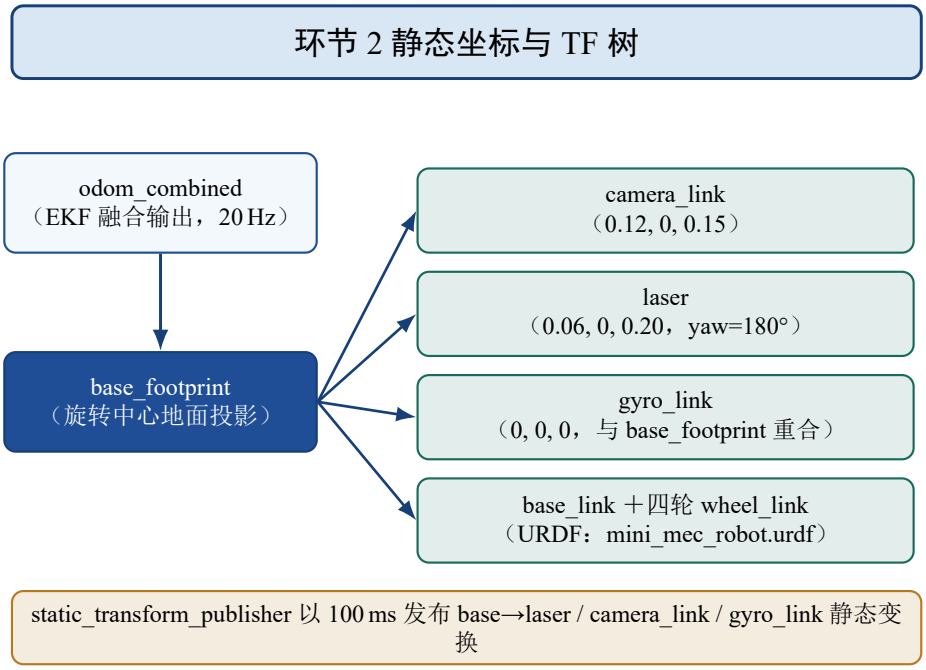


图 6.33　静态坐标与 TF 树结构（环节 2：base_footprint 至雷达、相机、IMU 及 URDF 轮系的静态变换关系）

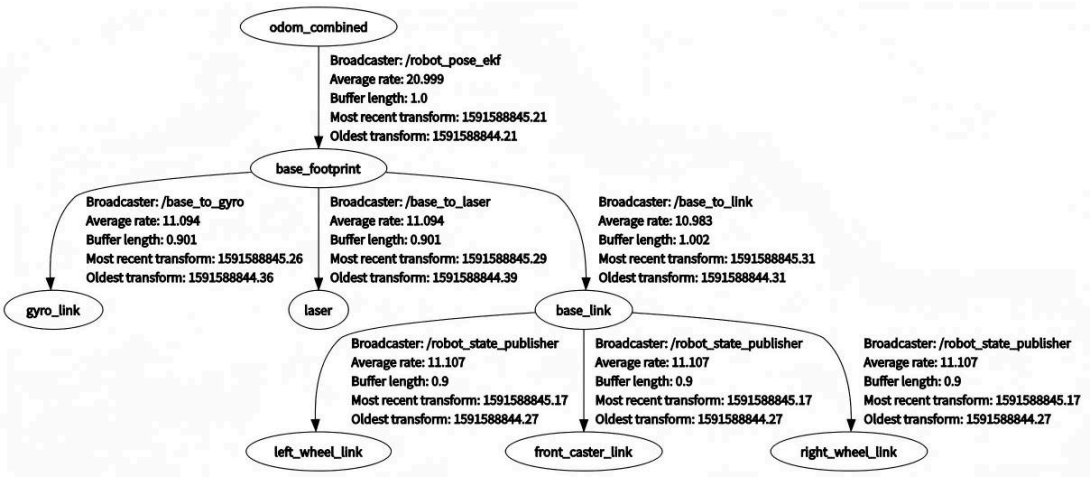


图 6.34　机器人 TF 坐标树运行实例（rqt_tf_tree：由 robot_pose_ekf、静态变换发布器与 robot_state_publisher 共同构成）

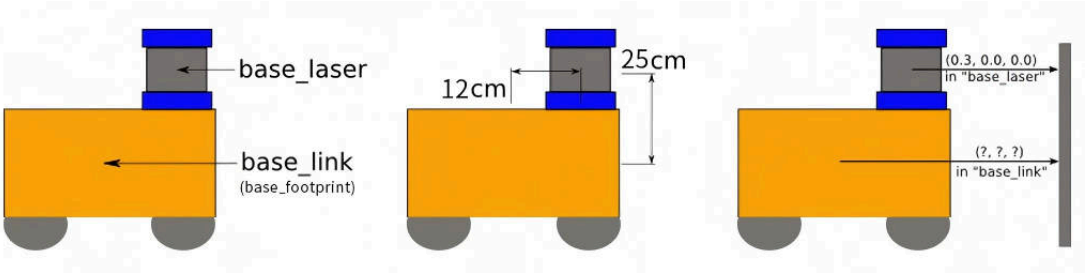


图 6.35　车体坐标系与静态 TF 变换的几何含义（base_laser 平移与旋转）

图 6.35以车体侧视关系说明静态变换的几何含义：base_laser 相对车体坐标系（base_link/base_footprint）的变换由平移量与姿态旋转两部分组成，平移量对应雷达安装到车体旋转中心的前后、左右与高度距离，旋转量用于补偿雷达安装朝向；本装置按实际安装取 $x = 0.06\,\mathrm{m}$、$z = 0.20\,\mathrm{m}$ 并绕 Z 轴旋转 180°，标定结果固化在 launch 文件的 static_transform_publisher 参数中，无需每次启动重新测量。

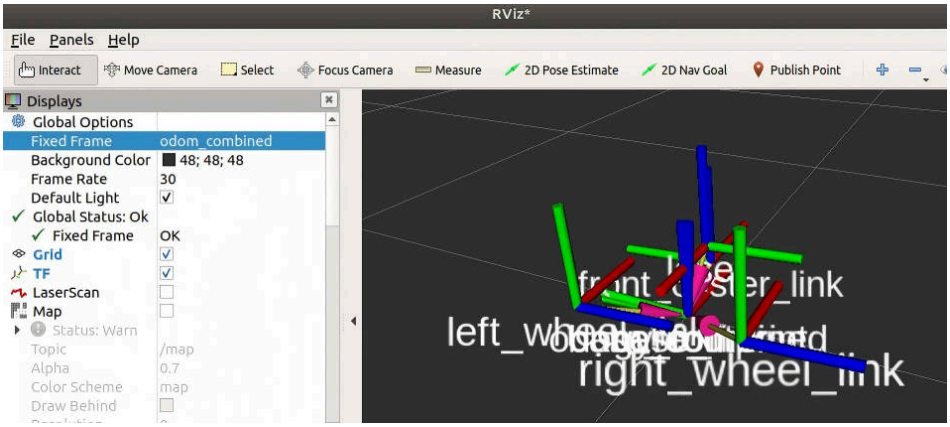


图 6.36　TF 坐标树运行实例（rviz：车体、轮系与传感器坐标系朝向）

由图 6.36可见，固定坐标系取 odom_combined 后，rviz 中可同时查看 base_link、gyro_link 以及 left_wheel_link、right_wheel_link、front_left_wheel_link 等轮系坐标轴的朝向与连接关系。各坐标轴方向与相对位置正确，表明 URDF 关节坐标与静态变换已随系统正常发布，里程计积分结果与各传感器数据帧能够对齐到同一 TF 树，为后续滤波定位与局部代价地图构建提供坐标校验依据。

环节 3 滤波定位：robot_pose_ekf.launch 启用官方 robot_pose_ekf 节点，频率 30 Hz，输入里程计与 IMU（odom_used=true、imu_used=true、vo_used=false，内部映射 imu_data→imu），输出 TF 变换 odom_combined→base_footprint，实现编码器漂移的修正与姿态平滑；amcl 再以激光扫描匹配修正 map→odom_combined（详见6.6.3.2节），形成两条 TF 链分层修正的定位结构。robot_pose_ekf 以 30 Hz 融合里程计与 IMU 保证短

时定位连续平滑，amcl 以激光扫描匹配静态地图补偿长时间运行的累计误差，两条 TF 链层叠为 map→odom_combined→base_footprint 的完整定位链（图 6.37）。

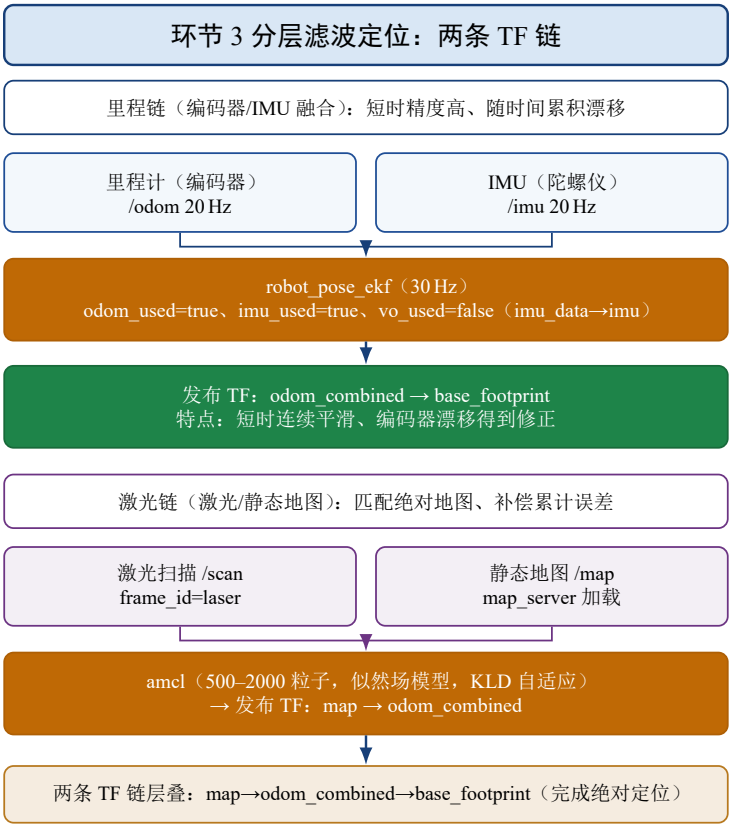


图 6.37　分层滤波定位 TF 链结构（环节 3：里程链 robot_pose_ekf 修正短时漂移，激光链 amcl 补偿累计误差）

环节 4 路径规划与指令下发：move_base 以 TEB 局部规划器（麦轮车型默认）在速度空间优化轨迹，以 10 Hz 发布/cmd_vel；wheeltec_robot 节点订阅/cmd_vel，在 Cmd_Vel_Callback 中将线速度 x/y、角速度 z 乘以 1000 后拆分为高 8 位、低 8 位，组装 11 字节目标速度指令帧（帧头 0x7B、2 字节预留、三轴目标速度、BCC 校验位、帧尾 0x7D）经串口下发 STM32，STM32 按表 6.4协议解析后进入运动学逆解与速度闭环。ROS 核心节点与话题见表 6.5，节点整体关系见图 6.41，指令下发链路见图 6.38，相关导航参数文件见图 6.40。目标位姿经 move_base 全局/局部规划转换为/cmd_vel 速度指令，wheeltec_robot 按协议编码为 11 字节指令帧经串口下发，STM32 解析后完成运动学逆解与 100 Hz 速度闭环直至电机 PWM 输出，构成“目标点—规划—指令—执行”的下行控制链路。



图 6.38　导航指令下发链路（环节 4：目标点 →move_base 规划 →/cmd_vel→11 字节指令帧 →STM32 速度闭环）

```
/**************************************
Date: January 28, 2021
Function: The speed topic subscription Callback function, according to the su
功能：速度话题订阅回调函数Callback，根据订阅的指令通过串口发指令控制下位机
**************************************/
void turn_on_robot::Cmd_Vel_Callback(const geometry_msgs::Twist &twist_aux)
{
  short  transition;  //intermediate variable //中间变量

  Send_Data.tx[0]=FRAME_HEADER; //frame head 0x7B //帧头0X7B
  Send_Data.tx[1] = 0; //set aside //预留位
  Send_Data.tx[2] = 0; //set aside //预留位

  //The target velocity of the X-axis of the robot
  //机器人x轴的目标线速度
  transition=0;
  transition = twist_aux.linear.x*1000; //将浮点数放大一千倍，简化传输
  Send_Data.tx[4] = transition;      //取数据的低8位
  Send_Data.tx[3] = transition>>8;  //取数据的高8位

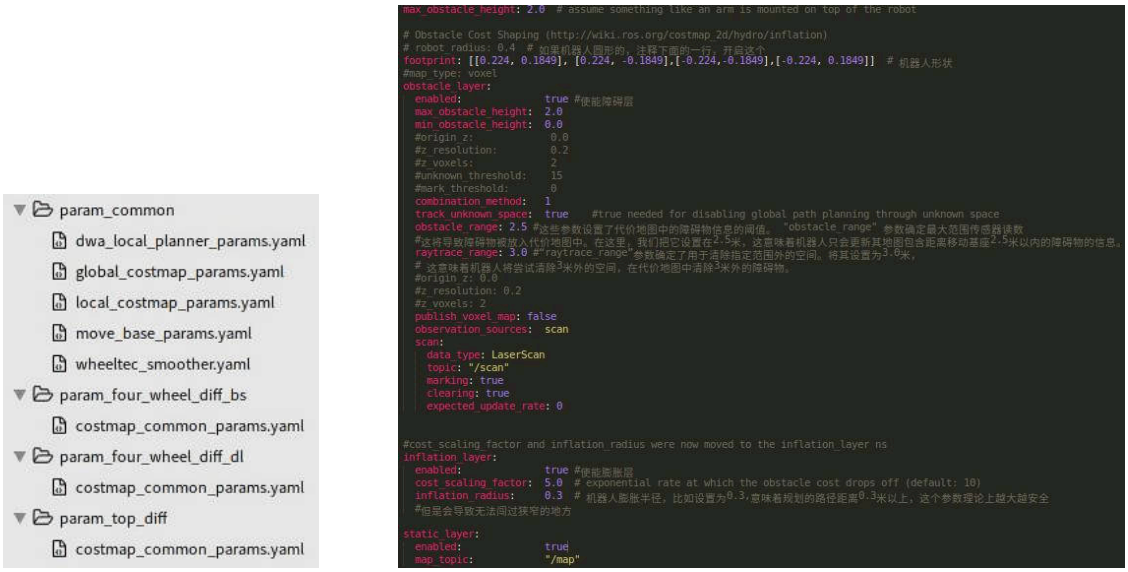
  //The target linear velocity of the robot on the Y-axis.Only wheat-wheel an
  //机器人y轴的目标线速度。只有麦轮、全向轮小车才可以直接进行y轴移动
  transition=0;
  transition = twist_aux.linear.y*1000;
  Send_Data.tx[6] = transition;
  Send_Data.tx[5] = transition>>8;

  //The target angular velocity of the robot's Z axis
  //机器人z轴的目标角速度
  transition=0;
  transition = twist_aux.angular.z*1000;
  Send_Data.tx[8] = transition;
  Send_Data.tx[7] = transition>>8;

  Send_Data.tx[9]=Check_Sum(9,SEND_DATA_CHECK); //For the BBC check bits, see
  Send_Data.tx[10]=FRAME_TAIL; //frame tail 0x7D //帧尾0X7D
  try
  {
    Stm32_Serial.write(Send_Data.tx,sizeof (Send_Data.tx)); //Sends data to t
  }
  catch (serial::IOException& e)
  {
    ROS_ERROR_STREAM("Unable to send data through serial port"); //If sending
  }
}
```

图 6.39　Cmd_Vel_Callback 回调函数：11 字节指令帧组装与串口下发

图 6.39为 wheeltec_robot.cpp 中 Cmd_Vel_Callback 的实现：线速度 *x*/*y* 与角速度 *z* 分别乘以 1000 后拆分为高 8 位与低 8 位，依次填入帧头 0x7B、2 字节预留、三轴目标速度、BCC 校验位与帧尾 0x7D，组成 11 字节指令帧后经串口下发，异常时通过 ROS_ERROR_STREAM 记录串口错误。该函数即表 6.4指令帧协议在 ROS 端的实现。



(a) 导航参数文件目录 (b) 代价地图参数配置示例

图 6.40 导航参数文件组织与代价地图配置示例：(a) param_common 等导航参数文件目录；(b) costmap_common_params.yaml 中障碍层、膨胀层与静态层参数

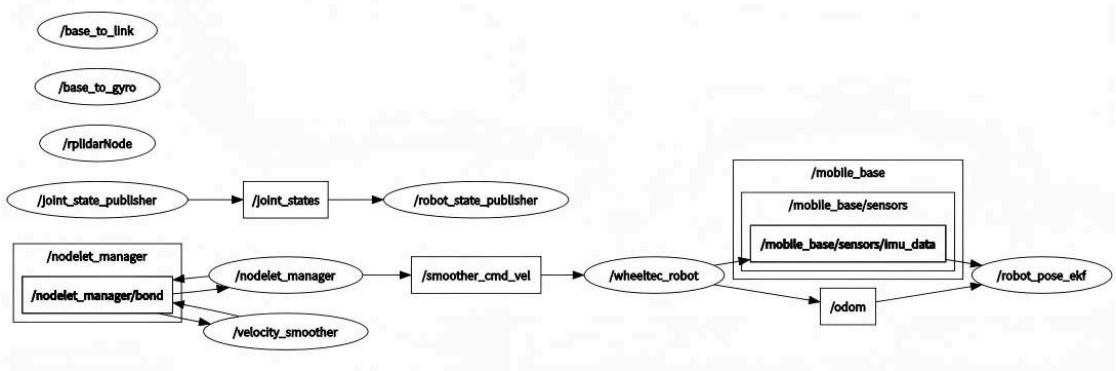


图 6.41 ROS 核心节点与话题计算图（rqt_graph）

图 6.41为 rqt_graph 绘制的节点—话题计算图：joint_state_publisher 经/joint_states 汇入 robot_state_publisher，nodelet_manager 与 velocity_smoother 输出/smoother_cmd_vel 至 wheeltec_robot，wheeltec_robot 发布/odom 与 IMU 数据供 robot_pose_ekf 融合，rplidarNode 与静态变换帧 base_to_link、base_to_gyro 共同接入 TF 体系。该图与表 6.5对应，直观呈现位姿外环各节点的数据依赖关系。

（3）内外环联动与验证

表 6.5 ROS 核心节点与话题

节点	话题/变换（消息类型）	频率	作用
wheeltec_robot	发布/odom（nav_msgs/Odometry）	约 20 Hz	三轴速度积分得里程计位移与航向四元数
wheeltec_robot	发布/imu（sensor_msgs/Imu）	约 20 Hz	三轴角速度、加速度与四元数姿态
wheeltec_robot	发布/PowerVoltage（std_msgs/Float32）	约 2 Hz	电池电压监控
wheeltec_robot	订阅/cmd_vel（geometry_msgs/Twist）	—	目标速度组装 11 字节指令帧下发 STM32
robot_pose_ekf	发布 odom_combined→base_footprint（TF）	30 Hz	里程计＋ IMU 扩展卡尔曼滤波融合定位
amcl	发布 map→odom_combined（TF）	约 10 Hz	蒙特卡洛定位误差补偿（详见6.6.3.2节）
move_base	订阅/move_base_simple/goal，发布/cmd_vel	—	全局与局部路径规划
lslidar_driver_node	发布/scan（sensor_msgs/LaserScan）	—	激光雷达测距数据（frame_id=laser）
map_server	发布/map（nav_msgs/OccupancyGrid）	—	加载静态地图
send_mark	发布/move_base_simple/goal、/path_point（MarkerArray）	—	多点巡航目标点序列与序号标记

两个闭环并非孤立工作：内环保证上位机速度指令被快速、准确地执行，外环在此基础上依据定位与路径误差修正目标速度；当巷道内出现障碍物或定位偏差增大时，外环及时调整目标速度，内环同步响应执行，使机器人平稳避障并回到规划路径。该机制直接对应“速度＋位姿双闭环控制系统”。按现有测试资料，样机已在模拟巷道地图中按规划路径平稳行驶，并按 TEB 设定容差（xy_goal_tolerance=0.2 m、yaw_goal_tolerance=0.1 rad）准确停靠，说明该双闭环链路在现有样机上工作正常。

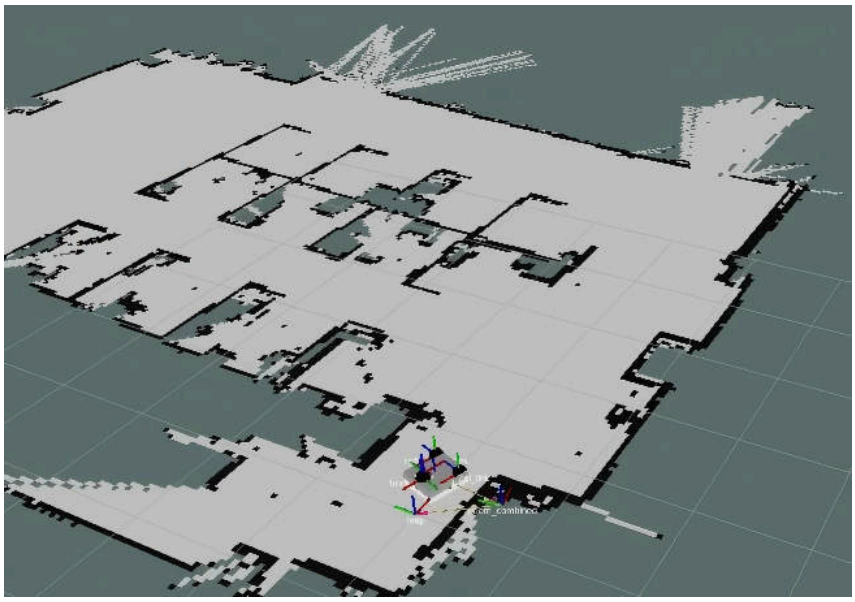


图 6.42 模拟巷道地图导航运行实例（rviz：栅格地图、局部代价地图与机器人位姿）

图 6.42为样机在模拟巷道地图中的导航运行实例：rviz 中可见已构建的巷道栅格地图、叠加的局部代价地图与机器人位姿，说明样机能够按规划路径在巷道地图中平稳行驶并按容差停靠。该实例对应上述“内外环联动与验证”的测试结果，即内环跟踪速度指令、外环修正定位与路径误差的双闭环链路在现有样机上工作正常。

6.6.2.2 巡检任务时序协同调度策略

（1）双层调度中心与任务链

巡检作业的关键不只是将各检测模块安装在同一车体上，还须保证巡航、采样与数据回传按巡检流程准确衔接。系统以 STM32 为底盘调度中心（任务划分见6.6.1.2节）、树莓派为导航与检测任务调度中心，将单次巡检组织为“行驶转场 → 停稳 → 定点气体采样 → 裂缝拍照 → 数据回传 → 下一巡检点”的连续任务链；建图与巡航两种作业模式由 mapping.launch 与 navigation.launch 统一切换。

（2）任务链时序

行驶转场：send_mark（多点巡航）或 rviz 的 2D Nav Goal 向 move_base 下发目标，move_base 规划并控制机器人沿全局路径行驶；逐点停靠：move_base 检测达到到达容差（$xy \le 0.2$ m、$yaw \le 0.1$ rad）后输出零速指令（Goal reached），底盘 20 Hz 状态帧显示速度收敛为零；定点采样与拍照：停稳后按时序启动气体采样（串行查询＋帧校验）与补光拍照（补光灯 PWM 开启、usb_cam 采集），与行走动作在时间上错开，避免冲击 100 Hz 控制节拍；数据回传：汇总气体浓度、裂缝定位与位姿信息，经预留 4G 接口上

传地面监控端；转场下一巡检点：send_mark 到达一个目标点后自动发布下一目标，全部完成后循环首点，实现巷道往返连续巡检。各阶段完成判据见表 6.6。

表 6.6 巡检任务链时序（停靠段）

阶段	进入条件	执行内容	完成判据
停稳	move_base 判定到达	目标速度置零并保持位置	底盘状态帧速度连续趋零
气体采样	停稳确认	气体模块串行查询、校验解析并标定	采样帧校验通过
裂缝拍照	采样完成	开启补光 → 摄像头采集 → 裂缝识别 → 地图标记	图像处理完成、标记发布
数据回传	拍照完成	ROS 端汇总打包，经 4G 接口上传	上传确认
转场	回传完成	send_mark 发布下一目标并继续巡航	重新进入行驶转场

（3）独立协同与安全保障 各模块支持独立与协同两种工作方式：独立模式便于分项测试、维护与单项检测；协同模式用于全流程巡检。安全上设置多重约束：APP/遥控急停与紧急停机入口（见6.5节与第八章）、STM32 侧失能保护（电压、使能开关、软件失能任一触发即 PWM 清零，见6.6.1.3节），以及巡检载荷与时序严格的联动保护。现有测试资料显示，样机已分别完成预定轨迹行驶、自动巡航、气体采集与图像回传等功能测试，主要功能模块具备进入统一时序调度的功能基础；跨模块的全流程自动巡检时序仍须结合实景巷道整定并验证。

6.6.3 矿井巷道自主导航与建图技术

矿井巷道为封闭、黑暗、无卫星定位的环境，视觉导航受光照条件限制，单独依靠视觉或 GPS 难以实现自主定位。项目采用“激光雷达＋ IMU/里程计”方案：激光雷达不受光照影响，可在黑暗巷道中稳定测距；以 STM32 底盘提供的编码器里程计与 IMU 数据作为位姿先验（见6.6.2节），结合激光雷达 SLAM 建图与 ROS navigation 导航框架，实现巷道地图构建、自主导航与多点巡航。地图采用手动遥控方式快速搭建，模拟矿山巷道环境，满足赛事演示与测试需求。

6.6.3.1 激光雷达 SLAM 建图与地图构建

（1）启动链与雷达接入

建图由 mapping.launch 统一启动，其内部按 mapping_mode 参数（默认 gmapping，可选 hector、karto、cartographer）选择建图算法，并依次启动 wheeltec_lidar.launch（雷达驱动）、algorithm_xxx.launch（SLAM 算法）与 turn_on_wheeltec_robot.launch（底盘通信＋滤波定位节点，见6.6.2.1节），同时附带 world_canvas_msgs 的 save 节点，支持 APP 端一键保存地图。

雷达驱动由 wheeltec_lidar.launch 按 rplidar_mode 参数选择（默认 ls_M10P_uart，即镭神 M10P 串口雷达，本装置标配；可切换 N10、LD14、LD19、思岚 A1/A2/A3/S1 等串口或网口型号），统一经 lslidar_driver_node 驱动节点发布/scan（sensor_msgs/LaserScan，frame_id=laser，最小/最大测距 0.15 m/100 m），并支持对车体遮挡角度段进行屏蔽（默认屏蔽 120°–240° 区域），保证输出数据与底座方位一致。

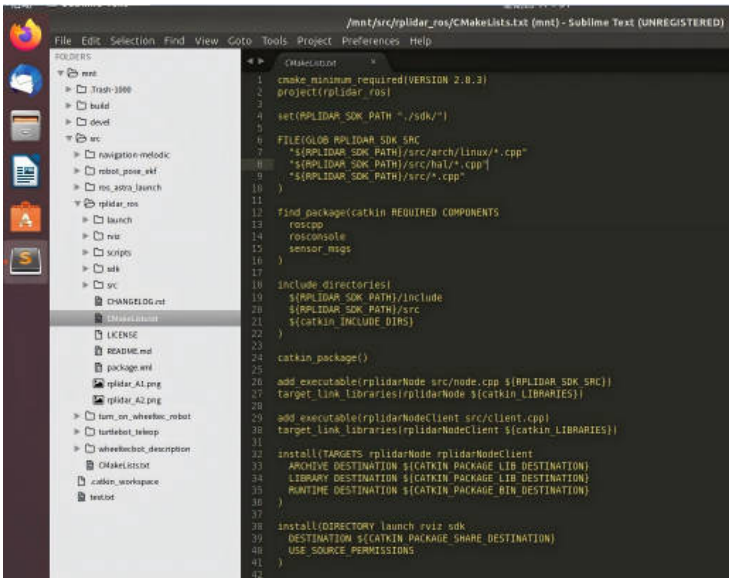


图 6.43 雷达驱动功能包 rplidar_ros 的 CMakeLists.txt 编译配置

图 6.43为雷达驱动功能包 rplidar_ros 的 CMakeLists.txt 编译配置：工程以 catkin 构建，通过 RPLIDAR SDK 路径组织源码，生成 rplidarNode 与 rplidarNodeClient 两个可执行节点，并安装 launch、rviz 与 sdk 目录。该配置对应本节雷达驱动接入环节，编译后由 wheeltec_lidar.launch 统一启动并发布/scan 话题。

（2）SLAM 算法方案

gmapping 为基于粒子滤波的二维 SLAM 算法，也是当前最常用、最成熟的开源建图方案：在小场景构建中，相比 hector SLAM 对激光雷达频率要求更低、鲁棒性更高；相比

cartographer 无需较多粒子且没有回环检测，计算量更小而精度接近；关键在于它是有效利用里程计信息作为位姿先验的滤波 SLAM，这与本装置“STM32 底盘数据作为导航先验”的设计完全一致。gmapping 关键参数：粒子数 8、线性/角度更新阈值 0.02 m/0.02 rad、地图更新间隔 0.01 s、有效测距上限 maxUrange=9.0 m、栅格分辨率 delta=0.05 m、重采样阈值 0.25，建图范围 (−5–5) m×(−4–4) m，与巷道中小尺度场景匹配。

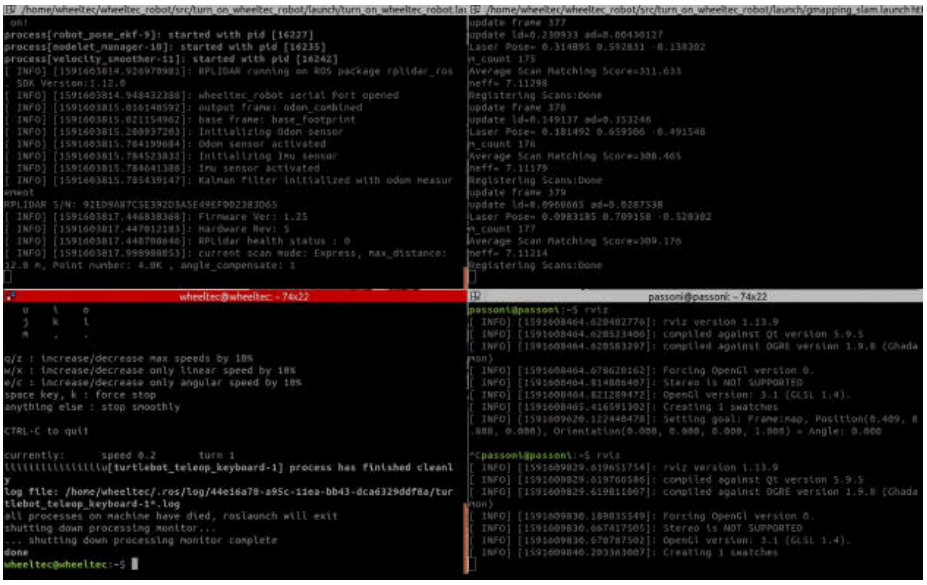


图 6.44　gmapping 建图运行日志（里程计、IMU 与激光数据正常汇入）

图 6.44为建图运行时的终端日志：robot_pose_ekf、nodelet_manager、velocity_smoother 与 rplidar 驱动依次启动，雷达以 Express 模式扫描（量程 12 m）；gmapping 逐帧输出 Laser Pose、采样数量与 Average Scan Matching Score，并显示 Registering Scans: Done。日志表明里程计、IMU 与激光数据正常汇入 SLAM 节点，粒子滤波匹配过程稳定，与上述 gmapping 参数配置相对应。

作为备选方案：hector 不使用里程计信息（适用于地面不平整场景），但快速转向时易产生错误的匹配；karto 建图原理与 gmapping 相近、同样依赖里程计，低速建图效果略优，分辨率 0.025 m；cartographer 具备回环检测、可用于手持雷达场景，但计算量最大，使用时应以 is_cartographer=true 关闭 robot_pose_ekf。四种算法由 mapping.launch 统一封装，可按巷道尺度与地形条件灵活切换（表 6.7）。

（3）建图操作与地图保存

建图采用手动遥控方式：启动 mapping.launch 后，通过键盘（keyboard_teleop.launch，turtlebot_teleop_key.py 发布/cmd_vel）或 APP 遥控机器人沿巷道行驶，激光雷达实时扫描巷道壁面轮廓，rviz 实时显示建图过程（rviz 运行于虚拟机端，经多机通信访问树莓

表 6.7 SLAM 建图算法对比

算法	依赖条件	关键参数	特点/适用	本装置
gmapping	里程计＋IMU	粒子 8、更新阈值 0.02 m/0.02 rad、栅格 0.05 m、测距 9 m	对雷达频率要求低、鲁棒高、计算量低	默认方案
karto	里程计	分辨率 0.025 m、地图更新间隔 1 s	原理与 gmapping 相近，低速效果略优	可选方案
hector	无需里程计	分辨率 0.05 m、1048×1048、多分辨率 2 级	快速转向易错位，适合地面不平时	可选方案
cartographer	无需里程计	回环检测（revo_lds）、关闭 EKF	具备回环检测，计算量较大	可选方案

派节点，缓解树莓派负载）。建图遵循两条技巧：①先小闭环、后大闭环——先行走能快速闭合的小环路，再逐步向外围扩展，避免累计误差过大导致大环无法闭合；②先闭环、后完善细节——环路闭合前不频繁转圈与往复，避免特征较少环境中闭环失败或错位。

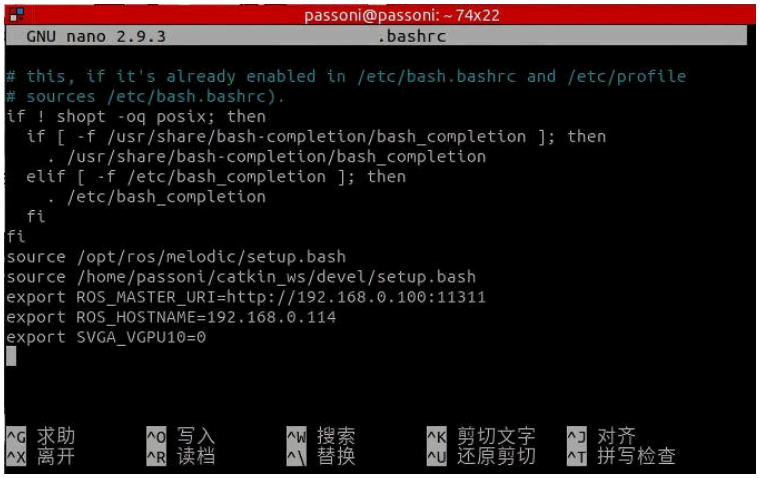


图 6.45 ROS 多机通信环境配置（虚拟机端.bashrc）

图 6.45为虚拟机端.bashrc 中的 ROS 环境配置：source /opt/ros/melodic/setup.bash 与 catkin 工作空间 setup.bash 完成环境加载，ROS_MASTER_URI 指向树莓派（192.168.0.100:11311），ROS_HOSTNAME 为虚拟机地址（192.168.0.114）。通过该配置，rviz 等图形化工具在虚拟机端运行并访问树莓派节点，减轻树莓派负载，对应本节建图操作的运行方式。

```
^Cpassoni@passoni:~$ rviz
[ INFO] [1591615360.192861338]: rviz version 1.13.9
[ INFO] [1591615360.192974604]: compiled against Qt version 5.9.5
[ INFO] [1591615360.193080838]: compiled against OGRE version 1.9.0 (Ghada
mon)
[ INFO] [1591615360.254701063]: Forcing OpenGl version 0.
[ INFO] [1591615360.411998239]: Stereo is NOT SUPPORTED
[ INFO] [1591615360.415702918]: OpenGl version: 3.1 (GLSL 1.4).
[ INFO] [1591615360.962317528]: Creating 1 swatches
[ INFO] [1591615361.357457823]: Creating 1 swatches
```

图 6.46 rviz 可视化端启动日志

图 6.46为可视化端 rviz 的启动日志：显示 rviz 版本 1.13.9、Qt 5.9.5 与 OGRE 1.9.0 编译信息，并提示 OpenGL 版本 3.1（GLSL 1.4）与单窗口创建完成。在虚拟机端正常启动 rviz 后，即可经多机通信订阅树莓派的/scan、/map 与路径话题，实时显示建图与导航过程。

建图完成后运行 map 目录下 map_saver.launch（map_server 的 map_saver 节点，-f 输出至 turn_on_wheeltec_robot/map 目录），保存 WHEELTEC.pgm 位图与 WHEELTEC.yaml 配置文件（分辨率 0.05 m/格、原点 [−5.0, −15.2, 0]、occupied_thresh=0.65、free_thresh=0.196），pgm 文件可用 GIMP 等软件人工修正；出厂地图为厂家演示地图，投入使用前须按巷道实测重新建图，并通过 navigation.launch 的 map_file 参数指定新建地图。

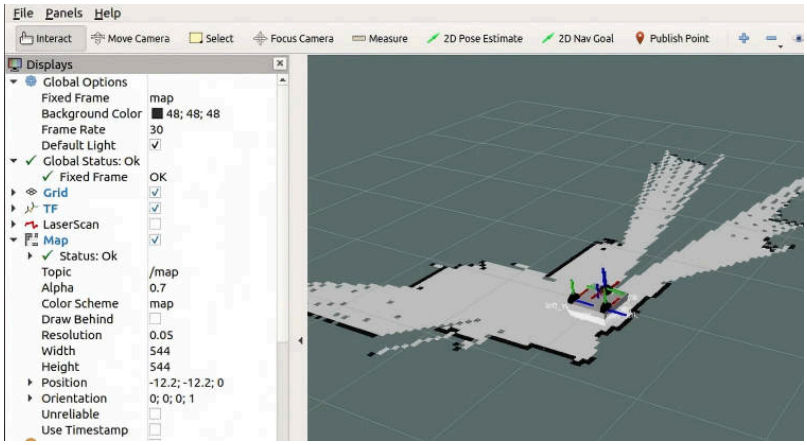


图 6.47 rviz 中 Map 显示插件参数（与 map_saver 保存的栅格地图一致）

图 6.47为 rviz 中 Map 显示插件的参数：话题为/map，栅格分辨率 0.05 m/格，地图尺寸 544×544、原点 (−12.2, −12.2)，与 map_saver 保存的栅格地图参数格式一致，说明地图已由 map_server 正确加载，可直接用于 amcl 定位与全局路径规划。

6.6.3.2　自主导航与多点巡航巡检

（1）导航框架与启动

导航基于 ROS navigation 框架，由 navigation.launch 统一启动：① turn_on_wheeltec_robot.launch（navigation=true 时挂载 teb_local_planner.launch，启动 move_base 节点）；② wheeltec_lidar.launch（/scan 数据）；③ map_server（节点 map_server_for_test，默认加载 map/WHEELTEC.yaml 静态地图）；④ amcl 定位；⑤ send_mark 多点巡航节点；⑥ node_ping.py 监控 move_base 运行状态。导航开始前将机器人放置于建图起点附近，确保初始位姿与地图一致。

（2）定位：自适应蒙特卡洛（amcl）

amcl 采用自适应蒙特卡洛粒子滤波：以 500–2000 个自适应粒子（KLD 策略，kld_err=0.05、kld_z=0.99）将激光扫描与已有地图匹配。激光模型采用似然场模型（likelihood_field，似然最大距离 2.0 m），每束扫描最多取 60 个光束点，测距上限 12 m；运动模型采用 omni-corrected（面向麦轮全向底盘），里程计噪声 α_1–α_4 = 0.2、α_5 = 0.1；机器人移动 0.25 m 或旋转 0.2 rad 时执行更新，重采样间隔为 1，变换容差 1.0 s。amcl 输出 map→odom_combined 的 TF，补偿里程计累计误差，实现机器人在巷道地图中的精确自定位。

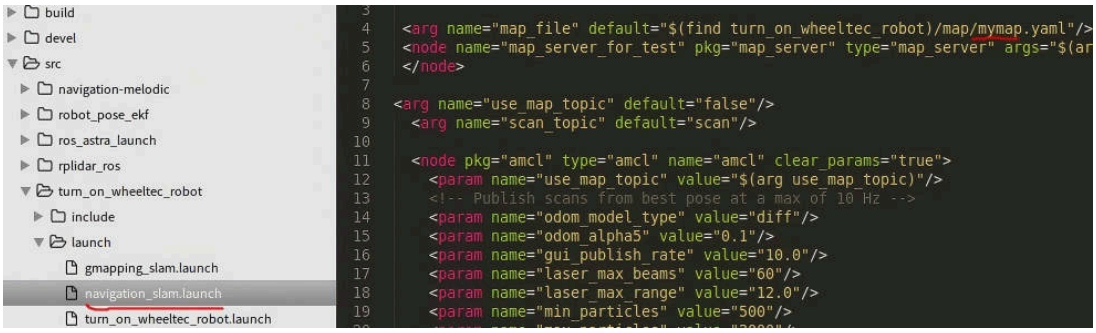


图 6.48　amcl 定位参数配置（navigation_slam.launch）

图 6.48为 navigation_slam.launch 中的 amcl 节点配置：以 map_server_for_test 加载指定地图，amcl 采用 diff 运动模型、500 个最小粒子，激光每帧最多取 60 束、测距上限 12.0 m，与上述粒子滤波定位参数一致。amcl 在此基础上输出 map→odom_combined 变换，完成机器人在巷道地图中的精确定位。

（3）路径规划：move_base 与 TEB 局部规划器

move_base 统筹全局与局部规划，关键配置见表 6.8：全局规划器采用 global_planner/GlobalPlanner，默认 Dijkstra 算法（use_dijkstra=true，可切换 A*），允许路径穿越未知

区域（allow_unknown=true），全局路径规划频率 1 Hz；TEB 局部规划器在速度与加速度约束下构建带时间戳的轨迹，以最短时间与避障距离为优化目标，按 10 Hz 频率输出/cmd_vel。本装置为麦轮全向底盘（mini_mec），TEB 速度上限设 max_vel_x=0.5 m/s、max_vel_y=0.3 m/s、max_vel_theta=1.5 rad/s，加速度上限 x/y=0.2 m/s^2、θ=0.3 rad/s^2，与底盘控制模式匹配；机器人外形采用多边形 footprint（四点 (±0.133, ±0.125) m，约 0.266 m×0.25 m），规划时最小保持 0.1 m 障碍距离。

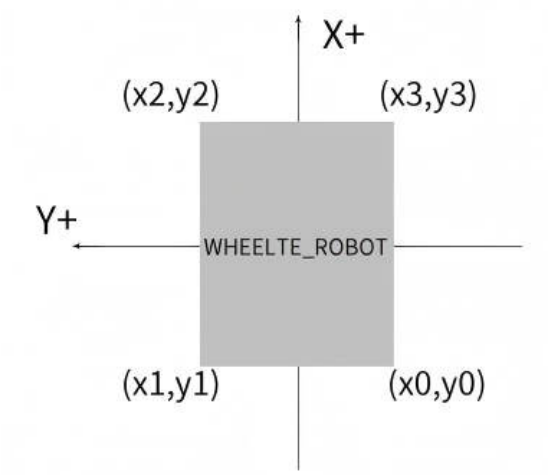


图 6.49　TEB 局部规划器采用的多边形 footprint 顶点坐标

图 6.49为 TEB 局部规划器采用的多边形 footprint：车体四角顶点 (x_0, y_0)–(x_3, y_3) 以车体坐标系表示，本装置按 mini_mec 车型取 (±0.133, ±0.125) m，约 0.266 m×0.25 m。规划时 TEB 以该多边形作为碰撞检测轮廓，并与 0.1 m 最小障碍距离共同约束，使机器人可安全通过狭窄巷道。

代价地图分为两层：全局代价地图 global_costmap 基于静态地图（更新 1.5 Hz、发布 1 Hz，静态层＋障碍层/VoxelLayer ＋膨胀层），用于全局路径规划；局部代价地图 local_costmap 以 4 m×4 m 滚动窗口（分辨率 0.05 m、rolling_window=true、更新 5 Hz）实时维护动态障碍（观测源/scan，sensor_frame=laser，障碍添加 2.5 m、射线清除 3.0 m）。膨胀层参数 inflation_radius=0.25 m、cost_scaling_factor=15，使机器人与巷道壁面保持安全距离，同时允许通过狭窄路段。move_base 标准恢复行为（清除代价地图、旋转 360°、减速缓行）在参数文件中保留定义，但经厂家实测关闭（recovery_behavior_enabled=false、clearing_rotation_allowed=false），以免在狭窄巷道中盲目旋转；规划失败时 move_base 按 max_planning_retries=1 重试，仍失败则原地待命并提示人工干预。规划路径与代价地图在 rviz 中可视化（绿色为全局路径、灰色为膨胀区），便于地面监控。

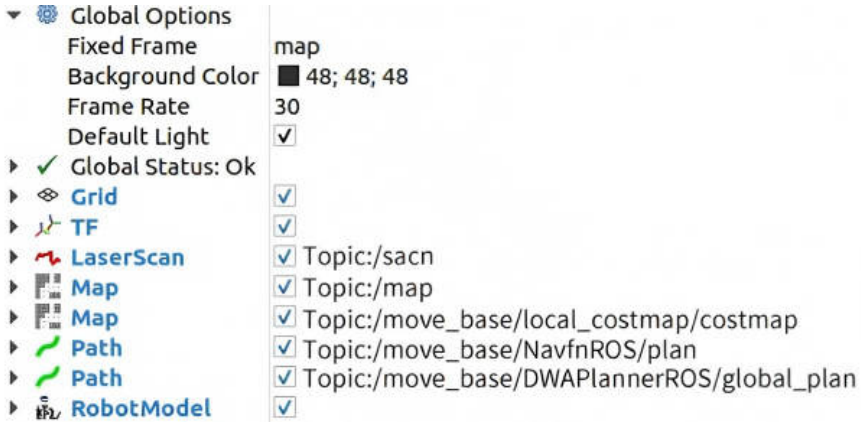


图 6.50 rviz 显示话题配置（激光、地图、代价地图与路径）

图 6.50为 rviz 的显示项配置：LaserScan 订阅/scan，Map 分别订阅静态地图/map 与局部代价地图/move_base/local_costmap/costmap，Path 订阅全局路径/move_base/NavfnROS/plan 与局部路径（改用 TEB 后对应 TebLocalPlannerROS 话题），RobotModel 显示车体与轮系。据此可在同一界面同时观察全局路径、局部代价地图与激光数据，对应本节规划可视化调试方式。

（4）单点导航与多点巡航 单点导航：在 rviz 中使用 2D Nav Goal 工具在地图界面设定目标位姿，rviz 发布/move_base_simple/goal（PoseStamped，frame_id=map，含位置与四元数朝向），move_base 订阅后规划路径并由机器人运动到达；也可用 rostopic pub 直接向该话题发布目标实现命令行导航。

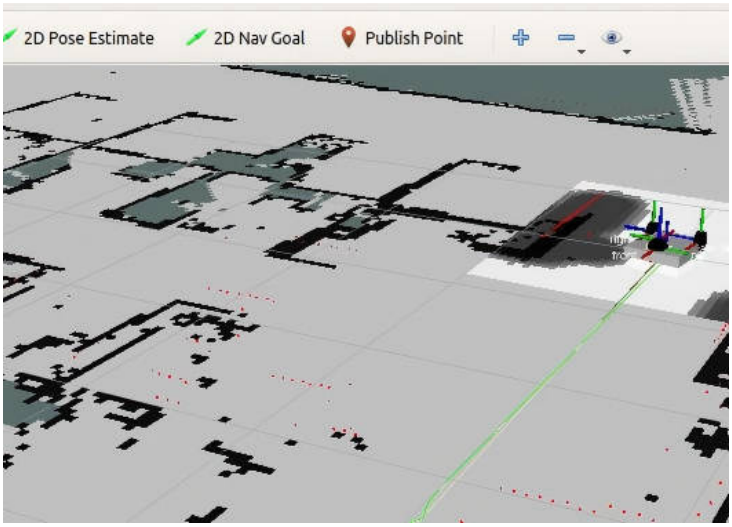


图 6.51 单点导航的 rviz 界面（全局路径与代价地图可视化）

图 6.51为单点导航时的 rviz 界面：地图上显示机器人当前位姿与全局路径（绿色），工具栏提供 2D Pose Estimate、2D Nav Goal 与 Publish Point 等交互工具。使用 2D Nav

表 6.8 导航关键配置参数（mini_mec 车型）

配置项	参数/数值	说明
全局规划器	global_planner/GlobalPlanner	Dijkstra 默认，可切换 A*，allow_unknown=true，规划频率 1 Hz
局部规划器	teb_local_planner/TebLocalPlannerROS	指令频率 10 Hz，最小障碍距离 0.1 m
速度限制	max_vel_x=0.5 m/s、max_vel_y=0.3 m/s、max_vel_theta=1.5 rad/s	麦轮全向三自由度
加速度限制	acc_lim_x=0.2 m/s^2、acc_lim_y=0.2 m/s^2、acc_lim_theta=0.3 rad/s^2	平滑启动与停车
到达容差	xy_goal_tolerance=0.2 m、yaw_goal_tolerance=0.1 rad	停靠巡检点判定
全局代价地图	更新 1.5 Hz/发布 1 Hz，静态＋障碍（Voxel）＋膨胀层	基于静态地图
局部代价地图	4 m×4 m 滚动窗口、0.05 m 分辨率，更新 5 Hz/发布 3 Hz	动态障碍实时维护
膨胀层	inflation_radius=0.25 m、cost_scaling_factor=15	与巷道壁面保持安全距离
amcl 粒子	min_particles=500、max_particles=2000	KLD 自适应（0.05/0.99）
amcl 激光模型	likelihood_field，激光最大 60 束、测距 12 m	更新阈值 0.25 m/0.2 rad

Goal 即可向/move_base_simple/goal 发布带朝向的目标位姿，move_base 规划后由 TEB 跟踪执行，说明单点导航操作流程与本节描述一致。

多点巡航：navigation.launch 启动 send_mark 节点（脚本 send_mark.py），支持两种目标点输入方式：① rviz 的 2D Nav Goal 工具（每次设定即加入目标序列并立即导航）；② Publish Point 工具（无方向信息，目标朝向默认正前）。每添加一点，节点即发布/path_point（MarkerArray）在 rviz 地图上显示箭头与序号标记，并自动向/move_base_simple/goal 发布 map 坐标系下的目标点；到达一个目标点（move_base result 状态 3）后自动发布下一

目标，全部完成后循环回到首点继续巡航（循环往复，适合巷道往返巡检）；目标点失败时先重试一次，仍失败则跳过进入下一目标；按“c”键清空全部目标点。该机制用于依次到达各巡检点，配合6.6.2.2节的时序完成定点气体采样与裂缝拍照。

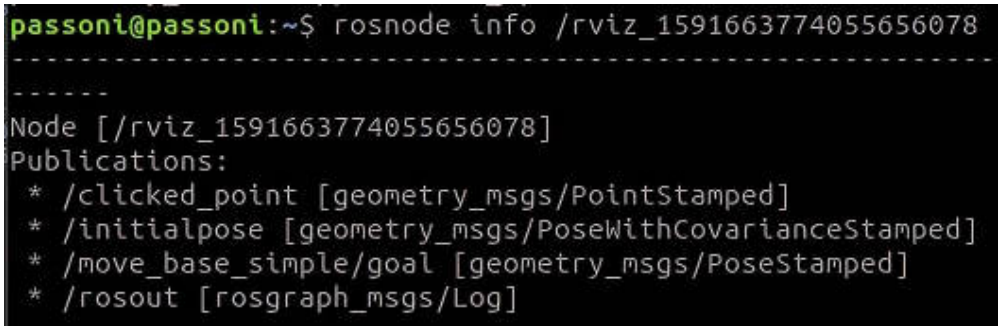


图 6.52 rviz 节点发布的目标点输入话题（rosnode info）

图 6.52为 rosnode info 查询 rviz 节点的结果：rviz 发布/clicked_point、/initialpose、/move_base_simple/goal 与/rosout。其中/move_base_simple/goal 为目标点输入话题，move_base 订阅后开始规划；多点巡航时 send_mark 节点亦通过该话题发布序列目标，单点导航与多点巡航均由此接口驱动。

6.6.4 多源传感器融合感知

矿井巡检环境同时包含巷道结构、气体浓度、温湿度、壁面状态和障碍物等多类信息，单一传感器难以完整描述巡检场景。因此，项目配置激光雷达、视觉、气体、姿态和定位感知单元，由 STM32 与 ROS 端分层汇集不同来源的数据，为自主巡航、气体报警和裂缝识别提供输入。这种融合方式与主办方对环境感知、导航控制和自主避障方案论证的要求相衔接。

6.6.4.1 低照度视觉裂缝检测

视觉检测系统面向巷道壁面采集图像信息，重点检测壁面裂缝。摄像头由 usb_cam 或奥比中光相机驱动节点驱动，发布/image_raw 图像话题供检测与可视化使用。针对矿井黑暗环境，检测时开启补光灯辅助成像，摄像头采集的灰度图像经降噪、对比度增强后，采用边缘检测与形态学处理提取裂缝轮廓，依据轮廓长度与宽度特征筛选裂缝目标。裂缝位置信息可与里程计与地图信息结合，标记裂缝在巷道地图中的具体位置，为维护人员提供定位依据。

视觉感知在系统中承担“识别与反馈”角色，而具体动作仍由 STM32 与 ROS 端统

一调度。例如，检测到裂缝后，系统将其坐标标记在地图上并推送至 APP 端，为人工复核提供指引；气体浓度异常时，系统联动停止巡航并就地报警。项目资料将该视觉检测系统作为核心技术方案，但未提供识别模型类型、训练数据规模和识别精度，因此本节仅说明其功能定位与控制链路，不设置未经验证的算法指标。

6.6.4.2 气体浓度与激光雷达多源数据融合

气体传感器用于采集巷道内可燃气体、一氧化碳等浓度信息，温湿度传感器反映巷道环境条件；激光雷达用于获取巷道轮廓和障碍物信息；陀螺仪与编码器分别提供姿态和里程计参考。气体浓度经 ADC 采样后汇入 STM32，与底盘状态数据一起经串口上传 ROS 端，可从气体安全、环境条件和巷道结构三个方面描述当前巡检场景。

在自主导航中，激光雷达信息用于 SLAM 建图与代价地图构建，陀螺仪姿态与编码器里程计用于定位先验；在气体检测中，系统将浓度数据与地图位置绑定，超标时立即停止行驶并触发声光报警，同时将报警位置与浓度值上传 APP 与地面监控端；在裂缝检测中，视觉信息与里程计结合实现裂缝定位。不同数据相互补充，可降低仅依赖单一信息造成的判断局限。

融合后的感知结果最终服务于巡检决策，而不是停留在数据展示层面。STM32 与 ROS 端根据当前任务模式，将感知信息分别传递给行走控制、气体检测、裂缝识别和数据回传任务，并将关键状态反馈至 APP 和云端。由此，机器人形成从环境采集、状态判断到机构动作与报警联动的闭环控制框架。现阶段，样机测试已经验证主要机械功能与基础巡航能力；多传感器完整安装、复杂环境避障与自主回充仍需结合主办方指标继续开展程序、仿真和实物验证，以形成更加完整的无人巡检论证链。

第七章　软件系统与 AI Agent 集群调度

7.1　嵌入式控制软件

嵌入式控制软件搭载于主控单元，采用模块化设计，分为六大功能模块：**传感器驱动模块**（底层驱动、滤波降噪与时间戳同步）、**运动控制模块**（履带差速驱动、螺旋推进、升降机构、云台姿态、补光控制，内置 PID 速度闭环与姿态控制）、**掘进清障控制模块**（切削负载自适应控制与多系统协同调度）、**导航与避障模块**（激光雷达-视觉融合 SLAM、全局路径规划、局部动态避障、路径跟踪与定点停靠）、**多任务调度模块**（状态机调度：待机、巡检、探测、清障、后退、故障停机、充电等工作状态自动切换）与**通信协议栈模块**（定义设备—地面平台、设备—AI Agent 调度平台双向标准数据帧格式，校验位机制保障传输稳定）。

7.2　集成通讯舱

集成通讯舱安装于左侧履带上方，作为无线信号收发主节点，承担三大核心功能：**无线数传**（稳定上传图像、气体、雷达等检测数据，接收地面控制指令）、**本地断网缓存**（进入通信盲区时自动本地缓存检测数据与告警信息，通信恢复后自动续传，确保数据不丢失、告警不遗漏）与**远程 OTA 升级**（设备空闲时接收地面平台推送的固件与 AI 模型更新包，无需井下拆机烧录）。

7.3　AI Agent 调度接口与数据契约

本装备作为执行型与感知型异构智能体，预留标准 API 接口接入矿井级 AI Agent 调度平台，接口分三层（图 7.1）：**任务接收层**支持 HTTP、MQTT 协议，可解析“前往 3 号回风巷检测瓦斯浓度”“前往坍塌区域执行清障”等自然语言任务描述并转化为设备可执行任务；**状态反馈层**实时上报设备位置、姿态、检测数据、切削负载与健康状态；**路径执行层**接收全局路径规划指令，在本地执行避障与轨迹跟踪。装备支持多台机器人分区巡检、交叉验证、协同清障等集群协同任务，工单遵循“接收任务—执行任务—反馈结果—工单归档”全闭环管理，实现任务可追溯、可考核。

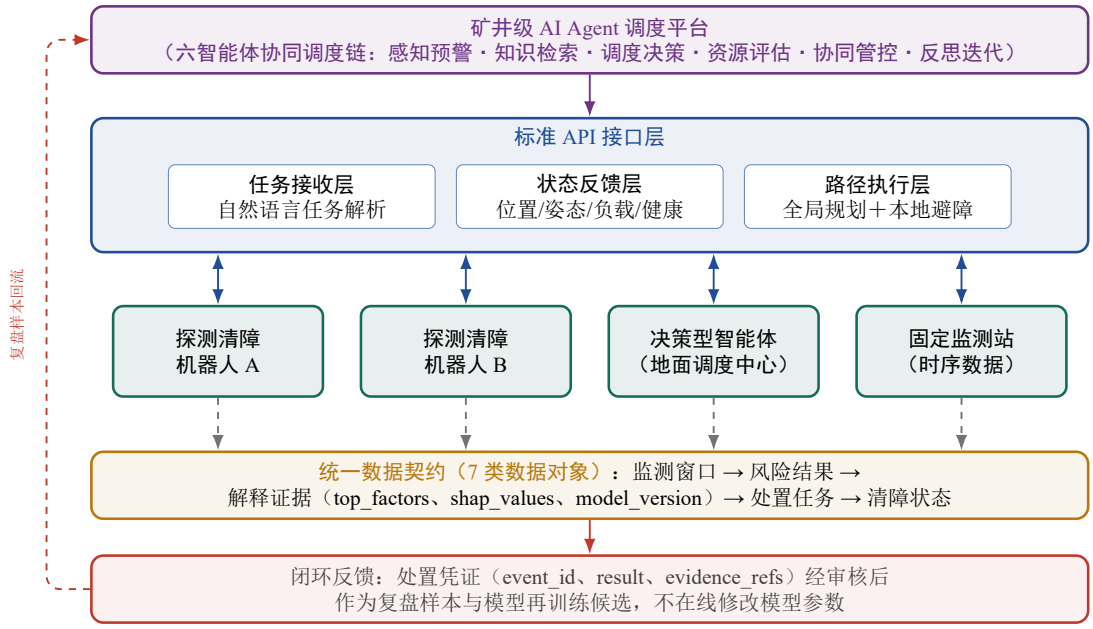


图 7.1　AI Agent 调度接口三层架构与数据契约（矿井级调度平台 → 标准 API 接口层 → 机器人集群与固定监测站，统一数据契约与闭环反馈）

为实现机器人与矿井级预警平台、AI Agent 调度平台的无缝数据对接，本装备定义统一数据契约，所有上行数据均携带时间戳、设备编号、空间坐标、数据质量标识与来源版本，不以自然语言替代结构化值；七类核心数据对象见表 7.1。

表 7.1　统一数据契约核心数据对象

数据对象	核心字段	说明
监测窗口	timestamp, device_id, features（气体/视觉/雷达/清障负载）, quality	原始监测数据窗口，quality 标识数据完整性（good/partial/failed）
风险结果	probabilities（四类风险概率）, risk_level（0–3 四级）, confidence	预警模型输出的风险等级与置信度（低/一般/较大/重大）
解释证据	top_factors（前三项触发因子）, shap_values, model_version	SHAP 可解释性输出，说明模型为何报警，携带模型版本号便于审计
设备状态	position, pose, battery, mode（待机/巡检/清障/故障）, health	机器人实时运行状态，支持调度平台掌握设备位置与健康度
清障状态	cutting_load, hydraulic_pressure, advance_speed, cleared_volume	掘进清障作业实时状态，支持应急救援决策与清障进度跟踪

数据对象	核心字段	说明
处置任务	task_id, task_type（巡检/清障/加密监测）, plan_steps, status, approval_id	AI Agent 派发的任务工单，全流程状态可追溯，高风险任务需人工审批
闭环反馈	event_id, result, evidence_refs, review_status	任务执行结果与处置凭证，经审核后作为复盘样本与模型再训练候选

数据契约遵循“算法层只负责计算事实字段，智能体层增加知识证据和建议字段，平台层维护视图状态和业务闭环字段”的分层原则。机器人输出的监测窗口与风险结果可直接接入矿井级 XGBoost/MOA-Transformer 预警模型；预警模型输出的风险结果经 AI Agent 六智能体链处理后，直接向机器人派发处置任务，形成“移动监测 → 预警研判 → 任务派发 → 自主执行 → 结果反馈”的完整闭环。

7.4 与六智能体调度链的对接

调度平台按“感知预警 → 知识检索 → 调度决策 → 资源评估 → 协同管控 → 反思迭代”六个智能体环节组织，其职责划分、输入输出与机器人交互接口以及两类典型协同时序详见第三章。本章软件模块为该链条提供设备侧支撑：嵌入式控制软件把结构化处置任务翻译为机载动作序列，集成通讯舱保障指令与数据的可靠收发与断网续传，统一数据契约为链条各环节定义字段语义，地面监控平台提供人工审批与可视化入口。机器人端只执行携带有效审批编号的任务，并在机载安全状态机否决条件成立时拒绝执行——这一“Agent 建议、人审批、机器人守底线”的对接方式在第三章展开。

7.5 地面监控平台

地面监控平台部署于矿井调度中心，提供六项核心功能：**实时监控**（多画面视频与传感器数据，电子地图显示位置与巡检轨迹）、**远程操控**（遥控模式下的行进、转向、升降、探测与清障操作）、**告警管理**（气体超限、裂缝异常、渗水异常、人员闯入、切削过载、设备故障等告警的确认、派单与闭环跟踪）、**数据管理**（历史数据存储查询、巡

检报表与趋势分析）、**清障调度**（应急状态多机协同清障指挥）与**系统管理**（设备、权限、任务配置与 OTA 管理）。

第八章　防爆与安全设计

8.1　防爆等级与壳体设计

本产品面向井工煤矿高瓦斯等爆炸性环境，整机按矿用防爆标准设计。主体采用防爆铸铝与不锈钢材质，具备足够的机械强度与耐腐蚀性能；防爆光谱云台摄像机选型为矿用防爆型并集成雨刮器与保护罩；液压系统采用防爆型液压元件；所有电气元件均选用矿用本安或隔爆型元器件，从源头保障防爆安全。

8.2　隔爆腔体、电缆引入与本安充电

电气腔体采用独立密封设计，主控、电源、通信、液压控制等关键电气单元分别置于独立隔爆腔体内，腔体之间通过防爆电缆引入装置连接；隔爆腔体按隔爆型电气设备标准设计，接合面参数满足防爆要求，可承受内部爆炸压力并阻止火焰向外部传播。电缆采用矿用阻燃电缆，液压管路采用防爆密封接头。充电接口采用隔爆型设计并支持井下本安充电，充电管理电路具备过充、过流、短路、过温四重保护，接口设置防护盖，非充电状态下密封保护。

8.3　多级安全保护机制

（1） **气体安全联锁：**实时监测 CH_4、CO 等气体浓度，达到预警阈值自动减速并加强监测，达到危险阈值自动停机并最高等级报警；清障作业中切削扰动导致气体浓度异常时立即暂停清障。

（2） **运动安全保护：**配备紧急停机按钮与远程紧急停机指令，任意状态下一键切断所有动力输出；后退作业时倒车激光雷达检测到人员立即声光报警并停机。

（3） **清障安全保护：**切削滚筒过载保护、液压超压溢流保护；清障全程巷道壁稳定性监测联动，发现裂缝扩展、掉矸立即暂停。

（4） **通信失效保护：**通信中断超过设定时间自动进入安全待机状态，停止运动并持续本地缓存数据，防止失控作业。

（5） **故障自诊断：**开机自检与运行中实时监测各模块状态，关键机构故障立即切断动力

并锁定姿态，上报故障代码。

（6） **电气安全保护：**电源管理系统集成过压、欠压、过流、短路、过温保护，电池管理系统实时监测各电芯状态。

8.4 软件六级分层降级机制

除硬件安全联锁外，本产品建立软件层面的六级分层降级机制（图 8.1），确保任何单个智能模块故障都不会掩盖风险，也不会在缺少审批时自动执行高影响动作。机制遵循三条安全底线原则：**风险展示不降级、处置建议可降级、执行动作需审批**。

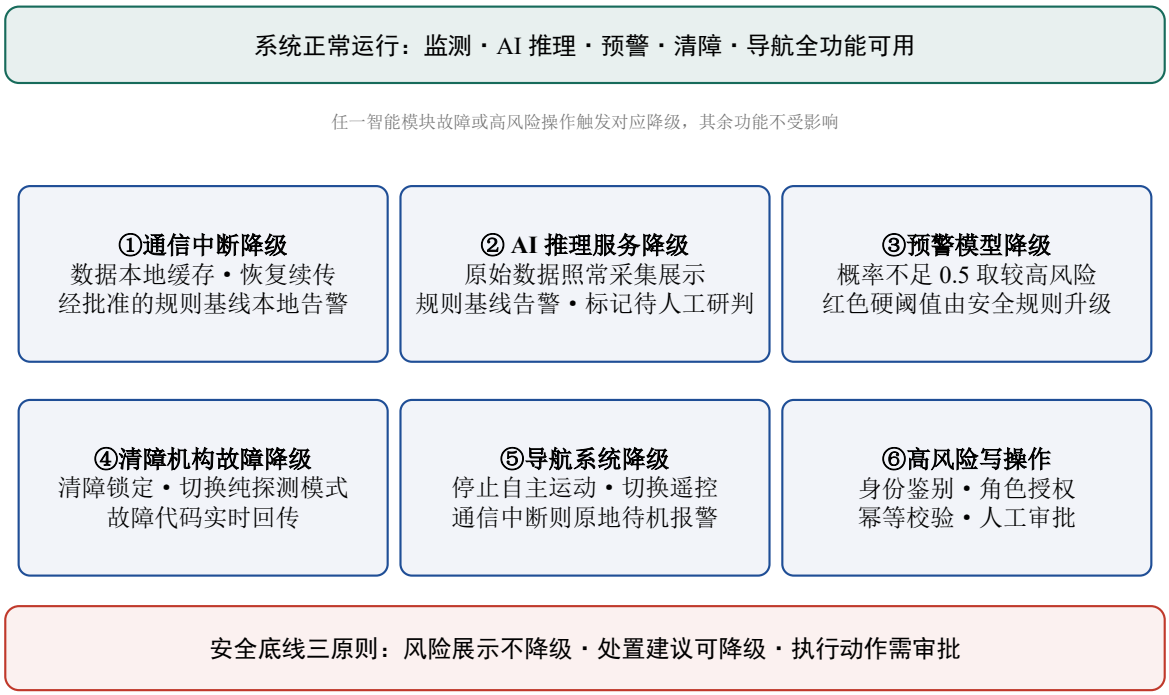


图 8.1 软件六级分层降级机制（通信/AI/预警/清障/导航/高风险操作六级降级，安全底线三原则）

六级降级的触发条件与系统行为见表 8.1。

该机制与本章硬件联锁、第六章安全联锁共同构成“硬件联锁—软件降级—审批关口”三道安全防线，是整机运行可靠性的直接保障。

表 8.1 软件六级分层降级机制

降级级别	触发条件	系统行为
通信中断降级	无线通信中断	不停止监测，本地采集缓存并切换矿方批准的规则基线本地告警（如气体超限直接声光报警）；不执行新的远程指令，已执行的自主任务继续完成，恢复后自动续传
AI 推理服务降级	边缘 AI 模型异常或服务超时	原始数据正常采集展示，AI 识别标记“待人工研判”，切换确定性规则基线（裂缝宽度绝对阈值、气体浓度绝对阈值）告警，不静默输出“无异常”
预警模型降级	矿井级预警模型不可用	基于本地传感器阈值与规则库保守判定：最大类别概率不足 0.5 时在前两类候选中取较高风险等级；单项达到红色硬阈值时由安全规则直接升级风险，不由模型概率自动解除
清障机构故障降级	液压/滚筒/推土铲任一子系统故障	清障功能立即锁定，切换纯探测模式仍可执行环境探测与人员搜寻；故障代码实时回传，不允许带故障清障
导航系统降级	激光雷达或视觉导航异常	立即停止自主运动切换遥控模式；遥控通信也中断时原地待机并声光报警，等待人工介入
高风险写操作	撤人、停机、封控、工单写入、知识库事实更新	须经身份鉴别、角色授权、幂等校验与人工确认；所有外部写操作使用幂等键约束，网络重试不产生重复处置命令

第九章　灾害风险监测与智能预警

9.1　四类灾害移动监测

本装备实时采集并回传井工场景四类关键灾害风险数据，为矿井灾害智能预警模型提供高质量移动监测数据，弥补固定监测站空间覆盖不足的缺陷。

瓦斯灾害：实时监测 CH_4 浓度、风速、风向参数。气体检测装置响应时间不超过 20 s，机器人在自主巡检中沿巷道全程连续采集瓦斯浓度，形成高时空分辨率的瓦斯分布图谱，可识别瓦斯积聚区与异常涌出点。

冲击地压与顶板灾害：采集煤岩体结构图像、声发射特征与温度异常数据。AI 模型识别裂缝的位置、长度、宽度与发育趋势；红外热成像监测煤岩体表面温度异常，识别应力集中区前兆；机器人定期对同一巷道段重复巡检，通过多期图像对比分析裂缝扩展速率与变形趋势。

水害：监测水位深度、水温、水质电导率参数；水深传感器触发履带升降与螺旋推进模式切换；AI 环视相机的渗水识别检测围岩渗水痕迹与湿区范围，多期数据对比分析渗水发展趋势。

火灾：采集红外热成像、CO 浓度与烟雾数据。红外热成像实现隐蔽火源与高温异常探测，在明火出现前发现电缆、机电设备与煤岩体的温度隐患；CO 浓度异常升高可早期预警煤炭自燃火灾。

9.2　移动—固定时空互补数据融合

本装备采集的移动监测数据与井下固定监测站数据形成时空互补而非简单叠加（图 9.1）：**时间维度**上，固定站提供关键点位分钟级连续时序，机器人提供周期性巡检采样并交叉验证；**空间维度**上，固定站仅覆盖关键测点，机器人沿巷道全程连续采样，直接生成空间连续的风险热力图，无需对离散测点插值，覆盖固定站盲区、灾后通信中断区与人员无法进入的危险区域。

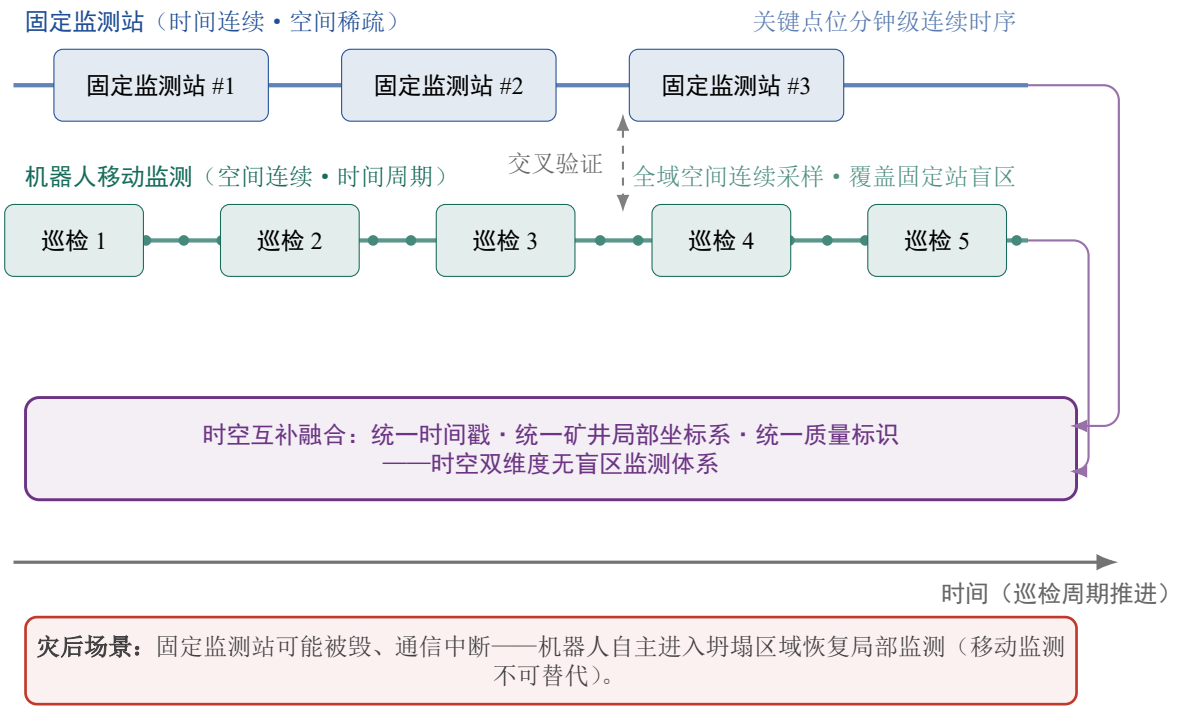


图 9.1　固定监测系统与机器人移动监测的时空互补示意（固定站时间连续空间稀疏＋机器人空间连续时间周期＝时空双维度无盲区）

融合时二者写入同一时空基准（统一时间戳、统一矿井局部坐标系、统一质量标识），综合风险场表示为

$$R(x,t) = \sigma\Big(\sum_{k} w_k\, q_k(t)\, \phi_k(x,t) + b\Big), \tag{9.1}$$

其中 ϕ_k 为第 k 类监测量的归一化异常度（固定站时序异常度＋机器人空间异常度），q_k 为数据质量权重，w_k 由模型贡献、专家规则和矿井标定共同确定，σ 为风险映射函数。缺测区域降低融合置信度并在平台中显示灰色不确定区域，不渲染为低风险，避免插值空白区被误读为安全区。灾后场景下固定站可能被毁、通信可能中断，机器人可自主进入坍塌区域恢复局部监测能力，这是移动监测不可替代的优势。融合架构如图 9.2 所示。

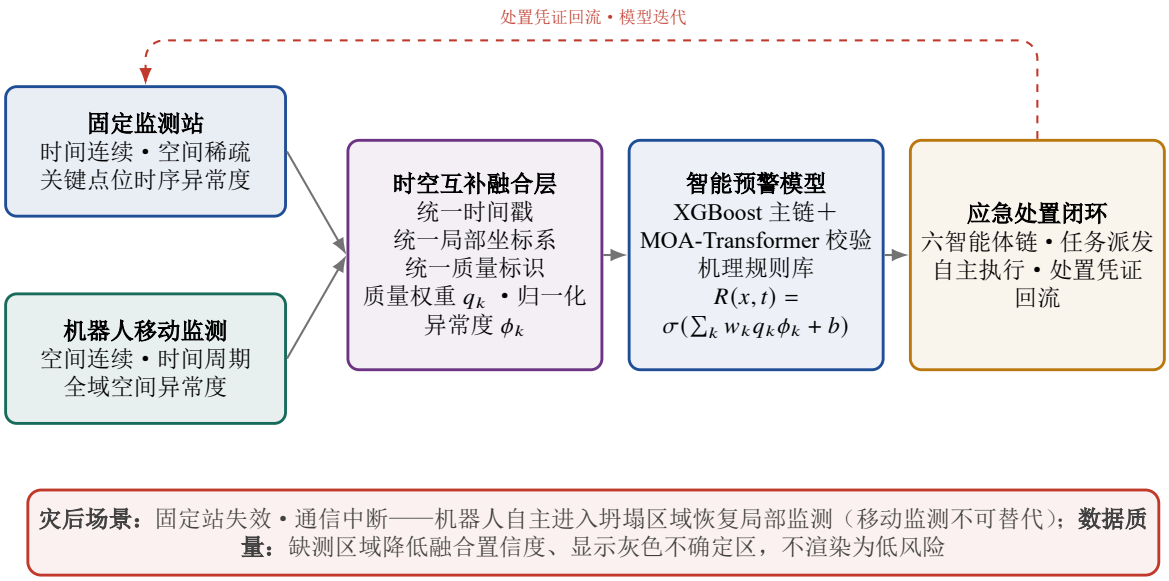


图 9.2　移动—固定时空互补数据融合架构（固定站时间连续＋机器人空间连续 → 时空互补融合层 → 智能预警模型 → 应急处置闭环）

9.3　坍塌通道应急清障处置

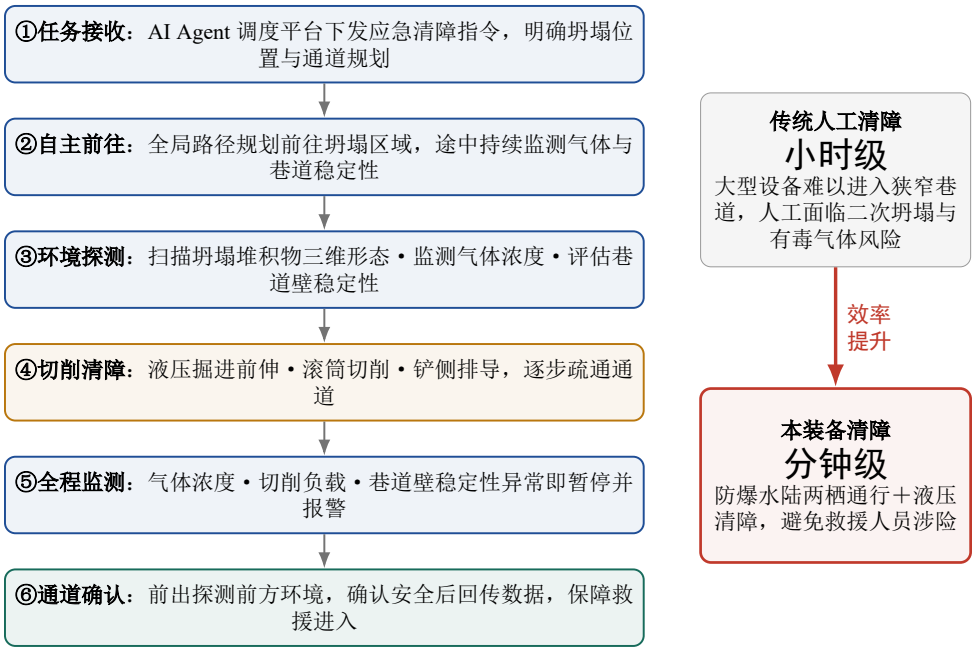


图 9.3　坍塌通道应急清障处置六步流程（对比传统人工清障，效率由小时级提升至分钟级）

当矿井发生顶板冒落、巷道坍塌导致通道堵塞时，本装备可第一时间自主或遥控前往坍塌区域执行应急清障，六步流程如图 9.3 所示：任务接收（AI Agent 调度平台下发应急清障指令）→ 自主前往（全局路径规划，途中持续监测气体与巷道稳定性）→ 环境探测（扫描坍塌堆积物三维形态、监测气体、评估巷道壁稳定性）→ 切削清障（液压

前伸、滚筒切削、铲侧排导）→ 全程监测（气体浓度、切削负载、巷道壁稳定性异常即暂停）→ 通道确认（疏通后前出探测前方环境，为救援人员进入提供保障）。通过该能力，灾后通道疏通时间由传统人工清障的小时级压缩至分钟级，同时避免救援人员进入危险区域造成二次伤亡。

9.4 智能预警算法架构

本装备的移动监测数据接入矿井级智能预警模型，预警算法采用“多源预处理融合＋双模型并行＋可解释性输出＋保守四级判定”的工程化架构，兼顾精度、稳定性、可解释性与安全性。

9.4.1 多源数据预处理与融合

预警模型的输入来自两类性质迥异的数据源：固定监测站提供关键点位上分钟级连续的时序 $x_k^{\mathrm{fix}}(t)$，机器人提供沿巷道空间连续、但在时间上按巡检周期稀疏采样的观测 $x_k^{\mathrm{mob}}(s,t)$，其中 k 为监测量类别（浅/深基点离层、锚杆/锚索轴力、支护阻力、涌水量、微震能量、距水体距离等八维特征），s 为巷道里程坐标。要把两者送入同一个模型，必须先在时空上对齐、在量纲上统一、在质量上标注，再按统一的窗口格式组织。预处理流水线分五步。

（1）时空对齐。所有装备以井下时间服务器统一时间戳，原始数据重采样到公共时间网格 $t_n = n\Delta t$（$\Delta t = 1\,\mathrm{min}$），格点值取窗口均值

$$\bar{x}(t_n) = \frac{1}{|\mathcal{W}_n|} \sum_{t \in [t_n - \Delta t/2,\, t_n + \Delta t/2)} x(t), \tag{9.2}$$

机器人观测则按其定位坐标映射到最近的巷道监测单元 ℓ（以固定站测点为中心划分的巷道分段），形成 (ℓ, t_n) 网格上的统一索引；某单元在某时刻若无机器人经过，记录距上次经过的时间间隔 $\Delta\tau^{\mathrm{mob}}(\ell, t_n)$ 作为“新鲜度”特征而非简单填零。

（2）卡尔曼滤波。对每一维监测量建立随机游走状态模型 $x_t = x_{t-1} + w_t$、观测模型 $z_t = x_t + v_t$（$w_t \sim \mathcal{N}(0, Q)$，$v_t \sim \mathcal{N}(0, R)$），逐通道执行预测与更新：

$$\begin{aligned} &\hat{x}_{t|t-1} = \hat{x}_{t-1}, \qquad P_{t|t-1} = P_{t-1} + Q, \\ &K_t = \frac{P_{t|t-1}}{P_{t|t-1} + R}, \qquad \hat{x}_t = \hat{x}_{t|t-1} + K_t\left(z_t - \hat{x}_{t|t-1}\right), \qquad P_t = (1 - K_t)P_{t|t-1}, \end{aligned} \tag{9.3}$$

Q 与 R 由训练集残差估计并随模型包固化。平滑值 $\hat{x}_t$ 送入统计模型，原始值 z_t 保留用于红色硬阈值告警，避免滤波延迟掩盖突变。

（3）标准化。使用训练集均值与标准差对每一维做 z 变换 $z_k = (\hat{x}_k - \mu_k^{\text{train}})/\sigma_k^{\text{train}}$，参数与模型共同版本化，线上不重新估计。

（4）质量编码。按缺失率、重复、乱序、漂移与突变五项规则为每一条记录打质量标记，并映射为质量权重 $q \in \{1.0\ (\text{good}), 0.5\ (\text{partial}), 0\ (\text{failed})\}$；质量为 failed 的记录不参与融合，只在平台中显示灰色不确定区。

（5）多源融合与窗口构造。对同一监测单元 ℓ 在同一时刻 t_n 同时存在固定站与机器人观测的通道，采用质量加权融合

$$z_k^{\text{fus}}(\ell, t_n) = \frac{q^{\text{fix}}\, z_k^{\text{fix}} + q^{\text{mob}}\, z_k^{\text{mob}}}{q^{\text{fix}} + q^{\text{mob}} + \varepsilon}, \tag{9.4}$$

仅有单一来源的通道直接沿用该来源的值；随后把融合特征、两侧质量权重与新鲜度拼接为单元特征向量

$$\tilde{\mathbf{x}}(\ell, t_n) = \left[\, z_1^{\text{fus}}, \ldots, z_8^{\text{fus}},\ q^{\text{fix}},\ q^{\text{mob}},\ \Delta\tau^{\text{mob}} \,\right]^{\top} \in \mathbb{R}^{11}. \tag{9.5}$$

XGBoost 以 $\tilde{\mathbf{x}}(\ell, t_n)$ 为点式输入；MOA-Transformer 以连续八步的滑动窗口 $\mathbf{X}(\ell, t_n) = [\tilde{\mathbf{x}}(\ell, t_{n-7}), \ldots, \tilde{\mathbf{x}}(\ell, t_n)] \in \mathbb{R}^{8\times 11}$ 为时序输入。预处理参数（卡尔曼 Q, R、标准化 μ, σ、质量编码器）与模型共同组成不可分割的模型包，任一工件变更都生成新的 model_version。代码 9.1 给出流水线的核心实现。

```python
import numpy as np

QUALITY_W = {"good": 1.0, "partial": 0.5, "failed": 0.0}

class ScalarKalman:
    """逐通道随机游走卡尔曼滤波，Q/R 随模型包固化。"""
    def __init__(self, q, r):
        self.q, self.r, self.x, self.p = q, r, None, 1.0
    def step(self, z):
        if self.x is None:
            self.x = z; return z
        p_pred = self.p + self.q                    # 预测
        k = p_pred / (p_pred + self.r)              # 卡尔曼增益
        self.x = self.x + k * (z - self.x)          # 更新
        self.p = (1.0 - k) * p_pred
        return self.x

```

```python
def align_to_grid(records, dt=60):
    """按 (unit, t_n) 网格聚合: 同格点取均值, 返回 {(unit, t_n): {k: (value, quality)}}"""
    grid = {}
    for rec in records:                                  # rec: device, unit, ts, k, value, quality
        t_n = int(rec.ts // dt) * dt
        cell = grid.setdefault((rec.unit, t_n), {})
        vals = cell.setdefault(rec.k, [])
        vals.append((rec.value, QUALITY_W[rec.quality]))
    return {key: {k: (np.mean([v for v, _ in vs]), min(q for _, q in vs))
                  for k, vs in cell.items()} for key, cell in grid.items()}

def fuse_unit(fix_cell, mob_cell, mu, sigma, kf, staleness, eps=1e-6):
    """按式(9.3)质量加权融合 + 标准化 + 新鲜度, 输出式(9.4)的11维特征向量。"""
    feats, q_fix, q_mob = [], 0.0, 0.0
    for k in range(8):
        zf, qf = fix_cell.get(k, (np.nan, 0.0))
        zm, qm = mob_cell.get(k, (np.nan, 0.0))
        zf = kf["fix"][k].step(zf) if qf > 0 else np.nan
        zm = kf["mob"][k].step(zm) if qm > 0 else np.nan
        num = (qf * np.nan_to_num(zf) + qm * np.nan_to_num(zm))
        z = num / (qf + qm + eps) if (qf + qm) > 0 else np.nan
        feats.append((z - mu[k]) / sigma[k])             # 训练集参数标准化
        q_fix, q_mob = max(q_fix, qf), max(q_mob, qm)
    return np.array(feats + [q_fix, q_mob, staleness], dtype=np.float32)

def make_windows(seq, win=8):
    """时序窗口: MOA-Transformer 输入 (N, 8, 11); XGBoost 直接取 seq[-1]。"""
    return np.stack([seq[i - win + 1:i + 1] for i in range(win - 1, len(seq))])
```

代码 9.1　多源数据预处理与融合流水线（生成点式与时序两种模型输入）

9.4.2　数据与实验设置

基于典型矿山监测数据构建机制构造与场景演化样本共 20,000 条（四类风险：低、一般、较大、重大），按矿井/工作面隔离划分为训练集 14,000 条与测试集 6,000 条，无窗口重叠泄漏（图 9.4）。全部样本经上节流水线处理，卡尔曼滤波前后的典型监测量对比见图 9.5；输入特征间的 Spearman 相关性分析（图 9.6）表明浅/深基点离层高度正相关，为特征筛选与冗余控制提供依据。

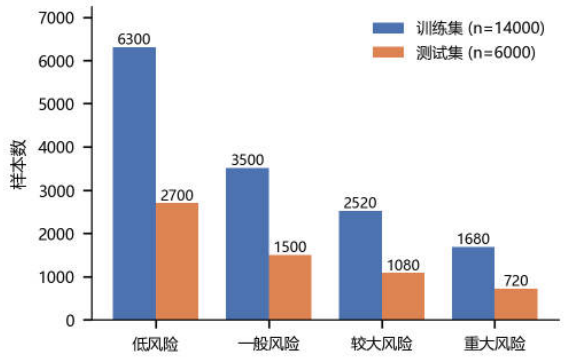


图 9.4　预警模型训练集与测试集样本分布（训练集 14000 条/测试集 6000 条）

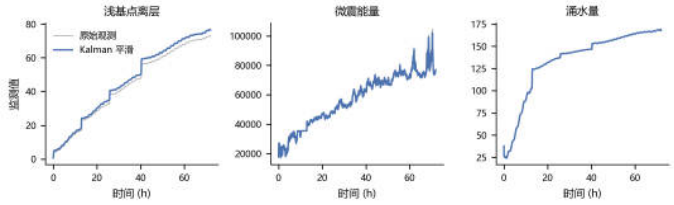


图 9.5　典型监测量卡尔曼滤波前后对比（浅基点离层/微震能量/涌水量）

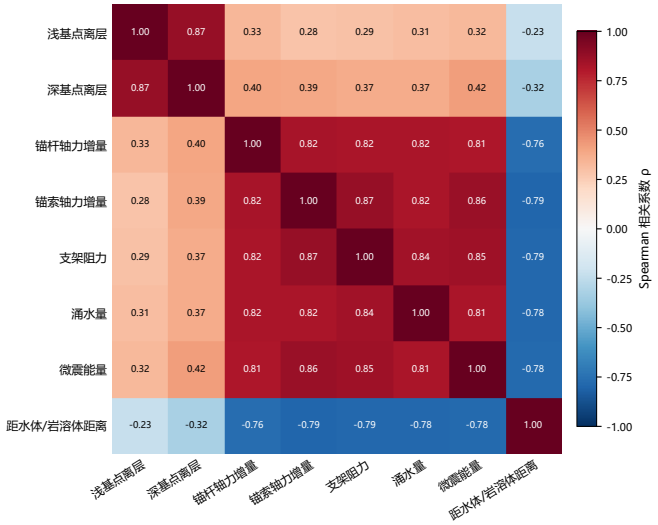


图 9.6　输入特征 Spearman 相关性分析热力图（八维监测特征相关系数）

9.4.3　双模型并行与性能验证

XGBoost 工程主链。XGBoost 以加法模型集成 K 棵回归树 $\hat{y} = \sum_{k=1}^{K} f_k(\tilde{\mathbf{x}})$，第 t 轮按最小化正则化目标

$$\mathcal{L}^{(t)} = \sum_i l\big(y_i,\ \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(\tilde{\mathbf{x}}_i)\big) + \Omega(f_t), \qquad \Omega(f) = \gamma T + \tfrac{1}{2}\lambda\|w\|^2 \tag{9.6}$$

选择分裂点，其中 l 为多分类 softmax 交叉熵损失（四类风险对应四组打分 F_c，$p_c = \mathrm{softmax}(F_c)$），$T$ 为叶子数、w 为叶子权重，γ 与 λ 控制复杂度。主链配置为 600 棵树、最大深度 6、学习率 0.05，测试集准确率 0.9870，具备毫秒级推理能力，承担在线实时预警。

MOA-Transformer 精度校验。MOA-Transformer（多源观测注意力 Transformer）以八步时序窗口 $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{8\times 11}$ 为输入，先把每一步的固定站分量与机器人分量视为两组观测令牌（token），经线性映射得到查询、键、值后执行多头注意力

$$\begin{aligned} \mathrm{Attention}(\mathbf{Q},\mathbf{K},\mathbf{V}) &= \mathrm{softmax}\left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^{\top}}{\sqrt{d_k}}\right)\mathbf{V}, \\ \mathrm{MHA} &= \mathrm{Concat}(\mathrm{head}_1,\ldots,\mathrm{head}_4)\,\mathbf{W}^{O}, \end{aligned} \tag{9.7}$$

源内自注意力捕捉单源时序演化，跨源注意力学习“固定站前兆—机器人实测”的耦合关系，这正是时空互补思想在模型结构层面的体现。网络由两层四头编码器组成，输出经均值池化与 softmax 给出四类风险概率。测试集准确率 0.9918、Macro-F1 达 0.9912，四类风险召回率 98.7%–99.5%。训练过程收敛曲线如图 9.7 所示；XGBoost 四类分类混淆矩阵与候选模型横向性能对比分别见图 9.8 与图 9.9。在线运行时 XGBoost 先行判定，MOA-Transformer 并行校验，二者结果不一致时触发人工复核，体现“性能、稳定性、可解释性和算力”四项综合取舍。

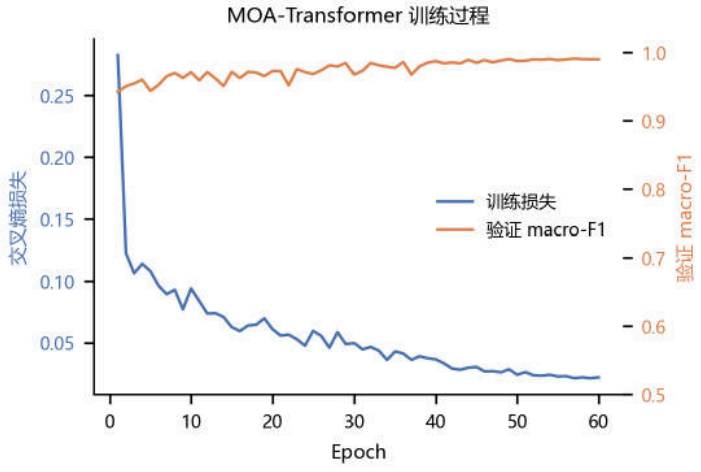


图 9.7　MOA-Transformer 训练过程（交叉熵损失下降，验证 Macro-F1 收敛至 0.99 以上）

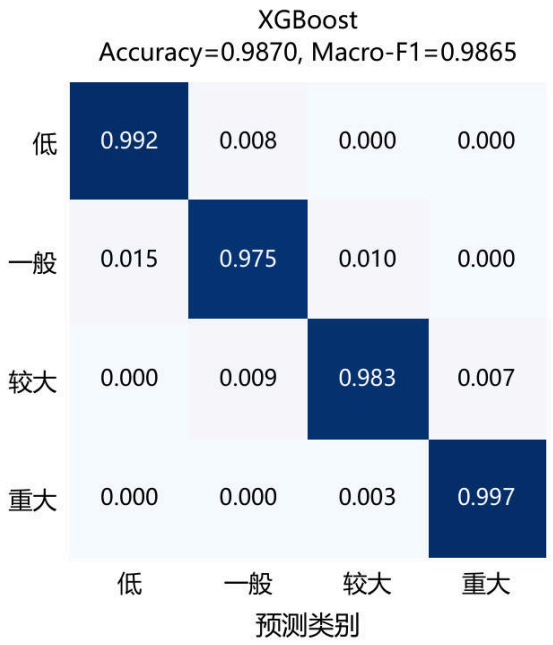


图 9.8　XGBoost 测试集四类风险混淆矩阵（Accuracy=0.9870，Macro-F1=0.9865）

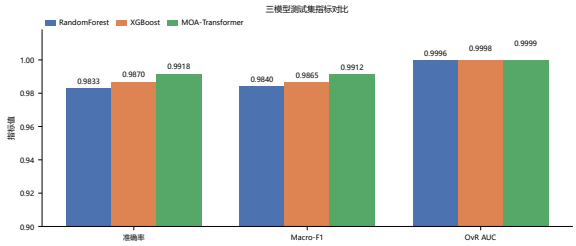


图 9.9　候选模型横向性能对比

9.4.4　SHAP 可解释性输出

基于 TreeExplainer 计算多分类 SHAP 值。对特征集合 F，第 i 维特征的 Shapley 贡献定义为

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|!\,(|F| - |S| - 1)!}{|F|!} \big[f(S \cup \{i\}) - f(S) \big], \tag{9.8}$$

即该特征在所有特征子集上边际贡献的加权平均，树集成模型可精确计算。单个样本的预测由此分解为基准输出与各特征贡献之和，事件中保存触发指标、贡献度、数据质量与判别依据（图 9.10）。输出前三项触发因子（如“涌水量升高＋距水体距离近＋微震能量异常”），使预警不再是“黑箱”而是可解释、可追溯的风险证据；关键特征与风险贡献的非线性依赖关系见图 9.11，模型在不同虚警率下的判别能力由 ROC 曲线（图 9.12）佐证。

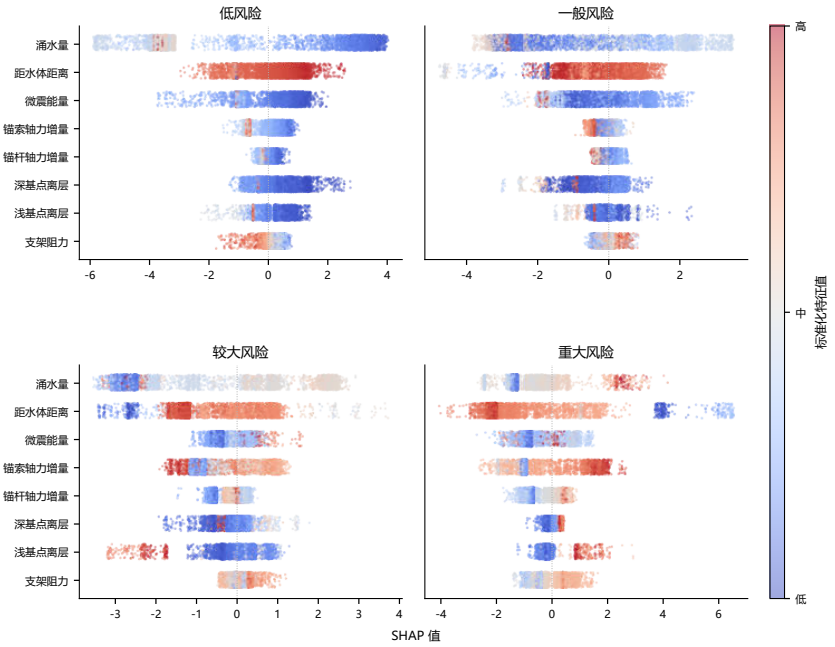


图 9.10　四类风险等级下各特征 SHAP 值分布（低/一般/较大/重大风险）

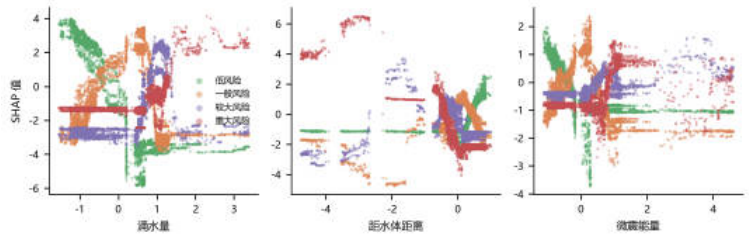


图 9.11　关键特征 SHAP 依赖关系（涌水量/距水体距离/微震能量的非线性贡献）

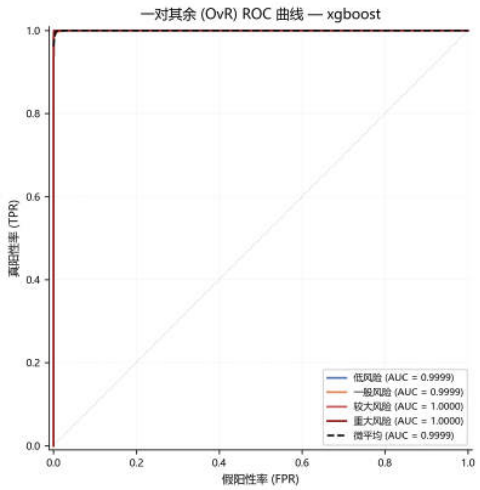


图 9.12　四类风险 ROC 曲线

9.4.5 保守四级判定与规则融合

风险等级分为低风险（蓝）、一般风险（黄）、较大风险（橙）、重大风险（红）四级。生产融合层对模型概率与规则库概率做质量门控加权

$$p^{\text{fus}} = \alpha \cdot p^{\text{model}} + (1-\alpha) \cdot p^{\text{rule}}, \qquad \alpha = g\big(q,\ model_version,\ \text{dist}(\tilde{\mathbf{x}})\big), \tag{9.9}$$

其中门控函数 g 在数据完整、模型版本有效且输入处于训练分布内时取高权重，反之降低模型权重并转向经矿方批准的规则基线。四级判定采用安全工程保守原则：最大类别概率 ≥ 0.5 时取最大概率类别；< 0.5 时在前两类候选中选取较高风险等级，避免模型不确定时低估风险。若数据源不足、质量字段未知、输入超出训练范围或模型版本校验失败，系统不静默输出“低风险”，而是降低置信度、附加质量标记，进入补数、人工复核或规则降级分支。任何单项达到红色硬阈值时，通过安全规则直接升级风险，不由模型概率自动解除告警。判定逻辑如代码 9.2 所示。

```python
LEVELS = ["low", "medium", "high", "critical"]        # 蓝 / 黄 / 橙 / 红
HARD_LIMITS = {"CH4": 1.0, "CO": 24.0}                # 红色硬阈值（% / ppm）

def gate_alpha(quality, version_ok, in_dist):
    """数据完整、版本有效、分布内 -> 高模型权重；否则转向规则基线。"""
    if quality != "good" or not version_ok or not in_dist:
        return 0.3
    return 0.8

def conservative_level(probs):
    """保守判定：概率不足 0.5 时在前两类候选中取较高风险等级。"""
    order = np.argsort(probs)[::-1]
    if probs[order[0]] >= 0.5:
        return order[0]
    return max(order[0], order[1])                    # 前两类中取较高风险

def decide(features, hard_values, model, rules, model_meta):
    q = features["quality"]
    in_dist = model.in_distribution(features.window)
    alpha = gate_alpha(q, model_meta.version_ok, in_dist)
    p_model = model.predict_proba(features.window)    # MOA/XGB 主输出
    p_rule = rules.probabilities(hard_values)         # 确定性规则基线
    p_fus = alpha * p_model + (1.0 - alpha) * p_rule
    level = conservative_level(p_fus)
    for name, value in hard_values.items():           # 硬阈值只升不降
        if name in HARD_LIMITS and value >= HARD_LIMITS[name]:
            level = LEVELS.index("critical")
    confidence = float(p_fus[level]) * alpha if alpha > 0 else 0.0
```

```
    if q != "good" or not in_dist:
        confidence *= 0.5                                  # 降低置信度并标记复核
        return level, confidence, {"review": True, "gated_by": "rules+model"}
    return level, confidence, {"review": False, "gated_by": "model"}
```

代码 9.2　保守四级判定与门控融合（感知预警智能体判定逻辑）

9.4.6　从预警到处置的闭环

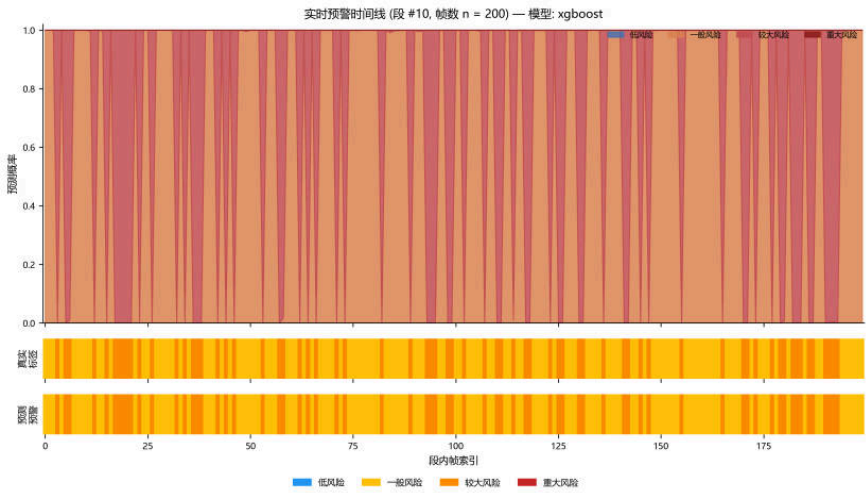


图 9.13　实时预警时间线示例（XGBoost 四类预测概率、真实标签与预测预警对比，200 帧时序数据）

每次推理生成结构化结果包（时间戳、对象编号、四类概率、风险等级、置信度、前三项触发因子、模型版本、质量标记），经第三章所述六智能体链处理后直接向机器人派发处置任务（加密监测、应急清障、人员搜寻等）；机器人执行后回传处置凭证，经审核后作为复盘样本与模型再训练候选——现场处置凭证只回写闭环数据库，不直接在线修改模型参数，避免在线反馈污染生产模型。图 9.13 给出了 200 帧连续监测数据上的实时预警时间线示例：四类预测概率、真实标签与预测预警高度一致，预警提前量与响应时效满足早期识别、动态研判、主动精准预警的工程要求。

第十章　核心技术指标与创新点

10.1　主要技术指标

本方案的主要技术指标按移动通行、掘进清障、探测感知、导航控制、通信调度、预警算法、防爆安全、灾害监测八类汇总于表 10.1，作为测试报告与验收的依据。

表 10.1　主要技术指标汇总

指标类别	指标名称	目标值
移动通行	陆基模式	防爆履带差速转向，人字纹深度 20–30 mm
移动通行	水基模式	螺旋推进，水深 ≤20 cm 自动切换
移动通行	履带升降行程	≥150 mm，正/倒三角姿态动态切换
掘进清障	掘进驱动方式	双液压油缸驱动，可前后移动与收纳
掘进清障	切削滚筒	表面均布切削齿，转速自适应，过载保护
掘进清障	推土铲	双铲侧向旋转排导碎屑，清障/推土双姿态
掘进清障	清障效率	坍塌通道分钟级疏通，多系统协同控制
探测感知	传感器种类	9 大类，多模态融合，无功能冗余
探测感知	气体检测	CH_4/CO/O_2 ＋温湿度，T90≤20 s，精度 ±3%
探测感知	AI 环视相机	4 台，边缘端推理（裂缝/渗水/人员），秒级响应
探测感知	多自由度平台	300° 水平旋转，俯仰 ±30°，偏转 ±20°，微调 ±5°
导航控制	导航方式	激光雷达-视觉融合 SLAM，定位精度 ≤0.1 m
导航控制	工作模式	远程遥控＋自主巡检＋应急清障三模式
导航控制	续航	≥4 h 连续作业

指标类别	指标名称	目标值
通信调度	通信方式	无线数传＋本地断网缓存＋ OTA 远程升级
通信调度	调度接口	AI Agent 标准 API（HTTP/MQTT），自然语言任务解析，工单全闭环
通信调度	数据契约	7 类数据对象（监测窗口/风险结果/解释证据/设备状态/清障状态/处置任务/闭环反馈）
预警算法	主链模型	XGBoost，毫秒级推理，准确率 ≥0.98（实测 0.9870）
预警算法	校验模型	MOA-Transformer，八步时序窗口，准确率 ≥0.99（实测 0.9918，Macro-F1 0.9912）
预警算法	可解释性	SHAP 多分类解释，输出前三项触发因子
预警算法	风险等级	四级（蓝/黄/橙/红），保守判定原则
防爆安全	防爆等级	矿用防爆型，隔爆腔体独立密封，本安充电
防爆安全	安全机制	气体超限/通信中断/切削过载/故障自动停机；六级软件分层降级
灾害监测	监测类型	瓦斯/冲击地压顶板/水害/火灾四类，动态评估
灾害监测	应急处置	坍塌通道切削清障，应急响应由分钟级压缩至秒级
灾害监测	数据融合	移动—固定时空互补融合，标准格式接入预警平台

10.2 核心创新点

创新 1： **水陆两栖双驱动：**履带＋螺旋复合推进，水深 ≤20 cm 自动切换，实现井工积水、淤泥场景全场景通行，突破传统履带机器人积水淤泥区易淤堵陷滞的瓶颈。

创新 2： **履带自适应升降越障：**升降行程 ≥150 mm，正三角与倒三角姿态动态切换，通过姿态调整突破固定式履带底盘的越障高度限制。

创新 3： **液压掘进清障一体化（核心）：**首创将液压驱动掘进机构、带齿切削滚筒、侧向

旋转推土铲集成于探测机器人前部，三大子系统协同实现坍塌通道分钟级疏通，使机器人从单纯“感知型”升级为“感知＋执行型”异构具身智能体，填补井工灾后应急清障智能装备空白。

创新 4： **多模态探测一体化集成：**集视觉、激光雷达、气体、红外、探针五类感知能力于一体，9 大类传感器精确定位、协同工作，实现多维数据交叉验证。

创新 5： **AI 边缘推理：**边缘端实时识别裂缝、渗水、人员闯入三类异常，仅异常数据回传，秒级响应，模型支持 OTA 远程更新。

创新 6： **掘进清障多系统协同控制：**切削负载自适应调节转速扭矩，清障全程气体与巷道壁稳定性联动监测，具备过载保护与危险暂停机制。

创新 7： **AI Agent 调度接口与数据契约原生设计：**统一数据契约（七类数据对象）与标准 API，支持自然语言交互与全流程工单闭环，可直接融入矿井级 AI Agent 调度体系，支持多机分区巡检与协同清障。

创新 8： **软件分层降级机制：**通信中断、AI 推理失败、预警模型不可用、清障机构故障、导航异常、高风险写操作六级降级，任何单模块故障都不掩盖风险、不静默输出“无异常”。

创新 9： **移动—固定时空互补与“预警即处置”闭环：**固定站时间连续与机器人空间连续互补融合构建无盲区监测体系；预警生成后 AI Agent 直接派发任务自主执行，将“预警 → 人工确认 → 人工处置”的分钟级响应压缩为“预警 → 自主执行”的秒级响应。

10.3 竞争优势

与现有矿用巡检机器人相比，本产品的差异化优势体现在：地形适应上以水陆两栖＋履带升降实现全场景通行；功能定位上以“探测＋清障”一体化覆盖感知与执行；应急处置上具备分钟级坍塌通道疏通能力；探测能力上以 9 大类传感器多模态融合超越单一摄像头＋基础气体传感器；智能水平上具备自主巡检、遥控、应急清障三模式与 AI Agent 调度接口；数据价值上以时空互补融合直接接入灾害预警平台，而非数据孤立。

第十一章　实施计划与保障

11.1　实施阶段与里程碑

项目总周期 12 个月，分四个实施阶段推进，关键里程碑 M1–M4 如图 11.1 所示，每个里程碑节点进行正式评审与验收，未通过不进入下一阶段。

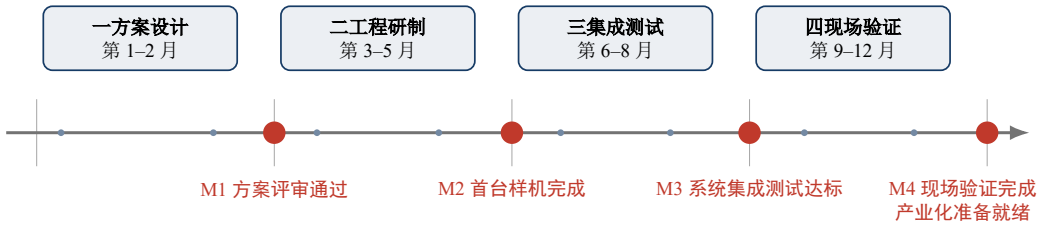


图 11.1　四阶段实施计划与关键里程碑

表 11.1　实施阶段主要工作与产出

阶段	时间	主要工作	阶段产出
方案设计	第 1–2 月	需求调研与矿井场景分析、总体方案设计、核心机构原理验证（水陆两栖/履带升降/液压掘进清障）、防爆方案论证、传感器选型、预警算法对接方案设计	需求规格说明书、总体方案设计报告、原理验证报告、防爆方案论证报告、数据契约规范
工程研制	第 3–5 月	三维建模与工程图纸、防爆壳体加工、液压掘进清障装置研制、电控硬件制板、嵌入式软件开发、9 大类传感器集成、预警模型部署联调、首台样机组装调试	全套工程图纸、BOM 清单、首台功能样机、嵌入式软件 V1.0、预警模型包、装配工艺说明书
集成测试	第 6–8 月	系统集成与多传感器融合调试、自主导航与 AI 推理测试、掘进清障协同控制测试、地面监控平台开发、AI Agent 调度接口与预警平台联调、软件分层降级测试、模拟巷道综合测试	优化后样机、地面监控平台、AI 调度接口、预警联调报告、清障测试报告、综合测试报告、操作手册
现场验证	第 9–12 月	矿井现场示范应用（巡检＋应急清障）、移动—固定数据融合验证、MA 认证准备与送检、小批量试产与工艺固化、用户反馈收集与最终优化	现场验证报告、数据融合验证报告、MA 认证资料、试产样机、产业化推广方案

11.2　人力资源配置

团队按“机械—液压—电控—软件—算法—平台—测试—认证”完整岗位链配置：项目负责人 1 名（整体规划、进度管控、矿方对接），机械结构工程师 2 名（机械设计、三维建模、防爆壳体与清障机构设计、样机组装），液压工程师 1 名，电控硬件工程师

1 名，嵌入式软件工程师 1 名，AI 算法工程师 1 名（边缘 AI 模型、预警算法对接），平台/通信工程师 1 名（地面平台、AI Agent 调度接口、数据契约），测试工程师 1 名，防爆/认证工程师 1 名。

11.3 预算规划

项目总预算 100.0 万元，构成见表 11.2。

表 11.2 项目预算规划

预算科目	金额（万元）	说明
人员经费	48.0	项目团队 12 个月人力成本（含液压工程师）
材料费	15.0	样机 BOM 物料、防爆元器件、传感器、液压元件
加工费	10.0	防爆壳体加工、机械加工、PCB 制板
测试与试验费	8.0	模拟巷道测试、防爆测试、液压系统测试、现场验证、算法联调
软件与云服务费	3.0	开发工具、地面平台服务器、OTA 平台、模型部署
知识产权与认证费	6.0	专利申请、MA 认证、检测费用
差旅与现场费	5.0	矿方调研、现场部署、差旅
不可预见费	5.0	按总预算约 5% 计提
合计	**100.0**	—

11.4 风险管理

项目建立风险登记册并每周更新状态，主要风险及应对策略见表 11.3。

表 11.3 主要风险与应对策略

编号	风险描述	等级	应对策略
R1	防爆设计不达标，MA 认证无法通过	高	前期聘请防爆专家评审，严格按矿用防爆标准设计；提前与认证机构沟通，预留认证整改时间
R2	水陆两栖机构在积水淤泥中可靠性不足	高	前期充分原理验证与模拟巷道积水淤泥测试；关键密封件选用矿用高可靠性产品
R3	履带自适应升降机构故障率高	中	核心部件冗余设计，升降机构双重限位保护；充分寿命测试，易损件快速更换设计

编号	风险描述	等级	应对策略
R4	液压掘进清障机构切削能力不足或可靠性差	高	前期液压仿真与原理验证、滚筒切削试验；液压元件选用矿用高可靠性产品，过载保护完善
R5	清障作业中巷道二次坍塌或气体超限	高	清障全程气体与巷道壁稳定性联动监测，异常立即暂停；AI 环视相机实时监测裂缝扩展与掉矸；制定清障作业安全规程
R6	AI 边缘推理在井下复杂环境识别率低	中	采集矿井真实图像数据训练并按岩性优化；人机协同确认机制，持续迭代模型
R7	井下通信不稳定，数据回传中断	中	通讯舱本地断网缓存、恢复续传；关键告警多通道冗余传输；软件分层降级保障本地告警
R8	激光雷达在高粉尘环境下测距衰减	中	激光雷达与双目视觉融合互补；选用工业级高穿透激光雷达
R9	气体检测响应速度或精度不达标	中	微型气泵主动抽气加快响应；选用矿用认证级传感器并定期标定
R10	智能体幻觉导致无依据处置方案	中	结构化契约约束，处置建议必须引用来源证据；确定性规则兜底，高风险写操作人工审批，智能体不直接执行现场命令
R11	项目团队人员变动，关键岗位缺失	中	关键岗位 AB 角，文档规范化管理，核心模块代码评审
R12	MA 认证周期长，影响项目进度	低	第 9 月启动认证准备并提前送检，认证与现场验证并行推进

11.5 质量保障与项目管理

文档质量执行“编制—审核—批准”三级评审，防爆与液压文档经专项专家审核；**设计质量**执行三维建模 → 干涉检查 → 防爆结构校核 → 液压系统仿真 → 有限元分析 → 图纸输出流程；**代码质量**执行编码规范检查、单元测试、代码评审、集成测试四级保证，版本管理使用 Git，预警模型包（模型＋预处理参数＋版本号）不可分割、变更需重新评审；**测试质量**制定测试计划与用例，各阶段执行功能、性能、防爆、液压、可靠性、软件降级测试，缺陷 100% 闭环；**样机质量**执行装配工艺卡与独立档案，防爆关键工序与液压系统 100% 检验。

项目管理机制包括：阶段评审机制（每阶段正式评审，防爆与液压专项评审）、周例会机制、里程碑管理（M1–M4 准入准出标准）、风险跟踪机制与变更管理机制（变更申请—影响评估—审批—实施—验证）。沟通与汇报机制上，每周提交周报、每月提交月报，每个里程碑向指导教师与合作矿方正式汇报并演示样机；指定专人负责与合作矿井对接现场验证进展与需求反馈，确保产品开发贴合矿井实际需求。

第十二章　续航与作业能力综合论证

井下巡检机器人需同时满足巷道内长时间连续作业、4 电机驱动、树莓派与激光雷达等高位载荷供电以及安全可靠运行等要求，动力系统设计不仅需要考虑瞬时功率输出能力，还需综合考虑续航时间、电池安全性以及不同巡检模式下的能量消耗。

12.1　动力电池系统设计与选型

本装置采用动力电池组直接驱动方案，通过电池组分别为行走电机、底盘控制板、树莓派上位机及感知载荷供电。整机采用 12 V/3S 锂离子电池组作为核心动力源，满电电压 12.6 V，欠压保护阈值 10 V（低于 10 V 时主控强制禁行），标称电压平台与电机驱动器、电源转换电路的供电窗口匹配良好。整机供电体系见表 12.1。

表 12.1　整机供电体系

供电导轨	设计参数	供电对象
12 V 电池组	3S 锂电，12.6 V 满电，≥10 V 有效区间	4 路电机驱动（AT8236，连续 4 A/峰值 6 A）
5 V 主电源	RT8289GSP 降压（5 V/5 A，效率 90%）	底盘主控、传感器、OLED、蓝牙等
5 V 上位机电源	Type-C 转接（可过 3 A 以上电流）	树莓派 4B 上位机
3.3 V 电源	RT9013 LDO	STM32 主控、MPU6050 姿态传感器

12.1.1　电池类型与参数选型依据

电池选型主要基于以下三个方面：

1. **功率输出能力满足巡检需求**：3S 串联结构将单体平台电压提升至 12 V，满足 4 路直流减速电机（13 线霍尔编码器、30:1 减速比）及激光雷达、摄像头等载荷的电压需求；电池具备过充、过放保护功能，驱动系统采用 AT8236 单通道 H 桥组件，具备过流、短路、欠压与过温保护，共同保障动力安全。

2. **电压窗口匹配电源系统**：3S 电池满电 12.6 V、放电压差平稳，高于底盘板规定的 10 V 禁行阈值，整车可用；主控通过 ADC 以 11:1 电阻分压采集电池电压（多采样取平均），并经电量换算（10.0 V 对应 0%、12.7 V 对应 100%）实时显示剩余电量，配合蜂鸣器与 APP 双层提示。
3. **安全性满足井下复杂环境要求**：井下环境存在振动、粉尘与潮湿工况，动力系统设置电池组过放保护（电池本体）与主控软件禁行保护（软件）双重防线；当电池电压低于 10.8 V 时提示尽快充电，低于 10 V 时主控立即 PWM 清零、禁止电机运动，防止过放损坏电芯。

12.1.2　动力系统功耗分析与能量预算

根据井下巡检任务特点，主要考虑低速巡检、巡检＋图传、建图巡航三种典型工况。各工况主要负载为：4 路电机驱动器（AT8236 ＋直流减速电机）、树莓派 4B 上位机（峰值 3 A 电流的 5 V 通道）、激光雷达（镭神 M10P，5 V 供电）、摄像头与补光灯、底盘主控（STM32 ＋ IMU ＋ OLED）。各工况平均功率估算见表 12.2。

表 12.2　典型巡检工况功耗预算

典型工况	主要负载	平均功率估算
低速巡检	4 路电机（0.2–0.3 m/s）、主控、激光雷达	约 14–16 W
巡检＋图传	低速巡检基础上叠加摄像头、补光灯与 WiFi 图传	约 18–22 W
建图巡航	全负载（电机＋雷达＋图传＋补光）	约 22–26 W

以 12 V/3S 锂电组（标配容量按厂家可选配置）为例，取电池组可用容量系数 $\eta = 0.82$（扣除 10 V 禁行电压以下余量及内阻损耗）、放电中途平均电压 $\bar{U} = 11.3\,\mathrm{V}$ 估算，续航时间为

$$T \approx \frac{C\,\eta\,\bar{U}}{P} \tag{12.1}$$

式中 C 为电池组标称容量（Ah），P 为工况平均功率（W）。以标称容量 5 Ah 配置为例：低速巡检工况（16 W）理论续航约 2.9 小时，巡检＋图传工况（20 W）约 2.3 小时，建图巡航工况（24 W）约 1.9 小时，能够覆盖井下巷道单班巡检与建图作业时长需求；若采用更大容量电芯配置（如 10 Ah），续航可同比提升，满足长巷道、多往返巡检需求。

12.2 续航性能指标评估

12.2.1 低速巡检工况续航估算与验证

低速巡检为本装置的基本作业模式，机器人按地图路径以 0.2–0.3 m/s 匀速行驶，各巡检点停靠间隔采样。该模式平均电流约 1.3–1.4 A（12 V 电压平台），以 5 Ah 容量配置计算理论续航约 2.9 小时，显著优于“单次充电压满足 2 小时巡检”的指标要求；同时主控在电量低于阈值时蜂鸣器预警，APP 端同步提示，操作人员可提前返回充电。现阶段样机已在模拟巷道完成巡航测试，控制链路连续运行稳定，可支撑后续长时续航标定。

12.2.2 建图/全负载工况能耗分析与续航预估

建图工况与全程图传巡检属于较高负载模式，需同时开启激光雷达、摄像头、补光与树莓派全功率运行，平均功率约 22–26 W，续航约 1.6–1.9 小时（5 Ah 配置）。由于井下巡检通常逐巷进行，实际作业可采用“分巷分次建图、先建图后巡检”的间歇式作业策略，即在低功耗巡检模式完成日常巡检测量，非连续开启高负载全功率模式，从而在有限电量下最大化巡检里程。

12.3 充电性能与电池管理

12.3.1 充电方案论证

针对井下巡检“作业时段集中、充电窗口有限”的工况，动力系统采用恒压限流充电策略（CC-CV），即充电初期恒流至设定电压后转恒压充电，提升充电效率并保证电池安全。充电器按电池组标称容量适配输出电流（建议 ≥0.4C），以 5 Ah 配置配 2 A 充电器计算，充电电流约 0.4C，充至 80% 容量约需 1.8 小时，有效达成“常规充电状态 2 小时内充至 80% 以上”的指标，满足班组交班后快速补电需求。

12.3.2 过流、过放、短路等保护功能设计

本装置电池保护功能采用“电池板硬件保护＋主控软件保护”两级联动的设计，见表 12.3。

充电过程中 BMS/保护板实时监测电芯状态，过温即限制充电电流；主控软件保护

表 12.3 电池保护功能设计

保护层级	保护项目	阈值/逻辑与执行动作
电池保护板	过充保护	单体电压达上限（约 4.25 V），切断充电回路
电池保护板	过放保护	单体电压低于下限（约 2.8 V），切断放电回路
电池保护板	短路/过流保护	输出电流异常陡增，快速关断输出
主控软件	低压预警	电池电压 10.5–10.8 V 区间，OLED 提示、蜂鸣器第一次报警
主控软件	禁行保护	电池电压低于 10 V，蜂鸣器再次报警、PWM 清零强制失能
主控软件	上电保护	上电 10 秒内电机强制失能，防止误动作

独立于电池保护板工作，形成双保险，从多维度保障电池组在长期井下连续作业场景下的可靠性与使用寿命。

12.4 综合能耗与节能策略分析

在实际应用中，续航能力不仅取决于电池容量，还受到行驶效率、巡检路径及能源管理策略影响。本装置从软件与调度层面提出以下节能策略。

12.4.1 节能策略设计

1. **按需启用载荷**：激光雷达、摄像头、补光灯由任务状态机统一控制，待机与转场阶段自动关闭补光灯与图传，仅在定点检测与建图阶段启用，降低平均功耗；
2. **优化巡检路径**：采用多点巡航（TEB 局部规划器）按“先近后远、一次进巷完成多点”的次序组织巡检任务，避免重复往返行驶；
3. **低速节能巡航**：巡检模式下行走速度自动限制为 0.2–0.3 m/s（遥控上限 500 mm/s），低速巡航使电机运转于最高效区，地面冲击小且功耗低；
4. **低电保护性返航策略**：电量降至 20% 以下时提示返航，10 V 禁行保护兜底，确保每次作业安全收尾，杜绝电量耗尽滞留巷道。

12.4.2 节能效果量化分析

节能策略汇总见表 12.4。

表 12.4 节能策略效果估算

节能措施	主要作用	预计效果
载荷按需启用	减少补光/图传无效工作时间	降低功耗约 10%–15%
路径优化	减少重复巡检与无效行驶	同等电量提升巡检里程约 5%–10%
低速节能巡航	电机运转于高效区，减少损耗	降低行走能耗约 5%–10%

12.4.3 整机综合能耗评估

综上，低速巡检工况整机平均功率约 16 W，5 Ah 配置下理论续航约 2.9 小时；叠加载荷按需启停与路径优化策略，实际巡检作业时长可进一步延长。后续可通过采用更高能量密度电芯、动态降额及任务调度优化进一步提升续航，满足长巷道、多班组连续巡检需求。

附录一：团队研发成果证明材料

本附录汇集团队近年来在巷道围岩控制、灾害监测与智能装备方向取得的代表性成果证明材料，包括已授权发明专利证书、软件著作权登记证书、代表性学术论文首页及相关荣誉证书，作为本方案研发基础与技术积累的佐证。

一、已授权发明专利证书



证书号第8933651号

专利公告信息

发明专利证书

发 明 名 称：一种煤矿巷道煤层掘进卸压装置和方法

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221116 江苏省徐州市南郊翟山

发 明 人：李桂臣;孙元田;王尚;杨森;郝浩然;李菁华;陈聪;田博文;卢忠诚

专 利 号：ZL 2024 1 0087694.0　　授权公告号：CN 117868821 B

专利申请日：2024年01月21日　　授权公告日：2026年05月12日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：李桂臣;孙元田;王尚;杨森;郝浩然;李菁华;陈聪;田博文;卢忠诚

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。

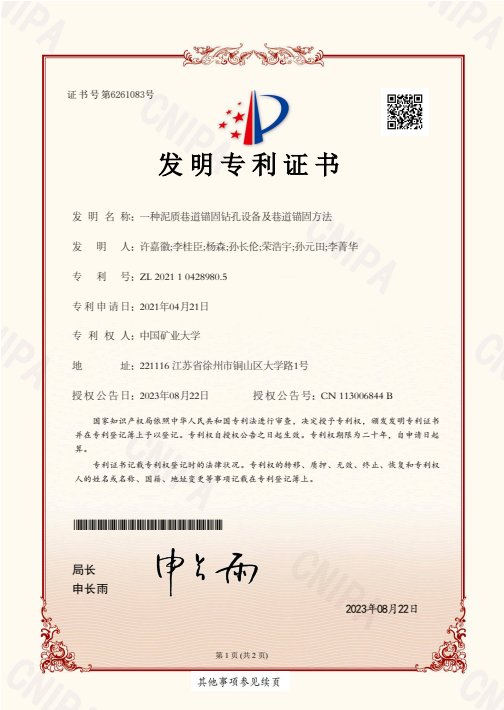
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年05月12日

第 1 页 (共 1 页)

（1）一种煤矿巷道煤层掘进卸压装置和方法发明专利证书（证书号第 8933651 号）



证书号第6261083号

发明专利证书

发 明 名 称：一种泥质巷道锚固钻孔设备及巷道锚固方法

发 明 人：许嘉徽;李桂臣;杨森;孙长伦;荣浩宇;孙元田;李菁华

专 利 号：ZL 2021 1 0428980.5

专利申请日：2021年04月21日

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221116 江苏省徐州市铜山区大学路1号

授权公告日：2023年08月22日　　授权公告号：CN 113006844 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

2023年08月22日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

（2）一种泥质巷道锚固钻孔设备及巷道锚固方法发明专利证书（证书号第 6261083 号）



证书号第9211469号

发明专利证书

专利公告信息

发 明 名 称：一种煤巷锚杆支护锚固厚度确定方法

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221000 江苏省徐州市大学路1号

发 明 人：孙元田;李桂臣;杨森;邵泽宇;李菁华;何风贞;王尚;田博文;沃小芳;荣浩宇

专 利 号：ZL 2025 1 1219700.4　　授权公告号：CN 121211672 B

专利申请日：2025年08月28日　　授权公告日：2026年08月21日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：孙元田;李桂臣;杨森;邵泽宇;李菁华;何风贞;王尚;田博文;沃小芳;荣浩宇

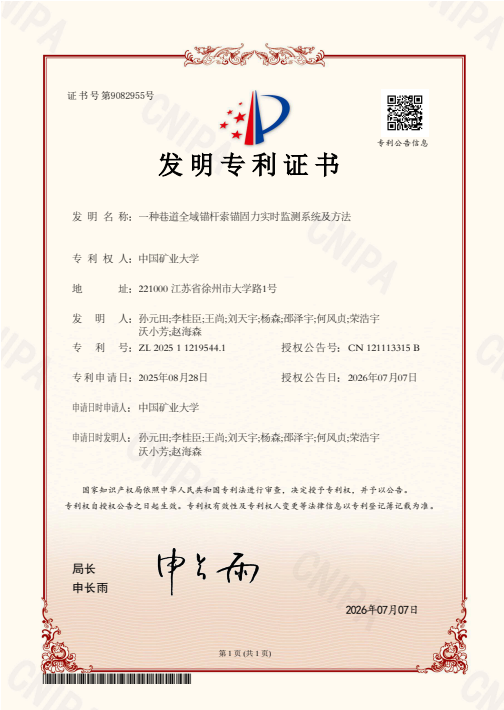
国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年08月21日

第 1 页 (共 1 页)

（3）一种煤巷锚杆支护锚固厚度确定方法发明专利证书（证书号第 9211469 号）



证书号第9082955号

发明专利证书

专利公告信息

发 明 名 称：一种巷道全域锚杆索锚固力实时监测系统及方法

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221000 江苏省徐州市大学路1号

发 明 人：孙元田;李桂臣;王尚;刘天宇;杨森;邵泽宇;何风贞;荣浩宇;沃小芳;赵海森

专 利 号：ZL 2025 1 1219544.1　　授权公告号：CN 121113315 B

专利申请日：2025年08月28日　　授权公告日：2026年07月07日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：孙元田;李桂臣;王尚;刘天宇;杨森;邵泽宇;何风贞;荣浩宇;沃小芳;赵海森

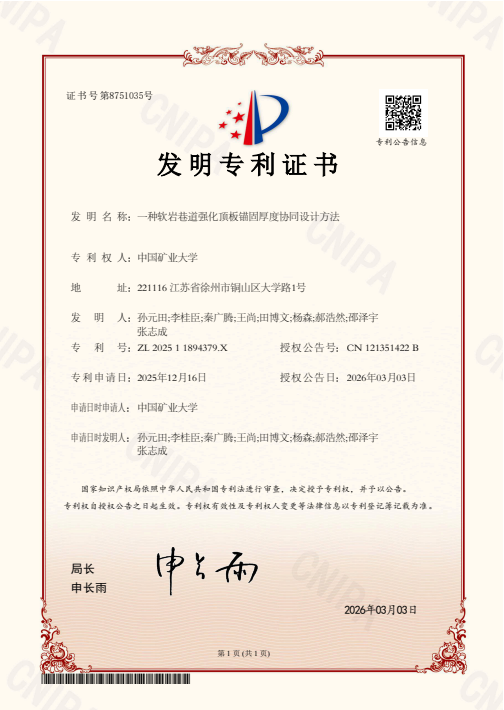
国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年07月07日

第 1 页 (共 1 页)

（4）一种巷道全域锚杆索锚固力实时监测系统及方法发明专利证书（证书号第 9082955 号）



证书号第8751035号

发明专利证书

专利公告信息

发 明 名 称：一种软岩巷道强化顶板锚固厚度协同设计方法

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221116 江苏省徐州市铜山区大学路1号

发 明 人：孙元田;李桂臣;秦广腾;王尚;田博文;杨森;郝浩然;邵泽宇;张志成

专 利 号：ZL 2025 1 1894379.X　　授权公告号：CN 121351422 B

专利申请日：2025年12月16日　　授权公告日：2026年03月03日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：孙元田;李桂臣;秦广腾;王尚;田博文;杨森;郝浩然;邵泽宇;张志成

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年03月03日

第 1 页 (共 1 页)

（5）一种软岩巷道强化顶板锚固厚度协同设计方法发明专利证书（证书号第 8751035 号）



证书号第9083286号

发明专利证书

专利公告信息

发 明 名 称：采动巷道关键层调控与厚层承载协同适应支护方法及系统

专 利 权 人：中国矿业大学

地　　址：221116 江苏省徐州市铜山区大学路1号

发 明 人：孙元田;李桂臣;王尚;郝浩然;杨森;邵泽宇;田博文;韩跃博;滑旭超

专 利 号：ZL 2026 1 0562010.7　　授权公告号：CN 122106611 B

专利申请日：2026年04月27日　　授权公告日：2026年07月07日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：孙元田;李桂臣;王尚;郝浩然;杨森;邵泽宇;田博文;韩跃博;滑旭超

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年07月07日

第 1 页 (共 1 页)

（6）采动巷道关键层调控与厚层承载协同适应支护方法及系统
发明专利证书（证书号第 9083286 号）



证书号第8916085号

专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种巷道围岩全域分布式薄膜传感器监测系统及方法

专利权人：中国矿业大学

地址：221000 江苏省徐州市大学路1号

发明人：孙元田;李桂臣;王尚;秦广腾;李菁华;杨森;郝浩然;许嘉徽;邵泽宇;田博文

专利号：ZL 2025 1 1219164.8 授权公告号：CN 121140594 B

专利申请日：2025年08月28日 授权公告日：2026年05月01日

申请日时申请人：中国矿业大学

申请日时发明人：孙元田;李桂臣;王尚;秦广腾;李菁华;杨森;郝浩然;许嘉徽;邵泽宇;田博文

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2026年05月01日

第 1 页 (共 1 页)

（7）一种巷道围岩全域分布式薄膜传感器监测系统及方法
发明专利证书（证书号第 8916085 号）



证书号第8150089号

专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种短壁充填开采的封堵装置及封堵方法

专利权人：内蒙古裕兴矿业有限公司;中国矿业大学

地址：016064 内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克旗棋盘井矿区兴毅煤矿

发明人：李修忠;孙建西;李桂臣;杨森;杨圣伟;张元;谢成军;孟现臣;张召玉;李懿

专利号：ZL 2022 1 0502533.4 授权公告号：CN 114737972 B

专利申请日：2022年05月10日 授权公告日：2025年08月12日

申请日时申请人：内蒙古裕兴矿业有限公司;中国矿业大学

申请日时发明人：李修忠;孙建西;李桂臣;杨森;杨圣伟;张元;谢成军;孟现臣;张召玉;李懿

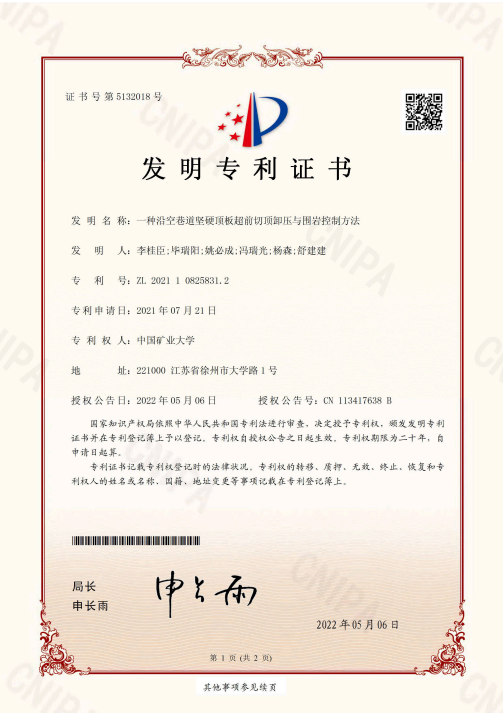
国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

2025年08月12日

第 1 页 (共 1 页)

（8）一种短壁充填开采的封堵装置及封堵方法
发明专利证书（证书号第 8150089 号）



证书号第5132018号

发明专利证书

发明名称：一种沿空巷道坚硬顶板超前切顶卸压与围岩控制方法

发明人：李桂臣;毕瑞阳;姚必成;冯瑞光;杨森;舒建建

专利号：ZL 2021 1 0825831.2

专利申请日：2021年07月21日

专利权人：中国矿业大学

地址：221000 江苏省徐州市大学路1号

授权公告日：2022年05月06日 授权公告号：CN 113417638 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

2022年05月06日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

（9）一种沿空巷道坚硬顶板超前切顶卸压与围岩控制方法
发明专利证书（证书号第 5132018 号）

二、软件著作权登记证书



中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第12818346号

软件名称：富水煤岩改性强化控制系统 V1.0

著作权人：李桂臣；崔金声；左宇军；王明仲；孙元田；马振乾；李钊；李菁华；郝浩然；杨森

开发完成日期：2023年08月10日

首次发表日期：未发表

权利取得方式：原始取得

权利范围：全部权利

登记号：2024SR0414473

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

2024年03月20日

（1）富水煤岩改性强化控制系统
计算机软件著作权登记证书



中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第8703218号

软件名称：巷道快速掘进智能围岩控制系统 V1.0

著作权人：李桂臣；孙元田；许嘉徽；柴浩宇；李菁华；孙长伦；杨森；沃小芳

开发完成日期：2021年10月18日

首次发表日期：2021年10月20日

权利取得方式：原始取得

权利范围：全部权利

登记号：2021SR1980592

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

No. 0958020

2021年12月02日

（2）巷道快速掘进智能围岩控制系统 V1.0
计算机软件著作权登记证书



中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第8703223号

软件名称：软岩多场多相多尺度演化探测关联系统 V1.0

著作权人：李桂臣；孙元田；柴浩宇；李菁华；许嘉徽；孙长伦；杨森；沃小芳

开发完成日期：2021年10月22日

首次发表日期：2021年10月25日

权利取得方式：原始取得

权利范围：全部权利

登记号：2021SR1980597

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

No. 0958036

2021年12月02日

（3）软岩多场多相多尺度演化探测关联系统 V1.0
计算机软件著作权登记证书

三、代表性学术论文（首页）



煤炭科学技术
Coal Science and Technology

李桂臣，沃小芳，杨　森，等. 巷道突水垮塌破碎岩体运移特性与堆堵机理[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(2): 413-428.

LI Guichen, WO Xiaofang, YANG Sen, *et al*. Transport characteristics and blockage mechanism of fractured rock mass during water inrush process in roadway[J]. Coal Science and Technology, 2026, 54(2): 413-428.

移动扫码阅读

巷道突水垮塌破碎岩体运移特性与堆堵机理

李桂臣[1,2]，沃小芳[1,2]，杨　森[1,2]，孙元田[1,2]，李善华[1,2]，郝浩然[1,2]，邵泽宇[1,2]

（1. 中国矿业大学矿业工程学院，江苏 徐州　221116；2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室，江苏 徐州　221116）

摘　要：矿井突水垮塌事故是破坏性巨大的地质灾害之一，其中流固两相流的运动与堆积行为直接决定了突水的演化规模与治理难度。矿井突水垮塌事故中，准确预测不同地质背景条件下碎石流动与堆积特征对突水的治理至关重要。突水垮塌事故造成垮塌假体在井下做运和堆积，使垮塌突情更加复杂。通过室内物理模型试验和 CFD-DEM 耦合数值模拟，系统研究了不同水压及巷道倾角条件下的矿井突水垮塌事故中碎石运移与堆积特征，研究通过物理模型试验定性再现了碎石从突水口涌出至最终稳定的动态过程，并结合流固耦合模拟揭示了垮塌假体宏细观力学机制。研究结果显示，碎石运移堆积过程呈现前步堆积、快速扩散与稳定堆积 3 个阶段，且堆积体基序与初始基序保持一致。随着水压增大，突水口下方形成“M”形双峰堆积，巷道倾角增大则使堆积体扩散距离变远、堆积更集中、横向养更明显、堆积高度增加。在宏观分布上，颗粒粒径呈现显著分选特征，即大颗粒堆积于堆积体前端与外围，小颗粒分布于后端与底部。在细观接触特征分析上，堆积体配位数云图整体呈“四周低、中心高”的分布模式，且其峰值随水压与倾角的增大均呈现先增后降的趋势。对多因素影响下碎石堆积运移特征的研究，可为矿井突水垮塌事故中救援通道的快速构建方案优化与施工安全风险评估提供关键的数据支持和理论指导。

关键词：突水垮塌；流固耦合；流动特性；颗粒分选；堆堵机理

中图分类号：TD12　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253-2336(2026)02-0413-16

Transport characteristics and blockage mechanism of fractured rock mass during water inrush process in roadway

LI Guichen[1,2], WO Xiaofang[1,2], YANG Sen[1,2], SUN Yuantian[1,2], LI Jinghua[1,2], HAO Haoran[1,2], SHAO Zeyu[1,2]

(1. *School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, China; 2. *Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou* 221116, China)

Abstract: Mine water inrush and collapse accidents are among the most destructive geological disasters, where the movement and deposition behavior of solid-fluid two-phase flows directly determine the scale of disaster evolution and the difficulty of mitigation. In mine water inrush and collapse accidents, accurate prediction of the flow and accumulation characteristics of crushed stone during such incidents complicate the disaster scenario. Through physical modeling and CFD-DEM coupled numerical simulations, this research systematically investigates the transport and accumulation characteristics of debris in mine water inrush and collapse accidents under varying water pressures and roadway inclination angles. Utilizing a combined approach of physical modeling and fluid-solid coupling simulation, this research replicated the full dynamic process of debris flow and unraveled the underlying macro-meso scale mechanical mechanisms of the collapsed mass. The results reveal that the crushed stone transport and accumulation process can be divided into three distinct stages: initial deposition, rapid spreading, and stable accumulation, with the deposit sequence remaining consistent with the initial accumulation sequence. As the water pressure increases, the crushed stones form an “M”-shaped double-peak accumulation below the water inrush opening, while a steeper roadway inclination leads to longer spreading distances, more concentrated deposition, more prominent transverse ridges, and greater accu-

收稿日期：2025-12-06　　**策划编辑：**曾　琛　　**责任编辑：**王晓珍　　**DOI:** 10.12438/cst.2025-1815

基金项目：国家自然科学基金区域联合基金重点资助项目(U22A20165)；山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(2024CXGC010322)；新疆维吾尔自治区重点研发任务专项资助项目(2023B01016-1)

作者简介：李桂臣(1980—)，男，河北衡水人，教授，博士生导师，博士。E-mail: liguichen@126.com

通讯作者：沃小芳(1999—)，女，江苏宿迁人，博士研究生。E-mail: b24020031a41ky@cumt.edu.cn

中国知网　https://www.cnki.net

（1）巷道突水垮塌破碎岩体运移特性与堆堵机理



applied sciences　MDPI

Article

Mesoscopic Damage Evolution of Water-Bearing Mudstone Under Low-Strain-Rate Cyclic Dynamic Loading: A Particle-Flow Simulation Study

Sen Yang [1,2], Guichen Li [1,2,3,*], Xiaofang Wo [1,2], Zeyu Shao [1,2], Yuantian Sun [1,2], Haoran Hao [1,2], Bowen Tian [1,2], Haisen Zhao [1,2] and Zhao Li [4]

[1] School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; yangsen@cumt.edu.cn (S.Y.); b24020031a41ky@cumt.edu.cn (X.W.); shenshaoyv@163.com (Z.S.); yuantiansun@cumt.edu.cn (Y.S.); cumthhr@126.com (H.H.); tianbowen20240163.com (B.T.); 15837034240@163.com (H.Z.)
[2] Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
[3] State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
[4] Haoke Technology Co., Ltd., Jining 272000, China; lizhao403@163.com
* Correspondence: liguichen@cumt.edu.cn

Abstract

Groundwater-related weakening and repeated low-strain-rate disturbances can jointly affect the long-term stability of soft surrounding rock. In this study, a PFC3D model was developed by combining a cumulative residual-strain damage variable with a Weibull statistical damage variable. Water effects were represented indirectly through water-content-dependent mesoscopic parameters and contact-strength degradation, thereby linking macroscopic irreversible deformation to progressive mesoscopic bond degradation. The cyclic responses of mudstone specimens with water contents of 0%, 3%, 5%, and 7.04% were simulated under a roadway-like three-directional, five-face boundary condition, consisting of axial loading, lateral pressure, one laterally constrained side, and one free face. The model reproduced the main stress–strain trends and failure characteristics. From the dry to saturated state, the experimental and simulated peak strengths decreased by 68.51% and 67.44%, respectively. Increasing water content also promoted earlier crack initiation, weakened strong force-chain continuity, and shifted failure from localized shear instability to distributed tensile–shear damage. Energy dissipation became increasingly important as water content increased. These findings clarify the mesoscopic damage mechanism of water-bearing mudstone under coupled water-induced softening and low-strain-rate cyclic loading, providing a reference for stability assessment and support design in underground soft-rock engineering.

Keywords: groundwater-induced weakening; residual strain accumulation; progressive bond degradation; force-chain reorganization; energy dissipation

Check for updates

Received: 7 June 2026
Revised: 29 July 2026
Accepted: 27 July 2026
Published: 2 August 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

1. Introduction

In underground engineering such as mine roadways, caverns, and tunnels, water infiltration commonly acts together with recurrent low-strain-rate disturbances, leading to residual deformation, cementation degradation, crack propagation, and eventually progressive instability of soft surrounding rock [1,2]. Such disturbances rarely cause

（2）Mesoscopic Damage Evolution of Water-Bearing Mudstone Under Low-Strain-Rate Cyclic Dynamic Loading: A Particle-Flow Simulation Study（*Applied Sciences*, 2026）



sustainability　MDPI

Article

The Stability of Roadway Groups under Rheology Coupling Mining Disturbance

Sen Yang [1,2], Guichen Li [1,2,*], Ruiyang Bi [3], Bicheng Yao [1,2], Ruiguang Feng [1,2] and Yuantian Sun [1,2]

[1] School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; ts20020064a31tm@cumt.edu.cn (S.Y.); ts20020178p214@cumt.edu.cn (B.Y.); ts20020100p214@cumt.edu.cn (R.F.); yuantiansun@cumt.edu.cn (Y.S.)
[2] Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining of the Ministry of Education, University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
[3] School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; biruiyang@csu.edu.cn
* Correspondence: liguichen@cumt.edu.cn; Tel.: +86-1580-521-5566

Abstract: The deep roadway groups play an important role in transportation and ventilation in coal mine production. Therefore, it is very important to comprehensively analyze the coupling effect of rheological deformation and coal mining on the stability of the roadway groups. In this paper, the disturbance effects of different stop-mining lines on roadway groups under long-term rheology were investigated by numerical simulation, and the failure mechanism of roadway groups with large sections and multiple disturbances in a deep well was revealed. The results show that the long working face will lead to the collapse of key strata, and the influence range will spread to the adjacent roadway groups. When the distance between the working face and the stop-mining line is 100 m, the roadway groups cannot be affected by the working face mining, and the reserved width of the coal pillar can be determined to be 100 m, which increases the stability of the roadway's surrounding rock and maintains the mine safety production. This paper aims to provide a reference for groups design and control under similar conditions.

Keywords: rheological deformation; key stratum; roadway groups; roadway deformation; surrounding rock control

check for updates

Citation: Yang, S.; Li, G.; Bi, R.; Yao, B.; Feng, R.; Sun, Y. The Stability of Roadway Groups under Rheology Coupling Mining Disturbance. *Sustainability* **2021**, *13*, 12300. https://doi.org/10.3390/su132112300

Academic Editor: Giovanna Pappalardo

Received: 2 October 2021
Accepted: 3 November 2021
Published: 8 November 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

In recent years, with the continuous increase in mining intensity and depth, a large number of difficult-to-support roadways have appeared, such as roadways with high stress, strong mining-affected roadways, roadways with extremely broken surrounding rocks, and roadways with extra-large cross-sections. Under the influence of factors such as tectonic stress, strong mining, faults, etc., roadway section shrinkage is serious, surrounding rock fragmentation is high, the floor experiences heave, and supporting components fail frequently, which increases the intensity and frequency of roadway repair [1]. Therefore, the stability of the deep roadway groups is essential for safe and efficient production.

For deep roadways, the ground stress of the environment in which the roadway is located increases. Under the action of high ground stress, rheological deformation occurs in the deep roadway [2,3]. The deformation of the deep soft rock roadway includes the deformation during the roadway excavation, the rheological deformation of the roadway during the service production period, and the deformation caused by other factors such as support failure and stress disturbance. The theory and technology of group control, originally applicable to shallow parts, cannot meet the requirements of the control effect in the deep part [4]. For the control of coal roadways with rheological properties, the theory and technology of soft rock support can be used for reference [5–9]. For soft rock roadways, many deep soft rock roadway control technologies have been produced on the basis of

（3）The Stability of Roadway Groups under Rheology Coupling Mining Disturbance（*Sustainability*, 2021）



煤炭学报
Journal of China Coal Society
ISSN 0253-9993,CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目：　低应变率动载下含水泥岩力学响应特性与损伤机制研究
作者：　李桂臣，杨森，孙元田，李善华，郝浩然，邵泽宇
DOI：　10.13225/j.cnki.jccs.2023.1504
网络首发日期：　2024-07-22
引用格式：　李桂臣，杨森，孙元田，李善华，郝浩然，邵泽宇. 低应变率动载下含水泥岩力学响应特性与损伤机制研究[J/OL]. 煤炭学报. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1504

CNKI中国知网 www.cnki.net

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可能不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对首文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为。稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准。正确使用和规一规范语言文字、符号、数字、外文字母，法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容。只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

（4）低应变率动载下含水泥岩力学响应特性与损伤机制研究（《煤炭学报》网络首发）



第 50 卷第 69 期　　煤 炭 科 学 技 术　　Vol. 50　No. 6
2022 年　6 月　　Coal Science and Technology　　Jun.　2022

李桂臣,杨　森,孙元田,等.复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(6):29-45.
LI Guichen,YANG Sen,SUN Yuantian,*et al*.Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions[J].Coal Science and Technology,2022,50(6):29-45.

移动扫码阅读

复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展

李桂臣[1,2],杨　森[1,2],孙元田[1,2],许嘉徽[1,2],李菁华[1,2]

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;2.中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州　221116)

摘　要:煤炭资源开采正不断向深部延进,面临的复杂地质条件问题也日益突出。深部资源开采、地下空间开挖等深部岩石工程活动迅速增加,而这些工程活动的开展和巷道的稳定性密切相关。重点总结了复杂条件下煤矿巷道围岩控制领域的相关成果,梳理了当下巷道围岩控制面临的主要复杂条件,划分了工程地质条件和开采技术条件 2 类巷道复杂条件。阐明了各类复杂条件下巷道围岩的变形破坏特征,指出了围岩应力、围岩性质和支护结构是巷道围岩控制的 3 类基本对象,明确了围岩应力环境恶化、围岩性质劣化和支护体性能弱化 3 种失稳形式,在此基础上揭示了不同地质环境与采掘时空关系下回采巷道的失稳机制。分析了现阶段围岩巷道控制基本机理;改基围岩应力环境、改良围岩性质与强化围岩承载结构;详述了基于卸压、改性、支护与协同控制的围岩控制技术在不同复杂条件巷道的阶段性理论研究与技术应用现状。同时,分析了泥质采动巷道渗流失稳与围岩控制的典型工程案例,揭示了该类复杂围岩条件的巷道围岩失稳机理,提出了疏水泄压、泥岩置换、分级注浆、高强度封层支护结构与底板结构等多种方法协同作用的高强度综合修复与控制技术体系。最后,基于上述 4 方面研究,结合工程实践,展望了未来复杂条件下巷道围岩控制技术的发展趋势。

关键词:复杂条件;巷道围岩;失稳机理;围岩控制;巷道支护

中图分类号:TD353　　**文献标志码**:R　　**文章编号**:0253-2336(2022)06-0029-17

Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions

LI Guichen[1,2],YANG Sen[1,2],SUN Yuantian[1,2],XU Jiahui[1,2],LI Jinghua[1,2]

(1.*School of Mining Engineering,China University of Mining and Technology,Xuzhou*　221116,*China*;2.*Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining,Ministry of Education of China,China University of Mining & Technology,Xuzhou*　221116,*China*)

Abstract:The mining of coal resources is constantly advancing to the depths,and the problems of complex geological conditions are becoming increasingly prominent. Deep rock engineering activities such as deep resource mining and underground space excavation are increasing rapidly,and the development of these engineering activities is closely related to the stability of roadway. This paper focuses on summarizing the relevant achievements in the field of coal mine roadway enclosure control under complex conditions,combining the main complex conditions faced by the current roadway surrounding rock control,and dividing the engineering geological conditions and mining technical conditions into two types of complex roadway conditions. The deformation and failure characteristics of the surrounding rock of the roadway under various complex conditions are clarified,and it is pointed out that the surrounding rock stress,surrounding rock properties and supporting structure are the three basic objects of the surrounding rock control of the roadway. Three forms of instability,namely,deterioration of the stress environment of the surrounding rock,deterioration of the nature of the surrounding rock and weakening of the performance of the support body,are clearly identified. On this basis,the instability mechanisms of mining roadway under different geological environments and spatial-temporal relationship of mining are revealed. The basic mechanism of surrounding rock control in difficult roadways at this stage is analyzed:improving the surrounding rock stress environment,improving the surrounding rock properties and strengthening the surrounding rock bearing structure. The current status quo of the stage theoretical research and technology application of the surrounding rock control

收稿日期:2021-10-02　　**责任编辑**:朱恩光　　**DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2022-0304
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174089,52104106);中国矿业大学未来杰出人才胜任资助(2022WLJCRCZL024)
作者简介:李桂臣(1980—),男,河北秦水人,教授,博士生导师,博士。E-mail:liguichen@126.com
通讯作者:杨　森(1997—),男,山西临汾人,硕士研究生。E-mail:ts20020064a31tu@cumt.edu.cn

29

（5）复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展（《煤炭科学技术》，2022）

四、荣誉证书



（1）《煤炭科学技术》创刊五十周年百篇最具影响力学术论文荣誉证书



（2）“十四五”矿业创新百篇优秀论文荣誉证书（2026）



（3）煤炭科学技术创新发展论坛暨第五届国际矿业青年科学家论坛博士生国际学术论坛二等奖（2025）