 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11536

Research on the Design Architecture and Key Technologies of the Overall Control System for Mine-Wide Body Vehicles

Jifu Wang

Tage Zhixing Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract

Mining wide-body trucks operate under high-dust, complex road conditions, and high-load alternating working conditions, and the existing systems face challenges in real-time responsiveness and functional safety. This paper proposes a layered modular vehicle control architecture that integrates three-layer logic: decision-making, coordination, and executive drive. By leveraging CAN FD and Ethernet converged communication, along with precise time synchronization technology, it achieves synergy among powertrain, steering, and braking. The integration of heterogeneous redundancy mechanisms ensures fail-safe operation. Validation demonstrates that the proposed scheme significantly reduces yaw error and energy consumption, establishes defense-in-depth capability under extreme environments, and further enhances anti-interference capability and system self-recovery performance under harsh conditions through hardware-software collaborative monitoring and adaptive calibration strategies, providing highly reliable technical support for unmanned intelligent mining operations.

Keywords

mining wide-body truck; vehicle control architecture; layered modularization; cooperative control; functional safety

矿用宽体车整车控制系统架构设计与关键技术研究

王纪福

踏歌智行科技股份有限公司，中国 · 安徽 合肥 230000

摘　要

矿用宽体车工作在高粉尘、繁复路况、大载荷交变工况，现有的体系在实时响应、功能安全方面存在考验。本文提出分层模块化整车控制架构，把决策、协调、执行驱动三者合在一起。使用 CAN FD 以及以太网融合通信、精密时间同步技术，实现动力传动以及转向制动的协同，用异构冗余机制保证失效导向的安全。验证结果表明，该方案大大减小了横摆误差和能耗，在极端环境下具备纵深防御能力，靠着软硬协同监测及自适应标定方略，增强了极端工况下抗干扰能力以及系统自恢复能力，给智能矿山无人化作业给出高可靠的技术支撑。

关键词

矿用宽体车；整车控制架构；分层模块化；协同控制；功能安全

1 引言

矿用宽体车每天在矿坑里跑重载上坡下坡的活儿承受着零下四十度到八十五度极端温度剧烈振动高粉尘伴随强电磁干扰的严苛考验需要耐受 IP6K9K 防护等级，传统的控制系统碰到冗杂路况时容易出毛病能耗太高无法满足毫秒级的控制周期加上扭矩响应高标准要求支撑矿山连续生产到了高平均无故障时间，本研究设计了一套分层架构协调发动机加上电机输出改良换挡过程减小冲击解决矿区冗杂路况具备快速响应加上降级容错能力支持软件在线升级实现配置化开发，车载网络利用 CAN FD 加上以太网融合技术保障指令传输安全实时建立全局到车内的亚微秒级同步体系解决矿山环境的延迟强电磁干扰融合 5G V2X 技术，整车方案凭借故障隔离机制保证单点失效后车辆仍能自主执行安全策略遵循失效导向安全加上异构冗余原则保障密集型交互加上实时控制需求借助严格的安标认证完成全包含硬件在环测试 [1]。

【作者简介】王纪福（1987–），男，中国河南商丘人，博士，工程师，从事新能源矿卡动力系统集成开发研究。

2 矿用宽体车整车控制需求分析

2.1 作业工况与功能需求界定

矿用宽体车长时间工作在重载上坡及重载下坡两个典型工况，两个工况各占运行时间的四分之一到三分之一，车辆需要克服百分之八到十二的正负坡度，控制难点分别集中在大扭矩需求和繁复的能量回收以及热管理，空载返回工况侧重于高速稳定性和能耗改良，车辆控制系统的功能需求必须建立在上述特定作业循环的分析之上，功能域的划分从能量管理延伸到驱动控制、安全监控等多个方面。整车控制要

满足以毫秒为单位的控制周期和扭矩响应时间，严格的机械负载以及电磁兼容标准也对控制器的环境适应性提出了比常规更高的要求，载荷及路况的实时识别为控制策略的动态调整给予依据，这种依据来自于悬架压力传感器或者扭矩反推技术，其识别精度已经到了一定的行业水平 [2]。

2.2 环境适应性与通信接口要求

矿用宽体车控制系统的环境适应性是整车在露天矿冗杂环境里可靠工作的基础，重点标准要求系统有着解决极端温度、剧烈振动、高粉尘腐蚀的鲁棒性，技术指标明确规定了宽达 -40° C 至 85° C 的工作温度范围和不低于 IP6K9K 的防护等级，为抵御矿山作业中常见的机械冲击及化学腐蚀给予量化的依据。通信接口是整车控制信息交互的枢纽，它的设计要满足低时延、高带宽、高可靠性的要求，动力底盘控制用 CAN FD 协议实现 10 毫秒内确定性的响应，感知数据的海量传输转向百兆或者千兆速率的车载以太网架构，远程调度功能需要融合 5G V2X 技术来保证 20 毫秒级的远程控制实时性。严格的环境参数以及通信性能共同构成了矿用宽体车在恶劣工况下准确控制、稳定互联的先决条件，其实现靠着的是从连接器密封、电路板防护到网络拓扑改良的系统性设计。

3 整车控制系统总体架构设计

3.1 分层模块化架构方案

整车控制系统使用分层模块化架构方案，架构设计遵循功能隔离、硬件抽象的原则，该系统方案把繁复的功能分成三个层次，决策规划层负责全局任务及能量管理策略，协调控制层执行整车状态实时估计以及扭矩分配，执行驱动层直接操控电机、制动、转向等底层执行器，各层级凭借标准化的通信接口实现数据交换，功能模块之间有着高内聚、低耦合的特性，能量管理、线控底盘、热管理、安全监控等重点模块有明确的输入输出定义，模块内部逻辑的变更不会影响其他功能的正常调用，硬件抽象化设计有效地隔离了底层驱动和上层算法，故障隔离机制保证单一模块失效只触发预设的降级形式，避免了整车系统的瘫痪风险，模块化方案为将来软件功能的独立在线升级给出了底层支持。

3.2 主控单元与子系统拓扑关系

主控单元是整车控制系统的重要节点，它形成了一个层次分明的集中协调式拓扑关系，该单元靠着高速通信主干以及动力、底盘、监控等各个子系统建立联系。动力子系统发动机控制器、电机控制器、电池管理系统均直接接受主控单元的指令控制，主控单元不但要发出目标扭矩的请求，还要实时接收电池高压状态等有最高优先级的反馈信号。底盘子系统内部的制动、转向控制单元一般借助冗余通信链路与主控单元相连，该设计目的就是增加系统的功能安全等级，在冗杂工况下保证可靠响应。监控子系统把车载终端当作数据上传的延伸，主控单元采集的车辆状态信息汇总之后发送到终端，最终上传到远程调度平台。整个拓扑结构由中央主控到边缘执行，数据流及控制流都很清晰，主控单元的硬件配置，即多路高带宽通信接口、高可靠性电源模块，都是为了满足密集型信息交互以及实时控制的要求而设计的。

4 关键子系统集成与协同控制策略

4.1 动力传动系统控制逻辑

矿用宽体车动力传动控制分层设计。感知输入信号经过上层能量管理按照等效消耗最小的原则实行全局能耗的改良，利用高精地图实行路况预览能量预分配。中层转矩协调利用模糊逻辑修正发动机和电机输出，保证动力性和平顺性平衡。下层换挡控制用动态规划算法最小化换挡冲击 [3]。

矿区非结构化路面负载突变时，系统要具备毫秒级多源异构时序同步能力。当重点传感器失效的时候，执行降级容错方针来保证运行安全。线控底盘给无人驾驶给予底层执行接口。云边端协同架构支持 OTA 更新，缩短标定周期。动力传动系统分层控制流程如图 4.1 所示。

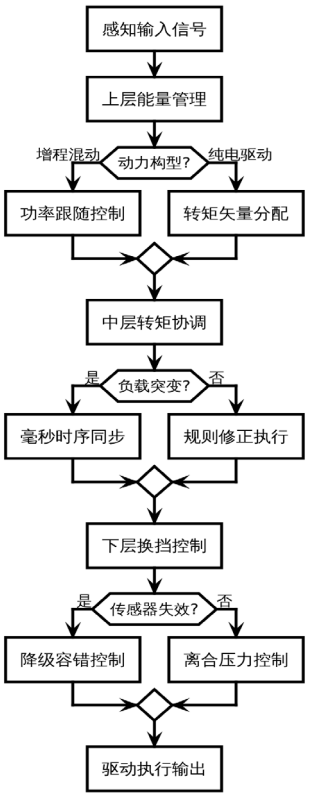


图 4.1 动力传动系统分层控制流程

4.2 制动与转向协同控制方法

制动与转向的协同控制，即在矿用宽体车在繁复的工况下，解决执行器之间动态耦合、冲突的问题，其主要目的就是建立一个可以同时改良车辆稳定性、途径跟踪精度、制动效能的多目标控制框架。目前主流的协同控制策略主要有模型预测控制、滑模控制、分层协同架构，此类方案依靠路面附着状态、载荷变化的实时估计，动态调节制动力以及转向力矩的分配权重。执行器饱和是关键技术难点，其解决办法一般使用根据加权二次型代价函数的改良算法，在保证横摆稳定性优先的情况下协调各个执行器的输出。协同控制的

实行明显提高了系统的性能，在双移线测试工况下，横摆角速度的跟踪误差峰值比传统独立控制减少了一半以上，制动距离在满载湿滑下坡时也可以缩短一成以上，上述性能的增加是由于电子液压制动、线控转向等快速响应硬件的普及以及高带宽总线通信的支持。

5 车载网络通信与信息安全机制

5.1 CAN 总线与以太网融合通信架构

矿用宽体车整车控制系统使用 CAN 总线及以太网融合的通信架构，该架构意在将 CAN FD 协议的高可靠性、低延迟特性用于重点控制域的通信，典型应用场景为动力总成和底盘控制，而车载以太网凭借百兆以及千兆级别的带宽能力，构成了数据传输的骨干网络，专门服务于智能驾驶域的高带宽需求及远程遥操作等新兴功能，为实现异构网络的无缝互联，系统设计了核心网关节点，该节点硬件集成了多路 CAN FD 和高速以太网接口，并内置独立硬件安全模块，网关的重点功能就是执行高效的协议转换，它把传统的 CAN 报文映射到依据 IP 的 SOME/IP 或者 DoIP 协议，这个转换过程被严格控制以减少额外延迟，时间同步作为多传感器数据融合的基础，需要精密时钟协议在全车网络内实现微秒级同步，网络拓扑设计遵循中央计算融合区域网关的原则，借助物理隔离不同的功能域来改良数据传输途径并增加系统安全性，电磁兼容性问题在宽体车大功率作业环境下特别突出，以太网双绞线需要具备高级别的屏蔽效能来满足严格的电磁辐射标准，融合架构同时面对异构网络统一诊断及功能安全标准整合的考验，此类问题直接影响到整车控制的可靠性以及后续维护的便捷性 [4]。

5.2 数据同步与时序保障技术

数据同步以及时序保障技术是整车控制系统实时性、可靠性的基础支撑，车载网络使用时间敏感网络作为主体架构，它有着高带宽、确定性低延迟的特点，可以满足多传感器数据流融合、急停信号快速响应的苛刻要求，全局时间基准靠着北斗和 GPS 双模 RTK 技术获得，融合网络内部使用 IEEE 1588v2 协议的精确时钟同步，两者共同创建起从车外全局到车内网络的亚微秒级同步体系，分层同步方针保证了多车编队协同作业时厘米级的空间对齐精度，时序保障层面靠着 IEEE 802.1Qbv 时间感知整形等流量整形技术，重点控制指令被分配到固定的时间窗口传输，融合依据模型设计的静态最坏情况执行时间分析，控制系统可以预先验证所有中断响应以及任务调度的时序边界，针对矿山环境特有的长距离布线延迟及强电磁干扰，设计方案实行了物理层延迟补偿，选用高共模抑制比的屏蔽线缆，此类措施有效地抵御了大功率电机变频产生的谐波干扰，保证了时间触发安全控制回路的信号完整性。

5.3 控制指令加密与入侵检测设计

控制指令传输安全要靠着加密算法和入侵检测机制的协同设计，矿用宽体车控制系统针对其实时性、环境约束选择合适的方案，车规级处理器有限的算力要求算法在低资源开销下保持高强度的安全性，所以 AES-128 等对称加密算法变成平衡性能以及安全的主流选择，其单次加密延迟被严格控制在微秒级别来满足转向及制动指令的实时性要求。入侵检测系统使用混合部署架构来解决各种攻击向量，网络检测模块部署在独立网关上监控总线报文频率以及格式异常，主机检测模块嵌入重点控制器验证指令序列的合法性，分工不但是减轻了单一节点的计算负担，而且加强了系统的整体纵深防御能力 [5]。检测到入侵行为之后系统会立即执行预设的车辆降级运行方案，保证基本行驶功能的时候隔离潜在威胁，加密密钥的动态更新以及入侵特征库的远程维护功能也凭借安全通道来实现，以适应矿区冗杂的电磁环境以及远程运维场景下的持续安全考验。

6 结论

矿用宽体车整车控制系统靠着分层模块化架构来达成决策规划和执行驱动的高效协同，动力传动系统靠着能量管理改良全局能耗并协调发动机和电机输出，动力以及转向的协同控制动态协调制动力和转向力矩继而大幅减少横摆角误差，能源管理融合使用多种方略增强能效并延长部件寿命，车载网络通信使用 CAN FD 及车载以太网融合架构保障重点控制域通信可靠性，精密的时间同步以及数据传输保障体系保证多传感器数据融合和重点控制指令的实时确定性传输，安全层面使用低开销加密算法保障指令传输安全并靠着混合入侵检测系统监控异常，硬件抽象设计支持跨供应商芯片和传感器的快速移植，故障隔离机制保证单一模块失效只触发预设降级形式，整体拓扑表现从中央到边缘的清晰数据控制流，主控硬件配置保障密集型交互以及实时控制需求，容错机制遵循失效导向安全及异构冗余原则保证单点或者部分失效时车辆可以自主执行安全策略，该系统依靠融合网络精密同步及分层安全设计满足矿用宽体车在严苛作业环境下对可靠性、实时性、安全性的融合需求。

参考文献

[1] 郭三刺,苏振恒,刘本学.基于PLC-Lasso回归算法的鱼池投饲轨道车驱动控制系统设计[J].渔业现代化,2025,52(06):97-105.

[2] 陈文鸿,李堃臻,杨云福,等.龙门式电动履带作业车设计与试验[J].林业机械与木工设备,2025,53(12):36-40.

[3] 徐昊洋,程海豫,颜斌.基于TC264D的双车跟随智能车控制系统设计[J].电子制作,2025,33(23):44-49.

[4] 于彬,李宗杰,师帅.矿用单元支架搬运车快速装卸及四履带转向系统设计[J].煤炭科技,2025,46(05):41-45.

[5] Wang, Yilin, Weiwei Yang, and Nong Zhang. ‘Slope estimation of distributed electric drive mining dump truck based on multi-sensor integration.’ International Journal of Vehicle Design 96.3-4 (2024): 263-285.