

无人驾驶矿用卡车举升角度位移传感器设计与应用

孙 利

国能准能集团有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要：针对露天矿无人驾驶矿用卡车在卸料作业中对举升角度与油缸位移的高精度、高可靠、强抗扰感知需求，本文设计并研制了一款适用于重载恶劣工况的举升角度位移传感器。系统以货箱举升角度与油缸位移双闭环测量为核心，采用 MEMS 双倾角差分测量与磁致伸缩位移检测融合技术方案，完成了传感器硬件电路、机械结构、信号处理算法及 CANopen 通信协议设计。传感器实现了 $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ 宽温域稳定工作、IP67K 高防护等级、抗 5g 振动与 50g 冲击、角度测量范围 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、测量精度 $\leq \pm 0.3^{\circ}$ 、油缸位移分辨率 0.5mm 的综合性能指标。通过在无人驾驶线控举升系统中的集成应用，实现了自动精准卸料、车身姿态防倾、安全互锁控制与远程数据监控等核心功能。实车试验表明，该传感器可显著提升无人矿卡卸料稳定性、作业循环效率与运行安全性，完全满足露天矿智能化无人运输系统的实际使用要求。

关键词：无人驾驶矿用卡车；举升机构；角度位移传感器；MEMS 倾角测量

引言

露天矿无人驾驶矿用卡车作为智慧矿山装备的核心组成部分，其“装—运—卸”作业流程中，举升卸料环节直接决定运输效率、设备安全性与系统智能化水平。传统矿用卡车依赖驾驶员人工判断举升状态，配合机械限位开关完成卸料动作，存在角度控制精度低、偏载易引发倾翻事故、卸料不到位、与电铲及推土机等设备协同作业能力差等问题，难以满足无人驾驶系统对高可靠性、高自动化、高安全性的要求。因此，研发一款集成化、高精度、高鲁棒性的举升角度位移复合传感器，对推动无人驾驶矿用卡车技术落地具有重要意义。

1 举升系统与测量需求分析

1.1 举升机构工作原理

无人驾驶矿用卡车举升机构多采用前置双缸直推式液压驱动结构，如图 1 所示，货箱①绕尾部铰接轴②旋转由液压油缸推动货箱完成举升动作实现物料倾卸。在举升过程中，液压系统推动油缸伸出，带动货箱从水平落锁位置向上旋转至最大角度，完成卸料后平稳回落至初始位置并锁止。

典型矿用自卸卡车举升机构关键参数如下：举升角度范围 0° （落锁状态） $\sim 60^{\circ}$ （满举卸料状态）；

油缸有效行程 300mm $\sim$ 1200mm；举升动作时间 15s $\sim$ 30s，下降回落时间 12 $\sim$ 20s；车辆额定载荷 220t $\sim$ 400t。



图 1 矿用卡车举升机构示意图

1-货箱；2-尾部铰接轴；3-液压油缸

1.2 无人驾驶系统测量需求

无人驾驶矿卡对举升状态感知提出了比传统人工驾驶更严格的要求，主要包括以下 6 个方面。

1. 连续角度测量：实时获取货箱相对车架的举升角度，用于液压系统闭环比例控制，保证举升速度平稳、角度定位精准。

2. 油缸位移测量：实时采集油缸行程信息，实现举升速度规划、终点缓冲控制与机械行程保护。

3. 车身姿态补偿：消除路面坡度与车身倾斜对角度测量的影响，实现真实举升角度解算。

1.3 传感器性能指标制定

结合露天矿工况与无人驾驶控制要求，确定传感器整体性能指标如下：角度测量量程 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，测量精度 $\leq \pm 0.3^{\circ}$ ，分辨率 0.1° ；位移测量量程 $0 \sim 1200\text{mm}$ ，测量精度 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ，分辨率 0.5mm ；工作环境温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ ，防护等级 IP67K；机械性能抗振动 $5\text{g}/10 \sim 2000\text{Hz}$ ，抗冲击 $50\text{g}/11\text{ms}$ ；电气性能供电电压 $9 \sim 36\text{V DC}$ ，通信接口 CAN2.0B。

2 传感器总体设计

2.1 总体架构

举升角度位移传感器采用双感知融合架构，由角度测量传感器如图 2 (a) 所示、位移测量传感器如图 2 (b) 所示、无人驾驶控制器、机械安装结构与通信接口五部分组成。



图 2 (a)



图 2 (b)

图 2 双感知融合架构图

角度通道采用双 MEMS 动态倾角传感器实现货箱与车架差分测量，消除车身姿态影响；位移通道采用非接触磁致伸缩位移传感器检测油缸行程；主控制器完成信号采集、滤波解算、温度补偿、故障诊断与 CAN 通信输出。

2.2 测量原理

1. 举升角度解算原理：通过分别测量货箱倾角与车架倾角，利用差值算法解算真实举升角。角度测量模块融合加速度计与陀螺仪数据，采用动态姿态解算算法抑制振动与冲击干扰，保证静态高精度与动态稳定性^[1]；2. 油缸位移测量原理：磁致伸缩位移传感器利用波导丝与磁环之间的磁致伸缩效应，实现非接触式绝对位置检测，具有无磨损、寿命长、精度高、抗干扰能力强等优势；3. 冗余校验与安全机制：将角度测量值与位移测量值通过举升机构几何模型进行实时互校验，当数据出现异常偏差时立即输出故障码并进入安全保护状态，提高系统功能安全等级。

2.3 硬件电路设计

1. 主控 MCU：采用 32 位车规级微控制器，支持 ASIL-B 功能安全等级，具备高速运算与多通道数据采集能力；2. 倾角采集模块：双轴高精度 MEMS 传感器，量程 $\pm 90^{\circ}$ ，温漂系数 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ；3. 位移采集模块：磁致伸缩探头信号调理电路，完成模拟信号到数字量的高精度转换；4. 电源管理电路：宽电压输入、防反接、过流、过压、浪涌保护，适应车载电源波动；5. 隔离 CAN 通信电路：采用隔离 CAN 收发器，支持 CANopen DS401 协议，提升抗干扰能力；6. EMC 防护电路：配置 ESD 保护、滤波电路，满足车载 ISO11452、ISO10605 电磁兼容标准^[2]。

2.4 软件算法设计

1. 多通道数据采集：ADC 高精度采样、倾角姿态解算、位移信号解码；2. 数字信号处理：滑动平均滤波、卡尔曼滤波、振动噪声抑制、温度漂移补偿；3. 车身姿态补偿：实时解算路面坡度并修正举升角度输出；4. 安全控制逻辑：上下限软保护、传感器故障自诊断、数据异常输出限制；5. CAN 通信：周期发送角度、位移、温度、状态字与故障码

2.5 机械结构与安装设计

角度传感器安装于货箱底部，与车架传感器形成差分测量，采用同心铰支结构保证与货箱铰接轴同轴如图 3 所示；位移传感器采用内置式安装于举升油缸，缸筒固定、磁环随活塞杆同步运动；壳体采用铝合金压铸成型，表面阳极氧化处理，配合多重密封胶圈实现 IP67K

防护；安装组件采用防松螺栓、减震垫片与加固支架，保证长期振动工况下不松动、不失准^[3]。



图 3 角度传感器安装位置图

3 无人驾驶系统集成应用

3.1 线控举升控制系统架构

线控举升控制系统如图 4 所示，传感器采集的角度与位移数据通过 CAN 总线发送至无人驾驶控制器，控制器根据作业指令输出控制信号驱动液压比例阀组，调节举升油缸运动速度与位置，形成位置—速度双闭环控制系统，实现举升动作精准可控。

线控举升控制系统架构

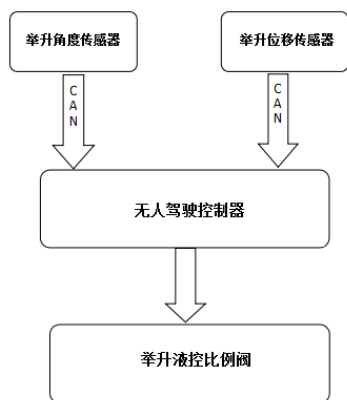


图 4 线控举升控制系统总体架构图

3.2 核心功能实现

1. 自动精准卸料控制：系统按角度分段闭环控制，包括低速起升、匀速举升、高速卸料、缓冲减速、满举保持、平稳下降、落锁检测，全程无需人工干预，卸料位置精准无冲击。

2. 车身姿态防倾保护：实时融合举升角度、车身倾斜角与载荷状态，计算整车合成重心，当重心超出安全阈值时，立即禁止举升动作、发出报警并自动回落货箱，从根源避免倾翻事故。

3. 多级安全互锁逻辑：设置多重安全保护机制，包

括货箱未落锁（角度 $> 3^\circ$ ）禁止车辆行驶、举升过程中自动锁定车辆制动、液压压力异常与角度位移不匹配时立即停机保护，全面提升无人作业安全性。

3.3 标定与调试流程

1 落锁位置标定：将货箱落至锁止位置，标定角度 0° 、位移 0mm ；2. 满举位置标定：将货箱举升至最大角度，标定 60° 与对应最大行程；3. 振动滤波参数整定：实车调试滤波系数，保证数据稳定无跳变

4 试验与结果分析

4.1 实验室性能测试

1. 精度测试：角度测量误差 $\pm 0.25^\circ$ ，位移测量误差 $\pm 0.4\text{mm}$ ，满足设计指标；2. 振动冲击测试：在 5g 振动与 50g 冲击条件下，输出信号稳定无跳变、无丢数；3. EMC 电磁兼容测试：满足车载级 EMC 标准，抗干扰能力强。

4.2 露天矿实车应用测试

在某露天矿 220t 级无人驾驶矿用卡车开展为期 3 个月的工业试验，试验结果如下。

1. 自动卸料成功率达到 100% ，动作平稳无冲击；2. 单车作业循环时间缩短 12% ，作业效率显著提升；3. 全程未发生偏载、倾翻等风险，安全性能达标；4. 传感器连续工作无故障、免维护，适应矿山全天候作业。

结语

本文针对露天矿无人驾驶矿用卡车举升卸料需求，设计了一款集成角度测量、位移检测、姿态补偿、CAN 通信与安全保护的高性能举升角度位移传感器。系统采用 MEMS 双倾角差分测量与磁致伸缩位移融合方案，结合车规级硬件、抗干扰算法及高防护结构设计，解决了重载、强振、宽温、多尘工况下的高精度感知难题。实车应用表明，该传感器可有效支撑自动精准卸料、姿态防倾、安全互锁与远程监控功能，显著提升卸料稳定性、作业效率与运行安全性。未来可进一步融合液压压力、毫米波雷达、激光点云等信息，实现偏载识别、物料残留检测与卸料智能决策，推动无人矿卡向更高自主化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 考虑动态需求的露天矿山无人驾驶矿卡实时调度方法韩亮等；工矿自动化;2026
- [2]. 绿色矿山建设背景下非金属露天矿山采矿终了效果管控制度研究——以山东省济宁市为例陈芝聪等；矿业研究与开发;2026
- [3]. 露天矿山无人驾驶智能集群应用及挑战王威等；露天采矿技术;2026