

基于多硬件协同的煤炭火车定量装车系统设计与实现

□刘东东 任杰

山东金钟科技集团股份有限公司

【摘要】针对传统煤炭火车装车作业中计量精度低、自动化程度不高、人工干预多等核心痛点，本文设计并实现了一套基于多硬件协调的定量装车系统。该系统深度融合了动态轨道衡、液压控制系统、激光/识别定位装置等模块装置，构建了“感知—控制—执行—监控”协同架构。其中动态轨道衡作为系统的计量核心与反馈中枢，承担动态重量精准采集、重量分布实时检测、闭环控制指令生成等关键功能，是实现“定量装车、防偏载、自动化作业”的核心支撑。该系统完全满足《煤炭快速定量装车系统通用技术标准》（NB/T 11643-2024）及《动态轨道衡》（GB/T 14298-2019）要求，为煤炭铁路装车的智能化、精准化升级提供了有效的解决方案。

【关键词】煤炭火车；定量；多硬件协同；动态轨道衡；PLC 控制；激光定位；智能装车

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2026）06-0011-07

Design and Implementation of Quantitative Coal Train Loading System Based on Multi-hardware Coordination

【Abstract】To address the core pain points in traditional coal train loading operations, such as low measurement accuracy, limited automation, and excessive manual intervention, a quantitative loading system based on multi-hardware coordination is designed and implemented in this paper. The system deeply integrates modules such as a dynamic rail weighbridge, hydraulic control system, and laser recognition/positioning devices to construct a coordinated architecture featuring perception, control, execution, and monitoring. Specifically, the dynamic rail weighbridge serves as the system's measurement core and feedback hub, undertaking critical functions including precise dynamic weight acquisition, real-time weight distribution detection, and closed-loop control command generation, acting as the core support for realizing precise loading, prevention of off-center loading, and automated operations. The system fully complies with the requirements of the General technical standard of coal batch weigh wagon loading system (NB/T 11643-2024) and the Dynamic rail weighbridge (GB/T 14298-2019), providing an effective solution for the intelligent and precise upgrading of coal rail loading.

【Keywords】coal train; quantitative; multi-hardware coordination; dynamic rail weighbridge; PLC control; laser positioning; intelligent loading

引言

（1）研究背景

煤炭装运是煤矿生产和销售的关键环节，直接影

响煤矿的生产效率、生产安全和经济效益，实现装车站的自动化与精准化，已成为智能化矿山发展的必然要求与显著标志。

当前现役火车装车站自动化水平较为落后，系统仅在物料传送带输送及车皮牵引拖拽环节配置电力动力支持，而火车车厢前后车位转换对位、装煤落料口开度与位置调节、车厢内部煤料整平压实等一系列核心工况操作，全程依靠人工手动作业，缺乏自动化控制手段。

工人劳动强度高、劳动环境恶劣、安全风险高、装车效率低、装车精度难以保证。随着智能化煤矿建设推进，装车站实现“无人值守、精准计量、高效协同”的作业模式，因此研发基于硬件协同的定量装车系统具有重要现实意义。

(2) 国内外研究现状

欧美发达国家很多已实现煤炭装车的全自动化，其系统核心采用“激光定位+动态称重+变频控制”的硬件架构，但存在适配性差、成本过高的问题。国内研究多聚焦于单一硬件的性能优化，

如轨道衡的动态误差补偿、激光传感器的抗干扰设计、落煤口的调节等。

目前，尚未形成完善的硬件协同联动控制体系，车厢定位精度、车厢识别反馈与給料动态调速之间联动匹配不足，整体协同控制性能亟待优化提升。

本文基于硬件基础，构建“感知-控制-执行-监管”的硬件架构，重点解决设备间的协同控制问题。

(3) 研究内容与技术路线

本文核心研究内容包括：① 定量装车系统的整体架构设计和各层级核心硬件选型；② 轨道衡的动态称重技术优化与重量分布检测方案设计；③ 轨道衡与激光定位、液压控制系统、变频器的协同控制策略；④ 系统工业测试与轨道衡核心性能验证。技术路线系统如图1所示。



图1 技术路线系统图

1 系统总体设计

1.1 设计原则

系统设计遵循四大原则：① 精准性原则，轨道衡硬件满足动态称重误差 $\pm 0.1\%$ 以内、定位精度 $\leq \pm 5\text{cm}$ 的技术指标。② 协同性原则，确保液压

系统、轨道称重系统、自控系统各硬件设备数据互通、动作联动。③ 可靠性原则，适应煤矿粉尘、振动等恶劣工况。④ 兼容性原则，支持C62、C70、C80等多种车型的装车需求。

1.2 系统架构设计

系统采用“感知层—控制层—执行层—监控层”的四层硬件架构，各层核心设备及功能如下：
四层硬件控制架构如表1 所示，该表主要是对

功能按照感知层、控制层、执行层、监控层进行分类，并将该架构包含的设备按类别统计并描述其核心控制功能，整体实现了从数据感知→逻辑控制→动作执行的完整自动化装车流程。

表1 功能架构表

架构层级	核心硬件	功能描述
感知层	刷卡装置、激光定位装置、轨道衡	轨道衡：动态重量 / 重量分布采集、偏载检测 激光定位装置：车皮精准定位、车型尺寸识别 刷卡装置：火车身份验证、任务匹配
控制层	电气控制装置（含 PLC、液压控制模块、通信模块）	接收感知层数据，执行控制算法，下发控制指令 接收轨道衡、激光定位装置的实时数据，执行控制，下发给料、牵引、液压调节指令
执行层	火车前进装置、液压控制系统	调节给料设备速度、控制火车匀速前进，响应控制层指令 给料装置：采用变频器进行给料速度调节 火车前进装置：车皮对位、匀速牵引 液压控制系统：溜槽高度 / 姿态调节
监控层	视频监控装置、远程监管终端	车道多点位视频覆盖，精准捕捉下料口装车状态 实时识别撒料、溢料及装车等问题 集成车厢上衡、溜槽切换等设备状态联动监控 提供远程监管入口，支持异常工况的快速响应与处理

◆感知层：由轨道衡、激光定位装置、刷卡装置组成，负责采集火车身份、位置、重量等实时数据，为系统提供决策依据。

◆控制层：以含 PLC 的电气控制柜为核心，接收感知层数据，通过算法处理后，向执行层下发给料、牵引、液压调节等控制指令。

◆执行层：包含给料装置、火车前进装置、液压控制系统，按控制层指令调节给料速度、牵引火车对位、调整溜槽姿态，完成自动化装车作业。

硬件协同逻辑：工作人员刷卡装置触发装车任务后，此时，电控系统发出指令驱动变频器对绞盘电机进行火车车厢的拖拽动作，在拖拽过程中，通过车号识别系统对该车厢进行车号识别，读取车牌信息（车厢尺寸、载重量等信息），通过定位传感器判断首节车厢到达装车位置后绞盘电机停止拖动激光定位装置实时采集车皮位置信息，反馈至电气控制柜；PLC 控制器根据位置数据驱动火车前进装置，

实现车皮与溜槽的精准对位；轨道衡实时采集装煤重量，通过闭环控制算法调节变频器输出频率，改变给料机转速，实现定量装车。当车厢落煤口上方测距传感器检测到车厢内物料达到设定高度时，绞盘电机启动并拖动车厢前进一段距离继续装车，如此循环，直至通过定位传感器判断车厢完全上轨道衡并到达指定位置。

1.3 系统工作流程

该装车系统以煤炭连续自动化装车为目的，形成“储煤—输送—分配—装配”的完整作业流程，煤炭通过储煤仓经皮带输送至装车站，汇入主溜槽，通过主溜槽换向阀、液压站的驱动，将煤炭定向分配至车道1 或者车道2 对应的落煤口溜槽，通过拖拽系统对车厢前后精准停靠，构成物料输送+ 设备控制的闭环运行体系，最终完成对火车车厢的装料作业。系统运行流程如图2 所示。

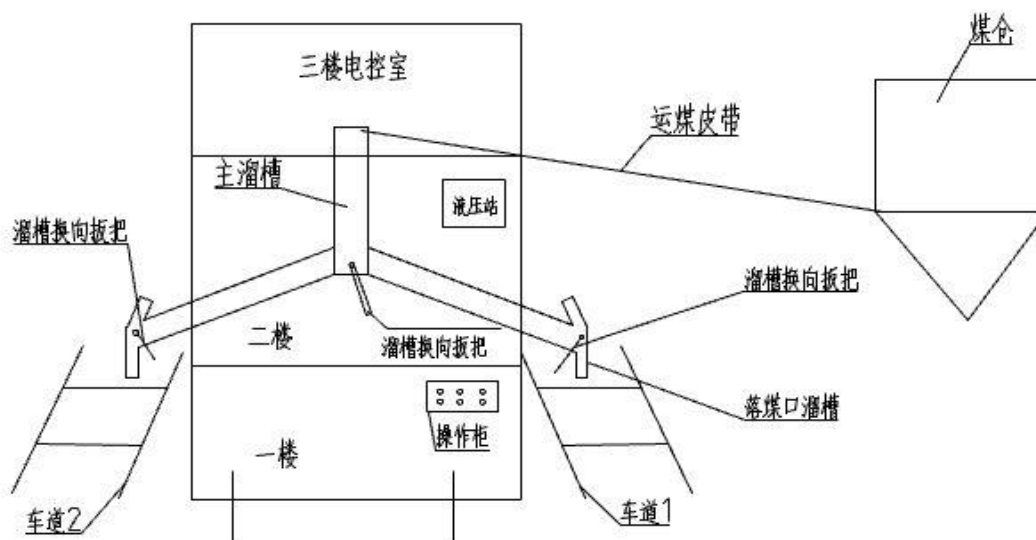


图2 系统运行流程

(1) 关键设备

- ◆煤仓：位于右侧，为储煤终端；
- ◆运煤皮带：连接煤仓与主溜槽，负责输送煤炭；
- ◆溜槽系统：含主溜槽（核心输送通道）、落煤口溜槽，配套溜槽换向扳把（左右两侧各1个），控制煤炭输送路径；
- ◆液压站：设于三楼电控室内，为系统提供液压动力支持。

(2) 物料输送逻辑

煤炭从煤仓流出，经运煤皮带输送至三楼电控室下方的主溜槽，再通过溜槽换向扳把控制，经二楼落煤口溜槽，最终落入一楼的车道1/车道2区域（运煤车辆装煤位置）。

2 核心硬件选型与功能实现

2.1 感知层硬件

(1) 刷卡装置

采用非接触式RFID刷卡模块（工作频率13.56MHz），支持读写距离0~10cm，防护等级IP67。

功能实现：司机通过刷卡完成火车身份验证（含车号、车型、额定载重等信息），数据实时上传至电气控制柜的PLC系统。系统自动匹配装车任务单，避免错装、混装，同时生成装车记录，实现数据可追溯。

(2) 激光定位装置（见图3）

功能实现：在装车区域两侧对称布置4组激光雷达，实时扫描火车车皮的边缘轮廓与位置坐标。通过坐标融合算法计算车皮中心位置与溜槽的偏差值，输出控制信号至火车前进装置，调节火车行驶速度与方向，确保车皮中心线与溜槽中心线偏差 $\pm 5\text{cm}$ 以内。同时，实时监测车皮长度与间距，为多节车皮连续装车提供位置基准。



图3 激光定位装置

该装置主要是用来对车厢定位，检测车厢到位位置将控制信号传输给电控柜，从而对车厢拖拽装置进行启动停止控制。

多激光雷达组合模块（测量距离0.5~50m，定位精度 $\pm 3\text{cm}$ ，采样频率100Hz），具备粉尘环境自适应补偿功能。

(3) 轨道衡

动态电子轨道衡，为铁路货厢动态高精度计量设备适配标准四轴车厢，最大量程 100t，动态计量误差 $\pm 0.1\%$ (0.2 级)，系统采用剪切梁式传感器，依

托电阻应变效应实现力电转换，其具有强抗偏载、抗侧向力与抗振动能力，配置 1kHz 高速采样与 16 位 AD，配合数字滤波与光电隔离设计，有效抑制列车冲击与电磁干扰。

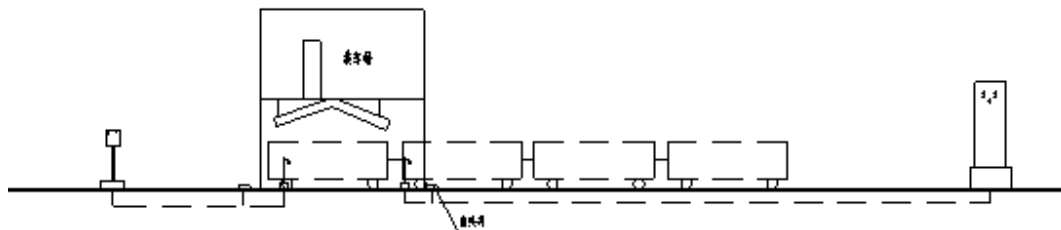


图4 轨道衡装车

图4 展示楼内设有 V 型溜槽结构，对应下方多组装车车位，用于煤炭装车作业。

列车行进过程中，轨道衡实时对车厢装煤重量进行动态在线精准计量，并将采集到的称重数据高速上传至电控系统。数据经后台处理中心实时运算分析后，同步下发控制指令，联动调节溜槽开度、皮带输送速率及车厢拖拽行进速度。系统依据实时载重反馈持续修正各执行机构运行参数，动态匹配当前装车工况，构建完整闭环控制逻辑，最终实现给料全过程的自适应智能调节，保障装车重量精准恒定、作业过程平稳高效。

轨道衡利用电阻应变电测原理称重，当罐车驶上衡器时，车轮重量通过称重轨传至数字化板式称重传感器，数字板式称重传感器的弹性体上粘贴着应变计，应变计组成惠斯通电桥，通过 AD104C 将模拟信号转换成数字信号，数字板式称重传感器安装在基础预埋板上并对称重轨起固定作用，防止钢轨纵向、横向移动，保证车轮重量正确传递。各称重传感器电缆线通过接线盒接到 RS485 总线接口进入 XK3102S 称重显示控制器，数字信号经称重显示控制器处理得到该次计量重量流程如图 5 所示。

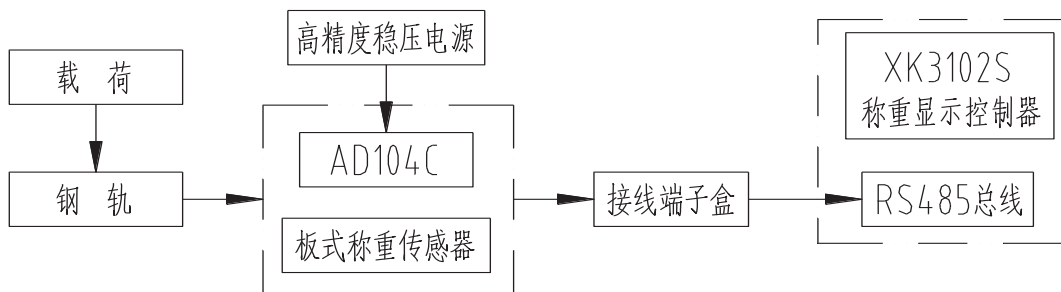


图5 轨道衡称重原理流程

◆工作温度：称重显示控制器：-10℃~+45℃；称重部分：-10℃~+60℃；湿度：≤95%。

◆工作电压：电压 AC220V (-10% ~ +15%)；频率 50Hz ± 1Hz。

(4) 视频监控模块

视频监控系统可有效辅助装车工人进行装车操作，监控现场设备状态，每个车道在当前车道下料

口的前后位置各设置摄像机，实时监控现场下料口装车状态，用于判断是否撒料、溢料，监管人员可通过远程监控模块监管火车上衡、溜槽切换、装车高度等，并进行异常处理。

2.2 控制层硬件

●电气控制装置

电气控制装置由 PLC 控制器、配备触摸屏、I/O

模块、通信模块（支持 Modbus TCP、Profinet 协议）等组成。

功能实现：作为系统的“控制中枢”，集成三大核心功能：① 数据处理：接收感知层设备的重量、位置、身份数据，进行逻辑运算与异常判断；② 控制指令下发：根据协同算法输出火车前进速度、变频器频率、溜槽高度等控制信号；③ 状态监测与报警：实时显示设备运行状态，当出现超偏载、定位偏差过大、设备故障时，立即触发声光报警并停机。

2.3 执行层硬件

（1）给料装置

功能实现：接收 PLC 系统的频率控制信号，调节给料机（或带式输送机）的电机转速，实现“粗装+精装”的双模式给料。当装煤重量达到额定载重的 90% 时，PLC 下发降频指令，变频器频率从 50Hz 降至 20Hz，减少给料速度；当重量接近额定值时，频率降至 5Hz，完成精准补料，避免超装。该模式使装车精度提升至 $\pm 0.3\%$ ，同时减少设备启停次数。

（2）火车前进装置

功能实现：接收激光定位装置的位置反馈信号，通过 PLC 控制牵引电机的转速与转向。单节车皮装车时，保持火车匀速行驶（速度 1.0km/h）；多节车皮连续装车时，根据激光定位的车皮间距数据，自动调节行驶速度，实现车皮无缝衔接，避免装车中断。

2.4 关键装置

轨道衡是系统的“心脏”与“眼睛”，其核心功能直接决定系统的性能上限，具体拆解为三个作用：

（1）动态称重，精准计量是定量装车的基础支撑

煤炭装车过程中，火车处于匀速行驶状态（1.0km/h），传统称重设备易受振动、冲击干扰，导致重量数据失真。轨道衡采用剪切梁式应变传感器+多通道同步采样技术，结合卡尔曼滤波算法进行动态误差补偿，有效消除车辆行驶带来的振动干扰，实现动态称重误差 $\leq \pm 0.08\%$ FS。该数据作为定量装车的核心依据，确保单节车皮装车重量与额定载重偏差控制在 $\pm 0.2\%$ 以内。

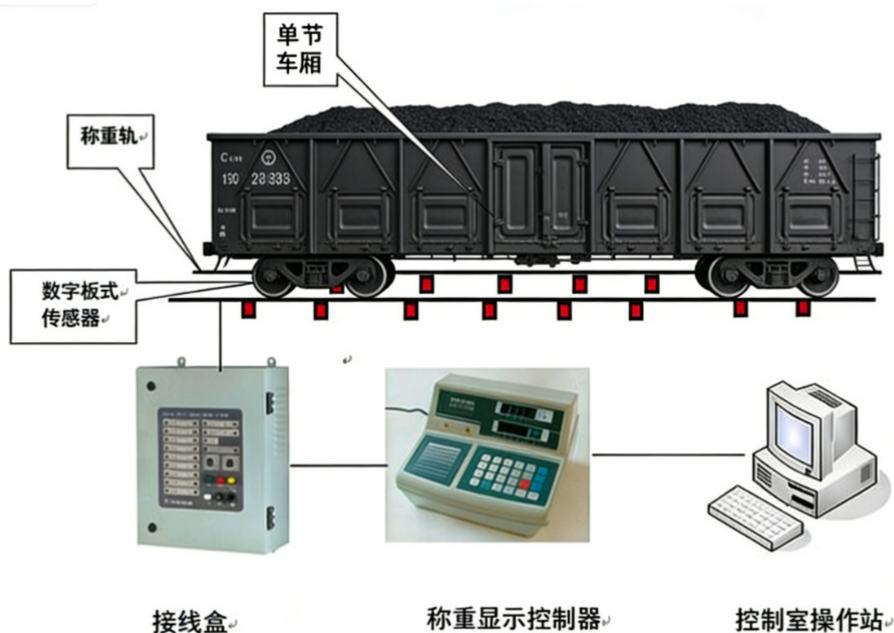


图6 轨道衡架构

图6 展示轨道衡通过传感器采集→接线盒传输→控制器处理→工作站监控的流程，完成定量装车自动称重与数据管理。

◆称重结构

待装车装置：行驶在称重轨上，是被称重的对象。

数字板式传感器：安装在称重轨下方，用于采集车辆的重量信号。

◆信号传输与处理

接线盒：接收传感器采集的重量信号并进行汇总、传输。

称重显示控制器：对接收到的信号进行处理，实时显示重量数据，并可进行操作控制。

◆远程监控

控制室操作站：由电脑及外设组成，用于远程查看、记录称重数据，实现系统监控与管理

(2) 实时重量分布检测是偏载防控的关键手段

偏载是火车装车的核心安全隐患，表现为煤炭在车皮内分布不均，一侧重量远超另一侧。轨道衡配备4路独立重量检测传感器，分别采集车皮左、右、前、后四个区域的重量数据，通过PLC计算偏载系数。当偏载系数超过0.8%的预警阈值时，立即向电气控制柜发送异常信号，触发液压控制系统微调溜槽姿态，使煤炭均匀分布，将偏载率控制在0.65%以下，避免车皮倾覆风险。

$$K=W_{\text{总}}/|W_{\text{左}}-W_{\text{右}}|\times 100\%$$

(3) 数据存储与追溯，实现全流程可管控

轨道衡配备大容量数据存储模块，实时存储每节车皮的称重时间、车号、车型、总重量、偏载系数、給料速率等数据，通过电气控制柜上传至煤矿ERP系统与铁路调度系统。当出现运输纠纷或设备故障时，可快速调取历史数据进行溯源分析，为煤炭运输的精细化管理提供数据支撑。

3 结论与展望

3.1 结语

本文设计并实现了煤炭火车定量装车系统，通过轨道衡、激光定位装置、电气控制装置等核心硬件，构建其协同联动机制，实现了装车全流程的自动化与精准化。系统采用“感知—控制—执行”的三层硬件架构，并基于定位—前进协同算法与称重—变频闭环控制算法，实现了从车厢精准对位、自适应给料到全程监控的智能控制。

通过对落煤口溜槽、车厢的牵引装置到车厢的电气化改造，并在关键部位部署视频监控，系统实现了主要工作流程节点的电气化控制。实际应用表明，该系统极大降低工人劳动强度，大幅度提升

自动化水平，有效改善了恶劣工作环境对工人健康的影响，在减少人工干预的同时提高装车效率与精度。工业线程测试验证了系统运行稳定、可靠，其装车精度、作业效率等关键性能指标均达到行业先进水平，具备广泛的工程应用和推广价值。

3.2 展望

尽管本研究取得了阶段性成果，但煤炭装车系统的智能化发展仍有持续优化的空间，未来可从三个方向进行优化：

(1) 引入自动化控制计算技术，实现多装车站的协同调度与远程监控。

(2) 融合机器视觉技术，增加车皮破损检测功能，自动跳过破损车皮，增强作业的安全性与可靠性。

(3) 基于大数据分析构建装车参数自优化模型，根据煤种、车型、环境等因素动态调整控制参数，进一步提升系统的适应性与智能化水平。

参考文献

- [1] 李宗泽. 火装站精准装车系统性能与装车效果研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [2] 刘欣, 杨臻, 何坐楼等. 红柳林煤矿火车装车智能化装车关键技术研发与应用[J]. 智能矿山, 2023, 4(3): 73-79. [3]
- [4] 齐海龙. 基于PLC的选煤厂智能快速动态自动定量装车系统设计研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(16): 124-127. DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.16.029.
- [5] 崔义森. 铁路智能装车系统技术研究与应用[J]. 煤矿机电, 2023.03.014.
- [6] 希都日古, 于昕, 常文峰等. 煤炭快速定量装车站精准装料控制系统设计[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 14-19. DOI:10.11799/ce202305003.
- [7] 刘儒. 火车快速定量装车系统自动化系统的升级与研究[D]. 华北理工大学, 2021.

作者简介

刘东东 (1989—) 中级工程师，从事电气工程及自动化专业，现就职于山东金钟科技集团股份有限公司，从事电气设计、自控系统开发等工作。