

设置缓冲平台为独立的伺服皮带机构进行独立输送，具有排空功能。

由于第一推进器的速度达到 137.6mm/s，缓冲平台与烟条的摩擦系数为 0.15 至 0.3，烟条将会在平台上产生较大窜动，因此需要在缓冲平台上方设置毛刷为烟条输送时增加摩擦力达到平稳输送的目的。

4.3 码垛机构

码垛机构由接板从上至下一层一层的步进运动将缓冲平台的烟条码垛成 5x10=50 条的排列。

为了实现步进接烟码垛功能，需要在底部接板设置步进电机或者伺服电机实现，承载能力需要大于 10.247kg（一件烟的重量）。

在码垛平台两侧板需要安装气缸，当入箱机构推送时，需要气缸驱动侧板将码垛机构内的烟条夹紧，使烟条更好地进入下一道工序。

同时也可以根据烟条外观的特性，按照二维码的打印位置在码垛机构的挡板处安装扫码头进行条箱关联。

4.4 入箱机构

入箱机构将码垛成 50 条的烟条通过后侧推板向前推送，通过导向窗导向，准确推送入箱。

入箱机构的动力机构与第一推进器需求基本相同，但需要通过导向窗以及推送的数量不一致，则入箱机构需要选择更大承载力和形成的动力机构，按照实际可选择单轴机械手机构、电缸机构、滚珠丝杆/滑台机构以及气缸结构。

气缸选型：

负载力 F 的计算： $F=\mu mg$

参照表 1， $m=10.247\text{kg}$ ， $\mu=0.5^{[4]}$ ，可计算出负载力 $F=50.21\text{N}$

气缸缸径计算：

气源压力 $P=0.5\text{Mpa}$ ，水平安装负载率 $=0.7$ ，则可算出

$$D=\sqrt{\frac{4F}{\pi P \eta}}=\sqrt{\frac{4 \times 50.21}{3.14 \times 0.7 \times 5 \times 10^5}}=0.0135\text{m}=13.5\text{mm}$$

圆整至标准缸径 16mm。

5 改进效果

硬纸板条盒装填机实施空盒输送通道改进后，与原设备控制系统对接，保证本装置与原设备不冲突，不改变原机性能。设计烟条收集装置，将原出口处平辅的烟条转向竖立并收拢成 5 条为一个单位的烟条组。将烟条组与收集机构的烟条进行整体分离，并有序推入空箱内。空箱供料装置能根据箱内烟条的数量自动降低一条烟的高度，以保证下一条烟组能顺利进行烟箱

6 结语

为了提升设备的适应能力，拓展其使用范围，我们需要设计一台高速包装机烟条自动收集装箱装置，通过烟条自动收集、自动堆叠和推送入箱，减少操作工介入，可以提升设备自动化水平，满足盒条件关联系统对设备提出的要求，降低操作工劳动强度，提升车间现场整洁程度。

参考文献

- [1] 刘旻,杨文凯,赵艳妮,等. YP11A封箱机“盒条件”关联方法的探索研究——一种YP11A封箱机“盒条件”关联方法[J]. 传感器技术与应用,2024,(4): 531-537.
- [2] 雷国星,喻树洪,王文鼎,等. 卷烟包装装箱烟人工分拣系统的改进与应用[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(3): 29-31.
- [3] 彭雄,郭龙,袁勇,等.一种用于包装机的条烟收集装置:CN202420883072.4[P].20240423.
- [4] 陆小龙,刘秀波,余鹏程,等. 后热处理对304不锈钢激光熔覆Ni60/h-BN自润滑耐磨复合涂层组织和摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报,2016,(1): 48-54.
- [5] 赖厚安. 一种H-bot追踪抓取式装箱机的分析与设计[J]. 包装与食品机械,2023,41(5): 82-86.

Modeling and Simulation Research on the Vehicle Control System of Pure Electric Excavators Based on Simulink

Wenchao Che Jiafeng Feng

College of Automotive Engineering, Weifang, Shangdong, 262737, China

Abstract

In response to the “dual carbon” strategy, the electrification of construction machinery has become the core of industrial upgrading, with the vehicle control unit (VCU) being crucial for the performance of pure electric excavators. Addressing the issues of lengthy development cycles, high testing costs, and slow iteration in traditional control systems, this study focuses on a 20-ton pure electric crawler excavator. Using model-based design (MBD), a forward simulation model of the vehicle was constructed in Simulink, incorporating the power battery, drive system, and electro-hydraulic coordination. Multi-mode coordination, torque distribution, and condition-adaptive energy recovery strategies were developed, along with a “perception-decision-execution” VCU simulation platform. Typical working condition tests demonstrated that the system achieved precise component coordination, with mode switching $\leq 100\text{ms}$ and no impact, meeting ISO lifting force requirements and achieving a 14.3% energy-saving rate. The study confirmed the effectiveness of MBD and provided support for VCU iterative optimization.

Keywords

pure electric excavator; Vehicle Control Unit (VCU); Simulink; Based on model design; Energy recovery strategy

基于 Simulink 的纯电动挖掘机整车控制系统建模与仿真研究

车文超 冯加锋

潍坊职业学院汽车工程学院, 中国·山东 潍坊 262737

摘要

为响应“双碳”战略, 工程机械电动化成为产业升级核心, 整车控制系统(VCU)对纯电挖掘机性能至关重要。针对传统控制系统开发周期长、测试成本高、迭代慢等问题, 以20吨级纯电履带挖掘机为对象, 采用基于模型设计(MBD), 在 Simulink 构建含动力电池、驱动系统及电液协同的整车前向仿真模型, 研发多模式协同、转矩分配、工况自适应能量回收策略, 搭建“感知—决策—执行”VCU 仿真平台。典型工况验证表明, 系统实现部件精准协同, 模式切换 $\leq 100\text{ms}$ 且无冲击, 满足 ISO 掘起力需求, 节能率达 14.3%。研究证实 MBD 有效性, 为 VCU 迭代优化提供支撑。

关键词

纯电动挖掘机; 整车控制系统(VCU); Simulink; 基于模型设计; 能量回收策略

1 引言

在“双碳”^[1]目标下, 工程机械电动化势在必行^[2]。传统柴油挖掘机排放高、能效低, 而纯电动挖掘机可实现零排放、高能效, 是重要解决方案。但其发展面临作业工况复杂导致续航短、电液系统协同控制难、电池成本高昂等挑战^[3]。

整车控制系统(VCU)作为核心, 通过优化能量管理、协调动力分配与保障安全, 是解决上述难题的关键。深入研究 VCU 不仅具有重要的理论价值, 更能为缩短开发周期、降低成本、推动产业化提供工程支撑。

【作者简介】车文超(1987-), 男, 中国山东邹平人, 硕士, 从事车辆电控技术研究。

2 纯电动挖掘机整车控制系统建模与策略设计

2.1 VCU 总体架构设计

功能需求: 基于动力性、经济性、安全性, 实现 7 项核心功能—上电/下电管理遵循 GB/T38032-2021(防冲击电流)、4 种工作模式(驻车/行走/作业/举升)切换、转矩分配、制动能量回收、电池 SOC(20%-95%)与温度(-20°C-60°C)功率限制、三级故障诊断、CAN2.0B 通讯(延迟 $\leq 10\text{ms}$)。

层次结构: “协调层-决策层-执行层”三级架构, 协调层(Stateflow 实现模式管理与故障诊断)为中枢, 决策层处理转矩/能量回收/功率仲裁, 执行层转换指令与采集反馈, 实现决策-执行解耦。

2.2 Simulink 整车控制策略建模

工作模式管理: Stateflow 有限状态机定义 6 种状态(含 Off、Parking), “事件—条件”触发切换(如

Parking → Travel 需 D/R 档且车速 ≤0.5km/h)，降错 60% 以上。

驱动力分配：行走模式按油门 / 车速查表定总转矩、转向调左右电机转矩差；作业模式按液压压力 / 主泵转速算总转矩并全部分配主电机；复合模式协调主电机与行走电机，控总功率不超电池峰值。

能量回收与功率保护：回转回收（操纵杆回位 / 反操作，回馈转矩 = 负载转矩 × 0.3—0.6 系数，一阶惯性平滑）；行走回收（滑行 / 轻制动，急刹优先机械制动，限回馈功率）；故障时 10ms 内冻结转矩指令。

2.3 部件仿真与前向平台搭建

关键部件模型：Simulink 封装子系统—电池（Thevenin 模型， $U_{bat}=U_{oc}-I \times R$ ）、永磁同步电机（dq 轴模型，效率 92%-96%）、液压系统（主泵流量关联转速 / 排量，油缸

推力关联压力 / 面积）。

前向仿真平台：“驾驶员—控制器—被控对象” 闭环架构，输入层模拟操作，控制器层导入 VCU 策略，被控对象层输出车速 / SOC，反馈层滤波回传；0.001s 固定步长 + ode4 求解器，保障精度与稳定性。

3 整车控制策略仿真验证与结果分析

基于上面搭建的仿真平台，设置 20 吨级纯电动挖掘机参数与典型作业工况，从动力性、经济性、平顺性三方面验证控制策略性能，并与传统柴油挖掘机对比。

3.1 仿真环境与工况设置

3.1.1 仿真参数设置

参考市场主流 20 吨级纯电动挖掘机参数，设定仿真模型关键参数如下表 1：

表 1 挖掘机参数

部件类别	参数名称	参数值	单位	备注
整机参数	整机工作重量（含配重）	20000	kg	-
	铲斗容量	1.0	m³	标准斗容
动力电池系统	电池类型	磷酸铁锂（LFP）	-	单体电压 3.2V，串联 187 节
	额定电压	600	V	-
	额定容量	300	Ah	-
	总能量（标称）	180	kWh	可用能量 162kWh（SOC20%-95%）
主驱动系统	电机类型	永磁同步电机	-	驱动液压泵
	峰值功率	180	kW	-
	峰值扭矩	950	N·m	-
	额定转速	1800	r/min	-
回转驱动系统	电机类型	永磁同步电机	-	-
	峰值功率	50	kW	-
	峰值扭矩	450	N·m	-
行走驱动系统	电机类型	永磁同步电机 × 2	-	左右各 1 台
	单电机峰值功率	40	kW	-
	单电机峰值扭矩	350	N·m	-
液压系统	主泵类型	电控变量轴向柱塞泵	-	-
	主泵最大排量	130	mL/r	-
	主系统安全压力	35	MPa	-

仿真环境为 MATLAB/SimulinkR2021b，固定步长 0.001s，求解器采用 ode4（Runge-Kutta）。

3.1.2 典型循环工况定义

参考 GB/T37446-2019，设计 60s 单循环工况，含四阶段：0-15s 挖掘（主电机满负荷）、15-30s 回转卸料（含能量回收）、30-35s 卸料、35-60s 空斗回转行走（含能量回收）。连续 5 循环（300s），评估电池 SOC 与能量回收效果。

3.2 控制策略仿真结果分析

3.2.1 动力性仿真分析

通过挖掘阶段与回转阶段的关键参数曲线评估动力性。液压系统响应：0~15s 挖掘阶段，主泵出口压力从 0 升至 28MPa 的时间 ≤1.2s，压力波动幅度 ≤0.5MPa，满足

ISO10987-1 标准中“掘起力响应时间 ≤2s”的要求；主电机转速从 0 升至 1800r/min 的时间 ≤1.5s，无超调现象。

回转性能：15~28s 回转阶段，回转电机转速从 0 平稳升至 25r/min（上升时间 2.5s），转速超调量 < 5%；28~30s 制动阶段，转速从 25r/min 降至 0 的时间 1.8s，无冲击抖动，表明能量回收策略未影响制动平顺性。

通过以上可以得出所提控制策略可实现电驱动系统与液压系统的快速协同响应，完全满足纯电动挖掘机的动力性需求。

3.2.2 能量经济性仿真分析

通过电池 SOC 变化与能量回收功率曲线评估经济性。

总能耗计算：初始 SOC=80%，5 个循环后