

基于机-液-散耦合方法的装载机装卸性能研究

杨飞^{1,2} 权龙² 王国强³ 刘近报¹ 陈泽仁²

(1. 潍柴动力股份有限公司内燃机与动力系统全国重点实验室, 潍坊 261000;
2. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 3. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130025)

摘要: 目前装载机研究主要侧重于给定静态载荷下装卸性能, 未考虑挖掘过程料堆与机械系统以及液压系统之间的交互作用; 针对装载机装卸性能演变分析问题, 通过流体仿真和刚散耦合方法研究装载机装卸性能不能反映装卸过程物料系统、机械系统以及液压系统之间的实时交互效应。为此, 本文以阀控装载机为例, 基于机-液-散耦合方法构建了装载机装卸性能模型, 探究了装载机在不同复合动作下装卸性能。结果表明: 变举升液压阀开度工况下液压泵峰值功率高于变转斗液压阀开度工况的液压泵峰值功率, 并且随着举升液压阀开度增加, 物料扰动速度先稳定后有所下降, 随着转斗液压阀开度增加, 物料扰动速度先增加后下降。研究结果可为装载机数字化设计提供借鉴。

关键词: 装载机; 装卸性能; 机-液-散耦合方法

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0412-08

OSID:



Loader Loading and Unloading Performance Analysis Based on Machine – Liquid – Bulk Coupling Method

YANG Fei^{1,2} QUAN Long² WANG Guoqiang³ LIU Jinbao¹ CHEN Zeren²

(1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261000, China
2. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
3. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: As a piece of key mechanical equipment in agriculture and construction, the performance improvement of loaders is of great significance. The current study mainly focused on the loading and unloading performance of loaders under a given static load, without considering the interaction between the material system, the mechanical system, and the hydraulic system in the excavation process. The loading and unloading performance of the loader was mainly investigated by the fluid simulation and rigid-diffusive coupling methods, which were not able to reflect the real-time interaction between the material system, the mechanical system, and the hydraulic system in the loading and unloading process. For this reason, a loading and unloading performance model of the working device of the widely used valve-controlled loader was constructed based on the machine – liquid – bulk multi-coupling method, on this basis, the loading and unloading performance evolution law of the loader under different composite actions was investigated. The results showed that the lifting hydraulic cylinder rodless chamber pressure was about 8 MPa, the bucket hydraulic cylinder rodless chamber pressure was about 4 MPa, and the bucket hydraulic cylinder rodless chamber pressure was more stable than the lifting hydraulic cylinder rodless chamber pressure under steady state operation. When the opening degree of both the lift hydraulic valve and the bucket hydraulic valve was 62.5%, the full bucket rate of the loader reached 91.48%, and the lift action had obvious influence on the digging volume of the loader. The peak power of the hydraulic pump under the variable lifting hydraulic valve opening condition was higher than that under the variable dumping bucket hydraulic valve opening condition, and the material disturbance velocity was first

收稿日期: 2025-01-18 修回日期: 2025-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52305275)、山西省基础研究计划项目(TZLH20230818004、202303021212072)、内燃机与动力系统全国重点实验室开放课题(skleps-sq-2023-015)

作者简介: 杨飞(1986—),男,高级工程师,太原理工大学博士生,主要从事机电液一体化技术研究,E-mail: 1739610049@qq.com

通信作者: 陈泽仁(1993—),男,副教授,博士生,主要从事机电液一体化技术研究,E-mail: chenzeren@tyut.edu.cn

stabilised and then decreased with the increase of lifting hydraulic valve opening, and increased and then decreased with the increase of dumping bucket hydraulic valve opening. The research findings may serve as a reference for the digital design of loaders.

Key words: loader; loading and unloading performance; machine – liquid – bulk coupling method

0 引言

装载机主要用于对松散物料的铲装和短距离运输,由于其机动性好、作业速度快以及工作效率高等特点,在工程建设中得到了广泛使用^[1-2]。实际作业过程中,由举升和转斗等动作形成的复合动作,实现装载机装卸功能^[3]。因此,在“双碳”和工作效率双重要求背景下,分析不同复合动作下载载机装卸性能(能耗特性、工作特性、物料扰动等)演变规律,可为装载机数字化设计和性能提升提供参考^[4]。

目前,关于装载机装卸性能研究主要集中在液压系统构型改进、能耗评估以及控制策略优化。在液压系统构型改进方面,朱恩旭^[5]提出一种混合动力 ZL50C 型装载机动臂能量回收及再生系统,采用蓄能器作为储能元件,能耗降低 21.3%。王翔宇等^[1]融合电机械执行器高效率与液压缸-蓄能器高势能回收效率的优势,提出电-液双源混合驱动举升系统,能耗降低 51.7%。王翔宇等^[6-7]为消除液压系统溢流与节流损失,采用闭式泵控原理驱动动臂单出杆液压缸,并在恒定载荷下分析了动臂能耗特性,结果表明能耗可降低 47.19%。张晓刚等^[8]采用闭式泵控三腔液压缸驱动装载机举升装置,较原有阀控非对称液压缸系统空载、半载和满载工况下能耗分别降低 22.7%、20.9% 和 21.5%。

在能耗评估方面,文献[9-10]基于连续介质理论分析了装载机在自动铲装过程不同铲装阶段下的能耗特性和满斗率。王敏等^[11]通过同样的方法分析了铲装过程工作装置各关键铰接点的载荷。张楷祥等^[12]通过离散元法仿真获得装载机工作装置铲装阻力。于向军等^[13]基于多体动力学与离散元法耦合的方法,探究了装载机分段铲装过程满斗率和能耗特性。LEE 等^[14]为了捕获挖掘过程铲斗与大堆积角土壤之间的相互作用力,通过改进基本土方方程以消除土壤力的不连续性。CHEN 等^[15]为了获得挖掘阻力,提出一种基于粒子群优化算法和长短期记忆神经网络的复合阻力预测模型,为能耗评估提供依据。

在控制策略优化方面,徐源俊等^[16]通过模拟装载机工作中对液压泵控制过程,检验液压泵在装载机工作过程的稳态性能。李泽龙等^[17]提出一种基于模糊 PID 泵阀协同进出口独立控制的装载机摇臂

液压系统,可显著降低阀口节流损失,在保持摇臂机构动力性不变的前提下,泵功率峰值在摇臂液压缸阻抗和超越工况下分别降低 13.6% 和 46.8%。卢一鸣等^[18]为了降低装载机铲装作业时因轮胎滑转而造成的功率损失,通过自动提升动臂破坏密实核,达到了铲斗减阻插入;谭鹏等^[19]通过构建装载机工作装置多体动力学模型和液压系统模型,优化了高位卸载工况下动臂液压缸回缩现象,降低回缩量 89.3%。

目前研究主要侧重于给定静态载荷下装卸性能研究,未考虑挖掘过程料堆与机械系统以及液压系统之间的交互作用;通过流体仿真方法和刚散耦合方法研究装载机装卸性能,均不能反映装卸过程物料系统、机械系统以及液压系统之间的交互耦合作用。本文基于机-液-散耦合方法构建装载机工作装置装卸性能模型,并探究在不同复合动作下载卸性能,以为装载机数字化设计和性能提升提供参考。

1 工作装置装卸性能模型构建

1.1 工作装置工作原理

装载机工作装置结构与原理如图 1 所示,柴油内燃机为上位机控制器提供电能,电机为液压泵提供机械能,液压泵为转斗液压系统和举升液压系统提供动力液压油,控制器用于控制转斗液压阀和举升液压阀工作状态,进而对相应转斗液压缸和举升液压缸的工作状态进行控制,实现不同的转斗动作和举升动作,即不同的铲斗复合动作。

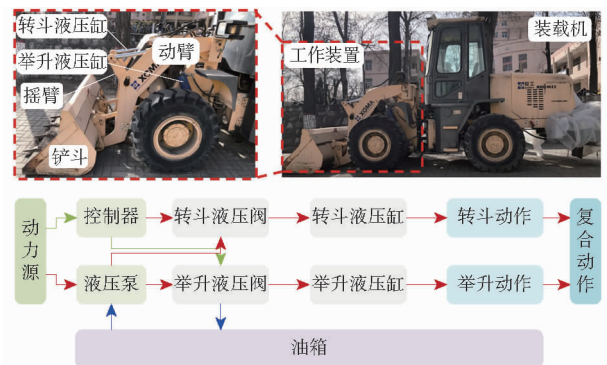


图 1 工作装置结构与工作原理

Fig. 1 Working mechanism structure and operating principle

1.2 装卸性能模型构建

装载机作业过程,挖掘物料是多颗粒系统,装载机工作装置是多体系统,液压驱动系统是复杂流体

系统,三者交互耦合,故其作业过程为典型的多体系耦合行为。因此,为更真实体现装载机工作装置实际装卸性能,构建基于机-液-散耦合方法装载机工作装置装卸性能模型,如图2所示。通过 EDEM 软件构建挖掘物料离散元法仿真模型,通过 Recurdyn 软件构建装载机工作装置多体系统仿真模型,通过 Amesim 软件构建液压驱动系统仿真模型。

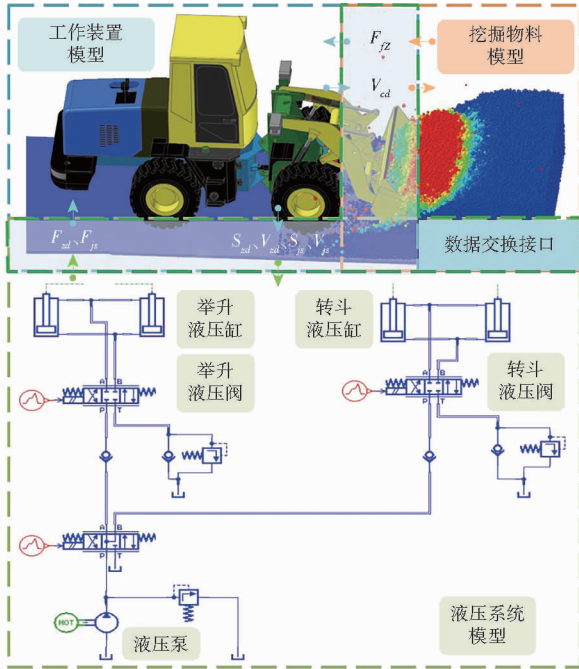


图2 工作装置装卸性能模型

Fig.2 Loading and unloading performance model of work device

通过多球填充方法构建物料颗粒模型。考虑挖掘物料为常见的碎石子,颗粒形状为典型四面体,主要分为4种,相应棱长为30、40、50、60 mm。按照实际挖掘物料颗粒组成,设质量比为4:4:7:5。根据牛顿第二定律,任意时刻物料颗粒运动状态可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_i(t) + \mathbf{G}_i - \beta \dot{\mathbf{q}}_i(t) = m \ddot{\mathbf{q}}_i(t) \\ \mathbf{T}_i(t) - \beta \dot{\boldsymbol{\omega}}_i(t) = I \ddot{\boldsymbol{\omega}}_i(t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{F}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{F}_{ij}(t) =$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{F}_{normal-ij}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{F}_{tangential-ij}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{T}_{ij}(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{F}_{tangential-ij}(t) R_i \quad (3)$$

式中 $\mathbf{F}_i(t)$ ——当前时步颗粒所受到的合外力
 \mathbf{G}_i ——本颗粒重力在 i 坐标方向上的分量
 β ——阻尼系数
 m ——本颗粒质量

$\dot{\mathbf{q}}_i(t)$ ——速度矢量在 i 坐标方向上分量

$\ddot{\mathbf{q}}_i(t)$ ——加速度矢量在 i 坐标方向上分量

$\mathbf{T}_i(t)$ ——本颗粒所受到外力引起的合力矩

$\boldsymbol{\omega}_i(t)$ ——当前时步颗粒转动角速度

I ——颗粒转动惯量

$\mathbf{F}_{normal-ij}(t)$ —— t 时刻颗粒 i 和颗粒 j 之间的法向接触力

$\mathbf{F}_{tangential-ij}(t)$ —— t 时刻颗粒 i 和颗粒 j 之间的切向接触力,其计算方法见 1.3 节

N —— t 时刻与颗粒 i 发生接触的颗粒数目

R_i ——颗粒 i 物理半径

通过追踪每个时步每个颗粒对应的运动状态,可获得整个物料颗粒系统宏观运动特性和力学特性。

在不影响挖掘动作前提下,为了加快仿真计算效率,工作装置模型做如下处理:整个装载机关键部件按实际样机尺寸构建,工作装置各部件按实际样机装配关系进行装配,包括驾驶室在内的其他部件则固结为一体。通过多刚体动力学获得工作装置各部件运动状态,计算式为

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{q}, t) \ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Phi}_q^T(\mathbf{q}, t) \lambda - \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = 0 \\ \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 t ——挖掘时间

\mathbf{q} ——位置矢量

$\dot{\mathbf{q}}$ ——速度矢量

$\ddot{\mathbf{q}}$ ——加速度矢量

λ ——拉格朗日乘子

\mathbf{M} ——工作装置机械系统惯性矩阵

$\boldsymbol{\Phi}_q$ ——约束方程雅可比矩阵

\mathbf{Q} ——外部力矢量

$\boldsymbol{\Phi}$ ——位置矢量约束方程

液压系统仿真模型向工作装置机械仿真模型传递转斗液压缸、举升液压缸驱动力,计算式为

$$\begin{cases} F_{zd} = p_{zd1} A_{zd1} - p_{zd2} A_{zd2} + F_{zdisc} \\ F_{js} = p_{js1} A_{js1} - p_{js2} A_{js2} + F_{jdisc} \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_{zd} ——转斗液压缸驱动力

p_{zd1} ——转斗液压缸进油腔压力

A_{zd1} ——转斗液压缸进油腔有效作用面积

p_{zd2} ——转斗液压缸出油腔压力

A_{zd2} ——转斗液压缸出油腔有效作用面积

F_{js} ——举升液压缸驱动力

p_{js1} ——举升液压缸进油腔压力

A_{js1} ——举升液压缸进油腔有效作用面积

p_{js2} ——举升液压缸出油腔压力
 A_{js2} ——举升液压缸出油腔有效作用面积
 F_{zdvisc} ——转斗液压缸粘性阻力
 F_{jsvisc} ——举升液压缸粘性阻力

将上述挖掘物料离散元法仿真模型、液压驱动系统仿真模型、工作装置多体系统仿真模型通过数据交换接口实现数据实时交互耦合。即工作装置机械仿真模型向挖掘物料散体模型传递铲斗速度(V_{cd}),向液压系统仿真模型传递转斗液压缸、举升液压缸位移、速度(S_{zd} 、 V_{zd} 、 S_{js} 、 V_{js}),挖掘物料散体模型向工作装置机械仿真模型传递外负载(F_{fz}),液压系统仿真模型向工作装置机械仿真模型传递转斗液压缸、举升液压缸驱动力。

1.3 接触力计算

在离散元法仿真时,需实时获得碎石子颗粒间、颗粒与机械部件间的接触力,以用于计算物料颗粒运动状态^[20-22]。需选择一种合适的接触力计算模型。考虑到本文所研究挖掘物料为一种典型的干性多颗粒系统,砂石颗粒间粘性较低,故选择 Hertz - Mindlin (No - Slip) 接触模型^[23-25],如图 3 所示。

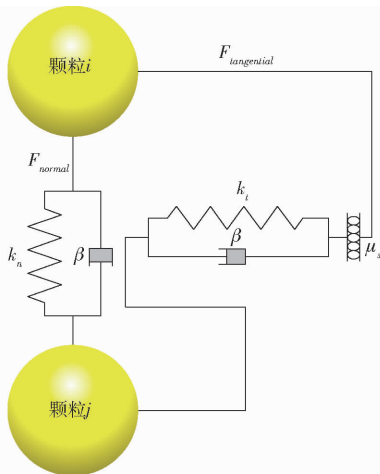


图 3 接触模型

Fig. 3 Contact model

该模型将接触力分为法向接触力和切向接触力,法向接触力是基于 Hertz 接触理论计算获得,切向接触力是基于 Mindlin - Deresiewicz 的研究计算获得。法向接触力和切向接触力均由弹性力和阻尼力叠加形成,阻尼力与阻尼系数和碰撞恢复系数有关,切向摩擦力基于库伦摩擦定律计算获得^[20],滚动摩擦力通过接触独立定向恒转矩模型获得。法向接触力可表示为

$$F_{normal} = F_{normal}^e + F_{normal}^d = \frac{4}{3}E^* \sqrt{R^* U_n^2} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_n m^* v_n^{rel}} \quad (6)$$

式中 F_{normal}^e ——法向弹性力

F_{normal}^d ——法向阻尼力
 E^* ——当量弹性模量
 R^* ——当量半径
 U_n ——颗粒 i 和颗粒 j 发生接触时的法向叠合量
 k_n ——法向刚度
 β ——阻尼系数
 m^* ——当量质量
 v_n^{rel} ——颗粒 i 和颗粒 j 相对速度法向分量

切向静摩擦力可表示为

$$F_{friction} = \mu_s F_{normal} \quad (7)$$

式中 μ_s ——静摩擦因数

$F_{friction}$ ——切向静摩擦力

切向接触力计算式为

$$F_{tangential} = - (F_{tangential}^e + F_{tangential}^d) = - \left(k_t U_t + 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_t m^* v_t^{rel}} \right) \quad (8)$$

其中 $F_{tangential} = \begin{cases} F_{tangential}' & (F_{tangential}' \leq F_{friction}) \\ -F_{friction} & (F_{tangential}' > F_{friction}) \end{cases} \quad (9)$

式中 $F_{tangential}^e$ ——切向弹性力

$F_{tangential}^d$ ——切向阻尼力

U_t ——颗粒 i 和颗粒 j 接触过程中的切向相对位移

k_t ——切向刚度

v_t^{rel} ——颗粒 i 和颗粒 j 相对速度切向分量

装卸性能模型关键物性和接触参数见表 1。

表 1 装卸性能模型关键参数

Tab. 1 Loading and unloading performance modelling key parameters

参数	数值
挖掘物料密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600
边界密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
挖掘物料泊松比	0.2
边界泊松比	0.3
挖掘物料剪切模量/Pa	5×10^7
边界剪切模量/Pa	7×10^{10}
挖掘物料静摩擦因数	0.74
边界静摩擦因数	0.49
液压泵排量/($\text{cm}^3 \cdot \text{r}^{-1}$)	50
液压泵转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 000
整车质量/kg	6 600

1.4 装卸性能模型验证

为了验证所构建装卸性能模型有效性,基于图 1 所示装载机试验平台进行典型正载工况下载载机挖掘试验,并通过装卸性能模型进行相应的多耦合仿真。即 0 ~ 2.5 s 铲斗放平插入料堆,2.5 ~ 4.5 s 铲

斗向上翻转,4.5~6 s 铲斗保持位姿不变,6~15 s 动臂逐渐被举升,13.5~15 s 铲斗下翻卸料。

装卸性能结果如图4所示。可以看出,试验和多耦合仿真液压缸位移、无杆腔压力、液压泵功率演变规律一致,相应挖掘质量分别为1 000、1 036.45 kg,相对误差为3.65%;液压泵能耗 $W(t)$ 计算式为

$$W(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (10)$$

式中 $P(t)$ ——液压泵功率

可得液压泵能耗试验值和仿真值为123.9、133.2 kJ,相对误差为7.51%,初步验证了所建立装卸性能模型有效性。

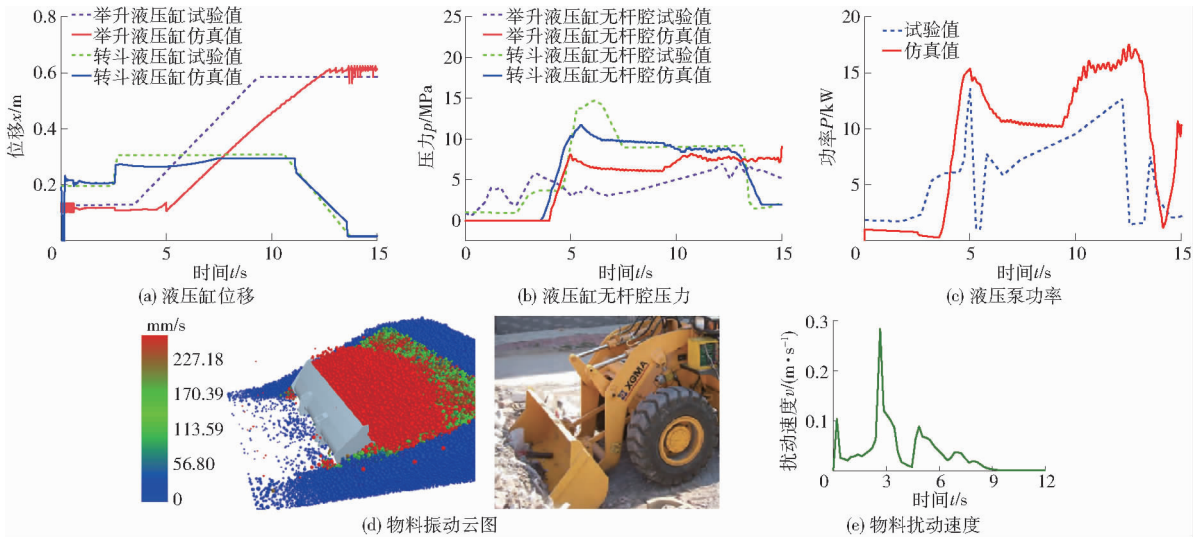


图4 典型正载工况下装卸性能

Fig.4 Loading and unloading performance under typical positive loading conditions

如图4d、4e所示,在2.65 s时,铲斗中和前方物料被明显扰动,最大平均扰动速度达到0.28 m/s,然而,铲斗侧方物料速度较低,扰动较弱,这是由于转斗动作使得铲斗前方物料一部分随铲斗运动,一部分则流入铲斗下方的挖空区域。平均扰动速度计算式为

$$v(t) = \frac{\sum_{i=t_0} v_i}{n_i} \quad (11)$$

式中 n_i —— t 时刻被扰动物料颗粒数量

v_i —— t 时刻被扰动物料颗粒速度

2 装卸性能

2.1 试验设计

为了掌握装载机在不同举升动作和转斗动作下装卸性能,通过控制液压阀开度,探究变举升液压阀开度和变转斗液压阀开度工况下,装载机工作装置装卸性能,相关参数及部分结果见表2。

2.2 工作特性

图5为举升液压缸和转斗液压缸位移和无杆腔压力曲线。由图5可知,4 s以后进入稳态运行状态。当举升液压阀开度为50%~75%时,举升液压缸位移特性相近。当举升液压阀开度为87.5%~100%时,举升液压缸动作响应滞后约0.2 s,当5~6 s时,举升液压阀全开所对应的举升液压缸伸出速

表2 试验方案及结果

Tab.2 Test design and results

开度/%		挖掘量/ kg	扰动速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
举升液压阀	转斗液压阀		
50.0	62.5	899.44	0.146
62.5	62.5	914.77	0.146
75.0	62.5	909.99	0.148
87.5	62.5	851.01	0.108
100	62.5	843.06	0.136
100	37.5	877.33	0.115
100	50.0	883.70	0.132
100	62.5	862.95	0.122
100	75.0	855.21	0.128
100	87.5	861.17	0.111

度迅速变大(I区域),运动到举升液压缸极限位置,此时举升液压缸无杆腔压力约为8 MPa。导致液压系统出现较大波动,举升液压缸出现回缩现象,这从举升液压缸无杆腔压力曲线得到验证。当运行时间为13.5 s时,铲斗快速下翻卸料,对动臂产生一个向下的冲击作用力,致使举升液压缸产生一定波动性(III区域),而且高开度工况下举升液压缸位移恢复效果较好。

转斗液压缸先缩回后伸出,实现转斗动作,最终转斗液压缸无杆腔压力约为4 MPa,且转斗液压缸无杆腔压力较举升液压缸无杆腔压力稳定。转斗液压缸缩回动作的产生是由于铲斗在举升过程,料堆

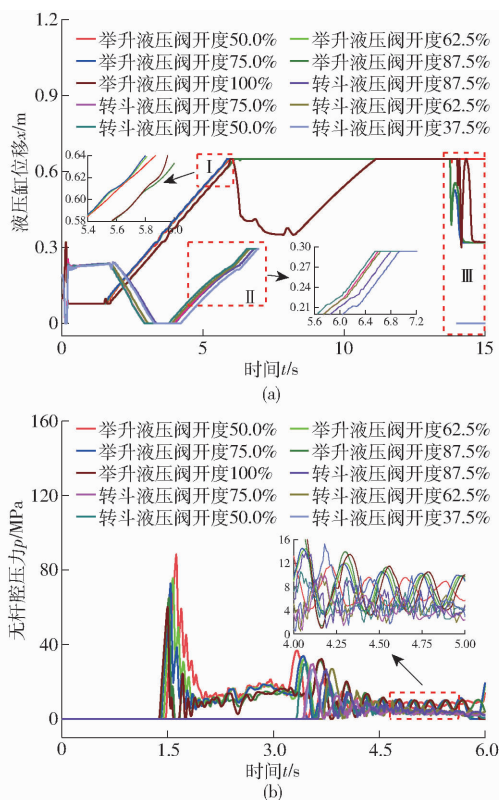


图 5 正载工况下工作特性

Fig. 5 Operating characteristics under positive load condition

与铲斗之间强相互作用,使得铲斗产生一定外翻;其次,随着转斗液压阀开度增加,转斗液压缸动作响应加快,而且当液压阀开度为 62.5%~87.5% 时较明显(II 区域)。

随着举升液压阀开度增加,装载机挖掘量先增加后减小,随着转斗液压阀开度增加,装载机挖掘量先增加后减小,最后稳定在 860 kg 附近(表 2),并且当举升液压阀和转斗液压阀开度均为 62.5%,装载机挖掘量为 914.77 kg,达到最大,满斗率达 91.48%;2 种工况下装载机挖掘量平均值分别为 883.65、868.07 kg,表明改变举升动作对装载机挖掘量影响明显。

2.3 能耗特性

图 6 为液压泵功率曲线,其演变规律基本一致。0~1.5 s 为工作装置位姿初始化过程,导致系统功耗较高。当运行时间为 1.5~3.3 s 时,液压泵功率逐渐恢复到正常水平,稳定在 21.3 kW 附近,而且变举升液压阀开度工况恢复速度较快,表明举升动作对液压泵能耗影响相对转斗动作更显著;变举升液压阀开度工况下液压泵峰值功率高于变转斗液压阀开度工况液压泵功率,与此时举升液压缸无杆腔压力有关,如图 5b 所示。

2.4 物料扰动特性

如表 2 所示,随着举升液压阀开度增加,物料扰动速度先稳定后有所下降,随着转斗液压阀开度增

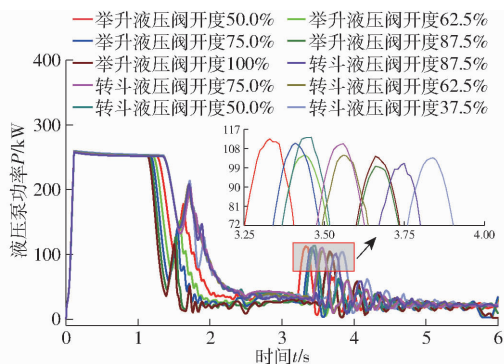


图 6 正载工况下能耗特性

Fig. 6 Energy consumption characteristics under positive load condition

加,物料扰动速度先增加后下降;变举升液压阀开度和变转斗液压阀开度工况下物料扰动速度平均值分别为 0.137、0.122 m/s,表明举升动作对物料扰动显著,进而显著影响装载机挖掘量,这从装载机挖掘量变化可以得到验证;挖掘量为 914.77 kg 工况所对应的物料扰动分布如图 7 所示。由图 7 可以看出,被扰动的物料区域主要位于铲斗的正前方,而周围区域(IV 区域)的物料绝大多数处于低扰动稳定状态,这有利于物料颗粒顺利进入到铲斗。此时,物料与铲斗的作用区域主要位于 V、VI 区域。对于 VI 区域,主要是被扰动颗粒进入铲斗时产生的冲击力和已进入铲斗物料重力共同作用的结果;对于 V 区域,主要是物料与铲斗之间的摩擦力和铲斗对物料的剪切力共同作用的结果。

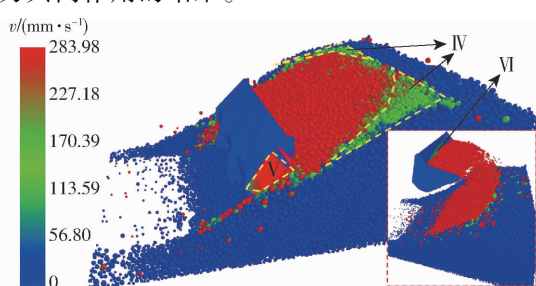


图 7 正载工况下物料扰动特性

Fig. 7 Material disturbance characteristics under positive loading condition

3 结论

(1) 通过装载机工作装置机-液-散耦合装卸性能模型,对典型正载工况进行了分析。试验和多耦合仿真液压缸位移、无杆腔压力、液压泵功率演变规律一致,挖掘质量相对误差为 3.65%,液压泵功率相对误差为 7.51%,验证了所建立工作装置装卸性能模型的有效性。

(2) 稳态运行时,举升液压缸无杆腔压力约为 8 MPa,转斗液压缸无杆腔压力约为 4 MPa,转斗液压缸无杆腔压力较举升液压缸无杆腔压力稳定。当

举升液压阀和转斗液压阀开度均为 62.5% 时,装载机铲斗满斗率较高,挖掘性能较好,并且举升动作对装载机挖掘量影响明显。

(3) 正载工况时液压泵功率约为 21.3 kW,举升动作对液压泵功率影响相对转斗动作更显著;变举升液压阀开度工况下的液压泵峰值功率高于变转斗

液压阀开度工况的液压泵峰值功率,与此时举升液压缸无杆腔压力有关。

(4) 随着举升液压阀开度增加,物料扰动速度先稳定后有所下降,随着转斗液压阀开度增加,物料扰动速度先增加后下降,并且举升动作对物料扰动显著,进而显著影响装载机挖掘量。

参 考 文 献

- [1] 王翔宇,郝云晓,权龙,等. 电-液双源混驱装载机举升系统特性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 41-51.
WANG Xiangyu, HAO Yunxiao, QUAN Long, et al. Research on the characteristics of wheel loader boom driven by the electric hydraulic hybrid drive system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 41-51. (in Chinese)
- [2] 黄鹏,李长硕,丁华锋,等. 一种新型液压装载机工作装置的运动学分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(23): 1-12.
HUANG Peng, LI Changshuo, DING Huafeng, et al. Kinematics analysis of a new hydraulic loader working device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(23): 1-12. (in Chinese)
- [3] 余聪,闫桂山,张宇航,等. 电动装载机双阀芯液电负载敏感系统特性研究[J]. 机电工程, 2023, 40(12): 2001-2010.
YU Cong, YAN Guishan, ZHANG Yuhang, et al. Characteristics of electro-hydraulic load sensing system of electric loader with double spool[J]. Journal of Mechanical Electrical Engineering, 2023, 40(12): 2001-2010. (in Chinese)
- [4] YAO J, EDSON C P, YU S, et al. Bucket loading trajectory optimization for the automated wheel loader[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 6948-6958.
- [5] 朱恩旭. 混合动力装载机动臂能量回收仿真研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(3): 221-226.
ZHU Enxu. Simulation study on energy recovery of hybrid loader boom arm[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(3): 221-226. (in Chinese)
- [6] 王翔宇,张红娟,杨敬,等. 非对称泵控装载机动臂特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 258-266, 284.
WANG Xiangyu, ZHANG Hongjuan, YANG Jing, et al. Research on the characteristics of wheel loader boom driven by the asymmetric pump controlled system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 258-266, 284. (in Chinese)
- [7] 王翔宇,郝云晓,杨敬,等. 基于三腔液压缸的装载机举升系统能效特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 3194-3203.
WANG Xiangyu, HAO Yunxiao, YANG Jing, et al. Energy efficiency characteristics of wheel loader lifting system based on three chamber hydraulic cylinder[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(9): 3194-3203. (in Chinese)
- [8] 张晓刚,王翔宇,张红娟,等. 闭式泵控三腔液压缸驱动装载机举升装置特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 410-418.
ZHANG Xiaogang, WANG Xiangyu, ZHANG Hongjuan, et al. Characteristics of wheel loader lifting device based on closed pump-controlled three-chamber hydraulic cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 410-418. (in Chinese)
- [9] 蒋恒,谌炎辉,郑特. 装载机自动铲装作业轨迹与能耗研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(5): 422-426.
JIANG Heng, CHEN Yanhui, ZHENG Te. Study on the trajectory and energy consumption of automatic shoveling operation of loaders[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(5): 422-426. (in Chinese)
- [10] 温超,李冰,席亚丽. 装载机铲装运动作业轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 150-153.
WEN Chao, LI Bing, XI Yali. Loader based on machine vision intelligent shoveling method[J]. Machinery Design and Manufacture, 2024(1): 150-153. (in Chinese)
- [11] 王敏,彭吉涛. 基于 Pro/E 软件的 ZL30 型装载机工作装置受力分析[J]. 机械设计, 2023, 40(7): 39-44.
WANG Min, PENG Jitao. Force analysis on working device of ZL30 loader based on Pro/E software[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(7): 39-44. (in Chinese)
- [12] 张楷祥,朱学岩,周庆辉,等. 基于 EDEM 的装载机工作装置运动轨迹控制研究[J]. 机电工程, 2023, 40(6): 919-927.
ZHANG Kaixiang, ZHU Xueyan, ZHOU Qinghui, et al. Motion trajectory control of loader working device based on EDEM[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2023, 40(6): 919-927. (in Chinese)
- [13] 于向军,槐元辉,李学飞,等. 基于克里金和粒子群算法的装载机铲掘轨迹规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 437-444.
YU Xiangjun, HUAI Yuanhui, LI Xuefei, et al. Shoveling trajectory planning method for wheel loader based on Kriging and particle swarm optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 437-444. (in Chinese)
- [14] LEE H, KIM M, YOO W. Force-balancing algorithm to remove the discontinuity in soil force during wheel loader excavation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(10): 4951-4957.

- [15] CHEN Y, SHI G, JIANG H, et al. Research on the prediction of insertion resistance of wheel loader based on PSO - LSTM [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 1372.
- [16] 徐源俊, 陈立创, 王素燕. 电动装载机的液压泵性能仿真及试验研究[J]. *建设机械技术与管理*, 2023, 36(6): 55 - 57, 61.
XU Yuanjun, CHEN Lichuang, WANG Suyan. Simulation and experimental study on the performance of hydraulic pump of electric loaders[J]. *Construction Machinery Technology and Management*, 2023, 36(6): 55 - 57, 61. (in Chinese)
- [17] 李泽龙, 杨敬. 模糊 PID 进出口独立控制装载机摇臂液压系统[J]. *液压与气动*, 2022, 46(6): 33 - 43.
LI Zelong, YANG Jing. Fuzzy PID import and export independent control loader rocker arm hydraulic system[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2022, 46(6): 33 - 43. (in Chinese)
- [18] 卢一鸣, 刘昕晖, 曹丙伟, 等. 装载机智能减阻铲装控制策略及实验研究[J]. *液压与气动*, 2022, 46(2): 169 - 175.
LU Yiming, LIU Xinhui, CAO Bingwei, et al. Control strategy and experiment on loader digging and loading with intelligent-resistance reduction[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2022, 46(2): 169 - 175. (in Chinese)
- [19] 谭鹏, 刘昕晖, 陈伟, 等. 装载机卸载工况动臂油缸回缩现象分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 1204 - 1212.
TAN Peng, LIU Xinhui, CHEN Wei, et al. Analysis on retracting phenomenon of boom cylinder of loader under unloading condition[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(4): 1204 - 1212. (in Chinese)
- [20] 赵宏波, 王学振, 郑智旗, 等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(7): 1 - 19.
ZHAO Hongbo, WANG Xuezheng, ZHENG Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method applications in agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(7): 1 - 19. (in Chinese)
- [21] 张伟健, 江善晨, 孔宪锐, 等. 基于离散元法的粉碎机筛网冲击特性与粉碎颗粒接触参数标定研究[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(4): 501 - 511.
ZHANG Weijian, JIANG Shanchen, KONG Xianrui, et al. Analysis of impact characteristics of hammermill screen based on discrete element method and calibration of contact parameters of crushed particles[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(4): 501 - 511. (in Chinese)
- [22] 张东明, 黄紫阳, 陈一夫, 等. 基于离散元法的谷子脱出物建模与参数标定[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(12): 354 - 365.
ZHANG Dongming, HUANG Ziyang, CHEN Yifu, et al. Discrete element method based modeling and parameter calibration for millet threshing mixture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(12): 354 - 365. (in Chinese)
- [23] CUNDALL P A, STRACK D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [24] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1949, 16: 259 - 268.
- [25] HERTZ H. On the contact of elastic solids[J]. *Journal Fur Die Reine Und Angewandte Mathematik*, 1881, 92: 156 - 171.