基于双缸联动的液压挖掘机复合挖掘力分析及优化

庞晓平[1*] 向俊滔[1] 冯原林[1] 杨中翔[1] KABAGEMA Benjamin[1] 赵卫东[2]
1.重庆大学机械与运载工程学院,重庆,400044
2.柳州柳工挖掘机有限公司,柳州,545007

摘要:针对液压挖掘机中传统基于单油缸驱动的静态力学模型导致理论值显著低于实际工况值引发“挖不动”的技术瓶颈问题,提出了基于双缸联动机制的整机理论复合挖掘力动态分析方法。通过建立多油缸协同作用下的复合力学模型,系统分析了挖掘过程中的运动学约束、机构奇异位形等关键限制因素,创新性地引入姿态空间奇异阈值判别准则,构建了覆盖全工作空间的复合挖掘力解析模型。通过对三款典型机型的理论计算与实机测试来进行交叉验证。研究结果表明:复合挖掘力分析值较传统理论值更接近实际的最大挖掘力,与操作人员实际作业评价吻合,有效解决了理论分析偏离工程实际的问题。在此基础上,建立基于复合挖掘力模型的反铲工作装置多目标优化设计体系,通过机构参数协同优化获得新型工作装置。样机测试结果表明,优化后机型在表层、1 m、2 m深度工况下的平均复合挖掘力分别提高3.28%、3.30%和5.96%,作业效率显著提高。

关键词:液压挖掘机;整机理论挖掘力;挖掘性能分析;复合挖掘
中图分类号:TU621
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.029 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Analysis and Optimization of Compound Excavation Force in Hydraulic Excavators Based on Dual-cylinder Linkage

PANG Xiaoping[1*] XIANG Juntao[1] FENG Yuanlin[1] YANG Zhongxiang[1]
KABAGEMA Benjamin[1] ZHAO Weidong[2]
1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044
2.Liuzhou Liugong Excavator Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545007

Abstract: To address the inherent flaw in traditional hydraulic excavator digging force analysis—where theoretical values derived from single-cylinder static models are significantly lower than actual conditions, leading to “digging difficulty”—a dynamic analysis method for whole-machine theoretical compound digging force based on dual-cylinder linkage was proposed in this study. A compound mechanical model under multi-cylinder collaborative interaction was established, kinematic constraints and mechanism singularity configurations during digging were systematically analyzed, and an innovative posture-space singularity threshold criterion was introduced. A compound digging force analytical model encompassing the entire workspace was subsequently constructed. A comparative experimental method was utilized with cross-validation on three typical models via theoretical calculations and field tests. The results indicated that compound digging force analysis values are closer to actual maximum digging force than traditional values, matching operator evaluations and effectively resolving theoretical deviations from practical engineering. A multi-objective optimization design framework for backhoe working mechanisms was established based on the compound digging force model. Novel working mechanisms were developed through collaborative optimization of mechanism parameters. Prototypes were tested, and the optimized models demonstrated average compound digging force increases of 3.28%, 3.30%, and 5.96% under surface layer, 1 m, and 2 m depth conditions, respectively, with operational efficiency markedly enhanced.

Key words: hydraulic excavator; theoretical digging force of the entire excavator; digging performance analysis; compound digging

0 引言

液压挖掘机作为现代工程建设的核心装备,其挖掘性能直接决定了施工效率与能源经济性[1]。在挖掘性能评价体系中,理论挖掘力分析始终是指导工作装置设计与优化的关键理论依据[2]。然而,传统单缸静态力学模型(即单独考虑斗杆或铲斗油缸作用)已难以满足高精度数字化设计需求,因为基于该模型的理论计算值普遍低

收稿日期:2025-03-31
基金项目:国家自然科学基金(51475056)

于实际复合挖掘工况测量值，导致“理论优化”与“实际失效”并存的工程悖论[3]。这种现象的本质源于实际作业中约87%的挖掘操作采用双缸联动模式（斗杆与铲斗油缸协同驱动），而现有研究仍沿用单缸分析范式，造成理论模型与动态复合工况的结果相差较大。

在挖掘机工作装置复合挖掘力的研究中，陈世教等[4]认为整机理论复合挖掘力更能展示挖掘机的挖掘能力，考虑挖掘机工作过程中斗杆和铲斗油缸同时作为主动油缸，并针对特定的危险进行了工况分析，其计算方法与单缸挖掘力计算方法相似，未能满足常态实际挖掘特性，也未能解决机构奇异位形引发的动态约束突变问题。CHEN等[5]基于复合挖掘是斗杆缸和铲斗缸主动工作的特点，将主动油缸的油压设置为固定的工作油压，并将工作装置斗杆推力等效作用在铲斗齿尖法向、铲斗推力等效作用在铲斗齿尖切向，综合考虑限制因素条件后，将斗杆和铲斗主动油缸能主动发挥出的切向复合挖掘力和法向复合挖掘力进行矢量叠加，得到整机理论复合挖掘力。这种方法假定了主动油缸作用在铲斗齿间的挖掘力方向，使得到的复合挖掘力方向与实际挖掘力的方向有较大的差异。陈进等[6]根据实际测试数据，统计出复合挖掘过程中挖掘阻力方向角的主值区间[7]，取方向角步长1°离散复合挖掘力，建立了基于方向角计算的复合挖掘力分析方法。这种方法所计算的复合挖掘力依赖方向角的提前估算，方向角又依赖实际该型号机型的挖掘数据，虽提高了特定机型匹配精度，却丧失了普适性。

液压挖掘机复合挖掘力分析是提高挖掘机作业效能的理论核心，但现有研究方法仍存在显著局限性，因此，亟需构建一种兼具物理完备性与工程适用性的复合挖掘力分析框架，以突破当前“理论优化失效”的瓶颈，为数字化设计提供高精度基础模型。为此，本文提出了基于双缸联动机制的整机理论复合挖掘力动态分析方法。

1 整机理论复合挖掘力分析方法

本文通过分析实际挖掘数据来说明整机复合挖掘力分析的必要性。对三款常态自由挖掘中的21 t挖掘机进行采样，三款机型的基本参数如表1所示。分析采样数据得到挖掘机工作装置在实际挖掘过程中的运动规律，并建立基于实际运动规律的整机理论复合挖掘力模型。

1.1 常态自由挖掘阶段分析

采集三款机型约1800 s实际作业循环中工作装置的油缸长度和对应的油压数据。由于每个作业循环具有相似性，故每个机型截取200 s的数据进行分析，如图1所示，实线框标出的为分类模型自动分类出的挖掘阶段数据。其中，机型2中具体标注出134.45～137.25 s的挖掘数据，用于单一挖掘阶段分析使用。

表1 测试样机基本参数

Tab.1 Basic parameters of the test prototype

机型	质量/t	动臂长度 L_{AB}/m	斗杆长度 L_{BG}/m	铲斗长度 L_{GJ}/m
1	21	5.71	2.915	1.48
2	21	5.71	2.930	1.51
3	21	5.68	2.910	1.57

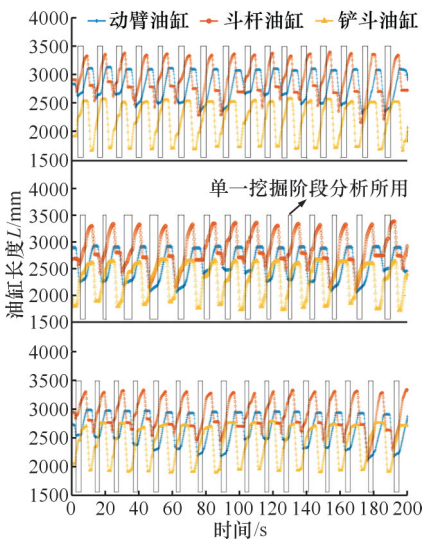


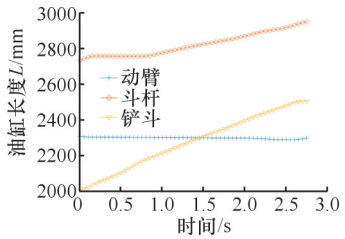
图1 实际作业循环油缸长度

Fig.1 Actual operating circulating cylinder length

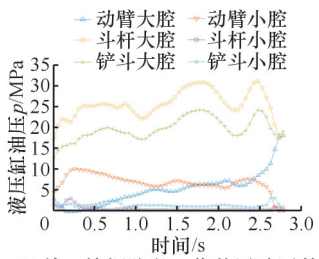
对方框标记出的挖掘阶段进行分析，挖掘周期可分为预挖掘阶段、负载阶段与卸载阶段。预挖掘阶段动臂下探并展开斗杆及铲斗，系统处于低阻力工况；负载阶段动臂静态锁定，斗杆与铲斗执行复合掘进动作，需协同克服高动态岩土破碎阻力；卸载阶段铲斗满载锁定，动臂抬升伴随斗杆辅助运动，重心迁移导致动态载荷再分布。综合具体挖掘数据可知，在挖掘阻力较大的负载阶段，铲斗和斗杆复合动作的挖掘方式更为常见。

为进一步分析实际挖掘阶段工作装置运动特点，取机型2的一组挖掘循环数据（图1标注位置）进行具体分析。此挖掘阶段动臂、斗杆、铲斗油缸的详细行程数据和对应的大小腔油压数据如图2所示。

在整个挖掘过程中，斗杆和铲斗油缸小腔油压皆趋近于零，大腔持续维持高压工况，且斗杆和铲斗大腔油压变化呈现高度的一致性，说明斗杆和铲斗在挖掘阶段中处于协同作业的复合挖掘状态。在0～0.8 s的时间段内，虽然铲斗油缸伸长



(a)单一挖掘阶段工作装置油缸长度



(b)单一挖掘阶段工作装置油压数据

图2　机型2单一挖掘阶段实测数据

Fig.2　Measured data of model 2 in a single mining stage

量较大，斗杆油缸基本不变，但斗杆油缸小腔油压几乎为零，而大腔油压保持高位，表明斗杆油缸依然提供了较大的推力，此时处于铲斗主挖、斗杆联动的复合动作状态。在0.8～2.8 s之间，铲斗油缸和斗杆油缸的长度变化斜率较为接近，且两者伸长量都较大，表明此时处于双缸联动的复合动作状态。

综合多组挖掘阶段分析和单一挖掘阶段分析可得：挖掘机在实际挖掘阶段，较少采用斗杆缸或铲斗缸单独主动动作的挖掘方式，更多采用斗杆和铲斗一起主动的复合动作挖掘方式。

1.2　整机理论复合挖掘力分析方法

基于复合挖掘的实际运动规律，建立整机理论复合挖掘力分析方法。整机理论复合挖掘力是反铲液压挖掘机在实际挖掘过程中动臂保持闭锁，在斗杆液压缸推力F_2、铲斗液压缸推力F_3作用下，所能发挥的最大理论挖掘力。复合挖掘力学模型如图3所示。

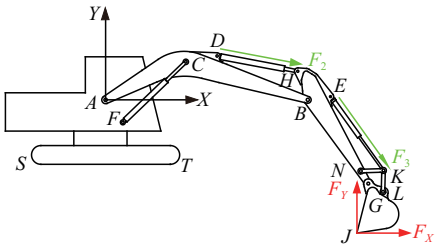


图3　复合挖掘力学模型

Fig.3　The compound digging mechanics model

1.2.1　复合挖掘力学模型

复合挖掘状态下的挖掘机工作装置是一个由斗杆和铲斗构成的二连杆机械臂，各挖掘姿态均需满足多体静力学平衡条件。斗杆、铲斗机构的受力分析如图4、图5所示，通过精确分析受力点，考虑所有外力（包括铰点约束反力、挖掘阻力、重力等），并解平衡方程，可得出斗杆与铲斗推力产生的复合挖掘力。

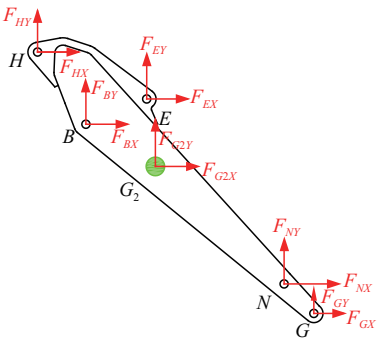


图4　斗杆受力分析

Fig.4　Stick force analysis

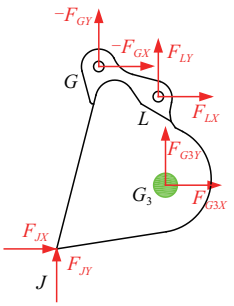


图5　铲斗受力分析

Fig.5　Bucket force analysis

对斗杆进行受力分析求解：

$$F_{HX}+F_{EX}+F_{BX}+F_{NX}+F_{GX}+F_{G2X}=0 \tag{1}$$

$$F_{HY}+F_{EY}+F_{BY}+F_{NY}+F_{GY}+F_{G2Y}=0 \tag{2}$$

$$F_2E_2+F_{BX}(Y_B-Y_{G2})+F_{NX}(Y_N-Y_{G2})+F_{GX}(Y_G-Y_{G2})+F_{HY}(Y_{G2}-Y_H)+F_{BY}(X_{G2}-X_B)+F_{NY}(X_{G2}-X_N)+F_{GY}(X_{G2}-X_G)=0 \tag{3}$$

对铲斗进行受力分析求解：

$$F_{JX}+F_{LX}+F_{G3X}-F_{GX}=0 \tag{4}$$

$$F_{JY}+F_{LY}+F_{G3Y}-F_{GY}=0 \tag{5}$$

$$F_{JX}(Y_J-Y_{G3})+F_{LX}(Y_L-Y_{G3})+F_{JY}(Y_{G3}-Y_J)+F_{LY}(Y_{G3}-Y_L)=0 \tag{6}$$

复合挖掘力$F_{w(02+03)}$取二力合成：

$$F_{w(02+03)}=\sqrt{F_X^2+F_Y^2} \tag{7}$$

式中：F_{*X}、F_{*Y}分别为作用在该点的水平方向和竖直方向的铰点力；X_*、Y_*分别为该点在水平方向和竖直方向上的坐标；E_2为斗杆油缸DH作用于斗杆BG的力臂。

若已知斗杆油缸有杆和无杆腔的压力数据p_3、p_4，铲斗油缸有杆和无杆腔的压力数据p_5、p_6，即可得到斗杆推力F_2和铲斗推力F_3，进而得到各个铰点力，联立式(1)～式(7)可得到当前姿态的复合挖掘力。

1.2.2　限制因素的确定

整机理论复合挖掘力作为理论挖掘力的一种，也必然受到整机约束的限制。复合挖掘时能实现的最大整机理论挖掘力被动臂油缸大小腔闭

锁能力所限制的挖掘阻力F_{w01}、地面摩擦附着能力限制的挖掘阻力F_{w04}、前倾条件限制的挖掘阻力F_{w05}或后倾条件限制的挖掘阻力F_{w06}中的最小值限制，即某一瞬时姿态下，在斗杆油压$p_{d,m}$和铲斗油压$p_{c,n}$主动作用下的整机理论复合挖掘力$F_{02+03,(m,n)}$为

$$F_{02+03,(m,n)}=\min(F_{w01},F_{w(02+03),(m,n)},F_{w04},(F_{w05}或F_{w06})) \tag{8}$$

在斗杆、铲斗缸极限油压范围内选取一组油压，统计所有的主动缸油压组合，并且获取各自可能的整机理论复合挖掘力，找出其中的最大值，即为该挖掘姿态下挖掘机能够发挥出的整机理论复合挖掘力。

1.2.3 奇异区域的确定

复合挖掘过程中只有铲斗和斗杆动作，动臂保持静止，此时的挖掘机工作装置是一个二连杆机构，存在使复合挖掘力求解失真的奇异位形[8]。在分析过程中，要尽量避免计算奇异位形及其附近的区域。取挖掘机工作装置姿态i的姿态角θ_i，此时工作装置的雅可比矩阵为

$$J_i=\begin{bmatrix}L_{BG}\sin\theta_{3i} & L_{GJ}+L_{BG}\cos\theta_{3i}\\ 0 & L_{GJ}\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：L_{BG}、L_{GJ}分别为斗杆、铲斗的长度。

定义奇异性判定指标d_i及奇异阈值d_c。当$d_i\leqslant d_c$时，将该工作姿态划入奇异区域，分析时避开该区域，以保证复合挖掘力计算结果的准确性[9]。奇异区域定义如下：

$$\Omega=\{\theta_i|d_i\leqslant d_c\}$$

$$d_i=\sqrt{\det J_i^{\mathrm{T}}J_i}=|\det J_i| \qquad d_c=\kappa d_0 \tag{10}$$

式中：κ为调节因子；d_0为基准值。

不同情况下奇异区域的范围不同，引入调节因子κ，根据计算误差调整奇异阈值。依据奇异阈值的统计分析[10]，本文取$d_c=1.28$。

采用1.1节的机型1实测数据验证所划分奇异区域的准确性，如图6所示。在奇异性判定指标d_i为0附近，基于实测阻力计算出的整机理论复合挖掘力F_w会出现明显失真；随着d_i逐渐增大，特别是越过经验阈值$d_c=1.28$后，计算值逐渐趋于平稳，说明该阈值能够满足复合挖掘力计算的准确性要求。

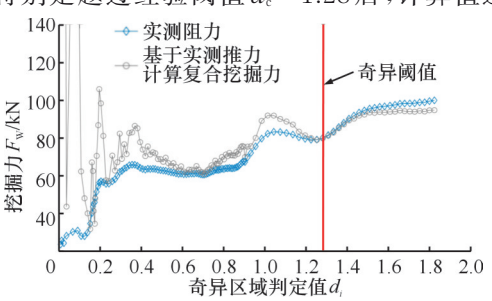


图6 奇异区域判定

Fig.6 Singular-region determination

根据前面的分析，整机理论复合挖掘力分析方法流程如图7所示。

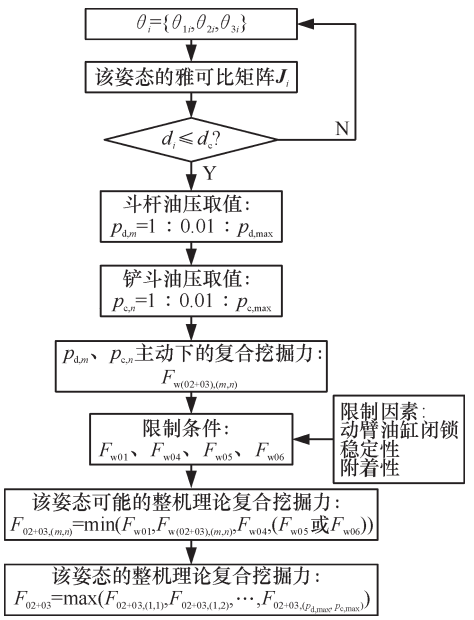


图7 整机理论复合挖掘力分析方法流程图

Fig.7 Flow chart of the analysis method of the theoretical compound digging force of the whole machine

1.3 验证

以三款机型的实测挖掘轨迹为基础，对建立的整机理论复合挖掘力分析方法进行正确性和先进性验证。

1.3.1 正确性验证

采用整机理论复合挖掘力分析方法对挖掘能力进行分析。为精确评估挖掘机的实际挖掘性能，在21 t挖掘机测试数据中选取了6条复合挖掘轨迹，计算各机型在轨迹上每个挖掘点的复合挖掘力，取平均值进行横向对比。

三个机型的平均复合挖掘力对比如图8所示，可以看出，机型3在每条挖掘轨迹下的平均复合挖掘力最大，机型2最小。据此，可以得出机型3的挖掘性能最佳、机型1次之、机型2最弱的结论。

对图8中的挖掘轨迹1进行具体分析，得到三

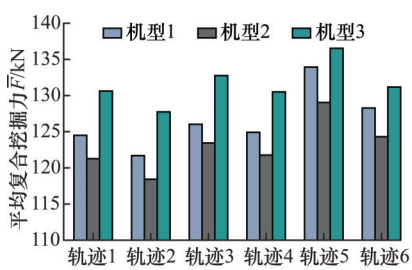


图8 各机型在不同轨迹上的复合挖掘力

Fig.8 The compound digging force of each model on different trajectories

款机型在该轨迹作业过程中挖掘力的动态特征，如图9所示。由图9可知，机型1、2、3的最大复合挖掘力分别为137.6、135.5、145.7 kN。机型3在0～0.4 s挖掘前期的复合挖掘力略小于机型1，在挖掘中期和后期都远大于机型1和机型2。在挖掘前期是铲斗调整准备切入土壤的阶段，挖掘机工作装置还未负载，故此阶段所需实际挖掘力较小，复合挖掘力理论计算出的较大负载的情况实际无法实现。综合轨迹1的复合挖掘力对比结果可得，机型3在相同的挖掘姿态下具有更大的挖掘力，拥有更佳的挖掘能力。

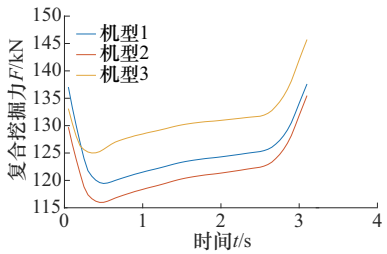


图9　不同机型在轨迹1工况的复合挖掘力

Fig.9　Compound digging force of different models in trajectory 1

通过对三个机型的多个挖掘轨迹和单一挖掘轨迹的分析，皆得出了机型3挖掘能力最佳、机型1次之、机型2挖掘能力最弱的结论。

为进一步验证结论的正确性，进行了实际操作评价。在实际测试中，三位操作手对三款机型进行自由挖掘测试。测试完成后，对挖掘力度、速度、动作灵敏性、动作柔和性和动作协调性5个性能指标进行打分，如表2所示。

表2　三位操作手对三款机型的操作评价（单项满分5分）

Tab.2　Evaluation of the operation of three models by three operators（with a maximum score of 5 points）

综合评估		力度	速度	灵敏性	柔和性	协调性	得分	平均总分
机型1	操作手1	2	3	3	2	2	12	12.33
	操作手2	2	3	2	2	3	12	
	操作手3	2	3	3	3	2	13	
机型2	操作手1	2	2	2	3	2	11	11.33
	操作手2	2	2	3	2	3	12	
	操作手3	2	3	2	2	2	11	
机型3	操作手1	4	3	4	4	4	19	19.33
	操作手2	5	4	4	4	4	21	
	操作手3	4	3	4	3	4	18	

复合挖掘力的大小直接影响挖掘力度，间接影响速度、动作灵敏性等，即拥有更大复合挖掘力的挖掘机在操作上会更为便捷。三款机型评分显示，机型3评分最高，在挖掘力度上有明显的优势；机型1和机型2在挖掘力度上相当，但机型1在挖掘速度、动作灵敏性和柔和性上要略优于机型2，即机型1比机型2拥有更好的挖掘性能。

综合基于整机理论复合挖掘力分析方法的性能评价和操作手实际操作评价，得出了相同的结论，即机型3挖掘性能最好、机型1次之、机型2最弱。验证了本文整机理论复合挖掘力分析方法可以正确反映挖掘机的实际挖掘性能。

1.3.2　先进性验证

性能优良挖掘机的挖掘力和挖掘阻力必须匹配，确保理论挖掘力大于实际挖掘阻力。本文整机理论复合挖掘力分析方法作为理论挖掘力分析方法的一种，得到的复合挖掘力必须大于实际挖掘作业中的挖掘阻力。将本文方法与文献中复合挖掘力分析方法进行对比，验证本文方法的先进性。

为显示挖掘机的真实挖掘性能，选择实测阻力较大的挖掘阶段测试数据，分析不同理论挖掘力模型在该挖掘阶段的数值结果。以挖掘性能较好的机型3为例，计算其轨迹上的整机理论复合挖掘力，并与实测阻力、斗杆和铲斗挖掘力、现有的基于阻力方向角计算的复合挖掘力[11]进行对比，结果如图10所示。由图10b可知，斗杆挖掘力全程小于挖掘阻力，铲斗挖掘力和基于方向角的复合挖掘力在挖掘阻力较大的阶段都小于挖掘阻力。用以往方法计算出的挖掘力与实际阻力不够匹配，出现了“挖不动”的现象，且复合挖掘力作为双缸复合动作作用于铲斗齿间的挖掘力，理应在挖掘力分析中大于单缸动作的铲斗挖掘力，但基于方向角计算的复合挖掘力存在小于铲斗挖掘力的现象，存在一定的局限性。本文方法计算得到

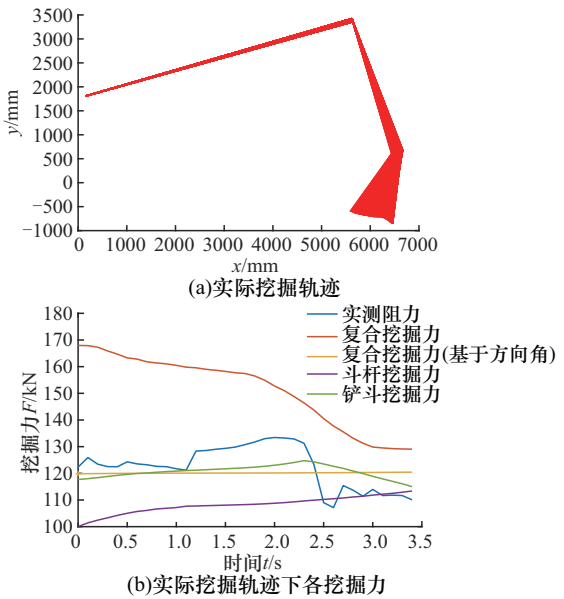


图10　不同理论挖掘力分析方法与实测阻力对比

Fig.10　Comparison of different theoretical mining force analysis methods and measured resistance

的挖掘力完全大于实测阻力，符合挖掘机的实际挖掘性能，且明显大于铲斗挖掘力和斗杆挖掘力，符合复合挖掘力双缸动作的特点。

综上，整机理论复合挖掘力分析方法解决了理论挖掘力与实际负载不匹配的难题，准确反映双缸联动的特性。相较于现有的理论挖掘力分析方法，此方法可以更准确地反映挖掘机实际挖掘性能。

2 优化设计

基于整机理论复合挖掘力分析方法，以最佳挖掘性能为目标展开研究，提出一种挖掘机工作装置全局优化设计的方法。当前主流优化算法可分为传统梯度类算法（如梯度下降、Adam等）与启发式算法（如粒子群优化、模拟退火等）。其中，梯度类算法依赖目标函数的连续性与可导性，收敛效率高但易陷入局部最优，难以适配离散或非凸优化场景；粒子群优化、模拟退火等启发式算法虽无需梯度信息，但前者高维场景下易早熟收敛，后者全局探索能力有限。遗传算法作为进化算法的典型代表，凭借基于种群的并行搜索机制，兼具突出的全局寻优能力与强鲁棒性，无需依赖问题的数学特性，对非线性、高维、多峰及含离散变量的复杂优化问题适应性更强。考虑到本文研究问题的多约束、多变量、多目标特性，本文采用遗传算法开展优化研究。

2.1 设计变量

综合分析各变量对工作装置的影响[12]，选取对复合挖掘力影响最大的27个参数作为挖掘机工作装置优化设计模型的设计变量，即

$$\begin{aligned}\boldsymbol{d}_{\text{var}}=(&L_{AO},H,X_F,Y_F,L_{AB},L_{AC},L_{AD},\angle BAC,\\&\angle BAD,L_{BG},L_{BH},L_{BE},L_{BN},\angle GBH,\angle GBE,\\&\angle GBN,L_{KN},L_{KL},L_{GJ},L_{GL},\angle LJG,L_{1,\max},\\&L_{1,\min},L_{2,\max},L_{2,\min},L_{3,\max},L_{3,\min})\end{aligned}$$

其中，$L_{1,\max}$、$L_{1,\min}$、$L_{2,\max}$、$L_{2,\min}$、$L_{3,\max}$、$L_{3,\min}$为三个油缸的最长和最短长度；各变量中的下标字母指代工作装置的具体位置，详见图3。L_{AO}、H、X_F、Y_F为主机机构的4个优化变量；L_{AB}、L_{AC}、L_{AD}、$\angle BAC$、$\angle BAD$为动臂机构的5个优化变量；L_{BG}、L_{BH}、L_{BE}、L_{BN}、$\angle GBH$、$\angle GBE$、$\angle GBN$为斗杆机构的7个优化变量；L_{KN}、L_{KL}为连杆机构的2个优化变量；L_{GJ}、L_{GL}、$\angle LGJ$为铲斗机构的3个优化变量。

2.2 约束条件

约束条件对挖掘机工作装置优化设计的可行性、安全性和性能优劣至关重要。本文主要考虑边界约束、性能约束和几何约束。

1）边界约束。从挖掘机工作装置操作灵活性出发，结合完成复杂作业任务的需求以及确保安全运输的便利性，挖掘机的挖掘空间设计必须避免过于局限，以确保不影响其工作装置的实际作业效能，这要求深入考量挖掘空间的边界约束条件。具体而言，最大挖掘深度d_{M}、最大挖掘半径r_{M}及最大挖掘高度h_{M}这三个关键参数直接界定了挖掘机的最大挖掘区域范围[13]，在优化过程中，若这些参数被过度缩减，将严重影响挖掘机的正常作业流程与效率，因此确定挖掘机工作装置边界约束为

$$d_{\text{M}}\geqslant d_{\text{M},0}\qquad r_{\text{M}}\geqslant r_{\text{M},0}\qquad h_{\text{M}}\geqslant h_{\text{M},0}$$

式中：$d_{\text{M},0}$、$r_{\text{M},0}$、$h_{\text{M},0}$分别为最大挖掘深度d_{M}、最大挖掘半径r_{M}、最大挖掘高度h_{M}的最小允许值。

2）性能约束。为使动臂、斗杆和铲斗液压油缸可以正常选型与工作，需要建立液压缸的性能约束：

$$L_{\max}/L_{\min}>1.8$$

式中：$L_{\max}$、$L_{\min}$分别为动臂、斗杆和铲斗油缸最大长度和最小长度。

3）几何约束。根据图3，工作装置的驱动构型涵盖动臂油缸驱动$\triangle AFC$、斗杆油缸驱动$\triangle DBH$、铲斗油缸驱动四边形$NKLG$和$\triangle ENK$[14]。尺寸不断改变的驱动三角形需要满足基本的几何约束条件，即需遵循三角形不等式定理。动臂油缸驱动的$\triangle AFC$的几何约束可写为

$$\begin{aligned}&L_1<L_{AF}+L_{AC}\qquad L_{AF}<L_1+L_{AC}\\&L_{AC}<L_1+L_{AF}\qquad L_{1,\min}\leqslant L_1\leqslant L_{1,\max}\end{aligned}$$

同理，斗杆油缸驱动$\triangle DBH$和铲斗油缸驱动$\triangle ENK$的约束条件与$\triangle AFC$相似。对于铲斗油缸驱动的四边形$NKLG$，为了保证摇杆KN与斗杆之间无干涉现象，并与铲斗边沿GL无接触，以及避免连杆KL与铰点G发生碰撞，需添加如下几何约束条件：

$$\angle GNK>0\qquad \angle GLK>0$$

2.3 目标函数

为使优化设计计算的挖掘轨迹能够全面且准确地体现挖掘机的挖掘性能，在构建目标函数时，特意选取了整个测试过程中实测挖掘阻力较大的挖掘阶段所对应的挖掘轨迹。依据挖掘机实测铲斗和斗杆油压数据，统计出测试过程中挖掘阶段所受挖掘阻力较大的11条挖掘轨迹的工作装置姿态θ_{1i}、θ_{2i}、θ_{3i}，该11条铲斗末端轨迹在挖掘域内的图像见图11。轨迹1～11为0～2 m挖深依次变大的挖掘轨迹。可以依据各挖掘轨迹挖掘深度的不同调整权重系数，以适应优化的需要。

基于上文建立的整机理论复合挖掘力模型，

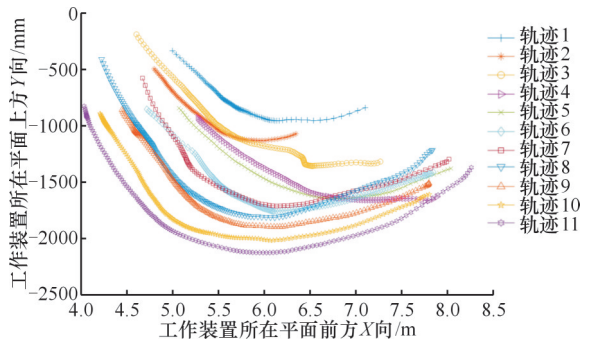


图11　优化模型采用的11条挖掘轨迹

Fig.11　The 11 digging trajectories used in the optimization model

计算出各个实测挖掘轨迹的平均复合挖掘力$x_1,x_2,\cdots,x_{11}$，由此得到优化设计的目标函数：

$$F(x)=x_1\lambda_1+x_2\lambda_2+\cdots+x_{11}\lambda_{11}$$

式中：$\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_{11}$为各轨迹平均复合挖掘力的权重系数，且$\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\cdots+\lambda_{11}=1$。

2.4　优化结果

基于建立的复合挖掘力优化设计模型，选取测试使用的21 t反铲液压挖掘机（机型1）进行优化设计。鉴于挖掘区间无特定要求，目标函数中各轨迹的权重系数皆设为1/11，采用遗传算法进行优化设计求解[15]。图12为在该参数设置下遗传算法优化迭代图，迭代至110代基本收敛，陷入局部最优解，直到第129代得到全局最优解，此时的最大平均复合挖掘力为128.83 kN。

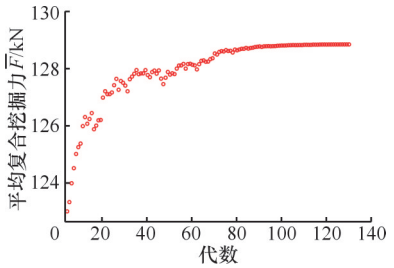


图12　基于复合挖掘力的遗传算法优化设计

Fig.12　Genetic algorithm optimization design based on compound digging force

优化前后挖掘机工作装置的尺寸变化如表3所示，灰色标注为影响复合挖掘力较大的变量。经过遗传算法优化后的目标函数值为128.83 kN，对比优化前目标函数值122.77 kN，提高幅度为3.49%。优化后机型在各条路径上的复合挖掘力提高情况如表4所示，提高幅度介于2.38%～8.09%之间。这一结果表明，从实际复合挖掘轨迹进行理论分析，优化后机型展现出了更为卓越的挖掘性能，验证了优化方法的有效性和必要性。

表3　优化前后设计变量对比

Tab.3　Comparison of design variables before and after optimization

设计变量	优化前	优化后	设计变量	优化前	优化后	设计变量	优化前	优化后
L_{AO}/mm	146.00	143.19	L_{BG}/mm	2915.00	2863.88	L_{GJ}/mm	1480	1473
H/mm	1806.00	1806.45	L_{BH}/mm	850.00	859.92	L_{GL}/mm	475.0	484.5
X_F/mm	486.00	495.52	$\angle GBH$	163.59°	164.05°	$\angle LGJ$	107.74°	117.00°
Y_F/mm	630.00	622.86	L_{BE}/mm	664.80	663.37	$L_{1,\max}$/mm	3185	3185
L_{AB}/mm	5710.00	5692.08	$\angle GBE$	60.81°	61.54°	$L_{1,\min}$/mm	2075	2070
L_{AC}/mm	2528.00	2544.15	L_{BN}/mm	2506	2575	$L_{2,\max}$/mm	3565	3560
$\angle BAC$	22.77°	22.45°	$\angle GBN$	0.61°	0.60°	$L_{2,\min}$/mm	1680	1680
L_{AD}/mm	3410.00	3430.34	L_{KN}/mm	640.0	654.5	$L_{3,\max}$/mm	2800	2805
$\angle BAD$	21.24°	22.45°	L_{KL}/mm	600.0	611.5	$L_{3,\min}$/mm	1680	1680

表4　优化前后各轨迹的平均复合挖掘力对比

Tab.4　Comparison of the average composite excavation force of each trajectory before and after optimization

优化轨迹	优化前/kN	优化后/kN	变化率/%
轨迹1	122.10	128.06	4.88
轨迹2	123.21	129.26	4.91
轨迹3	124.38	129.15	3.83
轨迹4	123.28	128.48	4.21
轨迹5	122.10	127.71	4.59
轨迹6	122.50	128.61	4.98
轨迹7	120.85	127.82	5.76
轨迹8	122.62	128.22	4.56
轨迹9	122.61	125.54	2.38
轨迹10	121.11	130.91	8.09
轨迹11	124.69	132.26	6.07

3　样机测试

为验证优化后挖掘机在实际作业中的挖掘性能，根据优化参数试制样机并进行测试。测试由同一操作手在相同土壤条件下，分别操作优化前后的挖掘机（图13）进行表面、1 m深及2 m深的挖掘作业。记录测试数据中的油缸大小腔压力



(a)原机型　(b)优化后机型

图13　优化前后机型样机

Fig.13　The model of the excavators before and after optimization

值、行程及机型参数，并计算出动态挖掘过程中的实际克服阻力，即实际挖掘力。

3.1 优化前后挖掘力分析

优化前后不同挖掘深度的实际挖掘力对比如图14和表5所示。可以看出优化后机型整体的挖掘性能较优化前显著提高。

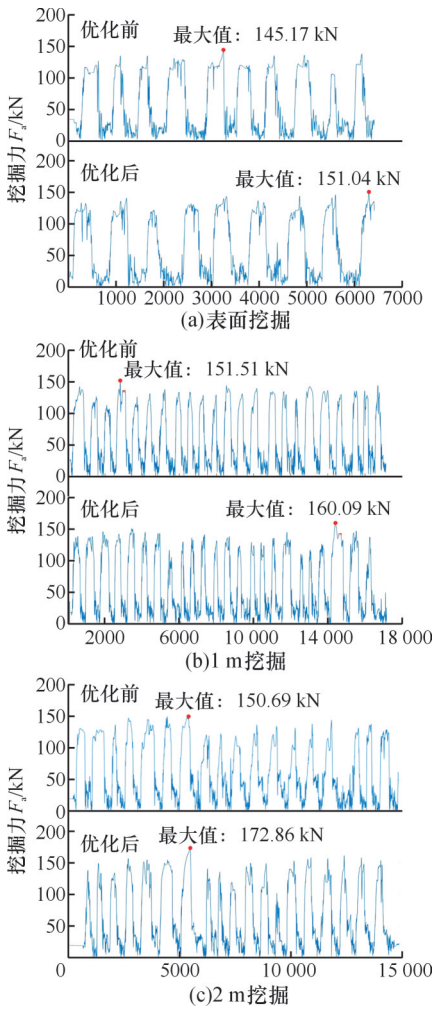


图14 优化前后机型在不同挖掘深度下的挖掘力对比

Fig.14 Comparison of digging force at different excavation depths before and after optimization

表5 优化前后机型挖掘数据

Tab.5 Data of model excavation before and after optimization

挖掘深度	挖掘力	优化前/kN	优化后/kN	增长比例/%
表面挖掘	平均挖掘力	118.31	122.19	3.28
	最大挖掘力	145.17	151.04	4.04
1 m挖掘	平均挖掘力	121.76	125.78	3.30
	最大挖掘力	151.51	160.09	5.67
2 m挖掘	平均挖掘力	123.32	130.67	5.96
	最大挖掘力	150.69	172.86	14.40

3.2 操作手评价

三位操作手分别对优化前后机型进行自由挖掘测试，测试完成后分别从挖掘力度、整机稳定性和动作协调性三个方面进行评价，结果如表6所示。

表6 优化后机型相比优化前机型实际操作评价结果

Tab.6 The actual operational evaluation results of the optimized model compared to the pre-optimized model

综合评估	评价项	优化后机型相比优化前机型评价		
		操作手1	操作手2	操作手3
力度	感觉有力	稍好	稍好	稍好
整机稳定性	感觉最远挖掘时的整机稳定	相当	相当	相当
动作协调性	感觉动作协调	相当	相当	相当

3.3 分析结论

由优化前后挖掘力结果可以看出：优化后机型相比于优化前机型在进行表面挖掘、1 m挖掘、2 m挖掘时的平均挖掘力分别提高了3.28%、3.30%、5.96%，最大挖掘力分别提高了4.04%、5.67%、14.40%，优化后机型的挖掘性能更佳。

由优化前后机型实际操作评价结果可以看出：三位操作手均一致反馈优化后的机型挖掘过程中感觉更有力，即基于复合挖掘力的工作装置优化设计对挖掘能力有显著的提高；在整机稳定性和动作协调性上，三位操作手均一致反馈优化前后机型的整机稳定性、动作协调性相当，即工作装置铰点的重新布置未对其正常的工作效率造成影响。综合三位操作手的评价结果，优化后机型在挖掘能力上有显著提高，有效解决了优化前机型在挖掘性能上的不足，证明了优化设计方法的可行性。

综上，从实际测试和操作手评价两个角度分析，均证明了优化后机型具有更佳的挖掘性能，从而验证了基于整机理论复合挖掘力优化设计方法的正确性与可行性。

4 结论

1）通过解析工作装置运动学特征，构建了整机理论复合挖掘力计算模型。针对传统算法在特定姿态下存在的解算失真问题，提出了奇异阈值判定准则，通过姿态空间离散化处理有效规避了奇异区域干扰。三组21 t级挖掘机对比验证表明：模型计算结果与实测挖掘阻力相当，相较传统理论挖掘力计算方法更精准。机型性能排序（机型3＞机型1＞机型2）与实际工况操作手评价一致，证实了模型的工程适用性。

2）基于理论模型建立了参数化优化模型，以平均复合挖掘力最大为主目标，同时兼顾能量效率与结构强度约束。通过遗传算法对关键铰点坐标进行多目标寻优，优化方案使典型挖掘路径的

平均复合挖掘力提高3.49%。样机实测数据显示：优化后的工作装置在表面挖、1 m挖及2 m挖三种典型作业模式下，平均有效挖掘力分别提高3.28%、3.30%和5.96%，深层作业性能改善尤为显著。

3)需注意的是，当前基于双缸联动的复合挖掘力分析与优化方法仍存在局限性：模型构建时设定铲斗末端受力仅为正交力，而实际情况中土壤对铲斗的作用力还可能会有力矩。未来可以引入力矩进一步提高方法的准确性与合理性。

4)研究成果可为新一代智能挖掘机的机电液协同设计与性能预测提供理论支撑，其方法论框架可扩展至其他类型工程机械的作业性能优化研究。

参考文献：

[1] DING H, HAN L, YANG W, et al. Kinematics and Dynamics Analyses of a New Type Face-shovel Hydraulic Excavator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(5): 909-924.

[2] 李佳豪，任志贵，庞晓平，等. 主挖力臂配比对主挖区界定及挖掘性能评价的影响研究[J]. 中国机械工程，2023，34(17)：2124-2141.
LI Jiahao, REN Zhigui, PANG Xiaoping, et al. Research on Influences of Main Digging Force Arm Ratio on Definition of Main Digging Area and Evaluation of Digging Performance[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(17): 2124-2141.

[3] ZOU Z, PANG X, CHEN J. Comprehensive Theoretical Digging Performance Analysis for Hydraulic Excavator Using Convex Polytope Method[J]. Multibody System Dynamics, 2019, 47(2): 137-164.

[4] 陈世教，荣洪均，冀满忠，等. 液压挖掘机反铲工作装置整机理论复合挖掘力的计算及应用[J]. 工程机械，2007，38(4)：39-43.
CHEN Shijiao, RONG Hongjun, JI Manzhong, et al. Calculation of Theoretical Digging Force under Combined Work Condition for Hydraulic Excavator with Backhoe Attachment and Its Application[J]. Construction Machinery and Equipment, 2007, 38(4): 39-43.

[5] CHEN J, QING F, PANG X. Mechanism Optimal Design of Backhoe Hydraulic Excavator Working Device Based on Digging Paths[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(1): 213-222.

[6] 陈进，任志贵，吕梁，等. 基于阻力特性的液压挖掘机复合挖掘力建模[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2015，36(7)：1015-1019.
CHEN Jin, REN Zhigui, LYU Liang, et al. Modeling of the Compound Digging Force of Hydraulic Excavator Based on Resistance Characteristics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(7): 1015-1019.

[7] 任志贵，陈进，王树春，等. 液压挖掘机挖掘阻力特性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2015，36(4)：551-556.
REN Zhigui, CHEN Jin, WANG Shuchun, et al. Resistance Characteristics of Hydraulic Excavator[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(4): 551-556.

[8] YANG L, XUE S, ZHANG X, et al. A Regularization Method for Solving Dynamic Problems with Singular Configuration[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2022, 236(1): 3-14.

[9] 吕永军，刘峰，郑飚默，等. 基于区域限定的奇异位置避免规划算法[J]. 计算机系统应用，2016，25(12)：169-175.
LYU Yongjun, LIU Feng, ZHENG Liaomo, et al. Singularity Avoidance Planning Algorithm Based on the Identification of Singular Configurations[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(12): 169-175.

[10] 周辉，丁锐，曹浩峰，等. 六自由度混联机构雅可比矩阵求解及奇异位形分析[J]. 东华大学学报(自然科学版)，2017，43(3)：416-424.
ZHOU Hui, DING Rui, CAO Haofeng, et al. Solution of Jacobian Matrix and Analysis on Singularity Configuration of a 6-DOF Hybrid Mechanism[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2017, 43(3): 416-424.

[11] 梁明锋，陈进. 基于极限挖掘力的液压挖掘机组合挖掘仿真研究[J]. 机床与液压，2021，49(21)：169-174.
LIANG Mingfeng, CHEN Jin. Research on Synthesis Digging Simulation of Hydraulic Excavator Based on Extreme Digging Force[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(21): 169-174.

[12] 李占龙，诸小武，高山铁，等. 液压挖掘机工作装置优化研究[J]. 机械强度，2023，45(1)：105-114.
LI Zhanlong, ZHU Xiaowu, GAO Shantie, et al. Optimization of Hydraulic Excavator Working Device[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 105-114.

[13] REN Z, LI J, PANG X, et al. Research on the Matching Characteristics of the Theoretical Digging Force of a Backhoe Hydraulic Excavator[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 16181.

[14] ZOU Z, CHEN J, PANG X. Optimum Dimensional Synthesis for the Working Mechanism of a Hydraulic Excavator to Improve the Digging Performance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2018, 232(3): 357-370.

[15] 朱丹丹，陈美英，曹宇. 基于遗传算法的矿用液压正铲挖掘机优化设计[J]. 机床与液压，2016，44(17)：173-176.
ZHU Dandan, CHEN Meiying, CAO Yu. Optimization Design of Mining Hydraulic Face-shovel Excavator Based on Genetic Algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(17): 173-176.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：庞晓平*（通信作者），女，1975年生，博士、副教授。研究方向为工程机械智能化、数字化。E-mail：pangxp@cqu.edu.cn。

本文引用格式：

庞晓平，向俊滔，冯原林，等. 基于双缸联动的液压挖掘机复合挖掘力分析及优化[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2667-2675.

PANG Xiaoping, XIANG Juntao, FENG Yuanlin, et al. Analysis and Optimization of Compound Excavation Force in Hydraulic Excavators Based on Dual-cylinder Linkage[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2667-2675.