

# 液压挖掘机挖掘力计算新方法

陈进,任志贵,庞晓平,贺康生

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

**摘要:** 以工作区域和挖掘点为对象,提出了一种研究理论挖掘力大小及其分布规律的新方法. 首先求得挖掘点的空间位置,再利用逆运动学原理求解每个挖掘点对应的挖掘姿态,根据对应的限制不等式组求解每个挖掘姿态的理论挖掘力,最后得到每个挖掘点的理论挖掘力和整个挖掘区域的挖掘力分布规律. 以某 36 t 反铲液压挖掘机为例,验证了相邻挖掘点或相似挖掘姿态的理论挖掘力相近的假设. 结果表明:在大多数挖掘点上新方法得到的理论挖掘力比传统方法有较大程度( $>20.2\%$ )的提高,且更能准确地反映挖掘机在给定挖掘点上所能发挥的最大挖掘力.

**关键词:** 液压挖掘机; 理论挖掘力; 挖掘点; 挖掘姿态; 逆运动学

中图分类号: TU621

文献标志码: A

## Novel Digging Force Calculation Method for Hydraulic Excavator

CHEN Jin, REN Zhigui, PANG Xiaoping, HE Kangsheng

(State Key Laboratory of Mechanic Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A new method for the researching of the theoretical digging forces and its regularities of distribution was presented based on the workspace and digging points. The spatial position of digging points was calculated first, the digging gestures corresponding to each digging point were solved by the inverse kinematics principle. The theoretical digging forces of each digging gesture were calculated according to the relevant limit equations. A case study of a 36 t backhoe hydraulic excavator proved the hypothesis that the theoretical digging forces, corresponding to two adjacent digging points or two similar digging gestures, be similar. The calculation results show that the theoretical digging forces obtained by the new approach are improved obviously ( $>20.2\%$ ). The experimental result proves that the new approach reflects the maximum digging force of the backhoe hydraulic excavator more accurately at the given digging

point.

**Key words:** hydraulic excavator; theoretical digging force; digging point; digging gesture; inverse kinematics

在农业、土方作业和采矿业中,土方机械发挥着重要作用<sup>[1]</sup>. 传统的采矿生产中,液压挖掘机是土方机械的关键设备<sup>[2]</sup>. 对挖掘机而言,挖掘过程是其最基本的功能也是其最为复杂的动作. 因此,众多学者致力于研究刀具和土壤之间的相互作用<sup>[3-5]</sup>,以期了解挖掘过程中阻力、速度和装土量之间的变化规律. 通用土方方程(UEE)正是一种建立刀具和土壤相互作用模型的方法. 基于被动土壤失效理论,一些研究者对 UEE 进行了开发和改进. 在过去的十年中,试验方法、数值方法、有限单元方法和离散单元方法相继被用来模拟和仿真刀具与土壤之间的相互作用<sup>[6]</sup>. 基于不断改进和完善的刀具和土壤相互作用模型,一些学者在土壤特性估计<sup>[7-8]</sup>、土壤参数研究<sup>[6]</sup>、装土过程<sup>[1,9-10]</sup>、挖掘阻力计算和预测<sup>[11-13]</sup>方面取得了诸多成果. 然而,由于挖掘对象的多样性和挖掘过程的复杂性,对于挖掘阻力的研究,尽管有多种计算模型,却没有公认的结论.

挖掘过程中,挖掘阻力和挖掘力是一对作用力和反作用力. 不考虑实际土壤作用时,挖掘机自身能发挥的挖掘力称为理论挖掘力. Flores 等<sup>[2]</sup>基于运动学转换器使用线性优化的方法计算正铲挖掘机的最大挖掘力,能够有效简化程序且大大缩短计算时间. 但这种方法没有考虑到挖掘机整体的倾翻和滑移. Park<sup>[14]</sup>将动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸单独作用时分别在铲斗上引起的挖掘力之和作为总的挖掘力. 这种方法没有考虑到挖掘机作为一个整体,各个液压缸之间的相互制约和相互影响. 有学者以三组液压缸长度的分级组合为基础,确定挖掘机

收稿日期: 2013-04-18

第一作者: 陈进(1956—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为机械系统协同优化和可再生能源装备设计理论及方法.  
E-mail: chenjin413@yahoo.com.cn

在整个工作区间上的若干种挖掘姿态,计算每一种挖掘姿态的理论挖掘力<sup>[15-16]</sup>,并以该计算结果生成的挖掘图为依据来评价挖掘机的设计合理性,本文将该方法称为传统方法.传统方法中,无论怎样分级都不可避免地以某一种挖掘姿态的理论挖掘力代替该挖掘姿态对应的挖掘点的理论挖掘力.因此,传统方法得到的理论挖掘力一般小于对应挖掘点实际的理论挖掘力.挖掘力的大小及其分布规律是挖掘机设计合理性评价的关键指标,所以传统方法得到的挖掘图并不能准确地评价挖掘机的设计合理性.

本文提出了一种以工作区域和挖掘点为对象研究理论挖掘力大小及其分布规律的新方法,给出了新方法的具体实施步骤,并建立了基于挖掘点的理论挖掘力计算模型.以某 36 t 反铲液压挖掘机为例,对比了新方法和传统方法的计算结果,以验证新方法的正确性.

### 1 新方法的实施步骤

理论挖掘力可以被定义为:不考虑铲斗与土壤的相互作用,由工作油压作用于主动液压缸,在铲斗切削刃处产生满足整机限制条件的最大作用力.整机限制条件包括:整机稳定性、地面附着性、闭锁液压缸的闭锁能力和工作液压缸的工作能力.

理论挖掘力大小及其分布规律研究新方法的主要步骤包括:① 根据挖掘机的几何尺寸和液压缸极限长度,得到挖掘机在其对称平面内的全工作区域,在该区域内生成挖掘点;② 利用逆运动学方法得到给定挖掘点对应的若干个有效挖掘姿态;③ 根据挖掘方式和挖掘姿态确定并求解限制条件方程组,得到对应挖掘姿态的理论挖掘力;④ 以给定挖掘点对应的所有挖掘姿态的理论挖掘力最大值作为该挖掘点的理论挖掘力;⑤ 重复步骤②~④,最终得到每一个挖掘点的理论挖掘力和挖掘力在工作区域的分布规律.其中,挖掘点是指铲斗切削刃在空间中的位置,挖掘姿态是指挖掘机工作装置在空间中的位置和方向.图 1 为给定挖掘点的理论挖掘力计算新方法流程图,对应新方法的步骤②~④.

#### 1.1 挖掘机全工作区域及挖掘点的生成

挖掘机的全工作区域是指铲斗切削刃所能达到的最大范围边界围成的区域,如图 2 中弧形曲线所围成的范围.要了解挖掘机在其工作区域上的理论挖掘力分布情况,理论上应该计算工作区域内所有

点对应的理论挖掘力.但实际上,不可能对工作区内无限多个点逐一进行计算.

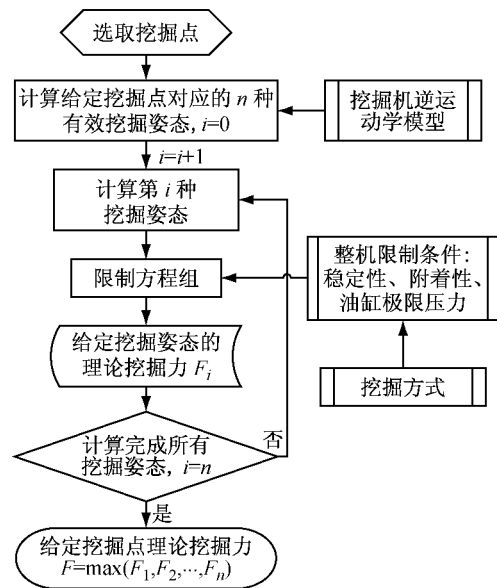


图 1 给定挖掘点的理论挖掘力计算流程

Fig.1 Calculation flow of the theoretical digging forces for the given digging points

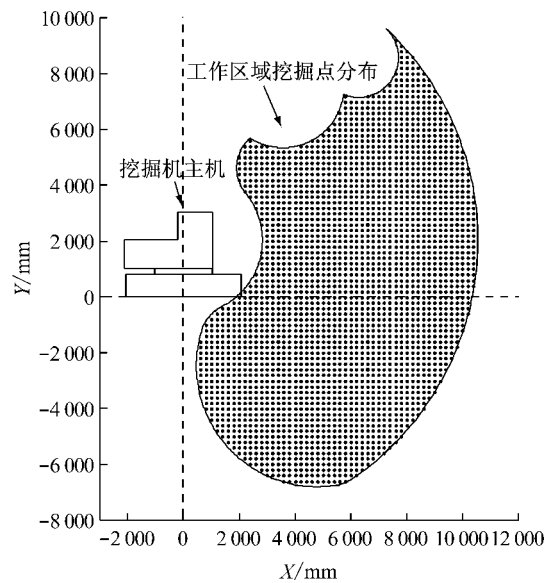


图 2 全区域挖掘点均布图

Fig.2 Uniform distribution of the digging points in the whole digging region

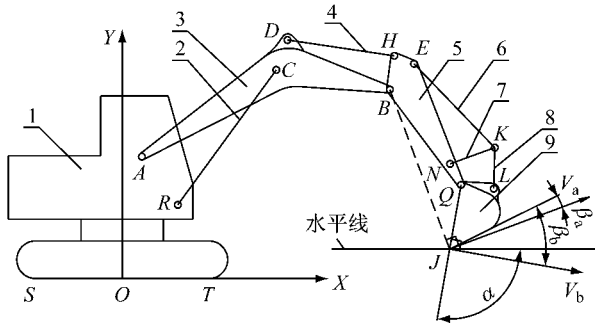
假设相邻挖掘点的理论挖掘力相近,或者当两个挖掘点足够接近时,对应的理论挖掘力近似相等.这样便可以合适的密度在工作区域均布挖掘点,以这些挖掘点的理论挖掘力代表工作区域上所有挖掘点的理论挖掘力.图 2 为某 36 t 反铲液压挖掘机在全工作区域内均布挖掘点的示意图.

### 1.2 挖掘姿态求解

如果只了解理论挖掘力在某一小范围区域(如主控区)内的分布规律,则可以只计算该范围内挖掘点的理论挖掘力. 如果不希望挖掘点均匀分布,则可以根据具体问题,在研究区域内以某种规律布置挖掘点. 尽管挖掘点的生成没有固定的方式,但也不是毫无规律. 例如,如果挖掘点选取得过疏,挖掘力的变化规律将不明显;如果挖掘点选取得过密,将会增加不必要的计算时间.

给定挖掘点,求解能够使切削刃到达该挖掘点的挖掘姿态,即知道了切削刃的坐标,求解三组液压缸的长度,这是一个逆运动学的问题. 除工作区域边界点外,对任意一个给定的挖掘点,该问题都有无数组解,即一个挖掘点对应无限多个不同的挖掘姿态. 但是,并不是每一种挖掘姿态都是有效挖掘姿态.

所谓有效挖掘姿态是指能够进行挖掘作业的姿态,它的两个常见限制条件是:① 铲斗角限制;② 切削后角限制. 铲斗角是指一般挖掘过程中 X 轴正方向到铲斗 QJ 的转角  $\alpha$ . 如图 3 所示, X 轴正方向是指工作装置所在平面内水平方向远离机身的一侧,图中  $\alpha$  为第三象限的角度. 切削后角是指切削刃板与其运动方向的夹角  $\beta$ . 图 3 中,当切削刃沿  $V_a$  所示反方向运动时,切削后角如  $\beta_a$  所示;当切削刃沿  $V_b$  所示反方向运动时,切削后角如  $\beta_b$  所示.



1—主机;2—动臂液压缸;3—动臂;4—斗杆液压缸;5—斗杆;  
6—铲斗液压缸;7—摇杆;8—连杆;9—铲斗

图 3 挖掘机机构简图

Fig.3 Schematic structure of an excavator

通常的挖掘行为发生在铲斗角  $\alpha \in [-160^\circ, 30^\circ]$  的范围;而切削后角需要满足  $\beta > 0$ , 因为如果  $\beta \leq 0$  将会导致铲斗前壁和土壤之间巨大的摩擦力. 根据这两个限制条件,便可以从挖掘点对应的无数种挖掘姿态中剔除无效的挖掘姿态.

要了解挖掘点的理论挖掘力,理论上应该首先计算出该挖掘点对应的所有有效挖掘姿态的理论挖掘力. 但实际上,不可能对无限多个有效挖掘姿态逐

一进行计算. 假设,相似的挖掘姿态对应的理论挖掘力相近,或当两个挖掘姿态足够接近时,对应的理论挖掘力近似相等. 这样便可以有限多个挖掘姿态的理论挖掘力代表无限多个挖掘姿态的理论挖掘力.

取  $d_\alpha$  为步长使铲斗角  $\alpha$  在  $[-160^\circ, 30^\circ]$  范围内变化. 利用逆运动学方法,每给定一个  $\alpha$  值,便有可能求解出一组满足挖掘点坐标的液压缸长度,对应一种挖掘姿态. 当取完所有的  $\alpha$  值后,便得到给定挖掘点所对应的一组挖掘姿态. 从中剔除由于切削后角所限制的挖掘姿态,剩余的便是有效挖掘姿态. 以某 36 t 反铲液压挖掘机为例,取  $d_\alpha = 2^\circ$  为步长,用以上方法求解出对应于某一挖掘点 P 的一组挖掘姿态,如图 4 所示.

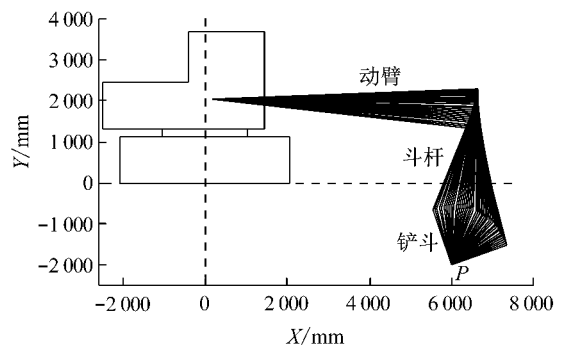


图 4 挖掘姿态逆解图

Fig.4 Inverse solution for the digging gesture

### 1.3 给定挖掘姿态理论挖掘力的求解

挖掘过程中整个挖掘机的受力可以分为重力、液压缸推力、挖掘阻力和地面对挖掘机主机的支撑力. 纵向挖掘过程中,将挖掘机的空间力系简化为纵向对称面 XOY 内的平面力系,如图 5 所示,其中各个符号的含义见表 1.

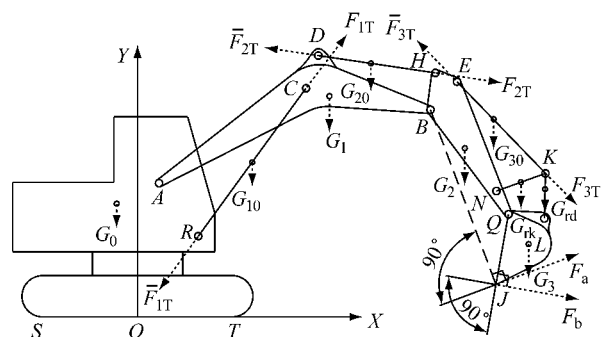


图 5 挖掘机受力简图

Fig.5 Analysis of forces acting on the excavator

理论挖掘力的计算与挖掘方式有关,一般的挖掘方式包括铲斗挖掘和斗杆挖掘. 铲斗挖掘是指铲斗液压缸主动工作,其他液压缸闭锁;斗杆挖掘是指

表 1 参变量含义

Tab.1 Meaning of the variables

符号	含义
$S, T$	挖掘机发生后倾和前倾时与地面的接触线分别在 XOY 平面上的投影点
$J$	切削刃板中间位置点
$G_i$	$i=0,1,2,3$ 分别代表主机、动臂、斗杆和铲斗的重力
$G_{i0}$	$i=1,2,3$ 分别代表动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸的重力
$G_{rk}, G_{rd}$	摇杆、连杆的重力
$F_k$	$k=1,2,\dots,11$ 代表挖掘点在第 $i$ 种挖掘姿态满足第 $k$ 个限制不等式的挖掘力
$F_{iT}$	$i=1,2,3$ 分别代表动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸的推力
$\bar{F}_{iT}$	$i=1,2,3$ 分别代表动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸的反推力
$F_b, F_a$	铲斗挖掘理论挖掘力、斗杆挖掘理论挖掘力
$E_i$	$i=1,2,3$ 分别代表动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸的力臂或当量力臂
$X_{Gi}$	$i=0,1,2,3$ 分别代表主机、动臂、斗杆和铲斗重心的横坐标
$X_{G_{i0}}$	$i=1,2,3$ 分别代表动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸重心的横坐标
$X_j, Y_j$	$j=A, B, Q, J, T, S$ 分别代表铰点 $A, B, Q$ , 以及切削刃 $J$ 和前倾线 $T$ 、后倾线 $S$ 的横坐标和纵坐标
$X_{rk}, X_{rd}$	摇杆、连杆的横坐标
$\gamma$	阻力角,即挖掘阻力在直角坐标系 XOY 中的方向角

斗杆液压缸主动工作,其他液压缸闭锁.本文假定,挖掘阻力与切削刃的运动方向相反,作用于切削刃的中间位置  $J$  点.铲斗挖掘时,切削刃的运动方向垂直于  $QJ$  连线,挖掘阻力如图 5 中  $F_b$  所示.斗杆挖掘时,切削刃的运动方向垂直于  $BJ$  连线,挖掘阻力如图 5 中  $F_a$  所示.

理论挖掘力是挖掘机在特定工况下的最大挖掘能力,不考虑挖掘阻力对它的限制.因此假定始终有一个挖掘阻力与理论挖掘力构成作用力与反作用力.所以,要求得理论挖掘力也就是求得挖掘机能克服的最大挖掘阻力.该挖掘阻力与挖掘机的其他作用力将构成平衡力系,因此必须满足静平衡条件,也就是挖掘机整机限制条件.因为理论挖掘力与挖掘阻力大小相等,下文中所称的理论挖掘力即是指挖掘机能克服的最大挖掘阻力.

1.3.1 整机限制条件及限制不等式

(1) 稳定性

挖掘机有前倾趋势时,假定地面对主机的支撑力仅作用于前倾线  $T$ ,为保证整机不向前倾翻,作用于挖掘机上的力系对其前倾线的合力矩  $M_T$  应大于或等于零.

$$M_T \geq 0 \Rightarrow F_{i1} \leq \frac{\{G_0(X_T - X_{G0}) + [G_1(X_{G1} - X_T) + G_{10}(X_{G10} - X_T) + G_2(X_{G2} - X_T) + G_{20}(X_{G20} - X_T) + G_{30}(X_{G30} - X_T) + G_{rk}(X_{rk} - X_T) + G_{rd}(X_{rd} - X_T) + G_3(X_{G3} - X_T)]\}}{-[\sin(\gamma)(X_J - X_T) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_T)]} \quad (1)$$

挖掘机有后倾趋势时,假定地面对主机的支撑力仅作用于后倾线  $S$ ,为保证整机不向后倾翻,作用

于挖掘机上的力系对其后倾线的合力矩  $M_S$  应小于或等于零.

$$M_S \leq 0 \Rightarrow F_{i2} \leq \frac{\{G_0(X_{G0} - X_S) + [G_1(X_{G1} - X_S) + G_{10}(X_{G10} - X_S) + G_2(X_{G2} - X_S) + G_{20}(X_{G20} - X_S) + G_{30}(X_{G30} - X_S) + G_{rk}(X_{rk} - X_S) + G_{rd}(X_{rd} - X_S) + G_3(X_{G3} - X_S)]\}}{\sin(\gamma)(X_J - X_S) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_S)} \quad (2)$$

(2) 附着性

为保证挖掘机不相对于地面发生移动,则应当满足  $F_H \leq \phi G$ ,其中  $F_H$  表示挖掘机所受合力的水平方向分量, $\phi$  表示地面附着系数, $G$  表示挖掘机所受重力.

$$F_H \leq \phi G \Rightarrow F_{i3} \leq \frac{\phi(G_0 + G_1 + G_{10} + G_2 + G_{20} + G_3 + G_{30} + G_{rk} + G_{rd})}{|\cos(\gamma)|} \quad (3)$$

(3) 闭锁液压缸的最大闭锁力

当动臂液压缸处于闭锁状态时,如果动臂液压缸具有被压缩的趋势,以动臂液压缸大腔最大闭锁力  $F_{1CB}$  作为液压缸闭锁力代入计算,为保证动臂液压缸不被压缩,则作用于动臂上的力系对  $A$  点的合力矩  $M_A$  应大于或等于零.

$$M_A \geq 0 \Rightarrow F_{i4} \leq \frac{\{F_{1CB}E_1 - [G_1(X_{G1} - X_A) + G_2(X_{G2} - X_A) + G_{20}(X_{G20} - X_A) + G_{30}(X_{G30} - X_A) + G_{rk}(X_{rk} - X_A) + G_{rd}(X_{rd} - X_A) + G_3(X_{G3} - X_A)]\}}{-[\sin(\gamma)(X_J - X_A) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_A)]} \quad (4)$$

如果动臂液压缸具有被拉伸的趋势,以动臂液压缸小腔最大闭锁力  $F_{1CS}$  作为液压缸闭锁力代入计

算,为保证动臂液压缸不被拉伸,则作用于动臂上的力系对  $A$  点的合力矩  $M_A$  应小于或等于零.

$$M_A \leq 0 \Rightarrow F_{i5} \leq \frac{\{F_{1CS}E_1 + [G_1(X_{G1} - X_A) + G_2(X_{G2} - X_A) + G_{20}(X_{G20} - X_A) + G_{30}(X_{G30} - X_A) + G_{rk}(X_{rk} - X_A) + G_{rd}(X_{rd} - X_A) + G_3(X_{G3} - X_A)]\}}{\sin(\gamma)(X_J - X_A) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_A)} \quad (5)$$

当铲斗挖掘时,斗杆液压缸处于闭锁状态.如果斗杆液压缸具有被压缩的趋势,以斗杆液压缸大腔最大闭锁力  $F_{2CB}$  作为液压缸闭锁力代入计算,为保证斗杆液压缸不被压缩,则作用于斗杆上的力系对  $B$  点的合力矩  $M_B$  应小于或等于零.

$$M_B \leq 0 \Rightarrow F_{i6} \leq \frac{\{F_{2CB}E_2 + [G_2(X_{G2} - X_B) + G_{30}(X_{G30} - X_B) + G_{rk}(X_{rk} - X_B) + G_{rd}(X_{rd} - X_B) + G_3(X_{G3} - X_B)]\}}{\sin(\gamma)(X_J - X_B) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_B)} \quad (6)$$

如果斗杆液压缸具有被拉伸的趋势,以斗杆液压缸小腔最大闭锁力  $F_{2CS}$  作为液压缸闭锁力代入计算,为保证斗杆液压缸不被拉伸,则作用于斗杆上的力系对  $B$  点的合力矩  $M_B$  应大于或等于零.

$$M_B \geq 0 \Rightarrow F_{i7} \leq \frac{\{F_{2CS}E_2 - [G_2(X_{G2} - X_B) + G_{30}(X_{G30} - X_B) + G_{rk}(X_{rk} - X_B) + G_{rd}(X_{rd} - X_B) + G_3(X_{G3} - X_B)]\}}{-[\sin(\gamma)(X_J - X_B) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_B)]} \quad (7)$$

当斗杆挖掘时,铲斗液压缸处于闭锁状态.如果铲斗液压缸具有被压缩的趋势,以铲斗液压缸大腔最大闭锁力  $F_{3CB}$  作为液压缸闭锁力代入计算,为保证铲斗液压缸不被压缩,则作用于铲斗上的力系对  $Q$  点的合力矩  $M_Q$  应小于或等于零.

$$M_Q \leq 0 \Rightarrow F_{i8} \leq \frac{F_{3CB}E_3 + G_3(X_{G3} - X_Q)}{\sin(\gamma)(X_J - X_Q) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_Q)} \quad (8)$$

如果铲斗液压缸具有被拉伸的趋势,以铲斗液压缸小腔最大闭锁力  $F_{3CS}$  作为液压缸闭锁力代入计算,为保证铲斗液压缸不被拉伸,则作用于铲斗上的力系对  $Q$  点的合力矩  $M_Q$  应大于或等于零.

$$M_Q \geq 0 \Rightarrow F_{i9} \leq \frac{F_{3CS}E_3 - G_3(X_{G3} - X_Q)}{-[\sin(\gamma)(X_J - X_Q) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_Q)]} \quad (9)$$

#### (4) 工作液压缸的最大工作推力

当铲斗挖掘时,铲斗液压缸处于主动工作状态.铲斗液压缸的主动作用将使铲斗绕  $Q$  点顺时针转动,若以铲斗液压缸最大工作推力  $F_{3w}$  作为液压缸推力代入计算,则作用于铲斗上的力系对  $Q$  点的合力矩  $M_Q$  应小于或等于零.

$$M_Q \leq 0 \Rightarrow F_{i10} \leq \frac{F_{3w}E_3 + G_3(X_{G3} - X_Q)}{\sin(\gamma)(X_J - X_Q) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_Q)} \quad (10)$$

当斗杆挖掘时,斗杆液压缸处于主动工作状态.斗杆液压缸的主动作用将使斗杆绕  $B$  点顺时针转动,若以斗杆液压缸最大工作推力  $F_{2w}$  作为液压缸

推力代入计算,则作用于斗杆上的力系对  $B$  点的合力矩  $M_B$  应小于或等于零.

$$M_B \leq 0 \Rightarrow F_{i11} \leq \frac{\{F_{2w}E_2 + [G_2(X_{G2} - X_B) + G_{30}(X_{G30} - X_B) + G_{rk}(X_{rk} - X_B) + G_{rd}(X_{rd} - X_B) + G_3(X_{G3} - X_B)]\}}{\sin(\gamma)(X_J - X_B) - \cos(\gamma)(Y_J - Y_B)} \quad (11)$$

### 1.3.2 理论挖掘力的求解

上述限制不等式中,部分变量的含义如表 1 所示.其中,挖掘机各构件的几何尺寸、重力,液压缸的最大工作压力和最大闭锁压力都随着机型的给定而确定.对应给定的挖掘姿态,液压缸的力臂和当量力臂、各位置点的坐标和阻力角可以采用机器人运动学的方法,建立挖掘机 D-H 坐标系,通过变换矩阵求解.

铲斗挖掘时对应限制不等式(1)~(7),(10).令该限制不等式组取等号时,得到一组对应解  $(F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, F_{i4}, F_{i5}, F_{i6}, F_{i7}, F_{i10})$ .该组解中的最小值必然满足每一个限制不等式,并且是满足该不等式组所有解中的最大解,所以该解就是挖掘机在给定挖掘姿态和铲斗挖掘方式下所能发挥的最大挖掘力,即给定挖掘点的第  $i$  种挖掘姿态下铲斗挖掘的理论挖掘力  $F_{bi} = \min(F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, F_{i4}, F_{i5}, F_{i6}, F_{i7}, F_{i10})$ .斗杆挖掘时对应限制方程(1)~(5),(8),(9),(11).同理,令该限制不等式组取等号时,得到一组对应解  $(F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, F_{i4}, F_{i5}, F_{i8}, F_{i9}, F_{i11})$ ,则给定挖掘点的第  $i$  种挖掘姿态下斗杆挖掘的理论挖掘力  $F_{ai} = \min(F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, F_{i4}, F_{i5}, F_{i8}, F_{i9}, F_{i11})$ .

### 1.4 给定挖掘点的理论挖掘力和挖掘力在工作区域内的分布规律

挖掘点的理论挖掘力是指挖掘机在该挖掘点所在的空间位置上,通过自身的任意组合能够发挥的最大力.一般一个挖掘点对应无数种挖掘姿态,所以挖掘点的理论挖掘力是其对应的无数种挖掘姿态的理论挖掘力中的最大值.重复第 1.3 节的过程,当计算完成给定挖掘点对应的  $n$  种有效挖掘姿态的理论挖掘力以后,找出其中的最大值作为该挖掘点的理论挖掘力,其中  $n$  表示该挖掘点对应的有效挖掘姿态的总数.对于给定的挖掘点,铲斗挖掘方式对应的理论挖掘力  $F_b = \max(F_{b1}, F_{b2}, \dots, F_{bn})$ ,斗杆挖掘方式对应的理论挖掘力  $F_a = \max(F_{a1}, F_{a2}, \dots, F_{an})$ .

以同样的方法可以得到给定挖掘区域中所有挖掘点在不同挖掘方式下的理论挖掘力.以该结果生成挖掘图谱,便可以看出理论挖掘力在整个挖掘区域内的分布规律.

## 2 新方法与传统方法的结果对比

### 2.1 两个假设的验证

以某 36 t 反铲液压挖掘机为例,用新方法在铲斗挖掘方式下计算了图 4 中挖掘点  $P$  对应的所有有效挖掘姿态的理论挖掘力  $F$ ,结果如图 6 所示.对同一个挖掘点来说,相近的铲斗角意味着形似的挖掘姿态.从图 6 中可以看出,理论挖掘力随铲斗角呈渐变趋势,这就证明了相似挖掘姿态的理论挖掘力相近这一假设的正确性.

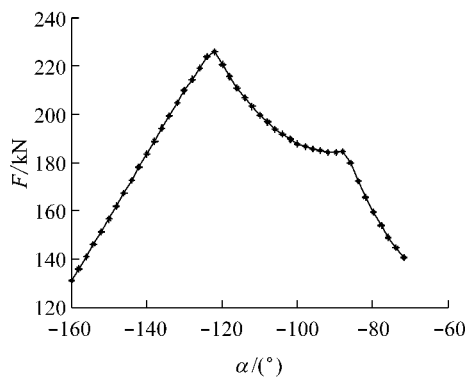


图 6 理论挖掘力随铲斗角的变化

Fig. 6 The changes of theoretical digging forces with the angle of bucket in Cartesian coordinates

同样以该 36 t 反铲液压挖掘机为例,用新方法在铲斗挖掘方式下计算挖掘机全工作区域内理论挖掘力大小的分布,结果如图 7 所示.从图中可以看出相邻挖掘点的符号相同(如果将理论挖掘力的大小程度分级更细,将可以更明显地看出全工作区域内理论挖掘力大小呈渐变趋势),该结果证明了相邻挖掘点的理论挖掘力大小相近这一假设的正确性.

### 2.2 理论挖掘力计算结果对比

各液压缸有 11 种瞬时长度,将其排列组合得到 1 331 种挖掘姿态,对应 1 331 个切削刃的空间位置,即挖掘点<sup>[15]</sup>.对这 1 331 种挖掘姿态进行理论挖掘力的求解计算,并以该计算结果作为对应的 1 331 个挖掘点的理论挖掘力,从而得到挖掘图,即理论挖掘力在整个工作区域的分布.传统方法中,针对某个具体挖掘姿态对理论挖掘力的求解过程与新方法基本相似,此处不再赘述.

以某 36 t 反铲液压挖掘机为例,分别用传统方法和新方法计算铲斗挖掘和斗杆挖掘两种常用挖掘方式下,挖掘机全工作区域内理论挖掘力的分布.图 7 和 8 为新方法和传统方法得到的铲斗挖掘图.图 9 和 10 为新方法和传统方法得到的斗杆挖掘图.

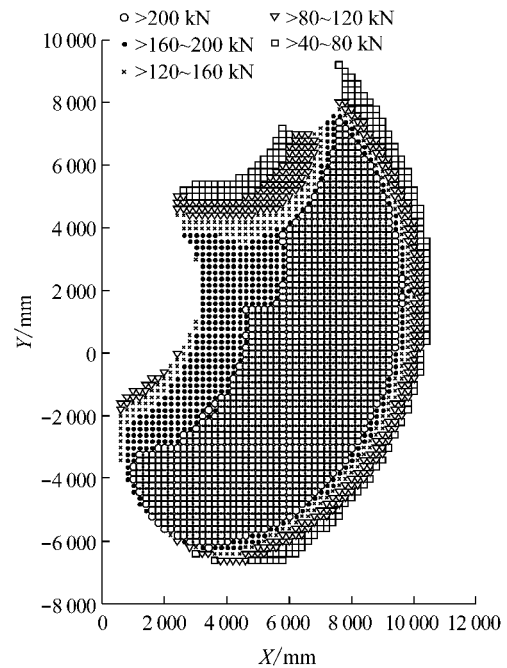


图 7 新方法得到的铲斗挖掘图

Fig. 7 Distribution of bucket breakout force obtained by the new method

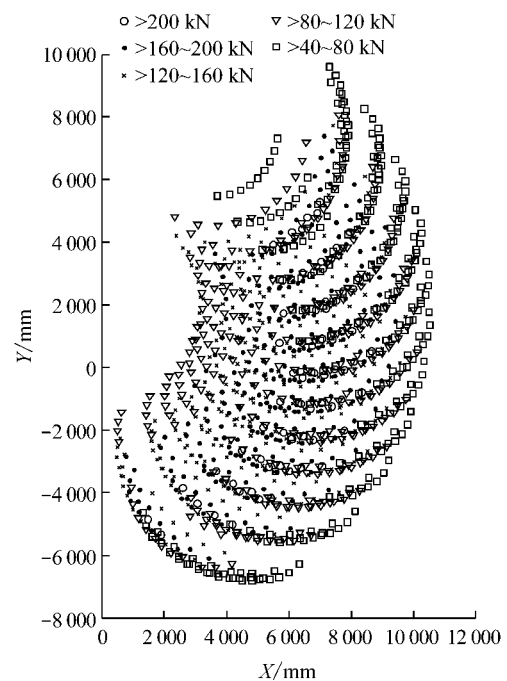


图 8 传统方法得到的铲斗挖掘图

Fig. 8 Distribution of bucket breakout force obtained by the traditional method

传统方法一般将工作装置三组液压缸从最短到最长分为 11 级,对比图 7 和 8 以及图 9 和 10 可以看出:① 传统方法得到的挖掘图,同一小范围内的几个挖掘点的理论挖掘力大小不在同一程度,挖掘力呈突变状态;新方法得到的挖掘图,同一小范围内的

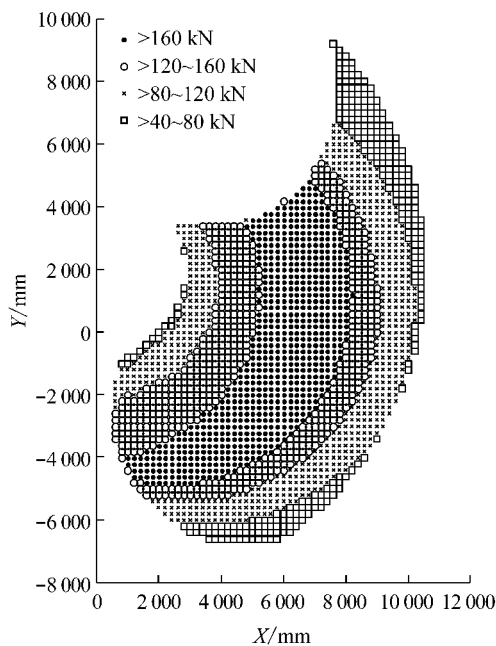


图 9 新方法得到的斗杆挖掘图

Fig.9 Distribution of arm crowd force obtained by the new method

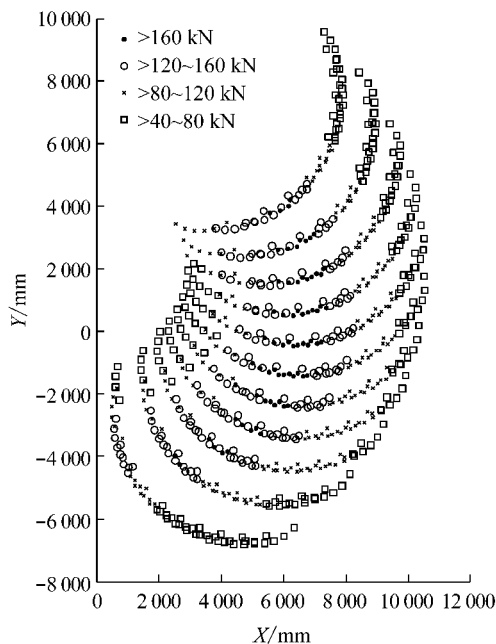


图 10 传统方法得到的斗杆挖掘图

Fig.10 Distribution of arm crowd force obtained by the traditional method

几个挖掘点的理论挖掘力大小在同一程度,挖掘力呈渐变状态.②传统方法得到的挖掘图,挖掘力没有明确的分布规律,很难判断挖掘机在某个区域所能发挥的挖掘力大小;新方法得到的挖掘图,挖掘力呈明确的区域性分布规律,容易判断挖掘机在某个区域所能发挥的挖掘力大小.③在大部分区域内,新方法得到的挖掘点理论挖掘力远大于传统方法得

到的邻近挖掘点的理论挖掘力.

统计传统方法和新方法在全挖掘区域内的理论挖掘力,得到全区域的最大理论挖掘力和平均理论挖掘力,如表 2 所示.其中,全区域内所有挖掘点的理论挖掘力最大值即为全区域的最大理论挖掘力,平均值即为全区域的平均理论挖掘力.

表 2 新方法与传统方法结果对比

Tab.2 Comparison of the results by traditional method and new method

方法	kN			
	铲斗挖掘		斗杆挖掘	
	全区域最大理论挖掘力	全区域平均理论挖掘力	全区域最大理论挖掘力	全区域平均理论挖掘力
传统方法	228.0	125.9	188.5	107.4
新方法	240.3	182.5	199.8	129.1
提高率/%	5.4	45.0	6.0	20.2

由表 2 看出,新方法计算得到的全区域最大理论挖掘力在铲斗挖掘和斗杆挖掘两种方式下分别比传统方法提高了 5.4%和 6.0%;新方法计算得到的全区域平均理论挖掘力在铲斗挖掘和斗杆挖掘两种方式下分别比传统方法提高了 45.0%和 20.2%.该结果说明,在大多数挖掘点上新方法得到的理论挖掘力比传统方法有较大程度的提高.这是因为新方法与传统方法存在着本质区别:传统方法以自身三组液压缸长度的分级组合确定的挖掘姿态为研究对象,而新方法以工作区域和挖掘点为研究对象.新方法从根本上避免了传统方法的问题,能够得到挖掘机在任意给定挖掘点上所能发挥的最大挖掘力,并进而得到挖掘力在给定区域的分布规律,即挖掘图.

### 2.3 试验验证

为了验证以上结论,本文将某 36 t 反铲液压挖掘机在铲斗挖掘方式下实际测试得到的挖掘阻力与两种方法计算得到的对应挖掘点的理论挖掘力进行对比.图 11 所示即为理论挖掘力与实测挖掘阻力的对比图.

理论挖掘力是指由主动液压缸引起的满足整机限制条件的最大挖掘力,即实际挖掘过程中挖掘机能够克服的最大挖掘阻力,因而理论挖掘力不可能小于实际挖掘过程中的挖掘阻力,并且由于实际挖掘过程中的挖掘工况和土壤因素,挖掘阻力往往达不到最大挖掘阻力.因此,一次挖掘过程中只有部分挖掘点的实际挖掘阻力接近其理论挖掘力,而大多数挖掘点的实际挖掘阻力都远远小于其理论挖掘力.

对比图 11 中三条曲线可以看出:①实测挖掘阻力在 4 s 以前有部分超过了传统方法计算得到的对应实测挖掘姿态的理论挖掘力.②新方法计算得到

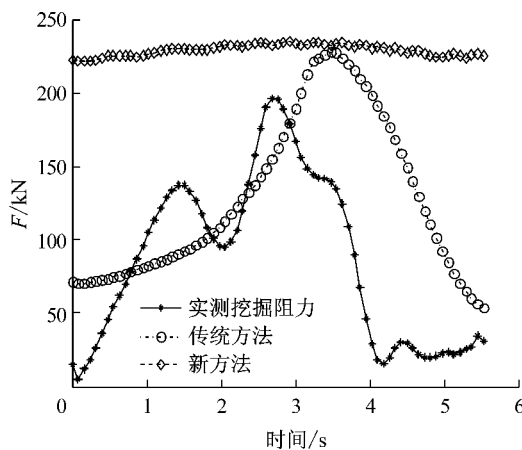


图 11 理论挖掘力与实测挖掘阻力对比图

Fig. 11 The contrast between the theoretical digging force and digging resistance

的对应实测挖掘点的理论挖掘力普遍大于实测挖掘阻力。③新方法计算得到的对应实测挖掘点的理论挖掘力在绝大部分挖掘点较大程度地超出了传统方法计算得到的对应实测挖掘姿态的理论挖掘力,只有在极少数挖掘点与其相当。以上对比结果证明:传统方法只能在少数挖掘点上较为准确地反映挖掘机的最大挖掘力,而新方法能够准确地反映挖掘机在任意给定挖掘点上所能发挥的最大挖掘力。

### 3 结论

(1) 相邻挖掘点和同一挖掘点对应的相邻挖掘姿态的理论挖掘力相近。

(2) 新方法得到的挖掘图中,挖掘力呈明显的区域性分布规律,容易判断挖掘机在某个区域所能发挥的挖掘力大小。

(3) 在大多数挖掘点上新方法得到的理论挖掘力比传统方法有较大幅度的提高,能够更准确地反映挖掘机在给定挖掘点上所能发挥的最大挖掘力。

### 参考文献:

[1] Coetzee C J, Els D N J. The numerical modeling of excavator bucket filling using DEM[J]. *Journal of Terramechanics*, 2009, 46(5): 217.

[2] Flores F G, Kecskemethy A, Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using Kinematical transformers[C]// *Proceedings of the 12th World*

*Congress in Mechanism and Machine Science*. Besancon: [s.n.], 2007: 18-21.

[3] Reece A R. The fundamental equation of earth-moving mechanics[J]. *Symposium on Earth-moving Machinery*, 1965, 179: 16.

[4] Blouin S, Hemami A, Lipsett M. Review of resistive force models for earthmoving processes[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2001, 14(3): 102.

[5] Lipsett M G, Moghaddam R Y. Modeling excavator-soil interaction [J]. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 2011, 5: 347.

[6] Mak J, Chen Y, Sadek M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 118: 117.

[7] Vahed S M, Delaimi H A, Althoefer K, et al. On-line energy-based method for soil estimation and classification in autonomous excavation [C]// *International Conference for Intelligent Systems*. San Diego: IEEE, 2007: 554-559.

[8] Lee Sanghak, Hong Daehie, Park Hyungju, et al. Optimal path generation for excavator with neural networks based soil models[C]// *International Conference for Intelligent Systems*. Seoul: IEEE, 2008: 632-637.

[9] Coetzee C. J, Basson A. H, Vermeer P. A. Discrete and continuum modeling of excavator bucket filling[J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(2): 177.

[10] Maciejewski J, Jarzebowski A, Trampczynski W. Study on the efficiency of the digging process using the model of excavator bucket[J]. *Journal of Terramechanics*, 2003, 40: 221.

[11] Wilkinson A, DeGennaro A. Digging and pushing lunar regolith: classical soil mechanics and the forces needed for excavation and traction[J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(2): 133.

[12] Obermayr M, Dressler K, Vrettos C, et al. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method [J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, 48: 347.

[13] Bhaveshkumar P P, Prajapati J M. Evaluation of resistive force using principle of soil mechanics for mini hydraulic backhoe excavator[J]. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2012, 2(4): 386.

[14] Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: a mathematical model of excavator digging and a calculation methodology[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 2002.

[15] 陈国俊. 液压挖掘机 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.

CHEN Guojun. Hydraulic excavator [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011.

[16] LÜ Chang, ZHANG Jihong. Excavating force analysis and calculation of dipper handle [C]// *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*. Xianning: IEEE, 2011: 4068-4071.