

基于正交回归试验法的煤矿剪式抓斗优化设计

孙远韬, 秦仙蓉, 孙文斌, 张 氢

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 煤矿剪式抓斗的挖掘过程是一个复杂的非线性动力学问题, 由于动态平衡方程的不确定性使得该类问题的优化设计不易实现. 建立了抓斗挖掘过程的数学模型, 获得了不同设计参数下的挖掘性能数据样本点, 然后构造了三因素五水平正交试验; 构建了物料挖掘过程目标函数的二次多项式响应面模型, 并采用最小二乘法求解响应面模型中的待定系数向量. 利用多目标优化的理想点法对抓斗的几何参数进行优化, 获得了一种性能更优的产品. 与蒙特卡罗法的计算结果对比表明, 该方法具有良好的预测能力, 并大大减少了仿真计算的规模.

关键词: 散体力学; 物料挖掘过程; 响应面法; 正交试验; 理想点法

中图分类号: TH113

文献标志码: A

Optimization Design of Coal Mine Scissor Bucket Grab Based on Orthogonal Regression Test

SUN Yuantao, QIN Xianrong, SUN Wenbin, ZHANG Qing

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The mining process of granular materials is a complex nonlinear dynamic problem, thus the optimization of bucket grab problem is difficult to achieve due to the uncertainty of dynamic equilibrium equation. This paper takes the coal mine scissor bucket grab as an example. Firstly, we establish the mathematical model of grab to obtain the mining performance data samples in different design parameters. Then, we construct three-factor and five-level orthogonal test to establish the quadratic polynomial response surface model of the optimization function of granular material mining performance, and solve the undetermined coefficient vectors of response surface model by the least square method. Finally, we obtain a better performance product by optimizing geometric parameters of the grab based on the ideal point

method of multi-objective optimization. The results show that the proposed method has good predictive ability, and greatly reduces the scale of simulation calculation by comparing with the results of Monte Carlo method.

Key words: granular material mechanics; mining process; response surface method; orthogonal test; ideal point method

对于机械优化问题来说, 机械系统的工作状态不断变化使得其性能不断发生复杂的变化, 即工作机构的动作使得目标函数与优化变量之间是一种非线性隐式关系, 并且不同状态下的性能参数由于初始设计变量的不同往往表现出复杂的耦合特征^[1], 不利于优化算法的实施. 以剪式抓斗为例, 其中一项非常重要的任务就是尽可能提高抓取物料与抓斗自身质量的比值(即抓取比). 目前在抓斗应用过程中最大的矛盾是抓斗不能太轻(需要依靠自重才能插入料堆), 而抓起来之后其自重却又是无效载荷. 理论上讲, 抓斗的抓取能力实际上是物料摩擦特性、抓斗自重、抓斗闭合力之间的复杂函数, 而物料的挖掘是一个动平衡过程, 阻力、黏聚力和力矩平衡方程是不定的^[2]; 同时, 挖掘模型中的各参数存在耦合关系, 导致目标函数与设计变量之间的非线性隐式关系不利于优化算法的实施, 一旦设计不当, 将容易导致抓斗本身脱离料堆而抓不到物料. 目前, 对这类问题可以采用蒙特卡罗法等全面试验方法对目标函数进行大样本全面仿真优化, 从而获得较理想的优化结果^[3-6]. 基于大样本仿真的蒙特卡罗法的优化结果往往被认为更接近真实解, 因此可用于各方法误差大小比较的基准, 但是需要指出的是, 诸如蒙特卡罗这类全面试验方法会随着设计变量个数、约束函数的复杂程度增加而使得整个设计过程非常漫长, 且不易达到设计要求和难以发现各设计变量与性能的

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2014BAF08B05)

第一作者: 孙远韬(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为机械现代设计方法. E-mail: sun1979@sina.com

通讯作者: 张 氢(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机械现代设计方法. E-mail: zhqing_tj@126.com

确定关系. 因此, 目前解决这一类问题往往是基于对某一静态条件下性能特征的确定函数进行优化设计. 以抓斗优化设计为例, 文献[7]以长撑杆散货抓斗最小抓取力矩为静力学计价指标, 建立了多变量非线性优化模型并得出了抓斗几何参数的优化值, 提高了抓斗的抓取力矩; 文献[8]以挖泥船抓斗为研究对象, 以抓斗容量最大为优化目标函数, 采用外点惩罚函数法进行抓斗结构参数的优化设计; 文献[9]以抓斗挖掘性能的抓取比为优化目标, 建立了大型疏浚抓斗机构的数学优化模型. 然而, 上述静态条件下的优化设计并不能较好地反映设计对象动态性能的变化, 不易获得动态性能不断变化下的最优化设计参数.

本文以煤矿剪式抓斗为例, 提出基于正交试验的响应面函数法来拟合目标函数多项式表达以求解最优化的设计参数. 首先建立了散体物料挖掘过程的数学模型, 并通过数值仿真方法获得了典型设计参数下的挖掘性能数据样本点, 构造了三因素五水平正交试验, 从而构建了物料挖掘过程目标函数的二次多项式响应面模型. 然后, 根据所得响应面模型, 利用理想点法对散体物料的挖掘性能进行多目标优化, 并将所获得设计参数与蒙特卡罗法的计算结果进行了对比, 验证了本文所述方法的可靠性.

1 散体物料挖掘过程模型

20 世纪 70 年代, 荷兰 NEMAG 公司生产了世界上第一台商用剪式抓斗, 它具有结构简单、抓取比大、作业循环时间短和抓取力矩逐渐增大的特点, 在港口码头的散体物料装卸作业中应用越来越广泛^[10]. 该抓斗在挖掘过程中主要受到钢丝绳的驱动力和土壤的切入阻力、推压阻力、摩擦阻力等, 其力学模型如图 1 所示, 图 1 中各符号含义如表 1 所示.

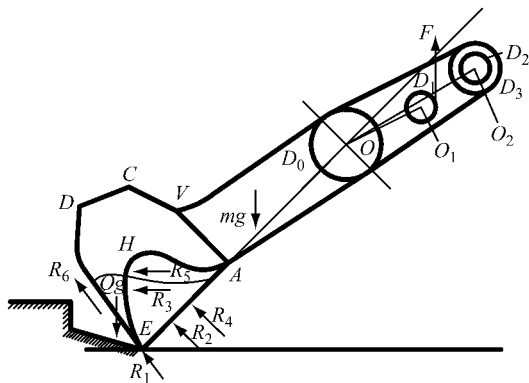


图 1 散体物料挖掘力学模型

Fig. 1 Mechanical model of granular material mining

表 1 图 1 中各符号含义

Tab. 1 Meanings of symbols in Fig. 1

符号	含义
R_1	铲斗水平刃口的切入阻力
R_2	铲斗两侧倾斜刃口的切入阻力
R_3	物料沿底板移动的水平推压阻力
R_4	侧板内外两侧受到的摩擦阻力
R_5	抓斗侧板内外两侧受到的黏聚力
R_6	底板内外两侧受到的摩擦阻力和黏聚力合力
m	抓斗自身质量
Q	物料质量
F	钢丝绳拉力
D_0	抓斗铰接点直径
D_1	导向滑轮外径
D_2	斗臂外径
D_3	滑轮外径

根据朗肯土压力理论, 对应抓斗的每一个开度状态 i , 挖掘阻力与挖掘深度 y_i 等状态参数之间有着复杂的函数关系, 各阻力计算式如下所示^[11]:

$$\begin{cases} R_{1i} = 31r_m f_0^2 (\delta + a') B y_i \\ R_{2i} = 62r_m f_0^2 (\delta + a') y_i^2 / \sin \beta_i \\ R_{3i} = (k_r y_i^3 / 3 + r_{m0} y_i^2 / 2) B \cot^2 \tau + 2k_c c y_i B \cot \tau \\ R_{4i} = 4(k_r y_i^4 / 12 + r_{m0} y_i^3 / 6) (\cot \alpha_i + \cot \beta_i) (1 - \sin \varphi_0) \tan \varphi \\ R_{5i} = 2k_c c y_i^2 (\cot \alpha_i + \cot \beta_i) \\ R_{6i} = (B r_m y_i^2 \cot \alpha_i \cos \alpha_i \tan \varphi) / 2 + k_c c y_i B / \sin \alpha_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_m 为物料容重; r_{m0} 为物料表层容重; f_0 为物料内摩擦系数; φ_0 为物料内摩擦角; φ 为铲斗与物料间的摩擦角; τ 为物料的被动滑移角; δ 为铲刃厚度; a' 为物料平均块度; B 为铲斗宽度; c 为物料黏聚力; k_c 为水对黏聚力的影响系数; k_r 为容重变化系数; α_i 为颚铲与水平线的夹角; β_i 为两侧倾斜切割刃与水平线夹角.

抓斗的挖掘工作是挖掘力矩和挖掘阻力矩动态平衡的过程, 即抓斗在一个挖掘深度上建立力矩平衡, 进而被打破, 然后在下一个挖掘深度上建立新的力矩平衡. 将整个挖掘过程划分为 N 段, 即 $(N+1)$ 个状态 (y_0, y_1, \dots, y_N) 对应每一个挖掘状态, 可建立阻力矩和驱动力矩的平衡方程, 如下所示:

$$M_{1i} = M_{2i} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{1i} = & R_{1i}s + (R_{2i} + R_{4i}) \left(s - \frac{y_i}{2\sin \beta_i} \right) + \\ & R_{3i} \left(s \sin \beta_i - \frac{y_i}{3} \right) + \\ & R_{5i} \left(s \sin \beta_i - \frac{2y_i}{3} \right) + R_{6i}s \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_{2i} = F_i \left[nr \sin(\beta_i - \delta) + \frac{r_D \cos(\beta_i - \delta_G)}{2} \right] + Q_i g l_{qi} + mgr_G \cos(\beta_i - \delta_G) \quad (4)$$

式(2)~(4)中: M_{1i} 为阻力矩; M_{2i} 为驱动力矩; n 为考虑阻力的滑轮组倍数; r 为滑轮中心至铰接点的距离; r_D 为导轮中心至铰接点的距离; r_G 为抓斗重心至铰接点的距离; s 为铲斗尖至铰接点的距离; θ 为铲尖轮廓夹角; δ_G 为铲斗尖至铰接点与水平面的夹角.对于每次挖掘后的物料质量 Q_i 及对应的力臂 l_{qi} ,本文建立如下关系式:

$$Q_i = Br_m \sum_{i=1}^N A_S = Br_m \frac{\left[\frac{x_0}{2N} \sum_{i=1}^N (y_{i-1} + y_i) + \frac{1}{2} y_i^2 \cot \beta_i \right]}{1 + \tan \alpha_i / \tan \beta_i}$$

$$l_{qi} = s \cos \beta_i + \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\left[\frac{x_0}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i-1} + y_i) + y_i^2 \cot \beta_i \right]}{(1 + \tan \alpha_i / \tan \beta_i) \tan \alpha_i}} \quad (5)$$

式中: A_S 表示每次挖掘的横截面面积.

令 x_0 为抓斗初始张开位移,根据每次平衡状态下驱动力矩式(4)和阻力力矩式(3)相等,并代入式(1)和(5),即可以得到当前状态下的挖掘深度 y_i 和前一个状态下的挖掘深度 y_{i-1} 的状态函数关系式,如下所示:

$$f(y_i, y_{i-1}) = 0 \quad (6)$$

由式(1)~(5)易知状态函数式(6)是关于 y_i 的五阶非线性方程,且和上一个挖掘状态 y_{i-1} 有关.本文利用斯蒂芬森(Steffensen)迭代法^[12]数值求解该平衡方程.

2 正交回归试验拟合法

2.1 剪式抓斗目标函数的响应面模型

由式(1)~(6)可知,抓斗在挖掘过程中初始参数和过程参数有着复杂的函数关系.随着机构作业的进行,铲斗内物料的重量、重心位置、各部件位置的关系都有较大变化,使得驱动力、挖掘阻力的函数表达式也一直发生较复杂变化.要求解整个挖掘过程中各性能参数的变化情况,需根据挖掘模型反复迭代仿真求解,且要多次求解挖掘深度函数这个高阶复杂方程的根,其计算精度取决于挖掘曲线被划分的区间个数.要对结构本身性能进行优化,需要充分分析各主要设计参数变化性能对挖掘性能的影响,所以完成这个设计空间的分析需要海量仿真计

算.以抓斗为例,铲斗宽度 B 、斗尖与绞轴间距离 y_e 、铲斗侧面横向长度 x_d 为主要设计参数,如果铲斗宽度 B 的样本点取 200 个, y_e 取 50 个, x_d 取 10 个,则要完成所有仿真的循环次数需近亿次计算,并且不易得到各参数对结果影响的规律.为此本文以煤矿剪式抓斗为例,采用三因素五水平正交试验设计方法,按照预先选取的数学模型通过仿真方法得到所需样本点,分析各参数的影响规律,并采用二次多项式拟合方法得到抓斗几何设计参数与性能参数的回归方程.

该剪式抓斗作业煤矿的表层容重为 $2\,400\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,如图 1 所示散体物料挖掘力学模型,以抓斗铰接点 O 为坐标原点建立直角坐标系,得到抓斗的几何参数,如下所示:

$$\begin{cases} A(x_a, y_a) = (0, -1.671), V(x_v, y_v) = (-0.733, -1.671) \\ C(x_c, y_c) = (-1.24, -1.84), y_d = -2.325 \\ H(x_h, y_h) = (-0.701, -2.325) \\ O_1(x_1, y_1) = (0.266, 0.793), O_2(x_2, y_2) = (0.375, 1.45) \\ D_0 = 0.7, D_1 = 0.5, D_2 = 0.5, D_3 = 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

煤矿剪式抓斗的几何变量数目较多,其中铲斗宽度 B 、铲尖 E 点纵坐标 y_e 和铲背 D 点横坐标 x_d 分别表征抓斗在 3 个维度上的度量,对抓斗自身质量、挖掘力矩和抓取物料质量影响最为显著^[13].本文以这 3 个几何参数为优化变量,铲斗闭合时物料质量 Q 、挖掘力矩 T_2 、铲斗自身质量 m 为拟合量,建立的三因素五水平正交试验表,如表 1 所示.

工程问题中,由于各设计参数的物理意义千差万别,在数值上不可避免地出现数量级相差较大的情况,导致方程无法求解.为避免这种情况,在构造响应面模型前,应预先对样本点进行归一化处理,建立拟合量和优化变量的二次多项式响应面模型,如下所示:

$$f = p_0 + p_1 B + p_2 y_e + p_3 x_d + p_4 B y_e + p_5 y_e x_d + p_6 B x_d + p_7 B^2 + p_8 y_e^2 + p_9 x_d^2 + \epsilon \quad (8)$$

式中:待定系数 $p_0, p_{i=1,2,3}$ 和 $p_{i>3}$ 分别为响应面模型的常数项、一次项和二次项系数; ϵ 为替代模型的误差.

基于表 2 中正交试验样本点的数据,采用最小二乘法求解中间变量响应面函数的系数,归一化后响应面模型系数如表 3 所示.

将表 3 中的物料质量、抓取力矩和自身质量对

表 2 三因素五水平正交试验

Tab.2 Three-factor five-level orthogonal test

编号	B/m	y_e/m	x_d/m	Q/kg	$T_2/(N \cdot m)$	m/kg	编号	B/m	y_e/m	x_d/m	Q/kg	$T_2/(N \cdot m)$	m/kg
1	1.5	-3.8	-2.00	6 033.4	510 920	3 349.7	14	2.5	-2.9	-1.25	5 771.7	427 820	2 656.4
2	1.5	-3.5	-1.60	4 939.8	406 650	2 789.0	15	2.5	-2.5	-1.80	5 703.5	527 640	2 864.3
3	1.5	-3.2	-1.25	4 111.9	329 660	2 349.1	16	3.0	-3.8	-1.60	7 920.0	608 130	3 893.7
4	1.5	-2.9	-1.80	4 744.4	402 770	2 562.7	17	3.0	-3.5	-1.25	6 385.6	481 170	3 280.7
5	1.5	-2.5	-1.40	3 533.5	334 240	2 118.2	18	3.0	-3.2	-1.80	8 570.5	640 010	3 613.8
6	2.0	-3.8	-1.25	4 674.9	385 790	2 948.1	19	3.0	-2.9	-1.40	6 986.4	514 080	3 019.0
7	2.0	-3.5	-1.80	6 628.1	523 250	3 256.0	20	3.0	-2.5	-2.00	6 904.2	641 780	3 296.0
8	2.0	-3.2	-1.40	5 409.2	415 730	2 710.4	21	3.5	-3.8	-1.80	9 930.9	748 620	4 439.8
9	2.0	-2.9	-2.00	6 208.1	511 940	2 988.6	22	3.5	-3.5	-1.40	7 902.0	583 200	3 704.5
10	2.0	-2.5	-1.60	4 587.2	425 690	2 471.7	23	3.5	-3.2	-2.00	10 336.0	770 540	4 121.4
11	2.5	-3.8	-1.40	6 097.9	482 520	3 381.3	24	3.5	-2.9	-1.60	8 427.1	622 410	3 461.1
12	2.5	-3.5	-2.00	8 443.1	651 930	3 758.1	25	3.5	-2.5	-1.25	6 423.4	527 810	2 896.6
13	2.5	-3.2	-1.60	6 930.0	521 980	3 143.7							

表 3 归一化后响应面模型系数

Tab.3 Normalized response surface model coefficient

p_i	各变量归一化系数		
	Q	T_2	m
p_0	$6.979\ 6 \times 10^3$	$5.248\ 2 \times 10^5$	$3.130\ 7 \times 10^3$
p_1	$1.965\ 1 \times 10^3$	$1.280\ 5 \times 10^5$	$0.546\ 2 \times 10^3$
p_2	$-0.749\ 0 \times 10^3$	$-0.308\ 0 \times 10^5$	$-0.441\ 9 \times 10^3$
p_3	$-1.025\ 6 \times 10^3$	$-0.928\ 0 \times 10^5$	$-0.335\ 6 \times 10^3$
p_4	$-0.068\ 1 \times 10^3$	$0.024\ 1 \times 10^5$	$-0.057\ 7 \times 10^3$
p_5	$0.616\ 3 \times 10^3$	$0.268\ 9 \times 10^5$	$0.060\ 4 \times 10^3$
p_6	$-0.418\ 6 \times 10^3$	$-0.296\ 9 \times 10^5$	$-0.062\ 6 \times 10^3$
p_7	$-0.128\ 2 \times 10^3$	$-0.062\ 3 \times 10^5$	$0.001\ 4 \times 10^3$
p_8	$-0.657\ 3 \times 10^3$	$0.015\ 8 \times 10^5$	$0.045\ 0 \times 10^3$
p_9	$-0.082\ 4 \times 10^3$	$-0.005\ 5 \times 10^5$	$0.005\ 3 \times 10^3$

应的多项式系数代入式(8)中即可求解得 3 个优化目标的二次多项式响应面函数。

2.2 响应面模型拟合精度的检验

评价响应面模型对试验数据拟合精度的指标主要有:负相关系数 R^2 、修正的负相关系数 R_{adj}^2 、 C_p 统计量、预测误差平方和等。负相关系数 R^2 和修正的负相关系数评价准则定义为

$$R^2 = 1 - \frac{S_{SE}}{S_{SY}}, R_{adj}^2 = 1 - \frac{M-1}{M-m} \frac{S_{SE}}{S_{SY}} \quad (9)$$

式中: M 为试验次数; m 为响应面模型项数; S_{SY} 为响应值与响应均值差的平方和; S_{SE} 为响应值与响应估计值差的平方和。 S_{SY} 和 S_{SE} 的表达式分别为

$$S_{SY} = \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y}), S_{SE} = \sum_{l=1}^M (y_l - \tilde{y}) \quad (10)$$

式中:下标 l 表示第 l 次试验; \bar{y} 表示 M 次试验响应的均值; \tilde{y} 为响应面函数。

模型检验结果如表 4 所示。结果表明该响应面修正模型具有较高的精度,可应用于优化数学模

型中。

表 4 归一化后响应面模型的检验

Tab.4 Test of normalized response surface model

参数	R^2	R_{adj}^2
Q	0.998 3	0.987 2
T_2	0.999 4	0.999 1
m	0.999 9	0.999 9

3 基于理想点的抓斗优化算例分析

抓斗的主要性能指标是抓取比和挖掘力矩,为了能够满足抓取比要求并使得挖掘力矩在挖掘过程中尽可能大,本文采用理想点法对剪式抓斗进行多目标优化^[14]。设抓斗闭合时抓取比和抓取力矩的最大值分别为 $f_{1\max}$ 和 $T_{2\max}$,最小值分别为 $f_{1\min}$ 和 $T_{2\min}$ 。优化的准则是使目标函数值与最大值的绝对误差的累加之和最小。将目标函数去量纲化,建立理想点优化数学模型,如下所示:

$$\min \sqrt{w^2 \left(\frac{f_{1\max} - f_1}{f_{1\max} - f_{1\min}} \right)^2 + (1-w)^2 \left(\frac{T_{2\max} - T_2}{T_{2\max} - T_{2\min}} \right)^2}$$

$$f_1 = Q/m$$

$$s. t. \quad 1.5 \leq B \leq 3.5, -1 \leq B_m \leq 1$$

$$-3.8 \leq y_e \leq -2.5, -1 \leq y_{em} \leq 1$$

$$-2.00 \leq x_d \leq -1.25, -1 \leq x_{dm} \leq 1$$

$$m/m_0 \leq m_{\text{frac}}$$

$$0.4 \leq w \leq 0.6$$

$$(11)$$

式中: w 为抓取比权重,工程中常取为 0.45~0.55; y_e 和 x_d 为归一前优化变量; B_m 、 y_{em} 和 x_{dm} 为归一后优化变量; m_0 为优化前抓斗的自身质量; m_{frac} 为优化

前后的自身质量比,通常允许优化后自身质量相比初始值不超过 105%。初始抓取比为 1.80,抓斗自身质量为 3 381 kg,抓取力矩为 482 520 N·m。

为求取目标函数抓取比和抓取力矩各自的最值,对 2 个目标的响应面函数分别进行单目标优化,将各目标函数的最值代入数学模型式(11)中,得到的鲍威尔算法求解结果如表 5 所示。

表 5 优化前后抓取特性参数对比

Tab.5 Comparison of parameters before and after optimization

状态	B/m	y_e/m	x_d/m	抓取比	$T_2/(N \cdot m)$	Q/kg	m/kg
初始	2.5	-3.8	-1.4	1.80	482 520	6 098	3 381
优化	3.5	-2.5	-1.8	2.19	664 000	7 446	3 400

优化后,抓取比增加了 21.7%,达到了 2.19,如图 2 所示,抓斗所抓取的物料质量大幅度增加;抓取力矩增加了 37.6%,达到了 664 000 N·m。这表明抓斗修正后的挖掘模型不仅具有良好的预测能力,还能提高优化的效率,改善产品的性能。

本文采用响应面法拟合目标函数的多项式表达式,样本点数少,优化效率高。为进一步检验该方法的误差,将铲斗宽度、斗尖与绞轴间距离、铲斗侧面

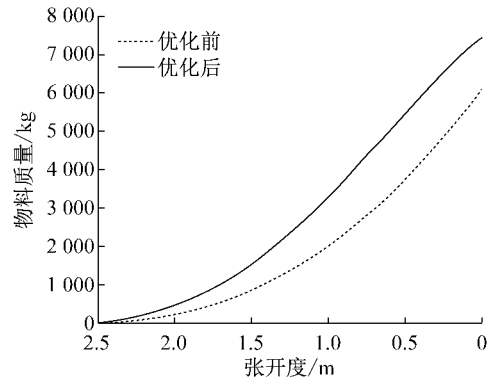


图 2 优化前后抓斗性能参数对比

Fig.2 Comparison of grab performance parameters before and after optimization

横向长度这 3 个优化变量看作区间上的均匀分布随机变量,其取值区间根据实际产品的样本变化范围放大 1.5 倍来确定(以扩大搜索范围),并对随机变量进行抽样,抽样次数为 300 万次,即通过蒙特卡罗仿真方法,求解相应的目标函数值并找出最优解。2 种方法的优化结果如表 6 所示,误差最大为 4.17%,其余误差基本在 1%~2%之间,表明本文采用的响应面法在优化效率高的同时,具有较好的可靠性。

表 6 优化结果对比

Tab.6 Comparison of optimization results between model modification and Monte Carlo method

方法	B/m	y_e/m	x_d/m	抓取比	$T_2/(N \cdot m)$	Q/kg	m/kg
蒙特卡罗法	3.5	-2.45	-1.7	-2.17	657 620	7 380	3 343
本文响应面法	3.5	-2.5	-1.8	2.19	664 000	7 446	3 400
误差/%	0	2.04	4.17	0.86	0.97	0.9	1.71

4 结语

煤矿剪式抓斗的挖掘过程是一个不确定的非线性动力学问题,对于每次挖掘状态,可利用迭代法求解非线性力矩平衡方程。然而,对于整个挖掘过程,挖掘参数的数值解是隐式不可解的。基于正交试验设计的二次多项式响应面模型能够很好地描述挖掘过程中输出和输入的关系,能够在较少的试验点数目情况下描述参数样本空间,避免重复抽取已经出现过的样本点,抽样效率高。通过对参数的检验可以发现,该响应面模型具有很高的拟合精度。

多目标优化理想点法结合正交回归优化的响应面模型具有很好的优化效果,显著降低了优化成本 and 提高了优化效率,表明该模型具有良好的预测能力,这也说明了回归正交方法本身得到的模型精度较高,能够用于优化设计,实际应用效果较为理想。

参考文献:

- [1] 张瑞军,邱继伟,王晓伟,等.基于多目标非耦合优化策略的可靠性稳健优化设计[J].中国机械工程,2014,25(2):246.
ZHANG Ruijun, QIU Jiwei, WANG Xiaowei, et al. Reliability based robust optimization design based on strategy of multi-objective optimization uncoupling or decoupling [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 246.
- [2] 郭广松.疏浚抓斗的优化仿真研究[D].上海:上海海事大学,2005.
GUO Guangsong. Study on simulation and optimization of dredging grab [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2005.
- [3] 张丽波,郭将,刘晓.响应面法与蒙特卡洛法边坡可靠性评价方法对比研究[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(5):779.
ZHANG Libo, GUO Jiang, LIU Xiao. Comparative study of methodologies between response surface methods and Monte Carlo methods in slope reliability analysis[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2016, 49(5): 779.

- [4] JAFARNEJAD M, PFISTER M, SCHLEISS A J, *et al.* Failure risk analysis of riverbank ripraps with Monte Carlo simulation [C] // River Flow 2012, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. London: Taylor Francis Group, 2012:1325-1330.
- [5] CAO Z, WANG Y, LI D. Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis [J]. *Computers & Geotechnics*, 2010, 37(7):1015.
- [6] 雷桂媛. 关于蒙特卡罗及拟蒙特卡罗方法的若干研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
LEI Guiyuan. Research on the Monte Carlo and quasi-Monte Carlo method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [7] 王宪龙, 梁庆华. 长撑杆抓斗静力学性能分析及参数优化[J]. *机械设计及研究*, 2011, 27(4): 88.
WANG Xianlong, LIANG Qinghua. Statics analysis and parameter optimization of the grab bucket [J]. *Machine Design and Research*, 2011, 27(4): 88.
- [8] 张春山. 基于 ADAMS 抓斗机构运动和受力分析[J]. *农业装备与车辆工程*, 2011(4):10.
ZHANG Chunshan. Motion and force analysis of the grab mechanism based on the ADAMS[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2011(4):10.
- [9] 甄义省, 陈凯凯. 基于多岛遗传算法的大型疏浚抓斗机构优化设计[J]. *港口装卸*, 2016(2):5.
ZHEN Yisheng, CHEN Kaikai. Mechanism optimization of large dredging grab based on multi-island genetic algorithms [J]. *Harbour Handling*, 2016(2):5.
- [10] 宋建军, 张建国. 剪式抓斗的原理及其在卸船机上的应用[J]. *起重运输机械*, 2011(5):36.
SONG Jianjun, ZHANG Jianguo. Work principle of scissors grab and its application in ship unloading machine [J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2011(5):36.
- [11] CHEN Q N, ZHANG Y X, ZHOU X P. Formula of rankine passive earth pressure in triaxial state of stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2005, 24(5):880.
- [12] SHARMA J R. A composite third order Newton-Steffensen method for solving nonlinear equations [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2005, 169(1):242.
- [13] 计三有. 散体变形理论及挖掘过程动态仿真的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2002.
JI Sanyou. Research on deformation theory and dynamic simulation of digging process for granular materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [14] DENG H, YE H C H, WILLIS R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights[J]. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(10):963.

~~~~~

(上接第 1846 页)

- [10] DIGANI V, SABATTINI L, SECCHI C, *et al.* Ensemble coordination approach in multi-AGV systems applied to industrial warehouses[J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2015, 12(3):922.
- [11] UMAR U A, ARIFFIN M K A, ISMAIL N, *et al.* Hybrid multiobjective genetic algorithms for integrated dynamic scheduling and routing of jobs and automated-guided vehicle (AGV) in flexible manufacturing systems (FMS) environment [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9/10/11/12):2123.
- [12] NERI F, COTTA C. Memetic algorithms and Memetic computing optimization: a literature review [J]. *Swarm & Evolutionary Computation*, 2012, 2:1.
- [13] 杨淑莹, 张桦. 群体智能与仿生计算: Matlab 技术实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.  
YANG Shuying, ZHANG Hua. Swarm intelligence and bio-inspired computation: implementation with Matlab [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [14] 朱琳, 范秀敏, 何其昌. 柔性生产系统配料区多自动导航小车调度优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(6):1168.  
ZHU Ling, FAN Xiumin, HE Qichang. Scheduling optimization for multi-AGVs in batching area of flexible production system [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(6):1168.