

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.02.024

基于遗传算法的复摆式破碎机 动颚运动特性优化^①

范 玉¹, 吴雪峰¹, 王 耿¹, 白福忠²

1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 内蒙古工业大学 机械学院, 呼和浩特 010051

摘要: 为有效减小复摆式破碎机动颚衬板磨损, 可通过降低动颚运动特性值实现. 为提高颚式破碎机工作性能, 以 PE250×400 型颚式破碎机为优化对象, 以动颚运动特性值最小作为优化设计目标, 以各构件基本尺寸作为优化设计变量, 建立包含构件尺寸、工作参数及腔形参数的约束条件, 构建优化设计数学模型, 采用遗传算法对数学模型进行优化, 优化后的动颚运动特性值降低 13.84%, 同时生产率提高 12.73%, 满足颚式破碎机的优化设计要求, 为颚式破碎机优化设计从理论上提供了方法指导.

关键词: 遗传算法; 优化设计; 破碎机; 运动特性

中图分类号: TH 11

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)02-0174-05

颚式破碎机自 1858 年由 E. W. Blake 发明以来, 已有 150 多年历史, 按动颚运动特点, 颚式破碎机分成简摆式与复摆式两种基本类型, 复摆式颚式破碎机由于其结构简单、经济性、操作性好等诸多优点, 是目前国内生产最多、使用最广的破碎设备^[1].

衬板磨损是颚式破碎机的主要问题, 通常可采用降低动颚运动特性值来解决其磨损问题^[2-3]. 母福生等人利用离散元法获得齿板齿形参数对破碎力的影响规律^[4]. 黄大明等人以惯性力引起的附加动载荷为出发点, 分析运动副之间约束力及平衡力矩, 利用 MATLAB 程序求解各构件在机构运动中的受力大小及变动规律^[5]. 姜丹丹等人利用 ABAQUS 软件对动颚齿板进行有限元分析, 计算出了动颚齿板在工作过程中所受的最大破碎力值, 得到动颚的应力分布情况^[6]. 李刚等人利用 ADAMS 软件对复摆颚式破碎机进行了动力学仿真分析, 从工作平稳性以及可靠性两方面对破碎机进化优化^[7]. 王晓敏等人对 PE400×600 复摆式颚式破碎机进行仿真优化, 通过改变参数点的位置来改变机架的位置进行优化设计^[8]. 张德浩等人研究了锤式破碎机的主轴辊模态特性, 并通过模态测试分析主轴辊模态参数, 对主轴辊有限元分析模型进行了验证^[9].

动颚的垂直行程使得动颚与定颚间产生垂直方向的相对运动, 这种相对磨搓运动加剧动颚与定颚衬板的磨损, 降低了衬板的使用寿命. 本文以降低动颚下部运动特性值为目标, 在分析破碎机运动特点的基础上, 提出基于遗传算法的复摆颚式破碎机尺寸优化方法.

① 收稿日期: 2017-03-18

基金项目: 教育部春晖项目(Z2011069); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(16A416003); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(17A535002).

作者简介: 范 玉(1979-), 女, 吉林长春人, 讲师, 博士, 主要从事机械优化设计研究.

1 动颚运动分析

复摆式破碎机机构类型是曲柄摇杆机构, 动颚上的点一般作复合平面运动, 轨迹近似为封闭椭圆曲线, 进料口处轨迹为椭圆形, 越靠近排料口其椭圆轨迹形状越趋于扁直, 排料口处的沿水平方向位移与垂直方向位移分别称作动颚水平行程 S_x 与动颚垂直行程 S_y , 二者比值 S_y/S_x 即为动颚运动特性值。

动颚水平行程可以产生破碎物料所必须的压缩量, 降低动颚运动特性值必须要充分考虑满足破碎矿石压缩量, 在此基础上最大限度降低动颚垂直行程^[10]。为建立以动颚运动特性值为目标函数的优化模型, 利用解析法对颚式破碎机进行运动学分析, 可精确求解动颚水平行程与垂直行程。

复摆式颚式破碎机的机构简图如图 1 所示。曲柄 AB 、连杆 BC 、肘板 CD 和机架 AD 长度分别是 l_1, l_2, l_3, l_4 , 动颚下端宽度为 l_5 。其中 θ_1, θ_2 及 θ_3 分别是构件 1, 2 和 3 相对于 X 轴的角位移。

以曲柄转动中心为坐标原点, 建立直角坐标系, 通过杆矢量建立机构封闭矢量位置方程:

$$AB + BC = AD + DC \quad (1)$$

$$AB + BC + CE = AE \quad (2)$$

将封闭矢量以复数矢量法表示, 则(1)式和(2)式可表示为

$$l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} = l_4 e^{i\theta_4} + l_3 e^{i\theta_3} \quad (3)$$

$$l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} = l_5 e^{i\theta_5} + l_{AE} e^{i\theta} \quad (4)$$

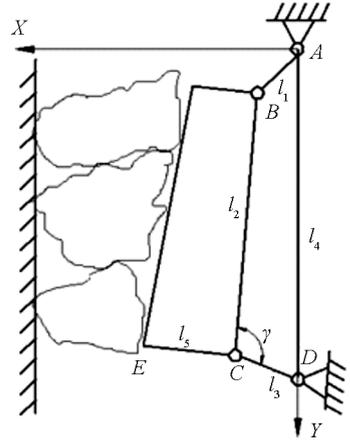


图 1 破碎机机构简图

利用方程 3 与方程 4 求得动颚齿板 E 点运动轨迹坐标为

$$\left. \begin{aligned} E_x &= l_4 \cos\theta_4 + l_3 \cos\theta_3 + l_5 \sin\theta_3 \\ E_y &= l_4 \sin\theta_4 + l_3 \sin\theta_3 + l_5 \cos\theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

计算出 E 点两极限位置横坐标之差, 即得到动颚下部水平行程 S_x :

$$S_x = E_{x1} - E_{x2} \quad (6)$$

计算出 E 点两极限位置纵坐标之差, 即得到动颚下部垂直行程 S_y :

$$S_y = E_{y1} - E_{y2} \quad (7)$$

2 颚式破碎机优化模型

2.1 目标函数

利用动颚运动轨迹分析结果, 计算得到动颚运动特性值 $f(x)$:

$$f(x) = S_y/S_x = (E_{y1} - E_{y2})/(E_{x1} - E_{x2}) \quad (8)$$

优化模型以动颚运动特性值最小为最优, 目标函数 Q 表示为

$$Q = \min f(x) \quad (9)$$

2.2 设计变量 X

影响颚式破碎机结构尺寸的主要独立参数有: 曲柄 l_1 、连杆 l_2 、肘板长度 l_3 、两固定铰链距离 l_4 和下部动颚宽度 l_5 。则设计变量 X 表示为:

$$X = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5] \quad (10)$$

2.3 约束条件

破碎机整体机构尺寸在满足动颚运动特性值最小的前提下, 必须考虑到生产能力、机构力学性能等因素, 为此建立包含构件尺寸、工作参数匹配、腔形参数合理等 3 类约束条件:

第 I 类约束: 构件尺寸约束

各构件参数取值范围直接影响优化结果, 采用经验类比方法, 确定各构件尺寸取值区间. 设计变量的取值范围如表 1 所示:

表 1 设计变量的区间

设计变量	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
上限	11	715	300	610	312
下限	9	580	200	475	290

对于复摆式破碎机, 曲柄与肘板较连杆和机架长度小得多, 四杆机构存在曲柄的约束条件可简化为两个:

$$l_1 + l_2 \leq l_3 + l_4 \quad (11)$$

$$l_1 + l_4 \leq l_2 + l_3 \quad (12)$$

第 II 类约束: 工作参数匹配

生产率作为颚式破碎机重要性能指标, 直接决定破碎机生产能力. 基于动颚运动特性值的优化必须充分考虑到破碎机生产能力, 才能使破碎机性能达到整体最优. 增大主轴转速可提高生产能力, 但与其匹配的动颚下部水平行程必然会减小, 从而又降低生产能力. 为提高破碎机生产能力, 使转速 n 、啮角 α 以及动颚下部水平行程 S_x 这 3 个参数相互匹配, 建立以下约束:

$$n = 2100 \sqrt{\tan \alpha + S_x} \quad (13)$$

第 III 类约束: 腔形参数合理

为满足四杆机构力学性能, 机构在运动过程中其最小传动角应大于 40° 或 50° , 当曲柄与机架两次共线时, 机构可能会出现最小传动角, 其值分别等于 γ_1 和 γ_2 , 以两值之中的最小值作为最小传动角 γ_{\min} .

$$\gamma_1 = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 + (l_4 - l_1)^2}{2l_2l_3} \quad (14)$$

$$\gamma_2 = 180^\circ - \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 + (l_4 + l_1)^2}{2l_2l_3} \quad (15)$$

确定最小传动角约束条件:

$$45^\circ \leq \gamma_{\min} \leq 55^\circ \quad (16)$$

动颚衬板挤压物料过程中, 要求衬板与物料间产生的摩擦力足够大, 以防止矿石被向上挤出. 因此确定啮角约束条件为

$$14^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ \quad (17)$$

2.4 优化模型

通过目标函数及约束条件, 建立变量为 5 维, 具有 17 个不等式约束及 1 个等式约束的颚式破碎机非线性优化设计模型如下:

$$\begin{cases} \min f(x) & X \in R^n (n=5) \\ \text{s. t } g_u(x) \geq 0 & (u=1, 2, \dots, 17) \\ g(x) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

3 优化方法及分析

利用 Matlab 软件对机构进行运动学分析, 得到在一个工作循环内动颚下端 E 点运动轨迹坐标, 在此基础上采用遗传算法工具对模型进行优化, 优化模型以获得最小目标函数值为最优. 而遗传算法的适应度函数以最大值为最优, 需将解空间中的目标函数转换为遗传算法中的适应度函数, 适应度函数

Fit($f(t)$) 如下^[11]:

$$\text{Fit}(f(t)) = \frac{1}{1 + c + f(x)} \quad (19)$$

其中 $c > 0$, $c + f(x) > 0$, c 为目标函数 $f(x)$ 的保守估计值。

设置遗传算法参数如下: 代沟为 0.9, 群体规模为 100, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.2, 终止进化代数为 100. 优化前后机构尺寸参数对比如表 2 所示, 优化前后破碎机产品性能对比如表 3 所示。

表 2 优化前后机构尺寸参数对比

参数	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
原始数据	10	540	250	575	300
优化数据	10.995 7	676.022 4	206.461 6	577.049 1	311.996 9
圆整后	11	676	206	577	312

表 3 优化前后机构性能对比

参数	排料口垂直行程/mm	排料口水平行程/mm	运动特性值	生产能力/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	传动角/ $^\circ$	平均啮角/ $^\circ$
原始数据	24.221 1	11.724 1	2.066 0	7.034 8	52.956 2	18
优化数据	22.518 1	12.622 2	1.78	7.906 3	50.057 6	14.236 6

由表 3 可知, 优化后排料口水平行程比优化前增大 7.66%, 排料口垂直行程减小 7.03%, 运动特性值降低幅度为 13.84%, 达到优化设计目的. 优化后机构最小传动角比优化前略有降低, 降低 5%. 增大传动角固然对力学性能更加有利, 但是增大传动角必然会增大垂直行程, 而且会使水平行程降低, 优化后最小传动角为 50.05° , 满足其自身约束条件。

优化模型中的第 II 类约束条件, 即工作参数匹配的要求, 使啮角与动颚下部水平行程及主轴转速 3 种参数间匹配更加合理, 优化后平均啮角比优化前减小近 20%, 在此基础上确定出匹配的主轴转速为 285 r/min, 由表 3 中优化前后对比可知, 优化后破碎机生产能力比优化前提高近 12.37%。

4 结 论

本文在利用解析法对破碎机进行运动学分析基础上, 构建基于遗传算法的破碎机优化数学模型, 对 PE250×400 型复摆式破碎机尺寸进行优化, 优化后动颚水平行程增大, 垂直行程减小, 使动颚运动特性值随之减小, 改善了动颚衬板的磨损, 优化后机构的动颚水平行程, 啮角与转速这 3 个参数满足相互匹配要求, 提高了破碎机生产率. 本文提出的基于遗传算法的破碎机优化设计方法在减小运动特性值同时又提高了生产率这一关键指标, 满足破碎机优化设计要求。

参考文献:

- [1] 黄欣. 颚式破碎机机构仿真及优化设计 [J]. 科技展望, 2016, 26(3): 160.
- [2] 黄大明, 蒋顺梅, 杨春兰. 基于最小特性值的破碎机机构参数 Matlab 优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2012(1): 4-6.
- [3] 齐忠华. 复摆颚式破碎机动颚齿板的运动轨迹及其对齿板寿命的影响 [J]. 选煤技术, 2006(3): 17-18.
- [4] 母福生, 朱贤云, 谢海庆, 等. 基于离散元法与正交试验的齿板破碎力研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 217-221.
- [5] 程发龙, 杨春兰, 黄大明. 破碎机运动机构载荷特性分析与 MATLAB 求解 [J]. 矿山机械, 2014, 42(11): 74-79.
- [6] 姜丹丹, 刘永财, 刘国祥, 等. WJ1210 颚式破碎机动颚强度仿真分析 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(1): 136-138.
- [7] 李刚, 余宗胜, 吴青青, 等. 复摆颚式破碎机的动力学分析及优化 [J]. 矿山机械, 2016, 44(7): 41-44.
- [8] 王晓敏, 张高青, 孟彩茹. 基于 Adams 的 PE400×600 复摆式颚式破碎机破碎腔优化设计 [J]. 煤炭与化工, 2016,

39(7): 56–58.

- [9] 张德浩, 陈蔚芳, 叶文华. 锤式破碎机主轴辊的计算机仿真与试验模态分析 [J]. 机械设计与研究, 2015, 31(2): 140–146.
- [10] 齐忠华. 复摆颚式破碎机动颚齿板的运动轨迹及其对齿板寿命的影响 [J]. 选煤技术, 2006(3): 17–18.
- [11] 许德帮, 徐元浩, 迟文俊. 基于遗传算法和_NET 平台的锥齿轮传动优化设计系统研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 153–158.

Genetic Algorithm-Based Optimization of Moving Jaw Motion Characteristics for the Pendulum Crusher

FAN Yu¹, WU Xue-feng¹, WANG Geng¹, BAI Fu-zhong²

1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China;

2. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China

Abstract: For decreasing the wear of the backing plate on a complex swing crusher, the usual way is to reduce the value of moving jaw's movement characteristics. In a study reported herein, a PE250×400 jaw crusher was used as the optimization object to improve its capability, the minimum value of moving jaw motion characteristics was taken as the target function, the basic dimensions of each component were selected as the optimal variables, and the constraints of mechanism parameters, cavity parameters and operating parameters were established. A mathematical model of optimization design was constructed, and solved by genetic algorithm. The results showed that the optimization value of motion characteristic was decreased by 13%, and productivity was increased by 12.73%, indicating that the optimization method met the requirements of the jaw crusher.

Key words: genetic algorithm; optimal design; crusher; kinematic characteristics

责任编辑 汤振金

