

doi: 10.7690/bgzdh.2019.07.015

胶泥阻尼器粒子群法参数优化

霍瑞坤¹, 狄长春¹, 王国平², 李旭³

(1. 陆军工程大学火炮理论教研室, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 95985 部队 94 分队, 河南 开封 475000;
3. 北京军事代表局, 石家庄 050003)

摘要: 为满足阻尼器在设计中最大过载和缓冲距离的需求问题, 运用粒子群法对胶泥阻尼器各参数进行优化。建立胶泥阻尼器冲击动力学模型, 确定阻尼器各参变量关系, 构造含有最大加速度和缓冲距离两设计指标的适应度函数, 采用粒子群算法对胶泥缓冲器进行多参数优化, 得出系统最优解, 确定各参数数值。结果表明: 该方法对胶泥阻尼器结构尺寸设计中如何避免最大位移和加速度两要素的矛盾, 迅速确定各参数有实际意义。

关键词: 胶泥阻尼器; 着陆冲击; 粒子群法; 参数优化

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

Particle Swarm Method Optimization for Viscous Damper

Huo Ruikun¹, Di Changchun¹, Wang Guoping², Li Xu³

(1. Staff Room of Artillery Theory, PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China;
2. No. 94 Team, No. 95985 Unit of PLA, Kaifeng 475000, China;
3. Beijing Military Representative Bureau, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the maximum overload and buffer distance of the damper in the design, the particle swarm method is used to optimize the parameters of the viscous damper. The impact dynamics model of the viscous damper is established, the relationship between the parameters of the damper is determined, and the fitness function of the 2 design indexes with maximum acceleration and buffer distance is constructed. The particle swarm optimization algorithm is used to optimize the multi-parameters of the viscous buffer to obtain the optimal system. And determine the value of each parameter. The results show that this method can avoid the contradiction between the 2 factors of maximum displacement and acceleration in the design of the size of the viscous damper, and quickly determine the practical significance of each parameter.

Keywords: viscous damper; landing impact; particle swarm method; parameter optimization

0 引言

在航空航天和重装空投等领域, 合理缓冲着陆冲击力至关重要, 现有的阻尼器研究主要集中在蜂窝弹塑性材料^[1]和缓冲气囊^[2]方向。随着我国在航空航天运力技术的发展, 把质量更大的物资装备安全投送到指定地点, 需要更大缓冲能量的阻尼器。高粘度的胶泥阻尼器具有容量大、无反弹、缓冲平稳和安全可靠等特点, 能满足需求。

目前大量研究主要集中在抗震减震结构^[3]和机械减震^[4]中, 特点是吸收频率载荷的冲击, 大量减轻周期冲击对结构的破坏。而在着陆缓冲中, 并不需要承受连续双向载荷的冲击, 也不贮存能量来恢复原位, 其设计标准为在单次冲击下能够有效吸收能量, 稳定降低速度, 且有效控制冲击过载和缓冲距离, 保证物资器材的安全。

最大过载和缓冲距离是胶泥阻尼器在设计中重

点考虑的 2 大指标, 由于其涉及参数较多且内部互相关联, 无法靠改变单一变量来迅速得到合适的设计标准。笔者采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对胶泥阻尼器进行多参数优化, 能迅速找到系统最优解, 确定各参数数值, 为阻尼器的设计提供参考。

1 粒子群算法的基本原理

粒子群算法是一种群智能算法^[5], 来源于鸟群捕食行为, 通过无质量的双属性(位置和速度)粒子的相互协作, 来寻找个体和全局最优解, 具有比传统算法计算速度快, 非线性、多峰问题全局搜索能力强, 种群数量依赖度低等特点, 在故障诊断、位置布局、策略决策优化等领域得到广泛应用^[6-8]。

粒子群算法存在容易早熟、陷入局部最优等缺点, 许多学者提出改进型变异算法来克服算法缺陷。例如, 自适应惯性权重粒子群算法^[9], 自适应双指

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-03-30

作者简介: 霍瑞坤(1983—), 男, 河北人, 硕士, 助理工程师, 从事装备模拟与技术仿真、机械设计、机械动力学研究。E-mail: huanyutian1113@163.com。

数惯性权重粒子群算法^[10], 自适应稳定性的惯性权重粒子群算法^[11], 退火机制型混合离散粒子群算法^[12]等, 使得应用领域更加广泛, 优化速度更加快捷, 全局收敛性更加稳定。

每个粒子的位置和速度更新公式是粒子群优化算法主要实现形式。

粒子 i 的第 d 维速度更新公式:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (1)$$

粒子 i 的第 d 维位置更新公式:

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中: V_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行速度矢量的第 d 维分量; X_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 位置矢量的第 d 维分量; c_1 、 c_2 为学习因子, 调节学习的最大步长; r_1 、 r_2 为 2 个随机函数, 取值范围为[0-1], 以增加搜索随机性; w 为惯性权重, 调剂对解空间的搜索能力。

粒子群算法的思想主要为: 1) 确定初始参数; 2) 初始化种群; 3) 评价函数适应度; 4) 寻找个体最优值; 5) 寻找全局最优值; 6) 更新粒子速度和位置; 7) 终止条件判断; 8) 输出结果。其流程如图 1 所示。

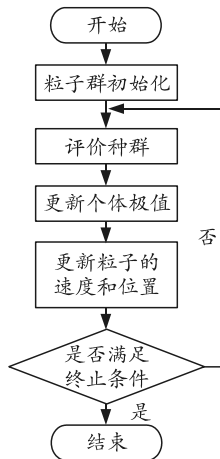


图 1 粒子群法流程

2 胶泥阻尼器动力学建模

对胶泥阻尼器进行参数优化, 应分析胶泥阻尼器的特点, 建立冲击动力学模型, 明确函数各参变量关系。

2.1 胶泥阻尼器结构特点

如图 2 所示, 胶泥阻尼器由活塞、活塞杆、缸体、缸盖、缓冲液和密封圈组成。工作原理是: 活塞受力在缸体内向右运动, 缓冲液通过活塞和缸体

的间隙从右腔向左腔流动, 产生阻碍活塞运动的剪切阻力, 起到缓冲的作用。

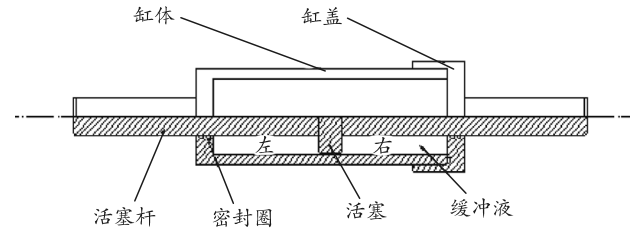


图 2 胶泥阻尼器的结构

2.2 胶泥阻尼器模型

为了研究冲击下胶泥阻尼器的特性, 美国泰勒公司^[13]经过试验和理论分析, 提出速度与阻尼力的经典公式:

$$F = C(\dot{x}')^n \quad (3)$$

式中: C 为阻尼系数; x' 为阻尼器活塞运动速度; n 为速度指数($0 < n < 1$), 表征系统非线性程度。

为了方便胶泥阻尼器的设计, 欧进萍等^[14]建立了经典公式与阻尼器结构尺寸和阻尼系数的关系表达式, 即式(3)的阻尼系数是阻尼器结构尺寸和阻尼系数函数, 关系如下:

$$C = \frac{\mu \pi l (D^2 - d^2)}{2b^{2n+1}} \left[\frac{(2n+1)(D^2 - d^2)}{n(D + D_0)} \right]^n \quad (4)$$

式中: μ 为弹性胶泥的动力黏度; D 为活塞缸体直径; D_0 为活塞直径; d 为活塞杆直径; l 为活塞厚度; b 为活塞与缸体的间隙。

2.3 胶泥阻尼器冲击动力学模型

胶泥阻尼器着陆冲击模型以 4 腿形式为例, 可简化为一质量为 m 的物体以速度 v 冲击地面, 4 个阻尼器可简化为一个阻力弹簧, 其阻力 $F = C(\dot{x}')^n$ 。以物体为研究对象, 其受力分析如图 3 所示, 受到向下的重力 mg , 向上的阻力 F 和惯性力 ma , 取垂直向下为坐标轴正方向, 由牛顿第二定律得:

$$mg - F = ma \quad (5)$$

而

$$a = x'' \quad (6)$$

将式(3)、(4)、(6)代入式(5)整理得:

$$mx'' + \frac{\mu \pi l (D^2 - d^2)}{2b^{2n+1}} \left[\frac{(2n+1)(D^2 - d^2)}{n(D + D_0)} \right]^n x' - mg = 0 \quad (7)$$

初始条件为:

$$x(0) = 0; \quad (8)$$

$$x'(0) = v \quad (9)$$

式(7)即胶泥阻尼器冲击动力学模型。

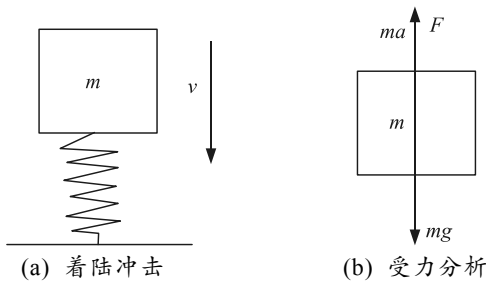


图 3 胶泥阻尼器着陆冲击模型

3 胶泥阻尼器粒子群法多参数优化

通过胶泥阻尼器冲击动力学模型，可以得到影响阻尼器设计的 2 个重要指标最大过载和最大加速度关系表达式，从而建立粒子群算法的适应度函数。胶泥阻尼器在着陆过程中姿态各异，但存在 4 腿同时着陆和单腿着陆 2 个极限状态，结构设计中满足这 2 个状态，则在各姿态着陆时自然满足，在参数优化处理中重点以这 2 个极限状态为标准。

参数优化前需做 2 项工作：1) 编写粒子群算法和求解动力学模型微分方程 2 个函数；2) 确定各参数的取值范围。粒子群法多参数优化流程如图 4。

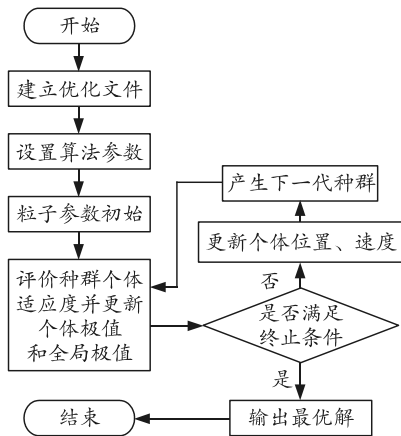


图 4 胶泥阻尼器粒子群法多参数优化流程

3.1 编写函数

笔者采用标准粒子群算法对胶泥阻尼器进行多参数优化。根据粒子群算法的基本原理，以 python 语言编写 PSO 优化算法函数。得到系统最大位移需求解式(7)的微分方程，以 python 语言编写求解最大位移的微分方程函数。

3.2 设置粒子群算法参数

粒子群算法主要参数包括：种群数量 (pop_size)，粒子维度 (particle_size)，粒子各维度取值范围 (particle_scope)，个体最优影响因子 (C1)，全局最优影响因子 (C2)，迭代惯性因子 (w)，迭代

惯性因子最小值 (min_w)，迭代惯性因子最大值 (max_w)，最大迭代数 (max_iter)，适应度函数 (func)。合理确定粒子群算法各参数数值是提高优化效率的关键。

3.3 确定适应度函数

适应度函数是粒子群算法的一个重要参数标准，粒子各维度的随机值通过适应度函数评估，更新个体极值和全局极值，在着陆冲击缓冲中，笔者主要关心的是最大过载和缓冲距离，找到使两者都达到最小时的各参数最优尺寸。

3.3.1 确定最大过载和缓冲距离

着陆冲击动力学模型的建立为确定最大过载和缓冲距离的关系表达式提供了依据，由着陆冲击动力学模型式(7)，易得最大缓冲距离随冲击质量的增大而增大，即发生在单腿着陆时。在缓冲过程中为了减小尺寸减轻质量，并不一定将速度降到 0，而是缓冲到许用安全速度即可。以一般空投弹药为例，其安全跌落高度^[15]为不大于 1.5 m，将速度控制在 5 m/s 即可满足标准。代入已知的条件参数，通过数值仿真方法求解微分方程，可得其最大缓冲距离 s_{imax} 的关系表达式。

根据着陆冲击动力学模型式(7)，其加速度关系表达式为

$$a_i = g - \frac{\mu \pi l (D^2 - d^2)}{2b^{2n+1}} \left[\frac{(2n+1)(D^2 - d^2)}{n(D+D_0)} \right]^n x' / m. \quad (10)$$

由上式可知：最大加速度随速度的增大而增大，随冲击质量的增大而减小，系统的初始时刻冲击速度达最大，其最大加速度表达式为

$$a_{imax} = g - \frac{\mu \pi l (D^2 - d^2)}{2b^{2n+1}} \left[\frac{(2n+1)(D^2 - d^2)}{n(D+D_0)} \right]^n v / m. \quad (11)$$

考虑系统着陆的 2 个极限状态，4 腿同时着陆和单腿着陆，最大加速度随冲击质量的增大而减小，其最大加速度表达式修正为

$$a_{imax} = g - 4 \frac{\mu \pi l (D^2 - d^2)}{2b^{2n+1}} \left[\frac{(2n+1)(D^2 - d^2)}{n(D+D_0)} \right]^n v / m. \quad (12)$$

3.3.2 适应度函数

确立了最大位移和最大加速度表达式，可以此来构造适应度函数，其目标为单腿着陆时最大缓冲距离不超过设计标准，4 腿同时着陆时不超过最大过载。适应度函数中含有最大过载和缓冲距离两项指标，可写为 $F(s_i, a_i)$ ，由于其数量级不同，各自除

以其许用值 $[s_i][a_i]$ 归一化处理, 许用值由设计标准决定, 空投设计标准范围如下:

$$[s_i] \leq 1 \text{ m},$$

$$[a_i] \leq 20 \times g(\text{m/s}^2).$$

为解决 2 项指标权重的问题, 引入比例因子 a_1 和 a_2 , 其关系表达式为

$$a_1 + a_2 = 1. \tag{13}$$

根据不同的侧重方向来确定比例因子数值, 默认情况下取值为 0.5, 可得适应度函数:

$$\text{Fitfun} = a_1 \frac{s_{i\max}}{[s_i]} + a_2 \frac{a_{i\max}}{[a_i]}. \tag{14}$$

其中: a_1 、 a_2 为比例因子; $s_{i\max}$ 为最大缓冲距离; $a_{i\max}$ 为最大加速度; $[s_i]$ 为最大缓冲距离许用值; $[a_i]$ 为最大过载许用值。

3.4 适应度评价

粒子群法多参数优化目标就是通过其算法不断的改变函数各变量数值, 求得适应度函数 Fitfun 的数值并进行比较, 舍去大值, 留下小值, 并不断迭代, 最终找到适应度函数 Fitfun 的最小值, 即 Fitfun_{\min} , 从而确定函数个变量最优值。

3.5 更新个体最优解和全局最优解

比较种群中各个粒子的当前适应度值和个体最优值, 若迭代后的当前适应度值优于迭代前, 则更新此粒子的个体最优值; 若所有粒子迭代后的个体最优值优于迭代前全局最优解, 则全局最优解更新为此个体极值。

3.6 条件判断

粒子群法是否终止程序的条件判断主要有最大迭代数和最小全局最优解更新阈值 2 个标准。如果满足条件判断, 则迭代终止, 程序输出变量值; 如果不满足, 则更新变量, 继续下一轮迭代。

4 算例与结果分析

4.1 算例

为验证粒子群算法在胶泥阻尼器中参数优化的可靠性, 引入一算例: 总质量 $m=500 \text{ kg}$ 的空投弹药中件以 $v=9 \text{ m/s}$ 速度着陆, 胶泥阻尼器采用四腿形式, 不考虑地面风速的影响, 阻尼器设计尺寸为活塞缸直径 $D=0.06 \text{ m}$, 活塞直径 $D_0=0.058 \text{ m}$, 活塞厚度 $l=0.02 \text{ m}$, 活塞杆直径 $d=0.03 \text{ m}$, 胶泥动力黏度 $\mu=700 \text{ pa} \cdot \text{s}$, 黏度系数 $n=0.6$ 。

选取种群数为 $\text{pop_size} = 50$, 最大迭代数

$\text{max_iter} = 200$, 对活塞缸直径、活塞直径、活塞杆直径、动力黏度, 按粒子群法优化流程进行多参数优化, 确定各参数变量最优值。优化目标为在满足缓冲距离不大于 1 m 的条件下, 着陆冲击过载尽可能小。优化中取 $a_1=0.45$, $a_2=0.55$ 。

4.2 优化结果分析

图 5 为适应度变化曲线, 可知在不到 150 次的迭代中, 算法程序基本就找到了系统的全局最优解, 确定了各参数的最优值, 表明粒子群法多参数优化的效率相当高。

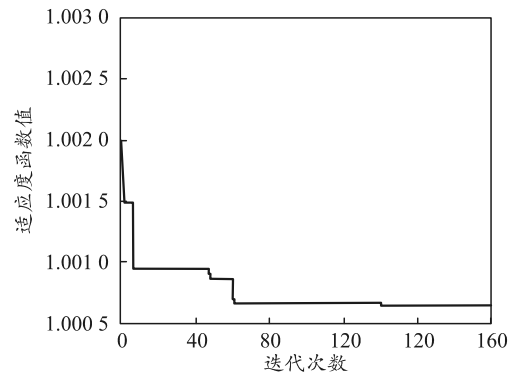


图 5 适应度函数变化曲线

表 1 为粒子群法多参数优化前后结果数值对比, 可知活塞杆直径和胶泥动力黏度值都相应地减少, 相对减轻了质量, 且满足缓冲距离不大于 1 m 的条件, 极大地减小了着陆冲击过载。

表 1 胶泥阻尼器多参数优化前、后结果对比

参数	μ	D	D_0	d	$a_{i\max}$	$s_{i\max}$
优化前	700	0.06	0.058	0.030	196	0.82
优化后	578	0.06	0.058	0.028	171	0.96

5 结论

笔者运用粒子群法对胶泥阻尼器各设计尺寸进行了多参数优化。结果表明: 该算法具有收敛速度快, 全局搜索能力强, 连续函数极值适应度好等特点, 能合理指导阻尼器各参数的选取, 可为阻尼器的优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 洪煌杰, 王红岩, 李建阳, 等. 空投装备气囊缓冲系统评价方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 148-154.
- [2] 李建阳, 王红岩, 芮强, 等. 空投缓冲气囊有限元模型修正方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 752-757.
- [3] 丁幼亮, 耿方方, 葛文浩, 等. 多塔斜拉桥风致抖振相应的粘滞阻尼器控制研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 130-137.
- [4] 李波, 吴晓涵, 宋和平, 等. 某框架-剪力墙结构采用

- 粘滞阻尼器减震效果分析[J]. 机构工程师, 2017, 33(3): 116-125.
- [5] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, 1995: 1942-1948.
- [6] 房红征, 史慧, 韩立明, 等. 基于粒子群优化神经网络的卫星故障预测方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(7): 1730-1733.
- [7] 郝永志, 郑彭军. 基于粒子群算法的航海雷达面板按钮布局优化[J]. 中国航海, 2017, 44(3): 4-8.
- [8] 许玉格, 宋亚龄, 陈立定. 基于人工免疫的污水处理系统自适应优化策略[J]. 信息与控制, 2015, 44(1): 99-103.
- [9] ZHANG L, TANG Y, HUA C, et al. A new particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight based on Bayesian techniques[J]. Applied Soft Computing, 2015, 28: 138-149.
- *****
- (上接第 66 页)
- [3] 杜继永, 张凤鸣, 杨骥, 等. 多 UCAV 协同任务分配模型及粒子群算法求解[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1751-1755.
- [4] 陈侠, 胡永新. 不确定环境下基于 PSO 算法的多无人机任务分配方法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(6): 11-16.
- [5] 郑晓辉. 无人机协同作战的目标分配算法研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 16-18, 31.
- [6] 冯琦, 张才坤, 赵鸿森, 等. 信息不确定下空战威胁评估方法研究[J]. 飞行力学, 2014, 32(5): 477-480.
- [7] KENDALL N, PHILLIP C, MEIR P. Dynamic network flow optimization models for air vehicle resource allocation[C]. Arlington: American Control Conf. Arlington, 2001: 25-27.
- [8] RICHARDS A, BELLINGHAM J, TILLERSON M, et al. Coordination and control of multiple UAVs[C]. Monterey: Proc of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Monterey, 2002: 20-24.
- [9] SHIMA T, STEVEN J. R, ANDREW G. S. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3252-3269.
- [10] 叶文, 朱爱红, 欧阳中辉. 基于混合离散粒子群算法的多无人作战飞机协同目标分配[J]. 兵工学报, 2010, 31(3): 331-336.
- [11] 苏菲, 陈岩, 沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配[J]. 航空学报, 2008, 29(S): 184-191.
- [10] CHAUHAN P, DEEP K, PANT M. Novel inertia weight strategies for particle swarm optimization[J]. Memetic Computing, 2013, 5(3): 229-251.
- [11] TAHERKHANI M, SAFABAKHS R. A novel stability-based adaptive inertia weight for particle swarm optimization[J]. Applied Soft Computing, 2016, 38: 281-295.
- [12] YAN Z C, LUO Y S. A particle swarm optimization algorithm based on simulated annealing[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989: 2301-2305.
- [13] LEE D, TAYLOR D P. Viscous damper development and future trends[J]. The structural design of tall buildings, 2001, 10: 311-320.
- [14] 欧进萍, 丁建华. 油缸间歇式粘滞阻尼器理论与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 82-89.
- [15] GJB 573.14-88. 引信环境与性能试验方法 1.5 m 跌落试验[S]. 国防科学技术工业委员会, 1988.
- *****
- [12] 杨启文, 蔡亮, 薛云灿. 差分进化算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(4): 506-513.
- [13] 张春美, 陈杰, 辛斌. 武器目标分配问题的离散差分进化算法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(03): 289-293, 321.
- [14] 罗德林, 吴文海, 沈春林. 空战多目标攻击决策综述[J]. 电光与控制, 2005, 12(4): 4-8.
- [15] PAN Q K, WANG L, QIAN B. A novel differential evolution algorithm for bi-criteria no-wait flow shop scheduling problem[J]. Computer and Operation Research, 2009, 36(8): 2498-2511.
- [16] ATANASSOV K T, GARGOV G. Interval valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 35(3): 343-349.
- [17] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 215-219.
- [18] 谭吉玉, 朱传喜, 张小芝, 等. 基于 TOPSIS 的区间直觉模糊数排序法[J]. 控制与决策, 2015, 30(11): 2014-2018.
- [19] YE J. Multicriteria fuzzy decision-making method based on a novel accuracy function under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 6899-6902.
- [20] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.