

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201803010



应用 GA-BP 神经网络优化平摆 复合振动筛的振动参数

沈国浪¹, 童昕^{1,2}, 李占福²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建工程学院 福建省数字化装备重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 针对目前筛分理论的研究仅局限于单因素考虑的问题, 提出应用遗传算法(GA)优化的 BP 神经网络对数据空间进行全局寻优, 且考虑所有因素对筛分结果的综合影响。首先, 通过离散单元法的筛分仿真试验, 获取实际筛分过程中难以获取的数据。然后, 利用 GA 优化的 BP 神经网络对平摆复合振动筛的振动参数进行优化, 选择 5-9-1 的 BP 神经网络结构类型, 得到优化后的振动参数组合, 即振幅为 2 mm, 振动频率为 26 Hz, 振动方向角为 46°, 摆动频率为 21 Hz, 摆角为 1°。对优化后的结果进行一次模拟仿真验证, 结果表明: 验证结果与测试结果相吻合。

关键词: 振动筛; 振动参数; 离散单元法; 筛分效率; 遗传算法-BP 神经网络

中图分类号: TD 452 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2018)04-0509-05

Application of GA-BP to Optimize Vibration Parameters of Vibrating Screen of Translation-Swing Composite Motion

SHEN Guolang¹, TONG Xin^{1,2}, LI Zhanfu²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Digital Equipment, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current screening theory was limited to one factor, a BP neural network optimized by genetic algorithm (GA) was proposed for global optimization of data space when the effects of multiple factors on screening results were considered. Firstly, the data difficult to obtain in the actual sieving process was obtained by using the simulation experiment based on discrete element method. Then, the BP neural network with structure of type 5-9-1 optimized by GA was adopted to optimize the vibration parameters of vibrating screen of translation-swing composite motion. The vibration parameters after optimization were as follows: vibration amplitude 2 mm, vibration frequency 26 Hz, vibrating direction angle 46°, swing frequency 21 Hz, and swing angle 1°. Finally, the optimized results were verified by simulation experiment. The results show that the simulation experiment results are in good agreement with test results.

Keywords: vibrating screen; vibration parameter; discrete element method; screening efficiency; genetic algorithm-BP neural network

振动筛是按照粒径大小对物料进行分级的主要设备, 它被广泛应用于采矿、煤炭、医药等行业。我国

收稿日期: 2018-03-07

通信作者: 童昕(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事机电系统动态分析与控制的研究。E-mail: xtong@fjut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175190); 福建省科技创新平台资助项目(2014H202); 福建省高校自然科学基金青年基金重点资助项目(JZ160460); 华侨大学研究生科研创新基金项目(1601103005)

对振动筛的自主研发水平虽然有很大的进步,但仍落后于发达国家,如德国、澳大利亚、美国等^[1]. 以往学者对振动筛的研究大都局限于单因素的研究,如赵跃民等^[2]研究单颗粒在筛面上的透筛情况,并以此建立颗粒沿筛面方向的透筛概率模型;王桂峰^[3]研究在不同筛分参数下,分析分层透筛细粒比和分层透筛速率的关系及筛面长度和时间的关系;肖建章等^[4]研究进料速率对颗粒分层和透筛的影响. 但不管是分层还是透筛,其最终目的都是为了提高筛分效率^[5]. 各因素对筛分效率的综合影响呈现出不确定的非线性关系. 本文采用经过遗传算法(GA)优化的 BP 神经网络,对平摆复合振动筛的筛分模型进行非参数建模及参数优化.

1 平摆复合振动筛

1.1 DEM 在振动筛上的研究

2003 年, Li 等^[6]利用离散单元法研究颗粒在筛面上的运动形式. 2009 年, 林钰珍^[7]利用离散单元法(DEM)软件对三自由度振动筛物料的分散过程进行数值模拟分析. 2015 年, 仇云飞^[8]对平摆复合振动筛的数值模拟进行研究, 并对颗粒的松散行为做了一个深入的分析. 综上所述: 基于离散单元法的 DEM 软件可以被用于振动筛的研究, 这在很大程度上解决了筛分过程中难以获取有效数据的问题; 同时, 防止由于人为因素对实验结果造成的误差, 从而影响优化模型的建立.

影响振动筛筛分效率的因素有以下 3 种: 1) 物料特性, 包括物料的松散度、粒度特性、颗粒形状、水的质量分数、相对分离粒径等; 2) 振动参数, 包括振动频率、振幅、振动方向角; 3) 结构参数, 包括筛面长度、筛面宽度、开孔率、筛孔尺寸、筛面倾角. 文中选择平摆复合振动筛的振动参数作为优化对象^[8-9].

1.2 平摆复合振动筛的原理及实验设置

平摆复合振动筛的振动形式是平动与摆动的复合^[10]. 这种振动系统是由 2 个激振源响应叠加而成, 对其运动进行分解, 有

$$A_x = A \sin \theta \cdot \sin(\omega t - a_x), \quad A_y = A \sin \theta \cdot \sin(\omega t - a_y).$$

(1)

式(1)中: A_x , A_y 分别为垂直筛面方向和沿着筛面方向的位移; a_x , a_y 分别为垂直筛面方向和沿着筛面方向激振力与位移的相位角差; ω 为角速度; A 为振幅; θ 为振动方向角. 摆动可分解为 $\varphi = A_\varphi \sin \Psi t$. 其中: φ 为摆动角位移; A_φ 为摆动角位移幅值; Ψ 角频率^[10]. 由此可知, 实现平摆复合振动筛需完成平动和摆动的复合运动. 实际装机时, 分别利用双轴惯性激振器和摆动激振器实现平动和摆动, 并配合使用完成振幅、振频、振动方向角、摆幅和摆频的相关设置.

将简化后的振动筛三维模型导入到 DEM 软件中, 如图 1 所示. 筛面倾角为 21° ; 开孔率为 0.44% ; 筛网长为 180 mm ; 筛网宽为 30 mm . 其他仿真实验初始条件的设置, 如表 1 所示. 表 1 中: ν 为泊松比; G 为剪切模量; ρ 为密度; e 为碰撞恢复系数; μ_s 为静摩擦系数; μ_k 为滚动摩擦系数.

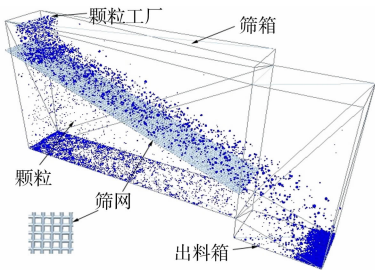


图 1 简化的振动筛模型

Fig. 1 Simplified model of vibrating screen

表 1 部分仿真实验参数设置

Tab. 1 Parameters setting of part simulation experiment

材料属性	ν	G/GPa	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
颗粒	0.30	0.023	2 678
筛网	0.29	79.920	7 861

材料属性	e	μ_s	μ_k
颗粒-颗粒	0.1	0.545	0.01
颗粒-筛网	0.2	0.500	0.01

2 数据的获取

2.1 筛分效率的定义

筛分效率是筛分结果优劣的评价标准, 可表示为

$$\eta_d = \left(\frac{m_{<d}^u}{m_{<d}} - \frac{m_{>d}^u}{m_{>d}} \right) \times 100\%.$$

(2)

式(2)中: $m_{<d}^u$, $m_{>d}^u$ 分别为筛下物中小于和大于颗粒粒径 d 的所有颗粒的质量; $m_{<d}$, $m_{>d}$ 分别为小于和大于颗粒粒径 d 的所有颗粒的质量; η_d 即颗粒粒度为 d 的筛分效率^[11-12].

筛分效率为客观量, 其值在 $0\% \sim 100\%$ 之间; 而优化结果为虚拟值, 其值可能低于 0% 或者超过

100%,但这对于筛分效率来说是不可能的. 因此,这可以作为后续优化过程中输出的限制条件.

2.2 参数设置与实验结果

BP 神经网络采用最小均方误差学习方式. 建立从输入到输出的任意非线性映射关系,只需要样本数据. 训练样本太少将很难掌握一般的映射规律,而训练样本太多则会出现过适配的现象^[13-14]. 因此,为了避免训练样本太少,在完成单一变量的基础上,添加了正交实验,综合考虑各因素(振幅、振频、振动方向角、摆幅和摆频)之间的交互作用,每个因素均设置 4 水平,选用正交表 $L_{16}(4^5)$. 最后,共有 52 组实验数据. 经过 DEM 仿真后的数据,如表 2 所示.

表 2 平摆复合振动筛振动参数与筛分效率的数据
Tab. 2 Data of vibration parameters and screening efficiency of vibrating-swinging screen

组号	振幅/ mm	振频/ Hz	方向角/ (°)	摆幅/ mm	摆频/ Hz	筛分效率	组号	振幅/ mm	振频/ Hz	方向角/ (°)	摆幅/ mm	摆频/ Hz	筛分效率
1	2.1	22	45	15	0.50	0.730 0	27	2.1	26	45	15	1.44	0.711 1
2	2.1	22	45	15	0.80	0.736 6	28	2.1	40	45	15	1.44	0.617 2
3	2.1	22	45	15	1.10	0.732 5	29	2.1	50	45	15	1.44	0.586 9
4	2.1	22	45	15	1.44	0.725 1	30	2.1	60	45	15	1.44	0.526 2
5	2.1	22	45	15	1.80	0.715 9	31	2.1	22	31	15	1.10	0.727 0
6	2.1	22	45	15	2.80	0.706 8	32	2.1	22	36	15	1.10	0.735 3
7	2.1	22	45	15	3.60	0.692 5	33	2.1	22	56	15	1.10	0.713 0
8	2.1	22	45	5	1.44	0.706 1	34	2.1	22	68	15	1.10	0.711 9
9	2.1	22	45	25	1.44	0.710 0	35	2.1	22	81	15	1.10	0.712 9
10	2.1	22	45	30	1.44	0.713 1	36	2.1	22	90	15	1.10	0.716 0
11	2.1	22	45	35	1.44	0.696 4	37	1.5	18	31	15	0.80	0.612 5
12	2.1	22	45	40	1.44	0.684 9	38	1.7	23	36	20	0.80	0.717 3
13	2.1	22	45	50	1.44	0.665 4	39	1.9	28	45	25	0.80	0.717 4
14	2.1	22	45	60	1.44	0.640 0	40	2.1	33	51	30	0.80	0.676 6
15	2.1	22	45	70	1.44	0.627 1	41	1.5	23	31	30	1.30	0.708 5
16	1.0	22	45	15	1.44	0.632 6	42	1.7	18	36	20	1.30	0.693 2
17	1.5	22	45	15	1.44	0.700 6	43	1.9	33	45	25	1.30	0.723 4
18	1.8	22	45	15	1.44	0.724 3	44	2.1	28	51	30	1.30	0.743 7
19	2.1	22	45	15	1.44	0.717 5	45	2.1	28	45	15	1.80	0.700 2
20	2.5	22	45	15	1.44	0.721 1	46	1.9	33	51	20	1.80	0.683 9
21	2.8	22	45	15	1.44	0.686 0	47	1.7	18	31	25	1.80	0.709 3
22	3.8	22	45	15	1.44	0.637 6	48	1.5	23	36	30	1.80	0.722 4
23	5.6	22	45	15	1.44	0.526 2	49	1.7	33	51	15	2.30	0.683 0
24	2.1	12	45	15	1.44	0.581 0	50	1.5	28	45	20	2.30	0.672 0
25	2.1	18	45	15	1.44	0.692 9	51	2.1	23	36	25	2.30	0.698 3
26	2.1	20	45	15	1.44	0.727 0	52	1.9	18	31	30	2.30	0.696 3

3 GA-BP 的优化求解过程

3.1 遗传算法的优化过程

基于 GA-BP 算法的结构优化设计方法包含 2 个步骤:1) 通过学习样本,建立 BP 神经网络近似模型,实现设计变量到结构响应的非线性映射;2) 通过非线性映射关系,建立基于 BP 神经网络的数学模型,并通过遗传算法实现全局优化^[15]. 利用遗传算法优化 BP 神经网络,实际是优化 BP 神经网络的初始权值和阈值,按照遗传策略,运用选择、交叉和变异算子作用于群体,获取最优的权值和阈值,进而得到 GA-BP 的预测模型. 该方案的具体实现过程,如图 2 所示.

3.2 神经网络结构类型的确定

BP 神经网络是一种典型的误差反向传播神经网络,它由 1 个或者多个输入层、1 个或者多个隐含层和 1 个或者多个输出层构成. 在闭区间内,仅含有 1 个隐含层的 BP 神经网络可以任意精度逼近任意

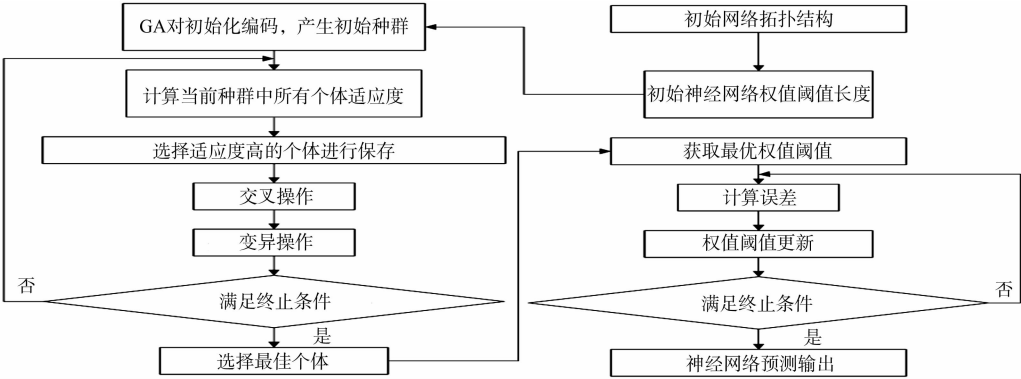


图 2 GA-BP 流程图

Fig. 2 Flow chart of GA-BP

的非线性系统^[16]. 故选用 1 个输入层、1 个隐含层和 1 个输出层的 3 层 BP 神经网络. BP 神经网络示意图, 如图 3 所示.

依据经验公式, 隐含层的节点数为 $m = \sqrt{j+l} + a$. 其中: m 为隐含层节点数; j 为输入层节点数; l 为输出层节点数; a 为常数, 值为 1~10. 经计算, 隐含层的节点数为 4~13. 隐含层的节点数决定神经网络的性能, 因此, 依次对不同节点的神经网络类型进行训练. 不同隐含层节点的训练误差, 如表 3 所示. 表 3 中: MSE 为均方误差.

由表 3 可知: 通过训练, 当隐含层节点为 9 时, MSE 为 0.000 3, 训练精度最好. 因此, 选择隐含层的节点数为 9, 从而最终确定 BP 神经网络结构为 5-9-1. 遗传算法的其他参数初始化设置如下: 进化代数 10; 种群规模为 50; 交叉概率为 0.8; 变异概率为 0.1.

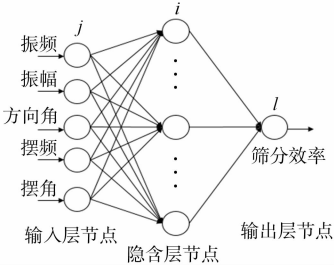


图 3 BP 神经网络示意图
Fig. 3 Schematic diagram of BP neural network

表 3 不同隐含层节点的训练误差
Table. 3 Training errors with different hidden layer nodes

节点数	网络结构	MSE	节点数	网络结构	MSE	节点数	网络结构	MSE
4	5-4-1	0.000 6	8	5-8-1	0.273 0	11	5-11-1	0.078 9
5	5-5-1	0.019 8	9	5-9-1	0.000 3	12	5-12-1	0.002 8
6	5-6-1	0.110 1	10	5-10-1	0.017 1	13	5-13-1	0.040 8
7	5-7-1	0.046 2						

4 预测结果分析与验证

4.1 预测结果分析

GA-BP 预测数据与原始数据的对比, 如图 4 所示. 图 4 中: η 为筛分效率; n 为样本组数. 由图 4 可知: 原始数据与预测数据整体趋势十分吻合, 说明基于 GA 优化的 BP 神经网络可以较好地实现对平摆复合振动筛振动参数的全局寻优. 最终得到的最优条件: 振幅为 2 mm; 振动频率为 26 Hz; 振动方向角为 46°; 摆动频率为 21 Hz; 摆角为 1°; 优化后的最优筛分效率为 0.754 7.

4.2 预测结果验证

利用 DEM 进行仿真实验验证, 得到筛分效率为 0.746 6, 预测结果为 0.754 7, 二者相差 0.008 1, 证明 GA-BP 神经网络可以用来优化振动筛的参数组合. 利用 GA 优化的 BP 神经网络对振动参数优化后的结果(筛分效率)没有大幅度的提高, 这是由于对平摆复合振动筛的各振动参数已经进行了优化. 在此基础上, 将筛分效率再次提高, 这对我国现阶段筛分效率普遍偏低现状依然有一定的指导意义.

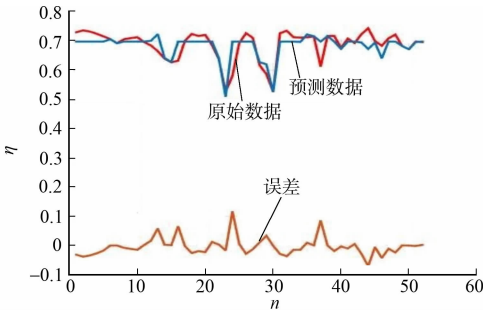


图 4 预测数据与原始数据对比图
Fig. 4 Comparison chart between predicted data and origin data

5 结束语

利用 GA 优化的 BP 神经网络可以实现对平摆复合筛振动参数的全局寻优, 最终的寻优结果如下: 振幅为 2 mm; 振动频率为 26 Hz; 振动方向角为 46°; 摆动频率为 21 Hz; 摆角为 1°; 优化后的最优筛分效率为 0.754 7. 与仿真实验结果对比表明, 此预测结果是可靠的. 采用 GA-BP 算法可以节省大量的实验时间与资源, 为探索新型的振动筛形式和完善筛分理论提供更大的可能性.

参考文献:

[1] 郭年琴, 匡永江. 振动筛国内外研究现状及发展[J]. 世界有色金属, 2009(5): 26-27.

[2] 赵跃民, 刘初升, 张成勇. 煤炭干法筛分理论与设备的进展[J]. 煤, 2008, 17(2): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2798.2008.02.003.

[3] 王桂锋. 振动筛筛分研究及优化设计[D]. 厦门: 华侨大学, 2011.

[4] 肖建章, 童昕. 基于 DEM 的进料速率对颗粒筛分影响的研究[J]. 煤炭工程, 2012, 1(10): 85-88.

[5] CLEARY P W, SAWLEY M L. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge[J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(2): 89-111. DOI: 10.1016/S0307-904X(01)00050-6.

[6] LI Jing, WEBB C, PANDIELLA S S, *et al.* Discrete particle motion on sieves: A numerical study using the DEM simulation[J]. Powder Technology, 2003, 133(1): 190-202. DOI: 10.1016/S0032-5910(03)00092-5.

[7] 林钰珍. 基于并联机构的高效多维振动筛设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

[8] 仇云飞. 摆动与平动复合的新型振动筛数值模拟及松散机理的研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2015.

[9] 张卡德, 黄致建, 郝艳华. 振动筛机架结构的优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 363-366. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2010.04.0363.

[10] 周碧, 童昕, 李占福, 等. 新型振动筛松散机理[J]. 机械设计与研究, 2016(3): 149-153. DOI: 10.13952/j.cnki.jofm-dr.2016.0121.

[11] LI Zhanfu, TONG Xin, ZHOU Bi, *et al.* Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens [J]. Minerals Engineering, 2015, 83: 149-155. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.07.009.

[12] 沈国浪, 李占福, 童昕, 等. 基于 DEM 的振动筛振动参数对分层质量的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 217-222. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.05.036.

[13] 姚立娟, 曾杨, 郑庆华, 等. 汽车起重机力矩限制器算法模型的实现[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(1): 106-108. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2011.01.025.

[14] 李烁, 徐元铭, 张俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 134-140. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3851.2005.05.022.

[15] 代向歌, 彭高明. BP-GA 算法对斗轮堆取料机回转平台的结构优化[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(1): 105-108. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2343.2012.01.029.

[16] TAN Gangping, WANG Dengfeng, LI Qian. Vehicle interior sound quality prediction based on back propagation neural network[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(B): 471-477. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.075.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)