

doi: 10.7690/bgzdh.2020.03.018

某双锥形药型罩性能参数灰关联分析

邵彬, 张国伟, 韩文斌, 曹鹏

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为提升射流侵彻能力及改善射流性能, 对双锥形药型罩性能参数进行灰关联分析。利用 AUTODYN 有限元分析软件模拟射流成型过程, 使用多种无量纲化方法对数据进行处理, 运用灰关联理论分析药型罩 5 种结构参数对射流头部速度和射流长度的影响。分析结果表明: 药型罩材料密度、小锥角罩锥角和上罩高占比是影响射流的主要因素, 聚能装药的研究需要选择合适的无量纲化处理方法, 才能得到最优的关联度排序。

关键词: 双锥罩; 射流; 数值模拟; 灰关联分析; 无量纲化

中图分类号: TJ410.3 **文献标志码:** A

Grey Correlation Analysis on Performance Parameters of Biconical Liner

Shao Bin, Zhang Guowei, Han Wenbin, Cao Peng

(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the jet penetration capability and jet performance, the grey correlation analysis on performance parameters of biconical liner is carried out. This paper simulates the jet formation process by using the AUTODYN finite element analysis software, and deals with the data by various dimensionless methods. At the same time, the influence of 5 structural parameters of liner on the jet head speed and jet length is analyzed by using the grey correlation theory. The analysis results show that the main factors affecting the jet are the material density of the liner, the cone angle of the small cone angle liner, and the high ratio of the upper liner. In the study of shaped charge, it is necessary to select the appropriate dimensionless processing method to obtain the optimal correlation sorting.

Keywords: biconical liner; jet; numerical simulation; grey correlation analysis; dimensionless

0 引言

与传统单锥罩相比, 双锥药型罩的母线长度和有效装药量都得到了增加, 能较好发挥一大一小 2 种锥角所形成金属射流的侵彻效果, 大幅提升侵彻深度。针对双锥罩的射流性能以及侵彻能力, 国内外开展了广泛的研究: Walters 等^[1]提出双锥罩所形成射流的速度在空间呈双线性分布, 并依此建立了射流侵彻计算模型; 赵海平等^[2]设计出一种锥-锥结合药型罩, 分析了组合药型罩形成射流的规律; 李磊等^[3]利用正交设计方法研究了不同结构参数的双锥药型罩射流成形性能, 并通过实验手段进行验证。

作为形成金属射流的母体, 药型罩的结构参数(如药型罩的锥角、壁厚, 材料的密度、塑性等)将直接影响射流的形态及相关参数, 进而关系到射流的侵彻效果^[4]。为了达到提升射流侵彻能力或者改善射流性能的目的, 需要对药型罩结构参数进行相应的设计与分析。在分析方法上, 灰关联系数理论由于具有针对小样本不确定数据分析上的独特优势, 被时常运用于对聚能装药的分析研究中^[5-6]。

为了给双锥罩类型药型罩的结构设计提供相关参考, 笔者基于灰关联理论, 对相关原始数据进行多种无量纲化处理, 以排除掉无量纲化采用方法不同对确定各结构参数关联序产生的影响。

1 数值仿真与结构方案设计

1.1 仿真模型的建立

如图 1 所示, 双锥罩装药直径为 60 mm, 装药长径比为 1.2:1, 壳体厚度为 1.5 mm。

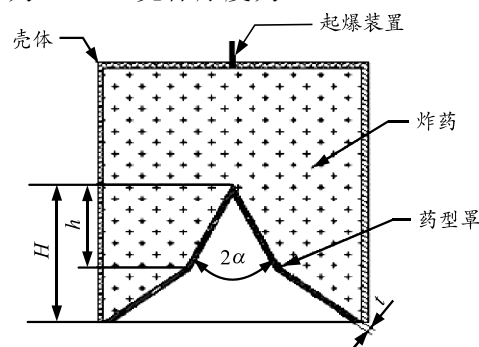


图 1 装药结构

聚能射流的成型数值仿真包括炸药的爆轰、药

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2019-12-16

作者简介: 邵彬(1993—), 男, 江西人, 硕士, 从事弹药毁伤评估研究。E-mail: 1518504031@qq.com。

型罩的压垮、射流的形成和拉伸。笔者利用流体力学计算软件 autodyn 对双锥罩射流的成型过程进行仿真计算。除了壳体为拉格朗日网格外，其余部分皆以欧拉网格进行计算，用以描述聚能射流成型的高应变、高应变率过程。空气域边界类型定义为 Flow-Out，使所有物质可以流出，来模拟无限空间，确保仿真的真实性^[7]。单元使用多物质 ALE 算法，同时为减小计算量，整个仿真过程采用 2 维轴对称模型。

1.2 材料模型及相关参数

如表 1 所示，炸药材料为 Octol，采用 JWL 状态方程来描述炸药爆轰产物的膨胀过程。4 种药型罩材料统一选取 Shock 状态方程和 Steinberg-Guinan 模型(参数见表 2)，以描述其在炸药爆轰波作用下的动态响应。壳体材料为 Al-2024-T4，选用 shock 状态方程和 Johnson-cook 本构模型。

表 1 Octol 炸药材料参数^[8]

密度/(g · cm ⁻³)	爆速/(m/s)	爆压/GPa
1.82	8 480	34.2

表 4 L₁₆(4⁵)正交表

方案	t/mm	2α/(°)	h/H	H/mm	ρ/(g · cm ⁻³)	v/(m · s ⁻¹)	l/mm
1	1.3	50	0.6	39	8.930	6 297	145.180
2	1.4	60	0.4	39	16.690	4 202	97.620
3	1.5	60	0.6	42	2.785	7 791	168.720
4	1.6	50	0.4	42	19.299	3 999	92.620
5	1.3	55	0.4	45	2.785	7 939	178.220
6	1.4	45	0.6	45	19.299	5 022	117.650
7	1.5	45	0.4	36	8.930	5 347	124.660
8	1.6	55	0.6	36	16.690	4 487	103.130
9	1.3	45	0.7	42	16.690	5 506	128.660
10	1.4	55	0.5	42	8.930	6 024	138.680
11	1.5	55	0.7	39	19.299	4 661	101.120
12	1.6	45	0.5	39	2.785	7 706	173.710
13	1.3	60	0.5	36	19.299	4 377	94.620
14	1.4	50	0.7	36	2.785	8 108	179.220
15	1.5	50	0.5	45	16.690	4 648	112.640
16	1.6	60	0.7	45	8.930	6 023	135.670

只有当药型罩压垮速度 v_0 大于某一值时，小锥角罩锥底才能与大锥角罩进行有效复合而不在稀疏波作用下飞散^[9]。为验证各方案药型罩结构的合理性，需要确定各方案药型罩的压垮速度。压垮速度可以通过 Gurney 速度公式或者有效装药绝热压缩方法确定，工程上常采用后者来计算。有效装药绝热压缩法假设炸药是瞬时完全爆轰，且稀疏波沿装药表面的内法线向爆炸产物内部传播。爆炸产物以稀疏波初始交界面进行定向膨胀，药型罩进行压合运动时，有效装药部分向内绝热膨胀做功。有效装药可以用装药剖面图的各个角平分线确定，局部剖面如图 2 所示。

表 2 药型罩材料模型部分参数

参数	钨	钽	铜	铝
G_0 /GPa	160	69	47.7	28.6
Y_0 /GPa	2.2	0.77	0.12	0.26
β	7.7	10	36	310

1.3 正交实验方案设计及结构合理性验算

为研究双锥药型罩的结构参数对成型射流的影响，选取药型罩的 5 个结构参数作为研究对象，分别为药型罩壁厚 t 、罩高 H 、上罩高占比 h/H 、小锥角罩锥角 2α 以及药型罩的材料密度 ρ 。各因素水平设计值见表 3。

表 3 各因素水平设计值

水平	t/mm	2α/(°)	h/H	H/mm	ρ/(g · cm ⁻³)
1	1.3	45	0.4	36	19.29
2	1.4	50	0.5	39	16.60
3	1.5	55	0.6	42	8.96
4	1.6	60	0.7	45	2.70

5 因素 4 水平的实验方案按常规试验方法需要进行 4⁵ 次实验。如此多的实验次数从客观条件上难以实现，且庞大的数据量也难以确定各因素对射流成型的影响。为减小实验次数，笔者利用正交设计法设计了 16 组仿真方案如表 4 所示。

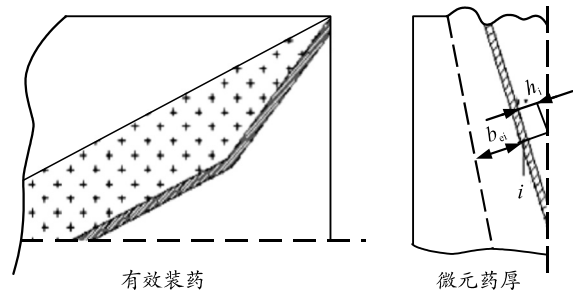


图 2 有效装药局部剖面

以图 2 中罩微元为对象，压垮速度：

$$v_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho_e b_{ei}}{\rho b_i} \left[1 - \left(\frac{b_{ei}}{b_{ei} + h_i} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式中： D 为爆轰波速度； ρ_e 装药密度， ρ 为罩密度； b_{ei} 为 i 微元的有效装药厚度， b_i 为 i 微元的罩厚度； h_i 为罩微元压合到轴线的运动距离。

由文献[9]可知， b_{ei} 和 h_i 的算法如下：

$$b_{ei} = \frac{(R-r)\tan(\alpha/2)}{\sin\alpha}; \tag{2}$$

$$h_i = \frac{r}{\cos\alpha}。 \tag{3}$$

式中： R 为大锥角药型罩的底面半径； r 为小锥角罩的底面半径。

根据文献[9]，压垮速度需要满足 $v_0 > 1.3$ km/s。现对表 4 中各方案计算得到的结果如下(按方案序

列号依次排序)：3.34,2.42,5.43,2.05,6.11,2.20,2.97,2.24,2.43,3.28,2.06,5.4,2.34,5.79,2.31,2.64 km/s。各个方案的压垮速度均大于 1.3 km/s，所设计的各方案结构是合理的。

2 仿真结果

在炸药起爆后，产生的爆轰波会迅速传递，在极短时间内便与药型罩顶端接触，而在爆轰波的强爆轰压力作用下，药型罩逐渐向轴线方向闭合，内罩微元形成高速射流，外罩微元则形成速度较低的杵体。射流成型过程(以方案 1 为例)的速度云图如图 3 所示。

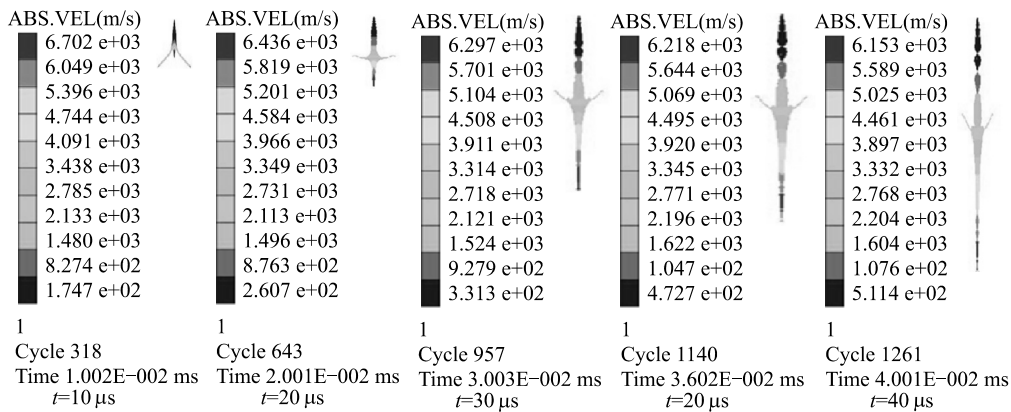


图 3 双锥罩射流成型过程

药型罩形成的聚能射流速度梯度较大，这就使得在大炸高下射流会越拉越长，但射流的伸长有限，最终会断裂为射流粒子。观察图 3 可以发现：经过 40 μs 后，射流开始发生断裂现象。图 4 分别为 4 种材料的药型罩(取自 16 种方案中的第 2、7、11、14 方案)所形成射流开始发生断裂时的形态。射流一旦断裂，射流粒子会偏离、飞散和翻转，其侵彻能力就会迅速下降^[10]。

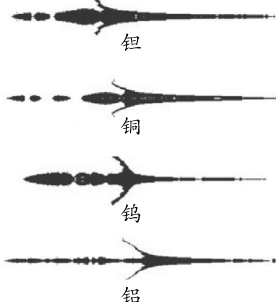


图 4 射流断裂形态

图 5 为各方案中射流开始出现断裂的时间。从图中可知：药型罩结构参数不同，其形成的射流断裂时间也不尽相同。由于射流断裂时侵彻能力会降低，因此，笔者主要研究各方案中药型罩的连续射

流状态。从对目标的侵彻深度上看，聚能射流的性能主要考虑射流头部速度和射流长度 2 方面的因素，由图 5 得到在炸药起爆 30 μs 后，各方案的射流仍处于连续状态，故以此时射流的头部速度 v 和长度 l 为射流性能的评定指标。通过对 16 种方案的数值仿真得到的结果见表 4。

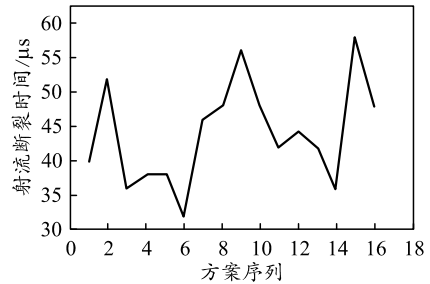


图 5 各方案射流断裂时间

3 灰关联分析

3.1 数据的无量纲化

直接利用原始数据进行分析会造成计算结果失真等不良后果，故需要对得到的数据进行无量纲化处理，以保证数据具有统一的量纲和可以比较的数量级。设 $x_i(k)=(x_i(1),x_i(2),\dots,x_i(n))$ 为系统因素序

列, $y_i(k)=(y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n))$ 为无量纲化序列。常用的无量纲化处理如表 5 所示。

表 5 无量纲化处理公式

方法	处理公式
初值化	$y_i(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}$
均值化	$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k)$
区间值化	$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(1) - \min x_i(k)}$
百分比化	$y_i(k) = x_i(k) / \max x_i(k)$
倍数化	$y_i(k) = x_i(k) / \min x_i(k)$
标准化	$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \bar{x}_i}{\sigma}$, σ 为序列均方差

从表中可以看出：对数据的无量纲化处理有多种方法，现今大多数对聚能装药的灰关联分析研究中，只是利用其中的一种，如文献[5-6]等。灰关联分析中，因素间的关联程度主要是用关联度的大小顺序来描述的。使用不同无量纲化后的数据关联度顺序是否保持不变，会直接影响对实际因素做出的判断^[11]。因此，笔者使用上述 6 种无量纲化的方法对数据进行处理，综合得到的计算结果，更准确地

分析双锥罩的各结构参数对射流的影响。

3.2 数据的灰关联分析

灰关联分析是将研究对象及影响因素的因子值视为一条线上的点，与待识别对象及影响因素的因子值所绘制的曲线进行比较，通过比较各关联度的大小来综合地体现各影响因素对识别对象影响的差异，所以被分析因素之间的差异越明显越好。在分别应用前述 6 种无量纲化方法得到的关联度 $r_{i,j}$ (其中 $i=1,2,\dots,5$ ，分别表示表 4 中 t 、 2α 、 h/H 、 H 和 ρ 5 个因素； $j=v,l$ ， v 表示与射流速度有关， l 表示与射流长度有关) 必须满足以下 2 个判断原则^[12]：

1) 极差值 $\Delta_j = \max\{r_{i,j}\} - \min\{r_{i,j}\}$ ，尽可能大；

2) 均方差 $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^5 (r_{i,j} - \bar{r}_{i,j})^2}$ ，尽可能大，式

$$\text{中 } \bar{r}_{i,j} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 r_{i,j} \text{。}$$

运用邓氏关联法，结合经过不同无量纲化处理后的数据，得到的结果见表 6 (同一方法栏中，上行表示对各因素影响射流头部速度 v 的分析结果，下行表示对各因素影响射流长度 l 的分析结果)。

表 6 灰关联分析结果

方法	关联度	关联序	极差值	均方差
初值化	$r_1=0.289, r_2=0.302, r_3=0.348, r_4=0.23, r_5=0.28,$	$r_3 > r_2 > r_1 > r_5 > r_4$	0.117	0.042
	$r_1=0.306, r_2=0.324, r_3=0.352, r_4=0.244, r_5=0.278,$	$r_3 > r_2 > r_1 > r_5 > r_4$	0.108	0.041
均值化	$r_1=0.498, r_2=0.289, r_3=0.358, r_4=0.334, r_5=0.434,$	$r_1 > r_5 > r_3 > r_4 > r_2$	0.209	0.084
	$r_1=0.536, r_2=0.321, r_3=0.441, r_4=0.387, r_5=0.471,$	$r_1 > r_5 > r_3 > r_4 > r_2$	0.215	0.082
区间值化	$r_1=0.461, r_{2,j}=0.430, r_{3,j}=0.658, r_{4,j}=0.520, r_5=0.378,$	$r_3 > r_4 > r_1 > r_2 > r_5$	0.279	0.107
	$r_1=0.350, r_2=0.46, r_3=0.366, r_4=0.349, r_5=0.221,$	$r_2 > r_3 > r_1 > r_4 > r_5$	0.239	0.085
百分比化	$r_1=0.37, r_2=0.449, r_3=0.291, r_4=0.34, r_5=0.588,$	$r_5 > r_2 > r_1 > r_4 > r_3$	0.297	0.116
	$r_1=0.4, r_2=0.414, r_3=0.338, r_4=0.300, r_5=0.513,$	$r_5 > r_2 > r_1 > r_3 > r_4$	0.213	0.081
倍数化	$r_1=0.395, r_2=0.445, r_3=0.34, r_4=0.386, r_5=0.537,$	$r_5 > r_2 > r_1 > r_4 > r_3$	0.197	0.075
	$r_1=0.417, r_2=0.561, r_3=0.346, r_4=0.443, r_5=0.511,$	$r_2 > r_5 > r_4 > r_1 > r_3$	0.215	0.084
标准化	$r_1=0.342, r_2=0.356, r_3=0.4, r_4=0.512, r_5=0.307,$	$r_4 > r_3 > r_2 > r_1 > r_5$	0.205	0.079
	$r_1=0.316, r_2=0.332, r_3=0.393, r_4=0.437, r_5=0.352,$	$r_4 > r_3 > r_5 > r_2 > r_1$	0.121	0.049

从表中可以看出，经过不同无量纲化处理后得到的关联序不同。且在满足 2 个判断原则的基础上有：对相关数据进行百分比化处理可以得到各因素对射流头部速度的最佳关联序，为 $r_5 > r_2 > r_1 > r_4 > r_3$ ，即相比其他 4 个因素，药型罩材料密度为最主要的影响因素，上罩高占比为次要因素；而对相关数据进行区间值化处理，可以得到对射流长度的最佳关联序为 $r_2 > r_3 > r_1 > r_4 > r_5$ ，表明小锥角罩锥角为最主要的影响因素，药型罩材料密度为次要因素。

4 结论

通过对双锥形药型罩射流成型的数值模拟和灰

关联分析，得到以下结论：

1) 各结构参数对双锥形药型罩射流头部速度影响程度大小依次为罩的材料密度、小锥角罩锥角、药型罩壁厚、罩高、小锥角罩占比；对双锥形药型罩射流长度的影响程度大小依次为小锥角罩锥角、上罩高占比、药型罩壁厚、罩高、罩的材料密度。

2) 聚能装药的研究在实际运用灰关联理论时，相关数据需要经过不同的无量纲化方法处理，在满足 2 个判断原则上，通过对比计算的关联度差异程度选择出合适的无量纲化方法，才可以得到最佳的关联度排序。

参考文献:

[1] WALTERS W P, FLIS W J, CHOU P C. A survey of shaped-charge jet penetration models[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 7(3): 307-325.

[2] 赵海平, 刘天生, 石军磊, 等. 双锥结合罩射流特性影响因素的模拟研究[J]. 火工品, 2018(2): 35-39.

[3] 李磊, 马宏昊, 沈兆武. 基于正交设计方法的双锥结构优化设计[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 567-573.

[4] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 187-188.

[5] 张程健, 赵捍东, 刘胜, 等. 超聚能射流影响因素的灰关联分析 [J/OL]. 兵器装备工程学报, 1-4[2019-10-20].http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.TJ.20190531.1607.083.html.

[6] 黄建军, 张国伟, 李金铭, 等. 药型罩参数对单兵制导

破甲弹影响的灰关联分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(2): 18-19.

[7] 张小静, 吴国东, 王志军, 等. 锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 39-42.

[8] 刘亚昆, 吴国东, 伊建亚. 亚半球罩形成杆式射流正交设计的数值分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 62-65.

[9] 李磊, 沈兆武, 马宏昊. 大孔径双向聚能射孔弹的研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(6): 539-548.

[10] 闫超, 黄正祥, 祖旭东, 等. 聚能装药超细晶纯铜药型罩性能研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 72-76.

[11] 周秀文. 灰色关联度的研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

[12] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

(上接第 65 页)

6 结论

笔者基于大功率交流伺服系统, 将混沌搜索和自适应变异思想引入到粒子群算法中, 提出一种混沌搜索的自适应变异粒子群优化算法(AMPSO), 以提高全局收敛的概率和速度, 最终建立了混沌搜索的 AMPSO-WNN 预测模型。仿真结果表明: 与传统的粒子群小波神经网络相比, 改进方法在加快模型的收敛速度同时, 避免了陷入局部最优解的缺点, 提高了逼近精度。

参考文献:

[1] 王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[2] 鲁文其. 永磁同步电机工程伺服系统若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[3] 林杉. 伺服系统永磁同步电机参数辨识研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.

[4] 黄邵刚, 洪剑峰, 赵鲁. 一种基于变频器驱动的异步电机参数辨识方法[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 50-53.

[5] 张瑞峰, 森林, 刘婷, 等. 基于模型参考自适应的永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. 机车电传动, 2015(2): 71-76

[6] 王皓, 欧阳海滨, 高立群. 一种改进的全局粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1161-1168.

[7] 林国汉, 章兢, 刘朝华, 等. 改进综合学习粒子群算法的 PMSM 参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1):

51-57.

[8] LI Z, ZHAO J Q, ZHANG X N, et al. Study of a New Improved PSO-BP Neural Network Algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 20(5): 106-112.

[9] VASU K, GANESH V. Performance Analysis of Brush Less DC Motor Drive Using Fractional Order Controller with PSO Algorithm[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2019, 12(2): 152-161.

[10] 吴梦华. 基于粒子群算法的轴向磁场定子无铁芯永磁电机优化设计[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2014: 6.

[11] KRINK T, VESTERSTROM J S, RIGET J. Particle swarm optimisation with spatial particle extension[J]. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002(2): 1474-1479.

[12] 易文周, 田立伟. 一种基于混沌搜索和鲶鱼效应策略的粒子群算法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(5): 311-315.

[13] 罗新, 牛海清, 来立永, 等. 粒子群优化自适应小波神经网络在带电局放信号识别中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 326-333.

[14] 陈卫东, 刘要龙, 朱奇光, 等. 基于改进雁群 PSO 算法的模糊自适应扩展卡尔曼滤波的 SLAM 算法[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 105-111.

[15] XIA C. Effectiveness Evaluation for UAV Air-to-Ground Attack Based on PSO-BP Neural Network[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会. 第 36 届中国控制会议论文集. 中国自动化学会控制理论专业委员会: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2017: 6.