

doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.008

## 基于杀伤面积的杀爆战斗部总体参数优化

肖师云, 冯成良, 刘俞平, 张亮

(重庆红宇精密工业有限责任公司研究一所, 重庆 402760)

**摘要:** 为了寻求合理匹配的战斗部各项总体参数, 基于杀伤面积对杀爆战斗部的总体参数进行优化。建立相关数学模型, 以动态杀伤面积作为优化战斗部其他参数的目标函数, 确定目标函数、设计变量和约束条件, 采用网格法计算满足约束条件的目标函数值, 应用 Matlab 编制优化计算程序, 获得各个设计变量对杀伤面积的影响规律。计算结果表明: 优化的总体参数组合可有效提高杀爆战斗部的杀伤面积。该方法可为杀爆战斗部指标确立和方案设计提供参考。

**关键词:** 杀爆战斗部; 杀伤面积; 杀伤概率; 优化设计

**中图分类号:** TJ410.2 **文献标志码:** A

## Optimization of Parameters of Blast-fragmentation Warhead Based on Lethal Area

Xiao Shiyun, Feng Chengliang, Liu Yuping, Zhang Liang

(No. 1 Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** For finding suitable overall parameters of warhead, the warhead overall parameter optimization was carried out based on lethal area. Establish the related math model, taking the dynamic lethal area as the target function of optimized warhead parameters, and ascertain target function, design variable and constraint conditions, use grid method calculation to satisfy the target function value of constraint conditions, use Matlab to compile optimization calculation program, and acquire influence rule of design variable on lethal area. The calculation results show that the optimized overall parameters combination can effectively improve the lethal area of blast-fragmentation warhead. The method can be used for reference for establishing parameter and designing plan of blast-fragmentation warhead.

**Keywords:** blast-fragmentation warhead; lethal area; lethal probability; optimization design

### 0 引言

杀爆战斗部爆炸时释放出大量高速破片向外飞散, 对其周围的有生目标、技术装备等产生毁伤作用。评定战斗部对地面特定目标的杀伤威力以及对已知目标毁伤效果的预先评估, 都需要一个既符合实战条件又能评定战斗部杀伤效果的标准。目前国内外都倾向于采用杀伤面积作评定标准。它不仅能反映出与杀伤威力有关的各方面参数, 如破片质量与初速, 飞散方向与飞散角、爆高, 战斗部落速与落角等, 而且能衡量不同打击条件下的毁伤效果, 由此获得最佳打击条件, 能计算战斗部对不同类型目标的杀伤威力及其变化规律, 便于综合评定战斗部的用途, 并为提高作战效率和实战部署火力提供用弹依据。在给定的战斗部指标约束下, 以动态杀伤面积最优作为优化战斗部其他参数的目标函数, 通过优化计算获得与给定指标达成最佳匹配的战斗部主要特征参数组合, 并以此作为战斗部详细设计

和进一步优化的依据, 是保证战斗部实战毁伤效果的重要技术途径, 也是评价杀爆战斗部技术方案设计优劣的重要因素<sup>[1-3]</sup>。

### 1 优化建模

优化设计通过求解所建立的数学模型来获得最佳设计方案与设计参数。建立一个合理而又实用的数学模型是弹药优化设计的核心问题<sup>[4]</sup>。优化建模的主要内容是确定目标函数、设计变量和约束条件, 建立相关数学模型, 以便应用计算机编程进行优化计算。

#### 1.1 目标函数及其计算方法

杀伤面积标准是比较各种杀爆战斗部对给定目标综合杀伤威力的一种评定标准, 在国内外均得到大量应用; 因此, 选择杀伤面积  $S$  作为目标函数, 使  $S \rightarrow \max$ 。杀伤面积在国外也被称作平均效率面积 (mean area of effectiveness, MAE)。它并不是地面

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-02-23

基金项目: 国防基础科研(2016209A003)

作者简介: 肖师云(1969—), 男, 重庆人, 硕士, 研究员, 从事弹药工程研究。E-mail: joonkyy@126.com。

上一块真实的面积，而是杀伤概率的加权面积。其定义如下：地面上围绕点 $(x,y)$ 的某一微元面积 $dxdy$ 内，目标的杀伤概率为 $P_k(x,y)$ 。则在地面直角坐标系中，杀伤面积<sup>[5]</sup>为

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_k(x,y) dxdy \quad (1)$$

地面上围绕点 $(x,y)$ 的某一微元面积 $dxdy$ 内，目标的杀伤概率 $P_k$ 取决于单枚命中破片的杀伤概率 $P_{hk}$ 、杀伤破片的分布密度 $\gamma$ 和目标的暴露面积 $A_e$ ，其表达式<sup>[6]</sup>为

$$P_k = 1 - \exp(-P_{hk} \cdot \gamma \cdot A_e) \quad (2)$$

杀爆战斗部的破片在飞散区内以飞散中心方向角为对称轴呈正态分布，其分布概率密度函数<sup>[7]</sup>为

$$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Phi-\phi)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中： $\sigma$ 为飞散方向角的均方根差； $\Phi$ 为破片飞散方向角（与导弹航向的夹角）； $\phi$ 为破片飞散中心方向角。设 $\Omega$ 为破片飞散角，则有 $\sigma = \Omega / 3.3$ 。

如图 1 所示，已知破片的静态初速、静态飞散方向、导弹速度，则破片的动态飞散方向及动态初速可采用余弦定理求解。破片的动态飞散规律遵循式(3)，相应的参数应为动态参数。由式(3)和式(4)可计算静态及动态下距离为 $R$ 、飞散方向为 $\Phi$ 的位置点的破片密度 $\gamma$ 。

$$\gamma = N / (2\pi R^2) f(\Phi) / \sin \Phi; \quad (4)$$

$$\cos(\phi_2) = -0.5(v_{fs}^2 - v_m^2 - v_{fd}^2) / (v_m v_{fd}) \quad (5)$$

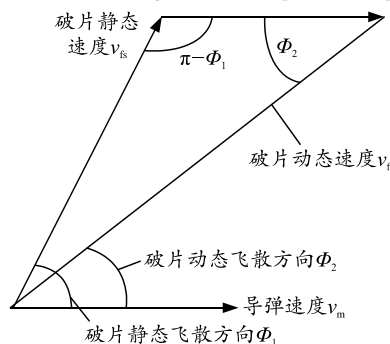


图 1 破片动态飞散方向及动态初速求解

建立如图 2 所示的坐标系，并将地面面积离散化，式(1)定义的杀伤面积可采用数值法计算，计算方法如下：

首先根据式(5)求得破片动态飞散角及动态飞散中心方向角，然后计算地面微元 $i$ 的中心是否位于动态飞散区内，如是则按式(3)计算微元 $i$ 处的破片密度、按式(2)该处杀伤概率，最后并将微元 $i$ 的

面积 $dxdy$ 与该处的杀伤概率的乘积进行累加，直至计算的微元不在动态飞散区内或其打击动能不满足要求为止，即可获得式(1)所示的杀伤面积 $S$ 。杀伤面积关于 $x$ 轴对称，计算 $1/2$ 模型后再乘以 $2$ 即可求得总杀伤面积。

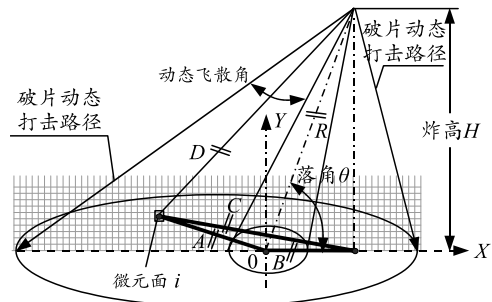


图 2 破片杀伤面积计算

### 1.2 设计变量的确定

杀爆战斗部的破片参数是影响破片杀伤威力的主要因素。战斗部质量和尺寸等通常由系统总体给出。破片参数是进行战斗部详细结构设计的依据，也是杀爆战斗部总体参数优化需要确定的主要参数。因此，优化设计的变量确定为破片静态飞散角 $\Omega$ 、破片静态飞散中心方向角 $\phi$ 、破片单枚质量 $m_f$ 、破片数量 $N$ 共 4 个特征参数，通过优化计算获得战斗部杀伤面积为最大时的最佳破片参数组合。

设计变量满足相应的指标约束条件，并确定合理的边界条件，以减少计算量、提高计算效率，避免出现工程上不合理或不可行的方案<sup>[7]</sup>。

### 1.3 约束条件

#### 1) 质量约束。

破片单枚质量 $m_f$ 、破片数量 $N$ 应满足战斗部总质量 $M$ 的约束。假设战斗部装药量为 $M_e$ ，结构件质量为 $M_s$ ，应满足以下约束条件：

$$M_e + m_f \cdot N + M_s = M \quad (6)$$

#### 2) 破片打击动能约束。

战斗部爆炸后，破片在规定距离处的打击动能应满足对目标的杀伤准则要求。对人员目标、杀伤准则的打击动能不小于 98 J。有：

$$\frac{1}{2} m_f v_R^2 \geq 98; \quad (7)$$

$$v_R = v_{fs} \cdot e^{-\frac{C_D \rho S R}{2m_f}}; \quad (8)$$

$$v_{fs} = \sqrt{2E} \left( \frac{M_f + M_s}{kM_e} + 0.5 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中： $v_R$ 为距离爆炸中心 $R$ 处的破片存速； $v_{fs}$ 为破

片静态初速； $C_D$ 为破片在空气中飞行的阻力系数； $\rho$ 为当地空气密度； $S$ 为破片迎风面积； $\sqrt{2E}$ 为炸药的格尼速度。

3) 破片飞散密度约束。

战斗部爆炸后，破片的飞散密度应满足规定要求。针对人员目标，通常要求在规定的距离  $R$  处，满足标准人形靶 (0.5 m×1.5 m) 上至少命中一枚破片，即破片飞散密度大于等于 1.33 枚/m<sup>2</sup>。根据破片飞散角、破片总数与破片飞散密度的关系，有

$$0.9N / (2\pi^2 R^2 \Omega / 180) \geq 1.33. \quad (10)$$

根据式(1)一式(10)，即可建立优化设计模型，通过合适的求解方法获得破片杀伤面积最大的设计变量，该变量组合即为破片最优参数组合。

## 2 优化计算方法

笔者建立的优化设计模型属于多维约束非线性规划模型，常用的求解方法有直接法和间接法 2 类。各设计变量的边界较易确定，故优化计算方法采用直接法中的网格法<sup>[8]</sup>。该方法是在设计变量的界限区间作网格，在网格点上逐一计算约束函数值与目标函数值，对满足约束条件的点，比较它们目标函数的大小，从中找出目标函数值为最大(或最小)的网格点，这个点就是所求的最优解的近似解。为了减少计算工作量，一般先做较稀的网格，然后找到近似解的网格点的附件，再做较密的网格，继续找出目标函数为最大的网格点。因为网格点之间的距离就是解的误差上限，所以当网格点的间距小于控制精度时，便求出了满足一定精度要求接近最优解的近似解。网格既可以是等间距的，又可是不等间距，根据优化设计的具体情况确定。

笔者建立的优化设计模型有 4 个设计变量，其网格法的计算步骤如下：

确定初始参数。给出目标函数初值  $f_0$ ，每个设计变量的区间等分数  $k_i (i=1,2,3,4)$  和控制精度  $\varepsilon$ 。由于优化所求目标函数的极值为最大值，故可设  $f_0=0$ 。

划分网格。将各设计变量的界限区间  $[a_i, b_i]$  等分为  $k_i$ ，求出各变量的分割点间距为

$$h_i = (b_i - a_i) / k_i, \quad i=1,2,3,4. \quad (11)$$

求各网格点的坐标。设以  $j_i$  表示第  $i$  个设计变量的第  $j$  个分割点，则各端点及分割点坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_i^{(0)} &= a_i \quad i=1,2,3,4 \\ x_i^{(j)} &= a_i + j_i h_i \quad j_i=1,2,\dots,k_{i-1}, (i=1,2,3,4) \\ x_i^{(k_i)} &= b_i \quad i=1,2,3,4 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

网格点总数为

$$R = (k_1 + 1)(k_2 + 1)(k_3 + 1)(k_4 + 1). \quad (13)$$

计算目标函数值并寻优。对  $R$  个网格点按顺序逐一检查，放弃不满足约束条件的网格点，计算满足约束条件的网格点的目标函数值  $f(X)$ ，并与初值  $f_0$  比较，放弃  $f(X) < f_0$  的点，然后以目标函数值大于  $f_0$  的网格点  $f(X)$  代替  $f_0$ ，如此从中找到目标函数值为最大的网格点  $X^*$ 。

计算精度检查。检查网格的最大间距  $h_i \leq \varepsilon$ ，如不满足，则以新求得的附近 2 个网格再分割，即令

$$\left. \begin{aligned} a_i &= X_i^* - h_i \\ b_i &= X_i^* + h_i \end{aligned} \quad i=1,2,3,4 \right\}. \quad (14)$$

转回 2) 重新计算，直至分割的间距满足  $\max(h_i) \leq \varepsilon$  为止。此时对应的目标函数值为最大网格  $X^*$  及其目标函数值  $f(X^*)$ ，即为满足精度要求的近似最优解。

## 3 计算实例

根据优化设计模型和计算方法，笔者应用 Matlab 编制了优化计算程序，对具体实例进行计算。计算假设末端弹道参数如下：导弹落速为 800 m/s，落角为 80°，炸高为 40 m。设计变量边界及总质量等参数见表 1。

表 1 计算实例边界参数

总质量 $M/\text{kg}$	静态 飞散角 $\Omega(^{\circ})$	静态飞散 中心方向角 $\phi(^{\circ})$	破片数量 $N$	破片单粒 质量 $m/g$
50	10~60	80~100	1 000~10 000	2~6

笔者针对以上条件设计变量，应用网格法计算杀伤面积，并输出满足约束条件的目标函数值，得到了杀伤面积最大时的近似最优解见表 2。

表 2 近似最优参数组合

杀伤 面积 $S/\text{m}^2$	静态 飞散角 $\Omega(^{\circ})$	静态飞散 中心方向角 $\phi(^{\circ})$	破片 数量 $N$	破片单粒质量 $m/g$
9 707.8	22.5	90	9 000	2.5

通过数据分析，获得了各个设计变量对杀伤面积的影响规律<sup>[9]</sup>。

1) 破片静态飞散角对杀伤面积的影响。

在其余 3 个特征参数固定不变时，破片静态飞散角在 10°~60°变化，对杀伤面积的影响如图 3 所示。计算结果表明：随着破片静态飞散角的逐步增加，杀伤面积相应增大；当破片飞散角增加到一定值后，杀伤面积开始减小。主要原因是：飞散角从

较小的值开始增大后，破片打击范围增加，因而杀伤面积增大；当飞散角达到一定值之后，随着飞散角的增大，破片飞散密度越来越低，同时飞散角外边缘处破片动态打击路径越来越大，使有效杀伤破片减少，导致杀伤面积减小。

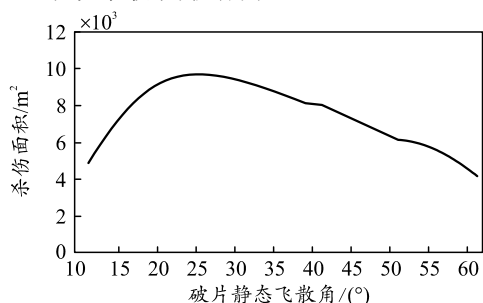


图3 破片静态飞散角对杀伤面积的影响

破片静态飞散角直接决定了破片杀伤区的宽度，对杀伤面积和战斗部实战毁伤效果均有重要影响，是杀爆战斗部的重要特征参数。

#### 2) 破片静态飞散中心方向角对杀伤面积的影响。

在其余3个特征参数固定不变时，破片静态飞散中心方向角在 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 变化，对杀伤面积的影响如图4所示。计算结果表明：随着破片静态飞散中心方向角的增大，杀伤面积随之增大；在破片静态飞散中心方向角达到一定值之后，杀伤面积随破片静态飞散中心方向角的增大而减小。主要原因是：破片静态飞散中心方向角较小时，由于导弹牵连速度使破片的动态飞散角压缩变小，此时随着破片静态飞散中心方向角的增加，破片动态飞散角增大，故杀伤面积增大；当破片静态飞散中心方向角增大到一定值之后，再增大破片静态飞散中心方向角导致破片越来越后倾，破片飞散角外边缘的部分破片的动态打击路径越来越大，使部分破片的打击动能不能满足目标杀伤要求，故导致杀伤面积减小。

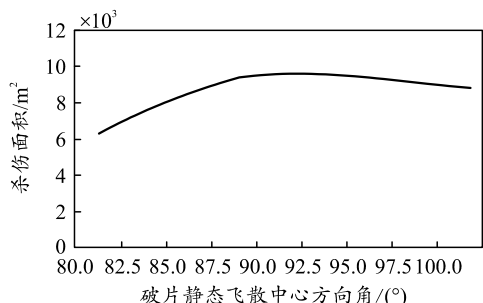


图4 破片飞散中心方向角对杀伤面积的影响

#### 3) 单粒破片质量对杀伤面积的影响。

在其余3个特征参数固定不变时，单粒破片质量在 $2\sim 6\text{ g}$ 变化对杀伤面积的影响如图5所示。计算结果表明：随着单粒破片质量的增大，杀伤面积

随之增大；在单粒破片质量达到一定值之后，杀伤面积随单粒破片质量的增大而减小。主要原因是：随着单粒破片质量的增加，破片打击动能增大，有效破片数量增大，故杀伤面积增加；在单粒破片质量达到一定值之后，在战斗部总质量的限制下，再增加单粒破片质量势必导致破片数量越来越小，破片杀伤概率也越来越小，最终使杀伤面积越来越小。

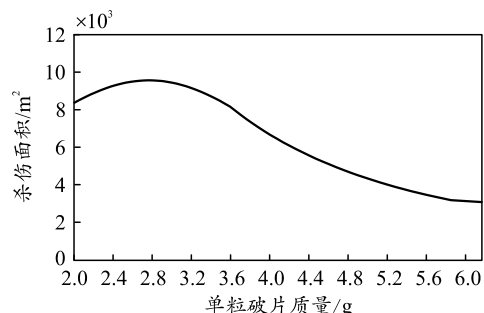


图5 单粒破片质量对杀伤面积的影响

#### 4) 破片数量对杀伤面积的影响。

在其余3个特征参数固定不变时，破片数量在 $1\ 000\sim 10\ 000$ 粒内变化对杀伤面积的影响如图6所示。计算结果表明：随着破片数量的增加，杀伤面积随之增大；在破片数量达到一定值之后，杀伤面积随破片数量的增加而减小。主要原因是：随着破片数量的增加，破片杀伤概率增大，故杀伤面积增大；破片数量达到一定值之后，因战斗部总质量的限制，再增加破片数量势必导致单粒破片质量减小，使破片打击动能减小，部分破片不能满足目标杀伤准则要求，故杀伤面积减小。

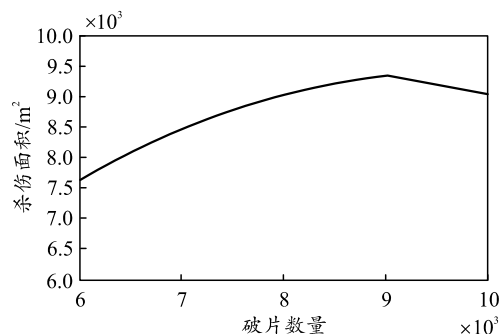


图6 破片数量对杀伤面积的影响

从以上计算结果可知：杀爆战斗部的破片静态飞散角、破片静态飞散中心方向角、破片单枚质量、破片数量4个特征参数对杀伤面积均有一定影响，其中以破片静态飞散角、单粒破片质量对杀伤面积的影响最大，且4个特征参数之间存在最佳匹配。实例计算结果表明：与未经总体参数优化的某产品相比，杀伤面积提高了12.5%，获得的各设计变量对杀伤面积的影响规律与实际情况相吻合。

### 4 结论

笔者以杀伤面积为目标函数，以战斗部质量、破片打击动能和飞散密度等为约束条件，针对杀爆战斗部的 4 个主要特征参数进行优化建模，编制了优化计算程序，并对具体实例进行优化计算，获得了预设弹道条件下杀伤面积最大时的最优特征参数组合，以及各参数对杀伤面积的影响规律。应用该方法确定的特征参数有效提高了杀爆战斗部的杀伤面积，能增强其实战毁伤效果，可作为杀爆战斗部指标确立以及战斗部详细结构设计的依据。

### 参考文献：

[1] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 106-108.  
 [2] 汪德武, 李卫平. 杀爆战斗部破片对地面目标杀伤概

(上接第 31 页)

### 6 结束语

笔者引入度指数和介数指数 2 种基于全局的节点评价属性，在层次分析法分析得到节点属性权重划分基础上，通过证据组合综合地域通信网络节点的多个属性进行决策评价。实验仿真证明文中方法克服了单一属性评价的不足，具备更细化的评价能力和更准确的评价结果排序。同时证据组合方法在处理节点属性参数模糊上具有一定优势，在地域通信网络节点识别中有较好的应用价值。

### 参考文献：

[1] GEORGE F, ELMASRY. 战术无线通信与网络：设计概念与挑战[M]. 曾浩祥, 田永春, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014: 21-25.  
 [2] POISEL R A. 通信电子战原理[M]. 2 版. 聂隼, 王振华, 陈少昌, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 36-37.  
 [3] 张金锋, 易侃, 王珩. 信息流的网络化 C4ISR 系统结构关键节点挖掘方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 61-64, 69.  
 [4] 周芳, 楚威, 程文迪. 基于业务流量挖掘的 C-4ISR 系统重要目标识别方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1520-1527.  
 [5] 李尔玉, 龚建兴, 黄健, 等. 基于功能链的作战体系复

率的工程算法[J]. 含能材料, 2007, 15(3): 265-268.  
 [3] 陈智刚, 赵太勇, 侯秀成. 爆炸及其终点效应[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004: 254-256.  
 [4] 赵悍东. 弹药优化设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005: 5-6.  
 [5] 李卫平, 汪德武, 王少龙. 大面积杀爆战斗部最佳爆高的工程算法[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(5): 92-94.  
 [6] 钱立新. 再入式大面积杀爆战斗部威力评定方法研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(3): 42-46.  
 [7] 黄鹤, 陈建中, 徐鹏, 等. 破甲反击弹抗串联战斗部的可行性[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 55-57.  
 [8] 肖刚, 张全虎, 李天柁. 大型杀爆战斗部动态威力计算[J]. 现代防御技术, 1997(5): 24-30.  
 [9] 余志统, 施冬梅, 尚春明, 等. V 形刻槽预制破片战斗部爆炸仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 159-162.  
 杂网络节点重要性评价方法[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(1): 42-49.  
 [6] 曾瑛, 朱文红, 邓博仁, 等. 基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 102-108.  
 [7] 张成才, 齐小刚. 基于复杂网络理论的无线传感器网络特征度量分析[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 44-46.  
 [8] 石福丽. 基于超网络的军事通信网络建模、分析与重构方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 75-77.  
 [9] 郭进时, 汤红波, 葛国栋. 一种联合拓扑与属性的社区模糊划分算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(11): 35-40.  
 [10] PENG Y, LIU F. An Optimized Identification Method of the Key nodes Based on Industrial Control Network[J]. Electrical Engineering and Automation, 2015, 4(2): 18-23.  
 [11] 罗贺, 尹艳平, 胡笑旋. 基于可信因子的证据源修正方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 144-146.  
 [12] 耿子惠, 崔力民, 舒勤, 等. 基于 TOPSIS 算法的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 78-86.  
 [13] 缪燕子, 方健, 马小平, 等. D-S 证据理论融合技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 31-33.  
 [14] BIAN T, HU J T, DENG Y. Identifying Influential Nodes in Complex Network Based on AHP[J]. Physical A, 2017, 47(2): 422-436.  
 [15] 彭一. 基于复杂网络理论的无线传感器网络关键节点识别技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015: 25-27.