

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.015

炮射云爆弹射击效能分析

谢文, 叶志红, 丁忠熙

(陆军炮兵防空兵学院南京校区, 南京 211132)

摘要: 为提高炮兵指挥员科学运用云爆弹精确筹划火力的能力, 需先摸清其射击效能。通过分析炮射云爆弹的作用机理与特点, 构建营、连和单炮射击误差模型、典型目标模型和毁伤概率模型, 计算出在不同射击单位发射不同弹药消耗量的情况下, 对地堡群目标的可达毁伤程度。结果表明: 3种射击单位对目标的毁伤概率均随弹药消耗量的增加而增大, 近似呈线性关系。该分析对于炮兵指挥员及其指挥机关精确筹划火力、科学运用弹药和正确进行火力分配具有重要借鉴价值。

关键词: 云爆弹; 射击效能; 射击误差; 毁伤概率

中图分类号: TJ413 **文献标志码:** A

Firing Efficiency Analysis of Gun-launched FAE Projectile

Xie Wen, Ye Zhihong, Ding Zhongxi

(Nanjing Campus, Army Academy of Artillery and Air Defense, Nanjing 211132, China)

Abstract: In order to improve the ability of artillery commanders to scientifically use fuel air explosive (FAE) to accurately plan firepower, it is necessary to find out its shooting efficiency first. By analyzing the mechanism and characteristics of FAE, the firing error model, typical target model and damage probability model of battalion, company and single gun were established, and the damage degree of bunker targets was calculated under different ammunition consumption of different firing units. The results show that the damage probability of the three kinds of shooting units to the target increases with the increase of ammunition consumption, which is approximately linear. The analysis has important reference value for artillery commanders and their command organs to plan firepower accurately, use ammunition scientifically and distribute firepower correctly.

Keywords: FAE; firing efficiency; firing error; damage probability

0 引言

云爆弹是一种杀伤面积大、毁伤效应多和效费比高的新型弹药, 主要用于打击地堡、掩体、堑壕、洞窟、遮蔽物、建筑物等有限空间目标, 以及炮阵地、防空导弹阵地、雷达站等技术兵器类目标, 必要时还可承担扫雷、破障等作战任务, 因其毁伤效能大、能量利用率高和心理震慑性强的特点, 受到美俄等军事强国的高度重视, 在全世界引起了广泛关注, 成为新型弹药发展的重要方向之一^[1-3]。分析摸清炮射云爆弹的射击效能, 既是炮兵指挥员及其指挥机关精确筹划火力资源的前提, 又是科学运用弹药和正确进行火力分配的基础。

1 作用机理

飞向预定打击目标的炮射云爆弹在引信作用下起爆, 将其战斗部内装常态下不具有爆炸性能的燃料抛撒在空中, 形成可以爆轰的多相混合物, 当其达到一定浓度条件后, 在适当的能量激励下, 发生

剧烈爆轰反应进而产生瞬间高压并辅以高温缺氧环境, 进而对有限空间内的有生力量造成大面积杀伤。爆炸时冲击波效应以超压挤压和动压撞击的方式, 使人体内脏器官受到严重伤害, 是致人死亡的最直接原因, 威力比常规炸药大得多, 其威力相当于等量 TNT 炸药爆炸威力的 5~10 倍^[4-6]; 因此, 对地堡、掩体等有限空间目标, 炮射云爆弹主要通过产生的冲击波超压对目标实施毁伤。

2 射击效能计算模型

2.1 射击误差模型

使用炮射云爆弹对陆战场上不同目标实施打击时, 一般会根据毁伤任务要求、持续射击时间、位置分布、目标幅员和抗毁能力等要素, 量化确定参加射击的兵力和具体射击方式, 比如单炮射击、连齐射或营齐射等。不同级别射击单位遂行射击会有不同的射击误差。依据炮兵射击理论, 单炮射击误差可分为 2 组型误差: 诸元误差和散布误差; 炮兵

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 武器装备军内科研重点项目 (LZ2019020411101)

作者简介: 谢文(1980—), 男, 广西人, 博士, 教授, 从事炮兵作战指挥教学与科研工作。E-mail: jren520@sina.com。

连射击误差可分为 3 组型误差：连共同误差、炮单独误差和散布误差；炮兵营射击误差可分为 4 组型误差：营共同误差、连单独误差、炮单独误差和散布误差^[7]。

2.1.1 单炮射击误差

设目标区域中心点 O 为坐标原点，以射击方向为 X 轴，垂直射击方向水平为 Z 轴建立右手坐标系 $OXYZ$ ，如图 1 所示。

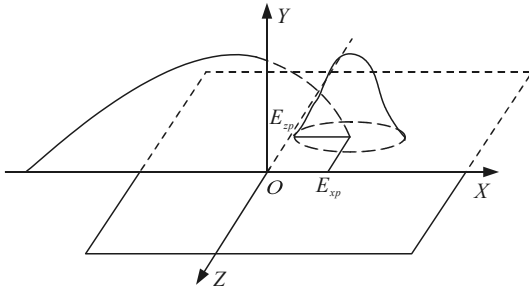


图 1 单炮射击

单炮射击时，由于各种随机因素的影响，炸点在目标中心点附近呈正态分布，其分布的密度函数为：

$$f(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} e^{-\frac{(x-E_{xp})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(z-E_{zp})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (1)$$

式中： σ_x, σ_z 为炸点在 X (纵向) 和 Z (横向) 方向上的散布均方差； E_{xp} 和 E_{zp} 分别为单炮的距离和方向中间误差； $\sigma_x=B_d/0.6745, \sigma_z=B_f/0.6745$ ， B_d 和 B_f 分别为炮射云爆弹射弹散布的距离和方向公算偏差。

2.1.2 连射击误差

连射击时，可将 3 组型误差简化为单炮射击误差，简化后仍近似服从正态分布。其连诸元误差的中间误差和散布误差的中间误差分别为：

$$\left. \begin{aligned} E_{dl} &= \sqrt{E_{xlg}^2 + E_{xpd}^2 / n} \\ E_{fl} &= \sqrt{E_{zlg}^2 + E_{zpd}^2 / n} \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{dl} &= \sqrt{B_d^2 + (1-1/n)E_{xpd}^2} \\ B_{fl} &= \sqrt{B_f^2 + (1-1/n)E_{zpd}^2} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

式中： E_{xlg} 和 E_{zlg} 分别为连共同误差的距离中间误差和方向中间误差； E_{xp} 和 E_{zp} 分别为各炮单独误差的距离中间误差和方向中间误差； B_d 和 B_f 分别为射弹散布的距离公算偏差和方向公算偏差； n 为连内炮数。

2.1.3 营射击误差

同样可将营射击 4 组型误差简化为单炮射击误

差，简化后仍近似服从正态分布^[8]。其营诸元误差和散布误差的中间误差分别为：

$$\left. \begin{aligned} E_{dy} &= \sqrt{E_{xyg}^2 + E_{xld}^2 / m + E_{xpd}^2 / mn} \\ E_{fy} &= \sqrt{E_{zyg}^2 + E_{zld}^2 / m + E_{zpd}^2 / mn} \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{dy} &= \sqrt{B_d^2 + (1-1/m)E_{xld}^2 + (1-1/mn)E_{xpd}^2} \\ B_{fy} &= \sqrt{B_f^2 + (1-1/m)E_{zld}^2 + (1-1/mn)E_{zpd}^2} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

式中： E_{xyg} 和 E_{zyg} 分别为营的共同误差的距离中间误差和方向中间误差； E_{xL} 和 E_{zL} 为各连单独误差的距离和方向中间误差； m 为营内连数； n 为连内炮数。

2.2 典型目标模型

炮射云爆弹打击目标为地堡群，并假设地堡群目标分布区域宽度为 W_t ，纵深长度为 L_t ，内部均匀分布地堡 (内有人员)，将地堡简化为长方体，其长宽高分别为 l_r, w_r 和 h_r ，纵深间隔为 ΔL_r ，宽度方向的间隔为 ΔW_r ，如图 2 所示。

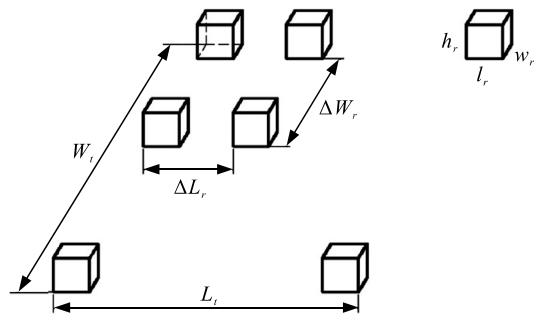


图 2 人员目标分布

则地堡的面密度为：

$$\omega_y = \frac{1}{\Delta L_r \Delta W_r} \quad (6)$$

地堡群内地堡数为：

$$N_r = \frac{L_t W_t}{\Delta L_r \Delta W_r} \quad (7)$$

2.3 毁伤概率计算模型

2.3.1 毁伤准则

云爆弹冲击波对目标杀伤通常用 3 个指标度量，即冲击波阵面峰值超压、冲击波正压持续时间和比冲量^[9-11]。目前，对地堡内人员的杀伤判断准则采用最多的是冲击波阵面峰值超压，笔者采用超压毁伤准则来评估炮射云爆弹的毁伤效能。

爆炸所形成的冲击波峰值超压和比冲量可分别按下面公式估算 ($3r_c > r > r_c$)^[12]：

$$r_c = 1.842\sqrt[3]{m}; \quad (8)$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{cj} (63.46e^{-2.443\bar{r}} + 0.476e^{-0.4152\bar{r}}); \quad (9)$$

$$t_r = 0.188 2\Delta P_m \sqrt[3]{m} (e^{-0.08743\bar{r}^3} + 2\ln 0.660 2\bar{r}). \quad (10)$$

式中： r_c 为云雾半径； m 为FAE燃料装药质量，kg； ΔP_m 为离爆心 r 处空气冲击波峰值超压； t_r 为在 r 处云雾爆炸比冲量； \bar{r} 为相对距离， $\bar{r} = r/\sqrt[3]{m}$ ， $m/\text{kg}^{1/3}$ ； ΔP_{cj} 为爆轰超压， $\Delta P_{cj} = P_{cj} - P_0$ ， P_0 为大气压力，其值为 0.101 3 MPa， P_{cj} 可通过下式计算：

$$P_{cj} = \rho_0 D^2 / (1 + \kappa). \quad (11)$$

式中： κ 为爆轰产物多方指数； ρ_0 为燃料空气爆炸混合物的密度， kg/m^3 ； D 为爆速， m/s 。

则冲击波峰值超压对人员的杀伤准则有：

$$P_k = \begin{cases} 1 & \Delta P_m \geq \Delta P_c \\ 0 & \Delta P_m < \Delta P_c \end{cases}. \quad (12)$$

式中： P_k 为目标毁伤概率； ΔP_c 为目标毁伤的冲击波阈值。其中，人员目标的毁伤阈值如表 1 所示。笔者根据人员战斗力评估标准，选取中度毁伤程度，人员达到中度毁伤即丧失战斗力。

表 1 人员超压毁伤准则^[13] MPa

毁伤程度	压力范围
轻度	$\Delta P_m < 0.029$
中度	$0.029 < \Delta P_m < 0.049$
重度	$0.049 < \Delta P_m < 0.098$
致死	$\Delta P_m > 0.098$

2.3.2 单发云爆弹毁伤计算模型

根据冲击波超压毁伤准则，可由式(9)、(11)推算出单发炮射云爆弹对目标的杀伤半径 r_k ，即在以炸点为圆心半径为 r_k 的圆内，目标被毁伤或者没被毁伤。

设在 XOZ 平面内，任取一点 $Q(x_Q, z_Q)$ ，该点处目标被毁伤的概率记为 $P(x_Q, z_Q)$ ，则：

$$P(x_Q, z_Q) = P_H P_{K/H}. \quad (13)$$

式中： P_H 为云爆弹命中 Q 点的概率，即云爆弹杀伤区域覆盖 Q 的概率； $P_{K/H}$ 为云爆弹命中 Q 点的条件下毁伤此点处目标的概率，根据定义和杀伤准则， $P_{K/H} = 1$ 。

因为单发云爆弹的杀伤半径为 r_k ，则仅当云爆弹落在圆 B 之内时，该弹的杀伤区域才能覆盖 Q 点。所以 P_H 为：

$$P_H = \iint_{S_B} f(x, y) dS. \quad (14)$$

式中： $f(x, z)$ 为云爆弹炸点的分布密度函数式(1)； S_B 为圆 B 内的区域。

圆 B 的方程为：

$$(x - x_Q)^2 + (z - z_Q)^2 = r_k^2; \quad (15)$$

则式(14)变为：

$$P_H = \iint_{(x-x_Q)^2+(z-z_Q)^2 \leq r_k^2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} e^{-\left[\frac{(x-x_Q)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(z-z_Q)^2}{2\sigma_z^2}\right]} dx dz. \quad (16)$$

式(16)很难求出解析解，笔者采用数值计算方法时行近似计算。

以 Q 点为圆心，以 r_k 为半径的圆，划分成许多微元，如图 3 所示。母弹落在微元内的概率近似为：

$$P_k = f(x_k, z_k) dS_k. \quad (17)$$

式中： (x_k, z_k) 为 k 微元面中心的坐标； dS_k 为微元面的面积。

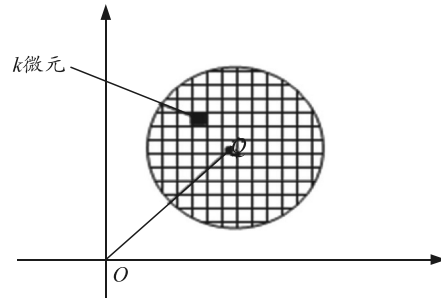


图 3 圆 B 内微元划分

则云爆弹命中 Q 点的概率 P_H 可近似通过下式计算：

$$P_H = \sum_k P_k. \quad (18)$$

2.3.3 多发云爆弹毁伤计算模型

对于地堡群等集群目标，常常需要发射多发云爆弹进行打击。下面分析发射 m 发云爆弹对目标的毁伤能力。当在较短的有效射击时间内发射多发云爆弹时，其毁伤会有一定叠加，为简化计算量，现假设：1) 每发弹的散布规律相同；2) 每发弹对目标的毁伤相互独立；3) 不考虑毁伤的叠加和积累效应；4) 弹药消耗量均在有效射击时间内发射完毕。

根据单发云爆弹毁伤模型，设任意位置 Q 点处目标被一发云爆弹毁伤的概率为 $P(x_Q, z_Q)$ ，根据假设各发弹对目标的毁伤是相互独立的，则发射 m 发后各点处目标被毁伤的概率 $P_{(x_Q, z_Q)}^{(m)}$ 为：

$$P_{(x_Q, z_Q)}^{(m)} = 1 - (1 - P_{(x_Q, z_Q)})^m. \quad (19)$$

在 XOZ 平面上，任取微元 $dx dz$ ，在此区域内目标被毁伤的概率为 $P^{(m)}(x, z)$ ，微元的面积为 $dx dz$ ，

由式(6)可知, $dx dz$ 内目标的数目为 $\omega_r dx dz$, 则此微元内毁伤目标数目的期望值为:

$$dn_r = \omega_r P^{(m)}(x, z) dx dz \quad (20)$$

则目标区域积分可得毁伤目标数目的数学期望值为:

$$n_r = \omega_r \iint_{\text{目标区}} P^{(m)}(x, z) dx dz = \omega_r \int_{-\frac{W_r}{2}}^{\frac{W_r}{2}} \int_{-\frac{L_r}{2}}^{\frac{L_r}{2}} P^{(m)}(x, z) dx dz \quad (21)$$

式中: $P^{(m)}(x, z)$ 为目标区任意位置处在 m 发弹药作用后目标被毁伤的概率, 可由式(19)计算; L_r 和 W_r 为目标区的长度和宽度。

地堡群集群目标被毁伤的地堡内人员数量反映了云爆弹对地堡群的综合毁伤能力; 因此, 此处用毁伤目标的期望值占目标总数目的比例表示弹药对目标的综合毁伤能力, 公式如下:

$$P^{(z)} = n_r / N_r \quad (22)$$

式中: n_r 为毁伤目标数目的数学期望值; N_r 为人员目标的总数。

3 射击效能计算示例

根据构建的射击效能计算模型, 编制了效能评估计算程序, 并对炮射云爆弹的毁伤效能进行全面评估, 以便分析不同射击单位在不同弹药消耗条件下对地堡群的目标毁伤程度的数值走向。

假设地堡群集群目标的幅员为 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$, 毁伤准则为 $\Delta P_m > 0.03 \text{ MPa}$ 。假定炮射云爆弹弹药参数如表 2 所示。

表 2 某型云爆弹参数

名称	参数
燃料装药质量/kg	9.5
TNT 当量	3.5
燃料空气混合物爆速/(m/s)	7 000
燃料空气混合物密度/(kg/m^3)	1.5
爆轰产物多方指数	1.4

3.1 单炮射击毁伤效能

设单炮的射击误差分别为: $E_{xp}=222 \text{ m}$, $E_{zp}=342 \text{ m}$, $B_d=150 \text{ m}$, $B_f=150 \text{ m}$ 。通过计算得出了不同弹药消耗条件下对地堡群目标的毁伤概率, 如表 3 所示。

表 3 单炮射击弹药数量与毁伤概率关系

弹药数量	毁伤概率	弹药数量	毁伤概率
12	0.024 123	96	0.177 456
24	0.047 665	108	0.197 299
36	0.070 639	120	0.216 663
48	0.093 058	132	0.235 559
60	0.114 936	144	0.254 000
72	0.136 287	156	0.271 996
84	0.157 123		

3.2 连射击毁伤效能

设一个连有 6 门炮, 连的射击误差分别为: $E_{xLg}=200 \text{ m}$, $E_{zLg}=300 \text{ m}$, $E_{xp}=222 \text{ m}$, $E_{zp}=342 \text{ m}$, $B_d=150 \text{ m}$, $B_f=150 \text{ m}$ 。通过程序计算得出了不同弹药消耗条件下对地堡群目标的毁伤概率, 如表 4 所示。

表 4 连射击弹药数量与毁伤概率关系

齐射管数	弹药数量	毁伤概率	齐射管数	弹药数量	毁伤概率
3	12	0.015 944	24	96	0.120 658
6	24	0.031 634	27	108	0.134 678
9	36	0.047 074	30	120	0.148 475
12	48	0.062 268	33	132	0.162 052
15	60	0.077 219	36	144	0.175 412
18	72	0.091 932	39	156	0.188 560
21	84	0.106 410			

3.3 营射击毁伤效能

设一个营有 3 个连, 每连有 4 门炮, 营共同误差为: $E_{xyg}=400 \text{ m}$, $E_{zyg}=400 \text{ m}$ 。则在上述连射击条件假设下, 通过计算不同弹药消耗条件下对地堡群目标的毁伤概率, 如表 5 所示。

表 5 营射击弹药数量与毁伤概率关系

齐射管数	弹药数量	毁伤概率	齐射管数	弹药数量	毁伤概率
1	12	0.009 231	8	96	0.066 654
2	24	0.017 639	9	108	0.074 584
3	36	0.025 977	10	120	0.082 448
4	48	0.034 249	11	132	0.090 244
5	60	0.042 453	12	144	0.097 975
6	72	0.050 589	13	156	0.105 640
7	84	0.058 655			

将上述 3 种不同射击单位对地堡群目标的毁伤概率用曲线表示, 如图 4 所示。

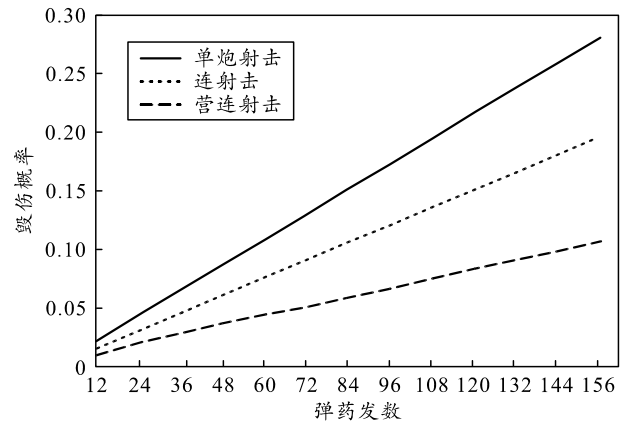


图 4 弹药消耗量与射击毁伤概率关系曲线

从上图可以看出: 3 种射击单位对目标的毁伤概率均随弹药消耗量的增加而增大, 近似呈线性关系。弹药消耗量相同的条件下, 单炮对目标射击的毁伤概率最大、连次之、营最小。原因是连射击时的诸元误差由连共同误差、各炮单独误差决定, 而营射击时的诸元误差由营的共同误差、连的共同误

差、各炮单独误差等 3 组误差决定，故营射击时的射击误差最大、连次之、单炮最小。

4 结束语

通过构建营、连和单炮射击误差模型、典型目标模型和毁伤概率计算模型，计算分析了营、连和单炮不同射击单位发射不同弹药消耗量条件下，对地堡群有生力量的可达毁伤程度，量化计算分析后得出以下结论：1) 在有效射击时间内且自身安全能够得到保障前提下，单炮若能够完成毁伤任务，尽量使用单炮射击，以减少散布误差，提高射击密集度；2) 作为面杀伤的炮射云爆弹虽然对射击精度指标不作过高要求，但也须与其毁伤半径相适应，以提高对目标的毁伤概率。上述结论可为炮兵指挥员科学运用弹药和正确进行火力分配提供有益参考。

参考文献：

- [1] 许化珍, 彭朝晖, 李向东. 云爆弹杀伤效能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 114-116.
- [2] 阙金玲. 液固复合云爆剂的爆炸和毁伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [3] 刘想炎, 黄振贵, 陈秋元, 等. 云爆弹对地面人员综合

(上接第 63 页)

4 结论

在多任务交错并存和保障要素有限供应的实际作战背景下，对保障要素进行统一调度，确定任务进行序列具有重要意义。笔者提出的资源调度算法设计经过仿真实例证实了可行性和实用性。通过移民交叉算子和自适应操作对遗传算法的改进，改善了传统遗传算法过早收敛无法求出全局最优解的问题。在先验知识的基础上改进迭代终止条件，使算法的效率提高了 76.4%。

参考文献：

- [1] 王坚浩, 张亮, 史超. 基于入侵杂草蝙蝠双种群优化的装备保障编组协同任务规划[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1375-1384.
- [2] 陈均明. 随机资源分配问题建模和随机模拟遗传算法求解[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2006, 23(5): 430-434.
- [3] 赵劲松, 李忠光, 门君. 基于模糊聚类装备保障力量单元编组研究[J]. 军事交通学院学报, 2008, 20(1): 32-36.

杀伤的仿真评估研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 103-106.

- [4] 王兆胜. 炮射子母弹对集群目标平均首发毁伤概率研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 42-44.
- [5] 肖师云, 冯成良, 陈文, 等. 目标易损性一体化建模[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 217-222.
- [6] 叶军, 刘天宇, 曹欣芹, 等. 某型云爆弹对地堡目标有生力量杀伤仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(1): 180-184.
- [7] 钟宜兴, 谢文. 炮兵射击理论[M]. 合肥: 陆军炮兵防空兵学院, 2019: 7-15.
- [8] 郭振汉, 钟宜兴, 刘占锋. 122 mm 火箭云爆弹射击误差分析[J]. 弹道学报, 2009, 17(3): 85-87.
- [9] 俞波. 激光末制导炮弹制导误差分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 46-48.
- [10] 惠君明, 刘荣海, 彭金华, 等. 燃料空气炸药威力的评价方法[J]. 含能材料, 1996, 4(3): 123-128.
- [11] 高旭东, 郭敏, 孙韬, 等. 炮射温压弹对人员目标的毁伤效能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 123-125.
- [12] 王廷增, 徐军培, 刘德润, 等. 云雾爆炸场的工程计算[J]. 兵工学报, 1994, 1(3): 94-96.
- [13] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [4] 张家良, 王迎磊, 李复名. 多节点协同任务分配问题的解决和验证[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 17(1): 45-50.
- [5] 王艳鹏. 外场机务保障调度及作业优化仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [6] 高亮, 高海兵, 周驰. 基于粒子群优化的开放式车间调度[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 129-134.
- [7] 万路军, 姚佩阳, 周翔翔. 多编组协同任务分配模型及 QGA 算法求解[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1562-1568.
- [8] 姚敏. 求解柔性资源受限项目调度问题的多种群遗传算法[J]. 计算机科学与技术, 2020, 47(S1): 124-129.
- [9] 朱传军, 刘明英. 基于改进遗传算法的民航客机地勤调度问题[J]. 湖北工业大学学报, 2020, 35(5): 17-22.
- [10] 崔利刚, 刘孝林, 邓洁. 模糊条件下的多品采配协同建模及遗传算法求解[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(6): 36-45.
- [11] 康璞, 毕义明. 常规导弹部队大规模作战编组问题研究及遗传算法实践[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2011.
- [12] 龚月娇, 陈梦君, 胡晓敏. 遗传算法中自适应方法的比较与分析[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(21): 7.