

doi: 10.7690/bgzd.2019.11.017

基于 SD 模型的对岸火力支援弹药消耗规律分析

王伊婧¹, 刘宇², 于仁清², 丛林虎³, 李向阳³

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91206 部队, 山东 青岛 266041;

3. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为计算弹药的需求量及了解弹药消耗的规律, 对 SD(system dynamic)模型的对岸火力支援弹药消耗规律进行分析。根据系统动力学的基本思路, 构建对岸火力支援弹药消耗 SD 模型, 对模型的因果关系进行分析, 得出交战模型的弹药消耗 SD 流程图, 并通过典型案例进行仿真验证。仿真结果表明: SD 模型可以反映对岸火力支援作战中的弹药消耗的总趋势, 为指挥员从宏观层面整体掌控弹药消耗的本质规律提供参考。

关键词: SD 模型; 对岸火力支援; 弹药消耗

中图分类号: TJ410.2 **文献标志码:** A

Research of Ammunition Consumption Rules in Anti-shore Support Based on SD Model

Wang Yijingxin¹, Liu Yu², Yu Renqing², Cong Linhu³, Li Xiangyang³

(1. Aviation Foundation College, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 91206 Unit of PLA, Qingdao 266041, China;

3. College of Coast Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to calculate ammunition demand and understand the law of ammunition consumption, the system dynamic (SD) model was used to analyze the law of ammunition consumption for cross-shore firepower support. According to the basic idea of system dynamics, the SD model of ammunition consumption for cross-shore firepower support is constructed, and the causality of the model is analyzed. The SD flow chart of ammunition consumption for the engagement model is obtained, which is verified by simulation with typical cases. The simulation results show that the SD model can reflect the general trend of ammunition consumption in cross-shore fire support operations, and provide a reference for commanders to control the essential law of ammunition consumption from the macro level.

Keywords: SD model; anti-shore fire support; ammunition consumption

0 引言

火力打击和火力破坏的基础是弹药, 战时弹药消耗是弹药保障科学决策的理论基础^[1]。科学计算弹药的需求量, 研究弹药消耗的规律, 对跨岸两栖火力支援作战具有重要的理论和实战意义。

目前, 许多文献从火力毁伤需求理论^[2]、敌我双方对抗条件^[3]、基于神经网络解决非线性计算问题^[4-5]等战略方法对弹药需求量进行了较为深入的系统性研究。根据两栖对岸火力支援在实际作战中的需要, 为了能够从宏观层面上进一步认识弹药消耗的规律, 笔者借助于系统动力学方法(system dynamic, SD), 按照宏观把握和微观分析相结合的总体思路, 建立了基于系统动力学研究方法的弹药消耗仿真模型, 从不同角度揭示了对岸火力支援作战中弹药消耗的基本规律, 在实战中对指挥员能够

从宏观层面整体掌控弹药消耗的本质规律具有重要意义。

1 SD 简介

SD 是 20 世纪 50 年代美国麻省理工学院的福莱斯特教授创立的一门计算机仿真方法。面对复杂的实战问题, SD 方法首先将社会系统实行模型化, 然后再进行一系列战略和策略的计算机模拟实验。在模拟过程中, 通过修改政策(策略)的参数, 来操作各种战略和策略实验。模拟过程通常可以分为: 确定系统目标、系统的结构分析和因果关系分析、建立 SD 模型、计算机模拟与策略分析和结果的分析评估与模型的检验这 5 个部分^[6-7]。

对模拟的结果进行分析后, 如果既定的结果不满意, 则可以按照图 1 从下至上的流程进行修改。

收稿日期: 2019-06-07; 修回日期: 2019-07-18

作者简介: 王伊婧(1987—), 女, 山东人, 学士, 助教, 从事装备管理研究。E-mail: 390300824@qq.com。

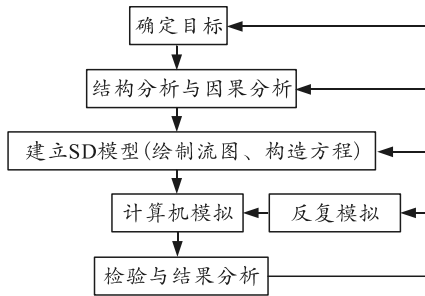


图 1 系统动力学建模与实验过程

2 构建对岸火力支援弹药动态消耗 SD 模型

2.1 基于对抗条件下的弹药消耗 Lanchester 方程

要研究对岸火力支援在实际作战中弹药消耗的基本规律，需根据对岸火力支援作战的特点建立一个弹药消耗 SD 模型。此 SD 模型是基于 Lanchester 方程平方律而建立，这就需要对对抗过程中弹药消耗产生的因果关系进行公式方程组表述^[8-12]。

在实际的对岸火力支援作战中，某一时刻产生的敌我双方瞬时的兵力及战斗力损耗率可通过下列 Lanchester 方程组来表示：

$$\left. \begin{aligned} dR_1(t)/dt &= -\alpha_1 B(t) \\ dR_2(t)/dt &= -\alpha_2 B(t) \\ dB(t)/dt &= -\beta_1 R_1(t) - \beta_2 R_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1(t) &= \frac{\alpha_2 \beta_2 + \alpha_1 \beta_1 \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_1(0) - \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} B(0) + \frac{\alpha_1 \beta_2 [\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) - 1]}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_2(0) \\ R_2(t) &= \frac{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_2(0) - \frac{\alpha_2 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} B(0) + \frac{\alpha_2 \beta_1 [\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) - 1]}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_1(0) \\ B(t) &= -\frac{\beta_1 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} R_1(0) - \frac{\beta_2 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} R_2(0) + \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) B(0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若我方火力支援作战取得胜利，即 $B(t_B) = 0$ 的时间解为：

$$t_B = \frac{1}{2\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} \ln \frac{\beta_1 R_1(0) + \beta_2 R_2(0) + \sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot B(0)}{\beta_1 R_1(0) + \beta_2 R_2(0) - \sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot B(0)} \quad (3)$$

设我方登陆兵力武器与火力支援兵力武器的平均射速为 S_{R1} 和 S_{R2} ，则我方兵力弹药总体消耗量为：

$$N^0 = N_1^0 + N_2^0 = \int_0^{t_B} [S_{R1} R_{R1}(t) + S_{R2} R_2(t)] dt \quad (4)$$

实际弹药需求量为

$$N = N_1 + N_2 = [S_{R1} R_1(0) + S_{R2} R_2(0)] t_B \quad (5)$$

基于 Lanchester 方程的弹药消耗量计算，对式(3)求解，得到整个对抗所持续的时间，这样弹药消

式中： $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $B(t)$ 分别为任意 t 时刻我方登陆兵力(武器)、火力支援兵力(武器)、敌方抗登陆兵力(武器)的瞬时战斗力； α_1 为敌抗登陆兵力单位战斗力、单位时间内对我方登陆兵力的战斗力平均毁伤数，称为我方登陆兵力的战斗力损耗率； α_2 为敌抗登陆兵力单位战斗力、单位时间内对我方火力支援兵力的战斗力平均毁伤数，可称为我方火力支援兵力的战斗力损耗率； β_1 为我方登陆兵力单位战斗力、单位时间内对敌抗登陆兵力的战斗力平均毁伤数； β_2 为我方火力支援兵力单位战斗力、单位时间内对敌抗登陆兵力的战斗力平均毁伤数；当初始条件 $t=0$ 时，敌我双方各兵力对应的战斗力初始值分别为 $R_1(0)$ 、 $R_2(0)$ 、 $B(0)$ 。

该模型的建立是基于现代作战侦察手段不断提高和火力打击前能够基本明确目标信息这 2 种前提，再借助 Lanchester 平方律描述各种火力对抗，通过武器兵力随时间的损耗方程对时间的积分与武器射速的乘积求出的弹药消耗量。现将 Lanchester 平方律理论在对岸火力支援作战中的表达式和精确解做详细分析。

式(1)解析解为：

$$\left. \begin{aligned} R_1(t) &= \frac{\alpha_2 \beta_2 + \alpha_1 \beta_1 \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_1(0) - \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} B(0) + \frac{\alpha_1 \beta_2 [\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) - 1]}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_2(0) \\ R_2(t) &= \frac{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_2(0) - \frac{\alpha_2 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} B(0) + \frac{\alpha_2 \beta_1 [\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) - 1]}{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} R_1(0) \\ B(t) &= -\frac{\beta_1 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} R_1(0) - \frac{\beta_2 \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t)}{\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}} R_2(0) + \operatorname{ch}(\sqrt{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2} \cdot t) B(0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

耗量 N^0 就是登陆兵力武器数量 $R_1(t)$ 、火力支援兵力武器数量 $R_2(t)$ 与各自武器实际射速 S_{R1} 、 S_{R2} 之积在时域上的积分，实际弹药需求量 N 就是登陆兵力初始武器数量 $R_1(0)$ 、火力支援兵力初始武器数量 $R_2(0)$ 与各自武器实际射速 S_{R1} 、 S_{R2} 以及作战持续时间 t 的乘积。其中： N^0 是实际作战对抗中我方兵力消灭敌方目标所必需的总体弹药数量，称之为静态弹药消耗量； N 是火力支援作战前我方兵力为了能够完成对岸火力支援任务所需配备的弹药量，也

是敌我双方以 Lanchester 平方律对抗交战的前提条件，这里称之为动态弹药消耗量或动态弹药量。

在对岸火力支援敌我双方的对抗中，通过分析总体上影响动态与静态弹药消耗量变化的不同因素，找出减小两者之间差值的方法，以研究火力支援作战弹药消耗的内在规律。

2.2 弹药消耗 SD 模型的因果关系分析

对抗条件下弹药消耗的建模，指从宏观层面的角度出发建立 SD 模型，对实际作战中出现的交战双方弹药消耗量的多种因素进行分析，以敌我双方兵力和损耗系数的变化作为依据，分析弹药消耗量宏观动态变化的趋势^[13-15]。如图 2 所示，实际上，可将两栖作战中的对岸火力支援行动看作一个复杂的系统，综合考虑各方面的影响因素，分析系统内部各影响因素之间存在的联系，并得出其因果关系。

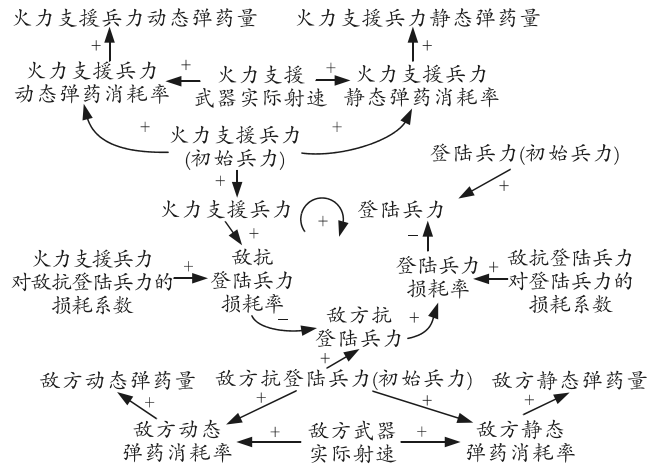


图 2 弹药消耗因果关系

2.3 弹药消耗 SD 流图及其说明

通过对图 2 所体现的实际作战中出现的弹药消耗因果关系分析，可得出基于 Lanchester 平方律交战模型的弹药消耗 SD 流图如图 3 所示。

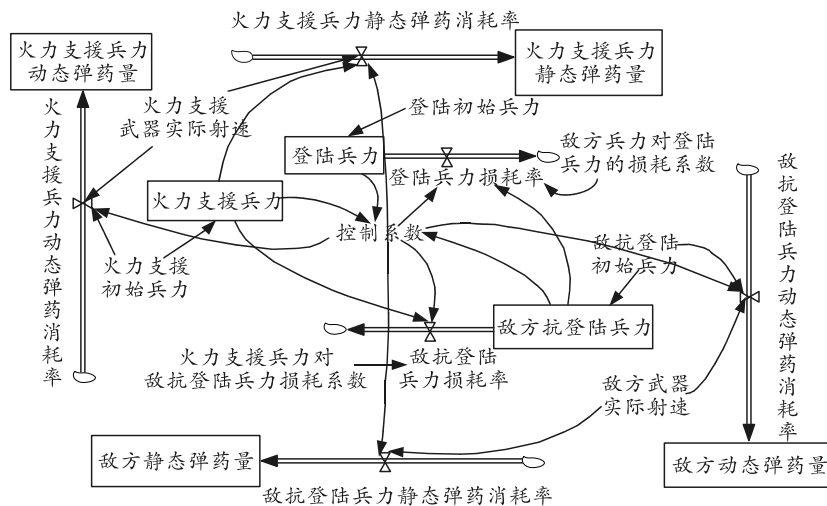


图 3 对抗条件下的弹药消耗模型 SD 流图

图中共有 22 个变量，其中，有 7 个状态变量，7 个常量，7 个速率变量，以及 1 个控制系数^[16-20]。在此设置控制系数是为了避免发生当对抗双方兵力值出现 0 或负值后，仍在进行模拟计算的情形。

模型中敌我双方兵力状态变化、速率变化及其方程分别为：

我方登陆兵力=INTEG(-我方登陆兵力损耗率，我方登陆兵力初始值)；

敌方抗登陆兵力=INTEG(-敌方抗登陆兵力损耗率，敌方抗登陆兵力初始值)；

静态火力支援弹药量=INTEG(+静态火力支援弹药消耗率，0)；

动态火力支援弹药量=INTEG(+动态火力支援弹药消耗率，0)；

我方登陆兵力损耗率=(敌方兵力对登陆兵力的损耗系数×敌方抗登陆兵力×控制系数)；

敌方抗登陆兵力损耗率=(火力支援兵力对敌抗登陆兵力的损耗系数×火力支援兵力数量×控制系数)；

静态火力支援弹药消耗率=(火力支援兵力数量×各型火力支援武器实际射速×控制系数)；

动态火力支援弹药消耗率=(火力支援初始值×各型火力支援武器实际射速×控制系数)；

控制系数=IF THEN ELSE(红方兵力≤0,0, IF THEN ELSE(敌方抗登陆兵力≤0,0,1))；

以上各式中：INTEL 是积分运算符；IF THEN ELSE 是条件判断语句。

一般情况下，为了便于模拟仿真实验的操作，

通常会对基础数据进行标准化的处理。对上述 SD 模型中常量设置具体的初始值，有助于直观地对仿真实验出现的结果进行分析。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验

两栖作战中，在泛水编波、兵力输送及突击上陆阶段，我方登陆兵力通常会暴露在敌抗登陆火力体系的打击范围内。由于客观条件的制约，仅依靠自身火力实现与敌方抗登陆防御体系的对抗实则收效甚微，并且受到的威胁通常较大；因此，我方支援兵力对登陆兵力实施火力支援，对敌方抗登陆目标实施火力打击。同时为了便于分析，可认为敌方抗登陆兵力的主要任务是阻止我方兵力抢滩登陆，对我火力支援兵力将不构成直接的威胁。

根据上述作战客观情况，对仿真实验初始参数进行设置，设 $R_1(0)=2\ 000$ ， $B(0)=1\ 000$ ， $\alpha_1=0.1$ ， $\alpha_2=0.1$ ， $\beta_1=0.055$ ， $\beta_2=0.088$ 。根据我方初始火力支援兵力与登陆兵力的比例变化，对我方弹药消耗规律进行仿真实验，仿真实验的结果如图 4、5。

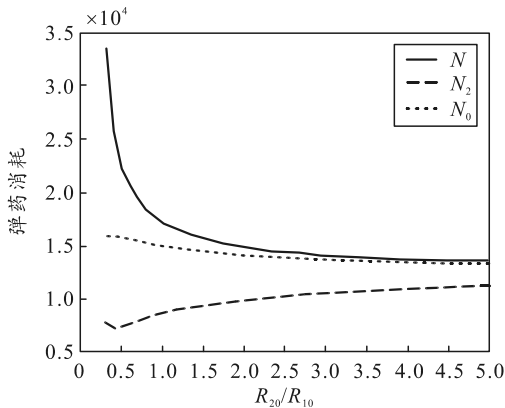


图 4 弹药变化

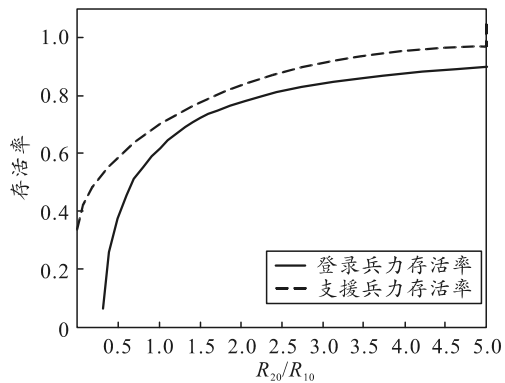


图 5 兵力存活率变化

3.2 结果分析

由图 4 可知：1) 我方兵力总体静态弹药量消耗

与初始兵力之间的比例没有直接关系，无论我方初始火力支援兵力增加与否，消灭敌方兵力的弹药总量都不会产生变化，这与基于目标火力毁伤弹药需求的理论相吻合。2) 随着我方火力支援初始兵力与登陆初始兵力比值的增加，尽管火力支援兵力消耗的弹药量在不断增加，但动态弹药消耗总量在逐渐减小，最终将趋近总体静态弹药量的数值。

从图 5 可知：随着我方火力支援初始兵力与登陆初始兵力比值的增大，我方登陆兵力及火力支援兵力的存活率也在不断增加。在理想情况下，当我方火力支援初始兵力与登陆初始兵力比值大于一定的数值时，我方兵力的损耗小到可以忽略不计。例如，在仿真结果中为了保证我方登陆兵力至少 70% 的存活率时，我方火力支援兵力至少为登陆兵力的 1.4 倍，至少投入标准弹药 9 250 发。

4 结论

笔者根据两栖对岸火力支援作战实际需要，从宏观层面运用系统动力学构建了对岸火力支援弹药消耗 SD 模型。通过对两栖登陆作战典型案例进行仿真验证得出：增加我方火力支援兵力的投入量可增强对敌岸上目标的毁伤率，从而达到减少我方动态弹药消耗总量的目的；在实际作战中，可将我方登陆兵力的损耗控制在可接受的范围内，从而为确定我方火力支援兵力和弹药投入量提供理论依据。

参考文献：

- [1] 郑津生, 欧阳豪. 炮兵火力毁伤指标体系研究与应用[J]. 火力与指挥控制, 2004: 29(3): 95-98.
- [2] 郑津生, 王东亚, 贺汉高. 联合战役火力毁伤指标体系研究[J]. 火力与指挥控制, 2005: 30(3): 115-119.
- [3] 张最良, 李长生, 赵文志. 军事运筹学[M]. 北京: 军事出版社, 1993: 67-76.
- [4] 俞杰, 沈寿林, 王三喜. 基于 BP 神经网络算法的弹药需求仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2734-2736.
- [5] JIANG C S, CHEN M. Adaptive H Control of Nonlinear Systems with Neural Networks[J]. Chinese Journal of Aeronautics. 2003, 16(1): 36-41.
- [6] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 31-40.
- [7] 郭浩波, 王颖龙. 兵力需求系统动力学模型研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 10(5): 84-90.
- [8] 郝海飞, 王京鸣. 炮兵弹药动态消耗规律[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(3): 41-43.

和定期检测策略下基于蒙特卡罗仿真计算评价指标的方法和流程,并以评价制动器摩擦盘定期检测间隔期为例,验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] XU A, QIAO X. On the Optimizing Maintenance Intervals of Transport Vehicles[C]//International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM) 2010.

[2] 李燕燕. 汽车变速器可靠性分析及维修决策系统软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 47-49.

[3] 周刚. 车辆装备单部件系统定时更换间隔期研究[D]. 天津: 陆军军事交通学院, 2018: 28-32.

(上接第 70 页)

[6] 李振. 弹炮耦合中若干因素对弹丸起始扰动的影响分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 8-14.

[7] 黄银柳, 陶如意, 王骁, 等. 某异形弹丸的气动特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 42-45.

(上接第 78 页)

[9] FORRESTER J W. Lesson From System Dynamic Modeling[J]. System Dynamic Review, 1987, 3(2): 136-149.

[10] LEE Z J, Lee C Y, SU S F. An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem[J]. Applied Soft Compting, 2002, 2(1): 39-47.

[11] LIU B, QIN Z, WANG R, et al. A hybrid heuristic ant colony system for coordinated multi-target assignment[J]. Information Technology Journal, 2009, 8(2): 156-164.

[12] 林炜, 屈洋, 刘洪坤. 基于 SD 的两栖坦克连水上火力支援行动分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 6-8.

[13] 葛涛, 朱小冬, 高鲁. 基于消耗规律的战时弹药供应计划优化研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 68-71.

[14] 付东, 方程, 王震雷. 作战能力与作战效能评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 30(12): 57-58.

[15] QUINLAN S, KHATIB O. Elastic Bands Connecting Path

[4] 周斌, 封会娟, 杨万成, 等. 军用车辆维修工程: 第一分册 基础理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2016: 1.

[5] 周刚, 唐彦峰, 封会娟. 车辆装备单部件系统定时更换间隔期研究[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(7): 28-32.

[6] 文建国, 孙作佩, 陈争新. 基于故障树的蒙特卡罗仿真在可靠性评估中的应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(1): 88-92.

[7] 许一帆, 曾杨智, 朱万红. 电磁防护对装甲车辆效能评估的影响[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 71-73.

[8] 张星, 郝立山, 李华. 战时装备抢修业务流程框架建模研究[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(5): 116-119.

[8] 殷军辉. 基于弹带微观组织分析的弹炮耦合建模与弹丸起始扰动多目标优化研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011: 20.

[9] 曹营修, 郑立评, 朱建杰, 等. 基于四目曲柄链式结构的火炮窥膛装置[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 16-19.

Planning and Robot Control[C]. The Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, GA, 1993: 802-807.

[16] 俞杰, 王三喜, 沈寿林, 等. 基于 SD 模型的弹药消耗规律研究[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 154-157.

[17] 王三喜, 俞杰, 夏新民. 联合火力打击弹药需求计算动态模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2009: 33(10): 99-102.

[18] CHASPARIS G C, SHAMMA J S. Linear-Programming-Based Multi-vehicle Path Planning with Adversaries[C]. Proceedings of 2005 American Control Conference, 2005: 1072-1077.

[19] LEE S, PARK J. Neural computation for Collision Free Path Planning[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, 2(1): 315-326.

[20] RAVINDRA KA, AHUJA K, KRISHNACJ, et al. Exact and Heuristic Algorithms for Weapon-warget Assignment Problem[J]. Operations Research, 2007, 55(6): 1136-1146.