

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.021

基于蒙特卡罗仿真评价车辆装备预防性维修间隔期方法

赵星贺¹, 周斌², 封会娟², 许凯¹, 张衡¹

(1. 陆军军事交通学院研究生队, 天津 300161; 2. 陆军军事交通学院投送装备保障系, 天津 300161)

摘要: 为解决在理论研究阶段利用试行方法评价车辆装备关键零部件预防性维修间隔期可操作性较低的问题, 提出基于蒙特卡罗仿真评估预防性维修间隔期的方法和流程。选取评价车辆装备关键零部件预防性维修间隔期效果的指标, 阐述车辆装备关键零部件定期更换和定期检测策略, 以评价制动器摩擦盘预防性维修间隔期为例进行分析验证。结果表明, 该方法能有效对车辆装备预防性维修间隔期维修效能作出定量评价。

关键词: 车辆装备; 预防性维修间隔期; 效果评估; 蒙特卡罗仿真

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Preventive Maintenance Interval of Vehicle Equipment Based on Monte Carlo Simulation

Zhao Xinghe¹, Zhou Bin², Feng Huijuan², Xu Kai¹, Zhang Heng¹

(1. Brigade of Postgraduate, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

2. Department of Projecting Equipment Support, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

Abstract: Aiming at the low operability of evaluating preventive maintenance interval by using test method in the theoretical research stage, an evaluation method based on Monte-Carlo simulation evaluation is proposed. Select evaluation index for preventive maintenance interval, introduce the strategy of vehicle equipment key parts periodic replacing and detecting, carry out analysis and validation based on friction disc preventive maintenance interval. The results show that the method can effectively carry out quantitative evaluation for vehicle equipment preventive maintenance interval.

Keywords: vehicle equipment; preventive maintenance interval; effect evaluation; Monte-Carlo simulation

0 引言

车辆装备故障关键零部件可能危害驾驶员人身安全、延误工作任务、增加维修保障负担。为了最大限度避免关键零部件故障发生, 车辆装备使用单位普遍采用定期更换和定期检测关键零部件的预防性维修策略。过去, 专家学者针对预防性维修间隔期决策问题开展了深入研究, 利用数学模型决策法确定了车辆装备关键零部件最优预防性维修间隔期^[1-3], 但是在评估预防性维修间隔期是否合理有效的问题上却没有简单可靠的方法。当前, 为了评价车辆装备预防性维修间隔期效果, 需要将其推广到车辆装备日常维修活动中试行一段时间, 之后, 通过分析实际故障数据得出评价。大范围试行统筹难度极大、所耗成本较高; 小范围试行故障数据说服力不足、所需周期较长, 在理论研究阶段试行方法的可操作性较低。笔者基于蒙特卡罗仿真, 提出评价车辆装备关键零部件定期更换和定期检测间隔期的方法, 为评估车辆装备预防性维修间隔期提供了一种思路。

1 理论基础

1.1 评价指标

评价是用来衡量某项工作对预定目标实现程度的常用手段, 可以通过判断车辆装备关键零部件在某预防性维修间隔期下开展预防性维修工作是否达到预防性维修的预期目标, 实现对预防性维修间隔期效果的评价。车辆装备关键零部件预防性维修的目标是以最低的寿命周期费用和资源消耗, 充分保持和恢复车辆装备的战术技术性能, 保证其战备完好性和作战训练任务的完成^[4]。其中寿命周期费用和资源消耗较为直观, 可以用车辆装备单时间维修费用衡量。战备完好性可以使用可用度指标衡量, 使用可用度越高, 证明车辆装备可用工作时间越长, 车辆装备随时随地都可以执行任务的反应能力更强。作战训练任务完成能力可以用可靠度指标衡量, 可靠度越高, 证明车辆装备遂行长时间工作的能力越强。假设车辆装备关键零部件故障会导致车辆装备故障, 因此, 选取单位时间维修费用、使用可用

收稿日期: 2019-06-05; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 军内装备科研

作者简介: 赵星贺(1994—), 男, 河北人, 硕士, 从事军用车辆检测诊断研究。E-mail: 408705028@qq.com。

度和可靠度作为车辆装备关键零部件预防性维修间隔期的评价指标，其计算方法如表 1^[5]所示。

表 1 评价指标计算公式

评价指标	单位时间维修费用 C	使用可用度 A	可靠度 R
计算公式	$C = \frac{\text{使用周期内预防性维修费用} + \text{使用周期内修复性维修费用}}{\text{使用周期长度}}$	$A = \frac{\text{使用周期内实际工作时间}}{\text{使用周期长度}}$	$R = P(\text{使用周期内正常工作})$

1.2 蒙特卡罗仿真

蒙特卡罗仿真是一种离散事件仿真方法。在仿真过程中利用随机变量表示实际所发生的真实事件，通过不断重复该动作获得事件的统计规律。蒙特卡罗仿真流程如图 1^[6]所示。

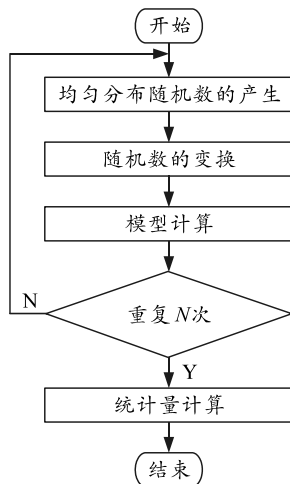


图 1 蒙特卡罗仿真流程

在利用蒙特卡罗仿真评价车辆装备预防性维修间隔期时，依据车辆装备关键零部件故障规律生成大量随机数据来仿真其实际使用寿命，之后逐一计算并记录车辆装备关键零部件在每一个仿真寿命下的单位时间维修费用、使用可用度和可靠度，最后对大量仿真结果进行统计、分析、对比，作出对车辆装备关键零部件预防性维修间隔期的评价^[7]。

2 定期更换间隔期评价

2.1 定期更换策略

定期更换策略是指以固定的时间间隔 T 对车辆装备关键零部件实施定期更换(如图 2(a)所示)，期间若关键零部件故障则立刻实施故障更换(如图 2(b)所示)。

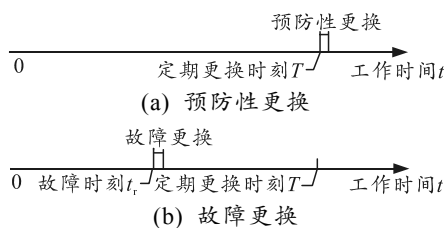


图 2 定期更换策略

2.2 评价指标计算

在定期更换策略下，车辆装备修理工作流程如图 3^[8]所示。设定车辆装备关键零部件故障概率函数为 $F(t)$ ，定期更换间隔期为 T 。实施预防性更换工作时车辆装备送修费用为 C_{tra} ，所需时间为 T_{tra} ；搭设维修环境和召集维修技术人员费用为 C_{sup} ，所需时间为 T_{sup} ；筹措器材费用为 C_{equ} ，所需时间 T_{equ} ；维修作业费用为 C_{hum} ，所需时间 T_{hum} 。实施故障更换工作时车辆装备送修费用为 C_{ftra} ，所需时间为 T_{ftra} ；搭设维修环境和召集维修技术人员费用为 C_{fsup} ，所需时间为 T_{fsup} ；筹措器材费用为 C_{fequ} ，所需时间 T_{fequ} ；维修作业费用为 C_{fhum} ，所需时间 T_{fhum} 。

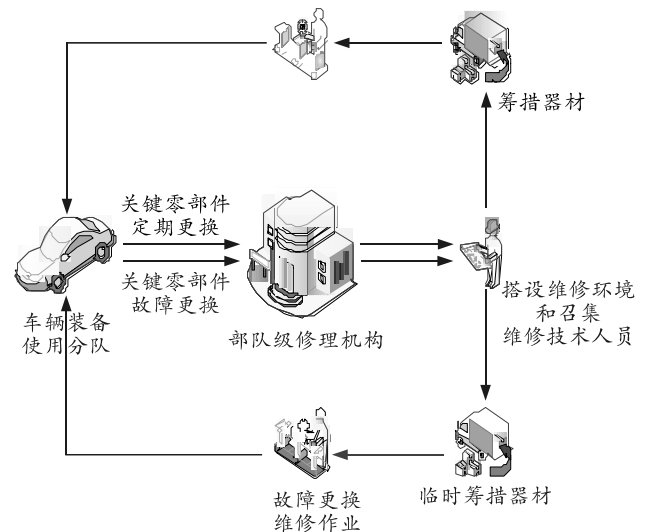


图 3 定期更换策略下车辆装备修理工作流程

在一次仿真实验中，依据车辆装备关键零部件故障时间分布函数 $F(t)$ ，随机生成关键零部件寿命 t 。当 $t \leq T$ 时，关键零部件故障，立刻实施故障更换。此时关键零部件单位时间维修费用

$$C = \frac{C_{tra} + C_{sup} + C_{equ} + C_{hum}}{t + T_{tra} + T_{sup} + T_{equ} + T_{hum}}$$

$$A = \frac{t}{t + T_{tra} + T_{sup} + T_{equ} + T_{hum}}$$

当 $t > T$ 时，关键零部件在定期更换周期 T 内未发生故障，实施预防性更换。此时由于预防性更换工作具备计划性，部队级修理机构可以依据车辆装

备预防性维修大纲提前搭建维修环境、召集维修技术人员，并且进行一次前期筹备工作可以完成多辆车辆装备关键零部件的预防性更换，在计算关键零部件单位时间维修费用和可用度时，上述工作成本和时间分摊到一辆车辆装备上可以忽略不计。由于车辆装备在预防性维修工作前仍具备正常工作的能力，其送修时间也可忽略不计。因此，单位时间维修费用 $C = \frac{C_{equ} + C_{hum}}{T + T_{hum}}$ ，使用可用度 $A = \frac{T}{T + T_{hum}}$ 。

在全部仿真实验结束后，关键零部件平均单位时间维修费用 $\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^N C}{N}$ ，平均使用可用度 $\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A}{N}$ ，可靠度 $R = \frac{\text{count}(t > T)}{N}$ 。

综上所述，基于蒙特卡罗仿真评价车辆装备关键零部件定期更换间隔期流程如图 4 所示。

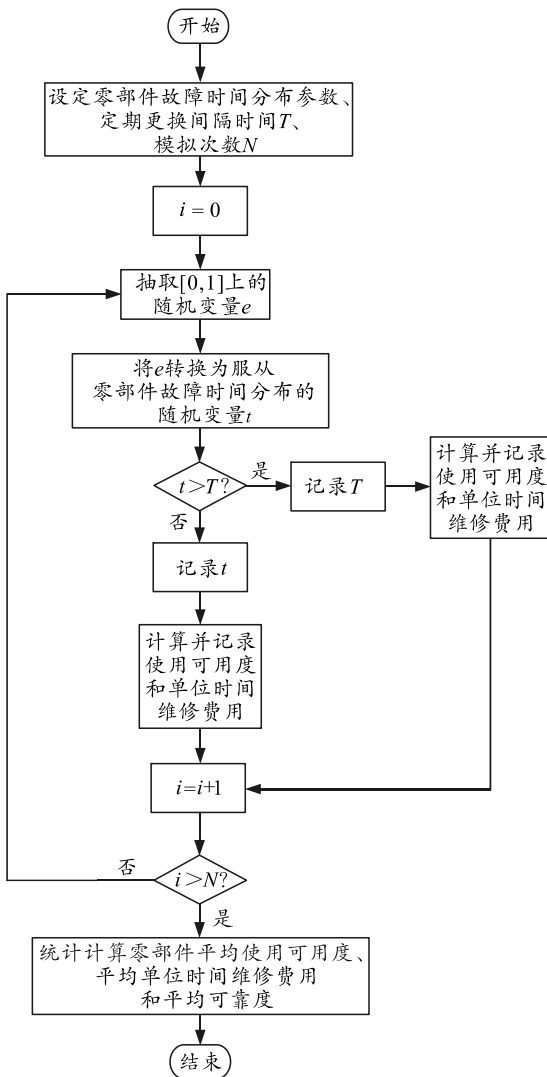


图 4 评价车辆装备关键零部件定期更换间隔期流程

3 定期检测间隔期评价

3.1 定期检测策略

定期检测策略是指以固定的时间间隔对车辆装备关键零部件实施定期检测。假设以 T_1 为定期检测间隔期对车辆装备关键零部件实施第一次定期检测，之后以 T 为定期检测间隔期实施定期检测，期间若检测到关键零部件发生潜在故障立刻实施检测更换(如图 5(a)所示)，若关键零部件发生故障则立刻实施故障更换(如图 5(b)所示)。

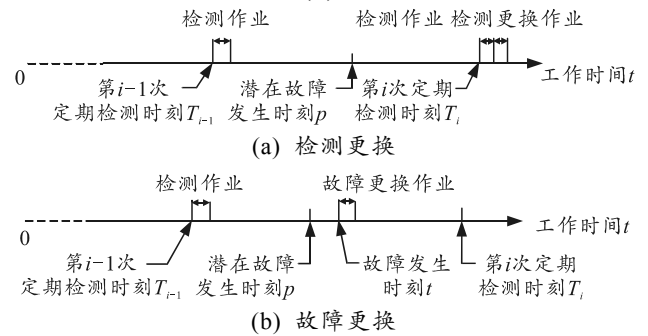


图 5 定期检测策略

3.2 评价指标计算

在定期检测策略下，车辆装备修理工作流程如图 6 所示。设定关键零部件发生潜在故障的时刻为 p ， p 的分布函数为 $F(p)$ ；关键零部件由潜在故障劣化到故障耗时为 h ， h 的分布函数为 $G(h)$ ；关键零部件实施定期检测费用为 C_{test} ，所需时间为 T_{test} ；检测更换费用为 C_{thum} ，所需时间为 T_{thum} ；其余参数设定同 2.2 节。

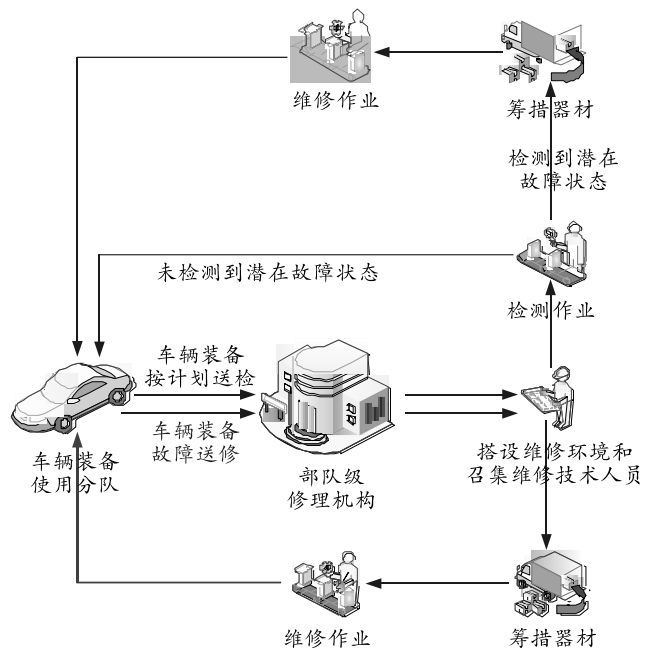


图 6 定期检测策略下车辆装备修理工作流程

在一次仿真实验中，依据 $F(p)$ 和 $G(h)$ 随机生成潜在故障发生时间 p 和劣化时间 h 。当 $T_{i-1} < p < T_i$ 且 $p+h > T_i$ 时，第 i 次定期检测可以检测关键零部件处于潜在故障状态，实施检测更换。其 $T_i = T_1 + (i-1) \times T$ ， $i = \left\lceil \frac{p-T_1}{T} + 2 \right\rceil$ （“ $\lceil x \rceil$ ”为取整运算符号，指不超过实数 x 的最大整数），特别的，当 $T_0 < p < T_1$ 时， $i=1$ 。该情况下，关键零部件已经实施了 $i-1$ 次定期检测作业，并将要实施 1 次定期检测作业和 1 次检测更换作业。关键零部件使用可用度

$$A = \frac{T_i + (i-1) \times T - (i-1) \times T_{\text{test}}}{T_i + (i-1) \times T + T_{\text{test}} + T_{\text{thum}}}$$

$$C = \frac{i \times C_{\text{test}} + C_{\text{equ}} + C_{\text{hum}}}{T_i + (i-1) \times T + T_{\text{test}} + T_{\text{thum}}}$$

当 $T_{i-1} < p < T_i$ 且 $p+h \leq T_i$ 时，关键零部件在第 $i-1$ 次至第 i 次定期检测间的 $p+h$ 发生故障，实施故障更换。该情况下，关键零部件已经实施了 $i-1$ 次定期检测作业并将要 1 次故障更换作业。关键零部件使用可用度

$$A = \frac{p+h - (i-1) \times T_{\text{test}}}{p+h + T_{\text{fra}} + T_{\text{fsup}} + T_{\text{fequ}} + T_{\text{fhum}}}$$

$$C = \frac{(i-1) \times C_{\text{test}} + C_{\text{fra}} + C_{\text{fsup}} + C_{\text{fequ}} + C_{\text{fhum}}}{p+h + T_{\text{fra}} + T_{\text{fsup}} + T_{\text{fequ}} + T_{\text{fhum}}}$$

在全部仿真实验结束后，关键零部件平均单位时间维修费用 $\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^N C}{N}$ ，平均单位时间维修费用 $\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A}{N}$ ，可靠度 $R = \text{count}(T_{i-1} < p < T_i \cap p+h > T_i) / N$ 。

表 2 制动器摩擦片维修参数

项目	$C_{\text{eqp}}/\text{元}$	$C_{\text{hum}}/\text{元}$	T_{hum}/h	$C_{\text{fra}}/\text{元}$	T_{fra}/h	$C_{\text{fsup}}/\text{元}$	T_{fsup}/h	$C_{\text{fequ}}/\text{元}$	T_{fequ}/h	$C_{\text{fhum}}/\text{元}$	T_{fhum}/h	$C_{\text{trst}}/\text{元}$	T_{trst}/h	$C_{\text{thum}}/\text{元}$	T_{thum}/h
参数	156	40	2	150	12	30	1	186	72	60	3	30	1	35	1.5

经数学决策模型决策后，确定 (547 d, 182 d) 为制动器摩擦片最优定期检测间隔期。基于笔者所述方法，分别对传统定期检测间隔期和模型决策确定的定期检测间隔期进行 10 000 次蒙特卡罗仿真。统计评价指标如表 3 所示。

表 3 制动器摩擦片维修参数

间隔期/d	单位时间维修费用/元	可用度	可靠度
传统间隔期(730, 365)	0.484 2	0.997 2	0.488 5
优化间隔期(547, 182)	0.411 7	0.999 2	0.888 1
改变量/%	-14.95	+0.2	+81.80

综上所述，基于蒙特卡罗仿真评价车辆装备关键零部件定期检测间隔期流程如图 7 所示。

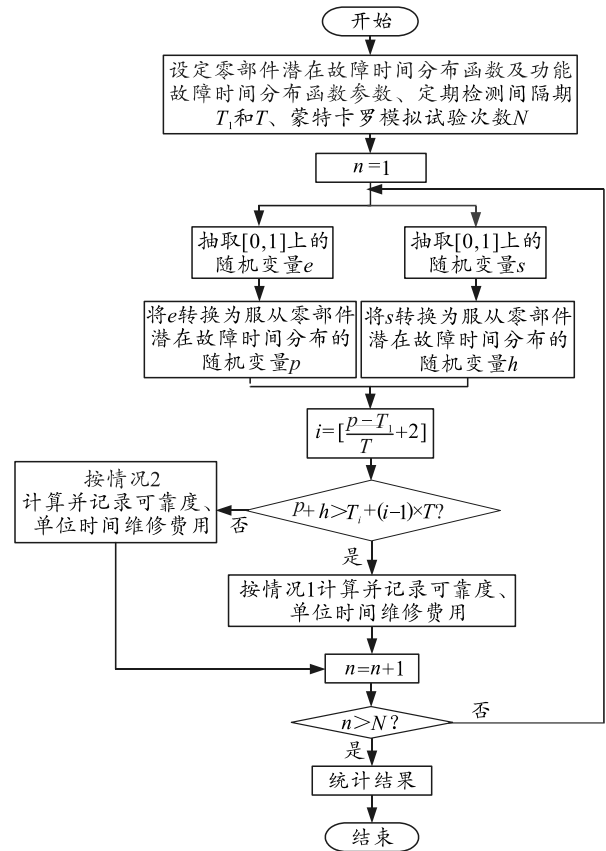


图 7 评价车辆装备关键零部件定期检测间隔期流程

4 示例分析

假设某型车辆装备制动器摩擦片潜在故障发生时刻 p 服从形状参数为 3.5、特征寿命为 674 的两参数威布尔分布，劣化时间 h 服从形状参数为 2.5、特征寿命为 202 的两参数威布尔分布，部队级修理机构过去以 (730 d, 365 d) 为定期检测间隔期对制动器摩擦片实施定期检测。相关维修参数如表 2 所示。

从表中可以发现：除使用可用度由于预防性维修所耗时间相对车辆装备使用时间较短始终保持较高水平外，单位时间维修费用和可靠度均有较大水平的改善，证明基于模型决策确定的定期检测间隔期开展预防性维修工作能够有效提高车辆装备维修效能。

5 结束语

笔者选取了关键零部件单位时间维修费用、使用可用度、可靠度作为评价指标，提出在定期更换

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.