

典型作战流程和分级环境下发射车生存能力改进 ADC 评估模型

王冬,高钦和*,黄通,刘志浩

(火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要:为了综合评估发射车在作战中的生存能力,区分参数-性能-能力-效能四个层次建立武器装备评估空间,构建对象、内容和层次三个维度的评估框架,划分五类自然环境、三级威胁环境和三种作战状态,将外界环境引入评估过程,用被发现概率和损毁概率表征发射车隐蔽伪装能力和抗毁防护能力,建立发射车作战状态转移概率矩阵,提出典型作战流程和分级环境下的发射车生存能力改进可靠性、可信性、可用性综合评估模型。通过仿真分析,在不同环境和作战状态下各型发射车生存能力差异明显,模型能在性能空间、环境空间、作战流程空间多个维度动态评估发射车的生存能力,为发射车性能设计、战场运用提出量化和优化建议。

关键词:作战流程;分级环境;发射车;生存能力

中图分类号:E92 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2024)01-222-09



听语音
与作者互动
聊科研

Improved ADC model for launch vehicle survivability in typical combat flow and graded environment

WANG Dong, GAO Qinhe*, HUANG Tong, LIU Zhihao

(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the survivability of launch vehicles in combat, a weapon equipment evaluation space was established by distinguishing parameters-performance-capability-effectiveness at four levels. In view of the survivability assessment of launch vehicles, graded five types of natural environment, three levels of threat environment and three kinds of combat flow status, the impact of external environment was taken as the necessary conditions of effectiveness evaluation, and an evaluation framework of three dimensions of object, content and level was constructed. The detection probability and damage probability were used to characterize the camouflage ability and anti-damage protection ability of launch vehicles, and the continuous transfer probability matrix of launch vehicles' combat status was established. A comprehensive evaluation model of launch vehicle based on improved availability, dependability, capability model under typical combat flow and graded environment was proposed. Through simulation analysis, the survivability of various launch vehicles varies significantly in different environments and combat status, the model can dynamically evaluate the survivability of launch vehicles from multiple dimensions of performance space, environment space and combat flow space, and put forward optimization and quantitative suggestions for the performance design and battlefield application of launch vehicles.

Keywords: combat flow; graded environment; launch vehicle; survivability

武器装备在预研、设计和运用中,通过横向评估不同武器装备应用性能的优劣,纵向评估同一武器在不同场景下的适用性,能够为武器设计运用提供科学依据和决策建议。武器装备评估研究具有不同的层次区分,美国 MIL-STD-721B 文件^[1]将其分为尺度参数(dimensional parameters, DPs)、性能度量(measures of performance, MOPs)、效能度量(measures of effectiveness, MOEs)和作战

力量效能度量(measures of force effectiveness, MOFEs)四个层次;在此基础上,周玉臣等^[2]进一步定义了尺度参数、性能指标、能力指标、效能指标及其关系;文献^[3-4]对作战能力和作战效能的内涵也进行了详细的分析。但以武器装备为中心的各层次评估内涵和边界的描述还不太清晰。

发射车的运用特点决定了其作战能力很大程度取决于突击之前的生存能力。邓岳等^[5]采用层

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905541);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JQ487)

第一作者:王冬(1985—),男,河南镇平人,博士研究生,E-mail:dong_2021201@163.com

*通信作者:高钦和(1968—),男,山东沂南人,教授,博士,博士生导师,E-mail:rgao_201@163.com

次分析法分析了影响电源车战场生存的主要因素。诸多文献^[6-10]从不同角度适应系统或体系能力效能评估需求,提出了一些改进可靠性、可信性、可用性(availability, dependability, capability, ADC)评估方法。但对外界环境影响因素的考虑不多,评估结果在实战环境下的应用还有一定的局限性。

综上所述,本文就武器装备评估层次的内涵、边界及空间关系进行论述,定义了发射车生存能力,将自然和威胁环境分级引入评估过程,用被发现概率和损毁概率构造连续转移概率矩阵,对ADC模型进行改进,提出发射车在典型作战流程和分级环境下的生存能力综合评估模型。

1 武器装备评估层次及框架

1.1 评估层次关系及空间构建

武器装备评估四个层次区分及内涵如图 1 所示。四级指标因素集相应构成四级评价空间,评估是从底层逐步向高层空间聚合的过程。

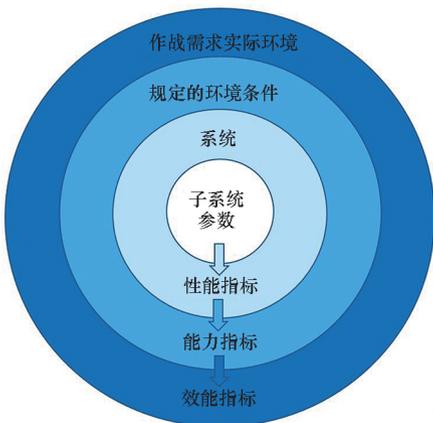


图 1 评估指标层次关系

Fig. 1 Hierarchical relationship of evaluation indicators

1) 参数表示武器装备结构和行为的固有属性或特征,如材料、重量、尺寸等。设有 n 个与武器装备某项性能有关且相互独立的参数 x_1, x_2, \dots, x_n , 其中 $x_i \in \delta$ 为该参数的可取范围, x_i 为所有参数值在允许范围内的任意组合矢量,则参数空间表示为 $S_{pa} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\}$ 。

2) 性能是由系统固有的物理结构参数决定的反映武器装备行为属性的定量化指标,如机动速度、探测区域、使用寿命等。性能空间是参数空间某种物理关系的映射,表示为 $S_{pe} = f(S_{pa})$,性能指标仅依赖于参数空间。参数空间与性能空间关系如图 2 所示,一个二维参数空间通过映射 f 可得对应的性能空间。

3) 能力表示武器装备性能在规定的

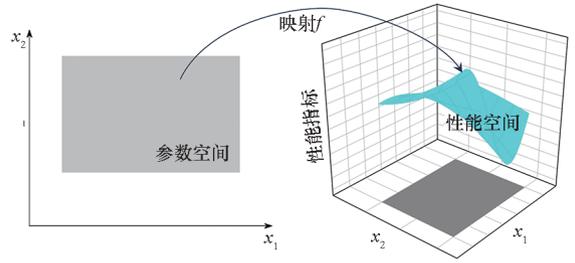


图 2 参数空间与性能空间

Fig. 2 Parameter space and performance space

下所具有的本领,由任一合理反映本领大小的数值量化表示。规定的外界环境包括自然环境和威胁环境,是一组相对离散的环境条件的集合,包括极限环境条件和按一定规则的分级条件。能力空间是性能空间元素在规定环境条件下形成的能力水平的集合,是装备自身性能和规定环境条件的函数,表示为 $S_{ca} = g(S_{pe}, S_{se})$ 。不同分级环境下能力度量大小如图 3 所示,一定性能的武器装备,在 6 个强度逐步提升的环境下,完成任务能力逐步下降。

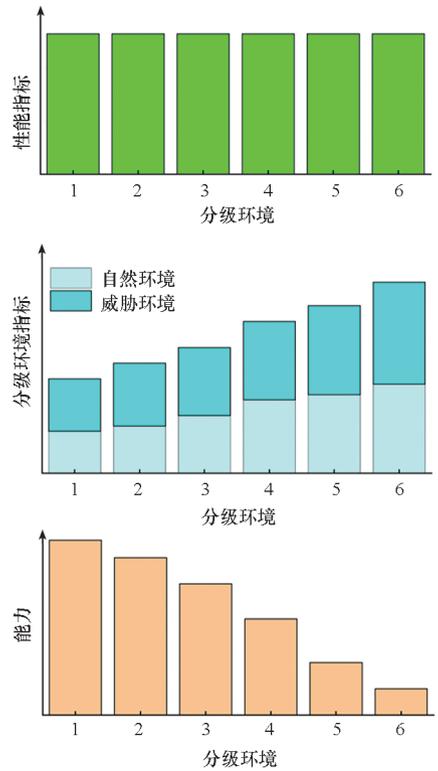


图 3 不同分级环境下的能力度量

Fig. 3 Measure of capacity under different graded environment

4) 效能表示武器装备性能在实际作战需求的外界环境下完成任务的程度,由实际能完成任务量与作战需求完成的任务量的比值量化表征,即 $E_f = \min \{N_{ture}/N_{need}, 1\}$ 。实际作战需求环境条件是作战流程中随时间连续变化的自然环境和威胁环境指标或函数的集合。效能空间是性能空间

和实际需求环境的函数,表示为 $S_{ef} = h(S_{pe}, S_{re})$ 。不同任务时间下的效能度量如图 4 所示,随着任务的推进,武器装备老化导致性能指标逐步衰减,在随机变化的自然环境和逐步恶劣的威胁环境下,任务完成度逐步降低,效能逐步下降。

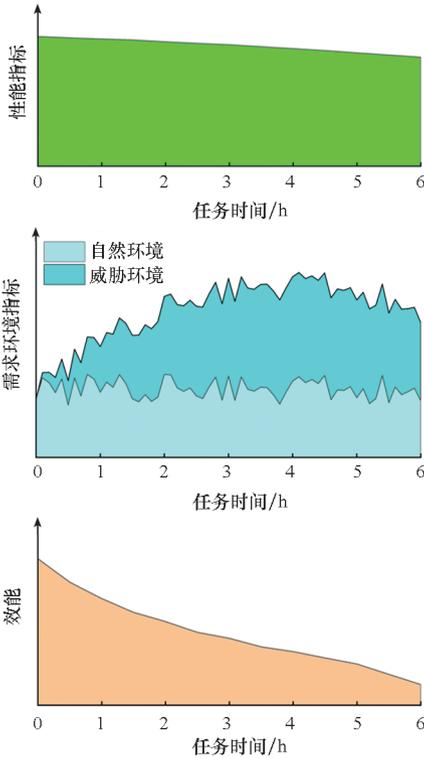


图 4 不同任务时间下的效能度量

Fig.4 Measure of effectiveness under different mission time

1.2 武器系统评估框架

定义了四层评估空间后,对武器装备系统或体系需要从评估内容和对象两个方面明确空间边界。评估内容根据需求确定,可以是作战应用、生存分析、抗毁防护或隐蔽伪装等任何内容。评估对象根据系统工程理论、武器装备可抽象为四级^[11]:体系级,由功能上相互联系、互相补充的武器系统在统一的联合指挥和保障下耦合而成的具有某种作战能力的大系统;系统级,不同功能的武器平台按一定的数量配比关系,构成具有编制特征的系统;平台级,不同作战能力的武器单元与搭载工具,为完成任务而组成的武器平台;单元级,具有独立功能的武器装备组件实体或子系统。评估的对象、内容和层次三个维度构成了武器装备评估框架,如图 5 所示。

有关武器装备的评估都可以据此框架进行定义和区分。相应的在发射车生存能力评估中:评估对象为发射车,包括武器系统及其搭载平台;评估内容为生存,即保持完成发射任务的功能;评估层次为能力,即在不同外界环境条件下保持生存

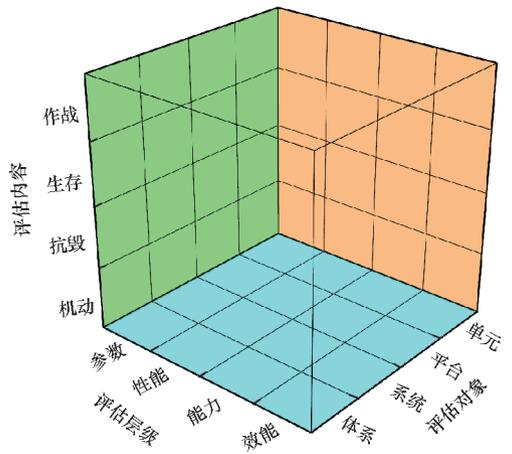


图 5 武器装备评估框架

Fig.5 Evaluation framework for weapons and equipment

的本领大小。因此,发射车生存能力定义为:在规定的自然和威胁环境下,发射车生存并保持导弹发射功能的能力。

2 环境分级和作战流程描述

发射车的生存性能取决于隐蔽伪装、抗毁防护、机动行驶和快速发射四种性能,这些性能在规定的自然和威胁环境下表现为对应的四种能力,在作战流程中耦合形成生存能力。因此在评估生存能力前要对自然、威胁环境及作战流程进行描述。

2.1 环境分级

自然环境以国内典型气候区域划分,取天气气象、地形地貌和道路交通三类与生存性能有关的参数,区分高原丘陵、戈壁草甸、热带雨林、亚热带山地和温带严寒构建五类代表性环境条件。自然环境特征参量表示为向量 $L_i = [l_{i1} \ l_{i2} \ \dots \ l_{in}]$, $1 \leq i \leq 5$,式中下标 in 表示第 i 类自然环境下的第 n 个特征参数,如温度、湿度、云层厚度等。对应各类自然环境空间表示为 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_5\}$ 。

威胁环境包括主要对手侦察和杀伤手段,从发射车的作战特点和可能面临的威胁,区分不同的方式和手段,取与生存能力有关的敌方武器性能参数,按照三级强度进行威胁环境分级。侦察威胁环境特征参量表示为向量 $S_j = [s_{j1} \ s_{j2} \ \dots \ s_{jm}]$, $1 \leq j \leq 3$,式中下标 jm 表示第 j 级侦察威胁环境下的第 m 个特征参数,分级侦察威胁环境空间表示为 $S = \{S_1, S_2, S_3\}$;杀伤威胁环境特征参量表示为向量 $U_k = [u_{k1} \ u_{k2} \ \dots \ u_{ko}]$, $1 \leq k \leq 3$,式中下标 ko 表示第 k 级杀伤威胁环境下的第 o 个特征参数,分级杀伤威胁环境空间表示为 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ 。威胁环境分级如表 1 所示。

表 1 威胁环境分级

Tab.1 Grade of threat environment

威胁环境	种类	参数	级别
侦察威胁	光学	侦察频率、侦察时长、分辨率	1 级侦察威胁 S_1
	红外	侦察频率、侦察时长、分辨率	2 级侦察威胁 S_2
	雷达	侦察频率、侦察时长、反射率	3 级侦察威胁 S_3
杀伤威胁	超压动压	当量、圆概率	1 级杀伤威胁 U_1
	侵彻破片	偏差、爆炸方式	2 级杀伤威胁 U_2
	温压燃烧	偏差、爆炸方式	3 级杀伤威胁 U_3

自然环境和威胁环境综合表征为分级环境空间 $B = L \cup S \cup U = \{B_1, \dots, B_{45}\}$, $B_z = \{L_i, S_j, U_k\}$, $1 \leq i \leq 5, 1 \leq j \leq 3, 1 \leq k \leq 3, 1 \leq z \leq 45$, 其中 B_z 为第 z 级环境特征向量, 且为五类自然环境、三级侦察威胁环境和三级杀伤威胁环境的任意组合, 共分 45 级。

2.2 分级环境下能力表征

发射车隐蔽伪装能力是其隐蔽性能 C_{sc} 在自然环境 L_i 和侦察威胁环境 S_j 下的综合表征, 使用被发现概率进行度量, 即 $P_f = h_1(C_{sc}, L_i, S_j)$ 。

发射车抗毁防护能力是其抗毁性能 C_{da} 在杀伤威胁环境 U_k 下的综合表征, 使用损毁概率进行度量, 损毁定义为发射车整体或分系统受损且无法修复, 有 $P_d = h_2(C_{da}, U_k)$ 。

机动发射能力包括机动行驶能力 C_j 和快速发射能力 C_F , 由机动和发射分系统性能 c_j, c_F 在自然环境 L_i 下分别表征(其中下标 J 和 F 分别代表机动和发射分系统), 体现了发射车的环境适应性, 机动发射性能通过组合赋权和模糊综合方法评估得到, 有 $C_j = h_3(c_j, L_i), C_F = h_3(c_F, L_i)$ 。

各项能力与分级环境的关系如表 2 所示。

表 2 分级环境下的能力表征

Tab.2 Ability representation in graded environment

参数	威胁环境	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
隐蔽伪装能力被发现概率	S_1	P_f^{11}	P_f^{12}	P_f^{13}	P_f^{14}	P_f^{15}
	S_2	P_f^{21}	P_f^{22}	P_f^{23}	P_f^{24}	P_f^{25}
	S_3	P_f^{31}	P_f^{32}	P_f^{33}	P_f^{34}	P_f^{35}
抗毁防护能力	U_1			P_d^1		
	U_2			P_d^2		
	U_3			P_d^3		
机动行驶能力		C_j^1	C_j^2	C_j^3	C_j^4	C_j^5
快速发射能力		C_F^1	C_F^2	C_F^3	C_F^4	C_F^5

2.3 基于 DoDAF 的发射车作战流程描述

为了评估武器装备效能, 美国国防部提出了国防部体系结构框架^[12-14] (the department of defense architecture framework, DoDAF), 本文采用其中的 EV-4 评估视图模型, 结合统一建模语言(unified modeling language, UML)活动图^[15]对发射车典型的作战流程进行可视化描述, 如图 6 所示。

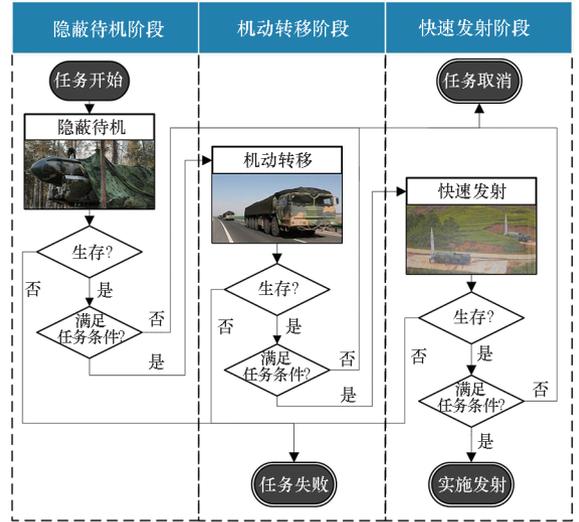


图 6 发射车典型作战流程

Fig.6 Typical launch vehicle combat flow

发射车完成发射任务, 在固定的作战域内其生存能力表现为隐蔽待机、机动转移和快速发射三种作战状态, 分别用 St_1, St_2 和 St_3 表示, 构成作战状态空间 $T = \{St_1, St_2, St_3\}$ 。各作战状态可根据实际情况和战术要求随机转换衔接, 组成不同的作战流程。

3 生存能力综合评估模型

3.1 发射车生存能力改进 ADC 模型

ADC 模型是经典的效能评估方法之一^[16], A 代表系统各初始状态的可靠性向量, 若系统运行过程中共有 r 种状态, 则有可靠性向量 $A = [a_1 \dots a_r]$ 。

D 为可信性矩阵, 代表系统从初始状态向各个状态转移的概率, 有:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{r1} & \dots & d_{rr} \end{bmatrix}$$

C 代表最终状态下的能力, 即可用性向量, 有 $C = [c_1 \dots c_r]^T$ 。经典的 ADC 评估模型效能值 E 为:

$$E = ADC = [a_1 \quad \cdots \quad a_r] \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{r1} & \cdots & d_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_r \end{bmatrix}$$

引入分级环境后,在不同的分级环境 B_z 下,可靠性向量、可信性矩阵和可用性向量也不同,分别表示为 A_z 、 D_z 和 C_z ,评估模型表示为:

$$E_z = A_z D_z C_z$$

作战流程中发射车生存状态的变化是一个时间连续状态离散的随机过程,由于流程各状态阶段时间相对较短,其间外界环境参数可视为常量,连续的时间变化过程可简化为以作战状态阶段区分的时间和状态均离散的马尔可夫过程。

n 个作战阶段总用时为 T 的作战流程,阶段时间向量 $T = [T_1, \dots, T_n]$, $T = \sum T_i$, 阶段状态向量 $ST = [st_1, \dots, st_n]$, $st_i \in \Gamma, i = 1, \dots, n$ 。发射车及其分系统的可用性构成过程状态空间。据此,可信性矩阵表示为各阶段状态可信性矩阵组成的 n 步转移概率矩阵,即:

$$D_z = \prod_{i=1}^n D_z^{st_i} \quad (1)$$

式中, $D_z^{st_i}$ 表示在作战状态 st_i 和第 z 分级环境下的可信性矩阵。评估模型改进表示为在第 z 分级环境下的生存能力:

$$E_z = A_z \prod_{i=1}^n D_z^{st_i} C_z^{st_n} \quad (2)$$

3.2 分级环境下的可靠性向量 A_z

机动分系统和发射分系统可靠性用 α 表示,可用平均故障间隔时间 $MTBF$ 和平均故障维修时间 $MTTR$ 计算:

$$\alpha = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

时间 t 后保持正常工作的概率^[17]为:

$$R(t) = \exp\left(-\frac{t}{MTBF}\right) \quad (4)$$

平均故障间隔时间受分级环境的影响,用 α_z 和 $R_z(t)$ 分别表示各分系统在不同分级环境下的可靠性和不发生故障概率,其中下标 j 表示不同的分系统, $j \in \{J, F\}$, z 表示不同的环境分级。

按照发射车的两个分系统的可用性,区分四种生存状态,不同生存状态具有不同的可靠性,初始可靠性如表 3 所示,得到不同分级环境下的发射车可靠性向量:

$$A_z = \begin{bmatrix} \alpha_{Jz} \alpha_{Fz} \\ \alpha_{Jz} (1 - \alpha_{Fz}) \\ (1 - \alpha_{Jz}) \alpha_{Fz} \\ (1 - \alpha_{Jz}) (1 - \alpha_{Fz}) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

表 3 生存状态及初始可靠性

Tab. 3 Survival state and initial availability

分系统	生存状态			
	1	2	3	4
机动分系统	可用	可用	不可用	不可用
发射分系统	可用	不可用	可用	不可用

3.3 不同作战状态下的可信性矩阵 $D_z^{st_i}$

作战流程中,除了故障因素外,被敌发现后打击毁伤也是重要的生存状态改变因素,在作战状态 st_i 和第 z 分级环境下可信性矩阵 $D_z^{st_i}$ 中的各状态转移概率是被发现概率 $P_{fz}^{st_i}$ 、损毁概率 $P_{dz}^{st_i}$ 和不发生故障概率 $R_z^{st_i}(t)$ 的函数, $R_z^{st_i}(t)$ 简化表达为 $R_z^{st_i}$, 则有 $D_z^{st_i} = f(P_{fz}^{st_i}, P_{dz}^{st_i}, R_z^{st_i})$ 。

故障或遭袭毁伤使发射车各分系统由可用状态转为不可用状态,其中不可用状态默认不可修复。由式(4)可得第 j 分系统不发生故障的概率 $R_z^{st_i}$, 遭袭后仍可用的概率为:

$$Q_{jz}^{st_i} = 1 - P_{fz}^{st_i} P_{dz}^{st_i} \quad (6)$$

表 3 中发射车的四种生存状态在作战状态 st_i 和第 z 分级环境下转移概率矩阵为:

$$D_z^{st_i} = \begin{bmatrix} d_{11}^z & d_{12}^z & d_{13}^z & d_{14}^z \\ 0 & d_{22}^z & 0 & d_{24}^z \\ 0 & 0 & d_{33}^z & d_{34}^z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{st_i} \quad (7)$$

式中, $d_{11}^z = R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i} R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i}$, $d_{12}^z = R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i} (1 - R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i})$, $d_{13}^z = (1 - R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i}) R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i}$, $d_{14}^z = (1 - R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i}) (1 - R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i})$, $d_{22}^z = R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i}$, $d_{24}^z = 1 - R_{Jz}^{st_i} Q_{Jz}^{st_i}$, $d_{33}^z = R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i}$, $d_{34}^z = 1 - R_{Fz}^{st_i} Q_{Fz}^{st_i}$ 。

3.4 作战流程最终状态可用性向量 $C_z^{st_n}$

对机动和发射分系统功能进行三级性能和参数分解,其中第一级对应为机动行驶性能和快速发射性能;第二级为第一级分解的子性能模块,如机动行驶性能下的道路机动性能、越野机动性能、道桥通过性能等;第三级为表征第二级性能的具体性能指标,如道路机动性能下的满载功率、最大机动速度等具体指标参数。采用层次分析、熵权法和模糊综合法^[17]进行分析,三级参数受分级环境影响形成不同的分系统能力值,逐级聚合成一、二级性能评估值。

发射车不同作战状态下分系统对生存能力的权重采用专家赋权法确定,作战流程最终状态和分级环境下二级指标参数权重向量为 $u_z^{st_n}$, 各分系统权重向量为:

$$w_z^{st_n} = [\omega_{J_z}^{st_n} \quad \omega_{F_z}^{st_n}] \quad (8)$$

采用模糊综合法对分系统初始能力值进行评定,用指派方法对三级参数设定隶属度函数,建立评判值矩阵 $G_{j_z}^{st_n}$,通过模糊合成运算^[18]可得各分系统的能力: $C_{j_z}^{st_n} = u_{j_z}^{st_n} \odot C_{j_z}^{st_n}, j \in \{J, F\}$, \odot 代表模糊合成运算,不同作战状态和分级环境下分系统能力向量为:

$$C_{0_z}^{st_n} = (C_{J_z}^{st_n} \quad C_{F_z}^{st_n})^T \quad (9)$$

用 $C_{i_z}^{st_n}$ 表示在不同作战状态、分级环境和表 4 的四种生存状态下的生存能力,可得最终状态下可用性向量表示为:

$$C_z^{st_n} = [w_z^{st_n} C_{0_z}^{st_n} \quad 0 \quad C_{3z}^{st_n} \quad 0]^T \quad (10)$$

式中,

$$C_{3z}^{st_n} = \begin{cases} \omega_{F_z}^{st_n} C_{F_z}^{st_n} & st_n = St_2, St_3 \\ 0 & st_n = St_1 \end{cases}$$

将式(5)、(7)、(10)代入式(2),即可得各作战状态和分级环境下生存能力,即典型作战流程和分级环境下生存能力评估模型。

3.5 生存能力动态综合评估

综合考虑自然环境、威胁环境和作战流程运用对发射车性能的影响,典型作战流程和分级环境下的发射车生存能力评估是一种动态综合评估方法,具体步骤如图 7 所示。

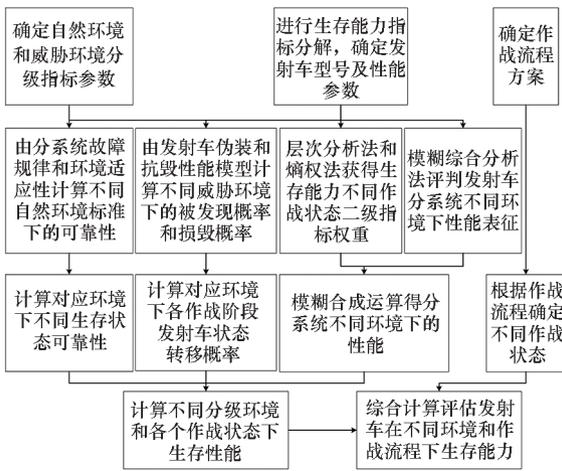


图 7 发射车生存能力综合评估流程

Fig. 7 Survivability comprehensive evaluation process of launch vehicle

首先建立自然环境和威胁环境分级标准作为生存能力评估的前提条件;然后以生存为准则建立发射车能力指标体系及相关性能参数,依据设计指标或统计数据计算第 z 分级环境下分系统 j 的可靠性 α_{j_z} 和不发生故障概率 R_{j_z} ,形成分级环境和不同作战状态下的可靠性向量 A_z ;计算作战状

态 st_i 和第 z 分级环境下发射车的被发现概率 $P_{i_z}^{st_i}$ 和损毁概率 $P_{d_z}^{st_i}$,形成各作战状态下的可信性矩阵 $D_z^{st_i}$;利用组合赋权方法和模糊综合法确定机动发射最终状态的能力向量 $C_z^{st_n}$;最后综合以上结果,用式(2)可得典型作战流程和分级环境下发射车生存能力评估值。

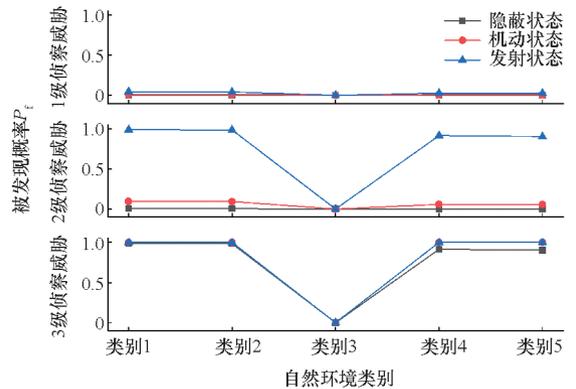
4 仿真算例分析

选取 A、B、C 三型发射车,设定五类自然环境和三级威胁环境,采用隐蔽-机动-发射三个状态作战流程,设定仿真参数进行生存能力评估。

4.1 分级环境下的隐蔽伪装性能

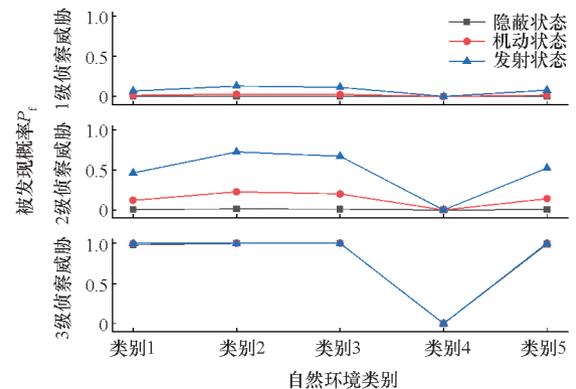
综合环境参数和发射车伪装性能参数,用美国 Johnson 计算目标检测概率的经验公式^[19-20],计算三型发射车以三种作战状态在不同分级环境下活动 1 小时的被发现概率,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,A、B、C 型发射车分别在 3 类、4 类、1 类自然环境中表现出明显的隐蔽伪装优势,在三级侦察威胁环境下发现概率均接近 0;随着侦察强度由 1 级提升至 3 级,三型发射车被发现概率均有明显提升,除优势环境外,其余环境



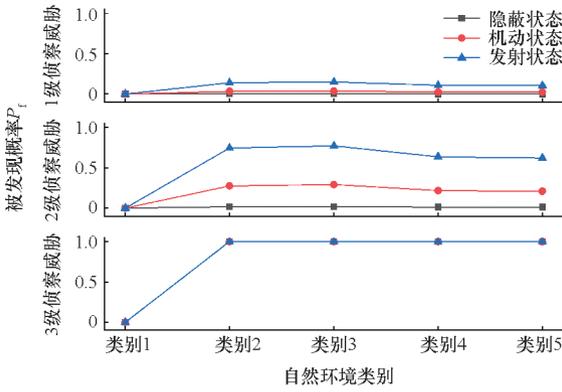
(a) A 型发射车被发现概率

(a) Probability of detection of launch vehicle A



(b) B 型发射车被发现概率

(b) Probability of detection of launch vehicle B



(c) C型发射车被发现概率

(c) Probability of detection of launch vehicle C

图 8 三型发射车不同分级环境下被发现概率

Fig.8 Probability of detection of three launch vehicles under different graded classification

中侦察强度升至 3 级,被发现概率接近于 1;作战状态对被发现概率也有影响,在发射状态下,2 级、3 级侦察威胁能够造成较高的被发现概率。

4.2 分级环境下的分系统性能评估

以生存能力为准则,计算不同环境影响下的分系统的三级评价指标参数值,确定各级权重。结合表 3 中四种生存状态,得到分系统和不同作战状态下的性能值,三型发射车在五类环境下分

系统表现出不同的机动和发射能力,其性能值如表 4 所示。

表 4 三型发射车在不同自然环境下的各分系统性能值
Tab.4 Performance values of each sub-system of three launch vehicles under different natural environment

发射车 型号	分 系统	自然环境类别				
		类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5
A 型	机动	78.9	82.1	82.5	75.9	75.2
	发射	61.9	62.8	64.1	63.3	62.6
B 型	机动	72.6	78.4	80.6	70.6	72.5
	发射	77.2	78.0	79.1	78.7	78.0
C 型	机动	70.9	73.2	74.9	64.6	67.4
	发射	77.1	78.2	78.2	78.9	76.5

三种不同的作战状态中机动和发射分系统的贡献度不同,相对应的生存状态也表现出不同的完成任务能力,其中:在生存状态 2 和 4 下,机动、发射分系统不可用,能力值均为 0,在生存状态 3 下,发射分系统可用而机动分系统不可用,仅取发射能力作为该状态下的能力值。不同分级环境和作战状态下的四种生存能力分别构成能力向量 $C_i^{st_n}$,结果如表 5 所示。

表 5 三型发射车在不同自然环境和状态下的能力值

Tab.5 Capability value of three launch vehicles under different natural environments and states

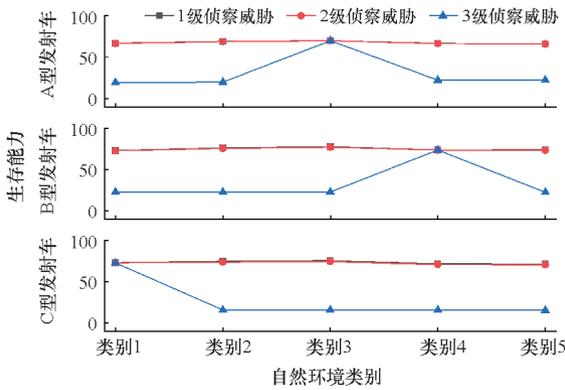
作战 状态	生存 状态	A 型发射车					B 型发射车					C 型发射车				
		类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5	类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5	类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5
S_{t_1}	1	69.2	71.1	72.0	68.7	68.0	75.2	78.2	79.7	75.2	75.7	74.4	76.1	76.7	72.8	72.6
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	35.3	35.8	36.6	36.1	35.8	44.1	44.5	45.2	44.9	44.5	44.0	44.7	44.6	45.1	43.6
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{t_2}	1	76.1	78.9	79.5	73.9	73.1	73.4	78.3	80.3	71.9	73.4	71.9	74.1	75.4	67.0	68.9
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	10.1	10.3	10.5	10.4	10.3	12.6	12.8	13.0	12.9	12.8	12.6	12.8	12.8	12.9	12.5
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{t_3}	1	64.1	65.3	66.5	65.0	64.3	76.6	78.0	79.3	77.7	77.3	76.3	77.6	77.7	77.1	75.3
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	53.9	54.7	55.8	55.1	54.5	67.2	67.9	68.9	68.5	67.9	67.1	68.1	68.0	68.7	66.6
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.3 典型作战流程和分级环境下的生存能力

分别计算不同分级环境下的可靠性矩阵、可信性矩阵和状态能力矩阵,代入式(2),可得不同作战状态和分级环境下的生存能力,如图 9 所示。

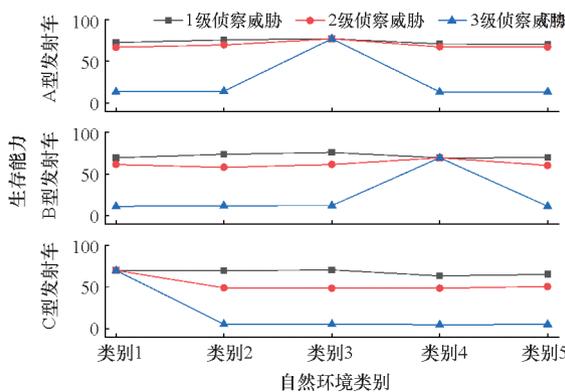
从图中可以看出,生存能力与被发现概率负相关,在优势环境中,三型发射车在三级威胁环境下均能表现出较高的生存能力。对比三种作战状态,同样在发射状态下,生存能力对威胁强度的提升

具有较高的敏感度。



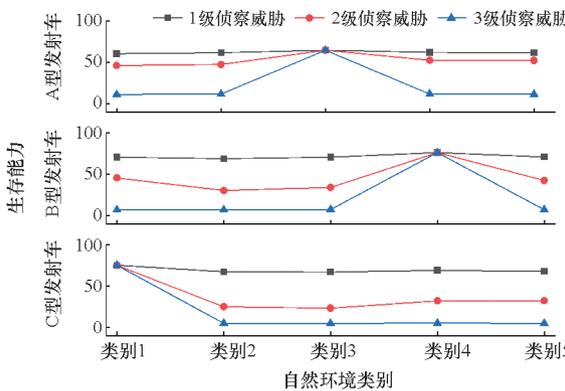
(a) 隐蔽状态下生存能力

(a) Survivability under hidden state



(b) 机动状态下生存能力

(b) Survivability under moving state



(c) 发射状态下生存能力

(c) Survivability under launching state

图 9 不同作战状态和分级环境下三型发射车生存能力
Fig. 9 Survivability of three launch vehicles under different combat status and graded environment

评估三种作战状态时间均为 1 h 的典型作战流程,不同分级环境下的可靠性矩阵 A_z 不变、可信性矩阵 $D_z = D_z^{st1} D_z^{st2} D_z^{st3}$ 、最终状态能力矩阵 $C_z^{stn} = (C_z^{st1} + C_z^{st2} + C_z^{st3})/3$,代入式(2),可得典型作战流程和分级环境下的生存能力,结果如图 10 所示。从图中可以看出整个流程各发射车依然保

持各自的环境优势,对威胁强度表现出了相似的敏感度。

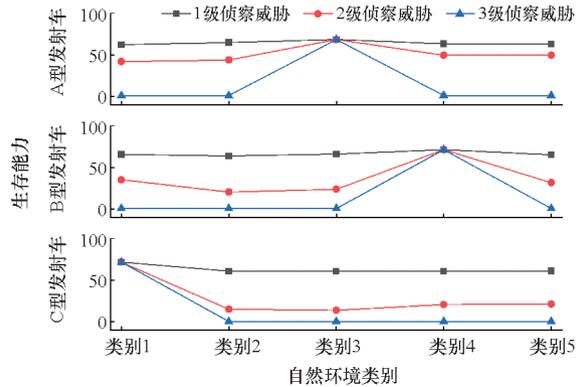


图 10 典型作战流程和分级环境下三型发射车生存能力
Fig. 10 Survivability of three launch vehicles under a typical combat flow and graded environment

5 结论

本文对武器系统评估层次进行了区分,定义了各层的内涵和边界,搭建了评估框架,为了使评估结果尽可能接近实际战场环境,在武器装备内、特性基础上,分步将自然环境、威胁环境和作战流程方案等外界因素融入评估过程,提出了典型作战流程和分级环境下基于改进 ADC 方法的发射车生存能力综合评估模型,得出结论如下:

1) 构建参数 - 性能 - 能力 - 效能四个层次的武器系统评估体系,参数和性能是武器系统自身能力的体现,能力和效能是在自然环境和威胁环境作用下武器系统性能的发挥水平,能力和效能通过评估结果和环境加载方式进行区分,能力侧重于对武器装备的评估,而效能则侧重于武器装备在方案想定中的表现评估。从评估对象、内容和层次三个维度构建武器装备评估框架,为发射车生存能力评估定义了内涵和边界。

2) 构建五类自然环境和三级威胁环境强度,量化分析自然环境对分系统可靠性和性能的影响,得到不同分级环境和作战状态下的分系统能力矩阵;使用被发现概率和损毁概率表征发射车的隐蔽伪装和抗毁防护能力,以各阶段连续转移概率矩阵乘积的形式构成经典 ADC 评估方法中的可信性矩阵,构造发射车生存能力综合评估模型,使评估更加接近作战应用环境。

3) 通过仿真算例及分析证明,该模型能够评估发射车在不同分级环境下的生存能力,为发射车在特定应用需求下的能力进行排序;通过分析不同状态发射车的自然环境优势和威胁环境承受

阈值,评估典型作战流程中发射车在各作战状态下生存能力大小和作战流程的优劣,为发射车性能设计和作战运用提供量化决策支撑。

参考文献 (References)

[1] HOOTMAN J C, WHITCOMB C. A military effectiveness analysis and decision making framework for naval ship design and acquisition [J]. *Naval Engineers Journal*, 2005, 117(3): 43 - 61.

[2] 周玉臣, 林圣琳, 马萍, 等. 武器装备效能评估研究进展[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(8): 1413 - 1424.
ZHOU Y C, LIN S L, MA P, et al. Research progress on weapon and equipment effectiveness evaluation[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(8): 1413 - 1424. (in Chinese)

[3] 杜红梅, 柯宏发. 装备作战能力与作战效能之内涵分析[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(4): 23 - 27.
DU H M, KE H F. Connotation analysis of equipment combat capability and equipment combat efficiency [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(4): 23 - 27. (in Chinese)

[4] 吴启波, 叶方超, 万学军. 武器系统效能度量理论研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2010, 28(4): 27 - 31.
WU Q B, YE F C, WAN X J. Study on measures of effectiveness of weapon system [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2010, 28(4): 27 - 31. (in Chinese)

[5] 邓岳, 王盛春, 李龙, 等. 电源车作战全过程总体战场生存能力评估[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(2): 13 - 19.
DENG Y, WANG S C, LI L, et al. Estimation of overall battlefield survivability for the whole battle process of power vehicle [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(2): 13 - 19. (in Chinese)

[6] 董骁雄, 车飞, 陈云翔, 等. 备件保障效能动态评估方法[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(1): 176 - 182.
DONG X X, CHE F, CHEN Y X, et al. Dynamic evaluation methods for spare parts support effectiveness[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(1): 176 - 182. (in Chinese)

[7] 盖美庆, 闫世强, 马梁, 等. 基于改进 ADC 模型的反导预警雷达作战效能评估[J]. *现代雷达*, 2020, 42(3): 20 - 24.
GAI M Q, YAN S Q, MA L, et al. Operational effectiveness evaluation of anti-ballistic-missile EWR based on improved ADC model[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(3): 20 - 24. (in Chinese)

[8] 刘仕雷, 李昊. 改进 ADC 方法及其在武器装备系统效能评估中的应用[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(3): 130 - 135.
LIU S L, LI H. Modified ADC method and its application for weapon system effectiveness evaluation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(3): 130 - 135. (in Chinese)

[9] 宋星, 贾红丽, 赵汝东, 等. 基于 ADC 和模糊综合评判法的合成旅装备保障效能评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(8): 126 - 129.
SONG X, JIA H L, ZHAO R D, et al. Effectiveness

evaluation of synthetic brigade equipment support based on ADC and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(8): 126 - 129. (in Chinese)

[10] 尹津丽. 基于 ADC 方法的预警机系统效能评估及软件平台开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
YIN J L. Research on effectiveness evaluation and software development of ewa system based on ADC method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[11] 张宏军, 韦正现, 鞠鸿彬, 等. 武器装备体系原理与工程方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
ZHANG H J, WEI Z X, JU H B, et al. Basic principles and engineering methods of weapon system of systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019. (in Chinese)

[12] United States Department of Defence. DoD architecture framework version 2.02: volume I: overview and concepts[R]. Washington D. C.: United States Department of Defence, 2015.

[13] United States Department of Defence. DoD architecture framework version 2.02: volume II: architectural data and models [R]. Washington D. C.: United States Department of Defence, 2015.

[14] United States Department of Defence. DoD architecture framework version 2.0: volume 3: DoDAF meta-model ontology foundation and physical exchange specification [R]. Washington D. C.: United States Department of Defence, 2009.

[15] AHMAD T, IQBAL J, ASHRAF A, et al. Model-based testing using UML activity diagrams: a systematic mapping study[J]. *Computer Science Review*, 2019, 33: 98 - 112.

[16] GUO J, LI T W, LI C X, et al. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive evaluation index system based on improved ADC mode[C]// *Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, 2014.

[17] 徐立, 李庆民, 李华, 等. 有限维修能力下作战单元时变可用度评估模型[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(1): 114 - 121.
XU L, LI Q M, LI H, et al. Evaluation model of time-varying availability for combat units under finite repair capacity[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(1): 114 - 121. (in Chinese)

[18] 李京峰, 项华春, 严雅榕, 等. 基于离差最大化的组合赋权评价方法及其应用[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(6): 18 - 23, 29.
LI J F, XIANG H C, YAN Y R, et al. Combination weighting method and application based on maximizing deviations[J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(6): 18 - 23, 29. (in Chinese)

[19] VOLLMERHAUSEN R H, JACOBS E. The targeting task performance (TTP) metric a new model for predicting target acquisition performance[R]. Virginia, USA: Modeling and Simulation Division, Night Vision and Electronic Sensors Directorate, U. S. Army CERDEC Fort Belvoir, 2004.

[20] 郭子淳, 姜毅, 李静, 等. 光学侦察卫星对地机动目标侦察性能的评估[J]. *现代防御技术*, 2017, 45(6): 131 - 137.
GUO Z C, JIANG Y, LI J, et al. Evaluation of reconnaissance performance of optical satellites for ground maneuvering targets[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(6): 131 - 137. (in Chinese)