

## 武器装备抗毁性分析与评估方法

黄通,高钦和\*,刘志浩,王冬,马栋,高蕾  
(火箭军工程大学 导弹工程学院,陕西西安 710025)

**摘要:**针对现阶段武器装备生存能力评估研究以统计学为主、缺乏物理学支撑的问题,并且为了建立各部件从结构参数到防护性能之间的传递关系,提出了抗毁性的研究概念,提出了基于极限损毁的抗毁性分析方法和基于广义防护时间的抗毁性表征方法;并通过指标对作战任务的量化机理,提出了面向任务的抗毁性评估方法。以行驶性能为例进行抗毁性研究。研究表明:基于极限损毁的抗毁性分析方法能够实现从物理空间到性能空间的传递关系的构建;基于广义防护时间的抗毁性表征方法能够反映幅值距离和难易程度对抗毁性综合影响;面向任务的抗毁性评估方法能够将作战任务需求引入抗毁性评估中,减弱了主观赋权对评估结果的影响;算例验证了方法的可行性和有效性。

**关键词:**生存能力;抗毁性;极限损毁;广义防护时间;作战任务

**中图分类号:**E919 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)04-150-09



论  
文  
拓  
展

## Analysis and evaluation method for invulnerability of weapons

HUANG Tong, GAO Qinhe\*, LIU Zhihao, WANG Dong, MA Dong, GAO Lei

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

**Abstract:** In view of the problem that the current evaluation of the survivability of weapons and equipment is mainly statistical and lacks physical support, in order to establish the transmission relationship between the structural parameters and the protective performance of each component, the concept of invulnerability was proposed, and the invulnerability analysis method based on the limit damage and the invulnerability characterization method based on the generalized protection time were proposed. And through the index to the quantitative mechanism of combat missions, the task-oriented invulnerability evaluation method was proposed. Driving performance invulnerability was studied as an example. Results show that: the invulnerability analysis method based on the limit damage can realize the construction of physical transfer relation from physical space to performance space; the invulnerability characterization method based on the generalized protection time can reflect the comprehensive influence of amplitude distance and difficulty degree on invulnerability; the task-oriented invulnerability evaluation method can introduce operational mission requirements into invulnerability evaluation and reduce the influence of subjective weight assignment on evaluation results. Case analysis verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** survivability; invulnerability; limit damage; generalized protection time; combat missions

武器装备在强对抗环境中的生存能力是其执行作战任务的前提和基础,生存能力越强的装备在对抗环境中完成既定作战任务的可能性就更大,因此无论是结构设计,还是指挥决策,评估和掌握武器装备的生存能力都具有重要的价值和意义<sup>[1]</sup>。

武器装备的生存能力是指,在对抗环境中装

备生存并保持作战功能的能力,通常由隐蔽伪装、毁伤防护和维修保障等子能力组成<sup>[2-3]</sup>。目前,生存能力分析 with 评估研究主要集中在舰船和阵地等领域,研究方法主要是以统计学为主<sup>[4-5]</sup>,用于表征武器装备在对抗环境中保持作战功能的可能性。如美国生存能力情报分析中心给出的弹道导弹地面生存能力评估模型<sup>[6]</sup>为:

收稿日期:2022-04-20

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:黄通(1995—),男,陕西咸阳人,博士研究生,E-mail:tongh201@126.com

\*通信作者:高钦和(1968—),男,山东济宁人,教授,博士,博士生导师,E-mail:qhga0201@163.com

引用格式:黄通,高钦和,刘志浩,等.武器装备抗毁性分析与评估方法[J].国防科技大学学报,2024,46(4):150-158.

**Citation:** HUANG T, GAO Q H, LIU Z H, et al. Analysis and evaluation method for invulnerability of weapons[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 150-158.

$$S_{\text{SPS}} = \begin{cases} 0.5 \left( \frac{R_D}{CEP} \right)^2, & \text{固定发射车} \\ 1 - \left( \frac{R_D}{R_m} \right)^2, & \text{机动发射车} \end{cases}$$

其中,  $S_{\text{SPS}}$  为单发打击生存概率,  $R_D$  为弹头毁伤半径,  $CEP$  为圆概率误差,  $R_m$  为机动半径。

还有基于比动能的常规破片毁伤概率公式和冲击波超压毁伤概率公式<sup>[7]</sup>为:

$$P_{\text{kp}} = \begin{cases} 0, & E_b \leq 4.5 \\ 1 + 2.65e^{-0.34E_b} - 2.96e^{-0.14E_b}, & E_b > 4.5 \end{cases}$$

$$P_{\text{kc}} = \begin{cases} \Delta p_m / p_t, & \Delta p_m \leq p_t \\ 1, & \Delta p_m > p_t \end{cases}$$

其中,  $P_{\text{kp}}$ 、 $P_{\text{kc}}$  分别为破片和冲击波超压毁伤概率,  $E_b$  为破片击中目标时的比动能,  $\Delta p_m$  为冲击波峰值超压值,  $p_t$  为目标的超压抗力。

上述及其他未列及的相关统计学公式虽然能够对装备的生存能力进行计算和评估,但缺乏对装备自身物理学属性的描述,从而产生了两个方面的问题:①评估指标不落地,采用统计学方法的评估模型在底层指标的选择上存在模糊和关联性较弱的问题;②指标权值存在主观性,现有的评估赋权方法仍需要主观赋值的介入,导致了评估结果可信度下降。因此,采用物理学理论对装备自身性能进行描述,进而构建评估体系的方法就成为了解决这两个问题的关键。

然而,在现有研究中,描述装备隐蔽伪装子能力的称为隐蔽性;描述装备维修保障子能力的称为可维修性;对于描述装备毁伤防护子能力的性能尚未有明确的名称,目前采用最多的是易损性,但目前的易损性研究在分析方法和模型上,仍然存在对装备自身属性描述的简化。因此,采用易损性描述生存能力评估赋予毁伤防护的重要含义是不妥的。

基于此,提出了抗毁性的研究概念,用于描述装备的毁伤防护子能力,抗毁性与武器装备的其他性能一样,都属于装备的自身属性,是由装备自身的结构参数、材料参数、物理机理决定的。同时针对抗毁性在极限损毁范围和损毁难易程度上所表现出的位移维度和速度维度,提出了用广义防护时间表征的抗毁性评估方法。并以发射平台轮胎系统为研究对象进行了算例分析,验证了评估方法的可行性。

## 1 易损性与抗毁性

### 1.1 易损性研究的问题

为了对抗毁性的研究概念和研究范畴进行明

确定义,需要对易损性和抗毁性进行区分。易损性研究最早出现于飞机的生存能力研究中,在易损性的早期研究中,易损性具有两重含义:

- 1) 在广义上表示装备对破坏的敏感性;
- 2) 在狭义上表示结构被破坏的可能性。

其中,前者可以理解为装备性能损耗,后者可以理解为装备结构破坏,这两者共同构成了武器装备的易损性研究。这一现象在易损性分析空间理论的研究中也有所体现。

20世纪80年代末,美国学者 Deitz 和 Ozolins 提出了易损性分析空间的概念,是比较符合装备逻辑特点的易损性研究框架<sup>[8]</sup>。如图1所示,易损性分析空间将易损性分析划分为四个层次,即几何空间、物理空间、性能空间和效能空间。其中,几何空间表示毁伤载荷和装备结构参数以及弹目交会的作用过程;物理空间表示弹目交会作用以后装备结构遭到破坏的物理现象;性能空间表示物理损伤破坏造成的装备功能的损失;效能空间是装备作战效能的度量表示。

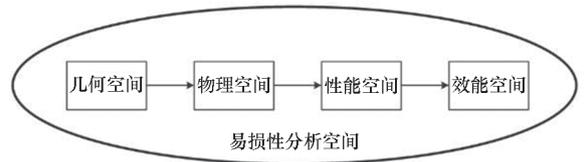


图1 易损性分析空间

Fig. 1 Vulnerability analysis space

从易损性分析空间的角度看,目前针对武器装备易损性的研究主要集中在从几何空间到物理空间传递关系的研究。其研究基本采用数值仿真与试验相结合的方法,以探究目标结构尺寸、材料属性等防护参数与侵彻深度、直径、超压分布等物理毁伤参数之间的关系。如文献[9]研究了金属网增强遮弹层抗高速弹侵彻性能;文献[10]研究了月牙形空腔结构金属靶的抗侵彻性能;文献[11]探究了封装陶瓷形状对复合结构抗侵彻性能的影响;文献[12]研究了铝-镁-铝轻质金属层状复合靶的抗弹性能。

尽管从几何空间到物理空间传递关系的研究最为深入和成熟,但对于易损性分析空间和武器装备易损性应用而言,这无法直观地反映实际作战环境下武器装备的功能损失的敏感程度,还需要在此基础上,研究从物理空间到性能空间的传递关系。

### 1.2 生存能力研究的需求

武器装备生存能力研究主要面向两个应用:

- 1) 面向于作战的指挥决策;
- 2) 面向于生产的设计优化。

前者需要明确装备进入作战区域后,在特定环境中的生存概率;后者需要明确装备在毁伤威胁下的薄弱位置。这两者共同点在于都需要明确装备结构、材料通过相关物理学组成而表现出的综合防护性能。前者将这种综合防护性能与作战环境相结合,后者用这种综合防护性能引导设计。

另外,在现有研究中,易损性主要被应用在弹药毁伤评估<sup>[13-16]</sup>,用于辅助反映弹药的威力特征,易损性的分析方法和思路都比较靠近弹药毁伤评估,而对装备自身的性能描述较为简化。

因此,基于上述,本文提出了抗毁性的研究概念,用于描述装备对毁伤的敏感程度,抗毁性与机动性等性能一样,都属于装备自身属性,不受外界条件的影响,由装备自身的结构参数、材料参数、物理机理决定。

## 2 抗毁性的分析与表征方法

### 2.1 问题描述

基于第 1 节对易损性和抗毁性的分析,发现易损性和抗毁性在研究对象、研究层次和表征方法上存在主要的区别,两者的区别如表 1 所示。

表 1 易损性和抗毁性的主要区别

项目	易损性	抗毁性
研究对象	装备毁伤耦合	装备自身性能
研究层次	毁伤元-几何结构-物理状态-性能状态	几何结构-物理状态-性能状态
表征方法	可能性/概率	鲁棒性/度值

由表 1 可知,易损性与抗毁性既有区别又有联系,抗毁性在易损性研究的基础上需要在两个方面进行突破,现阶段易损性与抗毁性的联系如图 2 所示。

1) 在研究层次方面,从几何空间到物理空间采用目前成熟的仿真或试验技术进行研究。从装备性能对结构毁损的要求角度来讲,抗毁性分析也可以视为对易损性判据准则的研究,即研究结构毁损程度对装备性能的影响。

2) 在表征方法层面,现阶段的易损性表征方法是采用概率描述装备结构与毁伤元耦合后的失效可能性,而抗毁性需要能够描述装备自身对毁

伤敏感程度的度量方法。

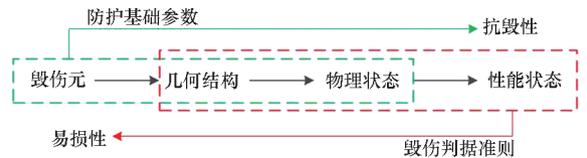


图 2 现阶段易损性与抗毁性的联系

Fig. 2 Connection between vulnerability and invulnerability at present stage

### 2.2 基于极限损毁的分析方法

性能指标是由装备自身结构指标参数,通过相关物理机理映射,对装备功能属性进行的定量化描述。比如机动速度、弹射速度、起竖过载等。武器装备的作战功能正是由各性能指标进行衡量的。当武器装备遭受毁伤破坏时,结构指标受损,结构指标所组成的性能指标也会因为结构受损而下降,直至不能满足作战对性能的需求。性能损毁过程如图 3 所示。

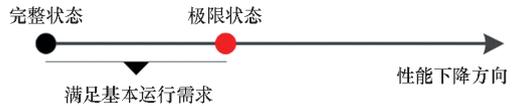


图 3 性能损毁过程

Fig. 3 Performance damage process

为了对上述损毁过程进行研究,设武器装备的性能指标有  $n$  个,所对应的结构指标有  $m$  个,作出如下定义:

**定义 1** 定义武器装备验收服役时的状态为完整状态 (complete state), 记为  $C$ ; 完整状态时各性能指标参量构成的集合为完整状态集, 记为  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

定义武器装备实际运行时的状态为现实状态 (actual state), 记为  $A$ ; 现实状态时各性能指标参量构成的集合为现实状态集, 记为  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。

**定义 2** 假设存在临界状态, 使得结构指标降低到该临界状态值时, 武器装备性能不再满足作战需求, 称该临界状态为极限状态 (limit state), 记为  $L$ ; 极限状态时各性能指标参量构成的集合为极限状态集, 记为  $\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ 。

**定义 3** 定义在完整状态下的所有结构指标参量构成的集合为完整参数集, 记为  $\{P_{C_1}, P_{C_2}, \dots, P_{C_m}\}$ ; 极限状态下的所有结构指标参量构成的集合为极限参数集, 记为  $\{P_{L_1}, P_{L_2}, \dots, P_{L_m}\}$ ; 现实状态下的所有结构指标参量构成的集合为现实参数集, 记为  $\{P_{A_1}, P_{A_2}, \dots, P_{A_m}\}$ 。

根据物理机理在装备设计中的应用,对于任意状态集元素  $C_i$  或  $L_i$  或  $A_i$ ,有函数  $f_i$  从参数集  $P_C$  或  $P_L$  或  $P_A$  到状态集。显然,  $f_i$  是基于性能所对应的相关物理机理建立的。即有:

$$C_i = f_i(\{P_{C_1}, P_{C_2}, \dots, P_{C_m}\}) \quad (1)$$

$$L_i = f_i(\{P_{L_1}, P_{L_2}, \dots, P_{L_m}\}) \quad (2)$$

$$A_i = f_i(\{P_{A_1}, P_{A_2}, \dots, P_{A_m}\}) \quad (3)$$

其中,在参数集中的完整参数集元素  $P_{C_j}$  和极限参数集元素  $P_{L_j}$  分别表示了完整状态下的第  $j$  个结构指标参量和极限状态下的第  $j$  个结构指标参量。即在结构指标中,也存在损毁过程如图 4 所示。

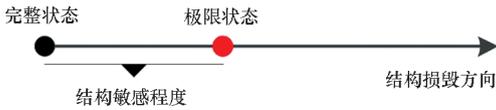


图 4 结构损毁过程

Fig. 4 Structural damage process

由图 4 可知,对于任意结构指标都存在一个极限状态值,使得结构被损毁到该极限状态值时,该结构指标通过物理机理所支撑的性能指标无法满足运行需求,从而被认定为运行功能丧失。当结构指标的极限状态值与完整状态值的历程较大时,该结构指标就越难被损毁,基于此可以作如下定义。

**定义 4** 定义结构指标从现实状态值到极限状态值的历程为该结构指标对毁伤的敏感程度,称结构抗毁性(structure invulnerability),记为  $S_1$ ,  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为两种不同状态的抗毁性。

即有:

$$S_{1j} = Q_{1j} \rightarrow Q_{2j} \quad (4)$$

式中,“ $\rightarrow$ ”为两种状态的历程符号。

采用两种状态下的历程来表征在某种需求下,性能指标反映在结构指标上的对于毁伤破坏的敏感程度,是将性能空间通过物理机理与物理空间和几何空间连接起来,构建从几何空间到性能空间的物理传递关系,可以分析出装备的结构抗毁性,显然,两种状态之间的历程越大,说明装备的结构抗毁性就越强。

### 2.3 基于广义防护时间的表征方法

结构指标从现实状态值到极限状态值的历程,不仅包含了两个状态值的幅值距离,也包含了从现实状态值到极限状态值变化的难易程度。只有将幅值距离和难易程度综合起来,才能完整地表征出结构指标从现实状态值到极限状态值的历

程,因此有如下定义:

**定义 5** 定义结构指标现实状态值与极限状态值的幅值差为结构抗毁性的广义位移,记为  $S_{ID}$ ;定义结构指标从现实状态值变为极限状态值的难易程度为结构抗毁性的广义速度,记为  $S_{IV}$ 。

$S_{ID}$  值越大,说明极限状态值与现实状态值的幅值差异越大,结构抗毁性就越强; $S_{IV}$  值越大,说明从现实状态变为极限状态就越快,就越容易出现极限状态,结构抗毁性就越弱。即结构抗毁性  $S_1$  与  $S_{ID}$  呈正相关,与  $S_{IV}$  呈负相关。根据“位移 - 速度 - 时间”三者之间的物理关系,本文提出了广义防护时间的综合表征方法,用于反映幅值距离和难易程度对抗毁性的综合影响,作出如下定义。

**定义 6** 定义结构抗毁性的广义位移与广义速度之比为结构抗毁性的广义时间,记为广义防护时间  $S_{IT}$ ,用于表征结构抗毁性的度值。

则式(4)的抽象公式可以转化为:

$$S_{IT_j} = \frac{S_{ID_j}}{S_{IV_j}} \quad (5)$$

$$S_{ID_j} = Q_{A_j} - Q_{L_j} \quad (6)$$

$$S_{IV_j} = \chi \cdot \varphi_j(\{P_{A_1}, P_{A_2}, \dots, P_{A_m}\}) \quad (7)$$

式中: $\varphi_j$  为第  $j$  个结构指标广义速度所对应的物理机理模型; $\chi$  为毁伤元对结构的作用系数, $\chi = K/K_0$ ,  $K$  为毁伤传递到装备位置处的威力强度,与毁伤元和装备相对位置有关,  $K_0$  为装备安全强度,一般通过试验获得。

## 3 面向任务的抗毁性评估方法

### 3.1 作战任务的指标量化

武器装备的本质是用来作战的,因此脱离了作战任务的装备评估是不完整的。作战任务的指标量化如图 5 所示,装备在执行作战任务时,主要受到任务目标和环境条件的约束。其中,任务目标是对装备性能指标的量化约束,如“在规定时间内做规定距离的机动部署”是对装备机动性能的量化,“在规定时间内完成规定的射弹任务”是对装备发射性能的量化;环境条件是对装备结构指标的量化约束,如“非常规作战环境”是对装备结构密闭完整的量化,“突击作战”比“支援作战”对装备结构防护有更高的量化约束要求。

由图 5 可知,根据作战任务在任务目标和环境条件层面分别对性能指标和结构指标的约束要求,可以将作战任务在各个指标上进行量化。即设某作战任务对装备性能指标的约束有  $x$  个,对

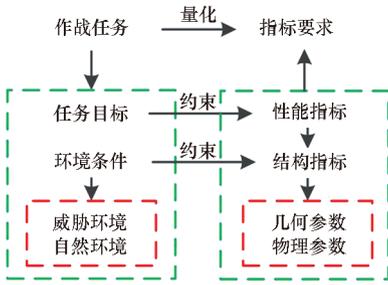


图 5 作战任务的指标量化

Fig. 5 Quantification of indicators for combat missions

结构指标约束有  $y$  个,  $x \leq n, y \leq m$ , 则装备性能和结构指标约束集为  $\{B_1, B_2, \dots, B_x\}$  和  $\{P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_y}\}$ , 有:

$$\{B_1, B_2, \dots, B_x\} = f(\{P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_m}\}) \quad (8)$$

将  $\{P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_y}\}$  和  $\{P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_m}\}$  两个集合合并后即可得到作战任务量化的结构指标约束集, 记为  $P_B$ 。即有如图 6 所示的性能损毁量化节点。

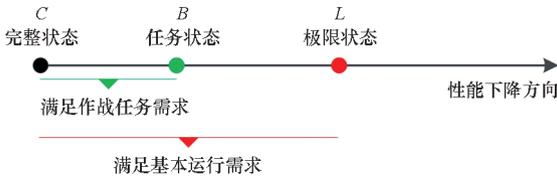


图 6 性能损毁量化节点

Fig. 6 Performance damage quantization node

### 3.2 抗毁性的等级判据

由图 6 可知, 武器装备从服役后的完整状态  $C$  开始, 结构损毁过程中存在两个关键节点, 满足作战任务需求的状态节点  $B$  和满足基本运行需求的状态节点  $L$ , 这两个节点将武器装备现实状态  $A$  所处的位置分成了三个阶段。

- 1) 当  $A \in [C, B]$ , 有  $S_1(A \rightarrow L) \geq S_1(B \rightarrow L)$ , 此阶段装备能够满足作战任务对抗毁性的要求;
- 2) 当  $A \in (B, L)$ , 有  $S_1(A \rightarrow L) < S_1(B \rightarrow L)$ , 且  $S_1(A \rightarrow L) > 0$ , 此阶段装备无法满足作战任务对抗毁性的要求, 但能够满足基本的运行需求;
- 3) 当  $A \in [L, 0]$ , 有  $S_1(A \rightarrow L) \leq 0$ , 此阶段装备无法满足基本的运行需求。

即可建立如表 2 所示的抗毁性等级判据表。

### 3.3 抗毁性的概率表示

抗毁性作为武器装备生存能力研究的重要组成部分, 在表征装备自身防护性能的同时, 还应当能够与生存能力的概率表示进行统一。基于抗毁性广义防护时间的定义, 广义防护时间越大, 装备对损毁越不敏感, 抗毁性就越强, 抗毁的概率就越

表 2 抗毁性等级判据表

Tab. 2 Hierarchy criterion table of invulnerability

抗毁性阶段	功能表现	等级
$S_1(A \rightarrow L) \geq S_1(B \rightarrow L)$	满足作战任务需求	优
$S_1(A \rightarrow L) < S_1(B \rightarrow L)$ 且 $S_1(A \rightarrow L) > 0$	满足基本运行需求 不满足作战任务需求	中
$S_1(A \rightarrow L) \leq 0$	无法满足基本运行需求	差

大; 反之广义防护时间越小, 抗毁的概率就越小。考虑到这种规律在变化的两端越明显, 本文选择反正切函数<sup>[17]</sup>对抗毁性进行概率表示。

$$p_{SI} = \left[ \frac{2}{\pi} \arctan(\delta \cdot S_{IT}(A \rightarrow L) \cdot e^{\frac{S_{IT}(A \rightarrow L) - S_{IT}(B \rightarrow L)}{S_{IT}(C \rightarrow B)}}) \right] \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $p_{SI}$  为抗毁性的概率;  $\delta$  为概率转化系数, 通过试验获得。

由式(9)可知, 抗毁性的概率表示主要受到装备现实状态的影响: 当  $S_{IT}(A \rightarrow L) = 0$  时,  $p_{SI}$  为 0; 当  $S_{IT}(A \rightarrow L) \rightarrow +\infty$  时,  $p_{SI}$  为 1。同时  $p_{SI}$  还受到装备任务状态的影响, 当  $S_{IT}(A \rightarrow L) > S_{IT}(B \rightarrow L)$  时, 说明装备现实状态抗毁性优于任务状态。

## 4 实例分析

由于大多数的武器装备属于多性能组合的综合技术体, 考虑到文章篇幅的限制, 本文以多轴特种车辆轮胎系统的行驶性能为例进行抗毁性研究, 以说明前述方法的可行性和有效性。

### 4.1 轮胎系统行驶性能的物理机理

#### 4.1.1 承载能力

设多轴特种车辆的轮胎系统共有  $n$  个轮胎, 各轮胎的接地位置坐标为  $Q_i(x_{qi}, y_{qi}, z_{qi})$ , 车辆的质心坐标为  $M(x_m, y_m, z_m)$ , 则各轮胎接地位置至车辆质心的距离矢量为:

$$\mathbf{r}_i = (x_{qi} - x_m, y_{qi} - y_m, z_{qi} - z_m) \quad (10)$$

由于运动状态下会产生附加的动载荷, 大于静止状态的轮胎力, 因此采用静止状态下的轮胎力即可进行计算。设静止状态下各轮胎力的作用力分别为各轮胎纵向摩擦力  $f_{xi}$ , 侧向摩擦力  $f_{yi}$  和垂向力  $F_{zi}$ , 则各轮胎的矢量力为:

$$\mathbf{F}_i = (f_{xi}, f_{yi}, F_{zi}) \quad (11)$$

即有各轮胎力对车辆质心的力矩为:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \quad (12)$$

则建立轮胎系统承载能力计算模型为:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n F_{zi} = mg \\ \sum_{i=0}^n f_{yi} = 0 \\ \sum_{i=0}^n f_{xi} = 0 \\ \sum_{i=0}^n M_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $m$  为簧载质量。

#### 4.1.2 驱动能力

设运动状态下各驱动轴轮胎纵向力为  $F_{xi}$ , 各驱动轮的纵向摩擦力、非驱动轮的摩擦力以及车辆风阻等阻力总和为  $f_{Fx}$ , 即有:

$$m\dot{v} = \sum_{i=1}^n F_{xi} - f_{Fx} \quad (14)$$

式中,  $v$  为车辆行驶速度。

其中, 各轮胎纵向力可由轮胎的魔术公式 (magic formula, MF) 进行求解:

$$F_{xi} = f(\alpha, \lambda, F_{zi}) \quad (15)$$

式中,  $\alpha$  为轮胎侧偏角,  $\lambda$  为轮胎滑动力率。

#### 4.1.3 转向能力

目前相关研究中主要使用的侧翻评价指标为车辆横向载荷转移率 (lateral load transfer rate, LTR)、静态稳定系数 (static stability factor, SSF)、侧翻预防度量 (rollover prevention metric, RPM) 等, 本文选用 LTR 作为侧翻评价指标<sup>[18]</sup>:

$$V_{LTR} = \frac{F_l - F_r}{F_l + F_r} \quad (16)$$

式中:  $F_l$  为左侧轮胎垂向力总和;  $F_r$  为右侧轮胎垂向力总和;  $V_{LTR}$  为 LTR 值, 取值范围为  $[-1, 1]$ 。在理想稳定状态, 两侧轮胎垂向力相等, LTR 值为 0。

运动转向状态时, 还应当考虑到侧倾动态作用力的影响, 设  $G$  为车辆质心,  $C$  为车辆侧倾中心,  $h$  为侧倾中心到地面的高度,  $\sigma$  为侧倾角,  $a_y$  为侧向加速度,  $e$  为侧倾中心到质心的距离,  $B$  为车轮轴距。即有:

$$\begin{cases} F_l \frac{B}{2} + ma_y e \cos \sigma + mg e \sin \sigma - F_r \frac{B}{2} = 0 \\ F_l + F_r = mg \end{cases} \quad (17)$$

且侧向加速度可由侧向力求解, 各轮胎侧向力可由轮胎魔术公式进行求解, 设运动状态下各驱动轴的轮胎侧向力为  $F_{yi}$ , 则有:

$$ma_y = \sum_{i=1}^n F_{yi} \quad (18)$$

$$F_{yi} = f(\alpha, \lambda, F_{zi}) \quad (19)$$

可得:

$$V_{LTR} = \frac{2(\sigma - 1)a_y e - 2g\sigma e}{gB} \quad (20)$$

#### 4.2 约束标准

若轮胎系统各轮胎垂向力大于轮胎的标准最大承载力, 此时轮胎系统失效。即:

$$F_{zi} > F_{zmax} \quad (21)$$

式中,  $F_{zmax}$  为轮胎的标准最大承载力。

若轮胎系统中各轮胎纵向力总和所提供的车辆行驶速度小于车辆任务所需的最小机动速度, 此时轮胎系统失效。即:

$$v < v_{xmin} \quad (22)$$

式中,  $v_{xmin}$  为车辆任务所需的最小机动速度。

若轮胎系统中 LTR 值大于车辆侧翻临界 LTR 值, 此时轮胎系统失效。即:

$$|V_{LTR}| > V_{LTR}^l \quad (23)$$

式中,  $V_{LTR}^l$  为车辆侧翻临界 LTR 值。

#### 4.3 抗毁性分析计算

基于对多轴特种车辆轮胎系统行驶性能的物理机理建模发现: 轮胎系统抗毁性的广义位移  $S_{ID}$  为最大可损失的轮胎数量; 轮胎系统抗毁性的广义速度  $S_{IV}$  为轮胎结构强度的轮胎层级倒数。轮胎系统的最大可损失数量通过物理模型计算可以得到。

1) 首先根据轮胎的标准最大垂向承载力来判断缺失一定数量的轮胎后, 剩余轮胎的垂向载荷是否超过标准承载能力: 若超过, 则轮胎系统失效, 迭代进行下一组计算; 若未超过, 则根据轮胎魔术公式计算出各轮胎的纵向力和侧向力, 计算出车辆的行驶速度。

2) 然后根据作战所需的最小机动速度来判断缺失一定数量的轮胎后, 剩余轮胎的行驶速度是否低于作战所需的最小机动速度; 若低于, 则迭代进行下一组计算; 若未低于, 则继续计算出车辆的侧向加速度。

3) 最后根据车辆侧翻 LTR 值来判断剩余轮胎的 LTR 值是否超过侧翻临界值: 若超过, 则迭代进行下一组计算; 若未超过, 即可得到该轮胎系统的极限缺失轮胎数量。轮胎系统抗毁性广义位移计算流程如图 7 所示。

按照设计的 30 km/h 标准行驶速度, 6 种典型的特种车辆轮胎系统抗毁性的计算结果如表 3 所示。其中,  $S_{ID}(B \rightarrow L)$ 、 $S_{ID}(C \rightarrow B)$  和  $S_{IV}(C)$  反映了车辆的原始设计性能与作战任务的关系。  $S_{ID}(A \rightarrow L)$  和  $S_{IV}(A)$  反映了车辆现实状态的性能。

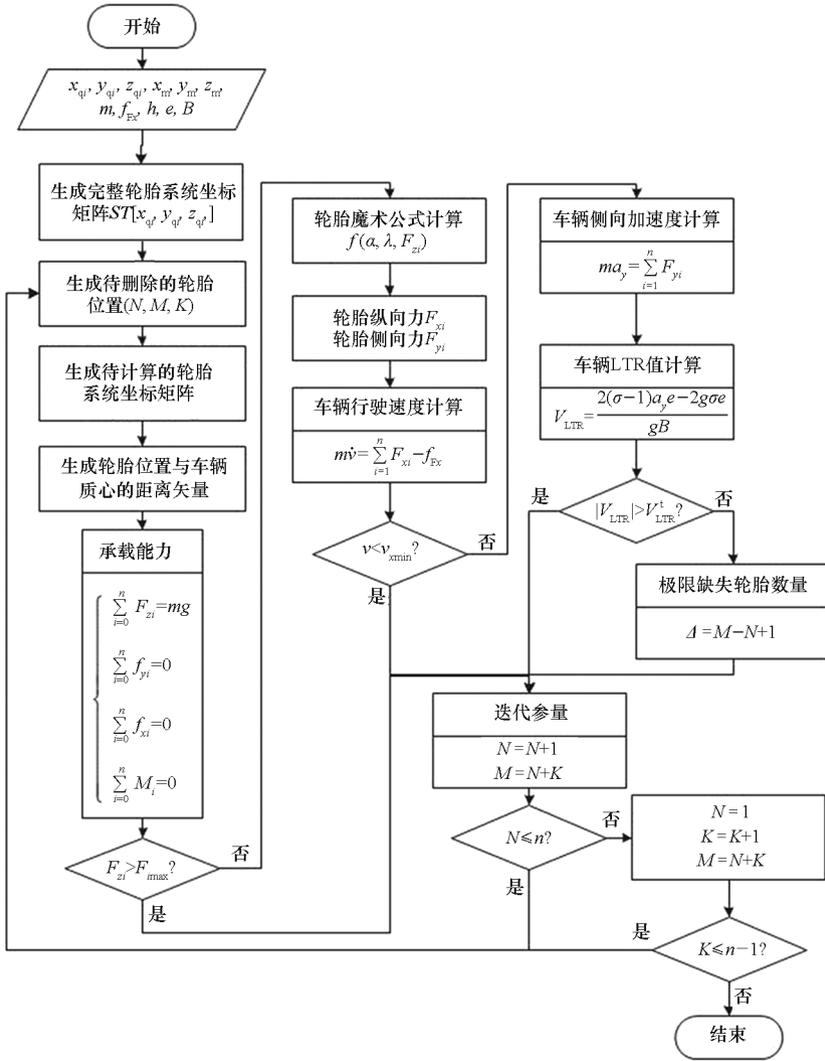


图 7 轮胎系统抗毁性广义位移计算流程

Fig. 7 Generalized displacement calculation process for tire system invulnerability

表 3 轮胎系统抗毁性计算结果

Tab. 3 Calculation results of tire system invulnerability

参数	五轴甲	五轴乙	五轴丙	八轴甲	八轴乙	八轴丙
$S_{ID}(B \rightarrow L)$	1	1	1	3	2	1
$S_{ID}(C \rightarrow B)$	2	2	1	1	2	2
$S_{IV}(C)$	1/16	1/16	1/14	1/18	1/18	1/16
$S_{ID}(A \rightarrow L)$	2	1	1	1	3	2
$\chi$	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5
$S_{IV}(A)$	1/16	1/14	1/16	1/18	1/16	1/16
$S_{IT}(B \rightarrow L)$	13.33	13.33	11.67	36.00	24.00	10.67
$S_{IT}(C \rightarrow B)$	26.67	26.67	11.67	12.00	24.00	21.33
$S_{IT}(A \rightarrow L)$	26.67	11.67	13.33	12.00	32.00	21.33
评估等级	优	中	优	中	优	优
$p_{SI}(\delta = 0.05) / \%$	72.82	31.39	41.74	5.16	73.30	67.08

由表3可知:

1) 八轴特种车辆由于完整状态时的轮胎数量众多,使得八轴车任务状态到极限状态的抗毁性广义位移  $S_{ID}(B \rightarrow L)$  值不小于五轴车;且八轴车轮胎层级较大,使得八轴车的  $S_{IV}(C)$  值小于五轴车,因此从总体上看八轴车的广义防护时间普遍较大。

2) 以五轴车为例进行分析,装备现实状态到极限状态的广义防护时间  $S_{IT}(A \rightarrow L)$  值最大是甲车,为 26.67,评估等级为优级; $S_{IT}(A \rightarrow L)$  值最小为乙车,为 11.67,小于其任务状态广义防护时间值 13.33,表明该型车辆的现实状态对于毁伤的敏感程度大于任务状态,容易遭受毁伤;对比五轴甲、乙两型车辆,其  $S_{ID}(B \rightarrow L)$ 、 $S_{ID}(C \rightarrow B)$  和  $S_{IV}(C)$  值相同,说明两型车辆在原始设计性能上是一致的,只是在现实状态下执行相同需求的作战任务时,甲车在  $S_{ID}(A \rightarrow L)$  和  $S_{IV}(A)$  值上均优于乙车,从而导致甲车的抗毁性大于乙车,在抗毁概率上该两型车辆出现较大偏差,甲车为 72.82%,乙车为 31.39%,乙车更容易被损毁;此外,与乙车相比,丙车在原始设计性能上相对较差, $S_{ID}(C \rightarrow B)$  和  $S_{IV}(C)$  在值上均劣于乙车,因此在  $S_{IT}(B \rightarrow L)$  和  $S_{IT}(C \rightarrow B)$  值上均低于乙车,但是丙车执行的作战任务需求比乙车低,因而在评估等级上占优,但与乙车相比,其  $S_{IT}(A \rightarrow L)$  和  $p_{SI}$  值差异并不大。

3) 计算结果显示的抗毁性评估等级与抗毁性的概率表示是一致的,这说明了可以将表征轮胎系统固有属性的抗毁性以概率的形式表示出来,从而将抗毁性与生存能力评估计算联系起来。

## 5 结论

本文基于生存能力评估对物理空间到性能空间逻辑关系的研究需求,提出了抗毁性的研究概念。针对性能指标对作战功能在广义位移维度和广义速度维度的衡量作用,提出了基于极限损毁的抗毁性分析方法和基于广义防护时间的抗毁性表征方法。通过指标对作战任务的量化机理,提出了面向任务的抗毁性评估方法。并以多轴特种车辆轮胎系统的行驶性能为例进行抗毁性研究,得出以下结论:

1) 抗毁性反映了武器装备对损毁破坏的敏感程度,是由装备自身的结构参数、材料参数、物理机理决定的,属于装备的自身属性。抗毁性是基于物理学理论研究装备结构与性能之间的连接关系,从而构建从几何空间到物理空间

再到性能空间的传递函数,能够解决生存能力和易损性毁伤判据研究缺乏物理学支撑的问题。

2) 基于极限损毁的抗毁性分析方法,是将装备的极限状态通过性能指标和结构指标反映,并通过相关物理学机理构建性能与结构的传递关系,该方法实现了从物理空间到性能空间的物理学传递。基于广义防护时间的抗毁性表征方法,能够反映出幅值距离和难易程度对抗毁性综合影响。

3) 面向任务的抗毁性评估方法能够将作战任务需求引入抗毁性评估中,能够减弱主观赋权对评估结果的影响,同时通过构建转换函数,实现了对抗毁性的概率表示。

4) 通过算例分析,基于本文所提方法得出 6 种典型车辆轮胎系统的抗毁性等级和抗毁性概率,验证了方法的可行性和有效性。

## 参考文献(References)

- [1] 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)
- [2] 郭齐胜,鄧志刚,杨瑞平,等. 装备效能评估概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. GUO Q S, ZHI Z G, YANG R P, et al. Introduction to equipment effectiveness assessment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 汪民乐,彭司萍,杨先德,等. 导弹武器系统生存能力分析[J]. 北京:国防工业出版社, 2015. WANG M L, PENG S P, YANG X D, et al. Methods for analyzing the survivability of missile weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 代海峰,毕义明,刘倩,等. 弹道导弹列车遭核攻击下的生存能力建模分析[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(12): 114-119. DAI H F, BI Y M, LIU Q, et al. Survivability modeling analysis for ballistic missile trains under nuclear attack [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(12): 114-119. (in Chinese)
- [5] 朱旭,朱万红,朱超,等. 基于毁伤树的防御阵地生存效能研究[J]. 防护工程, 2018, 40(4): 36-40. ZHU X, ZHU W H, ZHU C, et al. Research on the positional survivability based on damage tree [J]. Protective Engineering, 2018, 40(4): 36-40. (in Chinese)
- [6] 钱进. 陆基导弹武器系统生存能力研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(5): 5-8. QIAN J. A survey of survivability research of land-based missile weapon system [J]. Fire Control and Command

- Control, 2009, 34(5): 5-8. (in Chinese)
- [7] 陈新祥. 典型战斗部对飞机目标毁伤评估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
CHEN X X. Damage assessment of typical warhead to aircraft[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] DEITZ P H, OZOLINS A. Computer simulations of the abrams live-fire field testing[R]. [S.l.:s.n.], 1989.
- [9] 陈首, 石少卿, 王高胜, 等. 金属网增强遮弹层抗高速弹体侵彻的数值研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 40-50.  
CHEN S, SHI S Q, WANG G S, et al. Numerical study of metal mesh enhanced shielding layer against high velocity projectile penetration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 40-50. (in Chinese)
- [10] 高伟韬, 彭克锋, 张永亮, 等. 月牙形空腔结构金属靶的抗弹性能分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5): 05330.  
GAO W T, PENG K F, ZHANG Y L, et al. On ballistic performance of a metal target with crescent-shaped cavity structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5): 05330. (in Chinese)
- [11] 孙启添, 田超, 孙昕, 等. 封装陶瓷形状对复合结构抗侵略性能的影响[J]. 兵工学报, 2020, 41(增刊2): 83-88.  
SUN Q T, TIAN C, SUN X, et al. Effect of the shape of ceramics on the anti-penetration performance of compound structure[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(Suppl 2): 83-88. (in Chinese)
- [12] 郭登刚, 周强, 刘睿, 等. 铝-镁-铝轻质金属层状复合靶抗弹性能[J]. 兵工学报, 2021, 42(3): 598-606.  
GUO D G, ZHOU Q, LIU R, et al. Ballistic resistance of Al-Mg-Al light metal layered armor plate [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(3): 598-606. (in Chinese)
- [13] LIU Z H, JIANG N, ZHOU C B, et al. Damage effect of terrorist attack explosion-induced shock wave in a double-deck island platform metro station[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2021, 65(1): 215-228.
- [14] LAUBACH M. Destructive evaluation of four aircraft representative of the general aging aircraft fleet [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2008, 1(1): 657-674.
- [15] HLAVICKA-LACZAK L E, KOLLAR L P, KAROLYI G. Damage potential: a dimensionless parameter to characterize soft aircraft impact into robust targets [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2021, 78(1): 31-39.
- [16] ZHANG J L, CHEN C, WEI W B, et al. Research on vulnerability assessment of main battle tank based on the DS function damage tree method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 373/374/375: 2114-2118.
- [17] 蔺涛. 反正切函数回归模型方法及其应用 [C]//中国现场统计研究会第 12 届学术年会论文集, 2005: 163-168.  
LIN T. Arctangent function regression model methods and their applications [C]// Proceedings of the 12th Annual Conference of the China Society for Field Statistics Research, 2005: 163-168. (in Chinese)
- [18] 肖葵, 余卓平, 熊璐. 基于 TTR 和 LTR 的轻型客车侧翻预警及仿真[J]. 汽车技术, 2017(6): 7-10.  
XIAO K, YU Z P, XIONG L. Rollover warning and simulation of light bus with TTR and LTR [J]. Automobile Technology, 2017(6): 7-10. (in Chinese)