

doi: 10.7690/bgzd.2022.08.004

## 固定翼飞机易损性建模分析及软件设计

岳明凯, 宋 业, 赵洪志, 梁振刚

(沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110158)

**摘要:** 针对固定翼飞机易损性问题, 开发一种固定翼飞机目标易损性模型数据库软件。在分析典型固定翼飞机目标特性的基础上, 划分毁伤等级, 应用 3 维建模技术建立固定翼飞机易损性模型, 确定毁伤准则与判据; 应用关系型数据库, 设计固定翼飞机易损性数据库结构, 在 VS 集成开发环境下, 提供可视化仿真接口, 实现数据、模型的统一格式存储和快速查询, 并通过实例进行验证。结果表明: 该软件能够实现固定翼飞机目标易损性数据的快速查询与管理, 可为固定翼飞机目标毁伤评估提供参考。

**关键词:** 固定翼飞机; 目标易损性; 易损性模型; 数据库

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Modeling Analysis and Software Design of Fixed-wing Aircraft Vulnerability

Yue Mingkai, Song Ye, Zhao Hongzhi, Liang Zhen'gang

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of fixed-wing aircraft vulnerability, a database software of fixed-wing aircraft target vulnerability model is developed. On the basis of analyzing the target characteristics of typical fixed-wing aircraft, the damage level is divided, the vulnerability model of fixed-wing aircraft is established by using 3D modeling technology, and the damage criteria and criteria are determined; The database structure of fixed-wing aircraft vulnerability is designed by using relational database, and the visual simulation interface is provided in the integrated development environment to realize the unified format storage and fast query of data and models, which is verified by an example. The results show that the software can realize the rapid query and management of fixed-wing aircraft target vulnerability data, and provide a reference for fixed-wing aircraft target damage assessment.

**Keywords:** fixed-wing aircraft; target vulnerability; vulnerability model; database

### 0 引言

固定翼飞机具备机动性、快速性的作战特点, 主要包括战斗机、轰炸机、侦察机等, 是现代战争的重要作战单元<sup>[1]</sup>。分析固定翼飞机易损性并形成详细、真实的易损性数据库软件, 对固定翼飞机目标毁伤评估和飞机防护研究具有重要意义。

国外非常重视目标易损性仿真软件的设计。美国在广泛收集战场数据和全尺寸试验数据的基础上, 建立了大量相关的评估模型、建模软件、内嵌程序和针对性强的数据库; 瑞典的 AVAL 软件可进行三军通用的易损性分析; 德国 IABG 公司开发了功能强大的 UniVeMo 通用软件<sup>[2]</sup>。国内易损性研究起步较晚, 但随着计算机技术的高速发展, 飞机易损性方面的软件相继出现, 卢军民等<sup>[3]</sup>建立了一种破片式战斗部作用下的固定翼飞机易损性评估模型, 同时开发了飞机易损性评估仿真软件; 秦宇飞等<sup>[4]</sup>就飞机战伤抢修的角度, 设计开发了飞机目标

易损性分析系统; 吴旭辉<sup>[5]</sup>设计了以目标结构模型、目标功能模型、目标毁伤等级模型等模块为主的飞机类目标易损性数据库软件系统。综上所述, 目前飞机易损性相关研究大多都形成以软件分析系统来完成飞机易损性分析, 较为直观、全面; 因此, 设计一种通用性强、数据丰富、可再开发的易损性数据库, 能够对固定翼飞机易损性数据进行储存与管理, 形成此类飞机易损性数据的快速查询平台, 对于固定翼飞机目标毁伤评估研究具有实用价值。

笔者从固定翼飞机结构出发, 开展固定翼飞机目标易损性分析, 建立固定翼飞机易损性模型, 设计并开发一种用于快速查询的固定翼飞机目标易损性数据库软件。

### 1 固定翼飞机易损性分析

#### 1.1 目标舱段结构分析

选择某多用途型战斗机作为研究目标。如图 1 所示, 典型固定翼飞机由多个舱段组成, 包括前、

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-22

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LG202001); 沈阳理工校级高水平成果建设项目(SYLUXM202108)

作者简介: 岳明凯(1971—), 男, 辽宁人, 博士, 教授, 从事武器系统安全控制, 探测、控制与毁伤技术, 新概念武器设计与应用研究。  
E-mail: 13032486996@163.com.

中、后机身舱段，左右机翼，尾部辅助飞行稳定的垂翼和平翼。

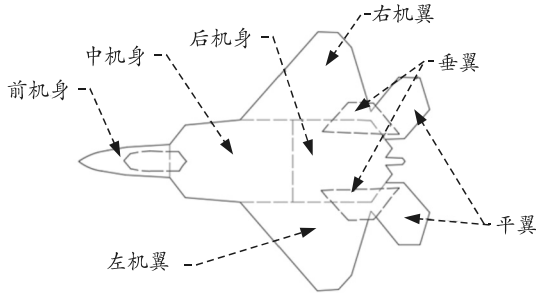


图 1 典型固定翼飞机舱段结构

在舱段划分的基础上，结合固定翼飞机特性数据，形成固定翼飞机结构模型如图 2 所示。确定每个舱段包含的部件以及每个部件之间的位置关系。

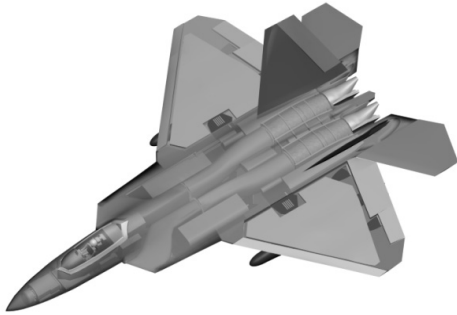


图 2 典型固定翼飞机结构模型

### 1.2 划分毁伤等级

固定翼飞机作战任务的完成需要依托于飞机的飞行和控制能力，可将固定翼飞机的毁伤等级划分为 3 类(各等级毁伤事件如表 1 所示)<sup>[6-7]</sup>：1) 重度

毁伤(K)，飞机立即解体或 5 s 内失去控制；2) 中度毁伤(A)，飞机在 5 min 内失去控制；3) 轻度毁伤(C)，飞机不能自主返回或者不能完成作战使命。

表 1 各级毁伤事件

毁伤等级	毁伤事件
K	武器舱引爆、飞行员死亡、航电系统击穿、发动机全部损坏、机翼断裂
A	单个机翼严重受损、环境系统受损(如氧气系统)、油箱引燃或泄露，飞行控制面板受损
C	起落架受损、武器舱受损、飞行控制面板轻度受损、雷达系统受损

### 1.3 毁伤等效模型

目标毁伤等效模型的等效原则：在几何和物理构型与真实目标相似、功能毁伤特性与真实目标等效的前提下，基于目标对具体毁伤因素的物理或力学响应规律所建立的结构简化、几何形状相对规则和材料标准的目标模型<sup>[7]</sup>。某战斗机目标的关键部件—涡扇发动机如图 3 所示，基于发动机的结构外形特点，等效为圆柱体等效模型。

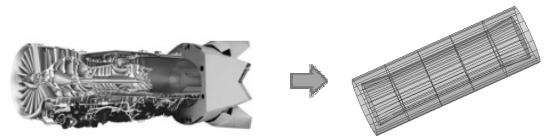


图 3 飞机发动机等效示意

考虑涡扇发动机的外壳材料以及功能毁伤特性<sup>[6]</sup>，发动机等效模型改为铝制圆柱体壳体，并确定发动机等效模型的等效厚度、易损面积比例等效数据如表 2 所示。

表 2 飞机发动机模型等效数据

等效部件	等效形状	等效材料	等效厚度/mm	易损面积比例/%	几何尺寸(r×h)/mm
涡扇发动机	圆柱体	AL2024	7.4	70	644×6 038

完成所有部件等效模型后，以目标结构坐标为基准，形成如图 4 所示的目标等效模型。

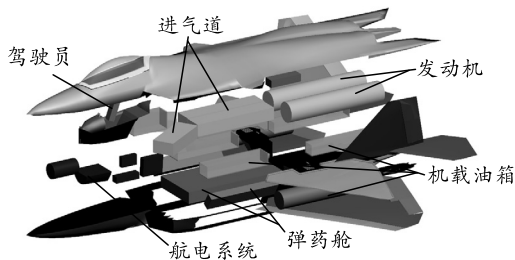


图 4 固定翼飞机等效模型

### 1.4 毁伤准则与判据

对于固定翼飞机目标，需要考虑的毁伤模式大致分为动能类毁伤元的穿透毁伤作用、引燃油箱毁伤作用、引爆飞机携带弹药的毁伤作用、冲击波的

毁伤作用以及杆条破片对目标的毁伤作用<sup>[8-12]</sup>。

1) 穿透毁伤作用，对于动能毁伤元侵彻问题一般采用 THOR 方程计算破片极限穿透速度  $V_b$ ，单枚动能毁伤元毁伤功能部件概率为：

$$P_{k/h} = \begin{cases} 0, & V < V_b \\ \xi, & V \geq V_b \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\xi$  为多个方向下易损面积比例平均值； $P_{k/h}$  为部件被毁伤概率。

2) 引燃油箱毁伤作用，动能毁伤元对飞机油箱的引燃概率取决于击瞬间毁伤元的速度、重量和防护层的厚度及空气密度，造成油箱引燃的概率为<sup>[8]</sup>：

$$P_c(V_{pxd}) = \begin{cases} 0, & V_{pxd} < 400 \text{ m/s} \\ 1 - e^{-0.006q^{2/3}(V_{pxd} - 400)H(y)}, & V_{pxd} \geq 400 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $q$  为弹丸的重量； $V_{pxd}$  为与目标的相对速度； $H(y)$  为高度函数。

3) 引爆飞机携带弹药的毁伤作用，主要是指破

$$P_{\alpha} = \begin{cases} 0 & 10^{-6} A_1 \leq 6.5 + 100a_1 \\ 1 - 3.03e^{-5.6} \frac{10^{-8} A_1 - a_1 - 0.065}{1 + 3a_1^{2.31}} \times \sin \left[ 0.34 + 1.84 \frac{10^{-8} A_1 - a_1 - 0.065}{1 + 3a_1^{2.31}} \right] & 10^{-6} A_1 > 6.5 + 100a_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中：

$$\begin{aligned} A_1 &= 5 \times 10^{-3} \rho_e m_f^{2/3} v_b^3; \\ a_1 &= 5 \times 10^{-2} \left( (\rho_{m1} b_1 + \rho_{m2} b_2) / m_f^{1/3} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\rho_e$  为炸药的密度； $\rho_{m1}$ 、 $b_1$  分别为被引爆物外壳的密度和厚度； $\rho_{m2}$ 、 $b_2$  分别为飞机蒙皮金属的密度和厚度。

4) 冲击波毁伤作用，主要考虑冲击波对飞机整体的毁伤作用，对于固定翼飞机目标的毁伤概率为：

$$P_{\text{shock}} = \begin{cases} 1 & \Delta p \geq p^* \\ 0 & \Delta p < p^* \end{cases} \quad (5)$$

K 级毁伤  $P^*$  取 0.1 MPa；C 级毁伤  $P^*$  取 0.05 MPa。

5) 杆条破片毁伤作用，主要考虑杆条破片对机翼、蒙皮、油箱等厚度薄弱处形成连续的切口来对目标毁伤。切口长度估算如下<sup>[3]</sup>：

$$l_{cs} = L \sin \gamma \sqrt{1 + \cos^2 \theta \cot^2 \Omega} \quad (6)$$

式中  $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\Omega$  为杆条与靶板不同位置的夹角。

$P_j$  为  $j$  舱段的毁伤概率， $l_j$  为该舱段上杆切口长度之和，则

$$P_j = \begin{cases} 1, & l_j \geq l_{jc} \\ 0, & l_j \leq l_{jc} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $l_{jc}$  为临界切口长度，一般取 0.6 ~ 0.9 m。

## 2 目标易损性数据库软件设计

### 2.1 系统整体架构设计

固定翼飞机目标易损性数据库软件设计包含 5 个模块，分别是目标功能结构分析模块、目标毁伤等级与毁伤树模块、目标等效模型模块、目标毁伤准则与判据模块和数据库维护模块。

各模块分别从目标易损性数据库中提取相关易损性数据，以实现易损性数据查询，同时在数据库维护模块中设置数据修改功能，并存储到数据库，软件整体架构如图 5 所示。

### 2.2 数据库设计

整个系统平台基于 C/S 架构，服务器端主要部

片对飞机装载的弹药的冲击而引起的爆炸。影响引爆的因素有引爆物参数、冲击体参数及遭遇条件。引爆概率的公式为：

署目标特性数据库，数据库储存各系统易损性数据，主要包含在典型固定翼飞机易损性分析过程中建立的目标结构功能数据、目标系统结构数据、目标 3 维模型数据、目标部件易损数据等。针对多样化数据形式，需对数据进行分类和组织；因此需进行数据库结构设计。以软件各模块为基准，完成数据组织和分类，采用基于实体联系方法进行数据库设计，各数据表关系如图 6 所示<sup>[13-14]</sup>。

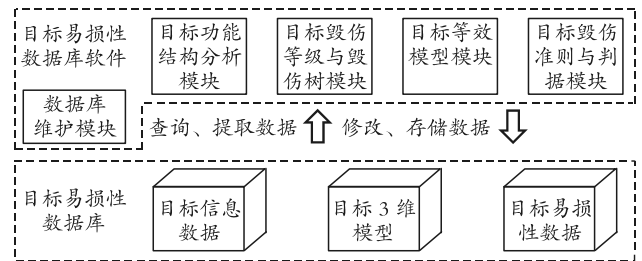


图 5 固定翼飞机易损性数据库系统架构

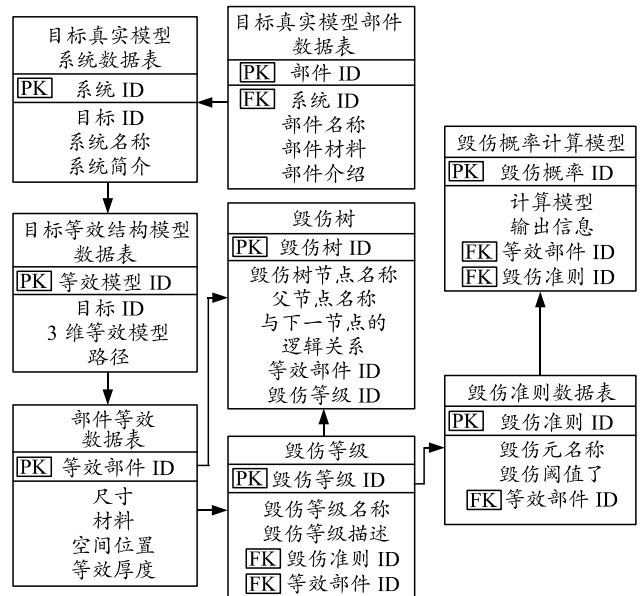


图 6 固定翼飞机易损性数据库关系模型

### 2.3 软件功能模块设计

#### 1) 目标功能结构分析模块。

模块用于目标功能结构数据查询，包括目标介绍、系统功能数据以及各系统部件与目标功能的关联。通过结构树的形式，便于快速了解目标的功能结构特性。

### 2) 目标毁伤等级与毁伤树模块。

模块用于目标毁伤等级及毁伤事件查询，划分固定翼飞机毁伤等级，从毁伤模式及影响分析角度，将部件、部件毁伤模式及毁伤级别联系起来，进而确定部件是否为关键部件以及对应的毁伤事件。根据关键部件的毁伤底事件及毁伤影响分析，建立不同等级的毁伤树，同时在系统中显示。

### 3) 目标等效模型模块。

模块用于目标等效模型数据查询，包括各系统结构关联及目标功能结构模型，从系统结构数据库中读取该模块信息，将目标等效模型展示在系统中，快速显示部件结构数据、空间位置数据及等效数据<sup>[15-16]</sup>。

### 4) 目标毁伤准则与判据模块。

模块用于目标部件毁伤律模型查询以及毁伤概率计算模型数据，结合典型战斗部毁伤元，从毁伤准则数据库中读取该模块信息，选择目标部件及毁伤元类型获得毁伤准则与毁伤阈值<sup>[17]</sup>。

### 5) 数据库维护模块。

模块用于固定翼飞机目标易损性数据库维护，包括将各个模块的目标易损性数据进行修改与添加，建立起数据库与数据库软件各模块的有效链接，同时实现目标易损性数据的有效管理。

## 3 应用实例

针对某典型固定翼飞机目标，从系统结构、功能角度入手，开展易损性研究。通过目标易损性数据库管理收录信息，可以实现其易损性数据的快速查询。通过 3 维结构模型的可视化展现，直观观察固定翼飞机各部件的真实形状以及位置关系。如图 7 所示，点击左侧结构树中的右平尾，模型中的右平尾处于高亮状态。

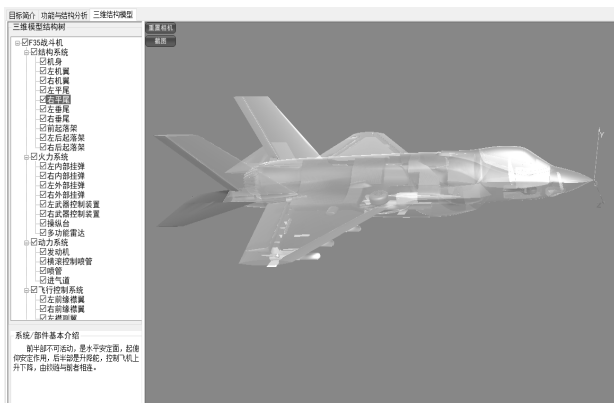


图 7 目标功能结构分析界面

如图 8 所示，以毁伤树的形式展示各毁伤等级

下毁伤事件，显示目标与部件毁伤之间的关联关系。点击 K 级毁伤，窗口呈现 K 级毁伤树。

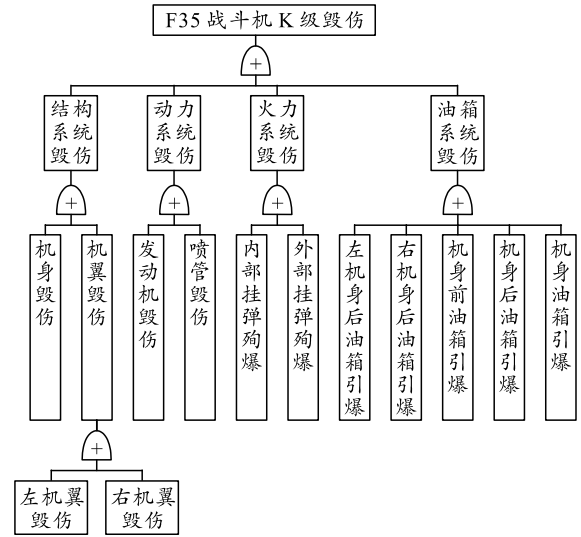


图 8 目标毁伤等级与毁伤树界面

将部件等效模型以位置坐标为基准进行重组，构成目标毁伤等效模型。如图 9 所示，从右侧可以查询各部件等效信息。

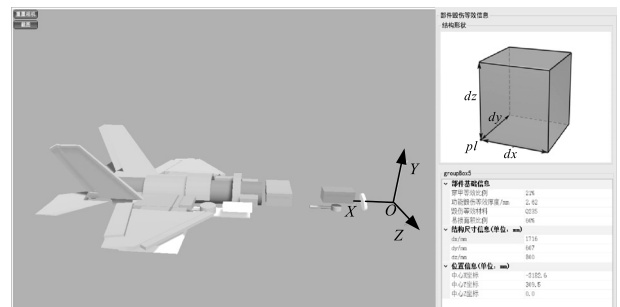


图 9 目标等效模型界面

以部件结构树的形式，点击选择显示各部件的毁伤准则与判据界面如图 10 所示。

飞机导弹引燃作用毁伤准则与判据

引燃作用主要是指破片对飞机结构的冲击而引起的爆炸。影响引燃的因素有引燃物参数、冲击变数及遭遇条件。引燃概率的经验式为：

$$P_0 = \begin{cases} 0 & 10^4 A \leq 6.5 + 100a_1 \\ 1 - 3.02e^{-0.17A} - \frac{0.065}{1 + 0.0001A^2} & 10^4 A > 6.5 + 100a_1 \end{cases}$$

其中， $A = 5 \times 10^4 \rho_0 v^2 \frac{d}{m}$   
 $a_1 = 5 \times 10^4 \frac{\rho_0 \beta - \rho_0 \beta_0}{\rho_0^2}$

式中， $\rho_0$  为炸药密度； $\rho_0 \beta_0$ 、 $\rho_0 \beta$  分别为引燃物壳类的密度和厚度； $\rho_0 a_1$ 、 $\rho_0 a_2$  分别为飞机蒙皮金属的密度和厚度。

毁伤概率计算模型

(1) 对于 $n$ 枚有效功能类毁伤元命中第 $i$ 个关键部件，第 $i$ 个关键部件的毁伤概率为：

$$P_i^{(1)} = 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - P_{ij})$$

(2) 存在冗余部件，一般来说，如果击中冗余部件之一，并不会造成系统或目标毁伤，冗余部件同时被毁伤时，才能影响系统功能。针对冗余部件，需计算该类部件整体毁伤概率：

$$P_i = \prod_{j=1}^k P_{ij}^{(2)}$$

(3) 一定毁伤等级下目标毁伤概率：

$$P_2 = \sum_{i=1}^n P_i$$

$\sum_{i=1}^n P_i$  表示目标功能与毁伤响应传递规律，即依据毁伤依据一定毁伤等级下毁伤树图表示的逻辑关系由部件的毁伤计算系统毁伤，再由系统毁伤计算目标毁伤的计算。

图 10 目标毁伤准则与判据界面

将目标易损性数据库的修改权限赋予数据库维护模块,通过将目标易损性数据模块化管理的方



图 11 数据库维护界面

4 结束语

笔者对固定翼飞机易损性进行分析,构建固定翼飞机易损性模型,使用关系型数据库与 C#编程语言,设计了固定翼飞机易损性数据库软件。

参考文献:

[1] 高宇, 胡慧, 邢丽, 等. 固定翼飞机近距空中支援作战能力评估[J]. 兵工自动化, 2021, 40(5): 51-55.
[2] 徐豫新, 蔡子雷, 吴巍, 等. 弹药毁伤效能评估技术研究现状与发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(6): 10.
[3] 卢军民, 李向东, 毛东方. 破片式战斗部作用下固定翼飞机的易损性评估[J]. 南京理工大学学报(自然科学

版), 2008, 32(6): 695-700.
[4] 秦宇飞, 刘晓山, 冯海星. 某型飞机目标易损性分析系统设计[J]. 机电产品开发与创新, 2010, 23(1): 18-20.
[5] 吴旭辉. 飞机类目标易损性数据库软件设计[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(2): 89-93.
[6] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 68-70.
[7] 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 36-37.
[8] 徐梓熙, 刘彦, 闫俊伯, 等. 不同破片对典型飞机目标的毁伤效应[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 63-68.
[9] 许寄阳. 杆条战斗部对固定翼飞机的毁伤效能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
[10] 高睿源, 范瀚阳, 范洪明. 飞机类目标毁伤效果评估方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(8): 136-140.
[11] 王玉, 张兵, 唐凯, 等. 复杂系统目标易损性等效结构建模与毁伤律分析方法[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(5): 99-102, 106.
[12] HAN L, HAN Q, GE Y X, et al. Vulnerability assessment of combat aircraft to blast loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(2): 604-615.
[13] 王鑫. 装甲车辆目标易损性及数据库系统技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
[14] 赵莹, 胡畅达, 王国宇. 三种关系型空间数据库比较[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(19): 62-64.
[15] 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.
[16] 徐敬青, 崔平, 文健, 等. 基于3DSMAX和Unity3D的末制导炮弹射击准备虚拟训练系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 30-34.
[17] 温泽华, 赵华超, 陈辛. 空空导弹对F-22A的杀伤概率研究[J]. 航空兵器, 2016(5): 8-11.
[3] 王文亮, 张效义. 反舰导弹协同作战智能化发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(10): 1-5.
[4] 贺扬清, 沈治河. 反舰导弹集群协同作战任务规划研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(7): 1-4.
[5] 邵云龙, 孙学峰, 隋江波, 等. 岸舰导弹作战体系网络结构优化研究[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 68-72.
[6] 曾家有, 王国卫, 钟建林, 等. 多平台舰舰导弹饱和攻击几个协同问题与模型[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 256-261.
[7] 车梦虎. 多平台导弹攻击航路规划时间基准方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(8): 123-126.
[8] 丁宇, 闫秀生. 智能化远程反舰导弹能力及技术分析[J]. 光电技术应用, 2019, 34(2): 1-6.
[9] 杨秀霞, 周恺恺, 罗超, 等. 反舰导弹智能化在线任务分配研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(7): 38-40.
[10] 郭锐, 王步云. 基于多Agent的舰艇编队反舰导弹作战指挥模式研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(2): 10-14.
[11] 范作娥, 顾文锦, 姜鹏, 等. 基于蒙特卡洛法的反舰导弹末端机动突防效果研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(3): 241-245.

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)