

基于杀伤链分析的协同作战效能评估



卫旭芳, 花文涛, 张欢

中国空空导弹研究院 空基信息感知与融合全国重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要: 随着技术发展及作战概念的推陈出新, 未来空战呈现协同、智能、激烈对抗的趋势, 导弹作为杀伤链打击环节的主战武器, 也逐步呈现群体化协同作战的特点。本文以导弹为主要研究对象, 探索了多导弹协同作战杀伤链建模及效能评估方法, 提出基于杀伤链分析的多导弹协同作战效能评估模型, 基于该模型分析导弹协同打击效能评估案例, 并对所提出效能评估方法进行验证, 为有效利用武器装备进行作战规划、战术决策、促进装备协调发展奠定基础。

关键词: 杀伤链分析; 协同; 效能评估; 导弹

中图分类号: TJ760.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.011

随着信息技术的发展, 武器装备的信息化水平大幅提升, 在分布式杀伤、马赛克作战、脉冲式作战概念牵引下, 未来空战呈现高动态、高烈度形态, 装备间密切协同, 形成高弹性、自组织、自适应的杀伤链, 有效指控、快速编组, 大幅提升了作战效能。各种武器装备协同执行作战任务, 避免了因单装失能导致体系失效的可能。杀伤链分析是优化空战体系、缩短打击时间及提升杀伤效果的有效方法^[1]。针对特定战场环境输入, 如何输出最优效能的杀伤链具有重要研究价值^[2]。美军先后提出多种杀伤链分析模型, 如空军定位-跟踪-瞄准-交战-评估(F2T2EA)杀伤链模型、新一代F5杀伤链模型和美国国防高级研究计划局(DARPA)的自适应跨域杀伤网(ACK)等。杀伤链分析常采用体系架构框架(DoDAF)、体系仿真、复杂网络建模等方法, 基于杀伤链分析的效能评估方法对构建好用、管用、耐用的杀伤链具有重要意义。导弹作为杀伤链打击环节的最后一环, 对杀伤链是否可行起到决定性作用, 在信息技术驱动下, 导弹打击环节也呈现群体化协同特征。导弹视角下如何评判杀伤链优劣, 需要开展基于杀伤链分析的协同作战效能评估研究, 为装备决策、任务规划提供参考和依据。

针对杀伤链分析问题, 国内学者开展了大量的研究,

采用建模仿真分析结合的方法, 以及杀伤链评估模型进行杀伤链分析。姜杰宇等^[3]作战系统建模进行杀伤网弹性分析; 万斯来等^[4]基于本体理论与知识建模进行杀伤网设计分析。杀伤链评估模型方面, 陆军等^[5]运用打击链时间评估模型分析杀伤链, 为伍^[6]提出导弹杀伤链评估模型进行导弹杀伤链分析; 相比之下邵俊^[7]则通过多种装备组合构建多层次网络杀伤链模型, 建立了冗余、风险、时效性分析指标, 并针对海上联合作战过程较为全面地进行了杀伤链分析评估。

上述文献研究对象多集中于联合作战或复杂体系层面, 未对武器参与的协同作战过程进行设计。因此, 本文以导弹协同作战为对象, 开展导弹协同作战体系架构、多弹协同杀伤链建模、基于杀伤链分析的多弹协同作战效能评估方法研究, 针对具体案例分析导弹协同打击杀伤链效能评估结果, 为不同战场情境下杀伤链评判提供决策依据。

1 导弹协同作战杀伤链体系架构

多弹协同作战相比传统作战要建立弹与弹之间的通信关系, 保障弹与弹之间的信息传输^[8-9]。其体系架构相

收稿日期: 2024-12-20; 退修日期: 2025-03-12; 录用日期: 2025-04-08

基金项目: 航空科学基金(2022Z001012001)

引用格式: Wei Xufang, Hua Wentao, Zhang Huan. Effectiveness evaluation of missile group operations based on kill chain analysis[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 87-95. 卫旭芳, 花文涛, 张欢. 基于杀伤链分析的协同作战效能评估[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 87-95.

比传统导弹发生了变化,要对多导弹杀伤链进行建模,需要研究多弹杀伤链的体系结构。针对典型对抗场景对多弹杀伤链体系结构建模,对多弹作战杀伤链进行分析,如图1所示。

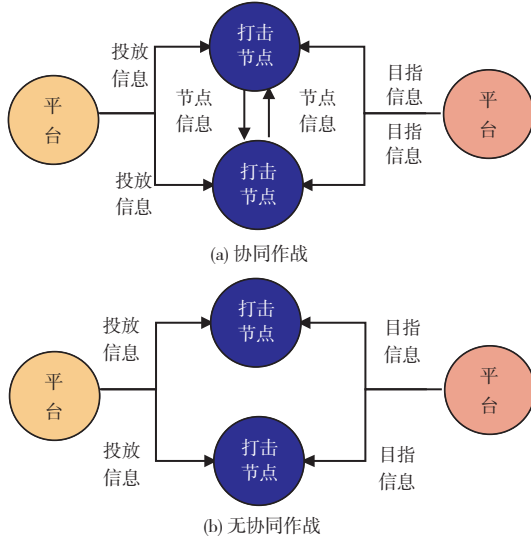


图1 信息交互关系

Fig.1 Information interaction relationship

经分析可知,相比传统导弹使用,多导弹协同作战的变化主要体现在:(1)与平台间的关系;(2)打击节点间信息交互关系;(3)打击节点之间产生协同行为关系,对其飞行特性、探测能力均会产生影响,因此,杀伤链建模时要着重关注上述模型。

2 多弹协同作战杀伤链建模

2.1 导弹作战过程分析

导弹的典型制导模式是复合制导,包括捷联惯导、无线电指令修正中制导、导引头精确末制导等阶段。对于协同作战的多枚导弹而言,会叠加新的作战元素,如信息保障、协同飞行及协同探测等。要对多弹协同作战杀伤链建模,需要关注弹道、制导、协同行为等多个环节^[10-11]。

2.2 多弹协同杀伤链模型

2.2.1 弹道模型

导弹的运动特性描述时,假设导弹在整个飞行期间处于瞬时平衡状态,舵面偏转的同时,运动参数就立即达到它的稳态值,过渡过程为零^[12]。同时不考虑弹性变形、曲率影响、气流等因素。选择地面坐标系 O_{xyz} 为基准,导弹的运动学方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_d}{dt} = v_d \cos \lambda_d \cos \theta_d \\ \frac{dy_d}{dt} = v_d \sin \lambda_d \\ \frac{dz_d}{dt} = v_d \cos \lambda_d \sin \theta_d \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_d 为导弹速度, λ_d 为导弹俯仰角, θ_d 为导弹航向角, x_d 、 y_d 、 z_d 分别为导弹在地面坐标系 O_x 、 O_y 、 O_z 轴上的投影。导弹动力学方程为

$$\begin{cases} m\dot{V} = P \cos \alpha \cos \beta - X - mg \sin \theta \\ mV\dot{\theta} = P(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma) + Y \cos \gamma - Z \sin \gamma - mg \cos \theta \\ -mV \cos \theta \dot{\phi} = P(\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma) + Y \sin \gamma + Z \cos \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为导弹质量, V 为速度, P 为发动机推力, α 为迎角, β 为侧滑角, X 为阻力, θ 为弹道倾角, γ 为速度倾斜角, Y 为升力, g 为重力加速度, ϕ 为弹道偏角, Z 为侧向力。

目标运动学方程^[110-12]为

$$\begin{cases} \frac{dx_m}{dt} = v_m \cos \lambda_m \cos \theta_m \\ \frac{dy_m}{dt} = v_m \sin \lambda_m \\ \frac{dz_m}{dt} = v_m \cos \lambda_m \sin \theta_m \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_m 为目标速度; λ_m 为目标俯仰角; θ_m 为目标航向角; x_m 、 y_m 、 z_m 分别为目标坐标在地面坐标系 O_x 、 O_y 、 O_z 轴上的投影。

$$\begin{cases} \dot{V} = a_x - g \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{1}{V} (a_y - g \cos \theta) \\ \dot{\phi} = \frac{a_z}{V \cos \theta} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\dot{V}$ 为速度导数; $\dot{\theta}$ 为倾角的导数; $\dot{\phi}$ 为方位角的导数。

2.2.2 制导律模型

比例导引律指保持导弹速度矢量转动的角速度与目标视线转动的角速度成比例,其导引关系为

$$\begin{aligned} \lambda_d &= K \lambda_{dm} \\ \theta_d &= K \theta_{dm} \\ \lambda_{dm} &= \arctan \frac{y_m - y_d}{\sqrt{(x_m - x_d)^2 + (z_m - z_d)^2}} \\ \theta_{dm} &= \arctan \frac{z_m - z_d}{x_m - x_d} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, K 为导引比; λ_{dm} 为目标相对于导弹高低角,为弹目视线与水平面夹角; θ_{dm} 为目标相对于导弹方位角,为弹目视线在水平面投影与 O_x 轴夹角。

2.2.3 导引头模型

导引头模型主要反映中制导、末制导、截获概率计算、工作状态判断等功能。影响导引头中末交班截获概率的因素主要有发射前主惯导对弹上惯导装订误差、加速度计测量误差、陀螺仪测量误差、传感器测量误差(测角、测距误差)、传感器传输延时造成的误差、传感器安装误差、目标机动引起的误差和机弹链路误差等^[13-17]。

(1) 雷达指示误差

雷达通过探测与目标的距离和方位角确定目标位置参数,目标坐标为 $(L \cos \theta \cos \phi, L \sin \theta + H, L \cos \theta \cos \phi)$ 。其中, L 为雷达与目标的探测距离, H 为平台雷达高度探测值, θ 为目标俯仰角探测值, ϕ 为目标方位角探测值。设雷达测距精度为 δ_L ,测高精度为 δ_H ,测角精度为 δ_a ,则估算目标指示位置误差的协方差矩阵为

$$\mathbf{B}_1 = \text{diag}(\delta_L^2 + 2(L\delta_a^2), \delta_L^2 + L\delta_a^2 + \delta_H^2, \delta_L^2 + 2(L\delta_a^2)) \quad (6)$$

(2) 导弹空间定位误差估计

设导弹单位时间内定位精度为 $\delta_{xM}, \delta_{yM}, \delta_{zM}$,估算导弹定位位置的误差协方差矩阵为

$$\mathbf{B}_M = \text{diag}(\delta_{xM}^2, \delta_{yM}^2, \delta_{zM}^2) \quad (7)$$

(3) 目标机动引起的误差

目标机动引起的误差表示为

$$\Delta\phi_1 = \arctan \frac{\alpha_H T^2}{2R_s} \quad (8)$$

式中, α_H 为目标的最大机动能力,用最大加速度表征; $\Delta\phi_1$ 为目标机动引起的误差; T 为中制导数据更新周期; R_s 为导引系统的扫描范围。

(4) 平台主惯导与导弹子惯导的对准误差

对准误差反映了平台主惯导系统提供的目标信息和导弹子惯导系统提供的目标信息之间的差异。目标机动引起的对准误差可表示为

$$\Delta\phi_2 = \theta_m + \theta_d \quad (9)$$

式中, $\Delta\phi_2$ 为对准误差,即主惯导与导弹子惯导之间的角度之和; θ_m 为主惯导系统提供的方向信息; θ_d 为导弹子惯导系统提供的方向信息。

(5) 目标指示误差

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta\phi_i^2} \quad (10)$$

目标指示误差相互独立,在视线系 y, z 轴上服从相同的正态分布 $N(0, \sigma^2)$,目标指示误差的概率密度函数为

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{y^2+z^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

导引头截获概率 P 可以描述为目标指示误差概率密度

函数在导引头视场 Ω 内的积分,即

$$P = \iint_{\Omega} f(y, z) dy dz \quad (12)$$

假设导引头的视场为 $\pm d$,截获概率 P 为

$$P = 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

如图2所示,目标指示角度误差 $\phi_s < d$,认为角度截获成功。

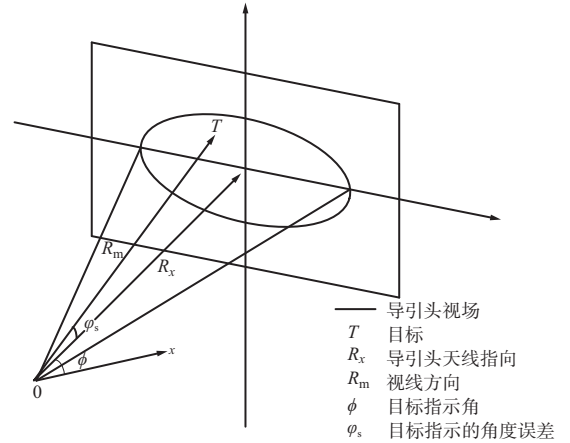


图2 目标指示误差

Fig.2 Target indication error

2.2.4 协同模型

导弹协同作战,针对不同任务场景、协同模式、目标指示信息及精度,考虑导弹工作逻辑等进行分析,通过合理假设,建立协同探测模型。通过作战过程分析,抽象出影响导弹截获概率的误差源,针对动态作战过程开展系统误差建模,形成多导弹协同作战协同探测分析模型,如图3所示。协同探测引起的变化,主要体现在对导弹传感器视场 Ω 、搜索时间等的变化上,如式(14)所示

$$P = f(\Omega, t, n, \theta) \quad (14)$$

式中, Ω 为导弹传感器视场, t 为波位时间, n 为波位数量, θ 为波位范围。

3 多弹协同作战杀伤链评估方法

3.1 时间分析

时间链指标反映了各个阶段的运行时间,从时间的维度描述杀伤链条所占用时间的长短及时间切片大小,以及对武器整体作战效果的影响。特定作战活动的及时性表示为一个五元组 $T = \{A, E, A_s, A_E, A_M\}$ 。其中 $A = \{\text{发现, 定位, 跟踪, 瞄准, 打击, 评估}\}$ 表示F2T2EA中的活动; E 表示在作战活动 A 中涉及的装备列表; A_s 表示作战活动的开始时间; A_E

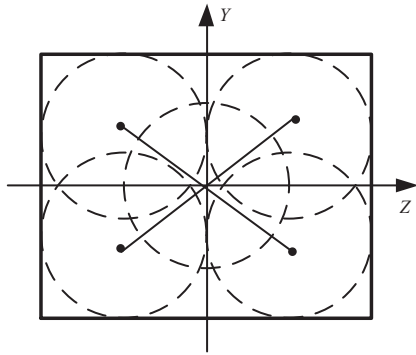


图3 导弹协同探测方式示意

Fig.3 Schematic diagram of missile collaborative detection method

表示作战活动的结束时间, A_M 表示该作战活动设定的最大执行时间。记 $t_i = A_E - A_S$, 对于整个杀伤链构建的时间链, 则为每个活动的及时性数值之和, 即 $\sum t_i$ 。

实际情况中, 时间效能的衰减通常并非线性的。随着实际用时 t 的增加, 时间链评估指标 W_T 可能会迅速下降。为更准确地反映这种非线性关系, 引入一个指数 k , 则公式修改为式(15)

$$W_T = -\left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^k + 1 \quad (15)$$

指数 k 定义了时间效能下降的速率。 k 的值越大, 意味着随着时间的推移, 时间效能下降得越快。通过调整 k 的值, 模拟不同战场环境和任务要求下的时间效能曲线, 从而为决策者提供更为精确的时间效能评估。

3.2 准确度分析

准确度评估辨别性, 关注辨别被打击目标的能力, 可用作战单元识别目标概率来衡量。辨别性指在杀伤链的各个阶段, 快速且准确地识别被打击目标的能力。高辨识性能能够显著降低误伤的风险, 提高打击的精确度。辨识性是针对特定装备的, 故可以表示为二元组 $P = \{E, E_p\}$ 。其中 E 表示作战装备, E_p 表示该装备的辨别性, 为一个概率数值。根据发现定位阶段、跟踪瞄准阶段和打击评估阶段中涉及的装备, 构建准确度链, 其可以分为三个独立阶段, 量化公式如式(16)所示

$$W_p = P_1 P_2 P_3 \quad (16)$$

式中, P_1 为发现定位阶段中侦察装备识别被打击目标的准确度, P_2 为跟踪瞄准阶段中作战单元到达指定地点后识别被打击目标的准确度, P_3 为打击评估阶段中作战武器后成功打击目标的准确度。

3.3 精度分析

两个装备之间的精确性可以表示为一个五元组 $A = \{A_S, A_E, E_S, E_E, E_A\}$ 。其中 A_S 表示起始作战活动, A_E 表示结束作战活动, E_S 表示起始作战装备, E_E 表示结束作战装备, E_A 表示从 E_S 到 E_E 的精度值。发现定位阶段到跟踪瞄准阶段的精度计算可由作战单元在抵达现场后使用探测平台侦察或探测到被打击目标的概率。打击评估阶段的精度由武器装备决定。精确度指标直接影响到作战单位能否准确定位并有效打击目标, 对于整个作战过程的成功至关重要。精确性量化公式为

$$W_A = A_1 A_2 \quad (17)$$

式中, A_1 为在作战体系预警探测装备目标指示下, 武器平台前往指定空域探测跟踪到目标的概率; A_2 为作战单元的武器成功打击到被打击目标的概率, $A_2 = A_{21} A_{22} A_{23}$ 。 A_{21} 为中末交班精度, A_{22} 为末制导精度, A_{23} 为毁伤概率。

3.3.1 侦察精度

为了精确地评估识别目标的精确性, 将侦察概率定义为在探测域与目标活动域构成的空间中探测源对目标的累积探测概率^[18], 以雷达探测运动目标为例, 雷达对飞行器的累积探测概率 P_d 为

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) \quad (18)$$

式中, P_{di} 为雷达对飞行器进行第 i 次探测的瞬时发现概率; M 为探测次数。单次探测概率与探测的阈噪比、探测接收到的信噪比相关, 单次探测概率计算方法^[19]如式(19)所示

$$P_d = p(i_0 + i_s > I_r) = \Phi(\text{SNR} - \text{TNR}) \quad (19)$$

式中, SNR 为探测器接收信噪比; TNR 为探测器阈噪比。

3.3.2 打击精度

打击精度主要涉及武器系统打击评估环节, 包括中末交班精度、末制导精度和毁伤精度^[20]。

(1) 中末交班精度

中制导的制导精度必须在一定的误差范围之内, 才能满足中末制导交接班捕获目标的要求。中末交班与三个因素有关, 即中制导末端导弹位置、速度大小和速度方向。

理论弹道中制导末端导弹的位置坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 实际导弹中制导末端坐标位置为 (x_1, y_1, z_1) , 中末制导交接班允许的位置误差为 R_0 , 则定义有关中制导末端导弹位置的效能值为

$$P_1 = \begin{cases} 1, & R \leq R_0 \\ \frac{R_0}{R_1}, & R_1 \geq R_0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, $R_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}$

理论弹道中制导末端导弹的速度大小为 v_0 , 中末制导交接班允许的速度误差为 σ_v , 实际导弹中制导末端速度大小为 v_1 , 则定义有关中制导末速度大小的效能值为

$$P_2 = \begin{cases} 1, |v_1 - v_0| \leq \sigma_v \\ \frac{\sigma_v}{|v_1 - v_0|}, |v_1 - v_0| \geq \sigma_v \end{cases} \quad (21)$$

有关中制导末速度方向的效能值为

$$P_3 = \begin{cases} 1, |\theta_1 - \theta_0| \leq \sigma_\theta \\ \frac{\sigma_\theta}{|\theta_1 - \theta_0|}, |\theta_1 - \theta_0| \geq \sigma_\theta \end{cases} \quad (22)$$

$$P_4 = \begin{cases} 1, |\phi_1 - \phi_0| \leq \sigma_\phi \\ \frac{\sigma_\phi}{|\phi_1 - \phi_0|}, |\phi_1 - \phi_0| \geq \sigma_\phi \end{cases} \quad (23)$$

则描述中制导精度的效能函数定义为

$$P_{zcd} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \quad (24)$$

(2) 末制导精度

描述末制导能力的指标主要包括脱靶量、导弹末速和导弹入射角。进行打靶试验, 导弹的圆误差概率半径为 CEP_1 , 导弹设计圆概率半径为 CEP_0 , 则定义有关脱靶量的效能值为

$$P_{m1} = \begin{cases} 1, CEP \leq CEP_0 \\ \frac{CEP_0}{CEP_1}, CEP_1 \geq CEP_0 \end{cases} \quad (25)$$

导弹实际速度大小为 v_1 , 导弹设计速度大小为 v_0 , 则定义有关导弹末速度大小的效能值为

$$P_{m2} = \begin{cases} 1, v_1 \leq v_0 \\ \frac{v_1}{v_0}, v_1 \geq v_0 \end{cases} \quad (26)$$

导弹设计入射角 λ_1 , 实际入射角 λ_0 , 则定义有关导弹入射角的效能值为

$$P_{m3} = \begin{cases} 1, \lambda_1 \leq \lambda_0 \\ \frac{\lambda_1}{\lambda_0}, \lambda_1 \geq \lambda_0 \end{cases} \quad (27)$$

则导弹末制导精度的效能函数定义为

$$P_{mzd} = P_{m1} \cdot P_{m2} \cdot P_{m3} \quad (28)$$

3.3.3 毁伤精度

毁伤精度包括单发导弹对目标的毁伤和多发导弹对目标的毁伤^[21]。

(1) 单发毁伤

根据末制导精度, 给定干扰条件及战斗部参数, 可计算导弹对单目标雷达的终端毁伤能力。

(2) 多发毁伤能力

各发导弹杀伤目标是相互独立事件, 多发导弹杀伤单

个目标的概率为

$$P_n = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{li}] \quad (29)$$

式中, P_{li} 为第 i 发导弹杀伤单个目标的概率。

3.4 杀伤链综合评估指标计算方法

在杀伤链的综合评估方法^[22]中, 综合考虑时间、准确性和精确性三个方面来评估杀伤链的总体效能, 通过不同的视角, 理解和判断不同作战策略的优劣。

定义时间指标 W_T 、信息指标 W_P , 以及精度指标 W_A 。这三个指标均在 0 到 1 之间, 代表了从最低效能到最高效能的范围。为综合评估杀伤链的总体效能, 采用加权求和的方法来计算综合评估指标 W , 如式 (30) 所示

$$W = \omega_1 W_T + \omega_2 W_P + \omega_3 W_A \quad (30)$$

式中, 权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 由专家根据实际情况进行设定, 它们的取值范围为 0 到 1, 并满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。权重反映了不同作战任务下对时间、准确度和精度的相对重视程度。

4 基于杀伤链的作战效能评估结果

4.1 作战场景与杀伤链要素

假想如下作战场景, 杀伤链元素包括: R_1 平台、 R_2 平台, 主要负责侦察、探测、跟踪、制导; A_1 、 A_2 、 A_3 平台, 主要负责运载、发射、探测、制导; W_1 、 W_2 、 W_3 平台, 主要负责攻击。具体体系构成及其用途见表 1。

表 1 体系构成

Table 1 System composition

杀伤链元素	元素编号	用途
	R_1	战场监控, 侦察, 探测, 指控
	A_1, A_2, A_3	巡逻, 运载, 发射, 探测, 制导
	R_2	战场监控, 侦察, 探测, 制导
	W_1, W_2, W_3	组成打击群进行打击, 杀伤目标

4.2 杀伤链构型

上述典型作战场景中可构建三种可能的杀伤链, 具体杀伤链描述如图 4 所示。具体信息见表 2。杀伤链 A 中, 采用 R_2 平台发现, A_2 发射, R_2 提供目指信息。杀伤链 B 中, 采用 R_1 平台发现, A_1 发射, R_1 平台提供目指信息。杀伤链 C 中, 采用 A_3 平台发现, A_3 平台发射, A_3 平台提供目指信息。

4.3 效能评估

针对三种典型杀伤链进行分析, 突出每种装备的特性及其在杀伤链中的作用, 同时考虑到不同战术情境下的时间链、准确度链和精度链, 构建杀伤链应用分析, 为作战策略和战术决策提供理论支撑。通过杀伤链建模, 形成三种

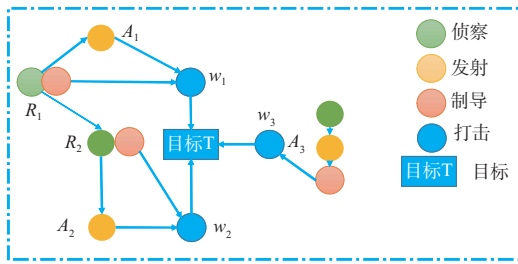


图4 典型杀伤链

Fig.4 Typical kill chain

表2 杀伤链种类

Table 2 Types of kill chain

杀伤链编号	侦察探测			指挥 控制		评估
	发现	定位	跟踪	瞄准	打击	
杀伤链A	R_2	R_2	R_2	A_2	W_2	A_2
杀伤链B	R_1	R_1	R_1	A_1	W_1	A_1
杀伤链C	A_3	A_3	A_3	A_3	W_3	A_3

典型杀伤链构型。分布在不同弹群构型下,考虑导弹个数 $N=1,2,3$ 的典型情况下,进行杀伤链构型设计与效能评估。其中 $N=1$ 代表该条杀伤链使用单枚武器攻击,同样地, $N=2,3$ 分别代表该杀伤链使用双枚、三枚协同攻击。

4.3.1 时间链评估

根据每条杀伤链的所有作战活动所需时间,基于时间链计算方法,得到三种杀伤链的作战任务总时间,见表3。

表3 杀伤链时间概率表

Table 3 Probability of kill chain time

弹数量 N	杀伤链编号	描述	时间链/s	$W_T/\%$
1	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	T0	95.73
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	1.2T0	91.15
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	1.26T0	89.24
2	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	0.96T0	96.37
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	1.15T0	92.48
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	1.21T0	90.86
3	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	0.92T0	96.94
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	1.10T0	93.66
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	1.16T0	92.29

4.3.2 准确度评估

杀伤链的准确度指标为

$$W_p = P_1 P_2 P_3 \quad (31)$$

式中, P_1 为发现定位准确度; P_2 为跟踪瞄准准确度; P_3 为打击评估(任务决策)准确度。基于准确度计算方法,获得三种杀伤链的准确度概率,见表4。

表4 杀伤链准确度概率表

Table 4 Probability table of accuracy of kill chain

弹数量 N	杀伤链编号	描述	准确度链			
			$P_1/\%$	$P_2/\%$	$P_3/\%$	$W_p/\%$
1	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	96.00	95.00	98.34	89.69
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	95.00	96.00	94.27	85.97
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	94.00	94.00	97.46	86.12
2	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	96.00	95.00	93.87	85.61
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	95.00	96.00	89.99	82.07
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	94.00	94.00	93.03	82.20
3	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	100	96.00	95.00	89.40
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	100	95.00	96.00	85.70
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	100	94.00	94.00	88.60

表5 杀伤链精度概率表

Table 5 Probability table of kill chain accuracy

N	杀伤链编号	描述	精度链		
			$A_{23}/\%$	$A_{21}/\%$	$W_A/\%$
1	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	80	90.53	72.42%
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	75	78.21	58.66
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	78	93.86	73.21
2	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	96	92.34	88.65
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	94	95.42	89.69
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	95	98.55	93.63
3	A	$R_2 \rightarrow A_2 \rightarrow R_2 \rightarrow W_2$	100	95.11	95.11
	B	$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow R_1 \rightarrow W_1$	100	98	98.28
	C	$A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_3 \rightarrow W_3$	100	99.54	99.54

4.3.3 精度链评估

杀伤链的精度链评估指标为

$$W_A = A_1 A_2 \quad (32)$$

假设基于无差异的侦察过程和末制导过程,那么可简化为 $W_A = A_{21} A_{23}$,其中, A_{23} 为毁伤概率, A_{21} 为跟踪瞄准至打击评估阶段导弹对目标的截获概率。

基于精度计算方法,获得三种杀伤链的精度,见表5。

4.3.4 综合评估

杀伤链综合评估采用如下计算公式

$$W = \omega_1 W_T + \omega_2 W_p + \omega_3 W_A \quad (33)$$

上述表达式可以表示为 W 关于 ω_i 的函数,如图5所示。

在杀伤链综合评估中,直线斜率大于0表示时间系数与综合评估成正比。若时效性是关键指标,有效的杀伤链应该满足斜率大于0,且具有较高的平均综合评估值。根据图6可知,当 $N=2$ 时,优先选择杀伤链A; $N=1$ 时,若时效性占比大,优先排序为杀伤链B、杀伤链A、杀伤链C,其他情况优先排序为杀伤链A、杀伤链B、杀伤链C。

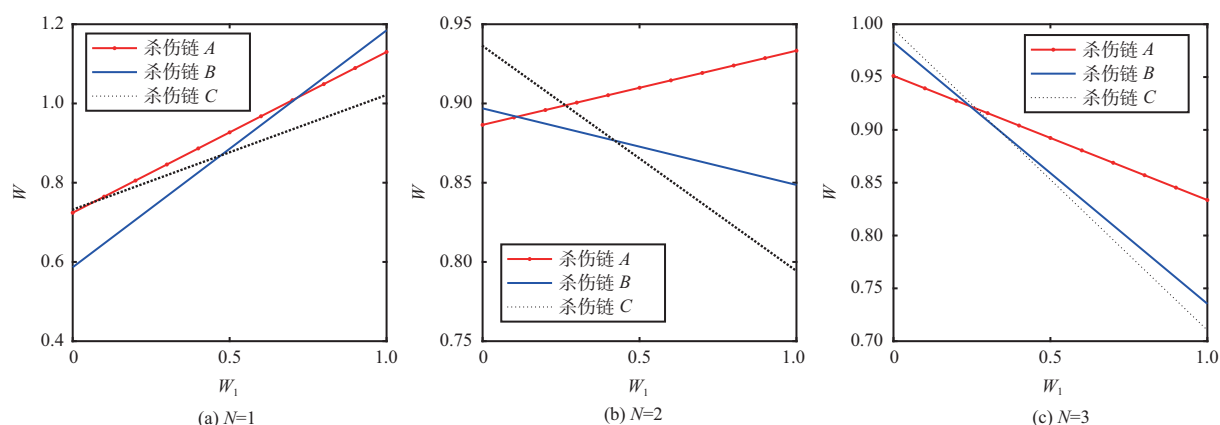


图5 时效性函数变化与杀伤链综合评估

Fig.5 Changes in time efficiency function and comprehensive evaluation of kill chain

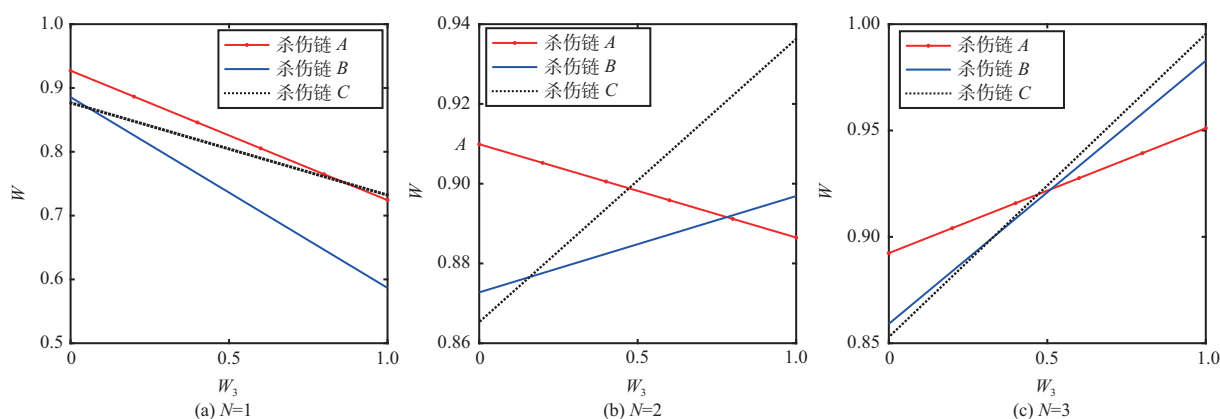


图6 精确性函数变化与杀伤链综合评估

Fig.6 Changes in accuracy function and comprehensive evaluation of kill chain

杀伤链综合评估时,直线斜率大于0表示精度系数与综合评估成正比。如果精确性是关键指标,有效的杀伤链应该满足斜率大于0,且具有较高的综合评估值。根据图6可知, $N=2$ 时,优先排序为杀伤链C、杀伤链B, $N=3$ 时,优先排序为杀伤链C、杀伤链B、杀伤链A;当精度占比较少时,优先排序为杀伤链A、杀伤链B、杀伤链C。

5 结论

本文针对多弹协同作战问题,开展基于杀伤链分析的效能评估研究,提出导弹作战杀伤链评价指标体系及评估方法,并对典型多弹作战杀伤链过程进行分析,结果证明了本文所提基于杀伤链分析的多弹协同作战效能评估方法的有效性。

AST

参考文献

- [1] 刘冠邦,张昕,郑明.美军空战场杀伤链发展与启示[J].指挥

信息系统与技术,2020,11(4):10-14.

Liu Guanbang, Zhang Xin, Zheng Ming. Development and enlightenment of U. S. air battlefield kill chain[J]. Command Information System and Technology, 2020, 11(4): 10-14. (in Chinese)

- [2] 阮开智,孙学安,全云.未来智能杀伤网构想[J].空天防御,2024,7(3): 27-33.

Ruan Kaizhi, Sun Xue'an, Tong Yun. Concept of future intelligent kill network [J]. Aerospace Defence, 2024, 7(3): 27-33. (in Chinese)

- [3] Jiang Jieyu, Li Jiancheng, Xia Boyu, et al. Modeling and resilience analysis of combat systems-of-systems based on kill web[C]. 2022 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE), 2022: 28-35.

- [4] 万斯来,王国新,明振军,等.基于知识推理的杀伤网智能设

- 计方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(4):1025-1037.
- Wan Silai, Wang Guoxin, Ming Zhenjun, et al. Intelligent design method of kill network based on knowledge reasoning [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2024, 45(4): 1025-1037. (in Chinese)
- [5] 陆军, 张瑶, 乔永杰. 不确定性打击链的闭环时间表征和评估[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 207-220.
- Lu Jun, Zhang Yao, Qiao Yongjie. Representation and evaluation of the closed-loop time of the kill chain under uncertainties[J]. China Science, 2017, 47(2): 207-220. (in Chinese)
- [6] 为伍. 导弹杀伤链[J]. 现代舰船, 2021(11):58-62.
- Wei Wu. Missile kill chain [J]. Modern Ships, 2021(11):58-62. (in Chinese)
- [7] 邵俊. 基于杀伤网的装备组合选择方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- Shao Jun. Research on equipment combination delection method based on kill network [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2020.(in Chinese)
- [8] 王君, 芮同林, 李进, 等. 空空导弹网络化协同制导作战模式[J]. 航空兵器, 2015, 22(5):32-35.
- Wang Jun, Rui Tonglin, Li Jin, et al. Network based collaborative guidance combat mode for air-to-air missiles[J]. Aviation Weapons, 2015, 22(5):32-35.(in Chinese)
- [9] 王宏, 王君, 梁文波, 等. 新一代空空弹多弹协同攻击制导策略[J]. 航空兵器, 2011, 18(2):7-11.
- Wang Hong, Wang Jun, Liang Wenbo, et al. Guidance strategy for multi missile coordinated attack of new generation air-to-air bombs[J]. Aviation Weapons, 2011, 18(2):7-11. (in Chinese)
- [10] 李波, 高晓光. 空空导弹通用仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(22):6290-6297.
- Li Bo, Gao Xiaoguang. Research on general simulation model of air-to-air missile[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20 (22):6290-6297.(in Chinese)
- [11] 吕超, 陈继祥, 辛旭光, 等. 超视距空战中空空导弹攻击效果模型与仿真[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3) :37-40.
- Lyu Chao, Chen Jixiang, Xin Xuguang, et al. Modeling and simulation of air-to-air missile attack effectiveness in over the horizon air combat[J]. Ordnance Automation, 2015, 34(3): 37-40.(in Chinese)
- [12] 万明, 程军, 张凤鸣, 等. 一种轻量级通用空空导弹仿真模型设计[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19):266-270.
- Wan Ming, Cheng Jun, Zhang Fengming, et al. Design of a lightweight universal air-to-air missile simulation model[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(19): 266-270. (in Chinese)
- [13] 李佳. 中远距复合制导空空导弹目标截获概率研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- Li Jia. Study on target intercept probability of medium and long range composite guided air-to-air missiles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.(in Chinese)
- [14] 李斌, 强艳辉. 基于相对坐标的空空导弹截获概率计算模型[J]. 弹箭与制导学报, 2024, 42(6): 107-110.
- Li Bin, Qiang Yanhui. Calculation model for intercept probability of air-to-air missiles based on relative coordinates [J]. Journal of Missile and Guidance, 2024, 42(6): 107-110.(in Chinese)
- [15] 刘韵竹, 李海军, 范庚, 等. 复合制导空空导弹截获概率模型仿真[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(5):500-505.
- Liu Yunzhu, Li Haijun, Fan Geng, et al. Simulation of interception probability model for composite guided air-to-air missiles[J]. Radar Science and Technology, 2019, 17(5): 500-505.(in Chinese)
- [16] 张明明, 王敏, 孙哲, 等. 编队协同空空攻击导弹截获概率仿真分析[J]. 航空兵器, 2021, 28(1):73-77.
- Zhang Mingming, Wang Min, Sun Zhe, et al. Simulation analysis of acquisition probability of formation cooperative air-to-air attack missile [J]. Aviation Weapons, 2021, 28(1):73-77. (in Chinese)
- [17] 张大元, 雷虎民, 李海宁, 等. 复合制导导引头开机截获概率估算[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(2): 150-155.
- Zhang Dayuan, Lei Humin, Li Haining, et al. Estimation of interception probability of composite guidance seeker startup [J]. Solid Rocket Technology, 2014, 37(2): 150-155. (in Chinese)
- [18] 刘开封, 刘新学, 许章凯, 等. 飞行器被雷达发现的概率计算[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(11):35-40.
- Liu Kaifeng, Liu Xinxue, Xu Zhangkai, et al. Probability calculation of aircraft discovered by radar[J]. Sichuan Journal of Ordnance Engineering, 2009, 30(11):35-40. (in Chinese)

- [19] 汪亚夫, 宋伟, 邵立, 等. 空间探测器对空间运动目标探测概率的计算[J]. 电子信息对抗技术, 2013, 28(2): 15-19.
Wang Yafu, Song Wei, Shao Li, et al. Calculation of detection probability of space moving targets by space detectors[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2013, 28(2): 15-19. (in Chinese)
- [20] 方洋旺, 伍友利. 机载导弹武器系统作战效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Fang Yangwang, Wu Youli. Operational efficiency evaluation of airborne missile weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [21] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
Fan Huitao. Design principles of air-to-air missile solutions [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [22] Liu Chen. Research on system-of-systems combat simulation model formal specification and representation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(4): 901-909.

Effectiveness Evaluation of Missile Group Operations Based on Kill Chain Analysis

Wei Xufang, Hua Wentao, Zhang Huan

National Key Laboratory of Airborne Information Perception and Fusion, China Academy of Air to Air Missiles, Luoyang 471009, China

Abstract: With the development of technology and the emergence of new combat concepts, the future of air combat presents a trend of collaboration, intelligence, and intense confrontation. Missile is the main weapon of the kill chain strike link. The missiles are used by coordinated state in combat gradually. Taking missile as the main research object, this paper explored multi missile collaborative combat modeling method and effectiveness evaluation method based on kill chain analysis. A multi missile collaborative combat effectiveness evaluation model based on kill chain analysis was proposed. The simulation result based on this model verified the feasibility of the proposed effectiveness evaluation method, which lays a foundation for the effective use of weapons and equipment for operational planning, tactical decision-making, and the promotion of coordinated development of equipment.

Key Words: kill chain analysis; coordination; efficiency evaluation; missile

Received: 2024-12-20; **Revised:** 2025-03-12; **Accepted:** 2025-04-08

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z001012001)