



DOI: 10.12382/bgxb.2022.1077

基于知识推理的杀伤网智能设计方法

万斯来, 王国新, 明振军*, 阎艳, 郝佳

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对现有杀伤网设计对人的经验依赖性强、智能化程度低的问题, 提出一种基于知识推理的杀伤网智能设计方法。基于OODA循环理论构建作战任务-作战能力-武器装备多层次杀伤网本体, 实现杀伤网设计静态知识建模; 构建任务-能力-装备映射规则、装备协同规则和杀伤链协同规则3类杀伤网设计规则库, 实现杀伤网设计动态知识建模; 在静态知识和动态知识的基础上提出一个基于知识推理的杀伤网智能设计流程框架, 同时定义了时间链、精度链和成本链3个杀伤链评估指标, 以实现动态战场下的杀伤网快速智能设计。在某体系对抗仿真推演平台上, 以防空反导作战体系执行典型防空反导任务为案例, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 杀伤网; 本体; 推理; OODA循环

中图分类号: E917 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)04-1025-13

Knowledge Reasoning-based Intelligent Design Method of Kill-web

WAN Silai, WANG Guoxin, MING Zhenjun*, YAN Yan, HAO Jia

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A knowledge reasoning-based intelligent design method of kill-web is proposed for the problems of strong dependence on human experience and low intelligence in the design of kill-web. Based on the OODA theory, a multi-level kill-web ontology including combat mission-combat capability-weapon equipment is constructed to model the static knowledge related to kill-web design. Three types of kill-web design rule bases, namely mission-capability-equipment mapping rule, equipment coordination rule and kill chain coordination rule, are constructed to model the dynamic knowledge related to kill-web design. Based on static knowledge and dynamic knowledge, a knowledge reasoning-based intelligent design process framework of kill-web is proposed, in which three kill-chain evaluation metrics of time, precision and cost are defined in order to quickly and intelligently design a kill-web in actual combat situations. Taking the air defense and anti-missile system of systems as an example the effectiveness of the proposed method is verified on a simulation platform.

Keywords: kill-web; ontology; reasoning; OODA loop

0 引言

随着信息技术的发展, 现代战争正在加速向信

息化战争演变, 作战样式由传统的高技术平台较量转变为武器装备体系对抗。1996年美空军罗纳德将军提出杀伤链的概念, 即打击目标的作战过程可

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3222020)

* 通信作者邮箱: zhenjun.ming@bit.edu.cn

以分为发现、定位、跟踪、瞄准、交战和评估 6 个阶段。2018 年,美国国防部高级研究计划局进一步提出杀伤网的概念,强调各作战域指挥与控制、情报获取以及武器的统合,形成多个节点构成的网状结构,凸显装备体系的跨域协同性^[1-4]。近年来美军又相继提出了多域战、决策中心战、马赛克战^[5]等概念,其重点都在提升闭合杀伤链、网的能力。因此,在实时战场上,基于已有的态势信息,根据作战任务情况,如何快速合理地配置现有的作战资源,动态设计具有完成作战任务能力的分布式杀伤网显得十分重要^[6]。

针对杀伤网设计问题,领域内已有不少学者开展了相关研究。例如,文献[7]针对杀伤网中的装备组合优化问题,采用层次化网络模型描述了杀伤网的架构,使用冗余性、风险性和敏捷性 3 个杀伤链评估指标构建了装备组合规划模型,提出了基于启发式算法的装备组合多目标优化方法。文献[8]同样使用启发式算法用于解决杀伤网决策优化问题,提出一种非支配排序蚁群遗传算法,有效提升杀伤网决策性能。文献[9]针对陆战场构建了包含侦察网、通信网、指控网和打击网 4 要素的陆战场体系作战杀伤多层网模型,并提出一个杀伤网资源池优化流程框架。文献[10]针对马赛克战体系中杀伤链重构问题,基于犹豫模糊理论和筹划-准备-执行-评估循环构建了作战模块评估指标体系和评估模型,提出了马赛克战概念下作战模块应急重构自主决策方法。文献[11]提出了一种基于立体分层网络模型的杀伤链架构,将自主性、风险性、灵敏性、谱半径、网络熵等指标应用到杀伤链评价,使用改进的蚁群算法实现机群杀伤链规划。文献[12]基于超网络构建作战体系网络模型和任务链路网络模型,提出基于可执行架构的杀伤链设计与分析优化方法,以应对杀伤链设计过程中杀伤链结构和连接关系的复杂性。文献[13]针对分布式协同作战武器编配问题,建立分布式协同作战效能指标体系,基于观察、判断、决策和行动(Observe, orient, decide and act, OODA)环的基本思想构建装备体系综合效能评估模型以及武器编配方案整数规划模型。文献[14]针对武器装备与装备间关系的异质性,建立武器装备体系异构作战网络模型,提出一种基于元路径的武器装备体系作战网络链路预测方法。文献[15-16]探索了人工智能技术在海军杀伤链决策问题的前景,得出特定人工智能能够有效减少杀伤力链不确定性、提高决策速度、加强决策性能。

文献[17]同样针对海军的区域防空问题,建立了基于事件图的区域防空杀伤网模型,将作战行为的连续动态过程转化为由关键事件组成的离散动态过程,基于优化算法确定最优编组方案。

然而,上述杀伤网设计的研究多聚焦于设计的后端,即网络架构的评估和优化,通过评估指标体系和优化算法实现既有杀伤网的演进与提升。鲜有研究涉及杀伤网设计的前端问题,即杀伤网的生成问题:在给定具体的作战任务的情况下,如何将装备单元连点成链并聚链成网。而杀伤网能否根据作战任务快速生成,关系到能否抢占作战先机,对战争胜败有着重要影响。

杀伤网生成过程涉及一系列的因果逻辑推理,包括根据作战任务推出满足任务要求的能力,根据能力推出相应的装备,将装备组合成杀伤链,将杀伤链聚合成杀伤网等。上述的逻辑推理是一个知识密集型过程,对体系设计人员的专业知识(包括作战和装备)有很强的依赖性。目前,与杀伤网生成相关的知识基本上以隐性知识的形式分布在文档或设计人员脑中,难以被利用,导致杀伤网的生成过程依然是一个以人为中心的手动过程,智能化程度低且效率不高。

本体论是哲学领域用于探索事物存在本质的理论,其核心思想是对事物的认知抽象为一系列的概念及其相互关系,形成特定领域的知识本体模型^[18]。本体的知识表征能力为解决杀伤网的智能设计问题提供了可行途径。此外,知识推理是基于特定的约束和规则从存在的知识中获得新的知识的过程^[19],可在本体的基础上,将设计人员的设计经验等动态知识表征为推理规则进行逻辑推理,增强杀伤网设计过程的自动分析和处理能力,从而提升杀伤网设计的敏捷性和智能性。

综上,本文结合本体论的思想,提出基于知识推理的杀伤网智能设计方法。首先,基于 OODA 循环理论^[20]构建作战任务-作战能力-武器装备多层次杀伤网本体框架,并对每一层级本体的类和属性进行详细定义,建立杀伤网设计本体模型;其次,根据连点成链-聚链成网的杀伤网设计流程,定义任务-能力-装备映射规则、装备协同规则和杀伤链协同规则 3 类杀伤网设计规则,表征杀伤网设计过程的动态推理知识。最后,定义时间链、精度链和成本链 3 个杀伤链评估指标,提出基于知识推理的杀伤网智能设计流程框架,基于预先构建的知识库和规则库,用于实时战场上的杀伤网快速智能设计。

1 杀伤网本体建模

1.1 杀伤网本体框架

杀伤网本体模型的作用是构建一个杀伤网知识库,用于表征杀伤网设计知识,辅助杀伤网自动化设计。如图 1 所示,提出了杀伤网本体框架。

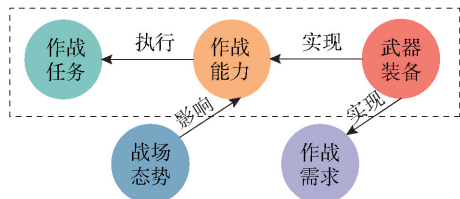


图 1 杀伤网本体框架

Fig.1 Kill-web ontology framework

本体框架包含 5 个核心类:作战任务、战场态势、作战能力、作战需求、武器装备,表 1 列出了这些类的定义。在实时战场环境,图 1 中从左至右,作战任务和战场态势决定了武器装备体系所需要具备的作战能力,进一步,武器装备体系的作战能力以及指挥员的作战需求,决定了杀伤链和杀伤网所需要的武器装备和它们之间的协同关系。其中,作战任务-作战能力-武器装备映射链路是本体框架的关键部分。自底向上,它描述了武器装备相互协同实现作战能力,作战能力进一步支撑作战任务的过程;自顶向下,描述了将作战任务映射到作战能力再进一步映射到武器装备的过程,这一映射过程也反映了体系设计人员在构建杀伤网时的推理过程。

表 1 杀伤网本体框架核心类定义

Table 1 Definition of the core classes of kill-web ontology framework

核心类	定义
作战任务	作战任务是指杀伤网为了实现作战目标需要完成的各种任务的统称,包括观察、判断、决策、行动等一系列任务。
作战能力	作战能力是指武器装备执行作战任务的本领,是武器装备体系的固有属性,与武器装备的型号、战技指标等有关。
武器装备	武器装备是指为遂行一定的作战任务,具有一定作战功能的装备系统,是杀伤网的最小组成功能要素。
战场态势	战场态势是指战场中兵力分布及战场环境的当前状态和发展变化趋势。
作战需求	作战需求是指在一定的时期,为完成可能担负的作战任务,对武装力量建设的基本要求。

OODA 循环理论是杀伤链和杀伤网概念背后的理论支撑。OODA 循环指的是作战过程中的 4 个阶

段或活动,即观察、判断、决策和行动,其中:观察指利用各类侦测设备观察感知战场信息,进行态势感知;判断指融合处理侦测设备收集的各种信息,进行态势评估;决策指依据态势形成作战构想,进行作战决策;行动指各类作战力量、武器平台针对性打击作战目标。4 种活动次第循环进行,形成闭合环路,可以描述作战活动的典型流程^[1,13,21]。

可扩展性是本体技术的典型优势,图 1 的本体框架实现了对杀伤网设计知识的总体表征,为了更加详细地描述杀伤网设计知识,下面基于 OODA 循环理论对杀伤网本体框架进行扩展,进一步细化本体框架的粒度。如图 2 所示,将作战任务-作战能力-武器装备映射关系的 3 个核心类基于 OODA 作战流程扩展,即分别为 3 个核心类按照观察 O_1 、判断 O_2 、决策 D 和行动 A 维度构建 4 个子类,形成 OODA 循环,分别组成 3 个核心类层,如图 2 中绿、橙、红 3 个本体层。一方面,与单个核心类相比,核心类层能够表征杀伤链的作战流程、节点之间的耦合关系等更加丰富的杀伤网知识。另一方面,3 个核心类线性的映射链路演变为复杂的层级间的映射关系,这更加符合真实的映射过程,有助于设计的杀伤链/网更加适应真实战场环境。下面分别介绍武器装备层、作战能力层和作战任务层的详细信息。

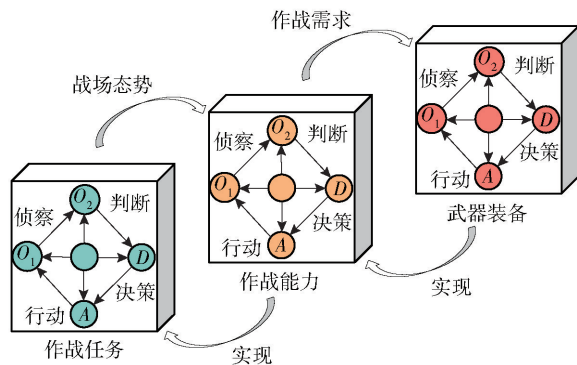


图 2 作战任务-作战能力-武器装备映射框架

Fig.2 Combat mission-combat capability-weapon equipment mapping framework

1.2 武器装备层

如图 3 所示是武器装备层本体,基于 OODA 理论将核心类武器装备细分为侦察装备、指控装备和打击装备 3 个子类,其中指控装备又细分为判断装备和决策装备两个子类。侦察装备-判断装备-决策装备-打击装备对应 OODA 理论 4 个作战阶段。装备类的定义及其属性定义分别如表 2 和表 3 所

示。表3中侦察装备、指控装备、打击装备除了具备自身的特有属性外,还会继承其父类“武器装备”的公共属性。

为侦察能力、指控能力和打击能力3个核心能力类,分别对应于侦察装备、指控装备和打击装备3个核心装备类,其中指控能力又可细分为判断能力和决策能力两个子类。表4展示了3个核心能力类的属性及其实例示例。

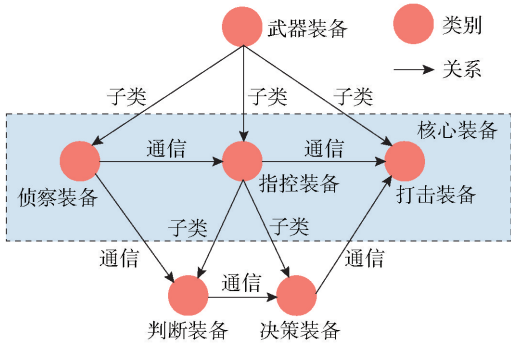


图3 武器装备层本体

Fig. 3 Ontology of weapon equipment layer

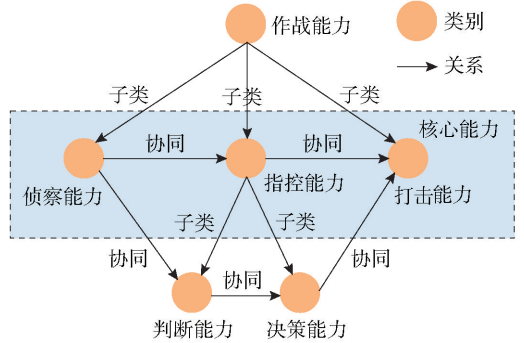


图4 作战能力层本体

Fig. 4 Ontology of combat capability layer

表2 核心装备类定义

Table 2 Definition of core equipment classes

类别	定义	实例示例
侦察装备	表示侦察监视类单元平台,承担发现、搜集作战空间信息参数并回传的任务。	侦察卫星、预警飞机、侦察飞机、防空雷达
指控装备	表示各类指控机构,是杀伤网的核心,对一切军事活动执行决策。	联合作战指控中心、舰艇编队指控中心
打击装备	表示可执行杀伤和击毁任务的单元平台,在指挥节点的指令和传感节点的信息传输下,对敌方目标进行干扰或攻击。	空空导弹、舰空导弹、地空导弹、反辐射导弹

表3 武器装备类属性

Table 3 Properties of equipment classes

类别	属性
武器装备	装备标识、装备分类、装备名称、装备简称、装备经度、装备纬度、装备海拔、装备速度、装备状态等
打击装备	目标类型、最大射程、最小射程、毁伤值、毁伤半径、响应耗时、波次打击数量、再装填耗时、目标最大速度、飞行速度、爬升速度、目标最小高度、目标最大高度、最小发射高度、最大发射高度、飞行高度、命中率、毁伤率、造价等
指控装备	评估耗时、单次评估数量、评估区域、通信带宽、通信功率、中继延迟
侦察装备	目标类型、探测距离、方位覆盖区、俯仰覆盖区、最大搜索目标数量、侦察精度(距离分辨误差、俯仰角分辨误差、方位角分辨误差)、侦察时间间隔等

表4 作战能力类属性

Table 4 Properties of combat capability class

类别	属性	实例示例
打击能力	打击距离	远程打击能力、中程打击能力、近程打击能力
	打击高度	太空打击能力、高空打击能力、低空打击能力、水下打击能力
	目标类型	对空打击能力、对地打击能力、对舰打击能力、对潜打击能力
	目标数量	单点打击能力、范围打击能力
指控能力	通信能力	信息中继能力、信息传输抗干扰能力
	指挥能力	快速响应能力、多装备协同指挥能力
	评估能力	快速评估能力、多目标评估能力
侦察能力	侦察距离	远程侦察能力、中程侦察能力、近程侦察能力
	目标类型	空中侦察能力、太空侦察能力、地面侦察能力、水底侦察能力

1.3 作战能力层

作战能力层的本体结构如图4所示。作战能力是武器装备的固有性能,由武器装备自身属性决定。因此,对应于作战装备层本体,作战能力类可以细分

1.4 作战任务层

作战任务层本体结构如图5所示。与武器装备和作战能力相同,作战任务也基于OODA理论细分

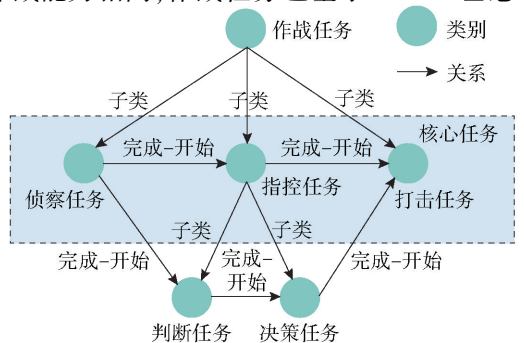


图5 作战任务层本体

Fig. 5 Ontology of combat mission layer

为侦察任务、指控任务和打击任务 3 个核心子类,其中指控任务对应 OODA 循环的判断和决策两个阶段。

如表 5 所示,作战任务类均具有任务类型、任务时间、任务地点等基本属性,也同时具备目标类型、目标速度、目标高度等与任务目标态势信息相关的属性。

表 5 作战任务类属性

Table 5 Properties of combat mission class

类别	属性
作战任务	任务名称、任务简称、任务代号、任务类型、任务地点、任务时间、任务指标、目标类型、目标速度、目标高度、目标经度、目标纬度、目标抗毁能力

1.5 基于 OWL 的杀伤网本体

本体可以使用不同的本体语言建模,利用计算机对领域知识进行编码,其中最常见的是资源描述框架(Resource Description Framework, RDF)和网络本体语言(Web Ontology Language, OWL)^[22]。OWL 是由万维网联盟发布的以描述逻辑为理论基础的一种语义标准语言^[23]。OWL 是基于 RDF 的语言扩展,但具有更好的描述逻辑能力和推理能力^[24]。因此,本文选取 OWL,并在 protégé 本体建模软件中对杀伤网本体建模,本体详细层次结构如图 6 左侧所示,右侧以打击装备类为例展示类的属性。

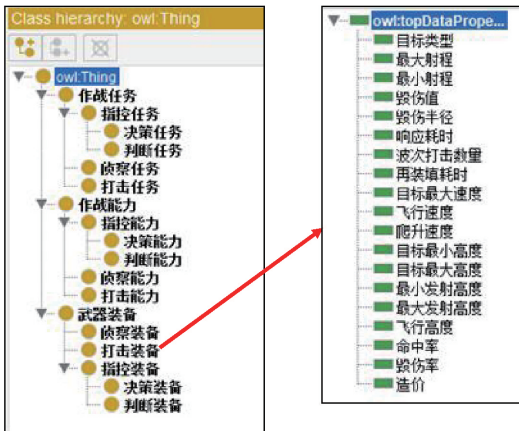


图 6 杀伤网 OWL 本体 protégé 界面

Fig. 6 Protégé interface of the kill-web OWL ontology

1.6 杀伤网知识图谱

知识图谱概念由美国谷歌公司于 2012 年提出,能够以结构化的形式描述客观世界中概念、实体及其关系,提供一种组织、管理和理解海量信息的能力^[25]。在杀伤网设计本体的基础上,通过收集相关资料以及实时的战场信息对本体进行实例化,可建

立杀伤网设计知识图谱^[26],用于杀伤网智能设计。

以本体框架中武器装备层为例,如图 7 所示是一个武器装备层本体实例化后的杀伤网知识图谱实例,图中从左往右不同颜色的节点分别表示敌方目标-侦察装备-指控装备-打击装备-敌方目标,形成完整的 OODA 闭合回路。节点之间连接的虚线表示装备之间的协同关系,是杀伤网的链路组成部分。例如,图 7 中红色虚线标出的敌方飞机-预警机-指挥中心-发射架-地空导弹-敌方飞机为一条可行杀伤链,通过在 protégé 中建模可得到如图 8 所示杀伤链知识图谱实例。

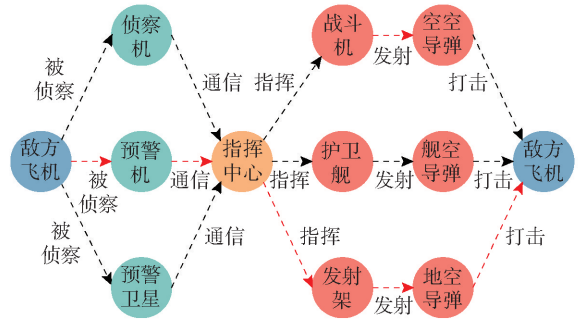


图 7 杀伤网知识图谱实例

Fig. 7 Example of kill-web knowledge graph

2 杀伤网智能设计方法

2.1 杀伤网设计规则建模

如图 9 所示是杀伤网设计流程示意图,设计流程分为 3 步:

步骤 1 装备选择过程。在给定作战任务的前提下,基于战场环境中的可用作战资源,利用任务-能力-装备映射规则,通过作战任务推理得到相应能力,从作战能力再推理得到可行装备集,完成作战资源的初步筛选。

步骤 2 连点成链过程。利用装备协同规则,在初筛装备之间进行协作关系可行性推理,将离散的装备实体,组合成杀伤链。

步骤 3 聚链成网过程。利用杀伤链协同规则,进行杀伤链之间的组合关系可行性推理,将多条独立的杀伤链组合成杀伤网,最终完成杀伤网的设计。

下面分别对设计流程所需要的任务-能力-装备映射规则、装备协同规则和杀伤链协同规则进行定义。

2.1.1 任务-能力-装备映射规则

任务-能力-装备链中的因果关系定义了回答

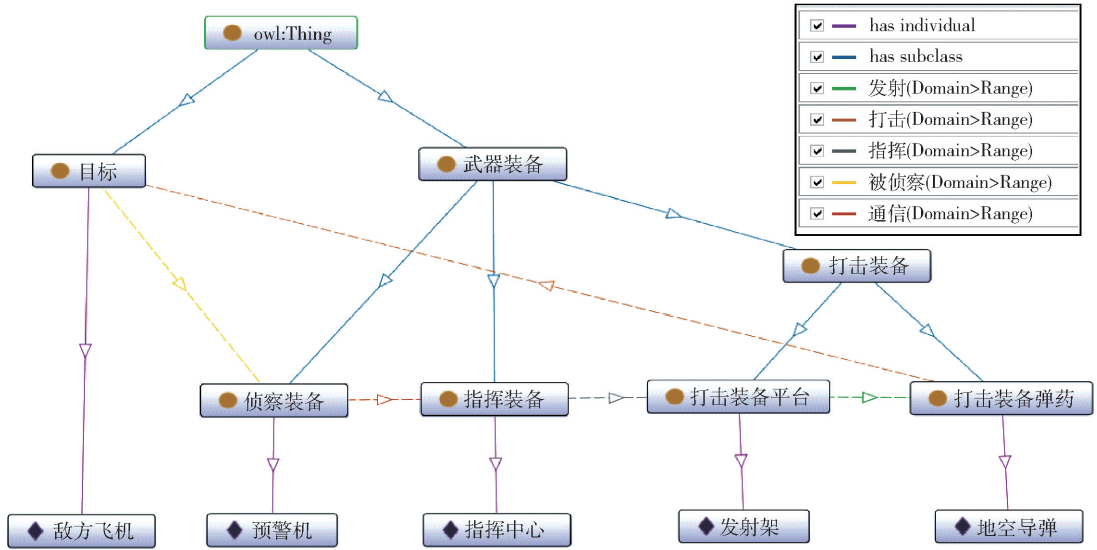


图 8 杀伤链知识图谱实例

Fig. 8 Instance of kill-chain knowledge graph

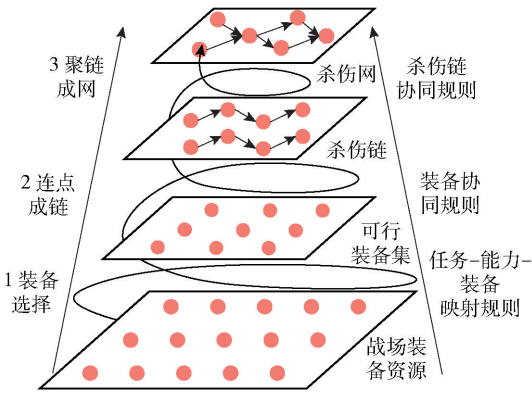


图 9 杀伤网设计流程示意

Fig. 9 Kill-web design flow diagram

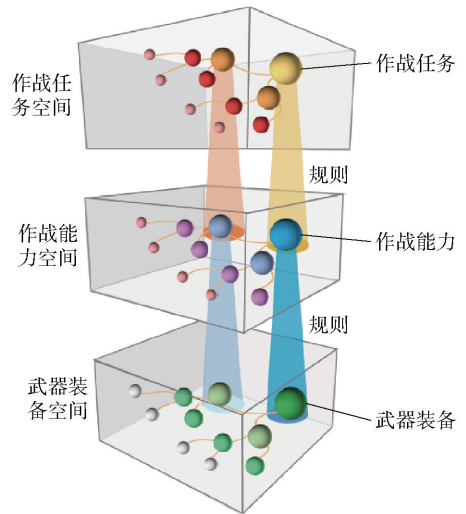


图 10 任务-能力-装备映射规则

Fig. 10 Mission-capability-equipment mapping rules

如何确定一组能够满足给定作战任务所需作战能力的武器装备这一问题逻辑过程,该过程可以分为两个连续子问题:1)如何确定给定作战任务需要的作战能力;2)如何确定具备该作战能力的武器装备。前者表示任务-能力映射规则,后者表示能力-装备映射规则,两级映射关系如图 10 所示。

对于任务-能力映射规则的表示,例如给定任务是要拦截一个接近我方资产的敌方导弹时,指挥人员可以使用以下规则确定所需的作战能力:

- 1) 当目标是导弹时,需要对空打击能力;
- 2) 当目标距离较近时,需要近程打击能力。

任务-能力映射规则的一阶逻辑如式(1)所示:

$$t_i^1 \cap t_i^2 \cap \dots \cap t_i^n \rightarrow c_i \quad (1)$$

式中: t_i^n 表示特定作战任务 i 的第 n 个属性满足条件; c_i 表示当作战任务 i 的所有属性均满足条件(取交集)时所需要的作战能力。

对于能力-装备映射规则的表示,以需要近程打击能力为例,语言描述如下:

- 1) 需要打击装备的最小射程小于 x 。
- 2) 需要打击装备的飞行速度大于 y 。
- 3) 需要打击装备的响应耗时小于 z 。

能力-装备映射规则的一阶逻辑如式(2)所示:

$$c_i^1 \cap c_i^2 \cap \dots \cap c_i^n \rightarrow w_i \quad (2)$$

式中: c_i^n 表示特定作战能力 i 的第 n 个属性满足条件; w_i 表示当作战能力 i 的所有属性均满足条件(取交集)时所需要的武器装备。

2.1.2 装备协同规则

装备协同规则用于回答如何将可行装备集合组合成具有杀伤力的杀伤链的问题,如:

- 1) 装备之间需要具有通信关系。
- 2) 装备之间物理距离小于最大通信距离。
- 3) 指控装备和打击装备之间需要具有指挥关系。

装备协同规则的一阶逻辑如式(3)所示:

$$w_{ij}^1 \cap w_{ij}^2 \cap \dots \cap w_{ij}^n \rightarrow l_k \quad (3)$$

式中: w_{ij}^n 表示特定武器装备*i*和武器装备*j*之间的第*n*条协同规则成立; l_k 表示当所有装备协同规则都成立(取交集)所能够组成的杀伤链。

2.1.3 杀伤链协同规则

杀伤链协同规则用于描述杀伤链之间的组合关系,如并行关系、串行关系、分支关系、作战要素协同关系等,回答如何将杀伤链聚合成具有联合多域杀伤力的杀伤网的问题,例如:

- 1) 当侦察装备的侦察范围较大时,可以同时存在于多条并行的杀伤链中。
- 2) 当作战任务的时间间隔较大时,侦察装备、指挥装备可以同时存在于多条串行的杀伤链中。
- 3) 当打击装备装载一次性弹药时,只能被一条杀伤链使用。

2.2 杀伤链设计解空间探索

武器装备杀伤链设计一般分为解构、重构两个过程:一是将战场环境中所有可服务于杀伤链的作战资源按照OODA循环理论解构为最小的武器装备单元;二是根据不同的作战任务情况快速配置作战力量、将武器装备单元动态形成具有完成作战任务能力的分布式作战杀伤链。

通过本体模型实现战场资源解构之后,所有可用的武器装备单元经过重新相互组合,能够重构成大量的杀伤链备选集合,即杀伤链方案空间,如图11所示虚线内区域。针对不同的作战任务,基于2.1节定义的任务-能力-装备映射规则和装备协同规则,通过规则推理能够实现杀伤链空间缩减,在杀伤链空间中筛选出符合作战任务的有效杀伤链,即图11中的黑点。为了从这些杀伤链中选择出最优的杀伤链应对作战任务,本文定义了时间、精度、成本3个指标,对杀伤链进行最终的筛选。

表6展示了侦察、指控和打击3类装备分别在时间、精度和成本3个维度的属性,共同组成了时间链、精度链和成本链3条杀伤链评估链路(暂不考虑通信类装备)。3个指标的计算公式分别为:

$$T = T_o + T_d + T_a \quad (4)$$

$$A = A_o A_d A_a \quad (5)$$

$$C = C_o + C_d + C_a \quad (6)$$

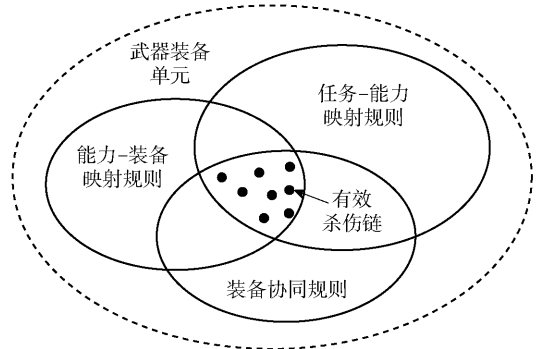


图 11 杀伤链设计空间探索

Fig. 11 Kill chain design space exploration

式中: T 表示杀伤链执行任务需要的总时间,是侦察时间 T_o 、指控时间 T_d 和行动时间 T_a 的求和; A 表示杀伤链的总精度,是侦察精度 A_o 、指控精度 A_d 和打击精度 A_a 的乘积; C 表示杀伤链的总成本,是侦察成本 C_o 、指控成本 C_d 和弹药成本 C_a 的求和,成本主要指装备的使用成本,如导弹成本指一次性弹药的价格。

表 6 杀伤链评估指标

Table 6 Kill chain evaluation indexes

维度	侦察装备	指控装备	打击装备
时间链	T_o	T_d	T_a
精度	A_o	A_d	A_a
成本	C_o	C_d	C_a

首先分别通过式(7)~式(9)所示的无量纲化数学变换方法消除时间 T 、精度 A 和成本 C 3个指标的纲影响,然后采用式(10)加权和得到杀伤链总性能 P , P 越大表示杀伤链越优,其中时间、精度和成本3个指标的权重组合(w_1, w_2, w_3)由体系设计人员的偏好决定,其中 $w_i \in [0, 1]$,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

$$T' = 1 - \frac{T - \min(T)}{\max(T) - \min(T)} \quad (7)$$

$$A' = \frac{A - \min(A)}{\max(A) - \min(A)} \quad (8)$$

$$C' = 1 - \frac{C - \min(C)}{\max(C) - \min(C)} \quad (9)$$

$$P = w_1 T' + w_2 A' + w_3 C' \quad (10)$$

2.3 基于知识推理的杀伤网智能设计流程

基于知识推理的杀伤网智能设计流程如图12所示,包括6个步骤,输入是特定的作战任务,输出是能够完成作战任务的最优杀伤网。

步骤 1 作战任务实例构建。在此步骤中,体

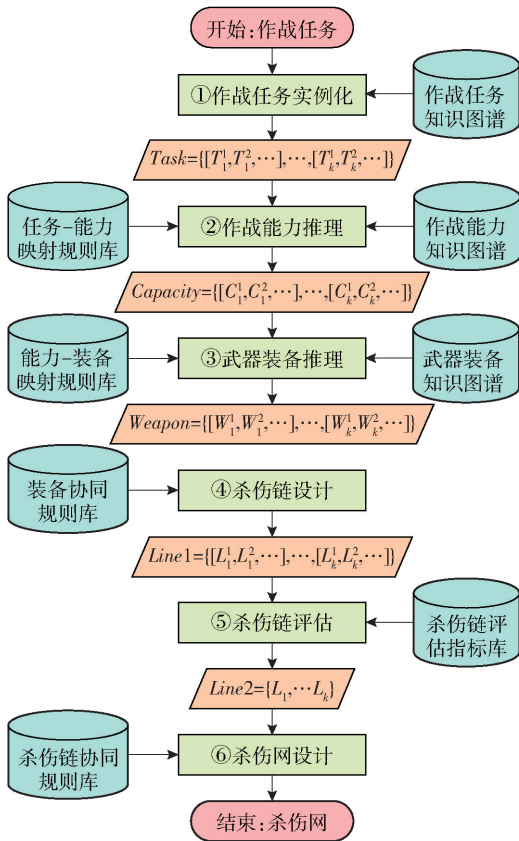


图 12 基于知识推理的杀伤网智能设计流程

Fig. 12 Intelligent design process of kill-web based on knowledge reasoning

系设计人员需要根据战场环境制定作战任务,并依据本体中关于作战任务的规范化定义将这些作战任务及其属性进行实例化,表示为

$$Task = \{[T_1^1, T_1^2, \dots], \dots, [T_k^1, T_k^2, \dots]\} \quad (11)$$

式中: T_k^i 表示第*k*条任务的第*i*个属性。

步骤 2 作战能力推理。在此步骤中,根据步骤 1 的作战任务实例,使用任务-能力映射规则推理作战任务所需要的作战能力。推理的输出是一组作战能力,表示为

$$Capacity = \{[C_1^1, C_1^2, \dots], \dots, [C_k^1, C_k^2, \dots]\} \quad (12)$$

式中: C_k^i 表示第*k*个作战能力的第*i*个属性。

步骤 3 武器装备推理。在此步骤中,根据步骤 2 的作战能力,基于能力-装备映射规则推理作战能力所需要的武器装备,推理的输出是可行武器装备集合,表示为

$$Weapon = \{[W_1^1, W_1^2, \dots], \dots, [W_k^1, W_k^2, \dots]\} \quad (13)$$

式中: W_k^i 表示第*k*个武器装备的第*i*个属性。

步骤 4 杀伤链设计。这一步的目标是基于装

备协同规则,将步骤 3 的可行武器装备集合组合为若干条可行的杀伤链,表示为

$$Line1 = \{[L_1^1, L_1^2, \dots], \dots, [L_k^1, L_k^2, \dots]\} \quad (14)$$

式中: L_k^i 表示执行第*k*个作战任务的第*i*条可行杀伤链,是作战目标-侦察装备-指控装备-打击装备-作战目标构成的闭合杀伤链。

步骤 5 杀伤链评估。在此步骤中,计算步骤 4 可行杀伤链集合中每条杀伤链的时间、精度和成本 3 项指标,根据体系设计人员的偏好进行加权并排序,得到执行每一项作战任务的最优杀伤链,表示为

$$Line2 = \{L_1, \dots, L_k\} \quad (15)$$

式中: L_k 表示执行第*k*个作战任务的最优可行杀伤链。

步骤 6 杀伤网设计。最后,使用杀伤链协同规则推理,将步骤 5 的杀伤链组合为分布式杀伤网。

3 案例验证

3.1 防空反导作战想定

防空反导体系是典型的武器装备体系,一般由预警追踪系统、指挥控制系统、火力拦截系统与作战通信系统等多种装备组成的多个子系统集合而成,主要承担现代战争中拦截敌方入侵飞行目标的作战任务。本文以防空反导体系为对象,在某通用体系对抗仿真推演平台建立如图 13 所示想定。

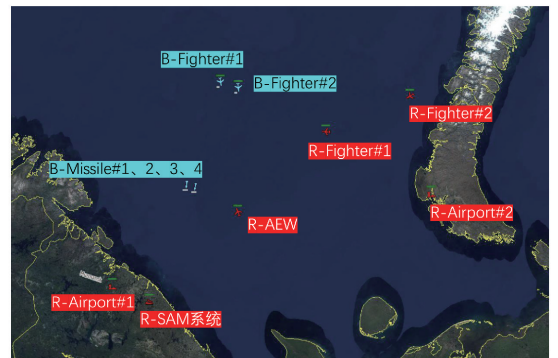


图 13 防空反导作战想定

Fig. 13 Scenario of air defense and anti-missile operations

想定分为红军、蓝军两方。在某海域,红军现有的防空反导体系构成如下:一架预警机从西边机场起飞至海湾中央执行预警侦察任务,西边海岸布置有防空系统,负责西侧防空,东边两架多功能战斗机从机场起飞执行巡逻任务,负责东侧防空。某日,蓝军两架多功能战斗机组成的飞机编队入侵红军领空,通过侦察卫星定位到红军防空反导系统,发射 4 枚空地导弹发动袭击,红军准备进行反击。红蓝

两军兵力构成如表 7 所示,本文站在红军视角,使用红军防空反导体系现有的作战资源,构建合理的杀伤网,拦截蓝军入侵目标。

表 7 红蓝军兵力构成

Table 7 Composition of red and blue forces

阵营	兵力构成
蓝军	1 颗侦察卫星 B-Satellite、2 架多功能战斗机 B-Fighter、4 枚导弹 B-Missile
红军	2 个机场 R-Airport、1 套防空反导系统 R-SAM、1 架预警机 R-AEW、2 架多功能战斗机 R-Fighter

3.2 杀伤网设计案例

在组建杀伤网之前,首先对杀伤网武器装备层本体进行实例化,这一步的作用是将红军防空反导体系现有的武器装备平台按照功能要素解构,实现所有战场资源的在网可用。红军武器装备详细信息如表 8 和表 9 所示(红军只有一个指控中心位于预

警机 R-AEW 上)。在 protégé 中对杀伤网本体实例化,如图 14 所示,其中橙色圆形标志为类,紫色菱形标志为实例,黄色矩形以导弹 R-Missile-A 展示了实例具体的数据属性信息。将 protégé 生成的 OWL 文件导入图数据库 Neo4j 构建如图 15 所示红军装备知识图谱。图 15 中圆形为装备节点,包括 1 个橙色指控装备节点,4 个棕色装载平台节点,6 个红色打击装备节点,4 个绿色侦察装备节点。装备节点之间的连线为装备的协同关系。以打击装备 R-Missile-A 为例,箭头指向的矩形为装备的详细属性信息。然后,建立杀伤网设计规则库,杀伤网设计规则如表 10 所示。为了简化验证流程,将任务-能力-装备映射规则简化为任务-装备映射规则,不影响对基于映射规则推理的智能设计思想的验证。此外,设计规则以任务-装备映射规则为主,着重验证基于任务-装备映射关系的杀伤网设计思想。

表 8 红军侦察装备信息

Table 8 Information on reds' reconnaissance equipment

装载平台	经度	纬度	高度/ft	侦察装备	目标类型	探测距离/n mile	侦察精度
R-AEW	N70°58'08"	E40°25'06"	36 000	R-Radar-A	空中、海面	350	90
R-Fighter#1	N72°47'54"	E45°39'48"	36 000	R-Radar-B	空中	160	80
R-Fighter#2	N73°35'32"	E51°18'20"	40 000	R-Radar-C	空中	160	80
R-SAM	N68°47'48"	E36°07'42"	0	R-Radar-D	空中	220	75

表 9 红军打击装备信息

Table 9 Information on reds' strike equipment

装载平台	打击装备	目标类型	最大射程/n mile	最小射程/n mile	毁伤值	目标最大速度/kn	目标最小高度/ft	目标最大高度/ft	最小发射高度/ft	最大发射高度/ft	命中率/%
R-Fighter#1	R-Missile-A	飞机、直升机、导弹	10	0.2	2.62	1 350	30	65 000	200	65 000	95
	R-Missile-B	飞机、导弹	160	4	21	1 950	30	80 000	200	65 000	85
R-Fighter#2	R-Missile-C	飞机、导弹	90	4	14	1 950	150	90 000	200	65 000	85
	R-Missile-D	飞机、直升机	0.2	3	0.7	700	30	12 000	0	0	50
R-SAM	R-Missile-E	飞机、直升机、导弹	2	215	123	4 500	30	150 000	0	0	90
	R-Missile-F	飞机、直升机、导弹	2	80	52.5	2 300	80	82 000	0	0	80

3.2.1 作战任务本体实例

想定中蓝军来袭飞行目标包括两架飞机和 4 枚已发射的导弹,红军的作战任务为拦截蓝军 4 枚导弹并击毁蓝军的 2 架飞机共 6 项作战任务。以击毁 B-Fighter#1 为例验证杀伤链的设计过程,并以 6 项任务共同验证杀伤网的设计。首先对杀伤网本体中

的作战任务层实例化,击毁 B-Fighter#1 详细任务信息如表 11 所示。

3.2.2 杀伤链设计

首先使用任务-装备规则,推理击毁 B-Fighter#1 需要的武器装备,筛选出来的武器装备如表 12 所示。

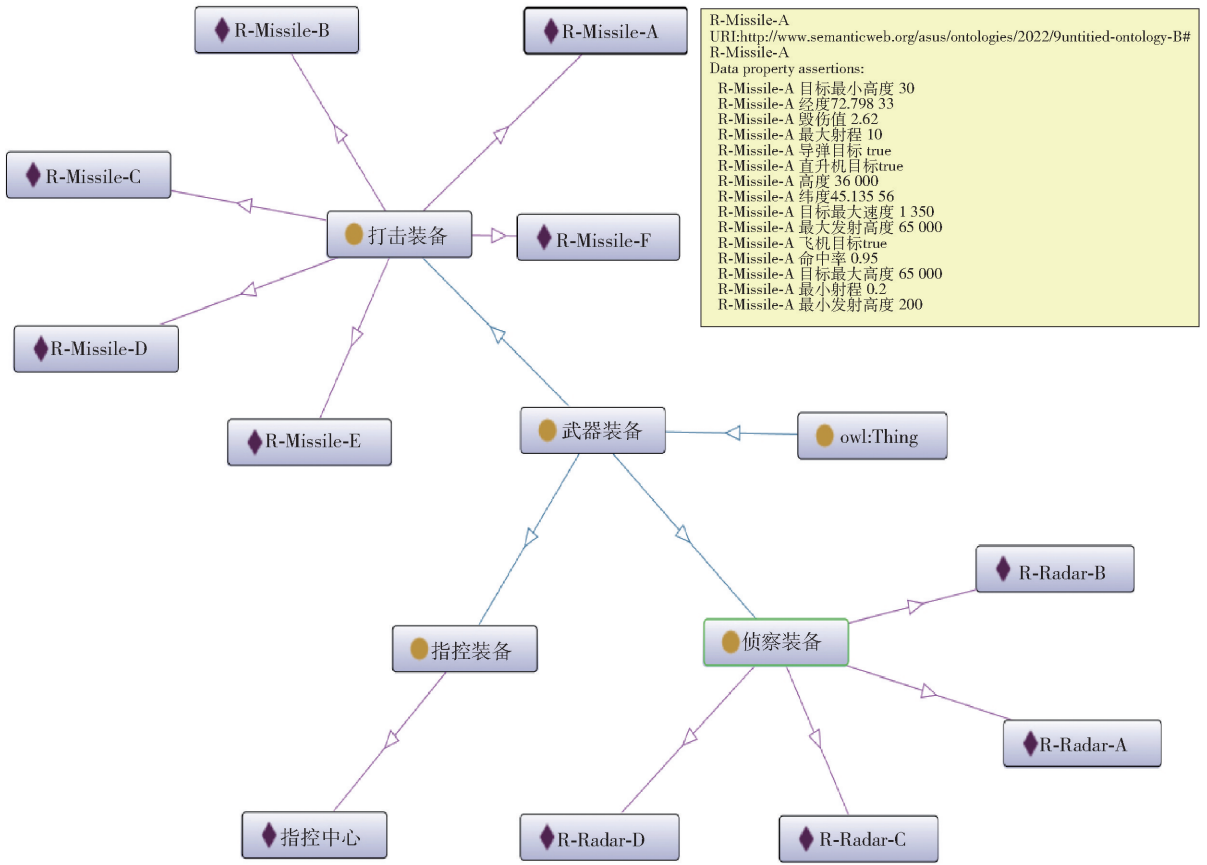


图 14 红军装备本体、实例 protégé 界面

Fig. 14 Protégé interface of reds' equipment ontology and instance

表 10 杀伤网设计规则实例

Table 10 Instances of kill-web design rules

规则类型	规则定义
侦察	侦察装备目标类型需要包含任务目标类型； 侦察装备探测距离需要大于任务目标距离
任务-装备映射规则	打击装备目标类型需要包含任务目标类型； 打击装备的最大射程需要大于任务目标距离； 打击武器装备的最小射程需要小于目标距离； 打击装备的毁伤值需要大于任务目标抗毁值； 打击装备目标最大速度需要大于任务目标速度； 打击装备目标最小高度需要小于任务目标高度； 打击装备目标最大高度需要大于任务目标高度； 打击装备最小发射高度需要小于装载平台高度； 打击装备最大发射高度需要大于装载平台高度
装备协同规则	装备之间需要有通信关系； 装备之间距离小于最大通信距离； 指控装备和打击装备之间需要具有指挥关系
杀伤链协同规则	侦察装备和指控装备可以同时多条杀伤链中； 打击武器装备只能在一条杀伤链中； 侦察装备在多条并列的杀伤链中时探测距离需要同时大于所有任务目标距离； 侦察装备在多条并列的杀伤链中时最大搜索目标数量需要大于所有任务目标数量总和； 指控装备在多条并列的杀伤链中时最大评估目标数量需要大于所有任务目标数量总和

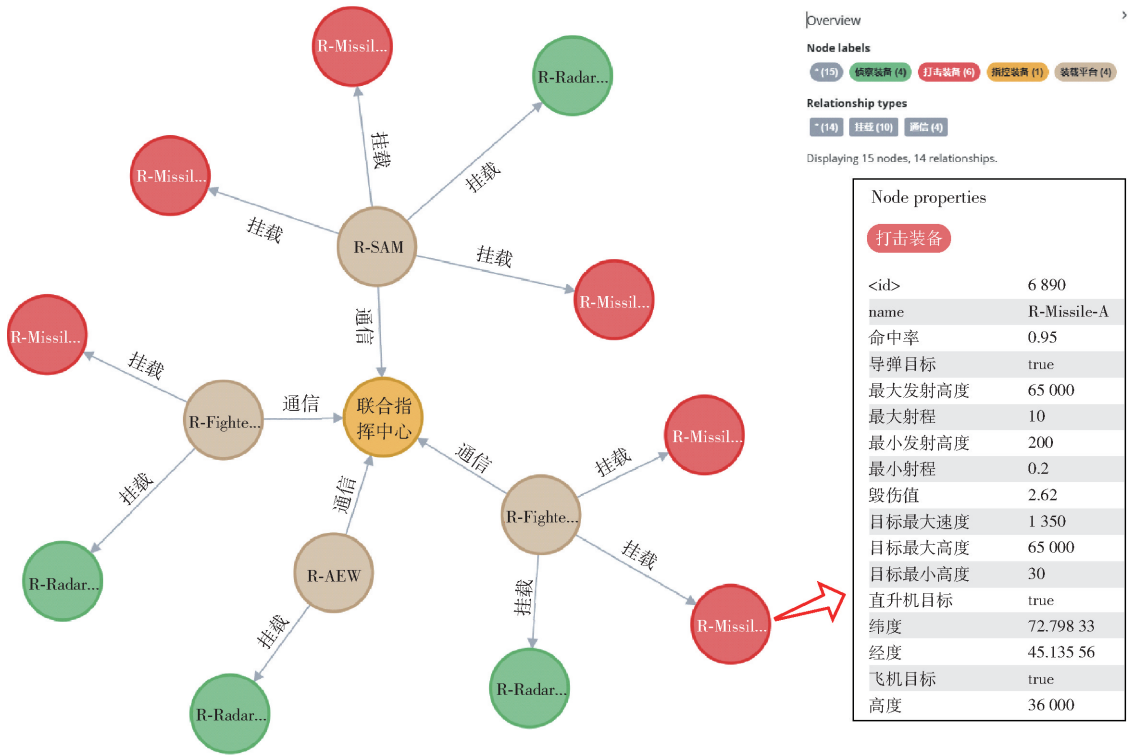


图 15 红军装备知识图谱

Fig. 15 Reds' equipment knowledge graph

表 11 击毁 B-Fighter#1 任务信息

Table 11 Mission message of destroying B-Fighter#1

参数	数值
目标类型	飞机
目标经度	N73°29'30"
目标纬度	E37°28'17"
目标高度(海平面上)/ft	36 000
目标速度/kn	350
目标抗毁值	10

表 12 击毁 B-Fighter#1 可用装备

Table 12 Available equipment to destroy B-Fighter#1

作战任务	侦察装备	指控装备	打击装备
击毁 B-Fighter#1	R-AEW, R-SAM	R-AEW	R-Fighter#1, R-SAM

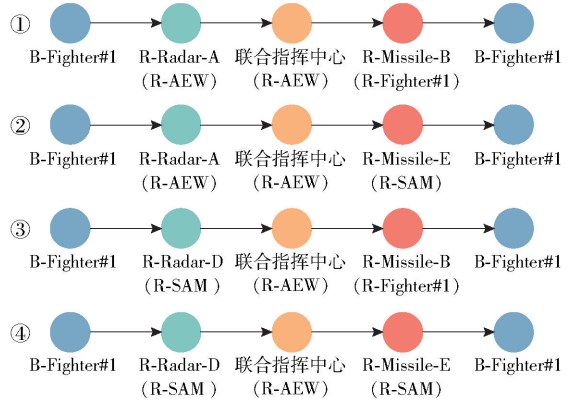


图 16 杀伤链设计空间

Fig. 16 Kill chain design space

然后基于上述装备使用装备协同规则推理可得到如图 16 所示的 4 条杀伤链,将初始杀伤链方案空间由 $4 \times 1 \times 12 = 48$ 条(红军初始可用作战资源有 4 个侦察装备、1 个指控装备、12 个打击装备,串联为杀伤链可以构成 48 条可能的杀伤链)大幅缩减。

进一步基于时间、精度和成本 3 个指标比较每一条杀伤链,时间取导弹飞行时间,精度取雷达精度

和导弹命中率乘积,成本取导弹毁伤值,3 个指标的权重分别设置为 0.3、0.3 和 0.4。如表 13 所示,最

表 13 可行杀伤链评估指标

Table 13 Evaluation indexes of available kill chains

杀伤链	时间(距离/速度)/ (n mile·kn ⁻¹)	精度(侦察 精度×命中率)	毁伤值	归一化 加权
1	190/3 450	90% × 85%	21	0.896
2	145/2 375	90% × 90%	123	0.300
3	190/3 450	80% × 85%	21	0.700
4	145/2 375	80% × 90%	123	0.092

终“击毁 B-Fighter#1”的最优杀伤链为“R-Radar-A (R-AEW)—联合指挥中心 (R-AEW)—R-Missile-B (R-Fighter#1)”。

3.2.3 杀伤网设计

重复上述步骤,得到“拦截 B-Missile-A”的杀伤链为“R-Radar-A (R-AEW)—联合指挥中心 (R-AEW)—R-Missile-E (R-SAM)”。使用杀伤链协同规则进一步推理,将筛选出的杀伤链组合为如图 17 所示分布式杀伤网。

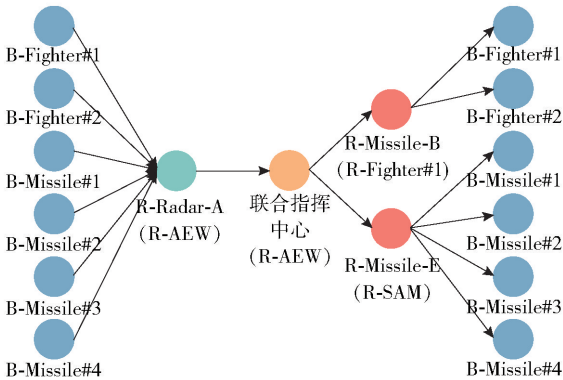


图 17 红军杀伤网
Fig. 17 Reds' kill-web

将得到的杀伤网在推演平台中建模仿真,结果如图 18 所示,杀伤网有效的击毁了敌方飞机,并拦截了所有的导弹,成功地完成了作战任务。



(a) 击毁飞机
(a) Destroying the aircraft



(b) 拦截导弹
(b) Intercepting the missile

图 18 仿真结果
Fig. 18 Simulated results

4 结论

传统的杀伤网设计方法往往聚焦于设计的后端,研究杀伤网的评估和优化问题,而忽略了杀伤网设计的前端问题,即杀伤网的生成问题。本文提出一种基于知识推理的杀伤网智能设计方法,能够有效解决实时战场环境下的杀伤网快速设计问题,为特定的作战任务提供与之匹配的杀伤网。得到以下主要结论:

1) 在知识建模方面,本文基于本体理论提出一种杀伤网设计知识建模方法,统一表征杀伤网设计过程中海量、分散、多域、异构、隐性的设计知识。一方面定义了杀伤网设计本体框架,构建了杀伤网知识图谱,实现了杀伤网设计的静态知识建模;另一方面构建了任务-能力-装备映射规则、装备协同规则和杀伤链协同规则 3 类杀伤网设计规则库,实现了杀伤网设计的动态知识建模。

2) 结合静态知识和动态知识,提出基于知识推理的杀伤网智能设计方法,为典型防空反导作战体系设计了杀伤网,设计结果能够有效遂行作战任务。通过上述方法设计杀伤网,可以有效减轻体系设计人员知识负担,提升杀伤网设计的智能化水平与设计速度,辅助体系设计人员在瞬息万变的战场环境中做出快速决策。

针对设计流程中杀伤链聚合为杀伤网的环节,后续研究将继续深入探索杀伤链的并列关系、顺序关系、分支关系等更加复杂的协同关系,进一步提升战场有限作战资源的利用效率以及装备的协同效能。

参考文献 (References)

- [1] 陈登, 陈楚湘, 周春华. 基于 OODA 环的杀伤网节点重要性评估[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 363-372.
CHEN D, CHEN C X, ZHOU C H. Importance evaluation of kill network nodes based on OODA loop [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 363-372. (in Chinese)
- [2] WANG L Y, CHEN L B, LI M H, et al. Decision-making control in military combat system of systems: a prospect theory approach [C]//Proceedings of the 2022 8th International Conference on Big Data and Information Analytics. Guiyang, China: IEEE, 2022: 41-47.
- [3] SMITH R M. Using kill-chain analysis to develop surface ship CONOPs to defend against anti-ship cruise missiles [D]. Monterey, CA, US: Naval Postgraduate School, 2010.
- [4] 唐毓燕, 李芳芳, 张振宇, 等. 美国弹道导弹防御系统中的杀伤链与杀伤网解析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 1-10.

- TANG Y Y, LI F F, ZHANG Z Y, et al. Analysis of kill chain and kill-web in American ballistic missile defense system [J]. *Modern Defense Technology*, 2023, 51 (1): 1 - 10. (in Chinese)
- [5] IONIȚĂ C C. World military high-tech competition to implement the mosaic warfare concept[J]. *Strategic Impact*, 2021, 4 (81): 7 - 22.
- [6] 王小军, 张修社, 胡小全, 等. 基于杀伤链感知的动态可重构作战体系结构[J]. *现代导航*, 2020, 11(4): 235 - 243.
WANG X J, ZHANG X S, HU X Q, et al. Dynamic reconfigurable combat architecture based on kill-chain awareness [J]. *Modern Navigation*, 2020, 11 (4): 235 - 243. (in Chinese)
- [7] 夏博远, 杨克巍, 杨志伟, 等. 基于杀伤网评估的装备组合多目标优化[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(2): 399 - 409.
XIA B Y, YANG K W, YANG Z W, et al. Multi-objective optimization of equipment combination based on kill-web evaluation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(2): 399 - 409. (in Chinese)
- [8] WANG L Y, CHEN L B, YANG Z W, et al. A prospect-theory-based operation loop decision-making method for kill web [J]. *Mathematics*, 2022, 10(19): 3486.
- [9] 杨争争, 白浩, 侯勇. 陆战场杀伤网模型与资源优化初探[J]. *火炮发射与控制学报*, 2022, 43(5): 49 - 53.
YANG Z Z, BAI H, HOU Y. Preliminary study on model and resource optimization of battlefield kill-web [J]. *Journal of Artillery Launch and Control*, 2022, 43 (5): 49 - 53. (in Chinese)
- [10] 向南, 豆亚杰, 姜江, 等. 马赛克战概念下作战模块应急重构自主决策[J]. *指挥与控制学报*, 2020, 6(3): 223 - 228.
XIANG N, DOU Y J, JIANG J, et al. Operational module emergency reconstruction autonomous decision based on mosaic warfare concept [J]. *Journal of Command and Control*, 2020, 6(3): 223 - 228. (in Chinese)
- [11] 刘畅, 张雪松. 基于立体网络模型的机群杀伤链架构与规划研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16(5): 468 - 479.
LIU C, ZHANG X S. Research on the architecture and planning of group kill-chain based on stereoscopic network model [J]. *Journal of China Academy of Electronics Science*, 2021, 16(5): 468 - 479. (in Chinese)
- [12] 王梦, 杨松, 李小波, 等. 基于可执行架构的杀伤链设计与分析优化方法[J]. *系统仿真技术*, 2021, 17(3): 169 - 174.
WANG M, YANG S, LI X B, et al. Design and analysis optimization method of kill-chain based on executable architecture [J]. *System Simulation Technology*, 2021, 17(3): 169 - 174. (in Chinese)
- [13] 陈清霖, 田鸿堂, 王鹏, 等. 基于“OODA”环的分布式协同作战武器编配方案[J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1780 - 1788.
CHEN Q L, TIAN H T, WANG P, et al. Distributed cooperative warfare weapon allocation scheme based on “OODA” ring [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1780 - 1788. (in Chinese)
- [14] 葛冰峰, 李际超, 赵丹玲, 等. 基于元路径的武器装备体系作战网络链路预测方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(5): 1028 - 1033.
GE B F, LI J C, ZHAO D L, et al. Combat web link prediction method of weapon equipment system based on meta path [J]. *System Engineering and Electronics*, 2019, 41 (5): 1028 - 1033. (in Chinese)
- [15] BURNS G R, COLLIER R T, CORNISH R J, et al. Evaluating artificial intelligence methods for use in kill-chain functions[D]. Monterey, CA, US: Naval Postgraduate School, 2021.
- [16] JOHNSON B, GREEN J M, BURNS G, et al. Mapping artificial intelligence to the naval tactical kill-chain[J]. *Naval Engineers Journal*, 2023, 135(1): 155 - 166.
- [17] SHI H Q, HE B, LIANG J, et al. Modeling technology of naval formation area anti-aircraft kill web based on event graph [C] // *Proceedings of the 2022 9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications*. Urumqi, China: IEEE, 2022: 353 - 359.
- [18] GRUBER T R. A translation approach to portable ontology specifications[J]. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2): 199 - 220.
- [19] HARMAN G. Knowledge, inference, and explanation [J]. *American Philosophical Quarterly*, 1968, 5(3): 164 - 173.
- [20] RICHARDS C. Boyd's OODA loop[J]. *Necesse*, 2020, 5(1): 142 - 165.
- [21] 郭雷平, 段文博, 刘宇, 等. 基于OODA环的合成部队光电装备作战效能评估[J]. *兵工学报*. 2022, 43(增刊1): 177 - 182.
GUO L P, DUAN W B, LIU Y, et al. Combat effectiveness evaluation of synthetic army opto-electronic equipment based on OODA ring [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43 (S1): 177 - 182. (in Chinese)
- [22] ALLEMANG D, HENDLER J. Semantic web for the working ontologist: effective modeling in RDFS and OWL[J]. *Semantic Web for the Working Ontologist*, 2011, 14(3): 343 - 346.
- [23] HE Q, LING T W. An ontology based approach to the integration of entity-relationship schemas [J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2006, 58(3): 299 - 326.
- [24] KALIBATIENE D, VASILECAS O. Survey on ontology languages [C] // *Proceedings of International Conference on Business Informatics Research*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 124 - 141.
- [25] 林旺群, 汪淼, 王伟, 等. 知识图谱研究现状及军事应用[J]. *中文信息学报*, 2020, 34(12): 9 - 16.
LIN W Q, WANG M, WANG W, et al. Research status and military application of knowledge map [J]. *Chinese Information Journal*, 2020, 34(12): 9 - 16. (in Chinese)
- [26] WANG Y F, WANG T, WANG J H, et al. Military chain: construction of domain knowledge graph of kill chain based on natural language model[J]. *Mobile Information Systems*, 2022, 2022: 7097385.