

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.002

组网协同探测闭环与预案的设计

丁建江

(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 针对预警装备组网协同探测资源管控闭环与预案设计技术难题,本文在深刻理解组网协同探测“预案+控制+融合”技术机理与“预案+闭环”制胜机理的基础上,聚焦人机深度交互与人机智能融合技术研究,新建了协同探测人在回路的DPFEE与人机智能融合闭环模型,提出了协同探测管控闭环与预案工程化设计的方法、流程和要求,为解决协同闭环难构与预案难用现实难题提供了技术指导,为研制与运用具有“节点灵活+智能融控”技术体制特点的雷达组网协同探测群奠定了基础。

关键词: 组网协同探测; 闭环; 预案; 模型; 设计

中图分类号: TN959; TN958 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)01-0007-07

Design of the Closed-Loop and Pre-Arranged Planning for Synergy-Netted Detection

DING Jianjiang

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: For the technical problems in both closed-loop and pre-arranged planning of early warning equipment's synergy-netted detection, this paper, based on a deep understanding for the technical mechanism of “pre-arranged planning, control, fusion” and the winning mechanism of “pre-arranged planning, closed-loop” in synergy-netted detection, focuses on the technical research in deep human-machine interaction and intelligent fusion of human-machine. A closed-loop model for people in synergy-netted detection of DPFEE's loop and intelligent fusion of human-machine is created. The design method, flow and requirement of closed-loop and pre-arranged planning engineering in synergy-netted detection is proposed. The technical solutions for scenarios of closed-loop in synergy-netted detection are provided. The effort can be considered as a technical guidance for solving the problems of “hard to construct synergy closed-loop” and “hard to implement pre-arranged planning”, and lays a solid foundation for researching and implementing a group of synergy-netted detection that contains both “flexible node and intelligent fusion”.

Key words: synergy-netted detection; closed-loop; pre-arranged planning; model; design

0 引言

随着新一代空天目标特性与作战方式的快速发展,单雷达探测被迎头 RCS 小与主瓣干扰强等现实难题和巨大挑战逼上了梁山,早期单雷达探测能力几乎被这些难题“清零”,难以满足空天作战的新需求。多雷达组网,进行协同探测是解决上述难题的有效技术途径之一^[1]。但近二十多年来,组网协同探测技术研究和应用几乎停留在传统的信息融合层面,多雷达组网协同也在简单和粗放的低水平,难以实现正确、精细、深度的实时

协同控制,严重制约了组网协同探测作战概念的实施与效能。

分析技术原因,就是没有解决好实现多雷达组网协同探测的“管控闭环”与“预案设计”两个关键技术,存在协同闭环难构与预案难用等现实问题,制约了基于预案和人在回路的探测资源实时控制实施,也就制约了多雷达实时协同探测。所以,本文针对协同闭环难构与预案难用现实问题,在深刻理解协同探测作战概念^[2-3]、“预案+控制+融合”技术机理与“预案+闭环”制胜机理的基础上,聚焦人机深度交互与人机智能融合技术研究,新建了协同探测人在回路的DPFEE与人机智能

融合闭环模型;针对机机闭环构建,对探测节点(主要是组网雷达,简称为雷达)、融控节点(主要是组网融控中心系统)与预警网提出了一体化设计方法、内容和要求;针对预案工程化,提出了预案工程化设计方法、流程和要求,为获得协同探测群人机智能融合新增长点奠定基础。

1 协同探测的管控闭环与预案

按照物理域、信息域、认知/社会域“多域融一”的基本原理^[4]与协同探测作战概念,闭环与预案是协同探测不可或缺的要素。闭环,即预警装备组网协同探测资源管控通路或回路,在协同探测群中,可构成探测与融控节点之间的机机硬件闭环,人在回路的人机混合闭环,人机智能融合复合闭环,预案内部嵌套的规则与触发研判闭环,迭代优化预案的推演评估闭环,协同探测群内各级各类指战员之间的人人交互闭环。预案,即预警装备组网协同探测资源优化管控预案,是连接物理域、信息域、认知域/社会域等领域的载体,是把物理域与信息域探测资源通过指战员认知思想,集成在一起的一种体系探测战法,表征了多域融一、人机深度交互的技术特征;预案也是协同探测战术与技术紧密结合的产物,是指战员采取协同探测作战的一种优化对策,深刻表达了指战员与装备、战术与技术、平时与战时等多层次交互关系。

1.1 技术与制胜机理的深化理解

基于协同探测作战概念、技术原理、实现条件、要素组成与工作过程,图1给出了“预案、控制、融合”三者关系。预案是融控节点设计难点之一,是目前最或缺、最薄弱、最没有做好、最需要加强的内容,控制和融合要基于预案来实施。预案规定了探测资源控制内容、优先级、时序等,体现了探测资源控制的精度、深度、时效性与有效性等性能,是复杂环境中匹配空天目标特性尽可能获得目标有用探测信息的保障。对应控制内容,预案也设置了相应的融合算法和参数等。融合是产生协同探测效能的技术途径,是提取有用探测信息、抑制有害探测信息、形成连续稳定可靠高质量航迹情报的保障,是大数据挖掘技术的具体应用。

所以,“预案+控制+融合”闭环模型表达了协同探测技术机理,突出了协同探测闭环中人机深度交互的技术特点。按照图1协同探测技术与制胜机理,可以设计具有“节点灵活+智能融控”技术体制的雷达组网协同探测群实装。这种探测群在预警网中可基于任务敏捷重构,群内探测和融控节点数量基于任务可灵活编配,部署扁平,支撑预案与算法不断创新升级,是未来智能预警网的智能探测群。

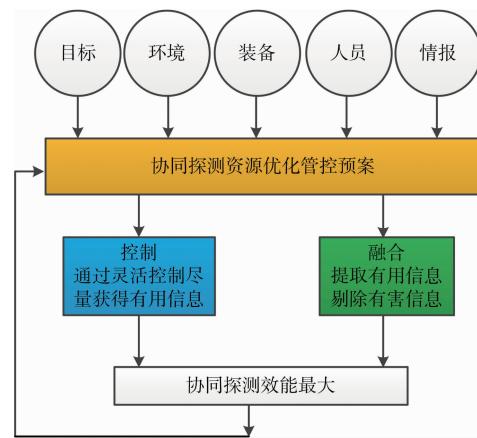


图 1 “预案+控制+融合”协同探测技术机理

控制和融合是实现预案的两个必要技术途径,是协同探测闭环中最重要的两个环节,预案通过闭环产生协同探测效能,闭环促进预案的优化迭代,两者联合构成了协同探测群最基本也是最重要的组成,在协同探测群中构建的“机机、人机、人人”等多型形态实体或虚拟闭环,为预案设计优化、推演训练、实施调整提供了保障,来支撑预案的设计、优化、推演、训练、实施等环节,不仅支持了指战员获得预案选择与调整的决策优势,也获得了人机深度交互的行动优势,最终获得协同探测的信息优势,这就是组网协同探测的优势原理,即“预案+闭环”制胜机理模型。该模型一方面表明要发挥和挖掘协同探测制胜优势,必须要解决好人机深度交互的技术难点;另一方面也指明,未来要持续保持协同探测制胜优势,要深化研究战技深度融合与人机智能融合。

1.2 人在回路的 DPFEI 闭环模型

战技深度融合一般通过人机交互实施,协同探测人机深度交互技术特点不同于单装,文献[5-6]虽

然构建了多级别协同探测资源管控闭环模型,但因人机交互具有时机、变量输入与反馈方式多、效能多样性等特点,没有详细讨论人在回路的协同闭环模型。图 2 给出了人在回路的 DPFE (Detect-Process-Fuse-Estimate-Execute) 协同探测作战运用典型闭环模型,即“探测、处理、融合、评估、执行”闭环模型,清晰表达了组网协同探测群指战员在预案设计、优化、推演、选择、实施、调整中的人机深度交互过程,即战技深度融合过程。融控节点依据指挥员选择的预案,用控制指令对各雷达的工作模式和参数实施精细化的控制;雷达依据控制指令对空天目标和环境进行全面感知,获得雷达探测的回波信号/点迹/航迹、识别特

征、威胁初判、装备状态等多类型信息,送融控节点集中处理。

在防空反导预警作战中,各级指战员一般都在 DPFE 闭环中,临战前,指战员与融控节点都要不断感知任务、敌情、我情等多方面变化情况,作为预案选择的决策基础。在自动建议预案的基础上,指战员人工选择预案。战中,在指战员监控下,装备半自动或自动方式执行所选预案,对协同探测群的时空频能等探测资源进行实时控制,获得所需要的探测信息。在装备自动、动态评估协同探测效能的基础上,最后由指战员分析研判,形成效能评估报告和建议,作为预案调整的重要依据。

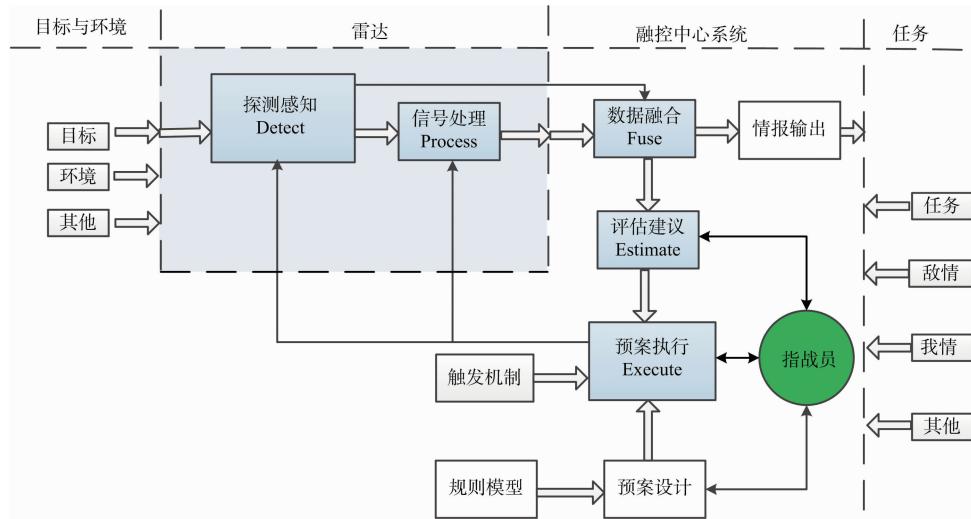


图 2 人在回路的 DPFE 闭环模型

1.3 人机智能融合闭环模型

人机深度交互的最新发展,就是人机智能融合,即指战员人类智能(HI)与预警装备人工智能(AI)的融合,也是指战员与装备相互作用后的新智能,使协同探测群在作战运用中获得更强的智能,即“智能+”,是未来协同探测战斗力的增长点。图 3 给出了协同探测群人机智能融合的典型闭环模型,描述了人机智能融合的一般性原理和方法,表明了指战员 HI 与装备 AI 融合关系、发挥作用的过程和效能。

装备 AI 一般由装备内核决定,HI 因人而异。人机融合智能表达了装备经指战员作战运用的综合智能,也就表达了装备作战运用的水平与战斗力大小。所以,要提升协同探测群的协同作战效

能,既要关注装备设计研制时 AI 的基本内核,即算法、规则、模型等;更要注重指战员 HI 水平及其两者融合的过程,这就要全面培养、训练指战员协同探测素质。装备 AI,核心是装备研制厂所设置的检测、识别等系列算法与逻辑规则,以及部队指战员经模拟推演训练后优化的作战规则与预案触发机制等。按照内设的系列算法和规则,预警装备对感知的大数据进行处理和判断,输出认知结果与决策建议,供多层次指战员决策选用。

图 3 人机智能融合闭环模型工作要点如下:第一,人员设置装备 AI 内核,研制人员和指战员要把正确的作战观念、任务优先、检测门限、评估准则等先验认知赋予装备,构成装备 AI 内核,也就是自适应算法、模型与规则等,装备在认知和建议中来体现人的意图;第二,装备 AI 赋能指战员,在

装备全面感知、大数据处理与模板匹配等技术支持下,给指战员提出探测资源优化管控预案、实施流程、维修保障等多方面建议,供指战员决策参考,可缩短指战员决策时间,获得决策优势;第三,人机智能融合制胜,在建议排序中,指战员选择优

先级较高的预案,再由装备执行,完成既定的作战任务,获得协同探测优势;第四,反馈优化装备 AI 内核,通过人机智能融合闭环,经实装实战检验的预案,再次优化装备内部的预案、算法、规则和模型等 AI 内核。

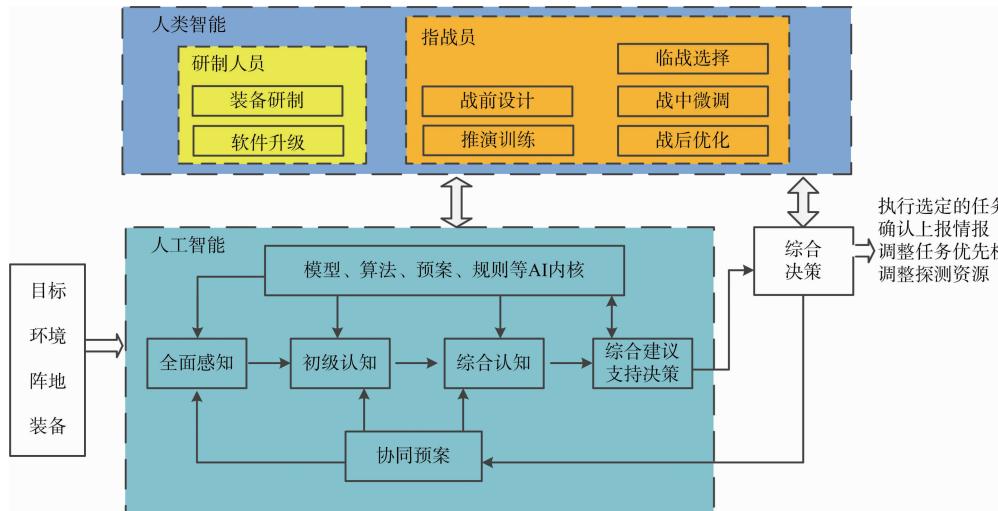


图 3 人机智能融合闭环模型

从图 3 可以看出,HI 赋予装备 AI 预案、算法、规则和模型等内核越精细,装备提出的建议会越具体、越全面、越实用,边界条件越详细,也就对指战员的赋能作用越大。这样形成了“人-机-人-机...”反复反馈迭代的人机智能融合新型闭环,简称“智融”闭环模型。在实际使用中通过“智融”闭环的不断迭代,可持续提升协同探测群智能能力与作战水平。

2 机机闭环设计

构建机机闭环涉及到探测和融控节点及预警网架构等多个环节。受传统雷达和各级情报处理系统长期各自分离设计、各自封闭、各树烟囱、树状架构、编成固化等原因的影响,基于早期雷达和情报处理协同,基本上不具备组网协同探测群的快速构建与协同运用的条件,更难以实施“按任务灵活组网、按预案敏捷控制”协同探测作战概念,也就难以适应未来智能化预警网的发展。一体化设计的目的就是要支持组网协同探测资源管控闭环快速构建与使用,要规范统一探测和融控节点及整个预警网架构的管控内容、接口、格式和协议等,解决网和源装备设计分离、各自封闭、接口多样、集成时长等现实难题。美军弹道导弹防御系

统的 C2BMC 与 TPY-2(FBM)雷达组网功能和接口协议进行了一体化设计,C2BMC 与部署于世界各地的 TPY-2(FBM)雷达可构成探测资源管控闭环,按照战前预先设计好的自主、聚焦、精确引导三个搜索预案集,对 TPY-2(FBM)雷达的工作模式和参数进行远程遥控^[7]。

2.1 对探测节点的设计要求

早期雷达对组网功能要求不高,造成了各厂所雷达设计师对探测资源控制方式方法、内容粒度、信息标识等方面有差异化理解和多样化设计,更重要的是影响融控节点设计师对预案、规则、策略等方面的设计。深度闭环控制对雷达组网功能总要求是:能准确接收和执行融控节点下达的预案或控制指令,按要求输出雷达探测信息与工作状态信息,有互联互通互操作标准的接口、格式、定义和协议等,能灵活适应多类融控节点组网方式。具体要求是:一是雷达具有较高的数字化水平和较好的自动监控能力,雷达发射、接收、天线、信号处理、数据处理、天控各分系统的工作参数和状态都能被实时监视和控制,具体监控内容包括:发射信号形式、参数、极化和数量等,波束空间扫描形式、位置、驻留时间等,接收机参数和极化形式,信号处理模式、参数、检测门限等,数据处理模

式、参数、探测信息输出格式和协议等,支持雷达资源被合理调配、工作参数按需设置和优化;二是雷达的感知、探测、状态等信息按需按要求输出。一句话,精细化实时控制指令要能进入到控制环节,探测和状态信息按需要输出,支撑探测资源控制的灵活性。

2.2 对融控节点的设计要求

融控节点的设计直接影响到探测资源控制的实现及其效能,灵活性越好,能灵活适应目标与环境的能力越强,实现匹配探测的可能性越大,组网探测作战效能可能越高,灵活性设计要始终贯穿于融控节点论证、研制和使用的多个环节,不仅有灵活的技术架构,还有灵活的信息融合、人机交互、预案设计与训练等功能,还能把雷达兵协同战术和组网技术紧密融合进行协同战法创新。主要要求如下:

1) 要具备预案设计的模型、规则、事件等多要素多粒度数据库,还要具备预案与策略仿真、评估、推演等的实验环节,检验预案与策略的缺陷,评估预案与策略效果,进一步明确预案与策略的边界条件,优先可实用的预案与策略,甚至创新组网探测战法。

2) 要具备信号级、点迹、航迹、点/航迹混合、选主站等多种融合处理功能,并便捷设置融合算法的参数,来灵活适应多样化协同探测任务、目标、环境与雷达的实际情况。

3) 前台有简洁的互联互通互操作人机界面,后台有数据统计、对比评估、图标显示、系统维护等丰富处理功能支撑。每个显控席位在硬件设备与软件功能上设计成为相同的全功能席位,使用时可按功能和操作人员在作战过程中的职责,启动不同的功能模块来区分席位功能。应用软件模块,特别是作战使用模块和数据库具有方便的扩充接口。整个应用软件可方便地维护、升级和移植,特别是预案、融合算法、判断规则、评估模型等,能通过自主和深化学习实际使用情况,不断优化和升级。

4) 要做好“人—装备—环境”三者的和谐一致,使协同探测群的操作、视觉、听觉、环境等方面协调统一。人机交互设计的重点既要考虑操作的可达性、简便性、安全性、容错性与负荷强度,还要

考虑自定义的灵活性。

5) 节点接入的数量在限量内是灵活可变的,接入的可以是融控节点或探测节点,探测节点可以是机动或固定雷达,也可扩展接入光电等多种异类体制探测信息,能较好地适应不同作战需求。

2.3 对预警网架构柔化的设计要求

传统防空预警网基于“单雷达独立探测上报航迹十大网航迹综合”技术体制建设,主要针对空中常规飞机目标,可综合区域多雷达航迹情报,能较有效承担日常空情监视任务,但区域预警网与雷达站的编成较为固定,对单雷达控制十分松散,柔性不足,灵活性有限,严重影响各级指战员协同战法创新,更影响智能化等先进技术应用和发展。预警网架构柔化的总体要求是,要满足基于探测任务敏捷重构协同探测群的性能要求,支持防空反导预警装备组网协同探测资源管控闭环的快速构建。具体要求是:一是协同探测群能基于探测任务对所需的处理和探测节点进行敏捷重组,随时构成任务探测群,完成任务后随时解散;二是群内的融控节点数量和主从作用也随探测任务进行重组,融合信息数量、层级、算法等技术参数也可随时选择;三是探测节点上的传感器能实时支持跨域、跨战区、跨军兵种调用,满足大区域、大空间的协同探测需要;四是能快速重组所需的指挥、控制、探测等信息链路。

3 预案工程化设计

传统预警作战,主要基于单雷达独立探测,预案通常是原则性文本形式,对单雷达控制主要是电话语音。而协同探测群是一个整体,由多个融控节点与探测节点组成,要基于预案对群内探测资源与融合算法进行实时协同控制,协同探测群相当于“一部基于预案控制的大雷达”,实现“你变我变、实时匹配”的协同探测。预案工程化就是要把多域融一的文本预案,逐步转化成装备能执行的指令或时序,生成多用途工程可应用预案。文献[4]概述了预案工程化的一般原则与概略流程,在文本预案工程化过程中可得到多类型多用途预案,主要包括基本预案、仿真预案、训练预案、实装

预案、演练预案、实战预案、归档预案等,分别用于仿真、训练、演练与实战等环节。本节从预案实用的视角,把多用途预案精简成基本预案与工程应用预案两类,先设计基本预案,再设计工程应用预案。

3.1 基本预案设计

按照“料敌从宽,预己从严”的总原则,基本预案设计要充分考虑目标、环境、装备、情报、人员五要素及变化,其主要任务就是完成假设类边界条件下建立基本预案矩阵/库,能支持预案合理性检验、效能对比、推演训练等多个环节,一般在作战实验室完成。尽可能使预案具备要素完备、合理可行、边界效能可比等技术特点,奠定预案工程应用基础。具体设计方法和要求如下:

1) 要素完备性设计。预案设计要尽量齐全考虑目标、环境、雷达等多维战场主要变化要素,对战中可能出现的确定性和不确定性因素进行预测、分析和评估。在目标、环境、雷达每一维都细分为多个层级,变量维是立体的,通常采用一维一层自顶向下设置变量的方法,设置典型场景进行细化设计,生成分类分层的基本预案集、多类多层次的预案矩阵或预案库。从理论上看,实现完备要素或者穷尽要素是困难的;但从实践看,依据先验知识分析与研判,设置类典型场景是可行的。这种方法称作“预测设计”法,这也是战争设计的重要内容之一。具体设计要求是:一是目标、环境、雷达等单要素仿真模型要齐全,置信度要高,粒度尽量要细,而且相互之间要匹配,接口要规范,特别要强调雷达模型是可控的;二是要具备组网协同探测典型作战概念模型与技术模型,单要素之间关系清晰,时序明确;三是要初步建立基本预案设计所需的智库,包括协同探测作战事件库、规则库、触发机制、风险规避机制等;四是人机接口、人机智能融合模型和算法接口等要开放,便于修改和升级。

2) 合理可行性设计。预案设计是一种立足可能的假设条件,通过反复迭代的闭环优化过程,寻找一种优化对策。设计预案是否合理可行,一是有正确的概念、机理和模型,二是有科学的设计方法和流程,三是有有效的仿真评估检验平台。预案设计流程主要有“总体设计—任务规划—参数

设置—效能评估”四个环节,如图 4 所示,在每个环节中可改变边界条件,来检验预案的合理可行性。

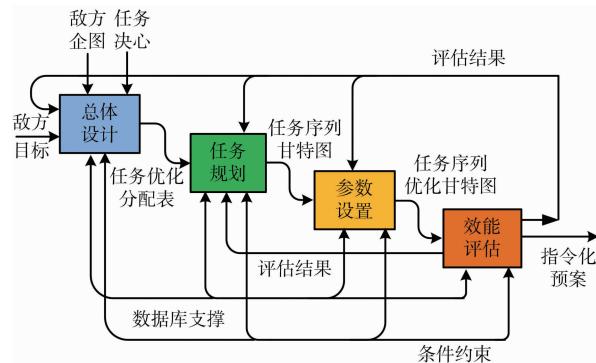


图 4 预案设计总流程

总体设计环节主要依据可能的作战场景及其他初始条件,明确传感器的任务分配,生成任务优化分配表与粗放任务时间图,即确定各个阶段的预警探测任务由哪些雷达具体执行,以及各雷达间的协作关系。任务规划环节进一步细化和明确雷达探测任务序列,生成任务序列甘特图与较为详细的任务时间图,即面对给定的目标,雷达探测任务时序和需要满足的探测要求。依据雷达详细任务时间图,设置该雷达执行某时刻探测任务的工作模式和参数,生成任务序列优化甘特图,并通过仿真模型来初步检验预案的合理性、可行性与效能性。

3) 效能可比性设计。在检验预案合理可行的基础上,评估比较其在多样化边界条件下预案集产生效能也是一个重要环节。实现边界效能可比性的设计要求是:一是要设计好边界变量的变化情况,在目标、环境和雷达三大类变量的情况下,依据可能的先验知识,要预计可能出现的变量和范围,并在预案设计流程中设置变量;二是能快速评估由边界变量带来的效能变化,并对比显示,形成边界与效能一一对应的预案效能清单,支持指战员快速“心明动案”,就是使指战员完全明白在选择或调整预案时每种边界条件下的效能,实施快速选案或调案,快速获得决策优势;三是要设计有人机智能融合的开放性接口,不仅能支持针对专题的研讨、决策与多个预案的效能对比,而且在推演训练实施过程中便于人机深度交互,实现多个预案前后台同时仿真推演,支持获得行动优势;四是要有试错性训练条件,增加训练不确定性,规避预案局限性与脆弱性带来的风险。

3.2 工程应用预案设计

在基本预案设计的基础上,预案要进入工程应用,还要进行预案实用性设计。实用性设计的目的就是使预案更能适应已有探测节点配置及部署情况,更能针对未知作战场景及战中可能出现的要素变化,更能满足人在回路的闭环监控,更能挖掘协同探测效能。实用性设计和评估的流程基本同上,设计方法和要求更加注重针对性与人机交互性,进一步检验预案的合理性、可行性、适应性、安全性和有效性,并规避由自动决策和控制带来的风险。临战前具体设计方法、流程和要求如下:第一,粗选排序。基于预测可能敌情与明确我情等先验知识的条件下,在设计好的基本预案库中粗选基本预案矩阵,针对可能出现的变量进行细化、排序和归类,设计生成多粒度、多种排序的和多种归类的多个预案矩阵,能适应战中可能出现的要素变化情况。第二,基于实装训练与优化。把粗选排序的预案转化成雷达能实时执行的控制指令和时序,开展基于实装部署的适应性训练,进一步检验预案矩阵中的每一个预案的适应性,并进行优化,磨合整个预案流畅性及与各级指战员交互性,设计生成变量细化与排序优化的预案清单及时序。第三,关键节点人机交互检测。在细化和优化预案的基础上,进行战中人机深度交互关键节点现场检验,主要包括探测性能动态评估、预案调整建议和指战员决策实施的实时性、合理性与准确性,满足战中基于预案和人在回路的控制要求。预案通过上述实用性设计后,使指挥员在预案选择与调整时获得决策优势,使各级指战员在人机交互中产生行动优势,最终转化成协同探测的信息优势,即协同探测制胜战斗力。

4 结束语

研究表明,按照本文提出的设计方法和要求来柔化预警网、设计探测和融控节点,就能快速构建基于探测任务的协同探测群,具有敏捷匹配探测任务的突出优点;按照预案工程化设计方法和流程来设计、推演优化、检验预案,就能逐步得到可工程应用的预案;基于设计的预案与所建的协

同探测群,来协同训练多层级指战员与创新协同战法,能提升人机交互实战能力,发挥和挖掘预警装备协同探测潜能。论文成果为解决协同闭环建构与预案难用等现实难题提供了方法和流程,能实现“按任务灵活组网、按预案敏捷控制”的协同探测作战概念,使协同探测群具备“敌变我变,与敌对口,先敌求变,高敌一筹”的战技特点。因此,要深化理解好“多域合一”基本原理、“预案+控制+融合”技术机理、“预案+闭环”制胜机理,构建好协同探测多类多层闭环,设计好探测资源管控预案,起步好人机智能融合,快速推动预警装备协同探测工程实施。

参考文献:

- [1] 丁建江,许红波,周芬.雷达组网技术[M].北京:国防工业出版社,2017.
- [2] 陈士涛,孙鹏,李大喜.新型作战概念剖析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2019.
- [3] CLARK B, PATT D, SCHRAMM H. Mosaic Warfare: Exploiting Artificial Intelligence and Autonomous Systems to Implement Decision-Centric Operations [EB/OL]. [2020-02-10]. <https://csbaonline.org/research/publications/>. CSBA.
- [4] 丁建江.概论雷达组网多域融一预案工程化[J].现代雷达,2018,40(1):1-6.
- [5] 丁建江.预警装备组网协同探测模型及应用[J].现代雷达,2020,42(12):13-18.
- [6] 叶朝谋.雷达组网系统资源控制研究[D].武汉:空军预警学院,2014.
- [7] Headquarters Department of the Army. AN/TPY-2 Forward-Based Mode (FBM) Radar Operations [EB/OL]. [2012-05-06]. <http://www.train.army.mil>.

作者简介:



丁建江 男,1963年生,浙江绍兴人,清华大学工学博士,空军预警学院教授、博士生导师,空军级专家,全军优秀教师,享受国务院政府特殊津贴,主要从事预警雷达总体论证、试验、作战运用等技术领域教研工作,发表学术论文150多篇,出版专著3部,获军队科技进步一、二等奖8项。

E-mail:dingjianjiang@tsinghua.org.cn