

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202505005

基于群体网络计划图的空中作战规划生成方法

王 蕾¹, 张志浩^{1*}, 吴 傲²

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安 710051;

2. 93184 部队, 北京 100085)

摘 要: 为应对未来大规模、高强度的空中战斗管理需求, 针对空中作战规划问题, 提出了一种基于群体网络计划图的全流程智能化空中作战规划方法。首先, 针对任务管理计划表征, 提出带时间戳的群体网络计划图模型; 其次, 针对任务管理计划生成, 提出基于工作分解结构 (work breakdown structure, WBS) 的智能空中任务管理计划生成方法, 并进一步提出基于时间参数的计划冲突自动检测与智能消解方法, 来对任务管理计划中存在的协同关系冲突、工作时长冲突以及“尽快原则”冲突进行检测与消解; 最后, 通过构建多角色多阶段群体协同任务场景对所提方法进行实例验证。结果表明: 该方法能够自动生成符合高阶作战逻辑的可执行计划, 并高效检测与消解 3 类冲突, 生成无冲突的优化方案, 从而验证了所提方法的可行性。

关键词: 任务管理计划; 网络计划图; 冲突检测; 智能消解

中图分类号: E919

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)05-0051-13



听语音
与作者互动
聊科研

Group Network Plan Graph-Based Method for Air Operation Plan Generation

WANG Lei¹, ZHANG Zhihao^{1*}, WU Ao²

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Troops No.93184, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: A comprehensive intelligent air operation planning method based on a group network plan graph (GNPG) was proposed to meet the requirements of large-scale and high-intensity air combat management in the future. First, a timestamp-based GNPG model was introduced for the representation of task management plans. Second, an intelligent air task management plan generation method based on the work breakdown structure (WBS) was developed. Furthermore, an automated conflict detection and intelligent resolution method of plan conflicts using temporal parameters was implemented to identify and resolve conflicts within the plan, including collabora-

收稿日期: 2025-03-06

修回日期: 2025-04-25

录用日期: 2025-05-08

基金项目: 国家社会科学基金 (SKJJ22050802)

第一作者: 王蕾 (1983—), 女, 讲师, 主要从事管理科学与工程研究。E-mail: xiaoci2000@sina.com

*通信作者: 张志浩 (1989—), 男, 讲师, 主要从事管理科学与工程研究。E-mail: 454689845@sina.com

引用格式: 王蕾, 张志浩, 吴傲. 基于群体网络计划图的空中作战规划生成方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (5): 51-63.
WANG Lei, ZHANG Zhihao, WU Ao. Group network plan graph-based method for air operation plan generation[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (5): 51-63.

tive relationship conflicts, work duration conflicts, and “as soon as possible” conflicts. Finally, an empirical evaluation of the proposed method was conducted in a multi-role multi-phase group collaborative task scenario. The results demonstrate that the method can automatically generate executable plans compliant with high-level operational logic, efficiently detect and resolve all three types of conflicts, and generate optimized conflict-free solutions, thereby verifying its feasibility.

KEYWORDS: task management planning; network plan graph; conflict detection; intelligent resolution

随着联合全域作战概念的提出,现代空中作战任务呈现出多维度特征。在作战域方面,已从传统空域拓展至太空、网络和电磁频谱域,形成多域融合的新型作战空间;在作战规模上,典型作战行动涉及百余个作战平台和千余个任务节点,协同复杂程度呈指数级增长;在时间精度方面,关键作战阶段的时间协同要求达到秒级。这些特点使得传统的任务规划和管理模式面临巨大挑战,亟需引入科学的管理规划方法。通过科学管理理论的应用,构建规划模型,优化作战流程,有效配置资源,形成集约的整体协同机制,从而提高空中作战的整体效能^[1]。

空中作战任务规划作为战前核心工作,其本质是通过科学的流程和方法,将上级作战意图转化为可执行的任务计划。该过程包含 3 个关键环节:一是任务管理计划表征,建立能够准确描述多域协同作战的数学模型;二是任务管理计划生成,基于作战指令自动生成符合战术逻辑的行动序列;三是任务管理计划冲突检测与消解,确保各作战要素在时空和资源维度上的协调一致^[2]。这 3 个环节相互耦合,共同构成完整的任务规划闭环系统。

针对任务管理计划表征问题,需要准确理解大规模空中作战的任务特点。常用模型包括甘特图^[3-4]、负荷图^[5-6]、网络计划图^[7] (network plan diagram, NPD) 等。甘特图和负荷图虽应用广泛,但难以清晰表征协同关系复杂的大型任务^[8],而 NPD 则基于网络模型,可直观体现子任务间的相互关系,适用于表征大型复杂计划。王锐^[9]利用 NPD 设计了联合作战跨域网络计划图,支持跨域协同计划的表征。NPD 模型采用关键路径法 (critical path method, CPM) 快速定位影响总工期的关键任务,已发展为可应对不确定性的关键路径决策技术^[10]。然而,面对复杂空中作战计划,NPD 存在 3 点不足:一是缺乏时间线,只能展现相对工作时长,无法动态跟踪任务进程;二是仅

有一个全局起点和全局终点,无法满足多批次兵力并行作战的需求;三是计算工作时间参数前,缺乏自动化任务排序和编码方法,难以满足大规模空中作战的任务需求。

针对任务管理计划生成问题,现有研究多集中于战术任务规划,侧重于实现单编组战术行动的闭环^[11]。然而,任务管理计划的实际使用者是作战指挥人员,其更关注整个作战任务的逻辑闭环。大型项目中各项工作通常存在时间和资源的强依赖关系,采用工作分解结构 (work breakdown structure, WBS) 技术^[12]分层细化任务,使每层计划受上层进度约束,从而实现科学规划。例如, Saputra 等^[13]应用 WBS 规划空军军事基地损毁后的维修工作; Fakrunnisa 等^[14]将其用于公共铁路的维护规划工作。因此,大规模空中作战任务管理可借鉴 WBS 技术,以空中任务指令 (air tasking order, ATO) 的协同信息为约束,将各编队任务分解为多个子任务,确保行动逻辑闭环,最终生成无冲突的任务管理计划。

针对任务管理计划冲突检测与消解问题,可借鉴项目管理领域的冲突消解方法。典型的计划冲突消解方法主要有 2 种^[15],分别为基于实例和规则的冲突消解方法^[16]和基于约束优化的冲突消解方法^[17]。前者通过总结指挥员的作战经验,构建冲突实例库和规则库,以实现对冲突的有效识别^[18]。后者将作战任务中的协同要求、先验条件及资源限制表示为约束条件^[19],借助层次任务网络规划或 Petri 网等技术检验行动计划是否违反约束条件。本文基于两者的优势,首先采用基于规则的方法检测冲突,随后将识别出的冲突作为新增约束引入计划生成模型中,最终通过约束优化方法求解出无冲突的任务管理计划。

基于上述研究,本文针对空中作战任务管理规划中的 3 个关键子问题,提出一种基于群体网络计划图的全流程智能化规划方法,将科学管理理念引入作战任务管理领域,以指导关键问题的解

决和技术实现。首先，将空中战斗管理活动建模为多角色、多阶段的群体协同任务，构建一种带时间线的群体网络计划图模型。其次，围绕作战逻辑，设计一种基于WBS的改进型自动化任务计划生成方法。最后，将任务管理计划冲突归纳为时长冲突、协同关系冲突及“尽快原则”冲突，提出了一种基于时间参数的计划冲突检测与消解方法，为大规模空中作战任务管理提供系统化、智能化的参考方案。

1 空中作战群体协同任务描述

空中作战任务具有大规模、高强度、快节奏的典型特征，需要协调执行大量相互关联的作战行动。这些行动不仅涉及众多分散部署、异地集结的作战单元，更要求各单元之间建立高效的协同机制。因此，多角色多阶段群体协同任务的定义为：在现代空中作战背景下，由指挥单元、作战单元等不同功能角色，按照既定任务分工，通过跨阶段动态协作与实时配合，共同完成复杂作战目标的系统性任务。典型的多角色多阶段群体协同任务场景如图1所示。

在群体协同任务中，将具体的空中作战任务实例化为多角色和多阶段描述。多角色是指多个参战编队承担不同的职能，例如打击编队、护航编队、加油编队、扫荡编队、干扰编队、压制编队等。多阶段是指每个编队按照空中作战逻辑，将作战过程分为多个阶段，例如起飞、交接、注册、加油、集结、点名、前推、交战、退出、返航和降落等。群体协同是指为达成作战目标，多个编队需要密切配合。例如，在进攻性制空作战

(offensive counter air, OCA) 中，多角色表现为扫荡编队、干扰编队和压制编队等，多阶段表现为侦查、加油、集结、推进、干扰、扫荡、压制、突防、打击、评估、退出等阶段，通过多角色多阶段有序协同，主动打击摧毁、压制或削弱敌方空中力量和防空系统，为打击编队肃清火力通道，以确保打击编队能够按计划对敌方地面目标实施有效打击。

2 基于时间线的群体网络计划图模型

2.1 群体网络计划图基本原理

基于空中任务管理计划的特点，群体网络计划图可定义为一种面向多作战单元协同任务的网络优化模型，其原理是通过双代号网络结构来统一表征3类要素，即纵向分布的编队任务线、横向统一的时间基准和节点间的作战逻辑约束。该模型采用全局起止节点集成分布式任务，基于拓扑排序和时间参数计算确保作战时序的严格满足，通过虚拟工作机制处理跨编队协同问题。

2.2 带时间线的双代号群体网络计划图模型

2.2.1 模型结构

为了完整表征空中作战任务内部的协同关系和外部的时间进程，本文结合甘特图和泳道图的可视化优点，同时借鉴网络计划图在任务逻辑关系表达上的优势，提出一种带时间线的双代号群体网络计划图模型，如图2所示。

在图2中，纵轴为编队编号 (identity document, ID)，横轴为时间。全局起始节点为S，全局终止节点为F，在网络计划图中分别用红色和蓝色表示。假设一个任务由N个编队共同完成，编

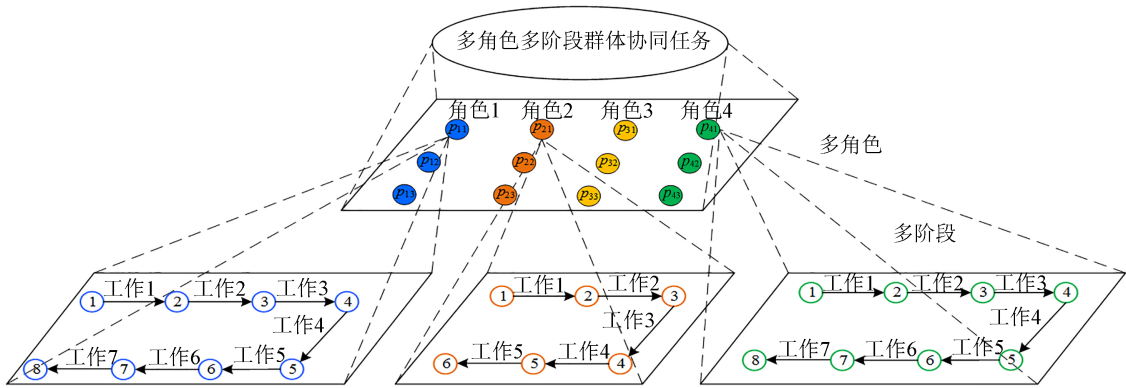


图1 多角色多阶段群体协同任务

Fig. 1 Multi-role and multi-stage group collaborative task

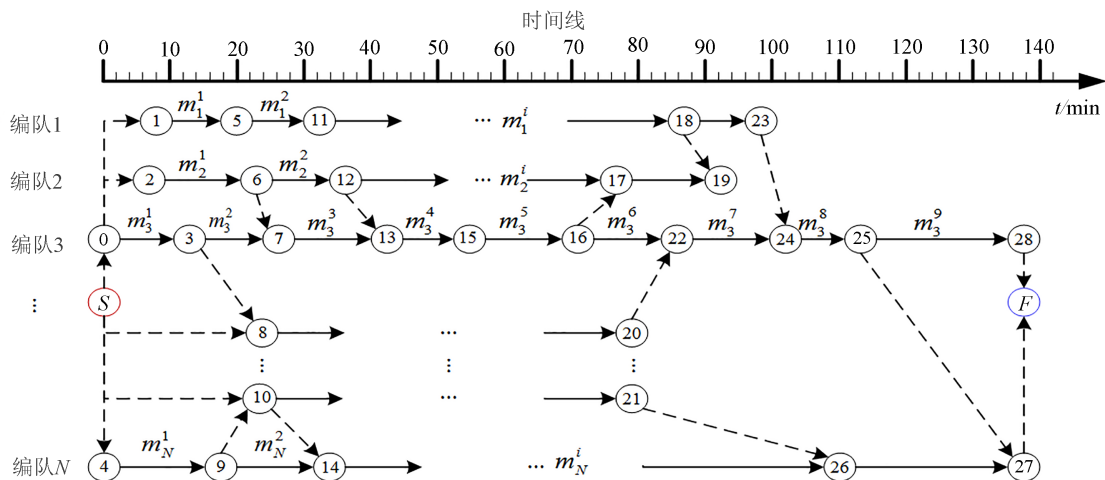


图 2 带时间线的双代号群体网络计划图模型

Fig. 2 Double-code GNPG model with a timeline

队 ID 构成的集合 $\varepsilon = \mathbb{R}^N$ 。从纵轴视角看, 计划图由多条任务线组成, 每条任务线代表一个编队 $j \in \varepsilon$ 的工作计划线。假设编队 j 所执行的工作数量为 α_j , 其工作 ID 的集合 $M_j = \mathbb{R}^{\alpha_j}$ 。同时, 假设每条工作计划线由若干节点 k 和工作 m_j^i ($j \in \varepsilon, i \in M_j$) 组成, 节点代表工作的开始和结束, 实线的长度代表工作的持续时长, 实线的起始节点为工作开始节点 $S_{m_j^i}$, 实线的终止节点为工作结束节点 $F_{m_j^i}$ 。任意工作有 2 种表示方式, m_j^i 表示工作编号, $(S_{m_j^i}, F_{m_j^i})$ 表示节点编号。为了表征计划的时间进程, 在群体网络计划图中增加时间轴, 节点 k 在时间轴上的投影 t_k 代表该节点的时间刻度。因此, 将工作 m_j^i 的开始时刻 $T_{S_{m_j^i}}^{m_j^i}$ 定义为工作开始节点 $S_{m_j^i}$ 在时间轴上的刻度, 即 $T_{S_{m_j^i}}^{m_j^i} = t_{S_{m_j^i}}$; 将工作 m_j^i 的结束时刻 $T_{F_{m_j^i}}^{m_j^i}$ 定义为工作结束节点 $F_{m_j^i}$ 在时间轴上的刻度, 即 $T_{F_{m_j^i}}^{m_j^i} = t_{F_{m_j^i}}$ 。

需要说明的是, 本模型与“计划-资源”分层指挥体系相契合, 聚焦任务内部工作间的时序逻辑规划, 将燃油、弹药等资源约束通过工作时长间接体现。在规划阶段, 工作时长的确定综合考虑了资源约束, 确保符合编队的任务执行能力, 并且在 4.1 节工作时长冲突及消解中, 规避了工作时长与实际不符的情况。同时, 通过工作类型和工作序列充分考虑作战企图、交战规则等约束, 确保工作设定符合作战逻辑。

2.2.2 协同关系建模

网络计划图中虚线代表虚工作, 其工作时长为 0, 仅用来表示各工作间的协同关系。依据工作

m_j^i 的时间轴方向, 所有指向开始节点 $S_{m_j^i}$ 的工作代表 m_j^i 的前置工作, 所有从终止节点 $F_{m_j^i}$ 流出的工作代表 m_j^i 的后置工作。只有当 m_j^i 的所有前置工作结束时, m_j^i 才能开始。令工作 m_j^i 的前置工作集合为 $M_{S_{m_j^i}}$, 后置工作集合为 $M_{F_{m_j^i}}$, 则

$$\begin{cases} M_{S_{m_j^i}} = \{m_e\}, m_j^i \in M_{F_{m_e}} \\ M_{F_{m_j^i}} = \{m_t\}, m_j^i \in M_{S_{m_t}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_e 为 m_j^i 的某个前置工作; $M_{F_{m_e}}$ 为 m_e 的后置工作集合; m_t 为 m_j^i 的某个后置工作; $M_{S_{m_t}}$ 为 m_t 的前置工作集合。

2.2.3 全局节点设置

在群体网络计划图中, 各执行者的工作开始时间或结束时间可能出现重合, 导致全局起始节点和全局终止节点的确定存在困难。

假设网络计划图中所有节点构成的集合为 P , 全局起始节点 S 的时间刻度 t_s 为所有节点刻度的最小值, 可表示为

$$t_s = \min t_k, k \in P \quad (2)$$

全局终止节点 F 的时间刻度 t_f 为所有节点刻度的最大值, 可表示为

$$t_f = \max t_k, k \in P \quad (3)$$

模型通过时间轴直观表征任务的时间进程, 能有效满足大规模数据集的时间管理需求。同时, 通过设置全局节点, 将复杂群体网络简化为单体网络结构, 显著提升数据集成与分析效率。相较于传统方法, 本模型通过多任务线并行协调机制优化资源配置效率, 实现作战进程的动态跟踪, 支持多执行者、多约束作战计划的全面表征, 尤

其适用于大规模数据集的复杂任务管理场景。

3 基于 WBS 的空中作战计划生成方法

空中作战任务的计划生成主要分为 2 种模式, 一种是人工提出需求后由机器自动生成计划; 另一种是人工制定计划后由机器进行冲突检测和消解。本文聚焦第一种模式, 即如何通过人机协同使机器自动生成符合作战需求的计划。为此, 提出一种基于 WBS 的改进式计划生成方法, 通过逐层分解复杂空中作战任务, 结合作战逻辑进行时间参数计算, 最终输出确定的、无冲突的空中作战管理计划。

3.1 空中作战任务的工作分解

WBS 技术为多层级复杂作战任务提供了系统性的规划框架, 通过作战进程的阶段化分解实现任务时序与资源依赖关系的可视化管控。以 OCA 为例, 其任务线程如图 3 所示。扫荡编队、干扰编队和压制编队之间保持群体协同。在战备阶段, 侦察单元持续获取战场态势, 各作战单元依序完成起飞、空中加油及战区集结。交战阶段由扫荡单元清除敌方空中目标, 电子战单元与火力压制单元协同作战为突击单元创造有利条件。作战终止阶段则实施战果评估并组织作战单元撤离, 期间预警指挥单元、通信中继单元和护航单元提供全程作战保障, 确保各作战要素的协同效能。

根据图 3 的任务线程, 将其映射到各编队, 生成各编队的工作线程。以任务线程作为作战逻辑约束, 将每个编队执行的任务进一步分解为多个工作, 确保各编队的行动形成逻辑闭环。以扫荡编队为例, 将 OCA 任务线程映射到扫荡编队, 得到其工作线程如图 4 所示。

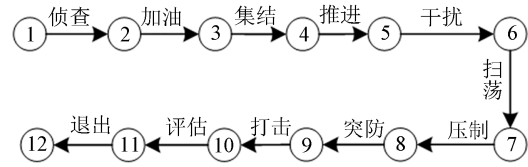


图 3 OCA 任务线程

Fig. 3 Thread of OCA task

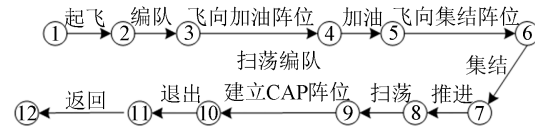


图 4 扫荡编队工作线程

Fig. 4 Thread of sweeping formation

通过对各编队任务的分解, 分别从任务指挥视角和编队长机视角, 生成整体任务线程和编队工作线程, 最终构建出整个任务的分层网络计划结构, 如图 5 所示。

图 5 中的分层网络计划结构表征了各编队工作的静态信息。基于空中作战任务 WBS 方法, 针对群体网络计划图中的任意工作 m_j^i , 指挥官可获取 3 类静态工作信息, 即工作时长 $x^{m_j^i}$ 、前置任务集合 $M_{S_{m_j^i}}$ 和后置任务集合 $M_{F_{m_j^i}}$ 。基于这些静态工作信息, 可定量计算群体网络计划图中的关键时间参数。

3.2 基于工作拓扑的工作时间参数计算

群体网络计划图中的各项工作之间都具有严格的协同关系, 这种关系直接体现了作战逻辑。为确保时间参数计算的准确性, 需要依据协同关系对各工作拓扑进行排序, 形成单线程的串行工作序列和多线程的并行序列。针对大规模群体网络计划图, 由于任务量大、协同复杂, 人工进行拓扑排序耗时长且易出错。为此, 本文提出一种群体网络计划图工作拓扑排序算法, 其算法流程如图 6 所示。

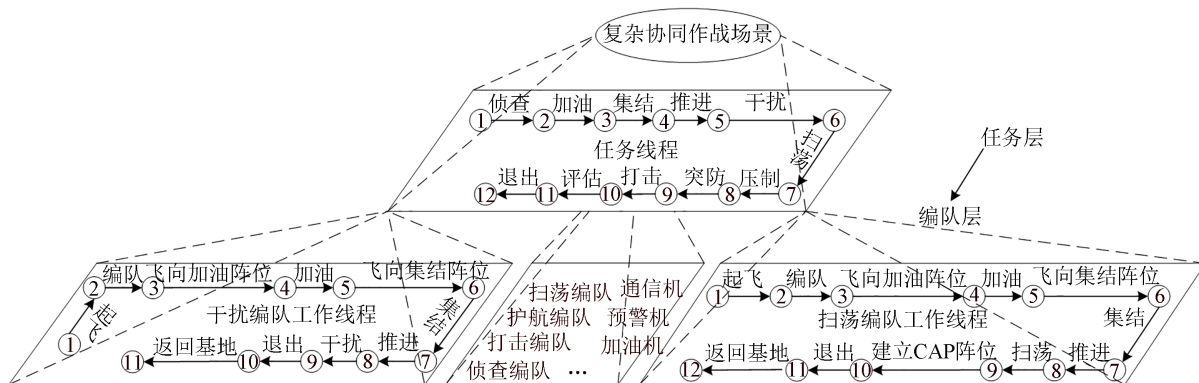


图 5 复杂任务的分层网络计划结构

Fig. 5 Hierarchical network planning structure of complex tasks

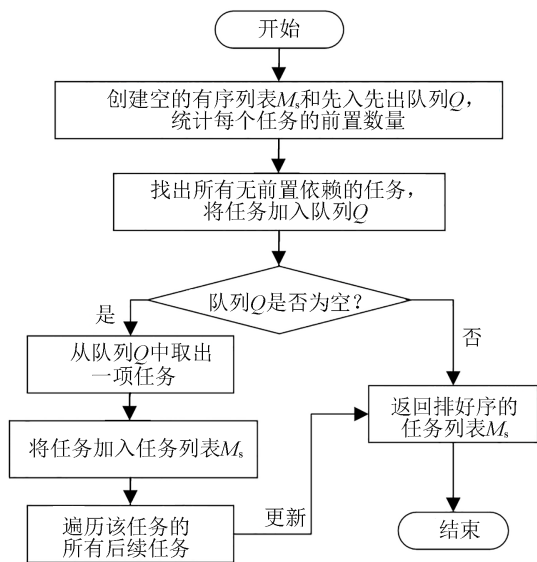


图 6 群体网络计划图工作拓扑排序算法流程

Fig. 6 Working topology sorting algorithm of GNPG

如图6所示, 本文拓扑排序算法的核心思想在于将工作节点间的逻辑依赖关系转化为确定的线性执行序列。该算法以前置任务数量为关键状态指标, 强调从无前置依赖关系的节点出发, 通过逐层解除后续任务的逻辑约束, 动态消解依赖关系, 最终生成一个能够严格保证所有前置关系均已被满足的有序工作序列。

基于工作拓扑排序算法得到的工作序列, 可计算群体网络计划图中任意工作的时间参数。为了便于表示工作间的逻辑关系, 用节点编号的形式表示任意工作。假设工作的起始节点和终止节点编号分别为 s 和 f , 则该工作的节点编号可表示为 (s, f) , 其时间参数包含工作最早开始时间 $T_{ES}^{(s,f)}$ 、工作最早完成时间 $T_{EF}^{(s,f)}$ 、工作最晚开始时间 $T_{LS}^{(s,f)}$ 、工作最晚完成时间 $T_{LF}^{(s,f)}$ 、工作总时差 $R^{(s,f)}$ 、工作单时差 $r^{(s,f)}$ 等。

根据有序任务集合 M_s 的特性, 可由前往后递推计算出 $T_{ES}^{(s,f)}$ 和 $T_{EF}^{(s,f)}$, 则

$$\begin{cases} T_{ES}^{(s,f)} = 0 \\ T_{ES}^{(s,f)} = \max_{(k,s) \in M_{S(s,f)}} \{T_{ES}^{(k,s)} + x^{(k,s)}\} \\ T_{EF}^{(s,f)} = T_{ES}^{(s,f)} + x^{(s,f)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x^{(s,f)}$ 为工作 (s, f) 的工作时长。所有从全局起始节点 S 出发的工作 (S, f) , 其最早开始时间 $T_{ES}^{(S,f)}$ 为 0。

根据有序任务集合 M_s 满足的特性, 可由后往前递推计算出 $T_{LS}^{(s,f)}$ 和 $T_{LF}^{(s,f)}$, 则

$$\begin{cases} T_{LS}^{(s,F)} = T_{ES}^{(s,F)} \\ T_{LS}^{(s,f)} = \min_{(f,k) \in M_{F(s,f)}} \{T_{LS}^{(f,k)} - x^{(s,f)}\} \\ T_{LF}^{(s,f)} = T_{LS}^{(s,f)} + x^{(s,f)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: 凡是进入全局终止节点 F 的工作 (s, F) , 其最晚开始时间 $T_{LS}^{(s,F)}$ 必须等于该工作的最早开始时间 $T_{ES}^{(s,F)}$ 。

工作的总时差 $R^{(s,f)}$ 指在不影响工作总工期的条件下, 工作可以延迟其开始时间的最大幅度, 定义为

$$R^{(s,f)} = T_{LF}^{(s,f)} - T_{EF}^{(s,f)} \quad (6)$$

工作 (s, f) 的单时差 $r^{(s,f)}$ 指在不影响紧后工作的最早开始时间下, 该工作可以延迟开始的最大幅度, 表达式为

$$r^{(s,f)} = \min_{(f,k) \in M_{F(s,f)}} \{T_{ES}^{(f,k)} - T_{EF}^{(s,f)}\} \quad (7)$$

式中: $r^{(s,f)}$ 为工作最早开始时间 $T_{ES}^{(s,f)}$ 和工作最晚结束时间 $T_{EF}^{(s,f)}$ 的可行区间。

定义 1 总时差为 0 的工作称为关键工作, 即对于工作 (s, f) , 如果 (s, f) 为关键工作, 则有 $R^{(s,f)} = 0$ 。

在工作时间参数的计算中, 关键工作集 M^* 表示所有关键工作的集合, 即

$$M^* = \{(s, f) \mid R^{(s,f)} = 0\} \quad (8)$$

工作 (s, f) 的计划开始时刻 $T_{PS}^{(s,f)}$ 可定义为

$$T_{PS}^{(s,f)} \in [T_{ES}^{(s,f)}, T_{LS}^{(s,f)}] \quad (9)$$

工作 (s, f) 的 $T_{PS}^{(s,f)}$ 一旦确定, 工作 (s, f) 的计划结束时刻 $T_{PE}^{(s,f)}$ 可定义为

$$T_{PE}^{(s,f)} = T_{PS}^{(s,f)} + x^{(s,f)} \quad (10)$$

只有确定各工作的计划开始时刻 $T_{PS}^{(s,f)}$ 和计划结束时刻 $T_{PE}^{(s,f)}$ 时才可生成一份确定性的计划, 实际 $T_{PS}^{(s,f)}$ 可在取值区间内任意取值。为了使各工作尽快完成, 减少前置的等待时间, 令各工作的计划开始时刻取该工作的最早开始时刻, 则

$$T_{PS}^{(s,f)} = T_{ES}^{(s,f)} \quad (11)$$

式 (11) 体现了“兵贵神速”的作战思想, 将其定义为计划生成的“尽快原则”。基于工作拓扑排序算法生成的有序工作序列, 可依次计算群体网络计划图中任意工作的时间参数, 最终生成满足作战协同关系约束的确定性可执行作战计划。

3.3 关键路径识别

定义 2 以群体网络计划图中的全局起始节点 S 为起点, 以全局终止节点 F 为终点, 相邻工作具有协同关系的关键工作集合称之为关键路径。

与一般网络计划图通常只有一条关键路径不同, 群体网络计划图中由于存在大量并行工作的编队, 可能导致多条关键路径的存在, 这就需要从群体网络计划图的所有关键工作中识别出所有关键路径。因此, 本文提出一种基于广度优先搜索的关键路径识别算法, 其输出为关键路径集合, 算法流程如图 7 所示。

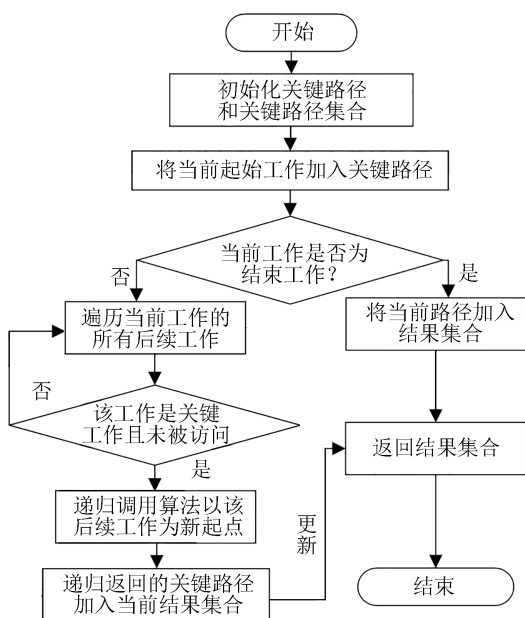


图 7 基于广度优先搜索的关键路径识别算法流程

Fig. 7 Breadth-first search-based critical path identification algorithm

如图 7 所示, 本文采用广度优先搜索策略, 递归枚举关键工作集合中的所有可行路径。其核心思想是以起始工作为根节点, 动态探测并扩展至所有符合关键条件的后继节点, 通过路径复制与递归调用构建完整的关键路径集合。算法通过状态空间遍历, 最终输出所有从起始工作至结束工作的关键路径序列。关键路径是“首尾相连”的关键工作组成的集合, 因此“关键路径”的最优性体现在 2 个方面: 一是关键路径的总时长为最长; 二是相邻关键工作间具有协同关系。基于广度优先搜索的关键路径识别算法中所有的工作均从关键工作中选取, 且保证加入关键路径中的工作均符合当前工作的紧前工作。

综上所述, 关键路径集合 $\tilde{K}$ 中包含所有相互独立的关键路径, 由于群体网络计划图中所有关键路径对总任务时长的影响是相同的, 因此只选取一条关键路径满足 $K \in \tilde{K}$ 作为群体网络计划图的关键路径。由于空中作战任务更关注核心工作的

完成情况, 因此本文采用“核心节点优先”的标准选取关键路径, 即优先选择包含核心工作(如打击工作)的关键路径。

3.4 节点自动编码

随着现代空中作战任务复杂度持续提升、作战规模不断扩大、参战单元数量急剧增长, 传统基于人工编制的网络计划节点编号方法难以满足战场的时效性需求。本文提出一种节点自动编码算法, 基于工作拓扑排序和确定性计划, 能够对群体网络计划图中的各节点进行自动编码, 为作战规划的快速生成和动态调整提供关键技术支撑。节点自动编码算法流程如图 8 所示。

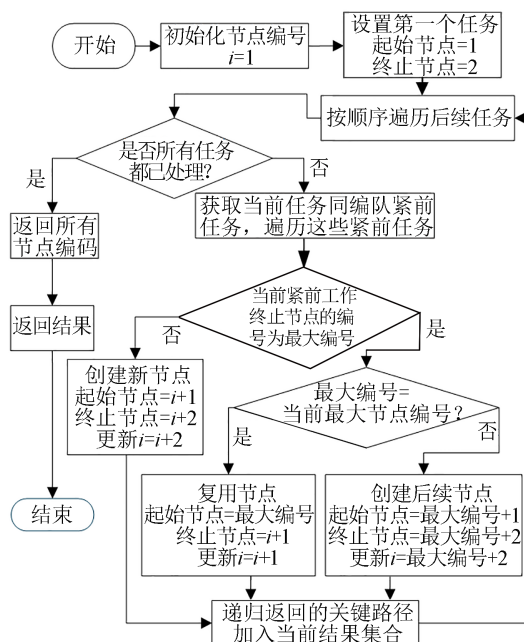


图 8 节点自动编码算法流程

Fig. 8 Node auto-encoding algorithm

如图 8 所示, 自动编码算法基于有序工作集合, 依据编队关系和紧前工作进行节点编码。其核心思想是通过遍历有序工作, 根据同编队紧前工作的节点编号, 动态确定当前工作的起始与终止节点编号。算法采用条件分支逻辑, 根据不同情况分配节点编号, 确保编码符合工作逻辑关系。

要实现节点自动编码必须满足以下条件: 一是对任一工作 (s, f) , 都有 $s < f$; 二是有序工作序列 M_s 中的各工作 (s, f) 排列都是按照起始节点 s 由小到大排列; 三是同一编队的各工作按照终止节点 f 由小到大排列, 且关键路径上相邻的两个工作, 紧前工作终止节点编号等于紧后工作起始节点编号; 四是有序工作序列 M_s 的第一个节点一定

为全局起始节点 S ，最后一个节点一定为全局终止节点 F 。本文通过节点自动编码算法，实现作战任务节点的自动化编号处理，确保节点编码的规范与高效，支持从作战目标到具体任务的逐级分解与系统规划。

4 空中作战任务计划冲突检测与消解

针对上述模型和算法制定的空中作战管理计划，需要引入冲突检测与消解机制以保障计划的可执行性。基于作战管理计划的特性分析，人工制定计划存在的冲突类型主要包括工作时长冲突、协同关系冲突、“尽快原则”冲突。本文将系统阐述这 3 类冲突的自动检测算法与消解方法。

4.1 工作时长冲突及消解

工作时长冲突是指某工作的计划时长小于其实际执行所需时长。针对工作 (s, f) ，假设人工制定的计划中 (s, f) 的计划工作时长为 $x_p^{(s,f)}$ 。根据任务需求，指挥官会指定工作 (s, f) 的执行所需时长 $x_n^{(s,f)}$ 。 $x_n^{(s,f)}$ 通常由作战任务的空间约束、装备能力及飞行员的日常训练水平决定，属于经验信息，代表实际执行中成功率较高的工作时长。如果 $x_p^{(s,f)} < x_n^{(s,f)}$ ，意味着计划中为工作 (s, f) 预留的时长不足，可能导致工作执行的成功率下降。因此，在计划冲突检测时，应将此情况视为异常抛出，提醒计划制定人员工作 (s, f) 的预留计划时长不足。

针对工作时长冲突的消解，利用本文提出的群体网络计划图工作拓扑排序算法计算，将异常工作在工作序列中进行编号定位。在工作序列中，异常工作之前的工作计划参数不再调整，仅针对异常工作之后的工作，按照本文提出的基于工作拓扑的工作时间参数计算方法，重新计算得到工作 (s, f) 在解决工作时长冲突之后的多项时间参数，然后将这些时间参数重新递推计算，即可得到无冲突的计划。

4.2 协同关系冲突及消解

协同关系冲突是指人工制定的计划中，某工作的计划开始时间 $T_{PS}^{(s,f)}$ 早于其所有紧前工作的最晚计划结束时间 $T_{PF}^{(s_i,f_i)}$ 。根据工作间的协同关系， (s, f) 必须在其所有紧前工作完成后才能开始。设工作 (s, f) 的紧前工作集合为 $M_{S(s,f)}$ ，集合中的工作表示为 (s_i, f_i) ，若工作 (s, f) 存在协同关系冲突，即可表示为

$$T_{PS}^{(s,f)} < \max T_{PF}^{(s_i,f_i)}, (s_i, f_i) \in M_{S(s,f)} \quad (12)$$

协同关系直接体现作战逻辑的核心约束，必须在制定计划时严格遵循。在冲突检测阶段，当识别到协同关系冲突时，模型启动冲突处置机制，提示计划制订员关注相关工作起始时间以确保符合作战逻辑要求。对于协同关系冲突的自动消解，可借鉴工作时长冲突的消解策略，首先通过定位工作序列的异常节点，然后基于既定的作战约束条件重新计算时间参数，最终生成符合所有协同要求的无冲突计划。

4.3 “尽快原则”冲突及消解

在空中作战计划优化中，“尽快原则”冲突特指工作计划开始时间违背“尽快原则”，即工作的计划开始时间滞后于工作的最早开始时间。“尽快原则”的核心价值体现在 3 个维度：从时间维度看，该原则要求所有作战任务必须在时间约束下尽早启动，可通过前移任务开始节点来压缩非必要等待时间，将延迟等待后置于任务完成阶段，确保作战进程持续推进；从作战效能角度看，该原则体现作战节奏的系统性和连续性，优化时序资源配置效率；从实战应用角度看，在多机种多任务协同时确保时序精确衔接，可为空中特情预留时间缓冲。

针对“尽快原则”冲突的消解，存在 2 种典型情况。第一种情况涉及编队工作线程中的首项任务，通常对应空中作战中的“起飞”任务。当此类任务出现启动时间延迟时，表明飞机处于地面准备阶段，尚未达到立即起飞条件。针对此类冲突类型，使用虚拟工作插入法，即在受影响编队的工作线程中增设虚拟工作 (s_0, f_0) ，保持作战计划的时间逻辑完整，以反映装备的实际状态。计划工作时长 $x_p^{(s_0,f_0)}$ 可以记为

$$x_p^{(s_0,f_0)} = T_{PS}^{(s,f)} - \max T_{PF}^{(s_i,f_i)}, (s_i, f_i) \in M_{S(s,f)} \quad (13)$$

式中： $x_p^{(s_0,f_0)}$ 为冲突工作 (s, f) 的开始拖延时间。

第二种情况涉及编队工作线程中的非首项任务冲突。当此类冲突发生时，表明飞机已经升空，此时严格遵循“尽快原则”的时效要求。针对此类冲突，采用与工作时长冲突相一致的消解策略，核心在于首先自动识别冲突任务节点，重新计算以优化任务时序，消除任务执行前的非必要等待时间。

本文方法的冲突管理机制通过时空约束优化实现多维度控制。首先，基于作战逻辑规则校验

编队工作时序；其次，按战术优先级对关键工作节点设置差异化时间裕度；最后，通过虚拟工作机制自动处理异常冲突。该机制通过对时空冲突、资源冲突和逻辑冲突的智能识别和动态消解，有效解决传统规划中冲突频发、依赖人工干预的难题，制定出一份无冲突的作战管理计划，确保空中作战任务计划可执行。

5 实验验证及结果分析

5.1 基于任务的群体网络计划图生成

为验证前文所提出的空中任务管理计划生成方法的有效性，构建典型的多角色、多阶段群体任务想定。采用Python语言设计仿真实验，通过结果的合理性来证明方法的有效性。在任务执行过程中，每个编队均需要完成多个工作，且各工作之间存在协同关系。基于提出的WBS方法，将整个复杂任务分解为9个编队（A、B、C、D、E、F、G、H、I）和56个工作（A1~A5、B1~B5、C1~C8、D1~D9、E1~E9、F1~F8、G1~G4、H1~H4、I1~I4），WBS分解的部分结果如表1所示。

表 1 复杂任务WBS分解结果（部分示例）

Table 1 Disintegration results of complex tasks using WBS (partial examples)

工作 编号	所属 编队	工作时长/ min	紧前 工作	紧后 工作
START	START	0	—	G1
A1	A	2	B1	A2\D1
A2	A	10	A1	A3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A5	A	2	A4	FINISH
B1	B	2	H1	B2\H1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
E6	E	3	E5\F6	E7
E7	E	3	E6	C7\E8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FINISH	FINISH	0	I4\H4\G4\ F8\E9\D9\ C8\B5\A5	—

依据群体网络计划图模型的设计要求，在表1中手动增添全局开始工作START和全局结束工作FINISH。通过对表1分解结果的分析可知，当

人为增设START和FINISH工作后，整个群体网络计划仅包含唯一的全局起始工作和唯一的全局结束工作。其中，START工作没有紧前工作，FINISH工作没有紧后工作。这一调整在不改变工作间协同关系的前提下，为多个并行开展作战行动的编队提供了统一的起始和终止节点，符合群体网络计划图的要求。此外，选定打击编队的打击工作（工作E7）为恒定关键工作，原因是该任务的核心是对目标实施打击，因此打击编队的打击工作成为整个复杂任务的核心，其他所有工作均围绕其展开并为其服务。

将表1所示的WBS分解结果作为输入，生成整个任务的群体网络计划图模型。首先，采用工作拓扑排序算法对所有工作进行排序，得到工作序列；其次，采用节点自动编码算法为各工作分配节点编号；再次，依据工作拓扑的工作时间参数计算方法，计算各工作的时间参数，生成确定性计划；最后，基于广度搜索的关键路径识别算法生成关键路径和关键节点。根据这些参数，绘制了复杂任务的群体网络计划图，如图9所示。图中省略了START和FINISH工作。

图9（a）中，各工作以工作编号的形式表示。结果表明：每个工作的所有紧前工作均在其之前开始，所有紧后工作均在其之后开始，符合工作排序设计要求。图9（b）中，各工作以节点编号的形式表示。结果表明：所有工作的结束节点编号自上而下递增，同一个编队的工作节点编号依次递增。对于具有协同关系的2个工作，若紧前工作的计划结束时间等于紧后工作的计划开始时间，则两者的节点编号相等。得到的节点编号符合工作间的协同关系，且连续无重复。

图9标明了关键工作和关键路径。其中，红色实线表示关键工作，蓝色实线表示非关键工作，虚线表示工作间的协同关系。结果表明，所有关键工作按协同关系连接，关键路径包含具体的工作编号。恒定关键工作E7位于关键路径上，在计划的静态展示中符合其定义。

为定量评估本文方法相较于传统方法的优势，与文献[8]所提方法进行了对比测试。在复杂任务想定中，本文模型凭借时间轴与全局节点设计，实现了多编队任务进程的时空统一表征。测试结果表明，本文模型将复杂计划的系统解析时间从传统方法的4.7个时间单元缩短至2.0个时间单元，使得多编队任务进程的可视化解读效率较文献[8]

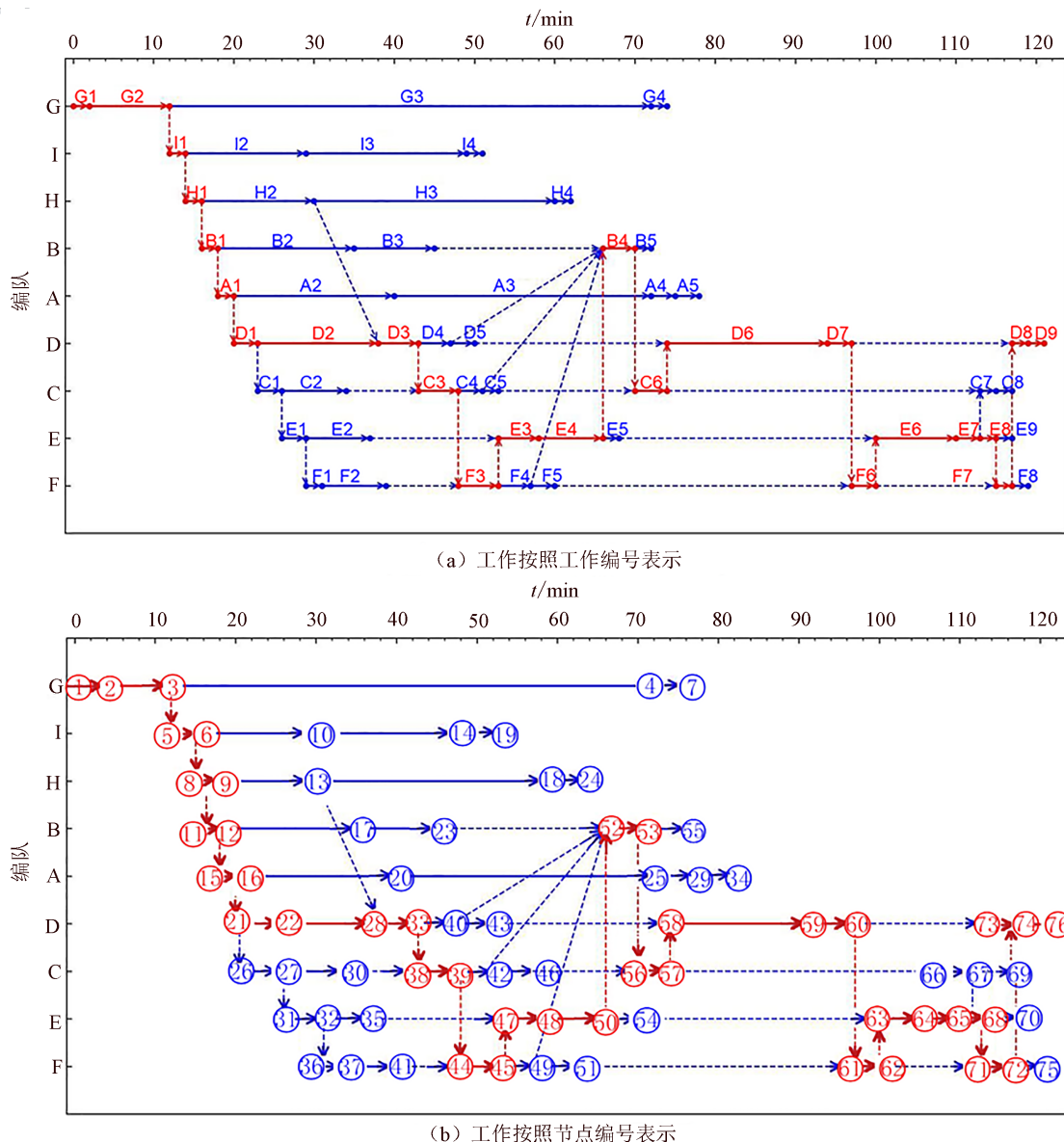


图 9 复杂任务群体网络计划图可视化

Fig. 9 Visualization of the GNPG of complex tasks

提升约 58%，其主要归因于统一时间基准的引入降低了系统对多线任务的认知负荷以及全局节点设置对计划拓扑结构的优化。此外，本文模型可支持 9 个作战编队 56 项任务的并行规划，且协同关系可以被清晰表达，克服了传统方法在处理大规模并行任务时存在的结构松散、时序不清等局限。

5.2 基于任务的计划冲突检测与消解

本文以一份事先由人工制定的复杂任务计划为例，对其进行冲突检测与消解，该任务计划由 24 个编队和 157 个工作组成，群体网络计划图如图 10 所示。通过对该任务计划进行冲突检测，发现 3 类冲突均存在，下面对各类冲突进行详细分析。

一是协同关系冲突。根据工作间的协同关系，

B2 工作应该为 C6、D6、E6、F6、G6、H6、I6、J6 等工作的紧前工作，这些编队的报到开始时间应不早于编队 B 到达任务区域的时间。然而，由图 10 可知，上述编队的报到开始时间早于 B2 工作的完成时间，造成协同关系冲突。其原因是计划中 B2 工作耗时为 59 min，但其实际所需时长仅为 49 min。由于为编队 B 预留的 B2 工作时间过长，导致编队 C 等按计划报到时编队 B 尚未到位。冲突消解的方法是缩短 B2 工作的工作时长，由 59 min 缩短为 49 min，与实际所需时长保持一致。

二是工作时长冲突。根据实际情况，工作 Q7 所需的时长为 32 min，但计划中仅预留了 20 min，引发工作时长冲突。冲突消解方法为：增加 Q7 的

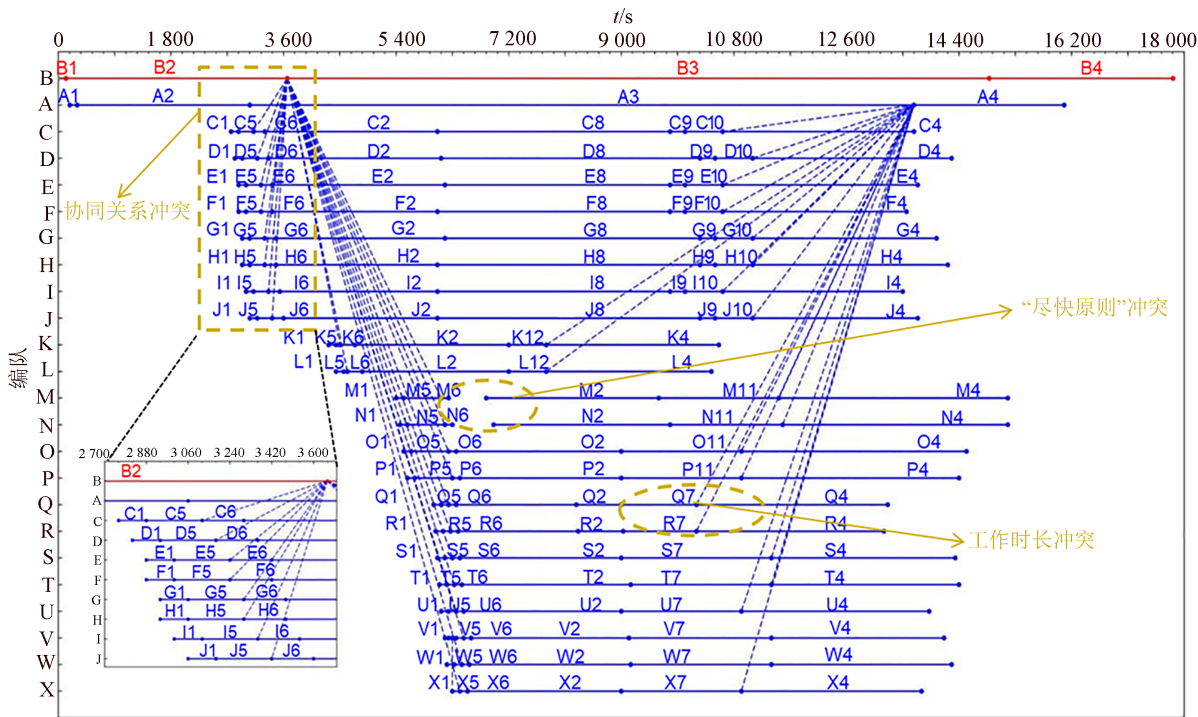


图 10 复杂任务计划冲突检测结果

Fig. 10 Conflict Detection results for complex tasks

工作时长,使其等于所需时长,并且将2个编队的后续工作依次向后平移。

三是“尽快原则”冲突。根据计划,工作M2的计划开始时间为第114 min,但其紧前工作仅有M1。根据“尽快原则”,编队M在工作M6结束后应立即开始工作M2,无需空等待。然而,图10显示编队M在工作M6结束后10 min才开始工作M2,导致编队M的所有后续工作均延迟10 min。冲突消解的方法为:消除计划中的“时间空隙”,使工作M2和N2的开始时间等于各自编队的紧前工作结束时间,并将2个编队的后续工作依次向前平移。此外,在各编队的起飞工作前均存在一定的“时间空隙”,这是允许的,并不违背“尽快原则”。因为所有编队的起飞工作(工作编号以1结尾)没有紧前工作,其开始时刻并不受约束,可人为指定。为实现机器对人工计划的理解,可在各编队的起飞工作前增加虚拟工作来表示紧前工作,用以约束起飞开始时间。人工计划中各参数的计算可统一在群体网络计划图计算框架下,确保机器生成的计划与人工计划保持一致,为后续计划管控奠定基础。

冲突检测完成后对计划进行冲突消解,图11展示了冲突消解后的任务群体网络计划图。与图10相比,图11中的工作数量由157个扩充至182

个,增加了全局起始工作START(图11中B1的起点时刻)、全局结束工作FINISH(图11中B4的结束时刻)、除编队B外其余23个编队的起飞前虚拟工作。由于虚拟工作为非真实工作(即START和FINISH工作),因此未在图11中可视化显示。

从图11的网络计划图中可以看出,原图10中存在的协同关系冲突、工作时长冲突以及“尽快原则”冲突均已得到消解,生成一份无冲突的任务计划,从而验证了本文冲突检测及消解方法的有效性,确保大规模空中任务管理协同计划的可执行性。冲突检测及消解不仅能够消除计划中的内在矛盾,更能够提升机器对人工计划逻辑的理解能力,从而在人工计划与机器自动计划之间建立起高效协同的沟通桥梁。

为系统评估本文方法的综合性能,在规划效率与冲突识别能力2个方面与现有基于规则库的方法^[8]进行对比。在规划效率方面,针对含157项任务的复杂场景,本文基于WBS的任务计划生成耗时从文献[8]所提方法的4.5 h缩短至1.96 h,时效提升约2.3倍,显著缩短了作战规划周期。在冲突识别准确性方面,本文采用基于时间参数的形式化分析机制,在包含31处预设冲突的测试集中成功识别出30处,准确率高达97%,而基于规则库的方法因其模型在表征动态时序约束方面存在的

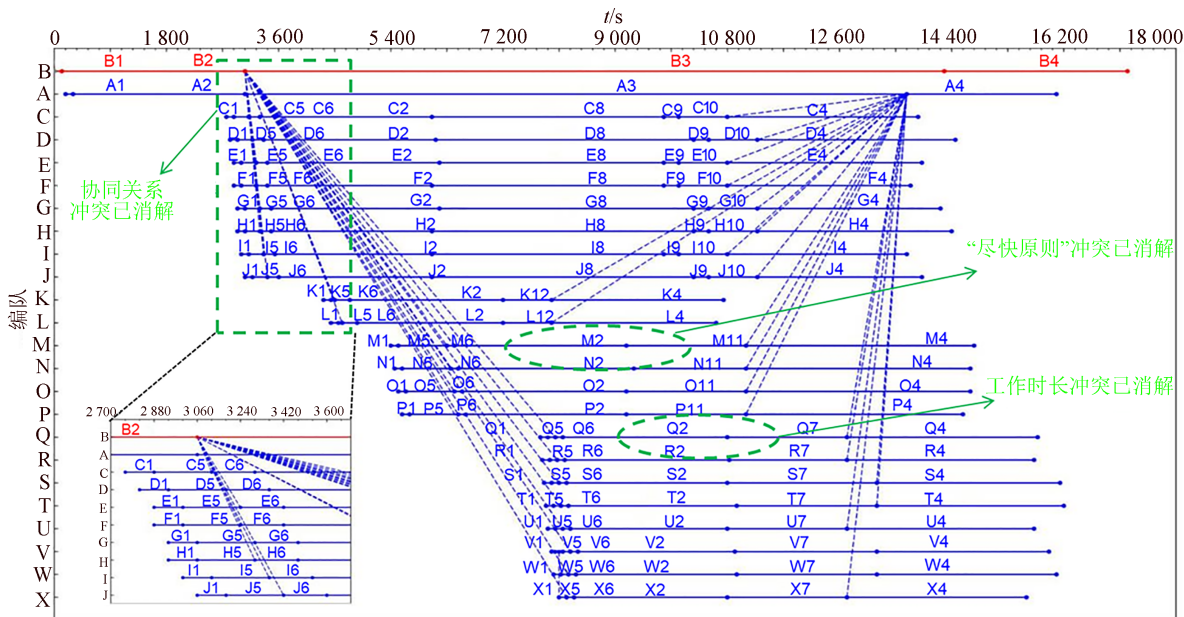


图 11 冲突消解后的复杂任务群体网络计划图

Fig. 11 GNPG of complex tasks after conflict resolution

固有局限，冲突识别准确率只有 82%，表明本文方法不仅能够显著提升任务规划速度，同时在处理动态时序冲突时具备良好的鲁棒性和检测精度。

6 结论

本文旨在提升空中作战指挥效能，聚焦多域联合作战任务，构建多兵种协同作战模型。首先，提出了任务管理计划的数字化表征方法，设计了任务管理计划生成方法，研究了 3 类典型任务管理计划冲突的消解措施；其次，采用数值计算方法，基于群体网络计划图模型，验证了方案的可行性，并评估了其在作战管理中的增效作用，主要结论如下。

1) 针对多角色、多阶段的群体协同任务，提出带时间戳的双代号群体网络计划图模型。该模型通过时间轴动态跟踪和全局节点设置，有效改善了传统方法在群体协同表征中的不足。在复杂场景中，任务进程可视化效率提升 58%，支持大规模、高强度任务的并行规划，性能显著优于传统 NPD 方法。

2) 提出了基于 WBS 的自动计划生成方法，采用拓扑排序、优先搜索与自动编码技术，实现了从作战指令到可执行计划的自动转化。在复杂任务场景验证中，规划时效为传统方法的 2.3 倍。

3) 针对 3 类冲突，提出了基于异常节点时间

参数分析与虚拟工作注入的检测与消解机制。经复杂任务场景验证，冲突识别准确率由 82% 提升至 97%，并展现出对多类型冲突的良好适应性。

本文将科学管理理论应用于空中作战规划领域，通过建立规范化流程和动态优化机制，统筹任务完成率、资源利用率和响应速度等关键要素，为现代战场环境下大规模高动态空中作战任务提供决策支持。未来将进一步探索智能对抗环境下作战管理从经验驱动向模型驱动的转型，推动空中作战管理向智能化、精细化方向发展。

参考文献

- [1] 解放军报评论员. 向科学管理要战斗力[N/OL]. 解放军报, 2025-02-26[2025-04-07]. http://www.81.cn/zt/2023nzt/flsxjbnmbjkjcsjyljd/esdjsjyy_244131/16373406.html.
- [2] 雷洪涛, 朱承, 王琛, 等. 联合作战行动跨域协同计划与控制关键技术[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(4): 361-371.
- [3] LEI H T, ZHU C, WANG C, et al. Key technologies of planning and control for cross-domain coordination on joint operational actions[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(4): 361-371.
- [4] HIRAKATA V N, OPPERMANN M L R, GENRO V K, et al. Exploring the Gantt chart as a tool to highlight double report in case series published during the first wave of the COVID-19 pandemic[J]. Systematic Reviews, 2022, 11(1): 155-

- 168.
- [4] SHIBUYA M, CHEN X. Production planning and management using Gantt charts[J]. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2021, 11(3): 228-310.
- [5] ZHUKOVSKIY Y L, KOVALCHUK M S, BATUEVA D E, et al. Development of an algorithm for regulating the load schedule of educational institutions based on the forecast of electric consumption within the framework of application of the demand response[J]. *Sustainability*, 2021, 13(24): 13801.
- [6] 高保慧, 胡海, 孙新炫, 等. 天基引导对海打击杀伤链火力规划方法研究[J]. *火箭军工程大学学报*, 2023, 37(6): 11-20.
- GAO B H, HU H, SUN X X, et al. Research on firepower planning method for space-based guided maritime strike kill chain[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2023, 37(6): 11-20.
- [7] NOORAFZA M, SANTOS B F, SHARPANSKY-KH A, et al. Airline network planning considering climate impact: assessing new operational improvements[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11): 6722.
- [8] 吴傲, 李寰宇, 高杨军, 等. 面向巡逻阵位保持的空中加油管理时空协同方法[J]. *航空学报*, 2023, 44(20): 116-145.
- WU A, LI H Y, GAO Y J, et al. Time-space coordination method for air refueling management for combat air patrol position maintenance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(20): 116-145.
- [9] 王锐. 基于网络计划图的联合作战方案建模与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 23-28.
- WANG R. Modeling and analysis of joint operations based on network planning diagram[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 23-28.
- [10] GUZMAN E, ANDRES B, POLER R. Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: a holistic framework and a systematic review[J]. *Journal of Industrial Information Integration* 2022, 27: 100287.
- [11] 杨任农, 张滢. 对任务规划系统建设的认识和建议[J]. *指挥与控制学报*, 2017, 3(4): 286-288.
- YANG R N, ZHANG Y. Views and suggestions on the construction of mission planning systems[J]. *Journal of Command and Control*, 2017, 3(4): 286-288.
- [12] KOUNTUR R, SARI M R. Risk identification approaches and the number of risks identified: the use of work breakdown structure and business process[J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2023, 10(1): 588.
- [13] SAPUTRA P D, FANSURI M H, LAKSMI A A. Development of work breakdown structure (WBS) for rapid damage runway repair (RADARR) time planning at military airbases[J]. *E3S Web of Conferences*, 2024, 517: 05002.
- [14] FAKRUNNISA I A, LATIEF Y, WARDAHNI N I. Public railway depot maintenance and maintenance work based on work breakdown structure (WBS) to improve maintenance and maintenance performance[J]. *International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research*, 2020, 10(4): 77-86.
- [15] 刘柏林. 战略实施中多项目资源冲突消解研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 88-98.
- LIU B L. Research and application of conflict resolution methods for multi-project management resource in strategy implementation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 88-98.
- [16] 张立群, 林海涛, 邹文明, 等. 基于OpenFlow的软件定义网络流规则冲突检测系统[J]. *计算机应用*, 2022, 42(2): 528-533.
- ZHANG L Q, LIN H T, HUAN W M, et al. Software defined network flow rule conflict detection system based on OpenFlow[J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42(2): 528-533.
- [17] 娄乐, 柳震, 齐星, 等. 面向遥感星座的地面测控资源调度方法[J]. *电讯技术*, 2024, 64(12): 2016-2023.
- LOU L, LIU Z, QI X, et al. A ground TT&C resource scheduling method for remote sensing constellation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2024, 64(12): 2016-2023.
- [18] 马俊光, 史红权. 浅谈舰载近末端防空武器使用冲突及消解策略[J]. *科技视界*, 2019(15): 72-73, 9.
- [19] 鲁小杰, 张涛, 王金双, 等. 基于规则集的安全策略冲突检测与消解[J]. *军事通信技术*, 2016, 37(1): 17-22.
- LU X J, ZHANG T, WANG J S, et al. Security policy conflict detection and resolution based on rule sets[J]. *Journal of Military Communications Technology*, 2016, 37(1): 17-22.

(编辑: 刘建民)