

网络化作战指控信息链柔性度量模型

南明莉^{1,2} 李建华¹ 崔琼¹ 冉湔丹^{1,3}

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)¹ (中国人民解放军 95801 部队 北京 100843)²
(国防科技大学信息通信学院 西安 710106)³

摘要 柔性是指控信息链有效应对网络化作战动态复杂性和不确定性的关键能力,对于确保指控信息快捷高效流转具有重要作用。针对网络化作战指控信息链柔性度量问题,首先,界定了作战节点、指控信息流、网络化作战指控信息链、柔性等概念,建立了指控信息链抽象结构,分析了指控信息链柔性的内涵及作用过程;其次,从设计、实施和控制3个阶段,提出了9个柔性要素度量指标,并给出了指标的具体计算方法;然后,给出指标权重确定和聚合方法,建立指控信息链柔性度量模型,并根据度量结果判定柔性程度;最后,以区域联合防空作战为例,验证了模型的可行性与有效性。

关键词 网络化作战,指控信息链,柔性,度量,模型

中图分类号 E917,TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.057

Flexibility Measurement Model of Command and Control Information Chain for Networked Operations

NAN Ming-li^{1,2} LI Jian-hua¹ CUI Qiong¹ RAN Hao-dan^{1,3}

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)¹

(The Unit 95801 of PLA, Beijing 100843, China)²

(Information and Communication College, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China)³

Abstract Flexibility is the key ability for command and control information chain to effectively response dynamic complexity and uncertainty, which plays an important role in ensuring command and control information flowing efficiently. Aiming at the flexibility measurement problem of command and control information chain for networked operations, in this paper, firstly, concepts of operational node, command and control information flow, command and control information chain for networked operations and flexibility were defined, abstract structure of information chain was built, and flexibility intension of command and control information and action process were analyzed. Secondly, nine flexibility factor measuring indexes were proposed from design, implement and control phases, and corresponding computing methods were given. Thirdly, index weight determination and aggregation method were given, and command and control information chain flexibility measurement model was built. According to the measurement results, flexibility degree can be judged. Finally, taking regional joint air defense operations as example, the feasibility and effectiveness of the model are validated.

Keywords Networked operations, Command and control information chain, Flexibility, Measurement, Model

1 前言

指挥信息系统是网络化作战的重要支撑,在作战中发挥着力量融合、效能倍增的关键作用。指控信息链是由作战单元和指控信息交互关系组成的网链,数量众多、规模不等的指控信息链彼此纵横交织,共同构成了网络化作战的指控信息网^[1]。柔性是系统灵活应对、主动适应环境变化的能力,最早由经济学家 Timoshenko 等于 20 世纪 30 年代提出,目的是研

究组织结构重组、要素关系优化、变量波动特性等问题。与传统作战相比,网络化作战更加强调流动聚能,力量结构能够通过动态转换和按需重组快速获取作战优势,因此指控信息链必须不断提高柔性,以灵活适应各类作战变化。柔性作为网络化作战指控信息链(Command and Control Information Chain of Networked Operations, CCICNO)的重要性能指标,提出科学合理的度量模型,对于准确衡量柔性程度、掌握指控信息链应对战场不确定性因素的变化能力具有重要意义。

到稿日期:2017-09-19 返修日期:2017-12-30 本文受国家自然科学基金(61573017,61401499,61174162),国家社会科学基金(15BGJ007,14GJ003-172)资助。

南明莉(1987—),女,硕士生,助理工程师,主要研究方向为指控信息链柔性度量与优化;李建华(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络化指挥信息系统建设与运用,E-mail:KGDLJH@163.com(通信作者);崔琼(1990—),女,博士生,主要研究方向为指挥信息系统弹性度量与分析;冉湔丹(1990—),女,硕士生,助教,主要研究方向为网络化指挥信息系统抗毁性度量。

目前,国内外已有许多学者对系统柔性度量问题进行了探索研究,先后基于经济效果、物理结构函数、信息熵、Petri网、多维变换等理论,提出了多种度量方法和模型^[2],深化了柔性问题的理论认知,但其仍存在以下不足:1)所提方法多数仅适用于系统的某个侧面,对系统整体柔性的度量研究相对不足;2)已有研究多数仅是定量分析,未能充分结合柔性背景,对定性因素的综合考虑不足。为此,本文针对 CCICNO 柔性度量问题,着眼柔性作用全过程,在分析柔性相关概念内涵、作用过程的基础上,综合运用定量与定性相结合的方法,构建柔性度量模型,并结合区域联合防空作战进行案例分析,以验证模型的可行性与有效性。

2 CCICNO 柔性相关问题

CCICNO 是指控信息组织运用的基本结构,反映了指控信息的作用过程与特点,具有跨度宽、层次多、动态性强等特征。

2.1 主要概念

定义 1(作战节点) 是具有预警、指挥、打击等功能的实体,记为 N 。按属性分为情报节点 N^I 、指控节点 N^C 、打击节点 N^S ,记为 $N = N^I \cup N^C \cup N^S$ 。 N^I 主要包括警戒雷达、无人侦察机等,记为 $N^I = \{N_i^I | i \in [1, I_0]\}$,其中 I_0 为 N^I 的数量; N^C 主要包括区域联合指挥所、各兵种部队指挥中心等,记为 $N^C = \{N_i^C | i \in [1, C_0]\}$,其中 C_0 为 N^C 的数量; N^S 主要包括歼击机、地空导弹等,记为 $N^S = \{N_i^S | i \in [1, S_0]\}$,其中 S_0 为 N^S 的数量。

定义 2(指控信息流) 是作战计划、方案、指令等战场指控信息,从权限较高的指控节点发出,在各类作战节点之间传播与流动,具有方向性,记为 $IFC = \{IFC_{i,j} | i \in N^C, j \in N\}$ 。

定义 3(网络化作战指控信息链) 是围绕作战任务,由各类作战节点之间的 IFC 组成,集指控信息产生、传递、利用等过程为一体的有序功能网链,可呈链式、树状或网状,记为 $CCICNO = \Theta(N, IFC)$ 。当节点数量多、信息交互密切时,CCICNO 会呈现典型的复杂网络特性^[3]。

定义 4(柔性) 是系统有效应对环境变化和不确定性的能力,强调主动进行自我调节与更新^[1]。

为深化柔性内涵理解,将其与弹性进行比较。弹性是系统在发生扰动后快速恢复到常态的能力,是抗毁、恢复和适应等能力的综合体现。两者都能反映系统适应环境变化的性能,但柔性的核心是主动应变,通过自主改变来灵活应对,而弹性的核心是被动应变,通过维持现状来耐受、抵抗外部各种冲击,并尽可能恢复到原有状态,以确保系统正常运转。

2.2 CCICNO 抽象结构

在复杂多变的战场态势中,CCICNO 会保持相对稳定,在平衡状态被打破后,能够快速重构,以灵活应对各类变化^[4]。从组成上看,CCICNO 包含战场所有的 IFC 及相关的 N^C , N^I , N^S ,按指挥控制权限由高到低的顺序传递信息,并形成有向网链结构^[3];从内容上看,CCICNO 主要对 IFC 的传递交互对象、过程、路径等进行控制;从实施上看,CCICNO 起始于最高权限的 N^C ,终止于独立执行指控信息的 N^I 和 N^S 。CCICNO 抽象结构如图 1 所示,该结构包含 9 个指控节点

($N_1^C - N_9^C$)、4 个情报节点($N_1^I - N_4^I$)和 3 个打击节点($N_1^S - N_3^S$),通过 15 个逐级 IFC、4 个越级 IFC 将 N 按一定规则顺次连接,形成具有特定功能的指控信息链。

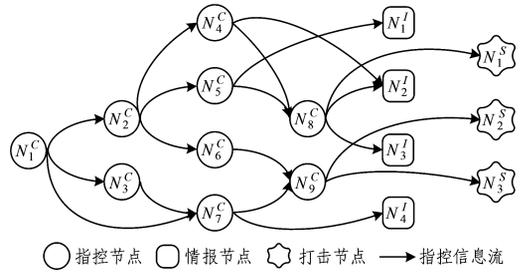


图 1 CCICNO 抽象结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCICNO abstract structure

2.3 CCICNO 柔性内涵

CCICNO 柔性是快速灵活应对战场环境、作战需求以及其他不确定性因素变化的综合能力,柔性程度与战场环境、作战需求适应性匹配,是指控信息快捷高效流转的前提。柔性越高,CCICNO 应对不确定性因素影响的能力越强、灵活性越好,但受制于资源分配、结构设计等因素,过高的柔性会引发过多的资源投入,造成较大的浪费,过低的柔性则会导致 CCICNO 僵化,不能有效应对环境变化,因此适度柔性是 CCICNO 设计和使用所追求的目标。柔性化 CCICNO 具有结构拓展性、响应性、协调性、多维性和适度性等特点,具体如下表 1 所列。

表 1 柔性化 CCICNO 的特点

Table 1 Characteristics of flexible CCICNO

特点	内涵
结构拓展性	根据环境、需求变化,CCICNO 灵活调整作战节点、信息交互关系的数量与组合方式。
响应性	CCICNO 以较低风险、较高收益完成状态转换,灵活、快速地响应需求。
协调性	CCICNO 高效协同内部要素之间的交互、关联关系,使彼此协调、共同作用。
多维性	CCICNO 柔性分析涉及不确定因素、信息流程、结构设计、度量、评估反馈等多个视角。
适度性	CCICNO 柔性不应过高或过低,而应以满足实际作战需求为最佳。

从功能角度来看,当战场环境扰动或作战需求变化在可容许范围内时,CCICNO 无需调整即可保持指控信息相对稳定传递的能力。从结构角度来看,当战场环境扰动或作战需求变化超出可容许范围时,CCICNO 能够快速通过扩展重组、路径寻优的方式,重新设计当前条件下指控信息的最优传输策略,维持网链结构与环境、需求动态平衡的能力^[5]。

2.4 CCICNO 柔性作用过程

CCICNO 柔性作用是层次递进、动态演变的过程,当战场环境和作战需求相对稳定时,CCICNO 柔性处于动态平衡状态;当战场环境或作战需求发生变化时,CCICNO 柔性的平衡状态被打破,需要通过调整作战节点数量、指控信息关系来改变柔性状态,向新的动态平衡演进,作用过程如图 2 所示。从图 2 可以看出,环境或需求是 CCICNO 柔性调整的诱因,CCICNO 结构变化(通过调整作战节点或信息交互关系来实现)是柔性状态改变的外在表现,演变前后 CCICNO 柔性状态会发生明显跃升^[6]。

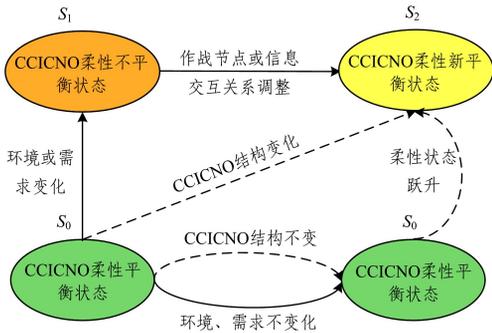


图2 CCICNO 柔性动态演变过程

Fig. 2 Dynamic evolution process of CCICNO flexibility

3 CCICNO 柔性要素指标

柔性是系统的潜在能力,伴随不确定性而存在,在尚未表现出来时难以衡量。本文从 CCICNO 结构和功能的角度,将其作战使用过程划分为设计、实施和控制 3 个阶段,分别提取关键度量指标,建立柔性指标体系,如图 3 所示。

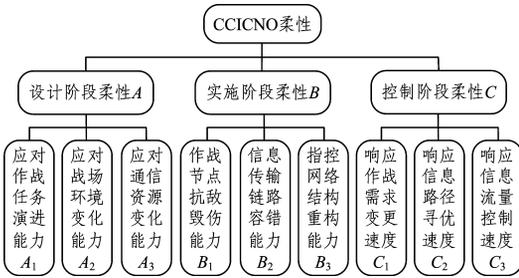


图3 CCICNO 柔性指标体系

Fig. 3 CCICNO flexibility index system

3.1 设计阶段柔性指标

3.1.1 应对作战任务演进能力

作战任务演进能力通过任务与 CCICNO 结构的匹配来体现,匹配程度越高,应对作战任务演进的能力就越强。作战任务可划分为多个按一定顺序组合的子任务,每个子任务都由特定的作战节点参与完成,可抽象为节点和信息流组成的网络图。作战任务与 CCICNO 结构的匹配性可转化为 2 个图形的匹配与相似性计算^[1],设作战任务为 T 、CCICNO 的网络结构图分别为 G^T 和 G^C ,图 G^T 节点 $N^T(m)$ 与图 G^C 节点 $N^C(n)$ 的相似性记为 $A(N^T(m), N^C(n))$,即:

$$A(N^T(m), N^T(n)) = \frac{n_M(N^T(m), N^C(n))}{|\Omega(N^T(m))| + |\Omega(N^C(n))| - n_M(N^T(m), N^C(n))} \quad (1)$$

其中, $n_M(N^T(m), N^C(n))$ 表示与节点 $N^T(m)$ 和节点 $N^C(n)$ 均有连接的“已匹配节点对” $n_M(N^T(m), N^C(n))$ 的数量,即 $N^T(m)$ 与 $N^T(k)$ 有连接, $N^C(n)$ 与 $N^T(k)$ 有连接, $|\Omega(N^T(m))|$ 和 $|\Omega(N^C(n))|$ 分别表示图 G^T 和 G^C 中与 $N^T(m)$ 和 $N^C(n)$ 直接相连的节点集,则 $|\Omega(N^T(m))| \geq n_M(N^T(m), N^C(n))$, $|\Omega(N^C(n))| \geq n_M(N^T(m), N^C(n))$ 。

综上可得 $A(N^T(m), N^C(n)) \in [0, 1]$, 将图 G^T 与图 G^C 中的节点两两匹配,可得作战任务 T 与 CCICNO 矩阵的匹配性测度 A_1 , 经归一化处理,则有:

$$A_1 = \frac{C(G^T, G^C)}{|N^T| + |N^C|} = \frac{\sum_{m=1}^{|N^T|} \sum_{n=1}^{|N^C|} A(N^T(m), N^C(n))}{|N^T| + |N^C|} \quad (2)$$

3.1.2 应对战场环境变化的能力

战场环境对 CCICNO 的影响主要通过作战节点和信息传输链路实现。对于作战节点而言,主要是使用方式受高度 hig 、降水 rai 、能见度 vis 等因素制约,环境适应性受温度 tem 、湿度 dam 、气压 pre 、风力 win 、雨雪 sno 、雷暴 lig 等因素影响,节点应对战场环境变化的能力 E_n 可表示为:

$$E_n = \mu(hig, rai, vis, \dots; tem, dam, pre, win, sno, lig, \dots) \quad (3)$$

其中, μ 表示节点的环境适应能力函数。

对于信息传输链路而言,主要是通信手段、信道质量等受传输路径 tra 、树林密度 woo 、周边电磁干扰 ele 、建筑物 bui 、天气状况 wea 和地形差别 lan 等因素影响,其应对战场环境变化的能力 E_l 可表示为:

$$E_l = \eta(tra, woo, ele, bui, wea, lan, \dots) \quad (4)$$

其中, η 表示作战节点的环境适应能力函数。

设 e_n, e_l 分别为作战节点与信息传输链路对 CCICNO 应对战场环境变化能力 A_2 的贡献度,则有:

$$A_2 = e_n E_n + e_l E_l \quad (5)$$

其中, $e_n + e_l = 1, e_n, e_l \in [0, 1]$ 。

3.1.3 应对通信资源变化能力

通信资源主要包括设备资源 R_e (程控交换机、收发信机等)、线路资源 R_l (通信光缆线路、电缆线路、管道设施等) 和网络资源 R_n (传输网、程控网等),这些资源在作战过程中都可能发生数量或性能上的变化。设 3 类通信资源的贡献度分别为 $\gamma_e, \gamma_l, \gamma_n$, 则 CCICNO 应对通信资源变化的能力为:

$$A_3 = \gamma_e R_e + \gamma_l R_l + \gamma_n R_n \quad (6)$$

其中, $\gamma_e + \gamma_l + \gamma_n = 1, \gamma_e, \gamma_l, \gamma_n \in [0, 1]$ 。

3.2 实施阶段柔性指标

3.2.1 作战节点抗敌毁伤的能力

在敌我攻防对抗中,为了最大限度地提高自身安全性、削弱敌方作战实力,关键节点往往成为攻击毁伤的重点。设 δ_{ij} 为敌目标 i 对关键节点 N_j 的毁伤概率, q_j 为 N_j 经过 1 次攻防对抗后的生存概率,则:

$$q_j = \prod_{i=1}^I [(1 - \delta_{ij}) + \psi_i \delta_{ij}] \quad (7)$$

其中, ψ_i 为敌目标 i 被毁伤的概率, $\psi_i \delta_{ij}$ 为采取积极抗击措施后提高的生存概率, I 为敌空袭目标的数量。

CCICNO 的抗敌毁伤能力不仅与单个关键节点的抗毁性有关,还与网络结构(关键节点的数量和分布)有关。为不失一般性,假设关键节点抗毁能力相同,则 CCICNO 整体的抗敌毁伤能力 B_1 为:

$$B_1 = 1 - (1 - q)^{N_k} \quad (8)$$

其中, N_k 为关键节点的数量。

3.2.2 信息传输链路的容错能力

为确保 CCICNO 正常执行作战任务,关键信息传输链路需要具有较高的可用性和可信性。设 $MTBF, MTTR$ 分别为平均故障间隔时间和修复时间,则信息传输链路在任意时刻处于正常状态的概率 P_A 为:

$$P_A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (9)$$

设 t 为信息传输链路执行作战任务的总时间,则信息传

输链路处于可信状态的概率 P_D 为:

$$P_D = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (10)$$

假设敌目标对关键信息传输链路的毁伤概率均为 p , 则信息传输链路的容错能力 B_2 可表示为:

$$B_2 = P_A P_D (1-p) \quad (11)$$

其中, L_k 为关键信息传输链路的数量。

3.2.3 指控网络结构重构能力

CCICNO 结构属于随机网络结构, 重构能力不仅取决于网络拓扑结构, 还取决于节点和链路的有效性^[7]。对于由 N 个节点、 L 条链路组成的网络 $G(N, L)$, 每条链路独立地以概率 p 被毁, 每个节点独立地以概率 q 被毁, $P_{s,t}$ 表示任意节点 N_s 和节点 N_t 之间的连通概率, 则遭受攻击后节点有效(即不考虑节点失效概率), N_s 和 N_t 之间的动态连通性概率为:

$$P_{s,t}^L = \sum_{k=0}^L C_{s,t}^L p^{L-k} (1-p)^k \quad (12)$$

其中, $C_{s,t}^L$ 表示 k 条链路的集合数目。当每个集合中的 k 条链路正常, 而 $L-k$ 条链路被毁时, N_s 和 N_t 之间仍存在至少 1 条通路。

同理, 遭受攻击后链路有效(即不考虑链路失效概率), N_s 和 N_t 之间的动态连通性概率可表示为:

$$P_{s,t}^N = \sum_{k=0}^{N-2} C_{s,t}^N q^{N-2-k} (1-q)^k \quad (13)$$

其中, $C_{s,t}^N$ 表示 k 个节点的集合数。当每个集合中的 k 个节点工作, 而其余 $N-2-k$ 个节点不工作时, N_s 和 N_t 之间仍存在至少 1 条通路。

设信息传输链路和作战节点的贡献度分别为 η_l 和 η_n , 则指控网络结构重构能力为:

$$A_3 = \eta_l \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^N P_{s,t}^L + \eta_n \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^N P_{s,t}^N \quad (14)$$

其中, $\eta_l + \eta_n = 1, \eta_l, \eta_n \in [0, 1]$ 。

3.3 控制阶段柔性指标

3.3.1 响应作战需求变更速度

作战需求变更的主要诱因往往是空袭目标状态发生变化, 此处以空袭目标数量作为表征^[8]。设作战需求变更时刻为 T_i, T_i 为时间段 (t_0, t_c) 内的随机变量, CCICNO 在作战需求变更后即刻感知需求, CCICNO 在探测时间 t 内发现空袭目标数为 $w(t)$, 则单位时间内发现目标的概率为^[4]:

$$P(t) = P\{T_i \leq t\} = 1 - P\{T_i > t\} = 1 - e^{-\int_{t_0}^t w(\tau) d\tau} \quad (15)$$

在时间段 (t_0, t_c) 内, 响应作战需求变更速度 C_1 表示为:

$$C_1 = \frac{p(t)}{|t-t_0|} = \frac{1 - e^{-\int_{t_0}^t w(\tau) d\tau}}{|t-t_0|} \quad (16)$$

3.3.2 响应信息路径寻优的速度

CCICNO 响应信息路径寻优的速度通过接收路径寻优指令到完成路径重新规划的时间来衡量^[9]。设寻优前后 CCICNO 结构分别为 G_C 和 G_C' , 节点数量分别为 $|N_C|$ 和 $|N_C'|$, 信息传输链路数量分别为 $|E_C|$ 和 $|E_C'|$, 则响应信息路径寻优的速度 C_2 表示为:

$$C_2 = e^{-[t_n(|N_C'| - |N_C|) + t_l(|E_C'| - |E_C|) + t^*]} \quad (17)$$

其中, t_n 和 t_l 分别为节点、信息传输链路的调整时间间隔, t^*

为网络平均时延。

3.3.3 响应信息流量控制速度

响应信息流量控制速度反映了 CCICNO 对信息流量调整的及时性和快速性, 通过平均响应时间来度量^[10]。响应分为自动响应和决策响应, 占比分别为 m 和 $1-m$ 。设平均自动响应时间和决策响应时间分别为 t_a 和 t_b , 则平均响应时间 $\bar{t} = t_a \times m + t_b \times (1-m)$, 针对具体的信息流量调整行为, 响应效率即响应信息流量控制速度 C_3 可表示为:

$$C_3 = e^{-\bar{t}} \quad (18)$$

其中, \bar{t} 越大, C_3 越小, CCICNO 响应效率越差; 当 $\bar{t} \rightarrow 0$ 时, $C_3 \rightarrow 1$, 表示控制即响应。

4 CCICNO 柔性度量模型

4.1 指标权重确定

指标权重确定方法分为主观赋权法和客观赋权法, 一级指标 A, B, C 采用专家主观评分, 对照标准量化评定。二级指标 $A_1-A_3, B_1-B_3, C_1-C_3$ 为定量与定性相结合的指标, 考虑到指标间的重要性差异和人为因素影响, 可采用主观、客观赋权法相结合的方式确定权重。设一级指标的权重向量为 $\omega = (\xi_a, \xi_b, \xi_c)$, 设计、实施、控制阶段的柔性分别为 F_a, F_b, F_c , 则 CCICNO 柔性为:

$$F = \xi_a F_a + \xi_b F_b + \xi_c F_c \quad (19)$$

其中, $\xi_a, \xi_b, \xi_c \in (0, 1), \xi_a + \xi_b + \xi_c = 1$ 。

4.2 指标聚合方法

4.2.1 加权和聚合

下层指标按照各自的权重, 以合作、互补的方式聚合到上层指标, 同级指标之间是相对平等、独立的关系。例如指标 A_1-A_3 都是设计阶段柔性的组成部分, 指标数值的改变会引起上层指标发生线性变化。该聚合方式能够突显权重较大的指标的作用, 应用较为普遍, 易于计算和推广。

4.2.2 加权积聚合

同级指标之间的相互依赖性强, 任意下层指标数值为 0, 都将导致上层指标数值为 0。例如指标 B_1-B_3 彼此关联密切, 任何指标失效都会导致实施阶段柔性失效。该聚合方式要求指标数值具有一致性, 能够突显数值较小、重要性较强的指标的作用, 适用于指标具有较强关联性的场合, 但计算量相对偏大。

以加权和“ \oplus ”与加权积“ \odot ”方式, 将 CCICNO 柔性的下层指标聚合到上层指标中, 如图 4 所示。

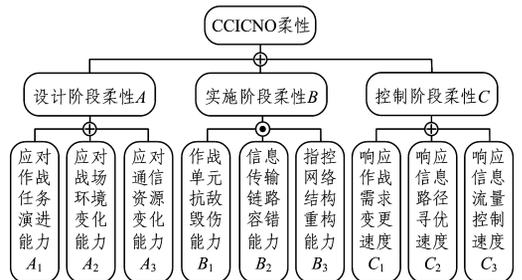


图 4 CCICNO 柔性指标的聚合方式

Fig. 4 Aggregation method of CCICNO flexibility indexes

4.3 柔性数值计算

由图4可知,设计阶段的柔性下层指标通过加权的方式聚合,设指标 $A_1 - A_3$ 的权重分别为 $\alpha_1 - \alpha_3$, 则:

$$F_a = \sum_{i=1}^3 \alpha_i A_i \quad (20)$$

实施阶段的柔性下层指标通过加权积方式聚合,设指标 $B_1 - B_3$ 的权重分别为 $\beta_1 - \beta_3$, 则:

$$F_b = \prod_{i=1}^3 B_i^{\beta_i} \quad (21)$$

控制阶段的柔性下层指标通过加权的方式聚合,设指标 $C_1 - C_3$ 的权重分别为 $\gamma_1 - \gamma_3$, 则:

$$F_c = \sum_{i=1}^3 \gamma_i C_i \quad (22)$$

将式(20) - 式(22)代入式(19),得到 CCICNO 柔性 F 为:

$$F = \xi_a \sum_{i=1}^3 \alpha_i A_i + \xi_b \prod_{i=1}^3 B_i^{\beta_i} + \xi_c \sum_{i=1}^3 \gamma_i C_i \quad (23)$$

4.4 柔性程度判定

设柔性程度为“优”“良”“中”“差”4个层次,对应数值区间 $[1, \theta_1], (\theta_1, \theta_2], (\theta_2, \theta_3], (\theta_3, 0]$, 满足 $0 \leq \theta_3 < \theta_2 < \theta_1 \leq 1$ 。运用定量与定性相结合的方法,得到各柔性要素指标数值,代入式(23),可计算 CCICNO 的柔性数值,将其与4个区间进行匹配,即可确定当前 CCICNO 的柔性程度。同时,在柔性度量过程中,根据各个要素指标数值情况,可以判定当前 CCICNO 的优势和不足,为反馈调整 CCICNO 结构和指控信息流转策略提供参考依据。

表2 初始化参数设置

Table 2 Initial parameter settings

参数	N	L	C_0	I_0	S_0	e_n	e_l	γ_e	γ_l	γ_n	ρ	ψ_i	δ_{ij}	I	MTBF	MTTR	ρ	ζ_a
数值	33	32	7	10	16	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	4	85	2	0.3	0.3
参数	ζ_b	ζ_c	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	γ_1	γ_2	γ_3	θ_1	θ_2	θ_3	η_n	η_l	$\omega(t)$	
数值	0.4	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.5	0.6	0.2	0.2	0.9	0.8	0.6	0.6	0.4	0.9	

各个参数具体的初始化数值如表2所列。出于对安全保密因素的考虑,以上参数设置均不反映部队的真实情况。

面对蓝方战机来袭的空情信息,红方的区域联合防空作战任务 T 可分解为“ T_1 目标发现”“ T_2 空情获取”“ T_3 指挥控制”“ T_4 实施抗击”等4个子任务,具体任务清单如表3所列,每个子任务对应的网络结构图 $G_1^T - G_4^T$ 如图6所示。

表3 区域防空作战任务清单

Table 3 Operational task list of RJADO

作战任务	子任务	参与节点
T_1 目标发现	T_{11} 警戒雷达发现	$N_5^C - N_7^C / N_1^I - N_8^I$
	T_{12} 前方哨位发现	$N_6^C / N_9^I - N_{10}^I$
T_2 空情获取	T_{21} 有线方式传输	$N_1^C / N_5^C - N_7^C / N_1^I - N_8^I$
	T_{22} 无线方式传输	$N_1^C / N_6^C / N_9^I - N_{10}^I$
T_3 指挥控制	T_{31} 威胁程度评估	$N_1^C / N_5^C - N_7^C$
	T_{32} 作战目标决策	N_1^C
	T_{33} 作战方案拟制	N_1^C
T_4 实施抗击	T_{41} 部队应急准备	$N_1^C - N_4^C / N_1^S - N_{16}^S$
	T_{42} 地空导弹打击	$N_1^C - N_3^C / N_1^S - N_8^S$
	T_{43} 空中反击作战	$N_1^C / N_4^C / N_9^S - N_{15}^S$

5 案例分析

以信息化条件下的区域联合防空作战 (Regional Joint Air Defense Operations, RJADO) 为背景,进行案例分析与模型验证。

5.1 案例设计

假设红方在某地域内分布有1个区域指控中心 (N_1^C)、2个地导指控中心 (N_5^C, N_6^C)、8个地导火力节点 ($N_2^S - N_8^S$)、1个空中指控中心 (N_4^C)、8个空中火力节点 ($N_9^S - N_{16}^S$)、3个情报处理中心 ($N_3^C - N_7^C$)、8个雷达情报节点 ($N_1^I - N_8^I$)、2个无人侦察节点 (N_9^I, N_{10}^I), 各作战节点之间的信息传输链路由具体的作战任务和战场环境确定。红方拟利用上述力量,有效抗击蓝方4架战机对该地域的空中突袭威胁。初始的 RJADO-CCIC 结构图即各节点的属性、编号如图5所示。

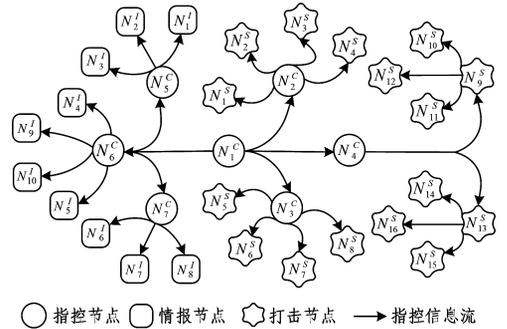
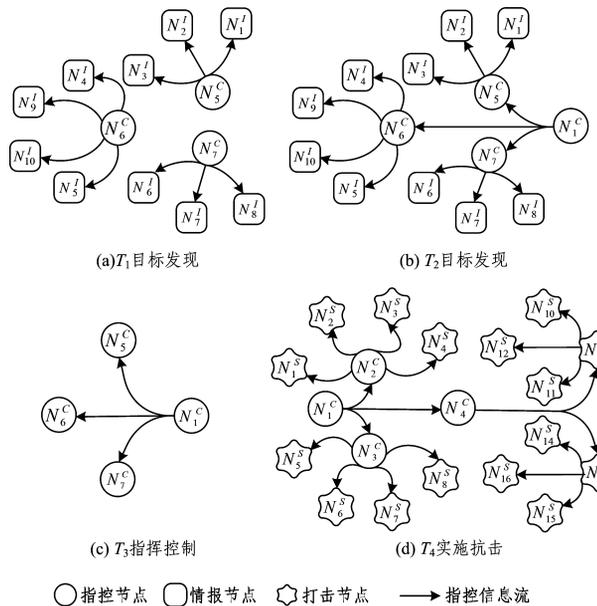


图5 RJADO-CCIC 初始化结构

Fig. 5 Initial structure of RJADO-CCIC



5.2 指标数值计算

5.2.1 设计阶段

根据式(1)和式(2),结合图 5 和图 6,计算得到 $A_1^T = 0.78, A_2^T = 0.86, A_3^T = 0.48, A_4^T = 0.92$,则应对作战任务演进

$$\text{能力 } A_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i^T}{4} = 0.76.$$

战场环境涉及的因素多且动态可变性强,难以用具体公式求解应对战场环境变化能力 A_2 。由于作战区域位于红方范围内,红方对战场环境较为熟悉,节点、信息传输链路的环境适应能力较强。通过专家打分方式,确定 $E_n = 0.93, E_l = 0.98$,从而计算出 $A_2 = 0.95$ 。

蓝方在实施空中突袭时,通常会进行电子干扰压制,影响红方电子设备的工作并干扰无线信息传输,红方需积极应对设备资源和线路资源的变化情况。由于通信资源类别复杂、数量较多,因此同样采用专家打分方式确定 $R_e = 0.8, R_l = 0.6, R_n = 0.9$,结合式(6),计算应对通信资源变化的能力 $A_3 = 0.77$ 。

5.2.2 实施阶段

红方的各个指控中心是蓝方优先攻击和破坏的关键节点,故 $N_k = 7$ 。结合表 2 和式(7),计算每个关键节点经过 1 次攻防对抗后的生存概率为 0.2。根据式(8),得到作战节点抗敌毁伤的能力 $B_1 = 0.79$ 。

信息传输链路的 $MTBF$ 和 $MTTR$ 为相关通信设备的最大值,执行作战任务的时间为整个联合防空作战的持续时间,设 $t = 24 \text{ h}$,结合表 2 和式(11),计算信息传输链路的容错能力 $B_2 = 0.76$ 。

以节点有效时的动态连通性概率计算为例,当 $k = 1$ 时, $C_{s,t(1)}^L = 32, C_{s,t(1)}^R = p^{L-1} (1-p)^1 = 1.38 \times 10^{-15}$,将 k 逐渐增加到 32,依次计算并累加得到 $\sum_{s=1}^{32} \sum_{t=1}^{32} P_{s,t}^L = 0.71$,同理计算 $\sum_{s=1}^{32} \sum_{t=1}^{32} P_{s,t}^N = 0.83$,代入式(14),得到指控网络结构重构能力 $A_3 = 0.78$ 。

5.2.3 控制阶段

设 RJADO 需求变更的时间间隔为 $|t - t_0| = 0.4$,代入式(16),可得响应作战需求变更速度 $C_1 = 0.75$ 。

以作战任务从 T_1 演化为 T_2 为例,设 $t_n = 0.05, t_l = 0.03, t^* = 0.01, |N_C'| - |N_C| = 1, |E_C'| - |E_C| = 3$,代入式(17),可得响应信息路径寻优速度 $C_2 = 0.86$ 。

在响应信息流量控制的过程中,设置 $m = 0.7, t_a = 0.01, t_b = 0.5$,代入式(18),可得响应信息流量控制速度 $C_3 = 0.85$ 。

5.3 柔性度量结果

根据各柔性指标计算结果和式(20)一式(23),可得设计阶段柔性 $F_a = 0.82$,实施阶段柔性 $F_b = 0.78$,控制阶段柔性 $F_c = 0.79$,总体柔性 $F = 0.80$ 。对比柔性数值区间,显然目前 RJADO-CCIC 柔性处于“良”的水平,能够较好地满足区域联合防空作战需要,但仍需采取有效措施进一步提升整体柔性。各个柔性度量指标与柔性数值区间的对照关系如图 7 所示。

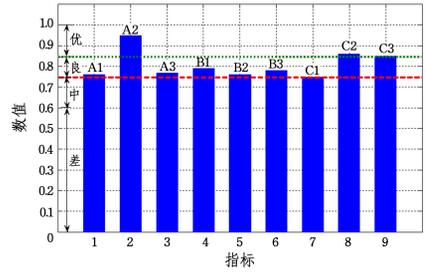


图 7 RJADO-CCIC 柔性指标数值对照情况

Fig. 7 Numerical comparison of RJADO-CCIC flexibility indexes

从图 7 可知,当前 9 个柔性指标数值的等级都在“良”(含)以上,其中 3 个指标达到“优”,分别为“应对战场环境变化能力 A_2 ”“响应信息路径寻优速度 C_2 ”和“响应信息流量控制速度 C_3 ”,这表明 RJADO-CCIC 各个指标的柔性总体较好,有力支撑了整体柔性状态。此外,“应对作战任务演进能力 A_1 ”“应对通信资源变化能力 A_3 ”“信息传输链路容错能力 B_2 ”和“响应作战需求变更速度 C_1 ”这 4 个指标的数值接近“良”等级下限,柔性数值偏低,可作为针对性地提升 RJADO-CCIC 柔性的着力点。

结束语 本文针对 CCICNO 柔性度量问题,结合柔性作用阶段,建立了柔性指标体系及度量模型,解决了以往柔性研究偏重理论分析、缺乏定量计算的问题,拓展了柔性度量的思路与方法。需要说明的是,本文未对柔性动态演化规律进行深入研究,所选指标仅是柔性度量的一个侧面。下一步,将更加全面地提炼柔性度量指标,剖析评估效果反映的关键不确定性影响因素,并针对性地调整作战节点构成、信息交互关系、信息流转策略等,使 CCICNO 柔性水平能够灵活应对动态变化的战场环境和作战需求。

参考文献

- [1] YANG Y H, LI J H, NAN M L, et al. Adaptive evolution modeling for networked operational information flowing strategy [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1513-1523. (in Chinese)
杨迎辉, 李建华, 南明莉, 等. 网络化作战信息流策略适应性演化建模[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1513-1523.
- [2] JIAO H, WU X D, WANG M. Research on flexibility and optimization of strategic delivery support chain [M]. Beijing: Military Science Press, 2013. (in Chinese)
焦红, 吴晓东, 王敏. 战略投送保障链柔性及优化研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2013.
- [3] ZHANG J Y, LAN Y S, YI K. Model and solving method for adaptive evolution of command and control relationship in C⁴ISR system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 39(7): 85-92. (in Chinese)
张杰勇, 蓝雨石, 易侃. C⁴ISR 系统指挥控制关系适应性演化模型和方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 39(7): 85-92.
- [4] CONNOLLY J, LAFLEUR J. Integrating flexibility into human space exploration architecture design decisions [C] // AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. California: Pasadena, 2012.

- [5] CUI Q, LI J H. An assessment method on the resilience of networked command information system [J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2016, 30(4):18-24. (in Chinese)
崔琼, 李建华. 网络化指挥信息系统弹性度量方法[J]. *军事运筹与系统工程*, 2016, 30(4):18-24.
- [6] YU K K, CADEAUX J, SONG H. Flexibility and quality in logistics and relationships [J]. *Industrial Marketing Management*, 2017, 62(3):211-225.
- [7] PATTERSON M, PATE D, GERMAN B. Performance flexibility of a reconfigurable family of UAVs [C]//11th AIAA Aviation Technolog, Intrgration and Operations Conference. VA: Virginia Beach, 2011.
- [8] LIU G, LIAO S H, YU G J, et al. Simulation research of time-sensitive target striking information chain [J]. *Information & Communications*, 2016, 31(10):82-84. (in Chinese)
刘钢, 廖守化, 于功建, 等. 时敏目标打击作战信息链仿真研究[J]. *信息通信*, 2016, 31(10):82-84.
- [9] IDRIS H R, SHEN N, EI-Wakil T. Analysis of trajectory flexibility preservation impact on traffic complexity [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Illinois: Chicago, 2009.
- [10] ZHU G, TAN X S, WANG H, et al. Command and control model based on complex information relation integration [J]. *Complex system and Complexity Science*, 2015, 14(1):57-65. (in Chinese)
朱刚, 谭贤四, 王红, 等. 复杂信息关系集成的指挥控制模型[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 14(1):57-65.

(上接第 275 页)

来检测图像显著区域的方法。与以往使用马尔可夫模型进行显著性检测的方法不同, 本文结合了背景先验线索和前景先验线索。传统的重要物体的检测方法往往只利用图像的背景先验线索, 而忽略了前景先验线索的有效使用, 这通常导致目标出现在边界附近时得不到有效检测。基于此, 本文使用被包围状态来检测重要物体的近似区域, 从而获得先验线索的前景。另外, 本文利用先验线索获取的前景区域, 将距物体的近似区域最远的两条边作为背景, 与任意选择两条边作为背景的方法相比, 本文选择的背景更加准确, 检测结果更加有效和精确。

参 考 文 献

- [1] BORJI A, CHENG M M, JIANG H Z, et al. Salient Object Detection: A Benchmark [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12):5706-5722.
- [2] XIE Y L, LU H C, YANG M S. Bayesian saliency via low and mid level cues [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(5):1689-1698.
- [3] SUN J G, LU H C, LIU X P. Saliency Region Detection Based on Markov Absorption Probabilities [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(5):1639-1649.
- [4] TONG N, LU H C, ZHANG Y, et al. Salient object detection via global and local cues [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(10):3258-3267.
- [5] ALEXE B, DESELAERS T, FERRARI V. What is an object? [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA, 2010:73-80.
- [6] LI G B, YU Y Z. Visual Saliency Detection Based on Multiscale Deep CNN Features [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11):5012-5024.
- [7] LU H C, TONG N, ZHANG X N, et al. Co-bootstrapping Saliency [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11):5012-5024.
- [8] FU K R, GU H, YANG J. Saliency Detection by Fully Learning a Continuous Conditional Random Field [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(7):1531-1544.
- [9] LU H C, LI X H, ZHANG L H, et al. Dense and Sparse Reconstruction Error Based Saliency Descriptor [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(4):1592-1603.
- [10] YANG C, ZHANG L H, LU H C, et al. Saliency Detection via Graph-Based Manifold Ranking [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, Oregon, 2013:3166-3173.
- [11] ZHANG J M, SCLAROFF S. Exploiting Surroundedness for Saliency Detection: A Boolean Map Approach [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(5):889-902.
- [12] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11):2274-2282.
- [13] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6):1397-1409.
- [14] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. 1998:839-846.
- [15] SHI J P, YAN Q, XU L, et al. Hierarchical image saliency detection on Extended CSSD [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(4):717-729.
- [16] ACHANTA R, HEMAMI S S, ESTRADA F J, et al. Frequency-tuned salient region detection [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida, USA, 2009:1597-1604.
- [17] TONG N, LU H C, ZHANG L H, et al. Saliency detection with multi-scale superpixels [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(9):1035-1039.
- [18] YAN Q, XU L, SHI J P, et al. Hierarchical Saliency Detection [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, Oregon, 2013:1155-1162.
- [19] ZHU W J, LIANG S, WEI Y C, et al. Saliency Optimization from Robust Background Detection [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA, 2014:2814-2821.