

基于复杂适应理论的电子信息系统模型构建

朱诗兵^{1,2} 陈刚² 任昊利³ 谢科范¹

(武汉理工大学管理学院¹, 武汉 430073; 装备指挥技术学院训练部², 北京 101416; 装备指挥技术学院信息装备系³, 北京 101416)

摘要 以复杂适应系统(CAS)理论为基础建立了电子信息系统模型。研究了体系的层次结构,分两层描述体系并对每一层包含的 Agent 进行了界定,最后对体系内部各个系统的运行原理进行了研究并给出了关键算法。

关键词 电子信息系统 复杂适应系统 建模

中图法分类号 TP391.9; **文献标志码** A

电子信息系统既是预警探测、情报侦察、指挥控制、通信、火力打击、综合保障等作战要素一体化的“粘合剂”,也是军队整体作战能力提高的“倍增器”,同时又是军队信息化建设的核心,其质量直接影响作战体系的一体化水平,其效能高低直接影响着武器装备综合集成建设的成败。电子信息系统能为作战要素、作战体系的综合集成奠定良好的基础,能实现武器系统及不同武器系统之间的高度融合与无缝链接,从而达到互连互动,整体调控的目的。

电子信息系统建模是对具体的武器电子信息系统及其作战行动的描述。电子信息系统属于复杂系统,具有高维数、层次多、涉及的单元和环节众多、关联度大、不确定性和多样性普遍存在、多目标性的特点,所以很难用单一的准确的数学模型来描述。基于能力的体系结构视图将体系结构与能力分析结合起来,从而更有效地为武器装备顶层设计提供规范、系统的方法论指导,为系统需求分析、装备方案评价等方面提供了有效方法。

现主要研究基于能力的电子信息系统的建模方法。根据复杂适应系统(CAS, complex adaptive system)理论“简单的系统元素以及这些元素之间简

单的、局部的交互作用会产生复杂的系统整体行为”的基本思想,应用基于多 Agent 的建模仿真方法,对电子信息系统进行建模。建立的模型是以不同层次的、具有适应性的 Agent 为基本单位,通过描述同一层次间 Agent 的行为和相互关系,以及不同层次 Agent 间的信息传递和作用机制,建立用于分析电子信息系统问题的 CAS 模型。

1 基于 Multi-Agent 技术的复杂系统建模

利用 Multi-Agent 技术进行建模与仿真是一种描述复杂现象、研究复杂系统、实现复杂自适应计算的有效手段,其建模方法能有效地满足分布式仿真系统对模型智能性的需求。基于 Multi-Agent 的建模仿真方法的特点是:从组成系统的基本元素着手,通过对系统局部细节的描述,自底向上地建立系统模型。Multi-Agent 技术非常适于建立非线性和复杂系统模型。通过使用 Multi-Agent,对非线性系统的组件实体利用 Agent 进行建模,而它们之间的交互关系可用 Agent 的交互来建模。每个 Agent 的行为成为微观行为,各种 Agent 的行为和属性,模拟组成系统的个体及个体间的相互作用关系。通过个体属性和行为与整体属性和行为间的反馈和校正,来研究系统的动力学特性。该方法不考虑系统的整体运动形式和规律,而把仿真目标定在行为一级,按观测数据建立系统同态模型,研究系统的行

2009年8月17日收到

第一作者简介:朱诗兵,武汉理工大学博士研究生,研究方向:系统集成,装备体系研究。

为趋向,这样可以克服复杂系统研究理论基础尚未成熟,通过系统分析产生的数学模型可信度低,很难以数学形式定义及定量分析等复杂系统建模仿真难点,是研究复杂系统的有力工具。

2 基于 CAS 的电子信息系统模型

以信息获取系统、信息传输系统、指挥控制系统和执行系统为适应性主体对电子信息系统模型进行建模。首先确定电子信息系统各层所包含的 Agent,然后对体系的层次结构和 Agent 之间的相互关系进行描述。

2.1 模型的基本简化原则

电子信息系统是复杂大系统,它的运行过程十分复杂,对于体系能力的优化配置,从理论上讲,应该将全部元素纳入模型进行分析、评估,但是这样会使得模型和求解的复杂性急剧增加。考虑模型建立和求解的实际需求,对模型的简化本着以下原则:

(1) 在空间范围内,以一次完整的对抗行动为研究对象进行模型的建立和 Agent 的概念化;

(2) 只考虑与电子信息系统对抗行动紧密相关的 Agent 的行为和适应性表现;

(3) 对于一些较为复杂的、描述较为困难的行为进行一定的简化;

(4) 每个 Agent 都具有一定的行为和各自的适应性表现;

(5) Agent 之间主要通过信息流和指挥控制关系形成网络或系统;

(6) 不考虑经济效益问题。

Agent 的能力指标以它能够完成任务的程度为依据,采取定性与定量相结合的方法给出。

2.2 模型的建立

基于 CAS 理论构建的电子信息系统模型如图 1 所示。模型分两层对电子信息系统进行描述。上一层代表概念化的电子信息装备体系,称为系统层 Agent,它主要由四个大系统组成:信息获取系统(包括传感器 Agent)、信息传输系统(包括信息传输 Agent 和信息处理 Agent)、指挥控制系统(包括信息处理 Agent 和指挥控制 Agent)和执行系统(包括攻

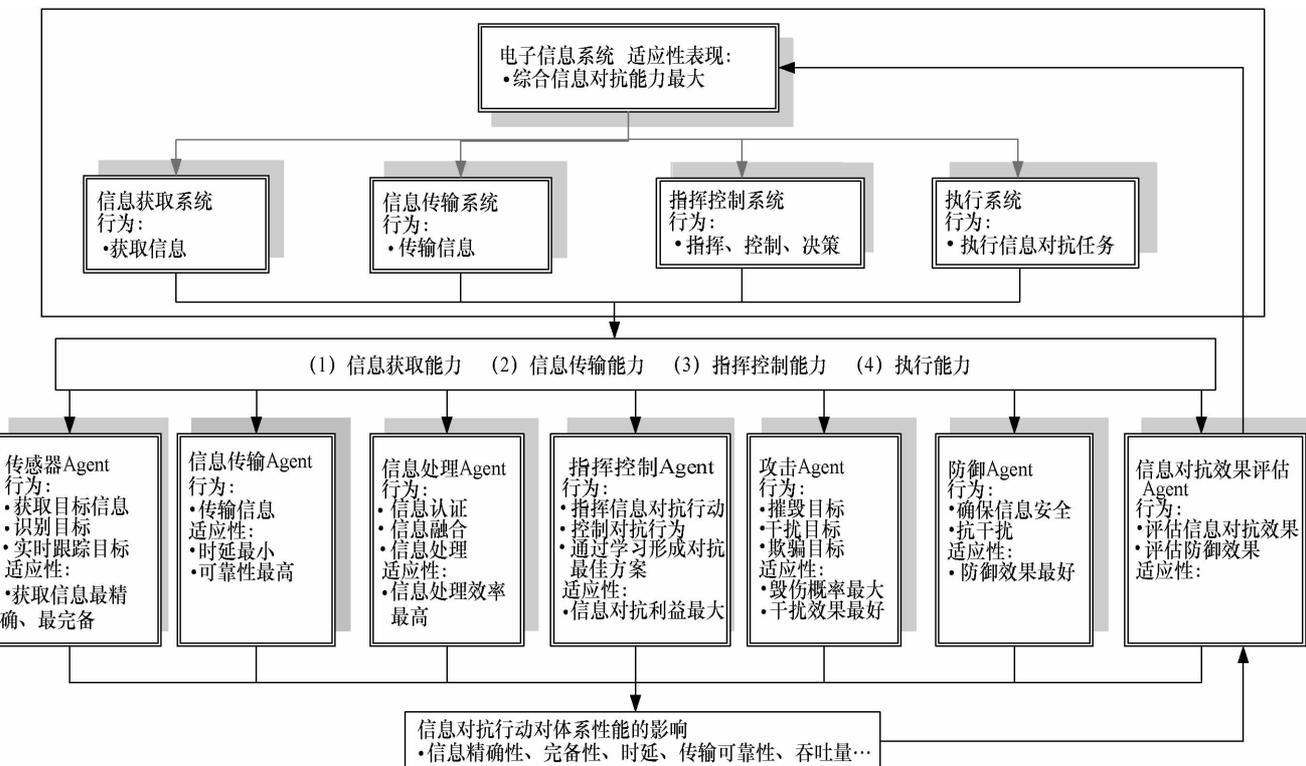


图 1 电子信息系统模型

击 Agent、防御 Agent 和信息对抗效果评估 Agent), 其行为是获取信息、传输信息、指挥控制和使用信息。因此, 从宏观上可以提取的系统层能力指标有: 信息获取能力、信息传输能力、指挥控制能力和执行打击能力, 这些能力值是评估系统层能力的指标, 它们对底层 Agent 的行为具有调控作用。下一层代表具体装备及使用装备的人所共同组成的 Agent, 称为节点层, 包括传感器 Agent、信息传输 Agent、信息处理 Agent、指挥控制 Agent、攻击 Agent、防御 Agent、信息对抗效果评估 Agent, 这个层次的 Agent 具有各自的行为和优化目标, 同时其行为还具有学习性, Agent 的驱动方程和约束方程将在下一节具体给出。

3 模型结构与关键算法描述

高层系统对低层 Agent 具有宏观调控作用, 同时低层 Agent 行为又涌现出高层系统的属性; 高层和低层之间及低层的 Agent 之间的联系用函数描述, 实现信息的交互。下面对各层 Agent 在 CAS 中的适应性行为进行描述。

3.1 信息获取系统行为描述^[1,2]

信息获取系统获取、采集战场信息形成战场感知态势, 这些感知态势会通过信息传输系统传递给指挥控制系统。因此, 可以用战场态势感知的质量来衡量信息对抗中信息获取系统的能力。战场态势感知质量就是战场感知到的态势和客观态势的吻合程度, 这种吻合程度可用信息的完备性和信息的精确性来度量^[3]。

3.1.1 信息完备性

完备性是感知态势中敌方目标的相关信息与客观态势中敌方目标的实际情况相吻合的程度, 目标的相关信息包括目标的种类和数量。由于态势感知是随着时间变化的, 因此完备性指标是时间的函数。完备性指标包括类型的完备性和数量的完备性, 用 $C(t)$ 表示类型的完备性, 用 $N(t)$ 表示数量的完备性。那么, t 时刻战场感知态势的完备性 $F(t)$ 可用式(1)表示。

$$F(t) = C(t)N(t) \quad (1)$$

式(1)中

$$C(t) = \frac{\alpha(t)}{\beta(t)} \quad (2)$$

式(2)中 $\alpha(t)$ 为 t 时刻感知态势中己方正确发现敌方目标种类数; $\beta(t)$ 为 t 时刻客观态势中实际的敌方目标种类数。

$$N(t) = \frac{\phi(t)}{\psi(t)} \quad (3)$$

式(3)中 $\phi(t)$ 为 t 时刻感知态势中已发现敌方目标数量; $\psi(t)$ 为 t 时刻客观态势中实际敌方目标数量。

从上面的数学表达式中不难看出, 式中的 $F(t)$ 、 $C(t)$ 、 $N(t)$ 均不大于 1。

3.1.2 信息精确性

精确性指的是传感器在感知态势中所捕获的目标特征与客观态势中真实目标特性相吻合的程度。可以用目标的特征向量来描述战场态势, 假设 $G_i(t)$ 、 $P_i(t)$ 分别表示第 i 个目标 t 时刻在客观态势和感知态势中的特征向量, 那么 $G_i(t)$ 和 $P_i(t)$ 可以分别表示为

$$G_i(t) = [g_{i1}(t), \dots, g_{in}(t)] \quad (4)$$

$$P_i(t) = [p_{i1}(t), \dots, p_{in}(t)] \quad (5)$$

其中, 特征向量中的元素为第 i 个目标的位置、速度、方位等特征, n 为第 i 个目标特征参数的个数。感知态势中第 i 个目标 t 时刻与客观态势中对应目标的偏离程度 $V_i(t)$ 定义为

$$V_i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{|p_{ij}(t) - g_{ij}(t)|}{g_{ij}(t)} \quad (6)$$

考虑到目标各个特征之间的相对重要性, 引入权重因子 ω_j ($0 < \omega_j < 1$) 来反映目标特征对性能指标的影响。于是, 式(6)改写为:

$$V_i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{|p_{ij}(t) - g_{ij}(t)| \omega_j}{g_{ij}(t)} \quad (7)$$

定义 $(1 - V_i(t))$ 为传感器对第 i 个目标在时刻 t 感知的精确性。假设时刻 t 感知态势中已正确发现了 N 个敌方目标, 那么 t 时刻感知态势的精确性 $V(t)$ 可定义为

$$V(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (1 - V_i(t))}{N} \quad (8)$$

感知态势的完备性和精确性指标能够从信息质量的角度动态反映作战行动中电子信息系统信息获取能力。因此,可以用这两个指标来衡量信息获取能力的动态变化,用 $I(t)$ 表示信息获取系统的能力指标,这里 $I(t)$ 是时间的函数,那么 $I(t)$ 可以由下式表示:

$$I(t) = w_1 F(t) w_2 V(t) \quad (9)$$

式(4)中, w_1, w_2 是权重,以下 w_i 都表示权重。

3.2 信息传输系统行为描述

信息传输系统一般包括信息传输 Agent 和信息处理 Agent 两部分。

信息传输系统是电子信息系统重要的组成部分,它承担着整个体系的信息传输任务,信息传输系统的任何一个部分出现问题都会给整个体系造成信息流通的不畅通甚至会导致体系的崩溃。因此,一个鲁棒性好的信息传输系统要有多种信息传输的手段。信息传输系统的能力指标可以用传输时效性 $T(t)$ 和可靠性 $P_i(N)$ 来表示。

3.2.1 传输时效性

时效性是个相对的概念,可以用信息从信源到信宿的时间表示。一般来讲,时间越短时效性就越好,说明战场态势感知信息更新的周期越短。信息在传输过程中传输的手段不同或者途经的节点处理信息的速度不同会导致信息在不同的路径上传递的时间有差异。用 $t(i)$ 表示信息经过 i 节点所用的时间; $\tau(j)$ 表示信息流过第 j 条路径信息处理所用的时延。信息的时效性可以用下式表示

$$T(t) = \max_{i=1,2,\dots,N} t(i) + \tau(j) \quad (10)$$

式(10)中 N 表示并列的节点数量。

3.2.2 传输可靠性

设第 i 个 Agent 为 U_i , 其在时刻 t 完成任务的概率是 $P_i(U_i)$, 再设系统有 n 个传输环节, 则各种信息在电子信息系统中可靠传输的概率为

$$P_t(n) = \prod_{i=1}^n P_i(U_i) \quad (11)$$

信息传输系统的能力可以用时效性和可靠性表示,用 $K(t)$ 代表信息的传输能力,用 $T(t)$ 表示时效性,用 $P_t(n)$ 表示可靠性,则信息传输系统的能

力为:

$$K(t) = w_3 T(t) w_4 P_t(n) \quad (12)$$

3.3 指挥控制系统行为描述^[4]

通过研究传统指挥流程 OODA 环(观察(Observe)、判断(Orient)、决策(Decide)和行动(Act))可知,电子信息系统决策过程中的信息流程是一个闭环系统,大致可以分为四个阶段:首先指挥员从信息获取系统那里获得战场态势信息,对战场信息进行评价;然后指挥员根据得到的战场态势信息进行决策分析/学习形成指挥命令;执行系统接到命令后执行命令、采取作战行动;最后,命令和决策的执行情况被信息获取系统获取,形成客观态势,反馈到指挥控制中心。在这个决策环中可以提取以下三个影响决策质量的指标^[5,6]。

3.3.1 决策周期

决策周期由四个时间构成:战场感知态势时间 T_1 , 指挥员根据战场态势信息形成决策的时间 T_2 , 指挥命令传输到执行系统的时间 T_3 , 执行系统把信息对抗情况反馈给指挥员的时间 T_4 , 假设决策周期为 T_D , 则

$$T_D = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (13)$$

3.3.2 认知一致性

认知一致性是指指挥员从战场态势综合信息中得到的感知态势与客观态势的一致性。由此,认知一致性可以用指挥员得到的态势感知信息中正确的信息量与客观态势中所有的信息量的百分比来度量。用 $M(t)$ 表示在 t 时刻指挥员正确认知的信息量; $N(t)$ 表示 t 时刻客观态势中所有的信息量; 则认知一致性 $Z(t)$ 为

$$Z(t) = \frac{M(t)}{N(t)} \quad (14)$$

3.3.3 决策可靠性^[7]

指挥员在选择作战方案或者制定决策时,要对决策的正确性进行预判,也就是说指挥员要对信息对抗过程中己方装备可能的损失进行预判,所以可以认为,决策的可靠性可以用指挥员对己方部队损失预判的可靠性来度量,这种预判的可靠性就是指指挥员预判的己方装备或兵力损失占实际损失的百分比;反之,如果预判损失大于实际损失,就是实

际损失占预判损失的百分比。假设 $P(t)$ 代表 t 时刻预判损失; $Q(t)$ 代表 t 时刻实际损失, 则 t 时刻决策可靠性 $R(t)$ 为:

$$R(t) = \frac{\min(P(t), Q(t))}{\max(P(t), Q(t))} \quad (15)$$

从对以上三个性能指标的分析中可以看出, 指挥控制系统完成任务情况由态势认知一致性 $C(t)$ 和决策可靠性 $R(t)$ 共同决定, 战场指挥员只有获得较为精确的战场态势并选择一系列可靠的方案, 才能形成质量较高的决策; 同时, 用指挥控制系统对战场态势的反应时间(决策周期 T_D) 衡量它的效率。认知一致性、决策可靠性和决策周期共同构成指挥控制系统的性能指标。用 $D(t)$ 表示指挥控制系统能力, 则:

$$D(t) = \frac{w_5 Z(t) w_6 R(t)}{w_7 T_D} \quad (16)$$

3.4 执行系统行为描述

执行系统包括信息攻击 Agent 和信息防御 Agent, 信息攻击 Agent 主要完成对敌方信息装备的摧毁、干扰和欺骗; 信息防御 Agent 主要完成防御来自敌方的信息攻击, 包括硬毁伤、干扰和欺骗。执行系统在对敌攻击的同时, 对敌方的进攻行动采取相应的对策进行防御。随着信息战和信息技术的不断发展, 信息对抗领域的手段也在不断创新, 总结起来主要包括以下三种方法: 硬摧毁、信息干扰和信息欺骗。可用毁伤概率、干扰效果和欺骗效果三个定量指标来描述执行系统的性能。

3.4.1 毁伤概率

毁伤概率是武器系统的重要性能指标, 它可以全面地反映武器系统的射击效力, 是一个综合性射击效力指标, 也是最常用的射击效力指标^[8]。现在假设我方武器系统对敌方武器系统毁伤概率为 $P(t)$, 我方发现敌方目标的概率为 $P_\omega(t)$; 在敌电子干扰情况下, 第 i 型武器命中目标的概率为 $P_i(t)$; 第 i 型武器的射击精度为 ω_i , 则武器系统毁伤概率为:

$$P(t) = P_\omega(t) \left(1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{P_i(t)}{\omega_i} \right) \right) \quad (17)$$

式(7)中 n 为攻击武器的个数; $P_\omega(t)$ 由信息获取系统确定^[9]。

3.4.2 干扰效果

目前评估干扰效果的准则比较多, 有信息准则、功率准则还有概率准则等。这里采用信息准则, 其公式如下

$$H(J) = - \sum_{i=1}^n P_i(t) \lg P_i(t) \quad (18)$$

式(18)中, $P_i(t)$ 为干扰信号 $J_i(t)$ 的出现概率。

如果干扰信息是连续分布的, 那么, 它的熵可用概率密度分布 $p(x)$ 表示

$$H(J) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \lg p(x) dx \quad (19)$$

信息准则是从信号本身在时域上的波形特征来衡量其品质的, 从上面的公式可以看出, 信息准则实际上是看信号出现的平均概率。信息熵是描述信息是否有规律的量, 信息熵越大说明信息越不确定, 反之信息熵越小信息越确定。因此, 从对抗的角度来看对于进攻一方这里的熵越大越好, 说明干扰信号不确定, 对方难以监测。

3.4.3 欺骗效果

欺骗效果的评估准则与干扰效果评估准则相似, 也是利用信息熵来描述。其数学表达式如下

$$H(I) = - \sum_{j=1}^n P_j(t) \lg P_j(t) \quad (20)$$

式(20)中, $P_j(t)$ 为欺骗信号 $I_j(t)$ 的出现概率。

如果欺骗信息是连续分布的, 那么, 它的熵可用概率密度分布 $p(x)$ 表示

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \lg p(x) dx \quad (21)$$

至此, 可以得到执行系统在信息对抗过程中对抗效果的能力指标, 设执行系统信息对抗能力为 $A(t)$, 则有:

$$A(t) = w_8 P(t) w_9 H(J) w_{10} H(I) \quad (22)$$

在执行系统进行进攻时会遭遇到敌方的反抗, 也会对我方的电子信息装备各个系统进行攻击, 我方采取相应的防御策略进行对抗。敌方对抗行动信息又可以通过信息获取系统传递给指挥控制系统, 总之, 信息对抗体系是一个此消彼长, 循环往复的复杂过程。

4 结论

本文以复杂适应系统理论为基础建立了电子信息系统模型,该模型分两层描述体系并对每一层包含的 Agent 进行了界定,并对体系内部各个系统的运行原理进行了研究并给出了关键算法。对于电子信息系统来讲,最终的优化目标不是单一的,也就是说,电子信息系统的建模是一个多目标问题的描述,主要包括信息完备性目标、信息精确性目标、信息对抗能力目标和信息实时传递能力目标。多目标问题不存在唯一的最优解,只可以找到问题的非劣解集,而最终的方案选择可以根据实际作战需求综合各方面利弊进行选取。

参 考 文 献

1 Darilek R, Perry W, Bracken J, *et al.* Measures of effectiveness for the

- information age army. RAND MR-1155-1, 2000
- 2 Major K S B, Tompson J R. C4ISR modeling and simulation, simulation. Interoperability Workshop (SIW), 1998;(9):189—195
- 3 江 汉,尹 洁,李学军,等. C4ISR 体系对抗仿真中的信息优势度量. 系统工程与电子技术,2006;(28):88—90
- 4 柯加山,刘 毅. C4ISR 系统信息的军事价值评估. 军事运筹与系统工程,2004;(1):51—55
- 5 Alberts D S, Garstka J J, Hayes R E, *et al.* Understanding information age warfare. CCRP Public Series, 2001(8)
- 6 张连庆,蔡亚军. 面向信息对抗的 C4ISR 系统作战效能评估指标研究. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005;(27):43—52
- 7 戴剑伟. 建模与仿真的信息优势评估中的应用研究. 通信指挥学院博士论文,2002
- 8 程江涛,王超勇,王锡仁. 统计模拟法在目标毁伤概率研究中的应用. 飞航导弹,2001;(1):32—46
- 9 徐浩军,华玉光,唐铁军. 基于复杂系统分析的航空装备体系对抗效能评估方法研究[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>

Modeling of Weapon Equipment Electronic Information System Based on Complex Adaptive System Theory

ZHU Shi-bing^{1,2}, CHEN Gang², REN Hao-li³, XIE Ke-fan¹

(School of Management, Wuhan University of Technology¹, Wuhan 430073, P. R. China;

Department of Training, the Academy of Equipment Command & Technology², Beijing 101416, P. R. China

Department of Information and Equipment, the Academy of Equipment Command & Technology³, Beijing 101416, P. R. China)

[Abstract] Based on the complex adaptive system theory, the electronic information system model is designed, and the system structure is analyzed, the whole systems are divided into two layers and the corresponding Agents are defined in each layer, at last, the running principles of the system are researched and the key algorithms are given.

[Key words] electronic information system complex adaptive system modeling