

1-20-2024

## Modeling and Analysing of Complex Combat Systems Based on Symbiosis Theory

Xiangrui Tian

*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China, xiangruitian@nuaa.edu.cn*

Jie Ying

*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China*

Rui Yao

*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China*

Xiaodong Wan

*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Modeling and Analysing of Complex Combat Systems Based on Symbiosis Theory

## Abstract

**Abstract:** As the combat systems develop towards clustering, coordination, unmanned, and intelligent direction, traditional combat system modeling methods are unable to reflect the complexity and intelligence of the combat systems. By drawing on symbiosis theory, this paper models and analyzes complex combat systems, and decomposes the complex combat system into various subsystems according to combat missions. The combat units, interaction modes, and combat environments in the subsystems are analyzed. The paper builds mathematical models to capture the collaborative interaction relationships between combat units, finally constructing a symbiotic model of complex combat systems. By the symbiosis principles and methods, quantitative analysis of collaborative effectiveness, stability, balance, and evolution direction of complex combat systems can be achieved. A modeling and analysis framework for complex combat systems based on the symbiosis theory is constructed, which provides a new theory and method for modeling and analysis of complex combat systems.

## Keywords

symbiosis theory, complex system, combat systems, coordination, modeling

## Recommended Citation

Tian Xiangrui, Yin Jie, Yao Rui, et al. Modeling and Analysing of Complex Combat Systems Based on Symbiosis Theory[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 203-219.

# 基于共生理论的复杂作战系统建模与分析

田祥瑞, 尹婕, 姚睿, 万晓冬

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 随着作战系统不断向集群化、协同化、无人化和智能化方向发展, 传统的作战系统建模方法无法体现作战系统的复杂性与智能性。借鉴生物共生理论对复杂作战系统进行建模与分析, 将复杂作战系统根据作战任务细化为各作战子系统, 分析子系统内的作战单元、交互模式和作战环境, 针对作战单元之间的协同交互关系建立数学模型, 最终建立复杂作战系统的共生模型; 利用共生原理与共生分析方法实现针对复杂作战系统协同效能、稳定性和均衡性以及演进方向的量化分析, 构建基于共生理论的复杂作战系统建模与分析框架, 为复杂作战系统的建模与分析提供一种新的理论和方法。

**关键词:** 共生理论; 复杂系统; 作战系统; 协同; 建模

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0203-17

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0551

**引用格式:** 田祥瑞, 尹婕, 姚睿, 等. 基于共生理论的复杂作战系统建模与分析[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 203-219.

**Reference format:** Tian Xiangrui, Yin Jie, Yao Rui, et al. Modeling and Analysing of Complex Combat Systems Based on Symbiosis Theory[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 203-219.

## Modeling and Analysing of Complex Combat Systems Based on Symbiosis Theory

Tian Xiangrui, Yin Jie, Yao Rui, Wan Xiaodong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** As the combat systems develop towards clustering, coordination, unmanned, and intelligent direction, traditional combat system modeling methods are unable to reflect the complexity and intelligence of the combat systems. By drawing on symbiosis theory, this paper models and analyzes complex combat systems, and decomposes the complex combat system into various subsystems according to combat missions. The combat units, interaction modes, and combat environments in the subsystems are analyzed. The paper builds mathematical models to capture the collaborative interaction relationships between combat units, finally constructing a symbiotic model of complex combat systems. By the symbiosis principles and methods, quantitative analysis of collaborative effectiveness, stability, balance, and evolution direction of complex combat systems can be achieved. A modeling and analysis framework for complex combat systems based on the symbiosis theory is constructed, which provides a new theory and method for modeling and analysis of complex combat systems.

**Keywords:** symbiosis theory; complex system; combat systems; coordination; modeling

收稿日期: 2023-05-10

修回日期: 2023-10-09

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20210298); 南京航空航天大学科研与实践创新计划(xcxjh20220340)

第一作者: 田祥瑞(1986-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为多无人系统协同与智能感知。E-mail: xiangrui@nuaa.edu.cn

## 0 引言

信息化条件下,作战系统呈现集群化、协同化、无人化、智能化等特点<sup>[1-3]</sup>,是一种典型的复杂巨系统,不仅具有一般复杂系统的普遍特性<sup>[4-5]</sup>,还具有军事体系特有的背景<sup>[6]</sup>。从系统论的角度出发,作战系统的复杂性主要体现在:①适应性,作战单元数量种类众多,还具有智能性,系统的行为在一定条件下会出现自适应和自组织的复杂现象;②层次性,现代战争有海、陆、空、天、电等多维度作战空间,形成多功能、多层次的系统结构;③涌现性,作战系统中单元交互复杂,通过不同的作用关系形成不同的结构,会涌现出不同的性质;④开放性,作战系统是一个开放系统,与环境有着密切的联系,环境因素的变化具有偶然性,从而使得作战存在多种可能性;⑤演化复杂,作战系统演化具有动态性、偶然性、不可逆性、不确定性等特点。

传统的数学建模如解析、数值分析等方法,将作战过程认为是确定的过程,难以刻画体系的动态和不断演进的特性,运用复杂系统的理论方法对作战系统建模是有效的解决途径<sup>[7-8]</sup>。复杂系统理论和研究方法分为两条主线<sup>[9-10]</sup>:一条以“复杂性”科学为主线,包括耗散结构理论、协同学、复杂适应系统等<sup>[11-13]</sup>;另一条以系统科学为主线,以钱学森开创的“开放的复杂巨系统”研究为代表,提出了“从定性到定量的综合集成法”。虽然理论和分析方法层出不穷,但是由于系统本身的复杂性以及一些关键技术的局限性,使得一些研究成果和方法只停留于理论而得不到具体的实施,针对不同领域的复杂系统,也尚无通用的理论建模框架。

大量学者运用复杂系统理论研究作战体系结构<sup>[14-15]</sup>,如 DoDAF<sup>[16-17]</sup>体系结构框架,从系统工程的角度对整体作战体系进行顶层设计与分析。同时,国内外学者借鉴复杂系统理论针对作战系统提出了很多建模方法,如基于 Agent 建模<sup>[18-19]</sup>和协

同论<sup>[20]</sup>等。

机械化战争时代主要实现作战平台的机动和对目标的火力打击<sup>[21-22]</sup>,未来作战主体将由基于群体智能的人机混合集群和自主无人集群组成,作战指挥向自主智能发展,指挥决策人机协同,作战装备智能化程度加深,作战单元已呈现出一定的生物智能特性,传统的建模分析方法遇到重重困难<sup>[23-24]</sup>。因此,可以将每个作战单元视作一种智能“生物”,从生物学的角度对作战系统进行描述,能够充分展现作战系统的智能化与生物属性。不同类型生物体之间的协作被称为共生<sup>[25]</sup>,共生理论在经济<sup>[26-27]</sup>、交通<sup>[28]</sup>、教育<sup>[29]</sup>等领域已被广泛应用,体现了其处理复杂系统的优势,也具有应用到复杂作战系统分析的潜力。

作战仿真是现代军事领域研究与实践的重要途径<sup>[30]</sup>,是在多学科交叉基础上形成的技术体系<sup>[31-32]</sup>,可以实现对作战系统的验证、分析、优化等<sup>[33]</sup>,共生理论通过对作战系统协同交互进行分析、归纳和抽象,为作战仿真提供数学模型和分析方法,为作战仿真研究提供了一个新的研究角度。数字孪生是仿真领域的研究热点,能够实现虚实交互,可以基于物理实体的数据实现对共生模型进行验证与优化,但是需要大量的数据,对数据的完整性和正确性要求很高,并需要大量的计算资源,而且对传感器、导航等装备技术依赖较强<sup>[34-35]</sup>,因此,并不是所有的作战系统都能满足数字孪生的技术要求。针对无人化、智能化和集群化的作战趋势,目前对集群行为的建模仿真研究大多采用基于 Agent 的建模与仿真方法,主要集中在 Agent 的内在结构和行为规则上<sup>[36]</sup>,对集群协同交互的研究集中在协同控制、任务分配、航迹规划等,大多针对某一局部的具体任务算法进行技术验证<sup>[37]</sup>。基于共生理论的作战系统建模与仿真方法深入分析作战系统的交互条件、机制和规律,指出对称性互惠共生是进化的必然趋势,为作战系统的静态分析和动态演化提供新的研究方法。

目前, 共生理论和方法本身已较成熟, 但在不同领域, 共生现象的分析不尽相同, 具体的建模方法也有所不同。针对信息化、集群化、智能化的复杂作战系统, 如何将作战单元的智能性转化为“生物”特性进行分析, 如何利用共生理论建立不同层级的作战系统数学模型, 如何运用共生原理和方法对复杂作战系统进行优化与设计等, 是共生理论具体运用在复杂作战系统中所需解决的关键问题。需要对作战系统的单元和功能进行

深入剖析, 建立起针对复杂作战系统的共生建模理论与分析框架。

## 1 共生理论概述

### 1.1 共生模型

从一般意义上说, 共生是指共生单元之间在一定的共生环境中按某种共生模式形成的关系, 共生理论<sup>[38]</sup>对共生现象进行描述和分析, 并建立共生系统的建模框架, 如图 1 所示。

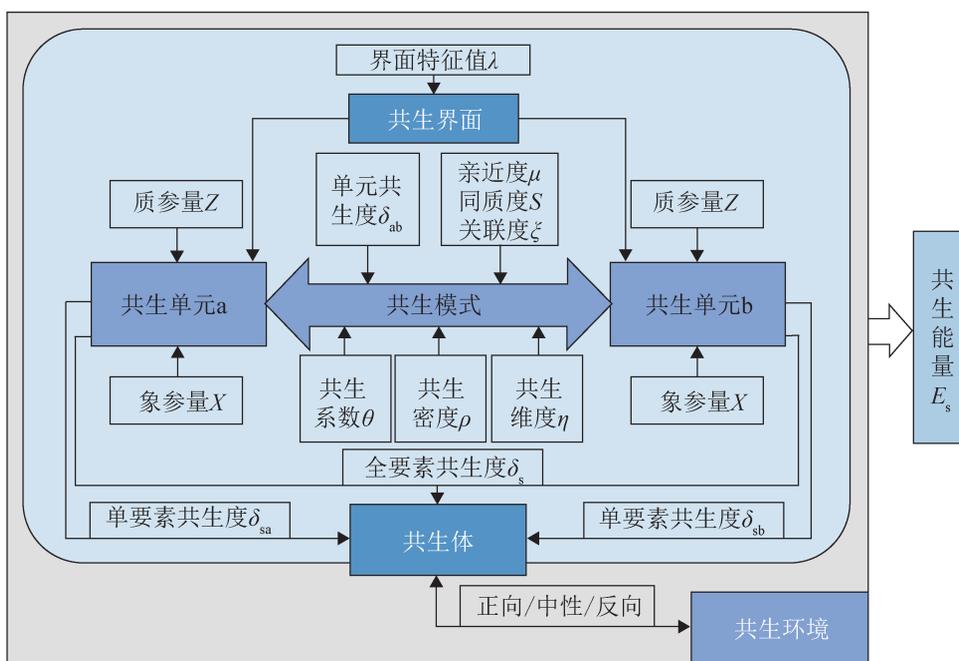


图 1 共生系统模型

Fig. 1 Model of symbiosis systems

共生理论以共生单元、共生模式和共生环境三要素描述共生关系。共生单元分别由质参量  $Z$  和象参量  $X$  对其内在性质和外部特征进行描述; 共生模式是指共生单元相互作用的方式或相结合的形式, 主要由共生度  $\delta$ 、亲近度  $\mu$ 、同质度  $S$ 、关联度  $\xi$ 、共生系数  $\theta$ 、共生密度  $\rho$  和共生维度  $\eta$  等参量对其进行量化; 共生环境是由共生单元以外的所有因素的总和构成, 共生体与共生环境之间的相互影响随着时空条件的变化而不断变化, 分别有正向、中性和反向影响。

共生界面是共生单元之间物质、信息和能量传导的媒介, 以界面特征值  $\lambda$  对交互界面的阻力

进行量化, 从而分析共生系统内交互、分工与合作的能力。共生能量  $E$  是共生过程中共生系统所新增的净能量, 用来描述共生单元、共生模式、共生环境相互作用的水平和效果, 以及共生系统的动态特征。

### 1.2 共生理论的基本原理

共生原理是指反映共生系统形成与发展中的一些内在的必然联系, 主要包括: 质参量兼容原理、共生能量生成原理、共生界面选择原理、共生系统相变原理、共生系统进化原理。如图 2 所示。

共生原理	关键概念	主要作用
质参量兼容原理	质参量可以相互表达, $Z_i=f(Z_j)$	1.共生条件识别 2.决定共生模式
共生能量生成原理	全要素共生度 $\delta>0$ 是共生能量生成的充要条件	1.共生系统识别 2.共生能量的最大化路径设计
共生界面选择原理	能量选择使用系数 $\beta=r/k$ , $r$ 选择是能量用于共生单元增值, $k$ 选择是能量用于共生单元质量改进	1.共生对象选择 2.共生能量使用选择
共生系统相变原理	$\alpha$ 相变引起共生类型变化, $\delta$ 相变引起共生模式变化, $\beta$ 相变属于混合相变	1.相变识别 2.进化与退化相变的调节控制
共生系统进化原理	对称性互惠共生是共生系统进化的一致方向	1.进化状态识别 2.促进共生进化的阶段和路径

图2 共生原理

Fig. 2 Principle of symbiosis

### 1.3 共生理论的分析方法

共生理论是通过剖析共生现象来发现和探索共生的客观规律,图3为共生分析的基本逻辑。先判断共生现象,再根据共生组织和行为模式判断共生系统类型,从共生能量生成、共生系统与环境关系、共生系统相变类型、共生系统进化方向和共生系统稳定性方面进行分析。

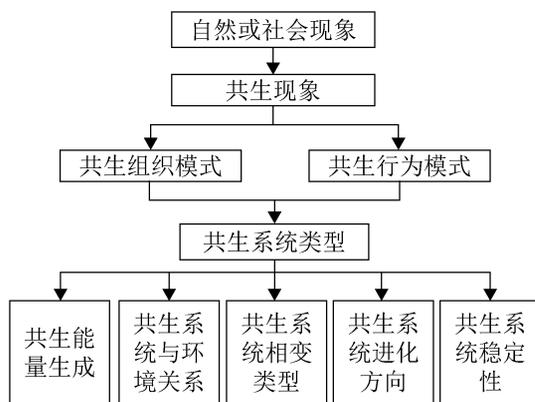


图3 共生分析的基本逻辑

Fig. 3 Basic logic of symbiotic analysis

共生分析方法主要包括共生度分析方法、共生界面分析方法和共生模式分析方法,如图4所示,分别从单元之间、单元和系统的交互程度、

交互界面能力、交互组织和行为模式方面进行分析。

### 1.4 共生理论与相关理论的对比分析

目前共生理论针对复杂系统的研究处于理论建模分析阶段,对自然现象进行抽象简化,构建数学模型。解析法是传统的建模方法,将作战过程认为是确定的过程,难以刻画体系的动态和不断演进的特性,无法反映作战系统复杂的、多级的、非线性的映射关系<sup>[39-40]</sup>。基于协同论的建模方法从宏观角度描述系统从无序状态发展到有序结构、或从一种有序结构转变为另一种有序结构的客观现象,为研究系统的动态行为提供了完整的数理描述,但无法深入描述其成序的动因,难以展现系统内部的复杂性,缺乏微观分析基础。

多智能体和共生理论较能全面描述复杂系统的复杂特性<sup>[41]</sup>,都是多层次的研究方法,从微观与宏观结合的角度探索系统之间、系统与环境之间、系统内要素之间的交互规律,也有对系统演化的研究。但在单元建模、交互建模、分析角度和量化标准等方面又有其不同之处,如图5所示。

共生分析方法	关键内容
共生度分析方法	1. 共生单元之间的作用关系—单元共生度 $\delta_{ij}$ 2. 共生单元与系统之间的作用关系—单要素共生度 $\delta_{sj}$ 3. 系统内所有单元与系统之间的作用关系—全要素共生度 $\delta_s$
共生界面分析方法	1. 反映共生界面的效率特性或阻尼特性—界面特征值 $\lambda$ 2. 反映共生界面的发展特性—能量使用选择系数 $\beta$ 3. 反映共生界面的分配特性—非对称分配因子 $\alpha$
共生模式分析方法	1. 反映共生单元交互的时间和空间—共生组织模式: 点共生、间歇共生、连续共生、一体化共生 2. 反映共生能量分配—共生行为模式: 寄生、偏利共生、非对称性互惠共生、对称性互惠共生

图 4 共生分析方法

Fig. 4 Methods of symbiotic analysis

	多智能体系统	共生系统
单元建模	agent 内部结构 agent 行为能力	共生单元内在性质 共生单元外在结构
交互建模	agent 通信能力	共生关系 共生界面
分析角度	agent 行为分析	质参量分析 共生界面分析 共生模式分析
量化标准	借鉴其他理论方法	共生量化指标

图 5 多智能体方法与共生理论对比

Fig. 5 Comparison of multi-agent method and symbiosis theory

(1) 单元建模: 多智能体方法重点对 Agent 的内部结构和行为能力建模; 共生理论以象参量和质参量分别对作战单元的外在结构和内在性质进行描述, 更能体现作战单元的复杂性。

(2) 交互建模: 多智能体方法将通信能力作为 Agent 的一个行为能力, 将交互关系作为一种反馈现象; 共生理论将通信能力体现在交互界面的建

立与分析, 对交互关系进行多维度描述。

(3) 分析角度: 多智能体方法主要集中在 Agent 的内在结构和交互行为规则上; 共生理论分析包括单元、环境和交互等多个角度。

(4) 量化标准: 多智能体方法需要借鉴其他相关理论和方法进行量化与计算; 共生理论有其自身系统化的量化描述与分析指标。

总之, 基于共生理论的建模分析方法与其他方法相比, 能够实现多层次的建模分析, 不仅针对作战单元之间交互, 而且对整个作战系统包括作战环境、作战任务等, 从微观和宏观层次上进行数学建模并分析, 并且有系统的量化标准。

## 2 复杂作战系统共生模型建立

建立复杂作战系统模型的流程如图 6 所示, 包括分析复杂作战系统的组成, 即提取合适尺度的作战单元, 划分作战任务; 以质参量对作战单元进行描述, 建立作战单元模型; 作战单元根据作战任务进行交互生成作战子系统, 建立作战子系统模型; 分析作战环境, 建立作战环境模型; 分析作战子系统间的交互关系, 建立整体的作战系统模型。

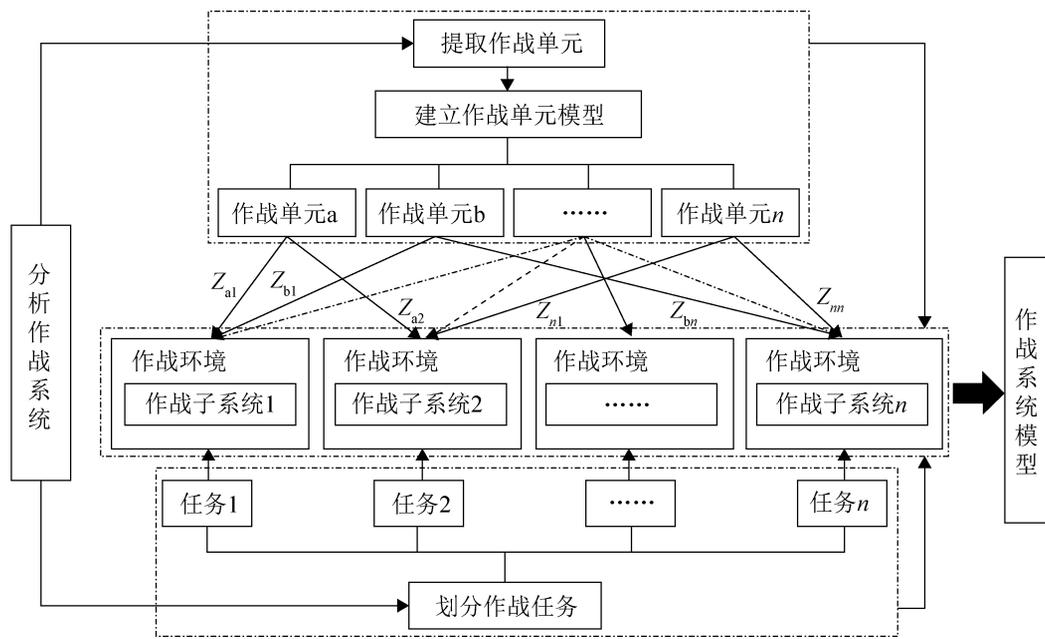


图6 复杂作战系统建模流程图

Fig. 6 Flowchart of modeling complex combat systems

### 2.1 分析作战系统

作战系统由大量作战单元组成，在不同层次的作战系统中，其作战单元是不同的，选取较为典型的指挥、攻击、防御和保障任务来说明作战单元和作战任务选取层次问题，作战任务如图 7 所示，作战单元根据具体的作战任务形成相应的作战子系统，如图 8 所示。

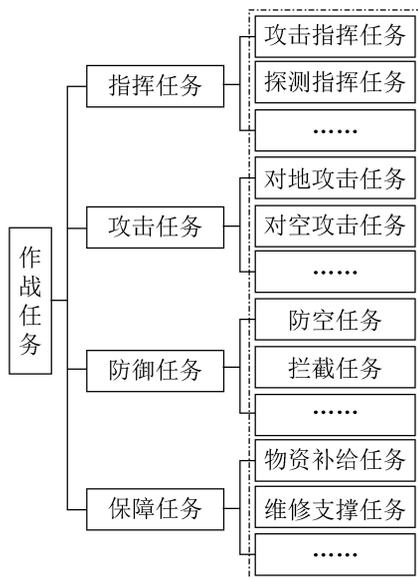


图7 作战任务

Fig. 7 Combat missions

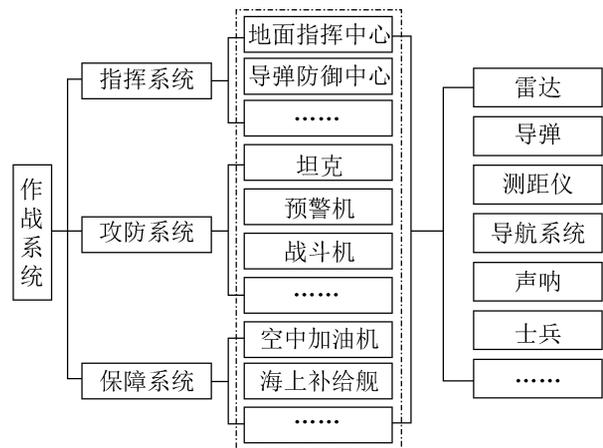


图8 作战单元层次图

Fig. 8 Combat unit level

作战单元的提取必须处于同一层次，此处选取坦克、战斗机、无人机等单独具有作战能力的个体作为最细粒度进行建模，这些作战个体可以根据作战任务相互协同，能够反映作战系统的复杂特性，将作战武器表达为作战能力作为作战个体的质参量。

### 2.2 建立作战单元模型

参考共生理论对作战单元进行建模，以质参量和象参量反映单元的特性。质参量是决定作战

单元内在性质及变化的因素,作战单元由一组质参量共同决定其内在性质,如表征战斗机的作战能力,包括探测精度、攻击精度、续航时长等。质参量对作战任务的完成起决定性的作用,因此在建立作战单元模型时,质参量的提取尤为关键。记作战单元质参量为

$$Z = \{Z_1, Z_2, \dots\} \quad (1)$$

象参量指反映作战单元外部特征的因素,由一组象参量分别从不同角度反映作战单元的外部特征,如外观形态、颜色、大小、规模等,一般对作战单元影响较小。记作战单元象参量为

$$X = \{X_1, X_2, \dots\} \quad (2)$$

则作战单元模型为

$$M = Z \cup X \quad (3)$$

### 2.3 建立作战子系统模型

作战子系统的模型实则是子系统内部作战单元的交互模型,作战单元的交互包括物质、信息和能量的交流和互换。物质包括燃料、武器、设备等补给物资,信息包括位置信息、环境信息、探测信息等,能量是指作战单元交互过程中协同效能,如拦截率、打击率的提升。作战单元之间的交互具有选择性,在某一作战任务下,两个作战单元*A*和*B*具有的关于对方的信息量称为信息丰度,表示为 $D_{ab}$ 或 $D_{ba}$ ,只有信息丰度达到一定的值,作战单元才会进行协同作用,信息丰度越高越容易形成协同。

作战单元之间的交互可表达为一方质参量对另一方质参量的影响:

$$Z_a = f(Z_b) \quad (4)$$

$$Z_b = f(Z_a) \quad (5)$$

本章节将从交互模式、交互界面两方面对作战单元之间的交互进行建模。

#### 2.3.1 交互模式

交互模式是指作战单元相互作用的方式或相互结合的方式,参照共生模式分析法,根据作战

单元交互的时间长短和空间大小分析其组织模式,根据作战单元交互效能分配分析其行为模式,表1为作战单元之间的交互模式。

表1 作战单元之间的交互模式  
Table 1 Interactive mode between combat units

行为模式	组织模式			
	点共生	间歇共生	连续共生	一体化共生
寄生(P)	$M_{P1}$	$M_{P2}$	$M_{P3}$	$M_{P4}$
偏利共生(C)	$M_{C1}$	$M_{C2}$	$M_{C3}$	$M_{C4}$
非对称性互惠共生(a)	$M_{a1}$	$M_{a2}$	$M_{a3}$	$M_{a4}$
对称性互惠共生(s)	$M_{s1}$	$M_{s2}$	$M_{s3}$	$M_{s4}$

组织模式分为点共生、间歇共生、连续共生和一体化共生,点共生具有随机性,只在某一个空间或时间进行交互;间接共生则是在不连续的空间和时间进行交互;连续共生则是指作战单元在连续的时间和空间进行交互;一体化共生指作战单元之间形成独特的交互界面。行为模式包括寄生、偏利共生、非对称性互惠共生和对称性互惠共生,寄生对一方有利,对另一方有害;偏利共生引起一方协同效能提升,对另一方没有影响;互惠共生则是指作战单元之间交互会引起两方协同效能的提升,若一方协同效能提升较多,另一方提升较少,为非对称性互惠共生,若两方协同效能提升相同,则为对称性互惠共生。

确定作战单元之间的交互模式后,再采用共生度对交互模式进行量化,共生度分为单元共生度 $\delta_{ij}$ 、单要素共生度 $\delta_{si}$ 和全要素共生度 $\delta_s$ 。单元共生度 $\delta_{ij}$ 是描述某一作战单元质参量的变化率引起的另一共生作战单元质参量的变化率,*i*和*j*分别对应作战系统内任意两个不同的作战单元。

$$\delta_{ij} = \frac{dZ_j/Z_j}{dZ_i/Z_i}, dZ_i \neq 0 \quad (6)$$

$$\delta_{ji} = \frac{dZ_i/Z_i}{dZ_j/Z_j}, dZ_j \neq 0 \quad (7)$$

单要素共生度则是反映作战单元与系统之间的相互作用关系,由单要素共生度 $\delta_{si}$ 可以得到作战子系统的全要素共生度 $\delta_s$ ,即系统中所有作战

单元相对于系统的共生度。

$$\delta = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^m \delta_{si} \quad (8)$$

式中： $\lambda$ 为交互界面特征值； $m$ 为子系统中作战单元的个数。

### 2.3.2 交互界面

交互界面是作战单元相互交互的媒介，图9为作战系统中交互界面的分类。

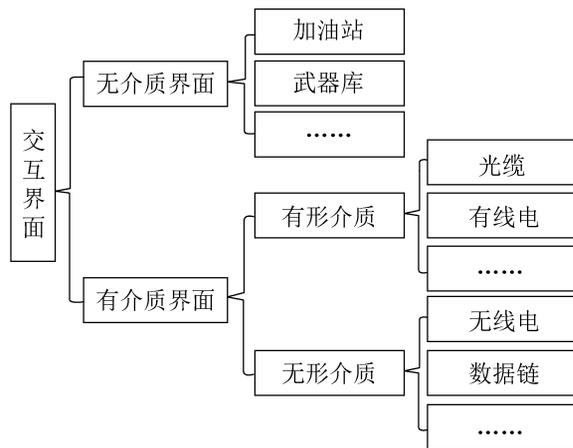


图9 作战单元交互界面

Fig. 9 Interactive interface of combat units

作战单元之间的交互都通过交互界面完成，因此交互界面会影响共生度的大小。采用界面特征值 $\lambda$ 对交互界面的阻力进行量化， $\lambda$ 由传输速度 $v$ 和交互损耗量 $e$ 决定， $\lambda$ 越小，传递速率越快，信息交流和物质交换越充分，不同界面 $v$ 和 $e$ 的影响方式不同：

$$\lambda = f\left(\frac{1}{v}, e\right) \quad (9)$$

子系统所有单元共生度、单要素共生度的集合分别为 $P$ 和 $Q$ ，作战子系统模型为 $S_k$ ：

$$P = \{\delta_{ij} | i, j \leq m \text{ 且 } i \neq j\} \quad (10)$$

$$Q = \{\delta_{si} | i \leq m\} \quad (11)$$

$$S_k = P \cup Q \cup \{\delta_{sk} | k \leq L\} \quad (12)$$

式中： $k$ 为任意一个作战子系统； $\delta_{sk}$ 为作战子系统的全要素共生度； $L$ 为作战子系统的个数。

## 2.4 建立作战环境模型

复杂作战系统中除作战单元以外的所有因素都为作战环境，用 $N$ 表示，主要有地形环境 $N_t$ 、气候环境 $N_c$ 和电磁环境 $N_e$ 。本章建立的作战环境模型是作战子系统的环境模型。

地形环境包括山川、丛林、平原等，同样的地形条件对不同的作战子系统影响不同。如平原地形在指挥、探测等作战子系统中起正向作用，此时 $N_t > 0$ ，更容易达到理想的共生度，但是在防空、拦截等作战子系统中起反向作用，此时 $N_t < 0$ 。同样，不同的气候环境、电磁环境都对作战系统有着正向、中性、反向的影响。

作战环境对作战系统的影响不是一成不变的，在不同的时空作战环境的影响在动态变化，对不同的作战任务， $N_t$ 、 $N_c$ 和 $N_e$ 的影响占比不同，即权重分别为 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ ，作战环境模型为

$$N = \omega_1 N_t + \omega_2 N_c + \omega_3 N_e \quad (13)$$

式中： $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

## 2.5 建立作战系统模型

在复杂作战系统中，作战单元数量庞大、种类繁多、交互密切且关系复杂，含有大量的作战任务，会涌现出整个作战系统内部的交互特性。每个作战任务都不是单独存在的，多个作战任务之间存在耦合关系，由上文各作战子系统的全要素共生度，可以得到整个作战系统的全要素共生度 $\delta_s$ ，则作战系统全要素共生度为

$$\delta_s = \sum_{k=1}^L \delta_{sk} \quad (14)$$

作战系统由各作战子系统构成，每个子系统内部的作战单元以及交互关系都会影响作战系统的内部交互，最终影响作战系统的协同效果。作战系统的参数量化包含作战子系统内部的单元共生度、单要素共生度、子系统的全要素共生度以及整个作战系统的全要素共生度 $\delta_s$ ，因此作战系统的模型为

$$S = \{S_k | k \leq L\} \cup \{\delta_s\} \quad (15)$$

### 3 复杂作战系统分析

#### 3.1 作战系统协同效能分析

作战系统中协同效能的变化量是评判作战单元交互结果的指标, 协同效能是在一定作战条件下, 作战单元通过协同有效完成相应作战任务的程度, 如拦截率、打击率等。作战单元依据作战任务形成的大量交互, 涌现出整个作战系统新的特性, 即协同效能的提升量, 定义为 $E_s$ , 主要由质参量 $Z$ 、交互界面特征值 $\lambda$ 等影响:

$$E_s = f(Z, \lambda) \quad (16)$$

第2节利用单元共生度 $\delta_{ij}$ 、单要素共生度 $\delta_{si}$ 和全要素共生度 $\delta_s$ , 实现了从作战单元层次、作战子系统层次和作战系统层次的多层次数学建模。作战系统的全要素共生度 $\delta_s$ 反映作战系统的内在相互作用关系, 是体现作战系统结构和功能的重要特征量, 只有 $\delta_s > 0$ 时, 才能提升作战系统的协同效能, 且 $\delta_s$ 越大, 协同效能的提升越大, 反之, 则越小。

因此, 要想提升作战系统的协同效能, 首先必须要提高作战系统的全要素共生度 $\delta_s$ , 就要提高作战单元之间的共生度 $\delta_{ij}$ , 运用消除机制和转换机制促进非正的作战单元共生度转化为正, 并且提高作战系统单要素共生度, 同时需要改进交互界面的功能或选择更好的交互界面, 减少界面交互的阻力。

#### 3.2 作战系统稳定性和均衡性分析

##### 3.2.1 作战系统的稳定性分析

作战系统的稳定性取决于系统的内部状态, 在提升作战系统协同效能的过程中, 由于交互界面的存在, 必然会出现物质、信息或能量的损耗, 作战系统协同效能的提升量与交互的损耗量之比为分配系数 $K_s$ , 作战单元协同效能的提升量与交互的损耗量达到一定相同的比例时, 其交互会达

到稳定状态, 即当分配系数达到以下条件时, 作战单元之间形成最稳定的系统状态:

$$\frac{E_{sa}}{E_{ca}} = \frac{E_{sb}}{E_{cb}} = \dots = \frac{E_{sn}}{E_{cn}} = \frac{E_s}{E_c} = K_{sm} \quad (17)$$

式中: 效能提升量 $E_s = E_{sa} + E_{sb} + \dots + E_{sn}$ ; 损耗量 $E_c = E_{ca} + E_{cb} + \dots + E_{cn}$ ;  $K_{sm}$ 为稳定分配系数;  $n$ 为系统中作战单元的个数。

在实际作战系统中, 任意一个作战单元分配系数为

$$K_{si} = \frac{E_{si}}{E_{ci}} \quad (18)$$

式中:  $E_{si}$ 和 $E_{ci}$ 分别为任意一个作战单元的效能提升量和损耗量。

对于作战系统而言, 系统平均非对称分配因子为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n K_{si}}{nK_{sm}} - 1 \quad (19)$$

一般情况下 $\alpha < 0$ , 当 $\alpha > 0$ 时, 表明系统内作战单元平均单位损耗所获得的协同效能提升量大于系统平均损耗所获得的协同效能提升量, 此时系统的损耗得不到相应的协同效能提升。 $\alpha$ 越趋于0, 作战系统越接近于理想分配状态。 $\alpha$ 的大小取决于交互界面的性质与功能, 在实际作战系统中, 可以改善交互界面, 使 $\alpha$ 趋于0, 从而提高作战系统的稳定性。

##### 3.2.2 作战系统的均衡性分析

作战系统的均衡性指的是作战单元的种类和数量达到均衡状态, 表现为增加一个作战单元或一种作战单元时, 对作战系统没有影响, 即增加作战单元时, 作战系统协同效能的提升量与协同交互的损耗量相同。采用作战单元的维度 $\eta$ 和密度 $\rho$ 分别对作战单元的种类和数量均衡状态进行分析。定义协同效能随维度变化的提升率为维度效能提升率 $M_{\eta s}$ , 交互损耗随维度变化的损耗率为维度能量损耗率 $M_{\eta c}$ :

$$M_{\eta s} = \frac{\partial E_s}{\partial \eta_s} \quad (20)$$

$$M_{\eta_c} = \frac{\partial E_c}{\partial \eta_c} \quad (21)$$

当  $M_{\eta_s} = M_{\eta_c} = M_{\eta_e}$ , 说明作战单元的维度达到  $\eta_{sc}$  时, 达到均衡状态, 此时系统协同效能的净增加量最大, 净能量为

$$\Delta E_s = E_s - E_c \quad (22)$$

同理当  $M_{\rho_s} = M_{\rho_c} = M_{\rho_e}$ , 说明作战单元的密度达到  $\rho_{sc}$  时, 达到均衡状态, 此时系统协同效能的净增加量最大。

### 3.3 作战系统演进分析

作战系统的状态不是一成不变的, 作战单元的质参量决定了系统全要素共生度  $\delta$  和非对称因子  $\alpha$ ,  $\delta$  和  $\alpha$  随着时空的变化不断发生变化, 也会引起作战单元质参量的变化, 从而影响作战系统的进化方向。系统进化有两个方向, 如图 10 所示, 一是由  $\delta$  引起组织模式的变化, 系统组织化程度提高, 共生进化作用增强; 二是由  $\alpha$  引起行为模式的变化, 系统协同效能的分配对称性提高。当系统的全要素共生度  $\delta_s$  越高、非对称分配因子  $\alpha$  趋于 0 时, 作战系统的协同效能提升越大, 系统越稳定。

当  $\alpha$  等于 0,  $\delta$  得到最大值时, 作战系统的协同效能提升最大, 且系统处于最稳定最有效率的状态, 此时系统是一体化共生、对称性互惠共生

的状态, 这也是作战系统最终的进化方向。目前的作战系统多处于互利共生、间歇共生的状态, 在对作战系统的设计与优化过程中, 设计适当的作战单元种类与数量, 选择效率较高的交互界面等, 提升协同效能, 平衡协同效能的分配, 使作战系统朝着一体化共生、对称性互惠共生的方向进化。

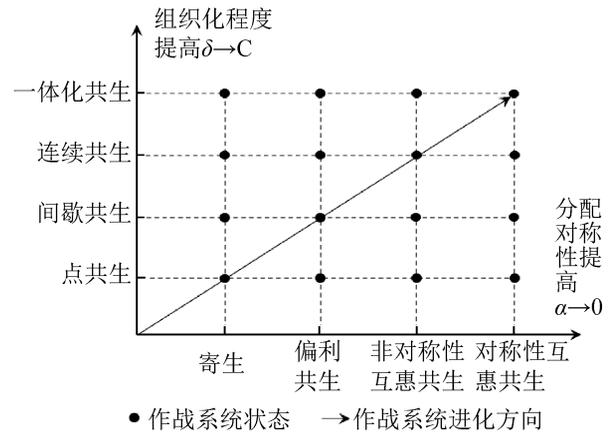


图 10 作战系统进化方向

Fig. 10 Evolutionary direction of combat systems

## 4 作战系统案例分析

### 4.1 案例

构想一个作战想定如图 11 所示, 红方协同作战拦截蓝方来袭的目标。

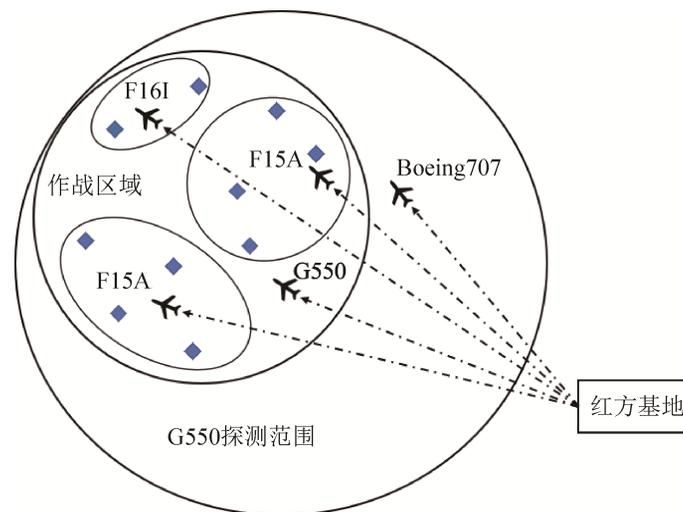


图 11 作战系统

Fig. 11 Combat system

红方有2架F15A和1架F16I战斗机, 1架G550预警机, 1架Boeing707加油机。设定蓝方已有10架战斗机进入红方的作战区域, 作战区域的半径为100 n mile, 由预警机提供探测信息, 战斗机根据导弹携带数量进行分工攻击敌机, 作战区域距离基地较远, 需加油机进行燃油补给。作战系统的作战单元有F16I、G550、Boeing707和2架F15A, 作战任务有探测任务、攻击任务和补给任务。

## 4.2 系统建模

### 4.2.1 单元模型

首先提取作战单元的象参量与质参量, 由式(1)和(2)建立单元模型, 如表2所示。在作战系统中提取的质参量一般是作战单元自身的属性参数, 往往不会被另一个作战单元的质参量影响而发生改变, 共生体现为作战单元之间的分工与协作。

### 4.2.2 子系统模型

依据作战任务可以将作战系统划分为探测子系统、攻击子系统和补给子系统, 设定所有作战单元之间拥有相同的信息丰度, 作战单元拥有其他作战单元实时位置、作战特性、环境等信息。以攻击子系统为例, 作战单元有2架F15A和1架

F16I。其中F16I携带3枚导弹且击中概率为95%, F15A携带5枚导弹且击中概率为70%, 由G550探测到10个敌机, 由此得到F16I和F15A的打击率分别为0.29和0.35。

3架战斗机都无法独立完成攻击任务, 需要进行协同分工。由表1可知, 在攻击子系统中作战单元之间属于连续的互惠共生模式。分配F16I打击2个目标, 每架F15A打击4个目标, 完成目标率分别为0.2和0.4。以1架F16I和1架F15A为例, 提取探测率、打击精度和载弹量为质参量, 这些质参量共同影响作战单元完成任务的能力, 选取F16I和F15A主质参量均为任务完成度分别为 $Z_b^m$ 和 $Z_c^m$ , 只考虑对方影响任务完成能力的情况下, 由式(4)和(5)得到:  $Z_b=0.2+Z_c$ ,  $Z_c=0.4+Z_b$ , 由式(6)和(7)得到单元共生度为 $\delta_{bc}=0.33$ 、 $\delta_{cb}=0.58$ 。

同理攻击任务中各作战单元之间的单元共生度由表3所示。

设攻击子系统的任务完成度为 $Z_{s1}$ , 以F16I为例计算其单要素共生度, 只考虑F16I的任务完成度 $Z_b$ 对子系统任务完成度 $Z_{s1}$ 的影响:  $Z_{s1}=0.8+Z_b$ 。可得F16I的单要素共生度为 $\delta_{sb}=0.2$ 。同样可以得到子系统每个作战单元的单要素共生度, 如表4所示。

表2 作战单元模型  
Table 2 Modes of combat units

作战单元	象参量X	质参量Z
G550	{翼展=28.5 m; 机身长=29.4 m; 机身高度=7.9 m; 机身质量=21 800 kg; 构型=固定翼; 驾驶舱仪表=数字仪表; 座位数=5}	{敏捷性=0.5; 单元探测距离=350 n mile; 探测角度=360°; 燃油量=18 700 kg; 爬升率=7 m/s; 飞行速度=260 n mile/h}
F16I	{翼展=9.5 m; 机身长=15 m; 机身长=29.4 m; 机身高度=4.8 m; 机身质量=8 715 kg; 构型=固定翼; 驾驶舱仪表=数字仪表; 座位数=2}	{敏捷性=4.9; 探测距离=80 n mile; 探测角度=120°; 攻击速度=2 100 n mile/h; 攻击距离=56.7 n mile; 打击精度=0.95; 燃油量=8 429 kg; 载弹量=3; 爬升率=159.5 m/s; 飞行速度=350 n mile/h}
F15A1	{翼展=13.1 m; 机身长=19.3 m; 机身高度=4.65 m; 机身质量=12 710 kg; 构型=固定翼; 驾驶舱仪表=机械仪表; 座位数=1}	{敏捷性=4; 探测距离=95 n mile; 探测角度=30°; 攻击速度=2 100 n mile/h; 攻击距离=38 n mile; 打击精度=0.7; 燃油量=8 894 kg; 载弹量=5; 爬升率=122.4 m/s; 飞行速度=350 n mile/h}
F15A2	{翼展=13.1 m; 机身长=19.3 m; 机身高度=4.65 m; 机身质量=12 710 kg; 构型=固定翼; 驾驶舱仪表=机械仪表; 座位数=1}	{敏捷性=4; 探测距离=95 n mile; 探测角度=30°; 攻击速度=2 100 n mile/h; 攻击距离=38 n mile; 打击精度=0.7; 燃油量=8 894 kg; 载弹量=5; 爬升率=122.4 m/s; 飞行速度=350 n mile/h}
Boeing707	{翼展=44.4 m; 机身长=44.6 m; 机身高度=12.9 m; 机身质量=66 406 kg; 构型=固定翼; 驾驶舱仪表=机械仪表; 座位数=5}	{敏捷性=0.5; 燃油量=72 460 kg; 载重量=12 454 kg; 飞行速度=230 n mile/h; 爬升率=6.4 m/s; 飞行速度=230 n mile/h}

<http://www.china-simulation.com>

表3 攻击子系统单元共生度

作战单元	作战单元		
	F16I	F15A1	F15A2
F16I		0.58	0.58
F15A1	0.33		0.47
F15A2	0.33	0.47	

表4 攻击子系统中的单要素共生度

作战单元	单要素共生度
F15A1	0.37
F15A2	0.37
F16I	0.20

作战单元之间的交互界面为数据链，设定没有电子信息干扰等方式阻碍作战单元之间的交互，忽略信息传输的损耗和速度的影响，为简化模型，设定交互界面阻尼特征值 $\lambda=1$ 。因此由式(8)可得攻击子系统的全要素共生度 $\delta_{s1}=0.94$ 。同样可得探测子系统的全要素共生度和补给子系统的全要素共生度分别为 $\delta_{s2}=1$ ， $\delta_{s3}=0.9$ 。

设定无特殊天气和电磁信号干扰且均在空中作战，不存在地形环境的影响，作战系统忽略环境对作战单元交互的影响，即作战环境模型 $N=0$ 。

#### 4.2.3 系统模型

作战单元的协同使得整个作战系统的拦截率提升，探测、攻击和补给任务不是单独存在的，任务之间也存在一定影响关系，探测和补给子系统分别为攻击子系统提升了探测能力与续航能力。由式(14)得到作战系统的全要素共生度 $\delta_s=2.84$ 。

单独作战F16I和F15A的拦截率由自身的探测率、导弹的命中率和导弹携带数量决定，得到F16I和F15A单独作战时的拦截率分别为0.06和0.03。

按照上述的分配情况，单独作战和协同作战时作战单元的拦截率如表5所示。

可以看出各单元单独作战时系统的拦截率为0.12，相互协同作战时系统的拦截率为0.90，拦截率提升78%，即系统协同效能提升量为 $E_s=0.78$ 。

表5 作战单元拦截率

作战单元	作战类型	
	单独作战	协同作战
G550	0	0
F16I	0.06	0.20
F15A1	0.03	0.35
F15A2	0.03	0.35
Boeing707	0	0
作战系统	0.12	0.90

### 4.3 系统分析

#### 4.3.1 协同效能分析

协同效能主要由系统的全要素共生度和交互界面影响。在实际作战过程中，由于电子信号的干扰或环境的影响，通过数据链交互会出现传输速度变慢和传输信息丢失的现象，作战单元之间的交互阻力由数据链本身的传输能力决定。忽略交互界面的影响，主要探讨作战单元之间的协同程度，协同效能主要由全要素共生度决定，采用共生度分析方法和共生模式分析方法进行分析。以攻击子系统为例，子系统存在作战任务的分配机制，设定3种不同的分配方式如图12所示，其全要素共生度和协同效能如表6所示。

3种分配下子系统的全要素共生度均大于0，能够得到作战系统拦截率的提升，而且全要素共生度越大，拦截率的提升也会越大。因此想要增加作战系统的拦截率，首先要提高系统的全要素共生度，这就需要提高各作战单元的单元共生度和单要素共生度，提高作战单元的功能属性，或改善作战任务的分配机制，使小的共生度增大，负的共生度转正。

#### 4.3.2 稳定性和均衡性分析

##### (1) 稳定性分析

协同作战过程的系统损耗来自燃油量根据经济损失，F16I一枚导弹价格约为100万美元，F15A一枚导弹价格约为50万美元，F16I执行任务5小时燃油保养费用约为20万美元，为方便计算，

设 F16I 燃油消耗为 0.01, 根据比例得到各单元损耗  $E_c=0.473$ , 其中  $E_{ca}=0.006$ ,  $E_{cb}=0.16$ ,  $E_{cc}=0.14$ ,  $E_{cd}=0.14$ ,  $E_{ce}=0.027$ 。表 7 为 3 种分配方式的拦截率。

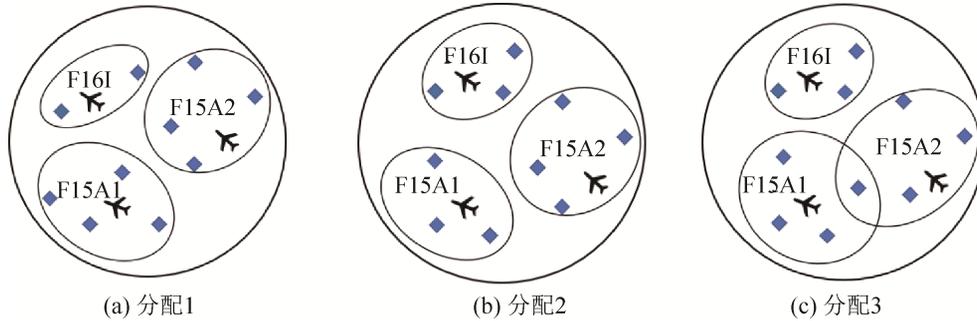


图 12 3 种分配方式

Fig. 12 Three types of allocation

表 6 3 种分配方式的差别

Table 6 Differences between three types of allocation

分配方式	全要素共生度	协同效能提升
1	2.94	0.78
2	2.96	0.82
3	2.99	0.87

将各单元和系统的损耗量  $E_c$  和拦截率提升量  $E_s$  带入式(17)(18)和(19), 得到 3 种分配下系统的非对称性分配因子分别为  $\alpha_1=-0.339$ ,  $\alpha_2=-0.348$ ,  $\alpha_3=-0.347$ , 系统均为非对称互惠共生, 稳定性都不高。因各作战单元性能与经济价值相差较大, 目前作战系统多为不稳定系统, 更多考虑的是协同效能的提升。

(2) 均衡性分析

此作战系统中作战单元的种类确定, 包含预

警机、战斗机和加油机, 系统的均衡主要指的是作战单元密度的均衡。以上 3 种分配情况均不能实现作战系统的拦截任务, 假设战斗机载弹量已经达到最大, 就需要增加一个战斗机。以分配 3 为例比较新增一架 F15A 或一架 F16I 的区别, 如表 8 所示。

这里的能量损耗量是指为了完成作战任务所投入的经济效益。由式(23)可得表 8 三种情况新增的净能量依次为  $\Delta E_{s1}=0.397$ ,  $\Delta E_{s2}=0.363$ ,  $\Delta E_{s3}=0.331$ 。可以看出在不增加战斗机的情况下, 作战系统新增的净能量更大, 协同效果更好, 相比之下新增一架战斗机的损耗量远比协同效能的提升量大, 但是在作战系统拦截任务中, 首先要利用已有资源使得拦截 100% 的敌机, 因此选择新增一架 F15A。

表 7 3 种分配方式的拦截率

Table 7 Interception rate of three types of allocation

作战单元	分配 1			分配 2			分配 3		
	单独作战	协同作战	拦截率提升 $E_s$	单独作战	协同作战	拦截率提升 $E_s$	单独作战	协同作战	拦截率提升 $E_s$
G550(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F16I(b)	0.06	0.20	0.14	0.06	0.29	0.23	0.06	0.29	0.23
F15A1(c)	0.03	0.35	0.24	0.03	0.30	0.27	0.03	0.35	0.32
F15A2(d)	0.03	0.35	0.24	0.03	0.35	0.32	0.03	0.35	0.32
Boeing707(e)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
作战系统	0.12	0.90	0.78	0.12	0.94	0.82	0.12	0.99	0.87

表8 新增单元的变化量  
Table 8 Variation of adding a unit

新增单元	协同效能提升量	能量损耗	协同效能
不增加	0.87	0.473	0.99
新增F15A	0.85	0.487	1
新增F16I	0.82	0.489	1

目前的作战系统很难达到均衡或稳定的状态，多为冗余系统，首先要保证作战任务能够完

成，在此基础上减少损耗，并且均衡作战单元新增效能与损耗的分配，从而达到更好的协同共生效果。

### 4.3.3 演进分析

由共生理论演进分析可知系统有两个进化方向，作战系统最终朝着一体化内共生或一体化对称性互惠共生的方向进化，如图13所示。

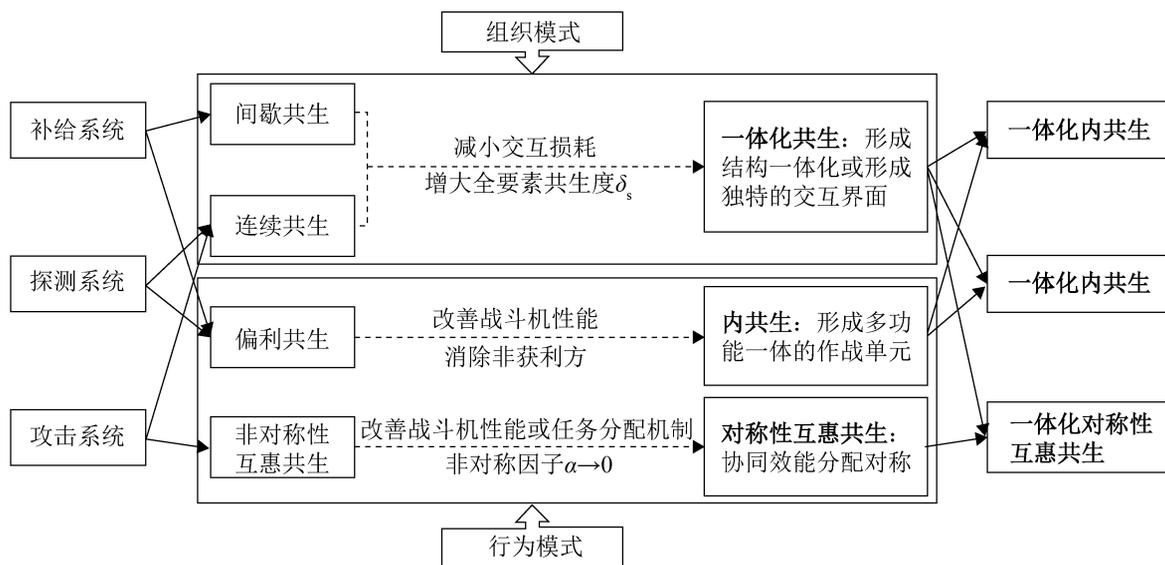


图13 作战系统的进化方向

Fig. 13 Evolutionary directions of combat systems

补给子系统处于间歇的偏利共生状态，在组织模式上可以减少交互过程中的损耗，推进间歇共生向一体化共生方向发展，结构形成一体，推进间歇共生向一体化共生方向发展；在行为模式上可以提升战斗机的续航能力，消除非获利方加油机，功能形成一体，推进偏利共生向作战单元内共生方向发展。探测子系统处于连续的偏利共生状态，同样可以减小交互界面的阻力，增强战斗机的探测能力，消除非获利方预警机，形成结构与功能上的一体。补给和探测子系统朝向一体化内共生方向发展。攻击子系统处于非对称互惠共生状态，从组织模式上可以减小交互损耗，推进连续共生向一体化共生方向发展，形成不受外界环境影响的交互界面；从行为模式上可以提升作战单元的攻击能力或作战任务的分配机制，使

得非对称因子 $\alpha$ 趋于0，推进非对称性互惠共生向对称性互惠共生方向发展。攻击子系统朝向一体化对称性互惠共生方向发展。

目前战斗机对气动布局和重量的要求十分严苛，探测扫描角度通常不超过 $120^\circ$ ，对雷达精度要求非常高，无法实现预警机的雷达探测距离，对承载量也有很大限制，因此探测和补给子系统很难达到一体化内共生的状态。并由于战斗机造价较高，作战系统内的战斗机更替缓慢，且随着电磁、光电等领域技术的发展，干扰通讯的手段越来越复杂，作战系统通过数据链进行信息传递仍受到较大的电磁、天气等环境的干扰，攻击子系统也很难达到一体化对称性互惠共生的状态。因此在进化过程中需要解决战斗机载重与搭载雷达技术的问题，加快战斗机的革新，提高通讯的

抗干扰能力等, 从而推进系统向一体化内共生或一体化对称性互惠共生的方向。

## 5 结论

共生方法可以实现作战系统的建模与分析, 对作战单元之间以及作战单元与作战系统之间的协同共生进行量化, 基于数值利用共生原理与共生分析方法对系统的协同效能、稳定性、均衡性和演进方向进行分析, 实现从单元、子系统和系统层次的多层次建模分析。但是针对复杂作战系统的共生分析方法还不够完善, 本文主要针对作战单元之间的协同分工进行分析, 实际作战过程中交互界面与环境因素对系统内部的交互有较大的影响, 作战单元之间的交互也更为复杂, 还需充分考虑作战单元间的交互复杂性, 更好地对作战系统的协同和演化进行分析。

当前作战系统由于技术、经济等方面的限制, 组织模式多为间歇共生或连续共生, 行为模式多为偏利共生或非对称性互惠共生, 作战单元间的交互依赖性强, 协同分工过程中存在较大的损耗, 与一体化内共生或一体化对称性互惠共生相差较远, 也说明当前作战系统协同效能还有很大的提升空间, 在未来的发展过程中仍需要攻克很多技术难题, 提升作战单元的功能, 加快作战单元的革新, 增强系统内通信和抗干扰能力等, 使得系统朝向一体化内共生或一体化对称性互惠共生的方向发展。

目前共生理论主要针对协同共生进行分析研究, 基于共生理论的对抗交互分析还需进一步完善, 以及如何将共生分析方法应用到作战系统的优化与演化设计中仍需深入研究。

## 参考文献:

- [1] Li Jichao, Jiang Jiang, Yang Kewei, et al. Research on Functional Robustness of Heterogeneous Combat Networks[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1487-1495.
- [2] Jia Niping, Yang Zhiwei, Yang Kewei. Operational

Effectiveness Evaluation of the Swarming UAVs Combat System Based on a System Dynamics Model[J]. IEEE Access, 2019, 7: 25209-25224.

- [3] Wang Tao, Zhou Xin, Wang Weiping, et al. An Optimal Approach for Combat System-of-systems Architecture Search Under Uncertainty[J]. IEEE Access, 2019, 7: 119140-119150.
- [4] 李林林, 张承龙, 卓志敏. 智能无人作战系统发展及关键技术[J]. 现代防御技术, 2020, 48(3): 37-43.  
Li Linlin, Zhang Chenglong, Zhuo Zhimin. Development and Key Technology of Intelligent Unmanned Combat System[J]. Modern Defence Technology, 2020, 48(3): 37-43.
- [5] 徐爽. 面向多任务的作战体系结构智能构建技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.  
Xu Shuang. Research on Intelligent Construction Technology of Multi-mission Combat Architecture[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [6] 陈宣汝, 邢积超. 基于大数据背景探究战争系统的复杂性[J]. 信息系统工程, 2018, 31(11): 141-144.
- [7] 卓硕. 基于Matlab和STK的无人机作战仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Zhuo Shuo. Research on UAV Combat Simulation Based on Matlab and STK[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [8] 闫杰, 符文星, 张凯, 等. 武器系统仿真技术发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1775-1789.  
Yan Jie, Fu Wenxing, Zhang Kai, et al. Review of the Weapon System Simulation Technology[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1775-1789.
- [9] 谢冉. 复杂系统建模方法综述[J]. 现代防御技术, 2020, 48(3): 31-36, 68.  
Xie Ran. Survey of Complex System Modeling Methods [J]. Modern Defence Technology, 2020, 48(3): 31-36, 68.
- [10] 刘晓平, 唐益明, 郑利平. 复杂系统与复杂系统仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6303-6315.  
Liu Xiaoping, Tang Yiming, Zheng Liping. Survey of Complex System and Complex System Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6303-6315.
- [11] 吴成海. 基于复杂适应系统范式的战斗随机协同控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
Wu Chenghai. Research on Combat Stochastic Collaborative Control Based on CAS Paradigm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [12] 向锦武, 董希旺, 丁文锐, 等. 复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 325-357.  
Xiang Jinwu, Dong Xiwang, Ding Wenrui, et al. Key

- Technologies for Autonomous Cooperation of Unmanned Swarm Systems in Complex Environments[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): 325-357.
- [13] Ye Fang, Chen Jie, Tian Yuan, et al. Cooperative Task Assignment of a Heterogeneous Multi-UAV System Using an Adaptive Genetic Algorithm[J]. *Electronics*, 2020, 9(4): 687.
- [14] 钟常绿, 贾子英, 王印来. 基于复杂系统的作战体系对抗研究[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 39(3): 112-115.  
Zhong Changlu, Jia Ziying, Wang Yinlai. Research on System-of-systems Combat of Operation System Based on Complex System[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(3): 112-115.
- [15] 刘德胜, 付东. 作战体系评估及评估方法研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2018, 32(3): 14-17.
- [16] 刘德胜, 马宝林, 葛亚维. 作战体系建模方法与应用[J]. *指挥控制与仿真*, 2020, 42(5): 1-6.  
Liu Desheng, Ma Baolin, Ge Yawei. Modeling Method and Application of Combat System of Systems[J]. *Command Control & Simulation*, 2020, 42(5): 1-6.
- [17] Chen Zhiwei, Zhao Tingdi, Jiao Jian, et al. System of Systems Architecture Modeling and Mission Reliability Analysis Based on DoDAF and Petri Net[C]//2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [18] 李志强, 李元龙, 殷来祥, 等. 智能无人蜂群作战系统适应性进化模型仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(4): 878-886.  
Li Zhiqiang, Li Yuanlong, Yin Laixiang, et al. Research on Unmanned Swarm Combat System Adaptive Evolution Model Simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(4): 878-886.
- [19] Mo Lipo, Yuan Xiaolin, Yu Yongguang. Target-encirclement Control of Fractional-order Multi-agent Systems with a Leader[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 509: 479-491.
- [20] 王三喜, 夏新民, 黄伟. 联合作战力量协同机理研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2011, 8(1): 9-14.  
Wang Sanxi, Xia Xinmin, Huang Wei. Research on Mechanism of Multi-arms Power in Joint Operations[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2011, 8(1): 9-14.
- [21] 衡祥安, 许建中, 冯进. 基于复杂系统理论的未来步兵作战概念研究[C]//第八届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2020: 184-188.
- [22] 杨未强, 刘书雷, 邓启文. 战争制胜机理的历史演变及启示[J]. *装备学院学报*, 2016, 27(4): 9-13.  
Yang Weiqiang, Liu Shulei, Deng Qiwen. Historical Evolution of War Winning Mechanism and Its Enlightenment[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2016, 27(4): 9-13.
- [23] 郑少秋, 吴浩. 智能化作战及其智能指挥控制技术需求[J]. *火力与指挥控制*, 2022, 47(2): 1-6, 13.  
Zheng Shaoqiu, Wu Hao. Intelligent Operations and Its Intelligent Command and Control Technology Requirements[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(2): 1-6, 13.
- [24] 许瑞明, 黄谦. 群体智能无人机系统作战仿真需求分析关键问题[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(6): 87-90.  
Xu Ruiming, Huang Qian. Key Issues of Combat Simulation Requirement Analysis of Swarm Intelligent UAV System[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(6): 87-90.
- [25] Mills R, Watson R A. Symbiosis, Synergy and Modularity: Introducing the Reciprocal Synergy Symbiosis Algorithm[C]//Advances in Artificial Life. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1192-1201.
- [26] 孟方琳, 田增瑞, 常焙筌, 等. VC和PE产业链的共生模式及路径选择研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2018, 57(6): 675-685.  
Meng Fanglin, Tian Zengrui, Chang BeiQuan, et al. Research on the Symbiotic Mode of VC and PE Industry Chain and the Path Selection[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 2018, 57(6): 675-685.
- [27] 侯晓. 基于共生理论的会展综合体设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
Hou Xiao. Research on Convention and Exhibition Complex Design Based on Symbiosis Theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [28] 董彬. 基于共生理论的运输方式发展模式及机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
Dong Bin. Study on Transportation Development Mode and Mechanism Based on the Symbiosis Theory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [29] 周金其. 基于共生理论的高校独立学院演变研究-以浙江省为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [30] 常晓飞, 蒋邓怀, 姬晓闯, 等. 无人作战系统仿真发展综述[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(6): 28-36.  
Chang Xiaofei, Jiang Denghuai, Ji Xiaochuang, et al. Summary of Simulation Development of Unmanned Combat System[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2021, 4(6): 28-36.
- [31] 谢旭, 邱晓刚, 段红, 等. 作战仿真知识体系的初步探索[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(4): 773-780.  
Xie Xu, Qiu Xiaogang, Duan Hong, et al. Research on Combat Simulation Body of Knowledge[J]. *Journal of*

- System Simulation, 2021, 33(4): 773-780.
- [32] 胡剑文, 常青, 冯晓文, 等. 作战仿真实验理论、平台与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [33] 王涵, 李浩, 范莉娟, 等. 作战仿真技术发展现状[J]. 指挥信息系统与技术, 2023, 14(3): 87-92, 100.  
Wang Han, Li Hao, Fan Lijuan, et al. Development Status of Operation Simulation Technology[J]. Command Information System and Technology, 2023, 14(3): 87-92, 100.
- [34] 李灿, 侯兴明, 祁启明, 等. 基于数字孪生的无人机平行作战仿真[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(8): 23-31.  
Li Can, Hou Xingming, Qi Qiming, et al. Parallel Battle Simulation of Unmanned Aerial Vehicle Based on Digital Twin[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(8): 23-31.
- [35] 罗浩, 张剑锋, 宁云晖, 等. 潜艇作战系统数字孪生体应用需求分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(3): 233-237.  
Luo Hao, Zhang Jianfeng, Ning Yunhui, et al. Application Requirement Analysis on Digital Twin of Submarine Combat System[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2021, 4(3): 233-237.
- [36] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98-108.  
Zou Liyan, Zhang Mingzhi, Bai Junru, et al. A Survey of Modeling and Simulation of UAS Swarm Operation[J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 98-108.
- [37] 许瑞明. 无人机集群智能涌现与演化建模论述[J]. 兵工自动化, 2021, 40(3): 5-9, 35.  
Xu Ruiming. Discussion on Intelligent Emergence and Evolution Modeling of UAV Cluster[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(3): 5-9, 35.
- [38] 袁纯清. 共生理论-兼论小型经济[M]. 北京: 经济科学出版社, 1998.
- [39] 郭一鸣, 陈春良, 曹艳华, 等. 基于排队论和兰彻斯特方程的战时维修保障装备数量确定[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11): 124-129.  
Guo Yiming, Chen Chunliang, Cao Yanhua, et al. Research on Quantity Determination of Wartime Maintenance Support Equipment Based on Queuing Theory and Lanchester Equation[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(11): 124-129.
- [40] 毕凯, 李大喜, 杨坤龙, 等. 基于多元兰彻斯特方程的电火一体作战模型[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5): 96-100.  
Bi Kai, Li Daxi, Yang Kunlong, et al. Research on Electronic-Fire Attack Model Based on Multivariate Lanchester Equation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(5): 96-100.
- [41] 刘奇华. 基于Agent的预警机协同作战仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Liu Qihua. Research on Agent-based Awacs Cooperative Combat Simulation Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.