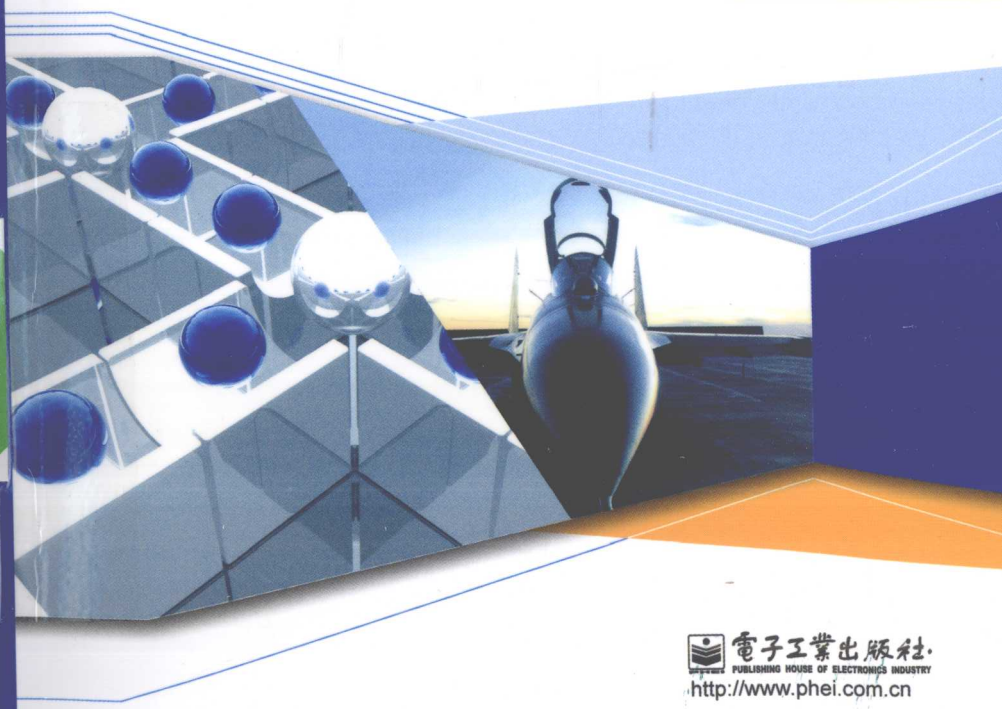
SoS-Ops M&S Based on the Complex Network

体系对抗复杂网络建模与仿真

金伟新 著



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

国家自然科学基金资助项目

体系对抗复杂网络建模与仿真

SoS-Ops M&S Based on the Complex Network

金伟新 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

图书在版编目（CIP）数据

体系对抗复杂网络建模与仿真 / 金伟新著. —北京：电子工业出版社，2010.6
ISBN 978-7-121-10964-5

Ⅰ. ①体… Ⅱ. ①金… Ⅲ. ①计算机网络－系统建模 ②计算机网络－系统仿真 Ⅳ. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 095624 号

责任编辑：竺南直
印　　刷：北京京科印刷有限公司
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本：850×1168　1/32　印张：7.25　字数：188 千字
印　　次：2010 年 6 月第 1 次印刷
印　　数：3000 册　定价：22.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前　言

网络化作战、网络化企业将成为未来作战和技术领域的一种主宰形式。从网络角度研究技术、企业、战争的发展趋势与演化规律，具有特别重要的意义与价值。本专著的主要特色有：（1）内容新。内容框架基于目前自然科学前沿研究方向之一——复杂网络与军事科学前沿课题——体系对抗构设，非常新颖。（2）热点多。研究聚焦于体系网络拓扑结构、生成机理、运行机制与方法、破击原理等，多数都是目前军事与技术焦点问题。（3）基础实。军事与技术、理论与实验相结合。

专著从作战体系的拓扑结构和体系对抗的演化动力学机制角度，运用建模仿真技术作为实验分析方法，对信息化战争体系对抗进行了系统的探索性研究，选题原创性强、学术价值高，在理论与实践两方面取得重要进展。

“巨量微观实体交互涌现宏观整体模式，整体宏观模式影响、约束微观实体交互机制”是众多现实复杂系统的共有特征。网络化战争是这样的系统之一。对于这样的系统，运用传统的纯粹还原的方法很难奏效。专著基于复杂系统理论，采用整体论与还原论相结合的方法对这一课题进行了探索性的仿真研究，取得了一些具有一定创新性的研究成果。

（1）提出了基于复杂网络与多 Agent 的网络化战争体系对抗通用建模仿真框架，微观基于实体的自适应 Agent 交互机制进行建模、宏观基于复杂网络约束的 Multi-Agent 交互多层协同进化进行

建模。该框架具有较强的指导性、理论性与实用性。研究了体系网络的拓扑特性。

（2）体系网络的分布特性是实现基于复杂网络的体系对抗仿真的基础。该专著基于对现实体系生成、连接机制的研究，构建完成体系网络的拓扑模型、算法，进一步，通过仿真揭示了体系网络的分布特性与规律。

（3）研究了基于多 Agent 的体系对抗行为建模。以 Agent 模型描述作战体系网络节点属性、行为与交互，通过对于作战体系指控 Agent、传感 Agent、交战 Agent、通信 Agent 的不同行为描述，遵循作战体系不同性质节点的特有连接模式，构建基于不同体系拓扑的作战体系对抗仿真实验模型。

（4）体系网络脆性对体系作战具有重要意义，是设计体系对抗模式的主要依据。专著基于开发完成的体系网络仿真分析系统对体系网络、指控网络脆性进行了大量仿真实验研究，结果表明：体系网络“鲁棒而又脆弱”；同时，还首次构造了指控体系的可视化环图，揭示出指控体系的脆性生成机理与防护机制。

（5）构建了体系对抗仿真实验环境（原型系统），通过对国内外战争复杂适应系统建模方法的归纳研究，结合作战体系自适应、自组织临界等复杂性特征，有针对性地设计了三十种仿真实验，揭示了体系对抗的一些重要的行为特性与规律。

专著的研究结果，对于推进网络化战争体系对抗仿真研究具有重要的理论指导意义与广阔的应用前景。

专著的出版，得到了国家自然科学基金（项目号：60974080）的资助和电子工业出版社的大力支持，在此致以由衷的谢意。专著的出版，得到了以下领导、专家的关心、指导与支持，在此深表感谢，他（她）们是：国防大学副校长任海泉中将、国防大学

信息作战与指挥训练教研部主任袁文先少将、清华大学自动化系肖田元教授、国防大学信指部副主任卢利华少将、胡晓峰少将、杜洪常协理员；作者在与以下老师、专家的长期学术交流、合作过程中受益很大，在此深表感谢，他（她）们是：《计算机仿真》杂志社长吴连伟教授、徐庚保研究员、曾莲芝老师，仿真应用分会理事长航天科工集团副总经理曹建国研究员，中国科技大学自动化系陈宗海教授，国防科技大学黄柯棣教授、谭东风教授、李革教授、黄健教授，哈尔滨工业大学杨明教授，二炮工程学院的李景文教授、毕义明教授，西安交通大学蔡远利教授，军事科学院运筹所副所长李辉研究员，解放军理工大学张宏军教授，武汉通信指挥学院王梦麟教授、贾连兴教授，空军指挥学院将军毕长剑教授、刘小荷教授，仿真应用分会秘书长王玲研究员等；作者的工作，还得到信指部以下领导、教授、同事的热情帮助与支持，在此表示感谢，他（她）们是：军事训练与第三大学生军训教研室主任李成安教授、副主任李延荃教授、杨树旗教授、张晖教授、李浩副教授、于景江副教授、杨设平副教授、吴留群副教授、印全云副教授，联合训练教研室主任郭若冰教授，作战指挥教研室主任郭武君教授、程启月教授、孙儒凌教授、刘伟教授、王令江副教授，信息作战研究所所长张鹏飞教授、张健教授、刘增良教授、黄玉亮副教授，战略模拟教研室孔令丰教授、主任司光亚教授、副主任张明智教授、刁文清教授、罗批副教授、杨镜宇副教授、张昱讲师、吴曦讲师、李志强博士后、李昌锦博士后、赵晔博士后、贺筱媛博士后，兵棋教研室主任范嘉宾教授、柳少军教授、向建华教授、副主任吴琳副教授、张国春副教授、刘洋讲师、周成军讲师、曹占广博士后，联合训练教研室张昕升副教授、冯新波副教授、龚学军副教授，战役模拟室李元副教授、肖雷讲师、

桑景瑞博士后、王再奎博士后和信指部的陈凯副教授、康保东副教授、蒋文杰秘书等。此外，在专著长达四年的写作过程中，对我的父母、家人及兄妹的默默奉献和支持表示感恩与谢意。

作者

2010．4

目　录

第1章 绪 论

本章导读：提出了课题研究的目的、意义，综述了国内外课题相关研究进展，归纳了研究的主要内容及各部分之间的逻辑关系。

1.1 问题提出

基于建模与仿真的观点，对于战争问题的研究可以从两种完全不同的角度进行：一种是从宏观角度，通过选取合理的宏观量，建立数学方程，描述战争系统宏观状态变量的演化，对战争的发展趋向作出预测；另一种是微观角度，通过合理抽象，建立微观个体的状态、行为模型，仿真分析大量个体的微观交互出现的整体态、模式，推定微观个体交互机制与整体模式的关联关系，进而形成对系统演化趋向与演化方式的认知。前者包括连续系统仿真、有人或无人干预的离散事件仿真，如 F.W.兰彻斯特（F.W.Lanchester，英国）方程[1]、M.奥西波夫方程（俄国）[1]、E.波莱尔的对策论模型（法国）[1]、T.N.Dupuy 的 QJM 模型（美国）[2-4]、J.W.福雷斯特的系统动力学（美国）[4]、本杰明·库伯斯的 QSIM 模型（定性仿真，美国）[1,5]；后者包括多主体仿真（MAS，Multi-Agent Simulation System）[6-9]、复杂适应系统（CAS，Complex Adaptive System）[6,7,10,11-17]、微观分析仿真（Micro-Analytical Simulation）[6]、元胞自动机（CA，Cellular Automata）[6,7,18]、人工生命与人工社会（AL，Artificial Life；AS，Artificial Society）[19-28]、人工战争（AW，Artificial War）[29-41]，使用的工具是基于主体的建模与仿真（ABMS，Agent-Based

Modeling&Simulation）[6,7,42-45]。但以上仿真领域目前普遍使用的这两类仿真方法总体上都属于单层次仿真，难以从本质上解决像网络化战争体系对抗这样多领域、多层次、高维、非线性交互、巨量实体、自组织、自适应的复杂系统的建模仿真问题。

网络化战争体系对抗建模与仿真的挑战性主要表现在：一是参战实体数量多、规模大，这些实体分布于陆地、海洋、内空、外空、电磁、网络多维物理空间与信息、认知、社会等虚拟空间，实体建模难度大；二是上述实体之间存在紧密、近实时的、频繁的巨量信息交互，构成一个近于无缝的整体，实体之间出现复杂的结构，对于这种体系层面的结构建模难度很大；三是这些实体大都有人参与或就是人或组织，智能性、适应性强，对于这种自适应能力的建模存在较高难度；四是网络化战争作战体系及体系对抗本身是刚刚出现的新的战争形式与作战样式，对于它的认识仍然是在初级阶段。

以上挑战构成了本专著课题立题的难度，也决定了其具有的重要研究价值，同时目前我军新时期、新阶段的使命任务与新的全球安全环境对该课题也有紧迫需求。因此，该课题具有重大的理论创新意义与现实应用价值，是一项急需攻克研究解决的国防领域重大课题。

本专著拟研究解决的关键问题主要包括：

（1）“巨量微观实体交互涌现宏观整体模式，整体宏观模式影响、约束微观实体交互机制”是众多现实复杂系统的共有特征。网络化战争体系对抗是这样的系统之一。对于这样的系统，运用传统的纯粹还原的方法很难奏效。本专著以复杂系统理论为指导，以建模仿真为支撑技术，采用整体论与还原论相结合的方法，针对体系对抗问题，对微观实体基于自适应 Agent 交互机制进行建模、宏观基于复杂网络约束的 Multi-Agent 交互多层协同进化进行建

模，构建基于复杂网络与多 Agent 的网络化战争体系对抗通用建模仿真框架。

（2）研究作战体系复杂网络的拓扑特性。体系网络的分布特性是实现基于复杂网络的体系对抗仿真的基础。本专著基于对现实体系生成、连接机制的研究，构建完成体系网络的拓扑模型、算法，进一步，通过仿真揭示了体系网络的分布特性与规律。

（3）体系网络、指控网络脆性仿真研究。体系网络脆性对体系作战具有重要意义，是设计体系对抗模式的主要依据。本专著通过对体系网络、指控网络脆性进行的大量仿真实验研究，证实：与众多现实复杂网络一样，体系网络“鲁棒而又脆弱”；同时，还首次构造了指控体系的可视化环图，揭示出指控体系的脆性生成机理与防护机制。

（4）体系对抗建模、仿真与实验研究。通过对国内外战争复杂适应系统建模方法的归纳研究，结合作战体系自适应、自组织临界等复杂性特征，提出基于复杂适应系统、多 Agent 与复杂网络的体系对抗行为建模理论路线与方法体系，形成具有特色的原创性的体系对抗仿真的一般原理，构建体系对抗仿真实验环境（原型系统），并有针对性地设计多达三十种仿真实验，通过仿真，取得了大量有价值的实验图表、数据。经过整理、分析，发现了体系对抗的一些非常重要的行为特性与规律。

本专著的研究，开辟了体系对抗仿真学科交叉的一个研究路线，对于推进网络化战争体系对抗仿真研究具有重要的理论指导意义与广阔的应用前景。

1.2 国内外研究现状

目前国内外作战建模仿真研究，如第 1.1 节介绍主要遵循的仍

是两条技术路线：一种是传统路线，即通过数学建模的方法，获取作战系统宏观参量之间的定量关系，而后仿真，揭示这些宏观量的演化轨迹与路线，进而对战局与结果作出解释与预测；另一种是基于近年来出现的复杂系统理论方法，通过构建微观主体自适应与进化模型，从众多主体交互呈现的宏观模式中揭示其隐含的微观机制，进而对战争的演化趋势与行为作出解释与推测。除这两种方法外，近年来，还出现了运用复杂网络对作战系统拓扑结构进行分析、解释的新趋向。下面从上述三个方面对国内外与本专著研究相关的研究进展进行分析，揭示其用于本专著课题研究时存在的局限性及与本专著研究课题的关系。最后，分析美国近年来倾力打造的大规模综合建模与仿真系统的研究进展及其与本专著课题研究的关系。

1.2.1 基于数学模型（方程）的作战建模仿真

在作战仿真领域，目前国内外这一类仿真仍是主流，代表性系统很多，仅在联合作战层次，美国就有 JSIMS（流产）、JAS（原来的 JWARS）、JMASS、EADSIM、JTLS、JCATS，还有美国陆军的 WARSIM、ONESAF（OTB、OOS）等[46]。这类系统国内及其他国家主要在仿真支撑环境核心技术上与美国存在一定差距，在建模方面除在模型要素与描述精细程度上有所不同，并没有本质上差异。限于非技术因素考虑，此类仿真以下仅就美国系统加以分析。这类系统大多对作战过程中指挥与控制（C2）、情报、信息的价值与作用表现不足[30,31,33,39,47,48]。尽管系统改进过程中采用了各种影响量补偿的方法尽量减弱其缺陷，但限于模型结构的限制，很难从本质上加以解决。

1. 确定性（Deterministic）模型[47,48]

确定性模型是对一个系统的完整、封闭式的表示、规范。由于建模者实际上不可能为建模的对象系统能够观察到的每一种可能的状态或交互都给出形式化描述或进行建模，所以，建立完成的模型实际上存在大量的隐式（Implicit）表示（或者叫做隐式假设）。在确定性建模中，两种最普遍的隐式假设是聚合（Aggregation）与解聚（Dis-aggregation）。建模者的聚合假设是：精细尺度上的复杂交互完全可以通过对细节行为进行“平均（匀质化）”从而聚合出它们的整体效果，在一个更粗的粒度上进行表示。聚合将整个系统的局部行为差异都归结于一种“噪声”，这种“噪声”可以通过某种参数表示，而且不会损失有效性。解聚则更具挑战性，解聚假设是：粗粒度上的参数能够被还原为多个细粒度、小型的、能够明确区分的局部行为。聚合、解聚假设不只应用于性能参数，它们假定作战环境条件和局部战术行为同样能够被聚合与解聚。

作战确定性建模还有一个假设就是规则性，也就是认为对象系统的各参量之间一定可以通过显式的确定关系表达出来，局部参量值小的改变不应直接带来整体巨大的非线性效果。

此外，指挥、控制、情报及作战对抗过程很少会在确定性模型中进行显式（Explicit）表示。这些因素的效果常常采用以下策略进行隐式表达，即通过模型中项与项之间的数学关系或者是通过过程的关系序列进行表现。

2. 随机性（Stochastic）模型[47]

用于作战仿真的随机性模型也包含有类似于确定性模型的“聚合-解聚”和规则性假设。此外，随机性模型还有如下三个附

加假设：

- 第一个假设源于不确定性的数学表示，既然不确定性意味着对于模型要求的输入数据的不完全知识，那么，有些输入数据必须是随机变量；
- 源于假设 1。既然数据本身某种程度上是不确定的，那么，输入数据之间的相互作用也应如此：因此参数必须被处理为相互独立的随机变量。或者说，被建模的作战过程的复杂的因果链被认为是不合逻辑的。从而，它假设大部分过程能够被建模为彼此独立的事件或简单的因果链。
- 建模人员一般假设：这些独立的随机变量的输出的分布是非“偏斜（Skewed）”的，从而较少的模型运行次数可以“消去”随机变量的方差并产生统计收敛性。

不同于确定性模型，指挥与控制（C2，Command and Control）在随机性模型中更多地得到了显式表示。随机性模型表达 C2 的方法与表示作战过程“损耗”的方法类似，都是使用服从某一分布的随机变量表示。比如，美国的“反潜战仿真系统（ASW，Anti-Submarine Warfare simulation）”对于 C2 的建模过程是：一个潜艇能否被一支水面舰艇的声纳探测到，由服从于某一指定概率分布的随机变量决定，经随机模拟如果结果是“被发现”，则舰艇状态调整为“跟踪”，在跟踪过程中，如果经过一段时间后，发现潜艇消失，则声纳初始探测概率分布重新被执行。其他 C2 过程，如通信、雷达探测采用的都是类似的处理方法。

例如，美军目前仍在使用的 JAS（Joint Analysis System，原名 JWARS：Joint WARfare System）系统的数学模型，主要都是上述两类，如图 1.1 所示[49]。