

“十三五”国家重点图书出版规划项目

系统工程与装备论证系列丛书

基于ABMS的体系计算 实验方法及应用

李群 等 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十三五”国家重点图书出版规划项目
系统工程与装备论证系列丛书

基于 ABMS 的体系计算 实验方法及应用

李 群 黄建新 朱一凡 李瑞军 雷永林 著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

采用 ABMS (Agent Based Modeling and Simulation, 基于 Agent 的建模与仿真) 方法对武器装备体系对抗过程进行合理抽象, 建立规范的体系效能仿真评估应用过程, 开发有效的体系效能仿真评估系统, 进行体系对抗仿真实验, 是武器装备体系效能评估的重要发展方向。本书以武器装备体系作战效能评估为背景, 重点介绍基于 Agent 的体系计算实验方法、相关工具和应用示例。针对体系论证分析对计算实验的需求, 本书从实验过程、模型设计、仿真运行机制、实验设计与分析方法等方面介绍了基于 ABMS 的体系计算实验方法, 并对国外典型案例进行了复现和剖析研究, 希望能够为国内武器体系装备论证工作中的应用实践提供一些有益的借鉴。

全书共 7 章, 内容包括体系与体系计算实验、基于 ABMS 的体系计算实验方法、可组合的体系仿真模型框架、基于进程的 Agent 体系仿真、近正交拉丁超立方实验设计、基于决策树的体系计算实验分析、航母无人舰载机作战效能分析。

本书可供军事理论和武器装备论证等领域的军事指挥人员和系统分析人员阅读, 也可作为高等院校的系统工程、军用仿真、军事运筹等有关专业师生的参考用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 ABMS 的体系计算实验方法及应用 / 李群等著. —北京: 电子工业出版社, 2018.7

(体系工程与装备论证系列丛书)

ISBN 978-7-121-34468-8

I. ①基… II. ①李… III. ①体系工程—实验方法 IV. ①TB-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 125597 号

策划编辑: 陈韦凯

责任编辑: 郝黎明 特约编辑: 张燕虹

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 15.75 字数: 403 千字

版 次: 2018 年 7 月第 1 版

印 次: 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: chenwk@phei.com.cn, (010) 88254441。

体系工程与装备论证系列丛书

编委会

主 编 王维平 (国防科技大学)

副主编 游光荣 (军事科学院)

郭齐胜 (陆军装甲兵学院)

编委会成员 (按拼音排序)

陈春良 樊延平 荆 涛 雷永林 李 群

李小波 李志飞 刘正敏 穆 歌 王 涛

王铁宁 王延章 熊 伟 杨 峰 杨宇彬

张东俊 朱一凡

体系工程与装备论证系列丛书

总序

1990年,我国著名科学家和系统工程创始人钱学森先生发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》一文。他认为,复杂系统组分数量众多,使得系统的整体行为相对于简单系统来说可能涌现出显著不同的性质。如果系统的组分种类繁多,并具有层次结构,它们之间的关联方式又很复杂,就成了复杂巨系统;再如果复杂巨系统与环境进行物质、能量、信息的交换,接收环境的输入、干扰并向环境提供输出,而且还具有主动适应和演化的能力,就要作为开放复杂巨系统对待了。在研究解决开放复杂巨系统问题时,钱学森先生提出了从定性到定量的综合集成方法,这是系统工程思想的重大发展,也可以看作对体系问题的先期探讨。

从系统研究到体系研究涉及很多问题,其中有三个问题应该首先予以回答:一是体系和系统的区别,二是平台化发展和体系化发展的区别,三是系统工程和体系工程的区别。下面,我引用国内两位学者的研究成果讨论对前面两个问题的看法,然后再谈谈我自己对后面一个问题的看法。

关于系统和体系的区别。有学者认为,体系是由系统组成的,系统是由组元组成的。不是任何系统都是体系,但是只要由两个组元构成且相互之间具有联系就是系统。系统的内涵包括组元、结构、运行、功能、环境,体系的内涵包括目标、能力、标准、服务、数据、信息等。系统最核心的要素是结构,体系最核心的要素是能力。系统的分析从功能开始,体系的分析从目标开始。系统分析的表现形式是多要素分析,体系分析的表现形式是不同角度的视图。对系统发展影响最大的是环境,对体系形成影响最大的是目标要求。系统强调组元的紧密联系,体系强调要素的松散联系。

关于平台化发展和体系化发展的区别。有学者认为,由于先进信息化技术的应用,现代作战模式和战场环境已经发生了根本性的转变。受此影响,以美国为首的西方国家在新一代装备发展思路上也发生了根本性转变,逐渐实现了装备发展由平台化向体系化的过渡。武器装备体系化的重要性已为众所周知,起始于35年前的一场战役。1982年6月,在黎巴嫩战争中,以色列和叙利亚在贝卡谷地展开了激烈空战,这次战役的悬殊战果对现代空战战法研究和空战武器装备发展有着多方面的借鉴意义,因为采用任何基于武器平台分析的指标进行衡量,都无法解释如此悬殊的战果。以色列空军各参战装备之间分工明确,形成了协调有效的进攻体系,是取胜的关键。自此以后,空战武器装备对抗由“平台对平台”向“体系对体系”进行转变,为世界周知。同时,一种全新的武器装备发展思路——“武器装备体系化发展思路”逐渐浮出水面。这里需要强调的是,武器装备体系概念并非始于贝卡谷地空战,当各种武器共同出现在同一场战争中,执行不同的作战任务时,原始的武器装备体系就已形成,但是这种武器装备体系的形成是被动的;而武器装备体系化发展思路应该是一种以武器装备体系为研究对象和发展目标的武器装备发展建设思路,是一种现代装备体系建设的主动化发展思路。因此,武器装备体系化发展思路是相对于一直以来武器装备发展主要以装备平台更新为主的发展模式而言的。以空战装备为例,人们一般常说的三代战斗机、四代战斗机都是基于平台化思路的发展和研究模式的,是就单一装备的技术水平和作战性能进行评价的。可以说,传统的武器装备平台化发展思路是针对某类型武

器平台，通过开发、应用各项新技术，研究制造新型同类产品以期各项性能指标超越过去同类产品的发展模式。而武器装备体系化发展的思路则是通过对未来战场环境和作战任务的分析，并对现有武器装备和相关领域新技术进行梳理，开创性地设计构建在未来一定时间内最易形成战场优势的作战装备体系，并通过对比现有武器装备的优势和缺陷确定要研发的武器装备和技术。也就是说，其研究的目标不再是基于单一装备更新，而是基于作战任务判断和战法研究的装备体系构建与更新，是将武器装备发展与战法研究充分融合的全新的装备发展思路，这也是美军近三十多年装备发展的主要思路。

关于系统工程和体系工程的区别。我感到，系统工程和体系工程之间存在着一种类似“一分为二、合二为一”的关系，具体体现为分析与综合的关系。数学分析中的微分法（分析）和积分法（综合），二者对立统一的关系是牛顿-莱布尼兹公式。它们构成数学分析中的主脉，解决了变量中的许多问题。系统工程中的“需求工程”（相当于数学分析中的微分法）和“体系工程”（相当于数学分析中的积分法），二者对立统一的关系就是钱学森的“从定性到定量综合集成研讨方法”（相当于数学分析中的牛顿-莱布尼兹公式）。它们构成系统工程中的主脉，解决和正在解决大量巨型复杂开放系统的问题。我们称之为系统工程 Calculus。

总之，武器装备体系是一类具有典型体系特征的复杂系统，体系研究已经超出传统系统工程理论和方法的范畴，需要研究和发展体系工程，用以指导体系条件下的武器装备论证。

在系统工程理论方法中，系统被看作具有集中控制、全局可见、有层级结构的整体，而体系是一种松耦合的复杂大系统，已经脱离了原来以紧密的层级结构为特征的单一系统框架，表现为一种显著的网状结构。近年来，含有大量无人自主系统的无人作战体系的出现使得体系架构的分布、开放特征愈加明显，正在形成以即联配系、敏捷指控、协同编成为特点的体系架构。以复杂适应网络为理论特征的体系，可以比单纯递阶控制的层级化复杂大系统具有更丰富的功能配系、更复杂的相互关系、更广阔的地理分布和更开放的边界。以往的系统工程方法强调必须明确系统目标和系统边界，但体系论证不再限于刚性的系统目标和边界，而是强调装备体系的能力演化，以及对未来作战样式的适应性。因此，体系条件下装备论证关注的焦点在于作战体系架构对体系作战对抗过程和效能的影响，在于武器装备系统对整个作战体系的影响和贡献率。

回顾 40 年前，钱学森先生在国内大力倡导和积极践行复杂系统研究，并在国防科学技术大学亲自指导和创建了系统工程与数学系，开办了飞行器系统工程和信息系统工程两个本科专业。面对当前我军武器装备体系发展和建设中的重大军事需求，由国防科学技术大学王维平教授担任主编，集结国内在武器装备体系分析、设计、试验和评估等方面具有理论创新和实践经验的部分专家学者，编写出版了“体系工程与装备论证系列丛书”。该丛书以复杂系统理论和体系思想为指导，紧密结合武器装备论证和体系工程的实践活动，积极探索研究适合国情、军情的武器装备论证和体系工程方法，为武器装备体系论证、设计和评估提供理论方法和技术支撑，具有重要的理论价值和实践意义。我相信，该丛书的出版将为推动我军体系工程研究、提高我军体系条件下的武器装备论证水平做出重要贡献。

汪浩

2017 年 5 月
湖南长沙

序

以信息技术为核心的高新技术的迅猛发展以及在军事领域的广泛应用，引发了一场迄今人类历史上影响最为深刻的新军事变革，这是人类文明由工业时代向信息时代转变的产物。纵观这场军事变革发展的过程，可以清楚地看到，高新技术是推动新军事变革最活跃的因素，高技术武器装备是促进新军事变革的重要物质基础，武器装备成体系发展、建设和应用是实现新军事变革的最突出特点。

武器装备体系是为满足作战体系对抗需要，以完成一定作战任务为目的，由在功能和作用上相互联系与制约、互为补充的各类武器装备所构成的一个整体。从系统论的角度看，武器装备体系是一类典型的复杂巨系统，既具有复杂巨系统的一般特征，如复杂性、涌现性、自适应性等，也具有其特有的特征，如层次性、对抗性、开放性等。开展武器装备体系研究，既要根据复杂巨系统理论方法把握其一般的研究方法，也要针对其独特的应用领域和研究目的，创新研究的理论、方法和工具，提升研究的针对性、有效性。

开展武器装备体系的研究，总体上需要研究其体系结构及其演化过程，分析体系结构的变化对体系整体行为的影响，还要研究体系在对抗过程中的能力和效能，分析评估体系的薄弱环节或短板。作为一个特定军事领域的复杂巨系统，这些问题的研究十分复杂，不仅缺乏可借鉴的理论方法，在实践中还涉及武器装备的种类、部署规模、作战编组、战术使用，以及相互支撑、相互制约的复杂关系。

近十多年来，学术界十分重视武器装备体系研究方法的探索，取得了许多成果。开展武器装备体系研究的方法大体上可以分为两大类：一类是从体系设计开发的角度开展研究，典型的方法有美国国防部公布的“国防部体系结构框架”，提出了体系结构开发顶层的、系统的框架和概念模型，主要用于体系结构开发、使用和维护，为体系结构全生命周期各阶段提供指南、原则、方法和技术，以支撑跨领域、跨部门、跨层级决策支持过程；另一类是从体系分析评估的角度开展研究，重点关注武器装备体系在特定作战环境下体系对抗中的能力和效能，以此评估武器装备体系完成作战任务的程度，通常采用建模仿真、解析计算、数据分析等一系列方法。

武器装备体系分析与评估的难点在于如何从整体上对体系的能力和效能进行分析评价。从系统论的角度看，体系的整体性难以通过独立分析其各部分的行为来确定，也不能在有限资源条件下对其整体行为进行大尺度的预测。解析计算、数据分析等方法，只能通过体系进行简化与抽象找出各部分之间的相互关系，建立模型或对数据进行分析，难以反映体系的实际运行过程；建模仿真方法能够解决用解析方法、数据分析难以解决的十分复杂的问题，可以反映体系的动态过程。但是，仿真模型的检验、校核比较困难。对于一个具体的、小规模、具备实际运行条件的实体，可以通过实际运行获取的数据来检验、校核模型。对于不能实际运行的实体，模型的检验、校核就缺乏有效的手段。而武器装备体系作为作战体系的核心，进行实际的作战对抗几乎是不可能的，加上现代战争的信息域和

社会域的作用,使评估工作更加复杂困难,因此如何采用建模仿真的方法分析评估武器装备体系就成为学术界需要探索研究的重要问题。

计算实验是在复杂系统控制领域仿真方法基础上提出的,其核心思想是,建立所要研究的实际系统的模型,并将计算机作为实际系统模型运行控制的实验室。计算实验不要求计算模型完全再现实际系统的行为,而把计算模型作为一种可能的存在。与计算仿真不同的是,计算机仿真要求仿真模型不断逼近实际系统,然而证明计算机模型的有效性与等价性,但是在研究复杂系统时往往难以实现。还有一种解决办法是不追求计算模型的有效性,在假设计算模型无法验证的前提下进行分析,尝试挖掘计算模型所隐含的潜在结论,并与实际系统的行为进行对比分析,找出有借鉴意义的分析结论。对于无法通过系统实际运行的武器装备体系,计算实验应该是一种较为有效的研究方法。

本书作者自 2000 年开始就进行体系效能仿真评估的相关研究与实践,在近年来承担的研究课题中,又将计算实验方法应用在武器装备体系分析评估中,在理论方法、实际应用上进行了有意义的探索。本书是基于 Agent 建模仿真的体系计算实验方法、技术和经验的概括和总结,反映了作者在体系效能仿真评估领域中积累的成功经验。体系计算实验方法是理论和实践都很强的一种方法,作者用 SEAS 介绍概念、仿真框架及与 SEAS 兼容的体系效能仿真平台原型,并用一个完整的案例作为结束,增加了本书的可读性。我相信书中介绍的体系计算实验方法对我国的装备体系论证研究具有积极的借鉴意义,该书的出版必将有力促进我国装备体系论证的实践和应用,推动装备系统工程的科学发展。

费爱国

2018 年 4 月

前 言

一般武器装备的作战效果可以通过装备作战效能进行评估,作战效能评估也一直是装备论证中需要解决的核心问题之一。同样,武器装备体系的作战效果也需要通过体系效能进行定量分析。体系效能评估是装备体系论证的重要工作内容,是武器装备体系发展与建设工作中不可缺少的一环。通过面向武器装备体系的计算实验可以计算不同武器装备结构方案对作战结果的影响,评估不同体系结构方案的作战效能,能够有效支持武器装备体系效能评估工作。然而,武器装备体系的复杂性也为体系计算实验应用带来了诸多挑战。本书以武器装备体系论证为背景,重点介绍基于 Agent 的体系计算实验方法、相关工具和应用示例。针对体系论证分析对计算实验的需求,本书从实验过程、模型设计、仿真运行机制、实验设计与分析方法等方面介绍了体系计算实验方法,并对国外无人机编队作战等典型案例进行了剖析研究,希望为国内相关武器体系装备论证中的应用实践提供一些有益的借鉴。

在计算机和信息技术的推动下,计算实验方法已经在很多领域得到了广泛应用。体系计算实验是计算实验方法在体系分析中的应用,然而体系的复杂性使得我们不可能建立一个完善的体系计算实验环境,而必须通过对系统进行合理的简化和抽象建立体系模型,在计算机技术、仿真技术、军事等多领域人员的密切配合下才能形成可用的研究成果。显然,我们不能冀望体系效能评估能最终解决体系问题,而是通过体系效能评估工作发现问题。同样,我们也应该抱着发现问题的态度去使用相关的体系计算实验模型,尽量发现体系发展中存在的问题和短板,减少体系发展建设中的潜在风险,而不是一味通过真实性去排斥这些方法和应用,否则我们可能陷入无方法和模型可用的窘境,这也是我们从基本的“计算实验”出发,在本书中将其称为“体系计算实验”,而不是“体系仿真”的原因。

本书对体系计算实验进行了系统性的总结和介绍,是著者多年的理论方法、技术研究和实际应用探索的总结。体系计算实验的应用性和实践性要求很高,本书的相关内容借鉴了国内外成熟的体系模型框架、实验设计与分析方法,著者所在课题组经过多年 Agent 仿真系统、仿真应用模型的设计开发和应用实验,通过实际应用课题和国外相关应用的复现研究检验了相关体系计算实验方法的有效性。

本书在出版过程中得到了电子工业出版社的大力支持和帮助,特别是徐静编辑和陈韦凯编辑为本书的出版倾注了大量的心血,在此表示衷心的感谢。

感谢实验室的侯红涛、王超、贾全、赵彦博、黄其旺、周威、范蕾等博士研究生和硕士研究生,在书稿的形成过程中帮助收集了大量资料,并对书稿进行了认真仔细的校对。

最后,感谢所有关心和支持本书编写和出版的朋友。

本书涉及的领域非常广泛,错误在所难免,书中不当之处敬请读者批评指正。

著 者

2018年4月于长沙

目 录

第1章 体系与体系计算实验	1
1.1 体系与体系论证	2
1.1.1 体系	2
1.1.2 武器装备体系	3
1.1.3 装备体系效能评估	4
1.2 一个计算实验示例	5
1.3 武器装备体系论证的计算实验需求	9
1.3.1 计算实验方法	9
1.3.2 体系计算实验面临的挑战	10
1.3.3 体系计算实验的认识	12
1.4 面向复杂系统研究的计算实验方法	14
1.4.1 基于数据的计算实验	14
1.4.2 基于方程的计算实验	14
1.4.3 基于仿真的计算实验	15
1.5 面向体系的计算实验	17
1.5.1 基于数据的体系计算实验	17
1.5.2 基于方程的体系计算实验	18
1.5.3 基于仿真的体系计算实验	18
1.5.4 面向体系的计算实验应用	19
1.6 基于仿真的体系计算实验应用	20
1.6.1 传统的体系仿真方法	20
1.6.2 面向训练的体系对抗仿真	21
1.6.3 面向网络中心战的体系仿真分析	21
1.7 本书的内容和组织	25
第2章 基于 ABMS 的体系计算实验方法	26
2.1 基于 Agent 的建模与仿真	27
2.1.1 Agent 概念	27
2.1.2 Agent 仿真的特点与应用	29
2.2 基于 ABMS 的模型设计方法	31
2.3 ABMS 与体系仿真	33
2.4 ABMS 仿真开发过程	34
2.4.1 ABMS 开发过程	35
2.4.2 ABMS 使用过程	36

2.5	基于 ABMS 的体系效能仿真开发与应用过程	37
2.5.1	体系效能仿真开发过程	38
2.5.2	体系效能仿真应用过程	40
2.6	基于 ABMS 的体系计算实验框架	42
2.6.1	体系架构定义	43
2.6.2	仿真想定设计	43
2.6.3	体系实验设计	43
2.6.4	数据收集和整理	44
2.6.5	Agent 体系仿真模型开发	45
2.6.6	仿真模型测试与验证	46
2.6.7	体系仿真计算	46
2.6.8	计算数据整合	47
2.6.9	体系实验分析	47
第 3 章	可组合的体系仿真模型框架	49
3.1	模型框架概述	50
3.1.1	Agent 层次结构	50
3.1.2	蚂蚁 Agent 与 SEAS Agent	50
3.1.3	Agent 类型	51
3.1.4	Agent 自述	52
3.1.5	Agent 结构	53
3.1.6	Agent 分形网络结构	55
3.2	作战实体 Agent	56
3.2.1	对象层次	56
3.2.2	作战单元 Unit	57
3.2.3	地面实体 Vehicle	59
3.2.4	空中实体 Plane	61
3.2.5	空间实体 Satellite	63
3.3	装备对象 Device	64
3.3.1	通信设备	65
3.3.2	传感器	68
3.3.3	武器系统	71
3.4	战场环境对象	76
3.5	Agent 行为表示	77
3.5.1	行为建模方法比较	78
3.5.2	基于进程交互仿真的 TPL 脚本	79
3.5.3	行为原语	79
3.6	基于 ABMS 的体系模型组合规范	81
第 4 章	基于进程的 Agent 体系仿真	84
4.1	进程交互仿真及实现方法	85

4.1.1	进程交互仿真	85
4.1.2	进程交互仿真的实现方法	86
4.1.3	基于进程例程的进程交互仿真	87
4.2	基于进程仿真的 ABMS 仿真调度策略	92
4.2.1	Agent 模型架构	92
4.2.2	基于进程仿真的 Agent 调度方法	94
4.2.3	Agent 状态更新	94
4.3	基于 ABMS 的体系仿真模型框架	95
4.3.1	仿真模型框架组成	95
4.3.2	基于进程的体系仿真模型调度	97
4.3.3	作战实体的状态更新	98
4.3.4	相关算法	99
4.4	决策行为进程	101
4.4.1	基本脚本的决策行为进程	102
4.4.2	无延迟操作和延迟操作	103
4.5	体系效能分析仿真平台原型	103
4.5.1	系统组成	103
4.5.2	系统启动	104
4.5.3	仿真想定模型	105
4.5.4	仿真运行	105
4.5.5	体系效能分析仿真应用开发过程	107
4.6	仿真示例	110
4.6.1	问题背景与想定	110
4.6.2	仿真想定	110
4.6.3	Agent 仿真模型开发	111
4.6.4	仿真结果分析	119
4.6.5	ISR 的影响分析	119
第 5 章	近正交拉丁超立方实验设计	123
5.1	典型实验设计方法	124
5.2	面向大规模影响因素的实验设计	127
5.2.1	仿真模型的数学描述	127
5.2.2	均匀设计	128
5.2.3	正交拉丁超立方矩阵	129
5.3	近正交拉丁超立方实验设计	132
5.3.1	改进正交拉丁超立方矩阵及评价准则	132
5.3.2	改善近正交拉丁超立方矩阵的正交性	137
5.3.3	近正交拉丁超立方实验设计算法	138
5.4	构建近正交拉丁超立方矩阵	140
5.4.1	变量数为 2~7 的 NOLH 矩阵	140

5.4.2	变量数为 8~10 的 NOLH 矩阵	144
5.4.3	变量数为 12~15 的 NOLH 矩阵	146
5.4.4	变量数为 17~22 的 NOLH 矩阵	148
5.4.5	构造二次实验	151
5.5	算法验证	154
5.5.1	近似正交矩阵 $(N_o)_{11}^{33}$ 第一次实验的回归分析	154
5.5.2	正交矩阵 $(O)_{11}^{33}$ 的实验回归分析	155
5.5.3	近似正交矩阵 $(N_o)_{11}^{32}$ 的第二次实验的回归分析	157
5.5.4	$(N_o)_{11}^{65}$ 实验	158
第 6 章	基于决策树的体系计算实验分析	160
6.1	研究现状	161
6.2	决策树算法基础	162
6.2.1	决策树生成	162
6.2.2	决策树剪枝	163
6.2.3	经典决策树算法	164
6.2.4	模糊集和粗糙集概念	166
6.3	基于模糊集的分类回归树算法	169
6.3.1	基于模糊集的 CART 算法	169
6.3.2	基于模糊集的加权 CART 算法	172
6.4	基于粗糙集的多变量决策树算法	174
6.4.1	多变量决策树算法概述	174
6.4.2	基于粗糙集的加权多变量决策树算法	177
6.5	算法性能分析与实验验证	178
6.6	相关工具介绍	180
6.6.1	JMP	180
6.6.2	SPSS 软件	181
6.6.3	R 语言	182
第 7 章	航母无人舰载机作战效能分析	185
7.1	研究背景	186
7.2	想定、模型和数据	187
7.2.1	使命想定	187
7.2.2	建模仿真需求	189
7.2.3	数据来源、模型抽象和假设	192
7.3	实验设计	193
7.3.1	可控因子	193
7.3.2	不可控因子	194
7.3.3	实验设计方案	195
7.4	Agent 仿真模型开发	196
7.4.1	仿真时间	196

7.4.2	作战组织	197
7.4.3	设备对象	197
7.4.4	环境对象	199
7.4.5	Agent 对象	199
7.4.6	交互数据	200
7.4.7	仿真运行初始化与结束处理	201
7.4.8	实体行为模型	209
7.4.9	仿真模型测试	214
7.5	问题分析	215
7.5.1	数据整合	215
7.5.2	数据分析	217
7.5.3	结论和建议	226
7.6	研究展望	227
7.6.1	研究结果对比	227
7.6.2	其他 NUCAS 想定	227
附录 A	缩略语汇总	229
参考文献		233

在构建适应信息化战争和履行使命要求的武器装备体系过程中，需要坚持体系建设思想，以作战体系的贡献率为评价标准，考虑和安排武器装备发展，强化顶层设计，搞好统筹兼顾，填补空白、补齐短板，以重点的突破来促进武器装备体系结构的完善和优化。那么什么是体系和武器装备体系？如何完善和优化武器装备体系呢？

1.1 体系与体系论证

1.1.1 体系

当前，国内外对体系及体系问题开展了大量研究，但是，对体系尚没有统一的概念和定义。在武器装备论证领域中，对于体系的认识和理解也存在很多的观点和描述。在美国国防部，体系被广泛地用于描述如何将许多武器平台、武器系统和指挥控制通信系统有机地结合起来，以完成某一作战目标。一般意义上，体系（System of Systems, SoS）属于一类特殊的系统。美国国防部《体系系统工程指南》中将体系列为一类特殊的系统。其中将系统定义为：

A functionally, physically, and/or behaviorally related group of regularly interacting or interdependent elements; that group of elements forming a unified whole.（在功能、物理和/或行为上相互交互和依赖的多个元素的集合所构成的一个整体。）

将体系定义为：

A set or arrangement of systems that results when independent and useful systems are integrated into a larger system that delivers unique capabilities.（一个体系定义为多个系统的集合和配置，这种配置使得当独立和有用的系统被集成为更大的系统时将形成特有的能力。）

在系统工程中，存在整体与部分的关系以及整体大于部分叠加之和等思想，同样体系和其中单个系统的关系也遵循同样的概念。体系虽然是一种系统，但不是所有系统都是体系。类似于不同版本的系统定义，在国内外众多的文献中也涌现出不同的体系概念，很多学者从特定的应用和视角对体系进行了定义和分析，我们也能从中更深刻地理解体系与系统的差异。表 1.1 给出了大量体系定义或描述中的 6 种典型定义。

表 1.1 体系的 6 种典型定义

语言 定义	英文	中文
定义 1	Enterprise systems of systems engineering (SoSE) is focused on coupling traditional systems engineering activities with enterprise activities of strategic planning and investment analysis	企业体系工程（SoSE）关注与企业战略规划相关的传统系统工程活动和投资分析的结合
定义 2	System-of-systems integration is a method to pursue development, integration, interoperability, and optimization of systems to enhance performance in future battlefield scenarios	体系集成是一个将开发、集成、互操作和优化等作为持续追求提升系统在未来战场行动中性能的方法
定义 3	Systems of systems exist when there is a presence of a majority of the following five characteristics: operational and managerial independence, geographic distribution, emergent behavior, and evolutionary development	与系统相比，体系呈现下列特点：运行与管理的独立性；地理上的分布性；涌现行为以及演化发展
定义 4	Systems of systems are large-scale concurrent & distributed systems comprised of complex systems	体系是由复杂系统组成的大规模并行和分布式系统

续表

语言 定义	英文	中文
定义 5	In relation to joint war-fighting, system of systems is concerned with interoperability and synergism of Command, Control, Computers, Communications, and Information (C4I) and Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR) Systems	对联合作战来说,体系关注指挥、控制、计算机、通信和信息(C ⁴ I)与情报、监视和侦察(ISR)系统的互操作及协同
定义 6	SoSE involves the integration of systems into systems of systems that ultimately contribute to evolution of the social infrastructure	体系工程就是把系统的集成变成最终支持社会基础设施发展演化的体系

上述体系的定义根据不同的背景和应用反映了体系的不同特点,虽然各有侧重,但都认为体系是由多个系统所组成的,是一类具有特殊性质的大系统。通过对体系问题的特征描述,可以使人们对体系的认识更加清晰明了,对军事领域的体系研究有着较好的推动作用。现有体系定义和准则存在较大差异的主要原因是,各研究者的研究对象处于不同层次和不同的角度。上述的体系描述是根据不同的研究对象所提出的,即使根据特征来描述体系的概念,它们也并不能准确地给出体系的确切定义。

在体系定义中, Jamshidi 的定义更具有典型性。随着体系研究的不断深入,同系统工程的发展一样,体系研究也在系统工程的基础上逐步向体系工程发展。2007 年和 2008 年,针对体系工程的发展, Jamshidi 主编出版了两部体系工程论文集。其中, Jamshidi 将体系总结为:

体系是大规模的系统集成,其中的系统自身具有异构性和运行上的独立性,但这些系统按照一个公共的目标被网络化地联系在一起。这些公共的目标可能与费用、性能、稳健性等因素相关。

体系一般具有以下一般特征:

- 包含大量的变量和元素。
- 元素之间具有丰富的交互关系。
- 难以确定属性及关联的涌现特征。
- 元素之间的交互属于松耦合交互。
- 与系统的确定行为相反,体系行为则表现出概率特征和不确定性。
- 体系会随时间发展不断进化和涌现。
- 体系中的子系统或实体会会有目的地追求不同的目标。
- 行为影响或干预会导致体系产生不同的结果。
- 会在系统边界和环境之间产生大量开放的资源转移。

1.1.2 武器装备体系

武器装备体系面向军事装备应用领域,国外文献一般使用军事体系(Military System of Systems)、联合系统(Joint Systems)或武器体系(Weapon Systems)等词组。自 20 世纪 90 年代以来,军事装备体系或武器装备体系研究引起了国内外越来越多的关注,但是对武器装备体系概念内涵的表述存在许多不同的观点。据不完全统计,国内关于武器装备体系