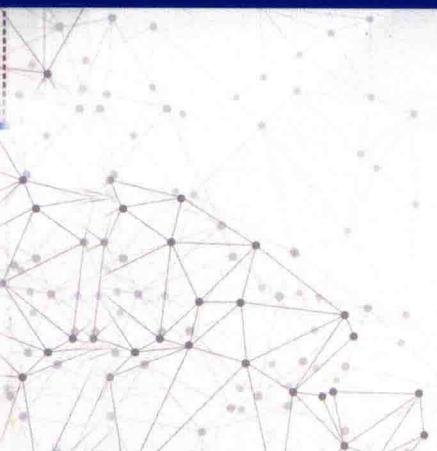




网络信息体系 能力演化分析方法研究

张婷婷 著

WANGLUO XINXI TIXI
NENGLI YANHUA
FENXI FANGFA YANJIU



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

网络信息体系能力演化 分析方法研究

张婷婷 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对当前网络信息体系构建过程中体系能力演化的有效建模与追踪问题,介绍体系能力演化分析方法与评估方案,为国防采办的决策过程提供可靠性分析手段。本书分为6章:第1章介绍网络信息体系的相关研究;第2章介绍网络信息体系演化机理;第3章介绍网络信息体系演化建模方法,抽象描述成员系统的行为变化及与体系的交互;第4章介绍网络信息体系结构优化算法和体系结构质量评估方法;第5章介绍网络信息体系结构演化动态仿真方法;第6章为战略预警体系分析案例。

本书适合从事系统科学领域的研究和教学工作人员、网络信息体系建设的参与人员、复杂大系统工程实践的工程技术人员及宏观体系的管理人员等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

网络信息体系能力演化分析方法研究 / 张婷婷著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-056566-2

I. ①网… II. ①张… III. ①计算机网络—信息网络—研究
IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 028939 号

责任编辑: 徐杨峰 张 湾 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

当纳利(上海)信息技术有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 10 月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 181 300

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

网络信息体系是近年来我国军事领域的研究热点。经过广泛的学术研讨，人们对其概念的认识不断深化。从广义上理解，网络信息体系是网络化、信息化的作战体系，是有中国特色的 C4KISR；从狭义上理解，网络信息体系是以网络中心、信息主导、体系支撑为主要特征的军事信息系统。该书将网络信息体系定义为多个 C4ISR 系统组成的系统，并从体系工程的角度探讨军事信息系统的设计与优化。实际上，C4ISR 系统本身就是一个集合名词，是由 C2、通信、计算、ISR 等类简单系统组成的复杂系统，其显著特点是非线性和涌现性。体系的整体性能或能力取决于其成员系统及其结构，且随时间、环境条件而动态演化，梅尔（Maier）曾将不断演化的发展过程定义为体系的五大特征之一。分析体系能力的演化规律，是学术界研究网络信息体系的重要内容。

演化（evolution）原指生物在不同世代之间的差异现象，以及解释这些差异现象的理论。生物的演化是物竞天择、适者生存的结果，主要机理是生物基因的遗传性，以及为适应环境或因物种间竞争而引发的变异。演化又称为进化，但严格来讲，演化有进化与退化双重含意。演化是一种不可逆的运动现象，是无序与有序、低度有序与高度有序、混沌态与平衡态之间的更替过程。演化的反义词是变革或革命（revolution），前者强调渐变，后者强调突变，前者强调连续与随机过程，后者强调断裂式创新、从头开始。显然，网络信息体系的整体能力只能是动态演化，虽然在演化过程中有可能生成新质战斗力，但不可能发生翻天覆地的变化。

鉴于演化概念源自生物体系，所以用遗传算法分析网络信息体系的能力演化也就顺理成章了。该书用不同染色体表示不同体系结构中成员系统及其接口关系，用遗传优化算法在体系结构空间中寻找最优染色体，即最佳的体系。鉴于优化的目标函数具有多元性，该书又运用多属性模糊评估算法，对演化后的体系质量进行定量的判定。此外，作者采用着色 Petri 网方法动态仿真体系的演化过程，为体系演化的分析评估提供了直观手段。这些都是该书的核心思想，也是作者的主要创新点。

该书是作者在博士论文基础上加工而成的，论文曾获中国指挥与控制学会首届“优秀博士学位论文”提名奖，并获得了 2017 年国家科学技术学术著作出版基金的大力资助。作为一名年轻教员，能有勇气向体系工程的理论高地发起冲

击，精神实属可嘉。在此我向作者表示敬意，并祝她在今后的学术研究中百尺竿头，更进一步。

中国人民解放军军事科学院系统工程研究院研究员
中国工程院院士

戴浩

2018年2月

前 言

互联网、物联网及信息的语义网等具有超复杂网络结构，广泛应用于城市信息网络、交通网络、航空航天系统、军队武器装备、指挥控制的各个应用领域和过程环节。超复杂网络系统的构建需要综合考虑诸多因素：它具有对不确定外部环境的适应性、鲁棒性和自适应性；成员系统在地域分布上具有广阔性，在功能上具有多样性、灵活性；系统模块具有松耦合性、相对独立性。超复杂网络系统具有体系的特征。

系统科学认为复杂网络系统的演化性表现为系统随时间发生的变化，其在结构、特性、行为和功能发生变化的主要原因有两个：①复杂系统的构建是反复迭代和渐进的过程，其发展受自身结构及研发生产、维护能力、经费保障等多种因素的制约，系统内各组成元素经历从无到有的形成过程，从不完整到完整的进化，以及从有到无的退化等一系列现象，同时面临技术革新及系统升级的需求。②复杂系统的建设需要集成现有孤立系统，实现系统间的互联与互操作，衍生新的能力，形成更加有效的系统能力。但是，局部系统地域分布广泛，隶属于不同建制的部门，具有完整功能的独立系统，它们的目标和复杂系统的目标不尽一致，驱使系统做出决定是否要参与到复杂系统当中去。

复杂系统的涌现性表现为系统通过自身反复工程迭代以逐步实现最大化的整体效能，协调成员系统之间的组合，产生“ $1+1>2$ ”的整体层面的效能。如何刻画演化对复杂系统的影响及涌现性关系成为问题的关键。复杂系统主要由成员系统的功能、系统间接口所形成的系统功能聚合，形成的体系结构决定复杂系统的功能，功能决定了复杂系统的能力。通过体系结构变化来研究复杂系统层面能力的变化及演化。本书认为造成体系结构演化的原因是复杂系统通过自身不断的工程迭代逐步实现能力最大化，其结构受外界环境、任务需求变化、系统的参与和协作的影响，受资金、信息技术的约束。通过观察发现，体系结构的演化会牵引出复杂系统能力相关特性的变化，复杂系统中个体的微小变化可能导致系统的重大变化。

如何分析具有演化性的复杂系统构建？从纵向角度分析领域问题的描述，构建“集成系统-系统-子系统”模型，利用计算机仿真方法模拟复杂系统的个体行为及在虚拟环境下中的互作用、演化，让系统的复杂行为自下而上地“涌现”出来。这种仿真的困难在于计算的空间和时间复杂度高，涉及的要害过于复杂。另

外,目前的复杂系统规划策略缺乏对子系统是否参与复杂系统构建的影响进行建模的方法,很难实现复杂系统设计的最优化。因此,本书期望提出简单、快捷的复杂系统结构演化和能力演化的分析方法。

军事领域中有广泛的超复杂系统应用,在当前新军事变革下,各国都在建设自己的军事信息体系。2012年9月,美军发布《联合作战顶层概念:联合部队2020》,其核心是实施“全球一体化作战”,该作战概念中任务式指挥等关键能力本质上是网络中心战理念,在全球、全域实施联合作战。“全球一体化作战”高度依赖于全球的信息和网络。2013年1月,美军发布了《联合信息环境》白皮书,提出建设联合信息环境,实现美军的作战人员能够通过任意设备、在任意时间、全球范围的任意地点(三个任意)迅速而坚定地执行多样化任务。我军于2014年提出网络信息体系的概念及基本构想,构建未来军事领域的信息体系,按照一体化思路以网络为中心,将探测装备、指挥系统、信息化武器等各类作战资源联为一体,以信息为主导,进行相互融合和全网共享,解决全网资源的优化调度、自主协同与能力聚合,实现资源共享和增值服务,实现能力最大化。从系统科学的角度看,网络信息体系是典型的“开放复杂巨系统”,与传统武器装备系统相比具有体系工程特征。2018年十九大报告再次强调我军要提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力。构建我军的网络信息体系已迫在眉睫,急需相关的技术与理论给予支撑。

与传统的复杂军事信息系统相比较,网络信息体系内涵发生了根本变化,系统结构 and 应用环境的动态变化造成系统边界的模糊性和不确定性,系统任务需求、组成单元、总体架构、支撑技术处在不断演化之中,网络信息体系结构演化和能力涌现特性较为突出,需要提出新的体系结构演化分析方法来预测和掌控网络信息体系构建过程中的能力涌现。以美国为首的军事强国已经敏感地认识到这个问题,近年来开始全力探索和研究以体系工程为代表的系统科学新方向。目前我军还未见有研究,期望通过对网络信息体系结构演化分析方法的研究,给出复杂系统演化分析的新方法。

综上所述,本书从“体系结构最优化、体系能力最大化”这一需求出发,基于网络信息体系结构设计应用,讨论动态环境、动态系统条件下体系结构演化分析问题。首先,需要归纳出能够分析网络信息体系结构演化的问题。结构演化涉及的核心演化要素是什么?要素之间有什么关系?如何建立结构演化核心要素模型?其次,分析体系结构演化机理是什么?包括演化的动因、演化的约束、演化的目标。建立体系结构演化机理分析模型,发现网络信息体系结构演化的动力学机制,建立体系演化过程模型、系统行为模型。构建网络信息体系结构与体系能力之间的映射关系,为分析网络信息体系结构演化对体系能力的影响建立基础。为了掌握体系层面因结构演化造成的体系能力的涌现,设计网络信息体系能力聚合层

次结构。最后,实现一种网络信息体系结构二进制码的数值描述方法,该数值作为输入参数,通过体系结构演化优化算法的计算,输出演化后的体系结构,给出一种从体系结构到体系能力的质量评估方法,实现对演化后的体系结构的评估。

本书的研究问题有着较强的学术价值和应用前景。一方面,复杂系统的体系结构演化量化问题是学界亟待解决的难题。体系结构的迭代演化描述方法正处于起步阶段,其定义、演化机理描述方法、演化过程描述方法都未成熟,其动力学机制问题研究的机遇和挑战并存。演化过程中对体系结构优化问题,未见国内外其他学术团队或高校在“从演化角度对体系结构进行多目标优化”这方面的研究成果。另外,在复杂系统背景下,随着机器学习、复杂网络等相关领域的发展,越来越多的体系演化迭代分析应用到如社会网络分析、生物系统、军事复杂系统等诸多领域中。体系结构演化分析方法有着非常广泛的应用领域,研究支撑结构演化分析模型运行的体系结构演化分析平台有着广泛的应用前景。通过分析发现,军事领域的网络信息体系演化特性明显,体系构建需求数据丰富,为了更清晰地对体系演化进行研究,本书的研究落点于复杂系统体系演化分析方法在网络信息体系的应用。

本书仅仅是系统总结了作者前期的研究成果,为本领域的研究工作提供部分研究思路,为参与网络信息体系的建设者和其他体系工程实践人员提供可行的操作方法。在本书的成稿过程中,还存在诸多方面的缺憾,如关于网络信息体系构建过程中的体系与系统间的博弈问题和体系演化的轨迹问题没有涉及,在能力涌现分析的研究上不够深入。本书之所以把诸多缺憾留给读者,主要是抛砖引玉,为本领域的研究提供方向。另外,也激励我进一步地深入展开研究,早日形成更完善的版本,以谢读者。我期待您给予我指导与支持,也渴望您通过本书去挖掘体系工程领域的“金矿”,为本领域的发展贡献您的成果,并对网络信息体系的构建提供思路和方法。



2018年4月30日

目 录

序	i
前言	iii
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 体系概念的研究	3
1.2.2 体系设计方法	6
1.2.3 体系演化特性分析研究	8
1.2.4 体系演化建模仿真方法	9
1.2.5 体系演化度量方法分析	13
1.2.6 体系结构设计与优化方法	14
第 2 章 网络信息体系演化分析框架	16
2.1 引言	16
2.2 网络信息体系及演化概念和特征	16
2.2.1 网络信息体系的概念及特征	16
2.2.2 网络信息体系演化的概念与定义	21
2.2.3 网络信息体系演化的特征	21
2.2.4 网络信息体系能力的概念	26
2.3 网络信息体系演化模型	27
2.3.1 体系演化要素	27
2.3.2 体系演化要素之间的关系	31
2.3.3 体系演化机理分析	34
2.4 网络信息体系演化分析方法	37
2.4.1 体系结构演化分析方法	37
2.4.2 体系能力演化分析方法	39
2.4.3 体系演化分析层次	41

第3章 网络信息体系演化建模方法	45
3.1 引言	45
3.2 体系层次模型建模方法	45
3.2.1 体系层次分析	45
3.2.2 基于能力聚合的网络信息体系层次模型	47
3.2.3 网络信息体系层次模型形式化定义	49
3.3 体系演化模型建模方法	52
3.3.1 体系演化模型定义及假设	52
3.3.2 网络信息体系演化约束条件描述	53
3.3.3 网络信息元体系结构建立与选择	54
3.3.4 网络信息体系演化动因描述	55
3.4 网络信息体系演化过程建模方法	57
3.4.1 初始网络信息体系	57
3.4.2 引导网络信息体系分析	59
3.4.3 网络信息体系结构发展和演化	60
3.4.4 计划网络信息体系更新	61
3.4.5 实现网络信息体系更新	61
3.4.6 下一波网络信息体系演化分析	62
第4章 网络信息体系演化度量与优化方法	63
4.1 引言	63
4.2 体系演化度量模型	63
4.2.1 参数定义	63
4.2.2 演化度量模型形式化描述	65
4.2.3 度量模型算法	68
4.3 体系优化评估算法	68
4.3.1 问题描述	68
4.3.2 多目标优化策略	69
4.4 网络信息体系演化评估方法	77
4.4.1 模糊综合评估的数学模型介绍	77
4.4.2 网络信息体系质量多属性模糊评估体系	78
第5章 网络信息体系结构演化仿真模型的生成方法	84
5.1 引言	84
5.2 CPN 方法	84

5.2.1	Petri 网及 Petri 网系统的定义	86
5.2.2	Petri 网扩展描述	87
5.3	网络信息体系结构演化的 Petri 网模型构建过程	88
5.3.1	体系结构模型的转换规则	90
5.3.2	体系演化模型的转换规则	91
5.3.3	体系结构演化复杂度描述方法	92
5.4	网络信息演化策略分析仿真案例	94
5.4.1	海面舰艇防御体系功能描述	94
5.4.2	模型的动态演化 CPN 模型	95
5.4.3	SWS 体系性能仿真分析	98
第 6 章	综合应用案例研究分析	101
6.1	引言	101
6.2	案例背景介绍	101
6.3	战略预警体系模型描述	101
6.3.1	体系能力描述	102
6.3.2	规划的未来战略预警能力需求	103
6.3.3	系统能力与体系能力相互关系描述	104
6.4	战略预警体系结构优选	107
6.4.1	优化染色体	110
6.4.2	接口关系生成	111
6.4.3	演化过程仿真实验	113
6.5	战略预警体系评估分析	116
6.5.1	体系评估属性	117
6.5.2	演化过程评估分析	118
	参考文献	124
	致谢	133
	后记	134

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

由于技术手段的不完备和管理体制的局限性，早期的 C4ISR (command, control, communication, computers, intelligence, surveillance and reconnaissance) 系统是烟囱式的^[1]，20 世纪 90 年代海湾战争的爆发暴露出各军兵种“烟囱式”系统不能互联互通、不具备互操作性等诸多问题，美军开始建设全军一体化的指挥信息系统，实行统一规划和分散建设相结合的管理体制，并且一直沿用至今，逐步取得了世界领先的地位。

随着网络技术的发展，网络中心化已经成为信息化条件下联合作战的核心。美军在“2020 年联合作战构想”中提出 C4ISR 系统的构建需要符合联合作战任务要求^[2]，要向网络化、体系化方向演化，能够快速应对使命任务的变化，以作战目标为中心，通过对作战资源的充分共享和聚合，实现 C4ISR 系统资源的统一调度与使用。为支持跨区域、跨军兵种的快速响应、协同作战和灵活柔韧，对 C4ISR 系统的构建从指导思想、实现途径和能力建设方法等方面提出了新的要求。联合作战已经跳出各作战单元局部对抗的范畴，是整个作战体系之间的对抗，要求指挥决策必须从战略全局出发，使诸兵种、诸战场、诸系统的作战力量有机结合，最大限度地发挥出整体效能，协调一致地夺取胜利。这就需要重构各指挥信息系统和武器装备原有的隶属关系，在统一的指挥控制下打破既有建制，实施最佳组合，充分发挥各个作战要素的功能，产生“1+1>2”的打击效能^[3]。

新军事模式下，我军目前提出网络信息体系的概念，要求对网络信息体系的建设要有全局意识，建立一种体系视角，从陆、海、空、天、电五维空间进行建设和整合，将探测装备、指控系统、信息化武器等各类作战资源融为一体，以信息为主导，进行深度融合、全网共享，解决全网资源的优化配置、自主协同与能力聚合，实现资源共享和增值服务，实现能力最大化，实现信息体系由“以平台为中心”向“以网络为中心”的转变。与过去传统的指挥信息系统相比，此时的网络信息体系的内涵发生了根本变化，是典型的“开放复杂巨系统”，与传统的网络信息系统相比，它地域分布广、成员系统灵活高效、相对独立、具有涌现性和演化性等体系工程特征。

目前，我军指挥信息系统已初步统一了技术标准，配发了一大批系统骨干装备，基本建成了能够覆盖东南沿海和首都防空区等重点方向的应急作战部队，涵

盖预警探测、情报侦察、指挥控制、通信导航和战场环境信息保障,实现了跨军兵种信息系统的互联互通和简单的互操作。同时,针对特定使命任务和典型作战指挥体制,初步形成了包括中央军委联合作战指挥中心、作战集团(集群)、参战部队的三级系统装备体系^[4]。指挥信息系统的互联互通技术问题已基本解决,但对于网络信息体系的构建仍然面临着一些问题。

一是存在系统融合的问题。在指挥信息系统“烟囱”林立的时代,各个部门各自建设了大量的信息系统,有许多为重复建设。站在体系武器装备采办的角度,为了避免浪费,网络信息体系的建设需要把现有的孤立的系统进行集成,要求与其他系统进行互联互通操作,从而衍生新的能力,形成更加有效的指挥控制信息体系。这些系统地域分布广泛,而且隶属于不同建制的部门,都是具有完整功能的独立系统,它们各自都有需要完成的目标任务,而其中的一些目标和体系的目标不尽一致,这些系统层面的问题驱使系统做出决定,是否要参与到体系当中去。目前的体系建设策略缺乏对成员系统参与体系构建对体系全局效能的影响进行建模的方法,从而很难实现复杂系统设计的最优化。

二是存在体系演化的问题。体系的发展受自身结构及研发生产、维护能力、经费保障等多种因素的制约,在建设过程中呈现出渐进式发展的特点,体系内各组成元素存在着从无到有的形成过程、从不完整到完整的进化及从有到无的退化等一系列现象,建成以后由于技术的革新及系统的升级面临满足新版本的需求。这样看来,网络信息体系的构建是一个反复迭代的过程,其中一个显著特征是持续演化性,并且在体系演化的过程中涌现新的能力,逐步实现体系优势。在实践中发现,有些涌现行为与特性是有害的、设计之外的、非预期的和非期望的消极涌现。网络信息体系演化是一个非线性系统行为,不存在一个重复的、可预测的因果关系链。因此,如何使体系积极涌现最大化、消极涌现最小化是体系演化过程管理面临的一个突出问题。

三是成员系统存在优胜劣汰的问题。在网络信息体系建设规划问题上面临对系统的选择。例如,确定保留和继续使用的系统、更新的系统,增加新系统及淘汰不适宜的系统。复杂系统理论和系统工程理论默认系统是确定不变的,无法解决当系统更新迭代时体系的构建问题。

目前国际上对于体系建设主要采用美国国防部体系架构框架(DoDAF)分析方法^[5],这种框架从业务、系统和技术的角度来描述系统结构。此类方法聚焦于如何定义和开发体系结构,很少考虑到体系的动态演化及系统在决策和交互过程中的涌现行为。对于某一成员系统的参与与否对体系全局效能造成的影响缺乏掌控,缺乏这些能力就难以实现体系设计的最优化^[6]。在体系演化发展过程中要处理环境(如安全威胁、作战任务)的发展变化,体现出越来越强的动态性。如何满足环境变化的需求,保证体系能力在动态过程中按照预期目标发展,控制整个

体系能力发展轨迹等,都是目前体系规划和管理中面临的难点问题。

只靠“目测”来决定体系的设计或者靠不断的纠错来提高设计质量,必将导致人力、物力、财力的大量浪费,特别是演化活动的延误。因此,需要从体系演化视角出发,除了关心自身和成员系统的资金、进度安排及可能实现的能力外,还要关心其他方面的问题,如体系高层的、非线性的、组合的属性。这些属性包括总体可负担性、成员系统间连接在体系层面的涌现性、成员系统参与与否对体系能力实现的关联关系等。针对这些问题需要对体系演化行为进行建模,从而对所有可行的体系设计有一个清晰的认识,并且能够在可行设计中做出权衡选择,分析判断体系演化行为将会带来的影响^[7-10]。

1.2 国内外研究现状

关于体系的研究内容也呈现出多样化的发展趋势。总地来看,体系的主要研究内容包括体系建模与仿真、体系实验设计和验证、体系的度量评估、体系的定义和演化、体系的涌现等。从近年来国内外公开发表的有关体系的资料来看,目前关于体系的研究热点主要集中于体系概念的研究、体系设计与优化方法研究、体系演化特性分析研究、体系演化建模仿真方法研究、体系演化度量方法研究、体系仿真测试环境研究。

1.2.1 体系概念的研究

体系(system of systems, SoS)也称为系统的系统,是一个分布式计算机集成系统组合,其特征是组成体系的单独系统在操作和管理上是独立的,同时系统之间也是互相影响的^[11],具有演化特性^[12]。实际上体系已存在不同的领域,如航空体系、网络信息作战体系和通信网络^[13-14]。如今在生物学、医学、天文学、社会科学和国防领域等都涉及体系问题,目前体系问题是系统科学的一个重要研究方向。但是至今在体系概念和定义方面没有一个统一明确的描述,有文献可查的定义就有41种^[15-16]。

对于“体系”内涵的解释,《现代汉语词典》中提到体系是相关事物或相关意识构成的一个整体。《苏联百科词典》将体系划分为物质和抽象两个方面,是相关元素的集合,该集合中的元素之间有着关联关系。

美国芝加哥大学的B. J. L. Berry在1964年的一篇论文中最早提到体系^[17],英文名称为system of systems,用来讨论城市建设系统中的系统,这一提法后来用在许多科学领域。系统科学体系工程协会主席(SoSECE) J. R. William指出体系主要用于研究超大系统或者超复杂系统,是对系统科学研究的发展和分化^[18]。20世纪40~50年代,

系统科学研究对象为一般系统、系统控制与系统动力学。50~80年代,系统科学研究对象分为软系统方法和硬系统方法,软系统方法研究系统管理、社会系统、生物和生态系统、非线性系统,硬系统方法研究系统工程、系统分析与控制、线性系统、耗散系统。90年代至21世纪初,系统科学研究对象为大规模系统、超复杂系统。

最初对体系的理解是在系统集成研究基础上发展而来的,认为体系有六个基本特征^[19-20]:

- (1) 构成元素是一些具有独立建设和发展权力的成员系统。
- (2) 各成员系统之间开发的时间阶段是任意的,没有关联性。
- (3) 成员系统虽然是独立存在的,但构成体系时成员系统必须存在一定规则的依赖关系。
- (4) 从体系的角度看,成员系统的能力应能支撑体系的能力构建。
- (5) 体系目标优化不是简单的各个成员系统的目标优化,两者之间没有必然关系。
- (6) 体系使命任务的完成依赖成员系统共同具备相互合作的能力。

Norman认为,体系具有动态性和复杂性。体系是动态环境中交互系统的集合。动态影响体系的环境分为两种:一是外部环境,即整个体系所处的环境;二是内部环境,即成员系统行为对体系的影响。

Maier认为,与复杂大规模单一系统相比,体系还具有其他特性^[21]:

- (1) 体系演化不是以确定的形式存在的。体系随着使命任务和环境变化会造成体系功能、结构等形式的演化。
- (2) 体系具有渐进开发与整体涌现的行为特性。

另外还有一些代表性的定义,是Kotov、Pei、Sage、Cuppan、Keating、Kaplan等研究人员根据各自不同的背景领域给出的^[22-28]。

随着军事科技的发展,体系的概念也被应用于军事领域。美国军方首先提出了体系的概念。美国应用物理实验室(the USA Applied Physics Laboratory)认为^[29-30],军事领域的体系是各个军事实体的联合体,使得整个体系的能力大于实体能力之和^[31]。2007年,美国参谋长联席会议主席签发了《联合能力集成与开发系统》(*Joint Capabilities Integration and Development System*)手册,认为体系基于使命任务的能力需求,将相关系统进行连接,使得系统间建立相互依赖的关系,从而使体系的效能依赖于这些成员系统的功能及系统间连接关系构成的涌现能力^[12, 32],认为复杂系统与体系虽然都具有复杂性和涌现性,但是存在本质的区别。虽然复杂系统中的子系统存在复杂的交互,但子系统之间的行为有其固定的模式。而体系是在网络环境中动态演化的,成员系统的自主性行为促成体系整体目标的实现,它通过网络中心的体系结构在成员系统间动态建立连接^[33]。

美军和我军近期都提出网络信息体系的概念。网络信息体系是以网络为中心,

将探测装备、指挥系统、信息化武器等各类作战单元联为一体,以信息为主导,进行相互融合、全网共享,最终形成一体化联合作战体系能力^[34-36]。同时,它也应该包括相关的标准规范、条令条例及组织机构、人的行为等管理要素。2012年9月,美军发布了《联合作战顶层概念:联合部队2020》^[37-38],其核心是实施“全球一体化作战”,该作战概念中的任务式指挥等关键能力本质上是将网络中心战理念拓展到全球、全域实施联合作战。2013年1月,美军发布了《联合信息环境》白皮书^[39],提出通过建设联合信息环境使美军的作战人员能够基于任意设备、在任意时间、在全球的任意地点(三个任意)迅速而坚定地履行多样化任务。

综上所述,体系的定义存在两个层次的界定^[40]:一是体系层的概念特征;二是体系组成系统或者说子系统层的特征。两个层次上的特征可概括如下:

(1) 体系层的特征包括规模性和复杂性、高度灵活性、动态演化性、地理分布性、可变性和涌现性等。

(2) 子系统层的特征包括异构性、独立性(如规划、运行与管理的独立性)、自相容性、地理分布性、自主性、支配性、嵌入性、多域性、背景性、概念框架的差异性、面向任务性、专用性、同步性、重用性和复杂性等。

前面提到的体系定义都具有专业性和领域性,到目前为止,体系还未有一个统一明确的定义。同时,体系相关问题的研究尚在探索初期,以至于还不能有一个共同接受的看法。目前我军指挥信息系统正在进行网络化、一体化建设^[41],逐渐形成体系特征,利用系统科学解决网络信息体系建设中的一些问题,是我军建设发展的重要研究课题。

现在许多领域对复杂系统的开发与建设需求是不断变化的,这就需要以体系的视角去解决这些问题,而体系的许多问题是原有系统工程方法解决不了的,主要表现在需求分析、资源分配、集成交互和动态演化几个方面^[42]:

(1) 体系的需求分析远远超过了系统工程需求方法所能承受的规模。

(2) 构成体系的系统都是根据独立的需求进行开发的,系统间相互协作和依赖关系的大大增加,为集成和开发带来了新的挑战。

(3) 体系是复杂开放系统,所处环境和任务需求处于变化中,而系统工程问题是由边界确定的。

(4) 系统工程考虑单系统问题,而体系是多系统集成问题。

基于此,有学者提出了体系工程(system of systems engineering, SoSE)方法^[43-44],21世纪初这一方法被逐步接受并成为研究热点,并成立了体系工程研究机构,目前国际电气与电子工程师协会体系工程委员会(IEEE System of Systems Engineering)和系统工程国际委员会(International Council on System Engineering)是两家知名的体系工程研究机构,另外,还定期举办体系工程国际会议^[45],创办 *System of Systems Engineering* 期刊等。研究人员开展了一系列的理论研究与工程实践活动,

包括美军未来作战系统 (future combat system, FCS) 的全新设计与实现, 美海岸警卫队深海作战系统的一体化改进, 战区弹道导弹防御系统 (theatre missile defense system) 的建设等^[46-48]。体系工程主要解决体系构建与体系演化问题, 与系统工程过程的以“功能”为核心不同, 体系的构建过程以构建体系“能力”为核心。因此要求体系演化的过程是权衡能力构建方案的过程。由于体系在演化过程中会出现成员系统的淘汰和新增, 体系工程需要解决体系边界的不确定性问题。但在这一领域仍然没有形成一套知识体系, 缺乏公认的、普遍接受的方法^[49]。在借鉴国外先进思想与方法的基础上, 结合我军信息系统构建的具体情况, 本书旨在提出符合网络中心化网络信息体系研究的理论、方法和相关工具。

1.2.2 体系设计方法

为了搞好顶层设计规划, 美国政府各部门提出了体系结构框架, 先后发布了 C4ISR AF 1.0^[50]、C4ISR AF 2.0^[51]、DoDAF 1.0^[52]、DoDAF 1.5^[53]、DoDAF 2.0^[54] 等多个版本的体系结构框架^[55-56], 实现跨领域、跨项目设计成果的集成和比较, 各业务部门通过建立满足自身需求的体系结构框架来开展体系设计, 建设了核心体系结构数据模型 (core architecture data model, CADM)、通用联合作战任务清单 (unified joint task list, UJTL)、DoDAF 数据元模型 (data meta-model, DM2) 等通用设计参考资源。同时, 结合上述体系结构框架, 形成了结构化、面向对象、基于活动、以数据为中心的多种设计方法, 并成功应用于全球信息栅格 (global information grid, GIG)、FCS 等工程建设中。以海军协同工程环境 (naval collaborative engineering environment, NCEE) 等建设为重点, 为开展信息系统顶层设计提供技术手段保障。NCEE 充分运用体系工程思想^[57], 基于 DoDAF、统一建模语言 (unified modeling language, UML)、系统建模语言 (systems modeling language, SysML) 等建模方法和系统结构 (system architecture)、软件变更管理工具 CORE、需求管理工具 DOORS 等设计工具, 以设计数据共享为目标, 通过网络集成需求管理、功能分析、任务分析、体系结构、仿真设计等设计工具而实现一体化, 支持开发人员、采办人员分布式协同设计, 具备体系结构、特定应用领域、部队系统集成和互操作性的分析、设计、评估能力^[58]。

受美军影响, 其他国家也逐步认识到体系结构的重要性, 纷纷开展了相关的研究工作。英国国防部参考 DoDAF 1.0 并结合英国国防部自身特点制定了国防部体系架构框架 (Ministry of Defence Architecture Framework, MoDAF)^[59]。北大西洋公约组织 (简称北约) 对其体系结构框架进行了重大调整, 以各国的成功案例为基础, 将框架的适用范围扩展到指挥控制通信 (communication, command and control, C3) 系统以外的所有领域。2007 年, 发布了《北约体系结构框架》3.0 版^[60]。挪威陆军装