

学 术 著 作 丛 书

C^3I 系统理论基础

C^3I 系统建模方法与技术

罗雪山 张维明 等著



XUE SHU ZHUO CONG

国防科技大学
学术著作专项
经费资助出版

C^3I 系统理论基础

C^3I 系统建模方法与技术

罗雪山 张维明 邱涤珊 著
罗爱民 饶先宏 曾 熠

国防科技大学出版社
湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

C³I 系统理论基础——C³I 系统建模方法与技术/罗雪山等编
著. —长沙:国防科技大学出版社,2000. 4

ISBN 7-81024-602-X

I. C… II. 罗… III. 指挥通信-指挥系统,C³I-建立模型
IV. E96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76125 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@ public. cs. hn. cn

责任编辑:文 慧 责任校对:黄 煌

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:12.625 字数:317 千

2000 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-2000 册

*

定价:20.00 元

前 言

实践证明,现代战争已不是硬武器的简单对抗,也不是单项武器装备或单一兵种的对抗,而是诸军兵种协同作战的系统对抗,是整个作战体系的对抗。传统的人工指挥手段已远不能适应现代战争的需要,指挥自动化系统(简称 C^3I 系统)是现代战争和科学技术进步的产物。时至今日, C^3I 系统已成为衡量国家军事实力的重要标志,是国家威慑力量的重要组成部分,因此越来越受到各国政府和军队的高度重视。建设 C^3I 系统,实现指挥控制手段的自动化,是我军现代化建设的重要内容。

近十年来,随着 C^3I 系统和相关支持技术的发展, C^3I 系统的开发越来越需要理论的指导。由于 C^3I 系统的开发和建设需要投入的资源巨大,对于我国来说,要将有限的资源最好地发挥作用,就更需要在 C^3I 系统理论的指导下进行 C^3I 系统的开发和建设。 C^3I 系统理论研究的重要内容之一就是建立系统模型,用以理解、分析、评价和优化系统,指导 C^3I 系统的发展及开发。建立 C^3I 系统模型是进行其它理论分析工作的基础。

C^3I 系统建模理论、方法与技术所涉及的学科内容多,作为整体来说又是一个很新的领域,而且发展非常迅速,目前国内尚没有一部能全面、深入阐述与 C^3I 系统相关建模理论方法的专著。本书是在作者多年来对 C^3I 系统建模理论与方法研究的基础上,针对 C^3I 系统建模理论、方法与技术研究而撰写的。本书从 C^3I 系统所支持的军事指挥控制过程以及 C^3I 系统系统全生命周期的角度出发,提出了各环节、各阶段可能遇到的建模理论问题,并对其进行深入探讨,其中重点介绍了 C^3I 系统的建模理论、方法与技术,

以及C³I系统的仿真、C³I系统评价等的理论和方法等与C³I系统建模理论方法密切相关的问题。

全书共分为六章,由罗雪山、张维明、邱涤珊、饶先宏、罗爱民和曾熠同志共同编著,罗雪山负责全书的组织、规划和统稿。本书的内容包括作者十几年的研究成果和国内外在该领域的最新研究成果,它系统地论述了C³I系统建模的基础与技术问题,对C³I系统理论发展和C³I系统的研究开发有较大指导意义。本书可供从事C³I系统需求研究、系统分析设计、系统开发建设和系统使用维护的技术人员使用,同时也可作为高等院校指挥自动化系统及相关专业的高年级本科生和研究生教材。

本书中的研究内容得到“八五”、“九五”国防科技预研项目、国防预研基金项目经费的资助,编写工作得到国防科技大学C³I系统研究中心的老师以及国防科技大学出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,同时,C³I系统理论尚在形成之中,书中不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

罗雪山

1999年11月于长沙

第一章 C³I 系统建模理论方法概述

1.1 C³I 系统理论与 C³I 系统模型

目前,称之为“力量倍增器”的 C³I 系统越来越受到各个国家与军队的重视,我国对 C³I 系统的投资规模也越来越大。人们通过多年的实践认识到,C³I 系统的进一步发展迫切需要理论指导。但是,目前在 C³I 系统的建设中存在的突出问题是缺乏一种系统的理论来指导 C³I 系统的建设与实践。这是因为 C³I 系统是一个复杂的人机大系统,目前在国内外还没有现成的理论能对这样的复杂人机系统进行描述与分析。因此,近年来国内外都开始重视对 C³I 系统理论的研究,我国从“七五”计划就开始了 C³I 系统理论的研究。C³I 系统理论研究的目的在于探讨各种用于表示、理解、分析、设计、评价、管理和综合 C³I 系统的思想、理论、方法和工具,并将其应用在实际的 C³I 系统建设中。

1.1.1 C³I 系统理论研究概况

C³I 系统的理论研究工作开始于 20 世纪 70 年代末,1978 年美国国防科学委员会(Defense Science Board)建议美国国防部:“国防部应该设置相应的关于指挥控制概念、设计和系统行为研究和验证的研究项目,以便为指挥控制系统的革命提供指导。”当时这个委员会由 Solomon Buchsbaum 博士领导,由许多有经验的 C³I 专家组成,它对美国的 C³I 系统发展提出了不少建议。此后,在美国国防部的支持下,许多专家学者从不同的角度探讨了 C³I 系统

的理论问题,并相继出版了一些论文集和专著。美国麻省理工学院(MIT)和海军研究办公室(ONR)联合举办的C³I系统专题讨论会(MIT/ONR Workshop on C³ Systems)和美国武装力量通信电子协会(AFCEA) EUROPEAN SYMPOSIUM 是两个有代表性的C³I系统学术交流会,MIT/ONR Workshop 后来又演变为 the Basic Research Group of the Joint Directors of Laboratories 和 National Defense University 联合举办的C² Research 学术会议系列。除此之外,有关C³I理论的论文还在IEEE的会刊和AFCEA的《SIGNAL》杂志上时而出现,一些出版社还出版了一些C³I系统工程与理论方面的专著。C³I系统理论研究是在1979年第一届MIT/ONR举办的C³I系统专题讨论会上正式提出的,经过十几年的努力,不仅形成了C³I系统理论研究的一些队伍与研究组织,有人还从多渠道探讨了C³I系统理论和理论体系,并取得了一定的进展。

C³I系统理论与理论体系包括概念、假定、公理、定理、验证方法等系统的知识体系。建立C³I系统理论体系的目的是使人们在其体系范围内运用相应的思想、理论、方法、工具与手段表示、理解、分析、综合、优化、开发与评价C³I系统。目前,从国际上看,尽管从1979年以来已经出现大量的关于C³I系统的综合性思想、理论与方法的研究,有些已经得到广泛的应用,但这些研究从总体上看是零散的,尚未形成C³I的理论体系。C³I系统理论的进展之所以如此困难,主要是因为C³I系统是一个复杂的人机系统,而且它在地理上是分布的,并处于对抗环境之中。

C³I系统理论研究是从局部与全局两个方面展开的。由于现在C³I系统理论处于初级阶段,因此从各个局部入手开展的研究工作占主流,从目前的研究来看,“蜻蜓点水”式的居多,真正形成理论体系或有较成功应用的成果较少。

C³I系统理论研究的重要内容之一就是建立系统模型,用以

理解、分析、评价和优化系统,指导系统的发展规划及开发。建立系统模型是进行其它理论分析工作的基础。

1.1.2 系统模型与系统建模的一般概念

一、系统模型

什么是模型?对此尽管没有统一的定义,但通常我们认为,如果把现实世界中的某个事物视为一个现实原型,那么模型就是对这种现实原型的一种抽象或模拟。这种抽象或模拟不是简单的“复制”,而是强调原型的本质,扬弃原型中的次要因素。因此,模型既反映原型,又不等于原型,或者说它是原型的一种近似。例如,地球仪就是对地球这一原型的本质和特征的一种近似和集中反映的模型。因此,系统模型简单地讲,就是把实际系统或待开发系统按照分析目标对系统进行的抽象和简化。也就是说,系统的模型是按系统的研究目的,以相似理论为指导,由原系统或假定系统抽象而得到的一种系统描述。根据抽象的程度,模型可分为不同的层次。

按照这种说法,模型的意义是很广泛的。自然科学和工程技术中的一切概念、公式、定律和理论都是某种现实原型的模型。社会科学中的学说、原理、政策,乃至文学作品、美术作品、表格、语言等,也都是某种现实原型的一种模型。例如,牛顿第二定律是,物体在力的作用下其运动规律这个现实原型的一种模型;计算机是人的某些功能或智能这个现实原型的一种模型。真实世界是复杂和动态的,我们不可能,也不需要掌握它的每一个细节,因此,研究真实世界的方法是:针对人与外部世界的相互作用,在科学的基础上建立问题空间的“形式”模型,用这一形式模型来反映和描述所要解决的真实问题。科学研究的绝大部分工作就是建立对问题的形式化模型。例如,自然科学是通过对大自然的观察和试验,总结、提炼出对客观事物的抽象表示方法和定律。这些方法和定律是已被

证实的对事物表述的“形式化”模型。

人类认识世界和改造世界的过程首先是建立模型和分析模型,然后根据分析的结论去指导人类的行动,即:

- 建立模型。通过对客观事物建立一种抽象的表示方法,用来表征事物并获得对事物本身的理解,从而建立现实世界的模型;
- 分析模型。依据模型进行计算,求解验证,通过模型的考察建立对客观事物的分析结论。

因此,模型的概念对我们不应该是陌生的,我们自觉或不自觉地在应用模型的概念来完成我们的工作。

目前关于模型的定义大致有以下几种:

① 模型是现实系统的一个抽象。由于模型是描述现实系统的,因此它必须反映实际,又由于模型是抽象的,因此它必须高于实际,即不仅能反映实际,而且还能指导其它具有共性问题的解决。

② 模型是实际系统或过程的代表或描述,它是实际系统一部分属性的抽象或模仿,而不是全部属性的复制。模型的实质是在一组简化的假设条件下,描述一个实体活动的最本质的属性。

③ 模型是集中反映系统有关信息的实体。它是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象化。因此,模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程相关的信息进行形式化的结果。

④ 根据目标对构成系统要素的因果关系和要素的特性进行定量化,并把这些因素结合起来进行描述的系统,称之为模型。

⑤ 模型是对一切客观事物及其运动形态的特征和变化规律的一种定量抽象,它能在所研究的主题范围内更普遍、更集中、更深刻地描述实体的特征。

模型建立不是“原型的复现”,而是按研究目的之实际需要和

侧重面,寻找一个便于进行系统研究的“替身”。在较复杂的情况下,对于由许多实体组成的系统来说,由于其研究目的不同,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型。例如:

- 某些模型反映了整个实际系统的部分属性,另一些模型则提供了系统更全面的描述;
- 某些模型反映了实际系统的全部组成实体,另一些模型仅强调了系统的某些侧面,而忽略了另外一些方面。

这些现象表明,根据系统研究的实际需要,可对模型进行粗化(简化)或精化(详细化),也可以对模型描述进行分解或组合。

模型的分析是指应用模型进行计算或实验,以便研究客观事物行为的过程。建立模型的目的是为了用模型来描述事物,而分析的过程既检验了模型,又通过模型求解获得了对客观事物的充分理解。前者是一个对于实际事物原型本质描述的实体或数学方程和符号等具有具体结构形式的东西,而后者则表现为一个过程;前者是静态的,后者则是动态的。

例如,在处理军事作战问题时,由于问题本身的不可真实表现性,通常先在军事想定的基础上建立一个模型,利用模型来反映作战指挥问题。对模型的求解和分析将使我们了解作战行动可能的结果。

图 1.1 说明了模型的作用。

应当指出的是,在 C³I 系统等信息系统中,模型还可以理解为一种信息处理的方案,它包括某种信息的转换(不仅仅是信息的存储、检索或显示)。模型的表达方式有多种,其中包括数学表达式、文字语句或计算机程序等等。

二、模型的组成

模型是用来描述现实系统的,因此一般由下列几个基本部分组成:

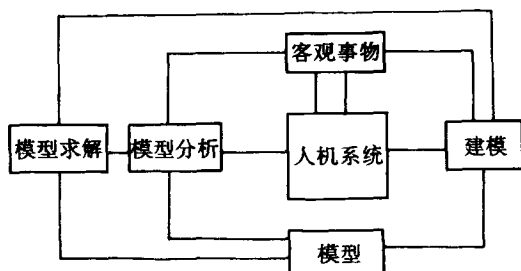


图 1.1 建模过程

- 系统。即描述的对象；
- 目标。系统的目标；
- 组分。构成系统的各种组分或子系统；
- 约束条件。系统所处的环境及约束条件；
- 变量。表述各组分的量的变化，它分内部变量(系统内部)、外部变量(系统外部及环境)及状态变量；
- 相关。表述不同变量之间的数量关系和逻辑关系。

如图 1.2 所示，边界内为一描述的系统，系统内有内部变量和状态变量，外部变量包括环境与约束条件以及输入的一些数据。在一定的约束条件下，当系统的外部输入发生变化时，通过模型描述的定量关系就能求解出系统的输出结果。

三、模型的表示

模型可以用一个 6 元组表示： $M = \{ O, G, T, V, R, S \}$ ，其中， O 表示模型的对象集； G 表示模型的目标集； T 表示模型系统所处的环境及约束条件集； V 表示模型的变量集，包括内部变量、外部变量及状态变量； R 表示模型变量之间的关系集； S 表示模型的状态集，从初态到终态。

模型的使用已经在很多方面显示了模型的功效，但一般认为

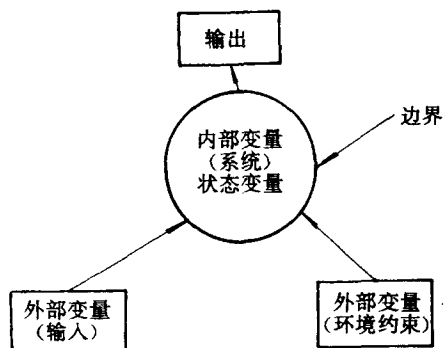


图 1.2 模型的环境

还远没有发挥模型的潜能。事实上管理者在很多情况下废弃、用错或不习惯于使用模型,问题的根源主要在于模型表示。

模型在计算机中的表示方法和存储形式称为模型表示。通常对模型表示有下列基本要求:

- 一致性。模型的表示应该与数据的表示相一致,以利于与数据的衔接和调用,并便于用统一的方式进行管理;
- 模块性。模型表示应该具有基本单元形式和组合功能,以便于多个基本模型组合成复杂模型,使一个模型系统能够适应多种不同的应用环境,方便模型的建立、修改和维护;
- 独立性。不仅每个模型应该独立,而且整个模型库应该与数据库和方法库分别独立存放。这样不仅模型的修改不会影响到数据及方法,而且便于模型资源共享;
- 智能性。模型表示应该基于知识,并且尽可能具有一些智能性,以便和知识库协同工作。

四、模型的分类

1. 抽象分类

从抽象的角度看,可把模型分为三类,即概念模型、逻辑模型

和物理模型。模型的这种分类方法能帮助我们在构造模型的时候，从概念上由浅入深，条理清楚，步骤扼要。

(1) 概念模型

概念模型是最抽象的模型，它是人们根据所要达到的目标和所具备的领域知识、经验等构造出来的。它可能很不完善，甚至无法实现，但它表述了对象系统的主要特征，描绘了其大致的轮廓，并对以后模拟、认识对象系统有深刻的意义。

(2) 逻辑模型

逻辑模型是在概念模型的基础上构造出的，其在原理上是行得通的。它考虑了模型总体的合理性、结构的合理性和实现的可行性，但它只是在逻辑上说明对象系统，而没有具体的细节。

(3) 物理模型

物理模型是一个完全确定了的模型，是一个可实现的、实在的模型。它在逻辑模型的基础上，经过对具体元件和具体细节的说明，构成了具有具体实现细节的合理的模型。

2. 形式分类

从大的方面来说，模型可以分成社会科学模型和自然科学模型两大类，其中每一类还可以细分。例如，经济模型、法律模型、工程模型、医学模型等。但是这种分类意义不大，因为我们学习模型不只是一要看懂模型，更重要的是要学会构造模型。因此只有从规律上分类，才能使我们获得构造模型的本领。按照这个观点，模型大致可分成四类或四种形式：

(1) 物理(比例)模型 (Physical Model)

由于物理模型是对象系统的物理再现，因此它的抽象级别最低。物理模型也称为实体模型，可分为实物模型和类比模型。

- 实物模型：根据相似性理论制造的按系统比例缩小(或放大或原尺寸)的实物。例如，风洞实验中的飞机模型、水力系统实验模型、船舶模型等；

- 类比模型:在不同的物理学领域(力学、电学、流体力学等)的系统中各自的变量有时服从相同的规律,根据这个共同的规律可以制定出物理意义完全不同的比拟和类推模型。例如,在一定条件下,由节流阀和气容构成的气动系统的压力响应与一个由电阻和电容所构成的输出电压特性具有相似的规律,因此可以用比较容易进行实验的电路来模拟气动系统。

(2) 结构模型(Structural Model)

结构模型是主要反映系统的结构特点和因果关系的模型。结构模型中的一类重要模型是图模型。

(3) 仿真模型(Simulation Model)

仿真模型是通过计算机上运行的程序所表示的模型。物理模型、数学模型和结构模型一般都能转化为仿真模型。对于不同控制策略或控制变量对系统的影响,或是系统受到某种扰动后可能产生的影响,最好是在系统本身上进行试验,但这并非总是可行,在某些情况下,建立系统的仿真模型是有效的。

(4) 数学模型(Mathematical Model)

数学模型简称 MM,它是用数字、拉丁字母、希腊字母以及其它符号来体现和描述现实原型的各种因素形式以及数量关系的一种数学结构。它通常表现为定律、定理、公式、算法以及图表等。这是一种最一般、最抽象的模型,也是自然科学和工程技术中最常用的模型。近些年,也越来越多地用于社会科学,如经济、管理模型,人口模型等。

数学模型可以是一个或一组代数方程、微分方程、差分方程或统计学公式,也可以是它们中某一些的适当组合。通过这些方程定量或定性地描述系统各变量之间的相互关系。除了用方程描述的数学模型外,还有用其它数学工具,如代数、几何、拓扑、数理逻辑等描述的模型。数学模型偏重于描述系统的行为和特征,而不是系

统的结构。

数学模型还可以进一步分类,而且分类方法颇多。例如,按变量间的关系可分为几何模型、代数模型、方程模型、概率统计模型、逻辑模型等;按变量的形式可分为确定性模型、随机性模型和模糊性模型,或者分成连续性模型和离散性模型。这两种分类方法都是从数学角度出发的经典分类法,它的优点是,模型的数学结构清晰,便于求解。但是对于一个实际问题来说,在模型建立以前,我们并不知道它是哪一类的,这不便于给出同类问题如何建立模型的大体方法。因此,我们主张按用途分类,这样可以给出同类问题的统一处理方法,便于应用。

表 1.1 数学模型公式分类

	模型的描述 变量的轨迹	模型的 时间集合	模型 公式	变量范围	
				连续	离散
混合(变化) 模型	连续(变化) 模型	连续—时间 模型	偏微分方程	可	
			常微分方程	可	
	离散(变化) 模型	离散—时间 模型	活动扫描	可	可
			差分方程	可	可
			有限状态机		可
			马尔可夫链		可
		离散—事件 模型	离散事件		可
			过程交互		可

有关数学模型的模型公式分类如表 1.1。应当指出的是,在应用上,有时这几种模型是交叉使用的。

五、模型建立的基本原则

(1) 相似性

模型与所研究系统在属性上应具有相似的特性和变化规律,

这就是说,“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

(2) 切题性

模型只应该针对与研究目的有关的方面,而不是一切方面。这是因为对于同一个系统,其模型不是唯一的,模型的选择应针对研究目的。

(3) 吻合性

模型结构的选择,应尽可能对可利用的数据作合理的描述。通常,其实验数据应尽可能由模型来解释。

(4) 可辨识性

模型结构必须选择可辨识的形式。若一个结构具有无法估计的参数,则此结构就无实用价值。

(5) 简单性

从实用的观点来看,由于在模型的建立过程中,忽略了一些次要因素和某些非可测变量的影响,因此实际上的模型已是一个被简化了的近似模型。一般而言,在实用的前提下,模型越简单越好。

(6) 综合精度

综合精度是模型框架、结构和参数集合等项精度的一种综合指标。若有限的信息限制了模型的精度,最有效的模型就应是各方面精度的平衡和折衷。

若上述原则间出现冲突,则要寻找合理的折衷,但特定的折衷方案却依赖于模型的对象,因而没有固定的程式。

1.1.3 C³I 系统模型

一、C³I 系统模型的特点

C³I 系统是一种复杂系统,借助模型研究 C³I 系统可以说是唯一的途径,因此如何建立 C³I 系统的模型是开展 C³I 理论研究的重要前提。只有根据模型才能更好地理解 C³I 系统,才能考察系统

的静态和动态特性,才能评价和优化系统。 C^3I 系统模型可用于系统的全寿命周期中的系统分析、可行性研究、系统设计、系统开发、系统测试运行和系统完善等各个阶段,甚至各种有关 C^3I 系统的作战条令的制定,都要以模型为基础。 C^3I 系统模型在实际应用中两种存在方式——独立式和嵌入式。前者主要用来分析 C^3I 系统本身,如评定系统的性能和部分效能,而嵌入式模型表明 C^3I 系统是更大系统的一部分,在评定 C^3I 系统的效能和它对作战的影响时,一般要采用嵌入式模型。

就一般情况而言,一个完整的指挥自动化(C^3I)系统应具备:信息获取功能;信息传输功能;信息处理功能;辅助决策功能;作战指挥和武器控制功能;资料检索和文电处理功能;后勤支援和保障功能;作战模拟和训练功能等主要功能。

要描述 C^3I 系统,必须先描述这些 C^3I 系统的主要功能。 C^3I 系统功能的建模是 C^3I 系统建模的基础。 C^3I 系统服务于军事指挥活动,与作战密切相关,于是人们自然会想到用描述作战等军事活动的建模方法来描述 C^3I 系统的功能。作战过程的描述最终落实在作战损耗等问题上,关于这些问题的研究导致了运筹学的诞生,后又发展成军事运筹学。Lanchester方程就是一种典型的半经验、半理论的作战损耗模型,以它为代表的基于微分方程的作战损耗模型得到了广泛的应用。但是,对于穿插在作战过程各个阶段的 C^3I 系统的上述功能,用这类模型是难以描述的。

通过考察 C^3I 系统的概念、组成和工作原理,我们知道, C^3I 系统是基于信息的系统,它支持的是军事指挥控制过程, C^3I 系统的功能绝大多数是与信息密切相关的,因此,信息活动的描述是 C^3I 系统功能建模、分析与仿真的基础。

目前 C^3I 系统建模方法可分为两大类,一是基于统计理论的Monte Carlo方法,二是基于Lanchester方程。这两种方法虽然在作战损耗的描述上各有所长,有着广泛的应用,在描述 C^3I 系统的