

论 C³I 系统的建模*

罗雪山

(国防科技大学系统工程与数学系 长沙 410073)

摘要 本文在对 C³I 系统的建模问题进行深入讨论后, 提出了一套用于 C³I 系统建模的规范化建模方法, 并由计算机实现了该方法, 使得人们可以通过人机对话的形式进行建模。这一方法解决了目前战争系统尤其是 C³I 系统的微分方程不易得到这个问题。文中给出了一个建模案例。

关键词 C³I 系统, 建模, 计算机

分类号 E96

C³I 系统建模研究目前遇到的最大问题是如何把 C³I 系统与它所处的战争环境结合起来, 因为 C³I 系统的作用贯穿于整个复杂的战争过程。在复杂的战争过程中, 由于涉及到人的因素以及新出现的一些软武器 (尤其是 C³I 系统), 这就使复杂的战争过程一般难以用定量的数学模型来描述。建模过程之所以困难, 主要是因为现代战争过程中交织着许多难以理清的物质流与信息流构成的反馈环路^[1], 而且物质流与信息流之间的相互作用关系极为复杂。这种相互作用的机理^[2], 至今在理论上我们并不十分清楚。

目前 C³I 系统建模方法有两个倾向: 一是自底向上法, 由微观入手对 C³I 系统进行描述, 这类方法主要基于统计理论中的 Monte Carlo 方法; 二是自顶向下法, 从宏观入手描述 C³I 系统, 这类方法目前主要基于军方广泛采用的 Lanchester 格斗方程。这两类方法虽然在作战损耗的描述上各有所长, 并在这方面有着广泛的应用, 但在描述 C³I 系统的问题上, 两者的研究都进展甚微。

由于 C³I 系统建模问题是 C³I 系统理论的主要问题之一, 因此 C³I 系统建模理论是 C³I 系统理论的重要内容。在本文中, 我们将综述在上述两个倾向中 C³I 建模理论的发展与存在的主要问题, 并重点介绍一下我们在 C³I 系统建模理论上的一些进展。

1 C³I 系统建模方法评述

我们先谈谈 Monte Carlo 方法在用于 C³I 系统建模时所遇到的问题。基本状态变量的巨额维数是 Monte Carlo 方法的障碍之一。为了构造一个事件驱动的微观 Monte Carlo 仿真, 就可能要求有 10 万条以上的 Fortran 语句^[3]。如此精确的细节或许是必要的, 但

* 1993 年 2 月 24 日收稿

如此大量的微观仿真是十分耗时、十分昂贵的，并且不适用于分析、设计和评价各种分布式的 C³I 系统结构。用这样的“巨型仿真”来回答“如果怎样”(What if) 类型的问题是很困难的，即使可以，代价也是相当高的。

Monte Carlo 方法的另一个巨大障碍是，它无法描述信息的处理与认知过程。由于目前的信息理论仍然局限于符号信息或句法信息上，而 C³I 系统所着重的语义信息与语用信息的描述在信息论意义上并未解决^[4,5]。这样，Monte Carlo 方法在描述 C³I 系统中信息活动时只能采用枚举法，列出所有可能的信息活动及其发生概率，这即使在微观仿真中都是很困难的事情。然而不这样，又难于将信息对决策的作用、决策对战果的影响表示出来。这个问题在国内外所研制的作战模拟系统中都有不同程度的体现。^[6,7]

Lanchester 型方程几十年来一直是军事运筹学的重要研究领域。近年来随着 C³I 系统的发展，一些学者开始重视如何把 C³I 系统的作用反映在 Lanchester 方程中^[8-12]，因为目前即使是有严重缺陷的综合了 C³I 与作战过程的集成模型也几乎不存在。但是，在这类描述作战损耗的方程中加入与信息的捕捉和消耗有关的内容，并不是一件容易的事情。

我们知道，Lanchester 方程的基本形式为

$$\frac{dx}{dt} = -ay, \quad \frac{dy}{dt} = -bx \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = -axy, \quad \frac{dy}{dt} = -bxy \quad (2)$$

前者代表的是常规战斗，描述的是点目标或瞄准射击的毁伤，后者代表的是游击战，描述的是面目标毁伤。一条简单的描述思路是，由于 C³I 系统的出现以及其功能的增强，使冲突双方对对方目标位置的辨识增强，从而使对方更多的目标被置于点杀伤的境地。这样，点目标毁伤和面目标毁伤比例的大小便能在一定程度上反映 C³I 系统对作战的影响。现在，关于 Lanchester 方程的改进多数居于此类^[9-11]。美国海军研究生院 Paul N. Moose 的工作^[10]就很典型，他的典型方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = -b_x X - a_y \mu_y Y - a_y (1 - \mu_y) XY + V_x \\ \dot{Y} = -b_y Y - a_x \mu_x X - a_x (1 - \mu_x) XY + V_y \end{cases} \quad (3)$$

其中 b_x 、 b_y 为自然损耗率， a_x 、 a_y 为由对方武器系统造成的损耗率， u_x 、 u_y 则在上面所述的意义上代表了 X 和 Y 的 C³I 系统效能。若 μ 为零，则所有的战斗都是面射型的，而若 μ 为 1，则所有的战斗都是点射型的。这里 μ 是 X 和 Y 的线性变化的系数，当然还有一些非线性变化形式的方程，但从原理上来说这些方程都是一类的。

可以看出，对 Lanchester 方程这样进行扩展，在一定程度上可以定性反映 C³I 系统在作战中的作用，但这只是一种很初级的形式，它无法反映 C³I 的内部因素在战场中的作用，也无法反映 C³I 系统在作战过程中的动态特性。

对 Lanchester 方程进行扩展的另外一些努力是基于现代非线性数学的一些新进展而进行的。A. E. R. Woodcock 和 J. K. Dockery 等人在突变论的基础上改进了 Lanchester 方程^[8,9,12]。他们把 Lanchester 方程表示为

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial V(x,y)}{\partial x}; \quad \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial V(x,y)}{\partial y} \quad (4)$$

如果把 (4) 式的 $V(x,y)$ 与突变论中的势函数对应起来，那么 (4) 式就表示了一类特殊

的 Lanchester 方程。根据突变论中的标准突变流形，可以写出一系列的突变流形势函数，由 (4) 式可以得出一系列基于突变论的 Lanchester 方程。这些方程通过控制一定的参数，可以产生突变现象。每个 $V(x, y)$ 中参数与多项式的意义须根据具体的作战环境确定。例如由双尖点突变模型导出的 Lanchester 方程为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -2axy^2 - 2bxy - cy^2 - 2ex - fy - g \\ \frac{dy}{dt} = -2ax^2y - bx^2 - 2cxy - 2ey - fx - h \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中的 cy^2 和 bx^2 可定义为双方的“灵巧武器” (smart weapon) 的作用。

显然，Woodcock 等人的基于突变论的 Lanchester 方程在很大程度上带有“拼凑”的意味。实际上这些 Lanchester 方程是从突变流形的势函数反推出来的，因此它们难以与实际的作战环境相符合，故不能代表大多数情况，而且从突变论角度研究作战难以反映作战的动态过程。

以上可见，现在的研究状态很难将 Lanchester 类方程与不同 C³I 系统分布形式的影响结合起来。对于 C³I 系统的 Lanchester 方程建模来说，必须结合其它领域的成果才能期望有新的突破。我们认为，在这类建模过程中，以具体问题为驱动力的研究方法才能有所突破，也就是坚持所谓“问题导向”，而不是以“模型导向”。

综上所述，C³I 系统建模的研究虽然有过不少尝试，但真正成功与能实用的定量化工作较少。对 C³I 系统这样的既有连续又有离散状态的混合状态系统，Monte Carlo 方法与 Lanchester 方程方法都不能独立完成建模任务。我们觉得，将这两类方法结合起来，并辅以新的复杂系统的系统化建模思路，或许能够胜任 C³I 系统的建模任务。在下一节中将探讨一种这样的方法。从建模结果来看，这种方法很自然地将 C³I 系统中离散的、由事件驱动的因素与连续的 Lanchester 方程结合起来，并便于使用非线性微分方程定性分析理论进行分析。

2 一种有效的 C³I 系统建模方法

为了弥补上述战争过程模型的缺陷，我们在坚持“问题导向”的原则下提出了一种用于 C³I 系统在战争环境下建模的方法。这种方法通过分析所要研究的复杂战争系统，找出表征系统运行过程所必须的系统参量，通过分析各参量之间的相互影响关系画出系统的有向图与系统参量的实际物理意义，运用建模理论的算法，最后得出系统的状态方程。从这种方法的建模过程来看，它是从实际系统出发进行建模的，因此能够真实反映原始系统的特性。这个建模过程可以以人机对话的形式由计算机自动完成。这便增强了该建模方法的可应用性。由于这个方法的理论描述很费篇幅，故在此仅以一个实例说明该方法，有兴趣的读者请参阅文献 [13]。

(1) C³I 系统的构成与环境

我们所考虑的 C³I 系统为如图 1 所示的网络。它包含七个节点和十三条通信链路。节点表示信息收集、传输或决策中心。它们是运行在敌对环境下 C³I 系统的一部分。确切地说，网络中的链路可能受到敌方的干扰或物理毁伤，这样两个节点间的通信可能遭到破

坏。

作战环境是蓝军利用这个通信网络进行防空作战，蓝军的任务是保卫座落在各节点的目标，所使用的武器系统安置在节点 B ，探测器安置在节点 A ，其目的为探测红军的空中目标并将信息传送到节点 B 。

(2) 系统有向图

根据前述的作战环境以及对 C^3I 系统的分析，可以得到能够表征该战争过程所必须的参量（表 1）以及画出该系统的有向图（图 2）。从图 2 可确定该作战系统的三元方阵 M （表 2）。

表 1 C^3I 作战系统的参量表

| | |
|----------|---------------------|
| q_1 | — 红军现存兵力水平（指数） |
| q_2 | — 蓝军现存兵力水平（指数） |
| q_3 | — 红军单发杀伤概率 |
| q_4 | — 蓝军单发杀伤概率 |
| q_5 | — 红军单发时间间隔 |
| q_6 | — 蓝军单发时间间隔 |
| q_7 | — 红军对蓝军的毁伤率 |
| q_8 | — 蓝军对红军的毁伤率 |
| q_9 | — 蓝军武器的杀伤半径 |
| q_{10} | — 蓝军武器对红军目标的不确定性半径 |
| q_{11} | — 蓝军由探测系统造成的不确定性半径 |
| q_{12} | — 红军目标的相对速度 |
| q_{13} | — 蓝军通信网的输入流量 |
| q_{14} | — 蓝军通信网的平均延时 |
| q_{15} | — 蓝军通信网的生存性 |
| q_{16} | — 蓝军通信网的可靠性 |
| q_{17} | — 蓝军通信网的通信容量 |
| q_{18} | — 红军对蓝军通信网的干扰及物理攻击率 |

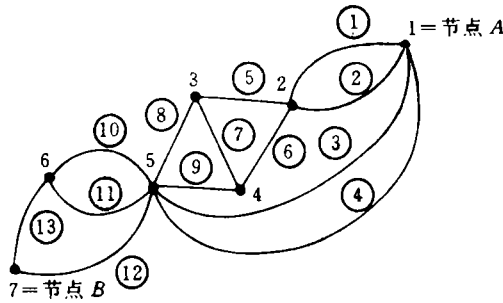


图 1 通信网络示意图

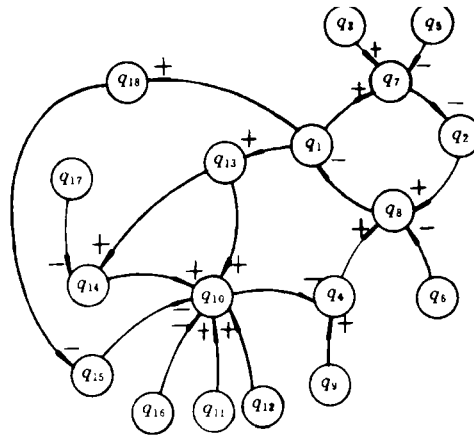


图 2 C^3I 作战系统的因果关系有向图

图 2 所示的系统实质上是一个交战 → 探测敌目标 → 信息传输 → 确定敌目标 → 交战的大反馈回路，它反映了现代战争中 C^3I 系统参战情况下的作战过程。对这样一个系统，要用前一节所述的方法直接对其进行描述是很困难的。

这里，利用文献 [14~16] 所述的系统规范化建模理论与建模算法，可以对这个 C^3I 作战系统进行建模。首先利用三元方阵 M ，对其进行变换，识别 q_1 —— q_{18} 的变量类型和各参量间的耦合枝类型。根据建模理论中的定理与算法，并且参照各参量的物理意义，很容易得到变换后的三元方阵（表 3）。可见，只有 x_1 与 x_2 （或 q_1 与 q_2 ）两个状态变量，可以藉此列出状态方程：

表 2 C³I 作战系统的三元方阵 M

| M | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----|----|----|---|----|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | | | 1 |
| 2 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | -1 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | -1 | | | | | | | | | | |
| 7 | | -1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | -1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | -1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | -1 | | | 1 | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | -1 | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | -1 | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | -1 | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | -1 | | |

表 3 变换后的三元方阵

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|------|----|----|---|----|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | X | X | P | V | P | P | R | R | P | V | P | P | V | V | V | P | P | V |
| 1 X | | | | | | | I | | | | | | I | | | | | I |
| 2 X | | | | | | | | I | | | | | | | | | | |
| 3 P | | | | | | | I | | | | | | | | | | | |
| 4 V | | | | | | | | I | | | | | | | | | | |
| 5 P | | | | | | | -I | | | | | | | | | | | |
| 6 P | | | | | | | | -I | | | | | | | | | | |
| 7 R | | -F | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 R | -F | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 P | | | | I | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 V | | | | -I | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 P | | | | | | | | | | I | | | | | | | | |
| 12 P | | | | | | | | | | I | | | | | | | | |
| 13 V | | | | | | | | | | -I | | | I | | | | | |
| 14 V | | | | | | | | | | I | | | | | | | | |
| 15 V | | | | | | | | | | -I | | | | | | | | |
| 16 P | | | | | | | | | | -I | | | | | | | | |
| 17 P | | | | | | | | | | | | | | -I | | | | |
| 18 V | | | | | | | | | | | | | | | | -I | | |

$$\frac{dx_1}{dt} = -\gamma_8 \quad (6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -r_7 \quad (7)$$

$$r_7 = f_1(x_1, p_3, p_5) \quad (8)$$

$$r_8 = f_2(x_2, v_4, p_6) \quad (9)$$

$$v_4 = f_3(p_9, v_{10}) \quad (10)$$

$$v_{10} = f_4(p_{11}, p_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, p_{16}) \quad (11)$$

$$v_{14} = f_5(p_{17}, v_{13}) \quad (12)$$

$$v_{13} = f_6(x_1) \quad (13)$$

$$v_{15} = f_7(v_{18}) \quad (14)$$

$$v_{18} = f_8(x_1) \quad (15)$$

我们已将上述建模过程编制成了一个建模软件包，它可以使上述变换过程以人机对话的方式由计算机自动完成。图 2 所示系统的最终模型为：

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{d + ex_1 + fx_1^2 + gx_1^3 + hx_1^4 + mx_1^5 + nx_1^6}{ax_1 + bx_1^2 + cx_1^4} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{p_3}{p_5} x_1 \end{cases} \quad (16)$$

其中 $a = 4p_6(30p_{11}\mu p_{17} + 14p_{12}) \quad (17)$

$$b = -120p_6p_{11}(k_1 + 0.9k_1\mu p_{17}) \quad (18)$$

$$c = 3.6p_6k_1^2 \quad (19)$$

$$d = 9p_9^2(1 + p_{16})^2\mu^2p_{17}^2 \quad (20)$$

$$e = -18k_1p_9^2(1 + p_{16})\mu^2p_{17}^2 \quad (21)$$

$$f = 9k_2^2\mu^2p_{17}^2p_9^2 - 18p_9^2\mu p_{17}(1 + p_{16})^2k_1 \quad (22)$$

$$g = 36p_9^2k_1^2(1 + p_{16})\mu \quad (23)$$

$$h = 9p_9^2k_1^2(1 + p_{16})^2 - 2k_2^2\mu p_{17}k_1 \quad (24)$$

$$m = -2k_1^3(1 + p_{16}) \quad (25)$$

$$n = k_1^2k_2^2 \quad (26)$$

k_1 ：是确定蓝军通信网输入流量与红军目标数目（或红军现存兵力水平）两者关系的一个常量；

k_2 ：是由蓝军通信网络生存性与网络拓扑结构确定的一个常量；

$\frac{1}{\mu}$ ：是蓝军通信网络中每个信息包（package）中的平均 bit 数；

p_i 与 q_i 的物理含义一致。

上面导出的模型是一个非线性微分方程组，其形式类似于 Lanchester 方程，不过由于 C³I 系统的作用，它出现了复杂的非线性项。描述蓝军 C³I 系统的特征量都反映在非线

性项中,如蓝军探测系统的误差、蓝军通信网的输入流量、平均延时、生存性、可靠性、通信容量、网络的受攻击率以及网络的拓扑结构、节点分布等等。因而我们称之为 C³I 系统的作战模型。可见,它成功地将 C³I 系统与 Lanchester 方程融合到了一起。

3 结束语

本文在综述了现有 C³I 系统在战场环境下的建模问题的几种倾向的基础上,提出了一种建立 C³I 系统作战模型的方法,并以一个建模例子说明了该方法。Levis 等人也曾使用该例子研究了 C³I 系统的效能问题^[17],对比一下本文与文献 [17] 的结果,可以发现本文所建的模型为进一步研究该范例提供了更完善的模型工具,便于用非线性微分方程的定性理论进行深入分析。这是文献 [17] 所不能提供的。

美国麻省理工学院的著名控制论专家 Michael Athans 评论说:“不过,很难将 Lanchester 类方程与不同的分布 C² 系统形式的影响结合起来。我们期望高水平的模型开发,应该不仅能捕捉消耗信息,而且能明显地体现不同的 C² 系统影响的决策变量……”^[3]。他称这个问题是对控制科学的一大挑战。从本文的建模工作来看,实际上已解决了这个问题。因此这种方法有较大的理论与应用价值。

参 考 文 献

- 1 罗雪山. 试论战争过程的系统规律. 见:中国系统工程学会编. 科学决策与系统工程,北京:中国科学技术出版社,1990
- 2 罗雪山. 决策系统的信息机理,国防科技大学学报,1991,(1)
- 3 Michael Athans. 指挥和控制(C²)理论:控制科学面临的挑战,火力与指挥控制,1988,(3)
- 4 罗雪山. 信息处理的模糊性描述与评价理论及其在决策系统中的应用. 大自然探索,1990,(2)
- 5 G J Klir, J A Folger, Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987
- 6 军事科学院运筹分析研究室. 信息·运筹·指挥. 军事科学出版社,1985
- 7 Reiner K Huber, (eds). System Analysis and Modeling in Defense —— Development, Trends, and Issues. Plenum Press, 1984
- 8 Dockery, John, Stefano Chiatti, Application of Catastrophe Theory to Problems of Military Analysis, European Journal of Operations Research, 1986, 24: 46~53.
- 9 Woodcock, A E R. Catastrophe, Chaos and C³I, Second International Conference on Command, Control, Communications and Management Information Systems, 1~3, April, 1987.
- 10 Paul N Moose. Evolution Equations of C³I; Canonical Forms and their Properties. Naval Postgraduate School, Monterey, California, NPS-62-83-059, AD-A135293
- 11 胡应平. 关于伏击战的蓝切斯特方程. 军事运筹, 1988, (1)
- 12 Woodcock A E R. Catastrophes, Chaos, and C³I: Towards a New Understanding of Military Combat. In Application of Artificial Intelligence to Command & Control Systems, Edited by C J Harris, IEE Computing Series 13, Peter Peregrinus Ltd. 55~89
- 13 罗雪山. C³I 系统理论及其应用研究: [学位论文], 长沙: 国防科技大学系统工程与数学系, 1991.

- 14 James R Burns. Converting Signed Digraphs to Forrester Schematics and Converting Forrester Schematics to Differential Equations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybenetics, 1977, SMC-7, (10)
- 15 Burns J R. An Algorithm for Converting Signed Digraphs to Forrester Schematics. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, SMC-9
- 16 周曼殊主编。农业系统动力学。济南：山东科学技术出版社，1987
- 17 Vincent Bouthonnier, Alexander H Levis. Effectiveness Analysis of C³ Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1984, SMC-14 (1)

On Modeling of C³I Systems

Luo Xueshan

(Deporement of Systems Engineering and Maths, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract

After discussing the Problem of modeling C³I systems in detail, this paper proposes a normative approach to modeling C³I systems. A software package based on the modeling approach is developed, which allows the modeling personnel to do their job via interaction with computers. A modeling example is given at the end of the paper.

Key Words C³I System, modelling, Computer