国防科技大学学报
JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
第17卷第1期 1995年3月 Vol. 17 No. 1

C^3I 系统作战效能的一种分析方法*

罗雪山 苏建志

(国防科技大学系统工程与数学系 长沙 410073)

摘 要 本文针对美国麻省理工学院为进行 C^3I 系统效能分析所提出的案例，运用影响图方法建立了该案例的微分方程模型，而后定义了若干个 C^3I 系统作战效能的衡量指标，最后由这些指标对模型的计算机数值仿真结果进行了详细地分析，得出了 C^3I 系统各项性能对战场态势的影响，从而说明了 C^3I 系统在战争中的作用。

关键词 C^3I 系统，效能分析，微分方程，数值仿真

分类号 E917

C^3I 系统的作用贯穿于整个战争过程，因此研究 C^3I 系统如何影响战争进程以及它作用于战争过程的机制，从而分析 C^3I 系统的作战效能，是国防系统分析与 C^3I 系统理论面临的问题。本文针对 MIT 为进行 C^3I 系统效能分析而提出的案例[1]，运用影响图建模方法[2,3,4]，对上述作战案例进行了具体的计算，建立了其微分方程模型。然后针对 C^3I 系统的作战效能定义了几个衡量指标，最后以一些具体数据为背景，用计算机进行了数值仿真，并由定义的指标进行了仿真结果的分析，揭示了 C^3I 系统在战场中的作用。

1 作战环境与系统配置

本文考虑的是一个战术防空作战案例，在这类战斗中，红方对蓝方重要目标往往采取多方向连续梯次进袭方式。蓝方的作战任务是保卫座落在图 1 中各节点的目标，并给来犯之敌以最大的杀伤。蓝方的武器系统(地空导弹与高炮部队)安置在节点 B，而其探测系统安置在节点 A。探测系统探测到敌空中目标后将信息通过通信网络传送到节点 B，以引导武器系统向敌机进行攻击。红军的作战任务则是向蓝军要地和地面武器系统以飞机实施连续攻击。

蓝军的 C^3I 系统如图 1 所示，这是一个包含七个节点和十三条链路的通信网络，节点表示信息收集、传输或处理中心。网络中的链路可能受到敌方干扰或物理毁伤，这样两个节点间的通信可能遭到破坏。

* 国防科技"八五"预研项目与国防科大基金资助
1994年4月15日收稿

A. H. Levis 等人曾以该案例为背景，用文献[1]介绍的方法分析了该系统的效能。这里我们采用基于复杂系统理论的分析方法[4, 5]对其进行分析，从后面的结果可以看出该方法在很多方面均优于文献[1]介绍的系统效能分析方法。

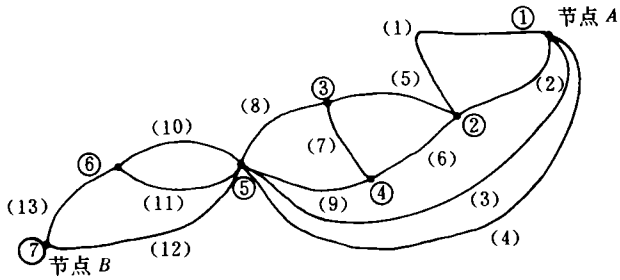


图 1　通信网络示意图

2　建立模型

根据上面的作战设定，可以得出能表征该作战过程所必须的参量(表 1)和系统的因果关系图(图 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}—蓝军通信网的平均时延
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

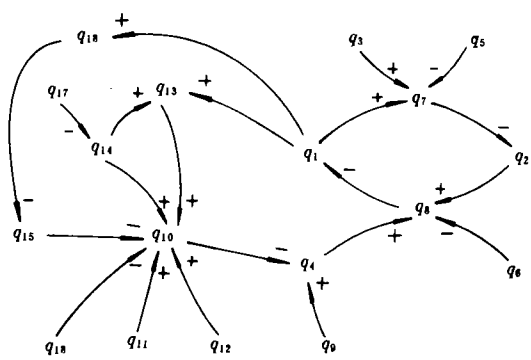


图 2　C^3I 作战系统的因果关系图

根据图 2 所示的 C^3I 系统作战过程的因果关系图以及表 1 所示的系统各参量的具体物理含义，我们运用一种面向复杂系统的系统动力学的规范化建模方法[2, 3, 4]，将系统的有向图转换成系统的微分方程模型。这种规范化的建模方法可以在计算机上建成一个建模软件包。我们已编制了该软件包。它可以使整个建模过程在计算机上以人机对话的形式完成，具体的建模过程可参考文献[6, 7]。由建模算法，可以得到如下方程：

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = -\dfrac{f + gx_1 + hx_1^2 + mx_1^3 + nx_1^4 + rx_1^5 + sx_1^6}{a + bx_1^2 + cx_1^4 + dx_1^6 + ex_1^2} x_2 \\ \dfrac{dx_2}{dt} = -\dfrac{p_3}{p_5} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$a = 120p_{11}p_{12}p_{17}p_6\mu + 784p_6p_{12}^2 + 3600p_6p_{11}^2\mu^2p_{17}^2 \tag{2}$$

$$b = -120p_{16}p_{11}p_{12}k_1(1 - 0.9\mu p_{17}) - 7200p_6p_{11}^2\mu p_{17}k_1 + 6840p_6p_{11}^2k_1\mu^2p_{17}^2 \tag{3}$$

$$c = 108p_6p_{11}p_{12}k_1^2 + 3600p_6p_{11}^2k_1^2 + 12690p_6p_{11}^2k_1^2\mu p_{17} + 2916p_6p_{11}^2k_1^2\mu^2p_{17}^2 \tag{4}$$

$$d = -5832p_{11}^2k_1^3\mu p_{17}p_{16} - 1296p_6p_{11}^2k_1^3 \tag{5}$$

$$e = 2916p_6p_{11}^2k_1^4 \tag{6}$$

$$f = 9p_9^2(1 + p_{16})^2\mu p_{17}^2 \tag{7}$$

$$g = -18k_2p_9^2(1 + p_{16})\mu^2p_{17}^2 \tag{8}$$

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

$$m = 36p_9^2k_1k_2(1 + p_{16})\mu p_{17} \tag{10}$$

$$n = 9p_9^2k_1^2(1 + p_{16})^2 - 18k_2^2\mu p_{17}k_1p_9^2 \tag{11}$$

$$r = -18k_1k_2^2(1 + p_{16})p_9^2 \tag{12}$$

$$s = 9k_1^2k_2^2p_9^2 \tag{13}$$

k_1 是确定蓝方通信网输入流量与红方目标数目(或红军现存兵力水平)两者关系的常量；

k_2 是由蓝方通信网络生存性与网络拓扑结构确定一个常量；

$\frac{1}{\mu}$是蓝方通信网中每个消息包的平均 bit 数；

p_i 和 x_i 分别是参量 q_i 经识别后的表示，其中 p_i 代表 q_i 是参数，x_i 代表 q_i 是状态变量。

3 作战效能的衡量指标

我们知道，C³I 系统的各项性能指标或大或小地对战场态势产生影响，然而，C³I 系统各项指标在不同的战场环境下战场态势的影响程度是不一样的。如何衡量各项性能指标对战场态势影响的显著性，自然是C³I 系统理论研究的一项重要内容。不过，从现有的国内外资料来看，还没有现成的指标或概念能够回答这类问题。为此，我们定义几个概念与指标。

设一蓝方 C³I 系统运行在某一作战环境下，α 是蓝方 C³I 系统的某一性能指标，在作战环境和 C³I 系统其它性能均不变的情况下，当 $\alpha=\alpha_1$ 时该 C³I 作战系统从初始态$(x,y)=(x_0,y_{01})$开始自然运行，运行的最终结果为$(x,y)=(0,y_1)$；而当 $\alpha=\alpha_2$ 时，并且其它条件都不变，该 C³I 作战系统从初态$(x,y)=(x_0,y_{01})$开始运行，运行的最终结果为$(x,y)=(0,y_2)$，$y_2>y_1>0$。令 $\lambda=\left[\frac{\alpha_2-\alpha_1}{\alpha_1}\right]\times100\%$，则称 $\Delta y=y_2-y_1$ 为蓝方 C³I 系统性能指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力直接改善指数；称$\frac{\Delta y}{y_1}\times100\%$为 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数直接改善比。以上 x 和 y 分别代表红、蓝双方的兵力水平指数，α_1 称为 α 的基础值。

上面定义的两个概念可由图 3 直观地表示。轨迹 BC 是 $\alpha=\alpha_1$ 时系统的运行轨迹，当蓝方 C³I 系统指标 α 改善到 $\alpha=\alpha_2$ 时，系统同样从初始点 B 出发，最终却运行到了 D 点，

DC 间的距离 y_2-y_1 是 C^3I 系统指标 α 为 α_2 时相对于 α 为 α_1 时蓝方少损失的兵力为指数。它是 C^3I 系统指标 α 改善对战果影响的直接体现，因而称之为 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力直接改善指数，称 y_2 相对于 y_1 少损耗的兵力指数百分比 $(y_2-y_1)/y_1$ 为 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数改善比。

在图 3 中，若存在初始点 (x_0, y_{02})，使 C^3I 作战系统在 $\alpha=\alpha_1$ 时从该点运行到终态 $(0, y_1)$，$y_2>y_1>0$，$y_{02}>y_{01}>0$，令 $\lambda=\left[\frac{\alpha_2-\alpha_1}{\alpha_1}\right]\times 100\%$，则称 $y_{02}-y_{01}$ 为蓝方 C^3I 对蓝方 C^3I 系统性能指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力间接改善指数，而称 $(y_{02}-y_{01})/y_{01}\times 100\%$ 为 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数间接改善比。

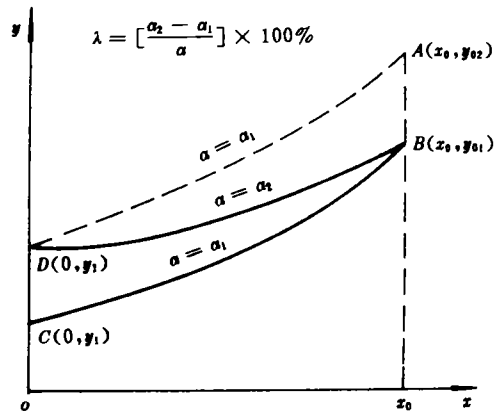


图 3　指标 α 的 λ——水平兵力改善比示意图

这个概念的直观意义同样可由图 3 表示。当 $\alpha=\alpha_1$ 时，系统从 B 运行到 C；$\alpha=\alpha_2$ 时，系统从 B 运行到 D。反推一下，当 $\alpha=\alpha_1$ 时，系统要从什么样的初始状态开始才能运行到 D 点；在 $x=x_0$ 时，只有从 $A(x_0, y_{02})$ 点出发才能到 D 点。也就是说，保持 C^3I 系统性能 $\alpha=\alpha_1$，即蓝方 C^3I 系统性能不改善的情况下，蓝方需要多少初始兵力才能达到系统性能改善到 $\alpha=\alpha_2$ 时的同样效果，亦即蓝方 C^3I 系统性能指标 α 从 α_1 改善到 α_2 相当于蓝方初始兵力从 y_{01} 增加到 y_{02}，因为在这两种情况下该 C^3I 作战系统的运行结果相同。因此 AB 间的距离 $y_{02}-y_{01}$ 表示：与系统指标 α 从 α_1 改善到 α_2 相等价的初始兵力增加。但这种对初始兵力增加的等价是间接的，故称之为蓝方 C^3I 系统性能指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力间接改善指数，称 $(y_{02}-y_{01})/y_{01}\times 100\%$ 为蓝军 C^3I 系统指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数间接改善比。

在上面的概念中，若 $y_2>0>y_1$，即图 3 的情况变成了图 4，则称 $(y_2-y_1)/y_1\times 100\%$ 为指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数直接隐涵改善比，称 $(y_{02}-y_{01})/y_{01}\times 100\%$ 为指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力指数间接隐涵改善比。

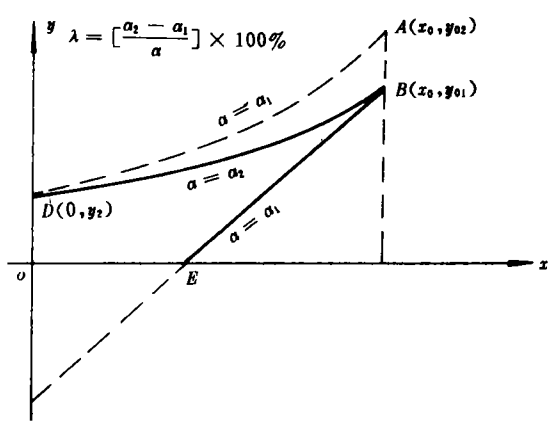


图 4　指标 $\alpha=\alpha_1$ 的 λ——水平兵力隐涵改善比示意图

隐涵兵力改善比适合于 C 点位于负半轴的情况，此时指标 α 从 α_1 改善到 α_2，战场态势中的胜负发生了根本性的变化，蓝方在 α 为 α_1 时失败，而在 $\alpha=\alpha_2$ 时则变为胜利。这时图 4 中的 EC 线是虚拟给出的，C 点是隐涵着的，$y_1<0$，故我们称这时的改善比为隐涵改善比。

与上类似，我们可以定义指标 α 的 λ——水平兵力指数直接恶化比，λ——水平兵力

指数间接恶化比，λ——水平兵力指数直接隐涵恶化比和 λ——水平兵力指数间接隐涵恶化比。恶化的情况也就是在图 3 和图 4 中出现了 $y_2 < y_1$，$y_{02} < y_{01}$的情况。实际上兵力水平指数由于 C^3I 系统性能指标的降低而造成的恶化可以用负的兵力改善比来表示。上面我们针对蓝方定义了几种兵力水平改善比和恶化比，对红方也可以如法泡制去定义，此处我们不再详谈。

定义了以上这些概念与指标，我们就可以建立 C^3I 作战系统中 C^3I 系统性能与作战效能之间的联系，并可以对这种联系进行深入研究。描述 C^3I 系统的性能指标众多，利用以上概念与指标，我们可以在众多的指标中寻找出那些最重要的、对作战能产生显著影响的指标。实际上，以上定义的这些指标与概念并不只限于考察 C^3I 系统性能指标与作战效能之间的联系，它们对武器系统、指挥系统和后勤系统的某些指标也适用。

5 仿真结果

为了研究 C^3I 系统性能与作战效能之间的联系，我们参考了文献[1]以及有关战例资料，设定了本文第一节所述的作战想定与 C^3I 系统数据，对前面建立的微分方程模型进行了数值仿真。数值解法采用了四阶龙格——库塔算法[8]。经过数值仿真，可用计算机给出系统的相图。

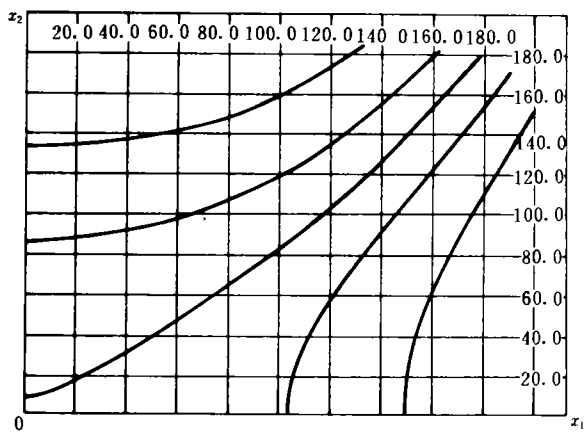


图 5 系统(1)的相图

图 5 便是前面建立的模型(1)的相图，仿真数据见表 2。图 5 所示的五条曲线从上到下分别是系统(1)从初始点(x_1^0, x_2^0)=(150, 200)，(170, 190)，(180, 180)，(190,170)，(200,150)出发而形成的系统行为轨迹，也就是说(1)式所表示的 C^3I 作战系统中，随着红、蓝双方的初始兵力水平(指数)不同，系统的进行结果(即双方交战的最终战果)各异。显然，系统初始点落在(150, 200)和(170, 190)时，最终战果为蓝方(x_2 方)胜；初始点落在(190, 170)和(200, 150)时，最终结果为红方(x_1 方)胜；而系统初始点落在(180,180)，双方几乎势均力敌，最终结果几乎是双方同归于尽。

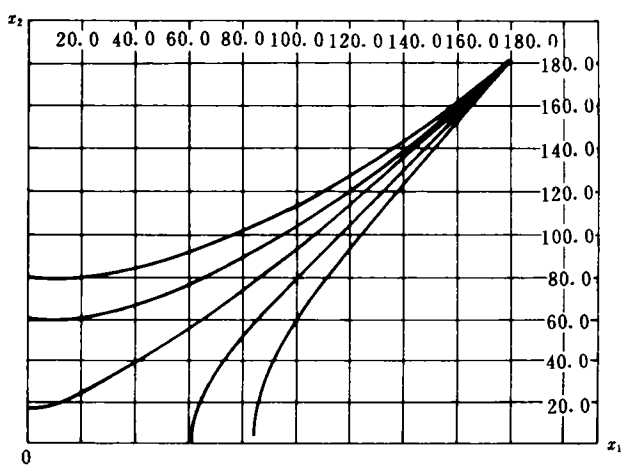


图 6 蓝军 C^3I 系统可靠性变化对战场态势的影响

表 2　数值仿真参数值

参量	p_3	p_5	p_6	p_9	p_{11}	p_{12}	p_{16}	p_{17}	k_2
取值	0.6	5	10	2	2	100	0.4	80，000	0.002145

图 6 所示的是蓝方通信网可靠性 p_{16}在其基础值 $p_{16}=0.4$ 上下摆动时的战场态势相图。图中的五条曲线从上到下分别是系统从初始态$(x_1^0,x_2^0)=(180,180)$出发在 p_{16}为 0.6，0.5，0.4，0.3，0.2 时的行为轨迹。由图可见，在其它条件不变时，改善蓝方 C³I 系统的可靠性可使蓝方反败为胜；反之，若使蓝军[3]系统可靠性降低则可能使蓝军由胜转败。从图 7 可以得出前节定义的兵力改善指数、改善比和恶化指数、恶化比。

我们选取了系统(1)中的几个参量，对其进行了对比分析，分析结果见表 3。从表 3 中的数据可以看出，系统(1)的四个参量在其基础值的近变化时，对战场态势的影响程度各不相同。在这四个参量中，p_{16}、p_{11}和 p_{17}为蓝方 C³I 系统的性能参量，p_9 为蓝方的武器系统参量。表 3 的数据表明，蓝方 C³I 系统通信容量(p_{17})的变化对战果的影响最小，对战场态势影响最大的是蓝方探测系统的不确定性半径(误差)p_{11}和蓝军武器系统的平均杀伤半径 p_9，而且 p_{11}对战场态势的影响较 p_9 略大一些。由此可见，在这个作战想定中蓝方要获得较好的战果，必须重点保证 p_{11}和 p_9 这两项指标。对蓝军 C³I 系统来说，则应重点保证 p_{11}和蓝方通信网的可靠性 p_{16}。

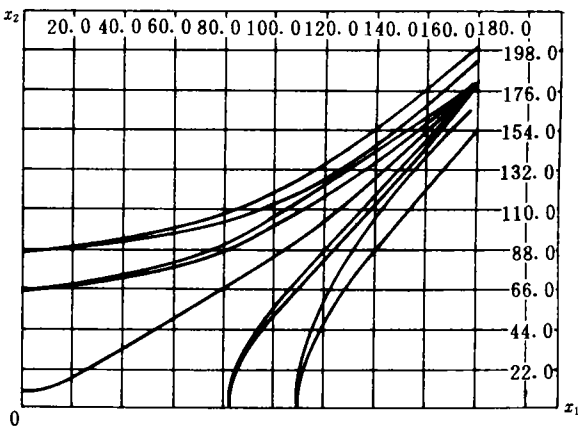


图 7　蓝军 C³I 系统可靠性改善造成的蓝军兵力指数改善和红军兵力指数恶化情况

表 3　C³I 作战系统各参量对战场态势的影响指标值

作战系统参考指标 α	蓝军兵力指数改善指标					红军兵力指数改善指标				
	基础值	λ	直接改善指数 u	间接改善指数 v	间接改善比 V	基础值	λ	直接改善指数 u	间接改善指数 v	间接改善比 V
P_{16}	0.4	0.25	56	11	6.1%	0.4	−0.25	83	9	5%
	0.4	0.5	78	19	10.6%	0.4	−0.5	109	18	10%
P_{11}	$2m$	0.25	110	35	19.5%	$2m$	−0.25	123	24	13.3%
	$2m$	0.5	148	58	32.2%	$2m$	−0.5	147	31	17.2%
P_{17}	80,000	0.25	8	1	≈0	80,000	−0.25	21	2	≈0
	80,000	0.5	10	2	≈0	80,000	−0.5	42	4	≈0
P_9	$2m$	0.25	102	30	16.7%	$2m$	−0.25	135	29	16.1%
	$2m$	0.5	128	45	25%	$2m$	−0.5	164	40	22.2%

5 结束语

从上述分析结果可以看出，本文所采用的一整套建模、分析、仿真与数据处理方法在分析 C^3I 系统性能以及其它系统性能(诸如武器系统等)对战场态势影响的研究中是切实可行的，具有较强的可操作性。

参 考 文 献

1 Vincent Bouthonnier, Alexander H Levis. Effectiveness Analysis of C^3 Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1984, SMC－14(1)

2 James R Burns. Converting Signed Digraphs to Forrester Schematics and Converting Forrester Schematics to Differential Equations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, SMC－7, (10)

3 James R Burns. An Algorithm for Converting Signed Digraphs to Forrester Schematics. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, SMC－9

4 罗雪山，段建新等。一种用于复杂战争过程的建模方法，系统工程与电子技术，1992，(12)

5 罗雪山，苏建志，周曼珠. C^3I 系统对战争进程的影响——案例分析。见：中国系统工程学会编：企业发展与系统工程。北京：中国科学技术出版社，1992

6 罗雪山. 论 C^3I 系统的建模。国防科技大学学报，1994，(3)

7 罗雪山，苏建志. C^3I 系统在作战过程中的微分方程模型描述，见：C^3I 系统学术交流会论文集，火力与指挥控制情报网。太原：火力与指挥控制研究会，1992

8 [美]杰洛斯拉夫·达奇纳。数值分析及其程序应用手册。上海科学技术文献出版社，1988

An Approach for Evaluation of the Effectiveness of C^3I Systems

Luo Xueshan Su Jianzhi

(Department of Systems and maths)

Abstract

An approach for analyzing the effectiveness of C^3I systems in the battlefield is presented in this paper. The proposed approach includes modelling, analysis, simulation and data processing methods and techniques. We demonstrate that the effectiveness of C^3I systems can be evaluatcd by properly applying the approach. An canonical example is given as well.

Key words C^3I systcms, effectiveness analysis, Differential eqnation model, Simulation