

# 《连续系统建模》的计算机 辅助学习与考核系统

王维平

(系统工程与数学系)

**摘要** 本文介绍了一个用于《连续系统建模》学习与考核的计算机辅助教学课件的功能和设计原理,重点介绍了系统动力学模型图的知识表达和建模行为的有效性度量的方法。

**关键词** 计算机辅助教学,连续系统建模,系统动力学模型,模型知识表达

**分类号** TP317

目前,国际上计算机辅助教学(CAI)的发展方兴未艾,我国也有几个大型计算机辅助教学系统及一大批教学软件(称为课件)相继问世。由国防科技大学系统工程与数学系研制的系统工程教学模拟系统是一个具有八十年代中期国际水平、在国内处于领先地位的计算机辅助教学系统。本文介绍该系统的一个课件系统——系统工程建模与仿真CAI中的一个子课件的情况。该子课件用于《连续系统建模》的计算机辅助学习和考核。

## 1 课件特点

目前国内外已生产的CAI课件大多是为基础教学服务的。而用于专业课教学的课件要具备不同于基础课教学课件的新特点。我们认为,用于连续系统建模教学的课件应具有以下特点:

从建模的条件到建模的结果之间需要经过一个复杂的模型变量提取和模型关系构造的过程,因此辅助学习的目的不再是使学生单纯掌握问题的解答,而是掌握模型的思路和建模的方法。所以,对学习的考核也不再是简单地针对判断或计算的结果,而是面向相互联系、错综复杂的建模过程,从简单的“对错打分”变为复杂的综合评价。

为了适应以上特点,本课件没有采用用于基础课教学的课件惯用的框架型结构,而是采用了具有一定智能性的自适应结构。学生的学习过程与学生的初学水平、建模思路及模型的当前状态有关。系统可以根据学生所建模型的当前情况,提出指导意见,或进行提示性辅导。学生的学习成绩根据学生学习建模过程中表现出来的一系列动态行为评定,并实时显示给学生。学生所建模型的当前情况通过高分辨率显示器以鲜明、生动的彩色图案显示出来。

## 2 课件设计原理

### 2.1 功能—结构设计

课件的用户使用功能如下:

(1) 模拟 如果学生对所要学习的模型一无所知,那么课件能够充当模拟生的角色,按照最佳的建模步骤,先给学生演示一遍建模过程。

(2) 建模 如果学生对于要学的模型已有一定的了解,可以在课件的支持下建立一个初步模型,并在课件的引导和帮助下不断纠正错误的建模行为,完善所建模型的元素和关系。

(3) 指导 课件可以充当专家的角色,按照最佳建模步骤,在学生需要时,代替学生进行建模。学生请求一次,“专家”代建一步,以启发学生完成后续的建模过程。

(4) 提示 如果学生只想得到“专家”关于下一步该怎么办的提示,而具体的建模步骤由自己来完成,那么可以使用提示功能。该功能可以给出指导学生建模行为的一句提示的话,而不代替学生建模。

(5) 求助 需要时学生可以查询题目内容和模型变量的名称及编号。

(6) 打分 学生的建模行为(包括成功和失败的)都将被打分,并计入最后总分,根据建模行为的重要程度,每一步得分或失分不同。“专家”代建时学生不得分。

(7) 显示 学生所建模型(包括“专家”代建部分)的当前情况,实时显示在高分辨显示器上,学生的得分显示在终端屏幕上。

为实现以上七项功能,课件有五个主要功能模块及一个运控程序。这五个模块是:

i) 模型知识模块; ii) 输入模块; iii) 搜索模块; iv) 图形模块; v) 效益评估模块。

### 2.2 模块设计原理

#### 2.2.1 模型知识模块

课件所采用的连续系统建模方法是系统动力学方法。模型知识模块用于存贮关于系统动力学模型图的知识。

模型知识表达分模型元素知识表达和模型关系知识表达两类。关于某一模型元素的知识可以表达如下

$$x m n y$$

其中,  $x \in \{0, 1\}$ ,  $m, n \in [1, 9]$ , 是自然数,  $y \in \{L, D, R, F, C, A, P\}$ 。

$x$ : 标划符。如果学生当前所建模型中已经包含了此元素,则  $x=1$ , 称此元素为标划过的; 否则  $x=0$ , 此元素为未标划的。

$m n$ : 元素的变量编号。

$y$ : 元素的变量属性。 $y$ 取  $L, D, R, F, C, A$ 和  $P$ 时, 分别是流位、延迟、流率、源、汇、辅助变量和参数。

关于模型元素间关系的知识有两种基本的表达方法, 即知识链和知识树。

• 物流  $S_m$  和资金流  $S_s$  可以用知识链来表示。

$n$  阶链的基本形式是:

$$S_m \text{ (或 } S_s \text{)} : F - R_1 - D_1 - L_1 - R_2 - D_2 - L_2 - \dots - R_{n+1} - C$$

· 信息流  $S_i$  可以用知识树来表达。

$n$  层树的第一层的基本形式如图 1。

图中树根  $R_1$  称为信息中心。带 0 号的树枝称为末端； $\{\cdot\}$  表示末端上某类元素的集合； $A^*$  表示已标号的辅助变量，指已作为其它信息树中元素的辅助变量； $F_0$  是可控的源。

$j(2 \leq j \leq n-1)$  层的基本形式如图 2。

可见第  $j$  层是以  $j-1$  层非末端枝为信息中心的  $m_{j-1}$  个子树 ( $m_{j-1}$  是  $j-1$  层中无标号辅助变量的个数)。

第  $n$  层的基本形式见图 3。

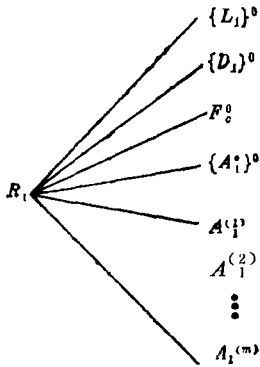


图 1  $n$  层数的第一层

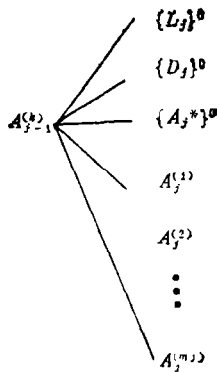


图 2  $n$  层树的中间层

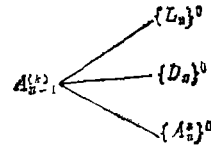


图 3  $n$  层树的最外层  
 $k = 1, 2, \dots, m_{n-1}$

可见，第  $n$  层是由  $m_n$  个由末端枝组成的子树。

### 2.2.2 效益评估模块

该模块用于计算建模行为的效益，是“专家”选择最佳建模步骤的基础。

· 效用值  $U$ ：表征“专家”对各种模型元素在建模中的相对重要程度的认识，是度量建模行为有效性的静态尺度。

课件中采用的各类元素的效用值及各元素的排序情况如下：

$$L(1.0) > R(0.8) > D(0.6) > F(0.5) \\ = C(0.5) > A(0.4) > P(0.2)$$

· 信息收益  $I$ ：表征“专家”对当前的模型状态下，各类模型元素在建模中的缓急程度的认识，是度量建模行为有效性的动态尺度，

学生学习建模的过程，就是在已掌握知识的基础上，逐渐改正对模型的错误认识，直至掌握关于模型的全部知识的过程，也是一个逐渐减少关于模型的元素和元素间关系的不确定性的过程。

假定模型中含有流位、流率等  $m$  类元素 ( $m \leq 7$ )， $j$  类元素的个数为  $N_j, j = 1, 2, \dots, m$ 。同类元素的不确定性等同，在不考虑各元素之间的相互关联性的条件下，每一个  $j$  类元素所拥有的信息量可按式计算：

$$I_j = \log_2 N_j - \log_2 (N_j - 1)$$

$$= \log_2 \frac{N_j}{N_j - 1}, \quad N_j \geq 2$$

$N_j=1$ 时, 取 $I_j=1.0$  (bit)

这里 $I_j$ 称为建模行为的信息收益。

• 相关度  $R$ : 表征“专家”对建模过程中, 相邻两个建模步骤之间的联系程度的认识, 是度量建模行为有效性的关联尺度。

(1) 在同一物流或资金流  $S$  中, 相邻元素  $E_i, E_{i+1}$  之间的相关度为 1, 表示成  $R(E_i, E_{i+1})=1.0, E_i, E_{i+1} \in S, E_i \rightarrow E_{i+1}$  (相邻)。不相邻元素  $E_i, E_{i+k} (k \geq 2)$  之间的相关度与两个元素之间的距离  $k-1$  (即两元素之间隔过的元素个数) 有关, 其关系为:

$$R(E_i, E_{i+k}) = 1 - 0.2 * (k - 1), \quad 2 \leq k \leq 5$$

$$R(E_i, E_{i+k}) = 0.2 \quad k > 5$$

$$E_i, E_{i+k} \in S, \quad k \geq 2$$

(2) 在同一信息流  $S_l$  的同一信息层 (第  $k$  层)  $S_l^{(k)}$  中的两个辅助变量的相关度为 1, 记作

$$R(A_i, A_j) = 1.0, \quad A_i, A_j \in S_l^{(k)}$$

信息层的含义如图 4 所示。  $A_1, A_4, A_5$  属于第一层  $S_l^{(1)}$ ,  $A_2, A_3, A_6$  属于第二层  $S_l^{(2)}$ ,  $A_7$  属于第三层  $S_l^{(3)}$ 。

不同两层  $S_l^{(k)}, S_l^{(l)}$  (假定  $l > k$ ) 之间, 如果其中某一信息层中包含的所有元素均已出现在学生所建的模型中, 那么

$$R(E_i, E_j) = 1.0$$

$$E_i \in S_l^{(k)}, E_j \in S_l^{(l)}, \quad i=1, 2, \dots, n_k, \quad j=1, 2, \dots, n_l$$

否则

$$R(E_i, E_j) = 1.0 - 0.2 * (l - k), \quad k < l \leq 4 + k$$

$$R(E_i, E_j) = 0.2, \quad l > 4 + k$$

$$E_i \in S_l^{(k)}, E_j \in S_l^{(l)}, \quad i=1, 2, \dots, n_k, \quad j=1, 2, \dots, n_l$$

(3) 在两条不同的物流、资金流或信息流  $S_k$  及  $S_l$  中, 如果其中有一条流中包含的所有元素均已出现在学生所建的模型中, 那么

$$R(E_i, E_j) = 1.0$$

$$E_i \in S_k, E_j \in S_l, \quad i=1, 2, \dots, n_k, \quad j=1, 2, \dots, n_l$$

否则

$$R(E_i, E_j) = 0.5$$

$$E_i \in S_k, E_j \in S_l, \quad i=1, 2, \dots, n_k, \quad j=1, 2, \dots, n_l$$

(4) 在中心不同的两个信息流  $S_k, S_l$  之间, 如果其中有一条流中包含的所有元素均已出现在学生所建的模型中, 那么

$$R(E_i, E_j) = 1.0$$

$$E_i \in S_k, E_j \in S_l, \quad i=1, 2, \dots, n_k, \quad j=1, 2, \dots, n_l$$

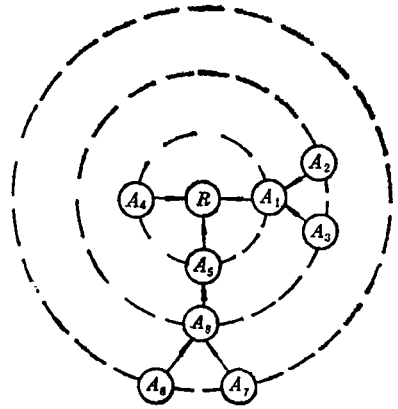


图 4 信息层

否则

$$R(E_i, E_j) = 0.5$$

$$E_i \in S_k, E_j \in S_l, i=1, 2, \dots, n_k, j=1, 2, \dots, n_l$$

(5) 学习建模的第一步, 相关度恒为 1, 记为  $R(E_0, E_1) \equiv 1$

• 建模行为  $j$  的效益 (有效性的量度) 为

$$B_j = U_j * I_j * R(E_{j-1}, E_j) * \alpha$$

$U_j$ :  $j$  行为所增添元素的效用值;  $I_j$ :  $j$  行为的信息收益;  $R_j$ :  $j$  行为与上一次建模行为的相关度;  $\alpha$ : 适当的放大因子。

### 2.2.3 输入模块

该模块用于输入模型元素。首先用提问的方式请学生输入所增添元素的编号 ( $mn$ ) 及属性 ( $y$ ), 形成元素的信息编码  $Q_1 \triangleq 0mny$ , 然后调用搜索模块。如果  $y=A$ , 则搜索知识树, 否则搜索知识链, 查找模型知识库里有无此元素。若无, 给出一定信息返回。

若模型知识库中含有  $Q_1$  元素, 则请学生输入直接影响  $Q_1$  或受  $Q_1$  直接影响的已输入元素  $Q_2$  (如果  $Q_1$  是学生输入的的第一个元素, 则不需要这一步), 并调用搜索模块检查  $Q_1$ 、 $Q_2$  是否在同一知识链或知识树中。若不在, 则给出一定信息返回。

若  $Q_1$ 、 $Q_2$  在同一知识链或树中, 则将模型知识库中的  $0mny$  改变为  $1mny$ 。

如果当前阶段学生已开始了对模型的学习, 则求出此建模步骤与上一步骤的相关度  $R$ , 然后返回。若进行的是初始模型的输入, 则可直接返回。

### 2.2.4 搜索模块

该模块用于完成对模型知识库的搜索。搜索模块有 ILT 和 IC 两个参数, 搜索内容由参数 IC 及 ILT 的组合而定。

第一类搜索: 模型知识库中的所有元素是否均被标划。置  $IC=1, ILT=0$ 。

第二类搜索: 某一元素是否包含在模型知识库中。参数设定  $IC=0, ILT=10$  (或  $ILT=01$ )。当  $ILT=10$  时, 搜索知识链;  $ILT=01$  时, 搜索知识库。

搜索的方式与知识库的数据结构有关。这里不赘述。

### 2.2.5 图形模块

该模块用于实时显示学生所建的模型图。

如果增添的元素是  $xmny$ , 则查找并执行绘图程序中的第  $mn$  条语句, 将此元素显在屏幕的一定位置上; 然后搜索知识库, 看与  $xmny$  相邻的元素的首位是否为 0。若是则返回; 否则, 做出从  $xmny$  到相邻元素的连线, 然后返回。

## 3 实例

最后, 给出一个建立“流行病传染过程仿真”模型的例子。该模型中元素情况见下表:

模型元素名称	变 量	编号
易染人数	SUSC	1
得病人数	SICK	2
有免疫力的人数	IMM	3
传染率	INFEC	4
治愈率	RECOV	5
接触系数	CONTAC	6
平均治愈周期	RECOVI	7
染病者平均每天接触人数	AVCON	8
总人数	TOTAL	9
平均染病周期	PRCON	10

选择这一模型后, 课件显示:

本题总分 87

1—— 开始构模练习

2—— 浏览练习内容

请选择

选择 1, 课件提问:

你能建立一个初步的系统模型吗 <Y/N>?

如键入 N, 则课件充当模拟生角色演示建模过程; 键入 Y, 显示

请输入所增添模型元素的编号

按 S 键查找编号.....

1 ✓ (键入 1)

请输入易染人数的属性

流位..... L      流率..... R      延迟..... D

辅助变量... A      源..... S      汇..... C

函数..... F

属性一律用大写字母表示

(高分辨显示器上显示“易染人数”的模型图符号)

用类似方法输入元素 2 后, 课件显示

输入方式选择: 在同一物流中

1. 输入对得病人数有影响的元素

2. 输入得病人数对其有影响的元素

1 ✓

输入此元素, 它必须是已输入的元素

键入 S 显示题目内容

1 ✓

(高分辨显示器上显示“得病人数”的模型图符号及“易染人数”到“得病人数”的连线)

输入元素3后,初始模型输入完毕,课件给出评语:

评 语

我认为你的初始模型建得较差,  
在下面的学习中要多加努力

然后进入辅助建模阶段。课件显示:

32

- 1——请求专家指导
- 2——增添模型元素
- 3——建模求助信息
- 4——浏览题目内容
- 0——返回主菜单

学生不知下步该怎么办,键入3,“专家”提示:

是否还缺少流率变量?

用与输入初始模型相似的方法输入元素4后,课件显示:

40

- 1——请求专家指导
- 2——增添模型元素
- 3——建模求助信息
- 4——浏览题目内容
- 0——返回主菜单

键入1,请求“专家”指导,课件显示:

专家建议

下一步最好增添治愈率,  
对它有直接影响的是得病人数  
按回车键……………

接着,学生输入了元素6,课件显示:

好,模型中的基本元素已具备,  
模型中各元素间的关系还没找完

39

- 1——给出模型关系
- 2——请求专家指导
- 3——浏览题目内容
- 0——返回主菜单

按照与模型元素输入相似的方法,可以在上面菜单的引导下构造各元素之间的关系。最后,模型建成后系统显示:

祝贺你,模型已全部建成,  
你的得分 51

这时高分辨显示器上显示的学生最终完成的模型如图(5)所示。

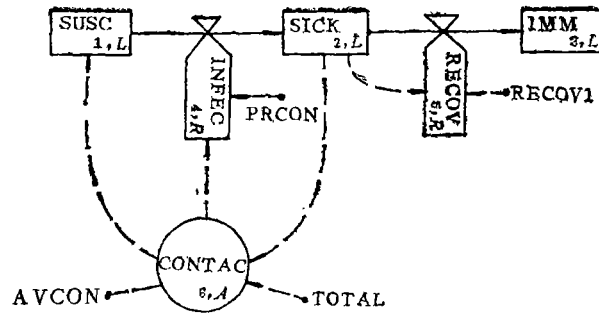


图5 流行病传染模型

## 参 考 文 献

- [1] Donald M May et al. Application of Adaptive Decision Aiding System to Computer Assisted Instruction Experimental Studies, AD-A050887

## The Computer-Aided Instruction System of learning and Examination with the Continuous Systems Modeling

Wang Weiping

(Department of Mathematics and system Engineering)

### Abstract

This paper introduces the function and design principles of a computer-aided instruction system which can be used to aid a student's learning and examination about the continuous systems modeling. The methods for system dynamics model knowledge representation and modeling behavior validity measure are discussed in detail.

**Key words:** computer aided instruction, continuous systems modeling, system dynamics model, moded knowledge representation