

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201210001

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130603.1601.007.html>

# GM(1, N) 和 QSIM 结合的复杂系统的 定性仿真建模方法

王洪利<sup>1,2</sup>

(1. 中原工学院 经济管理学院, 河南 郑州 450000; 2. 西安交通大学 管理学院, 陕西 西安 710009)

**摘要:**针对复杂系统仿真中系统信息缺乏、QSIM 建模方法可使用微分方程的特点,在复杂系统仿真方法中,提出了一种 GM(1, N) 和 QSIM 相结合的定性建模方法.首先给出了相关研究的现状,然后提出了 GM(1, N) 和 QSIM 相结合的仿真建模方法的基本原理和主要过程.最后通过一个系统仿真建模实例验证了该方法的可行性.结果表明,该方法具有充分利用系统较少信息,能将定量和定性信息有效地融合与复杂系统的仿真建模之中的特点.

**关键词:**复杂系统;定性建模;以约束为中心;GM(1, N)

**中图分类号:** TP18; N945.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)04-0367-05

**中文引用格式:**王洪利.GM(1, N) 和 QSIM 结合的复杂系统的定性仿真建模方法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(4): 367-371.

**英文引用格式:**WANG Hongli.Qualitative modeling and simulation of complex system based on the combination of GM(1, N) and QSIM[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(4): 367-371.

## Qualitative modeling and simulation of complex system based on the combination of GM(1, N) and QSIM

WANG Hongli<sup>1,2</sup>

(1.School of Economic and Management, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450000, China; 2.School of Management, Xi'an Jiaotong University Xi'an 710009, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of complex system simulations, such as a lack of information, and the possibility of QSIM modeling method employing differential equations, a qualitative modeling method combining QSIM and GM(1, N) is proposed. First the relative researches are reviewed. The variable space expression of uncertain information based on the cloud model is provided. Then the process and principles of combination of QSIM and GM(1, N) qualitative simulation are given. Lastly, the modeling method was applied to the case of modeling in the modeling and simulation of the complex system to verify the feasibility of the method. The results show that this method has full use of fewer system information. Both quantitative and qualitative information can effectively be integrated into modeling and simulation of complex systems.

**Keywords:** complex system; qualitative modeling; QSIM; GM(1, N)

管理科学的研究对象往往是现实世界中的复杂系统,管理系统具有复杂性特征<sup>[1]</sup>,由于复杂系统中信息的匮乏,复杂系统的仿真主要采用定性仿真为主,目前使用最广泛的复杂系统定性仿真方法是 QSIM,又被称为以约束为中心的仿真方法<sup>[2]</sup>.采用

定性与定量相结合的方法是复杂系统仿真的发展趋势<sup>[3]</sup>,定性与定量相结合的仿真能够充分利用系统的定性和定量信息,克服定性与定量相互脱节的问题.定性与定量相结合的仿真也被称为量性融合仿真或者半定性半定量仿真,又可细分为以定量为主定性为辅、以定性为主定量为辅 2 种,复杂系统的特点决定了其仿真原则上应该以后者为主.但在当前复杂系统的量性融合仿真中,仍然存在仿真效率不高,仿真方法和手段缺乏的弱点,究其原因,主要表

收稿日期:2012-10-01. 网络出版日期:2013-06-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71001082);河南省软科学研究计划资助项目(122400440143).

通信作者:王洪利. E-mail: graduated852@163.com.

现为以下3个问题:1)复杂系统的信息缺乏,复杂系统属于贫信息的系统,只有少量和不完整的信息可供使用;2)由于信息的缺乏带来系统间变量的关系难以确定的问题,导致无法采用常规的方法建立系统变量之间的关系模型;3)单一的方法无法解决复杂系统的仿真和建模问题,需要结合多种理论和方法解决复杂系统的仿真和建模,但如何结合和怎么使用是一个值得研究的问题.本文在回顾经典的QSIM和GM(1,N)建模方法并分析其优缺点的基础上,提出了一种QSIM和GM(1,N)相结合的复杂系统半定性半定量建模方法.

## 1 经典的QSIM和GM(1,N)建模方法

1986年美国德州大学的Kuipers提出的定性仿真理论—QSIM<sup>[2]</sup>,一直以来是复杂系统的定性仿真中应用最广泛的仿真方法,QSIM被称为以约束为中心的方法,因为它根据不完备知识系统定性微分方程(QDE)和系统的初始条件来预测系统的所有可能的定性行为.其预测结果是一个行为集合,在这个集合中,一些反映了系统的客观行为,一些反映了系统的潜在可能行为,另一些则是由于系统信息不足而产生的不可能行为(也称为奇异行为).在以约束为中心的定性仿真方法中,使用一组定性微分方程构建系统,定性微分方程是由定性参数和定性约束组成的,所有对所研究系统行为产生影响的变量都应考虑作为系统参数,参数的定性空间用一个有序路标值来表达<sup>[4]</sup>.定性约束是对系统参数之间关系的定性表达,Kuipers在QSIM中建立了MULT(X,Y,Z)、ADD(X,Y,Z)、DERIV(X,Y)、MINUS(X,Y)、M+(X,Y)、M-(X,Y)等定性关系,分别代表乘、加、导数、相反数、函数间单调增和单调减的关系<sup>[4]</sup>.在QSIM中,每个定性参数状态用一个二元组来表示: $q = (Qval, Qdir)$ ,Qval表示q的定性值,Qdir表示q的变化方向<sup>[4]</sup>.每个定性参数随着时间的推进有一个状态序列.在系统的当前时刻,系统的状态由参数的当前状态组合而成,系统的仿真演化通过系统下一时刻的可能状态组合变化来实现.下一时刻所有的状态组合,经过约束过滤、一致性检查、全局过滤后,得到系统下一时刻可能的系统状态<sup>[4]</sup>.在系统不断向前演化的过程中,形成了一个具有多种可能分支的状态树,树上每个结点就是一个系统状态,从树根到树梢的一个通路,便是系统的一个可能演化路径,即系统行为<sup>[4-5]</sup>.从QSIM算法被提出至今,其在算法实现和应用方面得到了广泛而深入的研究<sup>[6-10]</sup>.但是当使用QSIM进行复杂系统仿

真的时候,系统定性方程的建立往往依赖于使用微分方程,而复杂系统的信息贫乏,微分方程往往建立困难.

由华中科技大学邓聚龙教授提出的灰色系统理论,研究对象为灰色系统.所谓的灰色系统是指相对于一定的认识层次,系统内部的信息部分已知,部分未知,即信息不完全<sup>[11]</sup>.灰色系统是指“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”,“贫信息”的不确定性系统,它通过对“部分”已知信息的生成、开发去了解、认识现实世界,实现对系统运行行为和演化规律的正确把握和描述<sup>[12]</sup>.灰色系统具有如下特点:用灰色数学处理不确定量,使之量化,充分利用已知信息寻求系统的运动规律,能处理贫信息系统<sup>[12]</sup>.在灰色系统理论中,灰色GM(1,N)建模方法具有利用系统少量信息,采用生成方法建立系统的微分方程的特点.常见的生成方法包括累加生成、累减生成、均值生成、级比生成等.生成方法是针对原始数据操作和处理手段.生成方法能将原始数据的杂乱无章的外表掩盖下难以发现的某种内在的规律挖掘出来.灰色GM(1,N)建模方法通过发现生成数据的规律,进行预测,并将生成数据的预测结果还原为原始数据的预测值.GM(1,N)建模方法具有以下特征<sup>[11]</sup>:1)在建模过程中所使用的信息量很少,一般情况下只要有4个以上的时间序列数据就可以建模了;2)不需要预先知道原始数据的分布特征,即使是对于不符合已知分布的原始数列,一般也可以通过生成方法转化为有序数列;3)所建立的模型精度比较高,能较好地仿真和预测原系统的行为.灰色系统的GM(1,N)建模方法的以上特点,决定了其处理系统只需要极少的信息,特别适合于贫信息复杂系统的建模.

## 2 GM(1,N)和QSIM结合的建模方法

GM(1,N)和QSIM结合的建模过程的基本原理如下:利用专家知识和对系统的观察逐步搜集系统变量的信息和数据,尽管这些信息是不完全的,但是对于复杂系统来说却是最宝贵的,是赖以建模和仿真分析的惟一基础,然后根据搜集到的信息使用GM(1,N)进行建模得到系统变量之间的微分方程,将建立的系统的微分方程结合系统的其他约束建立系统的QSIM仿真模型.具体过程如下:

1)搜集系统和系统变量的信息.

2)根据专家经验知识,判断变量之间基本关系,使用灰色系统理论中的GM(1,N)方法,建立系统变量间的微分约束,方法如下<sup>[11-12]</sup>:

①对  $X_i^{(0)}$  做累加生成,得到生成数列:

$$X_i^{(1)} = (X_i^{(0)}(1), \sum_{m=1}^2 X_i^{(0)}(m), \dots, \sum_{m=1}^n X_i^{(0)}(m)) = (X_i^{(0)}(1) + X_i^{(0)}(2), \dots, X_i^{(0)}(1) + \dots + X_i^{(0)}(n-1) + X_i^{(0)}(n)), i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

②将数列  $X_i^{(1)}$  的时刻  $k=1, 2, \dots, n$  看作连续的变量  $t$ , 而将数列  $X_i^{(1)}$  转而看成时间  $t$  的函数  $X_i^{(1)} = X_i^{(1)}(t)$ . 如果数列  $X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, \dots, X_N^{(1)}$  对  $X_1^{(1)}$  的变化率产生影响, 则可建立白化式微分方程

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + aX_1^{(1)} = b_1X_2^{(1)} + b_2X_3^{(1)} + \dots + b_{N-1}X_N^{(1)}. \quad (2)$$

这个微分方程模型记为 GM(1,N). 其参数列记为

$$a = [a \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{N-1}]^T.$$

③再设

$$Y_N = [X_1^{(0)}(2) \ X_1^{(0)}(3) \ \dots \ X_1^{(0)}(n)]^T,$$

将方程(2)按差分法离散, 可得到线性方程组, 形如

$$Y_N = B\hat{a}. \quad (3)$$

按照最小二乘法, 有

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N. \quad (4)$$

利用2点滑动平均的思想, 最终可得矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_1^{(1)}(1) + X_1^{(1)}(2)) & X_2^{(1)}(2) & \dots & X_N^{(1)}(2) \\ \frac{1}{2}(X_1^{(1)}(2) + X_1^{(1)}(3)) & X_2^{(1)}(3) & \dots & X_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2}(X_1^{(1)}(n-1) + X_1^{(1)}(n)) & X_2^{(1)}(n) & \dots & X_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

④求出  $\hat{a}$  后, 微分方程(2)便确定了. 如果只有1或2个变量的数列, 则模型为 GM(1,1) 模型或 GM(1,2) 模型.

⑤若  $n-1 < N$ , 则方程组(3)的方程个数少于未知数的个数, 此时,  $B^T B$  是奇异矩阵, 无法利用式(4)得到  $\hat{a}$ , 称这时的信息为贫信息. 考虑到向量  $\hat{a}$  的元素实际上是各子因素对母因素影响大小的反映, 因此, 引入矩阵  $M$  对  $a^T a$  做加权极小化. 对未来发展趋势减弱的子因素赋予较大的权, 对有发展潜力的子因素赋予较小的权, 这样做可把未来的可能情形也考虑进来, 使之更好地反映未来的实际情况. 具体地, 令  $M = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_N)$ . 其中, 若  $X_i$  对  $X_1$  的影响有减弱的趋势, 则  $a_i$  相应较大; 反之, 若  $X_i$  对  $X_1$  的影响有增加的趋势, 则  $a_i$  相应较小. 此时, 计

算向量  $\hat{a}$  可采用式(6):

$$\hat{a} = M^{-1} B^T (B M^{-1} B^T)^{-1} Y_N. \quad (6)$$

3) 建立系统的 QSIM 定性仿真模型, 方法如下:

从2)中建立的常微分方程(ODE)出发, 建立系统的定性微分方程(QDE).

根据2)中建立的微分方程, 建立 QSIM 的定性微分方程:

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + aX_1^{(1)} = b_1X_2^{(1)} + b_2X_3^{(1)} + \dots + b_{N-1}X_N^{(1)},$$

令  $f_1 = \frac{dX_1^{(1)}}{dt}$ , 建立定性微分约束:

$$\text{DERIV}(f_1, X_1^{(1)}). \quad (7)$$

令  $f_{21} = aX_1^{(1)}$ , 建立定性约束:

$$\text{MULT}(a, X_1^{(1)}, f_{21}).$$

令  $f_{22} = b_1X_2^{(1)}, f_{23} = b_1X_3^{(1)}, \dots, f_{2N} = b_1X_N^{(1)}$ , 建立定性约束:

$$\text{MULT}(b_1, X_2^{(1)}, f_{22}),$$

$$\text{MULT}(b_2, X_3^{(1)}, f_{23}),$$

...

$$\text{MULT}(b_{N-1}, X_N^{(1)}, f_{2N}).$$

令  $f_3 = f_1 + f_{21}$ , 得到定性约束:

$$\text{ADD}(f_1, f_{21}, f_3),$$

令  $f_5 = f_{22} + f_{23} + \dots + f_{2N}$ , 得到定性约束:

$$\text{ADD}(f_{22}, f_{23}, \dots, f_{2N}, f_5),$$

综上, 得到定性微分方程(QDE):

$$\text{QDE} = \begin{cases} \text{DERIV}(f_1, X_1^{(1)}), \\ \text{MULT}(a, X_1^{(1)}, f_{21}), \\ \text{MULT}(b_1, X_2^{(1)}, f_{22}), \\ \text{MULT}(b_2, X_3^{(1)}, f_{23}), \\ \dots \\ \text{MULT}(b_{N-1}, X_N^{(1)}, f_{2N}), \\ \text{ADD}(f_1, f_{21}, f_3), \\ \text{ADD}(f_{22}, f_{23}, \dots, f_{2N}, f_5). \end{cases}$$

4) 重复2)~3), 建立系统所有变量之间所有的微分方程.

5) 补充变量之间的其他约束关系. 根据系统的其他信息, 建立变量的其他约束. 例如单调约束: 在函数关系中, 最常见和最重要的是函数间的单调关系<sup>[4]</sup>. 对于函数之间的单调约束, 表示了参数间同时增减或相反的性质. 实际上单调约束表示了2个参数的变化速率之间的关系. 仿真系统建模中包含2种单调约束:  $M^+(X, Y)$  和  $M^-(X, Y)$ . 即有:

$$M^+(X, Y) = \begin{cases} \text{if } f'(x) = 0, & \text{then } f'(y) = 0; \\ \text{if } f'(x) > 0, & \text{then } f'(y) > 0; \\ \text{if } f'(x) < 0, & \text{then } f'(y) < 0. \end{cases}$$

$$M^-(X, Y) = \begin{cases} \text{if } f'(x) = 0, & \text{then } f'(y) = 0; \\ \text{if } f'(x) > 0, & \text{then } f'(y) < 0; \\ \text{if } f'(x) < 0, & \text{then } f'(y) > 0. \end{cases}$$

式中:  $f'$  为参数的导数. 此导数实际上就是系统状态表达中的系统参数的变化速率.

6) 根据系统的其他信息, 定义系统量空间, 建立变量的初值和系统的初始状态.

### 3 一个建模实例

以下给出了一个信息贫乏系统的定性建模实例. 该实例中需要分析建立工业总产值和其他变量(包括发电量、未来受教育职工数、物耗、技术水平、滞销积累量、待业人数)之间的影响关系模型, 以分析和预测系统的将来行为. 实例中有 7 个变量, 而历史数据只有 5 年, 因此属于贫信息的系统.

表 1 某地区 1981—1985 年各项指标的统计数据

Table 1 Static data of indexes for 1981—1985 of regions

参数	1981	1982	1983	1984	1985
工业总产值 $X_1$	31 013	33 656	37 390	51 531	65 231
发电量 $X_2$	17 128	17 735	17 227	18 632	20 343
未来受教育职工 $X_3$	10 748	12 213	13 853	15 196	17 979
物耗 $X_4$	17 865	19 549	21 584	29 349	36 117
技术水平 $X_5$	0.968	0.985	0.945	1.091	1.183
滞销积累量 $X_6$	20 865	22 834	26 440	28 573	33 588
待业人数 $X_7$	15 149	16 247	20 226	31 459	34 603

表 1 为某地区 1981—1985 年各项指标的统计数据(该实例取自于文献[11]). 由于本实例的未知数有 7 个, 而时间序列  $i=1, 2, 3, 4, 5$ , 故不能按式(4)建立 GM(1, 7) 模型, 而必须按贫信息方法式(6)估计  $\hat{a}$ . 按这种方法最终得到 GM(1, 7) 模型(过程和方法参见第 2 节)为

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + 0.66X_1^{(1)} = 2.46X_2^{(1)} - 0.91X_3^{(1)} + 2.5X_4^{(1)} - 3.6 \times 10^{-5}X_5^{(1)} - 2.08X_6^{(1)} - 8.5 \times 10^{-2}X_7^{(1)}.$$

建立系统的 QSIM 定性仿真模型, 得到的定性微分方程(QDE), 过程如下:

$$\text{令 } f_1 = \frac{dX_1^{(1)}}{dt}, \text{ 建立定性微分约束:}$$

$$\text{DERIV}(f_1, X_1^{(1)}).$$

$$\text{令 } f_{21} = 0.66X_1^{(1)}, \text{ 建立定性约束:}$$

$$\text{MULT}(0.66, X_1^{(1)}, f_{21}).$$

$$\text{令 } f_{22} = 2.46X_2^{(1)}, f_{23} = -0.91X_3^{(1)}, f_{24} = 2.5X_4^{(1)},$$

$$f_{25} = -3.6 \times 10^{-5}X_5^{(1)}, f_{26} = -2.08X_6^{(1)} \text{ 和 } f_{27} = -8.5 \times$$

$10^{-2}X_7^{(1)}$ , 建立定性约束:

$$\text{MULT}(2.46, X_2^{(1)}, f_{22}),$$

$$\text{MULT}(-0.91, X_3^{(1)}, f_{23}),$$

$$\text{MULT}(2.5, X_4^{(1)}, f_{24}),$$

$$\text{MULT}(-0.36 \times 10^{-5}, X_5^{(1)}, f_{25}),$$

$$\text{MULT}(-2.08, X_6^{(1)}, f_{26}),$$

$$\text{MULT}(-8.5 \times 10^{-2}, X_7^{(1)}, f_{27}).$$

令  $f_3 = f_1 + f_{21}$ , 得到定性约束:

$$\text{ADD}(f_1, f_{21}, f_3).$$

令  $f_5 = f_{22} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27}$  得到定性约束:

$$\text{ADD}(f_{22}, f_{23}, f_{24}, f_{25}, f_{26}, f_{27}, f_5).$$

综上, 得到如下的定性约束方程组:

$$\text{QDE} = \begin{cases} \text{DERIV}(f_1, X_1^{(1)}), \\ \text{MULT}(0.66, X_1^{(1)}, f_{21}), \\ \text{MULT}(2.46, X_2^{(1)}, f_{22}), \\ \text{MULT}(2.5, X_4^{(1)}, f_{24}), \\ \text{MULT}(-0.36 \times 10^{-5}, X_5^{(1)}, f_{25}), \\ \text{MULT}(-0.91, X_3^{(1)}, f_{23}), \\ \text{MULT}(-2.08, X_6^{(1)}, f_{26}), \\ \text{MULT}(-8.5 \times 10^{-2}, X_7^{(1)}, f_{27}), \\ \text{ADD}(f_1, f_{21}, f_3), \\ \text{ADD}(f_{22}, f_{23}, f_{24}, f_{25}, f_{26}, f_{27}, f_5). \end{cases}$$

接下来建立系统变量的定性量空间如下:

$$\begin{cases} X_1 \in (0, +\infty), \\ X_2 \in (0, +\infty), \\ X_3 \in (0, +\infty), \\ X_4 \in (0, +\infty), \\ X_5 \in (0, +\infty), \\ X_6 \in (0, +\infty), \\ X_7 \in (0, +\infty). \end{cases}$$

然后补充其他约束关系: 如待业人数  $X_7$  和未来受教育职工  $X_3$  之间存在关系如下: 未来受教育职工增加则待业人数减少. 则两者存在单调约束为

$$M^-(X_3, X_7).$$

至此, 得到的定性模型可以用于复杂系统的定性仿真和推理. 其定性仿真和推理方法可参见文献[4].

### 4 结束语

本文在复杂系统的建模中, 引入灰色系统的 GM(1, N) 建模方法和以约束为中心的 QSIM 定性建模方法, 把两者结合用来建立贫信息的复杂系统的模型, 得到了复杂系统的定性仿真模型, 为复杂贫信息系统的仿真建模提供了客观可行的方法. 同时通



过定性仿真建模的应用实例证明该建模方法的可行性.但是需要注意的是,上面得到的定性模型表示的是关于生成数据的模型,而不是原始数据的定性模型,将来进一步研究将其还原为原始数据的定性表示方法.接下来的工作还包括使用建立的模型进行仿真推理,得到复杂系统的生成数据的定性仿真分析,并将其还原为复杂系统的原始数据的仿真分析结论.

## 参考文献:

- [1] 胡斌, 肖人彬. 复杂系统的定性仿真[J]. 系统仿真技术, 2006, 2(1): 1-11.  
HU Bin, XIAO Renbin. Qualitative simulation of complex system [J]. Technology of System Simulation, 2006, 2(1): 1-11.
- [2] KUIPERS B J. Qualitative simulation[J]. Artificial Intelligent, 1986, 29(3): 289-338.
- [3] 陈宗海, 段家庆, 桂旺盛. 智能模拟之定性定量仿真的发展[J]. 自动化博览, 2005, S1(增): 4-8.  
CHEN Zonghai, DUAN Jiaqing, GUI Wangsheng. Development of qualitative and quantitative intelligent simulation [J]. Automation Reviews, 2005, S1(suppl.): 4-8
- [4] 白方周, 张雷. 定性仿真导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 50-75.
- [5] CLANEY D J, KUIPERS B. Static and dynamic abstraction solves the problem of chatter in qualitative simulation[C]//14th National Conference On Artificial Intelligent. Providence, Rhode, USA, 1997: 125-131.
- [6] PLATZNER M, RINNER B, WEISS R. A specialized computer architecture for QSIM[J]. IEEE Intelligent Syetem, 2000, 3: 62-68.
- [7] 梁昌勇, 杨善林, 黄梯云. QSIM 算法的序列因果关系约束和目标搜寻策略研究[J]. 计算机应用研究, 2001, 18(1): 21-24.  
LIANG Changyong, YANG Shanlin, HUANG Tiyn. Constraint and searching strategy of objection of QSIM[J]. Application Research of Computer, 2001, 18(1): 21-24.
- [8] 胡斌, 殷芳芳. 集成 CA 与 QSIM 的非正式组织群体行为演化的定性模拟[J]. 中国管理科学, 2005, 13(5): 130-136.  
HU Bin, YIN Fangfang. Qualitative simulation of group behavior in informal organization integrating CA and QSIM[J]. Chinese Management Science, 2005, 13(5): 130-136.
- [9] YILMAZ O, SAY ACC. Causes of ineradicable spurious predictions in qualitative simulation[J]. Journal of Artificial Intelligent Research, 2006, 27(1): 551-575.
- [10] ZHANG H, KITCHENHAM B, JEFFERY R. Planning software project success with semi-quantitative reasoning [C]//Proceedings of the Australian Software Engineering Conference. Melbourne, Australia, 2007: 369-378.
- [11] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992: 10.
- [12] 曹鸿兴, 郑耀文, 顾今. 灰色系统理论浅述[M]. 北京: 气象出版社, 1988: 10.

## 作者简介:



王洪利, 男, 1978 年生, 副教授, 博士后, 主要研究方向为管理复杂系统的建模与仿真、决策支持系统等, 主持在研国家自然科学基金 1 项、省重点科技攻关项目 1 项. 发表学术论文 45 篇, 其中被 Ei 检索 20 篇.