

多云建模方法的研究及应用

吴爱燕 曾广平 涂序彦

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘 要 分析了目前复杂大系统建模方法存在的优缺点,旨在研究一种适用于我国行政递阶管理机制的建模方法。这种方法能够很好地解决系统问题中的不确定性,尤其是人为主观造成的模糊性与采样数据随机性并存的问题。鉴于以上研究目标,探讨了多层状态空间模型,并引用图论诠释了其横向关系模型,同时融合正态云发生器的原理提出了一种“分解-集结”式的不确定性智能建模方法——多云建模方法。最后将该方法用于我国能源系统分析研究中,取得了较好的结果,证明了该方法的简单性和有效性。

关键词 多层状态空间模型,云模型,不确定性,复杂大系统

中图法分类号 TP391.1 **文献标识码** A

Research of Multi-layer Cloud Modeling Method

WU Ai-yan ZENG Guang-ping TU Xu-yan

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract The paper studied many complex large system modeling method, and analysed their advantages and disadvantages. Furtherly, its research purposes were put forward, and it is a new complex large system modeling method suitable for China's administrative hierarchy mechanism, and is able to effectively solve uncertainty of system information, especially coexistence of fuzziness and randomness. According to the research target, the paper discussed multi-layer state space model, described specification of its latitude model, and combined with the principle of the normal cloud generator, proposed a “decomposition-collection” type of uncertainty intelligence modeling method; multi-layer cloud modeling method. Finally, it was used to analyse China's energy system, and got a active result, which shows the method is simple and effective.

Keywords Multi-layer state space model, Cloud model, Uncertainty, Complex large system

复杂大系统建模方法的研究是研究复杂现象产生、发展、剖析各领域的复杂大系统问题的关键。目前比较成熟的研究方法有元胞自动机法、基于 Agent 的建模方法以及基于 petri 网的建模方法^[1,2]等。元胞自动机是一种动态模型,它的典型特点是具有自组织、自繁衍性,因此适用于模拟生长、复制、竞争与进化等现象,如生态的动态演化、化学污染的动态扩散等。但是这种研究方法构造方式繁杂、变种很多、行为复杂,尤其不适合研究自组织或自繁衍性不突出的系统问题。基于 Agent 的建模方法是一种智能化的建模方法,它的典型特点是自治性、能动性、社会能力等拟人主体性,因此它适用于在各种领域采用拟人的方法解决系统问题,同时多 Agent 建模方法还可以完成复杂大系统的协同智能仿真。但是 Agent 的所有拟人主体性都必须在特有的仿真平台上才得以实现,于是真正充分实现其拟人性有较高的难度。基于 petri 网的建模方法是一种对离散并行系统问题的数学表示方法,它善于描述异步、并发的系统行为,既可以用严格的数学表示,又可以实现图形的直观描述。尽管如此,它分析过于复杂的系

统异步并发行为时,数学表示会很庞大,难以求解,图形表述又会过于繁琐;而且复杂大系统的行为是多样化的,一旦将其用于描述非异步并发系统行为,其优势也就荡然无存了。现有复杂大系统的建模方法很多,但不管是哪种方法都有其各自的适用优势和局限性。众所周知,我国自建国以来一直是行政递阶管理机制,而研究系统问题、分析系统问题,都是为了更好地管理系统现象。本文在研究现有建模方法基础上,旨在探讨一种适用于我国行政递阶管理机制的建模方法,同时这种方法又能够很好地解决系统问题中的不确定性,尤其是人为主观造成的模糊性与采样数据随机性并存^[3,4]的问题。最后提出了多云建模方法,并将其用于我国农村能源系统分析。

1 理论基础

多云建模方法是在进一步研究完善多层状态空间建模方法的基础上提出的。涂序彦教授^[5,6]在研究大系统控制论时提出了多层状态空间建模方法,并论证了该方法适合于复

到稿日期:2011-02-24 返修日期:2011-06-07 本文受“十一·五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ04B07-2),863 国家高技术研究发展计划项目基金(2009AA012119)资助。

吴爱燕(1980—),女,博士生,讲师,CCF 会员,主要研究方向为智能计算方法、智能建模方法等,E-mail: wkyway@163.com;曾广平(1962—),男,博士生导师,主要研究方向为智能网络等;涂序彦(1935—),男,博士生导师,主要研究方向为人工智能及应用。

杂的大系统建模,将其研究发展为一种普适的复杂大系统建模方法。多层状态空间建模方法迎合了我国行政递阶管理机制,在用其构建的复杂大系统模型中信息被递阶传输,也正因此它被广泛用于交通、军事、机械控制等各个领域。该方法作为一种广义的建模方法定义了各种纵向关系模型及其层间的递阶关系,但其同层间横向关系的表述以及模型内部信息不确定性的解决方法,仍需进一步研究。

众所周知,无论是社会现象的研究,还是自然现象的研究,所调研的信息必定存在不确定性,即随机性、模糊性、随机性与模糊性的并存等^[7-9]情况。如在我国农村能源规划研究中,能源统计前期抽样调研本身就存在着随机性。而对某地区某一种可再生能源可利用状况的定义,也只能是用差、好、良好等语言值,语言值本身就存在着模糊性,所以抽样调研的数值一定存在随机性,语言值一定是随机性和模糊性并存的。那么,如何解决这些信息的不确定性直接关系到最终系统分析结果的精度,进而影响规划与决策的结果。此外,在能源调研信息中数值、语言值同时存在,它们如何在系统分析中结合,也是一个尚待解决的问题。

云模型是一个能够实现语言值与数值互相转换的智能模型^[10-12],它能够较好地解决复杂大系统中易量化情况和难以量化情况的融合及信息不确定性等问题。因此,本文融合云模型这一不确定性信息智能处理模型的思想,并借鉴图论的理论知识,研究发展了多层状态空间模型,提出了多层云状态空间模型。

2 多云建模方法

涂序彦教授在研究大系统控制论时,详细提出了一个复杂的大系统根据粒度信息定性分解的方法和定量分解的方法,以及高层系统和低层系统之间的联合运算模型(即纵向关系模型)。本文主要阐述高层、中层或是低层同一粒度层中的横向关系的表述以及系统研究中信息的不确定性。

2.1 横向关系模型的表述

横向关系模型主要是指同粒度空间之间的关系模型以及独立粒度空间内部的关系模型。相关的定义和结论如下。

定义 1 在同一层中,众多相关联的子系统或是独立粒度空间内部相互作用的因素称为子系统群,记为 S 。 S 可以包含一个或多个因素。

定义 2 同粒度层系统模型及独立粒度空间内部模型均记为 T ,它是多个子系统群的集合表示,即 $T = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, $T = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n$ 且 $S_i \cap S_j = \emptyset, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j, n$ 为子系统群的个数。

在某一子系统群中,每个子系统都抽象为一个节点,用 m_i 表示。同一子系统群中每个子系统间的关联都抽象为一条边,用 r_i 表示。这一关联上的关系(即子系统间的横向关系模型)抽象为边上的权,用 φ_i 表示。

定义 3 子系统群 S 可以用一个三元组 (M, R, Ψ) 表示,即 $S = (M, R, \Psi)$,满足如下条件:

(1) $M = \{m_1, m_2, \dots, m_p\}, R = \{r_1, r_2, \dots, r_q\}$, M 和 R 均是一个非空有限集合,且 $M \cap R = \emptyset$;

(2) $\Psi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_q\}$,是一个非空有限集合, φ_i 表示 r_i 上的关系模型,可以是知识模型、数学模型、定性模型、定量模型、静态模型或动态模型等各种子模型,同时 φ_i 可以为空模

型;

(3) M 和 R 中的元素可以根据研究需要动态扩充或缩小,但要始终满足以上两个条件。

结论 1 子系统群是连通图。

结论 2 同粒度层系统模型或独立粒度空间内部模型均由多个不连通的子系统群构成。

结论 3 在实际系统研究中,多层状态空间模型的横向空间关系模型可以根据实际需要表述成有向图或无向图关系。

2.2 不确定信息的处理方法

本文借鉴正态云发生器的原理设计了云转换器,以解决系统分析中所需定性信息与定量信息之间的转换以及这些信息的不确定性,尤其是随机性与模糊性的关联。云转换器模型图如图 1 所示。

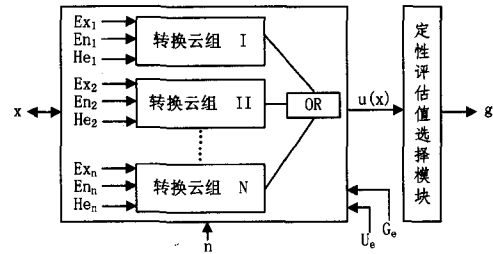


图 1 云转换模型图

云转换器定义如下。

(1) 一个云转换器包括转换云组的个数 k 、一个转换云组包括转换云的个数 l 由实际研究对象而定,每个转换云均满足云的定义^[11],记为 C_{ij} ;

$$C_{ij} = (Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij}), i \leq k \text{ 且 } j \leq l \quad (1)$$

(2) 各云组之间是或关系,某一时刻只能有一个云组工作;

(3) n 是转换云组的激活参数;

$$\exists n \in \phi \rightarrow \exists C_n; \phi = \{1, 2, \dots, k\}, C_n = \{C_{n1}, C_{n2}, \dots, C_{nl}\} \quad (2)$$

(4) x 是研究对象某属性信息的数值,满足正态云的要求;

(5) $u_i(x)$ 是 x 在转换云组 C_n 中第 i 个转换云上的确定度,它的求取满足正态云的定义^[11], $u_i(x) \in u(x)$;

(6) g 是由 x 转换得来的语言评价值;

$$g \leftarrow \max_{C_n} \{u_i(x)\} \quad (3)$$

(7) G_e 和 U_e 是专家针对研究对象某属性信息给定的语言评价和相应的确定度, G_e 和 U_e 通过转换云可以得到相应的数值 x 。

$$x = Ex_{ij} - \sqrt{-\ln U_e \times 2 \times (En_{ij})^2} \quad (4)$$

$$G_e \triangleright C_{ij} = (Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij})$$

3 多云能源系统分析模型

3.1 层次的划分

能源系统分析主要针对我国各省、县、乡、村 5 级管理辖域,完成下面功能,为农村用能规划及可再生能源开发提供依据。

(1) 分析各级辖域自然能源的存在状况;

(2) 分析各级辖域农村日常生活能源的用能状况;

(3)分析可再生能源的已开发状况;

(4)分析各级辖域农村日常生活能源的用能对比,以及各级辖域农村日常总能耗的对比情况。

根据以上任务,本文按照管理辖域构建省、市、县、乡、村5层模型,其广义状态变量定义为具体系统分析的数据流。能源系统分析5层模型如图2所示。

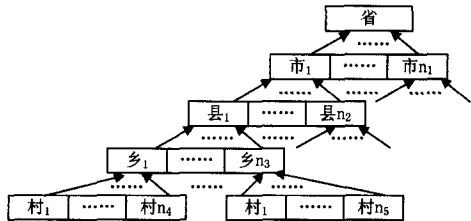


图2 能源系统分析五层模型图

3.2 纵向关系模型

(1)自然能源存在状况模型:自然能源存在状况主要考虑所分析区域农村的年平均日照情况,开发生物质能所需柴薪、秸秆、牧草等自然存在情况,周围水源存在情况,年平均自然风力情况。以上情况,调研时采用语言信息{VG,G,M,B,N}进行评价,它们分别表示{很好,好,一般,差,无}。其运算分为两步:首先,将对象的平均从高平到低平进行排序;然后,依次对评价信息进行合取运算。运算规则如下。

$$VG \wedge VG = VG \quad VG \wedge G = VG \quad VG \wedge M = G$$

$$VG \wedge B = G \quad VG \wedge N = M \quad G \wedge G = G$$

$$G \wedge M = G \quad G \wedge B = M \quad G \wedge N = M$$

$$M \wedge M = M \quad M \wedge B = M \quad M \wedge N = B$$

$$B \wedge B = B \quad B \wedge N = B$$

(2)生活用能状况模型:生活用能状况主要考虑电力、蜂窝煤、散装煤、木炭、液化气、天然气、秸秆、柴薪、沼气、太阳能、太阳灶等11种能源的日常消耗。

$$R_{k1} = \left(\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \right) \times n_2 \times co \quad (5)$$

$$R_{k2} = \sum_{j=1}^{n_1} \left[\left(\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_{ji} \right) \times n_2 \times co_i \right] \quad (6)$$

$$R_H = \sum R_L \quad (7)$$

式中, R_{k1} 和 R_{k2} 是最底层的核心系统分析关系; R_L 表示较低一层的关系模型; R_H 表示比 R_L 高一层的系统模型; n_1 表示某粒度系统调研的子粒度系统个数; n_2 表示该粒度系统中包含的子粒度系统数目; co 是标煤系数,用于统一各种生活能源调研数据的单位,不同能源的标煤系数不同,研究中所用标煤系数见表1。

表1 标煤转换系数表

能源标煤转换系数	单位	数值
电力	kgce/kWh	0.404
煤炭	kgce/kg	0.7143
木炭	kgce/kg	1.1616
液化气	kgce/kg	1.7143
天然气	kgce/m ³	1.2143
秸秆	kgce/kg	0.5
柴薪	kgce/kg	0.4282
沼气	kgce/m ³	0.629
太阳能	kgce/MJ	29.3076

(3)可再生能源的已存在状况模型:本文主要考虑风能、水能、太阳能、生物质能等4种可再生能源。

$$R_{wind} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_i}{\alpha_i} \quad (8)$$

$$R_{water} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Theta_i}{\alpha_i} \quad (9)$$

$$R_{sun} = R_{methane} = R_{k1} \quad (10)$$

以上公式为多层模型中最底层的系统分析数学关系,低层向高层信息递阶系统分析关系如式(7)所示, Ω_i 代表大型发电机组容量, Θ_i 代表水电站装机容量, α_i 是当地常住人口数。

3.3 横向关系模型

日常能源消耗对比模型 R_{in} 属于独立粒度空间的内部模型。由横向关系模型中的定义可知,任一管辖区域的某种能源消耗记为 S_i ,该管理辖域的总能源消耗记为 T 。而日常总能耗对比模型 R_{out} 属于同粒度层系统模型,那么根据横向关系模型中的定义可知,某一管辖区域的11种能源总能耗记为 S_i' ,它们的上级管辖区域总能耗记为 T' 。

$$T = \sum_{i=1}^{11} S_i, S_i \cap S_j = \Phi, 1 \leq i \leq 11, 1 \leq j \leq 11, i \neq j \quad (11)$$

$$R_{in} = \frac{S_i}{T} = \frac{\left(\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \right) \times n_2 \times co}{\sum_{j=1}^{n_1} \left[\left(\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_{ji} \right) \times n_2 \times co_i \right]} \quad (12)$$

$$T' = \sum_{i=1}^n S_i', S_i' \cap S_j' = \Phi, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j \quad (13)$$

$$R_{out} = S_i' : S_j' \quad (14)$$

3.4 能源云转换器

在本项研究中,既有语言调研数据,又有数值调研数据。为了给下一步规划决策提供有效信息,就一定要统一数据类型。为了使调研结果更加明晰,本文设计了能源云转换器,将数值数据转换成语言值。

能源云转换器包含单能源云组和多能源云组。单能源云组用于对电力消耗及风能、水能的已开发情况的转换;多能源云组用于对除电力以外的其余10种能源消耗总和的转换,因为电力的耗费代表着对电力的需求,即对风力发电和水力发电的需求;其余10种能源的耗费属于热耗能源的耗费,代表着对热耗能源的需求,即对太阳能和生物质能的需求。

单能源云组设计如下:

$$C_N = \begin{cases} 1, & x \in [0, 4] \\ C(4, 2/3, 0.05), & \text{others} \end{cases}$$

$$C_B = C(7, 8/7, 0.05)$$

$$C_M = C(25, 5, 0.05)$$

$$C_G = C(45, 20/3, 0.05)$$

$$C_{TG} = \begin{cases} C(65, 5, 0.05), & \text{others} \\ 1, & x \in [65, \infty) \end{cases}$$

多能源云组设计如下:

$$C_N' = \begin{cases} 1, & x \in [0, 60] \\ C(60, 80/9, 0.05), & \text{others} \end{cases}$$

$$C_B' = C(200, 50, 0.05)$$

$$C_M' = C(400, 50, 0.05)$$

$$C_G' = C(650, 50, 0.05)$$

$$C_{TG}' = \begin{cases} C(850, 50, 0.05) & \text{others} \\ 1, & x \in [850, \infty) \end{cases}$$

于是, $\phi = \{1, 2\}$ 。 n 为1时激活单能源云组, n 为2时激活多能源云组。

3.5 实验结果

表2是某地区部分已转换为标煤的调研数据,表3是某

地区自然能源存在的部分调研数据。该地区没有开发风力发电和水力发电,因此在调研数据中发电机组容量和水电站装机容量均为0。

表2 某地区部分生活用能的数据表(标煤)

电力	33.7	30.1	46.5	49.8	57.8
散装煤	98.2	144.4	173.6	170.2	180.2
蜂窝煤	152.3	126.7	109.4	132.5	181.1
木炭	41.1	11.3	0	0	0
液化气	13.9	10.1	3.2	4.5	8.6
天然气	0	0	0	0	0
秸秆	72.5	93.7	38.3	47.2	29.6
柴薪	80.1	96.6	85.2	126.2	105.3
沼气	50.8	56.2	52.5	59.9	63.2
太阳能	20.3	11.2	10.7	12.3	17.5
太阳灶	32.8	16.2	18.9	13.1	18.7

将表3数据代入自然能源存在状况模型,可得年平均日照:VG∧G∧G∧M∧M=G;柴薪、秸秆、牧草等资源:G∧G∧G∧B∧M=M;水源:G∧G∧M∧G∧G=G;年平均风力:G∧M∧M∧M∧B=M。

表3 某地区部分自然能源存在状况调研表

年平均日照	柴薪、秸秆、牧草等资源	水源	年平均风力
VG	G	G	M
G	G	G	G
M	B	M	M
M	M	G	M
G	G	G	B

将表3数据代入生活能源状况模型,计算可得电力消耗约为43.58标煤,其它10项能源共消耗约为558.06标煤。于是输入能源云转换器,首先设n为1激活单能源云组,可获知风能和水能的需求语言评估值为G(好),确定度为0.9776(见图3);然后设n为2激活多能源云组,可获知太阳能和生物质能的需求语言评估值为G(好),确定度为0.1844(见图4)。

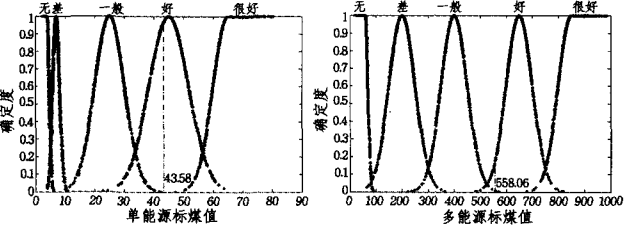


图3 单能源云组图

图4 多能源云组图

表4 能源系统分析表

调研项目	运算结果
自然能源存在状况	该地区年平均日照状况好 该地区开发生物质能所需柴薪等资源存在状况一般 该地区及周边水源存在情况好 该地区年平均风力情况一般
用能情况	该地区太阳能人均耗费17.17标煤 该地区生物质能人均耗费56.52标煤 该地区电力人均耗费43.58标煤 该地区除电力以外其他10种能源人均总耗费558.06标煤
可再生能源需求情况	该地区对风能和水能需求情况好 该地区太阳能和生物质能需求情况好
可再生能源已开发情况	该地区风能已开发情况无 该地区水能已开发情况无 该地区太阳能已开发情况一般 该地区生物质能已开发情况很好

由已开发模型可知,风能和水能的已开发状况为无,太阳能已开发17.17标煤,生物质能开发56.52标煤。将这两个标煤值依次代入能源云转换器,参数n设置为1激活单能源云组,可获得太阳能已开发状况为M(一般),确定度为0.2934;生物质能已开发状况为VG(很好),确定度为0.2374。综合上述运算结果,可得该地区的能源调研情况分析表(见表4)。

由粒度空间内部模型可获知该地区的用能结构信息,如图5所示。

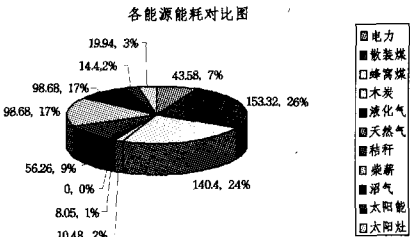


图5 用能结构图

在能源系统分析研究中,调研了我国30个省,共抽样300个不同省市的农村数据。图6是由同粒度层系统模型分析得到的内蒙古8个区域的总能源人均能耗对比图。

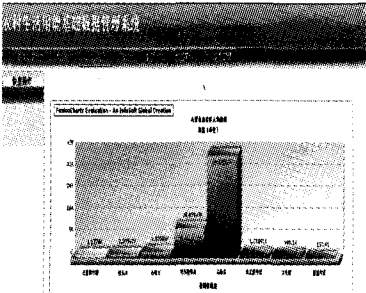


图6 总能源对比图

结束语 多层云建模方法是一个递阶的智能建模方法,它不但符合复杂大系统多层次、可组合等特性,其递阶特性更是迎合了我国行政管理的递阶机制,而且能够有效地处理系统信息的不确定性,尤其是模糊性与随机性并存的问题。也正因为如此,本文将其用于我国能源系统分析研究中,不但有效地组织了繁杂多样的调研数据,同时解决了调研数据的不确定性以及定性数据和定量数据间的综合运算等问题。实验证明多层云建模方法是一种“分解-集结”式的不确定性智能建模方法,它有助于提高复杂大系统问题研究结果的准确性,是研究复杂大系统建模的一种有效新模式。

参考文献

[1] 刘兴堂,刘力,宋坤,等.对复杂系统建模与仿真的几点重要思考[J].系统仿真学报,2007,19(13):3073-3075
[2] 张玉存,邢婷婷.一种复杂系统多源信息分析建模新方法[J].电子学报,2009,37(11):2427-2431
[3] 章文辉,杜百川,杨盈昀.模糊层次分析法在广播电视信息安全保障评价指标体系中的应用研究[J].电子学报,2008,36(10):2060-2064
[4] 谢琳,李凡长.一类动态模糊机器学习算法研究[J].电子学报,2009,36(12A):114-119

- [5] Wu Ai-yan, Zhao Yu-hong. A Multi-layer cloud state space model and its application[C]//CISE, China; CPS, 2009
- [6] 涂序彦, 王枫, 郭慧. 大系统控制论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005
- [7] Zenkai S. Rapid visual earthquake hazard evaluation of existing buildings by fuzzy logic modeling [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5653-5660
- [8] Ajayi A O, Aderounmu G A. An adaptive fuzzy information retrieval model to improve response time perceived by e-commerce clients [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 82-91
- [9] Azimrad E, Pariz N. A novel fuzzy model and control of single intersection at urban traffic network [J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(1): 107-110
- [10] 李华莹, 罗自强, 李德毅. 基于云模型的汽车款式知识表示[J]. 舰船电子工程, 2006, 26(6): 1-4
- [11] 李德毅, 刘常昱. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594
- [12] 杜鹤, 李德毅. 基于云的概念划分及其在关联挖掘上的应用[J]. 软件学报, 2001, 12(2): 196-203

(上接第 161 页)

建立的控制信号求解模型和算法分别求解系统输出为 $t\cos(0.85t\pi)+2.0$ 和 $t\cos(1.65t\pi)+2.0$ 的过程控制信号。

遗传算法中, 种群规模设为 $N=6$, 以样本集中 6 个学习样本输入函数的连续 Walsh 基函数展开系数为初始染色体, 交叉概率 0.5, 变异概率 0.01, 基因上限 5.0, 基因下限 -2.5, 控制误差精度 0.05。对于期望输出为 $t\cos(0.85t\pi)+2.0$ 的信号函数, 算法在迭代 273 次后满足控制误差精度要求; 对于输出为 $t\cos(1.65t\pi)+2.0$ 的信号函数, 算法在迭代 351 次后满足误差控制精度要求。系统在控制信号输入下, 样本函数 $t\cos(1.65t\pi)+2.0$ 的网络输出信号曲线(虚线)和期望输出函数曲线(实线)如图 6 所示, 取得了较好的控制结果。

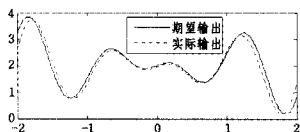


图 6 $t\cos(1.65t\pi)+2.0$ 的两种输出曲线

结束语 本文建立了一种基于过程神经网络的非线性动态系统控制信号求解模型和方法, 可根据反映实际系统模态变化特征的时变输入/输出样本数据, 直接建立动态系统的辨识模型和控制信号求解模型, 且该方法具有通用性。在计算机动态系统仿真等实际应用中, 文中建立的方法对解决诸如仿真模型建立、系统信号控制、时变信息处理等问题具有借鉴意义, 并有着较广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王树青, 载连奎, 于玲. 过程控制工程[M]. 化学工业出版社, 2008
- [2] 李言俊, 张科. 系统辨识理论及应用[M]. 国防工业出版社, 2004
- [3] Cheng Tao, Lewis F L, Abu-Khalaf M. A neural network solution for fixed-final time optimal control of nonlinear systems [J]. Automatica, 2007, 43(3): 482-490
- [4] Kumaresan N, Balasubramaniam P. Optimal control for stochastic nonlinear singular system using neural networks[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 56: 2145-2154
- [5] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [6] Mekki H, Chtourou M, Derbel N. Variable structure neural networks for adaptive control of nonlinear systems using the stochastic approximation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, 14: 1000-1009
- [7] Ng G W. Application of neural networks to adaptive control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2000, 36(11): 1929-1933
- [8] Huang S N, Tan K K, Lee T H. Decentralized control of a class of large-scale nonlinear systems using neural networks[J]. Automatica, 2005, 41(12): 1645-1649
- [9] Ge S S, Hang C C, Zhang T. Nonlinear adaptive control using neural networks and its application to CSTR systems[J]. Journal of Process Control, 1998, 19: 313-323
- [10] Yoo S J, Park J B, Choi Y H. Indirect adaptive control of nonlinear dynamic systems using self recurrent wavelet neural networks via adaptive learning rates [J]. Information Sciences, 2007, 177: 3074-3098
- [11] Choi J T, Choi Y H, Park J B. Stable intelligent control of chaotic systems via wavelet neural network[C]//Proc. Int. Conf. Control, Automation Systems, 2003: 316-321
- [12] Karami-Mollaei A, Reza M. A new approach for instantaneous pole placement with recurrent neural networks and its application in control of nonlinear time-varying systems[J]. Systems & Control Letters, 2006, 55: 385-395
- [13] 李少远, 蔡文剑. 工业过程辨识与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [14] Chow T W S, Fang Y. A recurrent neural-network-based real-time learning control strategy applying to nonlinear systems with unknown dynamics[J]. IEEE Trans. Industrial Electron, 1998, 45: 151-161
- [15] 石宇静, 柴天佑. 基于神经网络与多模型的非线性自适应广义预测控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 540-545
- [16] Hong-Wei Gea, Feng Qia-na, et al. Identification and control of nonlinear systems by a dissimilation particle swarm optimization-based Elman neural network[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2008, 9: 1345-1360
- [17] 许少华, 何新贵. 关于连续过程神经网络的一些理论问题[J]. 电子学报, 2006, 34(10): 1838-1842
- [18] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 115-165
- [19] 许少华, 何新贵. 基于函数正交基展开的过程神经网络学习算法[J]. 计算机学报, 2004, 7(5): 645-650
- [20] 王能超. 同步并行算法设计[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 100-105