

基于嵌入式系统动力学的人水系统模拟及应用

马军霞 左其亭

(郑州大学环境与水利学院 , 河南 郑州 450001)

摘要 : 基于人水系统概念和嵌入式系统动力学(ESD)方法 , 以一个相对独立的城市区为例 , 介绍人水系统模拟的 ESD 模型 , 说明 ESD 模型的优越性。通过 ESD 模型的模拟计算 , 分析实例区人水系统演变的主要影响因素以及调控方向和措施。模拟结果表明 , 该城市区总用水量在各年远未达到水资源可利用量 , 而水质控制目标已经达到临界状态 , 其发展的瓶颈是污水处理能力偏低 , 可以通过建设污水处理厂 , 增加污水处理能力 , 以提高该区的发展规模。

关键词 : 人水系统 ; 嵌入式系统动力学 ; 人水系统模拟 ; 人水和谐

中图分类号 : TV213 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2007)06-0006-04

Human-water system modeling based on embedded system dynamics and its application // MA Jun-xia , ZUO Qi-ting / *School of Environment & Water Conservancy , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China*)

Abstract : With a relatively independent urban area as an example , the embedded system dynamic(ESD) model for human-water system modeling was introduced based on the concept of human-water system and ESD method , and the advantages of ESD model were illuminated . Based on the numerical calculation , the main influencing factors on the development of human-water system and the regulation and control measures in the studied area were analyzed . The result shows that the total volume of water utilization of each year is far lower than the available volume of water resources ; however , the water quality control goal has reached the critical value . It is also concluded that the choke point to the development of this area is the relatively low capacity for sewage treatment , and that the construction of sewage treatment plants to improve the sewage treatment capacity is an effective measure to enhance the development scale of this area .

Key words : human-water system ; embedded system dynamics ; human-water system modeling ; human-water harmony

实现人水和谐是水利工作的主旋律。最近几年 , 在各种媒体上经常提到“人水和谐”一词。从查阅到的文献来看 , “人水和谐”一词最早出现于 1999 年 , 2001 年将其纳入现代水利的内涵及体系之中。2004 年 , 我国将“中国水周”活动主题确定为“人水和谐” , 使人们对人水和谐的思想有了更深入的认识^[1]。人水和谐研究的对象是人水系统 , 如何建立人水系统模拟模型是关注的难点问题。

关于人水系统的相关研究 , 已有一些成果^[2-4]。应用系统动力学方法研究人水系统^[5-6] , 主要偏重于社会经济系统的模拟与预测研究 , 难以把水循环系统模型与社会经济系统动力学模型进行实质性耦合^[7]。针对这一问题 , 左其亭^[7]提出了人水系统的概念 , 并基于系统动力学思想 , 提出嵌入式系统动力学(ESD)方法。在这一思想指导下 , 笔者拟通过实例研究验证 ESD 模型的可行性 , 为研究人水系统提

供一种新的方法。

1 ESD 方法

1.1 人水系统概念及模拟难点问题

关于“人水系统”的概念至今还没有一个统一说法。文献[7]中的定义如下 : 人水系统(human-water system) , 是以水循环为纽带 , 将人文系统与水系统联系在一起 , 组成的一个复杂大系统。该系统能依靠自身水循环动力和社会经济发展动力而演变 , 它是人水和谐研究的对象。由于系统的复杂性 , 定量描述这一系统内部的复杂关系非常困难 , 需要在包含与水相关的社会、经济、地理、生态、环境、资源等方面及其相互作用的复杂大系统中进行研究 , 需要利用水循环的规律、实验手段和模型方法 , 把社会经济发展内在规律研究成果带入到水系统研究中 , 真正实现人水系统的耦合研究。

1.2 ESD 的提出背景

在研究社会经济系统中,系统动力学方法具有得天独厚的优势。系统动力学(system dynamics)^[8]是一种以计算机仿真技术为辅助手段的研究复杂社会经济系统的定量分析方法。它自 20 世纪 50 年代中期创立以来,得到了广泛应用,包括在水资源研究方面的应用^[5-6]。

系统动力学以反馈控制理论为基础,以仿真技术为手段,建立的方程主要包括状态变量方程(L 方程)、速率方程(R 方程)、辅助方程(A 方程)等。系统动力学在处理区域、全国乃至全球的复杂系统时,具有明显的优势。在处理定性因子较多、十分复杂的大系统时,其他方法难以奏效,应用系统动力学可以大致认识和解决系统中的问题。这就是系统动力学的优势。但是,系统动力学在处理像人水系统这样专业性很强的复杂系统时,不能充分利用相关专业已有的研究成果,只依靠系统动力学本身的系统方程已经显得很单薄,大大限制了它的应用。这也是传统系统动力学在复杂系统中应用的弊端。为了解决这一问题,左其亨^[7]提出了更具实用意义的 ESD 方法。该方法是在系统动力学理论方法的基础上,考虑到研究系统(如人水系统)自身的特点和规律,充分利用现有的相关理论方法,在系统动力学模型的基础上加入其他学科的定量化模型,形成耦合的模型。该模型既全面吸收系统动力学的优点,又接纳了相关学科的研究成果,大幅度提升了系统动力学的应用研究能力,同时也解决了复杂而又有专业特点的系统模拟问题。

1.3 ESD 介绍

ESD 是对传统系统动力学的有益改进,其核心内容包括以下几方面^[7]:

a. 在建模思路,把反映系统的专业模型作为一个子模块,嵌入到系统动力学模型中。也就是说,除了包括 L 方程、R 方程、A 方程外,还增加一些其他专业模块,比如水文模型模块、水库调度模块、河道演进模块、水资源管理模块、优化调度模块等。

b. 在计算方法上,把专业模型看成一个有很多输入、输出的模块(简称 M),其输入、输出与系统动力学模型方程相对接,也可以把 M 作为系统动力学模型中一个具有多输入、多输出的方程,称为 M 方程。把 M 方程和系统动力学中的其他模型方程放在一起,进行统一计算。

c. 在计算程序编制上,系统动力学模型常采用专用的语言(DYNAMO 语言),但其很难用专用语言开发其他专业模块(M 方程),也很难直接引用现有专业模型的研究成果。鉴于此,需要针对 ESD 的特

点,采用目前常用的计算语言(如 VB、VC)来开发计算机软件。

2 人水系统模拟举例及 ESD 模型应用

2.1 实例区概况

人水系统是一个十分复杂的系统,文献[7]只提出 ESD 方法的基本思路,没有介绍应用实例。本文将以一个相对独立的城市区为例,介绍 ESD 模型的建立过程与计算结果。

2005 年该区人口 25.96 万人(其中非农业人口 16.03 万人,农业人口 9.93 万人),工业总产值 279 276 万元,农田灌溉面积 2 901 hm²,城市人均生活用水量 227 L/d,农村人均生活用水量 40 L/d,工业产值用水量 39.5 m³/万元,农田灌溉定额 6 450 m³/hm²。

该区地表水可利用量 284.60 万 m³,地下水可利用量 2 860.20 万 m³,外调水可利用量 3 000.00 万 m³,总水资源可利用量 6 144.80 万 m³。

2005 年,工业污水排放率 0.8,污水量 882.51 万 m³;农业污水排放率 0.17,污水量 318.09 万 m³;城市生活污水排放率 0.8,污水量 1 062.53 万 m³,合计排放污水量 2 263.14 万 m³。所有排放的污水集中在 1 条管道中,其 COD 平均质量浓度为 121 mg/L。2005 年经污水处理厂处理的污水量为 1 980 万 m³,污水处理后的 COD 质量浓度为 30 mg/L,排入到河流中。如图 1 所示,河流上游来水平均流量 0.63 m³/s,平均 COD 质量浓度 15 mg/L。河流下游有一控制断面,根据水功能区对水质的要求,控制断面 COD 质量浓度要控制在 30 mg/L 以下。

2.2 模拟存在的难点问题

图 1 是一个概化的人水系统,既包括自然水循环过程(形成河流),又包括受人类活动影响作用的社会水循环过程(生活、工业、农业用水),还受社会经济系统变化的影响。其模拟的难点问题有两方面:①在自然水循环、社会水循环定量模拟中,如何把社会经济系统模型耦合进来?过去常用的方法有 2 种,一种是把社会经济发展指标看作水循环模型

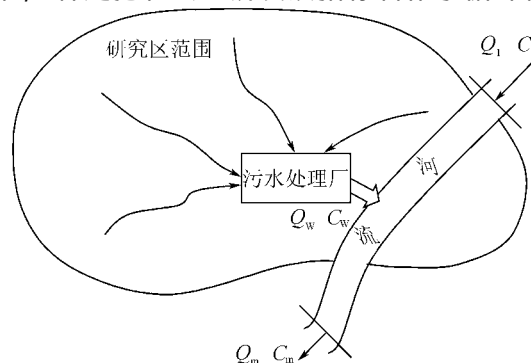


图 1 研究区污水排放及河流示意图

的输入参数,另一种是把建立的2个模型放在一起组成1个耦合模型。这2种处理方法都不能全面反映入水系统复杂的耦合关系。②在社会经济发展规划、变化预测、宏观调控中,如何实时定量地考虑水循环系统变化带来的影响和反馈作用?因为水循环规律十分复杂,社会学、经济学研究也很少深入涉及水科学领域。

在本例中,社会经济发展有自身规律,可以建立系统动力学模型。但它同时又受水资源可利用量的限制和控制断面水质的限制。这2个限制条件在系统动力学模型中难以有效体现。因此,如何把水系统变化模拟和控制条件嵌入到社会经济发展系统模型中,是本例的关键。

如果仅考虑社会经济系统发展趋势,可以建立系统动力学模型,如图2所示,该模型主要包括3种方程:

a. L 方程。状态变量包括人口数、工业产值、农业产值。在系统动力学中,状态变量是常见变量,用一般状态变量方程表示。

b. R 方程。速率是代表状态变量方程中输入与输出变化的量,用速率方程表示。比如出生率、工业产值增长率、农业产值增长率等。

c. A 方程。把反馈系统中描述信息的运算式称为辅助方程。辅助方程没有统一的标准格式,可由现在时刻的其他变量表达。比如生活用水定额、工业用水定额等。

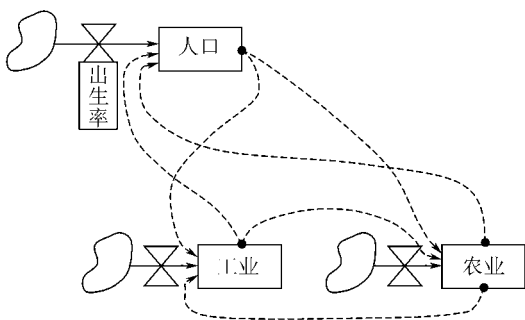


图2 研究区系统动力学模型流程图

根据建立的模型,笔者计算到2030年,为了表达方便,这里只选取到2020年结果(以下类同),如表1所示。在此计算结果中没有考虑水资源可利用量的限制和控制断面水质的限制。经水文学计算,结果如表2所示。从表2可以看出,如果按照这种假设进行计算,该区从2018年开始总用水量大于可利用水量,不符合水资源可利用量的限制条件;更有甚者,从2008年开始,控制断面COD平均质量浓度大于30mg/L,不符合控制断面水质的限制条件。因此,这种处理和计算显然不符合实际,必须考虑水资源系统的变化及控制因素。

表1 研究区社会经济系统动力学模型计算结果

年份	人口/ 万人	工业 产值/ 万元	农业 产值/ 万元	年份	人口/ 万人	工业 产值/ 万元	农业 产值/ 万元
2006	26.47	304 299	12 478	2014	30.53	579 221	12 781
2007	27.00	331 564	12 516	2015	31.02	624 400	12 819
2008	27.54	361 272	12 553	2016	31.38	66 2801	12 858
2009	28.10	393 643	12 591	2017	31.74	703 563	12 896
2010	28.67	428 913	12 629	2018	32.10	746 832	12 935
2011	29.12	462 368	12 667	2019	32.47	792 762	12 974
2012	29.58	498 433	12 705	2020	32.85	841 517	13 013
2013	30.05	537 311	12 743				

表2 各年总用水量及控制断面COD平均质量浓度计算结果

年份	总用水量/ 万 m ³	控制断面 (COD) (mg·L ⁻¹)	年份	总用水量/ 万 m ³	控制断面 (COD) (mg·L ⁻¹)
2005	4 447.4	26.1	2013	5 512.6	38.8
2006	4 506.8	27.4	2014	5 693.6	40.6
2007	4 650.7	29.0	2015	5 886.2	42.3
2008	4 804.6	30.8	2016	5 861.6	42.5
2009	4 969.3	32.7	2017	6 016.2	43.9
2010	5 145.8	34.6	2018	6 178.7	45.3
2011	5 181.9	35.4	2019	6 349.5	46.7
2012	5 342.2	37.1	2020	6 528.9	48.1

2.3 ESD 模型应用

入水系统是一个庞大而又复杂的自然-社会复合大系统,既有自然属性,又有社会属性。自然水循环过程、社会水循环过程、人类开发利用水资源过程可以用水循环过程、水资源管理等专业模型来描述。社会经济系统变化可以用系统动力学方法来描述。二者的结合,就是ESD模型。图3描述的是研究区的人水系统ESD模型流程图。在这个ESD模型中,包括一般系统动力学方程(如L方程、R方程、A方程)还嵌入了水量模型、水质模型(M方程)。水量模型、水质模型的输入包括自然界某些参数(如河流来水流量、水质)、社会经济变化方程中的一些参数(用水量、排水量),通过模型计算,输出水量、水质指标参数。这些参数又制约着工业、农业、生活的变化。这样,就形成了一个十分复杂的反馈系统。

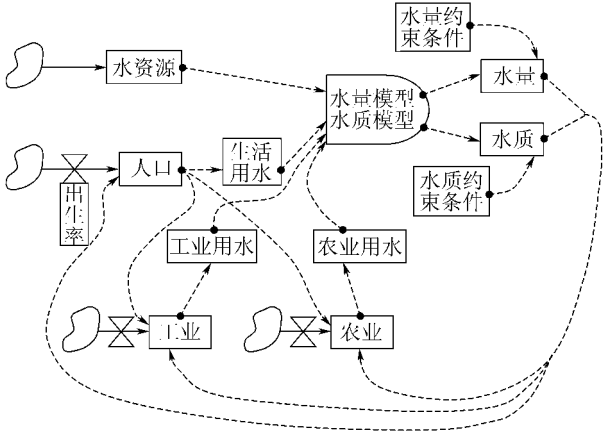


图3 研究区人水系统ESD模型流程图

该系统 ESD 模型方程除了包括所建立的一般系统动力学方程外,还包括专业模块方程(M 方程)。针对本例,专业模块主要有两类 M 方程:

a. 水量模型方程,包括水量计算方程、排放量计算方程以及控制断面径流量计算方程。

水量计算方程:

$$W_{Lost} = W_{Indu} + W_{Arg} + W_{Urban} + W_{Rural} \quad (1)$$

式中: W_{Lost} 为总利用水资源量; W_{Indu} 为工业用水量; W_{Arg} 为农业用水量; W_{Urban} 为城镇生活用水量; W_{Rural} 为农村生活用水量。

W_{Lost} 应小于或等于水资源可利用量。

排放量计算方程:

$$\sum W_{排水} = W_{Indu} \mu_{Indu} + W_{Arg} \mu_{Arg} + W_{Urban} \mu_{Urban} + W_{Rural} \mu_{Rural} \quad (2)$$

式中: $\sum W_{排水}$ 为用水总排放量; μ_{Indu} 为工业用水排放系数; μ_{Arg} 为农业用水排放系数; μ_{Urban} 为城镇生活用水排放系数; μ_{Rural} 为农村生活用水排放系数。

根据水量平衡原理建立的控制断面径流量计算方程:

$$Q_m = Q_1 + Q_W - \xi(Q_1 + Q_W) \quad (3)$$

式中: Q_m 为控制断面径流量 m^3 ; Q_1 为排放的河流上游来水量 m^3 ; ξ 为水体水量总消耗系数; Q_W 为污水排放量 m^3 。

b. 水质模型方程,包括污染物排放总量计算方程、污染物排入河流水体的总量计算方程以及零维水质模型方程。

污染物排放总量计算方程:

$$W_W = Q_W C_W \quad (4)$$

式中: W_W 为污染物排放总量 kg ; C_W 为污水处理前污染物综合质量浓度 kg/m^3 。

污染物排入河流水体的总量计算方程:

$$W_{WD} = Q_W \mu C_D + Q_W(1 - \mu) C_W \quad (5)$$

式中: W_{WD} 为污水处理后污染物排放总量 kg ; μ 为污水处理率; C_D 为污水处理后污染物质量浓度, kg/m^3 。

根据物质平衡原理,建立零维水质模型方程:

$$Q_m C_m = Q_1 C_1 + W_{WD} - \beta(Q_1 C_1 + W_{WD}) \quad (6)$$

式中: β 为污染物综合消减率,无量纲。

另外,还增加一些状态变量,如生活用水量、工业用水量、农业用水量、水资源量、河流水量、水质类型。

2.4 结果分析

根据以上建立的 ESD 模型,经计算得到的结果如表 1、表 2 所示。从表中可以看出,由于水资源可利用量限制条件和控制断面水质限制条件的加入,

计算结果均满足要求,但社会经济发展速度从 2008 年后减缓,规模也在逐步趋于平缓(与表 1 相比较)。这一结果比较符合实际发展趋势。可见,考虑水资源变化以及建立 ESD 模型是必要的,也是可行的。

从表 1、表 2 还可以看出,该区总用水量在各年远未达到水资源可利用量,而水质控制目标已经达到临界状态,因此可以得出结论:该区发展的瓶颈是污水处理能力偏低,可以通过建设污水处理厂,增加污水处理能力来提高该区的发展规模。

3 结 语

本文以应用实例为基础,阐述了 ESD 模型应用的必要性和可行性。通过 ESD 模型的模拟计算,认为本文实例研究区发展的瓶颈是污水处理能力偏低,可以通过建设污水处理厂,增加污水处理能力来提高该区的发展规模。这一研究为该区人水和谐调控提供了理论依据和途径。

本文研究是对文献[7]提出的 ESD 方法的补充和完善,旨在促进人水系统研究和嵌入式系统动力学研究,并为区域人水和谐模拟与调控研究提供可行的方法论。

参考文献:

- [1] 左其亭,高丹盈.人水和谐量化理论及应用研究框架[C]//人水和谐理论与实践会议文集.北京:中国水利水电出版社,2006:1-5.
- [2] MALIN F. Water management and ecosystems: living with change, global water partnership[EB/OL].[2006-11-21]. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/TEC9.pdf>.
- [3] LAUTZE J, REEVES M, VEGA R. Water allocation, climate change, and sustainable peace: the israeli proposal[J]. Water International, 2005, 30(2):197-209.
- [4] 左其亭,陈嘻.社会经济-生态环境耦合系统动力学模型[J].上海环境科学,2001,22(12):592-594.
- [5] 孙宗凤.系统动力学在水资源管理中的应用[J].水利水电技术,2005,36(6):14-21.
- [6] 杨建强,罗先香.水资源可持续利用的系统动力学仿真研究[J].城市环境与城市生态,1999,12(4):16-19.
- [7] 左其亭.人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J].自然资源学报,2007,22(2):268-273.
- [8] 王其藩.系统动力学[M].2版.北京:清华大学出版社,1994:1-88.

(收稿日期:2006-12-14 编辑:高建群)

