

城市供水管网模型参数自动识别方法研究

贾海峰, 赵琦峰

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 在分析城市供水管网模型建设和应用问题的基础上, 针对管网模型参数识别这一核心问题进行了研究, 提出了基于 GIS 和 SCADA 的管网模型参数自动识别的流程, 分析了管网模型参数自动识别的核心算法, 提出了基于 RSA 方法的灵敏参数自动识别和基于 MCS 方法进行参数识别的算法和技术路线, 并完成了管网模型参数自动识别模块的编程实现. 最后选择一个典型城市小区供水管网为案例, 进行了管网水力模型参数自动识别的示例研究, 并得到满足要求的模型参数.

关键词: 管网模型; 参数自动识别; 区域灵敏度分析方法(RSA); 蒙特卡罗随机采样(MCS)

中图分类号: X322 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0082-06

Study on the Automatic Parameters Identification of Water Pipe Network Model

JIA Hai-feng, ZHAO Qi-feng

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the problems analysis on development and application of water pipe network model, the model parameters automatic identification is regarded as a kernel bottleneck of model's application in water supply enterprise. The methodology of water pipe network model parameters automatic identification based on GIS and SCADA database is proposed. Then the kernel algorithm of model parameters automatic identification is studied, RSA (Regionalized Sensitivity Analysis) is used for automatic recognition of sensitive parameters, and MCS (Monte-Carlo Sampling) is used for automatic identification of parameters, the detail technical route based on RSA and MCS is presented. The module of water pipe network model parameters automatic identification is developed. At last, selected a typical water pipe network as a case, the case study on water pipe network model parameters automatic identification is conducted and the satisfied results are achieved.

Key words: water pipe network model; automatic parameters identification; regionalized sensitivity analysis (RSA); Monte-Carlo sampling (MCS)

为提高城市供水系统的科学调度和管理水平, 国内外很多城市开始供水管网系统管理的信息化建设. 在管网地理信息系统(GIS)、数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、营业查表收费系统的建设和应用方面有了很多成功的经验. 然而建立的服务信息系统、GIS 与 SCADA 系统多为着眼于供水系统数据信息的维护和管理, 还无法有效地支持供水管网的科学调度和决策^[1~6].

管网模型是管网科学调度决策的基础, 可以模拟管网实时运行状态, 较为准确地模拟事故运行情况, 为排除事故提供参考; 还可以对管网爆管等事故进行预测; 可以为管网规划设计、改扩建服务; 可以分析管网水质状况等. 为此, 国内外专家学者针对管网模型进行了深入研究和实践^[7~12]. 不过实际上模型建立后, 由于供水企业普遍缺乏能够维护模型的技术人员, 模型应用的技术水平比较低. 究其技术原因, 模型参数的自动识别是核心问题之一. 本文即针对此问题, 利用供水系统现有的信息服务系统、GIS 与 SCADA 等系统提高的实时数据, 研究管网模型参数的自动识别技术, 进而可以支持供水企业构建一

个实用的、可集成的、可扩展的、易于升级和管理的管网动态模拟模型系统.

1 基于 GIS 和 SCADA 的管网模型参数自动识别的流程

管网模型参数自动识别包括了 2 个主要的步骤: 模型参数的自动率定和模型参数的自动验证. 管网 GIS 系统、SCADA 系统以及营业抄表系统等是管网模型自动识别的数据基础. GIS 系统用以支持管网自动概化, SCADA 系统为模型参数率定和模型验证提供了监测数据, 营业抄表系统提供了管网用户节点的用水量信息等.

管网水力模型和水质模型的参数自动识别的过程类似. 但是, 有先后顺序的区分, 由于水力模型是水质模型的基础, 所以必须首先进行水力模型的参数识别, 得到合适的参数后, 再利用得到的参数, 对水质模型参数进行识别. 模型参数自动识别的基本

收稿日期: 2009-02-19; 修订日期: 2009-04-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z301)

作者简介: 贾海峰(1967~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境系统分析、环境信息技术应用, E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

流程如图 1 所示.

首先, 指定 2 组不同工况下的监测数据作为模型率定和验证的数据. 然后, 对现有管网进行模型概化. 接着, 根据率定工况组织模拟所需要的数据进行自动率定. 若参数率定合格, 则利用验证工况的数据进行验证. 若验证合格, 保存率定的模型参数. 若率定或者验证不合格, 则给出识别失败的信息, 让使用人员去检查基础数据, 以便重新识别.

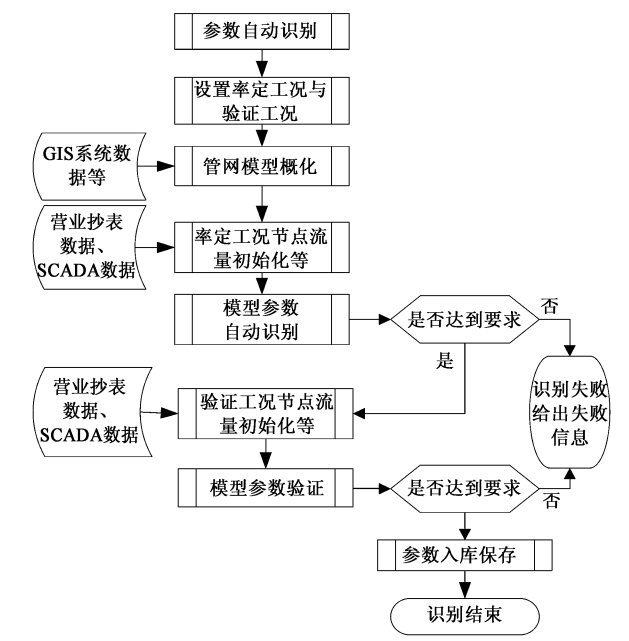


图 1 管网模型参数自动识别流程
Fig. 1 Flow chart of the automatic parameters identification of water pipe network model

模型参数自动识别模块包含 3 个主要过程: 管网自动概化、节点流量计算、参数自动率定与验证.

(1) 管网自动概化 城市管网结构复杂, 管段很多, 为建立管网模型需要进行管网概化. 当管网发生更改, 需要重新进行管网概化. 要进行管网的自动概化, 需要依据一定的概化原则, 自动从管网 GIS 数据图层中提取模拟用的管网结构.

(2) 节点流量计算 节点流量及其动态变化是管网模拟模型输入的重要条件, 是影响模型准确度的重要因素之一. 首先利用 GIS 的网络分析功能把每个节点下游的所有水表搜索出来, 利用这些水表的营业抄表数据选择典型模拟时段计算出该节点的流量及其动态变化^[13]. 各节点用户水量的变化与用户类型有关, 也与时间有关. 可根据供水管网的管理需求, 选择典型时段的节点流量变化作为参数率定和模型验证的工况.

(3) 参数自动率定与验证 根据设定的率定工况, 从 SCADA 系统、营业抄表系统中提取管网的运行数据(阀门的开闭状况、流量和压力数据等), 连同管网概化结果一起生成模拟输入文件, 进行模拟. 利用自动搜索识别方法率定出模拟误差符合要求的参数. 然后在验证工况下, 提取相应的管网运行数据和率定得到的模型参数进行模拟, 并分析其误差. 如果误差满足要求, 则把识别出来的参数存储到数据库中, 如果不满足则结束自动识别过程.

2 管网模型参数自动识别技术与方法

2.1 参数自动识别方法

模型参数自动搜索识别, 即在参数取值区间内, 按照一定的寻优规则识别参数^[14-17]. 常用的自动搜索识别方法分基于优化算法与基于随机采样的统计方法 2 种. 基于优化算法的识别方法认为在特定模型结构下只有唯一一组最佳参数与之对应. 但在实际中一般无法得到足够多的监测数据支持优化算法寻求最优参数, 而有可能造成参数不可识别, 或者识别的参数并非最优, 不确定性大. 基于随机采样的统计法承认了模型参数的复杂性, 放弃了寻找最优参数, 而是把参数分成“可接受”参数和“不可接受”参数. 其核心是根据一定的参数取舍标准, 在各参数的取值区间内随机抽样模拟, 得到可接受的参数取值区间, 进而得到的是一个可接受参数集合. 不过如果模型参数较多, 该方法的计算量将急剧增长. 因而虽然该方法得到广泛认同, 但是实际中只适用于参数个数较少的模型^[14].

为了在管网模型系统中实现参数的自动识别, 需要结合管网模型的特点, 选择相对简单并且易于编程实现和易于维护的方法. 管网模型的特点是参数与管段一一对应, 但每个管段包含的参数类型都一样, 比如, 每个管段都有各自的粗糙系数. 所以管网模型的参数绝对个数虽然和管段个数一样, 但是具有独立物理意义的参数类型很少, 而与管网模型参数识别关联较大的往往是具有独立特征的参数的个数. 基于以上要求以及管网模型的特点, 本研究采用基于随机采样的统计法——区域灵敏度分析方法 (regionalized sensitivity analysis, RSA) 作为管网参数自动识别功能的参数自动识别核心方法. RSA 方法中的随机采样技术采用蒙特卡罗随机采样 (Monte-Carlo sampling, MCS) 方法. 采用了 K-S 检验 (亦称拟合优度检验法) 识别参数的灵敏性.

2.2 管网模型参数自动识别的技术路线

管网中的管段数量较多,不同的管段由于其管段长度、管材、管道腐蚀程度等原因,其粗糙系数或者水质参数对管网模型的模拟结果的影响程度各不相同,有些管段粗糙系数的小扰动就会给模型模拟结果造成很大的影响,而有些管段在粗糙系数取值区间任意取值,对模型模拟结果的影响不大.当管道数量很多的时候,不灵敏的管段将增加参数识别的计算量和参数的准确性.所以,进行管段参数灵敏度

分析,遴选出参数灵敏的管段,可以加快参数的识别,提高识别参数的质量.

本研究把 RSA 方法定位为参数灵敏度分析工具,得到的行为参数区间作为进一步参数识别的基础.在灵敏度分析基础上,基于 MCS 方法进行最终的参数值识别.参数自动识别核心算法的技术路线如图 2 所示.

在开始参数识别前,需要确定模型待识别参数

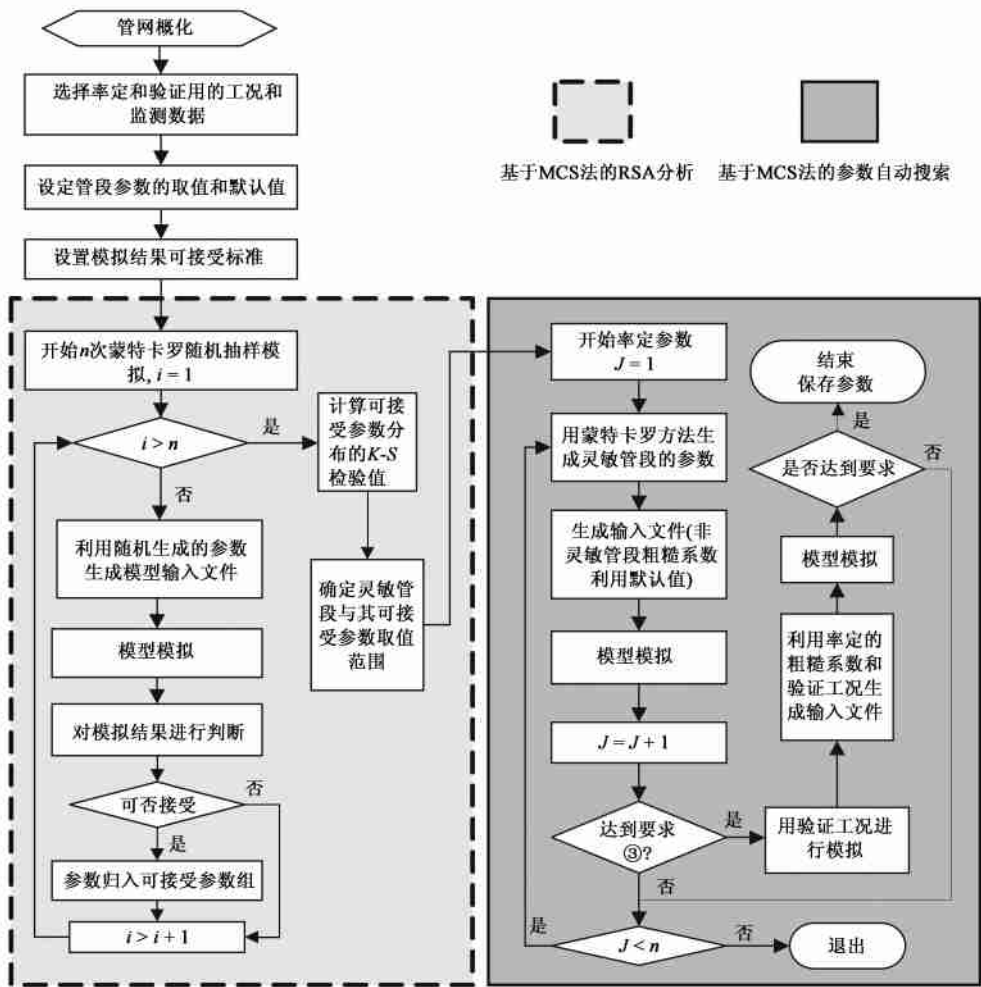


图 2 管网模型参数自动识别核心算法的技术路线

Fig. 2 Kernel algorithm for water pipe network model's automatic parameters identification

的取值区间以及模拟结果可接受的标准.一般地,待识别参数的取值区间需要根据实际的管网情况进行设定.关于管网模拟结果可接受的标准,英国的WRC(water research centre)提出过以下水力模型的应力标准^[8]:①85%的节点现场实测水头值和模型模拟误差绝对值应在0.5 m以内;②95%的节点现场实测水头值和模型模拟误差绝对值应在0.75 m以内;③100%的节点现场实测水头值和模型模拟误差

绝对值应在2 m以内.

如果这3条标准全部满足,则说明该水力模型精度达到要求.对于水质模型参数则没有类似的标准提出,在实际中可结合水质因子的特性,根据不同的管网环境,进行设定.在系统开发中,标准的设定是可更新的.

设置完参数取值区间以及模拟结果可接受标准以后,首先进行参数的灵敏度分析.在该阶段,可接

受结果的标准可比参数识别阶段低,比如针对水力模型可仅把WRC的压力准则的第3条作为标准.这样可以得到更大的行为参数样本,有利于K-S检验.灵敏度分析结束以后,进行基于MCS的参数自动搜索,该阶段采用的模拟结果可接受的标准要更严格,以WRC压力准则为例,在这个阶段应该使模拟结果满足全部3条标准.

2.3 模型参数自动识别模块的编程实现

使用C#语言进行管网模型参数自动识别模块程序的编程,将EPANET、GIS、SCADA、营业抄表系统集成起来,其界面窗口如图3所示.界面上设置模型参数管理、模型参数识别、模拟服务状态和系统参数设置栏目.

在界面上设置待识别的参数类型,选择用来参数率定和模型验证的工况,设定蒙特卡罗随机采样的次数.完成自动识别输入条件的设置后,即可开始参数自动识别.参数识别完成以后,给用户提示,并把参数保存到数据库中.

3 管网水力模型参数自动识别示例研究

3.1 示例管网

示例管网为某小区的实际供水管线系统(图4),并收集到其管网拓扑、基本信息与最高用水时与某用水时的流量和监测水压值.本研究使用最高用水时作为率定工况,某用水时作为验证工况.管网粗糙系数的取值范围为90~130,默认值设置为108.

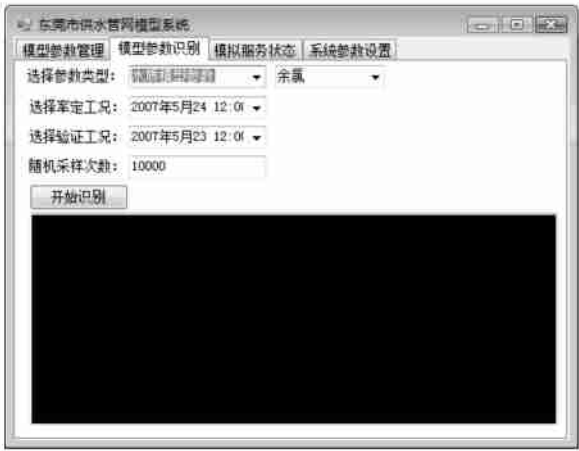


图3 模型参数自动识别窗口
Fig.3 Window of model's automatic parameters identification

3.2 管网模型软件的选择与集成方式

管网模型软件采用美国EPA开发的EPANet2.0^[9].模型软件提供了动态链接库epanet2.dll,供第三方案程序进行模型的集成.模拟软件集成的步骤为:①根据模拟工况,节点流量,模型参数等信息,编写算法,生成符合格式的模型输入文件;②调用EPANET模型,进行模拟,生成模拟结果文件;③根据模拟结果文件的格式,编写程序,对模拟结果进行解析,得到模型模拟结果数值,供程序进一步使用.

3.3 基于RSA方法的灵敏参数自动识别

随机抽样产生[0,1]间的均匀分布随机数,转换

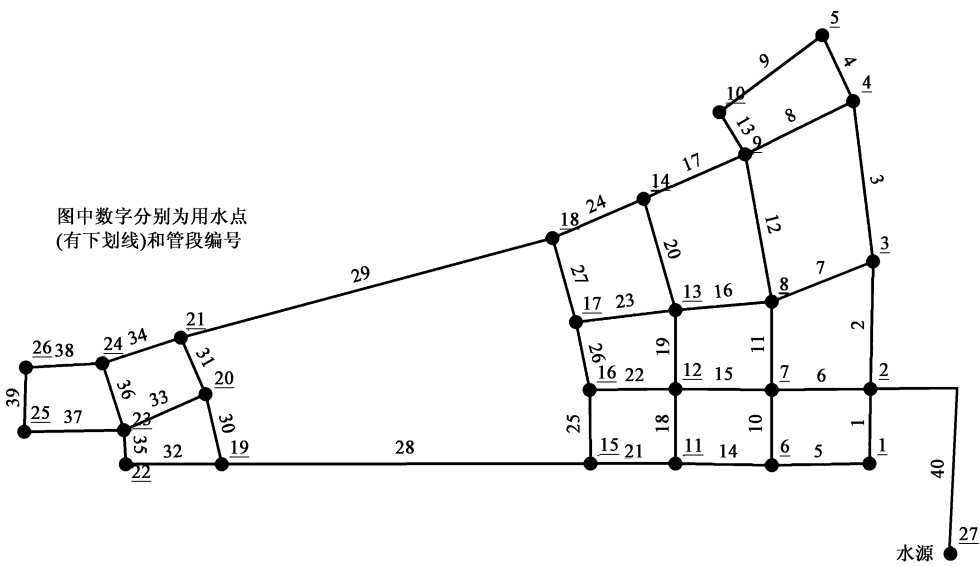


图4 示例研究管网
Fig.4 Demonstration water pipe network

到参数取值区间, 经过模拟运算验证得到的可接受行为参数, 再经过逆向转换将其变回到 $[0, 1]$ 区间进行 K-S 定量假设检验, 并以检验结果判断参数的灵敏程度。

在灵敏度分析中采用的可接受模拟结果的标准为 WRC 的压力准则的第 3 条。K-S 检验的显著性水平设置为 0.1。进行 10 000 次随机采样模拟计算, 得到行为参数 381 组。对所有管段粗糙系数的行为参数分布进行 K-S 检验结果(见表 1)表明: 管段 29 和管段 40 为灵敏管段。

根据模拟结果对管段 40、29、35、20 转换到

$[0, 1]$ 区间的行为参数绘制累积概率分布图, 并把它跟原始参数的均匀分布的累积概率分布图进行比较, 如图 5 所示。

表 1 灵敏度分析 K-S 检验表¹⁾
Table 1 Sensitive analysis K-S test table

检验 临界值	灵敏管段 K-S 检验值		不灵敏管段(代表) K-S 检验值	
	管段 40	管段 29	管段 35	管段 20
0.063	0.486	0.088	0.021	0.018

1) 以管段 35 和管段 20 作为不灵敏管段的代表进行分析

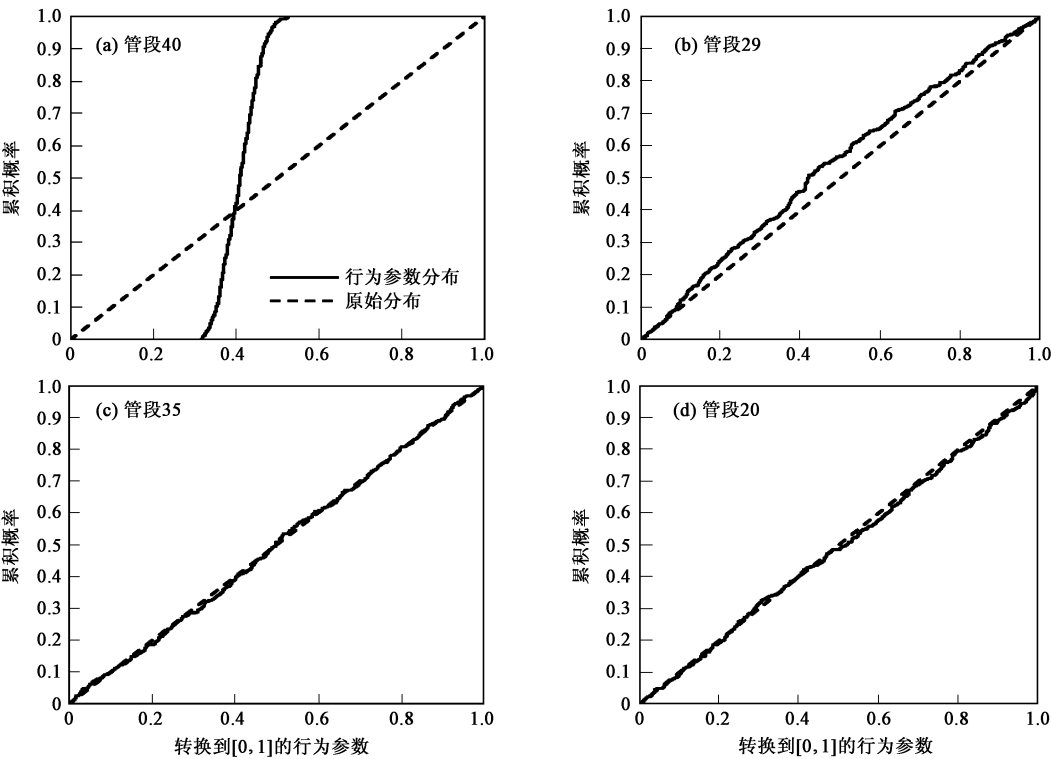


图 5 灵敏度分析前后参数累积概率分布

Fig. 5 Accumulated probability distribution of model parameter before and after sensitive analysis

可以看出, 灵敏管段的自动识别结果是正确的。管段 40 的行为参数分布与原始分布的差异很大, 其灵敏度最高; 管段 29 的行为参数分布与原始分布也存在一定程度差异, 灵敏度次之。管段 35 和 20 为非灵敏管段, 前验和后验分布十分类似, 其取值对于管网模拟结果的影响不大。从管网拓扑结构分析, 管段 40 为管网大干管, 管段 29 管线长度相对较长, 管段 35 和 20 则和其他非灵敏管段一样长度较短。可见, 干管和管线长度较长的管段对模型模拟结果的影响比较大。

通过基于 RSA 方法的灵敏参数自动识别, 得到

灵敏管段的取值区间和非灵敏管段的默认值, 如表 2 所示。

表 2 管段及其参数取值区间
Table 2 Pipe sections and its parameter range

灵敏管段	管段编号	参数取值
	40 29	102~ 111(均匀分布) 92~ 128(均匀分布)
不灵敏管段	108	

3.4 基于蒙特卡罗随机抽样的参数自动搜索
利用灵敏度分析的结果, 进行基于蒙特卡罗随机抽样的参数自动搜索, 分参数率定和验证 2 个部

分. 采用的可接受模拟结果标准为 WRC 压力准则中的 3 条标准.

在参数识别中, 对灵敏管段在行为参数分布区间内随机抽样产生参数值, 对非灵敏管段采用默认值, 生成输入文件, 进行模型模拟. 如此重复进行随机抽样模拟(上限10 000次). 进行到第 340 次模拟的时候, 模型自动率定达到要求. 然后采用率定的参数, 在验证工况下进行模拟, 结果也符合要求. 至此, 完成模型参数的自动搜索过程, 得到了示例管网的管段粗糙系数的参数集合(见表 3).

表 3 模型水力模型参数自动识别最终参数集合

Table 3 Identified parameters of hydraulic model		
	管段编号	参数取值
灵敏管段	40	107.8
	29	104.3
不灵敏管段		108

4 结论

城市供水管网模型参数自动识别是提高城市供水系统模型应用水平的关键技术, 提出了基于 GIS 和 SCADA 的管网模型参数自动识别的流程. 在此基础上, 提出了基于 RSA 方法的灵敏参数自动识别和基于 MCS 方法进行参数识别的算法和步骤, 并通过计算机编程开发了管网模型参数自动识别模块. 最后以一个典型城市小区供水管网为示例, 按照提出的技术方法进行了管网水力模型参数自动识别, 得到了满足要求的模型参数, 证明了所提方法的科学性.

参考文献:

[1] 魏伟. 东莞市供水管理与调度信息系统总体框架研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.

[2] 吴信才, 邢延炎. 苏州市供水管网信息系统的开发及其关键技术[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(2): 137-146.

[3] 罗灵军, 张远, 周平, 等. 重庆城市基础地理信息系统建设及应用[J]. 地理信息世界, 2004, 2(1): 19-23.

[4] Trepanier M, Gauthier V, Besner M C, *et al.* A GIS-based tool for distribution system data integration and analysis [J]. Journal of Hydroinformatics, 2006, 8 13-24.

[5] Massoud T, Zia A. Dynamic management of water distribution networks based on hydraulic performance analysis of the system[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2003, 3(1): 95-102.

[6] Davidson J W, Bouchart F J. Adjusting nodal demands in SCADA constrained real-time water distribution network models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 1: 102-110.

[7] Ozdemir O N, Ucak A. Simulation of Chlorine Decay in Drinking-Water Distribution Systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 2002, 128(1): 31-40.

[8] Piriou P, Dukan S, Kiene L. Modeling Bacteriological Water Quality in Drinking Water Distribution Systems [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(8): 299-307.

[9] 周玉文, 何敏, 方琦. 基于 GIS 的给水管网动态水力计算模型的建立与应用[J]. 给水排水, 2006, 32(8): 96-101.

[10] 信昆仑, 刘遂庆. 城市给水管网水力模型准确度的影响因素[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 23-28.

[11] 何芳, 李树平, 陈宇辉, 等. 供水管网水力模型的维护[J]. 给水排水, 2007, 33(1): 99-103.

[12] 陈宇辉. 给水管网动态模型维护与校验方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[13] 陈凌, 刘遂庆, 陈宇辉. 城市供水管网实时水力模拟节点流量的计算[J]. 给水排水, 2006, 32(10): 106-111.

[14] 王建平, 程声通, 贾海峰. 环境模型参数识别方法研究综述[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 574-581.

[15] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 6-10.

[16] 邓义祥. 稀疏数据条件下河流水质模型的参数识别[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[17] 陈宇辉. 给水管网动态模型维护与校验方法研究. [D]. 上海: 同济大学, 2006.

[18] WRC, Network Analysis-A Code of Practice [R]. Water Research Centre, 1989.

[19] Lewis A R. EPANET 2 USERS MANUAL[R]. United States EPA, 2000.