

# 基于 MATLAB 的给水管网可视化模型和仿真计算

姚 宇<sup>1</sup>, 俞国平<sup>1</sup>, 胡少华<sup>2</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 探讨并建立了具有用户图形界面(GUI)的任意形状给水管网的可视化微观计算模型。在 Matlab 平台下, 使管网建模、经济管径确定、平差计算、数据存取和结果分析达到一体化。由于引入 Matlab 可视化计算思想及其工具箱, 使管网的计算和程序的编制过程得到简化, 提高了工作效率。

**关键词:** 给水管网; 可视化分析; 平差法; Matlab

中图分类号: TU 991.32

文献标识码: A

文章编号: 1672-0679(2006)02-0054-06

应用计算机建模解决管网设计计算与优化调度问题是当前给水管网新理论、新技术发展的基本方向。通过合理的设计和运行管理, 可以提高给水管网的管理效率, 节约运行费用。国内外的科研工作者们已经做了大量工作并取得了相应的成果。以面向对象的高级语言如 VB、VC 开发的软件包已有不少得到了实际应用。但是由于管网计算问题本身的复杂性, 采用此类高级语言来求解管网数学模型也带来了开发周期长, 对计算机等硬件要求较高, 计算速度较慢等问题。

Matlab 是美国 Mathworks 公司自 20 世纪 80 年代中期推出的数学软件, 它源于矩阵运算, 并已发展成一种高度集成的计算机语言。Matlab 具有强大的科学运算能力, 提供了灵活的程序设计流程、丰富的函数库以及与其他语言的接口功能, 加上高质量的图形可视化处理与友好的界面设计风格, 它已成为当今工程界最具活力, 应用最广的软件之一。本文以 Matlab 作为开发平台, 采用面向对象的可视化界面技术使用户能建立具有树状网和环状网的城市给水混合型管网可视化计算模型; 并可根据管网的结构参数(如管网图形、管段长度、阻力系数、节点流量等)迅速进行平差计算得到各管段的流量和水头损失等水力要素; 在此基础上获得各节点的水压以及水源点供水量、泵站扬程等参数; 还能方便地对结果进行图形表达, 从而可以全面了解管网的工作状况, 为管网的优化调度运行, 改建扩建, 制订发展规模等提供科学依据。

## 1 计算机管网图形信息的表示方法

应用计算机解管网问题是根据管网的结构参数和运行参数求解管网的数学模型——管网稳态方程组。所谓结构参数或静态参数是指管网图、管径、管长、阻力系数、节点和地面标高等; 运行参数或动态参数是指节点流量、各水源水泵特征参数、运行调度方案、吸水池水位和水塔水位等。首先要考虑到如何用方便的形式将管网的图形信息输入计算机。这些信息包括节点信息、管段信息和环信息等。输入时一般应满足下列要求: 形式要具体, 同时尽量减少存储空间; 内容能满足解题所用的程序的需要; 输入方式要灵活, 并减少输入量; 另外, 对于混合型管网中环状网部分还要解决好衔接矩阵和回路矩阵的构建问题。

在计算机图形信息输入方面常用的方法是应用衔接矩阵  $A$  和回路矩阵  $B$  的概念, 衔接矩阵表示了节点与管段间的关系, 其取值方法为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如 } j \text{ 管段水流从 } i \text{ 节点流出} \\ -1 & \text{如 } j \text{ 管段水流从 } i \text{ 节点流入} \\ 0 & j \text{ 管段不在 } i \text{ 节点上} \end{cases}$$

[收稿日期] 2006-04-26

[作者简介] 姚 宇(1982-), 男, 湖南湘潭人, 硕士研究生。

衔接矩阵尽管非常简单,包含了管网的全部信息,但在计算机上进行运算时并不是很合适,因为对较复杂的管网而言,衔接矩阵占用的空间很大,而其中大部分的元素为零,即衔接矩阵为稀疏矩阵。

为解决上述问题,可将衔接矩阵表达的管网信息写成较小的矩阵即峰矩阵。所谓峰矩阵是每一管段只用两端节点的编号表示,矩阵仅占两列,行数等于管网的管段数。图1用峰矩阵表示如表1所示。

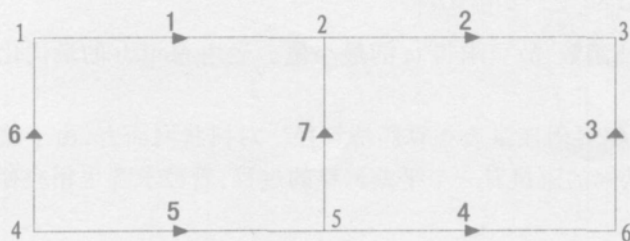


图1 简单环形网示意图

表1 峰矩阵

管段编号	两端节点编号	
	起点	终点
1	1	2
2	2	3
3	6	3
4	5	6
5	4	5
6	4	1
7	5	2

峰矩阵在直观性上不如联系矩阵,但计算机信息存储量小,且由该矩阵可以推导出联系矩阵和其它一些有价值的信息。由于第一列是管段的起点号,第二列是管段的终点号,故峰矩阵实际上还假定了管段的水流方向。每一节点上连接的管段数等于该节点编号在峰矩阵各列出现的次数。

回路矩阵用于表示每一基环内各管段的有关信息。在矩阵中,每一环占一行,每一管段占一列,其元素 $b_{ij}$ 可表示为:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如管段 } j \text{ 在 } i \text{ 环,水流与该环正方向一致} \\ -1 & \text{如管段 } j \text{ 在 } i \text{ 环,水流与该环正方向相反} \\ 0 & \text{管段 } j \text{ 不在 } i \text{ 节点上} \end{cases}$$

一般取顺时针方向为环的正方向,逆时针方向为环的负方向。用该法处理图1的环信息如表2所示。

在进行可视化操作绘制管网结构图的过程中,本程序将管段图形概化为直线,大用户简化为节点,沿线流量折算到节点,用户在界面绘图区以交互方式构建管网,输入必要的管网信息和进行数据存储。完成所有的前处理工作后,可以进行计算,计算时计算机按已存储的节点与管段的图形学关系,即可建立联系矩阵 $B_{ij}$ ,由于Matlab是基于矩阵运算的编程语言,处理程序的编制简单高效。

## 2 流量分配和管径确定

表2 回路矩阵

环号	管段编号			
I	1	-7	-5	6
II	2	-3	-4	7

管网模型建立后可以环状网初始流量分配以选择经济管径。根据管网技术经济理论,在一般情况下,环状网不可能出现最优的流量分配;流量分配要考虑经济性与可靠性并重,好的流量分配能降低管网造价和运行费用,并比较可靠。

树状网的每根管段流量和流向都是唯一的,实现计算机求解很简单,而环状网可有不同的流量分配。流量分配的方法有节点累计法、最小平方和法、均分法、截面法等。由于最小平方和法在管段流量较大时有良好的均匀分配性,比较接近实际情况,也比较安全,故本文采用了最小平方和法<sup>[1]</sup>。

最小平方和法是将分配后的各管段流量取其平方和,再求其最小值。假设管网的管段数为 $M$ ,管段流量为 $q_j$ ,目标函数为

$$\omega = \sum_{j=1}^M q_j^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

约束条件为各节点满足流量平衡条件。假设离开节点的流量为正,流向节点的流量为负,则节点流量的平衡关系为

$$\sum_{j \in S_i} (a_{ij} q_j) + Q_i = 0 \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $Q_i$  为节点  $i$  的流量;  $S_i$  为节点  $i$  的关联集;  $N$  为管网模型中节点总数;  $\sum_{j \in S_i} \pm$  为对节点  $i$  关联集中所有管段进行有向求和, 管段流量流出节点取正值, 反之取负值。

因目标函数为非线性, 约束条件为线性, 可以用拉格朗日未定乘数法求解, 引入未定乘数, 得

$$\omega = \sum_1^M q_j^2 + \sum \lambda_j \left[ \sum_{j \in S_i} (\pm q_j) + Q_i \right] \quad (3)$$

对  $q_j$  和  $\lambda_j$  偏微分, 并令其等于 0, 因(3)式对  $q_j$  为凸函数, 故可求得  $\omega$  的最小值。运用 Matlab 的最优化工具箱, 调用相应的库函数可直接得出上述问题的解。

在管网模型中, 一旦管段流量确定, 就可以根据界限流量表查算经济管径。对树状网而言, 由于流量一开始可以得到确定, 故管径求算相对容易。而环状网的流量有一个平差调整的过程, 管径求算也相应存在一个不断调整的过程。主要依据是界限流量公式

$$q_n = (m/fa)^{1/3} \left[ (D_n^a - D_{n-1}^a) / (D_{n-1}^{-m} - D_n^{-m}) \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中:  $D_n$  为市售标准管径;  $m$  为计算参数, 通常取 5.33;  $a$  为计算参数, 通常取 1.8;  $f$  为经济因素, 与城市技术经济指标有关。

当计算结果中的管段水头损失和流速超出规定的范围时, 程序执行管径的自动调整。有些方法以管段流量和管径是否满足界限流量关系为控制条件。但经试验发现, 该法迭代次数多, 还存在部分管段流量分配不合理, 流速过小的问题。本文优先考虑了水头损失的限制, 采用每千米管长的水头损失作为控制条件。控制标准可以人为设定。在环状网初分流量确定后, 按初分流量初步选定管径。平差计算后, 如有水头损失不符合标准的, 应由计算机根据管段流量重新选定管径计算, 如此反复, 直到所有管段水头损失都符合要求为止。此法计算收敛速度快, 结果与实际较符合。但有时也会造成管网末端或供水分界线(多水源时)附近流速较低, 这种情况下适当利用本程序的手工调整设置很快就可以得到较好的解。总的来说工作的效率和精确度都有所提高。

### 3 管网平差算法的选择与实现

混合型给水管网的水力计算关键在于环状网部分的计算。且为了提高可靠性, 城市给水管网也多建设成环状。环状管网的水力计算方法有很多种, 常见的有求解环方程, 求解节点方程, 求解管段方程等。

目前已有的各种软件包各具特色, 但基本算法都是对连续性方程、能量方程和管段压降方程的求解。一般认为, 计算机求解时, 宜采用解节点方程的方法, 解节点方程法的方程数介于上述两者之间; 它不需要输入回路矩阵信息; 初始流量或初始节点水头的拟定比较简单, 因而成为常用的重要方法。本文亦选用解节点方程法中的节点水压法来进行水力计算。

节点方程若以节点水头为未知量的非线性方程。解管网问题最后归结为了解多元非线性方程组问题。通常将其线性化并用迭代法求解。最常用的解法有: 哈代·克罗斯法(Hardy-cross), 牛顿·拉夫森(Newton-Raphson)法。牛顿·拉夫森法原是求解非线性方程组的一种方法, 此法理论严密, 考虑全面, 简单易行, 只要初始点选得好, 一般能保证收敛, 可以直接调用 Matlab 相应的库函数即可求解。其迭代流程如图 2 所示。

按牛顿法求节点方程式时, 每迭代一次就要解一个以 Jacobi 矩阵  $J$  为系数矩阵的线性方程组。 $J$  的阶数

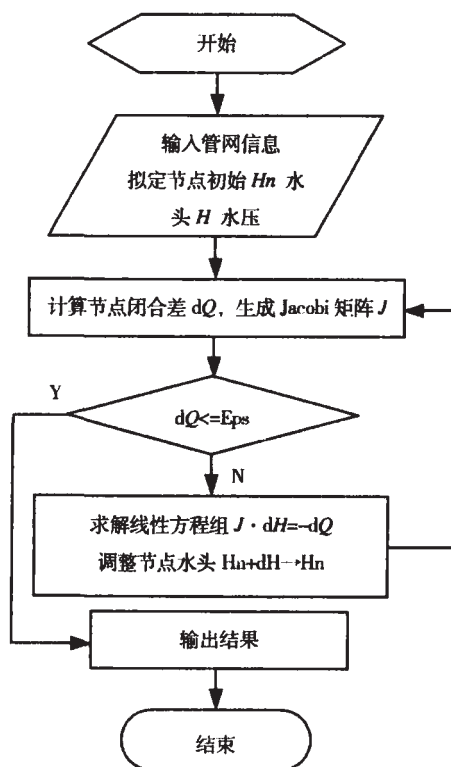


图 2 牛顿·拉夫森解节点方程算法流程图



与管网的节点数相等,是一个大型的对称正定稀疏矩阵,一般存储方法将浪费大量的存储单元,影响计算速度,必须采用压缩方案。本文利用 Matlab 自带的稀疏矩阵技术处理很好地解决了这个问题,直接调用内部命令 sparse,省去了复杂的编程过程。

#### 4 GUI 和可视化编程

Matlab 是一个既可以进行分析计算,又能进行数据可视化的高效操作平台,尤其是在 Matlab 6.5 版本以后,用户图形界面(GUI)的设计功能已与常用的面向对象设计语言 VB 等相差无几。利用其专业的绘图功能,还可以快速地建立管网模型数值解以及图形表达,如管网的水压等值线图、等压区图、地形图等。

在进行用户界面 GUI 设计时,研发人员主要应遵守三个原则:(1)简单化,即要求界面结构清晰,层次分明,操作方便;(2)一致性。界面各部分功能应相互匹配,相互之间不会产生抵触;(3)人性化。即界面要友好,符合人们的正常逻辑思维方式和习惯。

本模型将 GUI 设计成四个区域(见图 3)。最上方是下拉菜单区,右侧是主操作区,正中是图形显示区,下方是节点编辑区。根据这些特性,把一些不常调用的命令置于下拉式菜单中,如数据的存储和打开,图形的缩放,坐标系的调整,某些宏观参数的设置等。主操作区是一系列的操作按键,最主要的和频繁调用的一些功能均置于其中,如节点、管段的编辑,启动计算,显示结果等;下方的节点编辑区用于实现节点坐标的修改以及节点坐标的键盘输入。

基于以上的思路,本文设计了具有 GUI 的城市给水管网结果可视化计算模型,它具有按键和鼠标操作的全部功能,集建立管网模型,参数赋值,计算,结果图形化及存取为一体的可视化仿真模型,并利用 Matlab 编译器和运行时服务器,可生成独立的程序脱离 Matlab 平台在任意操作系统下运行和移植。

#### 5 计算举例

某城市给水管网由两水厂和一水塔供水,全城地势平坦,地面标高按 0.00 m 记。设计用水量 5 000 t/d,最高时用水量占最高日用水量的 5.92% 即 822 L/s。要求的最小服务水头为 24 m(管网模型见图 3)。整个管网由 15 个节点和 21 条管线组成,管段中如果存在阀门也在图上标志出来。其中 13 节点为西水厂,设计流量 493.0 L/s,压力 36.20 m,14 节点为东水厂,设计流量 263.0 L/s,压力 31.44 m,15 节点为水塔,设计流量 66 L/s,水箱水柜底高 27.74 m。

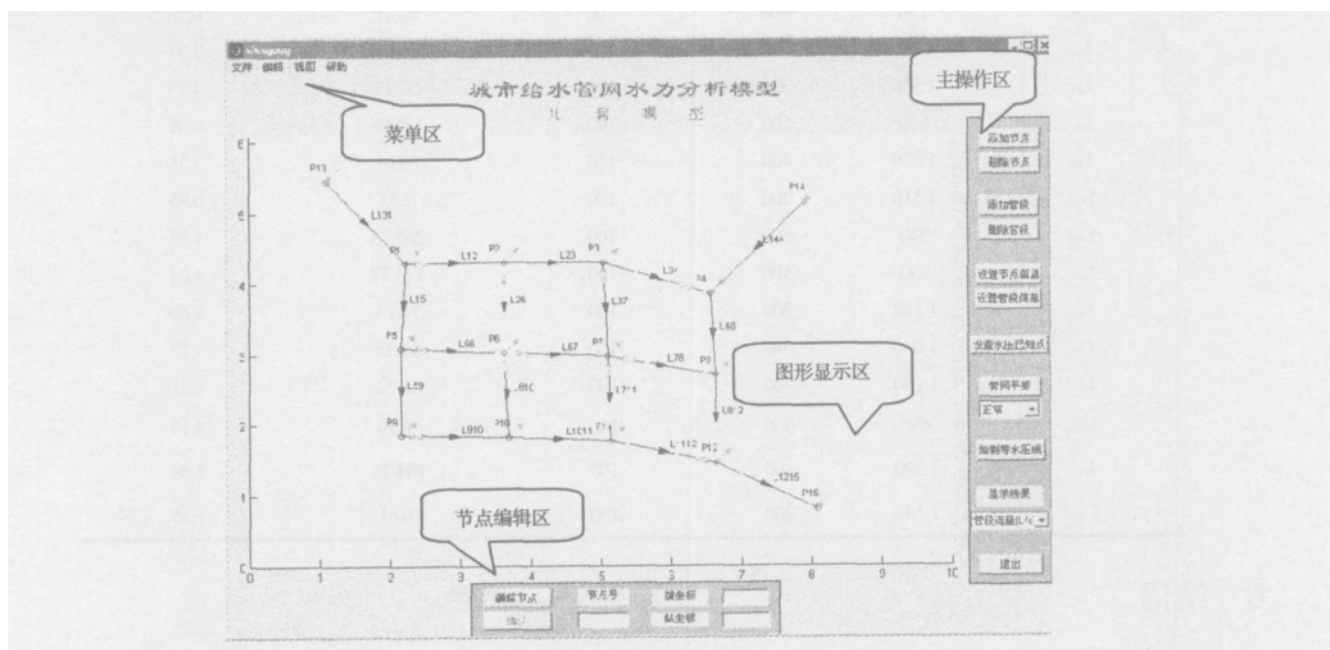


图3 界面结构和功能区划分

运用本程序构建的管网模型,输入管网信息后的计算结果见表 3、表 4,该管网的等水压线图见图 4。

表 3 节点计算成果

节点编号	地面标高 /m	配水量 / $L \cdot s^{-1}$	自由水压 /m
1	0.0	36.2	35.82
2	0.0	36.8	33.44
3	0.0	82.5	29.21
4	0.0	36.4	30.19
5	0.0	48.7	34.07
6	0.0	81.5	32.23
7	0.0	198.7	25.35
8	0.0	66.1	26.61
9	0.0	50.6	30.94
10	0.0	43.2	29.05
11(控制点)	0.0	105.8	24.00
12	0.0	35.5	27.56
13(水源)	0.0	-493	36.20
14(水源)	0.0	-263	31.44
15(水塔)	0.0	-66	27.74

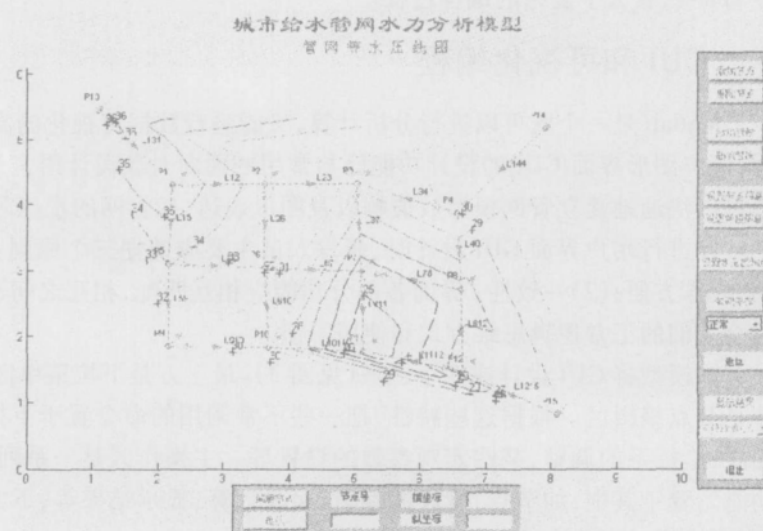


图 4 管网自由水压等值线图

表 4 管段计算结果

管段编号 L	起点/终点	管长 /m	管径 /mm	海曾-威廉系数 C	管段流量 / $L \cdot s^{-1}$	管段水头损失 /m
L <sub>431</sub>		225	800	100	492.99	0.38
L <sub>45</sub>		620	600	100	305.34	1.75
L <sub>99</sub>		1 730	400	100	82.64	3.13
L <sub>910</sub>		1 500	300	100	31.95	1.89
L <sub>4011</sub>		1 020	300	100	66.78	5.05
L <sub>4112</sub>		760	200	100	22.32	3.56
L <sub>4215</sub>		150	400	100	65.79	0.18
L <sub>42</sub>		1 270	500	100	151.30	2.37
L <sub>43</sub>		1 350	300	100	52.22	4.24
L <sub>44</sub>		650	500	100	135.08	0.99
L <sub>48</sub>		1 670	400	100	90.61	3.58
L <sub>412</sub>		1 510	200	100	7.53	0.95
L <sub>444</sub>		240	500	100	262.73	1.25
L <sub>46</sub>		760	500	100	173.72	1.84
L <sub>47</sub>		1 130	300	100	74.74	6.89
L <sub>78</sub>		1 040	300	100	31.33	1.27
L <sub>46</sub>		1 150	400	100	61.72	1.21
L <sub>410</sub>		480	300	100	78.29	3.19
L <sub>47</sub>		1 390	400	100	104.23	3.86
L <sub>411</sub>		1 140	200	100	10.61	1.35

## 6 结语

城市给水管网的计算机模拟仿真是一项十分复杂的系统工程,通过对管网系统的模拟计算,可以对现状管网的运行状况作出正确的评价,并可为今后改扩建计划,给水工程中远期规划及管网事故处理提供依

据。本文根据管网计算的特点,在充分利用 Matlab 提供的内部工具箱的基础上,建立了 Matlab 下具有 GUI 的任意管网计算可视化模型并探讨了其可行性与经济性,避免了繁琐复杂的编程和调试,提高了数学建模的效率,将主要精力放在模型的建立及机理分析方面;丰富了管网建模的手段和方法;有利于提高管网建模的质量。同时,在管网建模基础上如何充分利用 Matlab 的最优化工具箱来求解最优化模型进行管网系统的优化调度,还有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 严煦世,赵洪滨. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:39-42.
- [2] 严煦世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 严煦世,范瑾初. 给水工程[M]. 第四版. 北京:中国建筑工业出版社,1999:62-63.
- [4] 许仕荣,邱振华. 给水管网的计算理论和电算应用[M]. 长沙:湖南大学出版社,1997.
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.

## Visualized Modeling & Emulated Computation of Civil Water-supply Network under MATLAB

YAO Yu<sup>1</sup>, YU Guo-ping<sup>1</sup>, HU Shao-hua<sup>2</sup>

(1.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To analyze circuit water distribution networks, a visualized computational model with graphic user interface(GUI) is developed in this paper. The model is integrated with geometric data input, network design, calculation and result analysis under Matlab environment. It simplifies the computational procedures and program-making process due to the introduction of Matlab and makes the analysis of networks more efficient.

**Key words:** network; visualized analysis; newton-raphson method; Matlab