

# 节点递归算法优化合流管网

伊学农<sup>1</sup>, 吕腾蛟<sup>2</sup>, 刘遂庆<sup>1</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 济南市自来水公司, 山东济南 250013)

**摘要:**根据合流制管网系统的图论和矩阵算法, 提出节点递归优化算法, 以节点为研究对象, 优化合流制管网系统。本算法能解决管网在交汇点处上下游管段衔接计算问题、溢流井设置问题, 克服控制点不易确定的困难, 达到了费用最低的优化目标; 并可直接以节点标高为约束条件, 充分考虑利用原有管道或解决地下管线交叉问题。并通过实例进行了验证。

**关键词:**合流管网; 优化设计; 节点递归

**中图分类号:** TU992.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2003)05-0059-04

## 1 前言

排水管网系统的设计越来越向分流制系统发展, 尤其对于新建城市或城区更是如此, 但合流制管网系统目前仍然存在, 并且占有一定的比例。合流制管网系统的主要特点是在满足雨天排除雨水的同时, 也要满足晴天时输送污水的要求, 约束条件多, 设计要求高, 因此, 在设计中应引起足够的重视。

为解决和正确处理合流制管网设计计算中多管段交汇点处上下游管段的衔接关系, 本文提出以节点为研究对象的节点递归算法, 自动判断并正确计算上下管段的标高等水力参数; 根据此算法无需对管网进行特定编号, 即可一次计算完成整个合流制管网, 并且还可在一定程度上控制某些节点的标高等参数。

## 2 合流制管网与节点递归算法

合流制管网一般为树状网络分布, 按合流污水在管内的流向, 合流污水由各支管的起端进入, 经过干管逐渐汇集流向主干管, 最后流至管网下游终点, 因此, 可视为有向图。合流制管网系统的设计计算基本同雨水管网, 管网中各设计管段的设计流量是随着计算路线的不同而发生变化的, 因此, 合流制管网中控制点的确定尤为重要, 而节点递归算法可自动确定管网控制点。

对于合流制管网有向图, 可以用一个矩阵表示其节点与管段的衔接关系, 当管网图形确定后, 管网联系矩阵就被确定下来, 反之, 当已知管网联系矩阵, 则可唯一的确定管网图形。根据合流制管网的特点, 采用如下规则表示联系矩阵  $M$ :

$$M(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{表示节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相连,} \\ & \text{且 } i \text{ 为管段 } j \text{ 起点, 即流量从节点 } i \text{ 流入;} \\ -1 & \text{表示节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相连,} \\ & \text{且 } i \text{ 为管段 } j \text{ 终点, 即流量从节点 } i \text{ 流出;} \\ 0 & \text{表示节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 不相连;} \end{cases}$$

为方便, 采用具有一个交汇节点的简单合流制管网(图 1), 按照以上规则, 则联系矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

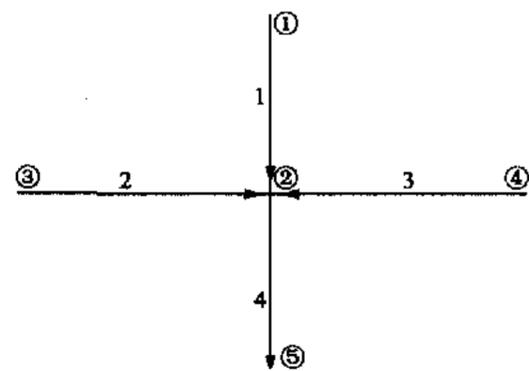


图 1 单交汇点合流制管网图

据上所知, 对于每一节点, 管网连接矩阵中数据唯一地确定了连接于该节点的管段数, 并分别区分为节点上游管段和下游管段, 特别地, 对于合流制管网的起点, 其上游管段数为零; 对于终点, 其下游管段数为零。根据合流制管网有向图的特点, 为了使其能够较为容易地在计算机中实现, 必

收稿日期: 2003-01-03

作者简介: 伊学农(1962-), 男, 山东济南人, 博士后, 山东建筑工程学院副教授, 从事教学工作。

须寻找一种较好地能在计算机中容易实现并且速度较快的遍历方法,对于有向图通常有先深搜索和先广搜索两种遍历方法<sup>[1]</sup>。本文在先广搜索算法的基础上,经过改进后,提出了以节点为对象的节点递归算法。在搜索过程中,从管网中任一个节点开始,依次检查与当前节点相邻的全部节点,将访问过的节点标记为“visited”,同时并标记该节点上游的计算管段,如果上游所有管段没有全部计算完毕,则不进行标记;然后利用节点→下游管段→节点,或节点→上游管段→节点的搜索遍历方式,访问未曾访问过的节点,直到遍历完整个管网,其实质是一种数学递归算法,用于合流制管网设计计算的步骤见本文后述。

### 3 合流制管网面积与流量计算

合流制管网设计流量包括雨水设计流量和旱流量两部分,并按照设计规范的规定采用直接叠加进行计算。管网中的雨水设计流量是按汇水面积叠加,并根据集水时间,与管网水力计算过程同时进行计算的;旱流量的计算同污水管网流量计算,生活污水流量按平均流量叠加,也可转化为面积叠加计算,再加集中流量。这样可先计算管网的汇水面积,然后进行设计流量的计算和水力计算。

如图1所示,设雨水管网中各管段的汇水面积分别为 $F_1, F_2, F_3, F_4$ ,则用向量表示如下:

$$\bar{F} = (F_1, F_2, F_3, F_4)^T \quad (1)$$

设各管段服务面积上的本段汇水面积为: $f_1, f_2, f_3, f_4$ ,用向量表示如下:

$$\bar{f} = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T \quad (2)$$

按流入节点的流量为负,流出节点的流量为正的原则,对相应管段的汇水面积赋以正负号加以计算。对于图1,按节点流量平衡原则,写出节点的汇水面积方程:

$$\begin{cases} F_1 = f_1 \\ -F_1 - F_2 - F_3 + F_4 = f_2 \\ F_2 = f_3 \\ F_3 = f_4 \end{cases} \quad (3)$$

写成矩阵形式,则为:

$$M \cdot \bar{F} = \bar{f} \quad (4)$$

式中, $M$ —为管网联系矩阵; $\bar{f}$ —为各管段本段汇水面积向量,当管网定线后可直接求出。因此,利用数学方法,直接求解上式即可得出各管段的总汇水面积 $F_i (i=1, 2, 3, 4)$ 。溢流井前各管段的雨水设计流量为:

$$Q_{yi} = F_i \cdot q_0 \cdot \psi \quad (5)$$

旱流量为:

$$\begin{aligned} Q_{hi} &= KQ_i + q_{ji} = \frac{2.7}{Q_i^{0.11}} Q_i + q_{ji} \\ &= 2.7 Q_i^{0.89} + q_{ji} = 2.7 (q_i)^{0.89} F_i^{0.89} + q_{ji} \end{aligned} \quad (6)$$

因此,溢流井前的设计流量为:

$$Q_{si} = Q_{yi} + Q_{hi} \quad (7)$$

溢流井后管段的设计流量为:

$$Q_{si} = (n+1)Q_{hi} + Q'_{yi} + Q'_{hi} \quad (8)$$

以上几式中: $q_0$ —雨水单位面积比流量; $\psi$ —径流系数; $n$ —截流倍数; $q$ —污水比流量; $K$ —污水总变化系数; $Q'_{yi}, Q'_{hi}$ —分别为溢流井后当作起始管段计算的雨水设计流量和旱流量。结合管网水力计算的进行,可逐步地计算确定整个管网的设计流量。

### 4 目标函数

合流制管网系统优化的目的是使整个雨水管网在其整个服务年限内基建投资和经营费用现值的总和为最小,本文主要考虑管网的造价和费用,并采用如下的优化目标函数<sup>[2]</sup>:

$$\min F = \sum_{i=1}^N (k_1 + k_2 H + k_3 H^2 + k_4 D_i H + k_5 D_i + k_6 D_i^2 + k_7 D_i^3) \cdot l_i \quad (9)$$

式中: $c$ —各管径管道单位长度敷设造价; $D$ —管径(m); $H$ —管道埋设深度(m); $k_1, k_2, \dots, k_7$ —地方性系数和指数,可按不同埋深管径系列的指标<sup>[3]</sup>值统计,见表1所示; $l_i$ —管网中管段长度(m); $N$ —管段总数。

表1 排水管道概算指标(90°基础,埋深小于4m) (单位:元/100延长米)

管径(mm)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
概算指标(元)	75495	89363	95852	105798	114282	131440	141569	165798	178129

## 5 合流制管网节点递归水力计算

合流制管网的水力计算采用重力流,并按满流进行设计,按非满流校核。节点递归算法用于合流制管网设计时,首先要对管网中各节点和管段进行编号,其次需要对管网管段的编号根据上下游衔接关系进行处理,即采用各上下游管段的管段编号和正负号作为计算标志。其算法和计算步骤如下:

(1)指定计算节点。

(2)判断是否为溢流井或起始管段:是,转(3)继续;否,转(4)继续。

(3)按  $t_2=0$  计算当前管段的雨水设计流量,并与旱流量叠加生成设计流量;如果为起始管段,按起点埋深进行水力计算;如果为溢流井,则按照上下游关系进行水力计算;找出下游节点,转(2)继续。

(4)判断其上游管段是否计算完毕:是,转(5)继续;否,转(6)继续。

(5)搜寻该节点上游所有管段,找出控制点所在上游管线中的位置,计算上游主干线的管内流行时间和当前管段的雨水设计流量,并按照规定计算合流管网的设计流量;根据该节点所有上游管段中管径和管内底标高等必要的水力参数,对当前管段进行水力计算;找出当前管段下游节点,返(2)继续。

(6)将计算节点移至当前管段的上游节点,转(2)继续。最后再沿此逆方向,将计算节点移回当前节点进行计算。

(7)当所有管段计算完毕,再次调用递归算法进行旱流量校核,结束。

在合流制管网系统的设计计算过程中,需要调用三次递归,分别用于管段面积计算与旱流量计算、满流水力计算和优化计算、旱流量非满流水力校核等。计算均从上游节点至下游节点的方向进行,遍历管网所有节点和管段。水力计算时,枚举全系列标准管径集<sup>[4]</sup>,并根据所选管径的大小,按下游管段起点管内底标高不高于上游计算管段终点相应标高的衔接原则,计算下游管段起点标高,以及其它各水力参数。(1)当计算管段为新设管段时,按较小埋深和最小造价进行优化计算。(2)当计算管段为原有管段,或设计者已确定计算管段起点和终点的管内底标高(或该两点的管顶

标高)时,设长度为  $L$ ,标高分别为  $HG_{i1}$  和  $G_{i2}$ ,则以该节点的标高作为控制因素,对该管段进行水力计算,其水力坡度  $I$  为:

$$I = \frac{HG_{i1} - HG_{i2}}{L} \quad (10)$$

根据求出的水力坡度,计算其它水力参数。

$$\text{设计流速: } v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{设计输水能力: } Q &= wv = \frac{1}{4} \pi D^2 v \\ &= w \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (12) \end{aligned}$$

(1)当地面坡度较大,管道埋深为负值时(即管道下游节点的管内底标高高于地面标高),同样首先确定管段起讫点的标高,按以上各式进行计算调整。

(2)对于平坦地区,则按造价最小直接进行优化计算。根据水力计算惯例,首先确定下游管段的设计流速  $V$ ,再利用上几式计算管段的水力参数。

根据计算出的各水力参数,判断是否满足规范约束条件,如果满足,将水力参数值作为计算值保存,并按造价最低原则寻优,确定出全局造价最低并符合要求的管径。

## 6 程序实现与设计实例

根据本文提出的算法,用 Delphi6.0 编写了相应的合流制管网优化计算程序。程序中数据输入主要包括交互式数据输入、数据文件输入等方法,内容有暴雨公式参数、总管段数、管段编号、起点和终点编号、管段长度、汇水面积、人口密度、排水量标准、溢流井数量和位置、截流倍数,以及地面标高、控制节点的管内底标高等;当某节点的管内底标高无需控制时可以不输,此时按程序设计直接优化。

计算程序能根据各节点的衔接关系,自动检查计算节点上游各管段终点的水力参数,根据设计原则确定下游管段起点的水力参数,并进行水力计算;如此循环,遍历所有节点,直到计算完所有管段。按照本文提出的算法,在计算时可自动对节点处各管段的管径衔接、流速、标高等水力参数进行处理,并可一次计算完整个合流制管网系统,克服了单条管段计算和节点处人工调整,以及多次重复计算等繁琐和困难,避免了管网系统中

难以确定控制点,并使合流制管网的设计更趋合理和优化。利用所编程序,对山东省某县城35km的合流管网系统进行了优化计算,得到了令人满意的结果。下面的示例图形(图2)和表2的计算结果是其中的一部分。

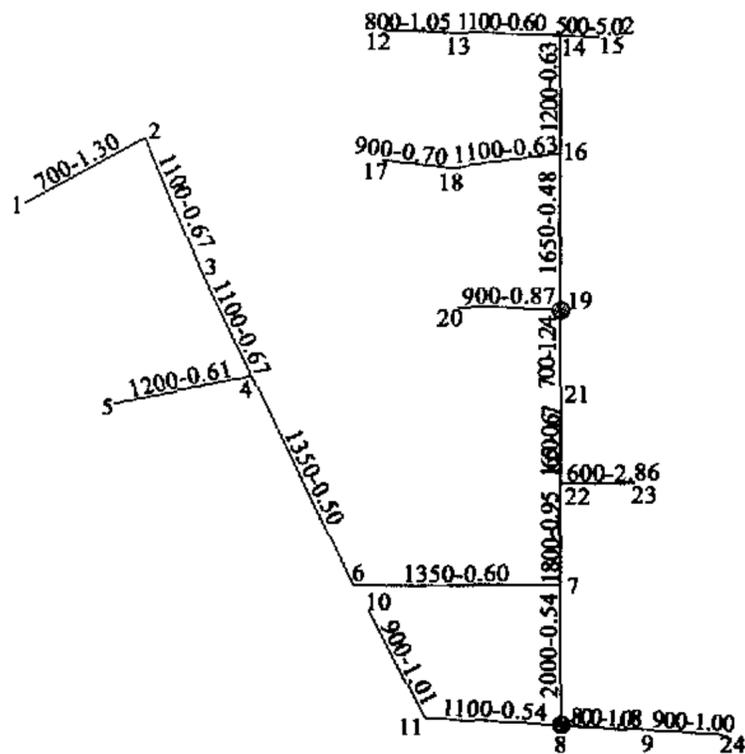


图2 计算示例图

## 7 结论

(1)利用图论理论和管网联系矩阵,表达合流制管网中节点与管段的衔接关系,方便了计算。

(2)采用节点递归算法可一次遍历整个合流制管网系统。在一定范围内,可对管网中某个或某些节点标高进行控制。

(3)本算法可针对合流制管网中不同径流系数、不同人口密度和排水量标准进行分区计算,并可根据地形自动处理管道的设计坡度和其它设计参数,以寻求造价最低。

(4)采用枚举全系列标准管径法,可优化合流制管网的造价。

## 参考文献

- [1]李连治等. 数据结构[M]. 大连理工大学出版社,1989.
- [2]丁宏达. 雨(污)水管道系统优化设计[J]. 中国给水排水,1988. 4(1):51-54.
- [3]给水排水设计手册(10)—技术经济[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [4]伊学农. 计算机在给排水工程中的应用[M]. 山东建工学院自编教材,1994.

表2 合流制管网水力计算结果表

管段	管长 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	管径 (mm)	地面标高(m)		管内底标高(m)		造价 (万元)
				上游	下游	上游	下游	
1-2	550	2.50	700	32.600	32.100	31.100	30.383	11.3563
2-3	750	10.20	1100	32.100	32.700	29.983	29.478	40.2186
3-4	370	13.40	1100	32.700	32.700	29.478	29.229	21.4033
5-4	590	7.20	1200	32.500	32.700	30.500	30.140	35.2309
4-6	930	28.60	1350	32.700	32.700	29.079	28.614	77.7849
6-7	830	44.10	1350	32.700	33.400	28.614	28.113	74.1268
10-11	600	4.30	900	32.700	33.100	31.000	30.394	21.5309
11-8	547	9.30	1100	33.100	33.200	30.194	29.900	30.8019
7-8	600	93.50	2000	33.400	33.200	27.836	27.510	101.1725
8-9	338	2.40	800	33.200	33.300	27.510	27.144	17.9325
9-24	327	4.90	900	33.300	33.400	27.044	26.718	20.7779
12-13	250	3.20	800	33.800	34.000	32.200	31.938	6.8515
13-14	400	7.50	1100	34.000	34.300	31.638	31.397	21.3582
15-14	160	2.00	500	35.100	34.300	33.800	32.996	1.6975
14-16	450	13.80	1200	34.300	34.700	31.297	31.013	29.8681
17-18	250	3.60	900	33.800	34.000	32.100	31.923	8.5157
18-16	450	7.90	1100	34.000	34.700	31.723	31.440	24.4038
16-19	620	37.00	1650	34.700	34.600	30.563	30.263	72.8938
20-19	460	4.00	900	34.400	34.600	32.700	32.298	15.9672
19-21	370	2.20	700	34.600	34.200	30.263	29.804	13.6839
21-22	360	23.50	1650	34.200	33.800	28.854	28.614	44.9855
23-22	350	2.40	600	34.800	33.800	33.400	32.400	5.2024
22-7	450	46.40	1800	33.800	33.400	28.464	28.036	64.2131
合计	11002	373.9						