

基于 GIS 的城市雨水管网优化设计模型研究*

孟令奎 边馥苓 陈晓宁

(武汉测绘科技大学信息工程学院, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 研究了 GIS 技术在城市雨水管网设计中的应用问题, 建立了雨水管网设计的相关模型, 重点分析了两类直接影响雨水管网工程的计算模型——水力优化计算与指标再优化模型。

关键词 GIS; 雨水管网; 优化设计; 模型; 水力优化计算; 指标再优化

分类号 TU 992.22; TP391

本文结合 GIS 技术, 针对城市雨水管网设计问题, 提出了适宜于规划与设计的雨水管网模型。以工程费用最小为出发点, 重点提出并分析了管网设计中水力优化计算与指标再优化这两类优化计算模型, 旨在为雨水管网的设计、改造和敷设提供科学、合理的依据。

1 雨水管网设计模型

雨水管网的设计主要包括: 确定当地暴雨强度曲线或公式; 划分排水流域, 进行管网的定线; 划分设计管段, 计算管段设计流量; 进行雨水管网的水力及高程计算, 确定管线尺寸、坡度、标高及埋深; 绘制管网平面图及纵剖面图。其中, 暴雨强度在不同的城市有不同的描述, 排水流域和设计管段的划分则与城市的总体规划、地形、道路以及其它因素有关。水力计算及由此得到的管段各项指标与不同的计算方法关系甚密, 它直接决定了排水管网的工程造价。以查图表法为主的传统计算手段虽然也能满足实际要求, 但由于这种方法可塑性大而且不精确, 导致工程造价偏高。因此, 如何在追求总费用最小的原则下, 满足管网的设计要求, 就不仅是设计本身问题, 也是现实的经济问题。

利用 GIS 技术进行雨水管网的设计, 可以十分方便地将地形、道路及其它管网等空间信息融为一体, 并根据经济实用原则, 采取模型化结构和一定的优化策略, 实现管网的优化设计。规划人员还可以对每一可行方案, 通过这一思路进行方案的比选, 以便确定出最适宜的方案。

本文的设计模型是在基本上确定了排水流域并在对管段进行了初步划分的情况下, 对雨水管网所进行的一系列优化处理。主要有以下几类:

1) 参数定义模型

包括对当地暴雨强度的参数、地面径流系数及雨水管与其它管线最小净距参数等的定义。

暴雨强度参数主要包括: P (设计降雨重现期, 单位 a); m (苏林系数); A_1 ($P=1$ 时的设计降雨雨力); C (设计雨力变动参数); b (设计降雨历时附加参数); n (设计降雨历时指数)。

地面径流系数主要包括: 单一覆盖径流系数 (6 种) 和城市综合径流系数 (4 种)。

最小净距主要包括与下列管线或构筑物的水平和垂直净距: 建筑物、给水、污水、燃气、煤气、热力、电力、电信、输油管、铁路、明渠渠底、涵洞基础底、架空管架基础、地上柱杆、乔木等。

2) 汇水面积分配模型

汇水面积是决定管段设计流量的一个因素。其分配具有两种形态: (1) 大汇水面积分块分配到若干管段上; (2) 若干小汇水面积分配到一条管段上。

汇水面积的分配制约因素主要有地形情况及人为和社会因素等。对于前者,通过对地形情况进行空间分析(如高程分析、坡度、坡向分析)确定一种“最佳”分配模式;对于后者,则需要建立一个因子库,将非技术性的限制因素分项存入,作为对“最佳”分配模式的修正,从而实现现实意义上的优化分配模式。

此外,本模型还将根据对地形的空间分析结果及汇水面积的大小按经验模式确定地面集水时间(t_1);根据对汇水面积内地块类型的分析,从参数模型中取出相应的径流系数,并按各类地块面积用加权平均法计算被分配汇水面积的平均径流系数。

3) 径流面积计算模型

汇水面积分配仅确定了各管段的本段汇水面积、平均径流系数及地面集水时间,而对于需要统计汇水面积或计算累积径流面积的情况,则由本模型实现。以后者为例,每条管段既服务于本段径流面积(径流系数 \times 汇水面积),同时还服务于上游各管段的径流面积,负责传输雨水。由于雨水管网是一树状结构,利用递归计算可快速求出各条管段的径流面积(此处从略)。

径流面积在确定设计流量时十分关键,它在多数情况下可直接与相应管段的暴雨强度相乘以得到该管段设计流量。特殊场合,即管段的最大流量不是发生在全部面积参与径流时,通过整体与局部的计算和比较选择取值最大的一个为该管段的设计流量。

4) 水力优化计算模型

本模型是根据各项约束条件,在确定暴雨强度进而得到相应设计流量的情况下,对管网各项指标进行计算和初步优化,其结果一般符合实际需要,且比传统方式更快、更准确。

5) 指标再优化模型

管网设计的主要目标是既合理又经济,因此最大程度地降低工程造价是十分重要的。指标再优化是实现这一目标的有效途径,它对水力优化计算的结果进行目标更明确、精度更高的反复迭代优化,以求取得较为理想的各项水力指标。

2 空间数据库内容分析

2.1 空间数据内容

空间数据是雨水管网设计的基础,相关的内容主要有:

- 1) 城市基础信息(提供定位基础);
- 2) 城市用地现状及规划信息(提供设计依据);
- 3) 城市道路现状及规划信息(提供定线依据);
- 4) 雨水管网现状及规划信息(提供设计、比较及优化依据);
- 5) 地下综合管线信息(提供设计依据)。

2.2 属性信息定义(以 ARC/INFO 为例)

与雨水管网优化设计最密切的属性数据主要有:

1) 雨水管网属性信息(弧段属性) 起止节点、左右多边形(哑值)、内部标识码、用户标识码、管长、管径、类型、编号、级别、起止点埋深、设计流量、输水能力、坡度、汇水面积、径流面积、敷设日期等;

2) 检查井属性信息(附属物:节点属性) 用户标识码、内部标识码、检查井编号、类型、 X

坐标、Y 坐标、关联的弧段 (管段)、地面标高、井底标高、建设日期等;

3) 雨水泵站属性信息 (附属物: 点状地物属性) 用户标识码、内部标识码、面积 (哑值)、周长 (哑值)、泵号、X 坐标、Y 坐标、对应的节点编号 (检查井号)、压力、流量、建设日期等;

4) 地块属性信息 (多边形属性) 用户标识码、内部标识码、周长、面积、地块编号、类型等。

地块与雨水管网分属不同的 COVERAGE

3 主要优化模型算法分析

这里选取对雨水管网工程造价影响最大的两类模型——水力优化计算模型和指标再优化模型进行算法分析, 重点在于确定符合要求的优化指标

3.1 基本公式的处理

优化计算是一个受约束条件限制的反复试算与比较过程, 因此雨水管网设计的水力计算公式应做一定的变换处理。变换的结果主要有 (推导过程略):

$$q = 167A_1(1 + C \lg P) / (t_1 + mt_2 + b)^{n_1} \quad (1)$$

式中 q 为降雨强度 ($L/s \cdot hm^2$); n_1 为设计降雨历时指数

$$t_2 = \sum (L_i / 60V_i) \quad (2)$$

式中, t_2 为管内雨水流行时间 (min); L_i 为管段长度 (m); V_i 为管段满流时的水流速度 (m/s)

$$V = R^{2/3} I^{1/2} / n_2 \quad (3)$$

$$V = 4Q_s / (\pi D^2) \quad (4)$$

式中, V 为设计流速 (m/s); R 为水力半径 (m); I 为坡度; n_2 为管壁粗糙系数; D 为管径 (m)

$$Q_s = j q F \quad (5)$$

$$Q_s = k R^{2/3} I^{1/2} / n_2 \quad (6)$$

$$Q_s = \pi D^2 V / 4 \quad (7)$$

式中, Q_s 为流量; j 为径流系数; F 为汇水面积 (hm^2); k 为过水断面面积 (m^2)

$$D = [4Q_s / (\pi V)]^{1/2} \quad (8)$$

$$D = [2^{10/3} n_2 Q_s / (\pi I^{1/2})]^{3/8} \quad (9)$$

$$I = (n_2 V / R^{2/3})^2 \quad (10)$$

$$I = [2^{10/3} n_2 Q_s / (\pi D^{8/3})]^2 \quad (11)$$

3.2 优化目标选择算法

优化目标是指与任一被选管段相关联且级别相同的一条从上游至下游若干管段依次相连而形成的链式管线 (简称管段链)。利用 GIS 可方便地搜索到要被处理的任何管段链

设雨水管网属性表中共有 L 个元组, 每一元组有 M 个属性项 (本文中, $M=19$)。以 T_i 表示第 i 个元组, T_{ij} 表示第 i 元组内第 j 个属性项, 则有 $T_i = \{T_{ij} | j \in [1, M]\}$, $i \in [1, L]$ 。对于一初选管段 (元组记为 T_k), 相应的编号、级别、Fnode[#] 和 Tnode[#] 分别表示为 T_{kN} , T_{kG} , T_{kF} 和 T_{kT} , 其中, 下标 N, G, F 和 $T \in [1, M]$ 。另设与雨水泵站 (点状地物) 所对应的节点集合为 S , 则目标管段链的选择算法如下 (TMP 为临时集合):

$$TMP = \{k\}$$

$$L: \forall i \in [1, L] - TMP \text{ if } \exists j \ni T_{kF} = T_{jT} \wedge T_{kG} = T_{jG} \wedge T_{jF} \notin S$$

then $TMP = TMP \cup \{j\}$, $k = j$, LOOP L_1

else $TMP = \{k\}$, $r = 1$, $a_r = k$

$L_2: \forall k \in [1, L] - TMP \quad f \exists j \ni T_{kT} = T_{jF} \wedge T_{kG} = T_{jG} \wedge T_{jF} \notin S$

then $r = r + 1$, $a_r = j$, $TMP = TMP \cup \{j\}$, $k = j$, LOOP L_2

else end

算法结束后,由 $T_{a_1}, T_{a_2}, \dots, T_{a_r}$ 构成的序列为所选管段中各个管段的元组序列。在该序列中,各管段从上游到下游依次相连,即 $T_{a_r T} = T_{a_{r-1} F}$, $k \in [1, r-1]$

3.3 水力优化计算算法分析

优化计算的前提条件是满足雨水管网设计的约束条件^[1,2],并针对一条管段链进行。管网中所有管段链的优化计算需分为若干次处理。对于其中任一管段链而言,其优化计算过程又是从上游至下游逐段进行的。主要算法描述如下:

1) 由式 (5) 计算本段设计流量。对于初始管段 (上游起始管段),预赋流速 (设为 V) 为最小设计流速;对于其它管段,根据上游管段的流速,初选一个满足约束条件的最经济流速 (亦设为 V)。由式 (8) 计算本段管径,并选取与该管径接近的公称管径作为本段实际管径。

2) 分别根据式 (4) 和式 (10) 计算本段设计流速 (设为 V_1) 和坡度。若初选流速 $V < V_1$,则取 $V = V_1$,并由式 (7) 计算本段输水能力。

3) 计算各项高程和埋深。若本段终点埋深小于最小埋深,则以最小埋深替代计算埋深,并进行以下各步。

4) 计算坡度值 (设为 I)。根据式 (9) 求得本段管径,以与该管径接近的公称管径作为实际管径,并由式 (11) 计算与公称管径相对应的管段坡度值 (设为 I_1)。若 $I < I_1$,取 $I = I_1$,再由式 (11) 反推求出此时该管段的输水能力。

5) 由式 (4) 计算本段设计流速,并重新计算各项高程和埋深。若设计流速大于最大流速,则进行以下各步。

6) 置设计流速为最小设计流速 (设为 V),由式 (8) 计算相应的管径。选取公称管径,按 (4) 和 (10) 两式分别计算对应于公称管径下的设计流速 (设为 V_1) 和坡度。若 $V < V_1$,取 $V = V_1$,由式 (7) 计算此时的管段输水能力。

7) 重新计算各项高程和埋深。根据管段起点标高和埋深,确定在该管段起端检查井内是否需要跌水以及跌水的高度。若跌水 $> 1\text{m}$,应设跌水井。

其它各管段的水力优化计算过程同上。

3.4 指标再优化算法分析

指标再优化通过减小各管段的埋深 (以满足约束条件为前提) 而对管段的各项水力计算结果指标进行调整 (优化处理),以降低实际的工程造价。这里称能够减小的埋深量为冗余埋深,优化处理的主要算法描述如下 (处理对象与水力计算过程相同):

1) 由式 (5) 计算本段设计流量,确定本段坡度的减小量。

2) 分别由式 (3) 和式 (9) 计算流速 (设为 V) 和管径。

3) 选取与计算管径接近的公称管径,并由式 (4) 和式 (10) 计算本段设计流速 (设为 V_1) 和坡度。若 $V < V_1$,取 $V = V_1$,并由式 (7) 计算本段输水能力。

4) 计算本段终点埋深。若埋深小于最小埋深,则相应于本次选取的坡度减小量,无冗余埋深。否则进行以下各步。

5) 计算本段冗余埋深量。若本段终点设有跌水井,则不消去冗余埋深,各项指标仍保持不

变; 否则进行以下各步。

6) 根据本段与下游邻接管段的预接方式确定下游管段的冗余埋深量, 记为 ΔMS 。若下游每个管段均能整体提升 ΔMS , 则重新计算本段及下游各管段起止点埋深和各项高程。否则, 各项指标仍保持不变。

其它各管段的再优化过程同上。

可以看出, 再优化是对管段链的全局优化, 其中的关键是确定管段的坡度减小量。为了保证能够消除事实上存在的冗余埋深, 坡度减小量不能取得过大。但是, 若取得过小, 也不能达到完全消除的目的。为此, 可采取反复优化措施, 将坡度减小量作为优化控制参量, 每确定一次, 便进行一次优化处理。随着坡度减小量的逐次递减, 优化处理过程将逐步收敛于理想状态。

4 结束语

在青岛市进行的新一轮城市总体规划修编工作中, 本模型作为辅助规划与设计模型得到了较好应用。主要体现在: 第一, 极大地降低了人工计算强度, 且可靠性有保障; 第二, 能依据规划流程, 快速生成各种方案, 便于进行方案比选; 第三, 提供了各种指标录入、检索、统计、综合及调整的手段; 第四, 提供了各种结果的输出形式, 如管网平面图、注记图、纵剖面图等。

参 考 文 献

- 1 北京市市政设计研究院. 简明排水设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- 2 重庆建筑工程学院. 排水工程 (上册, 第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.

GIS-Supported Study of Optimizing Design Models on Urban Rain Pipe Systems

Meng Lingkui Bian Fuling Chen Xiaoning

(School of Information Engineering, W TU SM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract Our attention was paid in this paper to employ geographic information system (GIS) technique for solving the design issues on urban rain pipe systems and some models related were presented and established. Specifically, two computational models i. e. the water optimizing calculation model and indices re-optimization model which affect directly the project investment of urban rain pipe systems were analyzed in detail.

Key words GIS; rain pipe systems; optimizing design; model; water optimizing calculation; indices re-optimization