

雨水管网优化设计*

陆少鸣 杨 立

(郑州工学院) (机电部六院)

摘 要: 本文针对雨水设计流量随管径决策变化的特点, 提出了相应的规划方法。在论证该规划方法的基础上, 扼要介绍其主要规划程序。

关键词: 管道序列, 决策, 设计

中图分类号: TU992

雨水与污水设计流量的确定方式有根本差别: 污水流量与管径的选择无关, 能在管径决策前确定各管段设计流量; 雨水流量与其流经上游管线的时间有关, 进行管径决策时, 不仅其降深影响下游管线的埋深, 对应的流行时间变化也导致下游管线的流量和降深发生变化。因此, 雨水管网的规划方法有别于污水管网。

1 雨水管网的规划方法

将管线节点从上游至下游依次编号为 $1 \sim n+1$, 管段编号依次为 $1 \sim n$ 。将市场可以供应的管径规格 d 从大到小依次用 $d_1 \sim d_{m_i}$ 表示, $d_{m_i} \geq D_{min}$ 。

1.1 求各管段初始最大可行管径

首先以地面集水时间 t_1 求 Q_1 , 按 $\frac{4Q_1}{\pi d_{i-1}^2} < V_{min}$ 且 $\frac{4Q_1}{\pi d_i^2} = V_1 \geq V_{min}$, 取 $D_{1,1}$

$= D_i$ 。则 $t_2 = t_1 + m \frac{L_1}{V_1}$ (m 为折减系数, L_1 为第 1 段管长)。再以 t_2 求 Q_2 , 继而确定 $D_{1,2}$ 和 t_3 。依此类推, 分别求出 $D_{1,1}, D_{1,2}, \dots, D_{1,n}$ 。

1.2 以 $PL'_n = (D_{1,1}, D_{1,2}, \dots, D_{1,n})$ 构成管线作为初始输入状态。

1.3 建立费用目标函数

$$W(PL) = C_1 \sum_{i=1}^n WL_i + C_2 WP + WE$$

式中: C_1 、 C_2 为费用系数; WL_i 为第 i 管段造价; WP 为泵站造价 (WL_i 与 WP

* 收稿日期: 1993-12-28

同污水管网类似); WE 为泵站动力费, 与终点埋深(影响扬程)及年均降雨量有关(基本上与终点流量 Q_{n+1} 无关, 但 WP 与 Q_{n+1} 有关)。

1.4 建立递推函数, 自下游至上游按管段顺序逐阶段规划。

以 PL_j^m 表示第 j 阶段第 m 步规划的输入状态。

$$PL_j^m = (D_{1,1}, \dots, D_{1,j-1}, D_{m,j}, \dots, D_{v,k}, \dots, D_{\phi,n})$$

以 $PL_{j,i}^m$ 表示对输入状态 PL_j^m 作管径决策的若干结果, $j \leq i \leq n$ 。

$$PL_{j,i}^m = \begin{cases} (D_{1,1}, \dots, D_{1,j-1}, D_{m+1,j}, \dots, D_{r,k}, \dots, D_{\phi,n}) & i=j \\ (D_{1,1}, \dots, D_{1,j-1}, D_{m+1,j}, \dots, D_{r-1,k}, \dots, D_{\phi,n}) & j+1 \leq i \leq k \leq n \end{cases}$$

以 $PL_{j,i}^{m+1}$ 表示对应于 PL_j^m 的输出状态。

$PL_j^{m+1} \in (PL_j^m, PL_{j,i}^m |_{i=j \sim n})$, 按 $W(PL_j^{m+1}) = \min\{W(PL_j^m), W(PL_{j,i}^m) |_{i=j \sim n}\}$ 确定。当 $W(PL_j^{m+1}) = W(PL_{j,i}^m) |_{j \leq i \leq n}$ 时以 PL_j^{m+1} 作为第 j 阶段第 $m+1$ 步规划的输入状态, 继续在本阶段规划, 求 PL_j^{m+2} ; 当 $W(PL_j^m) = W(PL_{j,i}^m)$ 时, 取 $PL_{j-1}^m = PL_j^m$, 结束第 j 阶段的规划, 并以 PL_{j-1}^m 作为第 $j-1$ 阶段的输入状态, 开始第 $j-1$ 阶段第 1 步规划。依此类推, 管网的规划从初始输入状态 PL_n^1 开始, 经第 $n, n-1, \dots, 1$ 阶段的逐步规划后得到最终输出状态 PL_0^1 , PL_0^1 即为管网的最优管线。

由递推关系及决策方式可见, 在各个阶段, 仅对本段及其下游管线作管径决策, 上游管线维持不变。

2 雨水管网优化理论

可行管径集合 $\bar{D} = (\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_j, \dots, \bar{D}_n)$, $\bar{D}_j = (\dots, D_{1,j}, D_{2,j}, \dots, D_{m,j})^{-1}$ 。 $D_{1,j}$ 仅表示第 $1 \sim j-1$ 段管径序列为 $(D_{1,1}, D_{1,2}, \dots, D_{1,j-1})$ 状态下第 j 段的最大可行管径, 若该状态改变, 则 Q_j 也相应变化, 因此 $D_{1,j}$ 并非一定是 \bar{D}_j 的上界。但 $\bar{D}_j \in \bar{d} = (d_1, d_2, \dots, d_m)^{-1}$, 因而 \bar{D} 是有限集合。 $PL = (D_1 \in \bar{D}_1, D_2 \in \bar{D}_2, \dots, D_n \in \bar{D}_n)$, 故最优管径序列必然存在。

尽管雨水管网与污水管网的费用模式及几何特征类似, 从而两者的规划方式较为接近, 但两者的水力学特征差别较大 ($\frac{dQ_{\text{雨水}}}{dD} = 0$, 而 $\frac{dQ_{\text{污水}}}{dD} = 0$; $(\frac{h}{D})_{\text{雨水}} = 1$, 而 $(\frac{h}{D})_{\text{污水}} < 1$), 因此两者的收敛条件不同, 对雨水管网的规划需要相应的理论依据。

雨水管网的目标函数同样具有污水管网的规律: $\frac{\partial W}{\partial D} > 0$; $\frac{\partial^2 W}{\partial D^2} > 0$; $\frac{\partial W}{\partial H} > 0$;

$$\frac{\partial^2 W}{\partial H^2} > 0; \quad \frac{\partial^2 W}{\partial D \partial H} < 0.$$

根据水力学计算公式:

$$\begin{cases} Q_j = 4F_j A_1 (1 + C \lg P) / t_j^4 & (\text{地方参数 } \lambda < 1); \\ V_j = \frac{4}{\pi} Q_j / D_j^2; \quad t_{j+1} = t_j + mL_j / V_j; \\ I_j = n_0^2 V_j^2 (4 / D_j)^4 = (4^{10/3} n_0^2 / \pi^2) Q_j^2 / D_j^{16/3} \end{cases}$$

$$\text{可知 } \frac{\partial I_j}{\partial D_j} < 0; \quad \frac{\partial^2 I_j}{\partial D_j^2} > 0; \quad \frac{\partial^2 I_j}{\partial D_j \partial Q_j} < 0$$

因 Q 沿程增加, 则 $Q_j \leq Q_k$ ($j < k$)

将 PL_{ji}^m ($i = j+1, \dots, n$)与 PL_j^m 比较:

以 $\Delta D_l^{(i)}$ 、 $\Delta t_l^{(i)}$ 、 $\Delta Q_l^{(i)}$ 、 $\Delta I_l^{(i)}$ 以及 $\Delta H_l^{(i)}$ 分别表示 PL_{ji}^m 第 l 管段相对于 PL_j^m 的 D 、 t 、 Q 、 I 以及节点埋深 H 的增量。

当 $i = j$ 时, 有:

$$\Delta D_l^{(j)} = \begin{cases} 0 & (l \neq j) \\ D_{m+1,j} - D_{m,j} = -\Delta D < 0 & (l = j) \end{cases}$$

$$\Delta t_l^{(j)} \approx \Delta t_{j+1}^{(j)} = -2(t_{j+1} - t_j) \frac{\Delta D}{D_{m,j}} < 0 \quad (l = j+1 \sim n)$$

$$\Delta Q_l^{(j)} = -\lambda \frac{Q_l}{t_l} \Delta t_{j+1}^{(j)} > 0 \quad (l = j+1 \sim n)$$

$$\Delta I_l^{(j)} = \begin{cases} \frac{16}{3} I_j \frac{\Delta D}{D_{m,j}} > 0 & (l = j) \\ 4\lambda \left(\frac{t_{j+1} - t_j}{t_l} \right) I_l \frac{\Delta D}{D_{m,j}} > 0 & (j+1 \leq l \leq n) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_l^{(j)} &= \sum_{\phi=j}^{l-1} \Delta h_{\phi} = \left[1 + \frac{3}{4} \lambda \sum_{\phi=j+1}^{l-1} \left(\frac{t_{j+1} - t_j}{t_{\phi}} \right) \frac{I_{\phi} L_{\phi}}{I_j L_j} \right] \Delta I_j^{(j)} L_j \\ &= (1 + \rho_{j,l}) \Delta I_j^{(j)} \cdot L_j \quad (j+1 \leq l \leq n+1) \end{aligned}$$

当 $i = k \geq j+1$ 时, 有:

$$\Delta D_l^{(k)} = \begin{cases} 0 & (l \neq j \text{ 且 } l \neq k) \\ D_{m+1,j} - D_{m,j} = -\Delta D < 0 & (l = j) \\ D_{r-1,k} - D_{r,k} = \Delta D > 0 & (l = k) \end{cases}$$

$$\Delta I_l^{(k)} = \begin{cases} -2(t_{j+1} - t_j) \frac{\Delta D}{D_{m_j}} < 0 & (j+1 \leq l \leq k) \\ -2m \left(\frac{L_j Q_k D_{m_j}}{L_k Q_j D_{r-1,k}} - 1 \right) \frac{L_k \Delta D}{V_k D_{r-1,k}} & (k+1 \leq l \leq n) \end{cases}$$

$$\Delta Q_l^{(k)} = -\frac{Q_l}{I_l} \Delta I_l^{(k)} \quad (k+1 \leq l \leq n)$$

$$\Delta I_l^{(k)} = \begin{cases} \frac{16}{3} I_j \frac{\Delta D}{D_{m_j}} & (l=j) \\ 4\lambda \cdot I_l \cdot \left(\frac{t_{j+1} - t_j}{t_l} \right) \frac{\Delta D}{D_{m_j}} & (j+1 \leq l \leq k-1) \\ -\frac{16}{3} I_k \frac{\Delta D}{D_{r-1,k}} & (l=k) \\ -2\lambda I_l L_l \frac{\Delta I_{k+1}^{(k)}}{t_l} & (k+1 \leq l \leq n) \end{cases}$$

$$\Delta H_l^{(k)} = \begin{cases} (1 + \rho_{j,l}) \Delta I_j^{(k)} \cdot L_j & (j+1 \leq l \leq k) \\ (1 + \rho_{j,k}) \Delta I_j^{(k)} L_j + \Delta I_k^{(k)} L_k - \sum_{\phi=k+1}^{l-1} 2\lambda I_\phi L_\phi \frac{\Delta I_{k+1}^{(k)}}{t_\phi} & (k+1 \leq l \leq n+1) \end{cases}$$

$$(\rho_{j,k} = \sum_{\phi=j+1}^{k-1} \left(\frac{t_{j+1} - t_j}{t_\phi} \right) \frac{I_\phi L_\phi}{I_j \cdot L_j} > 0, \text{ 表示由 } \Delta I_{j+1}^{(k)} \text{ 对 } K \text{ 节点产生的埋深增量}$$

与 $\Delta H_{j+1}^{(k)}$ 之比)。

为了比较 $PL_{j,i}^m$ 和 PL_j^m , 首先分析 PL_j^m 的特点:

PL_j^m 是第 j 阶段第 m 步规划的最优线, 其上第 j 段管径为 D_{m_j} , 在 $H_{j+1}(PL_j^m)$ 和 $t_{j+1}(PL_j^m)$ 控制条件下, (PL_j^m) 的第 $j+1 \sim n$ 段管径序列为最佳状态, 任何变动只会增加 W 值。当以 $D_{m+1,j}$ 代替 D_{m_j} 时, 在新的第 $j+1$ 控制条件下, 若 $PL_j^{m+1} = PL_{j,i}^m |_{j \leq i \leq n}$ 成立, 则必有 $I_{m_j} \cdot L_j / D_{m_j} < I_\phi (PL_j^m) \cdot L_\phi / D_\phi (PL_j^m)$ ($\phi = j+1 \sim n$)。

证明如下:

$$\text{假定 } I_{m_j} L_j / D_{m_j} > I_\phi \cdot L_\phi / D_\phi \quad (I_\phi = I_\phi(PL_j^m), D_\phi = D_\phi(PL_j^m))$$

$$\text{则: } \left(\frac{Q_j}{Q_\phi} \right)^2 \left(\frac{D_\phi}{D_{m_j}} \right)^{\frac{19}{3}} \frac{L_j}{L_l} > 1$$

$$\text{因 } Q_j / Q_\phi \leq 1 \quad L_j / L_\phi \approx 1, \text{ 故 } D_{m_j} < D_\phi, (j < \phi)$$

根据 $\Delta H^{(j)}$ 、 $\Delta Q^{(j)}$ 计算公式可知: 由 D_{m_j} 减小一级产生的 ΔH 和 ΔQ 均比 D_ϕ 减小

一级的对应值大, 故用 D_{m+1j} 代替 D_{mj} 必定不如用 $D_\phi - \Delta D$ 代替 D_ϕ , 而 $D_\phi = D_\phi(PL_j^m)|_{\phi>j}$, 可见 D_{m+1j} 代替 D_{mj} 只会增加 W 值, 则: $PL_j^{m+1} = PL_j^m \neq PL_{j,i}^m$.

根据 PL_j^m 的上述特征, 可以推论:

$PL_j^m = PL_{j,i}^m|_{i \geq j}$ 成立的必要条件是:

$$\begin{cases} I_{mj}L_j / D_{mj} < I_i(PL_{j,i}^m) \cdot L_i / D_i(PL_{j,i}^m) & (j \geq j+1) \\ I_\phi(PL_{j,\phi}^m) \cdot L_\phi / D_\phi(PL_{j,\phi}^m) < I_i(PL_{j,i}^m) \cdot L_i / D_i(PL_{j,i}^m) & (j+1 \leq \phi < i) \end{cases}$$

依据上述关系及设计参数的取值范围可以进一步推论: 若 $PL_j^{m+1} = PL_{j,k}^{m+1}|_{k \geq j+1}$ 成立, 则:

$$\begin{aligned} \Delta H_{k+1}^{(k)} = & - \left(\frac{16}{3} \frac{I_{r-1,k} \cdot L_k}{D_{r-1,k}} \Delta D \right) \left[1 - \left(\frac{I_{mj} D_{r-1,k} \cdot L_j}{I_{r-1,k} D_{mj} L_k} \right) \right. \\ & \left. + \frac{3}{4} \lambda \sum_{\phi=j+1}^{k-1} \left(\frac{t_{j+1} - t_j}{t_\phi} \right) \frac{I_\phi(PL_{j,k}^m) D_{r-1,k} L_\phi}{I_{r-1,k} D_{mj} \cdot L_k} \right] \leq 0 \end{aligned}$$

$$\text{且 } \Delta t_{k+1}^{(k)} \geq 0; \Delta Q_{n+1}^{(k)} \leq 0; \Delta H_{n+1}^{(k)} \leq \Delta H_n^{(k)} \dots \leq \Delta H_{k+2}^{(k)} \leq \Delta H_{k+1}^{(k)} \leq 0$$

因为 $\Delta H_i^{(k)}|_{k+1 \leq i \leq n+1} < 0$, $PL_j^{m+1} = PL_{j,k}^m$ 上第 $k \sim n$ 段管径不可增大 (否则 W 值增大); 但理论上存在减少管径降低 W 值的可能性, 鉴于 $|\Delta H_i^{(k)}|_{(k+1) \leq i \leq n+1}$ 很小, 且随着递推过程的继续, 埋深呈增大趋势, 故可忽略 $\Delta H_i^{(k)}|_{k+1 \leq i \leq n+1} < 0$ 的影响。

因此, $PL_j^{m+1} \in (PL_j^m, PL_{j,i}^m|_{i=j \sim n})$ 具有 PL_j^m 的一切特征, 且当 $PL_{j-1}^1 = PL_j^{m+1} = PL_j^m$ 时, PL_{j-1}^1 必定是第 j 阶段的最优管线, PL_0^1 必定是管网的整体最优管线。

在雨水管网各规划阶段, 管径决策在本段产生降落增量 $\Delta h_j = \Delta I_j L_j$ 和时间增量 Δt , Δt 继而而在下游段产生降落增量 $\Delta h_k = \rho_{j,k} \Delta h_j$ 和流量增量 ΔQ_k 。因为 Δh_j 、 $\rho_{j,k} \Delta h_j$ ($\rho_{j,k} > 0$) 及 ΔQ_k 同号, 说明 Δh_j 与 Δt 对下游段的影响具有一致性, 所以, 可将雨水管网的管径、埋深及流量关系归结为管径序列规划问题, 并采取从下游至上游递推的规划顺序体现管径决策的影响范围。可行管径法正因为充分利用了雨水管网的特点和规律, 不仅简化了参数间的影响关系, 加快了收敛速度, 也提高了优化精度。

3 多管线交汇管网的规划程序

在实际工程中, 排水管网一般由支线、干线和主干线构成, 单管线仅是排水管网的特例。可行管径法借助单管线之间的串联与交汇, 解决了多管线交汇管网的规划问题。

多管线交汇管网的规划程序以图 1 为例介绍如下:

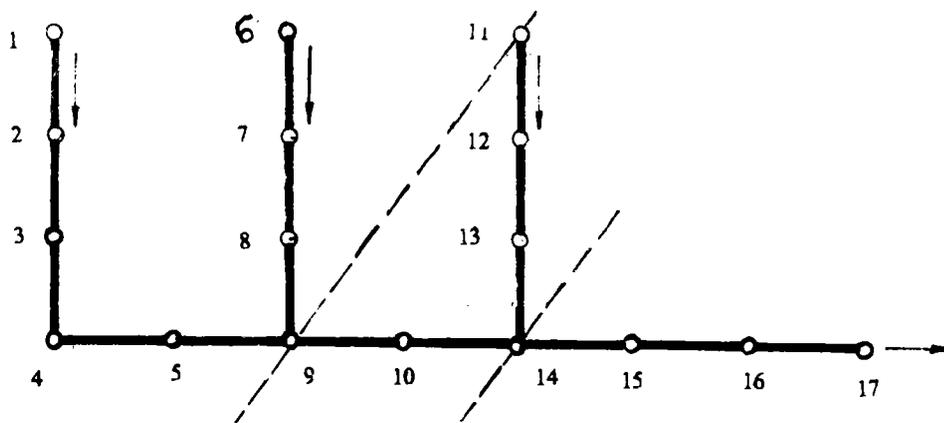


图1

3.1 管网节点编号

管网按顺序编号: 将内部不含交汇节点的一段管线视为单管线。这样, 由不同起点或交汇节点到终点, 水流沿程的单管线数不同。单管线数越多, 则该起点或交汇节点所对应的单管线编号越优先, 具体方法参照图1。

有序编号的目的是便于形成单管线或进行单管线的组合与串联。

3.2 建立初始管网

输入各节点原始数据, 按传统的设计步骤选择最大可行管径, 计算相应的埋深和流量等设计数据, 计算的管段顺序为1~n。由于出现了交汇节点(如图1的节点9和节点14), 必须引入交汇节点关系矩阵, 如该节点汇入管段数、汇入管段号及埋深与流行时间控制关系等。

3.3 确定主干线、干线及支线

确定主干线、干线及支线的目的是为了建立规划的优先等级。可行管径法按如下规则确定:

若管网某一起点对终点埋深起控制作用, 则由该起点至终点的管线定义为主干线。

在其它起点中, 若某些起点对汇入主干线交汇节点的任一管段的埋深起控制作用, 则由这些起点至主干线交汇节点的管线均定义为干线。

剩余的管网起点至各干线上交汇点节点的各管线均定义为支线。

在图1中, 若交汇节点9和14的控制埋深由管段5和10分别确定, 则管线(1~5, 9~10, 14~17)为主干线, 而管线(6~9)和(11~14)均为干线。图1中未表示支线。

3.4 单管线串联规划

以初始管网为输入状态, 首先对主干线进行规划。即在图1中, 对 $PL'_n = (D_{1,1} \sim D_{1,5}, D_{1,9} \sim D_{1,10}, D_{1,14} \sim D_{1,16})$ 进行规划, 输出线 PL'_0 上交汇点9和14的埋深增大, 为下一步干线优化放宽了约束; 再按从下游至上游的顺序逐一规划各干线及其上

支线。规划方法如下:

以干线的起点至管网终点形成单管线, 在图 1 中以

$PL'_{13} = (D_{1,11} \sim D_{1,13}, D_{1,14} \sim D_{\phi,16})$ 作为输入状态直接从第 13 阶段进行规划, 因为第 14~16 管段已在主干线上得到规划, 仅当干线规划对管 14 节点有影响时, 才涉及对 14~16 管段的决策。若该干线上有支线时, 继续以同样方式对这些支线进行规划。直至该干线及其上支线规划完毕。再对第 9 交汇节点上的干线进行规划, 其输入状态为

$PL'_8 = (D_{1,6} \sim D_{1,8}, D_{r,9} \sim D_{\lambda,10}, D_{r,14} \sim D_{\phi,16})$ 。

一般情况下, 主干线上交汇节点汇入端的管径和埋深明显大于干线相应的汇入管段的管径和埋深, 故主干线的规划不受干线规划的影响。同理, 干线规划也不受支线的影响。因此, 对绝大多数管, 单管线串联规划的输出状态即是最优管网。某些特殊管网, 经单管线串联优化后, 在其主干线中、下游交汇节点的汇入端, 主干线与干线的管径与埋深均较接近, 仅采用单管线串联规划, 理论上不能保证输出最优状态, 尚需将主干线与干线同步规划 (即单管线交汇规划)。交汇规划以串联规划的输出作为输入状态, 并令主干线 $W = \infty$, 从交汇节点汇入端依次作主干线和干线规划, 通过比较实际 W 值, 确定输出状态。交汇规划的基本原理与单管线规划是一致的, 仅对决策范围作了扩展。

排水管网的规划还面临中途泵站决策问题。应根据地理条件首先确定可能的泵站节点, 再作优化筛选。若管线上某节点设置泵站, 则该节点上游管线的埋深不再对下游产生影响, 故泵站优化问题同样转化为单管线串联问题。

排水管道系统的可行管径优化设计方法正是通过形成初始管网、假设泵站节点 (一条单管线上泵站节点一般不超过 3 个, 视管网规划而定), 单管线串联及交汇等步骤来实现其规划目标, 其核心是单管线优化程序。

参 考 文 献

- 1 J.M.Gupta. Optimal Design of Wastewater Collection Systems. ASCE EEs, 1976 P1029-1041
- 2 杨钦, 陈霜庆, 俞国平. 排水沟道最优化设计. 同济大学情报站, 1983.7.
- 3 高廷耀主编. 水污染控制工程. 高等教育出版社, 1989.2.

Optimal Design of Stom Sewer Networks

Lu Shao Ming

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: Stom design flow varies with the process of pipe decision. Because of this, a relative programming method is put forward in this article. It's main procedure will be briefly introduced, based on the discussion and proof of the method.

Keywords: pipe rands, decision, design