

喷灌系统的自适应模拟方法

李 鸣

(广西农垦设计院)

提 要

本文根据喷灌系统的特点,建立树状喷灌管网的数学模型,并运用现代控制论的数学方法构造喷灌标准参考自适应模拟系统。把系统是否是可观测的和可控制的问题归结为状态变量的确定是否可逆和非线性代数方程(17)是否有解的问题,并且根据卡尔曼(Kalman)递推滤波公式按模拟求解喷灌管网问题的需要,提出实用的滤波公式(23)、(28)及单步滤波方法,解决了用容量较少的微型计算机进行树状喷灌管网的水力模拟问题,提高了喷灌系统水力分析的精度。

一、引 言

喷灌系统的水力计算多数是用喷头设计流量作为计算管道流量的依据,对于地形起伏较大的喷灌工程,这种计算方法已无法反映喷灌系统的实际情况。况且,喷灌管道系统在与水泵联工作以后,喷头和管道的流量及压力均受水泵工况的制约,难以期待喷灌系统的工作条件与设计假定的情况一致,从而失去了对喷灌系统在运行状态时的能量消耗、喷灌强度、喷灌均匀度等经济技术指标进行全面地、客观地分析及其最优化的可能,使合理地布置管道系统、选择经济管径、编排轮灌计划等规划设计工作做得更科学的可能性受到影响。本文介绍的模拟方法将弥补上述缺陷,使喷灌系统的水力分析精度得到提高。

二、喷灌模拟系统

1. 管道系统的数学模型

(1) 喷头模型

在图1所示的喷灌系统中,第*i*条支管第*j*节点(以下简称节点*ij*)上的喷头流量可采用下式表示:

$$q_{ij} = aH_{ij}^b \quad (1)$$

式中 *a*——喷头流量综合系数,近似地取定值;

b——喷头工作压力水头指数;

H_{ij}——喷头工作压力水头(m)。

一般 $a = \mu f \sqrt{2g}$, $b = \frac{1}{2}^{(1)}$ 。亦可用数

理统计的方法求得*a*、*b*的值。

(2) 支管模型

第*i*条支管第*j*节点前的管段(以下简称管段*ij*)的水头损失⁽²⁾

$$\Delta h_{ij} = f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} Q_{ij}^m + \frac{\xi_{ij}}{2gA_{ij}^2 \times 3600^2} Q_{ij}^2 \quad (2)$$

式中 *f_{ij}*、*l_{ij}*、*d_{ij}*、*A_{ij}*、*Q_{ij}*分别为管段*ij*的摩阻系数、长度(m)、内径(mm)、过水断面面积(m²)、流量(m³/h), *g*是重力加速度常数(m/s²), *m*、*b*是与摩阻

有关的流量指数、管径指数, ξ_{ij} 是局部阻力系数, 这里包括管段*i**j*首端及管段中间所有局部阻力损失系数之积。

如在模拟运算过程中 f_{ij} 、 l_{ij} 、 d_{ij} 、 A_{ij} 均为常数, 上式写成:

$$\Delta h_{ij} = B_{ij} Q_{ij}^m + C_{ij} Q_{ij}^2 \quad (3)$$

$$\text{其中 } B_{ij} = f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}^5}$$

$$C_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{2g \times 3600^2 A_{ij}^2} \quad \text{均为常数。}$$

对于第*i*条支管末段管段有喷头流量为:

$$q_{i,mi} = a(s_i - \gamma_i m_i)^b = q_{i,mi}(s_i) \quad (4)$$

式中 s_i ——支管*i*末端水头 (m), 其断面在末端竖管三通的上游断面。

$$\gamma_{i,mi} = e_{i,mi} + \frac{v_{i,mi}^2}{2g} + h_{f,i,mi} \quad (5)$$

式中 $e_{i,mi}$ ——喷头位置水头 (m);

$$\frac{v_{i,mi}^2}{2g} \text{——竖管流速水头 (m);}$$

$h_{f,i,mi}$ ——竖管水头损失值 (m)。

末端磨损为:

$$\begin{aligned} \Delta h_{i,mi} &= B_{i,mi} q_{i,mi} + C_{i,mi} q_{i,mi}^2 \\ &= B_{i,mi} [a(s_i - \gamma_{i,mi})^b]^m + \\ &\quad C_{i,mi} [a(s_i - \gamma_{i,mi})^b]^2 \\ &= \Delta h_{i,mi}(s_i) \end{aligned} \quad (6)$$

注意这里 s_i 为总水头, 它应包含有末端三通的上游断面的位置水头、压力水头及速度水头。则第*i**m**i*-1节点上游端水头:

$$\begin{aligned} h_{i,mi-1} &= s_i + \Delta h_{i,mi}(s_i) \\ &= h_{i,mi-1}(s_i) \end{aligned} \quad (7)$$

节点*i**m**i*-1竖管上的喷头:

$$\begin{aligned} q_{i,mi-1} &= a(b_{i,mi-1} l(s_i) - \gamma_{i,mi-1} l)^b \\ &= q_{i,mi-1}(s_i) \end{aligned} \quad (8)$$

以此类推……

最后, 对管段*i*₁有

$$\begin{aligned} h_{i,0} &= h_{i,1}(s_i) + \Delta h_{i,1}(s_i) \\ &= h_{i,0}(s_i) \end{aligned} \quad (9)$$

上式即为支管首端节点水头, 而支管*i*首端管段流量

$$Q_{i,1} = \sum_{k=1}^{mi} q_{ik}(s_i) = Q_{i,1}(s_i) \quad (10)$$

(3) 干管模型

管段取下游节点的编号为该管段的编号, 如第*i*-1节点至*i*节点的干管管段称为管段*i* (见图1)。

喷灌系统干管管段*i*的流量 Q_i :

$$Q_i = \sum_{k=i}^n Q_k l(s_k) = Q_i(s_i, s_{i+1}, \dots, s_n) \quad (11)$$

特别地, 总流量 Q 有

$$Q = \sum_{k=1}^n Q_k l(s_k) = Q(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (12)$$

由 S_i 起算得到的管道系统总水头 H_i :

$$\begin{aligned} H_i &= \sum_{k=1}^i \Delta h_k(Q_k) + h_{i,0}(s_i) \\ &= \sum_{k=1}^i \Delta h_k(s_k, s_{k+1}, \dots, s_n) + \\ &\quad s_{i,0}(s_i) \\ &= H_i(s_1, s_2, \dots, s_n) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $Q_{k,1}$ ——第*k*条支管首端流量 (m³/h)

Q_k ——第*k*条干管的流量 (m³/h)

Δh_k ——第*k*条干管的水头损失 (m)。

H_i ——第*i*条支管 s_i 要求干管相应的管道系统总水头 (m)。

2. 水泵模型

对于离心泵可用下式给出水泵的数学模型

$$H_0 = A Q^2 + B Q + C$$

式中 A 、 B 、 C 均为水泵性能曲线的统计常数, H_0 为水泵扬程 (m)。

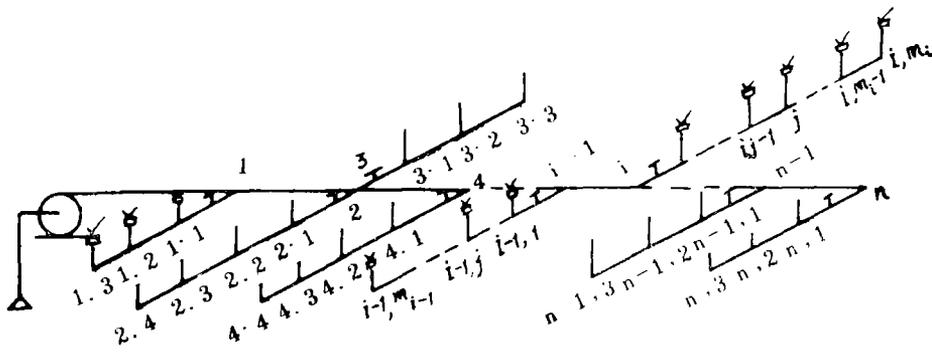


图 1

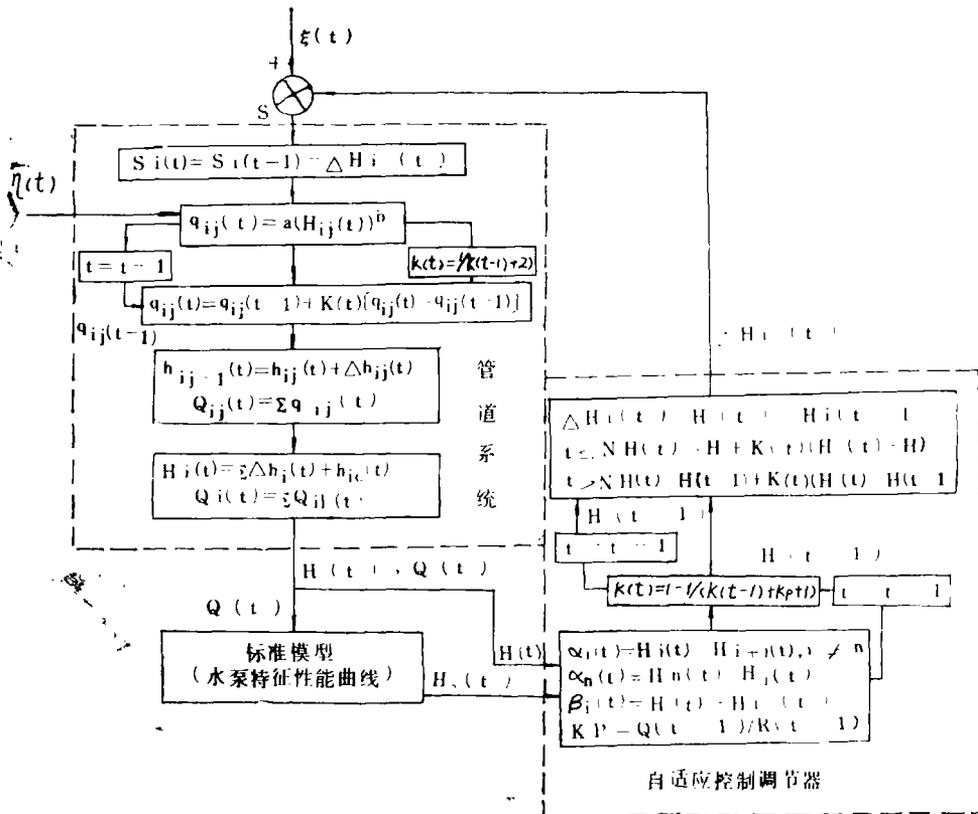


图 2

也可用拉格朗日的一元三点插值公式给出水泵的数值模型, 总之对水泵扬程 H_0 有:

$$H_0 = H_0(Q) = H_0(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (14)$$

3. 标准参考自适应模拟系统

为寻找多维向量 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 使得 $H_0 = H_1 = H_2 = \dots = H_n$ 或者

$$q_i(s) = H_i(s) - H_0(s) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

此时, 由数学模型组成的喷灌系统的各参数

值与实际喷灌系统相应参数接近或者说在工程意义上相等,当然接近的程度与数学模型代表的物理原型的精度有关。根据现代控制理论的理论及喷灌系统的特点构造结构关系如图2所示的标准参考自适应模拟系统。

显然由式(13)及式(14)可知该系统的输入量是向量 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, s 的有效维数由轮灌组内的支管总数确定, s_i 的初值 $s_i(0)$ 自然应选取支管 i 末端竖管上的喷头具有设计流量时要求的支管末端水头。事实上 s_i 的初值选取在其有物理意义的范围内是任意的,前面介绍的取法只是为了方便,并无特殊的含意。由于 s 在维数和数值上的任意性决定了 s 与其真值之间的偏差是随机的,即 s 的噪声干扰是随机的,只有在稳定状态时偏差才为零。

系统的状态量是喷头的流量 q_{ij} , 任意选定的初值 $q_{ij}(0) > 0$ 以及模拟运算尚未到达稳定前的状态值 $q_{ij}(t)$ 与平衡状态时的喷头流量 $q_{ij}(t)$ 真值的偏差表明存在某种随机噪声干扰,后面将介绍用状态滤波估计方法对存在干扰的 $q_{ij}(t)$ 作出预测。通常选取的 $q_{ij}(0)$ 等于设计喷头流量,但并非必须如此。

被控系统的输出量为管道系统的总水头

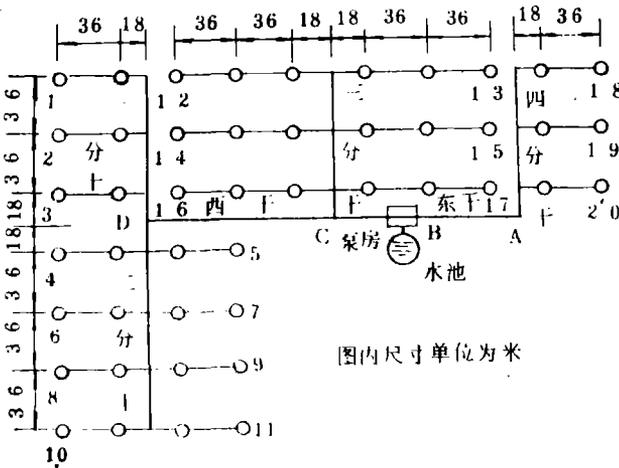


图 3

$H(t)$, 模拟计算过程中公式(13)给出的 H_i 不可能同时得出,因此 H_i 可视为两次迭代间的几个不同时刻总水头 H 的状态量,而在平衡状态时管道系统总水头 H 只存在一个唯一的值。

若将管道系统与水泵组成的系统称为喷灌系统,那么水泵按式(14)得到的结果 $H_0(t)$ 就是管道系统 H 在 t 时刻的比较标准,或者称为 $H(t)$ 的观测量。当 $H_0(t) = H(t)$ 时认为水泵与管道系统工作满足能量平衡方程,或称水泵与管道系统在管道系统的首端节点满足克契霍夫第二定律,而流量平衡关系是自动满足的。

三、系统模型的可控制性及稳定性问题

因系统内状态量 q_{ij} 均可由系统总水头、总流量及已知的输入向量 s 唯一确定,故系统是一个完全能观测的系统。这里主要讨论系统的可控制性及稳定性问题。

为讨论满足方程(15)的解存在及唯一性问题,定义下列函数:

$$f_i(s) = H_i(s) - H_{i+1}(s), \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (16)$$

则下列方程

$$\begin{cases} f_1(s) = 0 \\ f_2(s) = 0 \\ \vdots \\ f_{n-1}(s) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

是式(15)成立的必要条件。

根据式(13)对式(16)进行整理如下:

$$\begin{aligned} f_i(s) &= \sum_{k=1}^i \Delta h_k(Q_k) + h_{i0}(s_i) - \sum_{k=1}^{i+1} \Delta h_k(Q_k) - h_{i+10}(s_{i+1}) \\ &= -\Delta h_{i+1}(Q_{i+1}) + h_{i0}(s_i) - h_{i+10}(s_{i+1}) \end{aligned}$$

$$= -\Delta h_{i+1}(s_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_n) + h_{i0}(s_i) - h_{i+10}(s_{i+1}) \quad (18)$$

由上式知

$$\frac{\partial f_i}{\partial s_i} = \frac{\partial h_{i0}(s_i)}{\partial s_i} = \frac{dh_{i0}}{ds_i} \quad (a)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

对于 $\partial f_i / \partial s_j$ ($i \neq j$) 有

$$(1) \text{ 当 } j < i \text{ 时, } \partial f_i / \partial s_j = 0 \quad (b)$$

(2) 当 $j = i+1$ 时,

$$\frac{\partial f_i}{\partial s_j} = -\frac{\partial \Delta h_{i+1}}{\partial s_{i+1}} = -\frac{dh_{i+10}}{ds_{i+1}} \quad (c)$$

(3) 当 $i+1 < j \leq n$ 时,

$$\frac{\partial f_i}{\partial s_j} = -\frac{\partial \Delta h_{i+1}}{\partial s_j} \quad (d)$$

喷灌系统的数学模型中 s_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的取值是有限的, 即 n 维输入控制量 s 包含在 n 维正实数有限域 D_0 内

$$D_0 = \{X \mid X_i \in (s_{\min i}, s_{\max i})\}$$

$s_{\min i}$ 至少应使支管所有的喷头流量 $q_{ij} \geq 0$, $s_{\max i}$ 不可能使支管末端压力水头大于水泵的最大扬程。

在可行域 D_0 内考察偏导数 $\frac{\partial \Delta h_i}{\partial s_j}$ 及导数

$$\frac{dh_{i0}}{ds_i}。先分析 \frac{dh_{i0}}{ds_i} 的符号。从支管的数学模$$

型的构成可知函数 $h_{i0}(s_i)$ 虽然是关于 s_i 的有限项连续函数, 但函数的组合比较复杂。逐项求导的结果不仅推求困难也不便于列出, 考察到支管内喷头及管段的数学模型的单调递增的性质。

对 $s_i' < s_i''$, 下列不等式成立

$$h_{i0}(s_i') < h_{i0}(s_i'')$$

因此, dh_{i0}/ds_i

对于偏导数 $\partial \Delta h_i / \partial s_j$ 有

$$\frac{\partial \Delta h_i}{\partial s_i} = \frac{\partial \Delta h_i}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial Q_{j1}} \cdot \frac{dQ_{j1}}{ds_j} \quad (e)$$

$$\text{显然 } \frac{\partial \Delta h_i}{\partial Q_i} = mB_j Q_i^{m-1} + 2C_j Q_i > 0;$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial Q_{j1}} = \begin{cases} 1 & \text{当 } i = j \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } i \neq j \text{ 时} \end{cases}$$

$$\frac{dQ_{j1}}{ds_j} = \sum_{k=1}^{m_j} \frac{dq_{jk}}{ds_j} \quad \text{而}$$

$$\frac{dq_{jk}}{ds_j} = ab(h_{jk} - \gamma_{jk})^{b-1} \cdot \frac{dh_{jk}}{ds_j} \quad (f)$$

因 h_{jk} 是 s_j 的单调增函数 $dh_{jk}/ds_j > 0$, 且

$$h_{jk} > \gamma_{jk} \quad \text{故 } dq_{jk}/ds_j > 0, \text{ 可知式 (e)}$$

$\partial \Delta h_i / \partial s_j \geq 0$. 等号在 Δh_i 与 s_j 无关时成立。

据 $dh_{i0}/ds_i > 0$, $\partial \Delta h_i / \partial s_j \geq 0$ 综合

(a)、(b)、(c)、(d) 四式得

$$\frac{\partial f_i}{\partial s_i} < 0, \quad \frac{\partial f_i}{\partial s_j} \leq 0 \quad (i \neq j)$$

这说明 $f_i(s)$ 在 D_0 域内不仅是连续函数, 而且沿 s 方向的变化是严格保序的, 沿 s_i 方向 $f_i(s)$ ($i \neq j$) 是反序的。

对于方程 (17) 根据式 (18) 易知若取 $s = X^0$ 使其分量 s_i 的值很小, 且 $s_j \gg s$ ($i \neq j$) 使得

$$f_i(X^0) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (19)$$

另一方面又取 $s = y^0$ 使其分量 $s_i \gg s_j$ ($i \neq j$) 使得

$$f_i(y^0) > 0 \quad (20)$$

式 (19) 及 (20) 根据喷灌管道模型的构成理论及实际喷灌系统试验情况是可以做到的。

引用文献 [3] 定理 13.5.2 (P. 496) 可知方程 (17) 满足定理条件, 方程应存在解 x^* 、 y^* 及 Jacobi 迭代序列 $\{x^k\}$ 和 $\{y^k\}$ 。

水泵在平衡状态下有且仅有一个工况点, 按能量守恒及流量守恒原理, 各管段节点在平衡状态下有且仅有一个确定的水头值, 根据管段首末端点的水头差应等于管段水头损失的平衡条件, 易知管段的流量也是确定的, 从而喷头工作压力及流量是唯一确定的, 序 $x^k \nearrow x^*$ 或者 $y^k \searrow y^*$ 后应趋最向于一

致，即： $x^* - y^*$ 。这表明方程(15)有解则只可能有唯一的解。

方程(17)的解及Jacobi迭代序列的存在表明管道系统在 D_0 域内是完全可控制的，水泵工况点的唯一性，管段数学模型的唯一性均说明喷灌系统是稳定的。

四、卡尔曼递推滤波公式

常规的管网迭代计算法用的校正量是管段流量或者水头闭合差的确定性函数，从现

代控制论观点来看，任何一个物理系统总包含有确定性关系和随机性关系两部分，存在实际模型与理论模型的差别，计算工具的电器噪声等。基于这些原因参照模型参考自适应的方法设置喷灌标准参考自适应控制调节器显得十分必要。

图2所示的喷灌模拟系统其自适应控制调节器主要由卡尔曼(Kalman)滤波器组成。为便于讨论将函数 $H(s(t))$ 简记作 $H(t)$ ，其它状态变量亦作同样的表示。

1. 公式的引入

为合理地估计状态量 $H(t)$ 的变化，采用以下一维变量的状态方程及观测方程。

$$H(t+1) = H(t) + U(t) \quad (21)$$

$$H_o(t) = H(t) + V(t) \quad (22)$$

式中 $H(t)$ ——喷灌系统在第 t 次迭代模拟运算时的总水头状态量(m)；
 $U(t)$ ——总水头的动态噪声(m)，它反映 $H(t)$ 与 $H(t+1)$ 的随动差异；

$H_o(t)$ ——总水头在第 t 次迭代模拟运算时得到的观测量(m)，它是 $H(t)$ 的比较标准；

$V(t)$ ——总水头的过程输出 $H(t)$ 与其观测量 $H_o(t)$ 动态误差，相当于观测噪声(m)。

由于对 $U(t)$ 、 $V(t)$ 的统计特性无任何事前知识，这里只能使用自适应滤波和限定记忆滤波两种方法在不断观测的基础上对 $U(t)$ 和 $V(t)$ 的统计特征进行采样分析，对参数 $H(t)$ 进行预测估计。为此先假定方程(21)、(22)在满足卡尔曼滤波公式的假定条件下，则有相应的卡尔曼递推滤波公式如下(参见文献[6]、[2]、[9])。

$$H^*(t+1) = H^*(t) + \tau(t+1)[H_o(t+1) - H^*(t)] \quad (23)$$

$$\tau(t+1) = P(t+1/t)[P(t+1/t) + R(t+1)]^{-1} \quad (24)$$

$$P(t+1/t) = P(t) + G(t) \quad (25)$$

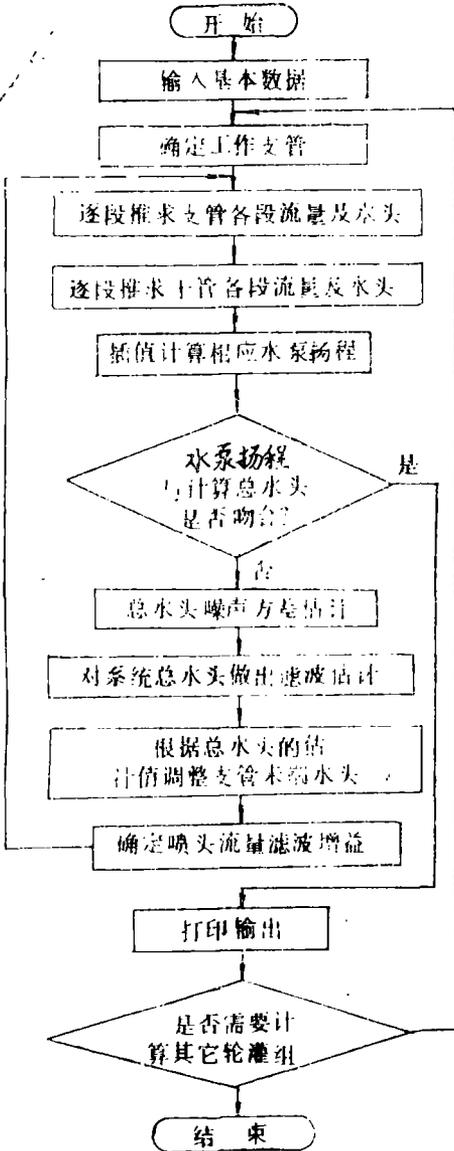


图 4

$$P(t) = [1 - \tau(t)]P[t/(t-1)] \quad (26)$$

这里, $t = 0, 1, 2, \dots$

式中 $H^*(t)$ ——第 t 次模拟运算时 $H(t)$ 的估计值;

$\tau(t)$ ——第 t 次模拟运算时卡尔曼滤波的增益系数;

$P[(t+1)/t]$ ——第 t 次模拟运算时对 $H(t+1)$ 进行预报的协方差;

$P(t)$ ——滤波误差 $H(t) - H^*(t)$ 的协方差;

$G(t)$ ——动态噪声 $U(t)$ 的方差;

$R(t)$ ——观测噪声 $V(t)$ 的方差。

其中已知, $H^*(0) = \bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i(0)$,

$$P(0) = P$$

为便于运用, 整理成

$$\tau(t-1) = [\tau(t)R(t) + G(t)] \cdot [\tau(t)R(t) + G(t) + R(t+1)]^{-1} \quad (27)$$

式 (27) 表明只需确定出 $\tau(0)$, $G(t)$, $R(t)$ 及 $R(t+1)$, 就可推算出滤波增益 $\tau(t+1)$ 的值。

2. 关于 $\tau(0)$, $G(t)$ 及 $R(t)$ 的确定

关于 $\tau(0)$ 的取值文献 [6] 定理 2 (P. 118) 指出: 对于一致完全可控制和一致完全可观测的线性系统, 当递推时间充分长后, 它的滤波增益将不依赖于初始方差 $P(0)$ 的选取。而 $\tau(0)$ 与 $P(0)$ 有关, 因此在没有任何事前知识的情况下自然取 $\tau(0) = 1$ 较为方便。

至于噪声 $U(t)$ 、 $V(t)$ 的方差 $G(t)$ 、 $R(t)$ 这里用采样方法对 $G(t)$ 和 $R(t)$ 进行估计。从控制论的角度来看, $H_i(t)$ 是状态参数 H 在第 t 次迭代到第 $t+1$ 次迭代开始的过程中, 或者说是在时段 $(t, t+1)$ 中的 n 次采样值, 按平稳过程各态历经性

(文献 [2], P. 96) 由 $H(t)$ 得到的统计特征值可代表喷灌系统总水头 $H(t)$ 的统计特征。从水泵性能曲线插值得到的 $H_i(t)$ 作为 $H(t)$ 的观测值, 取第 t 次迭代后获得的信息。

$$\alpha_i(t) = H_i(t) - H_{i+1}(t)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$\alpha_n(t) = H_n(t) - H_1(t)$$

$$\beta_i(t) = H_o(t) - H_i(t)$$

$$t = 1, 2, \dots, n$$

以 $\alpha_i(t)$ 及 $\beta_i(t)$ 作为 $U(t)$ 、 $V(t)$ 的样本经统计分析则得 $G(t)$ 、 $R(t)$ 的估计值 $G^*(t)$ 、 $R^*(t)$, 文献 [6] (P. 184) 指出: 只要使滤波的初始时段 $G(t)$ 及 $R(t)$ 的估计值 $G^*(t)$ 及 $R^*(t)$ 满足 $G^*(t)/R^*(t) \geq G(t)/R(t)$

就可以保证滤波不会发散。

3. 实际采用的滤波公式

在 $G(t)$ 及 $R(t)$ 变化较小的情形, 令

$$G(t) \doteq G^*(t) \quad \text{及}$$

$$R(t) \doteq R^*(t) \doteq R(t+1) \quad \text{代入式 (27)}$$

则有:

$$\begin{aligned} \tau(t+1) &= [\tau(t)R^*(t) + G^*(t)] \cdot \\ & \quad [\tau(t)R^*(t) + G^*(t) + R^*(t)]^{-1} \cdot \\ & \quad [1 - \tau(t) - \tau_p]^{-1} \\ &= 1 - [\tau(t) + \tau_p + 1]^{-1} \quad (28) \end{aligned}$$

其中 $\tau_p = G^*(t)/R^*(t)$

公式 (23) 及公式 (28) 加上初始条件

$$H^*(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i(0), \quad \tau(0) = 1$$

组成了总水头 H 的 $t+1$ 时刻的状态量 $H(t+1)$ 估计值 $H^*(t+1)$ 的卡尔曼滤波递推估计公式。

用类似的方法可以得到喷头流量在 $t+1$ 时刻的状态估计值。

$$q_{ij}^*(t+1) = q_{ij}^*(t) + \tau(t+1) \cdot$$

$$[q_{ij}(t+1) - q_{ij}^*(t)] \quad (29)$$

其中观测值 $q_{ij}(t+1) = a[h_{ij}(t) - \gamma_{ij}]^b$ 上式中 γ_{ij} 是用 $q^*_{ij}(t)$ 代入计算而得到的。

由于喷头流量的状态量与其模型给出的观测量比较接近，其干扰的统计特征趋向于一致，不妨假定其方差比 $\tau_p = 1$ ，则

$$\tau(t+1) = 1 - [\tau(t) + 2]^{-1} \quad (30)$$

考虑到最初开始的模拟运算过程中， $H(t+1)$ 与 $H(t)$ 、 $H_0(t)$ 与 $H(t)$ 之间的偏差较大，干扰 $U(t)$ 、 $V(t)$ 不满足线性的及零均值自噪声的基本假定，这时可以采用单步滤波方法，即使用以下公式：

$$H(t) = \bar{H} + \tau(t)[H_0(t) - \bar{H}] \quad (31)$$

$$\tau(t) = 1 - [\tau(t-1) + \tau_p + 1]^{-1} \quad (32)$$

式中， $\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i(t-1)$

单步滤波方法可以扔掉先前估计对当前估计的影响，在 $U(t)$ 、 $V(t)$ 偏离假定条件较大时，这种做法是合理的。

模拟运算的实践表明若 $t=N$ 时有：

$|H_0(N) - H_i(N)| \leq e$ ，对 $i=1, 2, \dots, n$ ，成立。

则可由 $N+1$ 次自适应迭代运算开始使用式 (23)、式 (28)， e 的值与计算允许误差及系统的近似线性程度有关，一般在工程上取 $e=0.6m$ 比较恰当。

值得指出的是：当 $H(t)$ 的样本 $H_i(t)$

的干扰增大时，方差 $G^*(t)$ 必然增大，从而使 τ_p 增加，由式 (28) 知最后将导致 $\tau(t+1)$ 增大，从式 (23) 知 $H^*(t+1)$ 采用含有较多干扰的 $H^*(t)$ 比例就相应减少，反之则相反，可见卡尔曼滤波公式的引入是合理的。

五、计算实例及模拟系统的工作性能

图 3 是根据设计实例简化的固定式喷灌工程管道平面布置图。该工程喷头采用喷嘴 $d=14mm$ 的 PY_1-40 喷头，竖管采用内径 $D_z=50mm$ 的镀锌钢管，竖管埋深 $0.8m$ ，距地面高度为 $2.5m$ 。干管和支管采用塑料管材，其中东西干管采用 $D_g=148mm$ ，分干管均采用 $D_g=102mm$ ，两个喷点的支管用 $D_g=50mm$ ，三个喷点支管 $D_g=75mm$ 。水泵进水管及出水管用 $D_g=150mm$ 的钢管 $10m$ 。水泵采用 $6sh-6A$ 型双吸泵。

沿程水头损失模型采用规范^[7]给出的公式，模拟计算使用 PC-1500 计算按图 4 框图所编制的程序进行，计算部分数据及成果见表 1~表 3。

表 1 6sh-6A 型水泵性能曲线表

流量 (m³/h)	50	100	111.6	144	150	180	200
扬程 (m)	70	69	67	62	61.7	55	47

表 2

第 13、15、17、16 号支管工作时系统自适应滤波情况

迭代顺序 t	K(t+1)	H ₀ (t+1) (m)	$\hat{H}(t)$ (m)	$\hat{H}(t+1)$ (m)	τ_p	备 注
0	0.76	60.99	57.30	60.11	2.11	采用单步滤波公式
1	0.75	60.30	60.11	60.26	2.28	采用递推滤波公式
2	0.74	60.24	60.26	60.25	2.17	同 上
3	0.74	60.24	60.25	60.24	2.16	同 上
4		60.24				已收敛

表 3

工作喷头水力参数状态值

喷头编号	喷头流量 (m ³ /h)	喷头射程 (m)	喷头地面高 程 (m)	喷头净工作水 头 (m)	备 注
C 13 1	13.16	30.49	50.00	36.44	喷头射程模型采用文献〔1〕介 绍公式 $R=1.35\sqrt{dH}$ 。
C 13 2	12.99	30.10	49.98	35.51	
C 13 3	13.03	30.18	49.50	35.69	
C 15 1	13.26	30.72	50.01	37.01	
C 15 2	13.09	30.33	50.00	36.06	
C 15 3	13.01	30.13	50.20	35.59	
C 17 1	13.58	31.46	50.20	38.79	
C 17 2	13.38	31.01	50.30	37.70	
C 17 3	13.32	30.85	50.40	37.32	
C 16 1	13.50	31.28	50.70	38.36	
C 16 2	13.55	31.42	49.30	38.69	
C 16 3	13.69	31.72	48.20	39.45	

六、结束语

主要参考文献

由于本模拟系统将管道系统视为一个平稳随机被控系统,故只要加入管道系统中的干扰是平稳的,如沿程水头损失采用理论公式作为模型,用动态规划法对管网进行优化时对局部管径的调整〔8〕,均不会影响模拟系统收敛于平衡状态。这就给动态规划法的在线运行带来方便,缩短了计算机的运行时间。模拟方法的编排的合理的轮灌计划使水泵工作于高效区成为现实。

本文完成了建立喷灌树状管网模拟系统的数学模型的任务,为喷灌系统的规划设计及自动化研究工作提供了方便的条件,其分析理论和方法有希望在其它领域的有关树状管路、油路、河川径流调节等问题中得到运用。

- 〔1〕 施钧亮、窦以松、朱尧洲,《喷灌设备与喷灌系统规划设计》,水利电力出版社,1979;
- 〔2〕 华东师范大学数学系控制理论教研室,《现代控制理论引论》,上海科学技术出版社,1984;
- 〔3〕 Ortega, J. M.; Rheinboldt, W. C.,《多元非线性方程迭代解法》,朱季纳译,科学出版社,1983;
- 〔4〕 王德人,《非线性方程组解法与最优化方法》,人民教育出版社,1980;
- 〔6〕 中国科学院数学研究所概率组,《离散时间系统滤波的数学方法》,国防工业出版社,1975;
- 〔7〕 中华人民共和国国家标准,《喷灌工程技术规范》,1985;
- 〔8〕 刘子沛,《用离散管径的动态规划法优化树状管网》,《喷灌技术》1986, 3, P.33
- 〔9〕 蔡高峰,《随机控制理论》,上海交通大学出版社,1987.