

管道式喷灌系统水力计算的ESM方法

赵凤娇 王福军

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 针对管道式喷灌系统的水力计算,剖析了目前采用的有限元法和 Hathoot 进步法等数解法的优点和局限性,结合进步法、退步法的计算思路,提出一种可以求解干管双向布置管道式喷灌系统的水力计算方法——改进步进法(ESM)。给出了详细的水力计算步骤及计算机流程图,并给出了实例。计算结果表明,ESM方法的水力学关系式准确和干管双向布置喷灌系统的水力学边界条件清晰,可有效解决干管双向布置的管道式喷灌系统的流量水头计算问题。

关键词 喷灌系统;水力计算;ESM方法

中图分类号 S 275.5

文章编号 1007-4333(2005)06-0047-04

文献标识码 A

ESM method for hydraulic analysis of sprinkler irrigation system

Zhao Fengjiao, Wang Fujun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to improve the hydraulic analysis method of a sprinkler irrigation system, the characteristics of the finite element method, the forward step method and the other numerical methods were evaluated in this paper. By introducing the idea of the forward-step method and the back-step method, a new numerical method, ESM(extended stepwise method), was presented for the hydraulic analysis of a sprinkler irrigation system with bilateral mainpipes arrangement. This method is an extension of the stepwise method. A computer program employing this technique was designed so as to provide sprinkler outflows and pressure head distributions of the system. The numerical example demonstrates that the analytical procedure is simple and accurate for the hydraulic analysis of a sprinkler irrigation system with bilateral main-pipes arrangement.

Key words sprinkler irrigation system; hydraulic analysis; EMS method

水力计算是喷灌系统水力解析和设计的基础^[1]。目前喷灌系统水力计算方法主要有图解法、解析法和数解法三大类^[2-4],本文中只讨论数解法中的几种具体算法。

已有的可求解管道式喷灌系统的数解法主要是有限元法(finite element method, FEM)和步进法(stepwise method, SM)。1985年,有限元方法首次用于滴灌支管单元的水力计算^[5],而后被 Haghghi 和 Saldivia 等引入管网和喷灌系统的水力计算^[6-8]。该法利用节点流量平衡原理进行多口出流计算,是目前较为准确的一种数值解法,但计算逻辑复杂,计

算机实现难度较大,一般只用于微灌系统的水力计算^[9]。1995年, Hathoot 等提出喷灌支管的水力解析和设计方法——进步法(forward step method, FSM)^[10],而后又衍生出了退步法(back step method, BSM)^[11]。进步法和退步法均应用水力学2个基本方程——伯努力能量方程(Bernoulli energy equation)和达西-韦斯巴赫摩擦损失方程(Darcy-Weisbach equation)对支管进行逐段水力解析,故通称为步进法。与有限元算法相比,步进法原理简单、计算容易、结果准确^[1,9,10],但由于传统进步法的水力计算针对的是喷灌系统中单条支管,故其不能独

收稿日期:2005-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50479008);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0133)

作者简介:赵凤娇,博士研究生;王福军,教授,博士生导师, E-mail: wangfj@cau.edu.cn

立求解由多支管、水泵等组成的喷灌系统。

本研究的目标是通过剖析喷灌系统中水流所遵循的水力学关系式和边界条件,结合步进法逐段求解的计算思路,找到一种可以求解干管双向布置的管道式喷灌系统的水力计算方法。

1 水力学解析原理

管道式喷灌系统一般布置形式见图1,其中图1(a)和(b)为干管单向布置,图1(c)为干管双向布置。干管布置方式不同,其水力学计算方法也有所

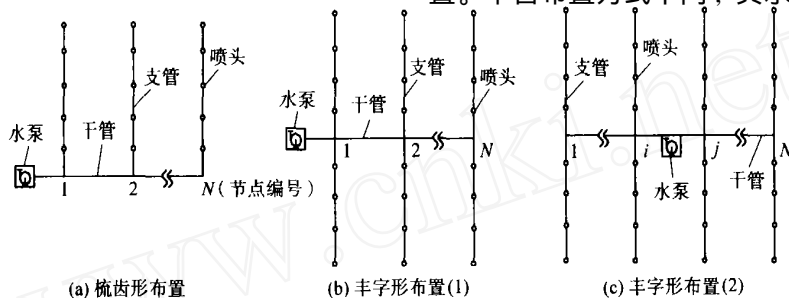


图1 管道式喷灌系统布置示意图

Fig. 1 Layout of sprinkler irrigation system

不同。这里仅就干管双向布置喷灌系统进行讨论。

1.1 压力关系

对照图2,在不同已知条件下,系统三通连接处各点压力关系可按式(1)~(3)计算。

$$H_{u,i} = H_{L,i} + \frac{Q_i^2}{2gA^2} \quad (1)$$

式中: $H_{u,i}$ 为干管管段的出口压力; $H_{L,i}$ 为支管 i 的入口压力; $L_{L,i}$ 为局部水头损失系数,可取文献[11]推荐参考值 1.5,也可根据文献[10]公式计算求得; $i=1,2,\dots,M$ 时, Q_i 为 i 和 $i+1$ 两出口间干管管段内流量,否则为 $i-1$ 和 i 两出口间干管管段内流量; A 为干管截面积; g 为重力加速度。

$$H_{u,i} = H_{d,i} + \frac{Q_i^2}{2gA^2} \quad (2)$$

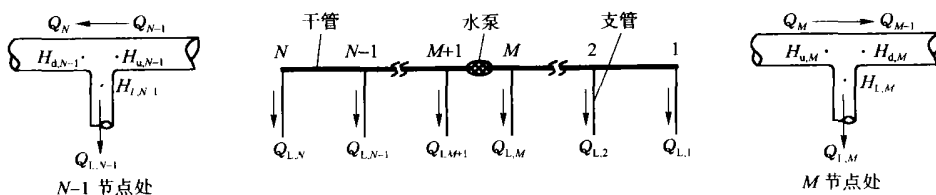


图2 干管双向布置喷灌系统简化示意图及系统三通连接处各点压力示意图

Fig. 2 Nodal heads of sprinkler irrigation system

1.2 流量关系

由能量守恒定理可建立支管入口流量、干管管段流量等关系,具体公式为

$$Q_{L,j} = \sum_{i=1}^m q_{j,i} \quad (4)$$

式中: $q_{j,i}$ 为第 j 条支管上第 i 个喷头流量; $Q_{L,j}$ 为第 j 条支管入口流量。

式中: $H_{d,i}$ 为干管管段 i 下游管段入口压力; $d_{L,i}$ 为局部水头损失系数,可取文献[11]推荐参考值 0.1,也可根据文献[10]公式计算求得。

$$H_{d,i+1} = H_{u,i} \pm S S_0 + f_i \frac{SQ_i^2}{2gDA^2} \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (3)$$

式中: S 为各支管布置间距; D 为干管内径; S_0 为地面坡度; f_i 为 i 和 $i+1$ 之间管段的摩擦损失系数,根据不同雷诺数有不同取值。按步进法计算时

$$H_{u,i+1} = H_{d,i} \pm S S_0 - f_i \frac{SQ_i^2}{2gDA^2} \quad (i=M+1,M+2,\dots,N) \quad (3)$$

式中: Q_i 为 $i-1$ 和 i 出口间干管管段内流量; f_i 为 $i-1$ 和 i 之间管段的摩擦损失系数。

$$Q_{i+1} = Q_i + Q_{L,i} \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (5)$$

按步进法计算,则有

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{L,i} \quad (i=M+1,M+2,\dots,N) \quad (5)$$

1.3 水泵特性

根据水泵运行特性,水泵流量压力关系为

$$H_b = H_x - S_x Q_b^2 \quad (6)$$

$$Q_b = Q_M + Q_{M+1} \quad (7)$$

式中： Q_b 为水泵流量； H_b 为水泵扬程； H_x 和 S_x 分别为水泵虚总扬程和水泵虚损耗系数，可由水泵性能曲线得出。

2 水力学边界条件

应用 ESM 算法进行水力计算的过程中，支管计算完全采用 Hathoot 在文献 [10] 中提出的进步法，所以其边界条件这里不再讨论。对于干管，从水力学角度考虑，其边界条件为两干管末端出流量为零。在 ESM 计算过程中，将两干管末端出流量为零的边界条件之一视为初始条件直接引入计算，即

$$Q_1 = Q_{L,1} \quad (8)$$

另一个则作为计算收敛判据

$$Q_N - Q_{L,N} < \epsilon \quad (9)$$

式中： ϵ 为计算要求的精度。

3 水力计算步骤

干管双向布置喷灌系统水力计算步骤如下：

1) 假定支管 1 入口初始压力 $H_{L,1} = H_0$ ，这里 H_0 的取值可为任意正值，因为在以后步骤中要对其进行修正。

2) 应用 Hathoot 进步法计算支管 1 上各喷头流量压力，及支管入口流量 $Q_{L,1}$ ，并由式 (8) 得 $Q_1 = Q_{L,1}$ 。

3) 由 $H_{L,1}$ 、 Q_1 及式 (1) ~ (5) 计算 $H_{L,2}$ ，重复步骤 2) ~ 3)，直至求得 $H_{u,M}$ 、 Q_M 。

4) 由 $H_{u,M}$ 、 Q_M 及式 (3) 计算 H_b (这里忽略水泵出水管道水头损失)，并由式 (6) 计算 Q_b 。

5) 由 Q_b 及式 (7) 计算 Q_{M+1} ，再由 H_b 、 Q_{M+1} 及式 (1)、(3) 计算 $H_{L,M+1}$ ，重复步骤 2) ~ 3)。

6) 在步骤 5) 的计算过程中，当压力出现负值时，为初始压力 $H_{L,1}$ 取值偏小所致，修正 $H_{L,1}$ ，重复步骤 2) ~ 6)；当流量出现负值时，为初始压力 $H_{L,1}$ 取值偏大所致，修正 $H_{L,1}$ ，重复步骤 2) ~ 6)。

7) 根据以上计算结果，比较 $Q_{L,N}$ 与 Q_N ，当两者的差值满足式 (9) 时，水力计算完成。否则根据计算结果修正 $H_{L,1}$ ，重复步骤 2) ~ 7)。

在以上计算过程中，当 $H_{L,1}$ 修正增量取值足够小时，该法计算精度可以足够高。水力计算步骤计算机流程见图 3。在对双向支管和双向干管构成的喷灌系统进行水力计算时，四通相当于 2 个三

通^[11]，其步骤基本与上述单向支管双向干管相同，只是在步骤 2) 中，要求应用 Hathoot 进步法分别计算干管左右两侧支管各喷头流量压力，以及 2 条支管的入口流量，并在干管管段流量计算时同时考虑 2 条支管的入口流量。

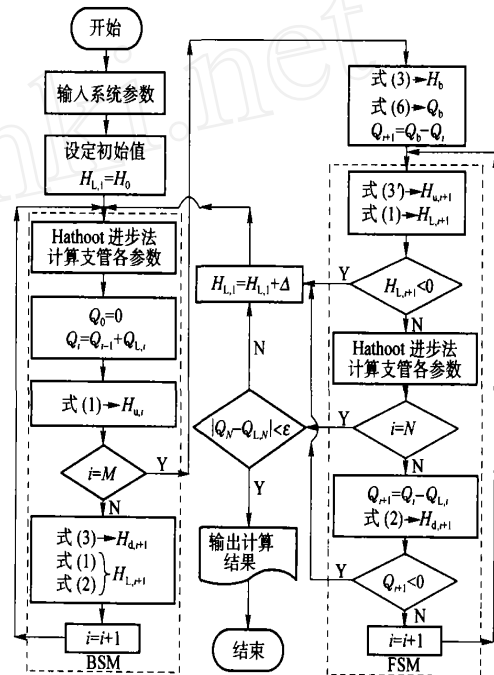


图 3 干管双向布置喷灌系统水力计算计算机流程图
Fig. 3 Flowchart of the computer program for the hydraulic analysis of the system with paired main lines

4 算例

按照上述 ESM 算法计算步骤，计算程序已编出。应用该程序对文献 [12] 中喷灌系统规划设计实例中固定式喷灌系统设计实例进行水力计算。通过确定系统的轮灌方式可知，其最不利工作情况如图 4 所示，具体参数见表 1。通过程序进行计算，结果

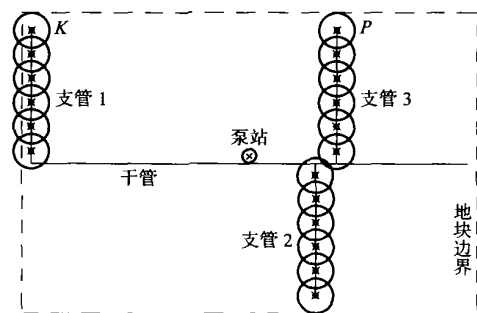


图 4 设计典型工作情况示意图
Fig. 4 Layout of the sprinkler irrigation system for analytical Example

见图5。显然,系统最不利喷点不是出现在该文献所提的最远点 K 处,而是支管3的末端 P 处。其原因主要是右侧干管流量大,其水力损失亦大,故压力较低。

表1 喷灌系统水力计算有关参量

Table 1 Parameters and conditions for Fig. 4

| 参量 | 数值 |
|--------------|-----------|
| 干管直径/mm | 140 |
| 支管直径/mm | 90 |
| 支管间距/m | 23 |
| 喷头间距/m | 26 |
| 喷嘴直径/mm | 7.0 × 3.1 |
| 竖管高度/m | 2 |
| 竖管直径/mm | 40 |
| 支管喷头数 | 6 |
| 地形坡度 | 0 |
| 支管1到泵站垂直间距/m | 230 |
| 支管2到泵站垂直间距/m | 69 |
| 支管3到泵站垂直间距/m | 92 |

注:水泵型号为4B35;管道材料为聚丙烯塑料管;喷头型号为中喷2号双喷嘴喷头。

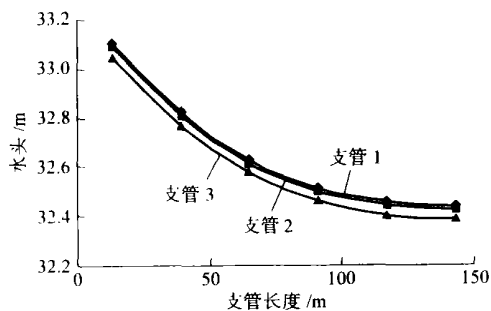


图5 支管各喷头压力曲线

Fig. 5 Pressure profile of sprinklers along the laterals

5 结束语

针对干管双向布置喷灌系统的水力计算问题提出了ESM方法。该方法采用逐段计算的方法对系统进行计算,以水泵作为进步法和退步法转换使用的标志,从而完成整个系统的水力计算。通过该计算方法,可以对任何2级管双向布置的喷灌系统进

行水力解析计算,快速、准确求得系统各管段、喷头以及水泵的流量、压力等工作参数,据此可分析系统运行工况,亦可评价系统的配套合理性,提出改进意见。该算法对机组式喷灌系统也有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 康跃虎. 微灌系统水力学解析和设计[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999
- [2] 李蔼铿. 多口出流管道水力设计的微机模拟图原理的研究[J]. 水利学报, 1994, 8(2): 1~8
- [3] 李蔼铿. 灌溉管网水力学图解软件的研制[J]. 节水灌溉, 2003(2): 14~15
- [4] Numan M. Numerical analysis to solve the hydraulics of trickle irrigation units[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 53~68
- [5] Bralts V F, Segerlind L J. Finite element analysis of drip irrigation submain units[J]. Transaction of the ASAE, 1985, 28(3): 809~814
- [6] Haghghi K, Bralts V F, Mohtar R H, et al. Modeling expansion/contraction, valve and booster pump in hydraulic pipe network analysis: a finite element approach[J]. Transaction of the ASAE, 1989, 32(6): 1945~1953
- [7] Mohtar R H, Bralts V F, Shayya W H. A finite element model for the analysis and optimization of pipe networks[J]. Transaction of the ASAE, 1991, 34(2): 393~401
- [8] Haghghi K, Bralts V F, Segerlind L J. Finite element formulation of tee and bend components in hydraulic pipe network analysis[J]. Transaction of the ASAE, 1988, 31(6): 1750~1758
- [9] 宫雪辉. 灌溉工程CAD水力设计算法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- [10] Hathoot H M, Abo-Ghobar H M, Al-Amoud A I, et al. Analysis and design of sprinkler irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE, 1994, 120(3): 534~549
- [11] 许一飞, 许炳华. 喷灌机械原理·设计·应用[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1989
- [12] 陈大雕, 林中卉. 喷灌技术[M]. (第2版). 北京: 科技出版社, 1992