

地下滴灌田间管网水力计算数值模拟

李刚¹ 王晓愚^{1*} 白丹²

(1. 塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘要 针对目前我国地下滴灌田间管网水力计算和水力特性研究较少,不能满足实际工程计算要求的问题,在前期试验和地下滴灌毛管水力计算数学模型的基础上,采用数值模拟方法,建立了地下滴灌田间管网水力计算数学模型。利用该模型可求解均匀坡、均匀土质、支管与毛管管径不变及均匀出流条件下的地下滴灌田间管网水力特征值。实例计算结果表明,该模型计算偏差小于1/1 000,精度满足实际工程计算要求。

关键词 滴灌; 田间管网; 水力计算; 数值模拟

中图分类号 S 275.4; S 275.6

文章编号 1007-4333(2011)02-0148-07

文献标志码 A

Study on numerical simulation of hydraulic calculation of field pipe network in subsurface drip irrigation

LI Gang¹, WANG Xiao-yu^{1*}, BAI Dan²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China;

2. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology,

Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract At present, few research reports on hydraulic calculation and hydraulic characteristics of field pipe network in subsurface drip irrigation (SDI) can be found in China. While these limited studies could not meet the requirements of engineering design. The mathematical model for hydraulic calculation in SDI filed pipe network was established based on former experiments and mathematical model of hydraulic calculation in SDI laterals. Using the model the hydraulic characteristics values in SDI field pipe network can be numerically solved under various conditions of uniformity slope, homogeneous soil, constant capillary diameter and constant space of submain pipes and laterals. Calculating results of the examples showed that the error s was less than 1/1 000, which is accurate enough to meet the needs of practice.

Key words drip irrigation; field pipe network; hydraulic calculation; numerical simulation

地下滴灌田间管网水力特性与水力计算对地下滴灌的应用推广具有重要意义。目前,国内外关于地下滴灌(subsurface drip irrigation, SDI)毛管和田间管网水力计算与水力特性的研究较少。已有研究^[1-2]认为地理毛管压缩变形会影响毛管水力特性,明显增加水头损失。Hills等采用地表滴灌的达西-韦斯巴赫公式和 Blasius 摩阻系数估算毛管水头损失和毛管流量。胡笑涛^[3]对地下滴灌灌水均匀度的试验,以及丛佩娟^[4]对毛管受压变形后地下滴灌系

统水力特性的研究中,毛管水力计算也是利用试验结果对现有微灌毛管沿程水头损失公式进行修正获得的。实际应用中,以色列、美国等技术发达国家根据地下滴灌多年田间试验,比较灌水质量、作物生长效果、产量和品质等获得较优的地下滴灌田间系统设计参数,这些研究都是针对具体地区、具体作物和土壤条件的经验方法。而我国地下滴灌的设计主要参照地表滴灌,按照《微灌工程技术规范》进行设计^[5-6]。从已建工程的运行效果看,地表滴灌田间管

收稿日期: 2010-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979089, 50549018); 塔里木大学校长基金自然科学基金项目(TDZKBS1001)

第一作者: 李刚, 讲师, 硕士, 主要从事节水灌溉技术与农业生态环境研究, E-mail: llgg11@qq.com

通讯作者: 王晓愚, 副教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: cxwxy1@163.com

网系统水力计算与设计理论尚不能满足地下滴灌实际要求^[5-6]。地下滴灌中滴头出流受土壤因素的影响,其水力特性与地表滴灌水力特性必定存在差异。

Warrick^[7]、Lazarovitch 等^[8]在分析土壤导水率、滴头出口正压的基础上,考虑土壤特性的空间变异性,模拟了地下滴灌毛管滴头流量的偏差率。在 Warrick 等的研究中毛管的水力偏差被忽略,而 Lazarovitch 等的研究则考虑了此项,其模型可估算毛管水头损失以及系统和滴头水力特性、土壤水力特性等对滴头出流的影响,由此推求滴头流量,分析土壤空间变异对毛管上各滴头流量均匀性的影响。但上述研究缺少对毛管上各个滴头流量的试验与测量。Gil M 等^[7]在室内利用称重传感器 1 次测得毛管多个滴头的流量以及滴头出口处的正压,在试验基础上推导、建立并校核了地下滴灌滴头流量、毛管流量偏差率等公式,可从土壤水入渗率和土壤正压角度对地下滴灌毛管流量偏差率进行分析;为了研究滴头流量与出口正压的关系以及毛管上各滴头流量的偏差率,试验中通过向毛管两端供水以保证毛管沿程压力恒定,因而无法观测地下滴灌毛管水力特性的沿程变化。

白丹等^[9]在室内利用称重传感器同时测得毛管多个滴头的流量,通过末端泄流的方式,测出毛管沿程压力的分布,建立的地下滴灌毛管水力解析模型通过了试验验证。本研究拟在此基础上,建立地下滴灌田间管网水力计算的数学模型,并对应用实例进行计算分析,以期为进一步研究地下滴灌田间管网水力特性及管网优化设计提供基础。

1 地下滴灌田间管网水力计算数学模型

实际工程中,非压力补偿式滴灌管应用较广,设计难度也较大,故本研究以毛管为非压力补偿式滴灌管的田间管网水力计算为主。

1.1 毛管水力计算数学模型

毛管沿程压力分布见图 1。假设:毛管上有 n 个滴头。 Q_0 为毛管进口流量, H_0 为毛管进口压力。自入口处开始,将管长按滴头位置分为 n 个管段。当地面纵坡为均匀坡、毛管等管径、滴头等间距时,根据能量方程,对于第 i 段管段有:

$$H_{i-1} + d = \Delta H_i + H_i$$

式中: H_i 为第 i ($i=1,2,\dots,n$) 个滴头孔口压力,m; d 为相邻两滴头之间的位置水头差,m, $d=IL$,其中

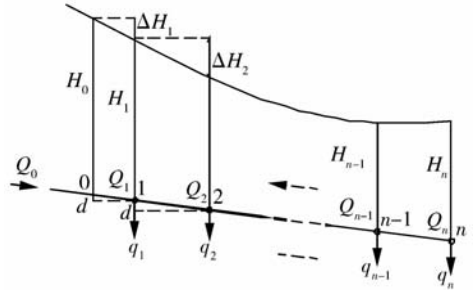
I 为地面纵坡坡度($I<0$ 为上坡, $I=0$ 为平坡, $I>0$ 为下坡); L 为滴头间距,m; ΔH_i 为第 i 段管段水头损失,m:

$$\Delta H_i = \alpha f \frac{Q_i^m}{D^b} L \quad (1)$$

式中: D 为毛管内径,mm; f 、 m 、 b 为与管材有关的水头损失计算系数; α 为考虑毛管局部水头损失加大系数,取值为 1.2 左右^[9]; $Q_i = \sum_{i=i}^n q_i$, 为第 i 段管道流量, q_i 为毛管上第 i 个滴头的流量,L/h,采用文献^[10]分析建立的地下滴灌滴头流量公式计算:

$$q_i = k\gamma^a \theta_0^c H_i^x \quad (2)$$

式中: γ 为土壤容重,g/cm³; θ_0 为土壤初始含水率,%; k 、 a 、 c 和 x 为经验参数^[10]。



Q_0 —毛管进口流量; Q_i —第 i 段管道流量,L/h; $i=1, 2, \dots, n$; H_0 —毛管进口压力; H_i —第 i 个滴头孔口压力 ($i=1, 2, \dots, n$); ΔH_i —第 i 段管段水头损失,m; q_i —毛管上第 i 个滴头的流量,L/h;下同。

图 1 地下滴灌毛管沿程压力分布图

Fig. 1 Pressure head distribution along SDI lateral

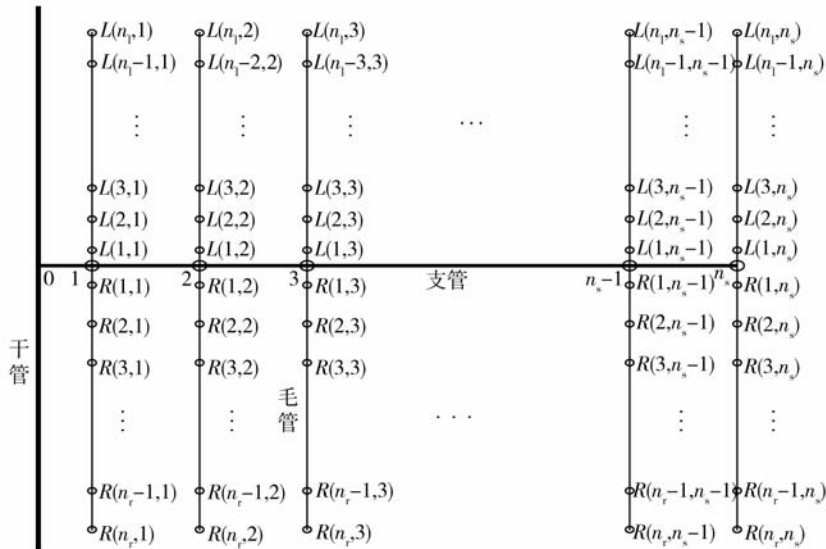
一般地,毛管上第 1 个滴头孔口与毛管进口处距离为滴头间距的 1/2,由此,可建立地下滴灌毛管水力计算的数学模型,是关于 n 个滴头流量 q_i 的一个非线性方程组:

$$\begin{cases} H_0 + \frac{IL}{2} - \alpha f \frac{\left(\sum_{i=1}^n q_i\right)^m}{D^b} \frac{L}{2} - \left(\frac{q_1}{k\gamma^a \theta_0^c}\right)^{\frac{1}{x}} = 0 \\ \left(\frac{q_1}{k\gamma^a \theta_0^c}\right)^{\frac{1}{x}} + IL - \alpha f \frac{\left(\sum_{i=2}^n q_i\right)^m}{D^b} L - \left(\frac{q_2}{k\gamma^a \theta_0^c}\right)^{\frac{1}{x}} = 0 \\ \vdots \\ \left(\frac{q_{n-1}}{k\gamma^a \theta_0^c}\right)^{\frac{1}{x}} + IL - \alpha f \frac{q_n^m}{D^b} L - \left(\frac{q_n}{k\gamma^a \theta_0^c}\right)^{\frac{1}{x}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

该模型中,当已知毛管进口压力、或进口流量、或滴头设计流量时,即可利用 MATLAB 中的 fsolve 函数编程快速方便地求解出毛管沿程压力分布、水头损失以及各滴头流量等水力特征值。当第 1 个滴头距毛管进口处的间距为 L 时,只需要将式(6)中第 1 个方程的 $L/2$ 改写为 L 即可进行计算。

1.2 田间管网水力计算数学模型的建立

图 2 为 1 个支管单元中毛管双向布置的示意图。以下未作特别说明时,支管毛管均按均匀坡、等管径、孔口等间距条件进行计算分析。当支管地面纵坡、支管管径、支管孔口间距和孔口数、毛管地面纵坡、毛管管径、滴头间距、毛管铺设长度、土壤容



$L(i, j)$ 、 $R(i, j)$ —左、右侧第 j 条毛管第 i 个滴头的位置, $i=1, 2, \dots, n_l, j=1, 2, \dots, n_s$;
 n_l 、 n_r —左、右毛管孔口数(滴头个数); n_s —支管孔口数(毛管条数)。

图 2 地下滴灌田间管网示意图

Fig. 2 Sketch map of subunit pipe network under SDI

重、土壤初始含水率、土壤质地、滴灌管等条件确定时,地下滴灌田间管网水力计算可以分为以下 3 种情况。

1) 支管进口压力已知。

当支管进口压力已知时,支管沿程压力分布、水头损失、各孔口压力和孔口流量也是确定的;同时支管孔口压力等于其孔口处的左、右两侧毛管的入口压力。与毛管水力计算方法类似,对图 1 所示的支管,第 j 段管段的能量方程可写为:

$$H_{j-1} + d_{zs} = \Delta H_j + H_j$$

式中: H_j 为支管第 j 个出水口处的压力水头($j=1, 2, \dots, n_s$), m ; $d_{zs} = I_s L_s$, 为支管第 j 个出水孔口相对第 $(j-1)$ 个出水孔口的位置水头差, m ; I_s 为支管纵坡, $I_s < 0$ 为上坡, $I_s = 0$ 为平坡, $I_s > 0$ 为下坡; L_s 为支管孔口间距(或毛管间距), m ; ΔH_j 为支管第 j 段管段水头损失, m ;

$$\Delta H_j = \alpha_z f \frac{Q_j^m}{D_s^b} L_s \quad (4)$$

式中: $Q_j = \sum_{i=1}^{n_s} (Q_{lj} + Q_{rj})$, 为支管第 j 段管道流量, L/h ; 其中, Q_{lj} 和 Q_{rj} 分别为支管第 j 个出水口处左、右侧毛管管道流量, $Q_{lj} = \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j)$, $Q_{rj} = \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j)$; $q_l(i, j)$ 和 $q_r(i, j)$ 为左、右侧第 j 条毛管上第 i 个滴头的流量($i=1, 2, \dots, n_l$ 或 $n_r, j=1, 2, \dots, n_s$), L/h ; n_l 、 n_r 、 n_s 分别为左、右两侧毛管孔口数(滴头个数)以及支管的出水孔口数(毛管条数)。 D_s 为支管管径, mm 。 α_z 为考虑支管局部水头损失加大系数,在地表滴灌中,支管局部水头损失加大系数取值范围一般为 1.05~1.10。

对于支管则有:

$$\left\{ \begin{aligned} H_0 + \frac{I_s L_s}{2} - \alpha_z f \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \right)^m}{D_s^b} \frac{L_s}{2} - H_1 &= 0 \\ H_1 + I_s L_s - \alpha_z f \frac{\left(\sum_{j=2}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) + \sum_{j=2}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \right)^m}{D_s^b} L_s - H_2 &= 0 \\ &\vdots \\ H_{n_s-2} + I_s L_s - \alpha_z f \frac{\left(\sum_{j=n_s-1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) + \sum_{j=n_s-1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \right)^m}{D_s^b} L_s - H_{n_s-1} &= 0 \\ H_{n_s-1} + I_s L_s - \alpha_z f \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, n_s) + \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, n_s) \right)^m}{D_s^b} L_s - H_{n_s} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

结合地下滴灌毛管水力计算式(3),对支管左侧第 j 条毛管有:

$$\left\{ \begin{aligned} H_1(0, j) + \frac{I_1 L_1}{2} - \alpha_m f \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) \right)^m}{D_1^b} \frac{L_1}{2} - \left(\frac{q_l(1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \\ \left(\frac{q_l(1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} + I_1 L_1 - \alpha_m f \frac{\left(\sum_{i=2}^{n_l} q_l(i, j) \right)^m}{D_1^b} L_1 - \left(\frac{q_l(2, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \\ &\vdots \\ \left(\frac{q_l(n_l-1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} + I_1 L_1 - \alpha_m f \frac{q_l(n_l, j)^m}{D_1^b} L_1 - \left(\frac{q_l(n_l, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

对支管右侧第 j 条毛管有:

$$\left\{ \begin{aligned} H_r(0, j) + \frac{I_r L_r}{2} - \alpha_m f \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \right)^m}{D_r^b} \frac{L_r}{2} - \left(\frac{q_r(1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \\ \left(\frac{q_r(1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} + I_r L_r - \alpha_m f \frac{\left(\sum_{i=2}^{n_r} q_r(i, j) \right)^m}{D_r^b} L_r - \left(\frac{q_r(2, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \\ &\vdots \\ \left(\frac{q_r(n_r-1, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} + I_r L_r - \alpha_m f \frac{q_r(n_r, j)^m}{D_r^b} L_r - \left(\frac{q_r(n_r, j)}{k\gamma^a \theta_0^c} \right)^{\frac{1}{x}} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: $H_l(i, j)$ 、 $H_r(i, j)$ 分别为左、右侧第 j 条毛管上第 i 个滴头压力($i=1, 2, \dots, n_l$ 或 n_r ; $j=1, 2, \dots, n_s$), m ; I_l 、 I_r 分别为左、右两侧毛管纵坡, I_l 、 $I_r < 0$ 为上坡, I_l 、 $I_r = 0$ 为平坡, I_l 、 $I_r > 0$ 为下坡; L_l 、 L_r 分别为左、右两侧毛管滴头间距, m ; D_l 、 D_r 分别为左、右两侧毛管管径, mm ; α_m 为考虑毛管局部水头损失

加大系数,其取值为 1.2 左右。

若当毛管上第 1 个滴头距毛管进口的间距为 L_1 和 L_r , 第 1 条毛管中距支管的入口的间距为 L_s 时, 分别将式(5)~式(7)第 1 个方程中的 $L_1/2$ 、 $L_r/2$ 和 $L_s/2$ 改为 L_1 、 L_r 和 L_s 即可。该模型的求解, 通过 MATLAB 编程实现, 当满足计算的支管进口压

力等于已知的 H_0 值时,即可获得田间管网所有的水力特征值。

2)支管进口流量已知。

支管进口流量 Q_0 已知时,理论上应有 $Q_0 = Q_1$,即支管进口流量与支管第 1 个孔口前的进口流量相等。此时田间管网水力计算与支管进口压力已知时的水力计算过程类似,其数学模型也相同,其求解过程需要满足的条件是:

$$Q_{1\text{计算}} = \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \quad (8)$$

最终对应的支管孔口压力和流量、毛管上滴头压力和流量也就是所要求的解。

3)支管进口压力未知。

支管进口压力未知时,地下滴灌田间管网水力计算存在以下 2 种情况:当滴头设计流量已知时,一般滴头设计流量取的是田间管网滴头的平均流量 \bar{q} :

$$\bar{q} = \frac{1}{(n_l + n_r)n_s} \left(\sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_l} q_l(i, j) + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_r} q_r(i, j) \right) \quad (9)$$

式中: \bar{q} 为毛管上各滴头流量的平均值,L/h。当设计灌水均匀度已知时

$$C_{u\text{计算}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{n\bar{q}} \quad (10)$$

式中: $C_{u\text{计算}}$ 为由计算所得的各滴头流量 q_i 值计算出的灌水均匀度。这 2 种情况与支管进口流量已知时的水力计算方法和过程基本相同,最终结果只需满足滴头平均流量 \bar{q} 等于滴头设计流量,或计算的田间灌水均匀度 $C_{u\text{计算}}$ 等于设计要求的灌水均匀度,那么,对应计算出来的支管孔口压力和流量、毛管上滴头压力和流量也就是所要求的解。

当滴灌管性能、地面纵坡、支管管径与长度、毛管间距、毛管管径与毛管长度、滴头间距、土壤质地、容重、初始含水率等条件确定时,上述模型适用于求解支管进口压力已知、进口流量已知、滴头设计流量或设计灌水均匀度已知时的支管进口压力和流量、支管上每个孔口(即每条毛管进口)的压力和流量,支管水头损失、毛管水头损失、滴头压力和流量、滴头平均流量以及灌水均匀度等田间管网各水力特征值。

2 应用实例

2.1 基本数据

已知:支管进口压力 $H_0 = 25.0$ m,土壤为轻黏土,土壤容重 $\gamma = 1.25$ g/cm³,土壤初始含水率 $\theta_0 = 13\%$,其他数据见表 1。滴头流量计算公式^[10]:

$$q_i = 1.125 5\gamma^{-0.089 1} \theta_0^{0.077 5} H_i^{0.557 5}$$

计算中支管局部水头损失加大系数取 1.08,毛管局部水头损失加大系数取 1.20。

表 1 应用实例中支管和毛管的基本数据

Table 1 Basic data of submain pipe and laterals in application example

管道	管径/mm	孔口间距/m	孔口数	地面纵坡坡度
支管	$D_s = 63$	$L_s = 1.5$	$n_s = 20$	$I_s = 0.005$
毛管左侧	$D_l = 14.2$	$L_l = 0.30$	$n_l = 150$	$I_l = -0.01$
毛管右侧	$D_r = 14.2$	$L_r = 0.30$	$n_r = 180$	$I_r = 0.01$

2.2 计算结果及分析

将已知量输入式(5)、(6)和(7),通过计算机数值迭代运算求解,得到支管进口压力计算值为 25.000 2 m,与初始值 25.000 0 的偏差 < 0.001 ;用支管同一出水口上的左右两根支管的进口压力对支管各孔口压力进行检验,计算结果偏差 < 0.001 。同理,支管各孔口流量与左、右毛管流量之和的偏差 < 0.001 ,说明计算结果可靠,计算精度较高,用于地下滴灌田间管网的水力计算是可行的。

图 3 为支管沿程孔口压力曲线图。因支管纵坡为下坡,其孔口压力和流量沿程先是逐渐减小,在支管上第 17 个孔口处,压力和流量降到最低,而后稍有增大。

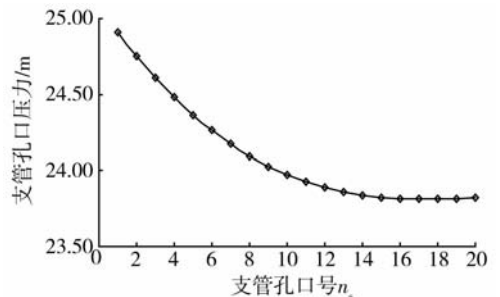


图 3 支管沿程孔口压力图

Fig. 3 Pressure head of every orifice along submain pipe

由于毛管和滴头数量多,不便将所有毛管的滴头压力和流量一一列出,在此节选支管孔口号 1、5、10、15 和 20 处的左、右两侧毛管,绘制其滴头压力和流量沿程变化曲线加以阐述(图 4 和图 5)。每条毛管滴头压力和流量均沿程减小,且每条毛管的压力分布曲线、滴头流量的沿程变化趋势完全相同;各

条毛管之间的压力变化与支管沿程压力变化相对应,靠近支管入口处的毛管,其进口压力和流量较大,远离支管入口的毛管进口压力和流量逐渐减小,到支管末端,减小幅度趋于平缓,所以毛管沿程压力分布曲线与沿程滴头流量曲线在靠近支管入口处较稀,而在支管末端处较密。

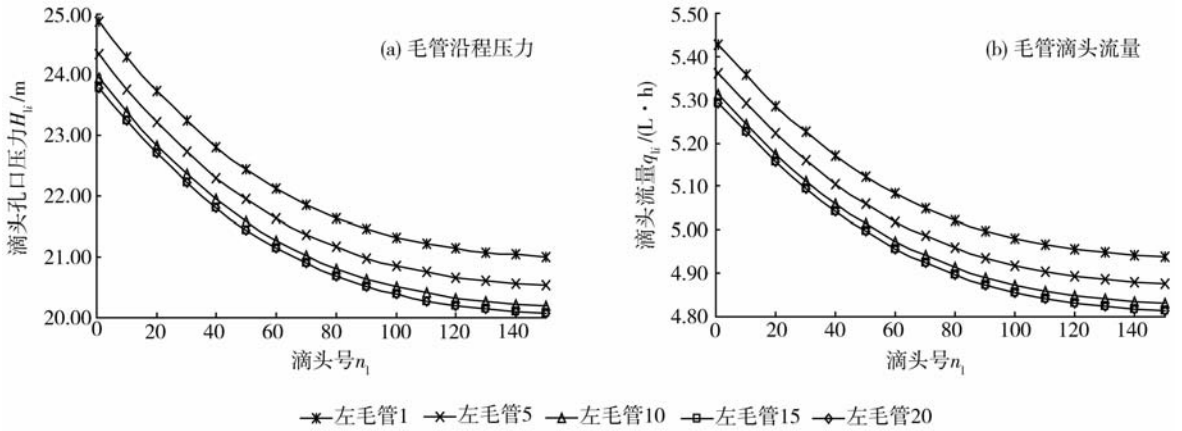


图 4 左侧毛管沿程压力与滴头流量分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of pressure head and emitter flux along every lateral on left submain

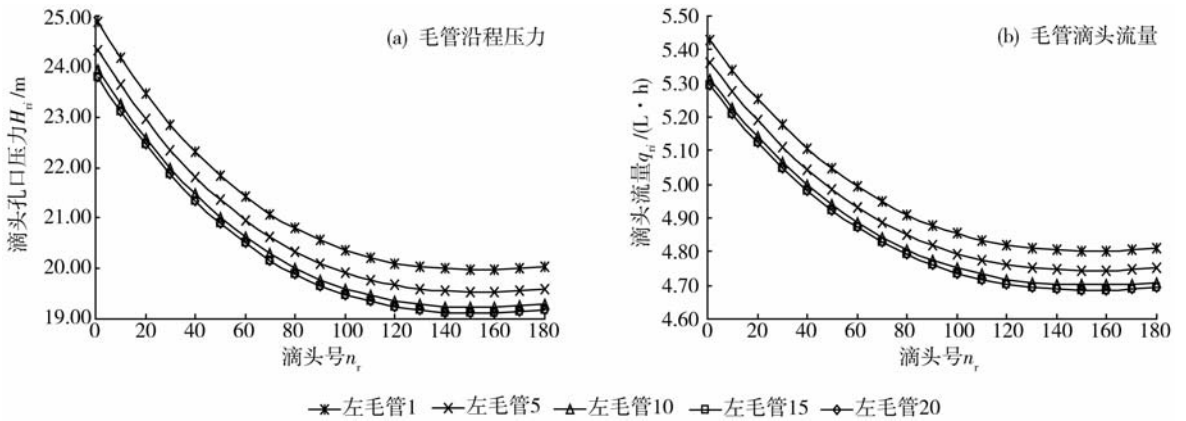


图 5 右侧毛管沿程压力与滴头流量分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of pressure head and emitter flux along every lateral on right submain

对于左侧毛管,地面纵坡为上坡,滴头压力和流量的最大值在离支管进口最近的位置,即 $L(1,1)$ 处;沿支管水流方向,毛管进口压力和流量依次降低,但受支管纵坡影响,第 17 个孔口之后的毛管进口压力有逐渐增大的趋势,第 17 个孔口之后的毛管压力和流量略大于第 17 条毛管的压力和流量,左侧毛管上滴头压力和流量的最小值出现在第 17 条毛管的最末滴头位置 $L(150,17)$ 处。

量的最大值在离支管进口最近的位置,即 $R(1,1)$ 处,同时受支管与毛管纵坡影响,最小值出现在第 17 条毛管上第 152 个滴头孔口处,即 $R(152,17)$ 处。

另外计算得:滴头平均流量为 4.924 4 L/h,灌水均匀度 0.970 5,滴头流量偏差率 15.09%,滴头工作水头偏差率 27.61%。

为直观了解整个田间管网水力要素的分布情况,绘制田间管网压力与滴头流量等值线立体图(图 6)。压力与流量等值线在支管附近较为密集,越向

对于右侧毛管,地面纵坡为下坡,滴头压力和流

左、右毛管末端的方向,等值线越稀疏。这说明越靠近支管进口和毛管进口,管网压力与滴头流量沿程

降低越显著,而越靠近支管与毛管末端,压力与滴头流量变化越趋于平缓。

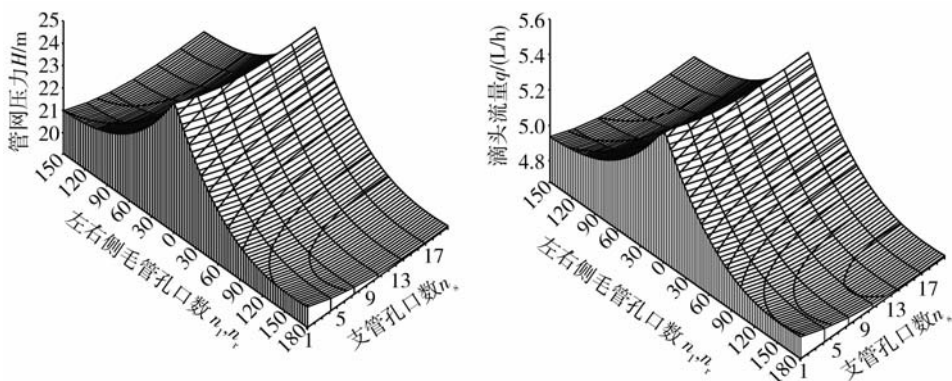


图6 田间管网压力与滴头流量等值线立体图

Fig. 6 Contours of pressure head and emitter flux in SDI field network

3 结束语

田间管网中支管压力、毛管压力和滴头流量之间是相互影响、对应发生变化的。本研究根据地下滴灌滴头流量计算公式与毛管水力计算数学模型,建立了地下滴灌田间管网水力计算的数学模型,该模型将田间管网作为一个整体进行水力计算。当滴灌管性能、地面纵坡、支管管径、支管长度、毛管间距、毛管管径、滴头间距、毛管铺设长度、土壤质地、土壤容重、土壤初始含水率等条件确定时,即可求解均匀纵坡、均质土、支管与毛管管径不变、均匀出流条件下的田间管网水力特征值;当纵坡为非均匀坡、管径变化或毛管间距与滴头间距不同时,可通过调用子程序分段计算。实例计算结果表明,该模型计算精度满足实际工程计算要求。

进一步可考虑寻求优化方法求解该模型,不仅满足计算精度,还要获得较快的运算速度;利用该模型,分析土壤特性对田间管网水力特性的影响。

参 考 文 献

- [1] Hills D J, Tajrishy M, Gu Yuping. Hydraulic considerations for compressed subsurface drip-tape [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1197-1201
- [2] Steele D D, Greenland R G, Gregor B L. Subsurface drip

irrigation systems for specialty crop production in North Dakota [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1996, 12(6): 671-679

- [3] 胡笑涛. 地下滴灌灌水均匀度试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001
- [4] 丛佩娟. 地下滴灌管网水力特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004
- [5] 黄兴法, 李光水. 地下滴灌技术的研究现状与发展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 176-181
- [6] 程先军, 许迪, 张昊. 地下滴灌技术发展及应用现状综述[J]. 节水灌溉, 1999(4): 13-15, 42
- [7] Warrick A W, Shani U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: effect on uniformity [J]. Irrig Drain Eng ASCE, 1996, 122(5): 296-300
- [8] Lazarovitch N, Shani U, Thompson T L, et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems [J]. Irrig Drain Eng ASCE, 2006, 132(6): 531-536
- [9] Gil M, Rodriguez-Sinobas L, Juana L, et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: Effect on water-application uniformity [J]. Irrigation Science, 2008, 26(6): 451-458
- [10] 白丹, 王晓愚, 宋立勋, 等. 地下滴灌毛管水力要素试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 19-22
- [11] 王晓愚, 白丹, 李占斌, 等. 地下滴灌灌水器水力要素试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 6-10

(责任编辑: 刘迎春)