

基于能坡线法的微灌双向异径毛管设计*

鞠学良¹ 吴普特¹ Weckler R Paul² 张 林¹ 朱德兰³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 俄克拉荷马州立大学生物系统与农业工程系, 斯蒂尔沃特 74078; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 根据最佳支管位置是位于使两侧毛管灌水器平均工作压力相等处的定义, 基于能坡线法推导了微灌双向异径毛管的最佳支管位置、进口工作压力、水力流量偏差系数及极限管长的计算公式, 并给出了最佳支管位置参数的数值表。以此为基础, 提出了3种常见设计情况下的微灌双向异径毛管设计步骤。通过3个设计实例表明: 该方法准确可靠, 可以简便快速地设计各种均匀坡条件下的微灌系统双向异径毛管, 提高微灌工程设计效率。

关键词: 微灌 双向异径毛管 压力分布 解析模型

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0047-08

Hydraulic Design of Micro-irrigation Paired Tapered Laterals
Based on Energy Gradient Line Method

Ju Xueliang¹ Wu Pute¹ Weckler R Paul² Zhang Lin¹ Zhu Delan³

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*

2. *Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Oklahoma State University, Stillwater OK 74078, USA*

3. *Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: A simple and easily adaptable analytical approach was developed for the hydraulic design of micro-irrigation paired tapered laterals laid on uniformly sloping grounds based on the definition position locations where the same average emitter pressure head existed in the uphill and downhill laterals. Analytical expressions of the best manifold position, inlet working pressure head, coefficient of variation by hydraulic variation and the limited length of the paired tapered laterals were separately developed by using the energy gradient line method. Three tables showed the values used in estimating the design parameters of the best manifold position, inlet working pressure head and coefficient of variation by hydraulic variation, respectively, for the common diameter ratio, pressure loss ratio and velocity exponent. When the length, diameter and designed emitter flow were given, the best manifold position and other parameters of the paired tapered laterals could be directly designed without using iterative methods. When the diameters, designed emitter flow and water application uniformity criterion were provided, the limited length, the best manifold position and remaining parameters of the paired tapered laterals could be easily determined by Excel Equation-Solver in Microsoft Excel. When the length, designed emitter flow and water application uniformity criterion were provided, the design diameter, the best manifold position and the remaining parameters of the paired tapered laterals could also be easily determined in Microsoft Excel by the iterative technique. Three numerical design examples covering various conditions indicated that the proposed approach could produce accurate results for practical purposes.

Key words: Micro-irrigation Paired tapered laterals Pressure distribution Analytical model

收稿日期: 2015-07-15 修回日期: 2015-10-01

* 中国科学院西部之光人才培养计划资助项目、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B02)和教育部、国家外国专家局“111计划”资助项目(B12007)

作者简介: 鞠学良, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: juxueliang1987@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 吴普特, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水农业与水土保持研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

引言

在微灌支管两侧布置双向毛管,有节省投资、节能、提高灌水质量的优点^[1]。在微灌系统毛管用量较大的情况时,采用变径毛管可以进一步减少系统投资^[2]。微灌双向异径毛管的铺设是指支管两侧采用不同管径毛管,水流由支管进入毛管后向相反的方向分流。微灌双向异径毛管的主要设计任务有:设计最佳支管位置,计算毛管进口工作压力,评价灌水均匀度及计算满足灌水均匀度要求的毛管极限管长或毛管设计管径。目前微灌工程实践中,尚没有适用于双向异径毛管的水力设计方法。

根据最佳支管位置的定义,现有的微灌双向毛管水力设计方法可以分为3类。第1类方法是将双向毛管最佳支管位置定义为使得支管两侧毛管上灌水器最小压力相等的支管位置^[3-5]。由于此类方法没有提出评价整条毛管灌水均匀度的计算公式,因此不能满足给定灌水均匀度标准的双向微灌毛管设计要求。第2类方法是将双向毛管最佳支管位置定义为使得整条毛管上灌水均匀度最大的支管位置。此类方法需要反复计算整条毛管上所有灌水器的压力和流量,因此需要借助于有限元法^[6]、黄金分割法^[6]、遗传算法^[7-9]等先进的算法和程序,可以获得较高的设计准确性和精度,但使用者需要具备一定的理论及编程基础。第3类方法是将双向毛管最佳支管位置定义为使支管两侧毛管上灌水器平均压力相等的支管位置,Juana等^[10]通过一个算例演示了此类方法设计双向毛管极限长度的计算过程,但并没有系统提出其他设计参数的解析模型及设计方法;笔者^[11]基于此定义,系统建立了双向毛管最佳支管位置、进口工作压力和灌水均匀度等设计参数的解析模型,并提出了双向微灌同径毛管的简易设计方法,相关设计案例显示此方法设计结果与其他传统方法的设计结果非常接近,验证了设计方法的准确性和可靠性。相比于传统设计方法,新方法简便易用,可以提高微灌工程的设计效率。

能坡线法具有物理意义明晰、易于理解、计算简便等特点,仍是目前微灌水力设计中最为普遍使用的设计方法之一^[4]。本文根据上述第3类最佳支管位置的定义,基于能坡线法,推导双向异径毛管最佳支管位置、进口工作压力、流量偏差系数及极限管长的计算公式。在此基础上,提出常见设计情况下的微灌双向异径毛管简易设计方法。

1 微灌双向异径毛管水力解析模型

1.1 最佳支管位置

为建立微灌双向异径毛管最佳支管位置的解析模型,本文用逆坡段毛管长度 L^{up} 与整条毛管长度 L 的比值作为最佳支管位置的设计参数 R_L ,公式为

$$R_L = \frac{L^{up}}{L} = \frac{N^{up} - 0.5}{N - 1}$$

(1)

式中 R_L ——最佳支管位置设计参数
 N^{up} ——逆坡段毛管灌水器个数
 N ——双向异径毛管灌水器总个数

微灌双向毛管上灌水器个数 N 通常大于100,因此式(1)可近似简化为 $R_L \approx N^{up}/N$ 。

如图1所示,本文定义最佳支管位置是位于使两侧毛管灌水器平均工作压力水头相等的支管位置。图1中, h_0 表示双向异径毛管进口工作压力(单位:m); h_d 表示灌水器设计工作压力(单位:m); $\bar{h}^{up}$ 、 $\bar{h}^{down}$ 分别表示逆坡段和顺坡段毛管上灌水器平均工作压力(单位:m); D^{up} 、 D^{down} 分别表示逆坡段和顺坡段毛管内径(单位:mm); L^{up} 表示逆坡段毛管管长(单位:m); L 表示双向异径毛管总管长(单位:m); S_0 表示地面坡度, $S_0 \geq 0$ 。

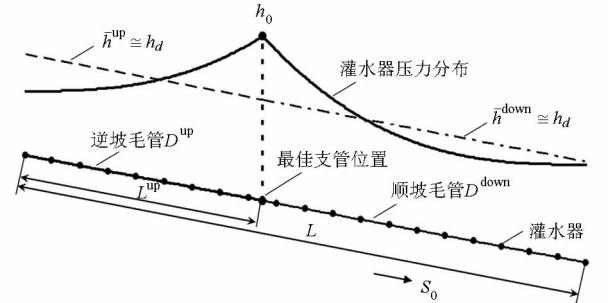


图1 微灌双向异径毛管最佳支管位置示意
Fig.1 Schematic diagram for designing the best submain position of paired tapered laterals

根据能坡线法^[10-11],忽略流速水头的影响,可得逆坡与顺坡段毛管灌水器平均工作压力的计算公式,分别为

$$\bar{h}^{up} = h_0 - \frac{m+1}{m+2} \Delta H_F^{up} + \frac{1}{2} \Delta H_S^{up}$$

(2)

$$\bar{h}^{down} = h_0 - \frac{m+1}{m+2} \Delta H_F^{down} + \frac{1}{2} \Delta H_S^{down}$$

(3)

其中 $\Delta H_S^{up} = -S_0 L^{up}$
 $\Delta H_S^{down} = S_0 (L - L^{up})$

式中 m ——流量指数
 ΔH_F^{up} 、 ΔH_F^{down} ——逆坡段和顺坡段毛管的摩擦损失,m
 ΔH_S^{up} 、 ΔH_S^{down} ——逆坡段和顺坡段毛管进口与末端的地形高差,m

根据最佳支管位置的定义,整理式(2)与式(3)可得

$$\Delta H_F^{\text{down}} - \Delta H_F^{\text{up}} = \frac{m+2\Delta H_S^{\text{down}} - \Delta H_S^{\text{up}}}{m+1} = \frac{m+2\Delta H_S}{m+1} \quad (4)$$

其中 $\Delta H_S = S_0 L$
式中 ΔH_S ——与双向异径毛管等长的单向顺坡毛管进口与末端的地形高差, m

根据 Darcy - Weisbach 公式^[12], 并结合 $R_L = L^{\text{up}}/L \cong N^{\text{up}}/N$, 逆坡段毛管的摩阻损失 ΔH_F^{up} 可表示为

$$\Delta H_F^{\text{up}} = F_c F_s K \frac{(N^{\text{up}} q_d)^m}{(D^{\text{up}})^b} L^{\text{up}} \cong R_L^{m+1} \Delta H_F \quad (5)$$

其中 $q_d = kh_d^x$ $\Delta H_F = F_c F_s K L (N q_d)^m / (D^{\text{up}})^b$
 $F_c = \frac{1}{m+1} \quad (N > 100)$

式中 F_c ——克里斯琴森多口系数^[13]
 F_s ——考虑灌水器局部水头损失的毛管总水头损失扩大系数^[12], 通常取 1.1 ~ 1.2
 q_d ——灌水器设计流量, L/h
 k ——灌水器流量系数
 x ——灌水器流态指数
 K ——摩阻系数 b ——管径指数
 ΔH_F ——与双向毛管等长且与逆坡段毛管同径的单向毛管的总摩阻损失, m

设计参数 m , K 和 b 取值可查阅 GB/T 50485—2009《微灌工程设计规范》。

同理, 微灌双向异径毛管逆坡段与顺坡段毛管摩阻损失的比值可表示为

$$\frac{\Delta H_F^{\text{up}}}{\Delta H_F^{\text{down}}} = \left(\frac{D^{\text{down}}}{D^{\text{up}}} \right)^{m+3} \left(\frac{N^{\text{up}}}{N - N^{\text{up}}} \right)^m \frac{L^{\text{up}}}{L - L^{\text{up}}} \cong r_D^{m+3} \cdot \left(\frac{R_L}{1 - R_L} \right)^{m+1} \quad (6)$$

其中 $r_D = D^{\text{down}}/D^{\text{up}}$
通常微灌双向异径毛管的顺坡段管径小于逆坡段管径, 因此 $r_D < 1$ 。

将式(5)、式(6)代入式(4), 整理得到微灌双向异径毛管的最佳支管位置参数 R_L 的解析模型

$$\frac{(1 - R_L)^{m+1}}{r_D^{m+3}} - R_L^{m+1} = \frac{m+2}{m+1} \frac{J}{2} \quad (7)$$

其中 $J = \Delta H_S / \Delta H_F = S_0 (D^{\text{up}})^b / [F_c F_s K (N q_d)^m]$
式中 J ——管长为 L 、管径为 D^{up} 的单向顺坡毛管的坡降比

式(7)表明: 对于给定的流量指数 m , 最佳支管位置参数 R_L 是坡降比 J 和管径比 r_D 的函数。当微灌毛管平坡布置时 ($J=0$), 最佳支管位置参数 $R_L =$

$$1/[r_D^{(m+3)/(m+1)} + 1]。$$

当 $m=1$ 时, 式(7)为 R_L 的二次函数。根据 R_L 的取值范围 ($R_L < 1$), 将 $m=1$ 代入式(7), 整理得到最佳支管位置参数 R_L 的解析式为

$$R_L = \frac{1 - \sqrt{1 - (1 - r_D^4)(1 - 0.75 J r_D^4)}}{1 - r_D^4} \quad (8)$$

当 $m=1.69$ 或 1.75 时, 式(7)为 R_L 的隐函数。在已知参数 r_D 和 J 时, 需要借助迭代法或试错法求解 R_L 。为了简化计算过程, 根据式(7), 表 1 和表 2 分别给出当 $m=1.69$ 和 1.75 时, 常见管径比 r_D 和坡降比 J 对应的最佳支管位置设计参数 R_L 的计算值。

1.2 毛管进口工作压力

在满足设计灌水均匀度要求的情况下, 微灌毛管上灌水器的平均工作压力近似等于灌水器设计工作压力^[14-17]。如图 1 所示, 本文方法的理论基础可表示为 $\bar{h}^{\text{up}} = \bar{h}^{\text{down}} \cong h_d$ 。

将 $\bar{h}^{\text{up}} \cong h_d$, $\Delta H_S^{\text{up}} = -L^{\text{up}} S_0$ 和式(5)代入式(2)并整理得毛管进口工作压力计算公式为

$$h_0 = h_d + \alpha \Delta H_F \quad (9)$$

$$\alpha \cong \frac{m+1}{m+2} R_L^{m+1} + \frac{J}{2} R_L \quad (10)$$

式中 α ——微灌双向异径毛管进口工作压力计算参数

同理, 将 $\bar{h}^{\text{down}} \cong h_d$, $\Delta H_S^{\text{down}} = (L - L^{\text{up}}) S_0$, 式(5)和式(6)代入式(3), 并整理得毛管进口工作压力计算参数 α 为

$$\alpha \cong \frac{m+1}{m+2} \frac{(1 - R_L)^{m+1}}{r_D^{m+3}} - \frac{J}{2} (1 - R_L) \quad (11)$$

由于计算误差及毛管进口比的影响, 利用式(10)和式(11)计算的 α 可能有一定的偏差。但一般情况下偏差很小, 可以忽略。

1.3 水力流量偏差系数

水力流量偏差系数 C_{Vqh} 是指由水力因素 (包括摩阻损失与地形高差) 引起的流量偏差系数。 C_{Vqh} 的水力解析模型可直接应用于微灌毛管的水力设计^[18]。根据微灌双向异径毛管的水力特性, 微灌双向变径毛管的水力流量偏差系数 C_{Vqh} 是逆坡段毛管的水力流量偏差系数 C_{Vqh}^{up} 和顺坡段毛管的水力流量偏差系数 C_{Vqh}^{down} 的加权和, 即

$$C_{Vqh} = R_L C_{Vqh}^{\text{up}} + (1 - R_L) C_{Vqh}^{\text{down}} \quad (12)$$

借鉴文献[18], 逆坡段毛管的水力流量偏差系数 C_{Vqh}^{up} 可表示为

$$C_{Vqh}^{\text{up}} = \sqrt{c_1 - c_2 J^{\text{up}} + \frac{1}{12} J^{\text{up}^2} \frac{x \Delta H_F^{\text{up}}}{h_d}} \quad (13)$$

其中 $c_1 = [(m+1)/(m+2)]^2 / (2m+3)$

表 1 微灌双向变径毛管最佳支管位置参数 R_L 的计算值 ($m = 1.69$)

Tab. 1 Values for estimating design parameter of the best manifold position R_L ($m = 1.69$)

坡降比 J	管径比 r_D									
	3/5	2/3	7/10	3/4	7/9	4/5	6/7	7/8	8/9	9/10
0	0.71	0.67	0.65	0.62	0.61	0.60	0.57	0.56	0.55	0.55
0.1	0.68	0.65	0.63	0.60	0.58	0.57	0.54	0.56	0.52	0.51
0.2	0.67	0.63	0.61	0.58	0.56	0.55	0.51	0.53	0.49	0.48
0.3	0.66	0.62	0.60	0.56	0.54	0.53	0.48	0.50	0.46	0.45
0.4	0.65	0.61	0.58	0.54	0.52	0.50	0.46	0.47	0.43	0.42
0.5	0.64	0.59	0.57	0.53	0.50	0.48	0.43	0.44	0.40	0.39
0.6	0.64	0.58	0.55	0.51	0.48	0.46	0.41	0.42	0.38	0.37
0.7	0.63	0.57	0.54	0.49	0.47	0.44	0.39	0.39	0.35	0.34
0.8	0.62	0.56	0.53	0.48	0.45	0.42	0.36	0.37	0.33	0.31
0.9	0.61	0.55	0.51	0.46	0.43	0.41	0.34	0.34	0.30	0.29
1.0	0.60	0.54	0.50	0.44	0.41	0.39	0.32	0.32	0.28	0.27
1.1	0.59	0.52	0.49	0.43	0.40	0.37	0.30	0.30	0.26	0.24
1.2	0.59	0.51	0.48	0.41	0.38	0.35	0.28	0.28	0.24	0.22
1.3	0.58	0.50	0.46	0.40	0.37	0.34	0.26	0.25	0.21	0.20
1.4	0.57	0.49	0.45	0.39	0.35	0.32	0.24	0.23	0.19	0.18
1.5	0.56	0.48	0.44	0.37	0.34	0.30	0.22	0.21	0.17	0.16
1.6	0.55	0.47	0.43	0.36	0.32	0.29	0.20	0.20	0.16	0.14
1.7	0.55	0.46	0.42	0.35	0.31	0.28	0.19	0.18	0.14	0.12
1.8	0.54	0.45	0.41	0.33	0.29	0.26	0.17	0.16	0.12	0.10
1.9	0.53	0.44	0.40	0.32	0.28	0.25	0.15	0.14	0.10	0.08
2.0	0.53	0.43	0.39	0.31	0.27	0.23	0.14	0.12	0.08	0.06
2.1	0.52	0.42	0.37	0.30	0.25	0.22	0.12	0.11	0.07	0.05
2.2	0.51	0.41	0.36	0.29	0.24	0.21	0.11	0.09	0.05	0.03
2.3	0.50	0.41	0.36	0.28	0.23	0.19	0.09	0.08	0.04	0.01
2.4	0.50	0.40	0.35	0.26	0.22	0.18	0.08	0.06	0.02	—
2.5	0.49	0.39	0.34	0.25	0.21	0.17	0.07	0.05	—	—
2.6	0.48	0.38	0.33	0.24	0.20	0.16	0.05	0.03	—	—
2.7	0.48	0.37	0.32	0.23	0.19	0.15	0.04	0.02	—	—
2.8	0.47	0.36	0.31	0.22	0.18	0.14	0.02	—	—	—
2.9	0.46	0.36	0.30	0.21	0.16	0.13	0.01	—	—	—
3.0	0.46	0.35	0.29	0.20	0.15	0.12	—	—	—	—

注：“—”代表支管位于逆坡段毛管的末端,微灌毛管为单一管径(D^{down}),且单向顺坡布置,下同。

$$c_2 = (m + 1) / [(m + 2)(m + 3)]$$
$$J^{\text{up}} = \Delta H_S^{\text{up}} / \Delta H_F^{\text{up}} = -J / R_L^m$$

$$C_{Vqh}^{\text{down}} = \sqrt{c_1 - c_2 J^{\text{down}} + \frac{1}{12} J^{\text{down}^2} \frac{x \Delta H_F^{\text{down}}}{h_d}}$$

(16)

式中 $c_1、c_2$ ——计算参数

J^{up} ——逆坡段毛管的坡降比

将 $J^{\text{up}} = -J / R_L^m$ 和式(5)代入式(13),并整理得到

其中 $J^{\text{down}} = \Delta H_S^{\text{down}} / \Delta H_F^{\text{down}} = r_D^{m+3} J / (1 - R_L)^m$

式中 J^{down} ——顺坡段毛管的坡降比

将 $J^{\text{down}} = r_D^{m+3} J / (1 - R_L)^m$ 、式(5)和式(6)代入式(16),并整理得到

$$C_{Vqh}^{\text{up}} = \lambda^{\text{up}} \frac{x \Delta H_F}{h_d}$$

$$C_{Vqh}^{\text{down}} = \lambda^{\text{down}} \frac{x \Delta H_F}{h_d}$$

(14)

(17)

其中 $\lambda^{\text{up}} = R_L \sqrt{c_1 R_L^{2m} + c_2 R_L^m J + \frac{1}{12} J^2}$

式中 λ^{up} ——逆坡段毛管水力流量偏差系数计算参数

其中 $\lambda^{\text{down}} = (1 - R_L) \sqrt{c_1 \left[\frac{(1 - R_L)^m}{r_D^{m+3}} \right]^2 - c_2 \frac{(1 - R_L)^m}{r_D^{m+3}} J + \frac{1}{12} J^2}$

(15)

(18)

与 C_{Vqh}^{up} 类似,顺坡段毛管的水力流量偏差系数

C_{Vqh}^{down} 可表示为

式中 λ^{down} ——顺坡段毛管水力流量偏差系数计算参数

表 2 微灌双向变径毛管最佳支管位置参数 R_L 的计算值 ($m = 1.75$)

Tab.2 Values for estimating design parameter of the best manifold position R_L ($m = 1.75$)

坡降比 J	管径比 r_D									
	3/5	2/3	7/10	3/4	7/9	4/5	6/7	7/8	8/9	9/10
0	0.71	0.67	0.65	0.62	0.61	0.60	0.57	0.56	0.55	0.55
0.1	0.69	0.65	0.63	0.60	0.58	0.57	0.53	0.55	0.52	0.51
0.2	0.68	0.64	0.61	0.58	0.56	0.54	0.51	0.52	0.49	0.48
0.3	0.67	0.62	0.60	0.56	0.54	0.52	0.48	0.50	0.46	0.45
0.4	0.66	0.61	0.58	0.54	0.52	0.50	0.46	0.47	0.43	0.42
0.5	0.65	0.60	0.57	0.53	0.50	0.48	0.43	0.44	0.40	0.39
0.6	0.64	0.58	0.55	0.51	0.48	0.46	0.41	0.42	0.38	0.37
0.7	0.63	0.57	0.54	0.49	0.47	0.44	0.39	0.39	0.35	0.34
0.8	0.62	0.56	0.52	0.48	0.45	0.42	0.36	0.37	0.33	0.31
0.9	0.61	0.55	0.51	0.46	0.43	0.41	0.34	0.34	0.30	0.29
1.0	0.60	0.53	0.50	0.44	0.41	0.39	0.32	0.32	0.28	0.27
1.1	0.59	0.52	0.49	0.43	0.40	0.37	0.30	0.30	0.26	0.24
1.2	0.58	0.51	0.47	0.41	0.38	0.35	0.28	0.28	0.24	0.22
1.3	0.57	0.50	0.46	0.40	0.37	0.34	0.26	0.26	0.21	0.20
1.4	0.56	0.49	0.45	0.39	0.35	0.32	0.24	0.23	0.19	0.18
1.5	0.56	0.48	0.44	0.37	0.34	0.30	0.22	0.21	0.17	0.16
1.6	0.55	0.47	0.42	0.36	0.32	0.29	0.20	0.20	0.15	0.14
1.7	0.54	0.46	0.41	0.35	0.31	0.27	0.19	0.18	0.14	0.12
1.8	0.53	0.45	0.40	0.33	0.29	0.26	0.17	0.16	0.12	0.10
1.9	0.52	0.44	0.39	0.32	0.28	0.25	0.15	0.14	0.10	0.08
2.0	0.52	0.43	0.38	0.31	0.27	0.23	0.14	0.12	0.08	0.07
2.1	0.51	0.42	0.37	0.30	0.26	0.22	0.12	0.11	0.07	0.05
2.2	0.50	0.41	0.36	0.29	0.24	0.21	0.11	0.09	0.05	0.03
2.3	0.50	0.40	0.35	0.28	0.23	0.19	0.09	0.08	0.04	0.02
2.4	0.49	0.39	0.34	0.27	0.22	0.18	0.08	0.06	0.03	0.01
2.5	0.48	0.39	0.34	0.26	0.21	0.17	0.07	0.05	0.01	—
2.6	0.48	0.38	0.33	0.25	0.20	0.16	0.06	0.04	—	—
2.7	0.47	0.37	0.32	0.24	0.19	0.15	0.04	0.02	—	—
2.8	0.47	0.36	0.31	0.23	0.18	0.14	0.03	—	—	—
2.9	0.46	0.36	0.30	0.22	0.17	0.13	0.02	—	—	—
3.0	0.45	0.35	0.30	0.21	0.16	0.12	0.01	—	—	—

将式 (14)、式 (15)、式 (17) 和式 (18) 代入式 (12) 中,并整理得到微灌双向变径毛管水力流量偏差系数 $C_{V_{qh}}$ 的解析模型

$$C_{V_{qh}} = \lambda \frac{x \Delta H_F}{h_d}$$

(19)

其中 $\lambda = R_L^2 \sqrt{c_1 R_L^{2m} + c_2 R_L^m J + \frac{1}{12} J^2} + (1 - R_L)^2 \cdot$

$$\sqrt{c_1 \left[\frac{(1 - R_L)^m}{r_D^{m+3}} \right]^2 - c_2 \frac{(1 - R_L)^m}{r_D^{m+3}} J + \frac{1}{12} J^2}$$

(20)

式中 λ ——微灌双向变径毛管水力流量偏差系数计算参数

1.4 毛管极限长度

微灌双向异径毛管的极限长度 $L_{\max}$ 是指满足灌水器设计流量及灌水均匀度设计标准的最长毛管管长。以水力流量偏差系数为灌水均匀度设计指标,根据式 (19),推导了 $L_{\max}$ 的解析式为

$$L_{\max} = \frac{[C_{V_{qh}}]}{\lambda} \frac{(D^{\text{up}})^b h_d}{x F_c F_s K (N q_d)^m}$$

(21)

其中 $[C_{V_{qh}}] = \sqrt{1.57(1 - [C_U])^2 - C_{Vm}^2/n_p}$

式中 $[C_{V_{qh}}]$ ——水力流量偏差系数设计标准

$[C_U]$ ——克里斯琴森均匀系数设计标准

C_{Vm} ——灌水器制造偏差系数

n_p ——每株作物灌水器个数

2 设计步骤

在微灌双向异径毛管水力设计中,通常有 3 种设计情况:在已知毛管管径、管长及其它设计变量的条件下,设计最佳支管位置和进口工作压力,同时评价灌水均匀度;在已知毛管管径、灌水均匀度设计标准及其它设计变量的条件下,设计双向毛管极限管长和进口工作压力;在已知微灌双向异径毛管管长、灌水均匀度设计标准及其它设计变量的条件下,设计双向毛管管径和进口工作压力。运用建立的水力解析模型,提出了这 3 种设计情况下的微灌双向毛管水力设计步骤。

2.1 最佳支管位置与灌水均匀度

均匀坡地上,在已知双向毛管管径 D^{up} 和 D^{down} 、毛管长度 L 、灌水器设计流量 q_d 、灌水器流态指数 x 、灌水器流量系数 k 、灌水器制造偏差系数 C_{vm} 、每株作物灌水器个数 n_p 、灌水器间距 s_e 、局部水头损失扩大系数 F_s 及地形坡度 S_0 的条件下,设计双向异径毛管的最佳支管位置,进口工作压力及评价灌水均匀度的步骤为:

(1) 根据已知参数,分别计算参数 h_d 、 r_d 、 ΔH_S 、 ΔH_F 和 J 。

(2) 当 $m=1$ 时,根据 r_d 和 J 的值,根据式(8)计算参数 R_L ,当 $m=1.69$ 或 1.75 时,可根据 r_d 和 J 的值直接查表 1 或表 2 得到 R_L 的值。

(3) 根据 R_L 、 r_d 和 J 的值,分别利用式(9)和式(20)计算参数 α 和 λ 的值。

(4) 计算逆坡段毛管的长度 $L^{\text{up}} = [\text{Int}(R_L N) - 0.5]s_e$ 。

(5) 分别利用式(8)和式(19),根据 x 、 h_d 、 ΔH_F 、 α 和 λ 的值,计算双向微灌毛管进口工作压力 h_0 和水力流量偏差系数 C_{vqh} 。

(6) 计算灌水均匀度 $C_U = 1 - 0.798 \cdot \sqrt{C_{vqh}^2 + C_{vm}^2/n_p}$ 。

2.2 最佳支管位置与毛管极限管长

均匀坡地上,在已知双向毛管管径 D^{up} 和 D^{down} 、灌水器设计流量 q_d 、灌水器流态指数 x 、灌水器流量系数 k 、灌水器制造偏差 C_{vm} 、每株作物灌水器个数 n_p 、灌水器间距 s_e 、局部水头损失扩大系数 F_s 、地形坡度 S_0 及灌水均匀度设计标准 $[C_U]$ 的条件下,设计双向异径毛管的最佳支管位置、进口工作压力及极限长度的步骤为:

(1) 根据已知参数,分别计算参数 h_d 、 r_d 和 $[C_{vqh}]$ 。

(2) 假设毛管管长初始值为 L_a ,根据已知参数,计算参数 ΔH_S 、 ΔH_F 和 J 。

(3) 当 $m=1$ 时,根据 r_d 和 J 的值,根据式(8)计算参数 R_L ,当 $m=1.69$ 或 1.75 时,可根据 r_d 和 J 的值直接查表 1 或表 2 得到 R_L 的值。

(4) 根据 R_L 、 r_d 和 J 的值,分别利用式(9)和式(20)计算参数 α 和 λ 的值。

(5) 根据 $[C_{vqh}]$ 和其他参数,利用式(21)计算毛管长度 L_b 。

(6) 当 $|L_a - L_b| \leq 0.001 \text{ m}$ 时,微灌双向异径毛管极限长度 $L_{\max} = L_b$; 否则,调整 L_a 值,重复步骤(2)~(5),直到满足 $|L_a - L_b| \leq 0.001 \text{ m}$ 。

(7) 计算逆坡段毛管的长度 $L^{\text{up}} =$

$[\text{Int}(R_L(L_{\max}/s_e + 1)) - 0.5]s_e$ 。

(8) 根据 x 、 h_d 、 ΔH_F 和 α 的值,利用式(8),计算毛管进口工作压力 h_0 。

利用 Microsoft Excel“工具”菜单中提供的“单变量求解”功能,可以求解上述试算步骤。

2.3 最佳支管位置与毛管设计管径

在已知灌水器设计流量和灌水均匀度设计标准的条件下,微灌双向异径毛管的管径设计可分为 2 种情况:设计逆坡段毛管管径 D^{up} 或顺坡段毛管管径 D^{down} ; 设计逆坡段和顺坡段毛管管径 D^{up} 和 D^{down} 。根据建立的双向异径毛管各设计参数的水力解析模型,结合工程实践经验,分别提出了以上 2 种情况的管径设计步骤。

2.3.1 设计 D^{up} 或 D^{down}

以设计 D^{up} 为例,均匀坡地上,在已知微灌双向异径毛管顺坡段管径 D^{down} 、管长 L 、灌水器设计流量 q_d 、灌水器流态指数 x 、灌水器流量系数 k 、灌水器制造偏差系数 C_{vm} 、每株作物灌水器个数 n_p 、灌水器间距 s_e 、局部水头损失扩大系数 F_s 、地形坡度 S_0 及灌水均匀度设计标准 $[C_U]$ 的条件下,设计逆坡段毛管管径、最佳支管位置及进口工作压力的步骤为:

(1) 根据已知参数,分别计算参数 h_d 和 $[C_{vqh}]$ 。

(2) 从市场上的毛管商用管径中,选择一组大于 D^{down} 的毛管内径, $D^{\text{down}} < D_1 < D_2 < D_3 < \dots < D_n$ 。

(3) 选择 D_1 为 D^{up} ,根据已知参数,计算参数 r_d 、 ΔH_S 、 ΔH_F 和 J 。

(4) 当 $m=1$ 时,根据 r_d 和 J 的值,根据式(8)计算参数 R_L ,当 $m=1.69$ 或 1.75 时,可根据 r_d 和 J 的值直接查表 1 或表 2 得到 R_L 的值。

(5) 根据 R_L 、 r_d 和 J 的值,利用式(20)计算参数 λ 的值。

(6) 根据 λ 、 x 、 ΔH_F 和 h_d 的值,利用式(19)计算参数 C_{vqh} 。

(7) 比较 C_{vqh} 与 $[C_{vqh}]$,若 $C_{vqh} \leq [C_{vqh}]$,则 $D^{\text{up}} = D_1$,否则,选择下一个管径 D_m ($D_1 < D_m \leq D_n$),重复步骤(3)~(6),直到满足 $C_{vqh} \leq [C_{vqh}]$,则 $D^{\text{up}} = D_m$ 。

(8) 利用 D^{up} 和其他已知参数,根据 2.1 节中的设计步骤,分别计算参数 R_L 、 L^{up} 、 h_0 和 C_U 。

当已知 D^{up} ,设计 D^{down} 时:只需将上述步骤中的 D^{up} 换为 D^{down} ,且步骤(2)中选取的商用管径满足 $D_1 < D_2 < D_3 < \dots < D_n < D^{\text{up}}$,其余设计步骤相同。

2.3.2 设计 D^{up} 和 D^{down}

均匀坡地上,在已知微灌双向异径毛管管长 L 、灌水器设计流量 q_d 、灌水器流态指数 x 、灌水器流量

系数 k 、灌水器制造偏差 C_{V_m} 、每株作物灌水器个数 n_p 、灌水器间距 s_e 、局部水头损失扩大系数 F_S 、地形坡度 S_0 及灌水均匀度设计标准 $[C_U]$ 的条件下,设计毛管管径 D^{up} 和 D^{down} ,最佳支管位置及进口工作压力的步骤为:

- (1)根据已知参数,分别计算参数 h_d 和 $[C_{V_{qh}}]$ 。
- (2)从市场上的毛管商用管径中,选择一组毛管内径, $D_1 < D_2 < D_3 < \cdots < D_n$ 。
- (3)选择 D_1 为 D^{down} , D_2 为 D^{up} , 根据已知参数,计算参数 r_D 、 ΔH_S 、 ΔH_F 和 J 。
- (4)当 $m = 1$ 时,根据 r_D 和 J 的值,根据式(8)计算参数 R_L , 当 $m = 1.69$ 或 1.75 时,可根据 r_D 和 J 的值直接查表 1 或表 2 得到 R_L 的值。
- (5)根据 R_L 、 r_D 和 J 的值,利用式(20)计算参数 λ 的值。
- (6)根据 λ 、 x 、 ΔH_F 和 h_d 的值,利用式(19)计算参数 $C_{V_{qh}}$ 。
- (7)比较 $C_{V_{qh}}$ 与 $[C_{V_{qh}}]$, 若 $C_{V_{qh}} \leq [C_{V_{qh}}]$, 则

$D^{\text{down}} = D_1, D^{\text{up}} = D_2$, 否则, 选择下一组管径组合 $D^{\text{down}} = D_j, D^{\text{up}} = D_k$, 满足 $D_1 \leq D_j < D_k \leq D_n$, 重复步骤(3) ~ (6), 直到满足 $C_{V_{qh}} \leq [C_{V_{qh}}]$, 则 $D^{\text{down}} = D_j, D^{\text{up}} = D_k$ 。

(8)利用 D^{down} 、 D^{up} 和其他已知参数, 根据 2.1 节中的设计步骤, 分别计算参数 R_L 、 L^{up} 、 h_0 和 C_U 。

3 设计实例

通过 3 个设计实例验证本文方法的准确性和可靠性。设计实例中,毛管类型为聚乙烯(PE)管材,灌水器类型为管上式压力补偿式滴头,滴头水力性能及制造偏差系数 C_{V_m} 根据《农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法》^[19] 测定,作物类型分别为蔬菜(实例 1)和果树(实例 2 和实例 3)。表 3 分别给出了各设计实例的已知参数及设计参数。利用本文方法,根据上述设计步骤,分别计算了各实例的设计参数,结果见表 4。

表 3 实例 1~3 的已知参数和设计参数

Tab.3 Input data and design parameters for design cases 1 to 3													
实例	已知参数												设计参数
	逆坡毛管	顺坡毛管	毛管	滴头	局部水头	滴头设计	流量	流态	滴头制造	每株作物	地形	灌水均匀度	
	管径	管径	管长	间距	损失扩大	流量	系数	指数	偏差系数	滴头个数	坡度	设计标准	
	D^{up}/mm	$D^{\text{down}}/\text{mm}$	L/m	s_e/m	系数 F_S	$q_d/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	k	x	C_{Vm}	n_p	S_0	$[C_U]$	
1	18	12	160.0	0.5	1.10	2.4	0.70	0.5	0.07	2	0.03		$L^{\text{up}}、C_U、h_0$
2	20	14		0.5	1.15	2.4	0.90	0.4	0.10	1	0.04	0.90	$L^{\text{up}}、L_{\text{max}}、h_0$
3	16		200.0	1.0	1.20	2.6	0.80	0.5	0.05	1	0.02	0.95	$D^{\text{down}}、L^{\text{up}}、h_0$

表 4 实例 1~3 的设计结果

Tab.4 Design results for design cases 1 to 3					
实例	逆坡段毛管管长 L^{up}/m	毛管进口工作压力 h_0/m	灌水均匀度 C_U	毛管极限管长 L_{max}/m	毛管设计管径 $D^{\text{down}}/\text{mm}$
1	81.25	13.41	0.954		
2	164.25	16.87	0.904	312.5	
3	93.50	11.93	0.955		12

根据表 4 中的设计结果,利用已知进口压力及最佳支管位置和其他设计参数,基于能坡线法分别计算了 3 个实例中微灌双向异径毛管上每个灌

水器的工作压力,如图 2 所示。从图 2a 中可以看出,实例 1 的逆坡和顺坡毛管上灌水器平均工作压力均接近于灌水器设计工作压力 11.76 m;从图 2b 中可以看出,实例 2 的逆坡和顺坡毛管上灌水器平均工作压力均接近于灌水器设计工作压力 11.61 m;从图 2c 中可以看出,实例 3 的逆坡和顺坡毛管上灌水器平均工作压力均接近于灌水器设计工作压力 10.56 m。结合表 4 的设计结果证明:本方法是准确和可靠的,设计步骤可

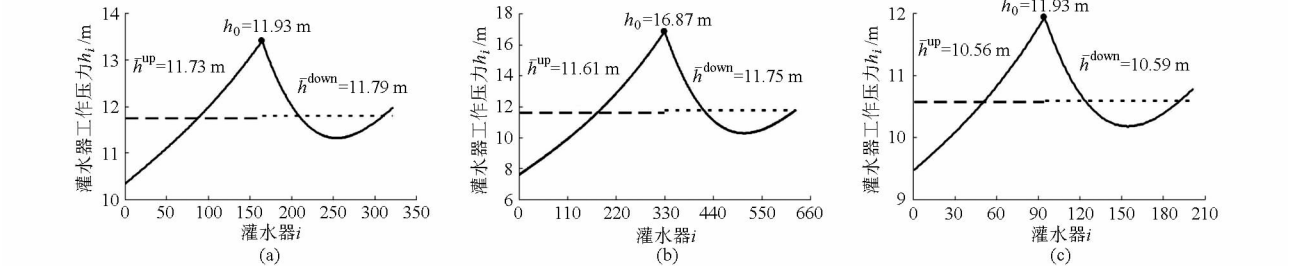


图 2 各设计实例中微灌双向异径毛管上灌水器工作压力分布

Fig.2 Pressure head distribution along paired tapered laterals according to the proposed approach

(a) 实例 1 (b) 实例 2 (c) 实例 3

以满足不同工程设计条件下的微灌双向异径毛管设计要求。

4 结论

(1)根据支管最佳位置位于支管两侧毛管上灌水器平均压力相等处的定义,基于能坡线法,构建了微灌双向异径毛管最佳支管位置,进口工作压力,水力流量偏差系数及极限管长的解析模型,分别计算了 $m = 1.69$ 和 1.75 时,常见管径比 r_D 、坡降比 J 和流量指数 m 条件下的最佳支管位置参数 R_L 的数值,并提出了 3 种常见设计情形下的微灌双向异径毛管设计步骤。

(2)运用该方法,只需借助于 Microsoft Excel 就能完成各种均匀坡条件下微灌双向异径毛管最佳支管位置、毛管进口工作压力、灌水均匀度、毛管极限长度、毛管设计管径等参数的设计。3 个设计实例中的顺坡和逆坡段毛管上灌水器平均工作压力均接近于灌水器设计工作压力,满足最佳支管位置的定义,验证了本设计方法和步骤的准确性和可靠性。

(3)提出的微灌双向异径毛管水力解析模型物理意义明晰,易于理解,设计步骤简单高效,可以直接应用于工程实践,提高微灌工程设计效率。但相比传统毛管布置方式,微灌双向异径毛管的定量适用条件还有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 张国祥. 微灌双向有坡毛管情况下支管位置的确定方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 98 - 104.
Zhang Guoxiang. Method of determining locations of branch pipe on slope with paired capillaries in micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 98 - 104. (in Chinese)
- 2 王新坤. 微灌系统遗传算法优化设计理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 135 - 176.
- 3 Keller J, Bliesner R D. Sprinkler and trickle irrigation[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990: 537 - 550.
- 4 蒋树芳, 康跃虎, 曲强. 坡地上灌水器流量均等微灌双向毛管设计方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 82 - 85, 129.
Jiang Shufang, Kang Yaohu, Qu Qiang. Designing paired laterals of micro-irrigation system with emitter in homologous discharge rate on slope field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 82 - 85, 129. (in Chinese)
- 5 Baiamonte G, Provenzano G, Giovanni R. Analytical approach determining the optimal length of paired drip laterals in uniformly sloped field[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(1): 04014042.
- 6 Kang Y H, Nishiyama S. Analysis and design of micro-irrigation laterals[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(2): 75 - 81.
- 7 王新坤, 蔡焕杰. 微灌毛管水力解析及优化设计的遗传算法研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 54 - 58.
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Study on genetic algorithms of hydraulic analysis and optimum design for micro-irrigation laterals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 54 - 58. (in Chinese)
- 8 王新坤, 蔡焕杰. 微灌坡地双向毛管最佳支管位置遗传算法优化设计[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 31 - 35.
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Optimal design for the best submain position of micro-irrigation on slope with paired laterals by genetic algorithms[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 31 - 35. (in Chinese)
- 9 王新坤. 基于遗传算法的微灌坡地双向毛管管径优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 108 - 111.
Wang Xinkun. Optimization of micro-irrigation bidirectional flow laterals diameter on sloping field based on genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 108 - 111. (in Chinese)
- 10 Juana L, Losada A, Rodriguez-Sinobas L, et al. Analytical relationships for designing rectangular drip irrigation units[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(1): 47 - 59.
- 11 Ju X L, Weckler R P, Wu P T, et al. New simplified approach for hydraulic design of micro-irrigation paired laterals[J]. Transactions of the ASABE, 2015, accepted for publication.
- 12 Yıldırım G. Hydraulic analysis and direct design of multiple outlets pipelines laid on flat and sloping lands[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 537 - 552.
- 13 GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- 14 Anyoji H, Wu I P. Statistical approach for drip lateral design[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(1): 187 - 192.
- 15 Valiantzas J. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(6): 300 - 305.
- 16 Zayani K, Hammami M. Design of level ground laterals in drip irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(5): 620 - 625.
- 17 Zayani K, Hammami M, Alouini A, et al. Design of non-zero uniformly sloping laterals in trickle irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(5): 419 - 425.
- 18 Ravikumar V, Ranganathan C R, Santhana Bosu S. Analytical equation for variation of discharge in drip irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(4): 295 - 298.
- 19 GB/T 17187—2009/ISO 9261 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.