

自压滴灌支管灌水单元设计方法

朱德兰¹, 吴普特^{1,2}, 李岚斌¹, 张琛¹, 王剑¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 国家节水灌溉杨凌工程中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了解决山地自压滴灌支管灌水单元水力设计问题, 以滴头制造偏差、水力偏差和微地形偏差产生的综合流量偏差率作为灌水均匀度衡量标准, 计算出支管灌水单元不同压力区允许水压力偏差和最大水压力, 根据不同压力区支管水压力递推关系, 确定出支管压力偏差分配系数, 将支管单元设计转变为支管设计和毛管设计; 支管设计采用两阶段设计法, 计算出支管各节点水压力, 根据该水压力和不同压力区允许最大水压力, 对支管进行压力单元的划分, 在不同压力区选择不同类型的滴头, 使滴头额定工作压力与地形高差提供的工作压力相匹配。研究结果可直接用于山地支管灌水单元设计, 计算可在 Excel 表格中完成, 设计方法简单实用。

关键词: 自压滴灌; 压力分区; 支管灌水单元; 压力偏差分配系数; 综合流量偏差率

中图分类号: S277 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)01-0059-04

Gravity-fed manifold subunit hydraulic design

Zhu Delan¹, Wu Pute^{1,2}, Li Lanbin¹, Zhang Chen¹, Wang Jian¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. National Engineering Center for Irrigation Water Savings, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to find design method of gravity-fed manifold subunit, the emitters discharge variation rate caused by hydraulic variation, emitter manufacturing variation and micro-topography variation were used as the criteria of irrigation uniformity. Then, the emitter discharge variation rate caused by hydraulic factor, the pressure head variation, and the maximum pressure head for different pressure sections were determined. By analyzing water pressure head relationship of different pressure units, the distribution coefficient of manifold pressure head variation for different pressure area was calculated, and the manifold subunit design was divided into independent processes for laterals and manifold. In the manifold design, a two-stage optimal design method was used. The size of each of the pressure sections was determined according to the pressure head distribution along the manifold. The different emitter types were chosen according to the nominal design pressure which best matches the available pressure at the entrance of each lateral. The design procedure can be applied in a spreadsheet application on a personal computer.

Key words: gravity-fed drip irrigation; pressure sections; manifold subunit; distribution coefficient of manifold pressure head variation; emitters combined discharge variation rate

由于山丘区滴灌可以利用山坡地形形成的地形高差加压, 实现自压滴灌, 从而节省了水泵等加压设备的投资和庞大的运行费用。因此, 山丘区自压滴灌具

有广阔的推广利用前景。

在滴灌工程设计方面, 国内外学者作了大量的研究。这些研究主要集中在滴灌均匀度评价^[1-3]、多

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家 863 计划项目(2010AA10A302); 国家科技支撑项目(2007BAD88B05); 国家 111 计划项目(111-2-16)

作者简介: 朱德兰(1969—), 女, 陕西杨凌人, 教授, 博士(dlzhu@126.com), 主要从事水资源高效利用研究。

吴普特(1963—), 男, 陕西杨凌人, 教授, 博士(gizwpt@vip.sina.com), 主要从事水资源高效利用研究。

口出流管设计^[4]以及管网优化等方面^[5-6]。Bhatnagar and Srivastava^[7]研究了一种山地梯田中的自压滴灌系统设计方法,发明了一种“星状”低压滴灌方式,研究表明,灌水均匀度在80%以上,但该方法适用于阶梯状分布的梯田中,所有区域均采用同一类型的低压滴灌,没有涉及压力区间的划分。截至目前,没有人对自压滴灌压力分区做过定量研究。

在山坡地自压滴灌系统中,支管垂直于等高线布置,毛管平行于等高线布置;如果支管进口水压力较低,沿支管方向,水压力应该自上而下逐渐增大。如果在毛管进口不安装调压装置,毛管内水压力自坡上到坡下亦逐渐增大。为了保证滴头在厂家推荐的最佳压力头(10~40 m)下工作,应将支管单元划分为几个不同的压力区,并在不同压力区选择不同类型的滴头,使滴头额定工作压力与地形高差提供的工作压力相匹配。本研究以一条支管灌水单元为研究对象,提出支管进口压力较低情况下,该单元压力区间的划分方法和设计程序。

1 支管灌水单元压力偏差

在考虑水力偏差、滴头制造偏差和田面微地形等情况下,支管灌水单元流量偏差率可表示为^[1]

$$q_{hvi} = q_v - q_{mvi} - \frac{x_i \Delta Z_i}{H_{si}} \quad (i = 1, 2, \dots, N_s) \quad (1)$$

式中 q_{hvi} 为第 i 压力区允许水力流量偏差率; q_v 为允许综合流量偏差率,按微灌设计规范选取; q_{mvi} 为第 i 压力区制造流量偏差率; x_i 为第 i 压力区滴头流态指数; ΔZ_i 为第 i 压力区田面最大局部高差, m; H_{si} 为第 i 压力区滴头平均工作水头, m; N_s 为压力分区数; i 的值自坡上到坡下增大。

滴头制造流量偏差率可按下式计算^[1]:

$$q_{mvi} = \frac{K_{\max i} - K_{\min i}}{K_{si}} \quad (2)$$

式中 $K_{\max i}, K_{\min i}$ 分别为第 i 压力区滴头最大和最小流量系数; K_{si} 为第 i 压力区滴头平均流量系数。

当滴头允许综合流量偏差率给定时,根据公式(1)和(2),不同压力区的允许水压力头偏差可按下式计算:

$$\Delta H_{si} = \frac{q_{hvi}}{x_i} \left[1 + 0.15 \left(\frac{1 - x_i}{x_i} \right) q_{hvi} \right] H_{si} \quad (3)$$

式中 ΔH_{si} 为第 i 压力区滴头允许水压力头偏差, m。

不同压力区满足允许水压力头偏差的最大和最

小滴头工作水压力头可按下式计算:

$$\begin{cases} H_{\max i} = (1 + 0.65q_{hvi})^{1/x_i} H_{si} \\ H_{\min i} = (1 - 0.35q_{hvi})^{1/x_i} H_{si} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $H_{\max i}$ 和 $H_{\min i}$ 分别为第 i 压力区内最大和最小水压力头, m。

当毛管进口未安装调压装置时,支管灌水单元的允许压力头偏差由支管和毛管共同承担,即:不同压力区压力头偏差 ΔH_{si} 等于支管压力头偏差和毛管压力头偏差之和,计算式为

$$\Delta H_{si} = \Delta H_{smi} + \Delta H_{sLi} \quad (5)$$

式中 ΔH_{smi} 为第 i 压力区支管允许压力头偏差, m; ΔH_{sLi} 为第 i 压力区毛管允许压力头偏差, m。

为了保证大部分滴头在适宜水头下工作,支管水压力沿顺坡方向应该呈增大趋势,每个压力区的最大压力处发生在该区内最底部的毛管进口。因此,第 i 压力区的最大水压力头近似等于第 $(i-1)$ 区最大水压力头与第 i 区支管压力头偏差之和:

$$H_{\max i} \approx H_{\max(i-1)} + \mu_i \Delta H_{si} \quad (6)$$

式中 $H_{\max(i-1)}$ 为第 $(i-1)$ 压力区最大水压力头, m; μ_i 为第 i 压力区支管压力偏差分配系数,是 0~1 之间的数。根据式(6),不同压力区支管压力偏差分配系数可按下式计算:

$$\mu_i = \frac{H_{\max i} - H_{\max(i-1)}}{\Delta H_{si}} \quad (7)$$

不同压力区分配给支管的允许压力头偏差按下式计算:

$$\Delta H_{smi} = \mu_i \Delta H_{si} \quad (8)$$

不同压力区分配给毛管的允许压力头偏差按下式计算:

$$\Delta H_{sLi} = (1 - \mu_i) \Delta H_{si} \quad (9)$$

当支管和毛管的允许压力头偏差确定后,支管灌水单元的水力计算转化为毛管设计和支管设计。

2 毛管水力设计

在田块长度一定时,可以根据田块长度确定毛管长度。由于毛管沿等高线布置,毛管铺设方向坡度为 0,毛管实际水头损失应小于允许水头损失,即

$$\frac{K f_1 f_2 L_i Q_i^{1.75}}{D_{Li}^{4.75}} \leq (1 - \mu_i) \Delta H_{si} \quad (10)$$

式中 K 为考虑局部水头损失的扩大系数, $K \geq 1$; f_1 为多口系数(当孔口数大于 30 时, $f_1 = 0.364$); f_2 为摩擦因数(在 Blasius 方程中,对于 PE 管, $f_2 = 0.505$); Q_i 为第 i 压力区毛管进口流量, L/h; D_{Li}

为第 i 压力区毛管直径, mm; L_{Li} 为第 i 压力区毛管长度, m.

式(10)可转化为

$$D_{Li} \geq \left[\frac{Kf_2 L_{Li} Q_j^{1.75}}{(1 - \mu_i) \Delta H_{ai}} \right]^{1/4.75} \quad (11)$$

3 支管水力设计

3.1 支管管径计算

由于长流道滴头和压力补偿式滴头具有良好的水力性能,而且最佳的工作压力头范围在 10 ~ 40 m 之间,因此,支管管径的变化应该保证顺坡方向支管压力总体呈增加趋势,但在局部管径突然变小的位置有微小降低,这种微小变化对不同压力区的最大和最小压力没有影响,而且在该压力范围之内变化,总的地形坡度依然大于水力坡度,支管最大水压力发生在地形的最低点. 则支管总水头损失为

$$H_{fma} = J_m L_m + H_{m0} - H_{mva} \quad (12)$$

式中 H_{fma} 为支管允许水头损失, m; J_m 为沿支管方向的地面坡度(对于顺坡, $J_m > 0$; 对于逆坡, $J_m < 0$); L_m 为支管长度, m; H_{m0} 为支管进口水头, m; H_{mva} 为支管末端水头, m.

当支管允许水头损失已知时,支管管径可按下进行初步优化设计^[4]:

$$D_j = Q_j^{0.259} \left(\frac{Kf_2 S_L \sum_{i=1}^{N_L} Q_j^{0.519}}{H_{fma}} \right)^{0.211} \quad (13)$$

式中 N_L 为沿支管方向的毛管数; D_j 为第 j 管段的直径, mm; S_L 为毛管间距, m; Q_j 为第 j 管段的流量, L/h; j 值为支管管段和节点编号,支管进口节点编号为 0,第一管段和第一条毛管进口编号为 1,依次沿坡度向下方向逐渐增大,最末一条毛管进口节点编号为 N_L .

根据式(13)计算得到支管连续变化的管径,采用该连续管径得到的支管水头损失之和为 H_{fma} . 在该管径的变化范围内,参考市场上可获得的标准管径及施工可接受的变径数 N_ζ (一般 2 ~ 4 种),选择几种标准管径,调整连续管径为标准管径,在 Excel 表格中通过试算的方法对连续管径进行标准化处理,使标准化管径满足下式:

$$\sum_{i=1}^{N_L} \left(Kf_2 \frac{Q_j^{1.75}}{D_\zeta^{4.75}} S_L \right) \leq H_{fma} \quad (14)$$

式中 D_ζ 为第 ζ 种标准管径, mm; ζ 从 1 ~ N_ζ 变化; N_ζ 为标准管径数.

支管节点水压力头递推公式为

$$H_{mj} = H_{m(j-1)} + J_m S_L - H_{mj} \quad (15)$$

式中 H_{mj} 和 $H_{m(j-1)}$ 分别为沿支管方向第 j 和第 $j-1$ 条毛管进口水头, m; H_{mj} 为支管第 j 管段(第 $j-1$ 节点到第 j 节点之间)水头损失, m.

3.2 支管进口水压力

支管进口水压力必须满足低压区滴头工作压力和管道水头的要求. 根据文献[8-9],滴头最小工作压力必须与田面微地形相匹配,应满足公式

$$H_{a1} \geq \frac{x \Delta Z}{q_{sv}} \quad (16)$$

式中 ΔZ 为田面最大局部高差, m; H_{a1} 为低压区滴头设计工作压力头, m; q_{sv} 为微地形流量偏差率, $q_{sv} \leq 0.05$. 在低压区,为了保证较大区域能进行滴灌,取 $q_{sv} = 0.05$.

靠近水源的低压力区,支管进口水头必须满足滴头设计水头和摩擦损失的要求,而且支管压力偏差分配系数值必须在 0 ~ 1 之间变化. 根据式(6),低压力区支管进口水头必须满足下式:

$$H_{m0} > (H_{max1} - \Delta H_{s1}) \quad (17)$$

式中 H_{max1} , ΔH_{s1} 分别为低压力区的最大水压力头和压力头偏差, m.

4 应用举例

榆林地区清涧县枣园山地滴灌系统,枣树株距 3 m,行距 4 m,枣树栽植在水平阶上,毛管沿水平阶布置,支管垂直等高线布置;在该系统中有一支管,支管进口水头 $H_{m0} = 5$ m,长 $L_m = 100$ m,沿支管方向的地面坡度为 0.5,每一个水平阶布置一条毛管,毛管间距 $S_L = 4$ m,毛管数 $N_L = 25$;毛管双向布置,根据地形尺寸,每条毛管长度均为 80 m,则 $L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = 80$ m. 沿支管方向分 3 个压力区,初步选择 3 种类型的滴头,滴头参数为: $q_{a1} = q_{a2} = q_{a3} = 3$ L/h; $H_{a1} = 5$ m; $H_{a2} = 6$ m; $H_{a3} = 10$ m; $x_1 = 0.4$, $x_2 = x_3 = 0.2$; $K_{max1} = 1.36$; $K_{max2} = 2.11$; $K_{max3} = 1.92$; $K_{min1} = 1.32$; $K_{min2} = 1.99$; $K_{min3} = 1.84$; $K_{a1} = 1.34$; $K_{a2} = 2.10$; $K_{a3} = 1.89$; 滴头间距为 1.5 m (每棵树 2 个滴头),每条毛管上的滴头数为 160 个. 枣园沿毛管方向最大田面局部高差均为 0.5 m,取灌水单元允许流量偏差率为 $q_v = 0.25$.

根据式(15)验证低压区的工作压力是否满足要求,已知 $\Delta Z = 0.5$ m, $x = 0.5$ 和 $q_{sv} = 0.05$,计算得 $H_{a1} = 5$ m; 根据式(1)计算水力流量偏差率 q_{sv} , 3

个压力区水力流量偏差率分别为0.17、0.18和0.20 m;利用式(3)计算不同压力区允许压力偏差,分别为1.75、5.03和9.64 m;利用式(4)计算不同压力区允许最大水压力头、允许最小水压力头和最大水压力头分别为6.17、10.32和18.3 m,此压力头可视作每个压力区支管末端水压力头;根据式(7)计算支管压力偏差分配系数,它们分别为0.67、0.82和0.83,这样,可以将支管单元设计分解为毛管设计和支管设计;利用式(11)计算毛管最小管径,3个压力区毛管直径分别为19.45、17.78和15.19 mm,参考市场上可获得的管径,可选择内径为20.4、18.0和16.0 mm 3种规格的PE管;根据式(12)计算支管允许水头损失,利用 $H_{\max 3} = 18.3$ m, $H_{m0} = 5$ m, $J_m = 0.4$ 和 $L_m = 100$ m,计算得支管允许水头损失 $H_{\text{ima}} = 26.7$ m;利用式(13)计算得到支管优化连续管径变化范围为18.99 ~ 43.74 mm,支管水头损失之和为26.7 m,然后参考市场上的标准管径和连续管径变化范围,选择3个标准管径45.2、36.2、28.8 mm,对应支管分段长度分别为32、36和32 m,支管水头损失之和为26.36 m (< 26.7 m);利用式(15)推算支管节点(毛管进口)压力,最大压力发生在末端为18.64 m处;考察支管节点压力,第4条毛管进口压力头为6.55 m,第一区允许最大水压力头为6.17 m,故第1~3条毛管为第一压力区;第15条毛管进口压力头为10.69 m,第二区允许最大水压力头为10.32 m,故第4~14条毛管为第二压力区;第25条毛管进口压力头为18.64 m,第三区允许最大水压力头为18.3 m,故第15~25条毛管为第三压力区。

5 结论

本研究提出了在该情况下,在满足灌水均匀度基础上的支管压力分区方法,在不同压力区采用不同类型的滴头,进而提出该灌水单元水力设计程序。设计结果可直接用于工程施工。但是,本研究仅提出了支管工作的一种情况(内水压力沿支管逐渐增大);对于其他情况,例如内水压力沿支管逐渐减小或不变的情况,有待进一步研究。

支管进口水压力应满足低压区滴头设计工作压力和水头损失的要求,否则,会造成有些滴头不出水的现象;滴头设计工作压力应保证由于微地形而产生的流量偏差不能过大(一般小于5%),且滴头工作压力越低,田面要求越平整。

参考文献(References)

- [1] 张国祥. 考虑三偏差因素的滴灌系统流量总偏差率[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 72-78.
Zhang Guoxiang. Calculating the total flow deviation rate of drip-irrigation system based on three deviation rates [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 72-78. (in Chinese)
- [2] Keller J, Bliesner R D. *Sprinkler and Trickle Irrigation* [M]. New Jersey: The Blackburn, 1990: 498-508.
- [3] Zhu Delan, Wu Pute, Merkle G P, et al. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field micro-topography variation [J]. *Irrigation and Drainage*, 2009, 59(1): 1-12.
- [4] 朱德兰, 吴普特, 牛文全. 用两级优化法进行喷微灌支管设计[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 608-612.
Zhu Delan, Wu Pute, Niu Wenquan. Two grades optimal design of submain manifold for sprinkle irrigation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(5): 608-612. (in Chinese)
- [5] Dandy G C, Hassanli A M. Optimum and operation of multiple subunit drip irrigation system [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1996, 122(5): 265-275.
- [6] Kale R V, Singh R P, Mahar P S. Optimal design of pressurized irrigation subunit [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 2008, 134(2): 137-146.
- [7] Bhatnagar P R, Srivastava R C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest himalayas [J]. *Irrigation Science*, 2003, 21(4): 151-157.
- [8] 朱德兰, 吴普特, 张青峰, 等. 微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究[J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 22-26.
Zhu Delan, Wu Pute, Zhang Qingfeng, et al. Study on the emission uniformity for the emitter under the condition of farmland micro-terrain action [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(1): 22-26. (in Chinese)
- [9] 朱德兰, 吴普特, 王艳群, 等. 滴头设计工作压力计算方法研究[J]. 排灌机械, 2005, 23(5): 31-34.
Zhu Delan, Wu Pute, Wang Yanqun, et al. Study on the calculation method of operation pressure of emitters [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(5): 31-34. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)