排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 4 月 Apr. 2013 | 第 31 卷 第 4 期 Vol. 31 No. 4
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.04.013

滴头最大流量偏差率计算方法及影响因素评价


朱德兰

朱德兰，吴普特，张林
（西北农林科技大学中国旱地节水农业研究院，陕西 杨凌 712100）

摘要： 首先分析了滴头水力特征曲线方程中流量系数分布规律，当流量系数服从正态分布时，流量系数在其平均值的±3 倍标准差之间变化的概率为 99.73%（近似于 100%），因此流量系数最小值为平均值减 3 倍标准差，最大值为流量系数平均值加 3 倍标准差，在此基础上提出了综合考虑水力偏差、制造偏差和微地形偏差的综合流量偏差率计算公式；然后以制造偏差系数、流态指数、压力差、平均工作水头及田面局部高差作为影响因子进行流量偏差率及毛管造价敏感性分析. 结果表明：对流量偏差率影响程度由大到小的顺序为滴头制造偏差系数、滴头流态指数、压力偏差. 当制造偏差系数大于 0.04 时，毛管造价急剧增大，在设计中应尽可能选择制造偏差系数小、流态指数小的滴头. 对于常规滴灌系统，当滴头工作水头大于 10 m 时，田面局部高差对流量偏差率影响可忽略.

关键词： 滴头；流量系数；流量偏差率；制造偏差系数；流态指数
中图分类号： S277.9　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1674-8530(2013)04-0340-05

Calculation method of the maximum flow variation and evaluation of factors for micro-irrigation engineering

Zhu Delan, *Wu Pute*, *Zhang Lin*
(Institute of Water Saving Agriculture of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The distribution characteristic of emitters' flow coefficient is analyzed. When flow coefficient complies with normal distribution, the probability of flow coefficient fluctuating at ±3 times standard deviations is 99.73% (approximating 100%). Thus, the minimum flow coefficient is average flow coefficient minus 3 times standard deviation and the maximum flow coefficient is average flow coefficient plus 3 times standard deviation. Based on the above analysis, a comprehensive flow variation rate calculation formula, taking hydraulic variation, manufacture variation and micro-terrain variation into consideration, is presented. Then, with emitter manufacturing variation coefficient, flow exponent, pressure difference and average field roughness height as influential factors, flow variation rate and lateral cost sensitivity were analyzed. The results show that emitter manufacturing variation coefficient is the most influential factor, followed by flow exponent and pressure difference. The lateral cost increases dramatically when manufacturing variation coefficient is larger than 0.04. In designing, emitters with minimal manufacture variation and minimal flow exponent should be elected. For normal drip irrigation systems, when the emitter's water-drop is larger than 10m, the effects of local height differences in fields on flow variation can be ignored.

Key words: emitters; flow coefficient; flow variation rate; emitter manufacturing variation coefficient; flow exponent

收稿日期： 2012-07-04
基金项目： “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B00)；教育部国家外国专家局“111”计划项目(B12007)
作者简介： 朱德兰(1969—)，女，陕西杨凌人，教授，博士生导师(dlzhu@126.com)，主要从事节水灌溉理论与新技术研究.
吴普特(1963—)，男，陕西杨凌人，教授，博士生导师(通信作者，wupt2000@126.com)，主要从事水资源高效利用研究.

滴灌灌水均匀度影响因素主要有水头偏差、滴头制造偏差、田面平整度、滴头堵塞状况、温度变化、计算公式的精度、滴头的布置形式与组合等[1-3]. 自从 Keller 等[4]提出考虑制造偏差和水头偏差的均匀系数计算公式以来，国内外许多学者对考虑制造偏差和水力偏差的均匀度评价方法进行了大量的研究[5-7]，美国微灌工程手册中使用了 Keller 提出的公式，但公式尚存在诸多自相矛盾的地方[8]. Bralts[9]对不同因素（滴头间距、堵塞、滴头数量、制造偏差、水流偏差、温度）与均匀度指标关系做了研究，但研究仅停留在每个因素对均匀度影响的定性描述阶段，没有提出能够指导工程设计的计算公式. 朱德兰等[10]假设制造系数和地表糙度符合正态分布，在对水力因素、制造因素、微地形因素进行水力学解析的基础上，通过计算机模拟和回归统计分析的方法推导出田面微地形因素、滴头制造因素、水力因素影响下的综合流量偏差系数计算公式. 张国祥[11]提出了水力偏差、滴头制造偏差及高程偏离三因素最不利组合的结果——流量总偏差率的计算式，并提出允许流量总偏差率的建议值，由于公式中包含了流量系数最大值和最小值，因而在实际工程设计中的应用受到了限制. 文中从概率论出发，研究流量系数分布规律，进而完善文献[11]提出的综合流量偏差率计算方法，并对流量偏差率影响因素敏感性进行分析.

1　考虑三因素的综合流量偏差率

张国祥[11]于 2006 年提出的考虑微地形、水头偏差、制造偏差最不利组合情况下滴头综合流量偏差率表达式为

$$q_v = q_{vm} + q_{vz} + q_{vh}, \tag{1}$$

式中：q_v 为滴头综合流量偏差率；q_{vm} 为制造流量偏差率；q_{vz} 为微地形流量偏差率；q_{vh} 为水头流量偏差率.

制造流量偏差率是指忽略微地形偏差和水力偏差时的流量偏差率，可表达为

$$q_{vm} = \frac{k_{max}H_{avg}^x - k_{min}H_{avg}^x}{q_{avg}} = \frac{k_{max}H_{avg}^x - k_{min}H_{avg}^x}{k_{avg}H_{avg}^x} = \frac{k_{max} - k_{min}}{k_{avg}}, \tag{2}$$

式中：k_{max} 为滴头最大流量系数；k_{min} 为滴头最小流量系数；k_{avg} 为滴头平均流量系数；q_{avg} 为滴头平均流量，L/h；H_{avg} 为滴头平均工作水头，m.

文献[12]推导了微地形流量偏差率，其表达式为

$$q_{vz} = \frac{x\Delta Z}{H_{avg}}, \tag{3}$$

式中：x 为流态指数；ΔZ 为最大田面局部高差，m.

当给定允许综合流量偏差时，由式(1)计算允许水头流量偏差率，则允许水头偏差[13]为

$$\Delta H = \frac{q_{vh}}{x}\left(1 + 0.15\frac{1-x}{x}q_{vh}\right)H_{avg}, \tag{4}$$

式中：ΔH 为允许水头偏差，m.

文献[13]指出该公式的适用范围为 $0.490 \leqslant x \leqslant 0.762$，式(4)被编入微灌工程设计规范[14]中，该设计规范仅考虑了水力偏差. 式(1)-(3)的提出无疑是微灌工程设计的一大进步，但是，式(2)中的 k_{max} 和 k_{min} 只能通过试验的方法确定，给工程设计者造成了不便，因此，该公式的应用性不强.

2　流量系数分布规律分析

由于流量系数服从正态分布，则滴头水力特征曲线方程可表示为

$$q = kH^x = (k_{avg} \pm \mu\sigma)H^x, \tag{5}$$

式中：q 为滴头流量，L/h；k 为流量系数；H 为滴头工作压力，m；μ 为标准正态分布随机数；σ 为制造系数标准差，计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (k_i - k_{avg})^2}{N-1}}. \tag{6}$$

滴头制造偏差系数计算公式为

$$C_{vm} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (k_iH^x - k_{avg}H^x)^2}{N-1}}}{k_{avg}H^x} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (k_i - k_{avg})^2}{N-1}}}{k_{avg}} = \frac{\sigma}{k_{avg}}, \tag{7}$$

式中：C_{vm} 为制造偏差系数；k_i 为任一滴头流量系数；N 为统计滴头数.

当流量系数符合正态分布时，流量系数值的次数分布表现为多数集中于算术平均值附近，离平均数越远，其相应的出现次数越少，且在算术平均值左右相等，当 $|k - k_{avg}| \geqslant 3\sigma$ 时 k 值出现的次数极少，其出现概率值仅为 0.27%，即 k 值在 $[k_{avg} - 3\sigma, k_{avg} + 3\sigma]$ 区间出现的概率为 99.73%（近似于 100%），因此，可认为

$$k_{min} = k_{avg} - 3\sigma = k_{avg}(1 - 3C_{vm}), \tag{8}$$

$$k_{max}=k_{avg}+3\sigma=k_{avg}(1+3C_{vm})\ . \tag{9}$$

滴头综合流量偏差率为

$$q_v=6C_{vm}+q_{vh}+\frac{x\Delta Z}{H_{avg}}, \tag{10}$$

式中:ΔZ 为最大田面局部高差,m.

当给定允许流量偏差率、滴头制造偏差系数、滴头平均工作压力及田面局部高差时,可根据式(10)计算水力流量偏差率 q_{vh},利用式(4)计算允许水头偏差,然后根据常规设计方法,在管长(或管径)已知情况下,确定管道直径(或长度),并推算出毛管进口水头.

3 流量偏差率影响因素敏感性分析

以滴头制造偏差系数 C_{vm}、滴头流态指数 x、平均工作水头 H_{avg}、水头偏差 ΔH 和田面局部高差 ΔZ 作为流量偏差率影响因子,进行敏感性分析,选取 C_{vm},x,H_{avg},ΔH 和 ΔZ 的基数值分别为 0.03,0.5,10 m,3 m 和 0.2 m 进行分析,具体方法为保持其他参数值不变,只改变某个参数值,改变值分别为基数值的 20%,40%,60%,80%,100%,120%,140%,160%,180%,即 C_{vm}的变化范围为 0.006 0 ~ 0.005 4,x 的变化范围为 0.10 ~ 0.90,H_{avg}的变化范围为 2 ~ 18 m,ΔH 的变化范围为 0.6 ~ 5.4 m,ΔZ 的变化范围为 0.04 ~ 0.36 m,敏感性分析结果如图 1 所示. 其中,F_p 为影响因素变化百分数,q_{vp}为流量偏差率变化百分数. 由图可以看出,流量偏差率随制造偏差系数、流态指数、水头偏差的增大而增大,当滴头制造偏差系数、滴头流态指数、水头偏差变化百分比为 20% ~ 180% 时,引起的流量偏差率变化百分比分别为 -42.30% ~ 42.32%,-37.66% ~ 37.52%,-35.37% ~ 35.88%,对流量偏差率影响程度由大到小的顺序为滴头制造偏差系数、滴头流态指数、水头偏差. 在实际工程设计中,应尽可能选择制造偏差系数小、流态指数小的滴头,而水头偏差对流量偏差率的影响较小,因此可适当放宽水头偏差,进而减小管道直径和投资. 由图 1 还可以看出,流量偏差率随平均工作水头的增大而减小,当平均工作水头小于 5 m 时,曲线的斜率急剧增大,即流量偏差急剧增大. 为了减小流量偏差,在常规的滴灌系统中,设计时平均工作水头应大于 5 m. 当滴头工作水头为 10 m 时,田面局部高差对流量偏差率影响的百分比在 -2.340% ~ 2.358% 变化,可忽略. 但是,目前的微灌工程技术规范[13]仅仅对水头偏差作了限制,而忽略了其他因素对流量偏差的影响.

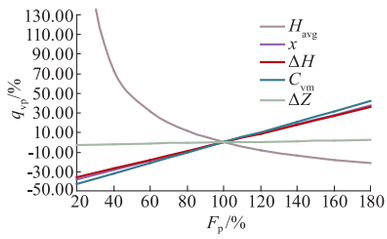


图 1 流量偏差率影响因素敏感性分析

Fig. 1 Sensitive analysis of flow variation influence factors

4 毛管造价影响因素敏感性分析

流量偏差率越小,灌水均匀度越高,系统造价也越高. 当给定流量偏差率、选定滴头及已知田面局部高差时,利用式(10)计算水头流量偏差率,然后根据式(4)计算水压力偏差,当毛管铺设地面坡度为 0 时,水压力偏差等于毛管水头损失,毛管直径计算公式为

$$D=\left(\frac{fQ^{1.75}L}{\Delta H}\right)^{\frac{1}{4.75}}, \tag{11}$$

式中:D 为毛管直径,mm;f 为水头损失系数;Q 为毛管进口流量,L/s;L 为毛管长度,m.

毛管管道材料投资[14]计算公式为

$$C_{pipe}=\beta_1 D^2 L, \tag{12}$$

式中:C_{pipe}为管道材料投资,元;β_1为管道价格因子,元/m^3.

利用 100 m 长的毛管进行敏感性分析,毛管上安装滴头的额定流量为 3.0 L/h,滴头间距为 0.3 m,管道价格因子为 0.005 元/m^3,给定允许流量偏差率为 0.34,选取 C_{vm},x,H_{avg}和 ΔZ 的基数值分别为 0.03,0.5,10 m 和 0.2 m 进行分析,影响因素变化百分比与造价变化百分比之间的关系如图 2 所示. 其中,C_p 为毛管造价变化百分数.

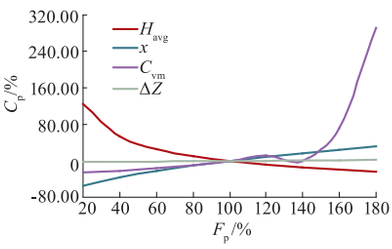


图 2 毛管造价影响因素敏感性分析

Fig. 2 Sensitive analysis of lateral cost influence factors

从图可以看出,毛管造价随滴头制造偏差系数、滴头流态指数、田面局部高差的增大而增大,当

滴头制造偏差系数、滴头流态指数、田面局部高差变化百分比为 *20%* ~180% 时,引起的毛管造价变化百分比分别为 -25.34% ~291.29%, -53.97% ~32.17%, -2.21% ~2.38%. 当流态指数和制造偏差系数小于基准值时,流态指数变化对造价影响大于制造偏差系数,当流态指数和制造偏差系数大于基准值时,流态指数变化对造价影响小于制造偏差系数. 从图 2 还可以看出,当制造偏差系数大于 0.04 时,毛管造价急剧增大. 造价对田面局部高差变化最不敏感,可忽略.

5　流量总偏差率上限值分析

在常规滴灌系统中,滴头平均工作水头一般取 10 m,如果田面局部高差取 0.2 m,取水力流量偏差率 0.10,当制造偏差系数在 0.01 ~0.05 变化时,综合流量偏差率在 0.17 ~0.41 变化,取水力流量偏差率 0.20,综合流量偏差率在 0.27 ~0.51 变化(见表 1). 如果仍按照现行规范规定水头流量偏差率(q_{vh} < 0.10),根据文献[14]规定综合流量偏差率分为 3 档: 0.25,0.28,0.32; 经济效益高、种植精细、对灌水质量要求高的选小值, 反之选大值. 那么,对灌水器质量标准应重新划分为 C_{vm} < 0.02,质量为优; 0.02 ≤ C_{vm} ≤ 0.04,合格; C_{vm} > 0.04,不合格. 在实际生产中,对于长流道滴头和迷宫流道滴头,制造偏差系数容易满足小于 0.04 的要求.

表 1　制造偏差系数与综合流量偏差率关系

Tab. 1　Relationship between manufacturing variation factors and flow variation rates

C_{vm}	q_{vh}	
	0.10	0.20
0.01	0.17	0.27
0.02	0.23	0.33
0.03	0.29	0.39
0.04	0.35	0.45
0.05	0.41	0.51

6　结　论

1) 从概率论角度出发完善了综合考虑水力偏差、滴头制造偏差、微地形偏差的滴头综合流量偏差率计算公式,该公式更容易在工程实践中应用.

2) 从流量偏差率影响因素对流量偏差率及毛管造价的敏感性分析可以看出,制造偏差系数和流态指数的变化对流量偏差率和毛管造价的影响均很敏感,当制造偏差系数大于 0.04 时,毛管造价急剧增大,所以在工程设计中应尽可能选择制造偏差系数小的滴头,以制造偏差系数为 0.04 作为判断灌水器是否合格的标准.

3) 滴头流态指数对毛管造价的影响也较大,选用流态指数小的滴头将大幅度降低毛管造价.

4) 由于本研究提出的考虑三因素的流量偏差率公式可直接应用于微灌工程设计中,因此研究结果有助于完善微灌技术规范,有利于激励厂家制造高质量的灌水器,而且也促使微灌工程设计者在工程设计中考虑制造偏差的影响.

参考文献(References)

[1] 朱德兰, 吴普特, 王剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 29(2): 175 -179.
Zhu Delan, Wu Pute, Wang Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigationon uniformity and lateral cost[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 29(2): 175 -179. (in Chinese)

[2] 王洪源, 李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 47 -51.
Wang Hongyuan, Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 47 -51. (in Chinese)

[3] 翟国亮,陈刚,鞠花,等. 全补偿微灌系统灌水均匀度参数之间的关系分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 61 -65.
Zhai Guoliang, Chen Gang, Ju Hua, et al. Analysis of relationships among different parameters of irrigation uniformity in fully-compensated micro-irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 61 -65. (in Chinese)

[4] Keller J, Bliesner R D. Sprinkler and Trickle Irrigation[M]. New Jersey: The Blackburn Press, 1990.

[5] Juana J, Leonor R S. Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1): 12 -26.

[6] Yildirim G. Analytical relationships for designing multiple outlets pipeline[J]. J Irrig Drain Eng, 2007, 133(2): 140 -155.

[7] Bralts V F, Wu I P, Gitlin H M. Manufacturing variation

and drip irrigation uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(1): 113 - 119.
[8] 张国祥. 用凯勒均匀度进行微灌系统设计的质疑[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 6 - 10.
Zhang Guoxiang. Query about micro-irrigation system design using Keller Uniformity [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 6 - 10. (in Chinese)
[9] Bralts V F. The effects of emitter flow variation on the design of single and dual chamber drip irrigation systems[D]. Honolulu: University of Hawaii, 1978.
[10] Zhu D L, Wu P T, Merkley G P, et al. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field microtopography [J]. Irrigation and Drainage, 2010, 59(5): 535 - 546.
[11] 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): 27 - 29.
Zhang Guoxiang. Calculating the total flow deviation rate of drip irrigation system based on three deviationrates [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 27 - 29. (in Chinese)
[12] 张国祥, 吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (9): 20 - 22.
Zhang Guoxiang, Wu Pute. Determination of the design working head of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 20 - 22. (in Chinese)
[13] 中华人民共和国住房和建设部、国家质量监督检验检疫. GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
[14] Wu P T, Zhu D L, Jin J, et al. Design of drip irrigation lateral for optimum capital and operating cost [J]. Water Science and Technology, 2010, 10(6): 943 - 951.

(责任编辑 徐云峰)

(上接第339页)

[7] Dallstream B E, Fricke B A, Bryan R B. Swing check valve design criteria and CFD validation[C]//Proceedings of the ASME 2006 International Conference on Nuclear Engineering. Florida: ASME, 2006: 691 - 699.
[8] 李贺军,蔡勇,向北平,等. 梭式止回阀关闭时的流场特性研究[J]. 机械设计与制造,2012(6): 226 - 228.
Li Hejun, Cai Yong, Xiang Beiping, et al. Study on flow field characteristics of shuttle check valves in shut process [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012 (6): 226 - 228. (in Chinese)
[9] 赵莹,周进. 球阀流场的数值模拟与可视化研究[J]. 导弹与航天运载技术,2007(6): 35 - 39.
Zhao Ying, Zhou Jin. Numerical simulation and visualization analysis of flow field in ball valve[J]. Missile and Space Vehcile, 2007(6): 35 - 39. (in Chinese)
[10] Ng Y T, Min C, Gibou F. Efficient fluid-solid coupling algorithm for single-phase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(23): 8807 - 8829.
[11] 葛如海,王桃英,许栋,等. 基于动网格和UDF技术的气缸动态特性研究[J]. 机床与液压,2010, 38(21): 12 - 15.
Ge Ruhai, Wang Taoying, Xu Dong, et al. Dynamic characteristics of pneumatic cylinder based on dynamic mesh and UDF [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(21): 12 - 15. (in Chinese)
[12] 杨国来,伍国果,刘小熊,等. 轴流式止回阀的数值模拟[J]. 西华大学学报:自然科学版,2012, 31(3): 97 - 100.
Yang Guolai, Wu Guoguo, Liu Xiaoxiong, et al. Numerical simulation for axial flow check valves[J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2012, 31(3): 97 - 100. (in Chinese)
[13] 朱奇,谷传纲,戴韧. 超超临界百万千瓦汽轮机主调阀流场非稳态数值研究[J]. 动力工程学报,2010, 30(10): 744 - 748.
Zhu Qi, Gu Chuangang, Dai Ren. Numerical simulation on unsteady flow field in the main stop and control valve system of a 1000 MW ultra-supercritical steam turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(10): 744 - 748. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)