微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究

朱德兰[1,2,3]，吴普特[1,2,3]，张青峰[2]，牛文全[1,2,3]，杨文辉[4]

（1.中国科学院水土保持研究所；2.西北农林科技大学；3.国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心，陕西 杨凌 712100；4. 宝鸡市金台区水利局，陕西 宝鸡 721300）

摘 要：首先对滴灌系统中田面微地形偏差、水力偏差、制造偏差三因素独立作用及共同作用下产生的滴头流量偏差率、偏差系数、均匀度的计算公式进行分析，对符合正态分布的田面局部高、滴头制造系数进行计算机模拟，并随机分配给滴头；然后借助计算机模拟计算出上述三种因素独立作用及共同作用下流量偏差率、偏差系数、均匀度等指标；最后将上述四种计算结果的500组数据，经过统计分析，确定了灌水均匀度计算公式，并建立了各均匀度参数之间的关系，分析得到的公式可直接用于滴灌系统的水力学计算。

关键词：滴头制造流量偏差；田面微地形流量偏差；水力流量偏差；滴灌均匀度

中图分类号：S275 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-6254(2006)01-0022-05

0 引言

田面高低不平引起滴头实际工作压力与设计工作压力的偏差，即微地形引起流量偏差；水沿毛管流动时，由于水流内部摩擦、水与毛管壁的摩擦以及地面坡度等水力因素，使沿毛管分布的滴头的水压力发生变化，进而导致滴头流量产生偏差；滴头在制造过程中同种规格型号滴头的流道尺寸会有不同程度的偏差，导致同型号滴头在同一水压力下的出流量不同，即由于制造因素产生流量偏差。因此滴灌均匀度不仅取决于水力设计，而且与滴头制造偏差、田面平整度有关，当制造偏差大于水力标准或地面平整度很差时，再强调传统的水力设计已没有多大意义，因此，在滴灌设计中如何把影响均匀度的参数都考虑进去，尽可能减小计算值与实际值之间的差距是设计中的一个重要问题。

目前，在滴灌设计中一般只以水力学变差指标为计算依据，也有一些学者提出了考虑水力学偏差和灌水器制造偏差估算灌水均匀度的不同形式的公式[1~5]，但仍不能取得满意的计算精度。同时考虑水力偏差、灌水器制造偏差、田面局部高差三因素设计灌水均匀度的思想由张国祥(2003)首次提出[6]，但尚未在这方面作过系统研究，本研究在同时考虑水力偏差、灌水器制造偏差、田面微地形三因素的基础上，确定了灌水均匀度参数之间的关系，将其直接用于滴灌系统的水力学计算，可进一步提高设计精度。

1 滴灌水力参数计算公式

1.1 滴头制造偏差水力计算

将滴头制造偏差引起的水力学变差作为独立事件时，滴头工作压力为恒值，地面平坦无起伏，则水力计算公式如下：

$$q_{mi} = K_i H_d^x \tag{1}$$

式中，K_i 为第 i 个滴头的制造系数；H_d为滴头设计工作压力，m；q_{mi} 为第 i 个滴头的流量，L/h；x 为流态指数。

$$\overline{q_m} = \frac{\sum q_{mi}}{N} = \frac{H_d^x \sum K_i}{N} = H_d^x K_{avr} \tag{2}$$

$\overline{q_m}$ 为滴头平均流量，L/h；N 为滴头数；K_{avr} 为流量系数平均值。

$$C_{mv} = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum (q_{mi} - \overline{q_m})^2}{N-1}}}{\overline{q_m}} = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum (K_i - K_{avr})^2}{N-1}}}{K_{avr}} = C_{kmv} \tag{3}$$

基金项目：中国科学院知识创新项目（2002AA$_2$Z4101）；中国科学院知识创新项目（KZCX1-06-02-03）；“十五”国家区域攻关项目：黄土高原优质果业开发模式与技术研究

作者简介：朱德兰（1969-），女，副教授，博士，主要从事水资源高效利用方面的研究。

万方数据

式中，C_{mv} 为制造流量偏差系数；C_{kmv} 为制造系数偏差系数。

$$q_{mv}=\frac{(K_{\max}-K_{\min})H_d^x}{\overline{q_{mi}}}=\frac{K_{\max}-K_{\min}}{K_{avr}} \tag{4}$$

式中，$K_{\max}$ 为制造系数最大值；$K_{\min}$ 为制造系数最小值；q_{mv} 为制造流量偏差率

1.2 田面微地形影响下的水力计算

田面微地形实际上指田面的高低起伏状况，如图1所示。

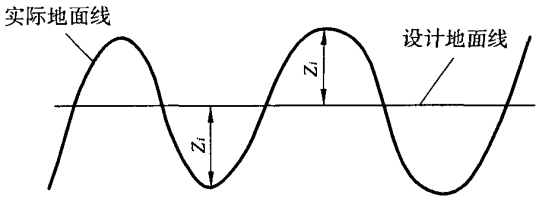

图1 微地形状况

图1中 Z_i 为滴头实际位置高程与设计高程之差，称田面局部高(m)，当滴头实际位置高程低于设计高程时取正值，反之，取负值。将田面微地形作为独立事件时的水力学计算公式如下：

$$q_{zi}=K_{avr}(H_d+Z_i)^x \tag{5}$$

式中，q_{zi} 为第 i 个滴头田面局部高产生的滴头流量(L/h)；其余符号意义同前。

$$C_{zv}=\frac{\sqrt{\frac{\sum(q_{zi}-\overline{q_z})^2}{N-1}}}{\overline{q_z}} \tag{6}$$

其中，$\overline{q_z}=\frac{\sum q_{zi}}{N}=\frac{K_{avr}\sum(H_d+Z_i)^x}{N}$ (7)

式中，C_{zv} 为田面局部高流量偏差系数；$\overline{q_z}$ 为滴头平均流量，L/h。

$$q_{zv}=\frac{K_{avr}(H_d+Z_{\max})^x-K_{avr}(H_d+Z_{\min})^x}{\overline{q_z}}=\frac{[(H_d+Z_{\max})^x-(H_d+Z_{\min})^x]N}{\sum(H_d+Z_i)^X} \tag{8}$$

式中，q_{zv} 田面局部高差流量偏差率；$Z_{\max}$ 为最大田面局部高，m；$Z_{\min}$ 为最小田面局部高，m。

1.3 水力偏差分析计算

水力偏差是由水流摩擦损失和地面高差引起的，将其作为独立事件时，田面局部高恒等于零，制造偏差系数取为平均值，则水力分析如下：

$$q_{hi}=K_{avr}H_{hi}^x \tag{9}$$

式中，q_{hi} 为第 i 个滴头水压力产生的滴头流量，L/h；H_{hi} 为第 i 个滴头的水压力，m。

$$C_{hv}=\frac{\sqrt{\frac{\sum(q_{hi}-\overline{q})^2}{N-1}}}{\overline{q}} \tag{10}$$

式中，C_{hv} 为水力流量偏差系数。

第 i 个滴头水压力递推公式为

$$H_{hi}=H_{hi-1}+\Delta H_{hi-1}-JS \tag{11}$$

式中，H_{hi-1} 为第 $i-1$ 个滴头的水压力，m；ΔH_{hi-1} 为第 $i-1$ 管段的水头损失；J 为地面坡度，顺坡时为正，逆坡时为负；S 为滴头间距,管段及滴头编号如图2所示。

$$q_{hv}=\frac{K_{avr}H_{h\max}^x-K_{avr}H_{h\min}^x}{K_{avr}H_d^x}=\frac{H_{h\max}^x-H_{h\min}^x}{H_d^x} \tag{12}$$

式中，q_{hv} 为水力流量偏差率；$H_{h\max}$、$H_{h\min}$ 分别为最大、最小水压力，m。

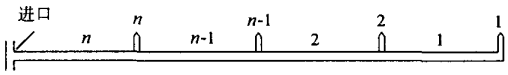

图2 管段和出水口编号

1.4 总灌水均匀度计算

田面微地形、制造偏差、水力三因素共同作用下，水力计算公式如下：

$$q_i=K_iH_i^x \tag{13}$$

式中，q_i、K_i、H_i 分别为第 i 个滴头的流量，L/h；制造系数、水压力，m。

$$\overline{q}=\frac{\sum q_i}{N} \tag{14}$$

式中，$\overline{q}$ 为平均流量，L/h。

$$C_u=1-\frac{\frac{1}{N}\sum|q_i-\overline{q}|}{\overline{q}} \tag{15}$$

式中，C_u 为灌水均匀度。

总偏差系数 $C_y=\frac{\sqrt{\frac{\sum(q_i-\overline{q})^2}{N-1}}}{\overline{q}}$ (16)

总流量偏差率 $q_v=\frac{q_{\max}-q_{\min}}{\overline{q}}$ (17)

水压力递推公式为

万方数据

$$H_i = H_{i-1} + \Delta H_{hi-1} - JS + Z_i \tag{18}$$

式中，H_i 为第 i 个滴头的水压力，m；H_{i-1} 为第 $i-1$ 个滴头水压力，m；ΔH_{i-1} 为第 $i-1$ 管段水头损失，m；其余符号意义同前。管段及滴头编号见图 2。

2　计算机模拟及参数选取

2.1 田面局部高差与制造系数计算机模拟

田面局部高差 Z_i 和制造系数 K 符合典型的正态分布[3]，公式如下：

$$Z_i = Z_{avr} + WS_z \tag{19}$$

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_{avr})^2}{N-1}} \tag{20}$$

$$k_i = K_{avr}(1 + WC_{kmv}) \tag{21}$$

式中，W 为符合标准正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数；S_z 为田面局部高差标准差。

2.2 计算机模拟参数选取

利用 Visual Basic 语言编程进行模拟计算。对上述计算参数可能出现的情况进行组合，其思路是取一组参数，由特定灌水器的 K_{avr}、C_{mv} 及标准正态随机数 W，生成随机数 K_i，由田块的 Z_{avr}、S_z 及标准正态随机数 W，生成随机数 Z_i，并随机输给各个滴头，求得 C_u、q_v、q_{mv}、q_{zv}、q_{hv}、C_v、C_{mv}、C_{zv}、C_{hv}。为了使输出参数具有普遍性，输入参数范围应在目前滴灌工程极值范围内选取，滴灌系统的模拟条件和参数选择见表 1。

表 1 模拟参数输入值列表

参 数	数 值
流量系数均值 K_{avr}	0.5~6
制造偏差 C_{vm}	0.01~0.2
流态指数 X	0.20~0.80
毛管直径 D (mm)	5~40
滴头间距 S (m)	0.1~2
沿毛管坡降 J	0.0~0.20
设计工作水头 H_d (m)	0.5~15
田面局部高均值 Z_{avr} (m)	0.05~1
滴头数	50~300

3　滴灌设计均匀度指标分析

利用计算机模拟计算结果随机抽出500组数据进行回归分析，建立各均匀度之间的关系。

3.1 C_v、C_{mv}、C_{zv}、C_{hv} 之间的关系

从统计学角度考虑，C_{mv}、C_{zv}、C_{hv} 为独立事件，应满足如下关系式

$$C_v = \sqrt{C_{mv}^2 + C_{zv}^2 + C_{hv}^2} \tag{22}$$

为了验证公式(22)的正确性，由计算机模拟计算得到 C_v、C_{mv}、C_{zv}、C_{hv} 的 500 组数据，将计算机模拟计算的 C_v 值与由公式的计算值进行相关分析，相关系数为 0.9998，说明完全相关。

3.2 C_v 与 C_u 之间的关系

对计算机模拟计算的总灌水均匀度 C_u 和总偏差系数 C_v 进行相关分析，得到 C_u 与 C_v 的关系式如下：

$$C_u = 1 - 0.83C_v \qquad (R^2 = 0.9913) \tag{23}$$

3.3 q_{hv}、C_{hv} 之间的关系

对计算机模拟计算的水力流量偏差率 q_{hv} 和水力偏差系数 C_{hv} 进行相关分析，得到 q_{hv} 与 C_{hv} 的关系式如下：

$$q_{hv} = 4.26C_{hv} - 0.034 \text{ 或 } C_{hv} = 0.229q_{hv} - 0.0091$$
$$(R^2 = 0.9751) \tag{24}$$

3.4 q_{zv}、C_{zv} 之间的关系

对计算机模拟计算的田面局部高差流量偏差率 q_{zv} 和田面局部高差偏差系数 C_{zv} 进行相关分析，得到 q_{zv} 与 C_{zv} 的关系式如下：

$$C_{zv} = 0.2q_{zv} - 0.004 \quad (R^2 = 0.9775) \tag{25}$$

3.5 制造流量偏差率计算公式

制造流量偏差率仅与制造系数 K、制造偏差系数 C_{mv} 有关。采用逐步回归法，建立制造流量偏差率 q_{mv} 与制造系数 K_{avr}、制造系数 C_{mv} 之间的关系。然后初步建立 q_{mv} 与 K_{avr}、C_{mv} 的多元回归模型

$$q_{mv} = a_1K_{avr}^3 + a_2k_{avr}^2 - a_3k_{avr} + a_4C_{mv} + a_5 \tag{26}$$

式中，a_1、a_2、a_3、a_4、a_5 为回归系数。

利用计算机多元统计分析方法，得到如下回归方程式

$$q_{mv} = -0.137K_{avr}^3 + 0.539k_{avr}^2 -$$
$$0.393k_{avr} + 2.76C_{mv} + 0.11 \quad (r = 0.956) \tag{27}$$

3.6 灌水均匀度设计质量指标

据张国祥(2002)分析，田面局部高差流量偏差率

万方数据

$$q_{zv}=\frac{\Delta Z.x}{H_d} \tag{28}$$

式中，ΔZ 为田面最大局部高差即最大正偏差 $Z_{\max}$ 与负偏差 $Z_{\min}$ 的差值，m。

滴灌灌水质量国际通用控制指标为均匀度 C_u，由式(23)、(24)、(25)、(28)，可推导出如下公式

$$C_u=1-0.83[C_{mv}^2+(0.2\frac{\Delta Z\cdot X}{H_d}-0.004)^2+(0.229q_{hv}+0.0091)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{29}$$

式(29)为水力、灌水器制造、田面不平整三因素影响下的灌水均匀度公式，可直接用于滴灌工程设计。

4 滴灌工程设计方法

在以往的滴灌工程设计中，仅考虑制造偏差和水力偏差，而大多数情况下，仅考虑水力偏差。因此，当在微灌工程设计中考虑水力、灌水器制造、田面不平整三因素引起的偏差时，设计方法必须改变，现将设计方法及步骤归纳如下。

1）根据滴灌工程设计规范选取灌水均匀度指标 C_u。

2）按照公式(23)计算流量偏差系数 Cv。

3）根据公式(22)计算水力流量偏差系数 C_{hv}，其中制造偏差系数 C_{mv} 由生产厂家提供或购买滴头后，实际测定并用公式(3)计算。田面局部高差偏差系数 C_{zv} 的确定有两种方法，第一，对拟灌溉地面的局部高差进行大面积测量后，由公式(6)计算；第二，先利用公式(28)确定 q_{zv}，然后利用公式(25)确定 C_{zv}。

4）根据公式(24)计算水力流量偏差率 q_{hv}。

5）确定了水力流量偏差率 q_{hv} 后，其余计算步骤与传统设计方法相同。

5 讨论

5.1 灌水器制造因素、田面微地形因素对灌水均匀度的影响

由公式(29)可以看出，如果制造偏差因素 C_{mv}、田面微地形因素 $\Delta Z/H_d$ 过大，不论水力流量偏差率 q_{hv} 取任何值都不能满足灌水均匀度的要求，因此，在进行滴灌设计时，首先应选择性能良好的滴头，以 $C_u=0.95$ 作为设计标准，可得到如下结论：当 $C_{mv}\leqslant 0.02$，滴头性能为优；当 C_{mv} 在 0.02～0.05、X 在 0.2～0.5 之间，滴头性能一般；当 $C_{mv}>0.05$，滴头不合格。同理，选用性能优良的滴头($C_{mv}=0.02$)，$\Delta Z/H_d$ 的取值范围为 0.2~0.65，当 $\Delta Z/H_d>0.65$ 时，不能满足系统均匀度的要求。

5.2 灌水均匀度公式比较与评价

由 Howell 和 Hilter(1974)等人提出公式

$$H_v=\frac{q_v}{x}(1+0.12\frac{1-x}{x}q_v)\ ,$$

仅仅考虑了水力因素引起的流量偏差，揭示了流量偏差率与水力偏差率之间的关系，该公式在滴灌工程设计中沿用至今。

Karmeli 和 Keller(1975)定义灌水均匀度公式

$$EU=100(1-1.27\frac{cv_m}{\sqrt{N_p}})\frac{q_n}{q_e}$$

以及 Bralts(1981)等人提出公式

$$CV=\sqrt{CV_H^2+CV_m^2}\ ,$$

考虑了水力因素和制造因素引起的流量偏差，揭示了制造偏差对灌水均匀度的影响。

我国的郑耀泉、陈昌渠(1994)得出考虑水力偏差和制造偏差的公式

$$C_{vh}=\sqrt{1.384(1-C_u)^2-C_{vm}^2}$$

并建立了灌水器工作水头变差率与灌水均匀度公式，该公式直接用于水力学计算，使微灌系统考虑灌水器制造偏差变得非常容易。

同时考虑水力偏差、灌水器制造偏差、田面局部高差三因素设计灌水均匀度的思想由张国祥(2003)首次提出，初步得出了一些公式

$$q_v=q_{hv}+q_{mv}+q_{zv}\ ,$$

该公式代表了一种极端情况，即水力因素产生的最大流量、制造因素产生的最大流量、田面局部高差因素产生的最大流量出现在同一滴头，水力因素产生的最小流量、制造因素产生的最小流量、田面局部高差因素产生的最小流量出现在同一滴头，而在实践中，这种情况出现的概率很小，所以，公式具有片面性。

本文提出的灌水均匀度公式(式29)从统计分析的角度出发将田面局部高、制造偏差当作随即数随即分配给滴头，更能反映实际情况，该公式可直接用于滴灌工程设计。

万方数据

参考文献：

[1] Bralts V F, Wu I-pai ,Gitlin H M. Manufacturing Variation and Drip Irrigation Uniformity[J]. ASAE, 1986, 26(6): 1659~1664.

[2] Bralts V F, Edwards D M. Field Evaluation Submain Units [J]. ASAE, 1986, 26(6):1659~1664.

[3] 郑耀泉，宁堆虎. 滴头制造偏差的模拟与滴灌系统随机设计方法的研究[J]. 水利学报，1991(7): 1~6.

[4] 郑耀泉，陈昌渠. 微灌均匀度参数之间的关系及其应用[J]. 灌溉排水，1994,13(2): 7~10.

[5] 王留运. 微灌灌水器制造偏差系数的计算方法与研究[J]. 喷灌技术，1993,12(2): 6~11.

[6] 张国祥. 廉价节能高效滴灌系统研究报告[R]. 杨凌：国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心，2002.

Study on the Emission Uniformity for the Emitter under the Condition of Farmland Micro-terrain Action

ZHU De-lan[1,2,3], *WU Pu-te*[1,2,3], *ZHANG Qin-feng*[2], *NIU Wen-quan*[1,2,3], *YANG Wen-hui*[4]

(1. ISWC, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources; 2. Northwest Sci-tech University of A &F; 3. National Engine Research Center of Water Saving-irrigation for Yang-Ling, Shanxi 712100, China; Water Conservancy Department of Baoji, Baoji 721300, China; 4. Jin Tai Area Hydraulic Office in Baoji, Baoji 721300, China)

Abstract: The calculation formulas of the dripper flow variation rate, flow deviation coefficient and the emission uniformity for the emitter were analyzed in drip irrigation system. They are affected by farmland micro-terrain deviation, hydraulic deviation for the emitter and manufacture deviation for the emitter. The micro-terrain and manufacture coefficient, which accorded with the random of positive state distribution are imitated by computer program. The dripper flow variation rate, flow deviation coefficient and the emission uniformity for the emitter are calculated by using computer program under the four conditions. And the formula of the emission uniformity for the emitter and the relation of various uniformity parameters are proposed by statistic analysis of 500 groups data, which could be used to the hydraulic calculation of the drip system designs.

Key word: Manufacture deviation for the emitter; Farmland micro-terrain deviation; Hydraulic deviation for the emitter; The emission uniformity for the emitter

（上接第 16 页）

[3] 赖喜德，姜江. 基于ACIS的水轮机转轮三维造型技术[J]. 四川工业学院学报，2004 增刊20215203: 215 ~ 217.

[4] 阎楚良　林洪义，杨方飞. 水泵叶片三维造型原理与工程应用[J]. 农业机械学报，2003(1): 95 ~ 97.

[5] 梁武科，罗兴锜，吴广宽. 混流式水轮机叶片自由曲面的延展[J]. 水利学报 2003(5): 69 ~ 73.

3-D Design of Hydro Turbine's Runner based on Pro/E

HOU Yi-hua[1], *QI Xue-yi*[1], *CHANG Yi-le*[2], *ZHANG Jing*[1], *FENG Jun-hao*[1]

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Zhengzhou Academe of Machinery, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The traditional 2-D pattern drawings of blade are transferred to Pro/E directly during the 3-D design of Francis' s runner. At the same time, the assumed crown and the spire of the blade are used to settle the problem of uncertainty and aberrance of the extending of blade near the crown and band. After the 3-D design finished, it can easily find the relation data of blade such as the thickness, the center of gravity, the volume, the area, the opening and the quality. It can also integrate the hydrokinetics design and the geometrical design and make the foundation of the future CFD calculation, capability forecast and CAM of the runner.

Key words: Runner; 3-D design; Pro/E; Hydro turbine

万方数据