

用凯勒均匀度进行微灌系统设计的质疑

张国祥

(北京中水新华灌排技术有限公司, 北京 100055)

摘 要: 用凯勒均匀度指标进行微灌系统设计的方法, 美国还在使用, 为了探讨该设计方法是否正确, 该文从凯勒均匀度的定义与多孔出流管水力学原理出发, 对凯勒均匀度的两种定义进行比较分析后, 认为两种定义有实质性差别, 不能混淆。凯勒均匀度的田间实测数据计算公式 (定义 1) 只能作为微灌系统的后评价指标, 用凯勒均匀度指标进行微灌系统设计的方法, 是以制造偏差系数为基础的 (定义 2), 而后者只是工作压力最小点的灌水器出流特征, 作为设计指标, 缺乏合理性; 该方法中用推荐均匀度 (EU_T) 来替代计算均匀度 (EU), 导致最小压力灌水器的流量期望值计算公式缺乏科学根据; 而允许水头差计算公式与多口管水力学规律不符。出现上述错误的原因, 在于当时多口管水力学研究还不成熟, 而微灌生产实际又迫切需要设计方法。时至今日, 应该重新审视这一设计方法。

关键词: 凯勒均匀度; 微灌系统设计; 制造偏差

中图分类号: S274.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0006-04

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, 2008, 24(8): 6-9.

Zhang Guoxiang. Query about micro-irrigation system design using Keller Uniformity[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 6-9.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

美国学者凯勒 (Jack Keller) 与卡迈里 (Karmeli) 于 1975 年提出了表征灌水均匀度的计算式^[1], 被称为凯勒均匀度 (EU); 它是美国农业部水土保持局目前仍推荐使用的灌水均匀度表达式^[2]。

中国学者出版的多本著作, 向国内读者介绍了凯勒均匀度计算式, 肯定其考虑了水头偏差与滴头制造偏差两个因素^[2,3]。近年来有学者^[2]介绍了用凯勒均匀度指标进行微灌系统设计的方法, 并要在《微灌工程技术规范》修订中, 将此内容作为中国国家规范的条文在国内推广使用; 因此, 推敲该方法是否正确, 已成为不能回避的问题。本文即从凯勒均匀度的定义与多孔出流管水力学原理出发, 对凯勒均匀度及其微灌系统设计方法进行讨论, 以便与更多学者达成共识。

1 凯勒均匀度的定义

1.1 定义 1

根据田间测定数据, 可用式 (1) 计算凯勒均匀度 EU (文献[2]记作 E_U) (%) :

$$EU = q'_{25\%} / q'_a \times 100\% \quad (1)$$

式中 $q'_{25\%}$ ——占田间实测流量数据 25% 的低流量数据的平均值, L/h; q'_a ——田间所有实测的灌水器流量平均值, L/h。

凯勒均匀度的定义 1 可表述为: 占田间 (或灌水小区) 实测灌水器流量数据 25% 的低流量数据的平均值与

田间 (或灌水小区) 所有实测的灌水器流量平均值的比值, 以百分数表示。

1.2 定义 2

对于一个计划中的灌水小区设计, 可用式 (2) 来计算凯勒均匀度 EU (%) ^[2,4]:

$$EU = 100(1.0 - 1.27V / \sqrt{e'}) q_n / q_a = 100(1.0 - 1.27V_s) q_n / q_a \quad (2)$$

式中 V ——灌水器制造偏差系数, 由制造厂家提供或由式 $V = s / q_a$ 计算; s ——样本流量的标准差; q_n ——根据灌水器标称流量-压力关系曲线, 由系统最小压力算出的灌水器最小流量, 也就是最小压力灌水器的流量期望值, L/h; q_a ——灌水小区全部灌水器的平均流量 (或设计流量), L/h; e' ——每株作物灌水器的最少个数, 个; V_s ——系统的制造偏差系数, $V_s = V / \sqrt{e'}$; 当 $e' = 1$ 时, $V_s = V$ 。

系统的制造偏差系数^[4], 是因为每株作物 (譬如果树) 可能布置有 1 个以上的灌水器; 此时, 每株作物周围各灌水器流量的偏差, 有可能彼此之间相互部分补偿; 平均计算时, 分配到每株作物供水总量的偏差, 可能会小于仅根据 V 值考虑的预计量。

在给定压力下, 灌水器的流量基本符合钟形正态分布, 因此在最小压力灌水器处, 因制造偏差而造成样本在相同水头下的出流量不同, 其 25% 低流量的平均值^[4]约等于:

$$q_{25\%} = (1 - 1.27V_s) q_n \quad (3)$$

式中 $q_{25\%}$ ——因制造偏差造成灌水器样本在同一水头下出流量不同, 其中位于低流量端 25% 灌水器的流量平均值, L/h。

因此式 (2) 也可写为:

收稿日期: 2008-05-16 修订日期: 2008-07-10

作者简介: 张国祥 (1941—), 浙江衢州人, 教授级高工, 主要从事节水灌溉技术研究和设备开发。北京 北京中水新华灌排技术有限公司, 100055。
Email: zhguox@sohu.com

$$EU = q_{25\%} / q_a \times 100\% \quad (2')$$

由上述可见，凯勒均匀度定义 2 可表述为：以 q_n 为期望值的灌水小区灌水器最小工作水头点，其灌水器流量分布曲线上低流量端 25% 灌水器的平均流量与小区灌水器平均流量（或设计流量）的比值，以百分数表示。

1.3 对两个定义的内涵及应用探析

1) 田间实测灌水器流量数据，是已包含所有偏差（如水力偏差、灌水器制造偏差、地形高程偏差、各级管道的内径与长度偏差、水泵工作特性与标定特性的偏差等）的最终结果。

2) 用式 (1) 计算的 EU 指标来评价微灌系统的灌水质量，并根据大量田间试验数据，规定出 EU 的最低允许值，是可接受的；而且，如将田间测定的流量数据，理解为每株作物所布置的各灌水器总流量，将更为合理。由实测数据计算的 EU 值，在设计阶段是不可能得到的；因此，它只能作为微灌系统的后评价指标。

3) 由式 (1) 与式 (2) 计算的 EU 值，虽然都称为凯勒均匀度，但其含义完全不同，不能混淆。它们的不同处表现在以下几点：① 式 (1) 计算的 EU 值，是由实测数据计算，已包含所有偏差影响的实际结果；而式 (2)

仅包含水力与灌水器（或系统）制造二项偏差影响的计算结果。② 式 (1) 中田间测定的 25% 最小流量数据可分布于数条毛管，能反映一定范围面上灌水器的出流情况；式 (2) 中的 25% 最小流量数据是由概率论推求的，只反映最小压力点（1 个点）的出流特性，不反映面上的出流特性，因此作为表征面上灌水质量的均匀度指标缺乏代表性和合理性。

4) 还必须指出：在微灌系统灌水小区布置及灌水器选定后，式 (2) 等号右边的各项便已确定， EU 的计算值是唯一而确定的。

5) 在 EU 的定义中，为什么选用低流量端占样本 25% 的灌水器流量平均值，而不用低流量端占样本 50%、30%、20% 等其他比例的灌水器流量平均值，未见有论证，似有一定的随意性。

2 用凯勒均匀度设计微灌系统的方法

文献[2]、[4]都介绍了用凯勒均匀度设计微灌系统的方法。首先，根据不同情况规定了凯勒均匀度的推荐范围^[2]（为便于叙述，本文把推荐的凯勒均匀度记作 EU_T ），文中列出了来源于文献[2]的 EU_T 值（见表 1）。

表 1 不同条件下推荐的 EU_T 值
Table 1 Recommended EU_T values under different conditions

灌水器类型	每株作物灌水器个数 e' / 个	地形	$EU_T/\%$	灌水器类型	地形	$EU_T/\%$
点源	≥ 3	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	90~95	微喷	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	90~95
点源	< 3	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	85~90	微喷	起伏地形或坡度 $> 2\%$	85~90
点源	≥ 3	起伏地形或坡度 $> 2\%$	85~90	线源	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	80~90
点源	< 3	起伏地形或坡度 $> 2\%$	80~90	线源	起伏地形或坡度 $> 2\%$	70~85

文献[4]以下列文字表述了推荐的 EU_T 取值范围。

1) 对于宽间距多年生作物的灌水器：

- (1) 均匀地形为 90%~94%；
- (2) 陡坡或起伏地形为 88%~92%。

2) 用于窄间距（ < 1.5 m，原文为 6ft）多年生或二年生作物的灌水器：

- (1) 均匀地形为 86%~90%；
- (2) 陡坡或起伏地形为 84%~90%。

3) 用于一年生行播作物的线水源软管：

- (1) 均匀地形为 80%~90%；
- (2) 陡坡或起伏地形为 70%~85%。

用凯勒均匀度设计微灌系统的方法为：对已选定的灌水器及灌水小区布置，可将选定的凯勒均匀度推荐值 EU_T 置换式 (2) 的 EU ，求出 q_n

$$\text{即：} \quad q_n = \frac{EU_T}{100} \frac{q_a}{(1-1.27V_s)} \quad (4)$$

再由所选滴水的水力关系，分别求出与 q_n 、 q_a 相应的滴水工作水头： $h_n = (q_n/k_d)^{1/x}$ ； $h_a = (q_a/k_d)^{1/x}$ ，其中 k_d 为滴水水力关系中的常系数； x 为流量指数；均由生产厂提供。灌水小区的允许水头差由下式计算：

$$[\Delta h] = 2.5(h_a - h_n) \quad (5)$$

即灌水小区内各灌水器的工作水头应在 h_n 与 $[\Delta h] + h_n$ 之间。

3 用凯勒均匀度设计微灌系统的问题

3.1 不能以凯勒均匀度推荐值 EU_T 来替代式 (2) 中的凯勒均匀度计算值 EU

如前所述，微灌系统的灌水小区布置、灌水器选择等确定后，凯勒均匀度计算值 EU 可由式 (2) 计算，它是个确定的值；凯勒均匀度推荐值 EU_T 是根据灌区情况在一定范围内选择的（见表 1）；用一定范围的值（ EU_T ）来替代一个确定值（ EU ），导致式 (4) 不再符合概率论，变成了一个无根据的算式；在一些情况下会出现荒谬的结果。表 2 列出一些情况下 q_n/q_a 的计算结果；其中地形为水平， EU_T 用表 1 推荐范围的上、下限。从表 2 可见：各种情况下 q_n/q_a 的范围在 0.805~1.031；显然， $q_n/q_a \geq 1$ 是荒谬的，将导致允许水头偏差为负值；最小工作压力点灌水器流量是不可能、也不应该比所有灌水器的平均流量大！同时，根据文献[5]的成果，灌水小区的流量偏差率 q_v 可按下式计算，具有足够的精度。

$$q_v = (1 - q_n/q_a)/0.35 \quad (6)$$

当 $q_n/q_a=0.805\sim1.031$ 时, $q_v=0.557\sim-0.09$; 负值表示灌水器的最小流量大于最大流量, 显然不合理; 与中国行业规范^[6]规定 $q_v\leq0.2$ (相当于 $q_n/q_a=0.930$) 相比, 流量偏差率达到 0.557 也实在太大了。

表 2 用 EU_T 上、下限算出的 q_n/q_a
Table 2 Calculated values of q_n/q_a from upper and lower limits of EU_T

V	e'	V_s	$1-1.27V_s$	EU_T 下限 /%	q_n/q_a	EU_T 上限 /%	q_n/q_a
0.05	6	0.0204	0.974	90	0.923	95	0.975
	2	0.0354	0.955	85	0.890	90	0.942
	1	0.0500	0.937	80	0.805	90	0.906
0.07	6	0.0286	0.964	90	0.934	95	0.986
	2	0.0495	0.937	85	0.907	90	0.961
	1	0.0700	0.911	80	0.878	90	0.988
0.10	6	0.0408	0.948	90	0.949	95	1.002
	2	0.0707	0.910	85	0.934	90	0.989
	1	0.1000	0.873	80	0.916	90	1.031

3.2 式 (5) 不符多口出流管水力学规律

凯勒本人曾指出^[4]: 水平地形下, 微灌毛管灌水器平均水头处至毛管末端的水头损失约占全管长水头损失的 1/4, 这一点已为后来众多学者的研究所证实。众所周知, 水平毛管全管长的水头损失可近似地看作该毛管的水头偏差, 对于由一根毛管组成的灌水小区, 那么就应该有:

$$[\Delta h] \approx 4(h_a - h_n) \quad (7)$$

凯勒将其改为式 (5), 允许水头差偏小了 37.5%, 未见其论述根据; 可以肯定: 在水平地形下它不符合多口出流管的水力学规律。

后人的研究表明^[7]: 要满足一根毛管或灌水小区灌水器平均流量等于灌水器设计流量, 其实际水头偏差将随地形坡度、毛管长度与直径、滴头间距、滴头设计流量等有关, 并不能将允许水头偏差作为实际水头偏差直接赋予毛管或灌水小区; 用凯勒均匀度设计微灌系统的方法, 没有考虑到这一问题, 也不符合多口出流管的水力学规律。

再者, 即使有了水头偏差, 还需要知道最大、最小工作水头的灌水器位置, 才能将最大、最小工作水头值赋予应赋予的灌水器; 这在当时难于做到, 因为均匀地形坡多口出流管各水力特征值的数解方法直至 1989 年才提出^[7]。

3.3 用凯勒均匀度设计微灌系统的合理性

在 1975 年, 全世界学者对多孔出流管的水力学研究还处于初级阶段, 建立比较合理的微灌系统设计方法的技术基础尚不具备。与此同时, 微灌在高效益经济作物

上的增产、增收、节水效果已经显现, 生产实践迫切需要微灌系统设计方法; 凯勒的设计方法、美国夏威夷大学吴义伯教授的设计方法以及一些图解的方法等相继问世, 虽然不尽合理, 却满足了微灌技术应用的需求, 应该说功不可没。对吴义伯教授的设计方法, 笔者已作过讨论^[8]。凯勒在设计方法中引入了灌水器平均流量, 还试图计入灌水器制造偏差, 思路是积极的; 只是限于技术基础尚不成熟, 凯勒的式 (4) 可能导致流量偏差率太大, 式 (5) 又人为地减小水头偏差 (亦即减小流量偏差), 两个都不正确的式子合用, 在某些情况下会出现错误的结果; 在另一些情况下也会出现基本合理的结果。

4 结 论

1) 凯勒均匀度 (EU) 两个定义的内涵完全不同, 不能等同, 更不应混淆; 其定义 1 作为微灌系统的后评价指标是可接受的; 定义 2 仅表示灌水小区工作压力最小灌水器 (1 个点) 的出流特性, 故作为微灌系统灌水均匀性评价指标, 缺乏代表性。在微灌系统布置及灌水器选定后, EU 已是确定的值, 是不能用人为推荐值 (EU_T) 来替代的; 故以定义 2 作为微灌系统的设计指标缺乏科学性。

2) 式 (5) 不符合多口出流管水力学规律, 因此, 也是不正确的。

3) 在凯勒提出均匀度指标和微灌设计方法时, 其技术基础研究尚不成熟, 不能超越时代条件苛求; 应该指出: 其设计方法对微灌应用与发展功不可没。但时至今日, 如将该方法订入中国国家技术法规, 则将是技术倒退, 是不可接受的。

[参 考 文 献]

[1] 凯勒·卡迈里. 微灌设计[M]. 加利福尼亚: 雨鸟喷灌制造公司, 1975.

[2] 水利部农村水司, 中国灌溉排水发展中心编著. 节水灌溉工程实用手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[3] 傅琳. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

[4] 水利部国际合作司, 农村水利司, 中国灌排技术开发公司, 等编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

[5] 张国祥. 微灌毛管水力设计的经验系数法[J]. 喷灌技术, 1991, (1): 4.

[6] 中华人民共和国行业标准. 微灌工程技术规范 (SL103-1995) [S].

[7] 张国祥. 微灌毛管水力学研究[J]. 微灌技术, 1990, (2): 9.

[8] 张国祥, 杜茂林. 微灌力设计方法的商榷与建议[J]. 微灌技术, 1990, (3): 27.

Query about micro-irrigation system design using Keller Uniformity

Zhang Guoxiang

(Beijing Zhongshui Xinhua Irrigation and Drainage Technology Co. Ltd, Beijing 100055, China)

Abstract: Keller Uniformity is recommended by USDA-SCS to design micro-irrigation system. In order to discuss whether the method is correct or not, Keller Uniformity and the design method of micro-irrigation system were discussed in detail according to the definitions of Keller Uniformity and hydraulics principle of multiple-outlet pipeline. The comparative analysis of the two definitions of Keller Uniformity indicates that there is substantive and completely difference between the two definitions, which cannot be confused. The formula of Keller Uniformity using field measured data (definition 1) is only used as an after-evaluation indicator of micro-irrigation system. The micro-irrigation system design using Keller Uniformity was based on manufacture deviation index (definition 2), and the later definition is only the outflow characteristic of the minimal working pressure point. As a design index, it is not reasonable. In this method calculated evenness(EU) was replaced by recommended Uniformity (EU_T), which leads to the flow expectation calculation formula of emitter under the smallest-pressure lack of scientific basis, while the calculation formula of allowable pressure head differences does not match with the hydraulics law of multiple-outlet pipeline. The cause for the mistakes was that the hydraulics knowledge of multiple-outlet pipeline was incomplete at that time, while the practice of micro-irrigation urgently needed a design method. So up today this design method should be re-examined.

Key words: Keller Uniformity; micro-irrigation system design; manufacture deviation