

微灌水力设计计算的  
技术进步与  
几个问题的讨论

张国祥

# 1 微灌水力设计方法 的技术进步

- ◆ 吴义伯教授的设计方法
- ◆ 凯勒的设计方法
- ◆ 我提出的设计方法

# 1.1 吴义伯教授的设计方法

◆ 基本公式 偏差率公式:

$$\left. \begin{aligned} q_v &= \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max}} \leq [q_v] \\ h_v &= \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max}} \leq [h_v] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

流量公式:

$$Q_o = N \cdot q_d \quad (2)$$

◆ 人为条件 为计算水头偏差, 令:

$$h_{\max} = h_d \quad (3)$$

为赋值, 令:

$$h_{\min} = h_d \quad (4)$$

式中符号 分别为灌水小区中的流量偏差率、水头偏差率、滴头最大、最小流量, 滴头最大、最小工作水头、支(或毛)管总流量、滴头总数、滴头设计水头、及允许的流量偏差率和水头偏差率。

◆ 可以看出

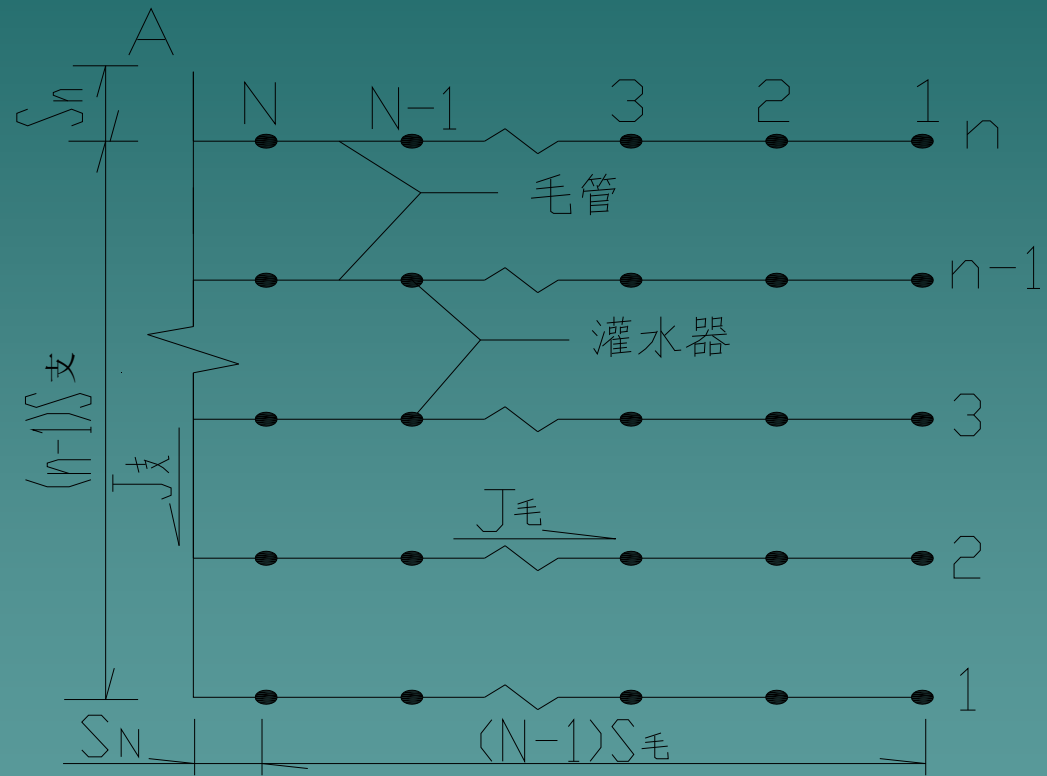
① 偏差率作为灌水质量的指标要求, 但偏差率算式未与滴头设计指标挂钩。

② 必须增加人为条件, 不然将无法进行小区设计。

③ 人为条件本身、及与流量公式矛盾, 说明该设计方法理论上不合理。

吴义伯设计方法的水力计算基础为: 无限孔数多孔管水力学。

# 微灌灌水小区示意图



# 1.2 凯勒的设计方法

## 1.2.1 凯勒均匀度 $EU(\%)$ 的定义

☆定义1：占田间(或灌水小区)实测灌水器流量数据25%的低流量数据平均值 $q'_{25\%}$ 与全部实测流量数据平均值 $q'_a$ 的比值，以百分比表示；

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

☆定义2：以 $q_n$ 为灌水器最小流量期望值的灌水小区，其灌水器流量分布曲线上，低流量端25%灌水器流量的平均值 $q_{25\%}$ 与小区全部灌水器平均流量 $q_a$ 的比值，以百分比表示；

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

请注意：式(2)中  $q_{25\%} = \left(1 - 1.27V / \sqrt{e'}\right)q_n \quad (3)$

式(3)中  $V = s/q_a$  一为灌水器制造偏差； $s$  一为灌水器流量样本的标准差； $e'$  一为每株作物灌水器的最少个数。

## 1.2.2 设计公式

$$q_n = \frac{EU_T}{100} \cdot \frac{q_a}{(1 - 1.2N/\sqrt{e'})} \quad (4) \quad h_n = \left( \frac{q_n}{k} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (5)$$

$$[\Delta h] = 2.5(h_a - h_n) \quad (6)$$

式中  $EU_T$  —推荐的凯勒均匀度； $[\Delta h]$ —灌水小区允许的水头差，m。

推荐的凯勒均匀度  $EU_T$  表

灌水器类型	$e'$ (个)	地形	$EU_T$ (%)
点源	$\geq 3$	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	90~95
点源	$< 3$	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	85~90
点源	$\geq 3$	起伏地形或坡度 $> 2\%$	85~90
点源	$< 3$	起伏地形或坡度 $> 2\%$	80~90
线源	$\geq 3$	均匀坡，坡度 $\leq 2\%$	80~90
线源	$< 3$	起伏地形或坡度 $> 2\%$	70~85

## 用 $EU_T$ 上下限算出的 $q_n/q_a$

$V$	$e'$	$1-1.27V/\sqrt{e'}$	$EU_T$ 下限	$q_n/q_a$	$EU_T$ 上限	$q_n/q_a$
0.05	6	0.974	90%	0.923	95%	0.975
	2	0.955	85%	0.890	90%	0.942
	1	0.937	80%	0.805	90%	0.906
0.07	6	0.964	90%	0.934	95%	0.986
	2	0.937	85%	0.907	90%	0.961
	1	0.911	80%	0.878	90%	0.988
0.10	6	0.948	90%	0.949	95%	1.002
	2	0.910	85%	0.934	90%	0.989
	1	0.873	80%	0.916	90%	1.031

- 注：①  $q_n/q_a > 1.0$ ，表示灌水器最小流量 > 平均流量；这是荒诞的。  
 ②  $q_n/q_a = 0.805$ ，相当于流量偏差率  $q_v = 0.557$ ，大大超过我国 0.2 的规定。  
 ③ 该方法对灌水质量要求表现为式(6)，但可能基本合理，也有可能荒诞。  
 ④ 式(4)与式(6)均不正确。

### 1.2.3 对前二种设计方法的评价

(1) 二种设计方法在理论上均不成熟；按此来设计微灌系统，可能出现毛管使用长度偏短、支管条数增多的现象，导致微灌系统投资与运行费用增大的后果；有改进和提高的必要。

(2) 二种设计方法均为美国学者提出，凯勒的方法后来成为美国农业部推荐的设计方法。方法提出的时间为1973~1975年，当时微灌系统设计的技术基础—多孔管水力计算方法还不成熟；同时，微灌技术应用实际，又迫切地需要设计方法；二种设计方法的提出，满足了生产的需求，实属不易。应该说：二种设计方法对美国及世界微灌技术的推广应用做出了重大贡献。

夏威夷大学吴义伯教授多次回国讲学，对我国微灌技术的启蒙、起步和发展，起到了重大的作用。



## 1.3 我提出(1989年)的设计方法

### 1.3.1 基本公式

$$\left. \begin{aligned} \text{偏差率公式: } q_v &= \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_a} \leq [q_v] \\ h_v &= \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_a} \leq [h_v] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{毛管(或小区)进口流量: } Q_0 = nq_a \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{赋值公式: } q_a &= q_d \\ h_a &= h_d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{小区(毛管)特征值关系式: } q_{\max} &= (1 + 0.65 q_v) q_a \\ q_{\min} &= (1 - 0.35 q_v) q_a \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{或: } h_{\max} &= (1 + 0.65 q_v)^{\frac{1}{x}} h_a \\ h_{\min} &= (1 - 0.35 q_v)^{\frac{1}{x}} h_a \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

☆该设计方法1995年进入我国行业规范，2005年进国标。在新疆生产建设兵团得到了大面积应用。

### 1.3.3 技术进步

与吴义伯与凯勒的设计方法相比：

- (1) 将偏差率算式的分母改为灌水器平均流量及其对应的工作水头，并做为灌水质量的量化指标。
- (2) 规定以灌水器设计流量与设计水头，作为小区(或毛管)灌水器的平均流量及其所对应的工作水头；不仅解决了水头赋值问题，还解决了灌水小区(或毛管)进口流量计算的合理性问题。
- (3) 提出了需计算设计方案实际的偏差率，并以此计算小区进口水头，从理论上实现了小区灌水器平均流量与设计流量相等。
- (4) 建立了灌水小区(或毛管)灌水器最大、最小流量(水头)与平均流量(水头)及流量偏差率的关系式，偏差新定义下水头偏差率与流量偏差率的换算关系式等；从而，使该设计方法得以完善，使赋值更为简便。

## 2 微灌水力计算方法的进步

- ◆ 吴义伯的计算方法  
——无限孔数多孔管水力学
- ◆ 我提出的计算方法(1989年)  
——有限孔数多孔管水力学

## 2.1 吴义伯的计算方法—无限孔数多孔管水力学

### 2.1.1 基本假定

- (1) 忽略多孔管内流速水头及其沿程变化，即将测管水头线视为总水头线。
- (2) 忽略多孔管上游段与下游段流态往往不同的影响，按多孔管进口段的流态，来确定沿程损失计算公式。
- (3) 把沿多孔管离散分布的灌水器出口，简化为连续分布，即视孔距为零、孔数为无穷多、亦就是说：将多孔管简化为**缝隙管**。
- (4) 等量出流，即以多孔管每m长的平均流量作为灌水器流量。  
水头损失线为指数型光滑曲线。

### 2.1.3 假定的合理性

- (1) 多孔管的流速水头，在进口管段仅占灌水器工作水头2%左右，且从上游向下游递减的，故假定1可行；
- (2) 流态不同对微灌多孔管水头损失的的影响仅在0.4%左右，忽略是合理的；
- (3) 多孔管的沿程损失曲线，应该是以出流孔为折点的折线，在孔口之间为直线，缝隙管假定会带来相对较大的误差，尤其是孔数少、孔距大的多孔管。
- (4) 等量出流的假定，对于限制流量偏差率的或使用补偿式灌水器的多孔管，其误差可以接受。

### 2.1.4 主要成果

多孔管沿程损失公式： $\Delta H = \frac{aq^m}{s^m(m+1)}L^{m+1}$ ； 摩损比公式： $R_i = 1 - (1-i)^{m+1}$ 。

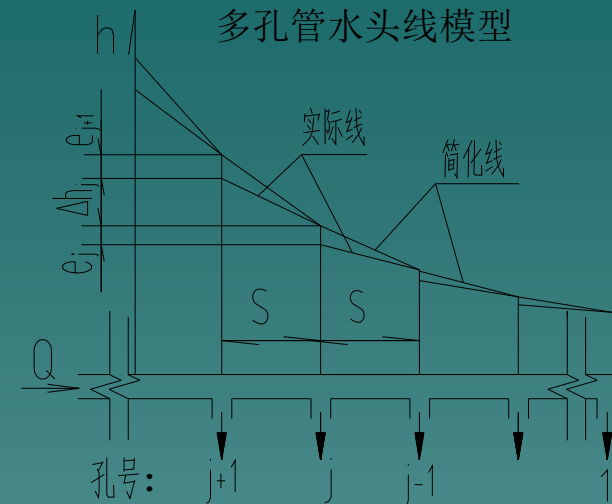
## 2.2 我提出的计算方法(1989年): 有限孔数多孔管水力学(均匀坡)

### 2.2.1 基本假定

- (1) 沿用吴义伯教授的假定1、2、4条。
- (2) 放弃缝隙管假定, 沿程损失的线型为多段折线; 采用的(总)水头线模型见右图。

### 2.2.2 内容及成果

- (1) 提出新的多孔系数公式; 导出多孔管总水头损失计算公式; 多孔系数查表已不再需要。
- (2) 定义参数**降比**( $r = J/I_1$ ), 并由此确定设计多孔管总水头线的线型; 定义参数**压比**( $G = SI_1/h_a$ ), 简化计算公式。
- (3) 推导出多孔管所有水力特征值的计算公式, 包括: 水头最小的灌水器编号、水头最大的灌水器编号、最大水头偏差、平均流量为 $q_d$ 时小区(或多孔管)进口水头、多孔管不超过规定偏差率时的最多(极限)孔数等。提高了计算精度, 实现了多孔管计算的完全解析化。
- (4) 由于明确了压力最大、最小孔的位置, 使最大水头偏差的计算更为直观。



### 3 几个问题的讨论

- ◆ 关于滴头内的流态
- ◆ 无补偿件滴头 $x < 0.5$ 的机理探讨
- ◆ 毛管进口安稳流器出现的问题
- ◆ 关于过滤器的过滤精度

## 3.1 关于滴头内的流态

### 3.1.1 已有认识

(1) 已有文献均按尼古拉池试验为依据来划分流态，以滴头水力关系式  $q = kh^x$  中的指数  $x$  值来判定流态，并将  $x$  称为流态指数。

(2) 《水利学报》05年，36(7)期发表了李云开、杨培岭的论文，其结论之一：“六种迷宫式流道灌水器流体(水流)流动的(雷诺数) $R_e = 105 \sim 930$ ，流态转捩的临界雷诺数比常规尺度流道的值要小，低于255”。

### 3.1.2 尼古拉池流态划分的依据、目的及适用的水流条件

(1) 划分流态的依据是摩阻系数与雷诺数、相对糙度的变化规律，目的在于正确计算摩阻系数，解决管道沿程损失计算问题。

(2) 适用的水流条件为仅有沿程损失(无局部损失)的水流。

### 3.1.3 滴头的 $x$ 与沿程损失公式 $Q = A(\Delta h)^{1/m}$ 中 $1/m$ 的差异

(1)  $1/m$  仅为沿程损失的指数，以它来判定流态是正确的。

(2) 滴头的  $h$  为总水头损失， $x$  为总损失的指数；只有微管滴头，仅有沿程损失，此时可凭  $x$  来判定流态；其他形式的滴头，局部损失不能忽略，不符合尼古拉池流态的水流条件，不能用指数  $x$  来判定流态。

将其称为流态指数是个概念上的错误，建议改称：水头指数。

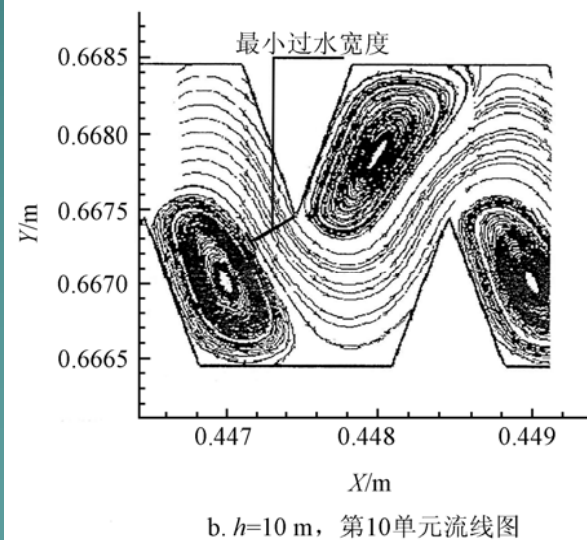
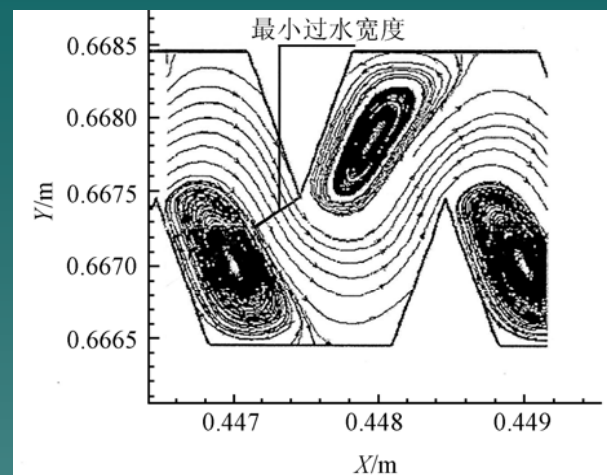
## 3.2 无补偿件滴头 $x < 0.5$ 的机理探讨

近年来，出现了指数 $x < 0.5$ 的无补偿件迷宫流道滴头，但未见到其机理探讨的论文。由于机理不清，我曾怀疑是水力测试的误差所至。

为此用FLUENT对某迷宫滴头做了2m和10m时的流量计算，得到流线图见右(由聂境提供)。各数据列于下表。

滴头水力关系	$q = 0.931h^{0.471}$	
滴头工作水头/m	$h=2.0$	$h=10.0$
滴头流量/ $L \cdot h^{-1}$	$q=1.28$	$q=2.74$
坐标轴1mm长的量测值/mm	34.22	34.12
最小过水宽测量值/mm	12.60	11.72
实际最小过水宽L/mm	0.368	0.343
二水头下过水宽度比值/mm	/	0.932

结论：由于滴头工作水头从2m升高到10m，水流惯性随流速增大而加大，导致过流面积减小至2m水头时的93.2%，使滴头的 $x$ 值从0.517降至0.471；减小了水头对流量的影响，体现了一定的补偿作用。



滴头在二个工作水头下的流线图

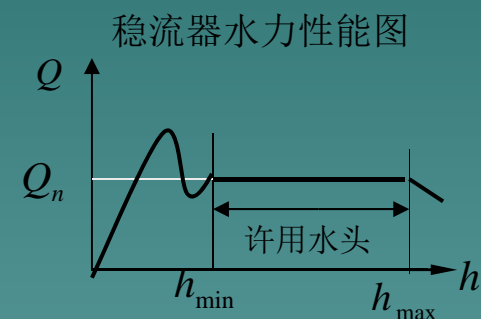


### 3.3 毛管进口安稳流器出现的问题

毛管进口安稳流器，可以使同一轮灌组(各灌水小区)中毛管进口获得基本相等的流量，从而提高灌水质量并减小设计工作量；故稳流器的使用相当普遍，尤其是大面积的微灌系统；估计新疆的使用量已超过1000万个。04年发现许多人对稳流器许用水头范围理解有误，导致滴头的出流量显著小于设计值，影响了灌水质量。

#### 3.3.1 检测机构提供给供应商的资料

由于国外无稳流器产品，没有国际标准可参考，也没有国家和行业标准，检测机构借用补偿滴头的标准实施检测，提供右图成果；它是稳流器大气出流的测试结果。开发商将此提供给用户。



#### 3.3.2 稳流器进口水头要求

稳流器为有压出流，出口水头即为毛管要求的进口水头 $h_0$ ，故稳流器进口允许的水头范围应为 $(h_{\min} + h_0) \sim (h_{\max} + h_0)$ 。可见，稳流器进口水头偏小近半；是滴头流量偏小的主因之一。

#### 3.3.3 应采取的措施

- (1) 尽快制订稳流器行业标准，以控制产品质量。
- (2) 制订稳流器水力性能测试行业标准，改变借用补偿滴头标准的现状。
- (3) 当前，由部农水司发给部属检测单位，对测试方法与成果加个要求。

## 3.4 关于过滤器的过滤精度

为使微灌系统可靠工作，国内外均认可灌水器的流道直径与筛网基本尺寸的比值应取7~10；设计者可根据所选用灌水器流道最小尺寸除以7~10，来选择滤网网孔的基本尺寸；因此，可把网孔基本尺寸视为网过滤器的过滤精度。

行标SL470—2010规定了网、叠片、沙过滤器的过滤精度均以“目”来表达。

“目”是筛网行业的专用词，其定义为：每吋长度上网孔的个数。由此可知：“目”的尺寸中包含网孔和网丝尺寸之和，故“目”数并不能唯一地表达网孔的大小。我国国家标准GB5330—85《工业用金属丝编织方孔筛网》中规定：筛网规格由网孔基本尺寸(mm)与网丝直径(mm)共同表示；如GFTW0.250/0.160。目数相同但网孔基本尺寸不同的筛网规格，在国标中随处可见(见右表)。

工业用金属丝编织方孔筛网(GB5330—85)

目数	网孔基本尺寸/mm	网丝直径 mm	筛分面积系数A
80.41	0.212	0.100	0.46
	0.200	0.112	0.41
101.6	0.160	0.090	0.41
	0.150	0.100	0.36

筛网还有个“筛分面积系数A”，是指网孔面积与总面积的比值；相同目数的筛网，其A值的差异不可忽视，对过滤元件过水能力的影响可超出10%。

### 3.4.1 网过滤器用“目”来表达过滤精度的问题

① SL470—2010对网过滤器用“网孔基本尺寸(目)”来表达过滤精度，但网孔基本尺寸的法定单位应为mm，而不能用目。

② 对不同材质的筛网，是否有不同产品标准？行标中没有关于网材的规定。不同材质而目数相同的网，网孔基本尺寸是否相同？并未经过技术论证。

③ (GB5330—85)中：网孔基本尺寸是有允许偏差的(见右表)；可见1级精度大网孔尺寸偏大1级有余，2级精度偏大了2级。大网孔的允许数量也有规定：1级精度不多于6%，2级精度不多于9%。大网孔对过滤精度有影响，但行标中没有筛网精度等级的规定。

④ 行标中没有筛分面积系数的规定；过滤器生产厂家在采购时仅有目数要求，很可能导致不同批次的过滤器，其过流能力的差别可达约14%；也可能因筛网精度等级不同，导致过滤精度降低。

网孔精度等级与大网孔尺寸对照表

网孔基本尺寸/mm	允许最大网孔尺寸/mm	
	1级精度	2级精度
0.25	0.313	0.375
0.20	0.250	0.300
0.16	0.208	0.240
0.125	0.163	0.200

### 3.4.2 叠片与沙过滤器的过滤精度问题

行业标准《灌溉用过滤器基本参数及技术条件（SL470—2000）》第5章规定了各种过滤器型号的表示方法，其最后一组为过滤精度，单位为目。

① “目”是筛网行业的专用词；没有看到过可以直接套用的论证。

②行标规定：叠片过滤器以目表示过滤精度；但目数如何得到？我问了不少叠片过滤器厂家，关于目的说法是五花八门，甚至是莫名其妙。如：说是以拦截下来的泥沙粒径所对应的网目数、有山寨国外叠片按国外所说的目数，也有的是杜撰的。如果按筛网的定义来量测叠片的“目”数，那么该如何操作？是在过滤元件的沿圆周向量测，还是沿轴向量测？是在过滤元件的外圆周面量测，还是内圆周面量测？而这将是几个完全不同的数！

③行标规定：沙过滤器的精度也以目表示，这里“目”的定义是什么？又通过什么途径来得到？

④即使定义了“目”，没有“目”数与过滤通道(最小)尺寸的对应关系，设计者仍然无法由灌水器流道的最小直径来选择过滤精度。

### 3.4.3 解决途径

① 研究以公制尺寸表达筛网、叠片及沙过滤器的过滤精度，以便于设计者用灌水器流道最小尺寸来选择过滤精度。

② 对网过滤器，在标准中增加筛网精度等级与筛分面积系数要求；并标明筛网型号规格。或者标准中明确规定微灌用过滤器网材的系列规格。

欢迎批评指正。

谢谢！