

DIGUAN XITONG SHUILI SHEJI  
XIN FANGFA

# 滴灌系统水力设计 新方法

朱德兰 吴普特 张林 等 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 滴灌系统水力设计 新方法

朱德兰 吴普特 张林 等 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书立足于滴灌系统水力设计亟须解决的理论和 technical 问题,以减小滴灌系统造价为目标,以满足灌水均匀度为前提,以确定滴头设计工作压力为突破口,以滴灌系统优化设计为手段,完善现有滴灌系统水力设计理论,实现滴灌系统优化,降低滴灌系统造价。本书共分为7章,分析了现有滴灌系统水力设计研究现状,提出了主要研究内容,主要涉及滴头工作压力、毛管和支管水力计算与设计问题,以及滴灌田间管网优化设计方法,在充分考虑系统-土壤-作物三者关系的基础上,提出了滴灌均匀度的合理取值方法,并开发了滴灌系统优化设计软件。

本书可作为农业水土工程以及相关专业的研究生和本科高年级学生的辅导教材,也可供相关专业的科研、教学和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

滴灌系统水力设计新方法 / 朱德兰等著. -- 北京 :  
中国水利水电出版社, 2019. 11  
ISBN 978-7-5170-7935-4

I. ①滴... II. ①朱... III. ①滴灌系统—自动化系统—系统设计 IV. ①S274.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第185477号

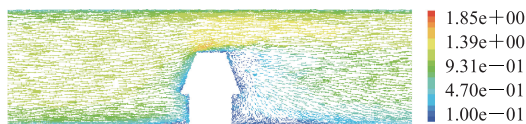
书 名	滴灌系统水力设计新方法 DIGUAN XITONG SHUILI SHEJI XIN FANGFA
作 者	朱德兰 吴普特 张林 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 298千字 2插页
版 次	2019年11月第1版 2019年11月第1次印刷
定 价	72.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



(a) 压力



(b) 流速

图 3.6 滴头附近水流压力及流速分布

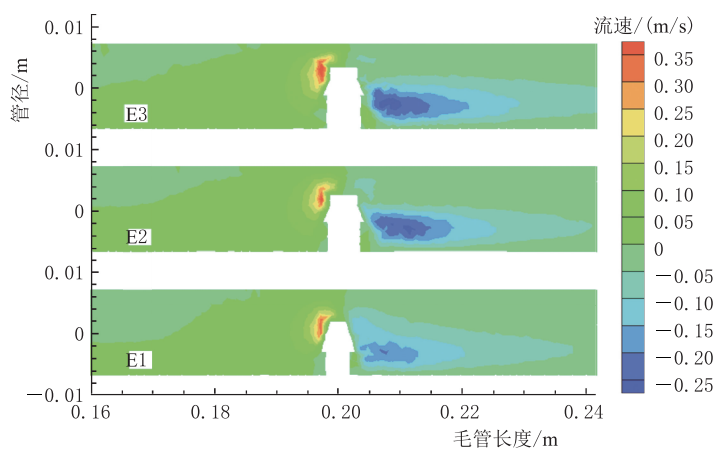
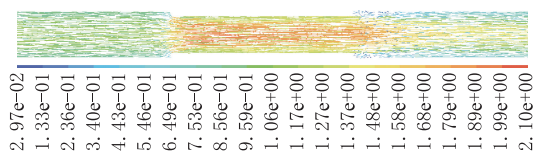
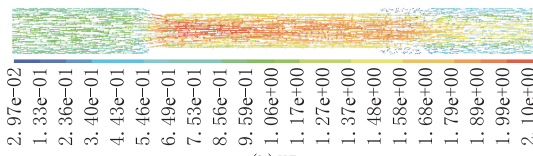


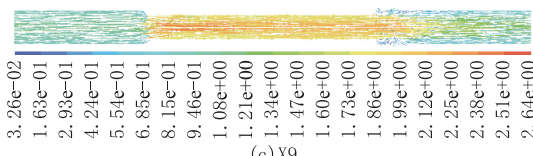
图 3.7 滴头 (E1、E2 和 E3) 附近水流湍动分布



(a) X1



(b) X5



(c) X9

图 3.16 滴头附近水流流速矢量

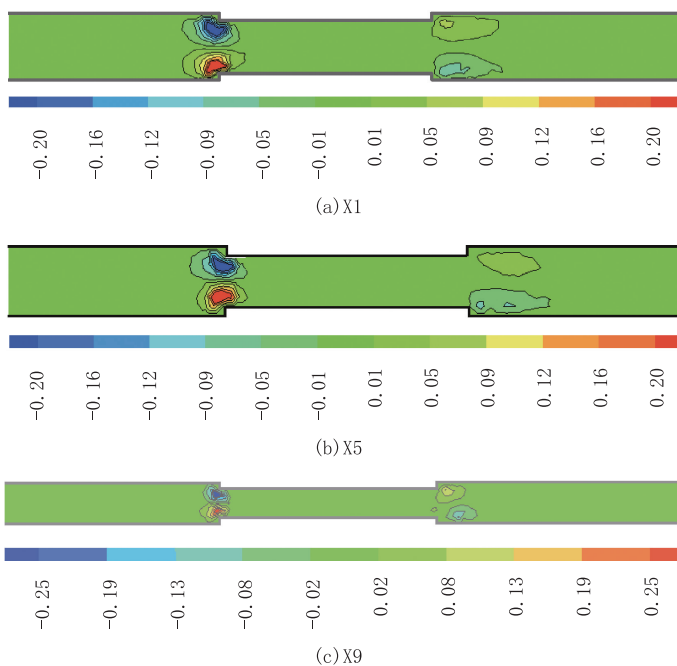


图 3.17 滴头附近湍动强度分布

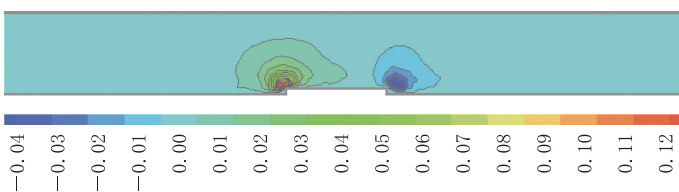


图 3.31 滴头扰动分布

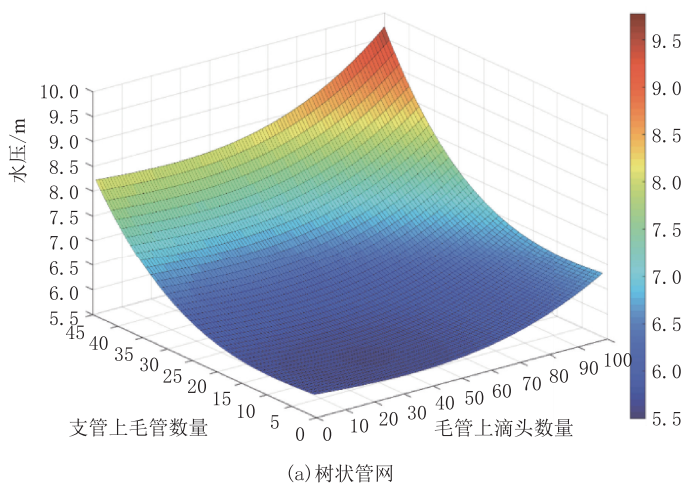
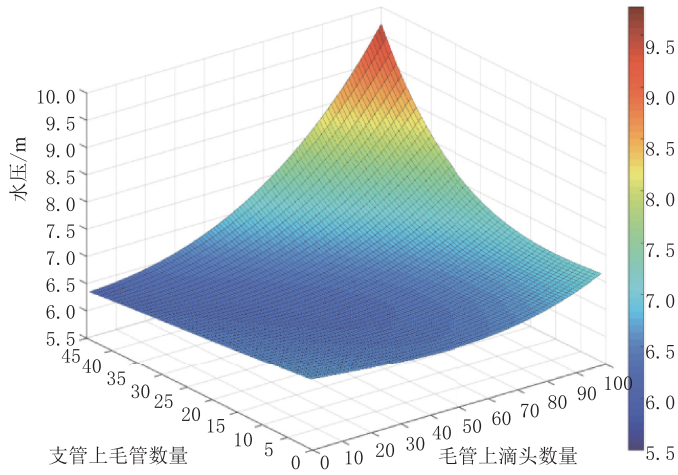
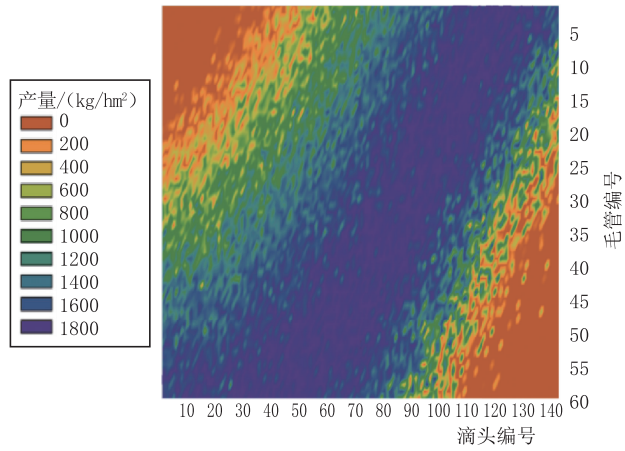


图 4.10 (一) 支管单元滴头压力分布

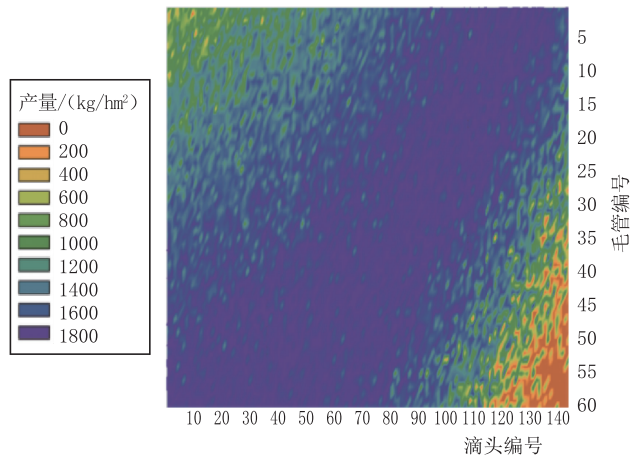


(b) 环状管网

图 4.10 (二) 支管单元滴头压力分布

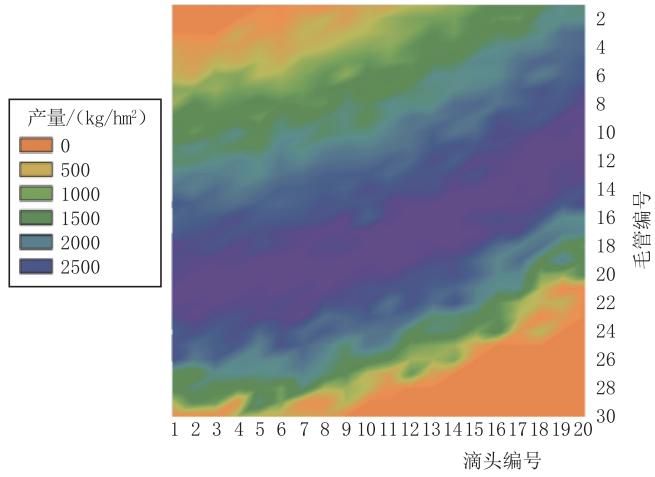


(a)  $C_u=0.6$

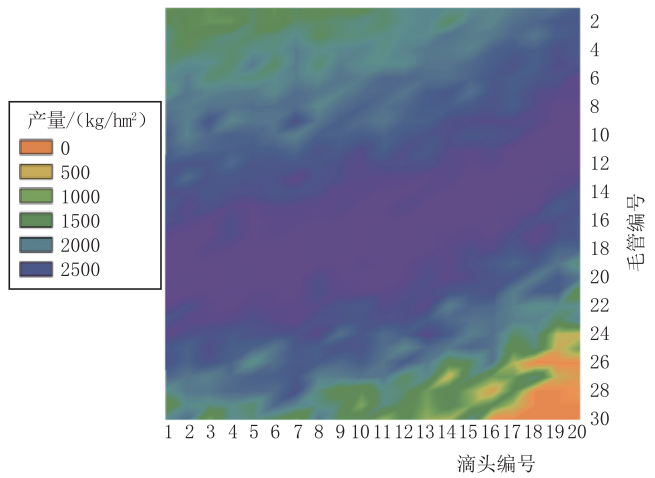


(b)  $C_u=0.75$

图 6.6 不同滴灌均匀度下棉花产量分布



(a)  $C_u=0.6$



(b)  $C_u=0.75$

图 6.7 不同滴灌均匀度下橄榄产量分布

滴灌是将水分缓慢、准确地输送到作物根区土壤的一种局部灌溉技术，具有节水、增产、省力等优点，在世界各国广泛应用。水力设计是滴灌系统安装运行的前提和基础，直接影响系统的工程投资、运行费、灌水质量和安全可靠。但是，目前的滴灌系统水力设计仍然存在以下四个方面问题：一是滴头设计工作压力取值缺乏科学依据，没有理论指导滴头设计工作压力计算；二是毛管水力设计时，毛管局部水头损失通常按沿程水头损失的10%~20%来估算，导致大部分工况下设计结果严重偏离实际结果，影响水力设计精度；三是滴灌均匀度取值多为经验值，且未考虑土壤水分再分布的影响；四是滴灌系统优化设计研究不足，滴灌系统往往包含多个灌水小区，小区数量、面积大小、长宽比直接影响系统投资和运行管理，而此方面研究较少。

为解决上述难题，本书较为系统地总结了作者多年来在滴灌方面的研究成果，以滴头设计工作压力计算，毛管、支管和管网水力设计和系统优化为主线进行撰写，共7章内容。

第1章为绪论。第2~第4章主要涉及滴头工作压力、毛管和支管水力计算与设计问题。首先从经济性出发，以毛管为研究对象，以年综合费用为目标函数，以滴灌均匀度为约束条件，建立了滴头设计工作压力计算方法。选取滴灌中常用的插入式、内镶圆柱式和变截面内镶贴片式等3种类型滴头为研究对象，分析了其对毛管局部水头损失的影响，建立了毛管局部水头损失系数计算公式，进而提出毛管水力设计新方法。基于有限元法，将局部水头损失和滴头制造偏差添加到水力解析中，编写计算机程序并应用到不同支管单元滴灌均匀度的计算，构建了基于有限元法的滴灌支管水力计算模型。

第5章重点研究了滴灌田间管网优化设计方法。根据管网优化设计时管道变径次数多的特点，将非线性规划模型与线性规划模型有机结合，充分利用两者优点，采用两级优化设计：第一级优化采用非线性规划模型，以连续管径为设计变量，以管网年综合费用为目标函数，获得一组最优管径组合；第二级优化采用线性规划模型，参考第一级优化的连续管径组合，结合施工中要求的变

径数，选择标准管径组合，以具有标准管径的管长为决策变量，以管道年综合费用为目标函数，建立相应的线性规划模型，获得全局最优解，从而确定出最优管径。

第6章在充分考虑系统-土壤-作物三者关系的基础上，提出了滴灌系统均匀度合理取值方法。针对现行设计均匀度取值科学依据不足的问题，在综合认识系统-土壤-作物三者关系的基础上，以经济效益最大为目标，针对不同气候和作物特征，得到系统均匀度、土壤含水率均匀度和作物产量的定量关系，提出均匀度合理取值方法，保证了系统均匀度选取的安全性。

第7章重点研究了滴灌系统优化程序设计和系统实现。在满足滴灌均匀度的前提下，将滴头设计工作压力作为决策变量（而不是以往的固定值），将土壤、作物、水源的约束条件考虑在内，在优化过程中，不仅对毛管、支管、干管进行水力优化计算，而且对多个灌水小区尺寸（长宽比、面积、数量）进行优化，开发出理论性强且实用的设计软件。

本书是在国家科技支撑计划项目（2015BAD22B01-02和2011BAD29B02）和杨凌示范区产学研用协同创新重大项目（2017CXY-09）支持下完成的，在此表示感谢。

本书第1~第2章由朱德兰和吴普特撰写，第3章由王亚林、朱德兰和张林撰写，第4章和第6章由王剑、朱德兰和张林撰写，第5章和第7章由朱德兰和吴普特撰写。全书由朱德兰统稿。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

**作者**

2019年7月13日



# 目录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究目的和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.3 主要研究内容 .....	10
<b>第 2 章 滴头设计工作压力计算</b> .....	12
2.1 毛管价格函数 .....	12
2.2 滴头设计工作压力的计算方法 .....	13
2.3 棉田、果园和温室滴头设计工作压力 .....	28
2.4 现行滴灌产品水力参数的改进 .....	31
<b>第 3 章 基于局部水头损失的滴灌毛管水力设计</b> .....	34
3.1 滴头插入式毛管局部水头损失 .....	34
3.2 内镶圆柱式毛管局部水头损失 .....	45
3.3 变截面内镶贴片式薄壁滴灌带局部水头损失 .....	59
3.4 滴灌毛管水力设计方法 .....	73
<b>第 4 章 基于有限元法的滴灌支管水力设计</b> .....	90
4.1 基于有限元法的滴灌支管水力计算模型 .....	90
4.2 改进的滴灌支管水力计算模型 .....	104
<b>第 5 章 滴灌田间管网优化设计</b> .....	114
5.1 田间管网初步优化设计 .....	114
5.2 田间管网二次优化设计 .....	123
5.3 田间管网优化设计应用 .....	128
<b>第 6 章 滴灌均匀度合理取值方法</b> .....	136
6.1 考虑土壤水分再分布的作物产量模拟 .....	136
6.2 滴灌系统年费用计算 .....	139

6.3	均匀度合理取值确定方法 .....	141
6.4	均匀度合理取值方法的应用 .....	142
<b>第7章</b>	<b>滴灌系统优化设计软件开发 .....</b>	<b>150</b>
7.1	优化程序总体框架及设计流程 .....	150
7.2	程序设计及系统实现 .....	157
7.3	滴灌工程设计实例 .....	172
7.4	滴灌工程不同设计方案的比较 .....	177
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>183</b>

## 绪 论

### 1.1 研究目的和意义

滴灌作为世界上最先进的节水灌溉技术之一，是通过机泵或地形高差对水加压，利用田间管网将水输送到安装于毛管上的灌水器，将作物生长所需要的水分和养料以较小的流量均匀、缓慢、准确地输送到作物根部附近土壤中的一种局部灌溉技术。滴灌技术具有灌水均匀度高、节水、节肥、节能、增产增收、适应性强、便于管理等优点，被世界各国广泛应用，并得到快速发展。2000—2007 年，全世界滴灌面积从 376.72 万  $\text{hm}^2$ （张志新，2007）增长到 600 万  $\text{hm}^2$ （Gopalakrishnan, 2007）。2007 年以来，我国滴灌面积呈快速增长的态势，从 2007 年的 67 万  $\text{hm}^2$ （王新坤，2010）增长到了 2013 年的 322.63 万  $\text{hm}^2$ 。

滴灌系统水力设计是滴灌系统安装运行的前提和基础，直接影响系统的工程投资、运行费、灌水质量和安全可靠（梁华锋，2014）。滴灌田间管网水力解析是管网优化设计的基础。早期，国内外学者基于能量轮廓线法（Howell 等，1974、1980；Keller 等，1974；Wu 等，1973、1974、1975）和等比降设计法（张国祥，1990）对滴灌毛管进行水力学解析与设计，在世界范围内极大地推动了滴灌的发展和应。现阶段滴灌系统水力设计仍然存在以下几个问题：

(1) 滴头设计工作压力取值缺乏科学依据，没有理论来指导滴头工作压力设计。多年来，滴灌系统压力常用 8~10m（郭庆人等，2000；徐建海等，2001；关新元，2002；赵万华等，2003）。例如，以色列 Plastro 公司和 Lego 公司生产的 TORNADO 大流道滴头、KATIF 压力补偿式滴头、SUPERTIF 压力补偿式滴头和 TUEFTIF 紊流滴头等，额定工作压力均为 10m，P 型管上式迷宫滴头最小工作压力为 5m；美国雨鸟公司、澳大利亚哈迪公司、我国北京绿源公司和山东莱芜塑料制品厂生产的灌水器工作压力均为 5~20m。采用上述常用值既能适应各种田面地形又不降低灌水均匀度，因而从来没有人对此值的选择依据予以详细论证并提出改进方法。在强调节约能源、降低系统造价的背景下，出现了薄壁滴灌带（杨树寻等，1999；秦为耀等，2000）。例如，澳大利亚 Hardie 滴灌带，当壁厚为 0.2mm 时，推荐的最小额定工作压力为 2.8m；美国雨鸟公司的 TPC 型压力补偿式滴灌带，壁厚 0.225mm 时，推荐的最小额定工作压力为 4m。为了进一步降低滴灌系统造

价,出现了温室重力式滴灌。重力式滴灌具有在低压下工作(2m以下)、流量小(1~2L/h)等特点,顺应了滴灌发展的潮流。重力式滴灌的成功应用,从实践上说明,在大多数条件下灌水器工作压力有大幅度降低的潜力。但是,在不同的地形条件下,在不牺牲滴灌优点的前提下,滴灌系统压力不能无限降低或随意取值,所以,有必要从理论上对该问题做深入研究,分析滴头工作压力取值依据和降低工作压力的可能性。

(2) 滴灌设计时,毛管局部水头损失通常按沿程水头损失的10%~20%来估算。这导致大部分工况下设计结果严重偏离实际结果,影响水力设计精度。水头损失计算是滴灌系统水力设计的一个重要内容,而水头损失计算包括两个部分:沿程水头损失和局部水头损失。长期以来,滴灌毛管中沿程水头损失主要选用达西-韦斯巴赫公式(Darcy-Weisbach公式)、勃拉休斯公式(Blasius,以下简称 Blasius 公式)及哈根-泊肃叶公式(Hagen-Poiseuille,以下简称 Hagen 公式)进行计算;毛管局部水头损失可按沿程水头损失的10%~20%估算。由于滴头种类不同、形式各异,由其引起的局部水头损失问题也非常复杂,有研究表明,毛管局部水头损失占沿程水头损失的比例并不是常数,有时可达50%。因此,准确计算不同类型滴头毛管局部水头损失对提高滴灌系统水力设计精度具有重要的实际意义。

(3) 滴灌均匀度是系统水力设计和后期运行管理的关键技术指标,取值多为经验值,且未考虑土壤水分再分布的影响。降低系统成本和提高灌水效率是滴灌技术发展和推广中需要解决的重要问题。由于滴灌是一种典型的非均匀灌溉系统,滴灌均匀度是系统水力设计和后期运行管理的关键技术指标。提高滴灌均匀度的方法有很多,比如提高工作压力、增大管道管径、使用压力补偿式灌水器,但均会使系统造价显著提高,比如当均匀度由0.80分别增大到0.90和0.95后,管道系统投资增加了32.8%和127.2%(朱德兰等,2011)。降低均匀度会造成部分滴头流量偏离设计平均值,较低的流量则会引起局部土壤干旱造成作物减产,高于平均值的流量则会引起水分和氮素的深层渗漏。因此,均匀度的选取面临着投资和产量间的矛盾,现有工程设计规范对均匀度的选取标准有明确规定[《微灌工程技术规范》(GB/T 50485-2009)],但取值多为经验值,缺乏理论支持和科学依据。同时,土壤水分再分布对灌水不均匀有补偿作用。另外,作物根系的延展能够缓解水肥分布不均带来的不利影响。因此,在制定均匀度标准的时候,应充分考虑系统、土壤、作物三者之间的关系,提出系统均匀度的合理取值,提高滴灌工程设计水平。

(4) 滴灌系统优化设计研究不足,滴灌系统往往包含多个灌水小区,小区数量、面积大小、长宽比直接影响系统投资和运行管理,而国内外在这方面的研究较少。滴灌系统优化设计是通过计算机优化设计模型,借助最优化理论和技术,研究如何在工程规划设计中合理选择有关设计参数,在满足灌水质量和作物需水要求的前提下,从众多可行的设计方案中寻找出既能满足工程设计要求又能降低工程成本的最优或次优设计方案,作为工程施工的技术依据。因此,优化设计是否科学、经济、实用,会直接影响系统的总投资、运行管理费、灌水质量及系统的可靠性。此外,以往优化技术理论性强,实用性不足,理论上的最优方案在实际中不可操作,实际操作要考虑实用性和优化并重,所以次优方案可能才是最佳方案。

为此,本书从制约滴灌发展的问题出发,立足于滴灌亟须解决的理论和技术问题,以

减小滴灌系统造价为目标, 以满足滴灌均匀度为前提, 以确定滴头设计工作压力为突破口, 以滴灌系统优化设计为手段, 完善滴灌系统水力设计理论, 实现系统优化、降低系统造价, 具有较高的理论价值和较强的实践应用价值。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 毛管局部水头损失

滴头为插入式的毛管局部阻力, 实质是插头柱体的圆柱绕流阻力。近代势流理论研究表明, 圆柱绕流阻力与圆柱体的尾流形式和泻涡频率有关, 而尾流形式与泻涡频率不仅仅依赖于雷诺数, 它们还与来流的湍流强度及结构物的表面粗糙度有关 (姜楠等, 2007)。当存在相邻圆柱体时, 两圆柱的尾迹表现为共同涡脱落模式, 两圆柱的尾迹都出现 Karman 涡脱落, 此时由于下游圆柱受到上游圆柱 Karman 涡脱落的周期冲击, 下游圆柱的涡脱落频率与下游圆柱相等, 同时, 下游圆柱的 Karman 涡尺寸比延伸体模式和剪切层附着模式的涡尺寸更大, 但是强度更弱 (齐鄂荣等, 2006)。当圆柱靠近壁面的时候, 壁面会对圆柱尾迹产生影响, 进而对绕流阻力大小产生影响。对于圆柱绕流运动规律的研究有助于理解插入式滴头局部水头损失的形成过程和作用机理。

在进行滴灌管网水力计算时, 毛管水头损失包括两部分: 管段沿程水头损失和滴头段局部水头损失。在已有的研究中, 对毛管沿程水头损失的计算已基本形成统一认识, 主要依据达西公式 (Von Bernuth, 1990; Giuseppe, 2007; John 等, 2005; Howell 等, 1980; Myers, 1972):

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1.1)$$

式中:  $h_f$  为毛管沿程水头损失, m;  $\lambda$  为沿程阻力系数;  $d$  为毛管内径, m;  $l$  为毛管长度, m;  $v$  为毛管内水流流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

在  $Re < 2000$  的层流范围内, 沿程阻力系数主要采用 Hagen 公式:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.2)$$

式中:  $Re$  为毛管水流雷诺数。

在  $3000 < Re < 100000$  的紊流范围内, 计算沿程阻力系数广泛应用 Blasius 公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1.3)$$

在  $2000 < Re < 3000$  的过渡区, 根据 Yitayew 等 (2009) 的研究, 可以将沿程阻力系数视为常数, 为 0.04。

对于毛管局部水头损失, 近些年试验研究表明, 局部水头损失被证实在毛管总水头损失中不可忽略。不少学者对局部水头损失计算进行了选择性分析和数学方法推导 (Kang 等, 1996; Hathoot 等, 2000; Vallesquino 等, 2002; Wu, 1997; Juana 等, 2002; Yildirim, 2006; 朱德兰等, 2010), 虽取得了一些成果, 但因滴头种类、尺寸差异较大, 没有形成统一认识 (陈渠昌等, 1994; 马志强, 2009; 毛根海等, 2005; 穆祥鹏, 2008)。

滴灌设计缺乏参数时,局部水头损失一般被忽略或按沿程水头损失的 10%~20% 估算 [《微灌工程技术规范》(GB/T 50485—2009)]。但有研究表明毛管局部水头损失与沿程水头损失的比值并非定值 (Thompson 等, 2011)。为准确计算毛管局部水头损失,不少学者进行了相关研究。Provenzano 等 (2005) 对插入式和内镶式毛管局部水头损失系数进行研究,认为局部水头损失系数在雷诺数  $Re < 10000$  时基本随雷诺数增大而减小,在雷诺数  $Re > 10000$  时趋于定值。Danieli 等 (2014) 对毛管直通接头水头损失做了研究,认为接头分流水头损失与滴头形状、毛管管径及流速有关,但对毛管内部水头损失没有涉及。王剑等 (2011) 通过试验研究了滴头插入式毛管水头损失规律,认为毛管局部水头损失既与滴头形状有关又与雷诺数有关,但由于只是对特定尺寸毛管进行了研究,其公式适用范围受限。Bagarello 等 (1997) 对插入式滴头局部水头损失进行了研究,认为局部阻力系数只与滴头毛管断面面积比有关,并得出了局部阻力系数表达式:

$$\zeta = 1.68 \left( \frac{A_0}{A_g} - 1 \right)^{1.29} \quad (1.4)$$

式中:  $A_0$  为毛管断面面积,  $m^2$ ;  $A_g$  为毛管滴头段水流通过面积,  $m^2$ 。

在研究水流流动问题时,理论分析与科学试验相结合成为一种重要的研究手段。量纲分析可在试验基础上寻求各物理量之间的关系,并建立结构关系式,通过量纲和谐原理,将相关物理量转化为无量纲因式,使影响因素的个数减小,降低试验工作量,且可将一些非常规因素转化为常见变量(如雷诺数等),有利于传统分析方法的使用。但量纲分析也存在一定局限性,对于某些复杂问题,影响因素较多,准确找出各相关物理量变得不容易,若遗漏某个具有决定性意义的物理量,可导致所建方程式错误。Demir (2007) 和 Yildirim (2016) 等利用量纲分析法对毛管综合摩擦阻力做了相关研究,认为试验与量纲分析理论结合可得到更合理、更准确的结果。Zitterell 等 (2014) 对插入式毛管接头局部水头损失进行了相关研究,认为接头局部水头损失与水流运动黏滞系数成正比。王亚林等 (2015) 考虑温度对毛管局部水头损失的影响,通过量纲分析得出了内镶式滴灌管局部水头损失表达式。仇振杰等 (2013) 针对 16 mm 毛管对雷诺数  $Re > 10000$  时插入式滴头局部阻力进行了相关研究,认为局部阻力系数与断面面积比、雷诺数和滴头间距有关:

$$\zeta = \frac{487.36 \left( \frac{A_1}{A_0} \right)^{2.309}}{S^{0.158} Re^{0.413}} \quad (1.5)$$

式中:  $A_1$  为毛管滴头处滴头截面面积,  $m^2$ ;  $S$  为滴头间距,  $m$ ;  $Re$  为毛管水流雷诺数。

Provenzano 等 (2007) 研究了内镶式毛管局部水头损失规律,认为局部水头损失系数只与滴头形状有关,得出了内镶式毛管局部水头损失系数公式:

$$\alpha = 0.056 \left[ \left( \frac{D_i}{D_g} \right)^{17.83} - 1 \right] \quad (1.6)$$

式中:  $D_i$  为毛管内径,  $m$ ;  $D_g$  为圆柱式滴头内径,  $m$ 。

近些年,计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 发展迅速,通过数值模拟的方式,可以计算流体在三维区域内、复杂边界条件下的速度场、压力场,以及流道内的水头损失、压力脉动、湍流度等信息。目前 CFD 已经成功应用于大量水利设备的设计和改进,在滴灌领域中的应用也在逐渐增多,已成为深入研究滴灌系统的一种新手段

(Issa 等, 1994; 王福军, 2004)。魏正英等 (2005) 通过建立迷宫流道滴头的 CFD 数值模型, 并对滴头的压力流量关系、流道内部的压力和流速分布进行了数值模拟计算, 结合原型滴头的实测数据, 验证 CFD 数值模拟可以成为进一步研究水力性能的有效手段。Provenzano 等 (2007) 和石喜等 (2013) 通过 CFD 模拟对管道水流流动特性进行相关研究, 认为 CFD 具有很高的准确性, 且通过流场可视化可呈现局部水流湍动形态。石喜等 (2013) 和陈江林等 (2012) 利用试验与 CFD 数值模拟对三通管局部阻力进行相关研究, 认为雷诺数  $Re > 150000$  时, 局部水头损失系数只与分流比有关。Guillermo 等 (2006) 通过试验与 CFD 模拟研究插入式毛管总局部水头损失规律, 并得到毛管总局部水头损失表达式:

$$h_1 = 7.638 \times 10^{-6} n^{2.495} \cdot \bar{q}^{2.554} \left( \frac{A_1}{A_0} \right)^{2.845} \quad (1.7)$$

式中:  $h_1$  为毛管总局部水头损失, m;  $n$  为滴头个数;  $\bar{q}$  为滴头平均流量, L/h。

上述滴头局部水头损失的研究大多没有考虑滴头局部阻力间的相互作用 (Neto 等, 2009; Gurol, 2010; Valiantzas, 2005; Danieli, 2014)。早在 20 世纪 50 年代, 苏联学者依杰里奇克提出, 在圆柱绕流情况中, 圆柱体后部产生一环形的漩涡流迹, 若两个物体前后排列、相隔较近, 其组成的系统总局部阻力系数并不是两个物体局部阻力系数之和, 这是因为第二个物体一直处于第一个物体“空气动力”阴影中, 该系统局部阻力系数取决于两物体之间的相对距离。白兆亮等 (2015) 研究了管道孔板之间局部阻力的相互作用, 认为孔板间距对局部阻力影响很大, 当间距小于一定值时, 总局部阻力系数不再随孔板个数的增多而增大。贺益英等 (2003) 对弯管相邻影响进行了研究, 认为形变件综合局部水头损失并不等于单独两个局部水头损失之和。《实用流体阻力手册》(1985) 中提到圆管中两个相邻圆柱存在相邻影响, 认为圆柱总阻力小于圆柱单独存在时的阻力之和。

以上关于毛管局部水头损失的研究, 大多为了简化计算忽略了雷诺数的影响或只给出某个雷诺数范围内的局部水头损失规律, 而综合考虑两种流态下全雷诺数范围内毛管局部水头损失规律的研究较少, 且没有考虑温度对运动黏滞系数的影响。数值模拟主要集中在毛管管件水流流动特性的研究, 而基于理论与试验相结合针对内镶圆柱式毛管局部水头损失研究较少, 对于因毛管断面形状改变引起局部水头损失规律变化的研究几乎没有涉及。关于局部阻力相邻影响的研究主要集中于管道形变件, 滴灌管中滴头间局部阻力相邻影响很少涉及或只针对特定毛管做了定性描述而未阐述其形成机理。

### 1.2.2 滴灌管网水力计算方法

滴灌系统管网水力计算的理论基础是水力学, 而水力学的许多分析计算均是基于传统运动力学中的质量守恒方程、能量守恒方程和动量方程。在同一管道中, 水流不可能凭空产生也不可能凭空消失; 能量也只能从一种状态转化成另一种状态, 不可能凭空产生和消失; 动量的任意改变必然存在外力的持续作用。微喷灌系统多为有压多孔出流管道, 一般情况下, 这些出流孔口间距相等。在滴灌系统中, 配水支管、毛管就是这种沿程出流管。在滴灌系统规划设计中, 灌水均匀性是对灌溉系统最基本的要求之一, 即要求管网中的每个滴头流量偏差尽可能小, 以便均匀一致地为每株作物输送水分。由于管道中存在水头损

失,使得每个滴头的压强水头不同,相应的滴头流量也不同,因此必须进行管道水头损失计算。滴灌管网水力计算主要有三种方法:解析法、数解法和图解法。

解析法最具代表性的方法为多口系数法。Christiansen 于 1942 年最早提出用多口系数法计算多孔出流管道总的沿程水头损失,该方法的建立是基于第一个出水孔与多孔管入口的距离与相邻孔口间距相等,而且管道的管径相等,水力特性一致。其后 Scaloppi (1988) 提出了修正的多口系数,能够用于计算第一个孔口到入口距离为任意长度的沿程水头损失。Scaloppi 和 Allen (1993) 认为流速水头对于水头损失的计算很重要,在分析中应该加以考虑,他们假设毛管上有无限多个孔口,提出了毛管水头损失的表达式。Anwar (1999) 提出了可计算末端出流的多口出流管道水力损失的 G 因子(该因子是出口数和水力损失系数的函数),之后又对该因子做了进一步的修正(Anwar 2000)。Valiantzas (1998) 就管道出口数对水力计算结果的影响进行了深入研究,得出了连续出流和节点出流两种情况下多口系数的计算公式。

数解法是数值计算方法,目前以有限元法和逐段计算法的应用最为广泛(赵凤娇, 2007)。Bralts 和 Segerlind (1985) 将有限元法用于滴灌支管单元水力计算,其后又被许多学者用在喷滴灌管网系统的水力计算。用节点流量平衡的有限元法求解喷滴灌系统的多孔出流计算是目前较为准确的数解法。但有限元法在计算时需要多次迭代,而且不易求解多种管径组成的多孔管问题。Haghighi 等 (1989) 分析了管网中各种管件的局部水头损失。Saldivia 等 (1990) 用有限元法分析了喷灌系统。Kang 和 Nishiyama (1996) 用有限元法分析了微灌毛管,使用达西公式计算沿程水头损失。逐段计算法又称步进法,是 Hathoot 于 1993 年提出,该方法给毛管入口处一个很小的增量,根据滴头的压力流量关系,利用前后算法按达西公式一步步进行水力计算,以此决定管道沿程的压力水头和水头损失的分布(Hathoot 等, 1993)。步进法又分为进步法和退步法,这两种方法均应用水力学两个基本方程(伯努利能量方程和 Darcy-Weisbach 公式)进行逐段计算,在计算中考虑了不同管段阻力系数的变化及连接件阻力系数的变化。步进法的计算受初始假定压力的影响:如果假定的压力合适的话,该方法的计算精度将会很高,否则计算次数将会增加,导致不收敛。康跃虎等 (1999) 应用有限元法,提出一系列以滴头平均流量和均匀度为条件的可用于微灌毛管和支管单元的设计方法,并将进步法、退步法和黄金分割法用于微灌毛管和支管单元的水力计算中。与有限元法比较,逐段计算法计算原理简单,精度高,而且不用建立复杂的有限元模型。

图解法是将管道压力、流量、管径等因素的关系表达式绘制成图,用以分析管网水力学特性的方法。图解法简单、直观,能全面反映流量、管径、地形等要素对管线压力的影响过程,便于设计判断,但图解法精度相对低,受图比例尺的大小、作图法、线簇间插入等问题的限制(李嵩铿, 1994)。Herbert 等提出了 Polyplot 多元图解法,但仍有精度不高等缺点,当出水口少于 10 个时误差扩大,此外当出流强度变化时,需额外计算才能借用图册求解,操作也较复杂(Babaeyan, 2001)。Wu 等 (1985) 提出了各种多口出流情况的无因次图表法,其优点是能反映灌水均匀程度,但对多管径的问题仍不能解决,而且不够直观,不能反映压力沿管线的变化过程。为了减轻计算量,张国祥 (1991) 在提出最小压力孔号的公式后又提出一些图表,但此法也只能解决均匀坡的单一管径问题,查图前