

王新坤 著

微灌系统遗传算法 优化设计理论与应用

Weiguan Xitong

Yichuan Suanfa

Youshua Sheji Lilun

Yu Yingyong



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



王新坤 著

微灌系统遗传算法 优化设计理论与应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要内容为微灌毛管的水力解析与优化设计、田间管网的水力解析与优化设计、干管管网的优化设计,同时对微灌工程中流调器和变频调速器选用的经济性、可行性及注意事项进行了分析,对微灌均匀度计算及其影响因素之间的关系进行了相关分析与研究,最后通过两个典型实例对研究内容进行了验证,并介绍了应用方法与步骤。本书将遗传算法应用于微灌毛管及田间管网的水力解析和优化设计中,建立数学模型,提出求解方法,将毛管和支管作为整体进行优化,提出了微灌毛管及田间管网水力解析和优化设计的新方法。所建立的模型与算法计算精度和搜索效率高、可靠性强、收敛性和稳定性好,根据该方法设计的算法程序运行时间短,具备很好的实用性和通用性。

本书可为微灌工程技术的研发与应用人员提供基本的优化理论与方法,在此基础上开发相应的优化设计软件,可供工程的规划设计、运行管理等使用。

图书在版编目(CIP)数据

微灌系统遗传算法优化设计理论与应用 / 王新坤著

— 北京:中国水利水电出版社,2010.1

ISBN 978-7-5084-7170-9

I. ①微… II. ①王… III. ①遗传—算法—应用—农田灌溉—灌溉系统 IV. ①S275

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第012415号

书 作 出 版 发 行	名 者 行	微灌系统遗传算法优化设计理论与应用 王新坤 著 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 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 印 规 版 印 定	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京市兴怀印刷厂 140mm×203mm 32开本 11.125印张 299千字 2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷 0001—1500册 35.00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

前

言

我国是一个干旱缺水严重的国家，人均占有水资源量不足 2200m^3 ，约为世界平均水平的 30%，而黄河、海河、辽河等主要河流的水资源开发利用率已远远超过国际公认的流域水资源利用率 40% 的危机警戒线。农业用水占我国总用水量的 75.3%，利用方式粗放、用水效率不高、用水浪费等问题十分突出。与国际先进水平相比，我国农田灌溉水有效利用系数为 0.45，远低于发达国家 0.7~0.8 的水平；我国单方水粮食产量不足 1kg，而发达国家大体都在 2kg 以上，以色列达到 2.32kg 以上，农业节水存在着巨大的发展空间和潜力。通过发展节水灌溉技术，提高灌溉水的利用率，无疑是解决我国农业用水危机，缓解我国水资源供需矛盾的有效途径。从国外和我国各地的实践经验看，凡是采用先进的节水灌溉技术，都可获得十分显著的节水增产效果。随着 21 世纪的到来，我国将面临经济持续高速增长、人口将达到 16 亿高峰与水资源十分紧缺的尖锐矛盾。大力发展节水农业，提高用水效率，实现水资源的可持续利用成为我国必然的战略选择。

微灌是一种先进的节水灌溉技术，具有高效节水节肥、增产增收、便于管理等优点，被世界各国广泛应用，并快速发展。微灌工程一般需要较高的资金投入，而且大多数微灌工程需要持续的能量消耗才能维持正常运行。近年来，我国微灌事业得到快速发展，据 2007 年 7 月召开的第七次全国微灌大会统计，我国已发展微灌近 67万 hm^2 。随着微灌技术的快速发展和应用，全国各地在微灌管网工程建设和运行管理方面的资金投入也将不断增加。

微灌工程一般需要较高的资金投入，而且大多数微灌工程需要持续的能量消耗才能维持正常运行。微灌工程的最终用户是农民，目前我国农村经济相对落后，能否为农民带来实效，应是微灌工程建设的基本出发点。因此，使微灌工程的效益最大化，是微灌工程设计的目标。微灌系统设计影响着微灌工程投资、效益和运行管理等多方面的指标，关系到整个微灌工程的质量优劣及其合理性，是决定微灌工程成败的重要工作之一，也是微灌技术应用与发展的基础和保证。

微灌系统的优化主要是通过构造微灌系统各部分的优化设计模型，借助于最优化理论和计算机技术，从众多可行的设计方案中寻找出既能满足工程设计要求，又能降低工程投资成本及运行能耗的最优或次优设计方案，为微灌工程优化设计提供必要的理论基础和实现手段。应用优化设计理论与方法，能够使微灌工程的设计更趋科学性、合理性与标准化，可以提高微灌工程的设计水平，减轻设计人员的劳动强度，提高工作效率。通过优化设计降低微灌工程的能耗，减少工程投资，提高灌水质量和工程的经济效益，有利于微灌技术的推广与应用，对促进节水灌溉技术的发展具有非常重要的现实意义。

国内外学者们围绕微灌系统的优化设计问题，开展了广泛深入的研究，取得了丰富的研究成果。尤其是近几十年来，系统科学的发展，使系统的概念、原理和方法渗透到各个工程领域。越来越多的科研和生产技术员使用系统方法优化的思想来解决微灌工程问题，应用数学模型、系统分析、优化理论和计算机技术对工程方案进行求解，用优化设计方法代替传统的经验设计法。形成了诸如数学规划法、有限元法、图论法等许多管网优化设计方法。近年来，有人也开始尝试应用遗传算法求解管网优化问题。遗传算法作为一种全局优化搜索算法，使用了群体搜索技术，

是一种借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应搜索算法。由于其具有操作简单、易于实现、应用效果明显等优点而被众多应用领域所接受。

作者借鉴前人研究成果,以微灌管网水力解析与优化设计问题为对象,采用遗传算法理论与方法,提出微灌田间管网水力学解析方法;在微灌管网水力学解析基础上,建立毛管与田间管网的优化设计模型与算法;根据树状管网与滴灌管网的工作原理与特点,分别建立微灌干管管网的优化设计模型,提出相应的优化算法;同时,对微灌均匀度影响因素、毛管流调器及变频装置的经济性进行了分析;最后通过工程设计实例,对本书中的优化设计方法进行了验证与分析。

本书是在总结作者近年来对微灌系统优化设计研究成果的基础上撰写而成。在研究及成书过程中,得到了西北农林科技大学蔡焕杰教授、林性粹教授、康绍忠教授、宋松柏教授等专家的热心指导和鼓励,同时,汪志农教授、马孝义教授、李援农教授、王密侠教授及西安理工大学的白丹教授等提出了宝贵的建议,在此向他们表示衷心的感谢。

本书出版得到江苏大学校长袁寿其教授、江苏大学流体机械工程技术研究中心主任施卫东教授及刘厚林教授的支持与帮助,并获得江苏大学国家重点学科——流体机械及工程学科的资助,在此一并表示感谢。

由于本书中的许多内容为探索或尝试性的研究,限于作者的学识与水平,疏漏与不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2009年9月10日

于江苏镇江

目

录

前言

1 绪论	1
1.1 微灌系统优化设计的重要意义	1
1.2 微灌系统的组成	3
1.3 微灌水力解析的基本方法	5
1.4 微灌系统优化设计的发展现状	9
2 遗传算法基本原理	17
2.1 遗传算法概述	17
2.2 遗传算法设计	27
2.3 遗传算法的改进	35
3 微灌毛管水力解析及优化设计	42
3.1 毛管水力解析	42
3.2 单向毛管优化设计	93
3.3 双向毛管优化设计	135
3.4 等流量灌水器毛管的水力解析与设计	176
3.5 灌水器优选	196
3.6 灌水器典型值的孔口位置分析	204
4 微灌田间管网的水力解析与优化设计	208
4.1 田间管网水力解析	208
4.2 田间管网优化设计	224
5 微灌干管管网的优化设计	250
5.1 树状管网优化	250

5.2	微灌管网优化	263
6	毛管流量调节器、变频装置经济性分析	275
6.1	毛管进口流量调节器的经济性分析	275
6.2	变频调速装置的经济性分析	281
7	微灌均匀度计算及其影响因素	289
7.1	微灌均匀度表示方法	289
7.2	灌水器工作压力、地形坡度及流态指数 与均匀度的关系	292
7.3	灌水器间距与均匀度的关系	296
7.4	堵塞对灌水均匀度的影响	298
7.5	流量偏差率与均匀度的关系	299
7.6	毛管管径与均匀度的关系	301
7.7	毛管长度与均匀度的关系	304
8	微灌系统优化设计应用	307
8.1	葡萄涌泉灌工程	307
8.2	棉花滴灌工程	324
	参考文献	338

1 绪 论

1.1 微灌系统优化设计的重要意义

1.1.1 节水灌溉是国内外农业发展的必由之路

我国是一个水资源短缺的国家,人均占有水资源量不足 2200m^3 , 约为世界平均水平的 30% ^[1]; 水资源总量 $28412\text{亿}\text{m}^3$, 农业用水占 75.3% ^[2], 是一个农业用水大国, 时间和空间分布极不均衡, 洪涝和干旱灾害出现频繁, 农业生产很不稳定。水资源紧缺的同时, 利用方式粗放、用水效率不高、用水浪费等问题仍然十分突出。与国际先进水平相比, 我国农田灌溉水有效利用系数为 0.45 , 远低于发达国家 $0.7\sim 0.8$ 的水平; 我国单方水粮食产量不足 1kg , 而发达国家大体都在 2kg 以上, 以色列达到 2.32kg 以上^[3], 农业节水存在着巨大的发展空间和潜力。随着 21 世纪的到来, 我国将面临经济持续高速增长、人口将达到 16 亿高峰与水资源十分紧缺的尖锐矛盾。发展农业高效用水技术, 把“节水灌溉作为一项革命性措施来抓”, 是保障我国农业可持续发展的一项根本性的战略措施。

从国内外的实践经验看, 凡是采用先进的节水灌溉技术, 都可获得十分显著的节水增产效果。农业灌溉节水潜力巨大, 通过发展节水灌溉技术, 提高灌溉水的利用率, 无疑是解决我国农业用水危机, 缓解我国水资源供需矛盾的有效途径。我国水资源平均开发率已高达 19% , 因此, 为实现水资源的可持续利用, 促进生态环境的良性发展, 发展节水灌溉势在必行。

1.1.2 微灌技术应用前景广阔

国家发展和改革委员会、水利部、住房和城乡建设部联合发布《节水型社会建设“十一五”规划》^[1], 到 2010 年, 新增

节水灌溉工程面积 0.1 亿 hm^2 ，农田灌溉水有效利用系数由 0.45 提高到 0.50 左右；农业每公顷平均灌溉用水量比现状减少 150~300 m^3 ，在农业灌溉用水总量基本不增长的情况下新增灌溉面积 130 万~200 万 hm^2 。据钱正英和张光斗主持、两院 43 位院士和近 300 位院外专家参加完成的《21 世纪中国可持续发展水资源战略研究》^[2] 预计，到 21 世纪 30 年代，我国将达到 16 亿人口高峰。为满足 16 亿人口的农产品需要，农田灌溉面积要从现在的 0.52 亿 hm^2 提高到 0.6 亿 hm^2 ，灌溉水利用系数从现在的 0.45 提高到 0.65，每立方米水的平均粮食产量从现在的 1.1 kg 提高到 1.5~1.8 kg 。为实现上述目标，大力发展高效节水农业、走资源节约型道路成为我国必然的战略选择。

微灌是一种先进的节水灌溉技术，因其具有灌水均匀、高效节水节肥、增产增收、便于管理等优点，被世界各国广泛应用，并快速发展。我国于 20 世纪 70 年代初引进微灌技术，经过近 30 年的努力，已取得了很大的进展。尤其是近年来，由于国家对节水灌溉的重视，促进了微灌事业的快速发展。据 2007 年 7 月召开的第七次全国微灌大会统计，我国已发展微灌近 67 万 hm^2 ，占有效灌溉面积的 1.2%，仅新疆生产建设兵团已发展棉花微灌 30 万 hm^2 。有力地促进了微灌技术在我国推广与应用，取得了显著的经济、社会和生态效益。

1.1.3 微灌系统的优化设计有利于促进微灌技术发展

微灌工程一般需要较高的资金投入，而且大多数微灌工程需要持续的能量消耗才能维持正常运行。微灌工程的最终用户是农民，目前我国农村经济相对落后，能否为农民带来实效，应是微灌工程建设的基本出发点。因此，使微灌工程的效益最大化，是微灌工程设计的目标。微灌系统设计影响着微灌工程投资、效益和运行管理等多方面的指标，关系到整个微灌工程的质量优劣及其合理性，是决定微灌工程成败的重要工作之一，也是微灌技术应用与发展的基础和保证。

微灌系统的优化主要是通过构造微灌系统各部分的优化设计模型,借助于最优化理论和计算机技术,从众多可行的设计方案中找出既能满足工程设计要求,又能降低工程投资成本及运行能耗的最优或次优设计方案,为微灌工程优化设计提供必要的理论基础和实现手段。微灌系统中,田间管网、输配水干管管网的布置、经济管径的确定、选型及水力设计,灌水器的选型及参数设计,工作制度的制定,首部系统的选型与设计等是微灌系统设计的主要内容,将直接影响到系统的工程投资、运行费、灌水质量和安全可靠。通过微灌系统的优化设计,能够为管网水力计算、优化设计及灌水器、首部设备的优化选型及运行管理提供相应的技术参数与指标,同时,采用优化设计的方法和手段可以提高工程的设计水平及效率。因此,对毛管、田间管网、干管管网、灌水器及首部设备等进行优化设计,在满足系统流量、灌水均匀度及可靠性要求的条件下,寻求使微灌系统年费用最低的设计方案,节能降耗、减少投资、提高灌水质量及微灌工程的经济效益,有利于微灌技术的推广与应用,对促进我国节水灌溉技术的发展具有非常重要的现实意义。

1.2 微灌系统的组成

微灌系统一般由水源工程、首部枢纽、输配水管网、灌水器及控制、量测和保护装置等组成,如图 1-1 所示。

1.2.1 水源工程

微灌系统的水源可以是机井、泉水、水库、渠道、江河、湖泊、池塘等,但水质必须符合灌溉水质的要求。微灌系统的水源工程一般是指:为从水源取水进行微灌而修建的拦水、引水、蓄水、提水和沉淀工程,以及相应的输配电工程。

1.2.2 首部枢纽

微灌系统的首部枢纽包括动力机、水泵、施肥(农药)装置、过滤设施和安全保护及量测控制设备。其作用是从水源取水

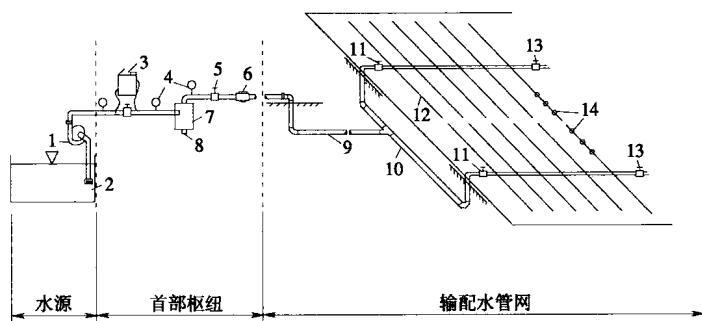


图 1-1 膜下微灌系统示意图

- 1—水泵；2—蓄水池；3—施肥罐；4—压力表；5—控制阀；
6—水表；7—过滤器；8—排砂阀；9—干管；10—分干管；
11—控制阀；12—毛管；13—放空阀；14—灌水器

加压并注入肥料（农药）经过滤后按时按量输送进管网，担负着整个系统的驱动、量测和调控任务，是全系统的控制调配中心。

微灌常用的水泵有潜水泵、离心泵、深井泵、管道泵等，水泵的作用是将水流加压至系统所需压力并将其输送到输水管网。动力机可以是电动机、柴油机等。如果水源的自然水头（水塔、高位水池、压力给水管）满足微灌系统压力要求，则可省去水泵和动力。

过滤设备是将水流过滤，防止各种污物进入微灌系统堵塞灌水器或在系统中形成沉淀。过滤设备有拦污栅、离心过滤器、砂石过滤器、筛网过滤器、叠片过滤器等。当水源为河流和水库等水源的水质较差时，需建沉淀池。各种过滤设备可以在首部枢纽中单独使用，也可以根据水源水质情况组合使用。

施肥装置的作用是使易溶于水并适于根施的肥料、农药、除草剂、化控药品等在施肥罐内充分溶解，然后再通过微灌系统输送到作物根部。

流量、压力测量仪表用于管道中的流量及压力测量，一般有压力表、水表等。安全保护装置用来保证系统在规定压力范围内

工作，消除管路中的气阻和真空等，一般有控制器、传感器、电磁阀、水动阀、空气阀等。调节控制装置一般包括各种阀门，如闸阀、球阀、蝶阀等，其作用是控制和调节微灌系统的流量和压力。

1.2.3 输配水管网

输配水管网的作用是将首部枢纽处理过的水流按照要求输送分配到每个灌水单元和灌水器，包括干管、支管、毛管及所需的连接管件和控制、调节设备。由于微灌系统的大小及管网布置不同，管网的等级划分也有所不同。

1.2.4 灌水器

灌水器是微灌系统中最关键的部件，是直接向作物施水肥的设备。其作用是利用灌水器的微小流道或孔眼消能减压，使水流变为水滴均匀地施入作物根区土壤中。

1.3 微灌水力解析的基本方法

微灌系统一般由水源工程、首部枢纽、输配水管网、灌水器及测控装置组成。水利解析主要是针对输配水管网而言，输配水管网一般由干管管网和田间管网组成。管网优化设计建立在水力解析基础之上。

1.3.1 田间管网的水力解析

田间管网一般由支管和毛管组成，支管和毛管均为多孔出流管，多孔管内的流量沿程逐段减少，多孔管水力解析的主要目的是计算多孔管沿程水头损失、孔口压力及流量值。校核多孔管孔口出流的均匀度及平均孔口流量，评价田间管网设计的优劣。目前多孔管水力解析的主要方法有多孔系数法、能坡线法、有限元法、退步法及多孔管特征值法等。

1.3.1.1 多孔系数法^[4, 5]

多孔系数法假定多孔管的孔口间距及流量相同，管道末端封闭，采用下列公式来计算全管长的沿程水头损失：

$$h'_f = Fh_f = Ff \frac{Q^m}{d^6} L \quad (1-1)$$

$$F = \frac{N \left[\frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \right] - 1 + \frac{S_0}{S}}{N - 1 + \frac{S_0}{S}} \quad (1-2)$$

式中 F ——多孔系数；

f 、 m 、 b ——与管材有关的水头损失计算系数；

d ——多孔管内径，mm；

N ——多孔管总孔数；

S ——孔距，m；

S_0 ——进口至首孔的距离，m；

h'_f ——多孔管沿程水头损失，m；

h_f ——无旁孔分流管沿程水头损失，m；

L ——管道长度，m；

Q ——管内流量， m^3/h 。

1.3.1.2 能坡线法^[6]

能坡线法是把管道上离散分布的孔口简化为连续分布，将毛管水头线简化成一条光滑的指数曲线，可用下面无因次能坡线表示：

$$R_x = 1 - (1 - X)^{m+1} \quad (1-3)$$

$$X = \frac{l}{L} \quad (1-4)$$

式中 R_x ——水头损失坡降， $R_x = \frac{h_r - h_l}{h_r - h_m}$ ；

l ——管道进口至计算点处的长度，m；

L ——管道总长度，m；

h_r ——毛管入口压力水头，m；

h_l ——毛管计算点处的压力水头，m；

h_m ——毛管末端的压力水头，m。

1.3.1.3 有限元法^[7~9]

有限元法是根据毛管水力特性，建立节点刚度矩阵：

$$\{Q\}^{(i)} = [K]^{(i)} \{H\}^{(i)} - \{F\}^{(i)} \quad (1-5)$$

式中 K ——管元的线性化系数；

F ——管元的作用力向量。

应用迭代法解线性方程，完成毛管的水力学解析，具体计算步骤如下：

(1) 假定毛管上各节点的压力水头初值等于毛管进口压力。

(2) 计算有限元模型中的有关参数，形成毛管的有限元行列式方程。

(3) 解行列式方程，计算各节点压力。

如果步骤(3)中计算出来的所有节点的压力水头都等于假定的压力水头，则假定的所有节点压力水头就是所要求的最后结果，否则，将这些计算出来的节点压力水头作为相应点上新的假设压力水头，重复步骤(2)、步骤(3)的计算直到计算值等于假定值，计算结束。

1.3.1.4 退步法^[10,11]

退步法是一种逆递推逐步逼近的方法，计算步骤如下：

(1) 假定末孔水头 h_0 ，由灌水器流量公式 ($q = kh^x$) 计算末孔流量 (q_0)。

(2) 计算最末端管段流量 Q_1 (等于末孔流量)。

(3) 以达西—韦斯巴赫摩擦损失方程计算倒数第二个灌水器上的压力水头，并计算该灌水器流量。

(4) 计算倒数第二管段的流量 (等于前两个灌水器流量和)。

(5) 用同样的方法计算每个灌水器的压力水头和流量。

(6) 计算多孔管入口压力、平均灌水器流量及灌水均匀度 C_u 。

(7) 若计算结果满足要求则计算结束，否则根据计算结果重新调整 h_0 值，重复上述过程直至满足要求为止。

多孔管特征值法^[12]是在毛管水头线多段折线模型基础上，

根据压比和降比的大小分析均匀坡毛管压力水头分布，提出总水头损失计算方法及毛管水力特征量计算公式。

1.3.2 输配水管道的水力解析

输配水管道水力解析的目的是根据管道设计流量，计算管路水头损失及节点压力水头。管路水头损失包括沿程水头损失和局部水头损失。

1.3.2.1 达西—韦斯巴赫公式^[13]

达西—韦斯巴赫公式是管道沿程水头损失计算的基本公式。

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-6)$$

式中 h_f ——沿程水头损失，m；

λ ——沿程阻力系数；

g ——重力加速度，m/s²；

v ——管道流速，m/s。

微灌干管和支管一般使用塑料管，其沿程水头损失常用勃拉休斯公式或哈—威公式计算。

1.3.2.2 勃拉休斯公式^[12]

我国灌溉管道目前常用勃拉休斯公式计算：

$$h_f = f \frac{L}{d^5} Q^m \quad (1-7)$$

对于塑料管 f 、 m 、 b 的值可按表 1-1 选用。

表 1-1 塑料管材水头损失计算系数表

管 材		f	m	b
硬塑料管		0.464	1.77	4.77
微灌用聚乙烯管	$D > 8\text{mm}$	0.505	1.75	4.75
	$D \leq 8\text{mm}$	0.595	1.69	4.69
		1.75	1	4

1.3.2.3 哈—威公式^[14, 15]

欧美国家一般采用哈—威公式计算：

$$H_f = k \frac{L}{d^{4.871}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \quad (1-8)$$

式中 C ——哈—威系数，一般 $C=150$ ；

k ——数值系数。

当 d 的单位为 cm ， Q 的单位为 m^3/h 时， $k=1.528 \times 10^4$ 。

1.3.2.4 局部水头损失^[13]

管道局部水头损失可按沿程水头损失的一定比例估算，也可按式 (1-9) 计算：

$$h_w = \frac{\sum \xi v^2}{2g} \quad (1-9)$$

式中 h_w ——局部水头损失， m ；

ξ ——局部水头损失系数，与管道上的部件类型有关。

1.4 微灌系统优化设计的发展现状

微灌系统的优化应该包括首部装置、输配水管网、灌水器及工作制度等几个方面的优化，国内外目前的研究主要集中在输配水管网的优化设计。微灌输配水管网优化设计又可分为田间管网的优化设计和干管管网的优化设计。近几十年来，系统科学的发展，使系统的概念、原理和方法渗透到各个工程领域^[16,17]。越来越多的微灌技术人员使用系统方法优化的思想来解决微灌工程问题，应用数学模型、系统分析、优化理论和计算机技术对工程方案进行求解，用优化设计方法代替传统的经验设计法，取得了大量研究成果，形成了诸如数学规划法、有限元法、图论法等许多管网优化设计方法。数学规划法又有线性规划法、非线性规划法、动态规划法、整数规划法等优化方法的模型和算法。近年来，遗传算法^[18]与神经网络^[19]被用来求解线性规划和非线性规划等优化问题，有人也开始尝试应用遗传算法和神经网络求解管网优化问题。