

灌溉管网优化研究现状与展望

付玉娟, 蔡焕杰

(西北农林科技大学 教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 分析了灌溉管网系统优化研究的现状, 论述了管网优化常用算法的特点及其适用性, 并根据灌溉管网的特点从不同方面提出了一些看法和观点。

[关键词] 灌溉管网; 优化设计; 优化算法

[中图分类号] S274.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)11-0137-04

随着人口和经济的不断增长, 我国水资源不足问题日益严重, 水的供需矛盾不断加剧, 特别是在北方地区水的缺乏严重制约了工农业的发展。农业作为用水大户, 节水潜力巨大, 因此通过发展节水灌溉技术提高水的利用效率, 是解决农业用水危机, 缓解我国水资源供需矛盾的有效途径。

20世纪70年代末, 管道化节水技术引起人们的关注, 80年代以来得到了很大发展, 到2001年仅山东省已推广低压管道输水灌溉技术173.5万 hm^2 ^[1]。管道化节水技术因其具有以下几方面的优势而得到广泛应用: 首先, 灌溉管道系统利用管网输配水和灌水, 完全避免输水损失和蒸发损失, 节约灌溉用水, 提高了水的利用效率, 并可以防止因渠系渗水而导致的土壤盐碱化、沼泽化和冷浸田等的发生。其次, 由于输配水管网大部分或全部埋设在地下, 提高了土地利用效率, 扩大了有效灌溉面积。第三, 灌溉管道系统具有应用灵活方便, 容易调节控制和实现自动化, 输水速度快, 灌溉效率高, 可用于各种不同的地形、作物与土壤, 便于田间管理等优点^[2]。因此, 管道化灌溉将是21世纪节水灌溉发展的一个趋势。但管道化灌溉也存在管道系统建设规划设计内容复杂, 需要的材料和设备多, 一次性投资较高等问题^[3]。灌溉管网的优化设计主要是根据优化的目标体系构造模型, 并利用最优化理论和方法选择合理的参数, 确定设计方案, 作为工程建设施工与运行管理的依据。因此, 在灌溉管网优化设计时, 寻求满足水量、水压、流速等约束条件, 使管网投资、年运行费或单位面积上的投资最小, 系统可靠性高

的设计方案, 对节约投资、降低能耗、促进新技术的发展都有重要的现实意义。

1 管网最优化技术研究

管网优化是一个多学科相互交叉运用的问题, 涉及到最优化方面的数学理论、技术经济评价以及如何通过计算机实现, 被广泛应用于城市给排水、油气输送、农业灌溉等各个领域。灌溉管网设计首先是进行管网的布置, 确立流量分配模式并计算管段流量, 然后进行水力计算确定管径和其他设计参数。灌溉管网根据管网动力形式的不同分为重力式和泵站加压式两种; 根据水源的多寡分为单水源和多水源^[4]; 根据所处位置分为输配水管网^[3,5]和田间管网^[6~8]。它的优化研究包括管网布置的优化和管径的优化两个方面。

1.1 管网布置最优化技术

管网优化布置是管网优化设计的前提和基础。一般分为环状管网和树状管网两大类, 其中环状管网又分为单环管网和多环管网。树状管网具有管网总长度短、结构简单、水力性能稳定、工程投资少、运行管理方便、操作灵活等优点, 多用于小型管网的优化布置, 但从可靠性方面来考虑, 树状管网较差。环状管网具有可靠性高, 管网各节点压力分布均匀, 水量调度灵活, 管道利用率高等优点, 一般常用作大型管网布置^[9]。

已有的管网优化方式各具特色, 其中Buras等提出用动态规划方法、Clement等提出用单位矢量法进行输水渠系的优化布置。在我国, 董文楚^[10]、周

[收稿日期] 2005-03-28

[基金项目] 教育部高校青年教师奖资助项目

[作者简介] 付玉娟(1980—), 女, 陕西蒲城人, 在读硕士, 主要从事管网优化研究。E-mail: fyj0249@sina.com

[通讯作者] 蔡焕杰(1962—), 男, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水理论与技术研究。

卫平^[11]、陈耀峰^[12]、魏永曜等^[13]结合灌溉工程规划设计的实际需要,对管网布置的基本原则和布置形式,布置与投资的关系,不同管网布置形式的适应性等问题进行了研究。对于树状管网一般采用最短路径法求解网络最短路径,其中 Kruskal 和 Dijkstra 法^[14]是最典型的算法。但这种方法只限于单水源的情况,对于多水源的情况则需要通过划分供水分界线或增设虚拟管道的方法转换为单水源的管网^[15],这虽然可行,但水量的分配问题不能保证达到最优。环状管网优化布置的研究则相对较少,已有的研究成果^[16,17]为管网优化布置提供了可选择的方法,具有一定的指导意义。但目前还存在很多问题,如在实际的优化布置设计工作中很大程度上还是依靠设计者的经验进行,其布局的合理程度取决于设计者的经验丰富程度,但当系统规模较大、投资额很高时,仅凭经验难以达到经济技术要求。由于管网布置与地块形状、坡度、水源位置、作物种植结构、气候条件等密切相关,有很多不确定和随机因素,所以还没有一个方便、快捷、实用、可靠,且具有通用性的系统软件可以用以寻找有效的管网布置方法^[6]。

1.2 管网设计最优化技术

管网优化设计是一个混和离散变量的非线性多目标优化问题^[18],这一领域的研究相对较多^[4,17,8],已有一些软件可供应用,并且已成为提高设计水平和设计效率的重要工具。

灌溉管网系统的规划设计与其他给排水管网最大的不同是,它与当地作物的种植结构和灌溉制度相关,不同的作物种植结构和灌溉工作制度在管网各设计管段中产生不同的流量分配模式,将直接影响管网工程总投资的大小。

现有的研究中,管网的优化设计模型一般为确定性规划模型,即管网的设计根据所控制的灌溉面积逐级确定其管网的设计流量,而未考虑作物种植结构及其分布差异。种植作物的种类不同,作物的需水规律和土壤的水分状况也不同,不同地块的最佳灌水时机也就不同。为了适时适量地满足作物的灌水要求,提高灌溉工程的科学管理水平,使管网的各项性能发挥到最佳,特别是在种植结构比较复杂的情况下,研究随机取水状况下的管网优化设计有一定的现实意义。徐翠兰^[19]以概率论的方法计算出各个管段的设计流量,建立非线性规划模型并进行求解,虽有一定的可行性,但在最末一段或两段支管计算时与实际情况不相一致。因此,如何将随机性与确定性结合起来,更科学地确定管段的设计流量,还有

待于进一步的探讨与研究。

在灌溉水源水量有限的情况下,灌溉系统为了减少工程投资,提高设备利用率,增加灌溉面积,干管通常采用续灌工作制度,支管采用轮灌工作制度。在一般的灌溉管网设计中轮灌组数的划分可能会因设计者的不同而不同,并没有一个统一的划分标准。对于不同的轮灌组数,管道的流量不同,与此相应的管径、水头损失等也不同,对于泵站加压的输水系统,水泵的扬程和工作时间也有很大差异。在一定供水条件下,选择合理的轮灌组数,满足所需水量、水压和灌水同期要求^[20],使系统的配置和运行效果最佳,这方面研究具有很大的现实意义。

管网的优化布置和优化设计是两个相互独立又相互关联的阶段,二者相互影响,相互制约,必须同时考虑才能使其达到整体最优,使不同阶段所要重点解决的问题得到充分考虑。但关键在于要能够在不同阶段选择和设计简单、实用、方便的优化方法,建立适当的优化模型,提高运行效率和求解的精确度,以达到全局最优解^[14]。

2 管网优化的算法

2.1 系统评价目标

灌溉管网优化问题的目标是寻求系统的最佳配置,而如何确定目标函数将直接影响优化结果、运行效率和算法的收敛性。灌溉管网优化大多是以年运行费或系统投资最小的单目标评价体系,管径优化设计是这类问题的主要工作。优化设计方法均以费用函数为基础,用这种方法对连续性函数的优化计算可以得到全局最优解,但在管网优化设计中,由于可用管径的非连续性,优化结果需要采用相邻的标准管径进行圆整化处理,这将破坏解的最优性,使优化结果与实际运行情况存在较大差距。

灌溉管网的优化设计不仅局限在经济上,而且还应节能、节劳和可持续发展等并重。王仁超等^[21]在渠灌区管网优化中提出了基于不完全偏好信息的多目标管网优化方法,该方法以经济性、系统可靠性和未来适应性作为系统的评价体系,实例证明具有可行性。随着对系统设计精确性的要求以及系统运行和控制管理自动化要求的提高,这方面的研究将日趋重要。

2.2 传统优化算法

管网的优化设计是以优化布置为基础的,所以现有的各种优化计算大都建立在定线布置的基础上^[8]。常用的数学模型有线性规划模型^[22~24]、非线性

性规划模型^[15]、动态规划模型^[18,24]等。线性规划模型决策变量数目和约束条件较多,限制了模型所能求解问题的规模,而且一些呈非线性的项不能在模型中考虑。从 20 世纪 70 年代开始,欧美一些学者开始把非线性规划模型应用到管网优化中。在环状管网优化模型中,非线性规划模型得到了广泛应用,如拟线性规划法^[24]、拉格朗日乘子法^[24]、梯度法^[24]、广义简约梯度法^[25,26]、罚函数法^[24,27]、正交实验法^[17,28]、枚举法^[29]和各种改进样式算法的组合算法^[8,27,30]等,但这些算法都有一定的适用范围,有的还需要进行求导计算,且初始步长也不易确定,计算量较大,收敛速度较慢,而且得到的不一定是最优解。动态规划模型是一种求解多阶段决策过程最优化的方法,也得到了一定应用,但对复杂问题,在选择状态、决策确定状态转移规律等方面需要丰富的想象力、灵活性和技巧性,故其应用范围受到了很大限制^[6]。正交实验法和枚举法则不适应于大型管网和相对复杂的管网。

2.3 智能优化算法

目前管网优化研究大部分集中在高效算法上,很多是在基本优化模型的基础上加以改进,采用一些新的算法获得优化方案,所以新算法在管网优化中取得了很多研究成果。遗传算法以其强大的全局最优解搜索能力、问题域的独立性、信息处理的随机性,应用的鲁棒性、操作的简明性而成为一种具有良好普适性和可规模化的优化方法^[31,32]。在灌溉管网优化设计中,遗传算法已在规划设计新的配水系统^[33~36]、现有系统的规划或扩建设计^[18,37]、老化系统的规划或修复设计^[1]、系统的最优化运行等领域得到广泛应用^[38,39]。在国内,遗传算法最优化技术在灌溉管网系统优化研究中的应用还很有限,周荣敏等^[40]应用单亲遗传算法进行了树状管网的优化

布置,取得了很好的效果。王新坤^[27]用遗传算法进行了微灌毛管及田间管网的水力解析和优化设计,用多重群体遗传算法、模拟退火惩罚技术求解管网优化问题,与线性规划计算结果基本一致,而且同一管段内采用一种管径的管道,减少了异径接头所产生的水头损失,易于施工。与其他方法相比,遗传算法模型及算法简单,优化变量少,程序的通用性强,可用于大规模的滴灌管网优化设计。周荣敏等^[40]利用分级分步的优化思想,综合应用单亲遗传算法和神经网络方法,进行树状管网的遗传优化布置和神经优化设计,结果显示,应用这两种方法均能获得更优的方案,使系统设计更合理、更经济。但由于采用了线性规划和神经网络两级优化方法,模型复杂,程序和算法的连续性和通用性差。周荣敏等^[41]还应用改进遗传算法对环状管网进行优化,避免了编码冗余,使算法更简单易用。目前,遗传算法大都是在原有非线性规划模型基础上构造适应度函数及改进编码方式,不易获得最优解,但其作为一种新的最优化技术,在性能上优于非线性的爬山搜索法,同时具备了枚举法离散变量组合的特性,其优势并未完全发挥出来。如何突破现有的理论限制,根据遗传算法的特点构造适应度函数,还有待于进一步研究。

3 结 语

目前,我国节水灌溉已进入大规模的开发应用阶段,灌溉管网的改造、推广工程也向大型化、复杂化和多样化的趋势发展,这对管网优化技术的计算速度、精确度及收敛性都提出了更高的要求。随着最优化理论、技术经济评价和计算机软件、硬件技术的不断发展,以及研究人员在灌溉管网优化设计领域的不断探索,这一领域将会取得更实用、应用更广泛的研究成果。

[参考文献]

- [1] 侯成波. 管灌技术创新的启示[J]. 水利发展研究, 2001, (5): 40-42.
- [2] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 147-148.
- [3] 白 丹. 树状给水管网的优化[J]. 水利学报, 1996, (11): 52-56.
- [4] 张启海, 李振佳. 井群供水管网优化方法[J]. 山东工业大学学报, 1999, 20(1): 71-76.
- [5] 齐学斌. 农田输配水管网优化设计研究[J]. 海河水利, 1996, (4): 14-16.
- [6] 白 丹. 自压喷灌干管管网的优化计算[J]. 农业机械学报, 1995, 26(2): 43-46.
- [7] 童水森, 潘就兴. 喷灌系统田间管网的优化设计及其投资比较[J]. 节水灌溉, 1999, (3): 4-7.
- [8] 王新坤, 程冬玲, 林性粹. 枚举法与动态规划法结合优化田间管网[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(2): 61-66.
- [9] 喻西崇, 冯叔初, 李玉星. 优化集输管网系统的有效方法[J]. 中国海上油气(工程版), 2000, 12(3): 31-34.
- [10] 董文楚. 树状管网布置的优化方法[J]. 喷灌技术, 1984, (4): 4-7.

- [11] 周卫平. 国外灌溉节水技术的进展及启示[J]. 节水灌溉, 1997, (4): 18-20.
- [12] 陈耀峰. 树枝状管网优化布置形式初探[J]. 地下水, 1994, 16(1): 17-18.
- [13] 魏永曜, 王雪珍. 树状输配水管网的优化设计[J]. 水利学报, 1992, (5): 9-18.
- [14] 周荣敏, 雷延峰. 管网最优化理论与技术——遗传算法与神经网络[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [15] 白 丹. 给水输配水管网系统优化设计研究[D]. 陕西西安: 西安理工大学, 2003.
- [16] 刘永淞, 曹爱国, 黄明娜. 给水管网优化布置的探讨[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 1996, (2): 100-105.
- [17] 张新平, 林性粹. 正交表优化管网布置的原理[J]. 上海农学院学报, 1993, 12(3): 20-24.
- [18] 卜文惠, 赵洪宾, 周建华. 用遗传算法求解给水管网系统优化改扩建模型[J]. 给水排水, 2003, 29(12): 89-93.
- [19] 徐翠兰. 微灌系统随机规划数学模型研究[D]. 江苏南京: 河海大学, 2003.
- [20] Lakhdar Zella, Ahmed Kettab. Numerical methods of micro irrigation lateral design[J]. Biotechnol Agron Soc Environ, 2002, 6(4): 231-235.
- [21] 王仁超, 张立岗, 杭 兵. 渠灌区输水系统优化设计问题研究[J]. 水利学报, 2005, (5): 12-48.
- [22] 白 丹. 微灌管网系统优化设计[J]. 农业机械学报, 1997, 28(1): 63-68.
- [23] 白 丹. 低压管道线性规划模型[J]. 地下水, 1991, 16(3): 115-117.
- [24] 裴哲勇. 燃气输配的数学模型[J]. 数学的实践与认识, 2001, 31(12): 1-7.
- [25] 魏运才. 最优化梯度法的改进[J]. 工程数学, 1996, 12(1): 77-79.
- [26] 刘铁男, 苑向兵, 杨文升. 注水系统建模和优化的理论方法[J]. 大庆石油学院学报, 1995, 19(1): 59-62.
- [27] 王新坤. 微灌管网水力解析及优化设计研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [28] 赵树旗. 环状管网优化设计新方法[J]. 华北水利水电学院学报, 1996, 17(2): 84-91.
- [29] 王荣和, 顾国维. 优选管径法在给水管网优化设计中的应用[J]. 中国给水排水, 1998, 11(1): 11-18.
- [30] 程杏林, 金兆森, 沈 洁, 等. 喷灌系统优化设计混合模型及其求解方法[J]. 水利学报, 1997, (7): 60-65.
- [31] 李敏强, 寇纪淞, 林 丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [32] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [33] 王文远. 用基因算法求管网经济管径[J]. 给水排水, 1997, 23(12): 22-25.
- [34] 朱家松, 龚健雅, 郑 皓. 遗传算法在管网优化设计中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 363-367.
- [35] 葛 琳, 许仕荣. 基于遗传算法的给水管网优化设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 167-170.
- [36] 刘小静, 何元春, 贺国定, 等. 管网扩建中管线布局和离散管径的遗传算法[J]. 管道技术与设备, 2001, (3): 12-14.
- [37] 邹 林, 马光文, 丁 晶. 给水管网管径优化设计的遗传算法[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1998, 2(1): 1-6.
- [38] 周荣敏, 雷延峰. 基于遗传算法的雨水管道系统优化设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(1): 59-62.
- [39] 谢礼贵, 戴向前, 王玉坤. 低压管道输水灌溉管网优化设计[J]. 河北水利科技, 2000, 21(增刊): 6-15.
- [40] 周荣敏, 雷延峰, 林性粹. 压力输水树状管网遗传优化布置和神经网络优化设计[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 41-44.
- [41] 周荣敏, 林性粹. 用基于整数编码的改进遗传算法进行环状管网优化设计[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 49-52.

Research status and prospect of optimal design of irrigation pipe networks

FU Yu-juan, CAI Huan-jie

(The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper analyzes the recent status and the problems in the optimal design of irrigation pipe networks, points out their characteristics and limitations of some optimal methods, and puts forward some opinions about irrigation pipe work from different aspects.

Key words: irrigation pipe network; optimal design; optimal method