

周荣敏 雷延峰 著

# 管网最优化理论与 与技术

——遗传算法与神经网络



黄河水利出版社

网络优化与网络规划

# 管网最优化理论与技术

——神经网络与神经网络



清华大学出版社

# 管网最优化理论与技术

——遗传算法与神经网络

周荣敏 雷延峰 著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书论述了遗传算法与神经网络的基本原理、设计与实现方法及其在压力管网最优化领域中的应用。主要内容包括:遗传算法基本原理与设计、单亲遗传算法、树状管网的遗传优化布置、神经优化计算基本原理与实现、自压式和机压式树状管网的神经网络优化设计、环状管网的遗传优化设计及其应用等。可供高等院校有关专业的师生、科研人员、工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

管网最优化理论与技术:遗传算法与神经网络/周荣敏,雷延峰著. —郑州:黄河水利出版社,2002.7

ISBN 7-80621-560-3

I. 管… II. ①周…②雷… III. ①遗传算法-应用-灌溉系统-系统最优化②神经网络-应用-灌溉系统-系统最优化 IV. S274.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 029956 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrpc@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 毫米×1 168 毫米 1/32

印张:7

字数:185 千字

印数:1—1 200

版次:2002 年 7 月第 1 版

印次:2002 年 7 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-560-3/S·39

定价:15.00 元

## 前 言

自 20 世纪 40 年代计算机出现以来,生物模拟便成为计算科学发展的重要组成部分。遗传算法和人工神经网络是从不同角度模拟生物系统的功能而发展起来的两种新兴学科。遗传算法是一种模拟自然界生物进化过程的全局优化算法,它将计算机科学与进化论思想有机结合起来,借助于生物进化机制与遗传学原理,根据优胜劣汰的原则,使所要解决的问题从初始解一步步地逼近最优解。人工神经网络则是从物理结构上模拟人脑的特殊信息处理功能,设计具有生物智能的机器或模拟系统,以解决复杂问题。作为两种新兴的智能化优化算法,遗传算法和人工神经网络各具特色,互相渗透,已在科学研究和工程最优化领域中展现出独特魅力。

压力管网最优化研究一直是灌溉系统和给排水系统规划设计中的重要研究课题,它主要通过构造抽象或简化的管网优化设计模型,借助于最优化理论和计算机技术,研究如何在管网工程规划设计中合理选择有关技术参数,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的最优或次最优设计方案,作为工程规划、设计、施工、运行和管理的重要技术依据。长期以来,针对管网优化问题,广大科研工作者进行了广泛和深入的研究,取得了大量研究成果,产生了巨大的经济效益。特别是最优化理论与技术、计算机技术、数值计算方法的快速发展和广泛应用,为管网优化研究提供了必要的理论基础和实现手段,逐渐使工程设计最优化成为衡量工程设计水平的一种标准。

作者在借鉴和吸收前人研究成果的基础上,针对现有管网优化设计方法中存在的问题和不足,综合应用了遗传算法与人工神

经网络这两种新兴的最优化理论与算法,对压力管网最优化研究中的若干问题进行了有益的探索和尝试,以推动新理论和新方法的应用,满足科学研究和工程技术发展的需要。

本书是根据作者近年来应用遗传算法和人工神经网络最优化理论与技术进行压力管网最优化研究的研究成果撰写而成的。全书共分8章,分别介绍了遗传算法基本原理与设计、单亲遗传算法、树状管网遗传优化布置、神经网络优化计算原理与实现方法、自压式和机压式树状管网的神经网络优化设计、环状管网遗传优化设计等内容,并在附录中给出了单亲遗传算法(SPGA)的源程序。

作者在从事遗传算法和人工神经网络研究的过程中,始终得到西北农林科技大学的林性粹教授、熊运章教授、李靖教授、孙明勤教授等人的悉心指导与帮助。西安理工大学的王文焰教授、沈冰教授、黄强教授、白丹教授、水利部农田灌溉研究所的李英能研究员以及郑州大学李清富教授等人对作者的研究工作提出了宝贵的意见和建议。在本书付梓之际,谨表示诚挚的谢意。

由于水平所限,书中难免会有不妥甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2002年4月于郑州大学

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
1.1 水管网系统优化研究的重要性 .....	(1)
1.2 管网优化设计研究 .....	(2)
1.3 管网优化布置研究.....	(11)
1.4 管网可靠性优化研究.....	(14)
1.5 基于遗传算法和神经网络的管网优化研究.....	(16)
<b>第二章 遗传算法基本原理与设计</b> .....	(23)
2.1 遗传算法的发展概况.....	(23)
2.2 遗传算法的基本流程.....	(26)
2.3 遗传算法的模式定理.....	(28)
2.4 遗传算法的特点.....	(32)
2.5 遗传算法的设计.....	(33)
2.6 遗传算法在压力管网最优化中的应用.....	(47)
<b>第三章 单亲遗传算法</b> .....	(53)
3.1 树的基本概念和定理.....	(53)
3.2 最小生成树算法.....	(55)
3.3 最小树问题的编码方法.....	(59)
3.4 适应度函数设计.....	(63)
3.5 遗传算子设计.....	(65)
3.6 进化策略设计.....	(68)
3.7 单亲遗传算法的实现步骤.....	(71)
3.8 实例应用.....	(72)
<b>第四章 树状管网遗传优化布置</b> .....	(78)
4.1 引言.....	(78)

4.2	树状管网优化布置的数学模型	(79)
4.3	用单亲遗传算法进行树状管网优化布置	(81)
4.4	树状管网遗传优化布置的适应度函数设计	(84)
4.5	不同适应度函数的应用分析	(86)
4.6	参数优化配置	(96)
4.7	实例应用	(105)
<b>第五章</b>	<b>神经网络优化原理与实现</b>	<b>(116)</b>
5.1	人工神经网络研究的发展状况	(116)
5.2	人工神经网络的特征与应用	(121)
5.3	人工神经网络的实现技术	(123)
5.4	Hopfield 网络模型的神经优化计算原理	(124)
5.5	人工神经网络在水科学中的应用	(129)
5.6	展望	(133)
<b>第六章</b>	<b>自压式树状管网神经优化设计</b>	<b>(137)</b>
6.1	自压式树状管网优化设计模型	(137)
6.2	两级优化设计模型	(139)
6.3	非线性规划模型的神经优化计算	(140)
6.4	树状管网神经优化计算实现途径	(144)
6.5	自压式树状管网神经优化计算的仿真实现	(146)
6.6	神经优化计算的参数优化配置	(152)
6.7	实例应用	(157)
<b>第七章</b>	<b>机压式树状管网神经优化设计</b>	<b>(169)</b>
7.1	机压式树状管网优化设计模型	(169)
7.2	机压式树状管网神经网络优化设计模型	(174)
7.3	遗传优化布置和神经优化设计的综合应用	(176)
<b>第八章</b>	<b>环状管网遗传优化设计</b>	<b>(186)</b>
8.1	环状管网管径优化设计模型	(186)
8.2	环状管网优化设计方法分析	(187)



8.3	环状管网遗传优化设计的主要步骤 .....	(188)
8.4	基于整数编码的改进遗传算法 .....	(188)
8.5	管网水力计算方法的选择 .....	(191)
8.6	改进遗传算法的应用 .....	(193)
附录	SPGA 程序 .....	(199)

# 第一章 绪 论

## 1.1 水管网系统优化研究的重要性

输配水管网是城市供水系统和管道化灌溉系统的重要组成部分,它通过各级输配水管道把水安全可靠地输送到各个用水点,并满足水量、水压和水质要求。在整个供水系统中管网部分的投资一般要占到工程总投资的 50%~80%,而且涉及到庞大的能耗和运行管理费用。同时,随着水资源日益紧缺和水资源开发利用率的提高,新系统的兴建和老系统的修复、改建和扩建等所需要的工程投入逐渐增大。因此,水管网系统的规划、设计和运行管理是否科学、经济、实用,直接影响工程总投资、运行管理费及系统可靠性。在工程资金投入有限的情况下,进行管网系统优化设计,寻求能满足水量和水压要求,且能使整个系统的造价最低或年费用最小、系统可靠性最高的设计方案,对节约投资、降低能耗、提高经济效益和社会效益等有着重要的现实意义。

水管网系统的优化研究主要是通过构造抽象或简化的管网优化设计模型,借助于最优化理论和计算机技术,研究如何在管网工程规划设计中合理地选择有关技术参数,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的最优或次优设计方案,作为工程建设施工和运行管理的技术依据。长期以来,针对管网优化问题,科研工作者进行了广泛研究,取得了大量研究成果,产生了巨大的经济效益。特别是最优化理论与技术、计算机技术、数值计算方法的发展和广泛应用,为管网优化研究提供了必要的理论基础和实现手段,逐渐使工程设计最优化成为衡量工程设计水平的一种标准。

通常一个完整的水管网系统设计过程包括规划、设计、运行管理三个阶段。规划阶段主要进行管网干支管线的布置,力求确定管网总长度最短或投资最小的最佳管网结构形式。设计阶段以最优管网布置形式为依据,通过管网水力计算确定有关技术参数,主要解决管径最佳组合问题,寻求系统造价最低的最优设计方案。一个按最优设计方案施工建设的管网系统还必须通过水泵机组优化组合、阀门开启优化组合、水源联合优化调度等优化运行研究,按最优运行策略运行管理才能发挥系统最佳性能。

从管网系统的规划、设计到运行管理,每个设计阶段的设计任务依赖于其他阶段的设计结果,彼此之间有一定的相互影响和相互制约,必须循环进行才能使系统性能达到整体最优。由于在不同设计阶段,管网优化研究的对象和侧重内容不同,采用的优化模型和算法也不相同,一般仍按相对独立的阶段分别进行研究。因此,水管网系统的优化研究工作按照主要研究对象的不同,一般可分为管网优化布置、管网优化设计和管网优化调度等几个方面。

## 1.2 管网优化设计研究

在管网优化研究的发展过程中,由于管网优化设计对整个系统投资影响较大,所产生的经济效益也比较显著。因此,研究人员们对管网优化设计研究非常重视,其发展速度和取得的成果均优于管网优化布置研究。

管网优化设计研究始于 20 世纪 60 年代末,最先在城市供水系统的规划设计中引起工程设计人员们的重视<sup>[1,2]</sup>。经过 30 多年的发展和完善,管网优化设计模型和算法在工程实践中得到了较为广泛的应用,成为提高系统设计水平和设计效率的重要工具。

目前管网设计优化模型大致可分为数学规划模型和非数学规划模型两大类,其中应用最广泛的是基于数学规划技术的优化模型,如线性规划模型、非线性规划模型、动态规划模型和整数规划

模型等。非数学规划模型大多数是基于工程经验和观察所总结的经验性方法,或者是用于特定网络结构的启发式方法。在实际应用中,由于优化设计的目标、所要考虑的约束条件、管网结构类型、系统规模大小等因素的不同,构造出了许多不同的优化模型,各种优化模型的实用性也有很大差异。

### 1.2.1 线性规划模型

线性规划(Linear Programming——LP),是研究在一组线性约束条件下,求某个线性目标函数的最小值或最大值问题,是数学规划中产生时间较早(产生于20世纪30年代)、理论和算法比较成熟、应用最广泛的一个重要分支<sup>[3,4]</sup>。许多实际问题从数学上可直接抽象为线性规划问题,或者通过一定的技术手段转化为线性规划问题来处理。线性规划问题通常可以写成下列标准形式:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m \\ & x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

式中  $x_1, \dots, x_n$ ——决策变量,是线性规划中所要求解的变量;

$c_1, \dots, c_n$ ——费用系数;

$a_{ij} (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$ ——约束系数;

$b_i (i = 1, \dots, m)$ ——约束右端项。

利用矩阵和向量符号,可将上式简写为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{c} \mathbf{x} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

式中  $\mathbf{A}$ —— $m \times n$  矩阵;

$\mathbf{c}$ —— $n$  维行向量;

$\mathbf{b}$ —— $m$  维列向量。

求解线性规划模型的算法很多,如单纯形法、两阶段法、大 M 法和 Karmarkar 法,等等。单纯形法是应用最广的一种通用算法,特别是单纯形法在计算机上的成功实现,使线性规划解决问题的数量迅速增加。

线性规划模型是管网优化设计中应用较早的数学规划模型之一。60 年代末, Karmeli(1968)、Gupta(1969, 1972)等人先后提出了进行树状管网优化设计的线性规划模型<sup>[5-8]</sup>。在树状管网布置形式和节点需水模式已定的情况下,仅用节点连续方程就可以确定出各个管段中的流量,管段的经济管径具有良好的收敛性,不用预先分配流量就可以获得满意的设计方案。如果先选定管段允许采用的标准管径集合,以具有标准管径的管段长度为决策变量,则管道水头损失是管长的线性函数,节点水压约束是决策变量的线性不等式。管网优化设计的目标函数可考虑管网投资和运行管理费用,其中管网造价是各管段长度的线性函数,机压系统的运行费用可视为水泵扬程的线性函数。因此,以具有标准管径的管段长度和水泵扬程为决策变量,可构成树状管网的线性规划模型。这种线性规划模型一般能保证得到一个全局最优解,但只适用于树状管网。

Kally(1972)同样以具有标准管径的管长为决策变量,以管网投资最小为目标函数,提出了环状管网优化设计的线性规划模型<sup>[9]</sup>。由于在环状管网中决策变量的变化对节点水头的影响不能够直接计算, Kally 采用了一种近似计算方法,利用水头变化是决策变量的近似线性关系,通过反复求解线性规划模型,得到环状管网的近似最优解。由于环状管网中存在流量分配问题,不同的流量分配模式直接影响所能实现的管网最小费用设计,因此,应用线性规划模型进行环状管网优化设计一般只能得到一个局部最优解,而无法得到全局最优解。

由于线性规划模型具有成熟通用的求解算法和程序,在随后

的管网优化研究中,有许多非线性规划模型的求解都是通过增加一些改进策略或措施,以求解线性规划模型为基础寻找有效的求解途径。

在国内,魏永曜(1987)、李永顺(1991)、覃通(1993)、白丹(1987,1996,1997)等研究人员,分别应用线性规划模型进行了喷灌、微灌及供水系统的管网优化设计研究,在工程实践中产生了显著的经济效益<sup>[10~17]</sup>。

已有的研究成果表明,应用线性规划模型进行管网优化设计具有如下优点:

(1)线性规划模型采用商业标准管径和真实的市场价格进行管网技术经济分析计算,能准确反映管网工程实际投资的大小。

(2)线性规划模型的优化结果是具有标准管径的管段长度,可以在工程施工中直接采用,无须调整。

(3)对于小型管网,线性规划模型一般均可采用通用的单纯形法求解,使用方便,行之有效。

(4)对于树状管网,线性规划模型能得到全局最优解。

因此,到目前为止,线性规划模型仍然是管网优化设计中经常采用的一种优化模型。但是,应用线性规划模型进行管网优化设计,还存在一些不足:

(1)线性规划模型的决策变量数目多,最优管径集合确定困难。管网中各管道所能选择的管径规格数目,决定着模型中决策变量数目的多少和解的最优性。为获得全局最优解,每个管道必须能自由地从所有可用管径集合中选择其组成管径。但是,如果所采用管径集合太大,如采用最大的商用管径集合,则会使模型中的决策变量数目急剧增大,降低模型的求解速度,甚至会因模型太大而无法求解。在实际应用中,设计者往往是根据自己的实践经验来选择可用管径集合,当管网规模较大时,人工确定和调整可用管径集合比较困难,难以构成最优集合,需要反复求解模型,增大

了计算工作量。

(2)线性规划模型的约束条件包括节点水压约束和管长约束,约束数目多,限制了模型所能求解问题的规模。

(3)线性规划模型只能考虑线性目标函数,一些呈非线性关系的费用项不能在模型中考虑,直接影响管网投资计算精度。

上述不足,一定程度上限制了线性规划模型的应用范围。因此,如何采用简捷快速的方法,确定最优管径集合,减少优化模型中决策变量和约束条件的数目,是线性规划模型在大中型管网设计优化应用中,需要进一步研究和解决的问题。

### 1.2.2 非线性规划模型

非线性规划(NonLinear Programming——NLP),是研究在一组线性与(或)非线性约束条件下,寻求某个非线性或线性目标函数的最大值或最小值问题<sup>[3,4]</sup>。非线性规划问题通常可用数学模型表示为:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ \text{s. t. } & g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ & h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, l \\ & x \in E^n \end{aligned}$$

式中  $f(x)$ ——目标函数;

$g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ ——约束函数。

这些函数中至少有一个是非线性函数。

在管网系统中,管道和各种水力元件的水头损失关系、泵的抽水性能关系、水位变化以及各项投资等,一定程度上都是非线性的,完全靠线性模型无法准确反映问题的实质。对于一个管网系统来说,所建管网优化模型必须能比较真实精确地反映管网系统的实际状态,才能使所获得的解越来越接近最优解。从70年代初,欧美一些学者开始比较完整地把管网优化问题描述为非线性规划问题,并建立了大量的管网优化设计非线性规划模型。

在树状管网的优化设计研究中, Schaaake (1970) 和 Lang (1971) 曾提出了树状管网的非线性规划模型, 但是与树状管网的线性规划模型相比, 该模型并没有表现出更强的计算优势, 不能得出更好的结果。

在环状管网优化设计研究中, 非线性规划模型应用较多, 非线性规划模型的许多求解算法如拟线性规划法、拉格朗日乘子法、梯度法(微分法)、广义简约梯度法、罚函数法以及各种改进或组合算法等, 在管网系统非线性优化模型的求解中都有不同程度的应用。

对于环状管网非线性规划模型, Shamir (1964) 等人采用梯度技术进行求解<sup>[18]</sup>。他们先采用 Newton - Raphson 方法获得管网稳定状态的水力解, 然后用该解的 Jacobian 矩阵计算目标函数对决策变量的梯度, 寻找减小管网设计费用的求解方向。模型中只考虑一种运行负载, 对节点水压和管内过流量都没有约束。Smith (1966) 组合了随机搜索、最陡下降和线性规划技术对类似问题进行优化设计<sup>[19]</sup>。

Jocoby (1968) 采用一种数值梯度技术求解环状管网非线性优化模型<sup>[8]</sup>。他先选择一个初始设计点, 在当前设计点周围做较小移动, 移动方向随机选择或者根据前几个相对成功移动的“经验”确定, 评价新设计点处的目标函数值, 计算目标函数对设计变量的近似梯度, 重新确定能改进设计的优化搜索方向。Jocoby 仅应用这种比较复杂的方法, 进行了一个有 5 条管道的双环网络优化设计, 没能进行更复杂网络设计研究。Lam (1973) 则提出用离散梯度法进行供水系统优化设计<sup>[20]</sup>。

Shamir (1974)<sup>[21]</sup> 提出用简约梯度法和罚函数法联合求解配水系统的优化设计模型。优化模型中的决策变量可以是设计变量如管径, 也可以是控制变量如水头和流量, 目标函数可以包括基本投资、一个或多个负载情况下的运行费用、系统性能的评价指标、违反约束的惩罚等项目中的一项或几项, 约束条件包括对决策变



量的约束和每种负载情况下系统性能约束。计算机实现和应用研究表明,该方法在计算上是可行的,可用于配水系统的分析、设计和运行等许多方面。

1977年,Alperovits和Shamir提出线性规划梯度(Linear programming gradient——LPG)算法<sup>[22]</sup>。LPG算法通过两个相互交替的线性规划模型,解决环状管网的局部优化问题。它首先确定出一个可行的初始流量分配方案,建立线性规划模型并求解,得到一组管径组合方案和节点压力水头。根据当前LP模型的优化结果,求目标函数对流量的梯度值,沿着能使系统费用减少的梯度方向修正初始流量分配;然后用新的流量分配模式重新构造LP模型,反复进行该过程直至收敛于一个局部最优解,也可能是全局最优解。LPG算法首次将环状管网中的流量分配问题与优化设计结合起来,对管网的水力解没有做任何假设,是环状管网优化设计的一个重要进步。随后,Quindry(1979,1981)、Goulter(1986)、Fujiwara(1987)、Kessler(1989)等围绕LPG算法进行了大量的修正和改进性研究工作<sup>[23~27]</sup>。改进后的LPG算法在梯度表达式、搜索方法、收敛性能等方面均有较大程度地提高和完善。然而,改进后的LPG算法仍然依赖于初始流量的分配,为获得最优设计必须尝试许多初始流量分配模式,计算工作量较大。在有关LPG算法的研究中,都忽略这样一个事实,即梯度不总是存在的,或者认为这一事实并不重要。大部分情况下,LPG算法总能找到一个次优的可行解,无法达到真正的全局最优解。

无论是用Newton-Raphson方法、梯度法、罚函数法、还是用LPG算法,一旦得到一个局部最优解,一般都无法进一步改进解的最优性。Morgan和Goulter(1985)提出一个两阶段法,用Hardy-Cross方法进行流量分配,用线性规划模型求每个流量分配下的最佳管径组合<sup>[28]</sup>。该方法可用于分析大范围需水模式和管道失败组合情况下的环状管网最小费用布置和设计,但只能得