

伪并行遗传算法在供水管网优化调度中的应用

信昆仑, 刘遂庆, 陶 涛, 李树平

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 讨论了基于微观水力模型的多水源大型供水管网优化调度问题的主要特征, 并提出了求解该问题的改进遗传算法. 首先, 针对决策变量的结构提出二进制-实数混合编码策略; 其次, 设计并实现了多种群进化的伪并行遗传算法. 将本算法与单一群体进化算法同时应用于实际管网的优化调度求解, 结果表明, 通过个体迁移策略, 伪并行遗传算法可以加速优化搜索的进程, 显著改善解的质量, 并有效节省运行调度费用.

关键词: 供水管网; 水力模拟; 优化调度; 伪并行遗传算法

中图分类号: TU 991.33

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2006)12-1662-06

Application of Pseudo-Parallel Genetic Algorithm in Optimal Operation on Water Supply Network

XIN Kunlun, LIU Suiqing, TAO Tao, LI Shuping

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a hydraulic simulation model, the main features of operational optimization problem for the multi-source water supply network are discussed. An improved genetic algorithm is then proposed. Firstly, a mixed-coding methodology was adopted according to the characteristics of the decision variables. Secondly, a Pseudo-Parallel GA (PPGA) was designed and implemented. Both simple GA and PPGA were applied to solve an operational optimization problem for a real-life water network. Results show that the evolution process of those populations can be accelerated through the migration of individuals when using PPGA. Compared to SGA, the PPGA proves to be more efficient and able to find much better solutions. And substantial saving on operation costs can also be achieved if the optimal solution is adopted.

Key words: water supply network; hydraulic simulation; optimal scheduling; pseudo-parallel genetic algorithm

供水系统计算机优化调度是城市供水行业长久以来面临和亟待解决的课题. 早在 20 世纪 70 年代, 国外给水管网领域的专家如 Ormsbee, Lansey, Mays, Coulbeck 等人相继开始了管网优化调度的理论研究^[1,2], 从 20 世纪 80 年代至今, 国内的一批学

者如王训俭、赵洪宾、赵新华、吕谋等在这方面也进行了深入研究并取得一定的研究成果^[3~7]. 在实际工程应用方面, 美国的 Chicago, Washington, Houston 等, 英国的 London, East Worcestershire, 法国的 Paris, Chambéry 及日本的一些城市, 已经基本

收稿日期: 2005-05-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(50409016); 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2004AA649410)

作者简介: 信昆仑(1977-), 男, 山东无棣人, 工学博士. E-mail: xkl@mail.tongji.edu.cn

实现了供水系统的计算机优化调度管理.近年来,国内部分城市也相继开展了这方面的应用实践研究,同时在优化调度理论模型及求解方法上亦取得一系列新的研究进展.随着数据采集与监测、通讯等软、硬件设施在供水系统中的逐步完善,供水优化调度系统的应用必将逐步完善推广.因此,研究适用在我国普遍存在的多水源大型城市供水管网中的计算机优化调度模型和求解方法,并积极开展应用实践,对于提升我国供水行业的信息化水平,为供水行业节省运行费用具有非常重要的意义.

1 给水管网优化调度的数学模型

优化调度的目标是寻求在调度周期内使供水能量费用达到最小的水泵、水池(或水库)组合供水方案.由于水泵本身分定速、变速两种不同的类型,因而该问题是既有连续变量又有离散变量的混合非线性优化问题.本文以管网微观水力模型作为计算核心,建立以管网中所有水泵的开关及转速比为决策变量的直接优化调度数学模型.

1.1 目标函数

供水能量费用主要包括制水费用和输水费用两部分.输水费用主要集中在水厂的二级泵站内部,一级泵站的能量费用以单位流量的能耗费用计入制水成本,同时考虑城市供水系统以天为周期的规律性,优化调度的时间周期选为24 h.

单台水泵工作时,水泵的有效功率消耗为

$$P_i = KQ_i H_i / \eta_i$$

其中: K 为换算系数; Q_i 为水泵的出水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; H_i 为水泵的出水扬程, m ; η_i 为水泵在当前流量、扬程下的运行效率; P_i 为水泵功率, kW .

对于二级泵站,考虑相应水厂的制水成本,泵站的总供水费用为

$$C_j(t) = \left[p_j \sum_{i=1}^n X(i) \cdot Q_i + \sum_{i=1}^n P_i X(i) F_j(t) \right] E(t) \quad (1)$$

式中: p_j 为泵站 j 对应水厂的制水成本; Q_i 为泵站 j 的第 i 台水泵出水量; $X(i)$ 为该泵站第 i 台水泵开关状态,开启时 $X(i)=1$,关闭时 $X(i)=0$; $F_j(t)$ 为 j 泵站第 t 时段电费; $E(t)$ 为 t 时段调度时间间隔, t 为该调度时段起始时刻; n 为泵站 j 内水泵台数.

对特定时段调度时,总的供水费用目标函数可以写成

$$\sum_{j=1}^J C_j(t) = \sum_{j=1}^J \left[p_j \sum_{i=1}^n X(i) \cdot Q_i + \sum_{i=1}^n W_i X(i) F_i(t) \right] E(t) \quad (2)$$

当以24 h为周期进行全天候调度时,总的供水费用目标函数为

$$C = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J C_j(t) = \sum_{t=1}^T \left\{ E(t) \sum_{j=1}^J \left[p_j \sum_{i=1}^n X(i) \cdot Q_i + \sum_{i=1}^n W_i \cdot X(i) F_i(t) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: T 为调度周期时间长度; J 为管网中泵站数.

1.2 优化调度问题的约束条件

(1) 以管网连续性方程与能量守恒方程为基础的隐式水力平衡约束条件

$$F(Q, H) = 0 \quad (4)$$

(2) 最小服务水压约束

$$H_{i,t} < H_{i,t,\text{req}} \quad (5)$$

其中: $H_i \in \Omega_n$, Ω_n 为控制点集合; t 为调度时刻, $t=1, \dots, T$.

(3) 泵站的出水量约束

$$\min Q_{j,t} \leq Q_{j,t} \leq \max Q_{j,t} \quad (6)$$

(4) 水池(库)的最高、最低水位约束

$$\min V_{r,t} \leq V_{r,t} \leq \max V_{r,t} \quad (7)$$

式中: r 为水池(库), $r=1, \dots, R$.

(5) 水泵扬程约束,根据水泵的运行特性曲线可知,等效于对水泵效率的约束

$$\min H_{i,t} \leq H_{i,t} \leq \max H_{i,t} \quad (8)$$

(6) 初始边界条件,要求在调度周期(一般为24 h)内,水池(库)的初始时段水位与末时段水位相等

$$V_{r,\text{init}} = V_{r,\text{end}} \quad (9)$$

2 优化调度模型的主要特征

2.1 管网微观模型作为水力计算内核

本优化问题基于管网微观水力模型,比基于宏观模型更为灵活.宏观模型是通过对监测的水量、水压等数据回归分析,获得管网中供水泵站出水量、水压与管网中监测点的相关关系,并以此分析供水调度方案的水力约束及供水能量费用.由于宏观模型对管网大幅简化,仅保留供水泵站和连接泵站的概念性主干管等,虽然一定程度上降低了建模的难度,但模型的精度和不确定性也显然随之增大.而且,当

实际管网发生变化(改建或者扩建)时,原有宏观模型很可能不再适用,需重新收集数据.因此,宏观模型的灵活性和适应性较差^[5,6].

管网微观水力模型是基于完整的管网拓扑和管网水力计算理论建立的,供水水源的水量和水压力通过求解水力平衡方程获得,较宏观模型使用的回归分析方法更为精确.此外,当管网结构变化时,微观模型仅需对管网输入参数作相应改动,无须重新收集数据和建模,具有更大的通用性和灵活性.

2.2 高内聚、低耦合的模型求解策略

从式(1)可见,作为供水系统运行费用函数,以管网中各台水泵的流量、扬程、运行效率以及制水成本系数等参数显式表达,而这些参数可通过微观水力模型求解获得.此外,基于微观模型的优化调度方法不再将优化问题分为泵站层次的水量分配和泵站内部的水泵组合优化两个子问题,而是直接以水泵的开关状态和转速比作为决策变量来求解,避免了两级优化的协调和对优化问题的分解求解等问题.

在求解结构上,采取最优化模型与水力计算模型分离的模式(图1),由水力模拟模块计算参数,向最优化模型传递,避开对最优化问题及约束条件的繁琐数学分析和简化(如求解函数梯度等),同时保证模块自身的高内聚与模块之间的低耦合^[6].

这种求解模式的优势在于:①使模型更加灵活,可对水力计算模块或者最优化计算模块独立地修改或完善,以提高模型的整体性能.②模型结构更适于分布式计算,将大量的计算负荷分散到更多的计算机CPU上执行,大大提高模型的求解效率.

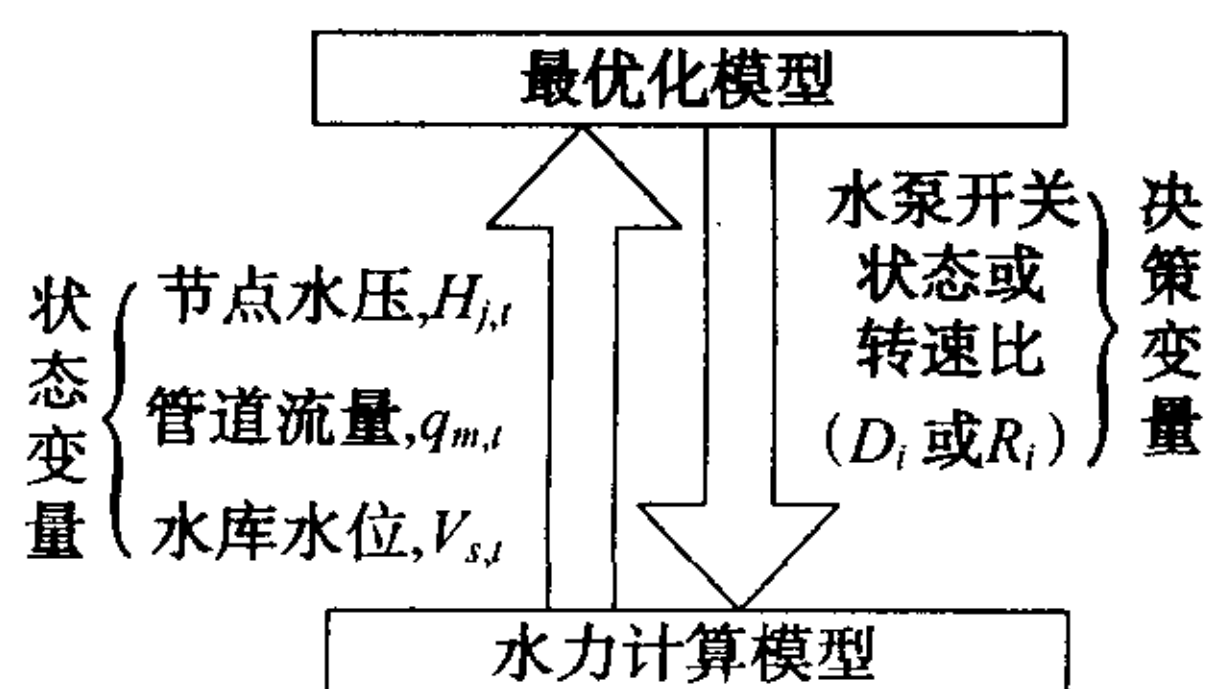


图1 最优化模型与水力计算模型的关系

Fig.1 Relationship between optimal model and water simulation model

3 伪并行遗传算法求解

采用遗传算法作为管网优化调度问题的求解方法.由于内在的类随机搜索机制,造成遗传算法较传统的线性、非线性最优化方法需更大的计算量,求解

效率也较传统搜索方法低.此外,遗传算法求解还存在过早收敛于局部最优解的问题.除了从编码方式及遗传算子本身等改进外,另一改进途径是并行化.

目前,传统的遗传算法在各个领域的研究及应用已十分广泛,而并行遗传算法由于受到需并行计算硬件环境等限制,仍以基础算法研究为主^[8].但随着并行计算技术、网络通讯技术不断发展和普及,针对并行遗传算法在工程调度领域的研究及应用也在逐渐增加.在水电站的优化调度、电网的无功优化、车间作业调度等应用、研究方面,近期均有关于采用并行遗传算法的文献报道.

近来,随着管网微观水力建模技术的不断成熟,遗传算法在管网优化调度问题的研究及应用也在不断增多.同时,并行计算技术、计算机网络的不断发展,也为采用并行遗传算法研究此类问题并最终应用于工程实践提供了可能.

3.1 遗传算法原理

遗传算法是一种适合求解大型组合优化问题的算法,对决策变量编码后会形成有限长的字符串——染色体或个体.每个个体都对应优化问题的一个可行解.一组个体组成一代种群.对该种群模拟进化过程,运用优胜劣汰原则,通过选择、交换、变异等遗传操作形成新一代种群,如此“选择—交换—变异—再选择”,不断重复,使各代种群的优良基因成分逐渐积累,直到种群趋于成熟,即找到问题的最优解.

3.2 二进制-实数混合编码策略

针对泵站中存在定速泵和变速泵两类情形,分别以二进制0/1和实数编码0~1.0表达定速泵的开/关状态和变速泵的转速比,并以编码串组合来表达管网中所有水泵的运行状态,形成用以表达某种调度方案的染色体个体,再由一定量染色体个体组合形成种群.这种编码方式的优点在于既能保证决策变量与编码结构在形式上的统一,也避免了用多位二进制编码映射实数值时的额外计算开销,从而提高了算法的搜索效率.

3.3 伪并行遗传算法的设计与实现

并行遗传算法主要分为主从式(仅实现适应度评估的并行化)、粗粒度、细粒度三种架构^[9,10].限于研究的硬件条件,在单台计算机上采用多线程技术设计伪并行遗传算法,模拟粗粒度并行计算环境.

方法实现:将种群分解为同等规模的 m 个子种群($m > 1$),分别初始化并进化计算.同时,为 m 个子种群建立一个最优个体缓冲池,当子种群进化至一定代数时,通过自身的迁移算子执行个体迁移计

算.不同于真正的并行算法,本方法所实现的伪并行算法无须维护各计算节点之间所形成一定规则的拓扑,而是所有迁移算子都通过最优个体缓冲池来实现群体之间最优个体的交换.缓冲池设计为单入口单出口的管道式结构,具体方法是,执行至一定进化代数后,子群体首先将内部最优的 x 个个体送入缓冲池,同时从缓冲池的出口侧取走 x 个个体替换内部最差的 x 个个体.为避免由于多线程模式引起缓冲池数据的存取冲突,设计一组变量监视缓冲池各位置上的个体的空/满的状态变化,通过缓冲池群体每隔一定进化代数,可以与其他群体充分交换彼此的优异进化个体,增加了搜索到更为优异个体的可能性,也一定程度地避免了单种群进化过程中的过早收敛问题(图 2).

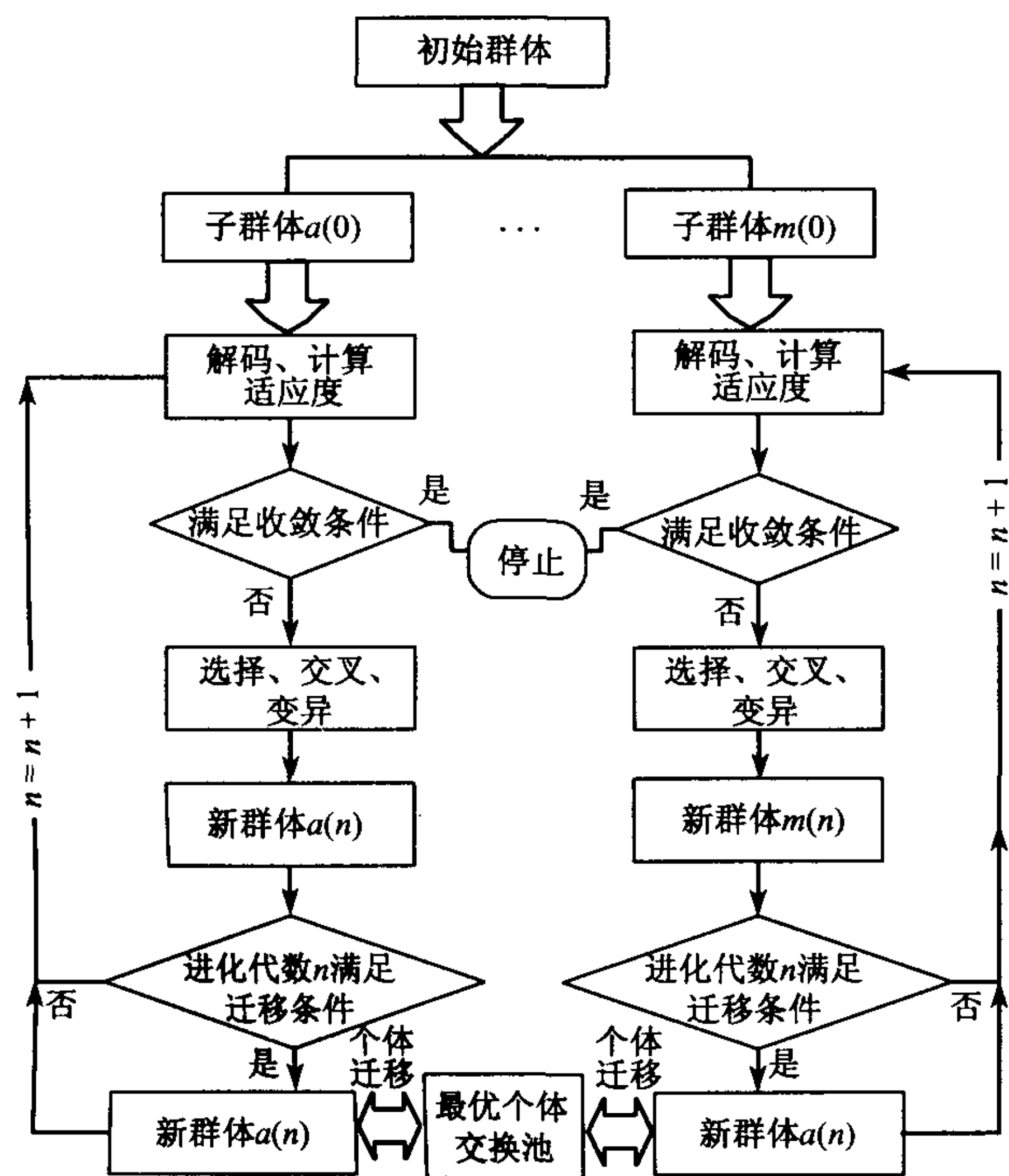


图 2 伪并行遗传算法求解流程

Fig. 2 Flow chart of pseudo-parallel GA

4 算例研究

为考察所设计伪并行遗传算法的求解效率和问题解的质量,以南方某市供水管网为例,利用伪并行遗传算法优化调度计算,并与传统的单种群非并行遗传算法进行比较.

4.1 供水系统及模型特征

(1) 该市管网建立了较为完善和可靠的数据采集与监控(SCADA)系统,可以实时监测管网中水厂

的出水压力、流量以及分布于管网中的 30 多个测压点的压力变化.

(2) 已经建立供水管网的管径 500 mm 以上微观水力模型,精度满足实际工程的需要,可用于优化调度计算(图 3).

(3) 管网内无高地水池或水库等调节设施.

(4) 全市不分昼夜实施统一电价.

(5) 其中一个水厂二级泵站配有调速泵,调度须同时考虑水泵转速的优化.

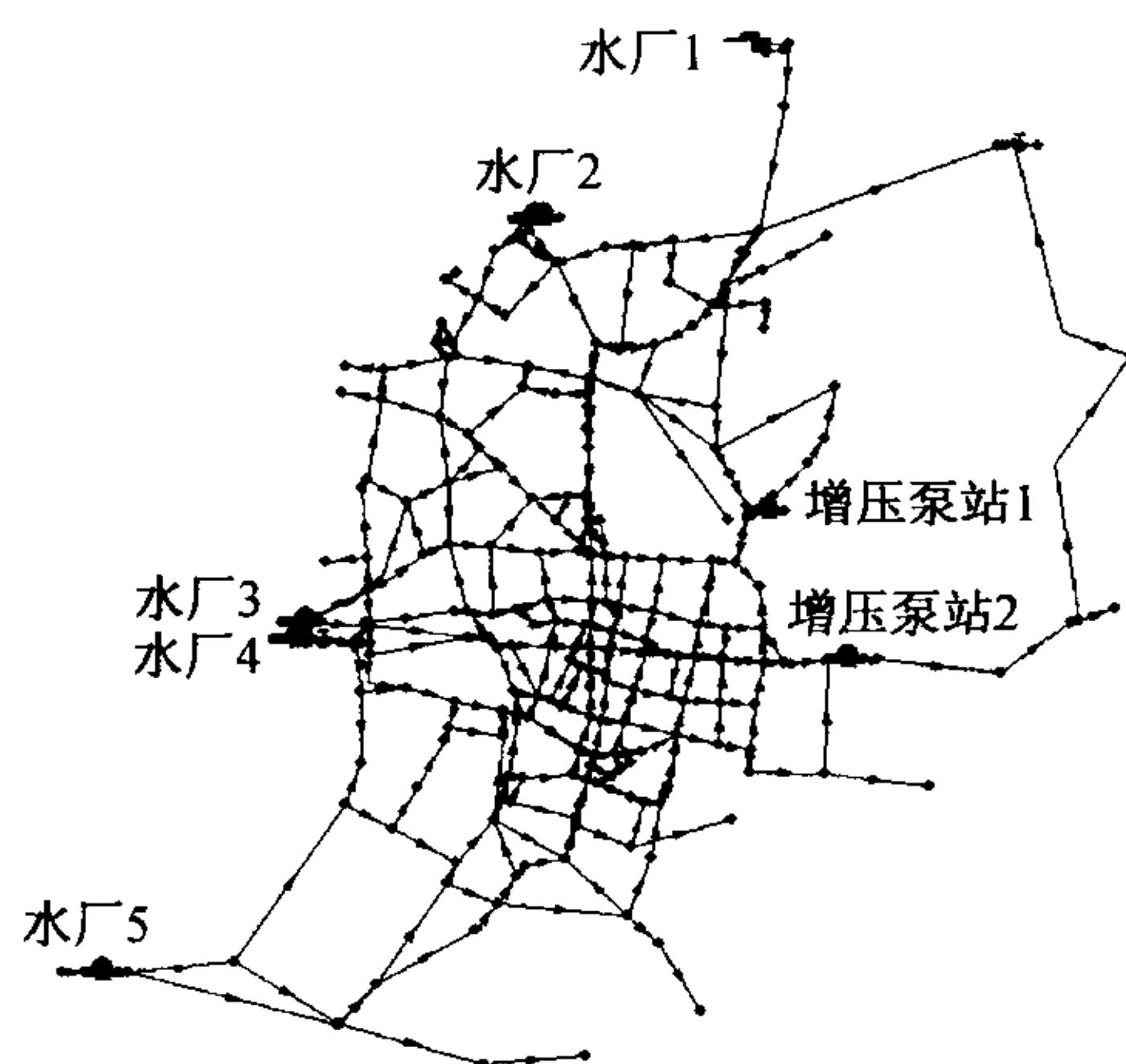


图 3 某市管网模型图

Fig. 3 Water network model of the city

4.2 优化调度模型的主要约束条件

(1) 最小水头约束 设定整个管网中节点的最小服务水头约束为 20 m,同时根据调度经验,为保证供水压力的均匀性,控制分布在管网不同位置的 3 个测压点的压力范围,分别为控制点 1(32 ~ 34 m),控制点 2(34 ~ 36 m),控制点 3(34 ~ 36 m).

(2) 泵站出水量的约束 管网中共有 5 个水厂和 2 个加压泵站(图 3),各水厂二泵站的出水量受水厂制水能力的限制.由于位置标高不同和工艺差异,各水厂制水成本也有所不同.这些均以参数形式在费用目标函数中体现.

(3) 水泵流量约束 根据各水泵型号,结合特性曲线,设定对应高效段的流量范围.

4.3 优化调度计算结果

对某日某一时段,采用遗传算法,按个体数为 25, 50, 100 的单一群体 S_{25} , S_{50} , S_{100} , 个体数分别为 25 和 50 的双群体 P_{25} 及 P_{50} 等五种情形进行求解,进化代数均为 100,每种情形均求解 20 次,得到的最小目标函数值的分布情况如表 1 及图 4 所示.可以看出, S_{25} 的求解质量最差.原因在于群体规模较小,在遗传算子特别是选择算子的作用下,群体

在 100 代内很快就进入收敛阶段;但由于群体进化并不充分,群体陷入局部最优解,而且解的质量较差. S_{50} 的求解质量有显著改善,所求的目标函数值大部分低于 21 000 元. 但 S_{100} 对 S_{50} 解的改善并不大. 当采用伪并行算法求解时,求解质量均优于个体数相同的单群体进化的结果,其中 P_{25} 显然有效地改善了单群体进化时陷入的局部收敛问题,解的质量也有较大提高,甚至搜索到所有计算结果中的最小值. 为进一步说明伪并行算法对传统遗传算法的改进效果,对 S_{50} , S_{100} , P_{25} 及 P_{50} 的 20 次计算结果中的最小目标函数值逐代取平均值,绘制各自的群体最小目标函数值随进化代数的变化曲线图(图 5). 从图中可见, S_{25} 的求解效率及求解质量最差,而 P_{50} 的求解效率和解的质量最高. P_{25} 在进化初期的求解效率高于 S_{50} ,但随着进化接近进入成熟期, S_{25} 的求解质量高于 P_{25} . 这表明,个体总数过少时,伪并行遗传算法的优势无法充分发挥. 当个体总数为 100 时(P_{50} 及 S_{100}),并行群体求解优势明显体现.

表 1 伪并行遗传算法与单群体遗传算法解的分布
Tab.1 Distribution of solutions by PPGAs and SGAs

类别	计算结果/元		
	<21 000	<20 900	<20 800
S_{25}	4	1	0
S_{50}	13	13	3
S_{100}	19	12	3
P_{25}	12	6	2
P_{50}	17	14	7

注:该时段实际运行费用 21 421 元.

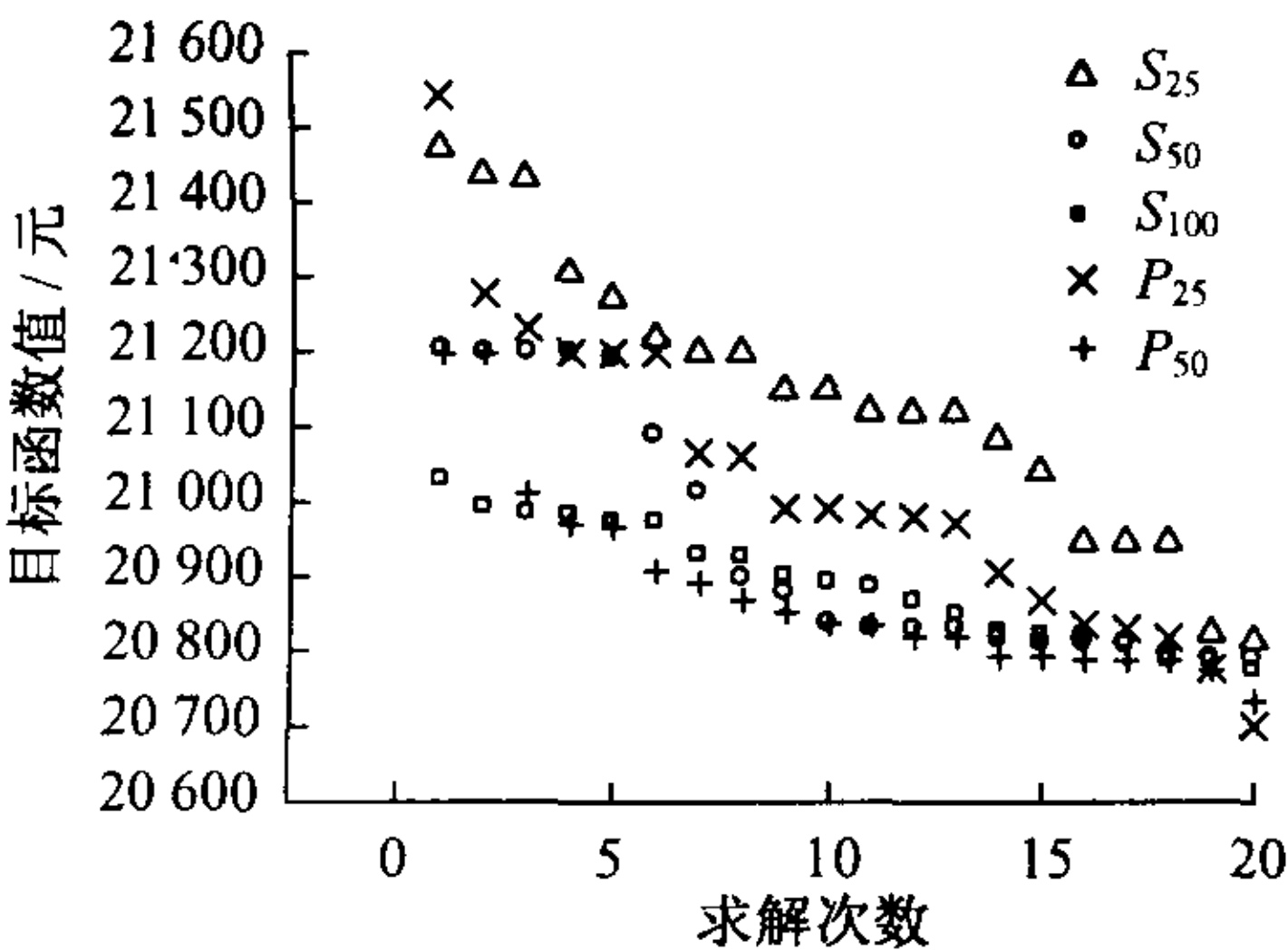


图 4 各类算法的解的分布

Fig.4 Distribution of the best solution over 20 trials

以上分析表明,对于所建立的多水源大型供水管网的优化调度模型,采用以多种群并行进化为主要特征的伪并行遗传算法求解,较单一种群进化的传统遗传算法,无论在求解效率还是质量上都有较

大程度的改善,甚至以较小规模并行进化的种群可以获得比较大规模单一进化种群更为优良的解.

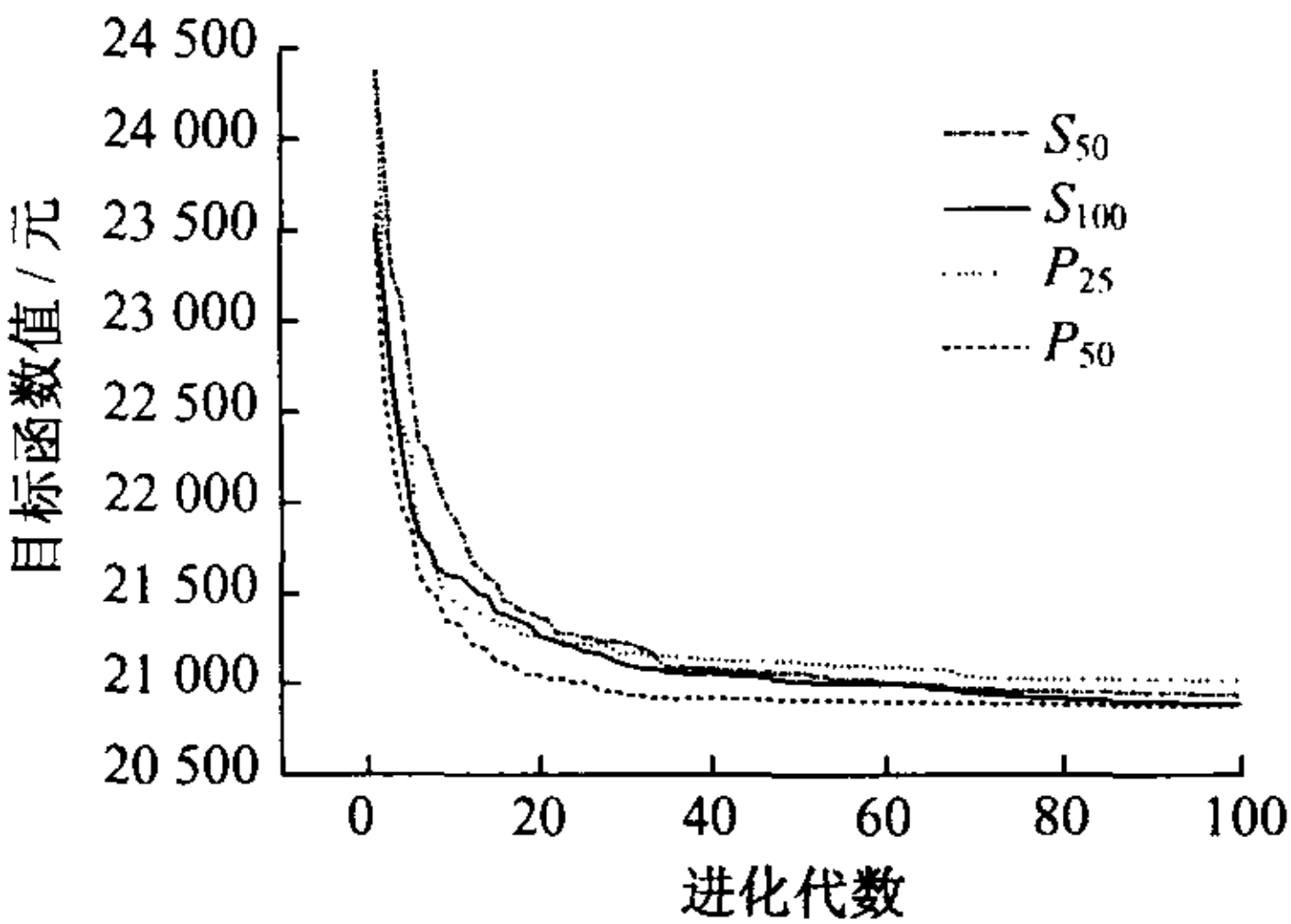


图 5 目标函数最小值的变化过程

Fig.5 Track of the minimum object function value

根据以上的试验分析,采用 P_{50} 方案的伪并行遗传算法,对该市管网 2002 年 9 月 27 日 8:00 到次日 7:00 进行优化调度计算. 为便于比较,以对应时段实际供水量作为优化调度计算时的管网用水量. 计算结果如图 6 所示. 通过计算,在优化调度方案下,当日总运行费用为 563 143 元,而实际总运行费用为 587 947 元,当日可节省运行费用 24 804 元,占总费用的 4.2%.

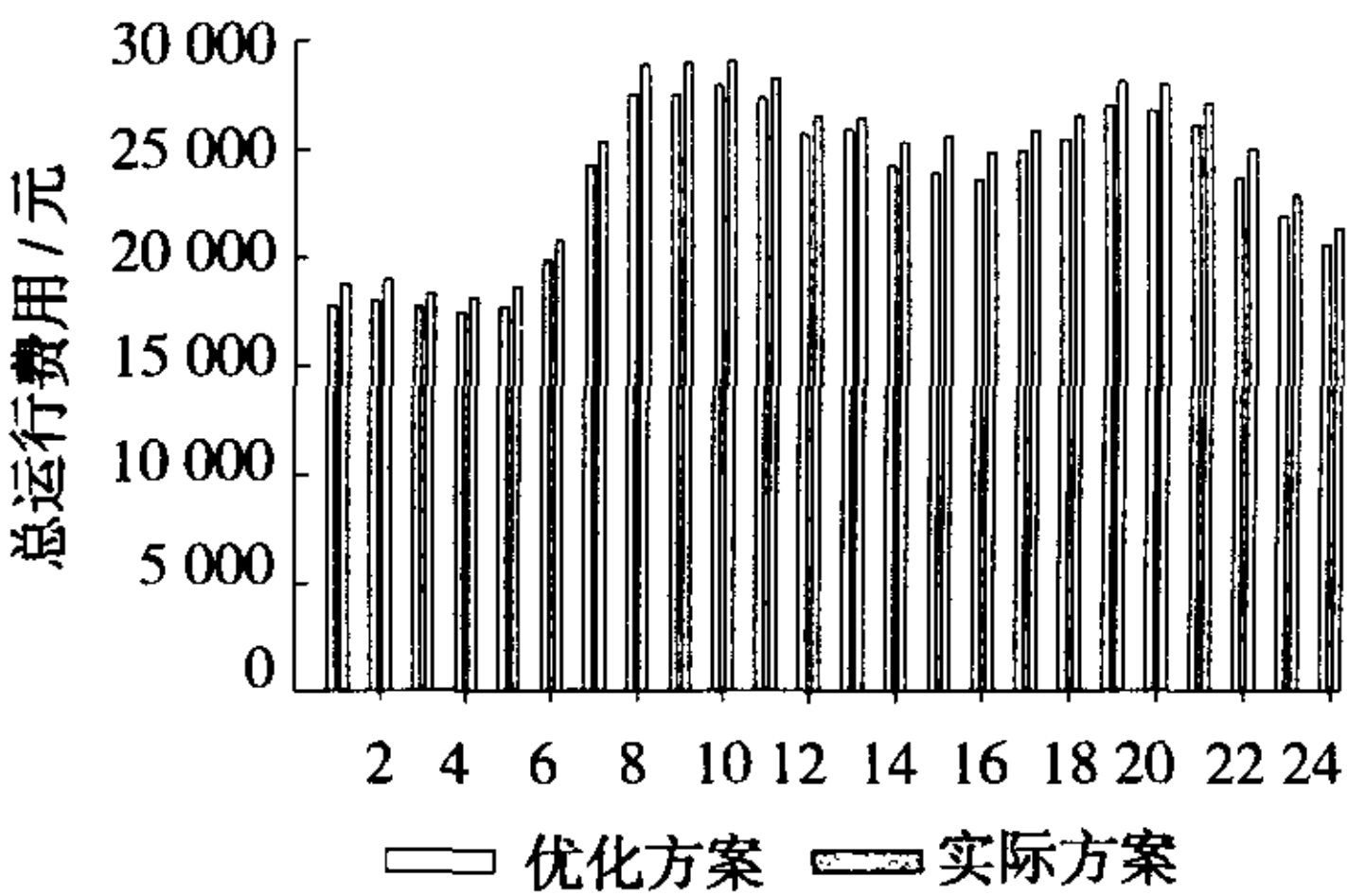


图 6 实际与计算方案的运行费用比较

Fig.6 Comparison of optimal and actual running cost

5 结论

(1) 对于多水源大型城市给水管网优化调度问题,所建立的基于管网微观水力模型的最优化数学模型和高内聚、低耦合的求解模式,具有准确度高、适应性强、灵活度大等优点,并且更适用于并行算法或者分布式模型求解.

(2) 在求解方法上,采用遗传算法对最优化调度模型求解,并针对问题的特点对算法中遗传个体的编码方式改进,使其与决策变量的结构更为契合,在一

定程度上提高了算法的解码效率和搜索效率。

(3) 遗传算法相对传统的线性、非线性最优化方法,具有概念简单、易于实现的优势,而且更适合求解管网优化调度问题。本设计和实现的伪并行遗传算法,以多种群并行进化、种群间通过最优个体缓冲池迁移个体为主要特征,相对以单一种群进化为特征的传统遗传算法,在求解效率和解的质量两方面都有较大改善,并可能更有效地降低供水管网运行费用,为供水企业节省大量成本。

(4) 通过分布式计算或网格计算等并行技术实现真正的并行遗传算法,并细化子种群的粒度划分,增加并行进化子种群的数目,可能会更大程度地利用并行遗传算法的优势,以便更有效地应用于基于微观模型的供水管网优化调度问题中。

参考文献:

- [1] Ormsbee L E, Lansey K E. Optimal control of water supply pumping systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994,120(2):237.
- [2] Brion L M, Mays L W. Methodology for optimal operation of pumping station in water distribution systems[J]. J Hydraulic Engineering, 1991,117(11):1551.
- [3] 王训俭,赵新华. 城市配水系统宏观模型的研究[J]. 中国给水排水,1988,4(3):33.
WANG Xunjian, ZHAO Xinhua. Study on the macrocosmic model of urban water distribution system[J]. China Water and Wastewater, 1988,4(3):33.
- [4] 赵新华,李霞. 多水源输配水系统的二级优化调度模型研究[J]. 中国给水排水,2004,20(8):17.
ZHAO Xinhua, LI Xia. Study on model for second level optimized dispatching of multi-source water transmission and distribution system[J]. China Water and Wastewater, 2004,20(8):17.
- [5] 吕谋,张士乔,赵洪宾. 给水系统多目标混合实用调度方法[J]. 中国给水排水,2000,16(11):10.
LV Mou, ZHANG Shiqiao, ZHAO Hongbin. Multi-purposes mixed optimal operation schedule for water supply system[J]. China Water and Wastewater, 2000,16(11):10.
- [6] 信昆仑,程声通,刘遂庆. 供水管网最优化控制方法综述[J]. 信息与控制,2004,33(4):440.
XIN Kunlun, CHENG Shengtong, LIU Suiqing. Review of methods for optimal controlling of water distribution system[J]. Information and Control, 2004,33(4):440.
- [7] 牛志广,张宏伟. 遗传算法用于城市供水系统优化调度[J]. 中国给水排水,2003,19(4):42.
NIU Zhiguang, ZHANG Hongwei. Application of GA in optimal operation on urban water distribution system[J]. China Water and Wastewater, 2003,19(4):42.
- [8] Cantú-Paz E. A survey of parallel genetic algorithms [J]. Calculateurs Paralleles, 1998,10(2):141.
- [9] 陈晓方,桂卫华,吴敏. 一种基于混沌迁移的伪并行遗传算法及其应用[J]. 控制理论与应用,2004,21(6):997.
CHEN Xiaofang, GUI Weihua, WU Min. Chaotic migration-based pseudo parallel genetic algorithm and its application[J]. Control Theory and Applications, 2004,21(6):997.
- [10] 邹琳,夏巨湛,胡国安. 基于实数编码的多种群并行遗传算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2004,25(6):982.
ZOU Lin, XIA Juzhan, HU Guoan. Real coding based multi-population parallel genetic algorithm[J]. Mini-Micro Systems, 2004,25(6):982.

(编辑:陶文文)

(上接第 1646 页)

- [2] FAN Linhua, Harris J L, Roddick F A, et al. Influence of the characteristics of natural organic matter on the fouling of microfiltration membranes[J]. Water Research, 2001,35(18):4455.
- [3] Kimura K, Hane Y, Watanabe Y, et al. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water [J]. Water Research, 2004, 38:3431.
- [4] 董秉直,曹达文,管晓涛,等. 混凝对膜过滤的影响[J]. 中国给水排水,2002,18(12):34.
DONG Bingzhi, CAO Dawen, GUAN Xiaotao, et al. Effect of coagulation on membrane filtration[J]. China Water & Wastewater, 2002,18(12):34.
- [5] 董秉直,曹达文,范瑾初. 铝盐和铁盐去除有机物的特点比较[J]. 中国给水排水,2003,19(13):69.
DONG Bingzhi, CAO Dawen, FAN Jinchu. Comparison on the characteristics of aluminum salts and iron salts in removal of organic matters[J]. China Water & Wastewater, 2003,19(13):69.
- [6] Turcaud V L, Wiesner M R, Bottero J Y, et al. Coagulation pre-treatment for ultrafiltration of a surface water[J]. Jour AWWA, 1990,82(12):76.
- [7] Carroll T, King S, Gray S R, et al. The fouling of microfiltration membranes by NOM after coagulation treatment [J]. Water Research, 2000,34(11):2861.
- [8] Logan B E, Jiang Q. Molecular size distributions of dissolved organic matter[J]. Jour of Environmental Engineering, 1990, 116(6):1046.
- [9] 董秉直,曹达文,范瑾初,等. 黄浦江水源的溶解性有机物分子量分布变化的特点[J]. 环境科学学报,2001,21(5):553.
DONG Bingzhi, CAO Dawen, FAN Jinchu, et al. Characteristics of changes in distribution of molecular weight of dissolved organics in Huangpu River water source[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5):553.

(编辑:陶文文)