

文章编号:1006-7329(2002)04-0053-07

# 城市供水系统的节能与优化\*

王 圃, 江志贤, 石长恩

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**介绍了供水系统节能的几种常见方式以及泵站优化运行中线性规划法、非线性规划法等基本方法,并针对管网优化中常用的非线性规划算法以及近几年出现的基因算法进行论述。在对各种方法进行论述的过程中,提出其适用条件及优、缺点。同时,在对城市给水系统的节能与优化进行综述的基础上,提出建议。通过本文希望达到确定已有方法,认清新发展方向的目的。

**关键词:**供水系统;节能;管网优化;基因算法

**中图分类号:** TB493;TB495

**文献标识码:** A

给水工程关系着国计民生。为了维持供水系统正常运作所需的泵站基建费和运行费,以及管网铺设和维护费,占着很大部分的国民预算。因此,合理地降低供水系统能耗以及优化管网设计对于减少国民预算,对于提高供水企业的效益以及人民的生活水平意义深远。

## 1 供水系统的节能

城市供水系统是城市的用电大户,而供水企业耗电的90%以上是消耗在水泵电机提升供水上。因此,泵站的能耗直接影响到整个供水系统的节能情况。泵站能耗的合理性主要取决于以下三方面:

- 1) 水泵提升的扬程是否合理。
- 2) 水泵的效率是否高效。
- 3) 水泵的搭配是否合理。

因此,能耗的降低可以通过合理地降低泵站的输水量和扬程,以及提高泵站的运行效率(通过优化水泵搭配或设置合理标高和容积的高位水池来实现)来完成。其中利用水泵运行的优化算法并根据实际流量来最优地控制不同扬程水泵运行的时段对于泵站节能会产生显著的效果。

### 1.1 通过降低总水头来达到节能的目的

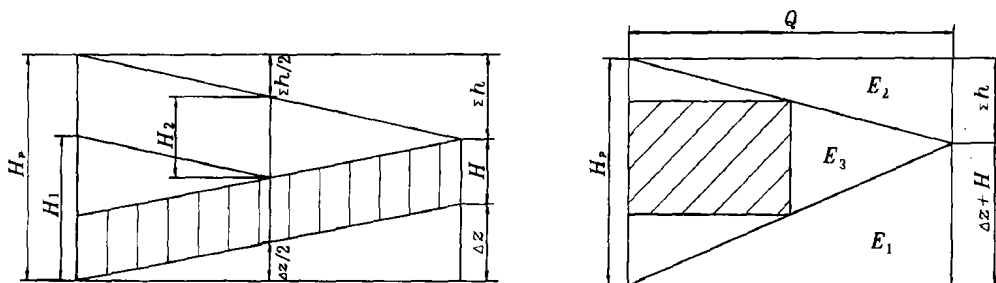
从公式:  $W = \gamma QH$  可以看出合理地降低系统的总水头可以有效地降低能耗。供水企业可以根据各自不同的情况因地制宜地采取分区供水,中途加压供水等供水方式,并在有条件的地点设置高位水池,采取重力流和压力流混合的供水方式,合理地降低系统的总水头(图1)。图中采用中途加压的给水方式,假定给水区地形从泵站起均匀升高,全区用水均匀,要求的服务水头相同。从图1a中可知:  $H_p = \Delta Z + H + \Sigma h$ ,  $H_1 = \Delta Z/2 + H + \Sigma h/2$ ,  $H_2 = \Delta Z/2 + \Sigma h/2$ 。等分成二区进行中途加压供水后所节约的能量为  $\frac{Q}{2} (\frac{\Delta Z + H + \Sigma h}{2})$ 。从图1b中可以看出:相对于未分区的供水方式来说,分区供水方式节约了四分之一左右的能量<sup>[1]</sup>。

### 1.2 利用调速泵与定速泵优化组合的方式来减少能耗

\* 收稿日期:2002-05-10

基金项目:建设部2001年科技项目(2001-45)

作者简介:王 圃(1965-),男,重庆人,副教授,博士生,主要从事给水工程的优化和节能技术研究。



(a) 管网系统

(b) 管网中途加压供水能量分析

图 1 中途加压给水方式管网系统及能量分析图

调速泵与定速泵优化组合的方式,在保持恒压的同时使泵站的输水量与实际的用水量相符,以达到降低能耗的目的(图 2)。从图中可知当用水量由  $Q_{A1}$  减少到  $Q_{A2}$  时,若泵站是定速运行的,则工况点由  $A_1$  点自动移到  $A_2$  点。此时,管网中的静压由  $H_{ST}$  增大到  $H_{ST}'$ ,轴功率为  $N_{B2}$  点。如果泵站是调速运行的,则工况点由  $A_1$  点移到  $A_2'$  点。管网中的静压保持不变,轴功率为  $N_{B'2}$ 。很明显,泵站调速运行具有既保持等压供水(即  $H_{ST}$  基本不变),又节约能耗(即  $N_{B'2} < N_{B2}$ ),降低管漏损率等优点。这些理论已经被应用到一些供水企业的实际运行中<sup>[2]</sup>。

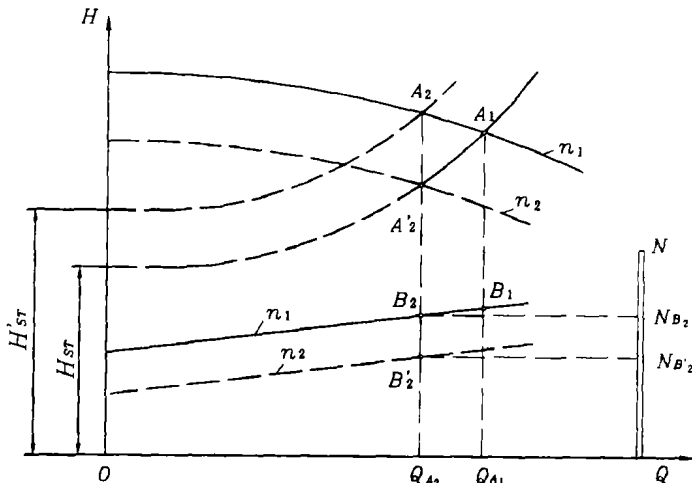


图 2 水泵定速运行与调速运行工况点对比图

### 1.3 水泵优化运行的算法

为了合理降低能耗,给水工作者在优化水泵运行方面做了许多研究。水泵优化运行的基本算法可以分为:线性规划法,非线性规划法。给水工作者的大多数研究都是基于这两个基本算法的。

#### 1.3.1 线性规划法

线性规划法考察的重点在于电费的征收制度。通过优化计算所达到的目标是尽可能地使水泵在低收费的时段内运行,在满足各方面约束的条件下达到运行费用最低的目的。线性规划法的数学模型为:在所考虑的时间  $T$  内(通常为 1 d)划分出  $N$  个控制时段  $T_k$ (时间间隔通常取为 1 h),泵站数为  $M$ ,对应于  $T_k$  控制时段的单位电量收费标准为  $U_k$ ,第  $I$  个泵站第  $j$  个水泵组合在控制时段  $T_k$  内的运行时间为  $t_{ijk}$ ,其所需功率为:  $KW_{ij}$ ,则

目标函数: 
$$\min \sum_{k=1}^N E_k \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L (KW_{ij} \cdot t_{ijk})$$

约束条件: 
$$\sum_{k=1}^N T_k = T$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$$

$$S_{k-1} - S_k + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L (q_{ijk} \cdot t_{ijk}) = D_k \cdot T_k$$

$$S_{\text{start}} = S_{\text{end}}$$

式中:  $S_k$ —— $T_k$  时段末水池的储水量,  $m^3$ ;

$S_{\min}$ ——水池允许的最小储水量,  $m^3$ ;

- $S_{\max}$ ——水池允许的最大储水量,  $m^3$ ;  
 $S_{\text{start}}$ ——水池在考虑时间初的储水量,  $m^3$ ;  
 $S_{\text{end}}$ ——水池在考虑时间末的储水量,  $m^3$ ;  
 $q_{ijk}$ —— $T_k$  时段内第  $i$  个泵站中第  $j$  个泵组的流量;  
 $t_{ijk}$ —— $T_k$  时段内第  $i$  个泵站中第  $j$  个泵组的运行时间;  
 $D_k$ —— $T_k$  时段内的预测用水量,  $m^3/h$ 。

在线性规划中,水泵是保持恒压的,如 Jowitt 和 Germanopoulos<sup>[3]</sup>提出在水泵扬程很高的情况下,高位水池水位的微小变化不会对水泵的扬程产生影响。因此,在线性规划法中  $KW_{ijk}$  以及  $q_{ij}$  是已知的,未知的只有  $t_{ijk}$  及  $S_k$ 。线性规划法无须对复杂的供水系统进行水力计算,因此计算简单明了。其不足是由于假定水泵的扬程不变,因此不具有通用性,只有在对供水系统进行分析的基础上才能将其应用于所适用的系统上。

### 1.3.2 非线性规划法

非线性规划法一般都可以分成两部分:水泵运行的优化计算与水力模拟。在水力模拟阶段,通过水力计算在事先预测的用水需求下确定各水泵组合的流量及所需的能量消耗。在优化计算阶段,则利用简约梯度法搜索问题的最佳解决方案。非线性规划法的数学模型可以通过下式表示:

$$\begin{aligned} \text{目标函数: } \quad \min Z_p &= f(H_{pt}, Q_{pt}, D_{pt}) = \min \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \frac{1}{EFF_{pt}} U_t (\gamma Q_{pt} H_{pt}) D_{pt} \\ \text{约束条件: } \quad \sum_i (q_{ij})_t &= Q_{jt} & (1) \\ \sum h_{li} + \sum H_{pt} &= \Delta E_f & (2) \\ S_t &= f(S_{t-1}) & (3) \\ \underline{E}_{st} \leq E_{st} \leq \bar{E}_{st} & & (4) \\ \underline{H}_{jt} \leq H_{jt} \leq \bar{H}_{jt} & & (5) \\ E_{s\text{end}} &= E_{s\text{start}} & (6) \\ 0 \leq D_{pt} \leq \Delta t_p & & (7) \end{aligned}$$

式中:  $EFF_{pt}$ —— $t$  时段内泵组  $p$  的效率;

$U_t$ —— $t$  时段内的单位耗电费用;

$\gamma$ ——能量转换系数;

$Q_{pt}$ —— $t$  时段内泵组  $p$  的流量;

$H_{pt}$ —— $t$  时段内泵组  $p$  的扬程;

$D_{pt}$ —— $t$  是的内泵组  $p$  的运行时间;

$(q_{ij})_t$ —— $t$  时段内与节点  $j$  相连的管段  $i$  的流量;

$Q_{jt}$ —— $t$  时段内节点  $j$  的流量;

$h_{li}$ —— $t$  时段内管段  $l$  的水损;

$\Delta E$ ——固定水头节点的水头差(在闭合环中为 0);

$H_{jt}$ —— $t$  时段内节点  $j$  的压力水头;

$\underline{H}_{jt}, \bar{H}_{jt}$ —— $t$  时段内节点  $j$  压力水头的下、上界;

$E_{st}$ ——水池  $S$  在  $t$  时段内的水位;

$\underline{E}_{st}, \bar{E}_{st}$ —— $t$  时段内水池  $s$  水位的下、上界;

$\Delta t_p$ —— $t$  时段内泵组  $p$  运行时间的上界;

$E_{s\text{start}}, E_{s\text{end}}$ ——水池在所考虑时间内的初始水位及最终水位。

非线性规划法的一般解法为:把  $H_{pt}, Q_{pt}$  看成是  $D_{pt}$  的隐函数,则

$Z_p = f[H_{pt}(D_{pt}), Q_{pt}(D_{pt}), D_{pt}]$ , 而  $H_{pt}(D_{pt}), Q_{pt}(D_{pt})$  可以通过水力模拟确定。对于  $Z_p(D_{pt})$  通过简约梯度法求解其最佳值。通过水力模拟可满足约束(1)、(2)、(3);若将约束(6)改写成:  $\lambda_1 E_{s,start} \leq E_{s,end} \leq \lambda_2 E_{s,start}$ , 约束(4)、(5)、(6)都可以引入增广拉格郎日乘子来实现。其方法是将目标函数改进为:

$$\min L = F(H_{jt}, E_{st}, D_{pt}) + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \sigma_{ji} [\min(0, b_{ji} - \mu_{ji}/\sigma_{ji})]^2 - \frac{1}{2} \sum_j \mu_{ji}^2 / \sigma_{ji} + \frac{1}{2} \sum_s \beta_s [\min(0, c_s - \eta_s/\beta_s)]^2 - \frac{1}{2} \sum_s \eta_s^2 / \beta_s$$

式中:  $\sigma_{ji}, \mu_{ji}$ ——对应于约束(5)的惩罚因子及拉格郎日乘子;  
 $\beta_s, \eta_s$ ——对应于约束(4)(6)的惩罚因子及拉格郎日乘子。

非线性规划算法的流程图见图 3。

从以上的分析可以看出相对于线性规划算法,非线性规划算法所需的计算时间长得多。这主要是必须对系统进行水力模拟所造成的。根据流程图每进行一次 GRG 算法的循环都必须进行一次水力模拟。为了减少计算时间, Ormbee<sup>[4]</sup> 等人将水力模拟与优化计算分离开来。在优化计算之前,根据给定的水力条件拟合出各种水力曲线,以此代替对系统复杂水力条件的分析,大大简化了计算。Lansley 和 Awumah<sup>[5]</sup> 在采用与 Ormbee 相似的方法的基础上引入二进制数:0、1,以此来代表水泵的启、闭状态,实现了对水泵启闭次数的控制,并为工程管理人员提供启闭次数对照最低费用的选择表列,避免得到费用低但启闭次数很大的不切实际的结果。这两种方法的不足在于它们仅适用于含有 1 个或 2 个高位水池的系统。对于多水池系统,由于曲线数量及复杂性而不具可行性。

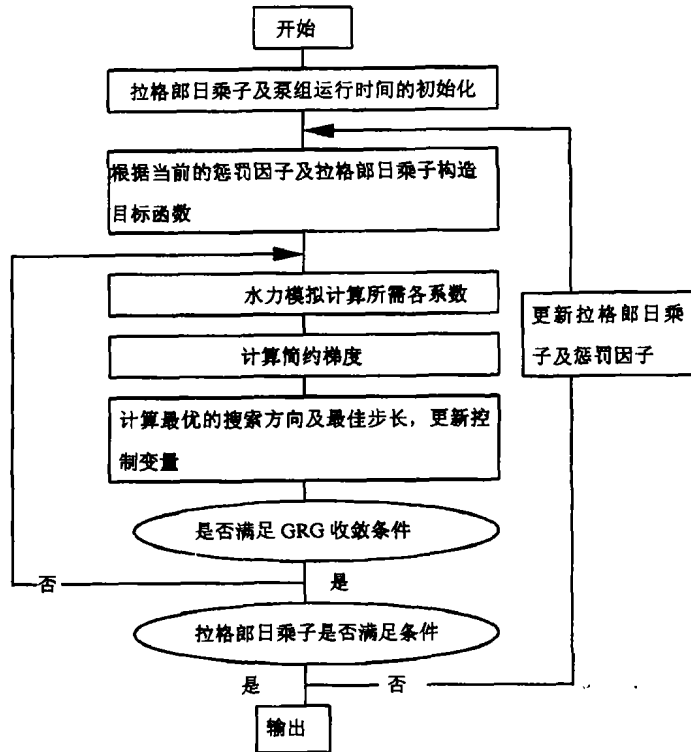


图 3 非线性规划算法流程图

## 2 供水系统的优化

在整个给水工程投资中,管网部分的造价约占 60% ~ 80%,而且每年都有大量的能量消耗和维护费用。因此,优化管网设计对于降低给水工程基建投资和运行费,增加国民收入意义重大。我国在管网优化方面的研究进行得较早(起始于五十年代),但由于当时的计算工具和计算方法所限,只限于手工计算与实际经验相结合的方法。随着最优化理论的不断的发展,特别是最近二十年里随着计算机应用在我国给水领域中的推广,管网优化与计算机应用的关系日益密切,研究者们提出许多新的算法。其中大多数都采用非线性规划法。

### 2.1 非线性规划法

非线性规划法的数学模型可以表示为:

目标函数:  $\min f(H, D)$

$$\begin{aligned}
 \text{约束条件: } & G(H, D) = 0 & (1) \\
 & H \leq H \leq \bar{H} & (2) \\
 & \underline{J(D)} \leq J(D) \leq \overline{J(D)} & (3) \\
 & \underline{W(H, D)} \leq W(H, D) \leq \overline{W(H, D)} & (4)
 \end{aligned}$$

上式中(1)为水力约束条件,包括各节点的连续性方程及各环的能量方程,(2)为边界约束条件,(3)代表设计约束条件,式(4)为一般的约束条件。与水泵优化运行的非线性规划法一样,为了简化计算,Lansley 和 Mays<sup>[6]</sup>对上述模型进行改进,即将其分解为两个子程序:优化搜索子程序,水力模拟子程序。经过水力模拟可以使最优解满足水力约束。而约束(2)可以通过对目标函数的改进解决。改进后的目标函数为:

$$\min AL(H, D, \mu, \sigma) = f(H, D) + \frac{1}{2} \sum_i \sigma_i \min(0, c_i - \mu_i / \sigma_i)^2 - \frac{1}{2} \sum_i \mu_i^2 / \sigma_i$$

式中:  $\sigma_i$  为惩罚因子;  $\mu_i$  为拉格郎日乘子。

$$c_i = \min[(H_i - \underline{H}_i), (\bar{H}_i - H_i)]$$

与水泵运行的算法一样,优化子程序中将  $H$  看成是  $D$  的隐函数,然后利用简约梯度法搜索最优解。优化子程序与水力模拟子程序的关系如图 4 所示。

非线性规划法预先假设管径是连续的,因此最终所的优化管径与实际市售管径的尺寸不符。为解决这一问题俞国平<sup>[7]</sup>老师提出将各管段分成两部分,各取对应于理论管径的上下二档标准管径。其中上游取大的一档,下游取小的一档。并构造数学模型:

$$\begin{aligned}
 \text{目标函数: } & \min = c_1 \sum_{i=1}^{2m} D_i^\alpha x_i + c_2 \sum_{i=1}^m Q_i \sum_{j \in Z_i} k q_j^\alpha D_j^{-\beta} x_j \\
 \text{约束条件: } & \text{环方程约束 } LLX = 0 \\
 & \text{长度约束 } BBX = L_0 \\
 & x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 2m
 \end{aligned}$$

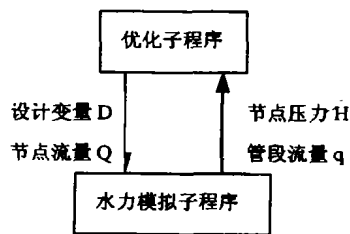


图 4 优化模型与水力模拟子程序的关系

式中:  $x_i$  为长度变量;  $D_j$  为已选定的标准管径;  $q_j$  为管段流量;  $Z_i$  为压力控制点到水源二级泵站某一指定管线上管段编号组合;  $c_1, c_2$  为计算系数;  $LL, BB$  为系数矩阵;  $L_0$  为管段长度;  $k$  为计算系数。

利用单纯形法解上述模型即可求出最优的实际管径。

## 2.2 基因算法

九十年代,随着人工智能在优化理论上的应用,研究者们(Savic 和 Walters<sup>[8]</sup>、Walters, Ouazar 和 Savic<sup>[9]</sup>)提出一种新的管网优化方法:基因算法。基因算法是根据生物进化模型而提出的一种算法。该算法中,管网中各管段的管径是利用数字编号(通常为二进制,其中的一个位数称为基因)来表示的,并以由数字编号组成字符串的方式表示管网优化的一个解决方案(称为个体)。在基因算法开始时,预先人为给出一组字符串(称为种群)对这些数据模拟生物遗传进行复制、交叉、变异等操作,由父代产生子代。在这一过程中,子代在继承父代优良基因的基础上,通过变异有可能产生新的优良基因。因此,基因算法最终将得到一组最优解。

### 2.2.1 复制

复制是根据适应度来进行的。适应度反映个体对环境的适应程度。在管网优化中它可以通过以下公式求得:

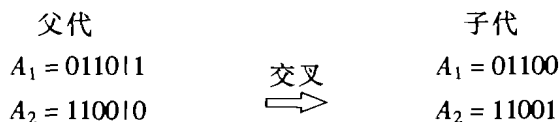
$$\begin{aligned}
 f_i &= \frac{1}{E_i} \\
 p_i &= \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}
 \end{aligned}$$

式中： $f_i$  为个体  $i$  的适配值； $E_i$  为个体  $i$  的管网系统费用； $p_i$  为个体  $i$  的适应度。

适应度高的个体根据按适应度划分的轮盘将被复制出更多的个体进入匹配池，其基因得到继承的可能性就越大。

### 2.2.2 交叉

交叉是分两步进行的。首先，将匹配池中新复制的个体随机地两两配对。其次，随机地选择交叉点，按照一定的概率（通常取为 70%）对配对的个体进行交叉操作。具体过程如下图所示（交叉点以分隔符所示）：



交叉在遗传算法中起到核心的作用。它是富有成效的，就如同人们在社会生活中的思想交流，学术交流，以及多学科交汇终将产生新思想，新观念，新学科一样。

### 2.2.3 变异

复制及交叉都是基于父代原有基因上的，不产生新的基因。算法如仅限于这两个步骤，则可能漏失一些优良的个体。如表 1 所示，无论怎样复制与交叉都不可能产生第 4 位字符为 1 的个体。因此，依据一定的概率（常取为 0.01）进行变异是重要的。

表 1

个体	1	2	3	4
字符串	01101	11001	00101	11100

由以上的分析可以看出对于随意的初始种群在经过复制，交叉，变异的基本操作后将繁衍出新的更具有生命力的种群。这样一代代地进行下去，最终将得到一个优化的种群。基因算法的流程图见图 5。

相对于其它管网优化方法，基因算法具有以下优点：

- 1) 基因算法直接考虑市售管径，而不必象非线性规划法一样在优化结束后，再进行管径的调整。
- 2) 基因算法对优化种群的获取是基于三个基本操作的。它的搜索路径是不确定的，因此更有可能获得全局最优解。
- 3) 基因算法最终产生的优化种群包括多个个体。它们费用差不多，但在设计上是有很大差异的。这为工程技术人员提供了一个选择的余地，利于把实践经验与优化理论相结合。

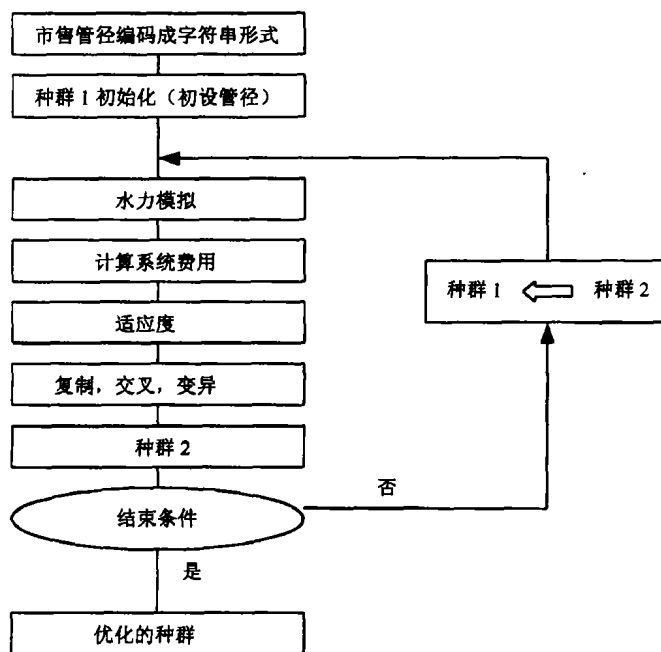


图 5 基因算法流程图

4) 基因算法只进行适应度的计算以及三个基本操作，对函数的连续性，可导性不作要求。而其它算法由于要进行函数的求导运算，所以要求目标函数是可导的。

基因算法的不足在于计算耗时时间长，特别对于大型的管网系统更是如此。由于其具有上述的优点，因此仍然是近几年来给水工作者进行优化理论研究的重点，并代表着今后的发展方向。

### 3 结束语

综上所述,城市供水系统的节能可以通过合理降低供水水头,采取调速泵与定速泵优化组合的方式,优化泵站各水泵运行时间来实现。而水泵优化运行时间的求解有线性规划和非线性规划两种基本方法。在管网的优化方面,传统的非线性规划法,在算法中假定求解的管径是连续分布的,这在实际应用中会产生许多不便之处。而基因算法则不会产生这些问题。同时基因算法中出现的计算耗时时间长的缺点,可以通过对算法的改进来加快收敛速度,以及随计算机技术的发展,而逐渐得以解决。因此,基因算法在今后的管网优化研究中将得到进一步的发展。

### 参考文献:

- [1] 严煦世,范瑾初. 给水工程[M]. 北京:中国建筑出版社,1995.
- [2] 姜乃昌. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国建筑出版社,1993.
- [3] Jowitt and George Germanpoulos. Optimal Pump Scheduling in Water - Supply Networks[J]. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 1992, (4): 406 - 420.
- [4] Lindell E. Ormsbee, Thomas M. Walski. Methodology for Improving Pump Operation Efficiency[J]. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 1989, (2): 148 - 163.
- [5] Kevin E. Lansey and Kofi Awumah. Optimal Pump Oterations Considering Pump Switches[J]. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 1994, (1): 17 - 34.
- [6] Kevin E. Lansey and Larry W. Mays. Optimization Model for Water Distribution System Design[J]. Hydr. Engrg, ASCE, 1989, (10): 1401 - 1419.
- [7] 俞国平. 给水管网优化设计的新方法—广义简约梯度法[J]. 给水排水, 1988, (5): 15 - 21.
- [8] Dragan A. Savic and Godfrey A. Walters. Genetic Algorithms for Least - Cost Design of Water Distribution Networks[J]. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 1997, (2): 67 - 77.
- [9] D. Halhal, G. A. Walters, D. Ouazar, and D. A. Savic. Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm[J]. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 1997, (3): 137 - 146.

## Energy Saving and Optimization of the Municipal Water-supply Systems

WANG Pu, JIANG Zhi-xian, SHI Chang-en

(Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, 400045, China)

**Abstract:** This paper describes the familiar ways for the energy saving of the municipal water - supply systems and the basic methodologies for the optimal pump operations. A recommendation of the most - used nonlinear programming and the lately developed genetic algorithm of the water distribution systems is also provided. Advantages and disadvantages of each approach are presented, along with the comment of the corresponding applications. At the last part of this paper, the author puts forward his suggestions, at the basis of the summary and conclusion of energy saving and optimization of the municipal water - supply systems. Through this paper, the author hopes to review the state of existing ways and methodologies of the water - supply systems, and to recognize the future work that for us to do.

**Keywords:** water - supply systems; energy saving; optimization of the water distribution systems; genetic algorithm