城市煤气供应系统优化调度[1)]

陈森发　林贻鸿
(东南大学管理学院,南京　210018)

摘　　要

本文提出城市煤气供应系统优化调度的两级算法. 首先，根据分解-协调原理，提出求解中压分配系统优化调度问题的一种算法；其次推导出低压分配系统优化调度问题的解析解，并提出相应算法. 实例计算表明，其结果比较满意.

关键词: 城市供气系统，优化调度，管网系统简化，分解协调，二次规划.

一、前　　言

城市煤气供应系统是多源非线性大系统. 凭人工的经验对其进行调度，难以达到“优化”. 本文作者将城市供水系统优化调度的成果，进行推广，并结合我国城市多为中压由气源至调压站、低压由调压站至用户的X型供气系统的特点，分别研究它们的模型和算法.

二、城市供气管网系统的简化

一般大中城市供气系统有上百个节点，几百甚至上千根管段. 如直接建模和编制算法，计算工作量相当大. 因而，有必要在保证系统精度的前提下，简化原始管网系统.

这里，用管网集结原理[1,2]对管网系统进行简化：把原系统中压力大致相等的多个节点，合并为一个虚拟节点，虚拟节点间的多根联结管段等效为一根虚拟管段. 集结处理后，整个系统的总节点数和总管段数显著减少.

管网系统的最优集结问题，可归结为网络多中心问题[3]. 实质是确定尽可能少的虚拟节点数目，以使任一虚拟节点(即集结区域的中心节点)与其集结区域内任一节点的压力差的最大值小于给定的临界值 λ.

设城市供气管网系统描述为 $G=[X, U]$，这里 $X=[x_i|x_i$ 为原管网系统节点，$i=1,2,\cdots,n]$，$U=[u_{ij}|u_{ij}$ 为原管网中的实际管段，u_{ij} 的权由节点 x_i 和 x_j 的压力差代表]. 定义 $d(x_i,x_j)$ 为节点 x_i 与 x_j 最小压力差的绝对值，对给定的压力差的临界值 λ，可建立起集合 X 上的二元关系 R,

1) 本文于1992年1月4日收到.

$$R = [(x_i, x_j) \mid d(x_i, x_j) \leqslant \lambda,\ x_i, x_j \in X]. \tag{1}$$

通过布尔代数积的运算[3],可得到 $m(m \leqslant n)$ 个备选虚拟节点为中心的集结区. 设 m 个备选节点的集合为 $Y, Y \subseteq X$, 令

$$y_R = \begin{cases} 1, & \text{当节点 } y_R \text{ 被选为虚拟节点,} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \tag{2}$$

可建立下面的数学模型:

$$\min f = \min \sum_{R=1}^{m} y_R, \tag{3}$$

$$\text{s. t. } AY \geqslant I. \tag{4}$$

其中 $I = (1, 1, \cdots, 1)^T$, $Y = (y_1, y_2, \cdots, y_m)^T$, $A = (a_{ij})_{n \times m}$ 为 X 中元素与 Y 中元素构成的二元关系矩阵,即

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } (x_i, y_j) \in R, \\ 0, & \text{当 } (x_i, y_j) \notin R. \end{cases} \tag{5}$$

式(3)和式(4)是确定简化系统节点的线性规划模型. 式(3)为目标函数,它保证简化系统的节点数目尽量少;式(4)为约束条件,它的任一不等式为

$$\sum_{R=1}^{m} a_{i_R} \cdot y_R \geqslant 1. \tag{6}$$

这表示任一顶点 x_i 总被虚拟节点所覆盖.

显然,式(3)和式(4)构成一个典型的 0—1 整数规划模型,用隐枚举法[3]求解, 可获得它的最优解.

三、中压分配系统优化调度

通常,将一天作为一个周期,根据用户用气量的变化规律, 将其分为 t 个等间隔的时间区间. 中压分配系统的优化调度,就是根据简化管网节点上用气量的变化规律,确定各煤制气厂分配站的供气压力和供气流量,确定各储配站的出口压力和出口流量,在保证系统服务质量的前提下, 使系统总的供气费用最低. 这可用下面的大型非线性规划模型来描述:

$$\min \sum_{e=1}^{t} f^e(u^e, F^e, p^e), \tag{7}$$

$$\text{s. t. } g^e(p^e, u^e, F^e, Q^e) = 0,\ e = 1, 2, \cdots, t, \tag{8}$$

$$\sum_{e=1}^{t} F^e = 0, \tag{9}$$

$$P^e - P^{\min} \geqslant 0,\ e = 1, 2, \cdots, t, \tag{10}$$

$$P^{\max} - P^e \geqslant 0,\ e = 1, 2, \cdots, t, \tag{11}$$

$$\sum_{j=1}^{e} F^j \geqslant F^0 - F^{\max},\ e = 1, 2, \cdots, t, \tag{12}$$

$$\sum_{j=1}^{e} F^j \leqslant F^0,\ e = 1,2,\cdots,t, \tag{13}$$

$$u^e - u^{\min} \geqslant 0,\ e = 1,2,\cdots,t, \tag{14}$$

$$u^{\max} - u^e \geqslant 0,\ e = 1,2,\cdots,t. \tag{15}$$

上述的非线性规划模型中，式(7)为目标函数，通常考虑进入分配站的煤气成本、分配站内电能消耗费用以及储配站作为气源时的电能消耗费用，其中 $u^e = [u_1^e,\ u_2^e,\cdots,u_n^e]^T$，$F^e = [F_1^e,F_2^e,\cdots,F_n^e]^T$，$P^e = [P_1^e,P_2^e,\cdots,P_n^e]$。式(8)为节点流量平衡条件，对于节点 x_i，有

$$\begin{aligned} &g_i^e(P_i^e,u_i^e,F_i^e,Q_i^e) \\ &= u_i^e + F_i^e - Q_i^e - \sum_{j\in I_i} K_{ij}\,\mathrm{sgn}\,[(P_i^e)^2-(P_j^e)^2]\cdot|(P_i^e)^2-(P_j^e)^2|^{\frac{1}{\alpha}} \end{aligned} \tag{16}$$

式中 P_i^e,u_i^e,F_i^e,Q_i^e 分别是节点 x_i 在第 e 个时间区间的压力、分配站的供气量、储配站的供气量、用户的用气量；K_{ij},α 为常数，与使用的公式和量纲有关；I_i 为与节点 x_i 邻接的节点集；$\mathrm{sgn}(A)$ 为符号函数，定义为

$$\mathrm{sgn}(A) = \begin{cases} 1, & \text{当 } A \geqslant 0, \\ -1, & \text{当 } A < 0. \end{cases} \tag{17}$$

式(9)为储配站在一天中的流量平衡条件；式(10)为节点压力的下限约束，它保证系统的服务质量；式(11)为节点压力的上限约束，它保证系统的安全运行；式(12)是储配站作为负载时的约束条件；式(13)是储配站作为气源时的约束条件；式(14)和(15)分别是煤制气厂分配站供气量的下限及上限约束.

式(8)—(15)大约有 5n·t 个约束条件，而且式(8)为非线性约束，求解较困难. 进一步分析式(7)—(15)，可以看出，该优化调度问题可以分解为 t 个子问题，其关联约束为式(9)，关联变量为 $F^e(e = 1,2,\cdots,t)$. 式(12)和(13)转换为各子问题中关联变量的上下限约束，可暂不考虑它们对解的影响. 设 $\lambda_i(i\in W$，W 为储配站所在节点的标号集合)为与式(9)有关的拉格朗日乘子，则拉格朗日函数可定义为

$$L = \sum_{e=1}^{t} f^e(u^e,F^e,P^e) - \sum_{i\in W}\lambda_i\sum_{e=1}^{t}F_i^e. \tag{18}$$

当 λ_i 为定值时，将 L 分解为 t 个独立子拉格朗日函数之和，即

$$L = \sum_{e=1}^{t} L^e, \tag{19}$$

式中

$$L^e = f^e(u^e,F^e,P^e) - \sum_{i\in W}\lambda_i F_i^e. \tag{20}$$

至此，可以清楚地看出，式(7)—(15)可用类似于文献[4]和[5]中的大系统分解协调算法，求得中压系统调度问题的最优或次优解.

四、低压分配系统优化调度

在我国城市煤气供应系统中，虽然低压分配系统有多个调压站和复杂的管网，但是，

每个调压站相当于一个稳压源，它们有相对固定的作用范围，在正常工况下，尤其如此.因而，低压分配系统的优化调度可看作 z(z 为调压站总数目)个区域调压站及其作用范围内的局部管网的调度子问题构成的.

1. 问题的提法

设第 $R(R=1,2,\cdots,z)$ 个区域调压站的作用范围内的局部管网有 n_R 个节点，以 $P_0(R)$ 表示该调压站的出口压力，不失一般性，同时，假设它与节点 1 相连. 第 R 个调压站的优化调度就是在站内节点负荷 $Q_i(R)(i=1,2,\cdots,n_R)$ 为已知的条件下，在一天的时间区间内，确定 $P_0(R)$，使各节点压力与其额定压力差的平方和的平均值趋于最小，即

$$\min f(R)=\min\frac{1}{n_R}\sum_{i=1}^{n_R}(P_i(R)-P_{0i}(R))^2, \tag{21}$$

它应满足一系列的等式和不等式约束. 首先，应满足流量平衡方程式. 由式(8)和(16)，对于 $i=2,3,\cdots,n_R$，可得

$$Q_i(R)+\sum_{j\in I_i}K_{ij}\,\mathrm{sgn}[P_i(R)-P_j(R)]\,|P_i(R)-P_j(R)|^{\frac{1}{\alpha}}=0. \tag{22}$$

对于 $i=1$ 有

$$\sum_{i=2}^{n_R}Q_i(R)=\sum_{j\in I_i}K_{ij}\ \mathrm{sgn}(P_1(R)-P_j(R)|P_1(R)-P_j(R)|^{\frac{1}{\alpha}}. \tag{23}$$

其次，为保证系统的服务质量和安全运行，所有节点的压力值应在该节点上燃具的最小允许压力和最大允许压力之间，即

$$P_i(R)\geqslant P_i^{\min}(R), \tag{24}$$

$$P_i(R)\leqslant P_i^{\max}(R). \tag{25}$$

再次，调压站的调整能力也有一定范围，因而 $P_0(R)$ 应满足

$$P_0^{\min}(R)\leqslant P_0(R)\leqslant P_0^{\max}(R). \tag{26}$$

此外，对于调压站和节点 1，根据系统的供需平衡可知

$$P_0(R)-P_1(R)=s_{01}\left(\sum_{i=1}^{n_R}Q_i(R)\right)^{\alpha}. \tag{27}$$

式中 S_{01} 为摩阻系数，与管段的直径、长度、煤气的物理性质等有关.

可见，低压分配系统的优化调度问题，就是求解 z 个以式(21)为目标函数，以式(22)—(27)为约束条件的非线性规划问题.

2. 优化解的表达式

将低压分配系统分解为 z 个独立的非线性规划问题，使问题的求解工作大大前进了一步，但问题的求解仍相当复杂. 根据供气管网的特点，式(23)依赖于式(22)，可暂不考虑. 另外，暂不考虑式(24)—(27)，则问题可进一步简化为

$$\min f(R)=\min\frac{1}{n_R}\sum_{i=1}^{n_R}(P_i(R)-P_{0i}(R))^2, \tag{28}$$

$$\text{s. t. } Q_i(R) + \sum_{j \in I_i} K_{ij}\, \mathrm{sgn}(P_i(R) - P_j(R)) |P_i(R) - P_j(R)|^{\frac{1}{\alpha}} = 0,$$

$$i = 2, 3, \cdots, n_R. \tag{29}$$

这是一个带有等式约束的二次规划问题.

式(29)有 $n_R - 1$ 个独立的平衡方程式,而系统未知量为 n_R 个节点压力，其中有一个节点为参考点,其值取为零. 这样，n_R 个未知量的相对值 $P_{1i}(R)$ 由式(29)唯一地确定. 另外,从式(29)不难发现，所有节点压力同时增加或减少相同的数值 $P_x(R)$，并不影响它的平衡. 令

$$P_i^*(R) = P_{1i}(R) + P_x(R), \tag{30}$$

式中 $P_i^*(R)$ 为带有等式约束的二次规划问题的最优解. 把式(30)代入式(28)，则第 R 个调压站及其局部管网的优化问题,转化为下面的无约束二次规划问题,

$$\min f(R) = \min \frac{1}{n_R} (P_{1i}(R) + P_x(R) - P_{0i}(R))^2. \tag{31}$$

由函数取极值的一阶条件,得

$$P_x(R) = \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} (P_{0i}(R) - P_{1i}(R)). \tag{32}$$

把式(32)代入式(30),得

$$P_i^*(R) = P_{1i}(R) + \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} (P_{0i}(R) - P_{1i}(R)). \tag{33}$$

它就是式(28)二次规划问题的解析表达式. 进而考虑式(24)—(27),可得第 R 个调压站及其局部管网的优化问题的解为

$$P_i^*(R) = \begin{cases} P_i^{\max}(R), & \text{当 } P_i^*(R) \geqslant P_i^{\max}(R), \\ P_i^{\min}(R), & \text{当 } P_i^*(R) \leqslant P_i^{\min}(R), \\ P_i^*(R), & \text{其它. } i = 0, 1, \cdots, n_R. \end{cases} \tag{34}$$

令 $i = 0$，可求出第 R 个调压站的最优出口压力.

五、实 际 案 例

某市供气系统有 108 个区域调压站，232 根管段，三个煤制气厂和两个煤气储配站(限于篇幅,原始数据略去.)取 $\lambda = 1.15\text{kPa}$，用 0—1 整数规划法[3]，可得中压分配系统的简化管网为 42 个虚拟节点和 52 根虚拟管段.

根据该市的用气规律,把一天的用气周期划分为 8 个时间段,用本文介绍的模型和算法获得中压系统的优化调度方案，具体如表 1. 表 1 中,节点 1,4,24 为煤制气厂；节点 20,29 为储气罐. 优化调度方案的运行费用为 9.97 万元，传统调度方案的运行费用为 10.50 万元. 和传统方法比较,优化方法节省 5% 以上费用,每月可节省 15 万元以上.

对低压分配系统,利用管网平差法,可确定 108 个调压站及其作用范围内的管网子系统,用本文介绍的方法进行优化调度,效果令人满意. 现举其中一调压站及其管网为例说

表 1 中压系统优化调度方案

节点	优化方案 \ 时间段	1	2	3	4	5	6	7	8
		[0,3]	[3,6]	[6,9]	[9,12]	[12,15]	[15,18]	[18,21]	[21,24]
1	供气量 (m^3/m)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	1441.5
	出口压力 (kPa)	23.11	23.11	23.11	23.11	23.11	23.11	23.11	6.42
4	供气量 (m^3/n)	4033.6	5000	5000	5000	5000	5000	5000	1441.5
	出口压力 (kPa)	37.78	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	6.24
24	供气量 (m^3/n)	3211.3	8000	8000	8000	8000	8000	4434.2	1100.4
	出口压力 (kPa)	24.66	108.28	108.28	108.28	108.28	108.28	43.37	3.78
20	储气量 (m^3)	2642.5	3345.9	0	−2906.0	2205.5	−5287.9	0	0
29	储气量 (m^3)	3011.2	5241.9	−232.1	−3226.8	4050.0	−8844.2	0	0

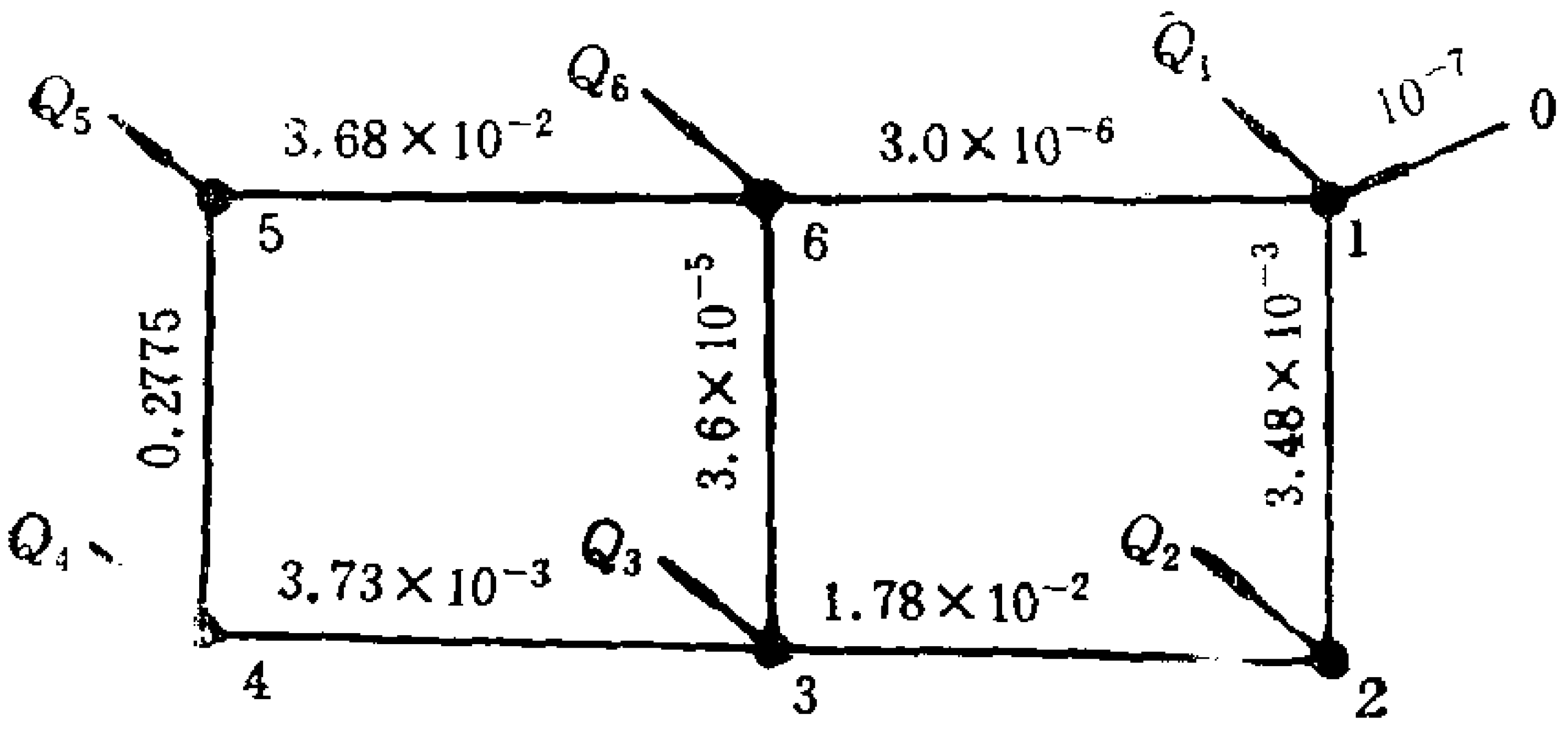


图 1 某调压站及其局部管网

明.

某调压站及其局部管网如图 1 所示. 它有 6 个用户节点，8 根管段. 管段摩阻系数标在图上. 各节点的用户用气量 Q_i、额定压力 P_{0i}、管网平差压力 P_{1i} 列于表 2 中. 设调压站的节点编号为 0，由管网平差结果，并用式(33)和(34)，求出各节点的最优压力 P_i^*，具体见表 2. 由式 (27) 算出调压站最优出口压力为 904.46Pa. 为比较，将传统方法算出的节点压力 P_{ci} 也列入表 2. 通过分析和简单计算，可以发现，用本文介绍的低压系统调度算法，用户节点压力波动平均减少 12%，调压站节省运行费占传统方法的 3.6%.

表 2 某调压站的计算结果及比较

节点编号	Q_i(m^3/h)	P_{0i}(Pa)	P_{1i}(Pa)	P_{ci}(Pa)	P_i^*(Pa)
1	180	900	238.39	938.39	904.31
2	196	850	170.11	870.11	836.03
3	327.5	950	226.09	926.09	892.01
4	115.5	720	153.94	853.94	819.86
5	103.5	700	0	700.00	665.92
6	302.5	900	235.93	935.93	901.85

本文的工作，曾得到南京市煤气公司高级工程师黄炳富经理的大力协助. 在此，作者深表感谢.

参 考 文 献

[1] Chen Senfa, Xu Nanrong, A Method for Simplifying Large Scale Water-supply Systems, Proceedings of the 1988 IEEE International Conference On Systems, Man and Cybernetics, (1988), 1302—1304.

[2] 陈森发,给水管网测压点布置的优化,给水排水, 2(1987), 3—6.

[3] 陈森发、朱玉全,网络多中心问题的一种算法及其应用,东南大学学报, 1(1991), 85—90.

[4] 仲伟俊、徐南荣、陈森发,城市供水系统调度的分解-协调优化方法,自动化学报, 3(1990), 217—225.

[5] 陈森发,网络模型及其优化,东南大学出版社, 1991 年.

THE OPTIMAL DISPATCH FOR URBAN GAS SUPPLY SYSTEMS

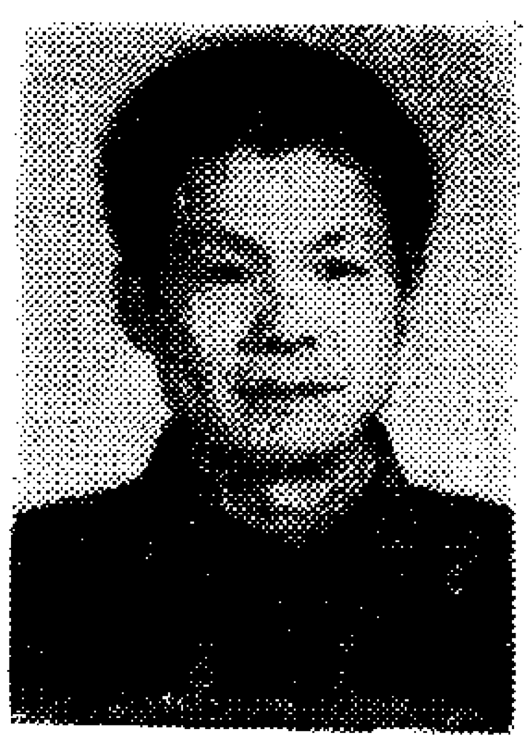
CHEN SENFA LIN YIHONG

(*Management College, Southeast University, Nanjing* 210018 *China*)

ABSTRACT

In this paper, algorithms of two levels for optimal dispatch for urban gas supply systems are proposed. First, based on the principle of decomposition-coordination, an algorithm for solving the optimal dispatch problem of mid-pressure distribution system is proposed; second, the analytic solutions of optimal dispatch for low-pressure distribution system are derived and their corresponding algorithm is proposed. The computational examples show that the results obtained are satisfactory.

Key words: urban gas supply system; optimal dispatch; simplifying network system of pipeline; decomposition-coordination; quadratic programming.



陈森发 东南大学副教授. 1945 年生,1969 年上海交通大学无线电系毕业,1982 年在南京工学院自控系获硕士学位. 1992 年在美国纽约州立大学深造. 从事决策分析、大系统理论及网络优化等方面研究. 在国内外杂志上发表论文近百篇. 主要著作有《决策分析》和《网络模型及其优化》.

林贻鸿 东南大学管理学院研究生, 1966 年生, 1989 年安徽师范大学数学系毕业, 主要从事决策理论和大系统理论方面的研究工作.