

# 供水低碳自动调度控制系统建模仿真与运行（六）

## ——管网压力控制曲线建模检验与节能运行

游庆元<sup>1</sup> 罗维平<sup>2</sup> 陈超明<sup>3</sup>

1. 惠州市供水有限公司 2. 中国自动化产业服务自集团 3. 南海市自来水公司桂城水厂

宏观模型可求水厂优化流量，但未有计算优化压力子模型，计算压力精度超出±0.02 MPa。依据宏观模型优化工况点，应用多种算法建立优化压力计算模型，即管网末端压力控制曲线，并于2007年在广东南海市桂城水厂运行表明：变频控制泵群沿此曲线运行，远端压力精度±0.002 MPa，满足用户流量压力需要且无多余扬程而节能，单耗降低了7.62%；2011年南海市水司利用第二水厂水量在管网末端里水镇建立加压站供水至桂城水厂范围六个远端点，使桂城水厂不再超负荷供水，2012年单耗降低了9.96%（参见图1）。

### 1 宏观模型节能应用现状及补充完善途径

2007年南海市水司领导要求桂城水厂（以下简称一厂）运行管网压力控制模型，并拟在第二水厂作宏观模型调度（无变频）。一厂与第二水厂供水能力为38×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d与50×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d。依据2006年SCADA数据建立宏观模型计算各厂优化流量符合实际（表1、表2）即：应减少一厂水量（超负荷运行理应减少）与增加第二厂水量（供水能力富余理应增加）。但计算优化压力却未随优化流量的变化而相应合理调节，多数（97%）偏差超出±0.02 MPa ~ ±0.03 MPa（表中修正压力是将优化流量输入管网压力控制曲线模型计算的压力）。

时段	优化前		优化后		修正压力
	H	Q	H <sub>y</sub>	Q <sub>y</sub>	
0:00	40.81	15617	41.10	17896	43.66
1:00	38.76	12875	37.72	15282	39.93
2:00	39.78	12557	40.08	13973	38.44
3:00	38.76	11540	36.84	13771	38.23
4:00	39.78	11277	38.59	13336	37.81
5:00	38.76	11597	38.12	13152	37.63
6:00	38.76	11697	34.35	13652	37.97
7:00	41.82	17192	40.96	18339	43.91
8:00	44.88	19116	44.17	19805	44.76
9:00	44.88	19352	44.52	20333	45.09
10:00	44.88	18887	43.95	20472	45.18
11:00	44.88	19093	45.09	20274	45.04

时段	优化前		优化后		修正压力
	H	Q	H <sub>y</sub>	Q <sub>y</sub>	
0	51.12	16733	48.65	14453	47.96
1	49.98	12886	53.08	10478	44.60
2	48.96	10803	48.76	9386	44.01
3	49.98	10583	50.22	8351	43.56
4	52.02	10395	51.69	8335	43.55
5	52.02	10398	51.25	8842	43.76
6	52.12	11398	47.45	9842	44.06
7	52.02	17006	55.24	15858	49.69
8	55.08	19244	55.88	18554	53.03
9	55.08	19196	53.78	18214	52.84
10	55.08	18981	55.78	17395	52.26
11	55.08	19122	54.41	17940	52.68

表1 第二水厂宏观模型优化前后比较（6月23日）

表2 桂城水厂宏观模型优化前后比较（6月23日）

究其原因在于：宏观模型是基于运行现状 SCADAS 数据建立的出厂压力流量与管网压力关系

模型，如式（1-1）所示  $H_j = C_j + \sum_{k=1}^m A_{jk} h_k + \sum_{g=1}^n B_{jg} Q_g^2$  用式（1-1）计算运行现状出厂压

力与 SCADA 实测值相符（式中系数矩阵  $C_j, A_{jm}, B_{jp}$  是用系数求解方程组（1-2）求出的）。

$$H_{sj} = C_j + \sum_{m=1}^{18} h_{sm} A_{jm} + \sum_{p=1}^2 Q_{sp}^2 B_{jp} \quad (1-2). \quad (H_{sj}, h_{sm}, Q_{sp}, \text{是 SCADA 数据, 见第一篇}).$$

基于式（1-1），建立非线性规化模型（1-3）求各厂优化流量，并符合实际（见第三篇）。

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \min f(Q) = \sum_{j=1}^P (C_j + \sum_{k=1}^m A_{jk} h_k + \sum_{g=1}^n B_{jg} Q_g^2)^T Q_g \\ \text{s.t. } Q_{li} + Q_{2i} = Q_0 ; Q_{1(\min)} \leq Q_{1i} \leq Q_{1(\max)} ; Q_{2(\min)} \leq Q_{2i} \leq Q_{2(\max)} \end{array} \right\} \quad (1-3)$$

优化流量将会改变监测参数  $H_{sj}, h_{sm}, Q_{sp}$ ，由式（1-2）可知会导致系数  $C_j, A_{jm}, B_{jp}$  的变化。只有依据变化后的系数矩阵及监测参数  $h_{sm}$ ，式（1-1）计算优化压力才会随优化流量的变化而合理调节。但宏观模型利用 SCADA 历史数据离线建模，SCADA 监测参数和系数矩阵均未变化。故用式

(1-1) 依据未变化的  $C_j$ 、 $A_{jm}$ 、 $B_{jp}$  及  $h_{sm}$  计算优化压力，其精度超出  $\pm 0.02$  MPa，和水力模型计算精度基本相同。

宏观模型只依据 SCADA 大数据建模方便快捷(水力模型需测定管网成百上千个环路节点每小时用水量和各环路每条管道粗糙系数，以计算管网压力损失，故称微观模型)。微观模型和宏观模型均只能求出每天 24 个时段优化工况点(流量压力)，不能满足城市供水量(非离散型随机变量)实时自动控制。但宏观模型建模工作量少所求优化流量符合实际。因此只需开发相应优化压力计算子模型，宏观模型仍有应用空间。

为此各大学与设计研究所发表了许多论文对此作了深入研究，如在式(1-3)中增加出厂压力约束等。同时不少论文向研究管网特性曲线方向发展，如东北市政设计研究院和华北市政设计院联合发表论文《管网特性曲线用于供水工程的节能设计》将曲线定义为管网概化理论曲线(《中国给水排水》2003. NO. 19)。上海市政设计研究院提出“模拟建立管网管道特性曲线”(2010年第11期《变频器世界》)。

2013年住建部《城镇供水管网运行、维护及安全技术规程(CJJ210-2013)》首次明确提出“管网压力应符合低碳节能并须满足管网末端服务压力需要”；并提出“用微观模型和宏观模型、SCADA系统、水量预测分配系统、泵站优化系统协同工作建立在线实时调度控制”，为管网建模低碳供水明确了方向和要求。各院校水司沿此方向途径作了大量研究。

如浙江大学和广州水司(日供水400多万吨，图1)2013年用SCADA数据在线校正水力模型节点流量(DN300管以上环路节点均安装远传流量计)使95%监测点计算压力与监测值误差0.02MPa以下，符合住建部标准；90%监测点误差0.015MPa以下，符合管网水力计算允许误差1~1.5m要求(见《给水排水设计手册》第3册.2.2.3节)属国内首例，节能却仍不明显。

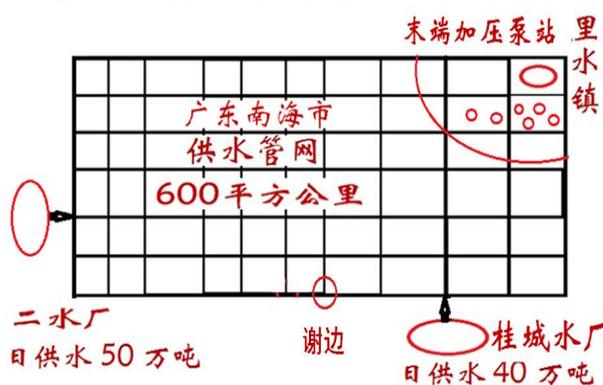


图1 南海市供水厂与管网示意简图



图2 广州水司供水厂与管网示意简图

## 2 管网末端压力控制曲线的建模与检验

水厂和管网属同一系统，建立与管网运行特征相符的模型并实现自动控制，确保出厂水量压力满足管网(末端)用户需要又无多余扬程而节能。基于宏观模型，离线构建末端压力与出厂压力流量关系模型，即管网末端压力控制曲线，曲线任意点出厂压力对应的末端压力与水司规定值的平均误差 $\pm 0.002$ MPa(图2，虚线表示末端压力)，控制出厂压力沿此曲线运行即可控制末端压力。

### 2.1 管网末端压力控制模型建模

模型构建主要有三部分：

第一部分是依据 SCADA 数据建立宏观模型求得优化工况点(参见1至5篇)。

第二部分是依据宏观模型优化工况点(以小时计全年8760个)建立管网压力控制模型。宏观模型优化工况点分布在幅度 $\pm 6.5$ m的长条形区间，有3%的工况点与理想状态管网压力控制曲线的误差 $\pm 0.001$ MPa(图3)提供了建立曲线模型条件。

建模迭代综合应用多种优化算法：①混合遗传算法在各区间(细分60个子区间)搜索这些点(初始点)；②推断子模型基于这些点推断相应末端压力，并与规定值比较的误差更新初始点；

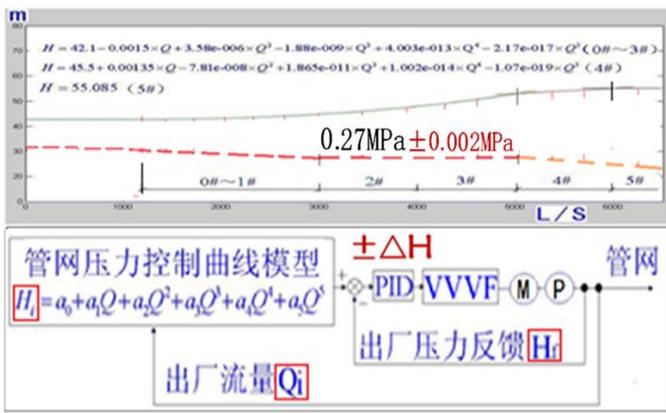


图2 管网末端压力控制曲线运行结构简图

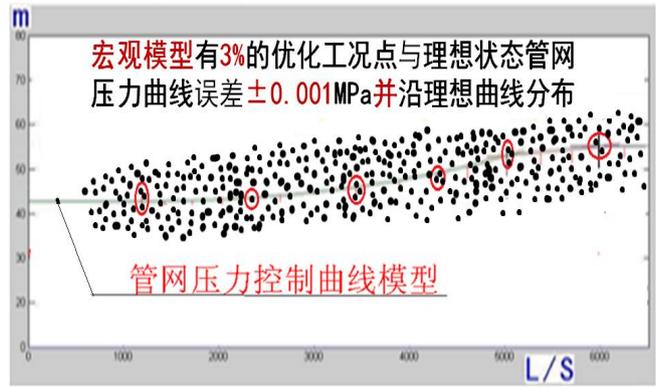


图3 宏观模型工况点沿管网压力控制曲线分布图

③更新点为样本点建立管网压力控制曲线,并校验其精度。步骤①、②、③是一个迭代循环,经54次循环迭代末端压力计算值与规定值的平均误差±0.002MPa,并生成8组高次(N次)曲线(N=3,4,⋯,10)参见图4。建模过程主要算法是:



图4 管网压力控制曲线建模主要过程

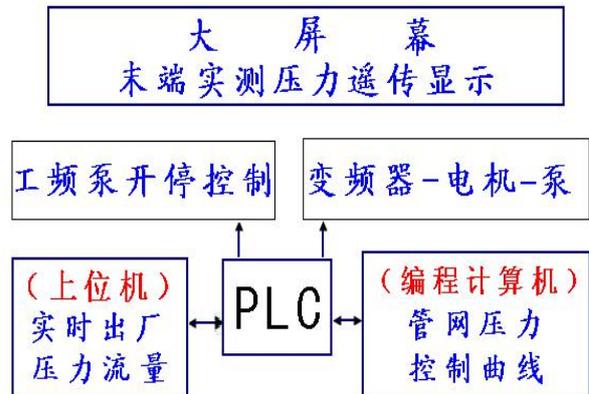


图5 运行之初核验曲线精度示意图

一是**多目标滚动优化**。供水量随用水量而变化,压力损失随供水量及管网节点流量的变化而变化,这些变化给预测出厂压力带来诸多不确定。离线建模是多目标滚动迭代,确定60个(子区间)最优控制点(迭代点),可弥补流量变化和水头损失变化引起的不确定性,满足出厂压力预测(传统预测控制采用的是在有限时域即每一时刻滚动优化,确定一个控制量去控制系统运行)

二是**模型误差反馈**。离线建模是依据历史SCADA数据,无疑记录了各种外界干扰因素影响,会使曲线模型出厂压力与实际出厂压力误差较大。为控制误差:①推断子模型推断与初始点相关的末端压力,②末端压力推断值(子模型输出值)与水司规定值比较,其误差修正初始点建立曲线(传统在线推断控制是模型输出值与实际运行值比较,显然比离线建模来得更真实)

三是**弥补离线建模不足**,实际运行之初核验曲线精度即上位机运行脚本程序,将末端压力实测值与规定值比较,若误差超出±0.002MPa,显示超差数据及所在区间供修正曲线参考(图5)。实际运行显示多数区间误差未超出±0.002MPa。但0#~1#区间超出±0.004MPa,因末端压力规定是变化的:0.279Mpa~0.335Mpa(时变)离线建模精度会差一些(图2)。

四是**运行结构简单仍属常规PID控制**(图2)。参与运行是管网压力控制模型而不是推断子模型,系统只有出厂压力输出,而无末端压力输出,结构简单计算量小。曲线模型覆盖全流量区域,运行不修正模型参数可满足控制精度。

### 第三部分是模型精度校验

南海水司供水管网600平方公里(图1),调度中心依据长期运行数据和用户需要及供水能力规定一水厂:①0时~5时(0#~1#区间,图2)各远端点压力不低于0.28Mpa~0.335Mpa(一厂超负荷供水白天远端缺水,为深夜储水提高此区间远端压力);②6时~17时(2#~3#区间)末端压力0.27Mpa恒定;③18时~23时(4#~5#超负荷区间末端压力已达不到0.27Mpa)规定出厂压力不低于0.52~0.54MPa、远端压力不低于上一年SCADA数据。**模型精度须满足上述规定**,若高于

规定值 (+0.006MPa) 节能即不明显, 若低于规定值 (-0.006MPa) 则不能满足末端用户需要, **模型精度至关重要**。故远端压力精度须控制在  $\pm 0.002\text{MPa}$ , 否则模型无实用价值。

推断子模型经 54 次迭代 (图 4) 生成的末端压力计算值  $h_y$  与规定值  $h_g$  (表 4) 比较的误差绝对值之和 ( $\sum |h_{yi}-h_{gi}|, i=1, 2, \dots, 8760$ ) 已最小, 平均误差  $\pm 0.002\text{MPa}$  ( $16.54\text{MPa}/8760$ ) 参见表 5, 并生成 8 组高次 (N 次) 曲线 (N=3, 4, ..., 10) 见图 4, 并自动输出与理想状态曲线的误差最小的一组曲线 (表 5 是由 8760 行数据每隔 160 行输出一行。Q 是宏观模型优化流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ )。

迭代次数	$\sum  h_{yi}-h_{gi} $	迭代次数	$\sum  h_{yi}-h_{gi} $
1	231.016	42	19.105
6	183.443	48	17.771
12	117.582	54	16.539
18	86.345	60	17.084
24	42.682	63	17.337
30	29.917	66	18.521
36	21.101	69	20.879

4#~5#			2#~3#			2#~3#			2#~3#			0#~1#		
Q	$h_y$	$h_g$												
22553	0.1857	0.188	17896	0.2686	0.270	16223	0.2681	0.270	13839	0.2731	0.270	9647	0.2977	0.295
21117	0.2091	0.211	17736	0.2708	0.270	16112	0.2685	0.270	13480	0.2720	0.270	9466	0.2990	0.303
20495	0.2234	0.225	17668	0.2712	0.270	16009	0.2688	0.270	13079	0.2727	0.270	9342	0.3007	0.303
20187	0.2278	0.232	17576	0.2707	0.270	15894	0.2690	0.270	12683	0.2736	0.270	9230	0.3029	0.303
19616	0.2390	0.242	17482	0.2706	0.270	15790	0.2692	0.270	12361	0.2746	0.270	9132	0.3051	0.303
19478	0.2424	0.245	17399	0.2704	0.270	15709	0.2696	0.270	11899	0.2743	0.270	9054	0.3077	0.303
19227	0.2485	0.252	17312	0.2703	0.270	15606	0.2696	0.270	0#~1#			8852	0.3130	0.303
19113	0.2499	0.252	17228	0.2703	0.270	15526	0.2703	0.270	10707	0.2779	0.287	8663	0.3159	0.311
19001	0.2525	0.252	17112	0.2693	0.270	15438	0.2709	0.270	10599	0.2809	0.287	8158	0.3188	0.311
18770	0.2558	0.259	17016	0.2692	0.270	15344	0.2711	0.270	10474	0.2830	0.287	6667	0.3248	0.327
18635	0.2570	0.259	16918	0.2690	0.270	14963	0.2727	0.270	10366	0.2854	0.287	5391	0.3343	0.335

表 4 压力计算值与规定值误差绝对值之和

表 5 末端压力计算值  $h_y$  (MPa) 与规定值  $h_g$  (MPa) 比较

曲线参数及几何形状与水厂地面高程、末端 (远端) 高程、输配水能力、供水量、节点流量、供水负荷等有关, 这些因素各厂千差万别, 故各厂曲线模型均不同, 须选择最能充分贴近理想曲线模型的某一组高次曲线来描述管网压力控制模型 (组内 1~3 条曲线, 图 2 为二条 5 次曲线和一条水平直线。不超负荷供水则组内只有一条曲线, 组内曲线过多会增加后续 PLC 编程繁琐)。为减少推断子模型计算量, 每次迭代输出 8 组高次曲线比较选择已能满足模型精度要求 (图 4)。

(基于此, 可将宏观模型水力模型时段流量输入曲线模型, 生成相应出厂压力, 以控制末端压力精度  $\pm 0.002\text{MPa}$ , 有利于扩展宏观模型水力模型在调度领域节能应用, 参见表 1、表 2)。

## 2.2 管网压力控制模型能耗预测

投资方和水厂均关心年节电量预测精度, 为此初步估算是将上年 SCADA 记录 8760 个小时流量输入管网末端压力控制曲线得 8760 个出厂压力, 平均值  $0.4762\text{MPa}$ , 比上年 SCADA 记录 ( $0.514\text{MPa}$ ) 降低  $0.0378\text{MPa}$ 。估算单耗降低 9.46% (运行显示出厂压力每降低  $0.01\text{MPa}$ , 单耗降低 2.5%)。估算还不能作论证依据, 因为: 一是高压变频器自身电耗较大, 二是变速泵转速下降泵效率也会下降。必须计算这二部分的损耗。计算须模拟变频控制泵群沿曲线运行, 故仿真以各泵群沿曲线各区间起点至终点移动步长为 1 秒。仿真求解最优区间数量、各区间长度、泵群组合及各起点调速频率。

2007	年均压力 MPa	型号	台数	流量/ $10^3\text{m}^3$		电量/ $10^4\text{kWh}$		kWh/ $10^3\text{m}^3$	
				实际	仿真	实际	仿真	实际	仿真
恒速泵		32SA	1	40030	40332	662	669	165.37	165.96
变速泵		32SA	1	46302	46667	797	806	172.28	172.89
恒速泵		24SA	2	43718	43984	731	736	168.39	167.33
		20SAP	1						
2007	0.476		7	130050	130983	2190	2211	168.4	168.8
2006	0.514		7	130002		2370		182.3	

表 6 仿真计算值与实际运行比较

2007 年	流量/ $10^3\text{m}^3$		电量/kWh	
	实际	仿真	实际	仿真
9 月				
21 日	399.4	403.3	67219	68077
22 日	407.0	410.9	68579	69115
23 日	386.6	390.4	65113	65899
24 日	387.0	390.9	65170	65984
27 日	401.4	405.4	67603	68432
29 日	411.4	415.5	69321	70138

表 7 单日运行记录与仿真值比较

仿真 (参见图 2) 显示各泵群工况点沿曲线每移动一个步长, 总流量  $Q_i$  和压力  $H_i$  都在变动, 各泵扬程即是  $H_i$ , 各定速泵流量变化甚微, 调速泵工况点在不同转速流量—扬程曲线上变动、轴功率点在不同转速流量—功率曲线上变动。数值计算每一步长总流量  $Q_i$  及累计值、压力  $H_i$ , 以及调速泵和各定速泵的流量及累计值、效率、功率、电量及累计值 (含电机、变频器及  $10\text{kV}$  以下机组所配变压器)。仿真计算见表 6: 沿曲线模型运行每台泵都节电且恒速泵单耗低于调速泵, 如 32SA 变速机组单耗  $172\text{kWh}$  (1 台  $1400\text{kW}$  变频器年用电  $34 \times 10^4\text{kWh}$ , 调速泵转速下降造成泵效率下降额外耗电 12 万 kWh。二者之和约占上年用电量的 2%) 而 32SA 恒速机组单耗  $165\text{kWh}$ ;

仿真计算单耗 168.8 Kwh，比上年单耗降低 7.4%。为核验年用电量预测精度，一厂实际运行后任选六天记录（泵组及相应区间运行时数）输入计算机程序仿真运行，用电量计算值与实际运行值误差在 1.1~1.3%（表 7）。

### 3 管网压力控制模型运行

#### 3.1 提高供水系统运行效率

2007 年管网压力控制模型在一水厂运行，压力均符合调度中心规定，每日供水量经水厂鉴定均符合要求，运行单耗比 2006 年降低 7.62%，年节电 180 万度（表 6）。

有水厂用了国外高效机组和变频器，工况点多数都落在泵高效区，实测节电却不明显。这是由于传统调度或恒压变频均未依据流量实时调节压力以适合管网需要，导致压力常常超过实际需求，因而抵消了高效泵节能效果，降低了供水系统效率。

#### 3.2 曲线模型易实现自动控制

系统调用出厂流量输入曲线模型计算出厂压力设定值  $H_i$ ， $H_i$  与出厂压力反馈  $H_f$  比较误差  $\pm \Delta H$  进入 PID（实现此过程的 PLC 程序仅十几句）， $\pm \Delta H$  经 PID 计算后进入变频器调节频率及调速机组转速（图 2），程序简短计算量小响应快。

水量微变剧变突变均使泵群工况点偏离曲线，但  $H_i$  与  $H_f$  比较、PID 计算直至转速调节这一过程瞬间完成，使泵群工况点得以修正返回曲线。上位机显示  $\Delta H$  在  $\pm 0.005\text{m} \sim \pm 0.01\text{m}$  范围。

外界扰动  $\Delta H$  值会超差，若超出  $\pm 0.5\text{m}$  上位机即提醒管网异常；若超出  $-1\text{m}$ （有较大管爆管，虽流量自动上升但压力不断下降）或  $\Delta H$  超出  $+1\text{m}$ （有较大管未开阀，虽流量自动下降但压力不断上升）系统会报警并转为人工控制减少机组运行（2007 年 9 月一条 DN600 管因故关阀使系统报警）。