

供水低碳自动调度控制系统建模仿真与运行（七）

——基于管网压力控制模型的低碳自动调度与控制

游庆元¹ 罗维平² 陈超明³

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

1 引言

建设智能水务^[1]实现低碳实时调度控制^[2]已成行业发展趋势。如 2018 年笔者去海南供水协会节能技术交流会介绍“管网压力控制模型节能运行”，会后海口市水司和三亚水司邀我们深入交流实时调度平台，水司实际要求将供水管网、供水泵站、取水泵站、加压泵站、清水池水位、远端高位水池各单元纳入低碳实时调度控制（图 1）。为此须以管网压力控制曲线+变频器为平台，变频控制泵群沿此曲线运行，实现出厂压力随流量变化而自动调节，满足远端服务压力且无多余扬程而节能，并以简捷模式实现各单元低碳自动调度控制、水司调度中心远程监控预警、突发事件自动启动应急预案等综合管理功能，在智能水务系统（图 2，住建部 2019 年发布）内构成低碳自动调度平台。

2 管网压力控制曲线模型

管网末端压力与出厂压力流量相关，基于宏观模型和 SCADA 大数据离线构建末端压力与出厂压力流量关系模型（管网压力控制曲线，图 1），输入模型的是出厂流量，输出（控制）的是出厂压力，同时间接控制末端压力恒定在水司规定范围（图 3，虚线表示末端压力）。模型算法结构详见第六章。管网压力控制曲线可以实现：

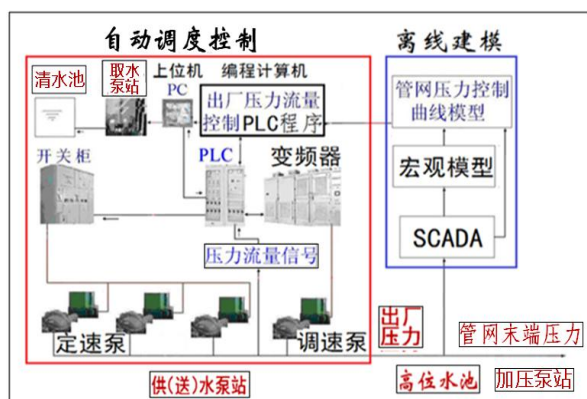


图 1 基于管网压力控制模型的自动调度控制

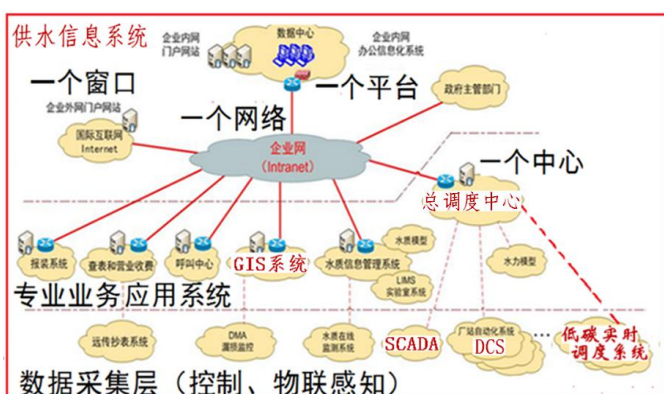


图 2 低碳实时调度系统在智能水务系统的位置

- ①满足瞬间管网用户流量压力需要，不改动现有机组可使单耗下降 10%左右；
- ②满足管网末端压力精度 $\pm 0.002\text{MPa}$ （美国规定末端压力预测误差 $0.015\sim 0.03\text{MPa}$ ^[3]，我国标准是管网“90%的节点压力模拟计算结果与压力监测点数据平均误差应小于 0.02MPa ”^[2]）；
- ③满足供水系统年能耗预测误差 $\pm 1.5\%$ （美国供水系统 24 小时能耗预测误差 $5\%\sim 10\%$ ^[3]）。

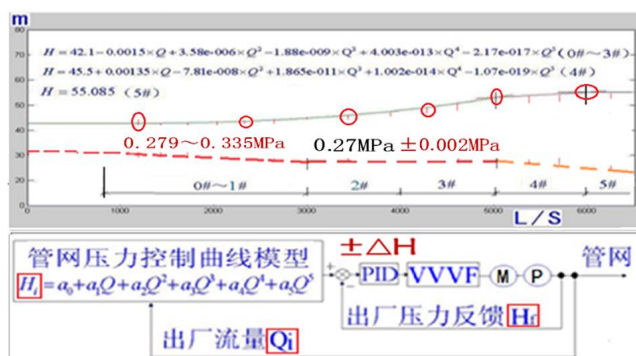


图 3 基于管网压力控制曲线模型的运行结构

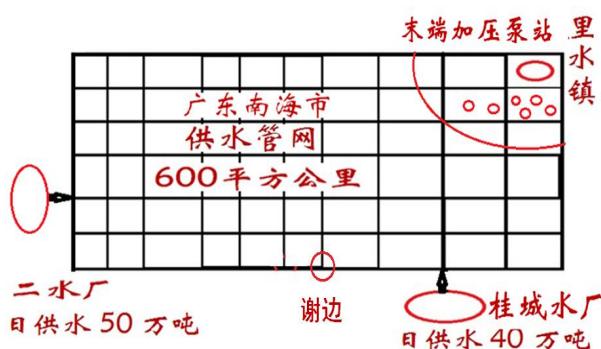


图 4 里水镇加压站供水至一水厂各远端

3 低碳供水实时自动调度控制运行

供水系统节能主要来自管网末端压力、出厂压力、供水泵站低碳自动控制运行，以及取水泵站、加压泵站、清水池水位、远端高位水池水塔的低碳实时调度。

3.1 精准控制管网末端压力(主控量)而节能

2007年南海水司桂城水厂（以下简称一厂，设计日供水38万吨，高日供水45万吨）供水泵站变频控制泵群沿管网压力控制曲线运行显示：末端压力实测值与规定值平均误差±0.002MPa，其中①2#~3#区间平均误差小于±0.002MPa（规定末端压力0.27MPa恒定）；②0#~1#区间规定末端压力0.28~0.33MPa（图3），平均误差超出±0.004MPa；③4#~5#区间超负荷供水，出厂压力和各远端点压力均符合规定（末端压力已达不到0.27MPa，规定出厂压力不低于0.52~0.54MPa、远端压力不低于上年SCADA记录值0.20~0.25MPa）。供水泵站单耗降低7.62%，年节电180万kWh。2011年水司用第二水厂（设计日供水50万吨）水量在管网末端建加压站供水至一水厂各远端（图4）使一厂不再超负荷运行深夜也无需提高压力，故0#~3#区间曲线H₂替换了H₁（图5）2012年单耗降低了9.96%，年节电220万kWh。

3.2 自动控制远端高位水池低碳进水而节能

2007~2011年，一厂超负荷供水白天远端缺水为深夜储水，0#~1#区间末端压力提至0.28~0.33MPa（图3）使流量流入各远端高位水池水塔及居民自备水箱，下半夜多数水塔水池充满了水，随着需水量渐减，变频系统控制泵群沿压力控制曲线向左运行（图3），出水量减少至7000 m³/h左右，相应末端压力提高至0.3MPa以上，满足地形较高水池补水。满足各远端乡镇、工业园区及居民白天生产生活用水需要。以往深夜人工调度增加机组运行，压力不可控，末端压力高达0.45MPa及以上，白白多耗能源。

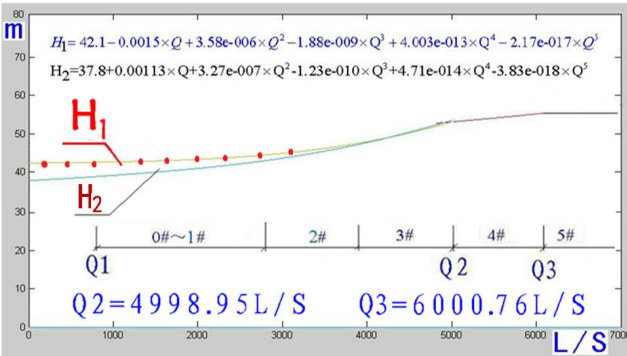


图5 0#~3#区间：曲线H₂替换H₁而节能

	方案一	方案二	方案三
调速泵	1台32SA	1台32SA 1台24SA	2台32SA 1台24SA
流量区间	10	6	4
启停次/天	11	6	4
年节电量 万Kw.h	201	180	135

图6 低碳实时调度变频器设置方案比较

3.3 自动调度供水泵站机组优化运行而节能

管网压力控制曲线必需变频控制泵群沿曲线运行，方能实现节能和自动调度。离心泵对变频器要求简单，但变频机组应如何运行（确定几台变频器、各流量区间起点频率）及机组何时投入运行（确定流量区间数量、各区间宽度及泵群组合）能耗最小，则须仿真确定。仿真在曲线模型平台上模拟泵群沿曲线运行经多方案比较确定合理方案（仿真基础工作是将运行硬件设备用曲线模型和数值模型替代，详见第8章）。

3.3.1 设置几台变频器最合理

方案一设置一台变频器，节电最多但机组启停次数11次，不合水厂要求；方案二设置二台变频器，机组启停6次（白天不更换机组）节电比方案一少21万kwh，可行合理；方案三设置三台变频器，机组启停仅4次，但节电比方案一少66万kwh，水厂不认同。

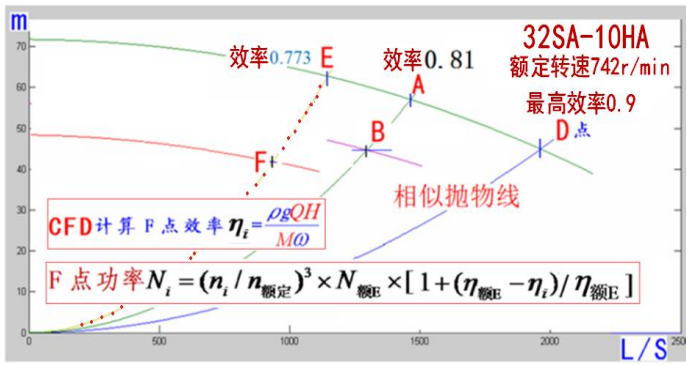


图7 转速下降则泵效率下降示意简图

区间 #	总流量 m ³ /h	调速泵		定速泵		
		32SA	24SA	32SA	24SA	20SA
0	4000-7000	1				
1	7000-10511	1				1
2	10511-14110	1	1			1
3	14110-17210	1	1	1		
4	17210-20270	1	1	1	1	
5	20270-23500	1	1	1	2	

表1 实时自动调度运行机组方案二

3.3.2 各流量区间起点频率

变速机组转速下降泵效率也会下降（图7），如32SA变速泵在F点（0#区间起点，表1）运行参数是：转速比0.808（额定转速742r/min）、流量0.9044m³/s、扬程42.02m，CFD计算的F点叶轮转矩M=8072N·m，则计算F点效率为：

$$\eta_i = \frac{\rho g q H}{M \omega} = \frac{9.81 \times 1000 \times 0.9044 \times 42.02}{8072 \times 0.808 \times 742 \times 2 \times 3.14 / 60} = 0.736$$

，即F点效率0.736，与额定转速曲线的对应点

E点效率（0.773）相比（图7）降低4.78%，效率降低会额外消耗一部分电，如计算

F点功率 $N_i = \left(\frac{n_i}{n_{\text{额定}}} \right)^3 \times N_{\text{额定}} \times [1 + \frac{(\eta_{\text{额定}} - \eta_i)}{\eta_{\text{额定}}}]$ ，其中虚线框内是转速下降导致的

效率下降。仿真显示调速泵95%工况点分布在过D点相似抛物线左右（图7），处在转速不同的流量—扬程曲线上（如图7，F、B点），效率不同程度降低。频率过低影响节电。仿真确定1#~5#区间起点变速泵转速为额定转速的85%~90%（兼顾流量调节宽度）使年节电量取最大值。

3.3.3 机组何时投入运行

基于SCADA数据仿真确定各流量区间（区间数量、各区间调节范围）及其泵群组合（表1）。方案一有10个区间，各区间调节范围小于2000m³/h，会导致各区间来回更替切换定速泵。方案二各区间调节宽度大于3000m³/h。如4#区间（表1）流量覆盖了白天水量变化范围，不增减泵只由系统调节转速流量可满足变化需要。

6时至8时水量快速上升，泵群由1#区间更替至2#、3#，8时后由3#进入4#区间，流量在大于17200m³/h以上运行，不再回落到3#区间。18时后水量上升超负荷运行，泵群由4#更替至5#，流量在大于20200m³/h以上运行，不再回落到4#区间。流量区间更替时，泵群的更替投入自动确保各区间起点（及终点）变频机组在预定频率（转速）运行。减省了频率设定装置，简化了变频运行系统。

3.3.4 依据水量变化自动调度控制泵群节能运行

依据方案二，变频控制泵群（7用4备）沿曲线运行，每台泵都节电，且定速泵单耗低于调速泵，如32SA变速机组单耗172kWh（变频器年耗电30万kWh、转速下降泵效率下降额外耗电12万kWh），同型号32SA定速机组单耗165kWh。

低碳自动调度基本功能是依据水量微变剧变突变，变频控制泵群沿曲线运行调节转速和出厂压力满足流量变化需要，流量区间更替时自动增减泵组。无需调度计划。

一水厂6时后水量急剧增加，泵群由1#区间自动更替至2#及3#区间运行。8时至18时泵群进入4#区间运行，水量在1.72~2万吨/h之间来回往复变化，泵群沿曲线运行调节水量压力满足变化需要。18时后高峰供水，泵群更替至5#区间运行，23时~凌晨1时用水量由2.3万吨/h急剧减至1万吨/h，泵群从5#区间经过4#、3#、2#区间进入1#区间运行，多数区间更替只减少一台机泵即可实现（表1）。

3.4. 自动控制多水厂管网节能运行

广州水司创建了泵开停调度功能分析图, 直观显示人工经验调度环境下泵开停对管网的影响。当西村水厂增开一台泵增加出厂水1059 m³/h, 导至石门水厂与南洲水厂分别减少出厂水量479m³/h与300m³/h、管网压力升高0.5~0.7m (参见第6章图2)。调度员通过分析图可采取措施实现各厂供水量平衡与合理压力控制。

在低碳自动调度环境下各厂依据需水量调节转速保持水量平衡, 如一水厂由3#区间进入4#区间运行增开一台24SA泵 (表1), 流量增加3000m³/h, 但出厂水总量并没有随即相应升高, 因系统PID控制调速泵降速量保持出厂水量与管网需水量平衡, 避免挤占第二水厂供水范围而造成压力升高浪费能源。当第二水厂故障减少供水则打破了平衡, 各厂供水交汇处由相对稳定即刻处于变动状态, 导致一水厂出水量增加使泵群工况点偏离至曲线下方, 但压力设定与压力反馈比较速度小于100ms、变频器调节频率增加调速泵转速瞬间完成, 使工况点返回曲线, 如此循环控制, 驱动泵群工况点沿曲线向右运行 (直至区间更替增加定速泵) 出厂水量增加出厂压力上升, 使前沿供水越过原交汇处去填补第二水厂退出的管网空间, 最终二个厂水量压力在新交汇处达到平衡, 保证新交汇处 (附近区域) 用户基本用水。

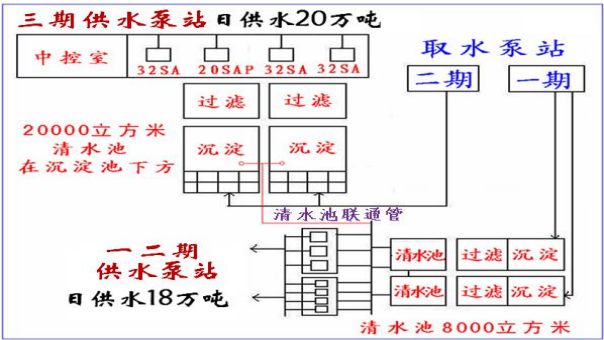


图8 桂城水厂供水泵站平面布置简图

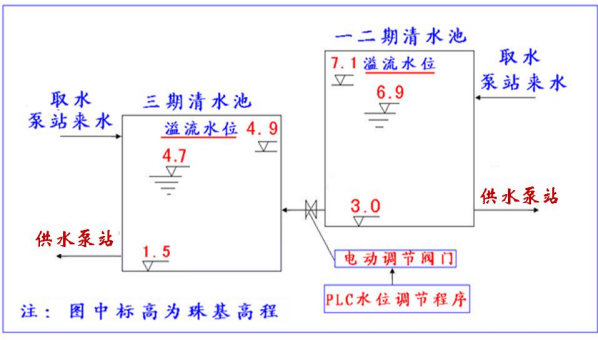


图9 自动维持清水池高水位运行无溢流

3.5 自动维持清水池高水位运行无溢流而节能

一厂1980至1990年代先后建成三期供水工程, 清水池未连通 (图8)。第三期占全厂供水量62%, 限于滤池生产能力, 清水池水量不够水位低, 影响节能运行。而一二期富余产水能力30~50%。

依据清水池结构确定连通方案及管道设计。2010年水池联通后在原PLC增设程序, 自动调节电动阀开度实现调水, 每天一二期4万吨水自动调入第三期清水池, 提高第三期水位无溢流, 并保持一二期清水池较高水位运行 (图9), 清水池年均水位提高0.5m, 供水泵站单耗可降1%。

3.6 统一调配供水泵和取水泵减少开停

水池联通使一二期取水泵站变成实际相连合为一体有利统一调度。依据供水泵沿管网压力控制曲线运行流量变化并综合河流水位变化、取水泵能力、清水池调节容量及其水位变化趋势等参数, 编制脚本程序在上位机运行, 统一调配供水泵和取水泵开停, 适时命令取水泵增减以维持清水池水位, 取水泵由5~6次减至3~4次/天 (表2)。

	大(机)为 32SA-19j,小(机)为 24SA-18j	
厂区出厂总量 (m ³ /小时)	二期取水泵站 (m ³ /小时)	一期取水泵站 (m ³ /小时)
4000~8500	1大(5053~5309)	1小(3261~3435)
8500~12500	1大1小(7636~8093)	
12500~17000	2大1小 (11212~11938)	2小(6411~6732)
17060~19500		1小1大(8215~8650)
19500~23500		2小1大(11302~11700)
取水河流水位变动:-2.7~-0.5m(珠基高程)		

表2 厂区出厂总水量与取水泵开停对照

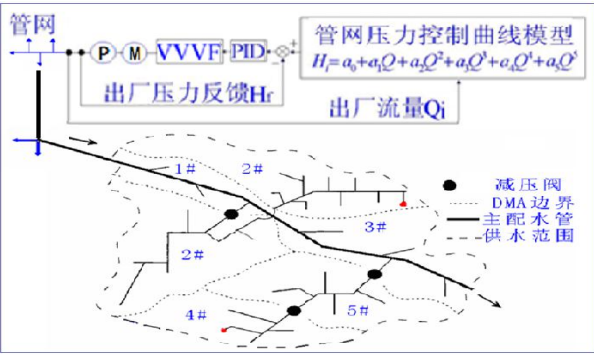


图10 自动将小区减漏效应放大至整个管网

3.7 小区减漏效应自动放大至整个管网

降低距水厂较近的高压力区域压力可减少漏损,同时也减少了出厂流量,管网压力控制模型是依据流量调节压力,故相应降低了出厂压力,因此可减少整个管网漏损,即小区减漏效应可放大至整个管网而降低漏损如:如2007年9月12日11时出厂压力0.5104MPa,出厂流量17368m³/h,将靠近水厂的8个区域压力(均在0.38 MPa及以上)降至0.3 MPa可减漏360m³/h,出厂流量相应也会减至17008 m³/h,相应出厂压力也降低了0.0056MPa,整个管网漏损可减少0.56%。泵站单耗还可再降1.3%。

3.8 突发事件自动启动突变预案

供水运行有多种因素会导至突发事件,如一次从2#区间更替到1#区间应减少一台24SA泵(表1)因PLC柜恰在检修,改由上位机运行的脚本程序发出命令,由值班人员人工关停一台机,但未立即执行,由于供水量在不断下降,因而系统控制调速泵不断降低转速减少水量,即变频器频率不断降低,最终超过系统设置的警戒值导至报警,使值班人员迅速减少机组运行。

4. 低碳自动调度在智能水务系统的位置与作用

2019年住建部发布《城镇供水信息系统工程技术标准》实现各专业业务信息系统互联互通信息共享智慧应用。供水信息系统是“开放互连分层分布式体系结构”(图2)。低碳实时调度系统在其中位置是与厂站DCS系统同层,实际成为DCS系统现场控制子站(图2、图11),DCS系统通过无线网络与总调度中心相连,共享资源,如DCS系统通过网络为管理系统提供低碳调度运行数据,同时调用系统SCADA流量压力信息,参与低碳调度模型运行计算,减少重复建设。

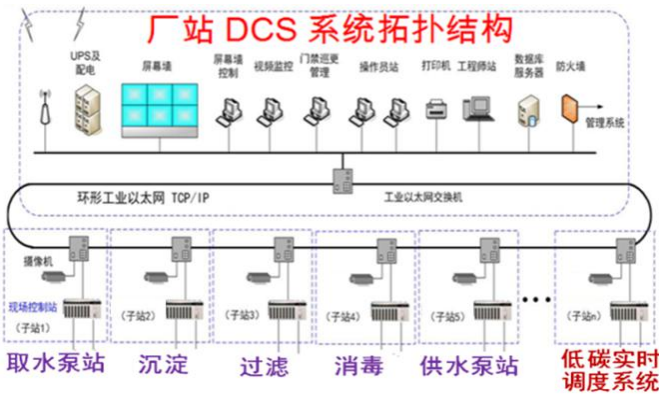


图11 低碳调度系统成为DCS系统的控制子站



图12 水司调度中心实时监控多个水厂

2007年南海水司总调度中心监控计算机装有远程控制软件客户端程序,通过无线网络相连,对装有远控软件服务器端程序的一水厂上位机实现远程监控。在信息系统内,总调度中心设置多台监控计算机即可远程监控多个水厂低碳自动调度运行(图12)。

在信息系统架构内,低碳自动调度运行显示,当水量变化使泵群工况点偏离曲线,误差 ΔH 一般 $\pm 0.005m \sim 0.01m$ 。外界扰动(爆管) ΔH 会超差,若超 出 $\pm 0.5m$ 即显示管网异常,信息系统的管网 GIS分析系统依据此信息会在一水厂供水范围搜索事故点缩小搜索范围;

若 ΔH 值超出一1m(有大管爆管)或 ΔH 超出+1m(有大管未开阀,)系统会报警并自动减机或全部停机,管网GIS分析系统依据此信息会沿一水厂范围大管方向搜索以快速确定事故位置。

参考文献:

[1] 住建部标准. CJ/T XXX—2019 城镇供水信息系统工程技术标准(征求意见稿). 住建部网站. 2019. 3
[2] 住建部标准. CJJ 207—2013 城镇供水管网运行、维护及安全技术规程. 北京. 中国建筑工业出版社.
[3] 程伟平. 郑冠军, 俞婷超等. 供水管网状态估计研究进展. 中国给水排水. 2006. No. 20