数字孪生技术在市政供水调度系统中的工程应用实践

周龙[1]

(1.昆明林勘院工程勘察设计有限公司，云南 昆明 650224)

摘 要：市政供水调度受用水波动、管网阻力及泵组运行状态共同影响，仅依据出厂压力调试设备，难以兼顾末端供水和输配能耗。围绕数字孪生技术在供水调度中的工程应用，研究管网对象映射、运行数据同步、水力模型校准和滚动调度方法，重点分析需水预测、泵组方案筛选、异常工况推演及指令反馈的技术衔接。通过典型支路扬程和功率核算，说明节能判断必须同时满足关键节点压力和设备运行约束条件。系统实施应以可信数据驱动模型更新，将预测结果转化为可核验的控制建议，并依靠现场联锁、执行回执和模型复核形成连续运行机制，为供水安全与经济调度提供技术支撑。

关键词：数字孪生；市政供水；水力模型；泵组调度；实时监测

DOI：doi.org/10.70693/202611065293

Engineering Practice of Digital Twin Technology in Municipal Water Supply Dispatching Systems

Zhou Long[1]

[1.]Kunming Forestry Survey and Design Institute Engineering Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650224, Yunnan, China

Abstract:Municipal water supply dispatch is jointly governed by demand fluctuations, pipeline network resistance, and the operating status of pump units. Commissioning equipment solely on the basis of plant discharge pressure renders it difficult to reconcile terminal supply performance with transmission and distribution energy consumption. Focusing on the engineering application of digital twin technology in water supply dispatch, this study investigates pipeline network object mapping, operational data synchronization, hydraulic model calibration, and rolling dispatch methods, with particular attention to the technical coupling among water demand forecasting, pump unit scheme screening, abnormal condition simulation, and command feedback. Through head and power calculations for typical branches, it is demonstrated that energy-saving assessments must simultaneously satisfy the pressure constraints at critical nodes and the operational constraints of equipment. System implementation should be grounded in trustworthy data to drive model updating, translate forecast results into verifiable control recommendations, and establish a continuous operating mechanism through field interlocking, execution acknowledgement, and model review, thereby providing technical support for water supply security and economic dispatch.

Keywords:Digital Twin; Municipal Water Supply; Hydraulic Model; Pump Unit Dispatch; Real-Time Monitoring

作者简介：周龙（1996—），男，汉族，云南大理人，本科学历，工程师，研究方向为给排水工程、市政工程等。

前言

市政供水系统由输水管（渠）、配水管网、调节构筑物、泵站、阀门与附件、计量设施共同组成，各环节在时间和空间上相互影响。早高峰需求增加时，出厂流量变化未必能够准确反映局部高区压力；低谷时段维持固定扬程，又可能使低区承受不必要的高压。现有监控系统能够监测设备状态和测点数据，但测点之间的水力状态仍需结合管网模型分析。数字孪生技术应用的关键在于让供水资产结构、现场状况和计算结果持续对应，使调度人员能够预判操作后果。本文以典型的市政供水系统为研究对象，从数据接入、水力计算及控制执行三个环节展开技术分析，讨论在既有监控条件下的供水系统部署和调试方法。

1 供水调度对象与实时数据接入

1.1 明确系统范围和调度层级

典型应用系统按供水量 12 万 m³/d、2 座水厂、3 座加压泵站和 6 个分区设置进行考虑，研究对象包括出厂干管、分区边界、主要调节阀及关键压力节点。系统首先明确每个分区的供水入口、联络通道和调蓄边界，区分可远程控制设备、仅监视设备和人工操作设备。数字孪生平台承担状态计算、方案比较与调度建议反馈，既有监控系统承担指令转发和运行监视，现场可编程控制器承担泵组联锁与设备保护功能。管网地理信息用于确定空间关系，设备台账用于识别性能与允许工况，实时监控数据用于更新运行状态，三者通过唯一供水资产编码关联。三维展示仅作为定位和查询入口，不能代替管网连通性及水力计算。对于未纳入水力模型的支管，应明确其需水量归属节点或所属分区，避免因模型简化造成分区需水量统计遗漏。

1.2 流量、压力与液位数据对时

现场接入流量、压力、液位、频率、功率及阀位信息，同时保留采集时间、接收时间和质量标识。调试阶段可按 10s 采集、1min 汇总、5min 更新调度状态组织数据，但这些周期属于系统配置条件，设备快速保护仍由现场控制器独立完成。压力测点统一换算测压管水头 $H = z + p/\rho g$，核对传感器安装高程和压力单位，不能将不同高程测点的表压直接比较。流量累计量与瞬时量分别处理，缺测期间不以零值填补；短时平稳缺口可以插值，设备切换期间则保留未知状态并暂停相关方案下发。数据以采集时间对齐，迟到数据用于历史复核，不再追溯触发已经过期的控制。泵组启停、阀门动作等离散状态按事件保存，不能使用时段平均值代替；仪表时钟偏移超出项目允许范围时，应先完成校时，再参与联合计算。对于长期不变的阀位或压力信号，应结合流量变化、现场反馈核实是否存在冻结，防止形式完整的数据进入模型。

1.3 监测位置覆盖关键水力边界

测点布置围绕边界可辨识性展开，水厂出口和分区入口布置流量监测设备，对调蓄设施液位进行记录，在高程较高、供水末端、供水薄弱的位置设置压力监测设备。联络阀两侧的压力和开闭状态应当对应，防止把实际上关闭的管段按通水状态计算。设备接口分别保存命令值和反馈值，比如变频器目标频率和实际频率不可以共用一个字段。当分区入口流量达到 1200m³/h 且出口流量为 150m³/h 时，调蓄设施会在每小时增加 100m³ 的储水量，分区净用水量和损失量合计达到 950m³/h，此时不能直接通过入口流量减去出口流量来计算出 1050m³/h 的结果。该平衡用于对边界数据和储量变化进行检查，不能直接作为用户实际用水量。针对那些需要平衡长期偏差的区域，建议先检查未计量联络管、仪表偏差、液位换算情况，再对模型参数进行调整。

2 面向在线计算的数字孪生模型

2.1 管网拓扑及设备特性映射

水力模型通过节点、管段、泵、阀门、调蓄设施来对实体网络进行描述，管段需要输入长度、内径、材质、阻力系数，节点需要输入高程和基准需求。管线平面交叉并不意味着相互连通，同一阀井内也有可能存在独立通路，模型导入之后需要依据竣工资料和现场核查来进行连通检查。模型简化可以把水力作用比较接近的末端支管进行合并，但是需要保留供水边界、控制设备和主要损失，不能为了加快计算就删除阻力较大管段。水泵使用实测或者厂家给出的流量—扬程（H-Q）、流量—效率（η-Q）曲线来确定水泵对应的转速和适用区间。并联泵组根据共同扬程来计算各泵的流量，不可以把单泵的额定流量直接相加。阀门按照类型形成控制或者阻力关系，开度不可以直接看作供水能力的比例。设备检修、管线切改、常闭阀门调整之后，应当同步更新拓扑版本。

2.2 分区需水量向节点分配

需水量按照分区总量和节点空间权重进行分配，居民、工业、公共服务用户分别设置时序特征，大用户主要利用独立计量数据。居民需求可以按照服务人口、历史计量数据和地块性质来确定初始权重，并且利用分区实测流量进行修正，不可以长期按管长平均分摊。模型入口设为供给量时，需要扣除调蓄储量变化，并考虑分区间交换，避免将泵站输水量全部计入当期用户需水量。漏损和正常需求分别进行设项，压力变化明显时不能假定漏损恒定。常态运行条件下，可按需水驱动方式进行计算。停泵、爆管或者严重低压情况应当使用压力驱动需求表达，该表达方式反映了压力不足使得实际供水受到限制。虽然模型出现不合理低压，仍然可以保留全部需求，从而对停水范围判断产生影响。节点分配结果需要依靠不同时间段的压力响应进行验证，不能仅让总量达到闭合。

2.3 水力参数分组校准与留出验证

校准前固定已核实的边界水位、阀门状态和泵组曲线，再调整分区需求系数与管道阻力，避免用粗糙度去补偿错误拓扑。阻力参数按照管道材质、管道使用年限和供水区域进行分组，并且约束在有工程依据的范围内，不逐根进行自由拟合。调试工作选取连续 7 天的数据，这些数据包括高峰、低谷和泵组切换的各个时段，部分时段用来进行参数辨识，其他时段用于参数验证。对压力和流量残差分别按照测量不确定度或者工况允许偏差进行归一化处理，并且加入权重，从而避免不同单位、数量级导致某类数据主导拟合。若将关键节点压力偏差控制在 2 m 以内，把主要边界流量相对偏差限制在 5% 以内，将其作为系统调试目标，同时应当检查仪表精度能否满足要求，不要只关注平均值而忽视最不利节点。单点持续偏差需要优先对高程、测点、局部阀门进行检查。对多点同步偏差进行分析，并对需求进行再分配，同时确定公共边界，校准结果需对留出数据进行复核。

2.4 滚动计算中的约束与目标

在线调度按当前状态初始化模型，预测未来 2h、每 15min 形成一个计算时段，并每 5min 滚动重算，只执行当前被批准的动作。目标函数把耗电量、泵组切换次数和压力偏离结合起来进行综合考量，但是最低供水压力、调蓄水位、泵组允许流量还有检修状态这些要素需要被当作明确的约束条件，不得因罚函数惩罚权重设置不足而突破上述约束，仅追求表面上的经济性。泵组启停属于离散变量，频率是连续变量，可以先把可用机组按顺序列举出来进行组合，然后在允许的频率范围内搜索，并且对水力性能进行校核。候选方案会对高区压力和低区超压进行检查，以防止整个系统使用相同的压力目标。预测末端储水量需要保持规定的储备或者接近初始可用水量，这样才能防止提前耗尽水池储量而出现短期的低电耗。计算时限也要把数据整理、方案审核和指令传输所需要的时间扣除，计算结果得到以后再重新核对现场的状态。如果在计算期间出现停泵或者阀门切换的情况，原来的方案应当作废并重新计算。如果计算超时或者没有找到可行的解，系统会保留当前的安全运行方案，并且提示存在约束冲突，不会自动地降低压力和液位的边界约束条件。

3 数字孪生调度的工程实施

3.1 用需水量预测修正泵站供水计划

预测模块以分区计量序列为基础，结合工作日、节假日和气温等因素，先建立可解释的同类日基线，再比较复杂模型是否实质性改善误差。大用户停产、消防用水和管线冲洗是事件输入，不能通过历史均值进行推断。系统在各个滚动周期内对预测结果和实际净需水量进行比较，以识别全区趋势偏差和局部异常情况，在确定边界数据有效后方可对后续需求进行修正。若预测值为 1800m³/h，实际值为 1980m³/h，偏差达到 10%，并且持续 15min 且无其他调蓄补偿，将形成 45m³ 的供水量差，此时可以依据可用储量来判断是否立刻增加泵站供水。调度时会同时计算基准需求和偏高需求情景，并且对压力余量较小的分区优先保留增供能力。频率调整完成之后，系统需要等待流量和压力反馈达到稳定状态后才可以继续进行修正，避免预测误差和操作偏差相互叠加造成反复调节。

3.2 按供水约束筛选泵组扬程

泵站节能需要比较在相同输水任务下所消耗的输入电能。例如，预测某支路流量 1800m³/h 且连续运行 2h，吸水端和主要节点高差 12m，沿程和局部损失总计 12m，节点最低压力水头按照该工况 20m 设定，则所需泵扬程至少为 44m。不同转速工作点的综合效率是由泵和电机、变频器性能所确定的，不会通过相似定律来推导。按输入

功率P = ρgQH/η计算表1,其中流量换算为0.5m³/s，效率分别采用所列工况假设值。A方案具有4m压力余量；B方案满足设定边界；C方案虽计算电耗更低，但关键节点仅有18m压力水头，应排除。B方案相较A方案在该时段减少电耗约82.9kW·h，降幅约13.0%，只反映了定流量工况下的计算差异。实际运行还需要对供水需求和模型误差保留适当余量，不能把理论最低扬程当作长期设定值，也不能用局部时段的数据推测出全系统的年度节能率。

表1 典型支路不同扬程方案核算

方案	扬程(m)	综合效率(%)	节点压力水头(m)	输入功率(kW)	2h电耗(kW.h)
A	48	74	24	318.2	636.3
B	44	78	20	276.7	553.4
C	42	79	18	260.8	521.5

3.3 异常工况推演与分区切换

出现入口流量突增、局部压力下降时，平台先检查泵频率、阀位及仪表状态，再将异常流量和相邻测点响应进行空间对照。压力下降是爆管、大流量用水与传感器故障的共同表征，仅依靠单点监测难以区分，需结合多点数据与水力机理进行判断。对疑似管段分别设置了附加泄流或停运情景，比较压力残差分布，给出需要现场核查的范围。隔离方案按照实际可操作的阀门组合进行推演，计算受影响的用户数量、关键节点的压力、替代管段的供水能力、调蓄的持续时间，不可以依据地图距离来选择关闭的阀门。分区联络完成之后需要重新核查高低区的压力和水流方向，若分区切换可能引起水质变化，还需分析水体停留时间及不同水源的混合情况，并且安排必要的采样检测工作。常规延时水力计算适用于稳态及缓慢变化过程，关阀和停泵引起的水锤需要进行瞬变分析，阀门动作速度不能只依据调度模型设定。

3.4 指令校验与投运效果复核

工程投运分为三个阶段：历史回放、在线影子计算与受控执行。历史回放使用同一时刻可获得的数据，不把事后信息用于预测。影子阶段记录建议方案但不改变现场设备，检查压力预测、求解时长和不可行原因。在受控执行过程中，每一条指令都包括设备编号、目标值、有效时段、模型版本、授权信息。现场控制器在核验远程允许、液位、启停限制之后执行，并返回接受、完成、拒绝三种状态进行选择。指令拥有唯一的编号，系统在重复接收时不会对设备进行重复启动。接受回执只表明进入了处理流程，完成状态仍需要设备反馈来确认，超时之后先查询状态然后再决定后续操作。当连续设定值达到过期时间后，系统不可以进行再次下发操作，在通信出现中断时，会依据现场预设的策略来保持设备的安全运行。调度平台和控制网络利用受控接口、访问权限，当模型调度出现故障时不会中断原有保护。将供水量、入口水位和压力等相近条件下的单位供水电耗进行比较，并统计低压持续时间、泵组切换次数、指令执行情况和异常处置记录。电耗改善如果伴随储水量下降或者供水压力降低，应该先消除比较条件的差异。最终通过电表、水量和调蓄记录进行核验，不能用模型目标值代替运行成果。

4 结论

数字孪生技术在市政供水调度系统中的应用，主要体现在供水资产拓扑、实时数据和水力计算三者的持续对应。数据接入应统一时间、高程与计量边界，模型校准应区分需求变化、设备状态和管道阻力，防止参数拟合掩盖现场信息错误。调度计算需要将节点压力、调蓄储备和泵组允许工况作为约束条件，在满足供水任务后比较电耗及动作代价。异常处置应以多测点响应和现场核查确定范围，分区切换需复核替代通路及瞬变风险。工程实施通过历史回放、影子计算和受控执行逐步投运，以指令回执及运行实绩检验方案，使数字孪生成为可用于日常调度的技术工具。

参考文献：

[1]吕昌旭.基于信息化的供水一体化调度管理模式探究[J].物联网技术,2026,16(16):71-75.

[2]张振光,刘晓臣.数字孪生引水工程建设——以嫩江北引工程为例[J].水利科学与寒区工程,2026,9(7):103-107.

[3]胡恺葳,李树平,吴烨璇.基于多级协同的城市供水系统节能优化调度研究[J].环境工程,1-15.

[4]宋金伟.数字孪生技术在大型水利工程供水调度中的应用[J].水科学与工程技术,2025,(4):13-15.

[5]戴雷杰.数字孪生技术在城市供水监管中的应用[J].智能城市,2025,11(7):124-127.

[6]王乐国.市政给水工程中二次供水设施的管理与优化研究[J].城市建筑空间,2025,32(S1):273-274.

[7]张元江.基于智能控制的市政供水系统设计及调度优化[J].智能城市,2025,11(4):144-146.

[8]张爱平.市政排水系统厂站网一体化调度应用[J].城市道桥与防洪,2024,(6):188-191+207+24.