

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.08.002

供水管网交叉型节点水质混合规律研究

陈健勋¹, 高金良¹, 齐世华¹, 张天天¹, 钟汶均², 郑成志²,
刁美玲¹, 陈晨咏², 王伟超¹

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 广东粤海水务投资有限公司,
广东 深圳 518000)

摘要: 通过装置实验和数值模拟实验,探究邻向入流十字节点和双T节点处水质混合规律。首先基于质量守恒定律,推导节点混合程度评价指标;通过对比装置实验和数值模拟实验的结果,验证十字节点和双T节点数值模型的准确性,并分析混合程度随雷诺数的变化。在此基础上,利用响应曲面法设计实验,回归得到两类节点混合程度计算模型,利用方差分析验证模型显著性;结合响应曲面,对比分析两类节点混合效果,并为管网设计及改扩建提供建议。

关键词: 水质; 十字节点; 双T节点; 节点混合程度指标; 响应曲面法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)08-0010-10

Study on Mixing Law of Water Quality at Cross Junctions in Water Supply Network

CHEN Jian-xun¹, GAO Jin-liang¹, QI Shi-hua¹, ZHANG Tian-tian¹, ZHONG Wen-jun²,
ZHENG Cheng-zhi², DIAO Mei-ling¹, CHEN Chen-yong², WANG Wei-chao¹

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2.
Guangdong Yuehai Water Investment Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The mixing law of water quality at the adjacent inflow cross junction and double-T junction is explored through device experiments and numerical simulation experiments. Firstly, the mixing degree index is derived based on the law of mass conservation. The accuracy of the numerical model of the two junction types is verified by comparing the device experiment results with those of numerical simulation, and the variation of mixing degree with Reynolds number is analyzed. On this basis, the response surface method was used to design the experiment, and the two types of junction mixing degree calculation models were obtained by regression, and the significance of the models was verified by variance analysis. The mixing effect of the two types of junction was compared and analyzed, and suggestions are provided for the design and expansion of the pipe network based on the response surface.

Key words: water quality; cross junction; double-T junction; junction mixing degree index; response surface method

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406200); 国家自然科学基金资助项目(51778178、51978203); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E044); 哈尔滨市校所信誉担保推荐项目(2017FF1XJ001)

通信作者: 高金良 E-mail: gjl@hit.edu.cn

供水管网水质安全保障是关乎用户饮水健康的重点^[1-2]。EPANET^[3]作为业界公认的标准化计算工具,对管网水质检测点优化布置^[4]及污染源定位^[5-6]具有指导作用。管网节点处污染物瞬时完全混合是EPANET水质计算模块的重要依据,直接关系到管网水质计算准确度。研究证实,在交叉型节点处水质组分并非瞬时完全混合,节点混合程度受到进口雷诺数比和出口雷诺数比的影响^[7-12]。现有研究中,以十字节点居多,且缺乏描述交叉型节点混合程度评价指标,对各种类型交叉型节点混合程度的研究比较少,无法给实际工程提供明确性的指导。基于此,选取常见的十字和双T节点(节点间距为单倍管径)作为研究对象,以进口雷诺数比和出口雷诺数比为实验变量,通过实验装置及数值模拟两种实验方式验证数值计算模型的准确性,并通过响应曲面法设置完善且具有代表性的实验方案,分析不同类型节点处示踪剂混合及在节点出口的分布规律,获得两种类型节点处示踪剂混合模型,期为管网水质计算提供依据。

1 实验内容与方法

1.1 实验装置构成

节点混合实验装置主要由水箱、水泵、气压罐、节点、连接管路、流量计及在线电导率仪构成,各设备通过DN20钢管和DN20 PVC管相连。由于管网中化学组成复杂,且成分占比受到水源水质、水处理工艺、管材、管龄及水力条件影响,故仅探究节点处混合规律,考虑到药品原材料获取便利性,选用氯化钠作为示踪剂代替多种污染物。根据氯化钠添加量,将水箱分为清水水箱和示踪水箱,两者氯化钠浓度之比为1:4;两水箱均连接有水泵和气压罐,可通过调节水泵转速,为节点两入口提供持续稳定流量。采用有机玻璃制作口径均为DN20的十字和单T型节点,如图1所示。双T节点可通过两个单T型节点经由同口径PVC管连接而成,且两个单T节点间距为一倍管径。

两种类型节点流向及各管路编号见图2,主要研究邻向入流及同口径条件下,两类节点混合规律。节点混合实验平台实物见图3。节点入口1与示踪水箱相连,入口2与清水水箱相连,可通过水泵转速调节及入口阀门调节控制两入口进水雷诺数之比 Re_1/Re_2 ,记为 $Re_{1/2}$ 。节点出口3和出口4与实验

室内排水管直接相连,可通过出口管路阀门调节出口雷诺数之比 Re_3/Re_4 ,记为 $Re_{3/4}$ 。节点进出口对应的4处管路均安装有流量计,用于读取流量数据;在线电导率仪用于检测节点两处入口和两处出口对应的电导率,并通过换算求出对应氯化钠浓度。

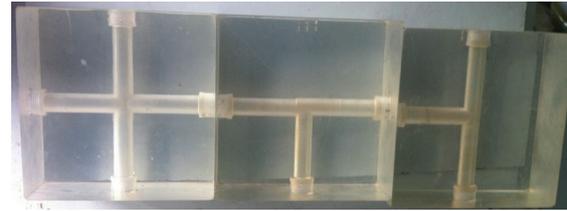
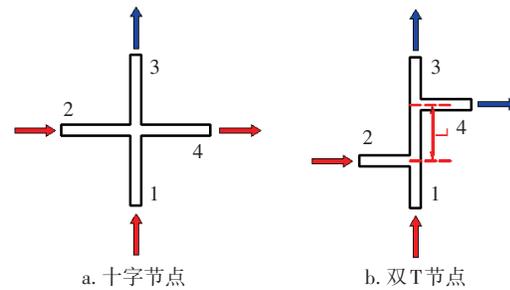


图1 十字节点及单T型节点实物模型

Fig.1 Physical model of cross junction and single-T junction



a. 十字节点 b. 双T节点

图2 十字节点和双T节点流向示意

Fig.2 Flow diagram of cross junction and double-T junction



a. 全景 b. 局部

图3 节点混合实验平台

Fig.3 Experimental device of junction mixing

1.2 混合指标选取

节点入口、出口氯化钠浓度及进出口流量数据可作为反映节点处混合程度的重要参数,为实现混合程度量化,基于质量守恒定律,定义节点处混合程度评价指标 L^* 。推导过程如下:

节点两入口氯化钠浓度定义了两出口氯化钠浓度边界,以此为依据,将节点出口氯化钠浓度转换为相对于入口浓度的无量纲浓度 C^* :

$$C^* = \frac{C - C_2}{C_1 - C_2} \quad (1)$$

式中: C_1 为进口1对应氯化钠浓度,进口1与示

踪水箱相连, mg/L; C_2 为进口 2 对应氯化钠浓度, 进口 2 与清水水箱相连, mg/L。

节点出口及入口无量纲浓度分别为:

$$C_3^* = \frac{C_3 - C_2}{C_1 - C_2}; C_4^* = \frac{C_4 - C_2}{C_1 - C_2}; C_1^* = 1; C_2^* = 0 \quad (2)$$

定义出口 3 和 4 质量分配系数分别为:

$$m_3 = \frac{M_3}{M_1 + M_2} = \frac{Q_3 C_3^*}{Q_1 C_1^* + Q_2 C_2^*} = \frac{Q_3 C_3^*}{Q_1} \quad (3)$$

$$m_4 = \frac{M_4}{M_1 + M_2} = \frac{Q_4 C_4^*}{Q_1 C_1^* + Q_2 C_2^*} = \frac{Q_4 C_4^*}{Q_1} \quad (4)$$

式中: M_1, M_2, M_3, M_4 分别为节点进出口管路 1~4 各自氯化钠质量, mg; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 分别为节点进出口管路 1~4 流量, L/s。

根据进、出口氯化钠质量守恒, 易得:

$$\frac{Q_3 C_3^*}{Q_1} + \frac{Q_4 C_4^*}{Q_1} = 1 \quad (5)$$

节点处发生完全混合时, 出口无量纲浓度为 C_{com}^* , 此时有:

$$C_{com}^* = C_3^* = C_4^* = \frac{Q_1}{Q_3 + Q_4} \quad (6)$$

$$Q_1 = C_{com}^* (Q_3 + Q_4) \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得:

$$\frac{Q_3 C_3^*}{(Q_3 + Q_4) C_{com}^*} + \frac{Q_4 C_4^*}{(Q_3 + Q_4) C_{com}^*} = 1 \quad (8)$$

定义出口 3 和 4 的流量分配系数 q_3 和 q_4 分别为:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_3 + Q_4}; q_4 = \frac{Q_4}{Q_3 + Q_4} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得:

$$\frac{C_3^* q_3}{C_{com}^*} + \frac{C_4^* q_4}{C_{com}^*} = 1 (0 \leq C_3^* q_3 \leq 1, 0 \leq C_4^* q_4 \leq 1) \quad (10)$$

$(C_3^* q_3, C_4^* q_4)$ 与 $(C_{com}^* q_3, C_{com}^* q_4)$ 均位于直线 $\frac{X}{C_{com}^*} + \frac{Y}{C_{com}^*} = 1$ 上, 将两点横坐标之差作为节点混合程度指标 L^* :

$$L^* = C_3^* q_3 - C_{com}^* q_3 \quad (11)$$

L^* 越小, 证明节点处混合越充分, 越接近于完全混合; 反之, 则混合越不充分。

1.3 数值模型验证

1.3.1 数值模型基本设置

本研究以实验装置为依托, 同时采用 Fluent 数值模型进行实验, 通过对比两种实验方式结果差异, 验证十字节点及双 T 节点数值模型参数设置的准确性。后续将利用数值模型开展多工况系统性实验, 为节点混合规律研究提供数据支撑。

十字节点和双 T 节点进出口编号及流向与图 2 完全相同, 数值模型中进口流体平均 Re 控制在 30 000, 管径均为 20 mm, 进出口管长均为 20 倍管径。采用 Gambit 进行非结构化四面体网格划分, 采用有限体积法对计算域进行离散化处理; 采用 SIMPLEC 进行求解, 涡黏性模型选择标准 $\kappa - \varepsilon$ 模型; 离散格式为二阶迎风格式。采用用户自定义标量输运方程模拟示踪水浓度, 将节点入口 1 用户自定义标量设置为 1, 入口 2 用户自定义标量设置为 0。

1.3.2 十字节点网格划分及数值实验方案

通过调整网格间距及数量, 对十字节点共形成 6 种网格划分方案, 如表 1 所示。

表 1 十字节点网格划分方案

Tab.1 Meshing scheme of cross junction

方案编号	1	2	3	4	5	6
网格间距/mm	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
网格数量/个	43 270	71 432	153 475	228 563	362 321	1 235 781

选择进口雷诺数之比 $Re_{1/2}=1$, 出口雷诺数之比 $Re_{4/3}=1$ 为基础方案, 对上述 6 种方案进行网格无关性验证, 所得结果如图 4 所示。

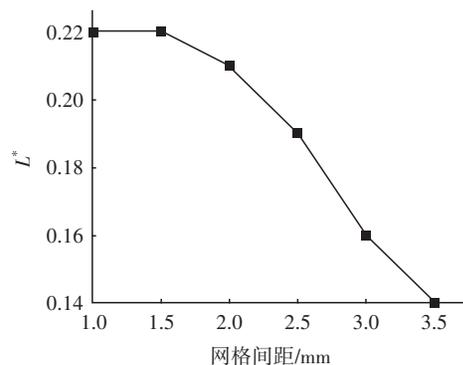


图 4 十字节点网格间距与 L^* 关系

Fig.4 Relation between grid spacing and L^* of cross junction

在网格间距为1.0~1.5 mm时,节点处混合程度 L^* 较为稳定,不随网格间距改变而大幅波动;同时考虑网格数量对计算速度的影响,将十字节点网格间距设置为1.5 mm,对应网格数量为362 321个。网格划分如图5所示。

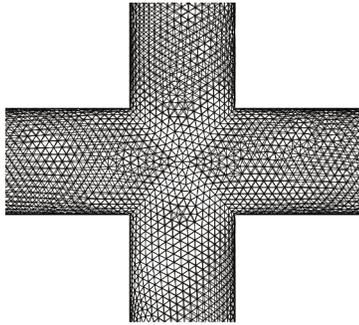


图5 十字节点网格划分

Fig.5 Grid generate of cross junction

重点研究十字节点混合程度指标 L^* 与 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 之间关系,数值模拟对应实验方案设置见表2。

表2 十字节点数值模拟实验方案

Tab.2 Simulation scheme of cross junction

编号	$Re_{1/2}$	$v_1/(m \cdot s^{-1})$	$v_2/(m \cdot s^{-1})$	$Re_{4/3}$	q_3	q_4
1	0.20	0.65	3.27	1.00	0.50	0.50
2	0.25	0.78	3.14	1.00	0.50	0.50
3	0.33	0.98	2.94	1.00	0.50	0.50
4	0.50	1.31	2.62	1.00	0.50	0.50
5	1.00	1.96	1.96	1.00	0.50	0.50
6	2.00	2.62	1.31	1.00	0.50	0.50
7	3.00	2.94	0.98	1.00	0.50	0.50
8	4.00	3.14	0.78	1.00	0.50	0.50
9	5.00	3.27	0.65	1.00	0.50	0.50
10	1.00	1.96	1.96	0.20	0.83	0.17
11	1.00	1.96	1.96	0.25	0.80	0.20
12	1.00	1.96	1.96	0.33	0.75	0.25
13	1.00	1.96	1.96	0.50	0.67	0.33
14	1.00	1.96	1.96	1.00	0.50	0.50
15	1.00	1.96	1.96	2.00	0.33	0.67
16	1.00	1.96	1.96	3.00	0.25	0.75
17	1.00	1.96	1.96	4.00	0.20	0.80
18	1.00	1.96	1.96	5.00	0.17	0.83

注: v_1 为入口1流速, m/s; v_2 为入口2流速, m/s; q_3 为出口3分流比; q_4 为出口4分流比。

1.3.3 双T节点网格划分及数值实验方案

双T节点共形成5种网格划分方案,见表3。

以 $Re_{1/2}=1$ 、 $Re_{4/3}=1$ 作为基本工况,进行网格无关性验证。绘制节点混合度与网格间距折线图,如图

6所示。

表3 双T节点网格划分方案

Tab.3 Meshing scheme of double-T junction

方案编号	1	2	3	4	5
网格间距/mm	4.0	3.0	2.0	1.5	1.0
网格数量/个	34 251	102 450	283 456	618 276	2 463 452

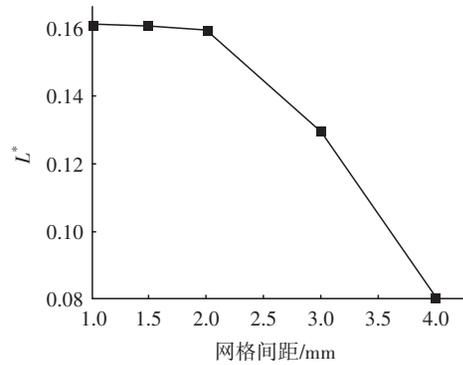


图6 双T节点网格间距与 L^* 关系

Fig.6 Relation between grid spacing and L^* of double-T junction

观察发现,网格间距为1.0~2.0 mm时,混合程度趋于稳定,结合计算精度及计算速度,将双T节点网格间距设置为2.0 mm,网格划分如图7所示。

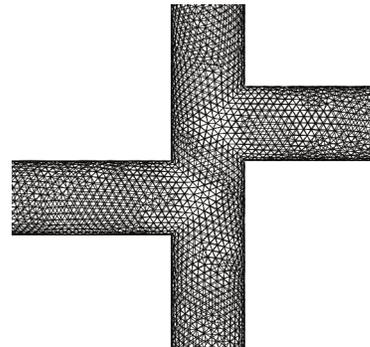


图7 双T节点网格划分

Fig.7 Grid generating of double-T junction

设定双T节点间距 $L=D$,主要探究节点混合程度 L^* 分别与 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 之间的关系,实验方案设置和十字节点完全相同(见表2)。

1.3.4 装置实验方案

与数值实验方案设计相同,分别以入口雷诺数之比 $Re_{1/2}$ 和出口雷诺数之比 $Re_{4/3}$ 为自变量设置实验,方案如表4所示。

实验过程中,通过调整进出口阀门开度实现上述雷诺数比设置,考虑到装置的实际条件,上述方案与数值实验方案略有不同。对于双T节点而言,

将实验装置 L 设置为单倍管径。

表 4 十字节点和双 T 节点装置实验方案

Tab.4 Experimental scheme of cross and double-T junction

组别	$Re_{1/2}$	$Re_{4/3}$
第一组	0.2, 0.25, 0.33, 0.5, 0.75, 1, 1.33, 2, 3, 4, 5	1
第二组	1	0.1, 0.25, 0.67, 1, 1.5, 4, 10

1.4 响应曲面设计

响应曲面法 (RSM)^[13] 是一种元建模技术, 可用于评估多个设计方案, 并可评估指定因素的影响作用^[14]。由于响应曲面法在评估工艺变量优化值精度和提高可靠性方面的显著贡献, 常用于实验设计^[15], 其优势在于可减少实验次数和最小化时间成本^[16-17]。在本研究中, 采用中心复合设计^[18] (CCD) 进行 RSM 优化。CCD 由因子设计、轴向矩阵和域中心的复制组成。这种设计是通过在编码变量的空间内均匀分布点来创建的。CCD 具有探索整个实验区域的机会和插值响应的优势^[19]。

在实验方案设计过程中, 将 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 作为 CCD 因素, 其中极值 a 为 1.414 (编码值)。采用中心复合序贯设计 (CCC), 十字节点和双 T 节点中心复合序贯设计见表 5。

表 5 十字节点和双 T 节点 ($L=D$) 中心复合序贯设计

Tab.5 Central composite sequential design of cross and double-T junction ($L=D$)

工况	编码值		真实值		$v_1/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$v_2/$ ($m \cdot s^{-1}$)	q_3	q_4
	x_1	x_2	X_1	X_2				
1	-1.414	0	0.293	1	0.89	3.03	0.50	0.50
2	-1	-1	0.5	0.5	1.31	2.62	0.67	0.33
3	1	1	1.5	1.5	2.35	1.57	0.40	0.60
4	0	0	1	1	1.96	1.96	0.50	0.50
5	0	0	1	1	1.96	1.96	0.50	0.50
6	1	-1	1.5	0.5	2.35	1.57	0.67	0.33
7	0	0	1	1	1.96	1.96	0.50	0.50
8	0	1.414	1	1.707	1.96	1.96	0.37	0.63
9	1.414	0	1.707	1	2.47	1.45	0.50	0.50
10	0	0	1	1	1.96	1.96	0.50	0.50
11	0	0	1	1	1.96	1.96	0.50	0.50
12	0	-1.414	1	0.293	1.96	1.96	0.77	0.23
13	-1	1	0.5	1.5	1.31	2.62	0.40	0.60

注: x_1, x_2 分别为 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 对应的编码值; X_1, X_2 分别为 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 对应的真实值; v_1 为入口 1 流速; v_2 为入口 2 流速; q_3 为出口 3 分流比; q_4 为出口 4 分流比。

CCC 设计共包括 4 个立方点、5 个立方体中心点及 4 个轴点, 通过 5 次中心点重复实验估计数值模型误差。兼顾序贯性和旋转性, 设计出两因素五水平 CCD 方案, 见表 6。

表 6 中心复合实验设计

Tab.6 Design of central composite experiment

变量	因素	范围和水平				
		$-a$	-1	0	1	a
$Re_{1/2}$	X_1	0.293	0.5	1	1.5	1.707
$Re_{4/3}$	X_2	0.293	0.5	1	1.5	1.707

2 结果与讨论

2.1 数值模型验证分析

2.1.1 十字节点数值模型验证分析

通过混合程度指标计算, 对比不同工况下装置实验、数值模拟及 EPANET 计算结果, 分析数值模型参数设置准确性, 并验证 EPANET 完全混合假设的不合理性。绘制 3 种实验条件下, L^* 随 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 变化折线, 如图 8 所示。

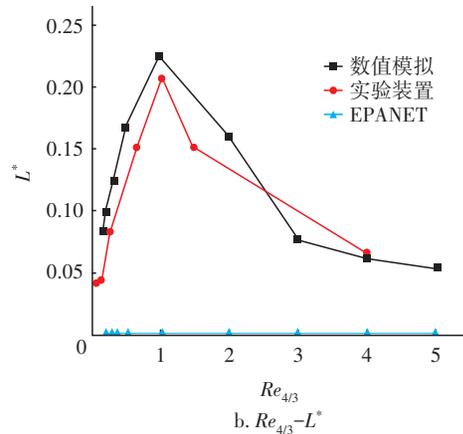
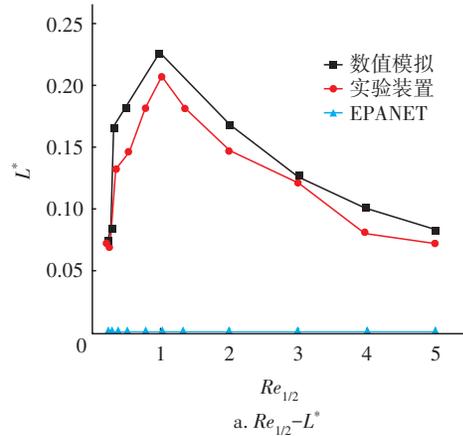


图 8 十字节点 $Re_{1/2}-L^*$ 、 $Re_{4/3}-L^*$ 变化

Fig.8 Variation of $Re_{1/2}-L^*$ and $Re_{4/3}-L^*$ in cross junction

EPANET 对应的 L^* 值恒为 0, 且与数值模拟和实

验装置结果存在明显差异,可证明其节点瞬时完全混合基本假设的不合理性。数值模拟和实验装置结果较为接近,且均在 $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1$ 时, L^* 取得最大值,即进、出口流速均相同时,十字节点完全混合程度最低;随 $Re_{1/2}$ 或 $Re_{4/3}$ 由 0 增至 1, L^* 值持续增大,且两者之间 L^* 差异逐步增大; $Re_{1/2}$ 或 $Re_{4/3}$ 由 1 逐渐增大时, L^* 值持续降低,两者间 L^* 差异较为稳定,均低于 0.03; 整体而言,数值模拟 L^* 值略高于实验装置 L^* 值,推测是由于十字节点加工质量、流量计及电导率计量误差、数据处理过程中数据舍入等因素综合所致。

同一工况下,数值模型计算 L^* 与装置实验所得 L^* 相对误差维持在 20% 以内,可采用数值模型进行后续实验。

2.1.2 双T节点数值模型验证分析

3种实验条件下,双T节点混合程度 L^* 随 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 变化折线如图9所示。

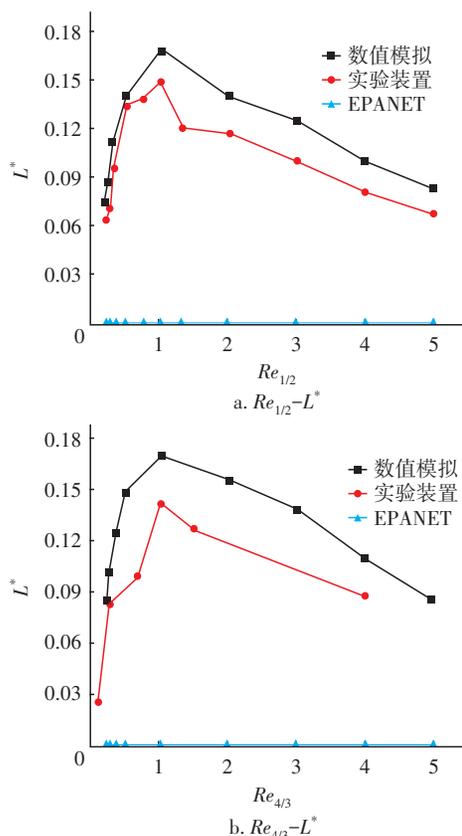


图9 双T节点 $Re_{1/2}-L^*$ 、 $Re_{4/3}-L^*$ 变化

Fig.9 Variation of $Re_{1/2}-L^*$ and $Re_{4/3}-L^*$ in double-T junction

与十字节点类似,EPANET实验结果与另外两种实验条件存在明显差异。数值模拟和实验装置

对应 L^* 随 $Re_{1/2}$ 增长均呈先增长后降低趋势,且在 $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1$ 时,数值模拟和实验装置 L^* 均取得最大值; L^* 随 $Re_{4/3}$ 增长,也呈现相同变化规律。在 $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1$ 时,双T节点数值模拟实验对应 $L^*=0.1693$,远小于十字节点数值模拟实验对应 $L^*=0.2248$,说明此工况下双T节点更加接近于完全混合;实验装置所得结果,也证明在 $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1$ 条件下,双T节点混合程度更高。

同种工况下,数值模拟和实验装置所得 L^* 相对误差维持在 20% 以内,可采用数值模型进行后续实验。

2.2 响应曲面分析

2.2.1 十字节点混合规律

以构建十字节点 CFD 数值模型为基础,按中心复合设计对应的 13 种工况进行数值实验,所得实验结果如表 7 所示。

表7 十字节点中心复合设计(CCD)实验结果

Tab.7 Experimental results of central composite design in cross junction

工况	$Re_{1/2}(X_1)$	$Re_{4/3}(X_2)$	L^* (CFD 计算值)
1	0	-1.414	0.1133
2	-1	-1	0.1958
3	-1.414	0	0.2288
4	0	0	0.2237
5	0	0	0.2237
6	0	1.414	0.1493
7	-1	1	0.1847
8	1	-1	0.1287
9	1	1	0.1902
10	0	0	0.2237
11	0	0	0.2237
12	0	0	0.2237
13	1.414	0	0.1847

利用响应曲面法进行多元回归拟合分析,建立混合程度 L^* 与 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 的二次多项式回归方程,如下:

$$L^* = 0.2237 - 0.0110Re_{1/2} + 0.0090Re_{4/3} - 0.0035Re_{1/2}^2 - 0.0224Re_{4/3}^2 + 0.0091Re_{1/2}Re_{4/3} \quad (12)$$

表 8 为基于回归方程得到的方差分析。一般而言,如 P 值小于 0.05 即证明影响显著,如 P 值小于 0.0001 即证明模型模拟结果极为显著^[20]。由表 8 可知,模型对应 F 值为 380.61, P 值小于 0.0001,表

明所得模型模拟结果极为显著。影响因子 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 对应的 P 值均小于 0.000 1, 表明两种因素对节点混合程度的影响极显著, 这与文献^[10,21-22]研究结果一致。根据 F 值大小, 推测 $Re_{1/2}$ 对 L^* 的影响高于 $Re_{4/3}$ 。

表 8 十字节点不完全混合水质模型方差分析

Tab.8 Analysis of variance of cross junction incomplete mixing water quality model

来源	自由度	Adj SS (调整后的 偏差平方 和)	Adj MS (调整后的 平均后的 偏差平方 和)	F 值	P 值
模型	5	0.018 444	0.003 689	380.61	<0.000 1
线性	2	0.003 204	0.001 602	165.32	0
$Re_{1/2}$	1	0.001 920	0.001 920	198.11	0
$Re_{4/3}$	1	0.001 285	0.001 285	132.54	0
平方	2	0.013 926	0.006 963	718.45	0
$Re_{1/2} Re_{1/2}$	1	0.000 342	0.000 342	35.29	0.001 0
$Re_{4/3} Re_{4/3}$	1	0.013 916	0.013 916	1 435.88	0
双因子交互作用	1	0.001 313	0.001 313	135.51	0
$Re_{1/2} Re_{4/3}$	1	0.001 313	0.001 313	135.51	0
误差	7	0.000 068	0.000 010		
失拟	3	0.000 068	0.000 023	5.87×10^8	0
纯误差	4	0	0		
合计	12	0.018 512			

13 种工况对应的 CFD 计算值与回归模型预测值对比如图 10 所示, 可看出数据点均匀分布在直线两侧, 决定系数 $R^2=0.77$, 说明所得拟合方程可较为准确地预测节点混合程度。

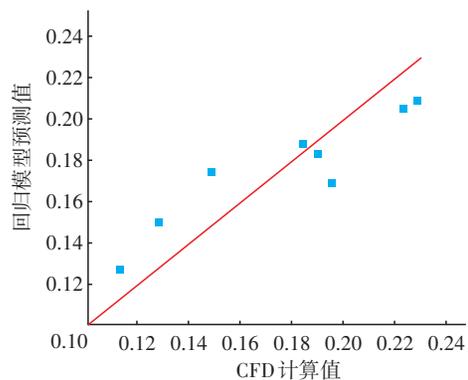


图 10 十字节点混合程度计算值与预测值对比

Fig.10 Comparison between calculated value and predicted value of cross junction mixing degree

2.2.2 双T节点混合规律

中心复合设计对应的 13 种工况所得实验结果如表 9 所示。基于响应曲面法建立混合程度 L^* 与 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 的二次多项回归方程见下式:

$$L^* = 0.171 0 + 0.010 5Re_{1/2} + 0.009 3Re_{4/3} - 0.007 6Re_{1/2}^2 - 0.009 3Re_{4/3}^2 + 0.004 1Re_{1/2}Re_{4/3} \quad (13)$$

表 9 双T节点($L=D$)中心复合设计(CCD)实验结果

Tab.9 Experimental results of central composite design in double-T junction($L=D$)

工况	$Re_{1/2}(X_1)$	$Re_{4/3}(X_2)$	$L^*(CFD$ 计算值)
1	-1.414	0	0.116 7
2	-1	-1	0.119 6
3	1	1	0.176 9
4	0	0	0.171 0
5	0	0	0.171 0
6	1	-1	0.133 3
7	0	0	0.171 0
8	0	1.414	0.148 9
9	1.414	0	0.158 5
10	0	0	0.171 0
11	0	0	0.171 0
12	0	-1.414	0.113 3
13	-1	1	0.130 6

回归方程对应的方差分析如表 10 所示。

表 10 双T节点($L=D$)不完全混合水质模型方差分析

Tab.10 Analysis of variance of double-T junction incomplete mixing water quality model

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	5	0.006 966	0.001 393	143.72	<0.000 1
线性	2	0.003 150	0.001 575	162.47	0
$Re_{1/2}$	1	0.001 770	0.001 770	182.64	0
$Re_{4/3}$	1	0.001 380	0.001 380	142.31	0
平方	2	0.003 550	0.001 775	183.11	0
$Re_{1/2} Re_{1/2}$	1	0.001 621	0.001 621	167.17	0
$Re_{4/3} Re_{4/3}$	1	0.002 382	0.002 382	245.69	0
双因子交互作用	1	0.000 266	0.000 266	27.42	0.001 0
$Re_{1/2} Re_{4/3}$	1	0.000 266	0.000 266	27.42	0.001 0
误差	7	0.000 068	0.000 010		
失拟	3	0.000 068	0.000 023	538 793.51	0
纯误差	4	0	0		
合计	12	0.007 034			

模型所得 F 值为 143.72, P 值 < 0.0001 , 表明所得模型模拟结果极为显著。影响因子 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 对应的 P 值均小于 0.0001, 表明两种因素对节点混合程度 L^* 影响极为显著。 $Re_{1/2}$ 对应的 F 值高于 $Re_{4/3}$ 对应的 F 值, 说明 $Re_{1/2}$ 对 L^* 的影响高于 $Re_{4/3}$ 。

13 种工况对应的 CFD 计算值与回归模型预测值对比如图 11 所示, 可看出数据点较为均匀地分布在直线两侧, 决定系数 $R^2=0.73$, 说明所得回归方程可较为准确地预测节点混合程度。

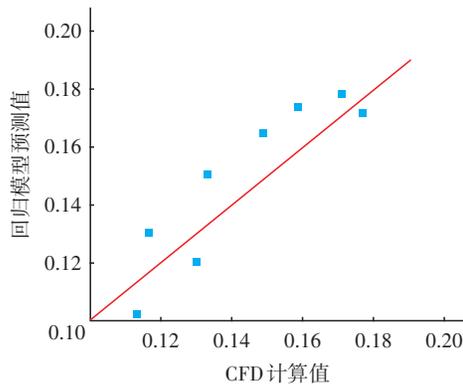


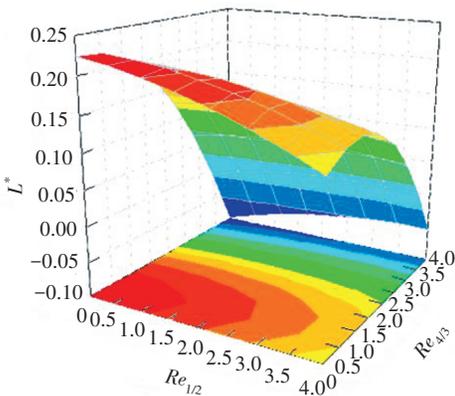
图 11 双 T 节点混合程度计算值与预测值对比

Fig.11 Comparison between calculated value and predicted value of double-T junction mixing degree

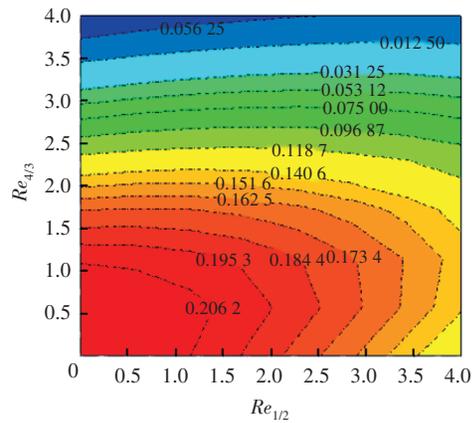
2.2.3 十字节点与双 T 节点混合效果对比分析

十字节点混合模型对应响应曲面如图 12 所示, 双 T 节点混合模型对应响应曲面如图 13 所示。

十字节点等值线较双 T 节点等值线更密集, 表明 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 对十字节点混合程度影响更大。结合两类节点构造进行分析, 双 T 节点相比于十字节点存在长度为 D 的进、出口连接管, 增加了混合空间, 因此双 T 节点 L^* 对 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 变化敏感度低于十字节点, 表现为等值线更加稀疏。



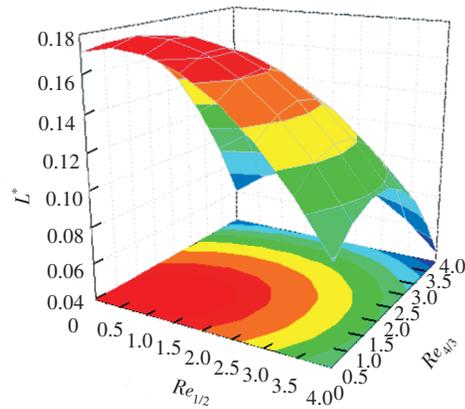
a. 回归模型对应的响应曲面



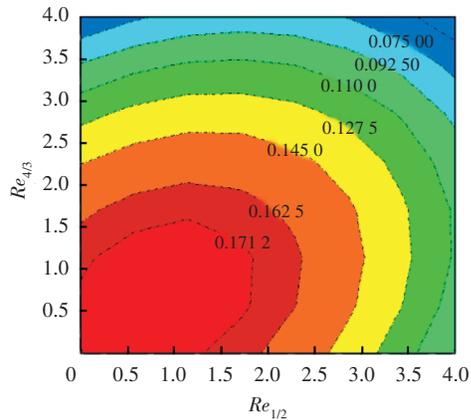
b. 响应曲面等值线

图 12 十字节点混合模型响应曲面

Fig.12 Response surface of cross junction mixing model



a. 回归模型对应的响应曲面



b. 响应曲面等值线

图 13 双 T 节点混合模型响应曲面

Fig.13 Response surface of double-T junction mixing model

当 $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1.5$ 时, 十字节点混合程度 L^* 为 0.1844, 双 T 节点混合程度 L^* 为 0.1712, 双 T 节点更接近于完全混合; $Re_{1/2}=Re_{4/3}=3.0$ 时, 十字节点混

合程度 L^* 为0.05312,双T节点混合程度 L^* 为0.1100,此时十字节点更接近完全混合。通过比较两曲面可得: $0 < Re_{1/2} < 4$ 且 $0 < Re_{4/3} < 1.5$ 时,双T节点更接近完全混合; $0 < Re_{1/2} < 3$ 且 $1.5 < Re_{4/3} < 4$ 时,十字节点更接近完全混合; $3 < Re_{1/2} < 4$ 且 $1.5 < Re_{4/3} < 4$ 时,十字节点和双T节点混合程度大小呈现波动变化。在管网规划及改扩建过程中,可结合节点进口及出口雷诺数之比取值范围,选择更接近于完全混合状态的节点类型,以减小管网水质计算过程中的误差。

3 结论

① 邻向入流十字节点和双T节点处,并未出现污染物完全瞬时混合现象,且EPANET计算结果与数值模拟和装置实验结果均存在显著差异,因此有必要对十字节点和双T节点处混合规律开展研究。

② $Re_{1/2}=Re_{4/3}=1$ 条件下,实验装置和CFD数值实验得到十字节点和双T节点对应的混合程度指标 L^* 达到最大值,完全混合程度最低。

③ 以 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 为影响因素,利用响应曲面法设计实验,根据实验结果,分别求解十字节点和双T节点 L^* 与 $Re_{1/2}$ 和 $Re_{4/3}$ 之间的关系,通过二次多项式回归得到两种类型节点混合模型;方差分析结果显示, $Re_{1/2}$ 对十字节点和双T节点 L^* 影响程度显著高于 $Re_{4/3}$;比较两类节点回归模型预测值与CFD数值模型计算值差异,得到决定系数 R^2 均高于0.70,说明回归方程可较为准确地预测节点处混合程度。

④ 比较十字节点和双T节点响应曲面,得出: $0 < Re_{1/2} < 4$ 且 $0 < Re_{4/3} < 1.5$ 时,双T节点更接近完全混合; $0 < Re_{1/2} < 3$ 且 $1.5 < Re_{4/3} < 4$ 时,十字节点更接近完全混合; $3 < Re_{1/2} < 4$ 且 $1.5 < Re_{4/3} < 4$ 时,十字节点和双T节点混合程度大小呈现波动变化;建议在管网规划及改扩建过程中,结合节点入口及出口雷诺数之比取值范围,选择更加接近完全混合节点类型布置管道,降低水质计算过程中的误差。

参考文献:

[1] 吉瑞博,王志红,龙志宏,等. 基于风险评估的供水管网水质监测点优化模型研究[J]. 中国给水排水, 2021,37(3):52-59.
JI Ruibo, WANG Zhihong, LONG Zhihong, et al. Water quality monitoring points optimization model for water supply network based on risk assessment [J].

China Water & Wastewater, 2021, 37 (3) : 52-59 (in Chinese).

- [2] 郭浩,田一梅,张海亚,等. 铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J]. 中国给水排水,2020,36(12):70-75.
GUO Hao, TIAN Yimei, ZHANG Haiya, et al. Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution systems [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(12):70-75(in Chinese).
- [3] ROSSMAN L A. EPANET' s User Manual [M]. Cincinnati:US Environmental Protection Agency,2000.
- [4] HUANG Y D, ZHANG T Q, WU X G. A hybrid PSO based method for optimizing water quality monitoring stations in water distribution systems [C]//IEEE. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: IEEE, 2006: 3109-3113.
- [5] 程伟平,张邢,龙志宏,等. 基于粒子源逆向追踪算法的管网污染源快速定位技术[J]. 中国给水排水, 2020,36(19):50-54.
CHENG Weiping, ZHANG Xing, LONG Zhihong, et al. Rapid pollution source location technology in water distribution system based on particle back-tracking algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (19):50-54(in Chinese).
- [6] GRBČIĆ L, LUČIN I, KRANJČEVIĆ L, et al. Water supply network pollution source identification by random forest algorithm [J]. Journal of Hydroinformatics, 2020, 22(6): 1521-1535.
- [7] OREAR L, HAMMOND G, MCKENNA S, et al. Physical Modeling of Scaled Water Distribution Systems Networks[R/OL]. (2005-10-01)[2021-11-04]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1143374>.
- [8] WEBB S W, WAANDERS B V B. High fidelity computational fluid dynamics for mixing in water distribution systems [C]//ASCE. Proc. 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium (WDSA). Cincinnati:ASCE,2006:1-15.
- [9] ROMERO-GOMEZ P, HO C K, CHOI C Y. Mixing at cross junctions in water distribution systems. I : numerical study [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(3):285-294.
- [10] AUSTIN R G, WAANDERS B V B, MCKENNA S, et al. Mixing at cross junctions in water distribution systems. II : experimental study [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134 (3) : 295-302.

- [11] HO C K, O' REAR J L. Evaluation of solute mixing in water distribution pipe junctions [J]. American Water Works Association Journal, 2009 (9):116-128.
- [12] SHAO Y, YANG Y J, JIANG L J, *et al.* Experimental testing and modeling analysis of solute mixing at water distribution pipe junctions [J]. Water Research, 2014, 56: 133-147.
- [13] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Stat, 1951, 13 (1):1-45.
- [14] MANSOURI N, MOGHIMI M, TAHERINEJAD M. Investigation on hydrodynamics and mass transfer in a feed channel of a spiral-wound membrane element using response surface methodology [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 149: 147-157.
- [15] RAZALI N F, MOHAMMAD A W, HILAL N, *et al.* Optimisation of polyethersulfone/polyaniline blended membranes using response surface methodology approach [J]. Desalination, 2013, 311: 182-191.
- [16] FERREIRA S L C, BRUNS R E, DA SILVA E G P, *et al.* Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems [J]. Journal Chromatography A, 2007, 1158(1/2): 2-14.
- [17] ZHAO Y, HU X M, JIANG B H, *et al.* Optimization of the operational parameters for desalination with response surface methodology during a capacitive deionization process [J]. Desalination, 2014, 336: 64-71.
- [18] GARG M C, JOSHI H. A new approach for optimization of small-scale RO membrane using artificial groundwater [J]. Environmental Technology, 2014, 35(23): 2988-2999.
- [19] ZAVISKA F, ZOU L. Using modelling approach to validate a bench scale forward osmosis pre-treatment process for desalination [J]. Desalination, 2014, 350: 1-13.
- [20] 秦志祥,杨婷,卢友志,等. 响应曲面法优化速生桉尾料还原浸出软锰矿试验研究[J]. 中国锰业,2021,39(4):22-25.
QIN Zhixiang, YANG Ting, LU Youzhi, *et al.* Optimization of reductive leaching of pyrolusite from fast-growing eucalyptus tail residue by response surface methodology[J]. China's Manganese Industry, 2021, 39(4):22-25(in Chinese).
- [21] SHAO Y, ZHAO L, YANG Y J, *et al.* Experimentally determined solute mixing under laminar and transitional flows at junctions in water distribution systems [J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:1-10.
- [22] YU T C, SHAO Y, SHEN C. Mixing at cross joints with different pipe sizes in water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(5): 658-665.

作者简介:陈健勋(1996-),男,河北冀州人,博士研究生,研究方向为供水管网优化及管网水质安全保障。

E-mail:18292005003@163.com

收稿日期:2021-11-04

修回日期:2022-02-21

(编辑:衣春敏)

实施国家节水行动,建设节水型社会