

时间权重思想在连续腔体流动中的研究

周晓泉¹, NG How Yong², 陈日东¹

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065, mail: xiaoquan_zhou@126.com 2.

Centre for Water Research, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of
Singapore, Singapore 117576)

摘要: 本研究引入时间权重思想, 将传统的流量权重及时间流量权重(总权重)两种权重处理方法, 应用到拉格朗日传质及欧拉传质计算中, 以它们停留时间为主线, 获取各种计算方法下的综合停留时间及综合体积。研究将表明拉格朗日方法是一种没有扩散的欧拉方法, 是欧拉方法的特例, 总权重是连接两种方法的桥梁。因此我们将流动问题分为流场问题和扩散场问题, 真实的流动是以上两种问题的叠加, 当扩散场问题可以忽略时, 才能退化为单纯的流场问题, 当它不可忽略时, 却常常被我们忽视; 流场问题可用有效体积来进行解读; 扩散场问题可以用扩散因子来解读, 就是解读液龄分布曲线(RTD); 严格说两个流动是相似的, 不仅是流场应该等效, 它的扩散场也应该等效, 这是便是相似理论的基础。时间权重思想, 为我们理解流动, 开辟了一个新的视角。

关键词: 总权重; 流量权重; 停留时间; 等效方法; 欧拉方法; 拉格朗日方法; CFD

1 简介

一般来说, 流动问题的数值计算绝大部分来源于 N-S 方程, 通常可以通过拉格朗日方法(如 SPH)或欧拉方法求解 N-S 方程(一般的商用软件, 如 Fluent、CFX、Star-CD、Phoenix 等)来获得, 但也有不是来源于 NS 方程, 如格子玻尔兹曼 (LBM)方法。这些对流动问题的求解均能获得瞬态流场或时均流场。如何解读流场, 尤其是流体中流体质点的运动, 可以是拉格朗日方法, 也可以是欧拉方法, 前者在时均流场的基础上通过求流线或粒子追踪方法求得云动轨迹, 后者则解传质方程或如浓度方程求解, 获得停留时间分布曲线。

作者通过对时间权重的系列研究, 用拉格朗日粒子追踪方法已经构建起了一整套完整的关于时间权重理论基础, 它是与传统的流量权重计算方法有重要的不同; 等效方法产生于一种假定: 流量的改变不影响流场中任意点的流速方向, 只改变其大小。总权重同等效方法一起, 是开启本研究的基石。

通常认为 RTD 曲线反映了一个反应器的水力性能(hydraulic performance)或水力效率(hydraulic efficiency), 并可以由水力效率指示器(HEI, Hydraulic Efficiency Indicators)来表示, 它们分为短路流指示器(Short-Circuit Indexes, 如 t_{10} , t_{50} ...等)和混合指示器(Mixing Index,

如 t_{90} , t_{90}/t_{10} ...等), 其实这些指示器其实只是表明 RTD 曲线的形状, 只是对 RTD 曲线进行的简单描述而已, 可能并不能反映反应器内流动的实质。

纵观相关的文章, 关于停留时间的研究并有实验数据和 CFD 计算结果的文章较少, 其中连续腔体的研究较多, 其中对臭氧^[1-2]的研究是一个非常难得的算例, 它的全部腔体尺寸完全相同, 有实验中实测 RTD 曲线, 而 RTD 曲线可以通过 CFD 计算进行再现。

2 研究思路

用总权重可以进行消毒效果的统计, 也可以对停留时间进行统计。传统的拉格朗日追踪, 采用的是进口处的流量权重, 而欧拉追踪, 获得出口处的停留时间分布函数(RTD), 采用的是出口处的流量权重。本研究是全面将时间权重思想引入到综合停留时间的研究上, 以期探讨时间权重和流动的意义。

2.1 拉格朗日方法

当采用拉格朗日方法(DPM)追踪, 假设在进口处 n 颗粒子投入, 出口只有 $m(m \leq n)$ 颗粒子流出, 传统采用进口处的流量权重来计算, 权重为:

$$\omega_i = q_i / \sum_{i=1}^m q_i \quad (1)$$

下标 i 为粒子编号, q_i 为 i 号粒子的流量, t_i 是 i 号粒子的停留时间。而总权重为:

$$\omega_i = (q_i / t_i) / \sum_{i=1}^m (q_i / t_i) \quad (2)$$

流量权重加权的综合停留时间按下式计算, 有效(A)停留时间(Active Residence Time):

$$T_{act} = \sum_{i=1}^m (q_i \cdot t_i) / \sum_{i=1}^m (q_i) \quad (3)$$

总权重加权的有效停留时间(Effective Residence Time), 可按下限计算:

$$T_{eff} = T_m = \sum_{i=1}^m q_i / \sum_{i=1}^m (q_i / t_i) \quad (4)$$

总权重在实际计算中, 同样可能总有很多粒子不能流出, 所以也推荐用下式计算:

$$T_{eff} = \sqrt{T_m T_n} = \sqrt{Q \sum_{i=1}^m q_i / \sum_{i=1}^m (q_i / t_i)} \quad (5)$$

其中上限为 $T_n = Q / \sum_{i=1}^m (q_i / t_i)$, 下限即式 4 中的 T_m 。

于是便可以获得有效体积 $V_{eff} = T_{eff} \cdot Q$, $V_{act} = T_{act} \cdot Q$, 有效体积率 $R_{eff} = V_{eff} / V$, $R_{act} = V_{act} / V$ 。

2.2 欧拉方法

当采用欧拉方法的传质计算来统计综合停留时间, 一般的做法是在进口投放一定浓

度的示踪物质, 在出口处截取随时间变化数据示踪物浓度数据, 便可以获得如浓度(C-t)函数或 E-t 函数(RTD 曲线)等, 传统是通过式(6)来计算其平均停留时间:

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (6)$$

$$\text{并满足} \quad \int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (7)$$

这里 t_m 为平均停留时间, 采用的为出口处的流量权重, 流量权重为 $E(t)dt$ 。

本研究是通过 CFD 数值模拟, 在已经求得的稳定流基础上, 于 $t_0=0$ 时刻在进口断面投放示踪物质, 将示踪物质浓度由 0 增加到 C_0 的阶梯方式输入, 后在出口断面处或中间断面处监控流出的浓度 C , 固定时间步长为一恒定的 dt , 计第 i 步 t_i 时刻出口浓度统计为 C_i , 最终形成浓度变化曲线, 直至出口的浓度非常接近 C_0 (这时计算步可记为 m) 为止。则在第 i 时间步(停留时间为 t_i)出口浓度增加 $C_i - C_{i-1}$, 这是流体浓度分数 $C_i - C_{i-1}$ 便相当于流量权重中的流量 q_i , 于是有:

$$q_i = C_i - C_{i-1} \quad (8a)$$

$$\text{或 } q_i = (C_i - C_{i-1}) * dt \quad (8b)$$

如果按式(6)的权重, 应该写成式(8b)的形式, 但如果 dt 恒定, 直接用式(8a)即可。

用流量权重的综合停留时间即是传统意义上的平均停留时间 t_m (式 6), 为区别这里特命名为当量停留时间 T_{equ} (Equivalent Residence Time):

$$T_{\text{equ}} = \sum_{i=1}^m (q_i \cdot t_i) / \sum_{i=1}^m (q_i) = \sum_{i=1}^m ((C_i - C_{i-1}) \cdot t_i) / \sum_{i=1}^m (C_i - C_{i-1}) = t_m \quad (9)$$

总权重加权的综合停留时间定义为扩散停留时间 T_{dif} (Diffusive Residence Time):

$$T_{\text{dif}} = \sum_{i=1}^m q_i / \sum_{i=1}^m q_i / t_i = \sum_{i=1}^m (C_i - C_{i-1}) / \sum_{i=1}^m ((C_i - C_{i-1}) / t_i) \quad (10)$$

于是便可以获得当量体积或扩散体积: $V_{\text{equ}} = T_{\text{equ}} * Q$, $V_{\text{dif}} = T_{\text{dif}} * Q$, 及相应的有效体积率。

3 连续腔体的边界条件及建模

CFD 建模: 根据文献[1-2]提出的模型(图 1), 并按其中的数据反推: ①如果按雷诺数^[1]反推, 则流量为 0.2023kg/s; ②如果按平均停留时间^[1]反推, 流量 0.2013kg/s; 故流量圆整为 0.202kg/s(三维), 二维计算则为 0.87826kg/s。

进口边界条件按均匀的质量流进口, 出口自由出流(outflow), 水面按对称边(symmetry)即相当于全滑移的固壁边界, 其他壁面均采用无滑移的壁面, 按标准壁函数处理, 流动的材质为水。

实验的停留时间分布数据来源于文献[2]，并将其数值化(图 2)。明显可见实验中每个腔体的出口均有两个波峰，第一波峰随着腔室的增加，逐渐降低，第二个波峰则逐渐增大，至第四腔室第二波峰同第一波峰几乎相当。

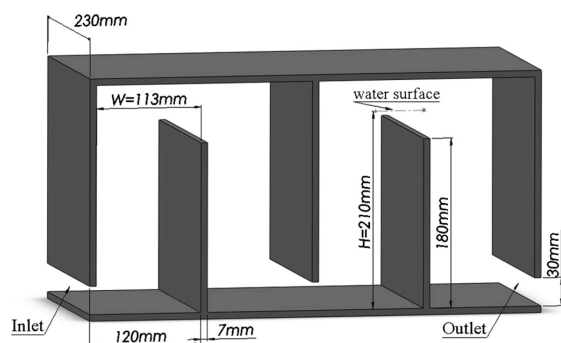


图 1 文献[1]中的计算域

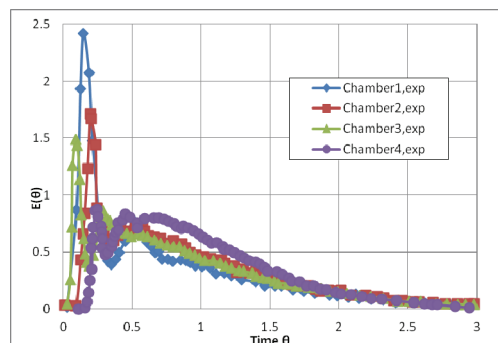


图 2 文献[2]中的停留时间分布

经过网格疏密性检查及有效体积网格划分原则，确定单个腔体计算尺度：有效体积响应曲线计算的最小边界层厚度 0.01mm，增长因子 1.5，共 11 层，后中央网格逐步增加，最终形成 95*160 网格单元(图 3)；其余 14 腔体的拉格朗日及欧拉计算均采用同样网格便于比较：边界最小网格尺度 1mm，逐步向中间扩大，每个腔室形成 55×100 网格单元(图 4)。

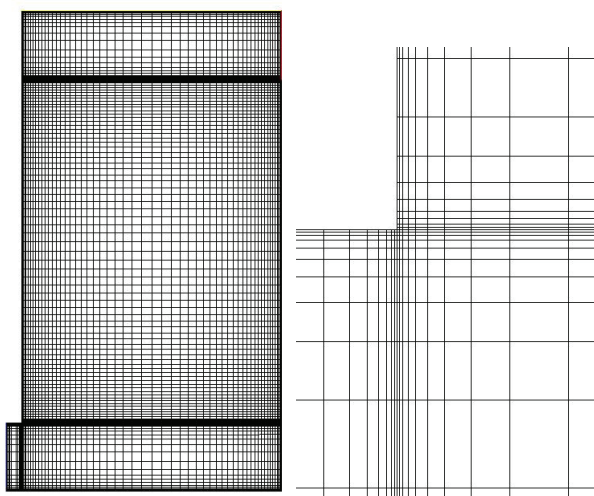


图 3 有效体积响应计算的网格划分

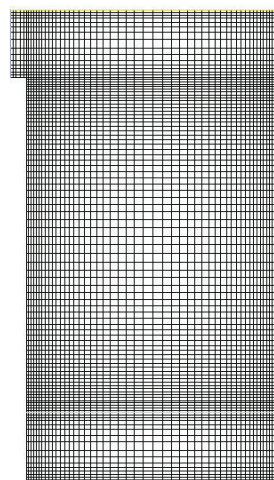


图 4 单一腔体的网格划分

经过前期研究，确定采用连续 14 腔体为整个计算域(图 7)。

3.1 有效体积响应特性

单独取出第二号腔体(图3)来进行，变化流量范围直至获得完整的有效体积响应曲线(图5)为止，图 6 为从刚性区域至非刚性区域一些典型流量下的质点追踪图。只有在刚性区域满足等效方法假定：流量的变化仅改变流动域中各点的流速大小而不改变其方向。

表 1 有效体积响应曲线计算表

Case	Q, kg/s	Effective Residence Time, s	Effective Volume, m ³	Effective Volume Ratio	Active Residence Time, s	Active Volume, m ³	Active Volume Ratio
A6_02	2.777E-06	6.624E+06	1.843E-02	76.99%	8.189E+06	2.279E-02	95.18%
A6_01	8.783E-06	2.098E+06	1.846E-02	77.09%	2.704E+06	2.379E-02	99.38%
A6_04	2.777E-05	6.634E+05	1.846E-02	77.10%	8.763E+05	2.438E-02	101.85%
A6_03	8.783E-05	2.097E+05	1.845E-02	77.09%	2.771E+05	2.438E-02	101.84%
A6_06	2.777E-04	6.630E+04	1.845E-02	77.06%	8.768E+04	2.439E-02	101.90%
A6_05	8.783E-04	2.094E+04	1.842E-02	76.95%	2.774E+04	2.441E-02	101.96%
A6_08	2.777E-03	6.571E+03	1.828E-02	76.37%	8.795E+03	2.447E-02	102.21%
A6_07	8.783E-03	1.951E+03	1.716E-02	71.70%	2.686E+03	2.363E-02	98.72%
A6_17	1.562E-02	9.523E+02	1.490E-02	62.24%	1.301E+03	2.036E-02	85.03%
A6_10	2.777E-02	4.232E+02	1.177E-02	49.18%	5.033E+02	1.400E-02	58.49%
A6_09	8.783E-02	1.053E+02	9.263E-03	38.69%	1.171E+02	1.031E-02	43.05%
A6_11	2.777E-01	3.139E+01	8.732E-03	36.48%	3.293E+01	9.163E-03	38.27%
A6	8.783E-01	9.995E+00	8.794E-03	36.73%	1.033E+01	9.089E-03	37.97%
A6_13	2.777E+00	3.300E+00	9.182E-03	38.35%	3.414E+00	9.498E-03	39.68%
A6_12	8.783E+00	1.055E+00	9.285E-03	38.78%	1.090E+00	9.594E-03	40.07%
A6_15	2.777E+01	3.343E-01	9.302E-03	38.86%	3.441E-01	9.574E-03	39.99%
A6_14	8.783E+01	1.061E-01	9.334E-03	38.99%	1.089E-01	9.584E-03	40.03%
A6_16	2.777E+02	3.374E-02	9.387E-03	39.21%	3.467E-02	9.647E-03	40.30%
A6_18	8.783E+02	1.075E-02	9.455E-03	39.50%	1.100E-02	9.682E-03	40.44%
A6_19	2.777E+03	3.414E-03	9.499E-03	39.68%	3.494E-03	9.721E-03	40.60%
A6_20	8.783E+03	1.050E-03	9.236E-03	38.58%	1.073E-03	9.443E-03	39.44%
A6_21	2.777E+04	3.203E-04	8.911E-03	37.22%	3.265E-04	9.086E-03	37.95%
A6_22	8.783E+04	9.892E-05	8.703E-03	36.35%	1.007E-04	8.863E-03	37.02%

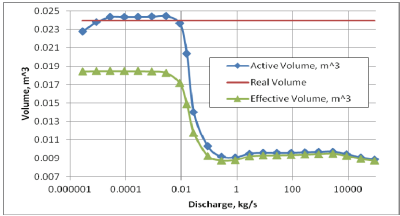


图 5 两种权重下的有效体积响应曲线

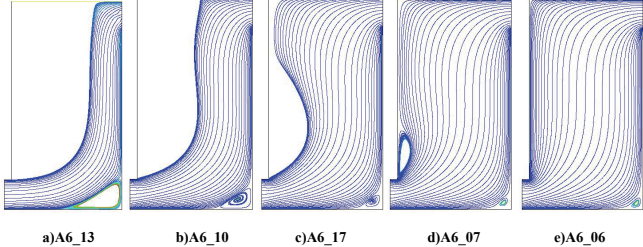


图 6 各个响应阶段的质点追踪

因此当采用有效体积网格划分原则，通过拉格朗日方法追踪，用总权重和流量权重均能获得两组有效停留时间和有效体积响应曲线，它们的刚性区域完全一致，它们都是对拉格朗日追踪的流线或迹线的一种解读，就是对流场(图 6)的解读，只是各有侧重。

3.2 拉格朗日方法进行 14 腔体计算

采用拉格朗日追踪，综合停留时间结果见表 2，在停留时间分布函数的表述上采用原始变量(总权重，图 8)。实验中的 RTD 曲线一直在变化中，而拉格朗日方法计算的 RTD 曲线结果几乎不随腔体的增加而变化，同实验的差异非常大。图 7 给出流场及流线图，拉格朗日追踪反映了流场特性的不变性，这与两种权重下的单腔体有效体积率完全一致(表 2)。

表 2 拉格朗日方法停留时间计算表

No. of Chamber	Effective Residence Time, s			Active Residence Time, s		
	Multi-	Single	Effective Volume Ratio	Multi-	Single	Active Volume Ratio
1	11.36	11.36	41.76%	11.77	11.77	43.27%
2	20.20	8.84	32.50%	20.98	9.20	33.83%
3	30.84	10.63	39.08%	31.76	10.78	39.62%
4	40.61	9.77	35.90%	41.83	10.08	37.03%
5	51.64	11.04	40.56%	52.99	11.15	40.99%
6	61.32	9.68	35.59%	62.89	9.91	36.40%
7	72.23	10.91	40.08%	73.87	10.98	40.36%
8	81.75	9.52	35.00%	83.54	9.67	35.54%
9	92.53	10.78	39.61%	94.36	10.82	39.77%
10	101.90	9.38	34.46%	103.83	9.47	34.79%
11	112.57	10.67	39.20%	114.51	10.68	39.26%
12	121.82	9.25	33.98%	123.81	9.29	34.16%
13	132.39	10.57	38.86%	134.37	10.57	38.85%
14	141.61	9.22	33.89%	143.61	9.23	33.94%

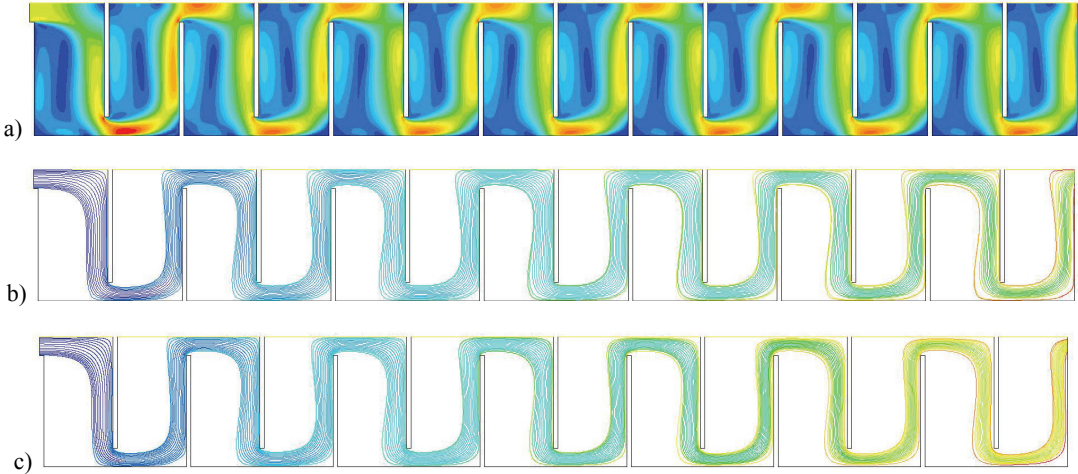


图 7 流场图 a) 流速等值图, b) 流线, c) 质点追踪

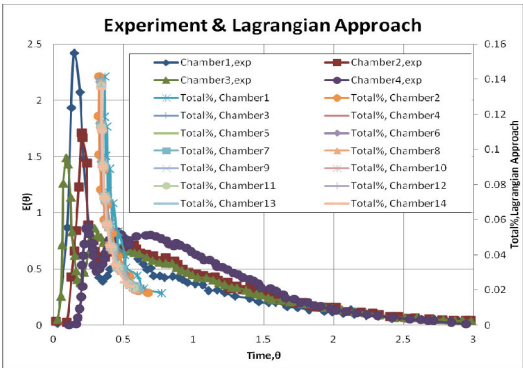


图 8 拉格朗日计算

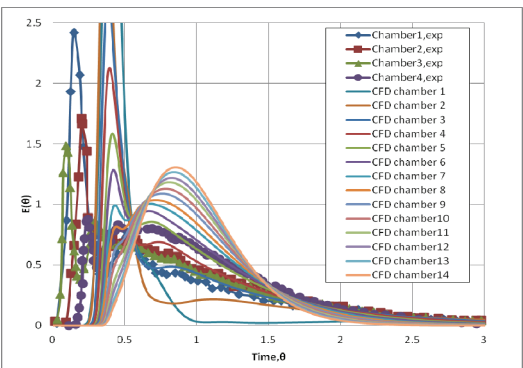


图 9 用欧拉方法的 14 腔室计算结果

3.3 欧拉方法进行 14 腔体计算

欧拉方法采用对流扩散模型，在进口投入示踪物质，它的特性同水完全一致，体积浓度定为 0.1，在每个腔体的出口进行浓度统计，其扩散系数常用 Wilke-Chang 公式估算，取为 1.73055E-08。

表 3 便是 14 腔体的综合停留时间计算表，图 9 是对应的停留时间分布曲线，同实验比，欧拉方法计算结果表明直至第 8 腔体 RTD 曲线都有双峰(图 10)。第一波峰出现的无量纲时间位置大致不变，峰值则随着腔体的增加而逐渐减少，至第 9 腔体及以后慢慢融合在第二峰之中，至第 14 腔体几乎完全不可识别第一峰的痕迹(图 10)，同时第二波峰则呈接近完美的正态分布，按现有对 RTD 曲线的理解，它表明示踪物已经接近完全扩散，已经没有短路流、没有回流，但实际上短路流依然存在(图 7)。

表 3 欧拉方法停留时间计算

Eulerian Approach	Multi Chambers					Single Chamber				
	Residence Time, s			Volume Ratio		Residence Time, s			Volume Ratio	
No. of Chamber	T_{dif}	T_{equ}	τ_{th}	R_{dif}	R_{equ}	T_{dif}	T_{equ}	τ_{th}	R_{dif}	R_{equ}
1	13.373	26.869	27.209	0.4915	0.9875	13.373	26.869	27.209	0.4915	0.9875
2	29.755	54.012	54.419	0.5468	0.9925	16.382	27.143	27.209	0.6021	0.9975
3	52.271	81.534	81.628	0.6404	0.9988	22.516	27.522	27.209	0.8275	1.0115
4	75.518	108.469	108.837	0.6939	0.9966	23.248	26.935	27.209	0.8544	0.9899
5	101.713	135.955	136.047	0.7476	0.9993	26.195	27.486	27.209	0.9627	1.0102
6	126.894	162.891	163.256	0.7773	0.9978	25.181	26.936	27.209	0.9255	0.9900
7	154.092	190.376	190.465	0.8090	0.9995	27.197	27.485	27.209	0.9996	1.0101
8	180.017	217.313	217.675	0.8270	0.9983	25.926	26.936	27.209	0.9528	0.9900
9	207.559	244.796	244.884	0.8476	0.9996	27.541	27.483	27.209	1.0122	1.0101
10	233.830	271.733	272.093	0.8594	0.9987	26.271	26.937	27.209	0.9655	0.9900
11	261.496	299.218	299.303	0.8737	0.9997	27.666	27.485	27.209	1.0168	1.0101
12	287.949	326.154	326.512	0.8819	0.9989	26.454	26.936	27.209	0.9722	0.9900
13	315.656	353.638	353.722	0.8924	0.9998	27.707	27.485	27.209	1.0183	1.0101
14	342.583	380.947	380.931	0.8993	1.0000	26.927	27.309	27.209	0.9896	1.0037

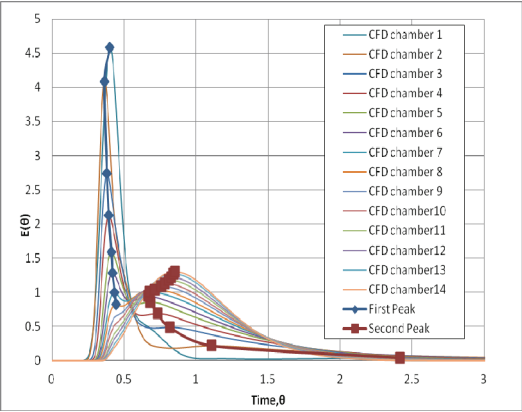


图 10 各腔室出口 RTD 曲线上峰值的位置

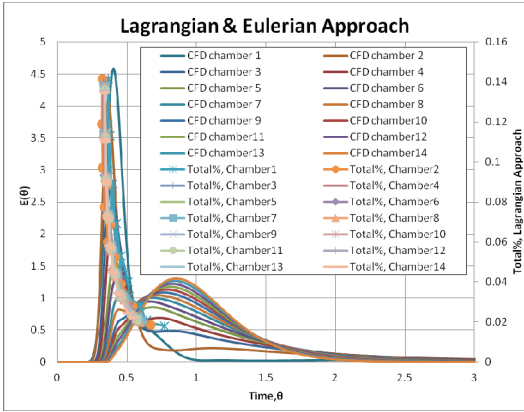


图 11 欧拉方法同拉格朗日方法比较

如果将拉格朗日方法同欧拉方向的 RTD 曲线进行对比(图 11), 不难发现: ①欧拉方法的第一峰的位置就是拉格朗日方法的主流位置(图 7 中主流), 它随腔体的增加而被扩散逐渐掩盖; ②第二峰的位置便是扩散流的位置; ③如果从第 14 腔体向前推, 它由接近完美的扩散流逐渐向双峰过渡, 至第一腔体第二波峰几近消失, 因此推论如果第二峰消失便是只有主流一峰的拉格朗日停留时间分布; ④因此得出结论: 拉格朗日追踪方法就是没有扩散的欧拉方法的特例。

同样, 单从综合停留时间(图 12)来看, 似乎没有规律, 但将停留时间分配到每个腔体中(图 13), 便得出规律: ①单个腔体的当量停留时间总在理论停留时间附近摆动; ②单个腔体的扩散停留时间逐渐向理论停留时间靠近, 说明当地的扩散程度不断在增加, 同 RTD 曲线(图 11)展示的一致。

因此将几个综合停留时间汇总(表 4), 将有效停留时间定为扩散为零的下限, 将当量停留时间作为扩散的上限, 中间变化的就是扩散停留时间, 因此可以构造扩散因子 DF (Diffusive Factor):

$$DF = (T_{dif} - T_{eff}) / (T_{equ} - T_{eff}) \tag{11}$$

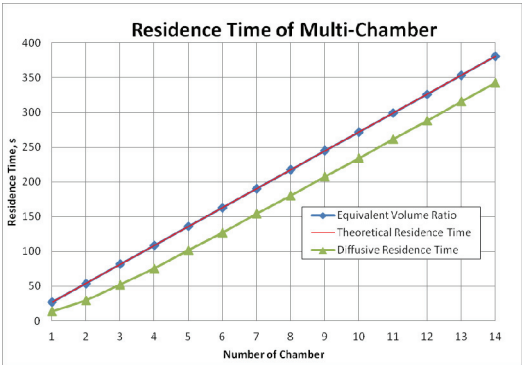


图 12 两种方法的停留时间计算结果(多腔体)

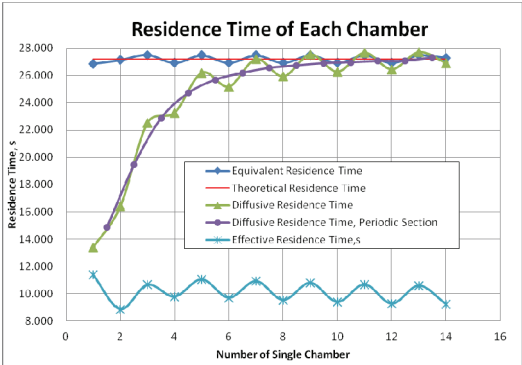


图 13 两种方法的停留时间计算结果(单独腔体)

表 4 各种综合停留时间汇总

	Lagrangian 追踪	Eulerian 追踪
流量权重	T_{act} 和 V_{act}	T_{equ} 和 V_{equ}
	当流量接近 0 时接近理论停留时间及真实体积	扩散的上限
时间权重	T_{eff} 和 V_{eff}	T_{dif} 和 V_{dif}
	扩散为 0, 扩散的下限	实际的扩散值
汇总	解读流场的方法, 通过有效体积或有效体积率	解读扩散场的方法, 通过扩散因子

如果放大每个腔体的当量停留时间(图 14), 则表明: ①当量停留时间总在理论停留时间附近波动, 如果将相邻的两个腔体合并成一个周期边界段, 则当量停留时间(平均停留时间 t_m)严格等于理论停留时间, 就是说当量体积严格等于实际体积。②进口边界影响 3 个腔体, 让单个腔体的停留时间发生漂移; 出口边界条件让最后一个腔体的停留时间发生漂移; 自由水面边界条件让停留时间发生定向漂移, 水面靠进口边时(单号腔体), 停留时间偏大,

双号腔体停留时间偏小,同 Demirel^[3]的研究一致。

由于当量停留时间及扩散停留时间的波动性,故将相邻的两个腔体合并求平均,因此每个 RTD 曲线均反映了一个 DF 的值,当地的和整体的均可,一般实验中只知道最终出口处的结果,推荐用整体的。一旦求得 DF 值,便可以查其近似的 RTD 曲线(图 10),确立扩散的影响。

3.4 讨论

所以扣除边界条件的影响,在一个封闭的流动域或周期边界流动域中,它的当量停留时间一定等于理论停留时间,即使 $T_{equ}=t_m=\tau_{th}$ 。而不等于时都为边界条件影响,各种文献中将 $t_m < \tau_{th}$ 解释成因为回流、短路流的存在,这是严重错误的,实验中得到这个 $t_m < \tau_{th}$ 多半因为测量时间不够,RTD 曲线有个长长的尾部被截掉了,或实验的误差所导致。因此当量停留时间和当量体积反映了模型真实的规模,时间和空间的尺度。

流动的特性,可以分为流场和扩散场的特性,流场的特性就是通常说的 Hydraulic Performance,是一种没有被扩散影响的流动特性(即流场特性),以往的研究者部分全部来源于 RTD 曲线,以后可以停止了。扩散场的特性往往被忽略,尤其在有关扩散的比尺实验中,它们的相似准则是什么?有谁去验证过比尺效应下的 RTD 曲线,它们还相似吗?

拉格朗日方法中的 Random Walk 方法,来源于爱因斯坦解释布朗运动,这种方法也集成到很多 CFD 中,它虽然有随机运动的因素,但仍然不能描述完整的扩散现象,因它所代表的颗粒性质是不变的,所以也不能通过计算得出如图 11 的各腔体 RTD 分布图。拉格朗日方法要能模拟扩散场,必须进行欧拉方法改造,让粒子的组分可变。

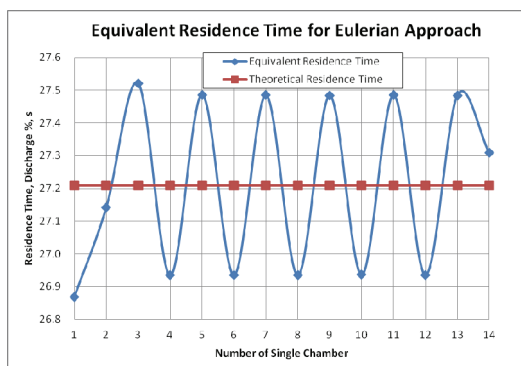


图 14 每个腔体的当量停留时间

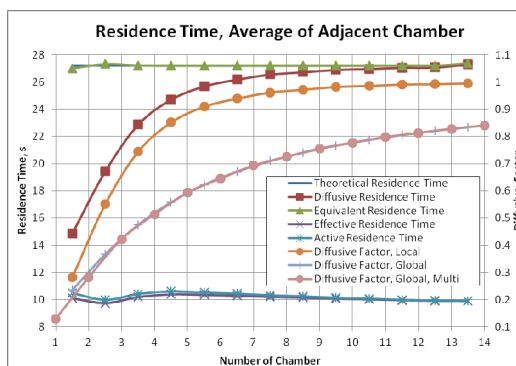


图 15 扩散因子的确立

4 结论

(1) RTD 曲线中,平均停留时间(当量停留时间)一定大致等于理论停留时间,不等于一定有原因(进口、出口、自由水面边界);如果小于理论停留时间过多,一定是 RTD 曲线长长的尾迹没能捕捉到,或计算域中还在继续扩散,计算时间还没有到位,或实验误差。

(2) 通常的流动都是流场问题和扩散场问题的叠加, 类似于波粒二象性, 它们同时存在, 当扩散可以被忽略时, 流动问题才演变成单一的流场问题, 可以通过 N-S 方程进行定义、量纲分析; 但当不可被忽略时, 扩散通常被忽视。

(3) 无扩散的流场问题可以通过有效停留时间或有效体积率来定义, 这就是 Hydraulic Performance 或 Hydraulic Efficiency 的实质, 而不是通过 RTD 曲线获得各种水力效率指示器(HEIs), 后者将彻底退出历史舞台; 而扩散问题可以通过扩散因子来进行定义, 它是扩散问题逐渐掩盖流场问题的过程, 这是对 RTD 曲线唯一的解读方式。

(4) 两个流动相似必须是在流场相似的基础上, 同时也满足扩散场的相似, 当两者均等效时, 才是严格的等效。

(5) 没有扩散场的拉格朗日方法是不能描述流体质点的扩散场的, 即使采用 Random Walk 的方法, 因为它的质点性质是不变的, 故不能求解出扩散场问题, 除非它精确描述各腔体的 RTD 曲线(图 11), 对此不乐观。只有将拉格朗日同欧拉方法结合, 改造拉格朗日追踪方法, 它的流场不变, 但颗粒性质即其组分必须改变, 这样才能改善其求解扩散场问题。

参 考 文 献

- 1 Zhang J, Tejada-Martínez, A. E, Zhang Q. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation of the Flow and Tracer Transport in a Multichambered Ozone Contactor[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(3):450-454.
- 2 Kim Dongjin, Kim Doo-Il K, Kim J, et al. Large eddy simulation of flow and tracer transport in multichamber ozone contactors[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(1):22-31.
- 3 Demirel E, Aral M. Unified Analysis of Multi-Chamber Contact Tanks and Mixing Efficiency Based on Vorticity Field. Part I: Hydrodynamic Analysis[J]. Water, 2016, 8(11):495.

Time scale method in CFD residence time research in multi-chamber contactors

ZHOU Xiao-quan¹, NG How Yong², CHEN Ri-dong¹

(1. State Key Laboratory of Hydrodynamics and Mountain River Engineer, Chengdu, 610065.

Email: xiaoquan_zhou@126.com, 2. Centre for Water Research, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576)

Abstract: In this paper the traditional Discharge Scale and new developed Time Scale were applied into both Lagrangian and Eulerian species transport, the main purpose is to get their comprehensive residence times and their comprehensive volume. The research showed that the Lagrangian approach is one of a special Eulerian approach with no diffused in species transport

simulation, and the Total Scale is a bridge of the two approaches. Any flow problem can be divided into velocity field and diffusive field. When the diffusion can be ignored or unimportant, the flow problem is just a velocity field problem, but in most cases the diffusion cannot be neglected. The effective volume or active volume can be used to explain velocity field, the diffusive factor can be used to explain diffusive field which is the only meaning of RTD curve. Strictly speaking, two flows are similar, not only the velocity field but also the diffusive field should be equivalent, which is the basis of similarity theory.

Key words: Total Scale; Discharge Scale; Residence time; Equivalent Method; Eulerian Approach; Lagrangian Approach; CFD.