



## 并联管组模型流动均匀性分析

张润来, 方一红

(天津大学机械学院, 天津 300072)

**摘要:** 流体在并联管组模型中流动的均匀性问题具有非常广泛的应用背景, U 型分布和 Z 型分布是实际工程中经常使用的经典并联管组模型. 针对这两种模型中各种参数对于流动均匀性的影响, 进行了数值模拟. 模拟结果表明: 总管截面积与支管截面积的比值对于两种并联管组模型中的流动均匀性有很大的影响, 要想使各个支路的流量满足实际工程需要, 必须找到一个比较合适的比值; 在湍流状态下, 为了使各个支管的流量尽量均匀, 应尽量减小入口速度.

**关键词:** 并联管组模型; 流量分布均匀性; 数值模拟

中图分类号: TQ051.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-6510(2007)02-0045-04

### An Analysis of the Uniformity of Flow in Parallel Pipeline Model

ZHANG Run-lai, FANG Yi-hong

(School of mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The problem of the uniformity of flow in parallel pipeline model has very wide background. U-distributing and Z-distributing are classical models we often use. To know the effect of different parameters on uniformity of flow, numerical simulations were constructed. Results show that the ratio of the inlet area and the side-outlet area is a very important parameter. It will affect the uniformity of flow consumedly in parallel pipeline model. To get the best distribution uniformity for real project, an appropriate ratio is required. Under the status of turbulent flow, inlet-velocity should be as slow as possible to get the best uniformity of flow.

**Keywords:** parallel pipeline model; uniformity of flow; numerical simulation

在化工、火电、核电、电子、制冷、采暖等领域中往往需要一种均匀分布气体或液体的装置, 它由一根总管和与总管的侧面连接的一排或几排支管组成. 支管可以是具有相当长度的管道或喷嘴, 总管的横截面可以是圆形、方形、椭圆形等. 这种总管被分流为多束分流的流动过程称之为分支流. 具有两个总管的流动分配系统非常普遍, 例如: 镜像催化反应器分布器、锅炉的受热面、各种热交换器和利用太阳能热的各类集热器等. 这类设备的经济性、安全性等在很大程度上取决于流体分配的均匀程度. 在设计这些装置时必须控制系统内部的压力分布和流量分配. 目前, 在设计时大多都假设各个支路中的流量是相同的, 这种简化不仅会产生很大的误差, 有时候甚至会造成严重的后果. 因此, 在研制众多的工程设备时, 设备内的流体力学行为是首先必须解决的问题之一, 研究管组模

型流动均匀性具有相当高的工程实际价值. 有学者用不同的方式、从不同的角度研究这个问题. 罗永浩等人用离散代数方程建立并联管路系统的流量分配模型, 但动量方程式中缺少流体进、出支管时带入或带出控制体的动量<sup>[1-2]</sup>. 赵镇南详细介绍了两种经典模型: U 型分布并联管组和 Z 型分布并联管组, 并且建立 U 型布置时的速度微分方程, 在摩擦阻降大大低于支管总阻降的条件下得出了各个支路中的流量分布以及整个系统总阻降的解析式, 并对 U 型分布中的压力和流量分布进行了分析<sup>[3]</sup>. 赵哲山、李忠玉对并联层流模型下的并联管组模型进行了分析<sup>[4]</sup>. 周喧毅、顾明针对计算中的耗散模型进行了深入的研究<sup>[5]</sup>. 但是, 对各种因素如何影响流量分布均匀性研究并不多.

本文使用 Fluent 软件对 U 型分布管组模型和 Z 型分布管组模型进行了仿真分析, 发现总管截面积与

收稿日期: 2006-11-21; 修回日期: 2007-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19802013)

作者简介: 张润来(1977—), 男, 黑龙江人, 硕士研究生; 通讯作者: 方一红, yhfang@tju.edu.cn.

支管截面积的比值对于模型中流量分布的均匀性有着很大的影响。

### 1 并联分布管组几何模型

管组系统中各个支管的流量分布状况最终取决于联箱中流体压力沿轴向的变化,而压力的变化规律则受以下两方面因素的制约:(1)联箱中的沿程摩擦阻力;(2)由于分流和汇流造成联箱中流体动量的沿程变化。当以每一个支路作为控制体时,控制体入口和出口的压差直接决定该控制体内流量的大小。U型分布管组模型结构如图1所示。由图可知整个管组模型的入口与出口位于模型的一侧,入口总管和出口总管的流动方向相反。Z型分布管组模型如图2所示,整个管组的入口与出口位于模型的两侧,入口总管与出口总管流动方向相同。

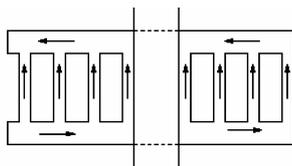


图1 U型分布示意图  
Fig.1 Sketch map of U model

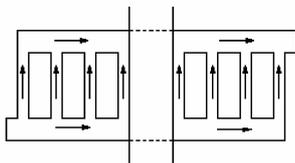


图2 Z型分布示意图  
Fig.2 Sketch map of Z model

定义:  $\psi = S_1/S_2$ , 其中  $S_1$  为总管的截面积,  $S_2$  为各个支管截面积。

基本假设:

- (1) 上、下总管及各个支管均为不变径的直管;
- (2) 总管和支管内均为等温不可压缩有黏流动, 流体具有常物性;
- (3) 总管中的摩擦系数恒定不变;
- (4) 支管等间隔密集布置, 不考虑两个总管的位置高差;
- (5) 模型中流体默认为水, 在所模拟的实际工程问题范围内, 可以认为其流速远小于音速, 所以采用的都是不可压缩的湍流模型。如果实际工程中的流动状态不是湍流, 则本研究的有些结论是不适用的。

### 2 数学模型

采用有限元方法对流体的流动状态进行数值模拟。湍流模型用的是  $k-\varepsilon$  二方程模型。在每一个有限元的节点上求解质量输运方程、动量输运方程(不可压缩的 N-S 方程)及部分的能量方程。在模型中不考虑换热(对流、传导及辐射)对流动状态的影响。其具体方程形式如下:

#### 2.1 N-S 方程

对于不可压缩流体有

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$j \in [1, 2, 3], i \in [1, 2, 3]$$

#### 2.2 能量损失方程

整个系统的能量损失可以分为沿程能量损失和局部能量损失两部分。

##### (1) 沿程损失

由于流体具有黏性以及并联管组系统壁面粗糙度的影响, 当流体流经一段长管(总管或支管)时必然会有能量损失, 在模拟计算中采用达西公式:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{u^2}{2g} \tag{3}$$

式中:  $h_f$  为能量损失;  $L$  为管道长度;  $d$  为水力直径;  $u$  为流体流速;  $\lambda$  为沿层损失系数。由于选取的是湍流模型, 所以  $\lambda$  的值可以通过布拉修斯(Blasius)公式由雷诺数  $Re$  来确定:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \tag{4}$$

而雷诺数可以由式(5)来确定:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \tag{5}$$

式中:  $u$  为流体速度;  $d$  为水力直径;  $\nu$  为流体的运动学黏度。

##### (2) 局部损失

在并联管组模型中, 流体由总管进入支管或由支管进入总管时流体运动受到扰乱, 必然会产生压强损失, 其表达式为

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2g} \tag{6}$$

式中  $\zeta$  为局部损失系数。

### 3 实验与分析

在实际工程应用中,普遍认为  $\Psi$  是一个对模型各个支管流量分布均匀性有很大影响的参数,  $\Psi$  越大各个支管中的流量分布就越均匀,  $\Psi$  越小各个支管中的流量差异就越大. 但实际情况并非如此简单. 以 31 支路的 U 型分布和 Z 型分布为例,分析在不同的  $\Psi$  值下各个支路的流量规律. 在模拟各种情况时,采用了统一的入口速度条件,而各种情况下面积  $S_1$  又不尽相同,所以各种情况下的流量是不同的. 为了便于比较,以距离总管入口最近支管的流量为标准,对所有支管中的流量进行归一化处理.

#### 3.1 U 型分布模型

##### 3.1.1 $\Psi$ 值对均匀性的影响

通过两种方法来调节  $\Psi$  值: 固定  $S_2$  逐步调大  $S_1$ , 其结果如图 3(a) 所示; 固定  $S_1$  改变  $S_2$ , 其结果如图 3(b) 所示. 图中  $Q$  为各个支管的流量;  $Q_1$  为第一支管的流量.

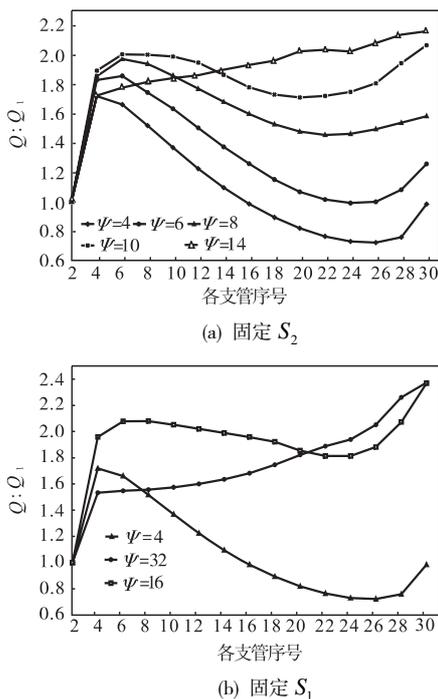


图 3 不同  $\Psi$  值下流量分布图  
Fig. 3 Sketch map of flux under different  $\Psi$

由图 3 可知,要想使整个 U 型分布的管路系统中各个支管的流量均匀,  $\Psi$  是一个十分重要的参数,但  $\Psi$  的数值并非越大越好,因为每个支路的流量取决于该支路出入口的压差. 在 U 型分布管组系统中,进水总管内远离进水口处的压力为系统内的压力最大点,但相应的,在出水总管的压力最大点同样出现在远离出

口的位置. 这就使得最远离系统出入口的支路其进出口压差不一定是各个支路压差的极值.  $\Psi$  值偏小,则在整个系统中靠近入(出)水口一侧支管的流量较大;而远离入(出)水口一侧支管的流量较小. 如果  $\Psi$  值偏大,则在整个系统中靠近入(出)水口一侧支管的流量较小;而远离入(出)水口一侧支管的流量较大. 要想使各个支路的流量尽量均匀,必须找到一个比较适合实际需要的  $\Psi$  值,称之为  $\Psi_0$  (如例子中为了使各个支管流量尽量均匀,可以取  $\Psi_0=8$ ).

对于每一个具体的 U 型并联管组系统,其  $\Psi_0$  值是不同的. 这不仅要取决于支管的数量和位置以及总管的形状,还要取决于入口的速度和湍流强度. 但是其规律是一致的. 这就为控制 U 型并联管组各支路中的流量分布提供了一种方法: 要想使靠近入口、出口一侧支路的流量大于远离入口、出口一侧的支路,当然这种差别是渐变的,应该在入口速度条件一定的情况下调小  $\Psi$  值(固定  $S_1$  并增大  $S_2$ , 或固定  $S_2$  并减小  $S_1$ ). 反之亦然.

##### 3.1.2 速度对均匀性的影响

以上各组数据是在总管中流速一定的前提下得到的. 为了探究不同速度对 U 型分布中各支路流量分布的影响,以  $\Psi=8$  的情况为例,分别加以不同的速度  $u$ , 其结果如图 4 所示.

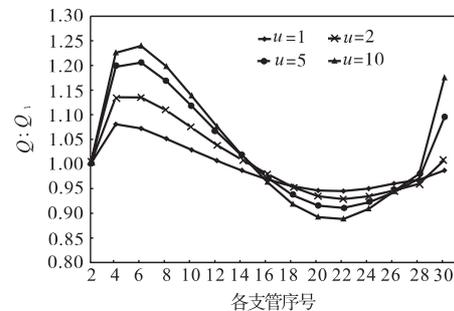


图 4 不同速度下流量分布图  
Fig. 4 Sketch map of flux under different velocity

对于不同的入口速度,各支路的流量分布规律是不同的.  $\Psi$  值相同时,在速度较大的情况下,靠近入/出口的位置流量更大,远离入/出口的支管流量会更小,整体的流量分布更加的不均匀. 也就是说在入口速度越大,为了使各个支路中的流量尽量均匀,  $\Psi_0$  的值会越大. 在  $\Psi$  值不变的情况下,为了使各个支管的流量尽量均匀,应尽量减小入口速度. 但是必须保证整个管组内部的流动状态为湍流.

#### 3.2 Z 型分布

##### 3.2.1 $\Psi$ 值对均匀性的影响

为了研究  $\Psi$  值对 Z 型分布并联管路系统均匀性

的影响,以图 2 的几何模型为例进行了数值模拟.其结果如图 5 所示.

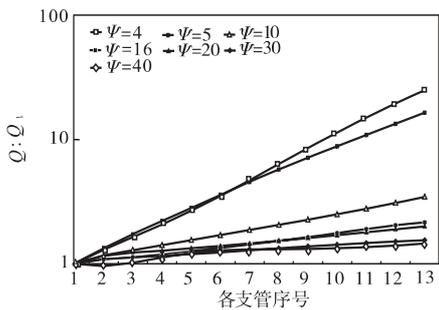


图 5 不同  $\Psi$  值下流量分布图

Fig.5 Sketch map of flux under different  $\Psi$

由图可知在 Z 型分布的结构中,远离入口而接近出口的支路(尾端)流量总是要大于接近入口而远离出口的支路(头端)流量.因为惯性的作用,尾端进口的压力为进水总管中的最大压力,这与 U 型分布的情况是一致的.而在出水总管中压力的最大值却出现在头端的出水口.这就使得在所有支路中头端的压差最小,而尾端的压差最大.所以尾端的流量总是最大的. $\Psi$ 值对各个支路的流量分布也是有很大影响的,只是影响比较简单:在相同的入口速度下, $\Psi$ 值越大各个支路的流量越均匀.

3.2.2 速度对均匀性的影响

入口速度  $u$  对 Z 型并联管路各支路流量的均匀性也是有很大影响的.其数值模拟结果如图 6 所示.

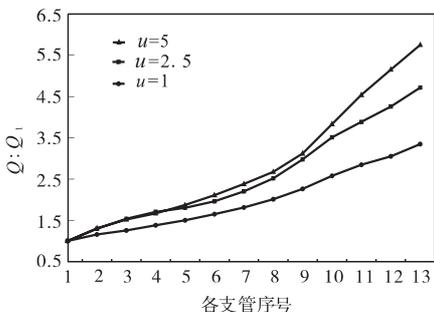


图 6 不同速度下流量分布图

Fig.6 Sketch map of flux under different velocity

由图可知在湍流状态下, Z 型分布的尾端流量总

是要大于头端流量,总管入口速度  $u$  越大,这种差异也就越大.要想使整个系统的各个支路的流量尽量均匀,就速度而言,应该尽量减小入口速度.但必须保证雷诺数足够大,进而整个流动状态为湍流.

4 结 论

在换热装置的设计中,当希望系统各个支路流量尽量均匀时,如采用 U 型分布并联管组,  $\Psi$  值存在一个最佳值  $\Psi_0$ , 设计时应使结构的  $\Psi$  值尽量接近  $\Psi_0$ ; 如果采用 Z 型分布并联管组,  $\Psi$  值越大越好.如果系统允许  $\Psi$  值能够达到一个很大的数值时(如实验中的  $\Psi \geq 16$ ), 应该优先考虑使用 Z 型分布的并联管结构, 这样可以使各个支路流量更加均匀.如果系统的结构不允许较大的  $\Psi$  值存在时, 应尽量考虑使用 U 型分布.因为在小  $\Psi$  值时 U 型分布的均匀性要好于 Z 型分布.当需要一端支路的流量大于另一端的支路流量时, 应该尽量采用 Z 型分布, 并合理确定出入口的位置和  $\Psi$  值.

速度对两种类型的并联管组流量分布均匀性均有很大的影响.在湍流状态下,为使各个支路流量均匀应尽量减小入口速度.在入口速度一定的前提下,对于 Z 型分布应尽量调大  $\Psi$  值;对于 U 型分布,速度越大,使各个支管流量尽量均匀的最佳  $\Psi$  值 ( $\Psi_0$ ) 也越大.

参 考 文 献:

- [1] 罗永浩. 锅炉管组集箱静压分布的离散模型[J]. 动力工程, 1997 (3): 32—36.
- [2] 杨世铭, 罗永浩. 并联管组流动性的研究[J]. 水动力研究与进展, 1998, 13 (2): 214—220.
- [3] 赵镇南. 集管系统压力与流量分布的研究——I(U)型布置时的分析解[J]. 太阳能学报, 1999, 20 (4): 377—384.
- [4] 赵哲山, 李忠玉. 并联管路的流量计算[J]. 吉林化工学院学报, 1995, 12 (3): 31—35.
- [5] 周暄毅, 顾明. 并联管组耗散模型的理论研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23 (3): 79—82.