

# 单相流体在U型布置并联管中的等温流动

陆慧林 鲍亦令 杨励丹

(哈尔滨工业大学)

〔提要〕 本文着重分析单相流体在U型布置并联管组中的流动,得到了流体在并联管组中流速和压力分布计算式,并对计算结果进行了分析和讨论。

主题词 锅炉 液相 等温流 计算

## 一、前言

在动力、化工、核动力等行业中,经常会遇到流体在并联管组中流动的问题。在文献[1]中作者着重分析了乙型布置并联管组的流动特点,本文将进一步讨论流体在U型布置并联管组中的流动。

## 二、基本方程

U型布置并联管组压降分布如图1所示。在分配集箱中,随流速减少使流体压力增大;在汇合集箱中,则由于流体速度不断增加使压力下降。并联管内速度大小取决于管两端压差  $\Delta P = P - P^*$ , 而压差  $\Delta P$  与集箱压力分布有关。

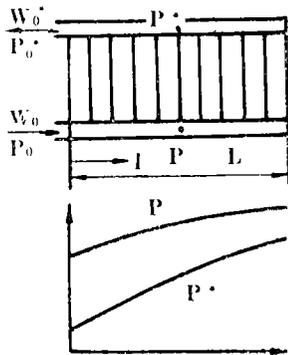
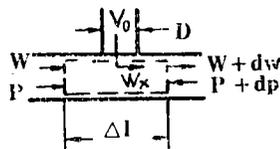
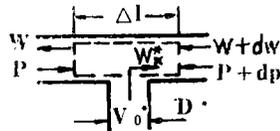


图1 U型并联管组压降分布



(a) 分配集箱



(b) 汇合集箱

图2 计算示意图

与文献[1]相同,根据图2可得到分配集箱和汇合集箱的基本方程。

(a) 分配集箱 质量守恒方程是:

$$V_0 = - \frac{A}{A_0} \cdot \frac{L}{n} \cdot \frac{dW}{dl} \quad (1)$$

收稿日期: 1989-04-22

动量守恒方程是:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dl} + \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot W^2 + (2 - C_f) \cdot W \cdot \frac{dW}{dl} = 0 \quad (2)$$

(b) 汇合集箱 质量守恒方程:

$$V_0^* = \frac{A^*}{A_0} \cdot \frac{L}{n} \cdot \frac{dW^*}{dl} \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp^*}{dl} + \frac{\lambda^*}{2 \cdot D^*} \cdot W^{*2} + (2 - C_h) \cdot W^* \cdot \frac{dW^*}{dl} = 0 \quad (4)$$

(c) U型布置并联管组的基本方程

根据质量守恒定律, 有:  $\rho \cdot V_0 = \rho V_0^*$  (5)

将式(1)和(3)代入式(5), 得:  $\frac{dW^*}{dl} = -\frac{A}{A^*} \cdot \frac{dW}{dl}$  (6)

其中边界条件  $W^* = 0$  时  $W = 0$

式(6)积分得  $W^* = \frac{A}{A^*} \cdot W$  (7)

将式(6)和(7)代入式(4), 且将式(2)减去式(4), 整理得:

$$\frac{d(p - p^*)}{dl} + \left[ \frac{\lambda}{2 \cdot D} - \frac{\lambda^*}{2 \cdot D^*} \cdot \left( \frac{A}{A^*} \right)^2 \right] \cdot W^2 + \left[ (2 - C_f) - (2 - C_h) \cdot \left( \frac{A}{A^*} \right)^2 \right] \cdot W \cdot \frac{dW}{dl} = 0 \quad (8)$$

若忽略并联管中加速压降, 并联管两端压降为:

$$P - P^* = \xi \cdot \frac{(\rho V_0)^2}{2} \cdot v + H \cdot \rho \cdot g \quad (9)$$

将式(1)代入上式, 并微分得

$$\frac{d(P - P^*)}{dl} = \xi \cdot \left( \frac{A}{A_0} \cdot \frac{L}{n} \right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{dW}{dl} \cdot \frac{d^2W}{dl^2} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8), 得:

$$\begin{aligned} & \xi \cdot \left( \frac{A}{A_0} \cdot \frac{L}{n} \right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{dW}{dl} \cdot \frac{d^2W}{dl^2} + \left[ \frac{\lambda}{2 \cdot D} - \frac{\lambda^*}{2 \cdot D^*} \cdot \left( \frac{A}{A^*} \right)^2 \right] \cdot W^2 + \\ & + \left[ (2 - C_f) - (2 - C_h) \cdot \left( \frac{A}{A^*} \right)^2 \right] \cdot W \cdot \frac{dW}{dl} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中第一项表示并联管的摩擦压降, 第二项表示流体在集箱内流动产生的压力降, 第三项表示流体沿集箱速度变化产生的压力降。通常, 第二项相对于第一项是很小的, 可以忽略不计。这时式(11)简化为:

$$\xi \cdot \left( \frac{A}{A_0} \cdot \frac{L}{n} \right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{dW}{dl} \cdot \frac{d^2W}{dl^2} + \left[ (2 - C_f) - (2 - C_h) \cdot \left( \frac{A}{A^*} \right)^2 \right] W \cdot \frac{dW}{dl} = 0 \quad (12)$$

令:

$$\frac{W}{W_0} = \bar{W} \quad , \quad \frac{l}{L} = \eta$$

则式 (12) 整理得: 
$$\frac{d^2 \bar{W}}{d\eta^2} - \phi^2 \bar{W} = 0 \tag{13}$$

式中,  $\phi^2$  —— 系数,

$$\phi^2 = \frac{(2 - C_h) \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 - (2 - C_f)}{\xi \cdot \left(\frac{A}{A^*} \cdot \frac{1}{n}\right)^2}$$

式 (13) 的边界条件是:

$$\begin{aligned} \eta = 0 \text{ 时 } \quad \bar{W} &= 1.0 \\ \eta = 1 \text{ 时 } \quad \bar{W} &= 0 \end{aligned} \tag{13a}$$

式 (13) 描述了单相流体在U型并联管组内等温流动的交配方程, 它可根据式 (13a) 边界条件确定。

### 三、方程 (13) 的解

二阶常系数微分方程 (13) 的解取决于系数  $\phi^2$ 。 $\phi^2$  的取值范围可分为三种情况: 一是  $\phi^2 > 0$ ; 二是  $\phi^2 = 0$ ; 三是  $\phi^2 < 0$ 。对单相流体在集箱流动时, 实测的系数  $C_f$  和  $C_h$  分别是 1.24 和 0。因此, 系数  $\phi^2$  一般情况下是大于 0 或者等于 0。仅对上述两种情况进行分析。

(a) 系数  $\phi^2 = \left\{ \frac{(2 - C_h) \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 - (2 - C_f)}{\xi \cdot \left(\frac{A}{A_0} \cdot \frac{1}{n}\right)^2} \right\} > 0$

二阶常系数微分方程 (13) 的通解是:

$$\bar{W} = C_1 \cdot e^{\phi\eta} + C_2 \cdot e^{-\phi\eta} \tag{14}$$

式中积分常数  $C_1$  和  $C_2$  由边界条件 (13a) 确定, 整理得:

$$\bar{W} = \frac{sh\phi(1-\eta)}{sh\phi} \tag{15}$$

根据式 (1), 并联管速度分布:

$$\frac{V_0}{W_0} = \frac{A}{A_0} \cdot \frac{\phi}{n} \cdot \frac{ch\phi(1-\eta)}{sh\phi} \tag{16}$$

根据式 (9), 并联管压降分布:

$$\frac{P - P^*}{\xi \cdot \frac{W_0^2}{2} \cdot \rho} = \left[ \frac{A}{A_0} \cdot \frac{\phi}{n} \cdot \frac{ch\phi(1-\eta)}{sh\phi} \right]^2 + \frac{H \cdot \rho \cdot g}{\xi \cdot \frac{W_0^2}{2} \cdot \rho} \tag{17}$$

根据式 (2), 分配集箱压力分布:

$$\frac{P_0 - P_{f\eta}}{\frac{W_0^2}{2} \cdot \rho} = (2 - C_f) \cdot (\bar{W}^2 - 1) + \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \frac{[sh2\phi - sh2\phi(1-\eta) - 2\phi\eta]}{(2 \cdot sh\phi)^2} \tag{18}$$

根据式 (4), 汇合集箱压力分布:

$$\frac{P_0^* - P_{h\eta}}{\frac{W_0^2 \cdot \rho}{2}} = (2 - C_h) \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 (\bar{W}^2 - 1) + \frac{\lambda^* L}{D^*} \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 \cdot \frac{[\text{sh}2\phi - \text{sh}2\phi(1-\eta) - 2\phi\eta]}{(2 \cdot \text{sh}\phi)^2} \quad (19)$$

$$(b) \text{ 系数 } \phi^2 = \frac{(2 - C_h) \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 - (2 - C_f)}{\xi \cdot \left(\frac{A}{A_0} \cdot \frac{1}{n}\right)^2} = 0$$

在这种情况下, 微分方程(13)简化为:

$$\frac{d^2 \bar{W}}{d\eta^2} = 0$$

$$\text{积分可得: } \bar{W} = (1 - \eta) \quad (20)$$

$$\text{并联管速度分布 } \frac{V_0}{W_0} = \left(\frac{A}{A_0} \cdot \frac{1}{n}\right) \quad (21)$$

并联管压力降:

$$\frac{P - P^*}{\xi \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho}{2}} = \left(\frac{A}{A_0} \cdot \frac{1}{n}\right)^2 + \frac{H \cdot \rho \cdot g}{\xi \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho}{2}} \quad (22)$$

分配集箱压力分布:

$$\frac{P_0 - P_{f\eta}}{\frac{W_0^2 \cdot \rho}{2}} = (2 - C_f) \cdot (\bar{W}^2 - 1) + \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \eta \cdot \left(1 - \eta + \frac{\eta^2}{3}\right) \quad (23)$$

汇合集箱压力分布:

$$\frac{P_0^* - P_{h\eta}}{\frac{W_0^2 \cdot \rho}{2}} = \left[ (2 - C_h) (\bar{W}^2 - 1) - \frac{\lambda^* L}{D^*} \cdot \eta \cdot \left(1 - \eta + \frac{\eta^2}{3}\right) \right] \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 \quad (24)$$

#### 四、计算结果和分析

由式(13)可见, 流体在U型并联管组中流动特征与系数 $\phi^2$ 有关。而系数 $\phi^2$ 依赖于并联管结构布置、集箱尺寸等。图3表示了分配集箱流体无因次速度分布曲线。由图可见, 当 $\phi^2 > 0$ 时, 随 $\phi^2$ 值增大, 无因次速度 $\bar{W}$ 变化趋势偏离线性变化愈严重。当 $\phi^2 = 0$ 时, 无因次速度 $\bar{W}$ 按线性变化。

图4表示了并联管无因次速度变化规律。由图可见, 当 $\phi^2 > 0$ 时, 随 $\phi^2$ 值增大, 并联管速度分布越不匀。当 $\phi^2 = 0$ 时, 并联管内速度相同, 流量分配均匀。可见, 最小流量的并联管位于 $\eta = 1.0$ 处。平均流量的并联管位于 $\eta = 0.42$ 。

图5和图6分别表示了分配集箱和汇合集箱的压力分布。计算时取 $\lambda = \lambda^* = 0.012$ ,  $L/D = 28$ ,  $A/A^* = 1.0$ 。图中实验数据取自文献[2], 由图可见, 当 $\phi^2 = 0$ 时, 计算值与实验值基本吻合。

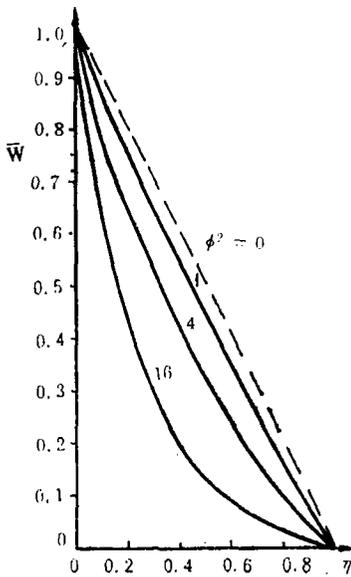


图3 分配集箱无因次速度分布

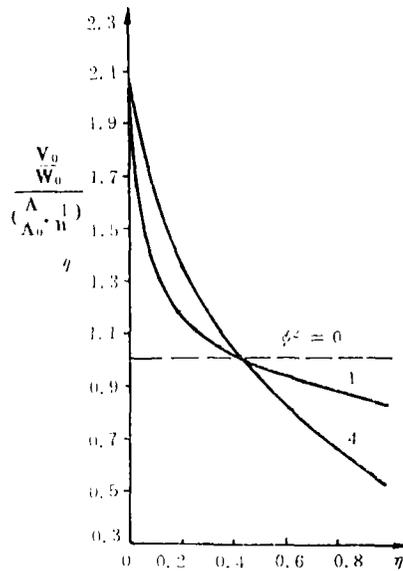


图4 并联管无因次速度分布

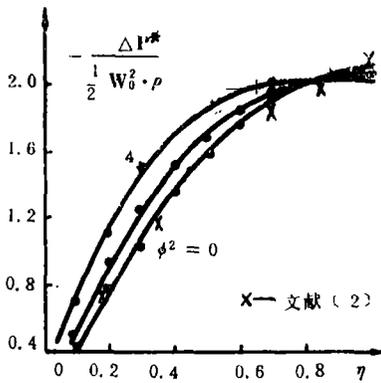


图5 分配集箱压降分布

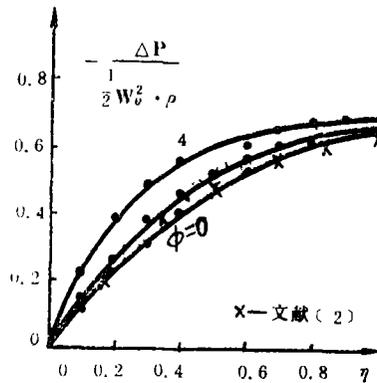


图6 汇集集箱压降分布

由上分析可知，保证并联管流量均匀分配的条件是 $\phi^2 = 0$ 。而 $\xi \cdot \left(\frac{A}{A_0} \cdot \frac{1}{n}\right)^2 \neq 0$ ，故保证 $\phi^2 = 0$ 的条件是：

$$(2 - C_h) \cdot \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 - (2 - C_f) = 0$$

若取 $C_f = 1.24$ 和 $C_h = 0$ ，则由上式计算可得保证并联管流量均匀的汇集集箱与分配集箱截面比 $A^*/A$ 是1.62。而在实际工程中，一般截面比 $A^*/A$ 取1.0或略大一些。因此，为保证并联管流量均匀的另一方法是增大并联管总阻力系数 $\xi$ ，使系数 $\phi^2$ 减小。但总阻力系数增加，要消耗动力。因此在设计中应合理地布置并联管组。

## 五、结 论

1. 本文导出了单相流体在U型并联管组中等温流动时集箱和并联管内流体速度和压力分布方程式(15)~(24)。

2. 并联管组流动特征可用系数 $\phi^2$ 表示。当 $\phi^2 > 0$ 时,随 $\phi^2$ 值增大,流量分配愈不均匀。当 $\phi^2 = 0$ 时,流量分配均匀。

## 参 考 文 献

- [1] 陆慧林,杨励丹,程初.单相流体在Z型布置并联管中的等温流动.热能动力工程,1989,4(1):28~36  
 [2] 上海机械学院锅炉教研室.单相流体在并联管组中的流量分布和热偏差的理论及计算,电站锅炉水力特性资料汇编,1976

(渠源汤 编辑)

# Isothermal Flow of Single-Phase Fluid in Parallel Tubes Arranged in U-Shape

Lu Huilin, Bao Yiling, Yang Lidan  
 (Harbin Institute of Technology)

## Abstract

Single-phase fluid flow in parallel tubes arranged in U-shape is analysed, formulas for calculation of fluid flow velocities and pressure drop in the parallel tubes are presented, and the calculation results are analysed and discussed in this paper.

**Key Words:** boiler, liquid phase, isothermal flow, calculation

## 简 讯

### 台湾选择 LM 2500 发动机驱动二艘新型的 FFG 级护卫舰

据“燃气轮机世界”1989年9—10月号报导,台湾海军已选择美国通用电气公司(GE)LM2500船用燃气轮机来驱动他们首批二艘新型的 FFG 级护卫舰。这二艘护卫

舰由台湾中国造船公司建造,每艘护卫舰将由二台每机额定功率为32000马力的LM2500发动机所驱动。GE公司将于1990年交付这四台发动机。

作为目前造舰规划的一部分,台湾海军计划至少还要建造六艘 FFG 级护卫舰。至今尚未决定这六艘护卫舰选用何种发动机。

(吉桂明 供稿)