

# 交变流动中压力速度之间相位差对突变截面损失的影响分析

张宇坤<sup>1,2</sup>, 陈燕燕<sup>1,3</sup>, 戴巍<sup>1</sup>, 罗二仑<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190

2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 中国科学院力学所国家微重力实验室, 北京 100190)

摘要: 从弱非线性热声理论出发, 给出交变流动中突变截面阻力系数的定义以及考察方法。通过 PIV(粒子成像测速仪)测量与 CFD 计算结果的对比, 验证了 CFD 计算结果的可靠性。进而利用 CFD 模拟考察了交变流动中压力与速度之间相位差对突变截面局部损失的影响, 观察到产生这种影响的流场内部流动机制。分析表明, 阻力特性确实对声场压力与速度之间的相位差存在依赖性, 但这种依赖性会随着非线性的增强而减少。

关键词: 热声热机; 突变截面; 交变流动; 局部损失; CFD 模拟; PIV

Investigation on the influence of the phase difference between pressure and velocity on the minor losses for a duct with sudden area change

Zhang Yukun<sup>1,2</sup>, Chen Yanyan<sup>1,3</sup>, Dai Wei<sup>1</sup>, Luo Erlun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry of CAS, Beijing 100190, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Microgravity Research, Institute of Mechanics of CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Minor losses for oscillating flow in a duct with sudden area change have been investigated through non-linear theoretical analysis, PIV measurement and CFD simulation. The influence of phase difference between pressure and velocity on the minor losses has been analyzed. The results show that the resistance characteristic has a dependence on the phase difference between pressure and velocity. However, this dependence is weakened as the non-linearity strengthens. The CFD simulation is useful for the flow characteristics analysis in oscillating flow.

Keywords: Thermoacoustic engine; Sudden area change; Oscillating flow; Minor loss; CFD simulation; PIV

## 1 引言

在脉冲管制冷机中, 不同部件通常具有不同的流通面积, 在他们连接之处会存在面积的突变, 如换热器与回热器之间、脉冲管与惯性管之间、压缩机与连接管之间等。一方面, 突变截面引起的局部流动现象会对某些关键部件内部的流场产生扰动。典型地, 在斯特林脉冲管制冷机中, 惯性调相管与脉冲管的截面积会存在量级上的差别, 气体从惯性管进入脉冲管时, 如不采取任何措施则会产生强烈的射流和拐角处的二次流动现象, 导致制冷机性能恶化。而在另一方面, 突变截面的流动损失也产生功的损耗, 甚至引起更大尺度的

声流现象如 Gedeon 声流, 也会对系统性能产生不利影响, 这种局部损失已经是线性热声理论无法准确预测和描述的。为了对实际制冷机以及更广泛意义上的热声热机的性能提高提供依据, 迫切需要对这类交变流动中的复杂流动现象进行系统研究。本文主要针对流动损失进行分析, 同时本文的 PIV 的测量工作也为今后进一步流动测量打下基础。

已有的此类研究中, 对于变截面流道的进出口效应的阻力特性只是采用简单模型进行分析<sup>[1]</sup>, 或是借鉴稳定流动的局部损失<sup>[2]</sup>, 缺乏严格的理论分析与实验验证。Jaworski 等人<sup>[3-6]</sup>利用 PIV 对热声板叠端部的流动形态做了详细的实

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(50890181, 50625620, 10574135)资助。

作者简介: 张宇坤(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热声热机内流场模拟与可视化测量。

验研究, 获得了板叠端部涡的形态特征及演化过程, 并结合数值模拟, 借鉴稳定流动的考察方法, 对板叠处入口效应长度进行了考察。但这些研究均未对交变流动下进出口效应的阻力特性进行具体分析。

基于目前对交变流动中突变截面局部损失的研究比较匮乏, 本文从适用于突变截面流道的方程组出发, 通过理论分析获得影响突变截面局部损失的无量纲参数。在对变截面处的阻力特性进行分析之前, 首先利用 PM 对突变截面流场进行测量, 将实验测量结果与采用 CFD 模拟的计算结果进行对比, 对 CFD 模拟结果的可靠性进行验证。再依靠 CFD 数值模拟, 集中考察了交变流动中压力、速度相位对突变截面局部损失的影响。

## 2 理论模型

对于图 1 所示的二维突变截面流道, 设声传播方向为  $x$  垂直声传播方向为  $y$  流道截面在  $x$  方向上产生突变, 从流道半宽  $b_l$  突变到  $b_r$ 。由于突变截面处  $y$  方向上的速度  $v$  与  $x$  方向上的速度  $u$  相比不可忽略, 且  $9_u/9_x$  不可忽略, 因而必须记入非线性效应。非线性效应将使得单频波通过突变截面后, 将能量向时均流动及高次谐波传递, 从而耗散声功。

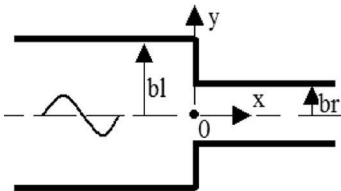


图 1 二维突变截面流道简图

Fig 1 Two-dimensional channel with a sudden area change

为分析突变截面损失的影响因素, 我们从弱非线性理论分析入手。考察图 1 所示的二维突变截面流道, 若流道横向尺度与流道进出口效应长

$$\$P_1 = Q \int_{-L_l}^{L_r} iXU_1 \left[ \frac{L_r}{A_r} + \frac{L_l}{A_l} \right] + Q \int_{-L_l}^{L_r} \frac{1}{A_f A_r} \left[ \frac{9(u_0 u_1)}{9_x} + v_0 \frac{9u_1}{9_y} + v_1 \frac{9u_0}{9_y} \right] dA_r dx + \int_{-L_l}^{L_r} \frac{4S_v}{Q_{d_h}} dx \quad (3)$$

定义一个类阻力系数  $f_{sp} = \frac{\$P_1}{(1/2)Q |u_{lc}| |u_{lc}|}$

#  $\frac{d_{hc}}{(L_l + L_r)}$ , 其中  $L_l, L_r$  表示变截面两侧的流道长度, 特征速度  $u_{lc} = U_l / A_r$ , ( $A_l > A_r$ ),  $U_l$  为体积流

度远小于声波长, 则通过量纲分析, 将动量方程保留到二阶小量, 其时均量方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{9u_0}{9_x} + \frac{9v_0}{9_y} = 0 \\ \frac{1}{2} |u_l| \frac{9|u_l|}{9_x} + \frac{1}{2} |v_l| \frac{9|u_l|}{9_y} \text{Re}[e^{i(\xi u_l - \xi v_l)}] \\ = -\frac{1}{Q} \frac{\mathcal{P}_0}{9_x} + \frac{L_0}{Q} \left[ \frac{9^2 u_0}{9_x^2} + \frac{9^2 u_0}{9_y^2} \right] \\ \frac{1}{2} |u_l| \frac{9|v_l|}{9_x} \text{Re}[e^{i(\xi u_l - \xi v_l)}] + \frac{1}{2} |v_l| \frac{9|v_l|}{9_y} \\ = -\frac{1}{Q} \frac{\mathcal{P}_0}{9_y} + \frac{L_0}{Q} \left[ \frac{9^2 v_0}{9_x^2} + \frac{9^2 v_0}{9_y^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

一阶波动量方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{9u_1}{9_x} + \frac{9v_1}{9_y} = 0 \\ iXu_1 + u_0 \frac{9u_1}{9_x} + u_1 \frac{9u_0}{9_x} + v_0 \frac{9u_1}{9_y} + v_1 \frac{9u_0}{9_y} \\ = -\frac{1}{Q} \frac{\mathcal{P}_1}{9_x} + \frac{L_0}{Q} \left[ \frac{9^2 u_1}{9_x^2} + \frac{9^2 u_1}{9_y^2} \right] \\ iXv_1 + u_0 \frac{9v_1}{9_x} + u_1 \frac{9v_0}{9_x} + v_0 \frac{9v_1}{9_y} + v_1 \frac{9v_0}{9_y} \\ = -\frac{1}{Q} \frac{\mathcal{P}_1}{9_y} + \frac{L_0}{Q} \left[ \frac{9^2 v_1}{9_x^2} + \frac{9^2 v_1}{9_y^2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

作为声传播管道, 在单频波驱动下, 声能在经过突变截面时由于粘性耗散而损失部分声功, 产生局部损失, 从方程组 (1) ~ (2) 可知, 一阶波动将诱发时均速度场, 时均速度反过来影响一阶波动量的分布, 强非线性情况下, 以上方程组中动量方程的非线性项也将导致高次谐波。因此该局部损失的产生主要是由于非线性诱发时均场及高次谐波, 并最终因粘性耗散声功。由于声功的传递仍然主要由一阶波动承担, 因此将阻力特性集中到该单频波的传播上, 对方程组 (2) 取截面平均, 再在  $x$  方向上积分 (变截面处压力、体积流连续), 得到:

率,  $A_k, A_r$  分别代表变截面两侧流道的横截面积,  $d_{hc}$  为  $A_c$  对应水力直径, 本文中  $A_c, u_{lc}, d_{hc}$  均取右侧小管道的值。  $f_{sp}$  有如下形式:

$$f_{sp} = i \frac{2Xd_{hc}}{|u_c|} \left[ 1 + \frac{L_l/L_r}{A_l/A_r} \right] \# \frac{1}{(L_l/L_r + 1)} + f_{noin} + f_{visc} \quad (4)$$

$$\text{其中, } f_{\text{nonlin}} = \frac{2d_{\text{hc}}}{(L_l + L_r)} \frac{1}{Q} \frac{1}{|u_{1c}|} \left[ \frac{9}{9} \left( \frac{u_0 u_1}{|u_{1c}| |u_{1y}|} \right) + \frac{v_0}{|u_{1c}|} \frac{9}{9} \left( \frac{u_1}{|u_{1y}|} \right) + \frac{v_1}{u_{1c}} \frac{9}{9} \left( \frac{u_0}{|u_{1c}|} \right) \right] dA_r dx$$

$$f_{\text{visc}} = \frac{d_{\text{hc}}}{(L_l + L_r)} \frac{1}{Q} \frac{1}{|u_{1c}|} \frac{8S}{d_{\text{h}}} dx$$

式 (4) 中右边第一项表示流场当地加速度对压差的贡献, 第二项表示非线性效应对压差的贡献, 第三项为粘性阻力对压差的贡献, 为真实的阻力系数。与稳定流动相比, 交变流动中不仅增加了流场当地加速度对压差的影响, 同时流场非均匀性产生的惯性力与粘性剪切力都将与来流速度产生相位差, 对压力相位产生影响。为讨论非线性惯性项与粘性剪切力产生的阻力特性, 定义  $f = f_{\text{nonlin}} + f_{\text{visc}}$ 。本文将从阻力系数  $f$  的角度出发, 考察交变流动中突变截面产生的局部损失。对方程组 (1) ~ (2) 进行无量纲分析, 阻力系数  $f$  可写为:

$$f = \left[ \frac{X d_{\text{hr}}}{|u_{1c}|} \frac{L_0}{Q |u_{1c}| d_{\text{hr}}} \frac{A_r}{A_l}, 5 (P_1 / u_1) \right] \quad (5)$$

公式中  $5 (P_1 / u_1)$  表示压力与速度之间的相位差。

考虑给定来流压力、速度的管道阻力特性, 满足线性简化条件时, 局部  $f = \frac{8iK_L}{Re} [1 - \tanh(\sqrt{i}K_L / 2) / (\sqrt{i}K_L / 2)]^{-1} - 1$ , 将之应用到长为  $L_l + L_r$  的变截面管道, 有:

$$f = \frac{f_l (d_{\text{hr}} / d_{\text{hl}}) + f_r (L_r / L_l)}{1 + L_r / L_l} \quad (6)$$

其中  $f_l$  与  $f_r$  分别为两侧流道的线性阻力系数,  $K_L = \frac{1}{2} \sqrt{Q d_{\text{hr}}^2 / L_0}$ 。因此, 线性情况下,  $f$  与来流  $5 (P_1 / u_1)$  无关。而在非线性情况下, 能量的传递与相关参量之间的相位息息相关, 从方程组 (2) 可以看出, 时均速度场受一阶速度分量之间相位差  $5_{u1} - 5_{v1}$  的影响。而即使从线性理论来看,  $v_1$  也直接受当地  $P_1$  的影响, 因此这里的时均速度场受  $5_{u1} - 5_{P1}$  的影响, 即与入口阻抗相关。

已有研究中, 很少有关于声场相位对局部阻力损失影响的研究, 其影响规律也尚不清楚。因此, 以下将首先利用 PV 实验测量对 CFD 数值计算结果进行验证, 然后依赖数值计算结果, 考察压力与速度之间的相位差对局部阻力损失的影响。

### 3 PV 实验系统及测量方法

#### 3.1 PV 实验介绍

实验考察常温常压下扬声器驱动的空气在变截面附近的流场, 实验装置简图如图 2 所示。待测试验段连接在两个扬声器之间, 通过调节两扬声器驱动电压的相对幅值与相位差, 可获得对待测位置压力、速度幅值以及压力速度相位差的可控调节。变截面处流道由横截面 100mm @ 100mm 突变到 80mm @ 100mm, 实验中采用单频驱动, 最低频率 30Hz 对应最大粘性穿透深度约为 0.4mm, 该尺度远小于流道固定宽度 100mm, 因此, 与管道固定面平行的流道中心平面的流动可视为二维。

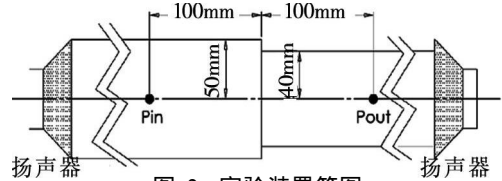


图 2 实验装置简图

Fig 2 Sketch of the experimental apparatus

采用 PCB106B51 压力传感器测量流场压力波动, 粒子成像测速仪 (PIV) 测量速度场。采用锁相测量方式, 每个相位点采集 20 对流动图像, 取其速度场平均值。以 15 度相位为间隔, 共采集 24 个相位点的流场图像, 组成一个周期。实验工况为:  $f = 30\text{Hz}$  入口截面平均速度  $|u_m| U 3\text{m/s}$  选取出口处 5 ( $P_{\text{out}} / u_{\text{out}}$ ) 从 0~360 度以约 45 度间隔变化的八个工况进行测量。由于在变截面处, 考察的实验管段长度均远小于声波长, 可以认为所考察的变截面实验段的进出口体积流量基本恒定, 因此实验中可以方便地通过调节变截面实验段的进出口压力相位差, 预先实现对实验段内压力、速度相位差的调节, 再进行速度场的测量。

实验中进出口压力波的最大高次谐波幅值都控制在一阶波动幅值的 5% 以内, 以保证流动系统本身存在的各阶谐波之间的相互作用在变截面流道中产生的额外非线性效应足够小。

#### 3.2 PV 典型测量结果

图 3 为 PV 测量结果, 给出的是  $A_r / A_l = 0.8$  保持出口处压力、速度相位差  $5 (P_{\text{out}} / u_{\text{out}}) = 47^\circ$  不同来流速度幅值下, 变截面处时均速度场

的变化。可以看出,随着来流速度的增大,时均速度场明显增强。变截面处附着两个时均漩涡,随着来流速度幅值的增加,这对漩涡强度逐渐增强,直径增大,与之相邻的第二对漩涡也逐渐显现并增强。第二对漩涡出现在图 3(b)的左上侧与右侧,图中未予完全显示。

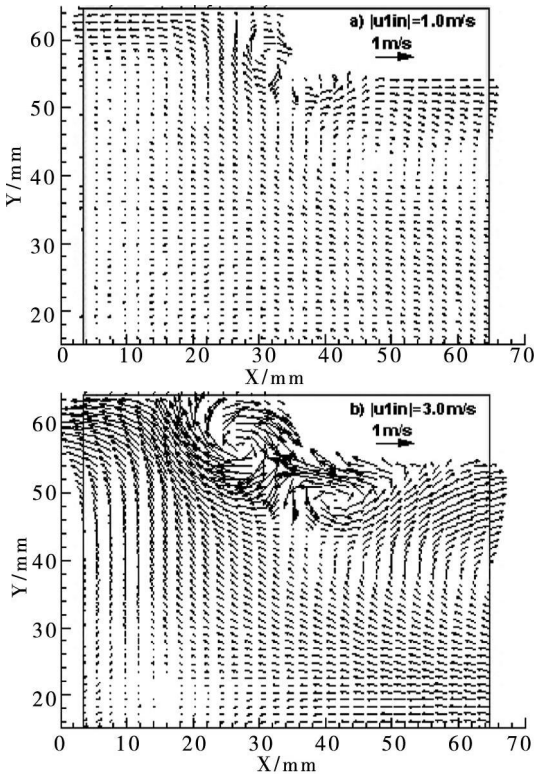


图 3 变截面附近时均速度场变化的 PIV 测量结果

Fig 3 Time averaged velocity field near the sudden change area by PIV measurement

## 4 CFD 计算方法

采用商业软件 FLUENT 对图 2 所示的二维突变截面流道进行数值模拟,计算区域为突变截面左侧宽 100mm,右侧宽 80mm,变截面左右各长 100mm。下文的分析中将左侧计算边界描述为入口,而右侧边界为出口。为考察强非线性的影响,模拟工况在实验工况基础上进行了扩展,增大了变截面两侧的面积差别与来流速度幅值。分别对变截面比  $A_r/A_l$  等于 0.8, 0.2, 0.1, 不同来流速度幅值的流场进行了模拟。压力振荡频率为 3Hz

设置 5 组工况,每组根据出口处  $5(P_{out}/u_{out})$  从 0~360 度以约 45 度间隔变化的 8 个工况进行计算,共 40 个工况。所有计算工况列于表 1。

表 1 计算工况

Tab 1 Numerical conditions

工况标记	$A_r/A_l$	$ u_{in} /(m/s)$	$5(P_{out}/u_{out})/(b)$
组 1	0.8	3m/s	0~360
组 2	0.8	8m/s	0~360
组 3	0.2	2.7m/s	0~360
组 4	0.2	6.6m/s	0~360
组 5	0.1	5m/s	0~360

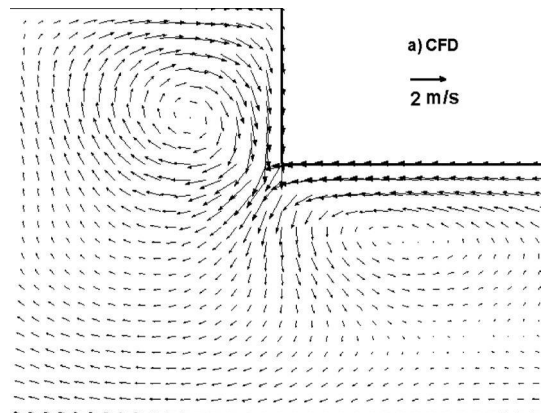
网格划分采用四边形结构网格 (structured grid),单元网格为边长 1mm 的正方形。网格模型左右两端为压力进、出口边界条件,上下为壁面边界条件,管壁绝热,管内为一个大气压下的空气。假定空气为理想气体,采用双精度分离式求解器,速度压力耦合采用 PISO 算法,时间项采用二阶隐式差分,考虑粘性生成热的层流模型。

计算稳定收敛后,通过编制 FLUENT 批处理程序,采集出全场所有单元网格在各个时刻点(采样时间间隔取  $T/100$ )的压力及 x 方向速度的数据。对数据进行后处理,得到各时刻压力和速度的截面平均值沿 x 方向的分布数据。将数据做时间上的 FFT 分析,得到截面平均速度和截面平均压力的幅值和相位沿 x 方向的分布。

## 5 结果与讨论

### 5.1 数值模拟与 PIV 测量结果对比

在  $A_r/A_l = 0.8$  进口压力幅值 303.8Pa 出口压力幅值 173.3Pa  $5(P_{out}/P_{in}) = -19.95$  的工况下,PIV 测量与 CFD 模拟的时均速度场对比如图 4 所示。二者呈现出的突变截面附近的成对反向旋涡,在形态、尺度上都吻合得较好,与 PIV 测量结果相比,CFD 模拟结果可以呈现出 PIV 难以



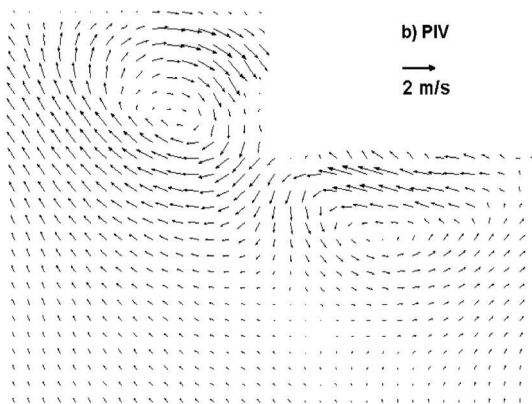


图 4 数值计算和实验测量的突变截面附近时均速度场对比

Fig 4 Time averaged velocity field near the sudden change area by CFD simulation and PIV measurement

测到的邻近壁面的速度情况。

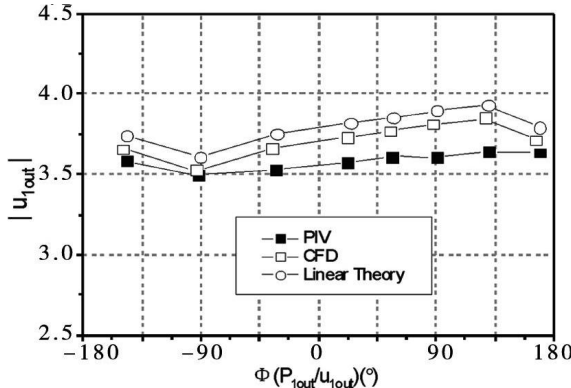


图 5 实验测量、数值计算以及线性理论所得出口速度的对比

Fig 5 Outlet velocity comparison between PIV, CFD and linear theory

图 5 给出了表 1 中组 1 的 8 个不同压力、速度相位差情况下, PIV 实验测量、CFD 模拟及线性理论计算得到的出口速度。图中可见, PIV 测量和 CFD 模拟的结果与线性理论的预测值差别不大, 这是由于所考察的工况流道尺度较大, 变截面比较小, 非线性惯性力以及粘性力相对局部加速度对压力梯度的作用较小。

对比 CFD 模拟结果与 PIV 测量结果, 可知二者在各工况下, 出口速度幅值的差别均小于 6%, 详见图 5 纵坐标; 出口速度相位的差别除第三个工况为 8% 外, 其它均小于 3%, 详见图 5 横坐标。

以上通过对时均速度场以及截面平均速度的比较, 说明 CFD 的计算结果与 PIV 实验测量符合较好, 因此基于 CFD 模拟对局部阻力损失的考察

是具有指导意义的。

### 5.2 阻力特性分析

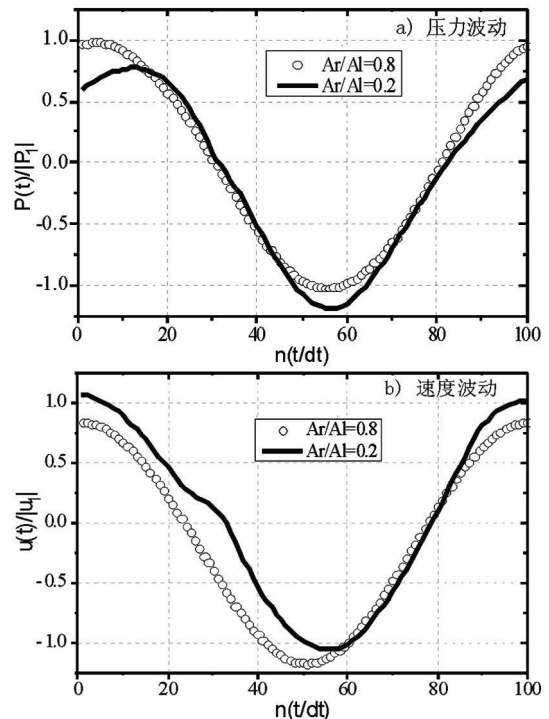


图 6 图 1 中原点处压力、速度在一个周期内的变化

Fig 6 Pressure and velocity oscillation at  $x = 0, y = 0$  in Fig 1

图 6 为 CFD 计算结果。图中比较了两种工况下变截面处流场中心的压力、速度随时间的变化曲线。图中两个工况分别取自表 1 中的组 1 与组 3。可以看出, 随着变截面面积差别的增大, 压力、速度出现明显的时均与高次谐波分量。

在相同变截面比的情况下, 阻力系数  $f$  与出口幅值雷诺数  $Re$  的乘积  $fRe$  与速度幅值无关, 从而比  $f$  更具备可比性。因此图 7 给出了表 1 中各工况数值计算所得  $fRe$  随出口处压力、速度相位差  $\Phi(P_{out}/u_{out})$  的变化曲线。图 7(a~b)、图 7(c~d)、图 7(e~f) 分别对应变截面比  $A_r/A_l$  为 0.8、0.2、0.1 的工况。

为计入进、出口体积流量的幅值与相位的不同对阻力系数的影响, 图 7 中各工况均给出了分别以进口以及出口体积流量为特征速度计算的阻力系数。尽管所有工况进口和出口体积流量的幅值与相位相差很小, 但当非线性惯性力以及粘性阻力作用过小时, 阻力系数值的计算方法会对进、出口体积流量之间的微小差别相当敏感, 如图 7(a~b) 所示。典型见图 7(b) 中, 进口速度幅值

$3\text{m/s}$  5 ( $P_{\text{out}}/u_{\text{out}}$ ) 略小于 135 的工况, 此工况下进、出口速度的相位仅相差 1.995b, 但分别作为特征速度计算出的 5 ( $f\text{Re}_1$ ) 则相差 168.503b, 随着非线性以及粘性阻力的增大, 阻力系数值受进、出口体积流率不同的影响越来越小, 如图 7(c ~ f) 所示。

图 7(a) 与图 7(b) 中, 计入体积流率分布特性对阻力系数的影响后, 仍然可以看出, 阻力系数随声场压力、速度相位差的变化出现明显波动, 而

图 7(e) 与图 7(f) 所代表的一组强非线性工况则表明, 阻力系数与声场压力、速度相位差的依赖关系则较弱。

比较各组工况中阻力系数的相位变化可以看出, 随着变截面积差别的增大或来流速度幅值的增大, 阻力系数与来流速度之间的相位差越来越小, 说明非线性效应的增强, 非线性惯性力与粘性力之和逐渐与速度幅值之间的相位差越来越小, 趋于同相。

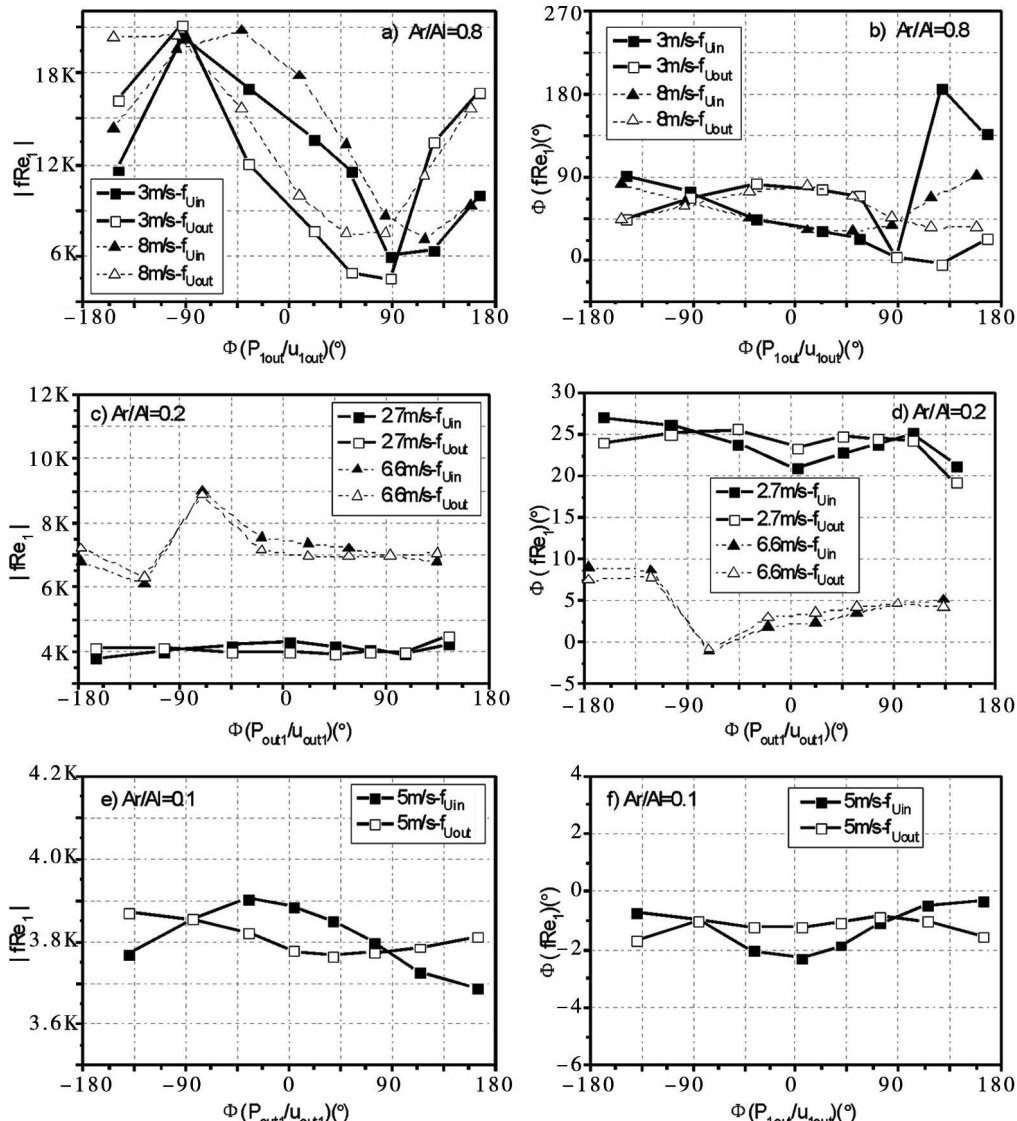


图 7 不同  $Ar/A_b$   $|u_{in}|$  下阻力系数随出口压力速度相位差的变化

Fig 7  $|f\text{Re}_1|$  vs  $\Phi(P_{\text{out}}/u_{\text{out}})$  for different  $Ar/A_b$   $|u_{in}|$

## 6 结论

本文从弱非线性热声理论出发, 得到交变流场中二维方管突变截面处局部损失阻力系数的数

学模型。通过 PV 实验测量和 CFD 数值模拟的对比, 验证了采用 CFD 数值模拟的手段研究交变流动中突变截面局部损失可行性。进而通过 CFD

(下转 19 页)

在着一个最佳充满率。本文中, 充满率对蓄压时间也会存在一定的影响。不过, 由于小型 LNG 船在运输过程中出于经济性考虑充满率一般都在 90% 左右, 本文没有对具体规律做进一步的研究。

LNG 初始温度或成分不同, 会影响液货的传热温差以及热容量, 从而影响蓄压时间。

## 6 结论

(1) 本文提出了解决沿海 (近海) 液化天然气运输的一种方案, 采取蓄压式 C 型独立液舱结构建造的小型 LNG 船, 可实现近海范围内的 LNG 运输。

(2) 小型 LNG 船液舱的蓄压时间是影响运输距离的主要因素之一, 与液舱的设计压力、绝热结构、液位高低和环境条件等因素有关。

(3) 本文通过模拟实验和理论计算分别得到了蓄压时间和压力之间的关系, 并利用上述结论对 LNG 的运输时间进行了预测, 进一步论证了小型 LNG 船在近海 (沿海) 运输的可能性, 对工程应用具有一定的指导意义。

(4) 小型 LNG 船液舱设计压力, 应根据运输距离, 液罐绝热结构的性能和航行区域内的环境条件来综合考虑。同时还必须考虑特殊情况下所需要的时间裕度。

## 参考文献

- [1] 顾安忠. LNG 科研攻关锁定六大创新主题 [J]. 深冷技术, 2009(2): 40-40
- [2] 汪顺华, 鲁雪生, 赵红霞. 低温容器的漏热分析与实验研究 [J]. 低温工程, 2001(6): 37-41
- [3] 谢高峰. 低温液体无损理论及实验研究 [D]. 兰州理工大学, 2006
- [4] 王贵仁, 陈叔平, 等. 低温容器的漏热分析与实验研究 [J]. 石油化工设备, 2007, 36(5): 20-22
- [5] Cryogenic vessels- Methods for performance evaluation of thermal insulation BSEN12213: 1998
- [6] 李雨康. LNG 船储罐保冷技术概述 [J]. 上海造船, 2002(2): 45-48
- [7] 徐烈, 孙恒, 等. 温度与充满率对低温容器无损贮存性能的影响 [J]. 化工学报, 2001, 52(10): 891-894

(上接 14 页)

数值模拟, 考察了交变流动中压力、速度相位差对阻力系数的影响。分析表明, 压力、速度相位确实对变截面处阻力损失有影响, 但随着非线性的增强, 非线性惯性力与粘性力产生的阻力特性对声场相位的依赖性逐渐减小, 且与来流速度逐渐趋于同相。强非线性情况下, 阻力特性对声场相位的不敏感意味着变截面处的阻力损失与声功输入的方向近乎无关, 这与稳定流动的情况不同。

## 参考文献

- [1] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [2] Swift G W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators. Sevier PA: ASA Publication, 2002
- [3] Artur J Jaworski, Mao Xiaolan, Mao Xueui et al. En2

trance effects in the channels of the parallel plate stack in oscillatory flow conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(3): 495-502

- [4] Shi Leij Yu Zh bin, Artur J Jaworski et al. Vortex Shedding at the End of Parallel-plate Thermoacoustic Stack in the Oscillatory Flow Conditions [C]. Pwaset 2009, 37: 766-773.
- [5] Shi Leij Yu Zh bin, Artur J Jaworski. Vortex shedding flow patterns and their transitions in oscillatory flows past parallel-plate thermoacoustic stacks [J]. Experimental Thermal and Fluid Science. In Press, Corrected Proof Available online 9 March 2010.
- [6] Yu Zh bin, Artur J Jaworski. Impact of acoustic impedance and flow resistance on the power output capacity of the regenerators in travelling-wave thermoacoustic engines [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(2): 350-359.