

二维混合层中不稳定波的共振干涉 和涡的卷并

钮珍南 诸乾康 俞达成 颜大椿
(北京大学力学系)

肖昌润 冯道堆
(海军工程学院) (中山大学)

摘要 本文对二维混合层中不稳定波的非线性增长和共振干涉过程进行研究,并分析它们与涡对卷并和湍流化过程的关系。

关键词 混合层、共振干涉、非线性增长。

1. 引言

二维混合层中的涡对卷并^[1,2]和 instability 波共振干涉^[3]对于混合层的转捩有重要影响,而涡对卷并和共振干涉的关系已有实验证明^[4]。但是,现有的理论分析多数从无粘性不稳定性理论出发,要想由此描述整个转捩过程是不可能的。为此,本文对混合层中涡对卷并和共振干涉进行研究,观察在整个转捩过程中每次涡对卷并和共振干涉的过程中湍流成分的增长规律。

2. 实验装置和仪器

实验所用的二维混合层装置中,气流分上下两股经二维收缩段后分别由 150mm × 15mm 的出口截面进入大气,在上下收缩段间留有 1mm 宽的窄缝,可引入 He 或 CO₂ 气体作示踪剂,供流动显示之用。两股气流在出口截面的速度比为 5。实验在高速端的出口速度为 7.7, 4.1 和 3.3 米/秒的条件下进行。平均流速和湍流特性的测量均用 BD-2 型热线测速系统。

在混合层装置的进气口一侧,装有 5W 中音喇叭。由信号发生器输出不同频率的信号,经功率放大器来控制输出信号的电功率到喇叭,对混合层的基频作声激励。

3. 混合层的基本流动特性

图 1 为不同风速和不同截面下测得的混合层中的平均风速剖面,高速端的平均风速为 U_1 , 低速端为 U_2 , $U_m = \frac{1}{2}(U_1 + U_2)$, L 为混合层各截面处的涡量厚度

$$L = (U_1 - U_2) / (dU/dx)_{\max}$$

本文 1987 年 9 月 24 日收到, 1988 年 6 月 17 日收到修改稿。

图中 $x_0 = 7.5\text{mm}$ 为坐标参考点。可以看到,从出口截面经过很短的形成段后,混合层中的

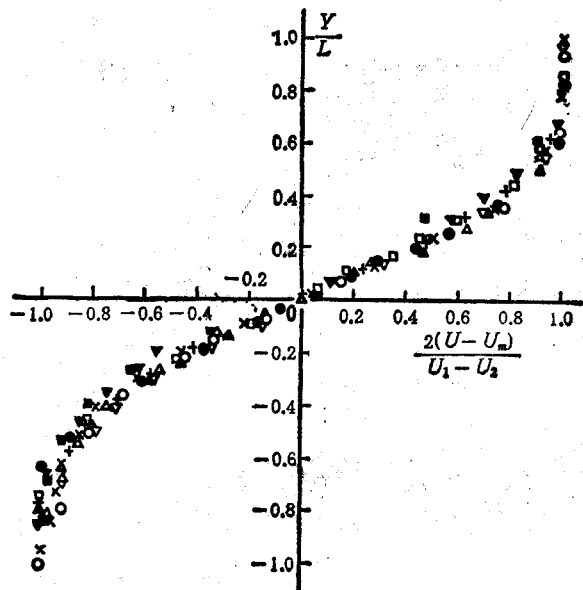


图1 混合层中的平均风速剖面

	$U_1(\text{m/s})$	$x - x_0(\text{mm})$	$F(H_z)$
×	3.3	25.0	0
+	3.3	32.5	0
○	3.3	41.5	0
●	3.3	46.5	0
△	7.7	23.5	0
▲	7.7	37.5	0
□	7.7	44.5	0
■	7.7	16.5	477
▽	7.7	31.5	477
▼	3.3	53.5	152

的速度剖面即具有良好的相似性,直到两侧自由边界与混合层交汇为止,实验结果和

$$\frac{U - U_m}{U_1 - U_2} = \frac{1}{2} \tanh \frac{\beta y}{L}$$

混合层中动量厚度的增长规律如图2。距出口截面23mm以内,动量厚度逐渐增长,最后稳定在0.4—0.5mm之间,速度剖面开始具有相似性。然后,动量厚度随 $(x - x_r)$ 作线性增长。在有声激励的条件下,形成段缩短,动量厚度的增长曲线略呈阶梯形。

4. 不稳定波的增长曲线和混合层中的涡对卷并规律

将热线探头从收缩段出口逐渐向下游方向移动,不断调节它在横向的位置使热线风速计输出电压所对应的平均风速始终等于 U_m , 输出的脉动电压经带通滤波器后由微计算机求得该频率下的脉动电压均方值及其沿流向的分布,它与该频率下不稳定波的振幅分布仅差一常数因子,由此得到各种频率下的不

稳定波增长曲线(图3),其中 Strouhal 数 $S = \frac{f\theta_m}{\Delta U}$, θ_m 为形成段的最大动量厚度, f 为

频率。图中 $S = 0.023, 0.012$ 和 0.006 分别为风速3.3米/秒时基波和第一、二亚谐波的特征频率的相应值,而 $S = 0.02$ 时的增长曲线具有最大增长率。为比较方便,将增长曲线起始点移到左下角。由曲线的斜率可求得不稳定波在线性增长区的增长率

$$\alpha_i = \frac{1}{u_m^2(f)} \frac{d u_m^2(f)}{dx}$$

图4为无量纲增长率 $\alpha_i \theta_m$ 与斯笃罗哈数的关系,图中实线为 Michalke 由无粘性不稳定性理论得到的计算曲线,与本实验相符^[5]。可以看到,从第一亚谐波开始,不稳定波的增长率随阶次的增长而迅速减小。

图5为风速4.1米/秒时测得的基波和第一亚谐波的增长曲线。基波增长曲线的最大值在距出口15mm处,第一亚谐波增长曲线的最大值在28mm处。由于收缩段之间有1mm狭缝,两股气流在出口下游2—5mm处才开始会合,与声反馈原理所预测的结果一

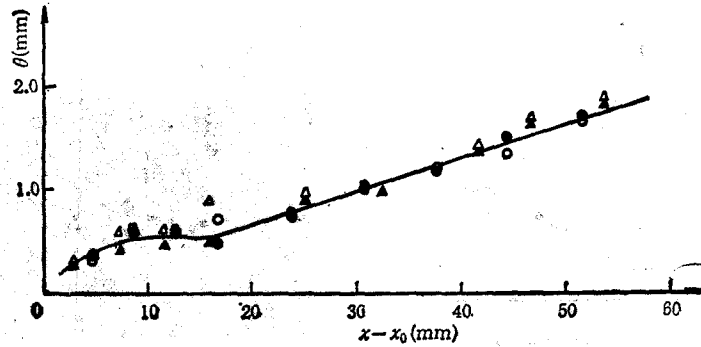


图 2 混合层中动量厚度的增长规律

	U_1 (m/s)	F (Hz)
●	7.9	0
○	7.9	475
▲	3.2	0
△	3.2	152

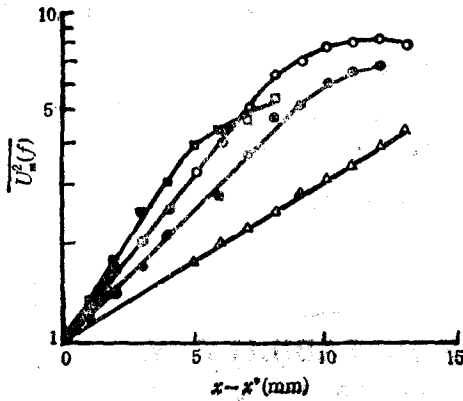


图 3 不同频率的不稳定波增长曲线

△	0.006
●	0.012
□	0.020
○	0.023

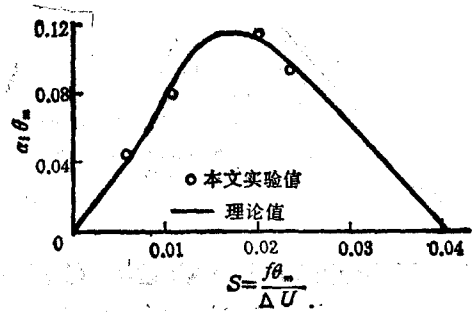


图 4 不稳定波空间增长率与频率的关系

致, 涡核生成和第一次卷并的位置与混合层起始点之间距离为一倍基波波长 $\lambda_1 \approx 13\text{mm}$ 和第一亚谐波波长 $\lambda_2 \approx 26\text{mm}$, 相应的对流速度为

$$U_c = \lambda f \approx 2.56 \text{ 米/秒}$$

与经验值 $U_c = (1.0 \sim 1.2)U_m$ 相符。

图 6 为风速 4.1 米/秒时以 CO_2 为示踪气体, 用纹影仪拍摄的照片。由于示踪气体流速较高 (0.5 米/秒), 三股气流的混合点后移, 但由混合点到涡核形成和第一、二次涡对卷并位置的距离与不稳定波增长曲线的最大值位置均能较为满意地相符。

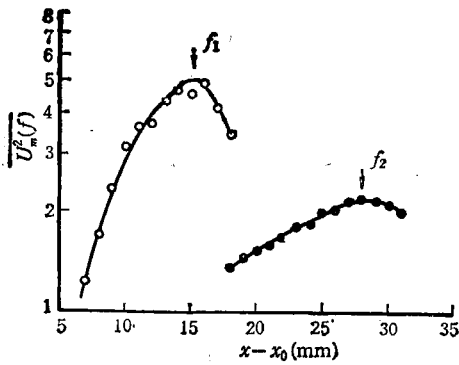


图5 基波和第一次谐波振幅 $\overline{u_r^2(f)}$ 沿 x 方向的分布, f_1 ——基频, f_2 ——第一次谐波。
 $u_1 = 4.1$ 米/秒 $f_1 = 237\text{Hz}$ $f_2 = 110\text{Hz}$

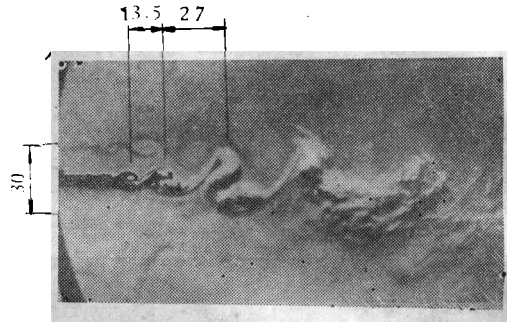


图6 混合层中涡对卷并的流动显示
 $U_1 = 4.1$ 米/秒

5. 结论

以上实验结果表明,在混合层中不稳定波的增长、发展和共振干涉与涡的形成、涡对卷并是两类相互依存而又相互独立的现象,在涡的形成和卷并过程中不稳定波的发展和共振干涉起着主要作用。

参 考 文 献

- [1] Brown, G. L. & Roshko, A., *J. Fluid Mech.*, **64** (1974), 775—816.
- [2] Winant, C. D. & Browand, F. K., *J. Fluid Mech.*, **63**(1974), 237—255.
- [3] Kelly, R. E., *J. Fluid Mech.*, **27** (1967), 657—689.
- [4] Laufer, J. & Monkewitz, P., *AIAA Paper* 80—0962, June, (1980).
- [5] Michalke, A., *J. Fluid Mech.*, **23** (1965), 521—544.
- [6] 颜大椿, *力学学报*, **18**(1986), 502—508.

RESONANT INTERACTIONS OF INSTABILITY WAVE AND EDDY-PAIRING PHENOMENA IN A TWO- DIMENSIONAL MIXING LAYER

Niu Zhennan, Zhu Qiankang, Yu Dacheng, Yan Dachun
 (Department of Mechanics, Peking University)

Xiao Changrun Feng Daodui
 (Institute of Naval Engineering) (Zhongshan University)

Abstract Nonlinear growth and resonant interaction in a two-dimensional mixing layer are observed, to analyse their effects on vortex-pairings and transition.

Key words mixing layer, resonant in teraction, nonlinear growth