

# 凹腔对超声速边界层转捩过程影响研究



冯 烁<sup>1,2</sup>, 王伯福<sup>1</sup>, 涂国华<sup>2</sup>, 武健辉<sup>3</sup>, 陈坚强<sup>2</sup>, 杨 强<sup>2,\*</sup>

(1. 上海大学 力学与工程科学学院/上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072

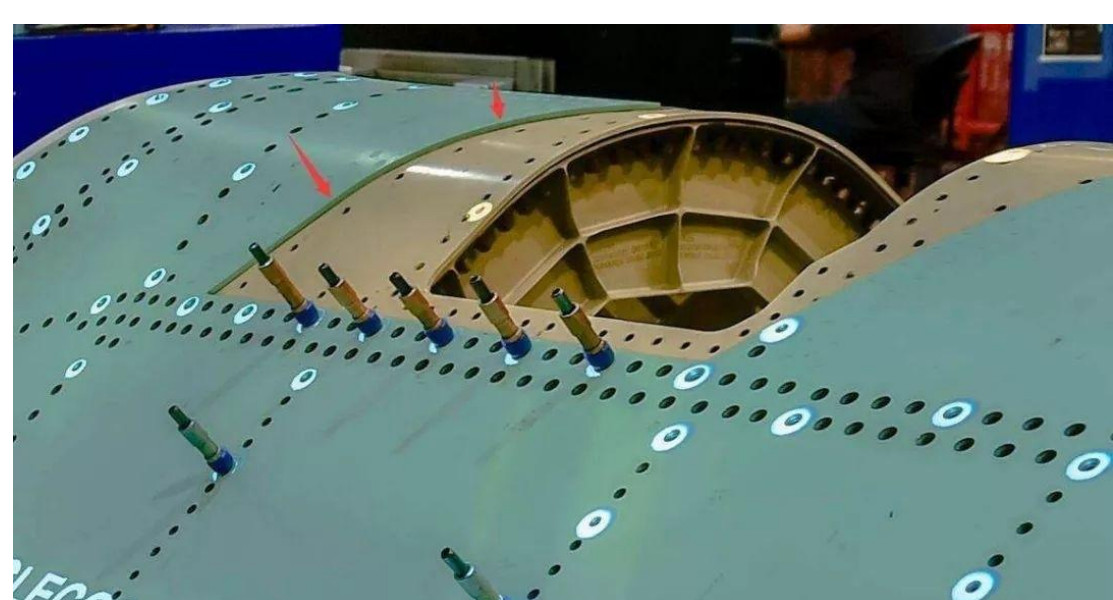
2. 空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000

3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

ifshuo@outlook.com; qiang.yang@skla.cardc.cn

## 介绍

凹腔广泛地存在于航空航天飞行器表面, 如部件安装缝隙、高温烧蚀剥离、防护涂层材料等, 对边界层转捩过程具有重要影响, 是飞行器气动设计需要重点考虑的因素之一。

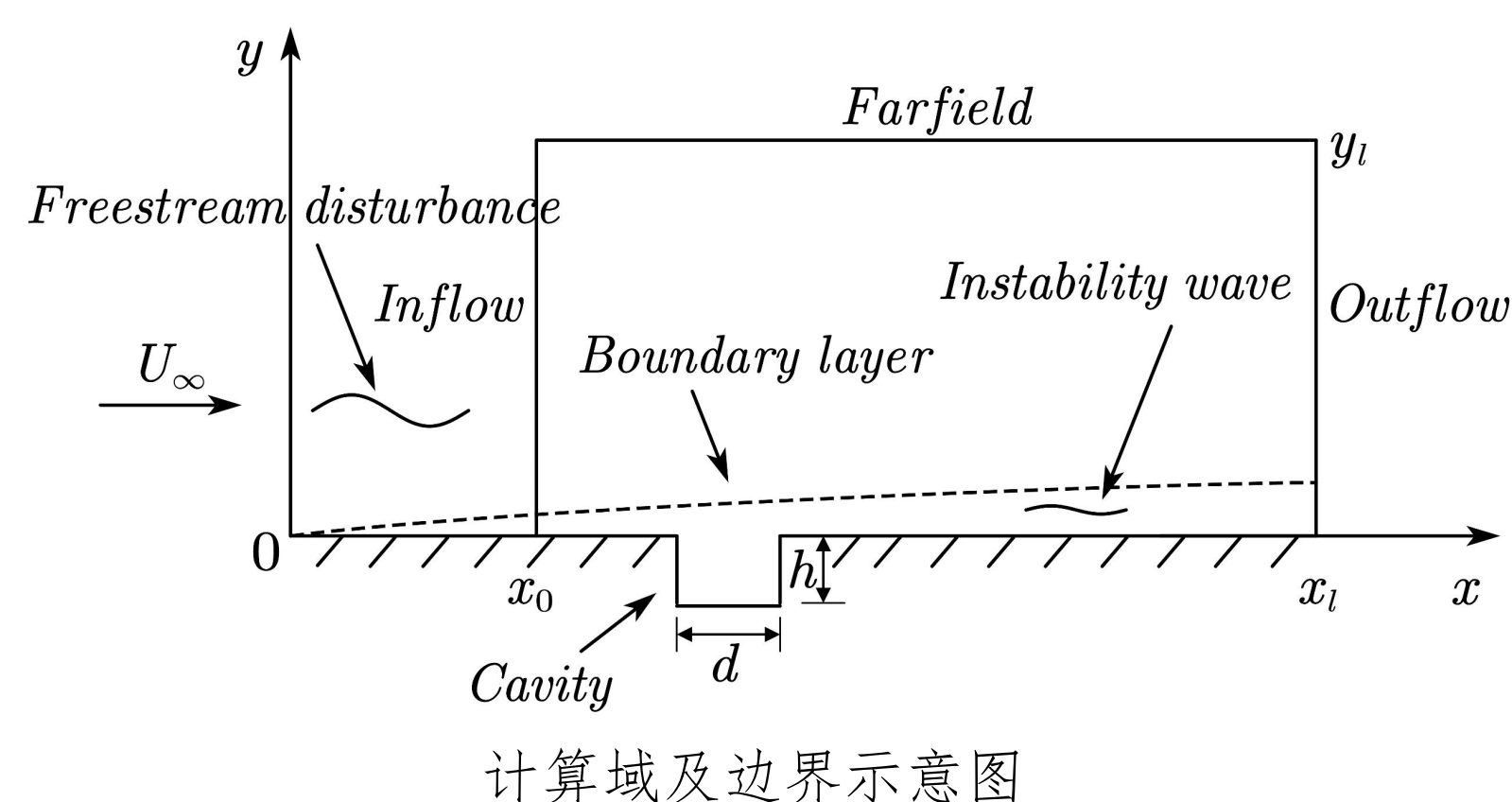


飞行器表面装配孔洞(来源互联网)

## 研究目标

研究了高超声速 ( $Ma=5.92$ ) 和超声速 ( $Ma=1.38$ ) 边界层内扰动波经过凹腔的演化过程, 根据流动固有不稳定性和响应, 更好地了解表面气动设计与热防护策略。

## 物理模型及计算方法



计算域及边界示意图

### 线性稳定性理论LST

$$q(x, y, t) = \hat{q}(y) e^{i(\alpha x - \omega t)} + c.c.$$

### 抛物化稳定性方程PSE

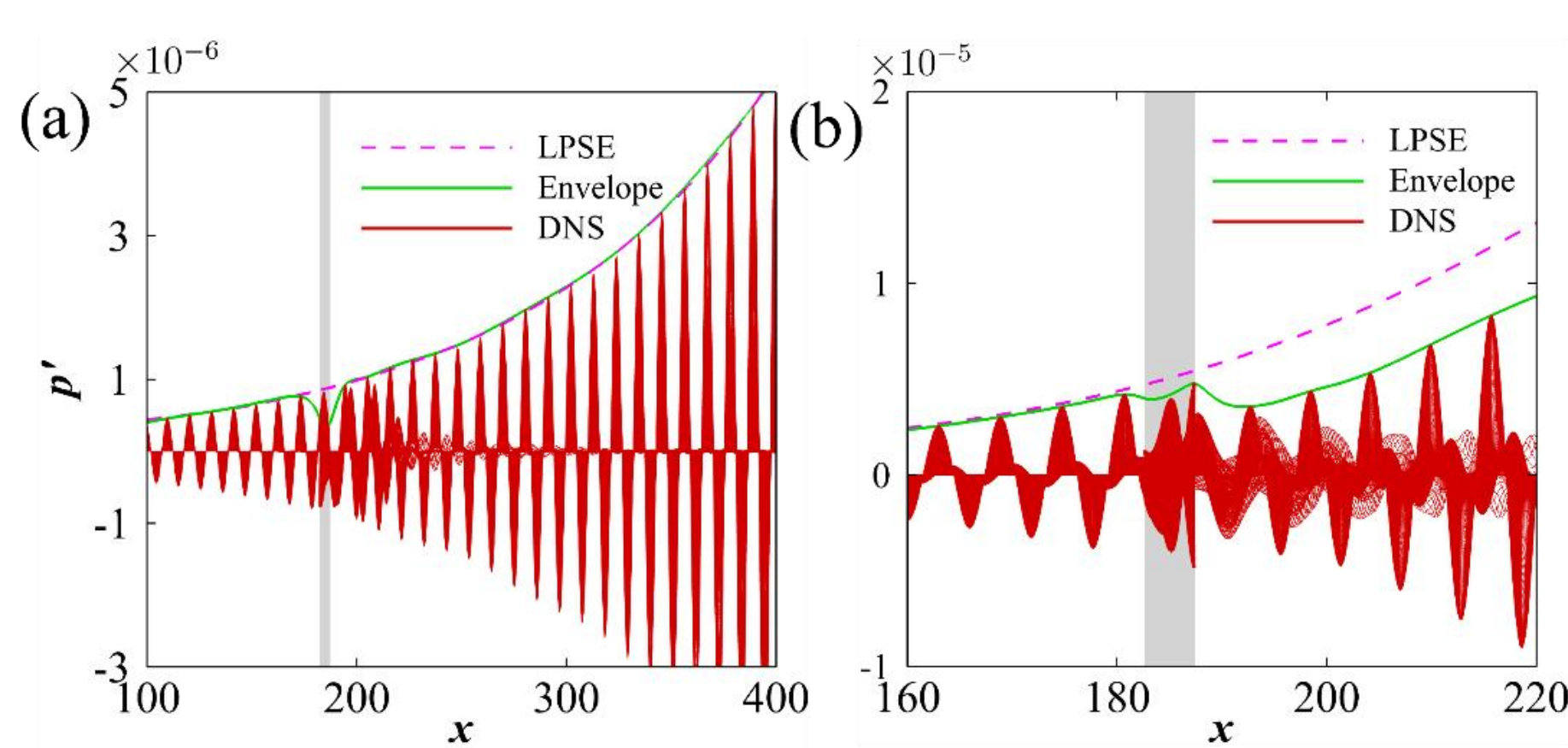
$$q(x, y, t) = \hat{q}(X, y) e^{i\left(\int_0^X \alpha(\xi) d\xi - \omega t\right)} + c.c.$$

### 全局稳定性分解GSD

$$\mathbf{BU}_m = [\mathbf{u}'_1(t_0 + \Delta t), \mathbf{u}'_2(t_0 + \Delta t), \dots, \mathbf{u}'_m(t_0 + \Delta t)]$$

### 高精度直接数值模拟DNS

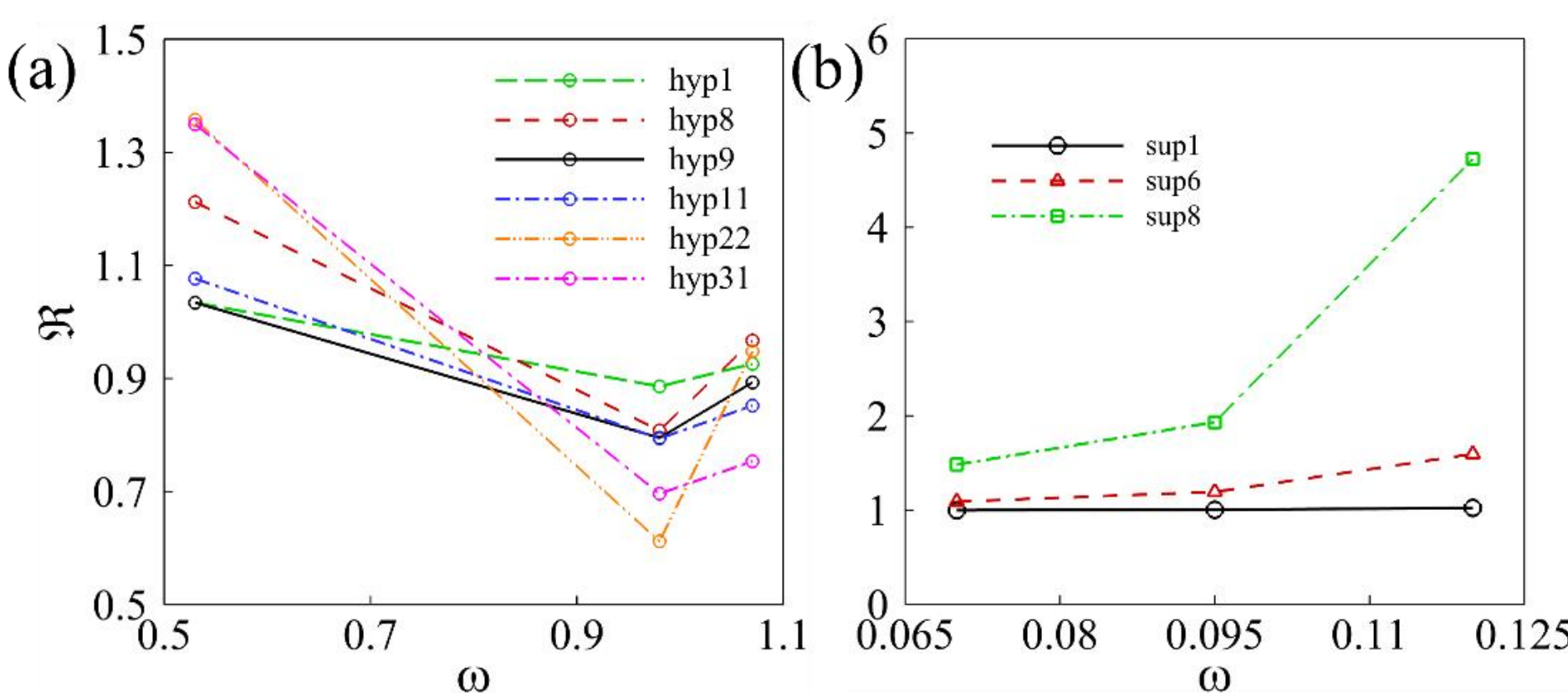
## 凹腔位置对转捩过程影响



$Ma=5.92$  压力脉动幅值演化: (a)  $\omega=0.53$ , (b)  $\omega=0.98$

$$\mathfrak{R} = \frac{A_p(x_f)}{A_{0,p}(x_f)}$$

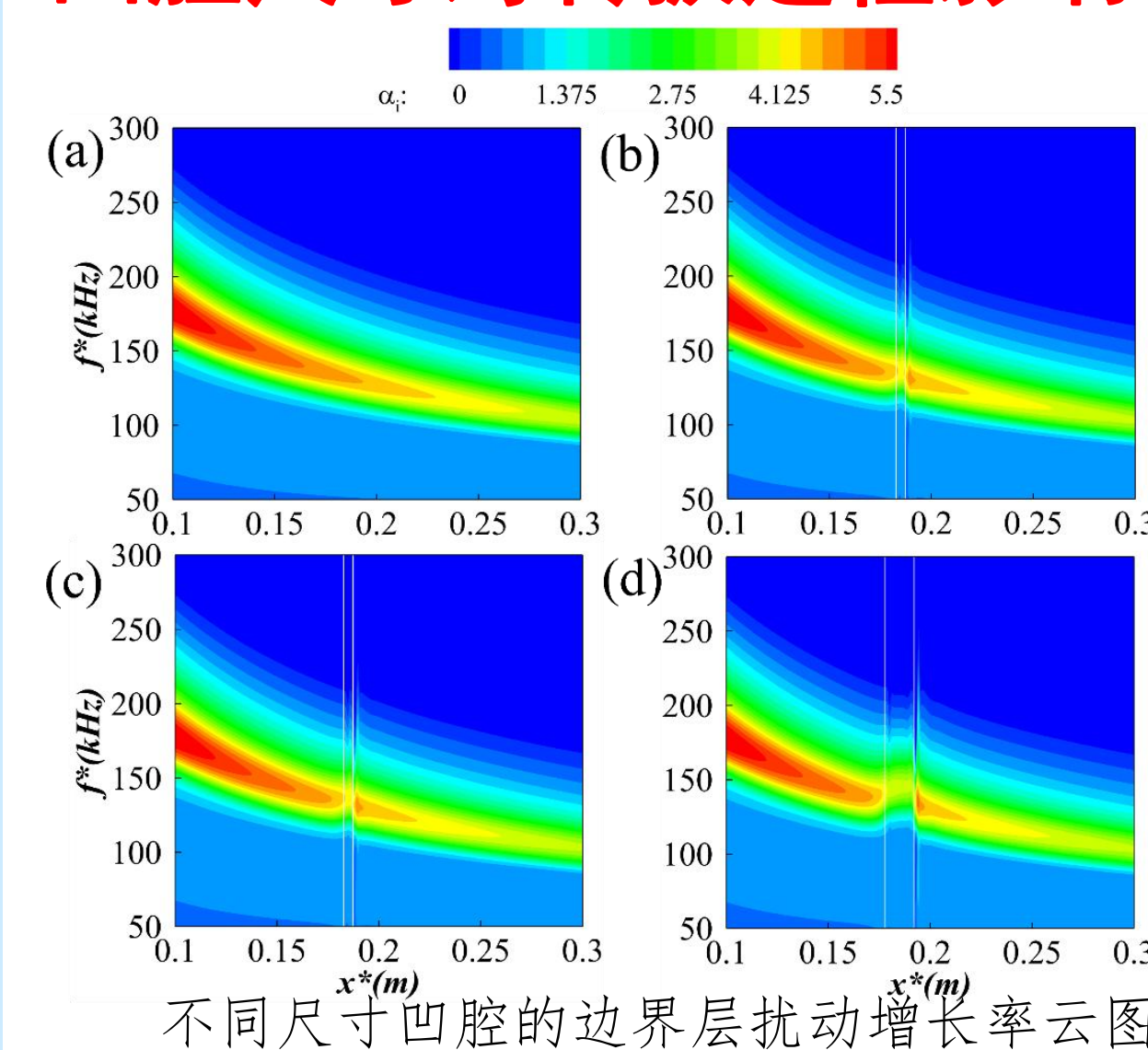
引入 Wu(JFM, 2016) 等人定义的透射系数, 来定量描述凹腔对扰动波和转换过程的影响。



凹腔对扰动波修正系数随扰动波频率的变化: (a)  $Ma=5.92$ , (b)  $Ma=1.38$

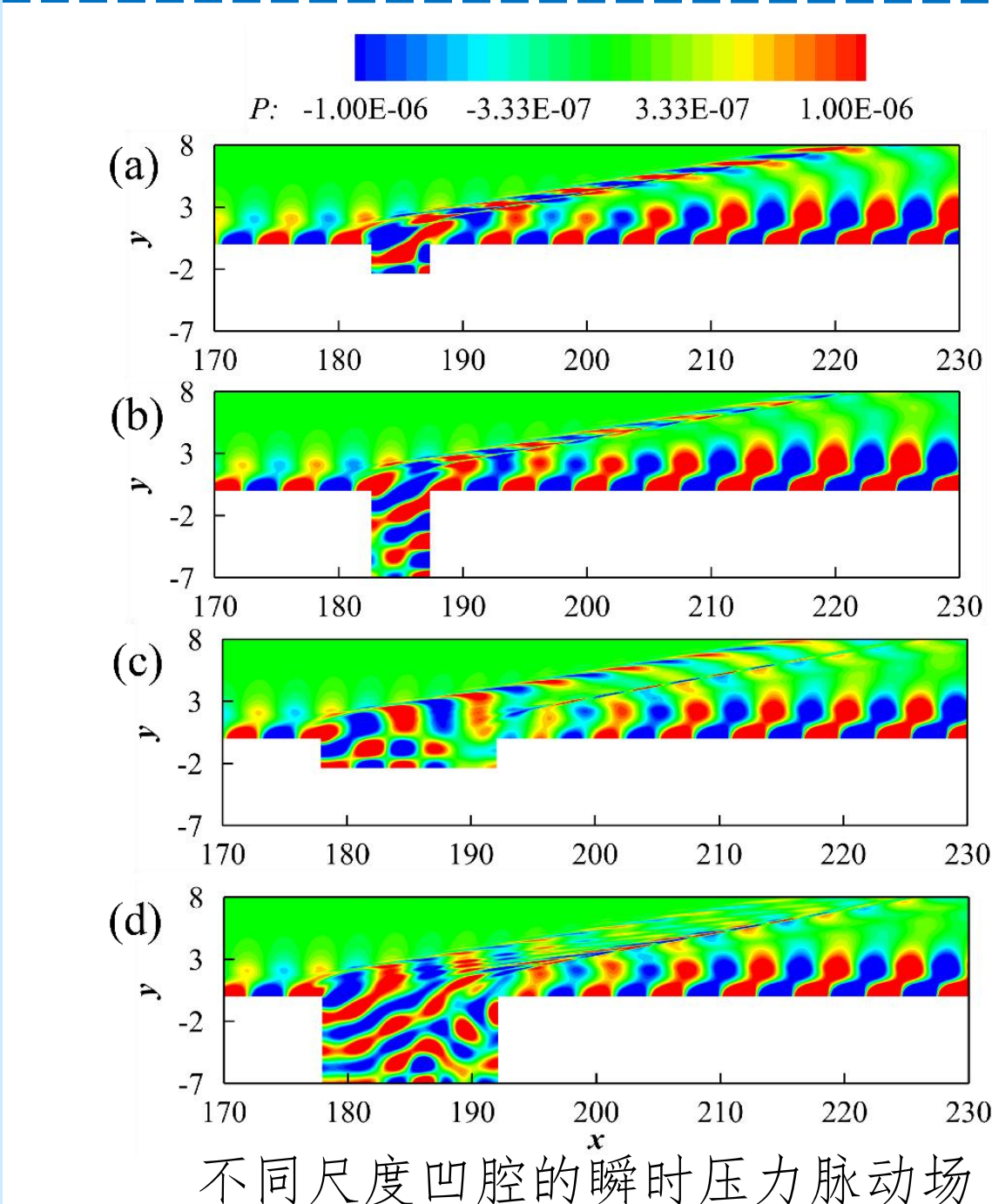
在高超声速情况下同步点附近频率抑制效果最好

## 凹腔尺寸对转捩过程影响—高超声速



不同尺寸凹腔的边界层扰动增长率云图

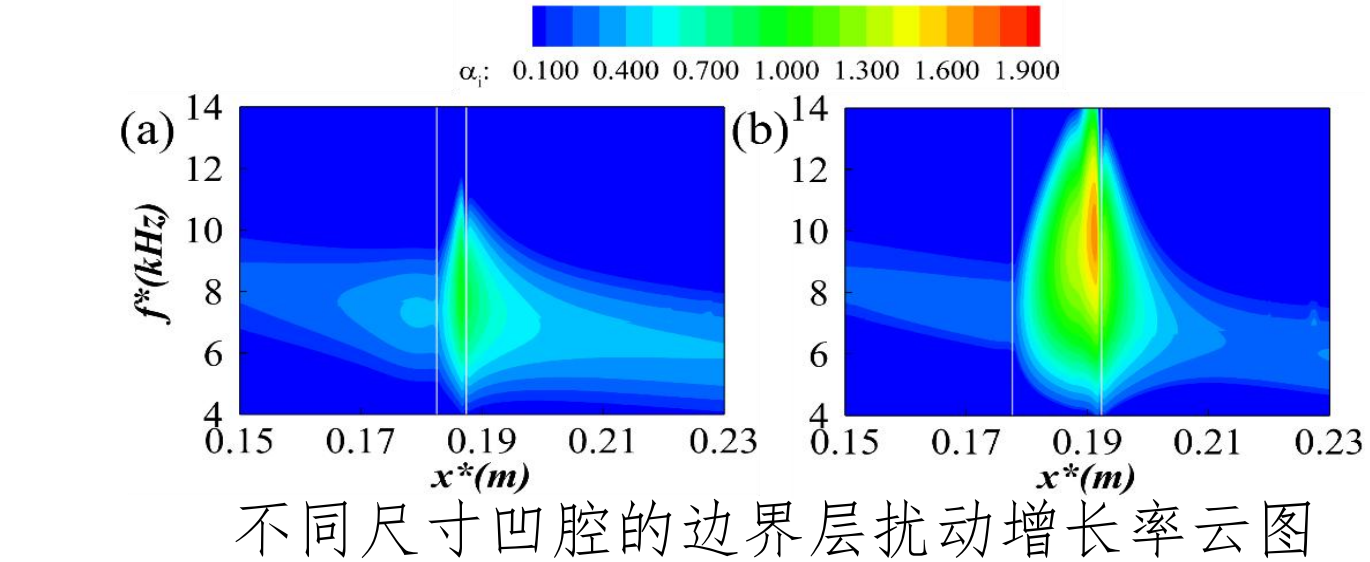
凹腔对于增长率的影响较为局部, 且大尺度凹腔的局部影响更为显著, 但增长率在凹腔下游均重新恢复到指数增长形式。



不同尺度凹腔的瞬时压力脉动场

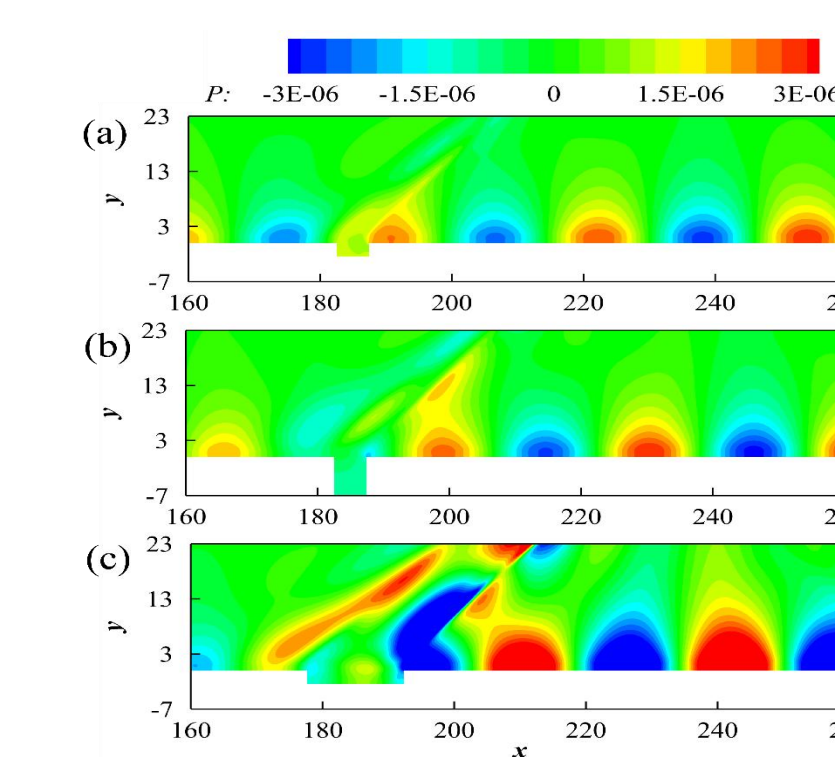
扰动波在凹腔的前缘被拉伸, 后缘则被压缩, 并沿凹腔底部法向形成反射波。

## 凹腔尺寸对转捩过程影响—超声速



不同尺寸凹腔的边界层扰动增长率云图

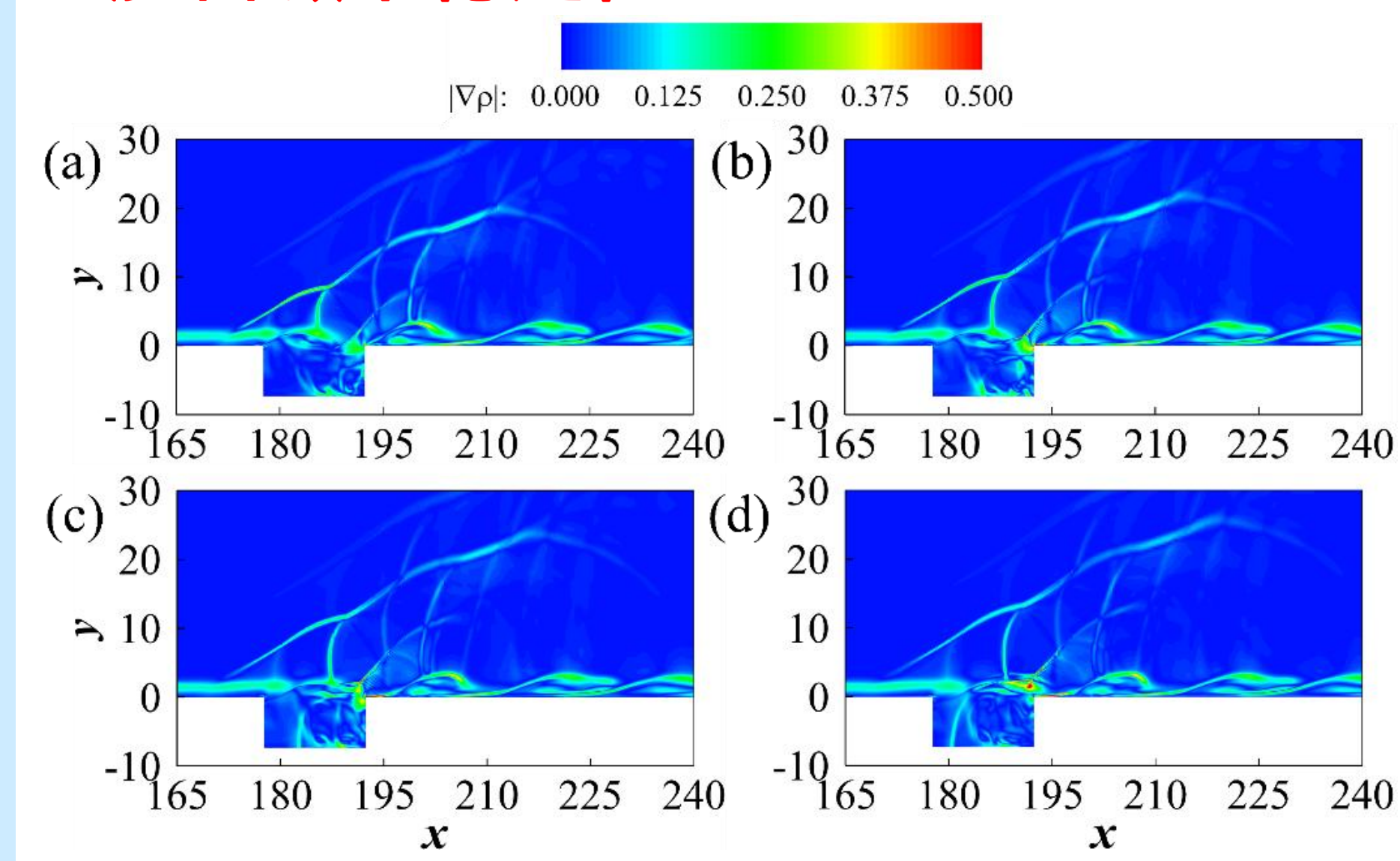
局部促进作用明显



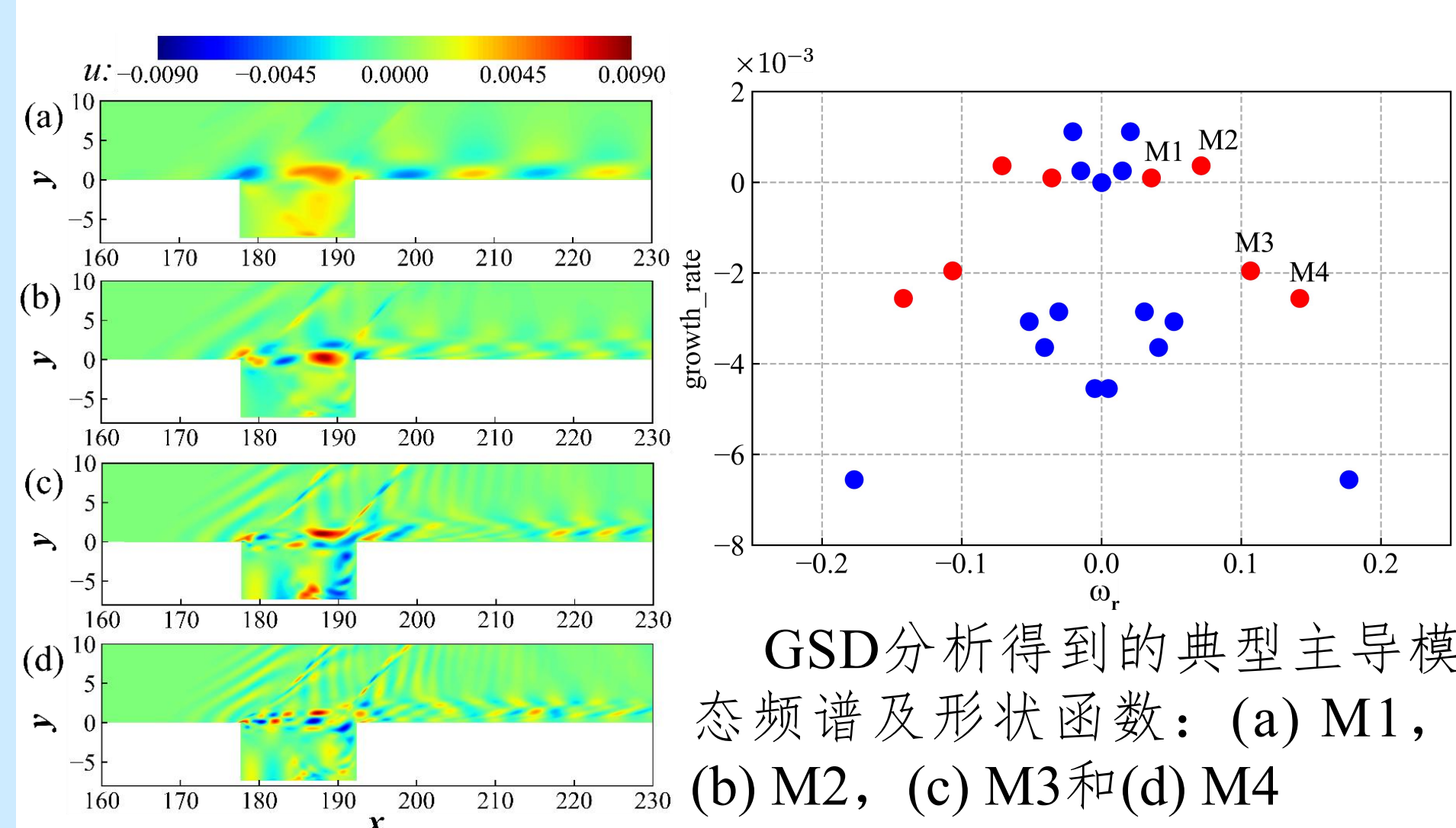
不同尺度凹腔的瞬时压力脉动场

相对于深度的增加, 宽度的改变对下游边界层扰动传播影响更大。

## 凹腔自激不稳定性

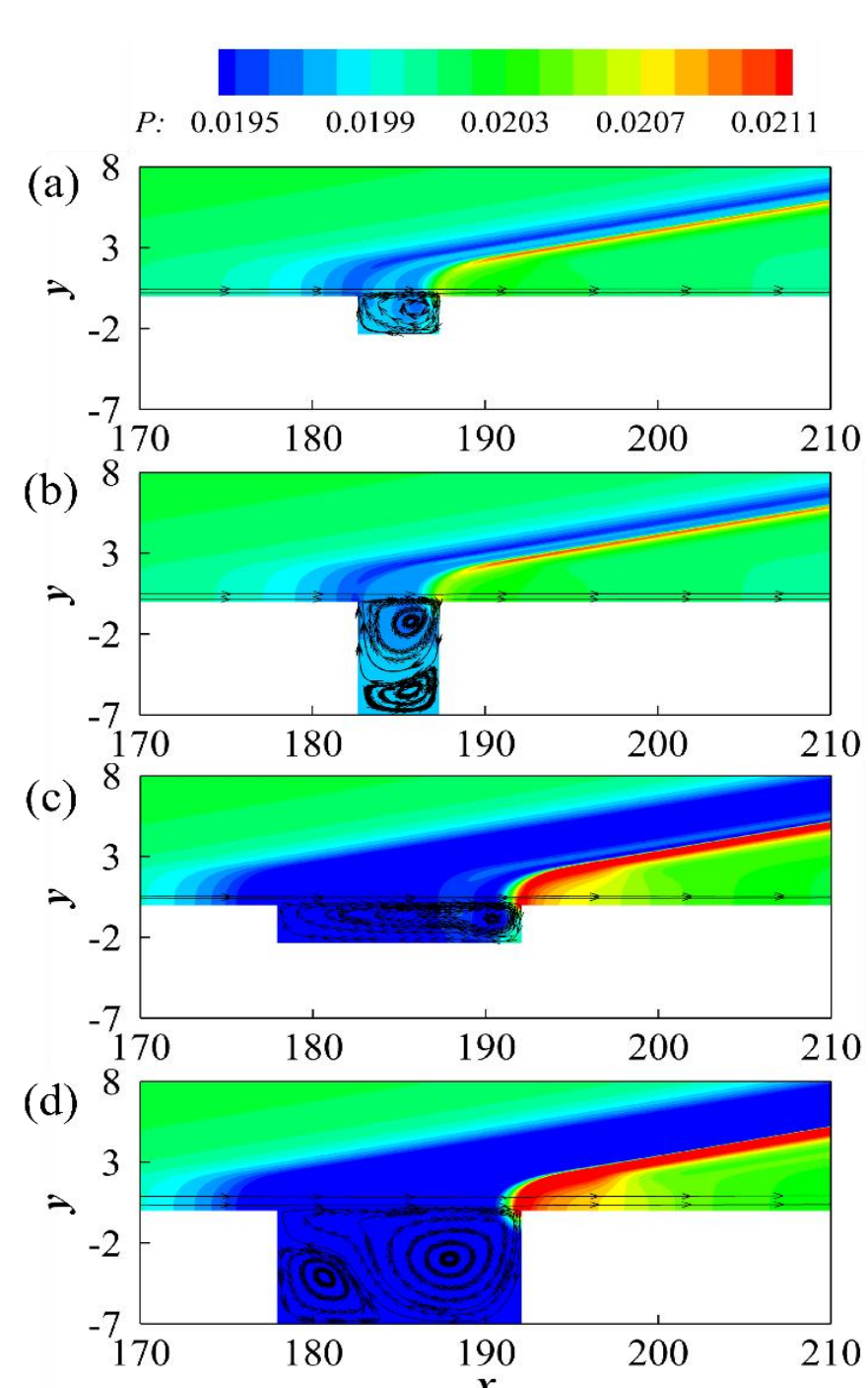


非正常基本流不同时刻  $|\nabla \rho|$



GSD分析得到的典型主导模态频谱及形状函数: (a) M1, (b) M2, (c) M3和(d) M4

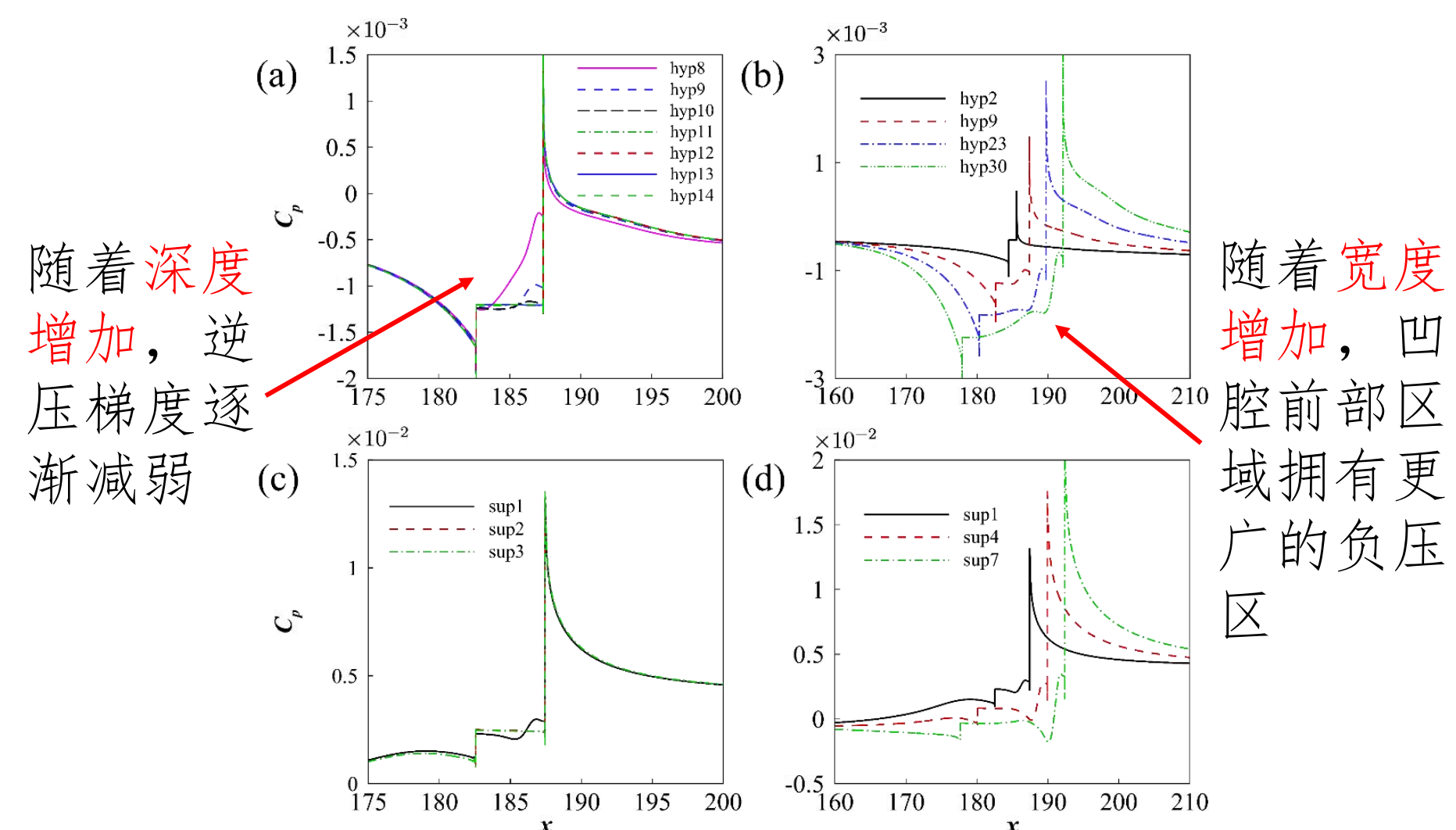
## 基本流特征



不同凹腔压力云图及流线图

凹腔前缘出现膨胀波系, 而在后缘出现压缩波系, 且二者均随凹腔尺度的增加而增强。

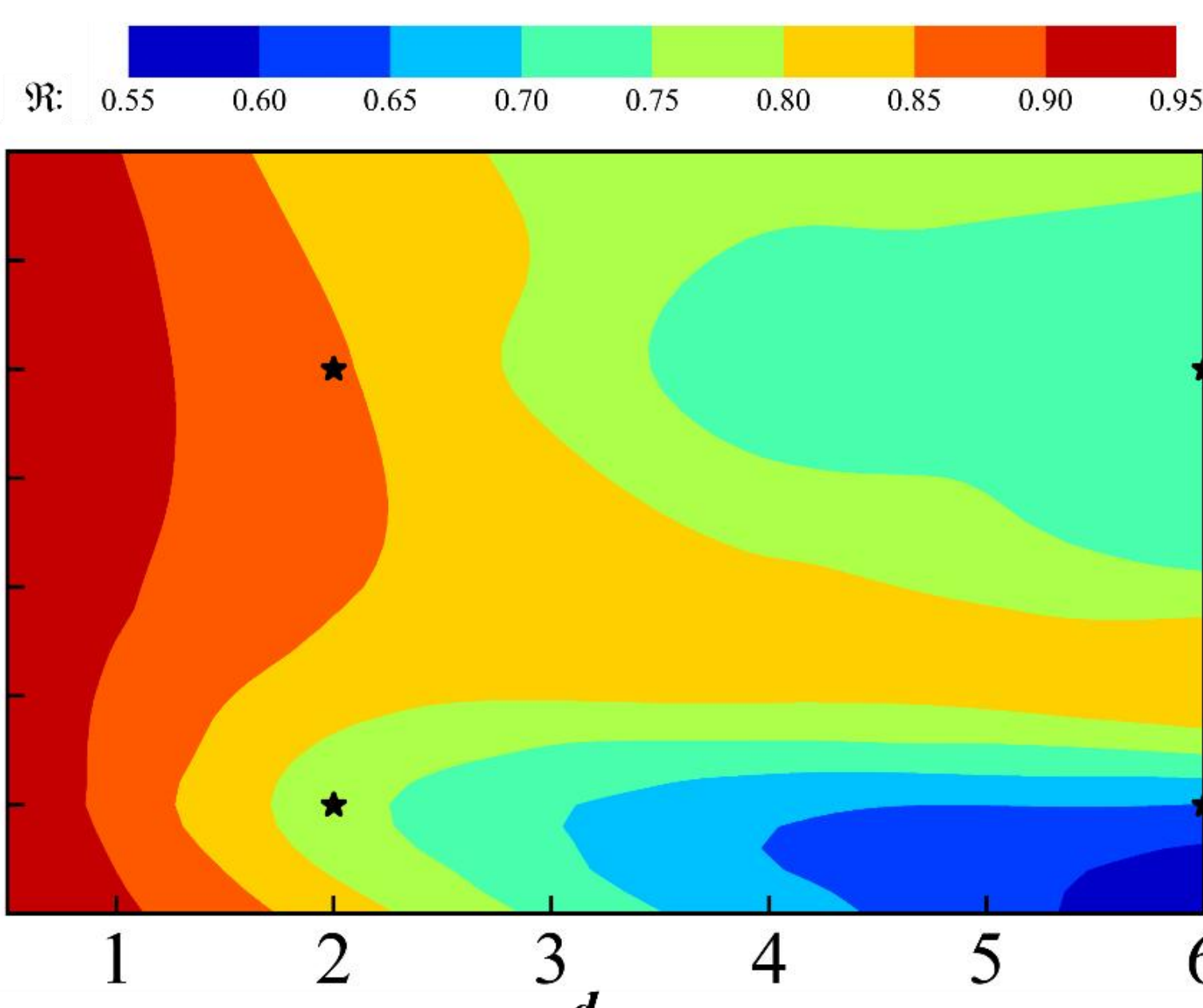
深度增加: 出现角涡;  
宽度增加: 主涡结构被拉长, 后缘涡强度高于前缘涡强度;



变深度和变宽度凹腔壁面压力系数  $C_p$  对比: (a, b)  $Ma=5.92$ , (c, d)  $Ma=1.38$

随着深度增加, 逆压梯度逐渐减弱

随着宽度增加, 凹腔前部区域拥有更广的负压区



不同尺寸凹腔透射系数云图  
可以直观看出宽浅腔抑制效果更明显。

## 结论

高超情况下, 当凹腔位于同步点上游时会促进扰动发展, 位于同步点附近或下游时则起到了抑制作用。

- 增大宽度时, 扰动波抑制效果逐渐增强;
- 增加深度时, 扰动波抑制效果呈现非单调变化;
- 超声速情况下, 凹腔在扰动波不稳定区内一直起促进作用。
- 增大宽度时, 凹腔对扰动波促进作用逐渐增强;
- 腔体本身自激振荡激发出非正常不稳定波, 给凹腔下游边界层引入新的转捩途径;

## 致谢

国家自然科学基金 (11972220; 92052301; 12272395)