

边界层控制转换研究的新结果 ——流场测量和流动显示

李存标^{1), 2)} 洪钟祥¹⁾

1) (中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

2) (北京大学国家湍流实验室, 北京 100871)

Kachanov, Y. S., Borodulin, V. I., Gaponenko, V. V.

(俄罗斯科学院理论和应用力学所, 新西伯利亚市 630090)

摘要 给出边界层转换研究的一些结果, 这些结果包括实验观察到一个 Λ 结构中会出现 4~5 个小旋涡; Λ 结构 (又称 Λ 涡) 是完整的蝴蝶型结构的一部分。孤立波结构存在于 Λ 结构的中心。

关键词 系列涡环 转换 孤生子

1 引言

科学家们对转换问题一直兴趣不减。最近的进展可见 Kachanov^[1]、周恒^[2]的文章。Borodulin 和 Kachanov 用带相位的测量技术给转换研究带来一系列新的结果和新的理解^[1]。李存标^[3]最近对近年来转换研究特别是对 Kachanov 的工作进行评述认为 Kachanov 的工作最重要的问题是找不到湍流斑的论述而实际上湍流斑存在。另一个重要问题是时间序列仅表现波动性, 光从热线测量结果来重构流场结构很难区别流动结构性质。本文用带相位热膜测量和流动显示相结合研究控制转换的流场结构。

2 实验方法

实验在北京大学国家湍流实验室新建的低湍流度水槽中完成。实验模型为前缘是半圆柱型的平板, 离前缘 20 cm 开一条长 15 cm, 宽 1 mm 缝。工作面背后有一水腔连接缝和胶皮管, 胶皮管连接一柱型容器, 容器顶部连接 30 W 喇叭。用网谱分析仪作信号源激励喇叭。信号频率为 2 Hz。这样产生稳定的近似二维的 T-S 波。实验时主流速度为 17 cm。测量用日本产 Kanomax 热线风速仪和美国产 TSI 热膜探针, 采集用网谱分析仪和计算机。实验时测量到自由流湍流度小于 0.3%, 测量方法同 Kachanov^[1], 流动显示方法同 Kline^[4]。

1997-08-08 收到, 1998-02-17 收到修改稿

* 本文得到国家自然科学基金、俄罗斯基础研究 (BFBR, No. 96-01-001C)、王宽诚教育基金会卢嘉锡基金资助, 还得到中国博士后基金资助

3 实验结果

在无控制扰动情况下流场边界层速度型如图 1 所示，和 Blasius 理论值相比，最大误差不大于 1%。

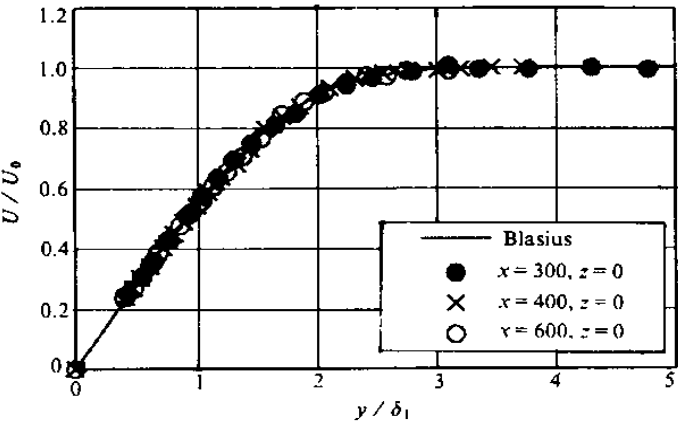


图 1 Blasius 速度型

典型的 T-S 波的波长约为 5 cm。图 2 给出典型的 Λ 结构及其演化，这是传统的 K 型转换的基本图画， Λ 结构演化到下游变成湍流。如果将氢气泡线放置稍低一点，就会观察到 Λ 结构中间有一结构（图 3），再将氢气泡线放低一点，就会发现蝶状结构（图 4），也就是说 Λ 结构的中心存在着新的结构。这和传统的 K 型转换已报道的结果是不一样的，过去



图 2 典型的 Λ 结构
(流动从左向右，比例 1:2，起始的氢气泡线处 $x=350\text{ mm}$ ， $y=1.5\text{ mm}$)

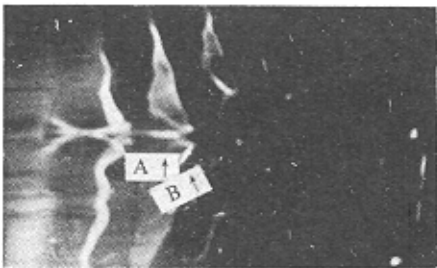


图 3 Λ 结构 (B $\uparrow$) 和孤立子 (A $\uparrow$) 共存
(比例 1:5， x 从 300 mm 起， $y=1.0\text{ mm}$)

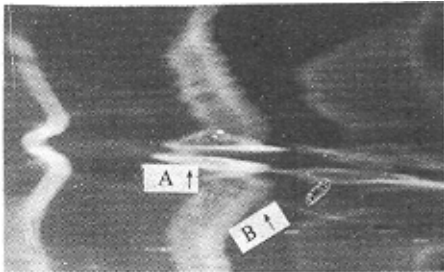


图 4 Butterfly-like 结构形成 (箭头 A 为孤立子，箭头 B 为 Λ 结构) (比例 1:3， x 从 350 mm 起， $y=1.0\text{ mm}$)

的结果和图 2 定性一致。进一步放低氢气泡线的位置, 可发现慢斑的形成, 除此之外在“peak position”处有一长条带存在 (图 5), 图 5a 中, A 箭头指向慢斑, B 箭头指向长条带, 向下游观察会发现长条带的两边有半棱型结构存在。这表明从转换开始到转换后期流场中存在着 CS-孤立子 (图 3、4 中箭头 A) 这些结构具有波的特征并且是周期性的。慢斑和 Λ 结构形成完整的涡环。

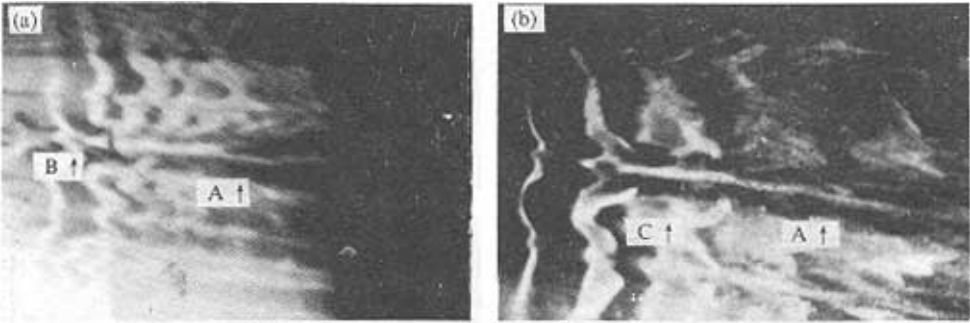


图 5 慢速区形成和长条带形成
(a) 长条带 (A ↑) 和慢斑 (B ↑) 形成 (比例 1:5, x 从 300 mm 起, $y=0.5$ mm);
(b) 半棱型结构 (C ↑) 和长条带形成 (A ↑) (比例 1:5, x 从 430 mm 起, $y=0.5$ mm)

图 6 给出系列的小涡旋从 Λ 结构的头分离出来, 这些小涡旋之间距离约为 1.0 cm, 一个 Λ 结构对应一系列 (4~5 个) 小旋涡 (箭头 1、2、3)。Kachanov 认为这些小旋涡是 Λ 结构头部多次分离失稳产生的。

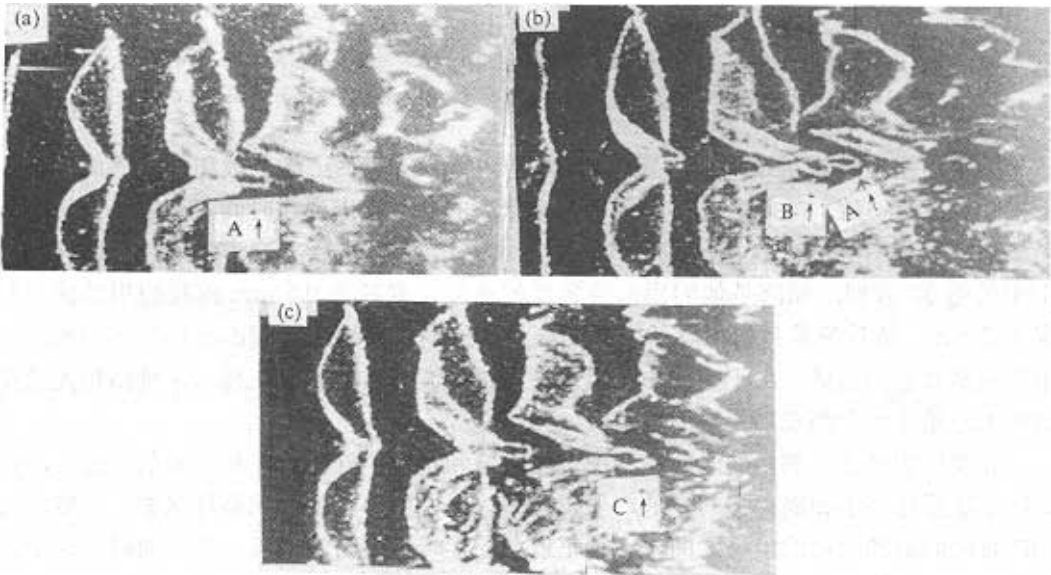


图 6 系列小涡旋形成 (比例 1:2.7, x 从 430 mm 起, $y=1.0$ mm)
(a) 第 1 个小旋涡形成 (1 ↑) ($t=0$ s); (b) 第 2 个小旋涡形成 (2 ↑) ($t=0.125$ s);
(c) 第 3 个小旋涡形成 (3 ↑) ($t=0.375$ s)

图 7 给出了这些小漩涡中第一个小漩涡是从 Λ 结构中间本文第一作者称之为孤立波 (Solitary wave) 的结构中失稳产生出来的, 进一步, 本文作者认为第 2、3、4 和 5 个小漩涡也是孤立波的边界失稳产生的。Kachanov 实际上是认为这些小漩涡是孤生子^[1], 这和文献[3]的结果不一样, 详细讨论见该文。

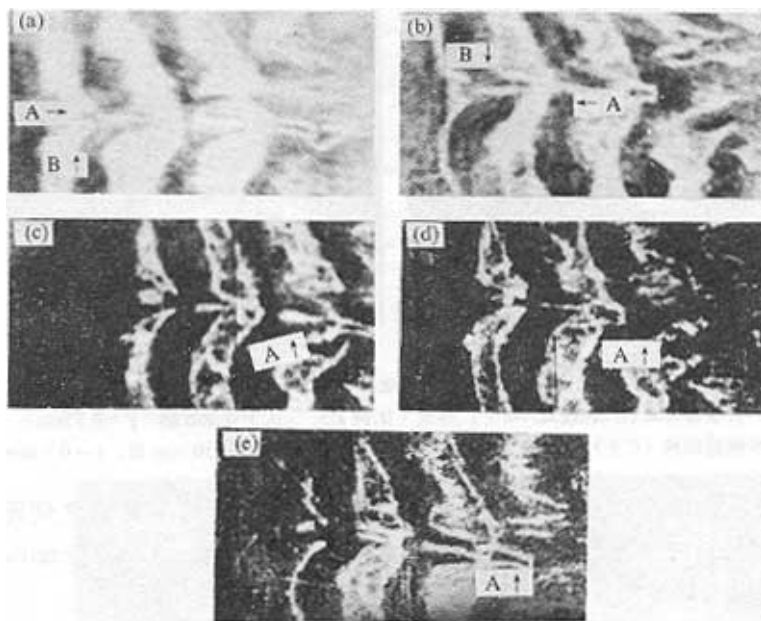


图 7 小涡旋形成过程

由于是周期性的, 又由于这时 Λ 结构 ($C \uparrow$) 的头部不完整, 小漩涡头部 ($B \uparrow$)
(比例 1:4) 从 Λ 结构中心位置 CS-孤生子处 ($A \uparrow$) 开始产生直至 Λ 结构下游

图 8 给出定量测量结果。结果表明正、负尘峰 (spikes) 的个数和小漩涡的个数加上上述涡环总数一致。除此之外, 一个垂直于壁面的孤立波出现在时间序列上 (这里指扰动幅值最大处所处的 x, z 位置对不同的 y 值基本上相同), 实际上这个结果也可以在文献 [1] 中的图 30 看到。原因是他们用的传感器的感应长度约为 0.5 mm 而我们用的感应长度为 2 mm。故现测量到的尘峰的幅值要比他们的测量结果小, 因而在原先的时间序列中如不是有意识的话, 由于尘峰幅值很难发现这种波动结构的存在性。这种结构无论是测量上还是显示上都表现相当的稳定性。

需要说明的是, 测量的时间序列中正的尘峰和负的尘峰出现在孤立子的界面上, 这些除了证明这些小漩涡存在同样的产生机理外, 还说明小尺度漩涡是环状的。小漩涡之间的时间间隔和测量的尘峰之间 (无论正或负的尘峰) 的时间间隔一致。同时也说明这些小漩涡不是直接从 Λ 结构头部分离出来的。如果是从 Λ 结构头部分离出来, 那么就不可能出现尘峰对 (一个正的和一個负的尘峰组成)。

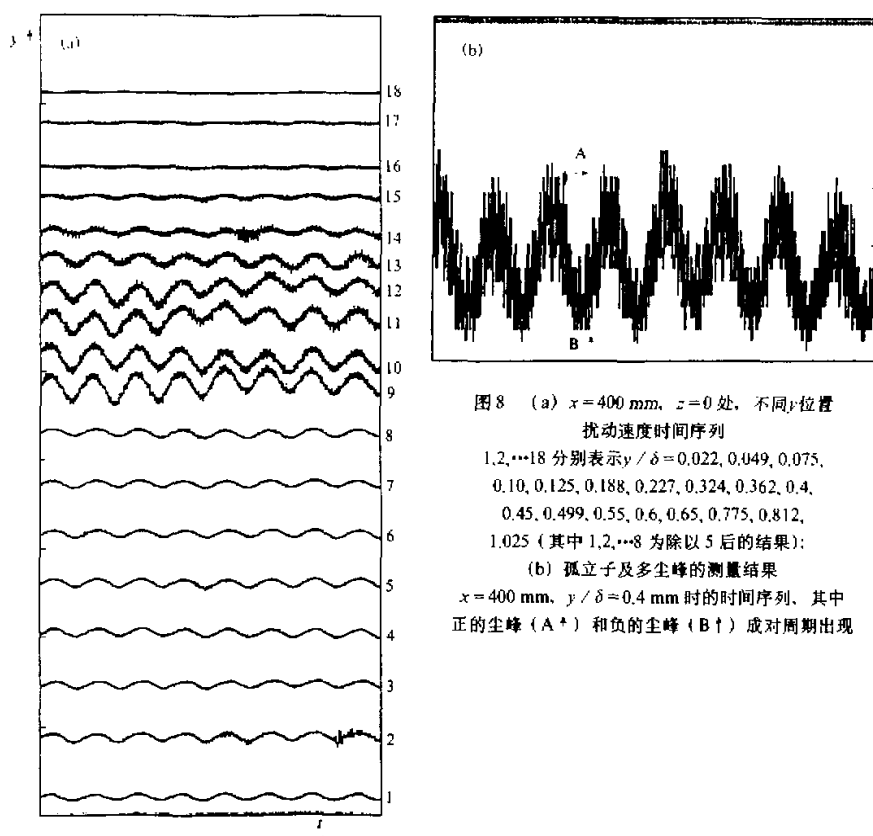


图8 (a) $x=400\text{ mm}$, $z=0$ 处, 不同 y 位置
扰动速度时间序列

1, 2, ..., 18 分别表示 $y/\delta = 0.022, 0.049, 0.075,$
 $0.10, 0.125, 0.188, 0.227, 0.324, 0.362, 0.4,$
 $0.45, 0.499, 0.55, 0.6, 0.65, 0.775, 0.812,$
 1.025 (其中 1, 2, ..., 8 为除以 5 后的结果);

(b) 孤立子及多尘峰的测量结果

$x=400\text{ mm}$, $y/\delta=0.4\text{ mm}$ 时的时间序列, 其中
 正的生峰 (A) 和负的生峰 (B) 成对周期出现

4 结论

至此, 我们观察到一个 Λ 结构中会出现 4~5 个小尺度的旋涡, 这些小尺度的旋涡和大尺度的孤立子以及 Λ 结构本身都会产生尘峰。定量和定性结果证明其存在性; 小旋涡是孤立子边界多次失稳产生的。至此, 我们能解释文献[1]中图 30 测量得到的接近充分发展湍流中的多尘峰的性质。不仅如此, 我们还可以解释接近充分发展湍流的结构中原先认为是随机的多尘峰不是随机而是周期性。另外, 多次失稳产生小旋涡系列 (Kachanov 称之为 ring-like vortices) 为湍流产生和认识湍流的性质提供了新的证据。

致谢: 感谢北京大学国家湍流实验室主任魏庆鼎教授、张伯寅教授、组珍南教授、杜向东同志、王雅丽同志。感谢冯小燕同志、时玉亭同志的帮助, 同时作者还要感谢国家自然科学基金委员会的靳征谋教授、中国科学院大气物理研究所赵松年教授, 本文第一作者还要感谢 Kachanov, Y. S. 教授多年来合作和帮助。

参 考 文 献

- 1 Kachanov, Y. S., 1994, Physical mechanism of laminar-boundary-layer transition, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **26**, 411~482.
- 2 周恒, 1994, 湍流, 天津: 天津大学出版社, 1~30.
- 3 李存标, 1998, 转换和湍流研究最新进展, 流体力学测量和实验, **12**(1), 8~28.
- 4 Kline, S. J. et al., 1967, The structure of turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **30**, 41~73.

New Results in a Study of Controlled Transitional Boundary Layers

Li Cunbiao^{1), 2)} and Hong Zhongxiang¹⁾

1) (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

2) (State Key Laboratory of Turbulence Research, Peking University, Beijing 100871)

Kachanov, Y. S., Borodulin, V. I., Goponenko, V. V.

(Institute of Theoretical & Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia)

Abstract Some new results are given in the present paper in a study of controlled transition. Besides a Λ -structure, a set of ring-like vortices and solitary waves are found to be associated with the formation of the Λ -structures. The Λ -structure is considered as part of the butterfly-like structure.

Key words transition set of ring-like vortices soliton