

湍流边界层中马蹄形涡的形成方式

李克文 连洪祥

(北京航空航天大学流体所, 北京, 100083)

摘要 本文使用一种新的流动显示方法——激光片光运动法和几种实验技巧对湍流边界层中的马蹄形涡进行了观测, 发现并描述了其形成的四种方式: 二次不稳定式、组合式、变形式和突发式。对这四种马蹄形涡的形成及发展进行了研究和比较。实验结果表明, 这些马蹄形涡在尺度、运动速度和变形上是有差别的。

关键词 涡, 马蹄形涡, 湍流边界层, 流动显示

一、前言

随着人们对湍流边界层的研究和认识的不断深入^[1,2], 发现了其中的一些拟序结构。60年代 Kline^[3] 等人发现了低速条带和猝发现象。70年代 Blackwelder^[4] 等人观察到了底层反向旋转涡对, 并研究了其与猝发等相干结构的关系。Cantwell^[5] 和 Hussain^[6] 总结了湍流边界层中拟序结构的研究状况。结果表明, 湍流边界层中的许多拟序结构和现象都与马蹄形涡密切相关, 这使得对马蹄形涡的研究更显重要。

然而, 马蹄形涡的形成及发展规律至今仍是没有被探明的问题。这不仅使许多实验研究(如边界层减阻、边界层控制等)无章可循, 也使从事理论和数值计算的科学工作者无从进行这方面结果的对比和验证, 更不用说在实际中的应用了。

众所周知, 湍流边界层的复杂性、非定常性和随机性及实验手段方面的缺陷给湍流中马蹄形涡的研究造成了很大困难。Heed 和 Bandyopadhyay^[7] 等人利用烟线-激光片光法对湍流边界层中的马蹄形涡进行了观测和研究, 并证明了它的存在。但近壁处被烟线弄模糊了, 以致无法更深入地研究。因而, 为了避免湍流边界层的紊乱背景, 科学工作者通常是在层流边界层中人工生成马蹄形涡来探索其发展规律和特点的。Metzler (1980) 首先用半球形扰源在层流中产生了人工马蹄形涡。后来 Acarlar 和 Smith^[8] 用半球形扰源和壁面定常喷流的方法在层流边界层中产生了人工马蹄形涡。刘天舒^[9] 等人采用热脉冲技术在层流边界层中产生了人工马蹄形涡。这些研究为湍流边界层中马蹄形涡的研究提供了启示。

可是, 层流中人工生成的马蹄形涡毕竟不同于真实湍流中自然生成的马蹄形涡。首先, 人工生成的马蹄形涡是有秩序的, 而湍流中自然生成的马蹄形涡具有随机性; 其次, 二者的生成方式和机理不一定相同; 最后, 影响马蹄形涡形成、发展和消亡的环境不一样。这

本文 1990 年 8 月 15 日收到第一稿, 1990 年 11 月 9 日收到修改稿。

些直接影响着对自然形成的马蹄形涡的认识。因此,研究马蹄形涡的最好办法是直接观测湍流中自然形成的马蹄形涡。但由于实验技术方面的限制,这方面研究进展得一直不快,对马蹄形涡的研究只是片面的和局部的。可以设想,如果能得到马蹄形涡形成和发展的全过程的三维信息,无疑会使对马蹄形涡的研究有较大的进展。

本文的实验是在水槽中进行的。这样既可以保证较高的雷诺数,又可以在较清晰的背景和较低的流速下更好地观测湍流中的马蹄形涡。利用滑轨设计出一种新的有效的流动显示法——激光片光运动法,结合几种实验技巧,更细致地从整体和局部观测了马蹄形涡的形成和发展。

二、实验设备与条件

实验在北京航空航天大学的水槽中进行,实验段尺寸 $6860 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,

流速为 $3.8 \text{ cm/s} \sim 8.6 \text{ cm/s}$, 湍流度为 3%。利用方波发生器使 $\phi 25 \mu\text{m}$ 的铂丝产生连续或有一定频率的氢气泡线(时间线)。照明装置是一个以 25 mw 氩离子激光器为光源的片光系统和一个 1000w 的碘钨灯。使用航空 3 型相枪拍摄。

利用 J2125 型气垫滑轨上的一条气轨造成激光片光的运动。片光运动系统如图 1, 其运动初速度可调, 运动方式可分为匀速、匀加速和匀减速运动以适应不同要求的拍照。无特别说明时 $R_{\theta} = 2200$ 。

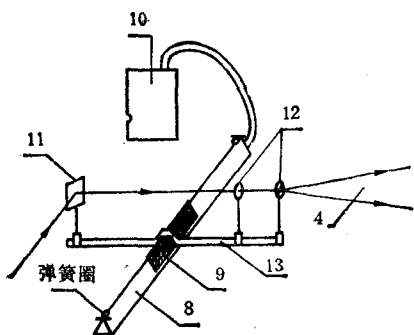


图 1 片光运动系统(符号说明同图 2)

三、实验方法与技巧

本实验主要采用下述方法和技巧。

1. 实验方法

如图 2, (1) 有机玻璃平板(水槽侧壁); (2) 绊线为一根紧靠壁面的 $\phi 15 \text{ mm}$ 的圆管(用来造成湍流边界层); (3) 平行壁面的铂丝; (4) 片光平面; (5) 相枪; (6) 聚光灯(碘钨灯); (7) 激光器; (8) 气轨; (9) 滑块; (10) 气泵; (11) 反光镜; (12) 聚光镜和扩光棒; (13) 支架。滑块的运动导致片光平面在 x 方向上的移动, 这使得相枪可以在规定的时间内拍下不同流向位置的截面图。

方法 1: $\alpha = 45^\circ$, 片光固定或运动。

方法 2: $\alpha = 90^\circ$, 片光固定。

方法 3: $\alpha = 135^\circ$, 方法 1 的补充与对

照

2. 实验技巧

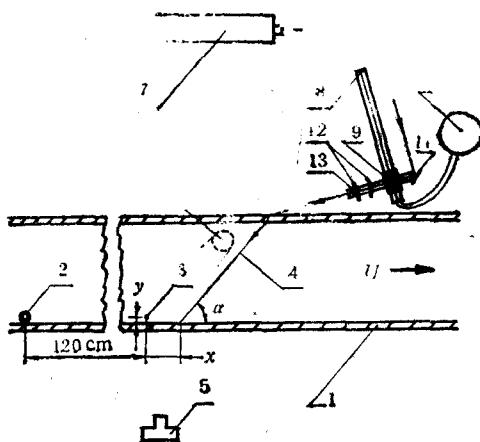


图 2 流态显示实验方法

技巧 1: 片光固定, 连续拍摄, 用于了解马蹄形涡通过某一截面的全过程。

技巧 2: 片光自上游向下游运动, 用于了解马蹄形涡的空间形状。

技巧 3: 片光自下游向上游运动。可以减小因时间差造成的空间形状的变形, 但涡形成和消亡时的一些细节可能会被漏掉。

技巧 4: 只打片光, 使截面内细节易于被观察。

技巧 5: 同时打片光和聚光灯。主要了解马蹄形涡与快斑、慢斑的关系 (包括形成和发展过程)。

四、实验结果与讨论

1. 二次不稳式马蹄形涡的形成与发展

二次生成方式是湍流边界层中最常见的马蹄形涡形成方式, 它的形成是由于涡的二次不稳定性造成的。其形成过程 (如图 3) 为: 当边界层内一纵向涡 Γ_1 附近又有一与之同方向的涡 Γ_2 生成时, 二者相互作用并靠近, Γ_2 对 Γ_1 的影响越来越大, 两涡间存在的与其反向的环量越积越多。涡的不稳定性使得从 Γ_1 上扯出一个反向涡 Γ_3 (图 5(d))。 Γ_3 的涡量不断增大且同时远离 Γ_1 横向移动 (此时 Γ_1 对 Γ_3 的斥力大于 Γ_2 对 Γ_3 的斥力)。由于 Γ_1 和 Γ_3 分别向左右外侧拉扯其中间上部流体形成低压区, 其中间上部空出的位置由后面的流体快速补充上来。而 Γ_1 和 Γ_3 中间的下部流体因积聚使流速减慢形成高压区。上、下部分的不同流速的流体的剪切造成一个与 Γ_1 和 Γ_3 相连接的横向涡, 从而形成马蹄形涡。随着马蹄形涡沿流向的运动, 横向涡头逐渐抬高直至达到一个渐近高度, 三条涡管也不断拉伸变形。马蹄形涡发展到一定程度后不再增长, 涡量逐渐耗散直至马蹄形涡消失。图版 I 照片 1 (方法 2 结合技巧 1 拍摄) 和图版 I 照片 2 (方法 1 结合技巧 2 拍摄) 分别从不同角度反映了马蹄形涡形成的同一方式和特点。

不过, 两同向涡相互作用时也不一定形成马蹄形涡。实验观察表明, 二者可能相互合并, 也可能各自独立发展直至分别消亡。这与二者的强弱、它们之间的距离以及所处的环境有关。壁面可能是 Γ_1 扯出的关键, 其作用似乎类似于耗散结构中的放大因子。当然, 这些尚需进一步的实验验证。

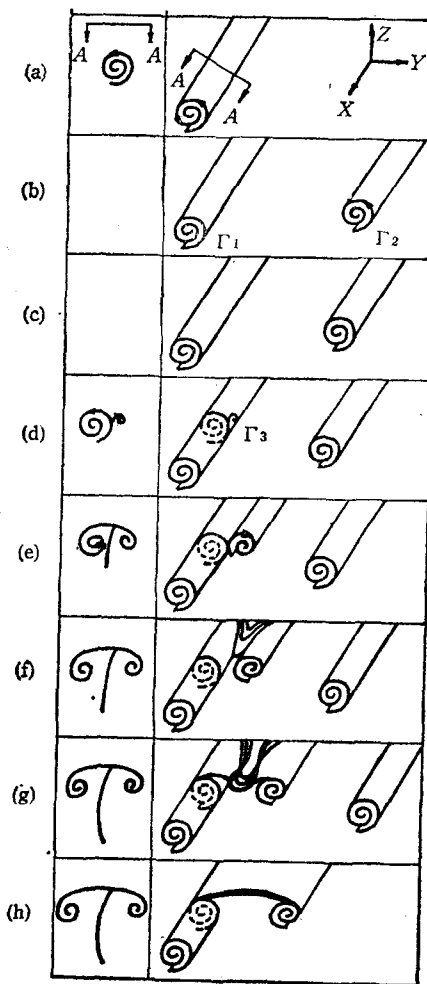


图 3 二次不稳式马蹄形涡的形成与发展

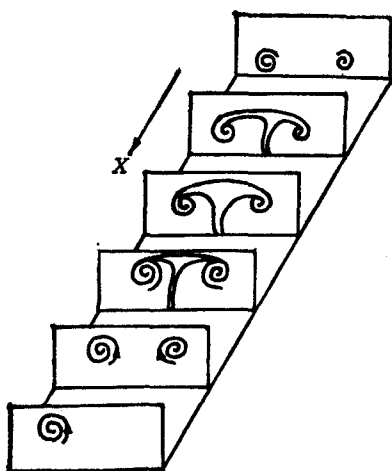
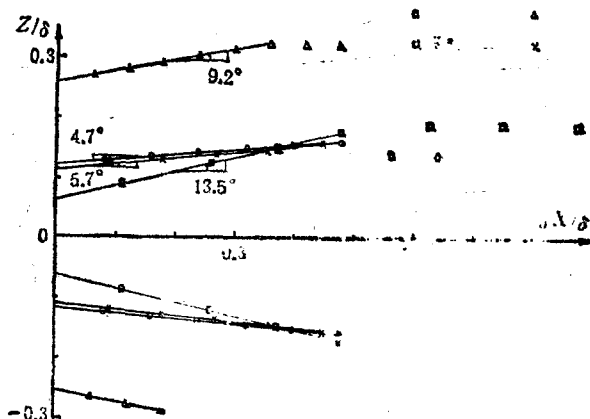
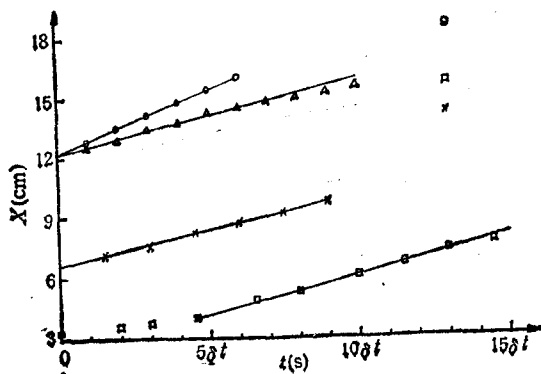


图 4 马蹄形涡的空间形状剖面图

图 5 涡的展向尺度的变化 ($y/\delta = 0.09$)

○二次式 △组合式 □变形式 ×突发式

通过对实验结果的分析,可以得出这种马蹄形涡的空间形状(如图 4)。它与文献[7]和[9]中描述的马蹄形涡虽然相似,但并不相同。其主要差别在于它并非完美的马蹄形,它的头部有两根长短不一的涡角,如图版 I 照片 3 (方法 1 结合技巧 5 及技巧 3 拍摄)中箭头所示的马蹄形涡那样。

图 6 涡头的运动速度 ($\delta t = 0.1664s$, $y/\delta = 0.09$)

○二次式 △组合式 □变形式 ×突发式

由图 5 可看出,二次不稳式马蹄形涡的展向尺度开始以线性增长,发展到一定程度后就保持一个固定值,而人工形成的马蹄形涡的展向尺度不仅一直增大,且变化也较快^[9]。图 6 表明其涡头的运动速度几乎不变(略低于快斑速度)。尽管涡头与壁面有倾角,但并没有观察到 45° 倾角,也许是没能拍摄到,也许是倾角不是 45° 。

2. 组合式马蹄形涡的形成和发展

马蹄形涡形成的另一种方式是组合式。如图版 II 照片 4,其形成过程大致如下:下游一个纵向涡 Γ_1 的尾部与上游两个反向的纵向涡 Γ_2 和 Γ_3 (Γ_3 与 Γ_1 同向)中的 Γ_3 相互作用而靠近,由于 Γ_1 与 Γ_2 头尾相连或头、尾相互作用等原因,带动 Γ_2 的头部一起靠近 Γ_3 。 Γ_1 的尾部和 Γ_2 及 Γ_3 的头部的相互作用越来越强(这种作用较复杂,目前尚不清楚),结果形成一个连接 Γ_1 尾部、 Γ_2 和 Γ_3 头部的横向涡。此时, Γ_1 的强度似乎已很弱,于是这个横向涡与 Γ_2 和 Γ_3 形成了一个不完美的、前部有涡角马蹄形涡。大部分情况下只有一个涡角,至于是否有其它的组合方式和过程,实验中尚没有观察到。

组合式马蹄形涡在涡头的展向尺度变化和运动速度方面与二次不稳式马蹄形涡具有类似的规律(见图版 II 照片 5 和图版 III 照片 6)。只是其展向尺度比后者大许多,而速

度却比后者慢些。此外,组合式马蹄形涡也具有涡头较高、涡管不断变形和拉伸的特点。而且,其纵向涡管的管径沿 x 方向明显地由细变粗。

3. 变形式马蹄形涡的形成和发展

马蹄形涡形成的第三种方式是变形式。照片 5 反映了其形成过程: 一个纵向涡管, 边运动边拉伸。由于环境的影响, 其头部打弯并拉伸。然后, 打弯的横向涡头再往回打弯, 形成一个纵向涡管长短不一的马蹄形涡。在随后的过程中, 其一边拉伸和扩展, 一边沿展向运动(当然比纵向运动慢许多)。

变形式马蹄形涡在展向尺度变化上有其特有的过程(见图版 II 照片 5 及图 5)。涡头第一次横向打弯后, 展向尺度的增长越来越快; 涡头第二次沿纵向打弯后, 展向尺度的增长减慢, 直至达到一个渐近尺度, 快消亡时尺度又有所增大。其运动速度基本保持不变, 只是其波动范围比前两种情况的要大, 且其第一次打弯的过程中速度似乎慢些(如图 6)。

4. 突发式马蹄形涡的形成和发展

马蹄形涡的第 4 种形成方式是突发式, 其形成很类似于人工马蹄形涡的生成, 都是突然形成的。如图版 III 照片 6, 其形成过程大致如下: 开始似乎是两个反向的纵向涡管突然形成(图版 III 照片 6(a)一(b)), 然后引起中间流体的升起(图版 III 照片 6(c)一(d)), 又似乎立即导致马蹄形涡的生成, 且涡头在发展过程中逐渐抬高和扩展。图版 III 照片 7 清楚地反映了这种马蹄形涡形成后的空间结构: 涡头骑在涡管上, 涡头后面的两根涡管的高度越来越低。图版 III 照片 8 表明了其形成非常快, 不到 0.0832 秒。图版 III 照片 6(d)一(e) 也能反映出来。图版 III 照片 6 和照片 8 中马蹄形涡形成时涡头的运动速度分别为 7.21 cm/s 和 10 cm/s, 均大于流速。不过, 一旦马蹄形涡形成后, 涡的运动速度立刻减慢下来。实验发现突发式马蹄形涡的涡头常与壁面呈 45° 左右的倾角。图 5 和图 6 分别说明, 在较长时间内, 其展向尺度均匀扩张, 运动速度基本保持不变。值得注意的是, 与人工生成的空气中的马蹄形涡相比^[9], 二者展向尺度的变化速度竟然差不多。

5. 马蹄形涡四种形成方式的比较

对每一种马蹄形涡, 形成时距离壁面的高度(简称形成高度)不同, 其展向尺度及运动速度也不同。若形成高度一样, 则各种马蹄形涡形成时的展向尺度由大到小依次为组合式 (0.514δ)、二次式 (0.24δ)、突发式 (0.228δ)、变形式 (0.126δ) (见图 5)。但展向尺度增加速度最快的是变形式, 然后依次是组合式、突发式、二次式。各种马蹄形涡发展到一定阶段后似乎都有一个渐近展向尺度, 其由大到小依次为: 组合式、变形式、二次式, 突发式与二次式差不多。各种马蹄形涡在形成后基本上都保持匀速运动的状态, 其速度由大到小依次为二次式、组合式、突发式、变形式。各种马蹄形涡均存在纵向拉伸变形, 其变形率几乎为线性, 快慢差别不大。但两根涡管变形的快慢却总不一样, 或者一快一慢, 或者一变形一不变形。在展向漂移方面, 组合式和变形式马蹄形涡漂移得较快, 二次式马蹄形涡略有漂移。流场中二次式马蹄形涡形成机率似乎最大, 其次是组合式。

虽然各种马蹄形涡在形成机理和发展规律上存在一定差异, 但也有许多共同之处:

- (1) 展向尺度匀速扩张, 且有渐近展向尺度;
- (2) 形成后基本作匀速运动;
- (3) 都有纵

向拉伸变形和展向漂移的特点。

本文给出的马蹄形涡的四种形成方式中,只有发生机率很小的突发式马蹄形涡是具有完美马蹄形的,这也许是流场中很少发现完美马蹄形涡^[10]的原因之一。Klebanoff 虽然很早以前就意识到马蹄形涡的形成是由于二次不稳定性^[11],但却没有给出其具体的形成过程和机理。而本文指出这种形成方式只是马蹄形涡形成方式中的其中之一。至于马蹄形涡是否还有另外的形成方式,这需要实验和理论的进一步验证。

五、结 论

1. 马蹄形涡的形成方式不是单一的,而是多样的。目前观测到的四种形成方式为:二次不稳定性、组合式、变形式和突发式。

2. 湍流边界层中马蹄形涡的形成方式、形成机理不同于人工生成的马蹄形涡。前者形成方式多样,且大部分是孤立的;而后者形成方式单一,且是级串的。

3. 各种马蹄形涡的展向尺度的变化速度及涡头的运动速度基本上是匀速的。它们均有纵向涡管拉伸和展向漂移的特点。

参 考 文 献

- [1] Hinze J O. Turbulence (second edition). McGraw-Hill, Inc. 1975
- [2] Structure and Mechanisms of Turbulence 1—2, Proceedings of the Symposium on Turbulence, Aug. 1—5, 1977, Edited by H. Fiedler
- [3] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A and Rundstadler P W. The structure of turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1967, 30: 741—773
- [4] Blackwelder R F and Eckelmann H. Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon. *J. Fluid Mech.*, 1979, 94: 577—594
- [5] Cantwell C T, Organized motion in turbulent flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1981, 13: 457—515
- [6] Hussain A K M. F. Coherent structures—reality and math. *Phys. Fluids*, 1983, 26: 2816—2850
- [7] Head M R and Bandyopadhyay R. New aspects of turbulent boundary-layer structure, *J. Fluid Mech.*, 1981, 107: 297—338
- [8] Acarlar M S and Smith C R. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1987, 175: 1—83
- [9] 刘天舒,史胜熙,周明德. 附面层中马蹄形旋涡的实验研究,实验力学,1989,4(3): 290—296
- [10] Lian Q X. A visual study of the coherent structure of the turbulent boundary layer in flow with adverse pressure gradient. *J. Fluid Mech.*, 1990, 215: 101—124.
- [11] Klebanoff P S, Tidstrom D K and Sargent L M. The three-dimensional nature of boundary layer instability. *J. Fluid Mech.*, 1962, 12

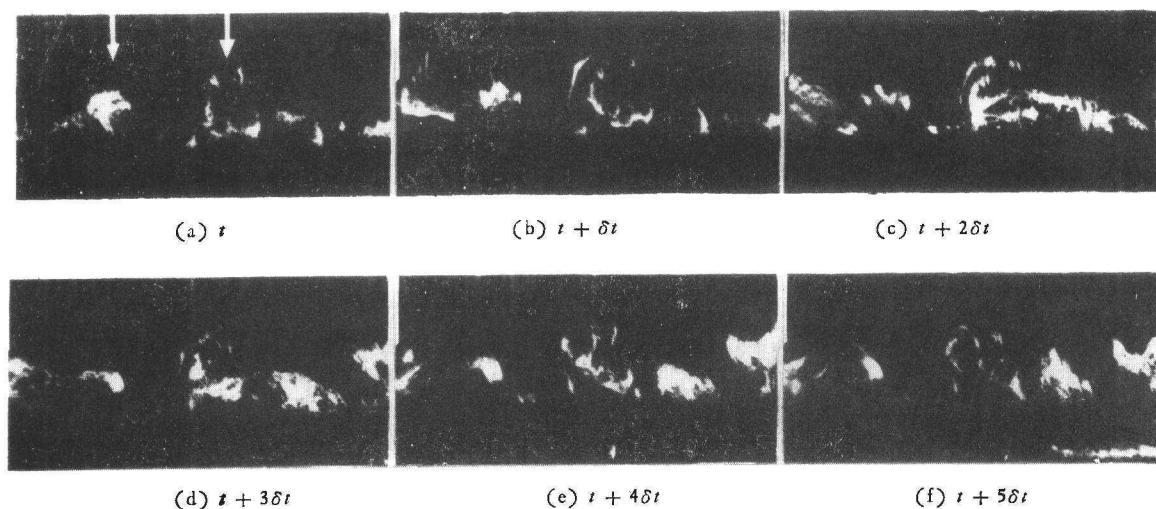
THE WAYS OF THE FORMATION OF THE HORSESHOE VORTEX IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

Li Kewen Lian Qixiang

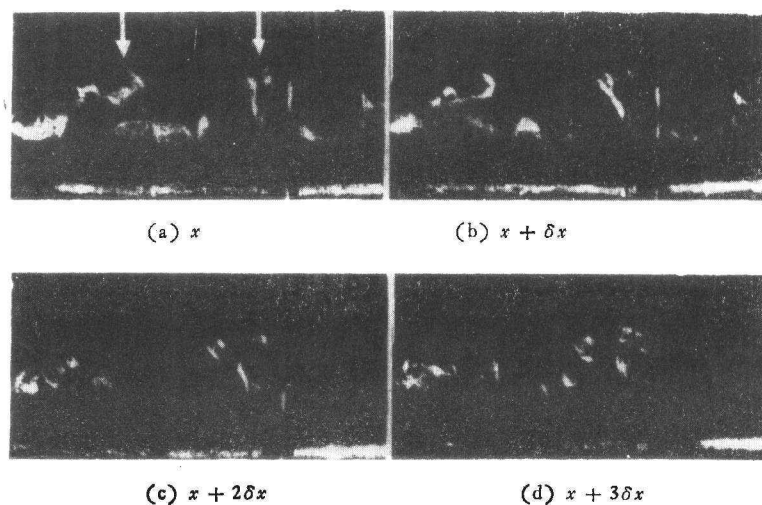
(Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing, 100083, China)

Abstract Experimental observation and measurement were performed for the horseshoe vortex in turbulent boundary layer through using a new method of visualization—moving sheet of laser light and several experimental skills. It was discovered and described that the horseshoe vortices form in four ways: secondary instability, combination, deformation and burst. The formation and development of these horseshoe vortices were studied and compared. The test results show that these horseshoe vortices are different in size, moving velocity and deformation.

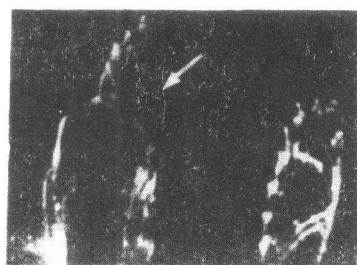
Key words vortex, horseshoe, turbulent boundary layer, flow visualization



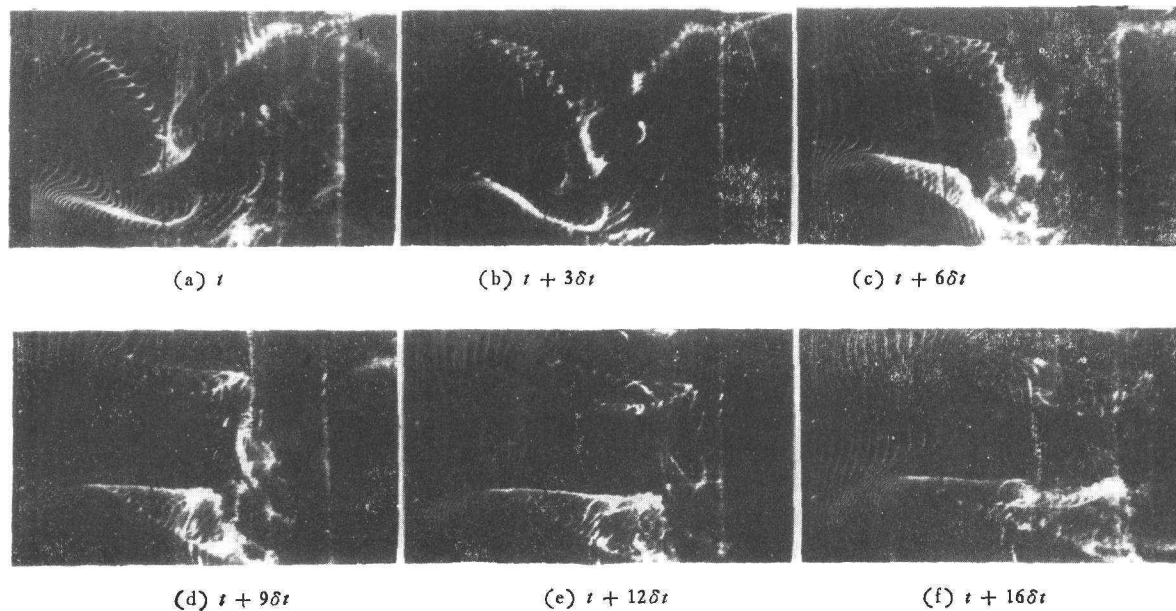
照片 1 马蹄形涡通过铂丝下游截面的过程图 ($y/\delta = 0.26$, $x/\delta = 1.00$, $\delta t = 0.0832s$)



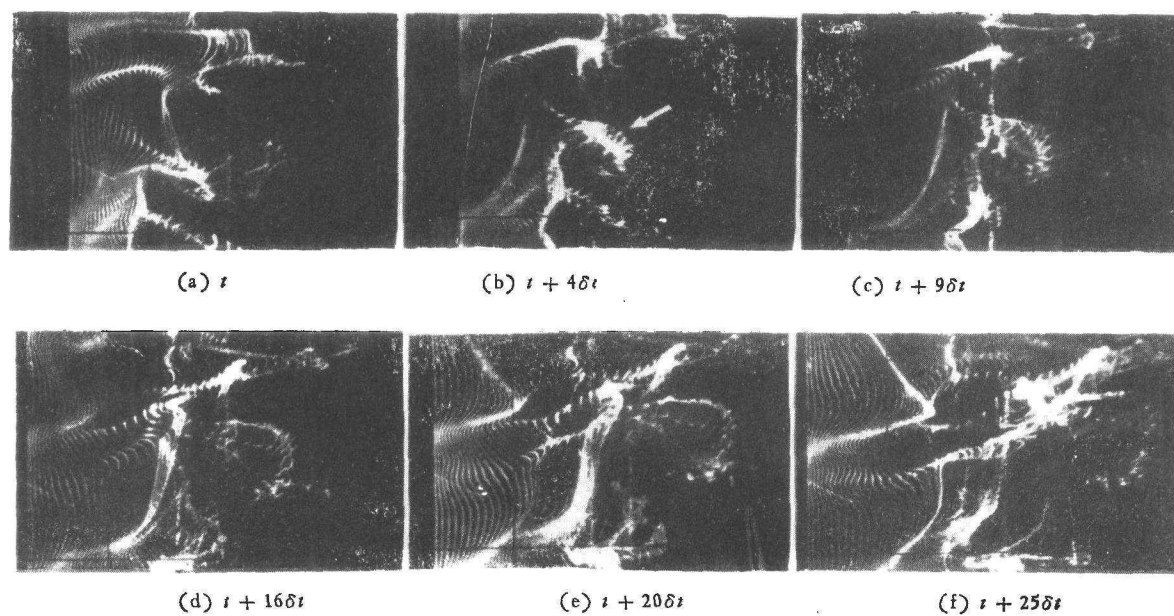
照片 2 片光扫描得到的马蹄形涡形成的空间过程图 ($y/\delta = 0.26$, $x/\delta = 0 \rightarrow 3$)



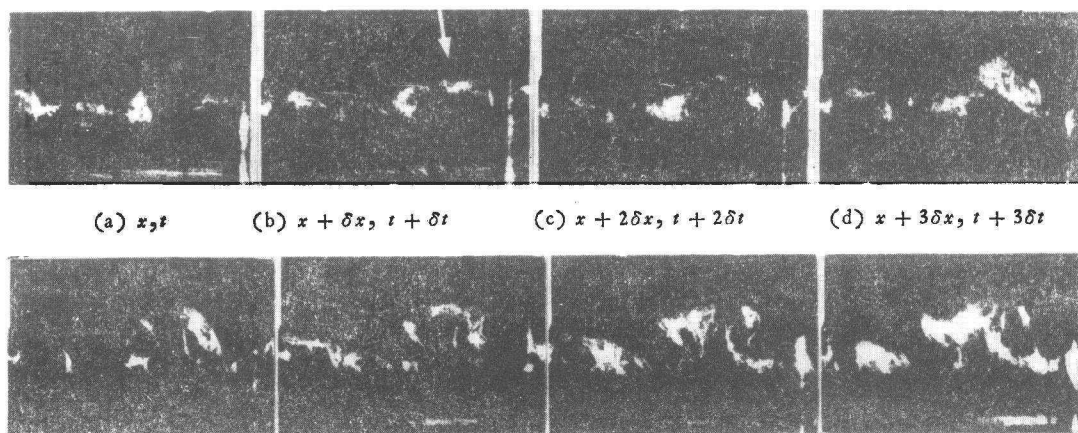
照片 3 马蹄形涡的俯视图 ($y/\delta = 0.09$)



照片 4 组合式马蹄形涡的形成过程 ($y/\delta = 0.09$, $\delta t = 0.0832s$)

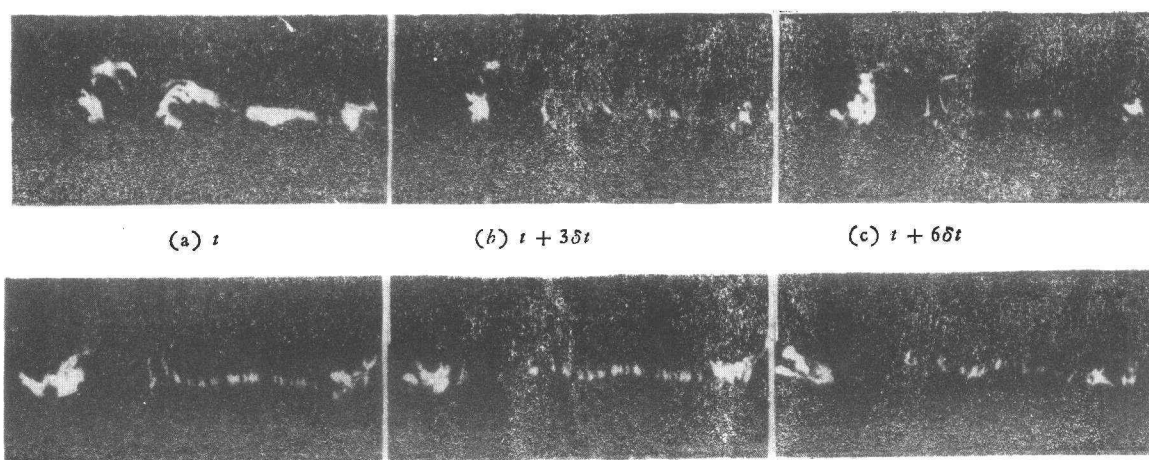


照片 5 变形式马蹄形涡的形成过程 ($y/\delta = 0.09$, $\delta t = 0.0832s$)

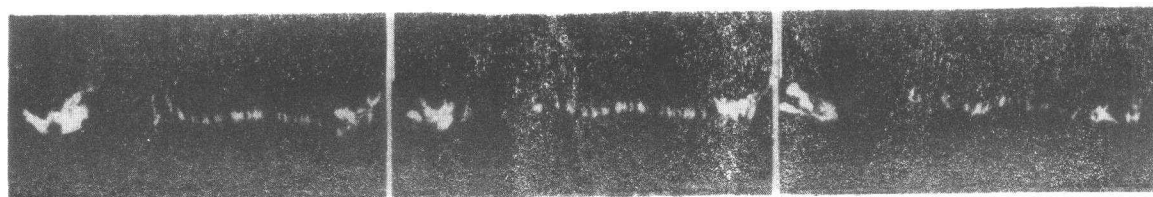


(a) x, t (b) $x + \delta x, t + \delta t$ (c) $x + 2\delta x, t + 2\delta t$ (d) $x + 3\delta x, t + 3\delta t$
(e) $x + 4\delta x, t + 4\delta t$ (f) $x + 5\delta x, t + 5\delta t$ (g) $x + 6\delta x, t + 6\delta t$ (h) $x + 7\delta x, t + 7\delta t$

照片 6 突发式马蹄形涡的形成过程 ($y/\delta = 0.27$, $\delta t = 0.0832s$, 方法 1 结合技巧 2, 片光匀速运动)

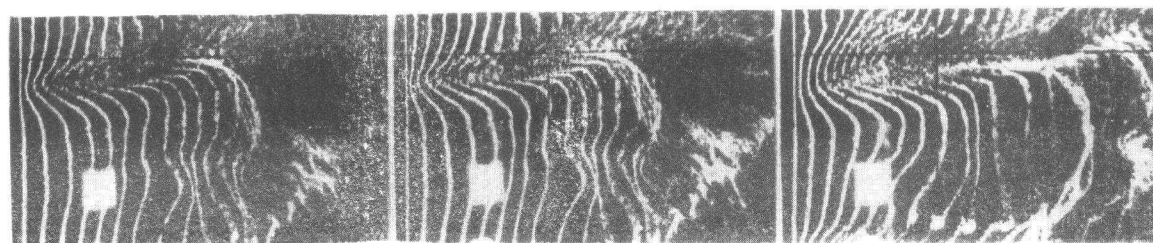


(a) t (b) $t + 3\delta t$ (c) $t + 6\delta t$



(d) $t + 12\delta t$ (e) $t + 15\delta t$ (f) $t + 21\delta t$

照片 7 突发式马蹄形涡通过某一截面的过程图 ($y/\delta = 0.09$, $\delta t = 0.0832s$)



(a) t (b) $t + 2\delta t$ (c) $t + 3\delta t$

照片 8 突发式马蹄形涡形成的俯视图 ($y/\delta = 0.09$, $\delta t = 0.0832s$)