

湍流级串和动力学过程之间的关系 *

孟庆国¹⁾ 李睿劬²⁾ 李存标^{3)†}

¹⁾(国家自然科学基金委员会数理学部,北京 100085)

²⁾(清华大学工程力学系,北京 100084)

³⁾(北京大学湍流研究国家重点实验室,北京 100871)

(2004年1月7日收到 2004年2月20日收到修改稿)

利用在边界层转捩中逐渐建立起来的主要动力学过程,对湍流级串概念做了进一步的分析。对边界层转捩的测量结果进行定量分析,从所得能谱中可以清楚看到湍流级串与转捩的动力学过程的对应关系,进而丰富了对湍流级串的理解。

关键词: 级串, 动力学, 转捩

PACC: 4725C, 4715C, 4715F

1. 引言

Frisch^[1]指出,湍流的动力学过程是极其重要的。长期以来,Richardson 的级串概念被广泛应用,但对级串的理解还不深刻,普遍的观点是级串从大涡变成小涡。缺乏深入理解的主要原因是没有把动力学和级串联系起来,更深刻的原因是对湍流的动力学过程尚不清楚。经过长期努力,我们总结了边界层转捩过程中若干动力学过程^[2,3],这些动力学过程也许是不完整的和有缺陷的。这些动力学过程主要是斜波的非线性相互作用产生类孤立波,类孤立波的一次边界层失稳产生一次涡环,二次边界失稳产生二次涡环,一次涡环和二次涡环相互作用产生涡环链和流向涡,涡环链和类孤立波相互作用产生类孤立波破裂,涡环链破裂。本文给出这些过程中所对应的频谱,建立动力学和级串的对应关系。

2. 类孤立波形成及其对涡量输运的贡献

如以前的研究中指出的那样,类孤立波可能是由斜波的非线性相互作用产生的^[2,3],本文对此不再

复述,而着重讨论它对涡量输运的贡献。Frisch 认为流体的浮力作用把涡量从固壁面带入流体内部,吴介之等^[4]在 Lighthill 工作基础上证明涡量是从固壁产生的。究竟是浮力作用将涡量从固壁带入流体内部还是其他原因?而类孤立波的存在性和本身的性质使它能完成将固壁处产生的涡量输运到流体内部,原因是类孤立波内部有垂直壁面并沿垂直于壁面的方向流动,不但会自然完成所谓的“浮力效应”产生的涡量从壁面向流体内部的输运,并且涡量会集中在其周围形成边界处的环状高剪切层,从而形成环形涡。这在过去的研究中已获得证据^[5]。

一次涡环和二次涡环均是类孤立波边界失稳产生的,详细的结果已在文献[3,5]中给出。图 1 给出这些过程对应的能谱,表明了从基本波到谐波产生过程的能量分布情况。因此,类孤立波引起的从壁面将涡量输运到流体内部承担“浮力作用”的主体并未被明确提出。过去的工作^[3,5]仅强调其产生高剪切层而形成一次、二次涡环,2 Hz 尖峰对应于基本波频率,4 Hz 尖峰对应于基本波与一次涡的频率,6 Hz 频率对应于基本波、一次和二次涡环的频率之和,低于 2 Hz 的尖峰是由内间歇性导致的,产生这样结构的具体原因,请参见文献[6]。

* 国家自然科学基金(批准号:10002001)和教育部博士点基金(批准号:20020001052)资助的课题。

† 通讯联系人,E-mail: cblee@mech.pku.edu.cn

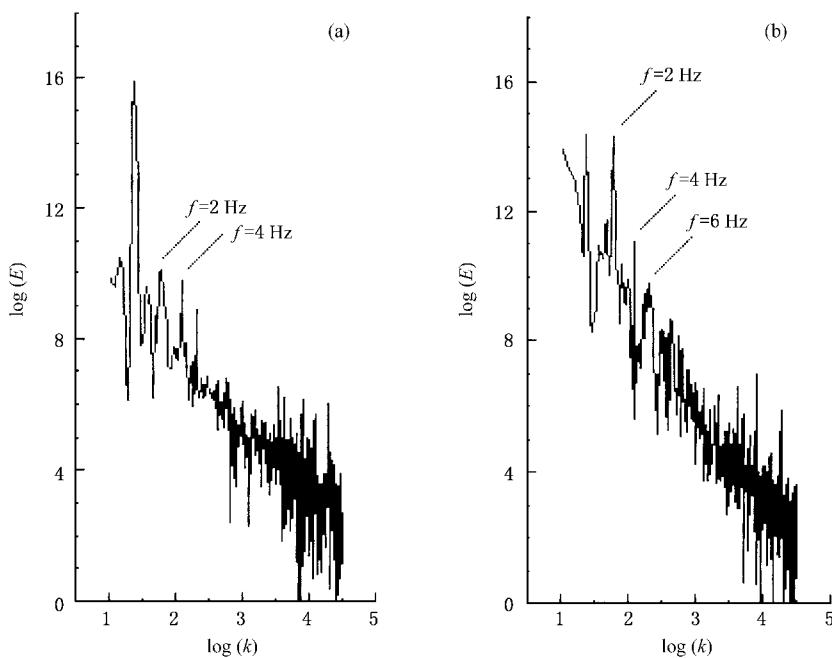


图 1 在 $x = 350 \text{ mm}$ (a)和 $x = 400 \text{ mm}$ (b)处的能谱 , 可见明显的正反向级串

3. 旋涡之间相互作用的基本形式是断裂和重联

旋涡从低频向高频小尺度演化发展有若干种形式 . 对单个旋涡主要是和流场作用形成若干涡丝、涡管 , 产生高频 , 而另一个重要的原因是旋涡的相互作用 . 过去在转捩过程中没有发现相互作用的直接证

据 . 我们最近的结果^[7]获得了这样直接的证据 , 即一次涡环和二次涡环相互作用产生高频旋涡 . 这个精心完成的实验基本上否定了高频旋涡是由 Δ 涡的头部涡自诱导相互作用产生的 . 相互作用和自相互作用是完全不同的 . 相应的能谱见图 2 . 这种相互作用的另外一个重要结果是产生流向涡^[8] . 图 2 中 8 Hz 结构对应于涡环链的频率 .

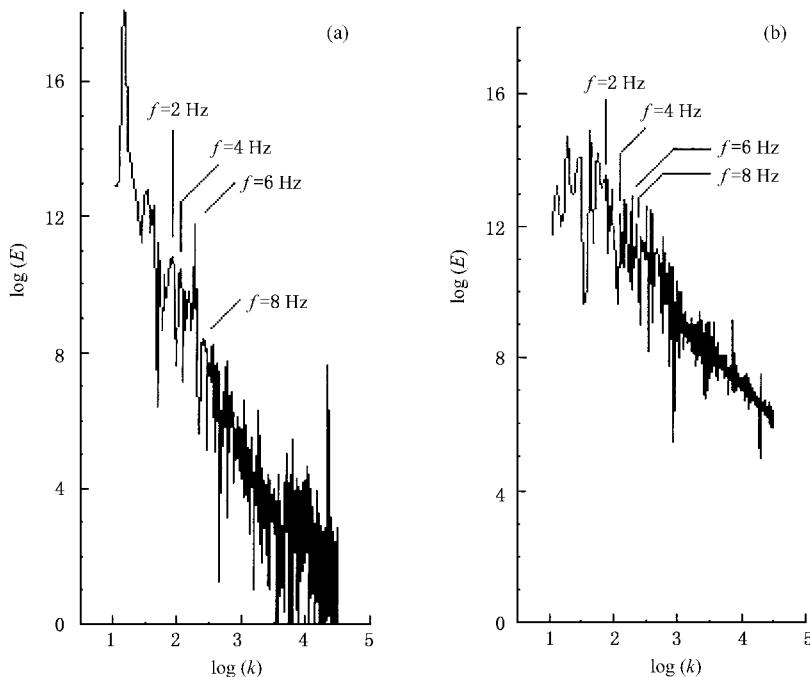


图 2 在 $x = 450 \text{ mm}$ (a)和 $x = 550 \text{ mm}$ (b)处的能谱

4. 涡环链及其破裂

由于涡环链产生速度脉动中的高频信号,因此涡环链的实验发现显得十分重要。涡环链是不稳定的^[8],并不像 Kachanov^[9]认为是相当稳定的结构。因此涡环链的失稳和破裂是直接导致更进一步产生高頻脉动的主要原因。涡环链本身的实验显示较容易,而涡环链失稳破裂过程的实验显得十分困难。所幸的是我们得到了这个过程^[6],这个过程是烟线法、染

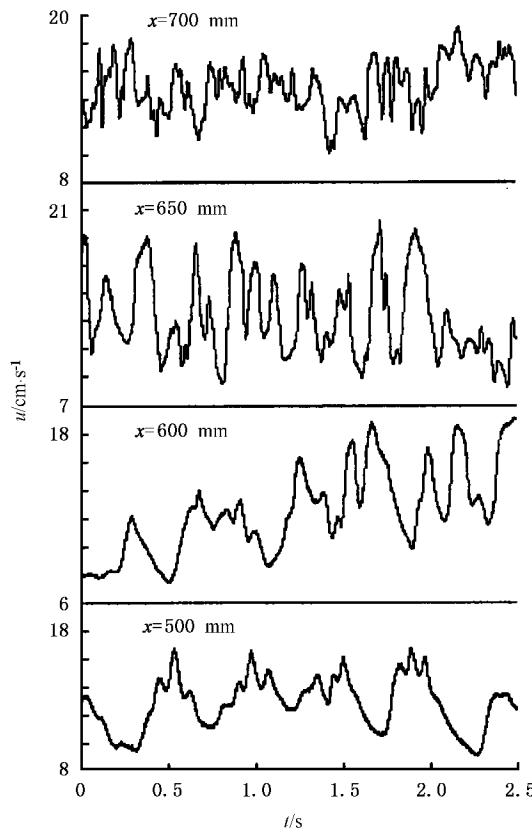


图 3 涡环链产生和破裂对应的时间序列

色液法、PIV 等方法无法实现的。主要原因是这种涡环尺度小,氢气泡线放在 X 位置较大处不能显示其全貌,又由于氢气泡的寿命有限,故经过动力学过程后集中在涡环链中氢气泡的密度往往不足以定性显示其破裂过程,即使肉眼可见也很难拍摄下来。经过反复实验,我们获得了涡环链破裂的详细结果^[8]。图 3 给出了涡环破裂过程中得到的时间序列,相应这个时期的能谱斜率明显接近 $-5/3$ (图 4),这一过程对应于 K 型转捩的最后阶段。

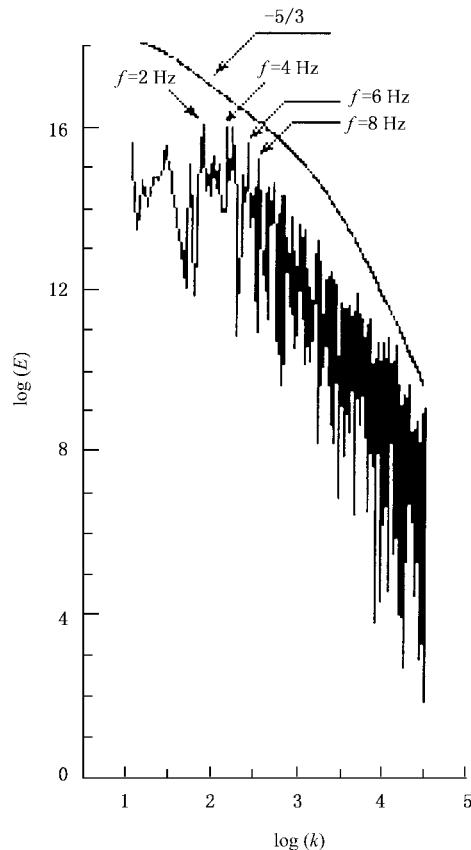


图 4 涡环链破裂后的能谱

5. 湍流的产生:确定性过程和随机性的发展

湍流长期以来被认为是随机的、不可预测的。对充分发展和完全充分发展的湍流,当前尚无直接证据证明其是否真正不可预测。但对于湍流发生,似乎现有的证据能证明所有湍流发生是随机的和不可预测的,主要的原因是:初始条件确定后,动力相互作用基本上可以重复,甚至是周期性的。转捩初期尤为

明显,转捩后期由于初始条件中的某些非周期的扰动参与了非线性相互作用,新的时空结构的产生在不同的周期中会稍有不同,而这种不同作用在下一个动力学过程会产生更新的结构、出现更大的时空差别,表现为随机性的放大。这可能是过去把这种本质上是初始条件不同,在不同周期产生的现象的差别误认为是随机性的根本原因。直接的证据表明,转捩过程甚至 Klebanoff 意义下的湍流产生是确定性的物理过程。

6. 应用能谱解释湍流级串应注意的问题

长期以来，人们大量使用能谱来解释湍流级串的物理过程，似乎已经被所有湍流研究工作者普遍接受。龚安龙等^[6]最近的研究表明，数字信号处理过程中如果受周期信号中若干信号影响而产生幅值上的波动，就会在能谱中出现较大幅值的低频“含能”结构。就物理意义而言，这种含能结构是不存在的。过去人们往往认为这种“含能”结构是产生大尺度结构的能量之源。因此，脱离动力学过程研究级串往往会带来虚假的信号，甚至可能带来错误的结果。这需

要十分小心区分低频结构中哪些是真正含能的结构，哪些是数据处理过程带来的“含能”结构。这些问题的区别是十分重要的，否则可能会带来不正确的分析结果。

7. 结 论

本文给出了转捩过程中大尺度向小尺度和更大尺度结构演化的正反级串过程，过程是确定性的。

感谢北京大学陈十一教授、美国 Arizona 大学周明德教授、吴介之教授的指导。感谢李长龄、朱凤荣等同志对本工作的帮助。

-
- | | |
|---|---|
| [1] Frisch U 1995 <i>Turbulence : The Legacy of A. N. Kolmogorov</i> (Cambridge : Cambridge University Press) | [6] Gong A L , Lee R Q , Lee C B 2002 <i>Acta Phys. Sin.</i> 51 1068 (in Chinese) [龚安龙、李睿劬、李存标 2002 物理学报 51 1068] |
| [2] Lee C B 2000 <i>Phys. Rev. E</i> 62 3659 | [7] Lee C B 2001 <i>Acta Phys. Sin.</i> 50 182 (in Chinese) [李存标 2001 物理学报 50 182] |
| [3] Lee C B 2001 <i>Experiments Fluids</i> 30 354 | [8] Lee C B 2003 <i>Chin. Phys.</i> 12 1429 |
| [4] Wu J Z , Wu J M 1996 <i>Adv. Appl. Mech.</i> 32 119 | [9] Kachanov Y S 1994 <i>Annu. Rev. Fluid Mech.</i> 26 411 |
| [5] Lee C B 1998 <i>Phys. Lett. A</i> 247 397 | |

A link between the turbulent cascade and the dynamics of transition^{*}

Meng Qing-Guo^{1,2)} Li Rui-Qu²⁾ Li Cun-Biao^{3)†}

¹⁾ Mathematical and Physical Bureau , National Natural Science Foundation Committee , Beijing 100085 , China)

²⁾ Department of Engineering Mechanics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

³⁾ State Key Laboratory for Turbulence Research , Peking University , Beijing 100871 , China)

(Received 7 January 2004 ; revised manuscript received 20 February 2004)

Abstract

The transitional primary dynamical processes, which were constructed in the experiment in a transitional boundary layer, were used to make further analysis on the turbulent cascade patterns. The quantitative results obtained from the measurement data in the transitional boundary layer experiment described the link between the turbulent cascade patterns and a sequence of transitional primary dynamics processes. This may be helpful for us to understand the turbulent cascade more deeply.

Keywords : cascade, dynamics, transition

PACC : 4725C , 4715C , 4715F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10002001) and the Doctorate Foundation of the Ministry of Education of China(Grant No. 20020001052).

† Corresponding author. E-mail : zblee@mech.pku.edu.cn