



研究述评

【按语: 在本期发表的这篇研究述评中, 作者归纳评述了周培源的湍流学派的成就, 对今后的湍流研究提出了建议. 本刊先后发表了有关湍流研究方法的三篇述评, 希望有助于同行们之间对湍流研究的讨论.】

周培源湍流理论及其重大应用

颜大椿*

北京大学力学系, 100871

*联系人, E-mail: yandachun@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-06-04; 接受日期: 2013-06-07; 网络出版日期: 2013-08-01

摘要 周培源湍流理论代表了我国在国际湍流研究中对湍流本质具有独特思想并被广泛应用的学派, 但疏于系统整理和进一步研究. 本文简要介绍他的湍流理论在揭示湍流本质中的主要成果, 及其在气动声学、混沌动力学和空气动力学中的重大应用, 以及对他在湍流研究中的贡献做出合理的科学评价.

关键词 脉动雷诺应力, 柯尔莫廓洛夫熵, 重傅里叶谱, 非定常空气动力学

PACS: 47.27.N-, 47.27.nb, 47.27.De, 47.27.Gs

doi: 10.1360/132013-260

1 周培源的湍流学派和湍流理论

周培源在《论湍流的本质和寻求似应力的雷诺方法的推广》^[1]一文中开宗明义指出, 普朗特和泰勒的动量和涡量传输理论不能给出确定的混合长, 在冯·卡门的湍流相似性理论配合下, 仅能给出湍流的内层结构(Inner Structure), 因此需要用完全不同的观点对湍流的本质进行研究, 创建了独立的湍流学派. 他以对数律为范例指出, 平均流场和雷诺应力之间的关系在湍流的长度尺度和速度尺度已知的条件下在物理上是确定的, 可通过脉动速度的高阶矩的特性及它们与雷诺应力的关系实现封闭后, 由雷诺应力的微分方程给出(周培源第一定理). 文中他第一次给出湍流脉动方程, 提出不同于国际上所有各家湍

流学派的, 首先从寻求雷诺应力入手, 直接求解雷诺应力方程的学术思想, 成为我国湍流学派的奠基人和核心. 他的第一定理被国际公认为湍流模式理论的创始人, 也是湍流理论在工程应用中最广泛和最具成效的理论. 其次, 他认为决定平均流场和雷诺应力之间关系的是湍流中的涡结构, 由普朗特混合长理论在平均速度梯度为零处失效, 但该区域的涡扩散不为零可以证明, 该处的涡量张量具有球对称性或各向同性; 而速度梯度不为零处不具有球对称性, 但有轴对称性, 因此建立涡球与轴对称涡并存的物理模型, 分别给出雷诺应力和速度梯度之间的关系. 轴对称涡模型在剪切流动的实验中有大量证明, 为了从理论上解释混合长理论失效的原因以建立更

引用格式: 颜大椿. 周培源湍流理论及其重大应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1011–1014

Yan D C. Zhou PeiYuan's theories of turbulence and their important applications (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1011–1014, doi: 10.1360/132013-260

完整的理论体系, 他用网格湍流研究涡球模型并为实验证实. 从而将湍流理论提高到全新水平, 而混合长理论始终止步不前.

周培源湍流理论另一重大成果是证明^[2], 湍流流动中的脉动速度场必然伴随着一个脉动压力场, 后者满足泊松方程, 具有调和函数特性, 源函数为脉动雷诺应力和雷诺应力之差的二阶空间导数(周培源第二定理). 他多次强调, 真正不可压缩湍流是不存在的, 按热力学定理必然存在体积变形. 因此, 第二定理对于可压缩湍流的研究有重要意义. 在脉动雷诺应力的线性项大于非线性项和雷诺应力时流场中脉动压力主要由脉动雷诺应力的线性项确定, 泊松方程可简化为以脉动雷诺应力的线性项为边值的拉普拉斯方程.

2 湍流理论在气动声学中的应用

气动声学的奠基人 Lighthill 在《空气动力声的产生》^[3]一文开始就指出, 气动声学的根本问题是脉动压力产生的变形能中有多少成分转换成声辐射, 然而在他的声类比理论中得到的声学波动方程的声源项, 在作绝热无黏假定后, 恰好也是脉动雷诺应力的二阶空间导数, 和周培源第二定理惊人的相似, 但方程左侧不是拉普拉斯算子而是声学波动算子. 两大学科领域和两位学界泰斗对基础理论问题得到迥然不同的结论, 必须在理论上分辨孰是孰非. 按照牛顿关于声是弹性流体中脉动压力和相应的体积变形之间能量转换的分析, 声源项应是脉动压力, 声源区应由脉动雷诺应力作用下由脉动压力的调和特性确定的区域决定, 声辐射特性由脉动压力作用下声源区的对流马赫数确定.

Laufer 和 Yen^[4]通过对低马赫数射流的剪切层中各特征频率的脉动雷诺应力, 脉动压力和远场声压的测量, 证明射流中存在非对流性声辐射, 远场声压的实测值为按声类比理论由脉动雷诺应力计算值的 10^{15} – 10^{20} 倍, 但是按周培源第二定理根据脉动压力的调和函数特性计算得到的远场声压与实验一致, 在全文结论中指出, 声起因于射流环形剪切层的厚度的快速轴向变化转而在射流核心区产生脉动压力场后发展成为声波. 这一实验结果正是周培源第二定理的最有力证明, 被以姓氏冠名.

3 湍流理论在混沌动力学中的应用

混沌动力学的迅速发展对湍流研究提出新的课题, 即混沌是否为湍流. 周培源十分敏锐地指出, Lorenz 的低维混沌^[5]和湍流中高维的随机涡运动的本质不同, 不具有湍流动量传输的相似性规律. 为此, 按照他从雷诺应力入手的指导思想, 开展对湍流和混沌关系的研究. 实验证明, 表征低维混沌的非线性动力学参数(相关维数, 柯尔莫廓洛夫熵和李雅普诺夫指数)在湍流转捩区迅速增长而进入湍流区后趋于平缓^[6]. Lorenz 的低维混沌理论基于对流函数和温度脉动作重傅里叶级数展开后由他们的一次项构成三维子空间, 证明一次项系数在子空间中轨迹在雷莱数增至临界值后出现奇怪吸引子. 但是, 他的临界条件要求普朗特数大于 1, 因而他的计算是在普朗特数为 10 的条件下进行的. 这一条件极难在真实的流体中出现, 因而五十年至今没有实验证明.

研究低维混沌和湍流的关系, 同样需要按照周培源第一定理的思想: 从雷诺应力的测量入手. 实验证明, 当流动失稳时雷诺应力已增至和黏性应力同一量级^[7]. 因此 Lorenz 所用的热对流基本方程不可能在一次项失稳后继续有效并在闭空间中保持周期性. 在开空间的热对流边界层中由于流函数一次项表示的雷诺剪应力正是流函数脉动的重傅里叶谱的一阶分量, 极易从实测的转捩区雷诺应力分布中检出, 但是, 在从湍流转捩区进入湍流状态后高阶谱分量出现, 雷诺应力的各阶谱分量幅值均匀一致有明显下降, 表明分子黏性的作用已为湍流动量传输的相似性法则取代, 平均速度剖面按湍流特性具有相似性^[7].

出现 Lorenz 的低维混沌现象的主要原因是热对流基本方程中有流函数和温度脉动的强相干项. 因而将相干项反向运动时可出现反混沌现象并实现湍流控制中的逆转捩. 实验证明, 在近壁层形成逆温层结时可以在雷莱数低于负临界值时由雷诺剪应力分布中检出一阶重傅里叶谱分量, 边界层平均速度剖面由湍流状态恢复到布拉修斯层流剖面, 近壁层速度脉动信号近乎消失或具有很大的间歇性, 非线性动力学参数回归至层流值, 表征间歇性的相对标度指数趋低于零, 但是, 外层的相对标度指数仍保持高位, 形成强背景湍流下的层流边界层. 逆转捩中的负临界值可由简化 Lorenz 方程得到的三维子空间中的

二阶阻尼振荡方程确定^[8]. 综上所述, Lorenz 的低维混沌主要表现进入湍流流态前的湍流转捩区的特性.

4 湍流理论在空气动力学中的应用

钱学森在加州理工和冯·卡门完成亚、跨、超音速空气动力学的统一的位势理论并开拓了高超音速流和稀薄气体流等重大研究方向后, 在麻省理工和林家翘合作开展非定常流的位势理论的研究, 对空气动力学的发展作出了重大贡献. 在回国后从 1955 年到 1958 年间受聘为北京大学兼职教授并随即主持设计了我国第一座大型研究型航空风洞, 并和周培源先生一起为风洞规划了非定常机翼理论, 湍流边界层控制和层流翼型(即二元机翼边界层湍流转捩)三项研究课题.

空气动力学理论主要包括机翼理论和边界层理论两部分, 分别以低速时用不可压无弹性假定和高速时用弹性气体假定进行研究, 因而无法考虑完整的飞行器起降过程的空气动力学特性, 这在理论上是不完备的. 由高速飞行到低速着陆的过程无法列入空气动力学教程, 要求飞行员按 AOA 驾驶技术重复训练操作. 柏实义先生十分关心钱学森归国后的进一步研究, 并详细介绍了历届非定常空气动力学会议的研究方向, 除非定常位势理论外, 有非定常儒可夫斯基定理、非定常失速环线、非定常边界层分离等均和大攻角湍流分离有关. 理论上的任何突破都将使我们的研究水平和实力大幅提升至伯仲之间. 建立完整的空气动力学理论体系对于我们的航空事业的发展具有重大意义. 其中关键性课题和难点无不与湍流理论有关, 哈军工岳劫毅先生对此课题也曾表现极大关怀. 这正是周培源第二定理和钱学森非定常流理论的主要结合点, 也是第一个大型航空风洞不建在航空院校而建在北京大学数学系的主要原因.

长期以来在周培源主持下, 相继开展了湍流边界层抽吸和温度控制, 湍流摩阻和分离现象测量, 全机气动弹性和动导数测量, 三角翼羊角涡横向失稳和涡破碎现象等研究. 在周培源带领下, 关于湍流在

国计民生重大课题中的应用调研后开展大气环境空气动力学研究, 完成珠江口洋面风环境和台风谱测量^[9].

起降问题的难点在于, 非定常机翼的附着涡和流向涡的环量不可能在加速或减速过程无限增长, 必然因为涡破碎而形成环量的振荡发散或振荡衰减现象, 无法用位势理论解决, 因而非定常机翼后缘的涡破碎现象对空气动力的影响成为关键性的问题. 是勋刚^[10]关于流向涡的研究得到国际上的高度评价; 实验表明涡破碎的临界条件和背压脉动相关, 并在不同条件下形成各种流动结构, 因此用边界层控制技术实现环量控制成为提高非定常空气动力特性的创新设计思想的主要依据.

5 关于湍流研究的建议

周恒和张涵信两位院士^[11]提出“湍流问题”十分重要, 也十分及时. 湍流研究不能脱离真实性和应用性的方向. 如同统计物理中由分子运动论转向真实气体的研究一样, 湍流问题的研究正在完成由各向同性湍流等理想模型向真实湍流的过渡^[12], 并走向这个世纪难题的突破. 湍流研究应该如何进行, 现提出以下建议:

(1) 认真研究周培源湍流理论, 尊重我国著名科学家对世界科学的重大贡献, 着重研究湍流的本质, 重视湍流对现代物理学各领域和航空航天等工程领域的应用. 普朗特的混合长假说属于空气动力学中的边界层理论, 在湍流中属于唯象理论. 但是就湍流本质的认识, 理论模型的细致, 逻辑和数学推理的缜密, 都是和周培源模式理论相比难望项背的. 模式理论由周培源创立是国际公认的.

(2) 真搞实干的研究真实湍流中的重大问题, 如湍流分离, 特别是非定常湍流分离. 这是关系到起降问题的应用价值极高的真实湍流中的关键性课题. 至今为止, 无 Navier-Stokes 方程的解.

(3) 重视真实湍流研究中的新问题和新方向. 这是一个创新科学家的本能, 形成良好的学术风气, 是我们攻克世纪难题的重要条件.

参考文献

- 1 Chou P Y. On an extension of Reynolds' method of finding apparent stress and the nature of turbulent. Chin J Phys, 1940, 4: 1-33

- 2 Chou P Y. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. *Quart Appl Mech*, 1945, 3(1): 38–54
- 3 Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. *Proc R Soc*, 1952, A211: 14–37
- 4 Laufer J, Yen T C (Yan Dachun). Noise generation by a low-Mach-number jet. *J Fluid Mech*, 1983, 134: 1–31
- 5 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130–141
- 6 陶建军. 竖直加热平板自然对流边界层内层的稳定性. 博士论文. 北京: 北京大学, 1998
- 7 Yan D C, Zhang H X. Origin of turbulence in natural convection boundary layer (in Chinese). *Acta Mech Sin*, 2003, 35: 641–649 [颜大椿, 张汉勋. 自然对流边界层中湍流的发生. *力学学报*, 2003, 35: 641–649]
- 8 Yan D C, Zhang Z. Reverse transition of a turbulent boundary layer. *Mord Phys Lett B*, 2005, 19: 1603–1606
- 9 颜大椿, 干辉, 罗焱, 等. 虎门悬索桥址的台风谱测量. *工程力学*, 1999, 2(a02): 61–67
- 10 Shi X G. Numerische Simulation des Aufplatzens von Werbeln. Dissertation for the Doctoral Degree. Technischen Hochschule Aachen, Fed. Rep. Germany
- 11 Zhou H, Zhang H X. What is the essence of the so-called century lasting difficult problem in classic physics, the “problem of turbulence”? (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42(1): 1–5 [周恒, 张涵信. 号称经典物理留下的世纪难题“湍流问题”的实质是什么? *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(1): 1–5]
- 12 Huang Y N, Chen Y S. On the discussion about the “What is the essence of the so-called century lasting difficult problem in classic physics, the “problem of turbulence”?” (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 445–447 [黄永念, 陈耀松. 对《号称经典物理留下的世纪难题“湍流问题”的实质是什么?》一文的讨论. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42: 445–447]

Zhou PeiYuan’s theories of turbulence and their important applications

YAN DaChun^{*}

Department of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China

Zhou PeiYuan’s theories of turbulence represent a chinese school with extinct idea on the nature of turbulence with wide applications in international turbulent researches, but lack of better understanding and further researches. In this paper a brief overview is provided on the main achievement of these theories in discovering the nature of turbulence and its most important applications in aeroacoustics, dynamics of chaos and aerodynamics, in order to give a reasonable scientific evaluation on his contributions in turbulent researches.

fluctuating Reynolds stress, Kolmogorov entropy, double Fourier spectrum, unsteady aerodynamics

PACS: 47.27.N-, 47.27.nb, 47.27.De, 47.27.Gs

doi: 10.1360/132013-260