能否发展关于湍流动力学和颗粒材料运动学的综合理论?

陆夕云^{1*}, 林建忠^{2,3*}

1. 中国科学技术大学工程科学学院, 合肥 230026;
2. 中国计量大学流体检测与仿真研究所, 杭州 310018;
3. 浙江大学航空航天学院流体工程研究所, 杭州 310027

* 联系人, E-mail: xlu@ustc.edu.cn; mecjzlin@zju.edu.cn

2016-11-01 收稿, 2016-11-15 修回, 2016-11-15 接受, 2017-02-28 网络版发表

摘要 自然界和工程应用中遇到的流动绝大部分是湍流问题. 湍流流动中包含了不同尺度的旋涡, 如何准确地定义湍流仍十分困难, 湍流动力学的理论体系仍尚未完成. 颗粒流是固相颗粒以气相或液相为载体的流动, 缺乏普适的本构方程, 处理颗粒运动时无法将微观的颗粒尺度与宏观的场尺度分开. 本文介绍了湍流和颗粒流的基本特性、研究的理论和方法, 分析了湍流和颗粒流研究所面临的挑战.

关键词 湍流, 颗粒流, 理论体系

自从雷诺(Reynolds)1883年在管流实验中观察到湍流以来, 众多科学家试图从理论上探求这种现象背后的规律. 但是, 时至今日湍流动力学的理论体系仍未完成, 湍流已成为流体力学界公认的难题, 正如美国著名物理学家费曼(Feynman)所说, 湍流是经典物理学中最后一个未被解决的难题.

在高雷诺数流场中, 通常受黏性与惯性制约的流场会因不稳定性而导致层流失稳, 进而转捩形成湍流流动. 所以, 在我们日常生活中, 湍流无处不在. 自然界和工程应用中遇到的流动, 也绝大部分是复杂的湍流问题. 但是, 要准确地定义湍流仍十分困难. 人们对湍流流动有一些直观的认识, 这其中包括湍流流动的一些基本特性^[1]. 第一, 湍流流动具有不规则性或称随机性, 所以确定性方法对于湍流问题的研究几乎无能为力, 而统计方法则是更为有效的手段. 由于描述流体湍流运动的方程具有随机性和非线性, 这给求解湍流运动方程的数学手段带来很大挑战. 第二, 扩散性是湍流流动的另一个重要特性, 湍流扩散会导致物质迅速混合, 增强流体动量、

热量以及质量的输运. 就实际应用而言, 扩散是湍流最重要的特性, 例如湍流扩散会抑制飞机以较大攻角飞行时机翼尾缘边界层的分离、会增加很多机械装置的热量传递、会提高海风与洋流的动量交换等. 第三, 湍流是三维有旋的流动, 湍流总是会产生强烈的涡量脉动, 这也是其显著特征之一. 因此, 旋涡运动的动力学过程是湍流的核心内容. 第四, 湍流流动总是具有耗散能量的特性. 黏性剪切应力做功会导致流动动能向内能转化. 为了弥补黏性引起的动能损失, 需要持续补充能量来维持湍流运动, 否则湍流将迅速衰减.

湍流流动中包含了不同尺度的旋涡, 根据旋涡的尺度可以大致分为大尺度和小尺度运动. 通常, 湍流的大尺度运动受到流动环境的影响, 而湍流的小尺度运动具有普适性. 柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)理论^[2]给出了湍流的小尺度运动的普适特性, 奠定了湍流理论的基础. 该理论指出充分发展的均匀各向同性湍流存在能量级串过程, 湍流的速度结构函数在惯性区满足由量纲分析导出的标度率. 实际流动中,

引用格式: 陆夕云, 林建忠. 能否发展关于湍流动力学和颗粒材料运动学的综合理论? 科学通报, 2017, 62: 1115–1118

Lu X Y, Lin J Z. Can we develop a general theory of the dynamics of turbulent flows and the motion of granular materials (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 1115–1118, doi: 10.1360/N972016-01209

带有壁面的湍流流动是非常普遍的,拟序结构是壁湍流场中的一个重要特征.壁面附近的扰动使流场失稳而产生了发卡型涡,能量从近壁区经对数区传到尾迹区,构成空间的能量反级串过程,这一过程和当地的能量级串过程相互作用形成了壁湍流的自维持机制.湍流统计理论采用的是基于Navier-Stokes方程推导出湍流统计量方程的方法,在推导过程中会采用各种不同的假设来使方程得以封闭.一些常见的方法基本上仅适用于均匀各向同性湍流,因而需要发展针对壁湍流和描述拟序结构的统计方法.

中国著名学者周培源先生创立了湍流模式理论,被誉为湍流计算模式(computational modeling)之父^[3].他在1940年首次提出了湍流脉动方程^[4],奠定了湍流模式理论的基础.1945年,他又提出了两种求解湍流脉动方程的方法^[5].他的这些理论和方法为后来以雷诺应力方程为出发点的工程湍流模式理论奠定了基础,并在国际上形成了湍流模式理论学派,推动了湍流理论的研究.

对湍流的认识是现代数学和理论物理中最具挑战性的问题之一.湍流可以被描述为一个非线性物理系统的一种混沌,具有高度非平衡状态.因此,湍流包含了比Navier-Stokes方程引入的混沌流动更广泛的一类例子.尤为值得关注的是,湍流会出现在远离平衡态的等离子体、固体以及玻色-爱因斯坦凝聚体甚至在非线性光学中.由于湍流无论是对理论还是应用科学都非常重要,数学家、物理学家和工程师都投入了巨大努力来了解湍流.

颗粒流是固相颗粒以气相或液相为载体的流动,该流动已成为与流体力学、土壤力学、流变学以及统计物理相关的前沿研究领域.颗粒流的研究成果对于了解滑坡、岩石崩塌、火山碎屑岩流以及许多的工业过程具有指导作用.

研究颗粒流的主要难点,一是缺乏普适的本构方程,二是在处理颗粒运动时无法将微观的颗粒尺度与宏观的流场尺度分开.根据固相颗粒的体积分数,可以将颗粒流分成三类^[6]:一是体积分数很大的准静态型,特征是流动变形慢,颗粒间由摩擦发生相互作用;二是体积分数很小的气相型,特征是流速快,颗粒间由碰撞发生相互作用;三是介于以上两者之间的液相型,特征是像流体一样流动,颗粒间同时存在摩擦和碰撞的相互作用,该类型最常见,是以下介绍的重点.以下所介绍的研究中假设颗粒与流体

间的作用可以忽略,颗粒为刚性干圆球颗粒,可忽略颗粒间的黏附力.液相型流动可归类于黏塑性流动,也存在一个决定流动发生的、与摩擦力而非屈服应力相关的阈值,一旦流动发生,流动过程依赖于剪切率.

颗粒流动分成两大类:一类是具有壁面约束的流动,另一类是存在自由表面的流动.典型的壁面约束流动如图1所示,当两平板间距足够宽以至于平板对流场无影响时,da Cruz等人^[7]和Lois等人^[8]由量纲分析确定了应力和剪切应变关系,流动系统依赖于无量纲惯性数 I :

$$I = \frac{\gamma d}{\sqrt{P/\rho_p}}, \quad (1)$$

式中, d 为颗粒直径, γ 为剪切率, P 是在上平板加的压力, ρ_p 是颗粒密度.小惯性数对应准静态,即颗粒流宏观变形较慢;大惯性数对应于快速流动.

典型的存在自由表面的流动如图2所示,颗粒稳

图1 (网络版彩色)简单剪切颗粒流示意图
Figure 1 (Color online) Schematic of shear granular flow

图2 (网络版彩色)倾斜平面颗粒流示意图
Figure 2 (Color online) Schematic of inclined plane granular flow

定均匀地沿斜面流动, 颗粒体积分数沿流动层为常数. 当流动层较厚时, 速度剖面为Bagnold分布, 且与层高呈 $3/2$ 次方的关系; 当流动层薄至可产生流动的最小厚度时, 速度接近于线性分布^[9]. 然而, 也有一些研究发现, 薄流动层中速度不是线性分布^[10].

以上流场只存在一个方向剪切, 对于存在多方向剪切的流场, 如溃坝、颗粒扩散、自由表面稳定性等, 要将简单剪切流中应力与剪切率关系拓展成张量形式. 此时, 颗粒流可视为一种特殊的不可压非牛顿流, 流体黏度依赖于剪切率和压力. 当剪切率张量的二阶不变量趋于零时, 黏度发散, 此时可由与摩擦力相关的Drucker-Prager准则给出流动发生的阈值.

以上描述仍存在一些缺陷: 一是没有将颗粒流的流变特性与颗粒群在相互作用下分布的演变联系起来; 二是无法正确地描述约束流中的剪切带; 三

是流动阈值只由简单的Coulomb准则给出, 没有顾及滞后作用和有限尺度效应; 四是颗粒流在由液相型向气相型转换时, 无法捕捉流场存在的气相区域.

颗粒流研究领域所面临的挑战: 一是寻找一个能描述从准静态型到气相型都适用的本构关系; 二是如何处理具有不规则形状、非单一尺度的颗粒流, 因为形状不规则会加剧流场的非局部效应; 三是如何处理颗粒间存在黏附力、颗粒与流体存在相互作用的颗粒流^[11].

综上所述, 湍流和颗粒流都是典型的远离平衡态的非线性复杂系统, 均缺少普适的理论. 尽管我们对湍流和颗粒流的认识取得了飞速发展, 但描述湍流和颗粒物质运动的理论体系至今还未完备, 正如*Science*杂志描述的那样: 统计力学在湍流和颗粒物质这个非平衡体系的失败是物理学中的一个鸿沟.

参考文献

- 1 Tennekes H, Lumley J L. A First Course in Turbulence. Cambridge: MIT Press, 1972
- 2 Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. C R Acad Sci URSS, 1941, 30: 301–305
- 3 Chou P Y, Chou R L. 50 years of turbulence research in China. Annu Rev Fluid Mech, 1995, 27: 1–15
- 4 Chou P Y. On an extension of Reynolds' method of finding apparent stress and the nature of turbulence. Chin J Phys, 1940, 4: 1–33
- 5 Chou P Y. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. Q Appl Math, 1945, 111: 38–54
- 6 Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P. Granular solids, liquids, and gases. Rev Mod Phys, 1996, 68: 1259–1273
- 7 da Cruz F, Emam S, Prochnow M, et al. Rheophysics of dense granular materials: Discrete simulation of plane shear flows. Phys Rev E, 2005, 72: 021309
- 8 Lois G, Lemaitre A, Carlson J. Numerical tests of constitutive laws for dense granular flows. Phys Rev E, 2005, 72: 051303
- 9 Rajchenbach J. Dense, rapid flows of inelastic grains under gravity. Phys Rev Lett, 2003, 90: 144302
- 10 Baran O, Ertas D, Halsey T C, et al. Velocity correlations in dense gravity-driven granular chute flow. Phys Rev E, 2006, 74: 051302
- 11 Forterre Y, Pouliquen O. Flows of dense granular media. Annu Rev Fluid Mech, 2008, 40: 1–24

Summary for “能否发展关于湍流动力学和颗粒材料运动学的综合理论?”

Can we develop a general theory of the dynamics of turbulent flows and the motion of granular materials?

LU XiYun^{1*} & LIN JianZhong^{2,3*}

¹ School of Engineering Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Institute of Fluid Detection and Simulation Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

³ School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

* Corresponding authors, E-mail: xlu@ustc.edu.cn; mecjzlin@zju.edu.cn

Most flows in nature and in engineering applications are turbulent. Turbulence is not a feature of fluids but of fluid flows, and turbulent flow includes multi-scale vortices. Many turbulent flows can be observed in our daily life; however, it is very difficult to give a precise definition of turbulence. Some of the characteristics of turbulent flows can be described, such as the randomness, the diffusivity, the dissipation, and the vorticity fluctuations of turbulent flows. Granular flow is the flow of solid particles in gas or liquid phase, which has been the subject of intense activity at the leading edge of fluid mechanics, soil mechanics, rheology, and statistical physics. The relevant research is motivated by a variety of applications encountered in industrial processes. Most important question is the lack of constitutive equations. The difficulty originates from fundamental characteristics of granular matter such as negligible thermal fluctuations, highly dissipative interactions, and a lack of separation between the microscopic grain scale and the macroscopic scale of the flow. To date, no general theory for the dynamics of turbulent flows and granular flows exists. In this article, we discuss the fundamental characteristics of turbulent flows and granular flows and the relevant theories and methods, and analyze the difficulties in the research of turbulent flows and granular flows.

turbulent flow, granular flow, general theory

doi: 10.1360/N972016-01209

陆夕云

中国科学技术大学教授, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授. 1993 年获中国科学技术大学博士学位, 之后入选中国科学院“百人计划”, 获国家杰出青年科学基金, 教育部创新团队带头人和国家自然科学基金创新研究群体学术带头人. 担任国家自然科学基金委员会数理学部第五和第六届专家咨询委员会委员、《力学学报》副主编和其他多个国际国内学术刊物的编委等.

林建忠

1991 年获北京大学博士学位, 1994 年晋升教授, 1999 年获国家杰出青年科学基金. 现任中国计量大学校长、浙江大学博士生导师、中国计量测试学会副理事长、全国质量监管重点产品检标委副主任、教育部高校力学教学指导委员会委员, *Applied Mathematics and Mechanics*, *Journal of Aerosol Science* 等十余种刊物副主编或编委.