

## \* 专题评述 \*

## 多尺度耦合现象：挑战和机遇\*

何国威<sup>1</sup> 夏蒙焚<sup>1\*\*</sup> 柯孚久<sup>1,2</sup> 白以龙<sup>1</sup>

1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;

2. 北京航空航天大学应用物理系, 北京 100083

**摘要** 以力学学科的两个重要方向——流体湍流和固体破坏为例, 解释了多尺度耦合现象. 这类现象的本质是不同尺度上物理的多样性和强耦合, 动力系统理论和统计力学为这类现象的研究提供了基本的方法. 这种对不同现象中多尺度问题强耦合本质的统一处理可能蕴涵着新的学科生长点.

**关键词** 多尺度耦合现象 流体湍流 固体破坏 统计力学

时空尺度是客观世界的基本特征<sup>[1]</sup>. 例如, 湍流的涡有大小不同的尺度, 材料的微损伤有大小不同的尺度. 人类认识客观世界的科学活动也是针对不同尺度的现象展开的, 打上了尺度的烙印. 例如, 天文学涉及的时空尺度可能以年和光年计算的, 微生物学涉及的时空尺度是分和微米. 如果说上一个世纪的科学大力开拓了极端尺度, 例如宇宙和量子世界, 那么 21 世纪的科学将会更多地关心人体尺度范围的复杂现象.

多尺度耦合现象是客观世界复杂性的主要特征<sup>[2~4]</sup>, 即在不同的尺度上拟序结构和随机涨落的同时或交替出现并互相耦合. 在流体湍流中, 不同时空尺度的涡相互作用构成复杂的流动图案; 在固体破坏中, 不同尺度的微损伤相互作用产生更大尺度上的裂纹导致材料破坏. 由于随机涨落的出现, 完全确定性的方法在这里并不适用; 由于拟序结构的出现, 完全随机性的方法在这里也不适用. 一个可能的方法是拟序结构上的统计分析, 但是, 如何选择统计表象完全取决于对系统物理特性认识的深刻程度. 因此, 多尺度现象构成了对 21 世纪的科

学的挑战.

不同领域、不同时期可能提出不同的多尺度问题. 我们现在所面对的多尺度现象的本质在于不同时空尺度上物理的多样性和耦合性. 这种多样性表现为不同尺度上存在多个不同的物理机制, 它们都对系统的行为起重要的作用; 这种耦合性表现为不同尺度上的物理机制的相互关联, 它们的耦合方式直接决定系统的行为. 不同尺度上物理的多样性和耦合性构成了多尺度现象这枚金币的正反两面.

动力系统理论和统计力学为多尺度现象的研究提供了基本方法. 以力学系统为例, 在一个给定尺度上的物理可以用动力学方程描述, 而动力学方程的建立主要依赖于经典力学, 如牛顿定律. 问题的关键在于不同尺度上物理机制的互相耦合. 如果不存在耦合, 单个尺度上的物理完全可以由动力学方程描述, 剩下的就是类似于解方程那样的认识过程. 从这个意义上来说, 单个尺度上的研究并没有不同尺度上物理的强耦合带来的特殊困难. 在平衡态统计物理里, 不同尺度之间物理耦合的基本假设是基于等概率原理, 宏观性质是由微观运动基于等

2003-05-12 收稿, 2003-08-11 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10172048, 10047006, 10232050)

\*\* 联系人, E-mail: xiam@lnm.imech.ac.cn

概率原理的统计平均导出,而一切中间尺度的现象均归结于等概率原理的结果,这种多尺度现象在原则上是比较简单的.但是,多尺度现象里的大多数问题涉及统计力学中非平衡态的非线性演化过程,不同的尺度之间存在强耦合或敏感耦合,不能简单地采用统计平均以及微扰等方法处理,而必须将不同尺度耦合求解.特别是存在敏感耦合的情形,小尺度上的某些无序性细节在非线性演化过程中可能被强烈地放大,变成大尺度上的显著效应.统计力学为处理这类问题提供了一个基本出发点,但形成对多尺度耦合现象的理论认识并发展有效的处理方法,则是对我们的挑战和机遇.

现代力学的两个重要问题是流体湍流和固体破坏,它们可看作是力学系统中多尺度耦合现象的范例:

#### (1) 流体湍流

在流体湍流里,不同尺度上的涡相互作用构成了复杂的流动图案,它们可能有不同的物理机制而又相互耦合.在上个世纪,针对不同尺度上物理相似的问题,流体力学家发展了求相似解的方法;针对不同尺度上物理耦合较弱的问题,流体力学家发展了小参数摄动法.正是相似解和摄动法解决了航空航天中诸如湍流边界层这样的重大问题,形成了力学史上的一个黄金时代.但是,现在对湍流问题的研究与过去有了根本的不同,它表现为要认识不同尺度上不同的物理过程和不同尺度上物理的强耦合.对于这类问题,经典的相似解和摄动法并不适用.因此,必须发展能解决多尺度现象里多样性和强耦合问题的理论和数值方法.

统计物理为湍流的多尺度模型提供了工具<sup>[5-7]</sup>.一般而言,湍流的统计描述可以用矩方法和概率密度函数方法<sup>[8]</sup>.但是,矩方法难以处理非线性引起的高阶矩封闭问题,而概率密度函数方法难以处理空间耦合引起的多点联合概率密度函数的封闭问题.这时,需要引入一个唯象的封闭性假设,而这些假设尚需进一步的验证.我们正在致力于发展映射封闭逼近方法(mapping closure approximation, MCA)<sup>[9]</sup>.MCA是一种演绎性的解析理论,它通过合理的逼近克服封闭性问题而不需要任何唯象的假设.在MCA里,不需要假定不同尺度之间的相似性和弱耦合.我们把未知的多尺度之间

的关系看成已知的多尺度现象的一个映射,这个映射关系完全由系统的动力学决定.MCA和先前的映射封闭方法<sup>[10,11]</sup>的根本不同之处在于它是系统的逼近理论,而不含先验的假设.我们已成功地将MCA方法用于研究湍流混合问题<sup>[12]</sup>.

现有的数值方法大多在某一特定的尺度范围内进行计算.直接数值模拟方法可求解流动的所有尺度,但这种方法在近期不可能用于工程实际<sup>[13]</sup>;Reynolds平均方法只求解平均流动,而要模拟所有其他尺度对平均流的作用,要构造这样的模型对于湍流来说是非常困难的<sup>[14]</sup>;在大涡模拟中,大尺度的运动被数值求出,而小尺度对大尺度运动的影响必须模拟<sup>[15,16]</sup>.由于只有较小尺度范围内的运动需要模拟,而较小尺度范围的运动有着某些普适特征,因此构造小尺度流动的模型是可能的.但是,湍流并不能简单地分解为大尺度和小尺度运动.众所周知,湍流包含许多不同尺度的运动,每个尺度上的运动机制不尽相同.为此,我们建议发展了多尺度大涡模拟方法(multi-scale large-eddy simulation, MLES)<sup>[17,18]</sup>:把速度场分解为多个不同尺度的运动,不同的尺度对应一个或几个不同的物理机制,不同的物理机制需要不同的亚格子模型,不同的亚格子模型构成的大涡模拟方程需要不同的数值方法和计算网格.我们已成功地发展MLES方法用于研究湍流的声场计算<sup>[19]</sup>.

湍流的研究特别是湍流模型的研究已取得了丰硕的成果.但是,人们经常抱怨:为何没有一个普适的湍流模型用于解决一切问题?实际上,这种湍流模型并不存在.如果非要说它存在的话,那就是Navier-Stokes方程本身.任何一个湍流模型都是Navier-Stokes方程的简化,都是Navier-Stokes方程部分物理的描述,它们不可能是普适的模型.因此,如果承认Navier-Stokes方程是湍流的原表象的话,湍流模型就是湍流的近似表象.我们所要做的就是构造湍流的近似表象,这种近似表象完全取决于具体问题所需要的物理.在这个意义上,湍流不只是一个难题,更是一个研究方向.湍流的研究为多尺度耦合现象的科学认识提供了一个新思想的源泉.

#### (2) 固体破坏

人类生活在一个主要由固体介质支撑的环境

中, 固体介质的破坏、失效几乎涉及人类生活的一切方面、工程技术的各个领域、以及地震、滑坡、雪崩等多种严重自然灾害之中。但是, 由于固体破坏问题的复杂性, 使之成为固体力学、材料科学、物理学以及诸多相关学科的跨世纪难题<sup>[20]</sup>。以固体破坏预测为例, 其困难主要与它的两个特征相联系: 一大类固体的破坏表现为突发性灾变, 灾变前很难捕捉到明显的前兆; 宏观上大体相同的系统其灾变行为可有显著差异, 即灾变呈现不确定性, 只用宏观平均量不足以表征灾变行为。这类复杂特征的根源在于多尺度耦合效应。固体破坏的演化过程涉及很宽的空间和时间的尺度范围<sup>[21,22]</sup>。因此, 对固体破坏的研究也就从针对一条宏观裂纹的断裂力学, 拓宽到对破坏过程的非平衡统计力学研究<sup>[23,24]</sup>。破坏过程通常又是一种跨尺度演化的过程, 即由大量微损伤的累积并通过跨尺度的非线性串级发展而诱发宏观灾变。在整个过程中, 微小尺度上的某些无序结构的效应可能被强烈放大, 上升为显著的大尺度效应, 对系统的灾变行为产生重要的影响。由于不可能对各个尺度上的无序结构及其敏感效应作详尽无遗的描述, 灾变行为呈现不确定性<sup>[25]</sup>, 跨尺度敏感性就是一个典型的案例。

实现灾变预测的一种可能的策略是寻找灾变的共性。为此, 我们在下述两个方面进行了探索。

统计细观损伤力学<sup>[26~29]</sup>是描写非均匀介质损伤演化的一种连接细观与宏观尺度的统计理论。由统计细观损伤力学可导出描写宏观损伤演化规律的损伤动力学函数, 其性质决定了系统中从随机损伤发展为损伤局部化的转变点。而损伤局部化正是灾变的前兆。在这个跨越宏观和细观尺度的认识里, 将宏观尺度, 细观尺度, 宏观控制时间尺度和细观动力学时间尺度耦合起来的无量纲数, 起着关键性的作用。

另一种具有共性的灾变前兆是临界敏感性<sup>[30]</sup>, 它是指当系统趋向灾变点时, 系统对外界控制变量响应的敏感性显著提高。这种临界敏感性是在对一类细观动力学模型演化规律的统计分析中发现的, 反映了损伤演化从细观尺度向宏观尺度跨尺度串级发展的特征。

损伤局部化与临界敏感性是典型的多尺度现象, 是在连接细观与宏观尺度的跨尺度耦合理论框

架中得到的。它们可能是具有普适性的, 并且是可监测的灾变前兆, 因而可为灾变预测提供线索。这个案例表明进一步发展关于固体破坏的跨尺度耦合的理论应是当前最重要的研究方向之一<sup>[30]</sup>。

流体湍流和固体破坏从具体物理机制来看, 似乎毫不相干。但是从多尺度耦合的角度来看, 无论是基本概念、研究方法还是理论框架, 都有惊人的共同之处。例如: 它们都涉及非平衡、非线性的演化, 不同尺度之间存在强耦合, 不能采用微扰方法或求相似解的方法, 都存在跨尺度的敏感性, 以致某些涨落会影响全局的突变等等。因此, 加强交叉学科的多尺度现象的研究, 是我们必须面临的挑战。

由上可见, 对多尺度系统中强耦合的个案处理已有了一定的进展。看来, 似乎并不存在对一般多尺度强耦合问题的普适方法, 至少, 在非平衡态统计物理取得突破之前, 我们难以对这个问题有满意的答案。但是, 对于一类强耦合物理问题案例的处理也许会启发出一定程度上的统一处理方法。这个统一的处理方法多半会来自于学科的交叉, 也就是说, 多尺度现象里看似毫不相关的物理现象的相似处理思路, 会给强耦合物理问题的研究带来新的发展机遇。就像 19 世纪电学和磁学的统一于具体的 Maxwell 方程和 20 世纪生物学与分子科学的结合导致分子生物学的蓬勃发展一样, 多尺度现象研究中新的概念和方法的引入和融合统一会创造出学科发展的新增长点。除了上述统计物理学与流体湍流和固体破坏的结合之外, 多尺度耦合的新增长点也许还存在于: 软物质和连续介质力学、统计力学的结合; 生命现象, 如基因序列、蛋白质功能的研究, 可能萌生新的统计力学方法; 纳/微米尺度和原子分子间作用相结合的准连续力学理论等。实际上, 我们必须处理大量复杂系统中的各种复杂现象, 其复杂性的根源之一就是多物理、多尺度的耦合效应。通常认为, 复杂系统的本质在于“整体大于部分和”, 这意味着应当认真处理多尺度耦合问题, 而不能简单地作解耦处理。因此, 多尺度耦合问题已经成为广泛关注的一大难题。

## 参 考 文 献

- 1 Barenblatt G I. Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymp-

- otics. New York: Plenum Press, 1979
- 2 Glimm J, et al. Multiscale science: A challenge for the twenty-first century. *Siam News*, 1997, 30 (8): 1
  - 3 李静海, 等. 过程工程量化的科学途径——多尺度法. *自然科学进展*, 1999, 9(12): 1073
  - 4 胡英, 等. 化学化工中结构的多层次和多尺度研究方法. 见: *科学前沿与未来, 第五集*, 2002, 香山科学会议主编. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 38
  - 5 Kraichnan R H. Structure of isotropic turbulence at very high Reynolds number. *Phys Fluids*, 1964, 7: 1723
  - 6 She Z S, et al. Intermittent vortex structures in homogeneous isotropic turbulence. *Nature*, 1990, 344: 266
  - 7 Qian J. Variational approach to the closure problem of turbulence theory. *Phys Fluids*, 1983, 26: 2089
  - 8 Pope S B. *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
  - 9 He G W, et al. Mapping closure approximation to conditional dissipation rate for turbulent scalar mixing. ICASE Report No. 2000-48, 2000
  - 10 Chen H, et al. Probability distribution of a stochastically advected scalar field. *Phys Rev Lett*, 1989, 63 (24): 2657
  - 11 Pope S B. Mapping closures for turbulent mixing and reaction. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 1991, 2: 255
  - 12 He G W. Eulerian mapping closure approach for probability density function of concentration in shear flows. ICASE Report No. 2002-9, 2002
  - 13 Moin P, et al. Direct numerical simulation: A tool in turbulence research. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 539
  - 14 Spalart P R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21: 252
  - 15 Meneveau C, et al. Scale-invariance and turbulence models for large eddy simulations. *Annu Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 1
  - 16 Li J C. Large eddy simulation of complex turbulent flows: Physical aspects and research trends. *Acta Mech Sinica (English series)*, 2001, 17: 189
  - 17 Huges T J R, et al. The multiscale formulation of large eddy simulation: Decay of homogeneous isotropic turbulence. *Phys Fluids*, 2001, 13: 505
  - 18 He G W, et al. Evaluation of sub-grid scale models in terms of time correlations. In: *Proceeding of the summer program 2002, Center for Turbulence Research, Stanford University*, 2002
  - 19 He G W, et al. Effects of subgrid scale modeling on time correlations in large eddy simulation. *Phys Fluids*, 2002, 14: 2186
  - 20 Bazant Z P, et al. Scaling of structural failure. *Appl Mech Rev*, 1997, 50: 593
  - 21 Pantelides S T. What is materials physics, anyway? *Physics Today*, 1992, 45: 67
  - 22 Barenblatt G I. Micromechanics of fracture, In: Bodner S R, et al. eds. *Theoretical and Applied Mechanics*, Elsevier Science Publishers B V, 1992. 25~52
  - 23 Curran D R, et al. Dynamic failure of solids. *Physics Reports*, 1987, 147: 253
  - 24 邢修三. 脆性断裂的微观机理和非平衡统计特性. *力学进展*, 1986, 16: 495
  - 25 夏蒙芬, 等. 破坏现象耦合斑图演化诱致突变的系统计. *科学通报*, 1999, 44: 562
  - 26 夏蒙芬, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(I). *力学进展*, 1995, 25(1): 1
  - 27 夏蒙芬, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(II). *力学进展*, 1995, 25(2): 145
  - 28 Bai Y L, et al. Non-equilibrium evolution of collective microdamage and its coupling with mesoscopic heterogeneties and stress fluctuations. In: Horie Y, et al. eds. *High-Pressure Shock Compression of Solids, Old Paradigms and New Challenges*, New York: Springer, 2002. 255
  - 29 Bai Y L, et al. Closed trans-scale statistical microdamage mechanics. *ACTA Mechanica Sinica (English Series)*, 2002, 18 (1): 1
  - 30 Xia M F, et al. Critical sensitivity and trans-scale fluctuations in catastrophic rupture. *Pure Appl Geophysics*, 2002, 159: 2491