

## 迅速发展的非线性连续介质力学研究\*

白以龙

中国科学院力学研究所, 北京 100080

**关键词** 非线性连续介质力学; 牛顿力学; 混沌; 复杂性

20世纪中、后期以来, 自然科学观正在经历一个重大的转变, 即从确定论、还原论的看法又向前跃进了一步, 如周光召在1995年全国科学技术大会的报告《迈向科技大发展的新世纪》中说的, 非线性科学“为人类观察世界打开了一扇新的窗户”, “透过这扇窗户看到的将是与牛顿、爱因斯坦创建的确定性的、简单和谐的模式不同, 而是一个演化的、开放的、复杂的世界, 这是一幅更接近真实的世界图景。”<sup>[1]</sup> 夸克理论的提出者诺贝尔奖获奖人盖尔曼称其为描述整体效应不等于部分之和的复杂性理论。非线性连续介质力学对这个科学前沿的形成起了重要的推动作用, 目前又正在对其新发展做着重要的贡献。

众所周知, 1687年牛顿发表“自然哲学的数学原理”, 提出了牛顿三定律, 成功地解释了上至天体, 下至地面物体运动的基本规律, 被誉为是人类认识史上对自然规律的第一次科学概括和综合。科学从此摆脱了神学和宗教。当有人向拿破仑告状说, 拉普拉斯在其“天体力学”一书中, 没有讲上帝, 于是拿破仑问拉普拉斯: “你写了这部讨论宇宙体系的大著作, 但不提到它的创造者”。拉普拉斯挺直了身子, 率直地答道: “我用不着那个假设”。从此机械性确定论主导着整个自然科学达200年, 支撑起了人类关于自然和工程科学的庞大的知识体系。<sup>[2]</sup>

在这个过程中力学的一个重要进展是连续介质力学, 它创造了被爱因斯坦称作“为以后寻求全部物理学新基础的努力所必需的工具”(爱因斯坦, 1927, 1936)<sup>[3]</sup>。爱因斯坦指出, 把牛顿定律应用于连续分布的质量, 必然会导致偏微分方程的发现和应用, 这种方程第一次为场论的定律准备了语言。另一方面, 他又指出: “连续介质力学, 不去考虑把物质再分为实在的质点, 这种力学是以一种假想来表征的, 既假定物质的密度和速度对于坐标和时间的依赖关系都是连续的, 而且相互作用中那个不是明白规定的部分能被看作是面力, 这种力也是位置的函数。”这使连续介质力学又有了“伟大的实际意义。”重要的是, 这第二个方面, 使得人类跨越了大量粒子或质点组成的大体系带来的巨大的困难, 一举解决了宏观介质的运动问题。事实上, 只靠牛顿定律去解决三体相互作用下的运动, 依然使现在的力学研究者生畏。而且,

\* 在中国科学院力学研究所建所40周年纪念会上的发言。

近年(1994年)用最快的计算机,按牛顿定律逐个计算的分子动力学模拟,才处理了包括 $10^8$ 个原子的体系,大体相当 $0.1\mu\text{m}$ 尺寸或更小一些的三维固体。因此,连续介质力学的科学意义和实际意义确实是重大的。

基于牛顿力学、连续介质和微分方程等一系列概念和工具,电磁学理论、热力学理论等也迅速发展起来了。科学家和工程师们在这块与人类生存密切相关的土地上辛勤耕耘,并陆续创造出震惊世界的巨大生产力——机器,火车,轮船,飞机……。机械性确定论全面开花、结果了。

科学家对知识是永不知满足的,他们不满意对物质的接近经验的概念,不愿意简单地跳过物质内部的相互作用,于是量子论、原子论、相对论出现了。这些发现表明,特别在微观世界里,牛顿力学需要修正,能量要量子化,物质要原子化。特别是量子力学的成功,提示了机械性确定论的严重不足。这一个时期的成就也在人们心中萌生了另一个科学观念,即还原论。还原论认为物质世界是由基本微元,分子、原子、夸克组成并服从一些基本规律。一旦把基本微元和基本规律搞明白了,就能解释物质世界的各种现象。这导致本世纪初,两大派物理学家间十分尖锐的观点对立和激烈争论。

1948年爱因斯坦在给玻恩的信中写道<sup>[3]</sup>：“对科学的期望,我们已渐渐走向两极：你相信掷骰子的上帝,我则相信作为实体而存在的物质世界具有完善的规律。”看来,爱因斯坦认为人类进入微观世界仅只百年(从道尔顿提出原子论算起),只要人类能深入认识“物理体系的实在状态”,那么就会得到“完全因果性”的认识。

这里,我们不想引述作为另一方的一批量子力学创建者们的论述,而是引述庞加莱在研究纯粹力学系统(三体问题)后提出的一些很不相同的看法。这个见解对本世纪后期的自然观的转变影响更大。

三体问题是问,在万有引力相互作用下,三个质点如何运动。按确定论,给定了初始位置和速度后将可得到确定的后继运动,但研究表明,对于三体竟难以确定后来某一时刻的位置和速度,也无法确定该系统的稳定性,例如,其中二个物体是否会相撞。杞人忧天的瑞典国王奥斯卡二世悬赏,寻求能预测太阳系的稳定性的人。1899年庞加莱以三体问题的研究结果获奖。他提出了今日称之为“庞加莱截面”的工具刻画这个运动。他发现,即使是一个质点的质量比其它两个质点的质量小许多的简化情况,穿过庞加莱截面的点序列(代表着体系相继的运动)竟是如此复杂,“没有什么能给我们一个三体问题复杂性的更好概念。”因此,庞加莱总结道:“一种非常微小,以至我们觉察不到的起因可能产生一个显著的,我们决不会看不到的结果。初始条件中的微小差异导致最终出现根本不同的现象。前者的微小误差将使后者出现巨大误差。于是我们就不可能作出预言。这现象就被认为是偶然性的现象。”<sup>[4]</sup>

但是,庞加莱的这个持异议的声音,“只是微弱地,不确定地对未来麻烦的一个颤抖的暗示;这声音仅仅出现一次,又沉寂了;这声音——如果它被人听见过的话——被置若罔闻了”(斯图尔特,1991)<sup>[5]</sup>。在我国也是这样,庞加莱曾被当作唯心主义批判,从而阻塞了我们自己的学术思路。

唤起人们对这一重要自然观重新认识的是洛仑兹。洛仑兹是气象学家,关心的是天气预报。他的理论工具是连续介质力学中的热对流模型,他的技术工具是60年代初的电子管计算机。1961年洛仑兹为了考察该模型的长时间行为,他把上一次的计算结果,作为下次计算的输

入，这是用小机器算大问题常采用的战术。在洛仑兹轻松地喝完咖啡回来看结果时，发现结果与从头算起的结果却大不相同。洛仑兹回忆道，当时的第一个念头是“计算机的电子管又出毛病了”（我们大家都会这么想）。但是，洛仑兹很快意识到，毛病出在他用手敲入的作为输入的数据，它是四舍五入后的三位，而连续计算的精度是六位。后来的巨大差别来自初始千分之一的误差。洛仑兹的工作发表于1963年的《大气科学杂志》。但直到10年后才被人认识其意义，并成为“混沌”理论的发端。

实际上，面对自然和工程现实的力学研究者几个世纪以来一直在冲击着发源于力学成就的机械性确定论，以及还原论。

还是在建立连续介质力学的初期，1774年欧拉在丹尼尔·贝努里（第一）的帮助下，解决了现在称之为欧拉压杆失稳的问题。它表明压杆在临界载荷以下有唯一解，保持直线状态。在临界点处，解发生分岔，即杆子可被压弯，但往哪边弯，从原方程里却看不出来。在同一控制条件下可不止一个结果，表现了多样性。这与二次方程有两个根相当。之后，庞加莱建立了系统的分岔理论。非线性带来了多样性和复杂性，直至本世纪初物理学家玻恩又重新考察压杆是怎么出现非对称解的。

另一个例子发生于二次大战后的美国。那时计算机刚露头角，费米和乌拉姆考察了另一个非线性连续介质力学问题，试图预测附加了非线性项的弹性弦的长时间行为。乌拉姆后来回忆他们曾这样预测其结果：“弦上的其它振动波型是如何变得更加重要的以及整个运动最后是如何——当时我们这样以为——热能化的。也许就和开始呈层流状态慢慢湍流得越来越厉害并将宏观运动转化成热的液体的行为相似。”但是，“计算结果在本质上，居然与熟知流体力学的费米所预期的大相径庭”<sup>[6]</sup>。这个范例成为后来非线性理论中孤立子研究的发端。

宏观连续体中这些丰富多采的画面终于把科学家从确定论和还原论中惊醒。普里高津写道(1987)<sup>[7]</sup>，“甚至在前几年，若是一位物理学家被问及，什么是知道的，什么是不知道的，他会回答说，真正的问题仅存在于宇宙的前缘领域，发生在基本粒子层次和宇宙学层次，另一方面，他会声称，与宏观层次有关的基本定律已经一清二楚了。……科学历史，真象一则富于戏剧性的故事，曾有过一些关头，经典科学似乎已近于功德圆满，……但每每这个时候，总有一些事情出了差错，于是方案又必须扩大，待探索的领域又变得宽广无际了。

……今天，只要我们放眼一望，就会发现演变、多样化和不稳定性。”

作为力学工作者，当我们冷静地回顾力学的发展史，真是“祸兮福所倚，福兮祸所伏。”牛顿力学和连续介质力学的成功在于，摒除次要因素，把整个宇宙看成一部大机器，通过经验和推理认识“机器”的规律。连续介质力学则更进一步跨过了物质结构的细节，通过接近经验的概念，直接得到了一大类宏观体系的规律。有得就有失，完全接受这种观点，又都已限制了科学的发展。但解铃还需系铃人，上面例举的几个针对连续介质中尚未清楚的问题的探索，使人们不仅认识到机械论的局限，还认识到还原论的局限，于是一扇新的观察真实世界的窗口被打开了。

现在，我们仍面临着一系列的力学难题。钱学森于1960年指出<sup>[8]</sup>，固体强度和塑性变形，就“属于连基本概念也还不十分清楚的问题”，“直到现在也还没有较全面的微观理论，没有工程上可用的肯定结果。”30年过去了，这个局面并没有发生根本的变化。这可能表明，现有的非线性力学的已有成果，也尚未能提供足够的工具，解决此问题。事实上，强度问题

跨越了固态物质从原子键断裂到固体出现宏观分离, 高达  $10^7$  倍的尺度差异, 哪些尺度上的哪些因素对宏观破坏是不可忽略的重要因素, 并将其包括进新的(连续介质)力学的框架之内是至关重要的。这必将突破完全忽略物质结构的经典连续介质力学, 并为相邻学科和工程技术带来新方法。

兰姆在30年代曾说, 我已临垂暮, 但紫外发散和湍流两个问题, 仍使我不安。多位物理学家(海森堡, 索末菲尔德等)均有类似表示。紫外发散早已解决, 但湍流却一直仍被视为“经典物理学最后之谜题”, 为什么呢? 现在看来, 可能是由于湍流是多层次的涡旋相互作用的有序(大涡)与无序(小涡)共存的体系。它是物质组织成复杂运动形态的一个范例。

基本规律在多质点系统中长时间多次重复, 可能形成物质在不同层次的多种复杂的行为(Kadanoff, 1991)<sup>[9]</sup>, 卡达诺夫举的例子就是湍流。力学造就了机械论的成功, 物理学造就了还原论的成功, 现在, 科学的再一次飞跃, 把二者都推到了他们过去成就的反面——物质的多层次性和复杂性。非线性连续介质力学正在这条道路上迅速发展。中国的力学家一定会抓住这个机遇做出自己的贡献。

### 参 考 文 献

- 1 周光召. 迈向科技大发展的新世纪. 中国科学报, 1995年5月29日, 3—6版.
- 2 仓孝和. 自然科学史简史. 北京出版社(1983)
- 3 阿·爱因斯坦. 纪念牛顿200周年(1927), 物理学和实在(1936), 给玻恩的信(1948). 爱因斯坦文集商务印书馆(1976)
- 4 转引自赵松年. 非线性科学: 它的内容, 方法和意义. 大气物理所(1992)
- 5 伊·斯图尔特. 上帝掷骰子吗. 上海远东出版社(1995)
- 6 斯·乌拉姆. 一位数学家的经历. 上海科学技术出版社(1989)
- 7 G·尼科里斯, I·普里高津. 探索复杂性. 四川教育出版社(1987)
- 8 钱学森. 物理力学讲义. 科学出版社(1960)
- 9 Kadanoff L P. *Phys. Today*, **44**, 3 (1991): 9—11

## RAPIDLY DEVELOPING NON-LINEAR MECHANICS OF CONTINUOUS MEDIA

Bai Yilong

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

**Keywords** *Non-linear mechanics of continuous media, Newton mechanics, chaos, complexity*