力学纵横

力学几落几起，源于生活之树长青

白以龙

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

力学是以宏观世界为主要对象，研究力和运动的关系的一门学问．从古至今，不断有人深入钻研力学，成就大事业，如牛顿，拉格朗日，冯·卡门，钱学森等．可能是因为这些对象和现象大多是普通人都能看得见，摸得着的．所以，也不断有人否认，抹杀力学，甚至扼杀力学，使力学的发展受阻．但是，生活这棵常青之树，催生了力学，更繁荣着力学．

聪明的阿基米德 (公元前 287～ 公元前 212) 奠定了静力学的基础，堪称力学的先驱．他在洗澡盆里洗澡时悟出了浮力的原理，并用来为叙拉古的亥厄洛王测量黄金王冠真伪的故事，脍炙人口．但是，他竟然被罗马入侵军杀死．他的一些成果晚至二十世纪初才被发掘出来．无独有偶，中国古代文献“墨经”记载的力学知识 (公元前 5 世纪 ～ 公元前 3 世纪) 也被湮没了两千年．人类早期对力学知识的探索，就这样被延误，湮没着．

但是，不断增长的人类的生产活动依然有力地推动着对力学规律的探索．出于生产和算历的需要，人们必须认识天体的运行．于是，伽里略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》一书中，试图阐明宇宙的力学．但是，他竟遭宗教裁判终身禁锢．著名的牛顿运气要好得多， 27 岁的牛顿受到老师巴罗的提拔， 40 岁的巴罗把教授位子让给了牛顿．牛顿最终在《自然哲学的数学原理》中，阐明了经典力学的基本规律，但他依然未能逃脱教会的压力和攻击．巴克莱主教针对牛顿的学说写道：“自然哲学者的任务是研究和了解上帝所造的那些标记物．……所谓必然的和本质的，那只是完全依靠于主宰万物的精神的意志的．”拉普拉斯把大自然看成是一部遵循一定的规律的机器，而不是全能的上帝．因此，有人向当时的皇帝拿破仑告状，说拉普拉斯在《天体力学》一书中不提上帝，真是大逆不道．但是，所有这一切都未能阻止力学成为近代科学形成的里程碑，力学蓬勃发展起来了．

一个学说在获得巨大成就之后，又总会有人认为这个学科也发展到头了，就在发生上面关于拉普拉斯的故事的时代，也是在法国，就连著名的学者狄德罗也曾说过：“这门学科很快就会停滞不前……我们将不能越过那个地方”．狄德罗为什么会这么讲呢？让我们稍微仔细地看一看那时的力学．表 1 勾划了一幅近代自然科学以前 (16 世纪以前)，和 17 至 18 世纪力学发展的简图．

表 1

年代	人物	主题	社会背景	学科
16 世纪以前				
287～	阿基米德	“论平面图形的平衡”		
212 BC		“论浮体”	简单工具和建设	静力学
16～17 世纪				
1589	伽里略	落体，加速度	天体运动，航海	
1609	开普勒	天体运动三定律		
1687	牛顿	“自然哲学的数学原理”		经典 (动) 力学
18 世纪				
1717	伯努利	虚位移	机械	
1743	达朗贝	达朗贝原理		
1788	拉格朗日	“分析力学”		刚体 (分析) 力学

看起来，跨海的探险，机械的发展，微积分的出现，一批法国分析大师们的杰出努力，造就了力学的空前繁荣．非常凑巧，相隔一百年，分别接近两个世纪末，牛顿 (1687) 和拉格朗日 (1788)，各自集大成，总结并形成了经典动力学和分析力学的学科体系．倘若站在 18 世纪末的门坎上，背靠过去两个世纪的宏伟成

就，展望 19 世纪的前景，确实会使人产生力学已经功德圆满，难以再有新的重大作为的感慨．这大概就是前面引述的狄德罗论断的原由．

与狄德罗悲观的预言相反，在 19 世纪竟然又耸立起新的力学高峰．表 2 是 19 世纪力学的一个大大简约了的图示．其最引人注目之处是连续介质力学的创立和统计力学的引入．显然，面对当时大规模的水利、土木和机械工程，只有牛顿 (质点) 力学，不考虑力场和变形场之间的关系，是无法阐明世界和改造世界的．而从质点到连续介质，这又是科学概念上一个极大的飞跃，是科学家们百年心血的结晶．于是又隔一百年，接近 19 世纪末，兰姆 (1878) 和乐夫 (1893)，集大成，形成了连续介质力学．这是 18 世纪末的人所未曾预料到的．它是 19 世纪大规模工业革命的产物，也是这个工业革命的杠杆．对连续介质力学的巨大成就，学术价值和对整个现代科学的历史影响，如果不看下面爱因斯坦的评论，恐怕许多现代学者还没有真正意识到．

爱因斯坦于本世纪 20 和 30 年代，曾多次评论连续介质力学．他写道："连续介质力学，它不去考虑把物质再分为实在的质点，……假想……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．这种力也是位置的连续函数．""除了它们的伟大实际意义以外，科学的这些部门还创造了一些形式的工具 (偏微分方程)．这些工具是为以后寻求全部物理学新基础的努力所必须的．"

表 2

年代	人物	主题	社会背景	学科
19 世纪				
1821	纳维	流体，弹性体方程	水利，土木	
1823	柯西	应力，应变		
1834	汉密尔顿	正则方程		
1878	兰姆	"流体运动的数学理论"		
1893	乐夫	"数学弹性理论"		连续介质力学
1860	麦克斯韦	气体速度分布		
1877	波尔兹曼	熵的统计解释		
1903	吉布斯			统计力学

另一方面，如果我们真的"去考虑把物质再分为实在的质点"，哪怕只是观察一个连续介质单元，那么将会如何呢？麦克斯韦和波尔兹曼从分子运动的角度来思考这个问题．设想 1 ml 的气体中含有 10^{19} 个气体分子，这是多么巨大的，难以处理的一个质点体系呀！但是，统计力学以气体为出发点，却沟通了质点和连续体．

毋庸讳言，连续介质力学和统计力学属于 19 世纪的几个科学高峰之列．可悲的是，统计力学的奠基人之一的波尔兹曼，当时竟遭冷遇和拒绝．他曾悲愤地写道："我只是作为个人对时代的潮流进行微弱的抵抗，但我为捍卫它而作出的贡献，有力量使气体理论继续存在下去．"但是，他终究不堪忍受压力，于 1906 年自杀身亡．

进入 20 世纪，相对于物理学在微观世界里的突飞猛进，一些人又怀疑，力学还能有哪些发展．他们问，力学还是科学的前沿吗？事实上，奋斗在生活、工程和科学第一线的人们，在重重压力下却又开始了艰难的探索，去开拓新的原野了．普朗特，冯·卡门，泰勒，谢多夫，钱学森等人是这个时代的杰出代表．他们从工程应用的角度，率先突入了非线性世界，揭示了边界层，冲激波，涡街，湍流，薄壳失稳，自模拟，一系列新现象，新规律，在 20 世纪形成了应用力学，造就了宏伟的航空和航天业．

表 3

年代	人物	主题	社会背景	学科
20 世纪 (A)				
1904	普朗特	边界层	航空，航天	
1912	卡门	涡街		
1942	普朗特	"流体力学概论"		应用力学

当时，面临正在兴起的航空和航天业，三方面的非线性问题提到了人们的面前．一是因飞行速度跨越声速引起的声障，二是因飞行器的薄壁结构的大变形引起的几何非线性，三是因使用新型材料带来的物理非线性．前辈的成就没有留下足够的方法，来解决这些问题．怎么办？对此，冯·卡门大声疾呼"工程师们与非线性问题拼搏！"他写道："在许多情况下，工程

师靠简化假设，就能将他的问题线性化，并且一部数学教材，就能容易地提供他所需的全部工具．但是，如果他遇到的是一个真正的非线性问题，也就是说，线性化会使其变得毫无意义，此时，工程师就不得不靠自己与非线性拼搏了！”正是这种无情开拓，勇于拼搏的精神，为我们带来了 20 世纪力学的蓬勃发展．

正当大多数人，甚至力学界的人，沉缅于应用力学的这些伟大的成就，感慨今后的力学将辉煌不再时，另一批有识之士，却以其敏锐的触角，和坚韧不拔的毅力，为人类观察世界，又开辟了一扇崭新的窗口．

表 4

年代	人物	主题	社会背景	学科
20 世纪 (B)				
1899	庞加莱	三体问题，稳定性	(多) 天体，振动，大气	
1963	洛伦兹	混沌		
196x	柯尔莫哥洛夫等	KAM 定理		
				非线性科学

事实上，早在 1744 年欧拉就发现了非线性问题中的分岔现象．他发现，一根弹性杆在其两端受压时，起初仍保持为笔直．但当两端的压力增加到某个临界值后，杆就发生弯曲，但弯向哪一边却表现出任意性．这就带来了变形的多样性和复杂性．庞加莱，洛仑兹等人，从类似的视角更深入地考察了非线性带来的多样性和复杂性．庞加莱考察的是针对天体运动的三体问题．他被他的发现所震惊．庞加莱写道“这一图形的复杂性令人震惊，我甚至不想画出来．没有什么能给我们一个三体问题复杂性的更好的概念．”庞加莱敏锐地感觉到，“一种非常微小，以至我们察觉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．”而洛仑兹则称他是“在天气预报的理论方面做开拓性实验时，偶然发现了一种后来被称作“混沌”的现象”．他回忆道：“我……键入一行数，它是前不久打印出来的模拟数值．然后再重新让计算机计算．我在走廊上喝了一杯咖啡，……打印出的数值怎么也不像老的数值．……如果我键入的不正好是原来的数值，而是键入原来打印输出的结果的四舍五入值，那么这种初始的舍入误差是故障的真正原因，这种误差被不断放大，直到它们主宰了方程的解．用今天的术语来说，这就是混沌．”

今天，人们意识到，自己正在打开一扇不同于牛顿、爱因斯坦观察世界的窗口．通过这扇刚刚打开了一点的窗口，我们看到的是确定性与随机性结合的，简单性与复杂性结合的世界．有人比喻说，线性问题就像一班在教堂优雅和谐唱诗的男童歌手，而非线性问题则像一群桀骜不驯的烈马．

现在，假想我们正处于 19 世纪末，刚刚认识了不用马拉，不用蒸汽自己就会跑的“汽车”（Benz，1880s）．那时，我们虽然已强烈地感受到了牛顿力学、热力学和电磁学以及它们所创造的巨大的生产力，不过，要在当时去想象人能在天上飞，而且还要飞出地球去，去展望什么桀骜不驯的混沌 (庞加莱感到了这个气息)，却太困难了．或许就像现在幻想人类可以控制天气，可以控制地震一样天方夜谭．所以，现在又有相当一些人断言，主要以宏观世界的运动和力的关系为研究对象的力学，对人类知识的创新已无足轻重，这实不足为怪．但是，三个世纪力学的成就清楚地告诉我们，生活和周围的世界是常青之树，它永不停息地推动着力学向前跃进．无情开拓，勇于拼搏的精神，为人类带来了过去三个世纪力学的蓬勃发展，无疑，它也是推动力学继续向前的原动力．

力学的丰富多彩，是宏观世界中的运动形态的丰富多彩和复杂性的反映．生活中真实的系统和介质，远比现有的力学模型和理论中假设的复杂得多得多．这可能是力学尚不能对一些常见的力学现象，如湍流、破坏等，作出清楚理论阐述的原因．这里，我们举一个小例子来说明力学对象的复杂性．假设人类生活的世界，只涉及由微观质点（如分子）到连续体单元（如沙粒），大约为几埃 (10^{-10} 米) 到微米 (10^{-6}) 的跨度，这样，从最简单的一维角度看，沙粒约含 1000 个微观质点．设想这颗沙粒，像计算机一样，由两种微观质点组成，如 0 和 1，黑和白，好和坏，等等．那么，这颗沙粒有多少种不同的形态呢？对这颗一维的沙粒，一个粗略的估计是，约有 2^{1000} 种形态，即约 10^{300}．人们早就知道，我们无法逐一穷尽这些形态，即使使用最快的计算机，也需要大大超过宇宙年龄的机时．更重要的是，组成这颗沙粒的微观质点会在力的作用下，在 0 和 1 两态间变化．从平均的角度来看，什么是表

征这种动力学演化的分布函数？从现实来看，又确实存在一些可能会被平均化抹杀掉的，对某些微观结构极其敏感的演化模式，并形成小概率的大灾难．波尔兹曼曾开拓性地把动力学的研究，从单个质点转向大量质点集体的行为．但是，大量质点体系中的远离平衡的丰富多彩的运动形态和复杂性，这种新的挑战，呼唤着新的力学．

正如诺贝尔奖获得者普里高津写道："过去三个世纪里追随牛顿综合法则的科学历史，真像一桩富于戏剧性的故事．曾有过一些关头，经典科学已近于功德圆满，决定性和可逆性规律驰骋的疆域似乎已尽收眼底．但是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，待探索的疆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．"另一位诺贝尔奖获得者安德孙也持类似的观点，"在每个复杂的层面都会出现全新的特征，每个阶段都需要全新的法则，概念和普遍化，需要与上一阶段同样多的灵感和创造性"．总之，长青的生活之树中，包含着不竭的丰富多彩的挑战性问题，这些问题将继续推动着力学从一个高峰走向另一个高峰．

身边力学的趣话

从窑洞的冬暖夏凉谈起
——一种居室温度调节的节能前景

武际可　徐　丹
(北京大学力学与工程科学系，北京 100871)

摘要　本文通过一个地表热传导模型的建立及求解，得出了地下温度变化与地表存在相位差并且振幅衰减，某个深度以下温度恒定为全年平均温度的结论．由此讨论了一种温度调节的设想，论证了可行性并与现有方案进行了比较．

关键词　热传导，温度调节，供热

1　冬暖夏凉的窑洞

窑洞，是我国西北部黄土高原地区的传统民居建筑，广泛分布于陕北、山西、陇东、宁夏南部以及豫西等地，早在古代，我们的祖先就有"凿穴为居"的习俗，至今居住人口仍达 4000 万以上．

生活在黄土高原的人们为什么选择窑洞这种居室形式呢？黄土的直立性为开凿窑洞提供了条件．黄土高原被众多的沟壑切割得支离破碎，在沟壑的岩面上开凿窑洞是十分方便的．对于在黄土高原塬面保存较好的平坦地区，人们就凿掘出方形或长方形平面的深坑，沿着坑壁开凿窑洞，称为地坑窑或天井窑．其间的生活被描述为"上山不见人，入村不见村，平地起炊烟，忽闻鸡犬声"．

除了上述因地制宜、能够和易于建造的优点外，窑洞的另一显著特点是保温隔热、冬暖夏凉，其温度和相对湿度的稳定性好，有益于人们的健康．住在窑洞里舒适，能延年益寿，难怪它深受人们的喜爱．

窑洞的冬暖夏凉，古人就已清楚．在明人陈继儒所著的《销夏部》中就有不少古人利用天然洞穴的凉爽以避暑的记载．其中有一则说："巨鹿金乡山北有石洞口，清凉，深十余丈．内凿四小阁，阁外一堂，陛高三尺，堂外两门，门外两大阁．石道长三十丈，阔十有六尺．世传秦始皇避暑宫也．"说明在很古时候，窑洞挖得已经有相当的规模，甚至有宫殿的形制，用作避暑．该书在摘录一篇宋朝人写的《石乳洞记》的末尾说："洞之中，冬温而夏凉．"

为什么窑洞和天然洞穴里冬暖夏凉呢？从现代科学技术的角度看，是否可以利用这种现象呢？值得我们仔细分析一下．

2　窑洞里冬暖夏凉的原因

设 $u(t,z)$ 为在 t 时刻距地面深度为 z(向下为正方向) 处的温度，因为从地表向地下传热是一个热传导过程，所以 u 满足下面的一维热传导方程及边条件

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial u}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2 u}{\partial z^2},\quad t\geq 0,\ z\geq 0\\&u(0,t)=\cos\omega t,\quad t>0\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

本文于 1999-09-30 收到．