

20 世纪理论和应用力学十大进展

在我们迈步走向新世纪的时候, 正值《力学进展》创刊 30 周年. 为纪念这一特殊的历史时刻, 《力学进展》举行了“20 世纪理论和应用力学十大进展”评选活动. 本次活动历时半年多, 经过编委会提名、初步筛选, 确定出入围的 20 世纪理论和应用力学进展 17 项, 分别请有关方面专家精心撰写了条目介绍, 最后请从事力学及与力学相关学科的研究人员投票. 评选活动得到了广大热心读者的极大支持, 共发出选票 994 张, 收回有效选票 409 张. 2001 年 7 月 3 日编辑部进行了计票, 得到“20 世纪理论和应用力学十大进展”选出结果如下(其中“稳定性、分岔和混沌理论”一条原来是以“混沌理论”和“稳定性与分岔”两条分别投票的, 得票分别为 337 票和 210 票, 考虑一些投票人的建议, 现合并为 1 条, 得票按 337 票计):

序号	名称	得票数
1	有限元方法	384
2	断裂力学	343
3	生物力学的创立	337
4	稳定性、分岔和混沌理论	337
5	边界层理论	323
6	塑性力学和位错理论	312
7	湍流统计理论	259
8	奇异摄动理论	222
9	力学的公理化体系	199
10	克服声障、热障的力学理论	196

参加条目撰写的同志有: 戴世强、邓学莹、段祝平、黄永念、黄筑平、李家春、连淇祥、陆启韶、沈青、谈庆明、陶祖莱、王克仁、王文标、王自强、解伯民、姚振汉、殷有泉、余寿文、张兆顺、周显初、朱如曾、朱照宣, 在此深表谢意.

1 有限元方法

有限元法是 20 世纪 60 年代逐渐发展起来的对连续体力学和物理问题的一种新的数值求解方法, 其做法是, 对所要求解的力学或物理问题, 通过有限元素的划分将连续体的无限自由度离散为有限自由度, 从而基于变分原理或用其它方法将其归结为代数方程组求解.

有限元法不仅具有理论完整可靠, 形式单纯、规范, 精度和收敛性得到保证等优点, 而且可根据问题的性质构造适用的单元, 从而具有比其它数值解法更广的适用范围. 随着计算机技术的发展, 它已成为涉及力学的科学研究和工程技术所不可或缺的工具. 对于力学工作者来说, 借助于有限元的工具, 可以得到许多难以求得解析解的问题的可靠数值结果; 对于工程技术人员来说, 很多复杂工程对象的设计可以不依赖或少依赖于耗费巨大的实验.

1943年 R. 库朗 (R. Courant) 已从数学上明确提出过有限元的思想, 20世纪50年代, J. H. 阿吉里斯 (J. H. Argyris)、R. W. 克拉夫 (R. W. Clough) 等人从复杂结构分析发展出了有限元的雏形。1960年克拉夫首次采用有限元的名称。O. C. 辛凯维奇 (O. C. Zienkiewicz) 等许多学者对有限元法的发展做出了重要贡献。

2 断裂力学

1921年 Griffith 提出了能量释放率理论, 认为玻璃等一类脆性材料均含有微小缺陷或裂纹, 这一类脆性材料低应力脆断是由于微小裂纹失稳扩展造成的。他指出一旦含裂纹物体能量释放率等于表面能, 裂纹就会失稳扩展, 导致低应力脆断。

1948年 Irwin, Orowan, Mott 各自独立地提出了修正的 Griffith 理论, 指出将裂纹尖端区塑性功计入耗散能, 就能将 Griffith 理论用到金属材料。1956年, Irwin 提出了应力强度因子理论和断裂韧性新观念, 建立了临界应力强度因子准则, 认为裂纹尖端应力强度因子达到临界值时, 裂纹就会失稳扩展, 奠定了线弹性断裂力学理论基础。1962年 Paris 提出了疲劳裂纹扩展公式, 开辟了疲劳寿命预测的新领域。1962年 Dugdale 提出了窄带屈服区模型, 1968年 Rice 建立了 J 积分原理, 指出了 J 积分的守恒性, Hutchinson, Rice 和 Rosengren 独立地提出了弹塑性材料裂纹尖端 HRR 奇性场, 为弹塑性断裂力学奠定了理论基础。

断裂力学是20世纪固体力学重大成就之一, 是工程材料与构件强度估算和寿命预测的重要理论基础。在断裂力学原理指导下建立起来的平面应变断裂韧性 K_{IC} 和 J_{IC} 以及裂纹尖端张口位移临界值 δ_{IC} 的测定规范及相应的断裂准则, 已经成为工程材料与结构设计规范的重要组成部分。“损伤容限设计”已成为航空航天结构设计的重要原理。“缺陷评定规范”和“先泄漏原理”已经用于压力容器和管道的结构设计。断裂力学的发展还必然地激发了细观和微观断裂理论研究的蓬勃发展。

3 生物力学的创立

生物力学创立于20世纪60年代后期, 其内涵是力学方法和生物学方法相结合, 研究不同层次生命体 (从个体到生物大分子) 结构 - 功能的定量关系。冯元桢 (Y. C. Fung) 关于肺微循环的研究 (1969) 提出了生物力学的独特的方法学原则, 这是生物力学作为一门独立的分支学科的标志。而应力 - 生长关系 (冯元桢假说, 1983) 则是生物力学的活的灵魂。以细胞层面为焦点, 上及组织、器官, 下至生物大分子的生物力学的研究是当前生物医学工程十分活跃的一个领域。

30余年来生物力学的研究对相关领域的发展起了重大的推动作用。定量解剖学、定量形态学、系统 (定量) 生理学、血管生物学 (Vessel Biology) 的形成即为其例。而正在崛起的 mechanocytobiology、分子生物力学和 mechano-chemical effect 等的研究, 正在而且必将大大推动21世纪生命科学的进步。同时, 对力学本身提出了重大的挑战, 并赋予古老的力学以新的生命。

另一方面, 生物力学是生物工程 (含生物医学工程、生物化学工程、生物技术等) 的基础之一。它对21世纪生物工程的前沿, 如器官 - 组织工程、功能生物材料、生物微系统等的发展, 具有重要意义。正如冯元桢在论及人工器官时所提出: “莱特兄弟的飞机飞上天时, 并不懂得空气动力学。但如果没有空气动力学, 就没有‘协和’飞机”。生物力学和生物工程的关系, 与此相仿佛。

4 稳定性、分岔和混沌理论

稳定性、分岔和混沌起源于19世纪末 Poincaré 和 Lyapunov, 而在20世纪得到长足的进

展. 运动稳定性的 Lyapunov 方法在力学中有了广泛的应用. 在 40 年代, 林家翘建立了流动稳定性理论, von Kármán、钱学森、Koiter 等开展了板壳等结构的稳定性研究. 它们为连续介质力学领域的稳定性分析奠定了基础, 并在各类工程技术问题中有重要作用. 60 年代 Thom、Zeeman 和 Arnold 创立了动力系统的分岔理论, 成为研究动力系统失稳后行为的基础. 分岔是非线性动力学的一个重要内容, 它建立了对力学稳定性的全面深刻认识, 还提供了用于力学稳定性理论和应用研究的解析和数值手段.

混沌是指非线性确定性系统中由于对初值敏感而出现的貌似随机的运动. 1963 年 Lorenz 在对气象预报研究引出的一类非保守系统里发现了这类混沌现象. 另一方面, 1954 年~1962 年 Kolmogorov、Arnold、Moser 从数学上证明的 KAM 理论, 解释了保守的力学系统里出现的混沌现象. 60 年代以后, 对非保守和保守系统中混沌理论及应用的研究得到很大发展, 并且认识到混沌往往在参数空间的一系列分叉之后出现. 混沌理论的产生, 揭示了牛顿力学中确定性和随机性之间的辩证关系, 反映了自然现象的复杂性.

5 边界层理论

1904 年 L. Prandtl 在第三次世界数学大会上发表了题为“Über die Flüssig-bewegung bei sehr kleiner Reibung”的论文. 他根据实验观测, 提出了大雷诺数(小黏性)的流体运动边界层的概念, 即黏性仅在固壁附近的薄边界层内起作用, 故层内黏性流体运动方程可以简化, 称为边界层方程, 该层以外可以用理想无黏流体来处理, 从而解决了平板边界层问题. 他还研究了在逆压梯度下的边界层的分离, 注意到流动一旦分离, 边界层便会形成包住尾流的涡面, 改变流动的拓扑结构. Prandtl 的这一理论可以应用到所有大雷诺数(小黏性)的流体运动上.

求解上述绕流问题是否可以忽略黏性或者应该考虑黏性而又如何处置, 一直困扰着 19 世纪末的流体力学界, 小黏性的流体运动忽略黏性后阻力为零, 与实际情况不符, 这就是著名的达朗贝尔佯谬. L. Prandtl 的边界层理论不仅解决了这个疑难, 而且给出了计算物体在流体中运动时阻力的近似方法. 在计算机出现以前, 人们尚无计算黏性流体绕流的途径, 所以边界层理论极大地促进了航空、航天工业的发展. 实际上, 小黏性的作用是无黏方程的奇异摄动, 所以它也是后来发展起来的匹配渐近展开法的原型和物理基础.

6 塑性力学和位错理论

关于固体材料的性质, 1951 年 Drucker 提出了 Drucker 公设, 认为对一类稳定材料, 附加应力在应力循环上所作的功总是非负的. 由此导出两个重要结论: 在屈服面光滑点处, 屈服面必是凸的; 而塑性应变增量方向必与屈服面外法线方向一致. 1954 年 Drucker 进一步证实任何材料如果不满足这个公设, 就是不稳定的. Drucker 公设为塑性力学奠定了理论基础. 1961 年 Ильюшин 在应变空间中提出如下公设: 材料微元在任意应变闭循环中应力所作的功均是非负的. 该公设不仅适用于稳定材料, 而且适用于非稳定材料. 由该公设同样可以推出正交性法则.

1923 年 Taylor 提出了晶体变形滑移机制, 1934 年 Orowan, Polanyi, Taylor 各自独立地提出了刃型位错新概念, 成功地解释了金属材料屈服应力远远低于理论强度的物理机制.

这些理论预测 50 年代得到实验证实, 推动了位错物理蓬勃发展. 1935 年建立了 Schmid 定律, 指出当作用在滑移系上的分解剪应力达到临界值滑移系就会开动. 1954 年 Kroner 提出了位错连续统塑性理论, 成功地将位错密度张量与变形非协调联系起来. 1955 年 Kondo, Bilby 等人建立了位错连续统一般理论, 成功地将非黎曼几何与变形非协调联系起来. 60 年代至 70 年代初 Hill, Mandel 发展和完善了晶体和多晶体塑性理论.

塑性力学是 20 世纪固体力学重大成就之一,是金属材料与构件强度估算和塑性成型理论基础。而位错理论乃是 20 世纪固体物理重大成就之一,为晶体微观力学奠定了基础。

7 湍流统计理论

自雷诺实验发现湍流后,他在系综平均的基础上建立了雷诺方程。如何描述脉动量的无规则性曾是摆在 20 世纪力学家,以及物理学家、数学家面前的重要课题。1921 年, G. I. Taylor 首先提出了脉动速度关联函数的概念,并于 30 年代同 von Kármán 等一起开创了湍流统计理论的研究工作。1938 年 G. I. Taylor 又进一步提出了湍流能谱的研究思想。1941 年前苏联统计数学家 Kolmogorov 首先提出脉动速度结构函数的重要概念,并导出了均匀各向同性湍流的相似性理论,得到了惯性区的 $-5/3$ 次能谱幂次标度律,这是一种湍流运动普适的统计规律。由于原来的假定没有考虑湍流运动的间歇性,1962 年 Kolmogorov 又对它进行了修正,由此开创了湍流结构函数普适标度律研究工作的先河。这是 20 世纪湍流研究的最重大的成果之一,它往往作为检验计算和实验的准绳,也是上世纪湍流研究引用率最高的文章。

如何求解不封闭的雷诺方程是湍流研究的另一个难题。20 世纪 40 年代初,周培源首先提出同时求解平均速度和脉动速度的动力学方程组,并给出了奠基性的雷诺应力所满足的方程。50 年代,他又提出先求解,后平均的旋涡结构湍流统计理论,为克服湍流理论中的封闭性困难提供了新的思路和途径,为现代湍流模式理论奠定了理论基础。50 年代初, Rotta 和 Davidov 进一步阐明了湍流模式理论的研究方向。70 年代以后,随着计算机技术的进步和工程应用的迫切需求,在原来的理论框架基础上,湍流模式理论迅猛发展。虽然湍流模式理论在诸如:描述能力,经验成分,适用范围等方面有明显的不足,但由于计算所需资源和费用少,目前仍是解决工程问题的最主要途径。总之,湍流模式理论是湍流统计理论和实际工程应用的桥梁。

8 奇异摄动理论

指的是获得在空间或时间域上一致有效摄动解的理论和方法。19 世纪在研究水波和天体运动时解决了奇异摄动的个例。20 世纪,在力学和物理中遇到的问题普遍起来。典型的例子有:边界层理论,升力线理论,激波边界层相互作用,圆锥体超声速绕流,圆板的弯曲,非线性振动,量子力学中的隧道效应,几何光学近似等。根据奇异性产生的原因,发展了处理边界层效应的匹配渐近展开法和处理出现长期项的 PLK (Poincaré-Lighthill-Kuo) 方法。前者用内外变量分别展开、互相匹配,后者用变形参数或变形坐标变换来得到一致有效渐近解。前苏联学派独树一帜,发展了基于平均思想的奇异摄动理论。60 年代以后,人们用多尺度的观点来认识奇异摄动问题,提出了应用范围更宽的多重尺度法,并形成了奇异摄动的系统理论。中国或华裔学者郭永怀、钱伟长、林家翘、丁汝等在这一领域有较大的贡献。美国 Stanford 大学 M. Van Dyke 将摄动级数延拓,可以扩展参数或变量的适用范围,应用于众多的流动问题,是将理论与计算结合的范例。迄今,奇异摄动理论仍是力学、声学、大气、海洋和工程中解决弱非线性问题的有效理论方法。

9 力学的公理化体系

物理学,尤其是力学的公理化是德国大数学家 Hilbert (1900) 提出的著名的 23 个问题的第 6 问题,即要实现 D. Alambert (1743) 的设想:“力学必须象几何学那样建立在显然正确的公理上,且力学的结论要有严格的数学证明”。在 20 世纪 50 年代,一些杰出的力学数学家开始了力学公理化体系的探索与研究。其中里程碑性的重要工作有: J. G. Oldroyd (1950) 提出本构关系

必须具有确定不变性的原理； W. Noll (1958) 提出“确定性公理、局部作用公理和客观性公理”是构造本构理论的基础，从而确定了关于力学公理化结构的雏形； Truesdell 和 Noll (1965) 的名著“力学的非线性场论”总结了关于力学公理化体系的主要研究成果，使连续介质的基础理论进入了一个崭新的时代。 A. C. Eringen (1975) 的专著“连续统物理， Vol. 1~4”更加明确提出：“因果公理、确定性公理、等存在公理、客观性公理、物质不变性公理、邻域公理、记忆公理和相容性公理”等八条公理是构造简单物质本构理论的基础，随后添加了坐标不变性公理和对因次(单位)系统不变性公理，并逐一明确赋予每个公理的数学内涵。 Eringen 的工作进一步扩充了 Noll 的公理结构，使之成为工程科学派理论的基石。作为现代理性力学核心内容的力学公理化体系的建立，奠定了现代连续介质力学体系的基础。它巧妙地运用各种现代数学理论成功地构造了各种非线性物质(包括力-电-磁-热相互耦合)的本构理论框架，并把它进一步推广到广义连续介质和非协调缺陷场论中去，为 20 世纪整个力学的发展作出了卓越的重大贡献，影响极其深远。

10 克服声障、热障的力学理论

声障一词出现在 20 世纪 40 年代。二战中，战斗机的平飞速度已达到声速的一半，俯冲时则可超过声速的 0.7 倍。这时飞机的阻力随着马赫数的微小上升而急剧增大，飞机会突然受到很大的低头力矩并伴随有剧烈的抖振现象，飞机的安定性和可操纵性急剧下降。飞行员不得不把速度降低下来，以避免飞机的坠毁。这导致当时人们认为声速是不可逾越的，进一步提高飞行速度似乎是不可克服的障碍。空气动力学的研究表明，低头力矩的产生是由于上机翼表面附近有超声速区出现，负压区大大向后扩展，使压力中心向后移动的结果。超声速区还导致激波的产生，进而引起气流的分离。分离流极不稳定，使机翼发生颤振，打到飞机的水平和垂直安定面也会引起尾翼的颤振，又是阻力急速增加的原因。人们通过使用小展弦比、后掠的薄翼和大推力的发动机，成功地实现了超声速飞行，使声障成为历史名词。

热障是指飞行器在高超声速飞行时其表面产生高温，导致结构的刚度和强度下降，尤其是在再入大气层时产生的高温(约达 10000 K)，不加防护会使飞行器被烧掉的问题。当轨道飞行器以接近第一宇宙速度的高速度进入大气层时，气流的动能在驻点滞止下来转化为热能，导致极高的温度和气流向飞行器表面的极高的热流率产生。为了防护使任何材料均会溶化烧毁的高温，原始的热沉法，即应用一层材料允许其溶化吸走传至飞行器的热量的方法是不经济的。有效的防热手段是烧蚀法，即用碳酚醛高硅氧、碳石英等高分子材料做飞行器的表面层，在高温下吸收热量，在其分解湿度的高温下分解前吸收更多的热，同时分解气体形成气膜保护层，使飞行器免于烧毁。烧蚀法防热会使飞行器外形改变。能保持飞行器外形的防热方法，有发汗冷却法，即用多孔材料为飞行器的外层，使冷却剂通过此层排出并汽化，达到防热目的而同时保持飞行器的尺寸不变。利用有效的防热方法人类已实现了轨道飞行器包括载人航天器安全再入大气层返回地面。

声障和热障的克服，空气动力学研究起了很大作用，是各国科学家在多种学科领域共同努力的结果。