

20~21世纪的力学

中国科学院院士、中国工程院院士 郑哲敏

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

一、力学发展的趋势

1. 20世纪力学的巨大成就

本世纪初边界层理论的提出,对力学的发展起了划时代的作用。从此,流体力学能够成功地解释流动对物体的阻力与升力,为航空、航天的发展奠定了科学基础。这个典型也影响与推动了其他力学分支的发展,使力学研究的内涵有了空前的充实、扩大与深化。早在20年代初便形成了活跃于整个20世纪内容广泛的应用力学,成为工程与应用科学的支柱。人们把空气动力学的研究看作是本世纪以科学为基础将航空、航天建成的第一个例子。由此可见,应用力学在创立新产业方面所起的巨大作用。19世纪发现的湍流是数理科学,特别是流体力学公认的难题。虽然,湍流理论还远不完善,但湍流理论的研究从未中断,而且不断出现高潮,重要的有湍流的统计理论、湍流的模式理论、湍流的拟序结构和大涡理论等。它们对阐明湍流机理的某些侧面起了十分重要的作用。湍流模式理论是周培源先生奠基的,有许多发展至今仍是解决某些实际问题的主要手段(虽然并不普适)。湍流(以及水波)的研究促成了非线性科学,而非线性科学又为湍流研究带来了新的高潮。

固体力学同样有巨大的发展。这里只举一个断裂力学的例子,断裂力学能对受力状态下,含宏观裂纹固体的失效与否和使用寿命做出可靠的估计,这就从根本上改变了传统设计的概念与方法,其经济和社会效益是难以估计的,而且促成了对固体材料力学(微观力学、损伤力学)性质更为深入的研究。

曾经被认为是已经十分完美的哈密顿系统,有了出人意料而意义又十分重大的新发展。哈密顿力学现在被置于辛几何这个更为基础的框架内,苏联学派对哈密顿系统进行持续不断十分深入的研究,所提出的KAM定理(Kolmogoroff, Arnol'd, Mose)是非线性科学中的一个基本定理。60年代以来,自从混沌现象被

发现,人们发现确定性的问题可以导致几乎是随机性的结束,从而认识到甚至牛顿力学的内涵也远没有认识清楚。还应当指出流体力学的基础研究为非线性科学提供了丰满的理论与实验结果。

在这个世纪里,力学还对数学和其他自然科学做出了重要的贡献。流体力学被应用于大气科学和海洋科学,使天气预报、海况预报发生了质的改变,从而使这一学科从过于纯经验性的变为以数值计算为基础的。力学推动了应用数学的发展,奇异摄动法就是一个突出的例子;力学对天文学的贡献也是大家所公认的(例如:星系螺旋臂的实质与自持性质)。

总之,在本世纪,既是基础科学又是应用科学的力学对科学与技术的贡献是巨大的。

2. 展望21世纪

在世纪之末,科学地展望一下21世纪的力学将会是怎样的,是有必要和有益的。这里我们着重于根据现状和可能,对力学发展的总趋势做些预测,但必须指出,预测毕竟是预测,决不等同于现实。

我们的估计是以下述几个总趋势为基础的:

(1)人们的计算与实验和观测能力将得到极大的加强,学科面的交叉和综合的趋势也会更增加。

(2)人类将更加关心信息、环境、健康,这将对科学技术的发展起引导与制约作用,而且国际化的势头将进一步加强,大科学将更多采用国际合用的形式。对我国来说,能源、交通,保证工农业生产持续发展,提高劳动生产力,提高产品质量,增加品种,解决农村大量剩余劳动力的就业问题,将是突出的问题。这些方面科学界应做出贡献,否则科学在我国生长的土壤将是贫瘠的。

(3)在世界上50年来颇有影响的Vanevar Bush (Science: The Endless Frontier)的观点,特别是他关于基础研究是知识源泉的观点将得到修正,人们将会把有应用目的的所谓应用研究也纳入基础研究的范畴,因为后者已被证明也是知识的源泉。联合国所定

义的基础研究(或 pure research)与应用研究(包括工程科学)间的界限将变得模糊。

(4) 人们终将认识到,在我国正确的策略将是着力发展那些“省钱”但效益(科学的、社会的)较好的学科,而把“大科学”组织到国际合作项目中去(关系到国家安全的除外)。以这些为前提,我们认为力学学科无疑应在我国的规划中有其独立的位置。力学曾经是物理学的一部分(或者说在本世纪之前,经验力学是物理学的主线和样板)。今天力学已经发展到这一步,已远远超越物理学所能包括的学科了,这在国际上已是公认的事实。

下个世纪力学将是怎样的呢?

(1) 与20世纪相比,力学将进一步突破宏观的框架。如果说在20世纪气体力学方面已经开始这样做了,下个世纪,在现有断裂力学、微观力学、损伤力学的基础上,采用宏、细、微观相结合的方法,在各种材料的强度理论上将有重要的新进展,在实验手段方面也将有突破传统方法的创新。所谓各种材料将包括金属材料、高性能复合材料、陶瓷材料、纳米材料、地质材料等。在新理论的基础上,传统的均质连续介质力学将得到根本性的改造,使其不仅能更精确地判断构件和结构在各种复杂受力环境下的变形与失效行为,而且有望成为用于象设计房屋那样,按照所需功能设计材料。

(2) 随着计算力学和计算机能力的提高,将对湍流运动提供愈详尽的描述,为理解湍流提供了极好的机会,问题是如何从浩瀚的数据中去提取有用的信息,整理出普适性的规律,以揭示湍流的根本机制,这将是下个世纪湍流理论工作者的任务。从最近的情况看,对于均匀各向同性湍流而言,这个目标似乎已经不很遥远了。

从层流到充分发展的湍流是个复杂的过程,对这个过程的理解在科学和应用上至关重要,包括这类流动的控制和利用将构成流体力学研究的重点内容,是一个长期的任务,在21世纪会有重大的突破,成为科学史上一件值得夸耀的事。

(3) 传统的力学主要是就某类具体问题通过实验、解析和计算的手段,深入理解其机制,并在此基础上建立数学模型,用它来准确预测在不同条件下这个力学系统的行为。下世纪,这无疑仍将是力学研究的主要方式,但可以预期这种方法的应用将得到远比20世纪更为广泛的应用,力学学科也将通过这些应用得到新的提高与发展。可以预言21世纪将是力学大延伸、大推广的时代。这里举几个例子:

① 力学与地学的结合将在地学定量化和精确化方面起比20世纪更大的作用,这特别是指固体地球物理,地球构造力学,各种类型的地质灾害以及水资源,水循环,污染物的扩散、控制与治理。

② 人们将看到20世纪中叶发展起来的生物力学首先在医学、人工体育训练、药物或生物制品产生方面发挥作用。

③ 一批传统的工业,过去主要依靠经验或者经验的成分很高,以至成为一种艺术,因而成本高、质量差、费劳力,其出路是把生产逐步转移到近代科学的基础上来。例如,大型铸钢件成品率低,次品过多,是一种极大的浪费,如果充分利用现代力学的成就,这个问题是可以完全得到解决的。这类的工业很多,所以说下个世纪力学将为改造传统工业,使其立足于现代科学发挥重大的作用。

(4) 可以预计,力学研究的模式也将有很大的开拓。由于计算能力和数学工具的限制,各种设计的优化问题和信息处理中的各种逆问题在我国并没有纳入力学研究的主流。绝大多数这样的问题都是非线性的,随着计算机能力不断提高,如果再把力学与控制论密切结合起来,此类问题一定会得到更好的解决,那时力学学科的理论框架将更为完善,解决实际问题的能力也会有实质的提高。

二、关于力学的前沿课题

单纯从学科发展的需要与可能看,我认为21世纪力学学科的前沿课题有:

1. 流动中的涡不稳定性,层流向湍流转捩过程和充分发展的湍流的研究

所研究的对象可以是气体、液体乃至非牛顿流体,但最根本的困难大都包括在经典的牛顿不可压缩流体中。在这个领域内最重要的是高性能巨型计算机和中、小型的具有三维流场测定和显示功能的实验设备,这两方面我们目前大大落后于先进国家。鉴于这个问题在学科上的重要性与应用上的普遍性,国家应当下决心在这方面投资。在这些条件未完全具备前,充分利用国内现有条件和国际合作机会,国内力学界应力争做出成绩,但国家的投资是必不可少的。

2. 各种材料(人工和天然的)强度理论的研究

重点是研究在各种环境条件下(例如高温、高压、高应变率、腐蚀环境等),材料在受力过程中损伤的萌生、演化与失效,同时强调宏观与细观、微观研究相结合。传统实验的缺点是宏观试验与细观的观察常常是分离的,今后应当发展新的实验与观测设备,

在试验过程中能实时地进行必要的宏、细、微观的定量测量(力学的、热学的、结构的、化学的等)。同时,这项研究还应当包括界面力学性质的研究,这方面同样需要发展新的实验与测量方法。

3. 一批重要力学过程(现象)的建模

在自然界与各项工程中,有一批尚有相当一部分未被认识或未被足够清晰认识的重要现象,我们还没有可靠的数学模型对之加以描述,这是力学界义不容辞的责任。这些力学现象有:散体的流动;多相介质(气液、固液)的流动;兼有孔隙与裂隙介质中(可以不严密地称之为“分维介质”)的渗流现象;气流(风)与液面(水面)的相互作用,表面波与传质过程;表面形态与减阻的关系(海豚表面是带沟槽的,鲨鱼表面是粗糙的,鸟类的表面由羽毛构成,都有减阻效果,为什么?)

4. 复杂结构(包括机械、机器人、矿山和大型水利枢纽)的静动力响应,振动与控制,寿命与失效和优化

主要是结合几个典型,做深入、全面的研究,提出新的、比较完整的系统理论。

5. 制造过程中的力学问题

把一部分研究重点放到制造上来,以改进产品质量、增加品种、提高生产率、降低能耗、减少或完全避免污染,同时增加产品竞争能力,这已成为当前国际上科技改革的一个重要方面,力学在把传统工艺建立在科学分析与定量的基础上,改进化学与生物反应的流动状态,创造新的反应环境,处理污染物,以至在提出新的工艺流程方面都可以起重要作用,因此有必要鼓励和引导力学工作者在这些方面做贡献。

以上所列的五个问题我们认为是在21世纪学科规划中应该单独体现的力学问题。当然,力学与其他基础学科有许多交叉,如天文学星体中的湍流,星际空间的磁流体力学,陨石碰撞,数学中的应用数学,声学中的流体噪声,航空航天中的分离流的控制与利用,超声速燃烧,非平衡高速气体力学,微重力条件下的流体力学,能源问题中的海洋工程,大型水利工程,交通问题中的大型民航机,高速火车,高速信息网中力学信息的提供,加工等等。这些也都非常重要。我们认为应在相应的规划中体现,力学工作者积极参与,且国家在经费上给予保证。

另外,力学与军工的发展历史一直有十分密切的联系,后者往往是力学发展的推动力,这部分内容没有包含在上面提出的课题中。

力学中的前沿问题可以说都是非线性的。它可以

从非线性科学吸取许多有用的结果,但它所研究的多数非线性现象,正如在许多其他分支学科中一样,并不是非线性科学所能概括的,而且由于它有较强的本门学科的特性,所以常常超越了非线性科学研究中的共性问题。另一方面,力学界的一部分力量,特别是研究湍流、材料的损伤与破坏、水波和一般力学方面的一部分,应当积极参与到非线性科学中去。

三、关于力学的思考

1. 关于力学的性质

在这个问题上应当说已经有了比较统一的意见,即它既是一门基础科学又是一门应用科学;它是一种科学,而不是技术,尽管它的发展与技术有密切的联系。

我们说它是基础科学,因为它有认识世界的根本任务,有它推动自身发展的内在动力,又能为数学与自然科学的其他分支提供重要的支持,组成科学的总体;我们说它是应用科学,因为它是工程技术和其它应用技术的基础,以工程技术为例,力学与它的关系是结合,而不是代替。

2. 趋势与政策

(1) 力学的根本任务是通过实验与观察,分析和数值计算,为一个复杂的客观体系(许多乃至无穷多个粒子或物体的集合)建立数学模型,取得对这个体系力学行为的深刻理解,包括对它的行为做出可靠而精确的预测。作为应用科学,力学又要在这些认识的基础上,为应用技术提供概念、理论、方法、手段,一方面推动技术的发展(包括新技术的建立),一方面从应用中取得新的认识,进一步发展力学的基础理论。曾经有个时期,认为有了牛顿力学,在一般宏观尺度范围内,最基本的规律已经有了,剩下的是计算的问题了。这种认识由于简单非线性力学系统中混沌运动的发现,而被证明是过于乐观了。实际上,迄今为止人们对非线性力学运动规律的认识还只能说处于很初始的阶段,而且仅有的一些认识也大多来自几个典型力学系统,所以说,混沌现象的发现为力学研究提出了历史性的新任务。

自然现象和应用技术中的实际力学大都是非线性的。过去力学发展了各种线性化与摄动技术,解决了一大批问题。但在非线性效应强烈的条件下,这些方法大多失效。因此一系列重大技术问题没有得到解决。解决这类问题并发展普适性大的非线性规律与提供有效的计算与分析手段,将是下一阶段力学学科发展的一个主要趋势。

(2) 21世纪的应用力学将比20世纪有更大的发展与普及。出于节约能源和其他资源、保护生态环境、提高人类生活质量、保证经济持续发展的需要,必须不断开发新技术和改造传统技术,使其以科学为基础,这将是促进力学,特别是应用力学发展的巨大动力。

回忆一下20世纪应用力学发展的历史是有好处的。我们知道,在把航空和航天工业建立在科学基础上的过程中,空气动力学的研究发挥了关键性的作用。当飞机的速度还在每小时200公里左右的时候(20~30年代),空气动力学家已经在研究可压缩性对飞行的影响、超声速飞行、声障与热障,远早于实际超速飞行的实现(50年)。此例表明:a.基础性研究能对发展新产业产生巨大作用;b.要对新产业起这样的作用,超前研究是十分必要的,这需要有远见的财政支持与研究人员的创业精神;c.应用研究推动了力学研究的发展。由于出现研究高温气体性质的需要,力学家的研究领域超出了经典力学的范围,需要应用与发展微观理论,形成宏观、微观相结合的势头。

在21世纪,应用力学的这些优良传统无疑应当得到继承与发展。社会对发展新技术和改造传统工业的要求将是持续、长期的,应用力学家的任务是从中发现有价值的研究课题。这需要应用力学家一方面具有对应用技术需求与发展趋势的深刻了解;同时要有对应用研究的热忱。

在力学领域内,保持基础研究和应用基础研究在大约1.5:8.5或2:8将是合适的。同时应该注意到,至少在力学范围内,区别基础与应用基础研究常常是困难的,它们之间往往更多是定向与非定向研究的区别,在很大程度上取决于研究者的目的,而不在于研究内容的实质。

(3) 21世纪力学与其他学科的交叉与融合将更为深刻与广泛。这里,其它学科不只是数学、物理、化学、天文、生物、地学,也包括工程技术与其他应用科学技术领域,如医学与农业。这种交叉和融合不仅表现在研究对象上,也表现在方法与手段的相互借

鉴和人员的交流。这种趋势首先要求我们在力学教育上做相应的调整。一个力学科研工作者自然需要有传统力学方面的坚实基础,但这还不够,还需具备某些其他领域的专门知识,而且要敢于走出传统领域的圈子,进入新领域。这常常不是件容易的事,但是如果在本科或研究生教育中注入这种思想,而且在组织领导部门的有力支持下,是应该能够办到的。这件事情做好了,就可能出现力学的一个新的繁荣时期。但是我们应该注意到一种倾向,那就是表面上与其他学科交叉,实际却没有真正做到,这种情况无疑是应当避免的。

(4) 力学既然有基础的一面又有很强的应用性,与多种学科和应用及工程技术又有广泛的交叉和联系,可做的事自然很多,作法也有千差万别,那么,应当有什么政策呢?

首先,应该允许不同途径、不同风格、不同学派并存。例如,力学问题可能从物理、应用数学、工程的角度加以研究,这些无疑都应受到鼓励。

要认识到,重点的选择总免不了有主观的成分,而且受多种非科学因素的干扰,这是不可避免的,但毕竟又需要有重点。在这种情况下,重点项目或课题的比重不能过大,而且以偏小一点为宜。对面上项目的支持则应当加强,要通过学术活动的方式,让学术界和应用的一方来评价成果与人才,从而形成新的重点,发现新的人才,把行政干预减小到最低限度。

科学规划与计划应当是滚动的。为了开辟资金来源,在支持应用研究方面,基金委与三峡工程总公司合作,建立基金的方式是很好的,建议在基金委与科委扩大这种集资方式,并采用基金委已经行之有效的评审办法(虽然仍需改进),使力学工作者能更多地参与重大国民经济建设有关项目的研究。

(5) 50年代以来,在我国建立的几个交叉学科都是具有相同特色的,它们应当得到适当的支持,这些分支学科包括物理力学、化学流体力学、爆炸力学、等离子体动力学和岩石力学等。

应当加强现场工作,特别应结合重大工程,发展现代化的现场观测与测量仪器。