

# 20 世纪的力学

В. В. Струминский

现代力学究竟是什么？它同哪些科学技术问题有关？它给技术的进步开辟了哪些前景？很可惜，就是在今天也并不是所有的人都能把这些问题想像得非常明晰。必须明白，现代力学并不限于研究第一类和第二类杠杆、物体的平衡定律和直线运动定律这样一些极简单的问题，但力学是从这些问题开始成为科学的。

伟大的思想家伽利略、牛顿、哈密顿奠定了科学的坚实基础，并在其上造出了宏伟大厦的第一层——质点和质点系力学。相应的力学定律在以后的人类活动中得到了非常广泛的应用。天体运动规律就是用它们来解释的。直到现在它们还继续发挥着作用，飞机、火箭和航天器的飞行轨道和飞行动力学，就是根据它们来确定的。

18 世纪俄国科学院院士欧拉和伯努利的工作把力学定律推广到液体和气体的运动，随后又推广到弹性体的变形。于是出现了空气动力学、气体动力学和可变形固体力学。这些新力学分支同非常广泛的工程技术问题有关，直到现在还决定着许多重要工程技术部门的进一步发展。

19 世纪中叶由于杰出科学家克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼的工作，力学得到了重大的扩展。它的定律用概率论作了解释。于是出现了宏伟大厦的新的一层，出现了气体分子运动论，并用它解释了热力学基本定律，从而有可能从理论上论证液体和气体介质的运动规律，有可能建立最复杂的物态形式即等离子体的运动规律。

20 世纪初出现了力学的继续总结推广，出现了解释速度与光速相近物体的运动规律的相对论力学(爱因斯坦的相对论)，出现了解释原子与分子结构以及理论上论证门捷列夫周期表的海森伯、薛定谔、狄喇克的量子力学。

看来，力学以崭新内容再作增补和总结推广，从而能够作为解释原子核结构和基本粒子结构的基础的日子已为期不远。但这也还不是人类建造的宏伟大厦的最高一层。目前在这座大厦周围已造出为数众多的头等建筑物，在它们之上的是许许多多应用科学，如材料力学、水工学、建筑力学、热工学等等。

20 世纪给力学的发展带来一些新方向和新特点。迅速发展的工程技术要求更加深入详细地研究力学的基本规律。这些要求是如此之重要和不容推卸，以致根本不容许去考虑存在着什么困难。飞速发展的航空工程提出了特别复杂的问题。举几个例子。这个时期茹可夫斯基及其学派研究并解决了机翼升力问题。普朗特及其学派研究了空气动力学最漂亮理论之一的边界层理论，由此就能计算飞机各部件和整个飞机的摩擦阻力。30 年代航空学达到的巨大进步是飞机最大速度接近声速。在这种飞行状态下，同空气可压缩性有关的空气动力学新规律即气体动力学规律起着主要的作用。

虽然气体动力学规律早在 18 世纪已经作了表述，但它们的具体形式直到今天还研究得

很不够。风洞实验研究和近似理论估算证明，接近声速时飞机阻力可增加许多倍。在高速飞行道路上出现了所谓“声障”。在这个时期，全世界最著名的力学家和科学家集体都被吸引到解决声障问题和气体动力学问题中去。在进行理论研究的同时建造了昂贵的大型跨声速风洞。各国许多大实验室加快步伐进行了跨声速绕流研究。为了争夺空军空中优势，为了夺得最大飞机速度，进行了紧张迫切的研究。第二次世界大战期间，德国为了迅速取得胜利，曾首先试图在旧空气动力学型式飞机上克服声障，试图通过大大增加发动机推力和采用极不经济的附加液体喷气发动机来克服声障。由于阻力极大，这些飞机失去稳定性而无法控制。一个灾难接着一个灾难，德国损失了好几十个第一流优秀飞行员，最后停止了毫无意义的试验。

但是为了克服声障的斗争依旧毫不放松地紧张进行着。高速风洞中的研究和理论上的探索使我们找到了机翼、机身和其他飞机部件的新形状。苏联飞行员在天才设计师 С. А. Лавочкин, А. И. Микоян, А. С. Яковлев 研制的箭形机翼飞机上成功地克服了声障，进行了超声速飞行。现在，我国和国外的飞机都毫无困难地通过了声障而把飞机速度提高到超过声速 2—3 倍。

超声速飞行和火箭技术的顺利发展，造成了加速发展航天技术的有利条件。大家知道，航天飞船要穿过整个地球大气层。它在回地时发生特别复杂的情况。存在一条很窄的“走廊”（轨道参数范围），航天飞船在该地区回地是安全的。因此必须对上层大气中作用在航天飞船上的空气动力学有很精确的数据，必须对导向和控制系统有很高的要求。可是，古典高速空气动力学规律不适用于上层稀薄大气层。这里起作用的是尚未认识的稀薄气体动力学规律。

指出这些规律可用玻耳兹曼的分子运动论来得到是重要的。本世纪初许多著名数学家曾试图解玻耳兹曼方程。可是甚至杰出的数学家希尔伯特都未能成功。只是在本世纪中叶，由于要发展航天技术，才重新对分子运动论和玻耳兹曼方程感兴趣。大批科学家重新被吸引到这个问题上。在用分析方法研究解玻耳兹曼方程的同时广泛利用了电子计算机，建造了具有模拟再入大气条件的广泛气流速度范围的特殊真空风洞和装置。在理论方面由于问题太复杂，所以在上层大气中航天飞船绕流的基本数据，暂时只能根据在特殊风洞和装置中得到的实验资料换算成实际条件来求得。

同上述例子一样，20 世纪把一系列崭新的力学问题推到舞台前面，要求在极短时间内给以深入研究。由于吸引了大批科研人员和科学家，由于各个方面的理论研究和实验研究，所以有可能顺利发展这些崭新的力学方向。前些年建造起来的实验基地有重大的意义。目前要研究一些大的力学问题（其实其他科学领域也一样），只有依靠各个方面科学家的集体劳动才有可能。

20 世纪下半叶要求继续把科学力量集中到极重要的那些力学问题上去，要求更加注意建造用于有发展前途的研究的实验基地，要求科学家从一些力学科学问题转到另一些更迫切的力学科学问题。

20 世纪下半叶要解决在很大程度上决定着许多工业部门技术进步的一系列力学科学问题。主要的方向将是在一切力学分支中由连续介质力学的唯象方法过渡到在分子水平上进行描述的统计方法。这些统计方法在稠密气体、液体和固体方面将得到进一步发展，其中要考虑到分子和原子的量子结构。重大的成果将在建立等离子体理论时得到。

下面我想较详细地论述空气动力学（这是我的专业）方面的某些问题，论述我们苏联科学院西伯利亚分院理论和应用力学研究所的工作的一些主要方向。

这些问题之一同空气粘性及湍流流动引起的阻力有关。此问题研究得非常不够,其中还有一些未开垦的处女地。包括航空在内的许多科学和技术部门的进步将取决于最近一些年利用这些处女地上取得的成果。气体湍流流动的研究特别不顺利。大家十分清楚,湍流流动是极普遍的运动形式。它们存在于遥远的星云中,存在于星际空间,存在于太阳、地球和金星的大气中,存在于海洋里。它们在许多能源过程、化学过程甚至生物过程中起着巨大作用。虽然这种运动形式如此广泛和普遍,但我们尚未了解它,未能在理论上描述它,尽管大批数学家和力学家曾经在这方面作了巨大的努力。

19世纪末著名科学家雷诺得到了描述气体湍流流动的方程组。但此方程组是不封闭的,含有未知函数。本世纪30年代的主要空气动力学家普朗特和卡门,根据 Никурадзе 独特的实验研究提出了能够计算湍流摩擦阻力的头一批半经验理论。从那时以来对求解湍流问题又作了许多尝试。在1966年日本京都举行的国际湍流讨论会上,英国著名科学家莱特希尔正确地指出,湍流理论这个“墓地”拥挤到了极点,可是问题几乎在原地踏步不前。

为了解决这些问题,对粘性流体的空气动力学规律研究必须比我们今天所作的要远为深入得多。而这首先又必须在专门的低湍流度风洞中进行新的基础性实验工作。

我们所进行了大量工作来建造西伯利亚第一批跨声速和高超声速低湍流度风洞(该所高超声速风洞和低湍流度风洞附图两幅略。——译者),在这些风洞中开始了第一批实验研究。在发展实验基地和完善测试技术的同时,进行了该科研方向的理论研究。

稳定性理论对粘性气体流动问题有巨大意义。大家知道,它对等离子体理论也是重要的。相当长时期以来从稳定性理论得到了受控热核聚变的某些研究工作没有前途的结论。在我看来,这个“禁令”目前暂时还不会解禁。我们认为稳定性理论研究有巨大的意义。

对美国无湍流风洞中的实验资料的分析表明,稳定性古典线性理论同这些实验工作之间的差别几达两个数量级,即大约为50倍。为了解释这个差别,我们所进行了非线性稳定性理论研究。应用彭加勒变形方法建立了均匀精确近似法。原来,扰动并不是象线性理论所预言的那样按指数方式增长,而是稳定下来趋于新的层流流动。

我们所研究了流动过渡状态理论,Л.Д.朗道猜到了这个理论。它将在我们的低湍流度风洞中受到仔细检验。

对气体三维流动的稳定性理论表现了特大兴趣。这个问题非常复杂。在同美国科学家交谈中我们得知,他们也在抓紧致力于研究此问题。为了研究箭形机翼上的三维流动稳定性,他们利用了按位势流动流线展开流动的方法,并在电子计算机上数值求解了问题。我们成功地求得了此问题的非常简单漂亮的解,并以显式确定了主要参数的影响。同时发现了未预料到的现象:过去都认为是不很稳定的那些气体流动,结果反而都是稳定的。我们所的这些工作再一次证实了稳定性理论的重要意义。

我们所也进行了湍流一般理论的研究。我们的分析表明,主要困难在于实际上完全没有关于湍流过程物理实质的实验数据。到现在为止,处理这个问题或者是从形式数学观点出发,采用复杂的函数分析法(例如霍普夫的工作)或更为形式化的 Фейнмановский 展开法,或者从工程要求观点出发,假定粗略的近似以建立工程计算方法。

为了解决此问题,要求进行基础性实验研究,随后必须有数学家和力学家的共同努力。对于解决湍流问题,我寄很大的希望于气体分子运动论的统计方法。

我们所的第二个大的科学问题同气体动力学、稀薄气体动力学和等离子体动力学有关。

目前对这个方面研究得还不够。此问题也给进一步改进许多科学技术部门的工作开辟了巨大可能。此问题可从气体分子运动论的统一观点，首先是从玻耳兹曼分子运动论方程的观点来考虑。

大家知道，对于低层大气，对于相当稠密的空气层，从分子运动论方程可推出已经相当详细地研究过的古典气体动力学方程。简单形状物体的许多重要绕流问题已在电子计算机上研究和解决。复杂形状物体绕流的规律则只能在风洞里研究。

由于我们所集体的努力，1967年在西伯利亚首次运转了大型超声速风洞。目前此风洞最大气流速度达4500公里/小时，以后将增至8500公里/小时。风洞装有多用自动快速天平，附有输出信息的机器 Минск-22 可给出整理好了的实验资料。

在超声速风洞中开始研究与下述问题有关的现代气体动力学问题：机翼、机身和其他飞机部件的扰动引起的干扰；空气进气口前气体的滞止；气体射流。研究相当稠密低层大气的空气动力学规律就属于这种研究。

在50—60公里以上高空这些规律应当有重大的改变。只能依据玻耳兹曼方程来研究它们。提出了解此方程的方法，得到了不同的结果。哪些方法可用尚未搞清楚。

在研究此问题和建立玻耳兹曼方程的(科希问题的)完全解方面我们得到了一些重要结果。这些结果于1968年莫斯科第3届全苏理论力学大会上和美国波士顿国际稀薄气体学术讨论会上作了报告。指出了玻耳兹曼方程具有迅速把初始信息“忘掉”的特性，这使我们能够在70—80公里以下高空利用古典气体动力学规律。这时只需改变边界条件便能准确说出分子同航天飞船表面相互作用的规律。

对于更高飞行高度时问题更为复杂，尚未提出解玻耳兹曼方程的方法。然而在120—130公里上下的高空，气体非常稀薄，无需求玻耳兹曼方程的解，因为在这样的高空，空气分子的运动彼此无关。但它们撞到物体上会阻遏物体并发热。作用于人造卫星上的力依赖于分子同卫星表面相互作用的规律。卫星的寿命、温度和飞行轨道也依赖于此相互作用。这些规律很复杂，要由实验来确定。我们所建立了用来研究这些规律的苏联第一个高强度分子束装置。已完成了第一批实验研究并获得了重要结果。

在研究气体动力学和稀薄气体动力学的同时，我们所实验室进行了磁气体动力学和低温等离子体的研究。进行了关于适用于磁流体发电的导电介质流动问题的大量研究。主要进行这种流动理论的原理性问题研究，获得了建造磁流体发电装置所必需的有趣的重要结果。

最近我们同事和M. B. 凯尔迪什院士的研究所的同事共同发现了新的T层效应。揭示了在什么条件下进入磁场的等离子体凝块会剧烈加热到高温。

我们所在低温等离子体方面作了大量工作。研究了建造效率高、容量大、能稳定工作的高效能等离子体发生器问题。我们所有着推荐给工业用的各种必要的等离子体发生器，可交付给一系列化学工业使用。等离子体发生器对建造大型高超声速实验台和风洞有巨大意义。

除液体和气体力学方面工作外，我们所在固体力学方面只作了不多的工作。在弹塑性介质模型和岩石强度方面获得了一些有趣的结果。

下面谈谈综合性基础问题，最近十年许多科学家和力学家集体都会碰到它们。这些问题也促使航空航天技术进一步发展和完善。越早把这些问题表述清楚，那怕是大体上的表述，解决它们也就会越快，越可靠，并且花费也越小。

目前广泛采用亚声速民航机和运输机。不久以后超声速民航机将在多数航线上经常使用。

第一架超声速民航机图 144 的飞行就是这个方向的重要阶段。

航空如何进一步发展？多年来各专业的力学家在这个问题上犹豫不定。全世界许多国家在进行理论的、数值计算的和实验的研究。结果证明，建造飞行速度为 10000—12000 公里/小时的高超声速民航机是可能的。

今天已经能够描述出这种飞机的性能和它的空气动力学模式，其中一些是：(1) 不用普通涡轮喷气发动机，而应采用超声速燃烧的直流发动机；(2) 不用普通煤油燃料，而应采用效能更高的低温燃料如液氢；(3) 机身应同进气口、发动机及喷管有机连接在一起，以便保证高超声速飞行时的必要空气动力性能；(4) 飞机上应采取超级绝缘措施，特别在储氢器内部温度应低至  $-253^{\circ}\text{C}$ ，而在飞机表面外温度则高达  $800-1000^{\circ}\text{C}$ 。

在建造高超声速民航机前应继续进行已开始了的力学基础问题方面的大规模科学工作。其中的一些是：(1) 在超声速下考虑复杂化学反应时低温燃料的混合和燃烧；(2) 在超声速下燃烧的稳定性；(3) 在高超声速下由飞机部件的扰动引起的干扰，空气动力性能问题；(4) 在高超声速下考虑分子离解过程时的摩擦和传热；(5) 结构元件和储氢器的防热；(6) 超级隔离的效率。解决这些力学问题不仅能创建高超声速民航事业，而且能加快征服宇宙。

大家知道，直接从地球上发射场起飞到其他行星上去，必须有初始重量非常大的宇宙火箭，其重量以千吨计。要知道，火箭上装载的不仅有为了到达其他行星所必需的东西，而且还有从该行星上起飞的装置、飞往该行星和回地的燃料。这些火箭都是庞然大物。发射场规模更大。总之，预定飞往其他行星的整个系统很复杂，不够可靠，当然还特别费钱。这就是为什么在发展航天技术时利用中间轨道站这另一个方向非常吸引人的原因。在这情况下，飞往其他行星的复杂飞行任务好象分解成了一系列较简单的任务：从地球上发射场飞往地球附近的轨道站，再从地球附近的轨道站飞往其他行星的轨道站，如此下去。在这情况下，解决每次飞行任务所需火箭的重量大为减轻，整个系统则更加可靠和经济。把设备、燃料和材料运往轨道站仓库的工作则可用专门的运货航天飞船来进行。

在利用轨道站的情况下，有可能不用单级火箭垂直发射的办法飞往宇宙空间，而采用多级飞机系统定期地把轨道站同普通机场的起飞和着陆系统联系起来。这种情况的飞机系统比普通的稍微复杂些。飞机为两级，头一级类似于上述高超声速民航机，从普通机场起飞，爬高并达到 12000—16000 公里/小时的速度。在更高的高空则由第二级飞机接着飞往轨道站。高超声速飞机完成任务后降落着陆，准备把新的货物或乘员送往轨道站。

苏联航天飞行员在航天飞船“联盟 4 号”和“联盟 5 号”上的飞行证实，在宇宙空间建造轨道站是可能的，航天飞船在轨道上对接是可能的，航天飞行员走出飞船到宇宙空间工作是可能的。

董务民译自：Струминский, В. В. (1980), Механика XX века, 《Механика и технический прогресс》, Изд-во Наука: 6—16. (略有删节)