

## 回顾钱学森先生居留国外时期对力学的贡献

郑哲敏

中国科学院力学研究所

钱学森先生离我们而去, 我国失去了一位科学巨人, 我们力学界失去了一位大师, 我也失去一位跟随整整 60 年的恩师。

钱先生在美国期间在力学和火箭方面所发表的论文, 对国际力学和航空航天学术界有重要而广泛的影响, 这主要是由于论文的原创性、超前性、深刻性、涉及面的广泛性和实用价值。这篇短文仅就他在美国时公开发表的几方面工作做简短的回顾以示纪念, 并期对人们深入认识钱先生的科学贡献有所帮助。

他在可压缩气体动力学方面的研究遍及亚声速、跨声速、超声速、高超声速和稀薄气体等领域, 同导师冯·卡门 (von Karman) 一起发表的卡门-钱 (Karman-Tsien) 压力修正理论公式得到实验的充分证实, 可以在相当大马赫数范围内用于亚声速机翼设计, 解决了当时高速飞机发展急待解决的问题。

他又证明, 在无旋假设下, 轴对称流场中出现极值线时的来流马赫数是上临界马赫数, 超过这个数, 流场中必然出现冲击波。这会导致机翼所受的阻力猛然增加, 甚至造成灾难性后果。他还指出, 当流场局部的流速达到当地的声速时, 相应的来流马赫数是下临界马赫数, 这时也可能出现冲击波。在实际问题中, 冲击波往往出现于介于两个极限之间的马赫数。在平面流动条件下, 可压缩气体无旋流方程在物理坐标内是非线性的, 无法求得一般解析解, 在当时的条件下也没有方法求得数值解。虽然前人已经知道, 在速度平面上, 可以将方程式转换成线性的, 但伴随而来的是难以满足流场的边界条件。因此在跨声速范围内, 当流场中既有亚声速流动又有超声速流动, 如何求解机翼的绕流问题并计算上临界马赫数, 是国际公认的难题。钱学森先生和郭永怀先生通力合作, 借助于解析的方法彻底解开了问题的难点。这样一来, 从低亚声速直至超声速, 只要不超过上临界马赫数, 机翼的平面绕流问题就得到完全的解决, 卡门-钱公式在低亚声速端的近似与这个严格解相连接。当时飞机设计正朝着声速前进, 因此这项研究

成果起了引领航空工业的作用, 自然得到学术界和工业界的重视和很高的评价。

在高超声速绕流问题上, 钱先生建立了相似律用以解决尺寸不完全相同的机翼间气动力的换算问题。他利用分子自由程与黏滞系数之间的关系, 将分子自由程与飞行体特征长度之比表述为航空工程师所熟悉的雷诺数和马赫数, 从而把气体的微观参数和宏观性质联系起来。以此为基础他将流场分为 3 类, 并给出了平板升力和阻力的计算结果。稀薄气体力学的提出为空气动力学指出了新的方向。

直至 20 世纪 30 年代末, 带有曲率的弹性薄壳受力时出现的失稳现象是一个困惑许多著名力学家的难题。边界影响、初始缺陷、塑性变形等因素都未能对此现象做出解释。这个现象的特点是, 实际失稳的临界值比当时的理论值小许多, 而且失稳的发生很突然, 是跳跃式的而且显然都在弹性变形范围之内。这类壳体是航空结构工程师在飞机上所必须采用的。没有可靠的理论公式迫使他们不得依靠试验或者适用范围有限的经验公式作为设计依据。刚刚取得学位而且重点研究气体动力学的钱学森先生决心攻克这个难题。1939 年起至 1942 年间, 他会同他的导师冯·卡门发表了 4 篇文章。他认识到这是几何非线性导致的结果, 对这类现象做出了透彻的物理机制说明, 并且提出了以能量法为基础的近似计算方法, 使理论计算的结果十分接近实验值, 因而可以预报可靠的失稳临界值。这是钱先生出师后第一项独立的工作, 为他赢得了学术界很高的荣誉。不久之后 (1945 年), 荷兰力学家考伊特 (Warner T Koiter) 提出了数学上更为完善的理论, 但这并不降低钱先生贡献的价值。

还在博士研究生阶段, 经过导师的同意, 他受同学马里纳 (Frank Malina) 的邀请, 参加了火箭研究小组, 从此结下了他与火箭和导弹研究的不解之缘。这个小组在十分简陋的条件下开展了固体和液体燃料火箭的研究, 钱先生分工侧重理论研究, 研究燃烧室和喷气方面的问题。虽然之前有

齐奥尔考夫斯基 (Konstantin Tsiolkovsky), 欧伯特 (Hermann Oberth), 高达得 (Robert Goddard) 等人关于宇航和探空火箭方面的早期研究, 但那时航天和火箭领域还基本停留在科幻的阶段, 严肃的科学研究很少, 报道也不多. 钱先生的第一篇论文根据当时所掌握的有关燃料的知识, 采用脉冲驱动方式, 分析了探空火箭可能达到的高度. 此文后来与马里纳 (Frank Malina) 联名发表. 始于 1936 年的加州理工学院古根海姆航空系这个火箭研究小组的实验和理论研究工作构成了当代美国宇航局喷气推进实验室的早期历史. 二战时, 钱先生以中国公民的身份参加美国军方的科研工作, 作为代表团成员被派遣到败退的德国, 考察德方航空和火箭研究方面的工作, 参与了代表团考察和发展战略建议报告的撰写. 这些经历都使他在战争年代和战后发表的论文具有更为深刻的应用背景.

20 世纪 50 年代是超声速飞行和航天科学与技术初创时期. 钱先生在这个广泛领域里开展的研究和发表的科学论文涉及许多方面, 包括探空火箭、卫星和从卫星轨道上发射的火箭, 火箭的多类动力系统, 火箭发动机的程控和优化, 长程火箭的自动导航与寻的, 火箭发动机的选型等. 这些工作为航天科学研究起到了奠定基础、界定领域和性质、指出方向的作用, 有的成果具有很强的启发性和前瞻性. 例如通过分析和计算, 他提出在火箭上安装翅膀, 利用重力和气动力, 可以实现载人火箭洲际航行. 这种前景当时在科技界和社会上都引起很大的兴趣. 事实上, 后来美国在这方面进行过实际尝试, 现在仍在使用的航天飞机在返地时也应用了这个原理.

发动机是火箭的核心, 火箭发动机运行的特点是高温、高压、大推力和短时, 火箭运行时还可能出现燃烧室的不稳定性. 因此钱先生在这些方面进行了许多深入的研究, 这包括高温、高压真实气体的热力学和输运性质, 燃烧室的冷却方式, 耐短时、高温的结构设计, 燃烧室震荡的伺服控制, 探空火箭推力的优化程控, 火箭喷嘴的传递函数等. 他的研究有些至今仍然是很有启发性的, 例如鉴于发动机需要耐受短时高温的特点, 他建议用流变模型代替弹性模型进行结构的强度和变形分析, 以同时满足结构设计的需要.

钱先生的着眼点不限于个别具体问题的研究.

他总是努力把问题提高到更为普遍的理论高度上加以探讨. 鉴于所需高温、高压、含化学反应的气体的性质难以完全依靠试验测定, 而基础的物理和化学的研究又不以定量地提供实际复杂气体的细节性质为目标, 因此他提出了物理力学的概念, 并且就此开展了具体的研究. 他认为物理和化学的理论, 特别是微观理论是基础, 但是在解决实际工程中的问题时, 人们面临的是复杂、多因素的系统, 其行为大都不是物理和化学家在单因素条件下得出的规律所能直接定量刻划的. 所以他提出, 在这类有工程和应用目标的科学研究领域里, 除了充分利用物理和化学方面的最新成果外, 还要同时应用和发展经验和半经验的方法以及数学上的近似方法. 他把这个科学研究领域统概括为物理力学, 其特点和目标是基于宏微观理论, 用近似的手段解决复杂系统的问题.

在研究了多方面有关火箭的一些控制问题之后, 他著成了《工程控制论》, 对工程中的各类控制问题进行了高度的科学概括, 所研究的时变系统, 时滞系统, 非线性系统的控制, 优化系统和容错系统控制, 将控制理论提高到一个新的层次, 被公认为这个控制领域的开篇之作.

《钱学森文集》中“工程与工程科学”一文代表钱先生的一个基本思想. 1947 年回国访问时钱先生曾以此为题做过报告. 1957 年在参加 12 年全国远景科学技术规划会后, 他又以“论技术科学”为题在《科学通报》对同一思想做了进一步的阐述. 这代表他对 20 世纪前半叶科学和高技术发展经验, 特别是原子能、雷达和航空航天技术发展方面经验的总结, 他认为工程科学是自然科学与工程技术和其他应用技术之间的桥梁, 其任务是在这个广泛领域内发现和研究共性即基础性问题, 以达到发展高技术、提升和改造传统工程技术、开辟新的工程科学领域的目的. 在晚年著作中他更是把工程科学列为人类科学技术知识体系的有机组成部分. 钱先生的这个重要思想无疑是我们应当珍惜、继承和发扬的.

从取得博士学位到回国, 短短不过 16 载, 钱先生在力学和控制理论方面取得的成就是令世人瞩目的, 也是国人完全可以引以为骄傲的. 今天我们追念他的最好方式就是发扬他的科学精神, 学习他的奉献、专一和勤奋, 加速我国力学事业的发展.

## A BRIEF REVIEW OF PROFESSOR QIAN XUESEN'S CONTRIBUTIONS TO MECHANICS IN THE U.S.

ZHENG Zhemin