

钱学森对近代力学的发展所做的贡献[†]

谈庆明

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘 要 钱学森先生为了研究实现高速飞机和远程火箭的可能性, 在空气动力学、固体力学、稀薄气体力学和飞行力学等应用力学领域做出了杰出的贡献; 并且开创了喷气推进学、工程控制论和物理力学等技术科学新分支。他对近代力学以至技术科学的内涵和发展方向, 发表过全面系统的论述。在这篇文章中将介绍他的主要研究成果, 并对他的科学思想作一初步的探讨。

关键词 钱学森, 应用力学, 喷气推进, 技术科学, 工程控制论, 物理力学

钱学森先生是国际知名的力学大师, 他的许多力学著作堪称经典文献, 他对近代力学以至技术科学的内涵和发展方向发表过全面系统的论述, 对于指导我国实现科学和技术的现代化具有重要的现实意义。

1 留学美国的历史背景^[1,2,3]

1934 年, 钱学森以优异的成绩从交通大学毕业。大学的学习大大拓宽了眼界, 他的兴趣逐渐转向了新一代的交通工具飞机, 同时他也认识到飞机在战争中的重要作用。当时的国民党政府在 1928 年设立了航空署, 1934 年改称航空委员会, 下面只有修理厂, 而不能制造飞机。1932 年 1 月 28 日, 日本飞机轰炸上海, 中日空军多次空战, 我英勇战士驾驶的却不是国产飞机。钱学森深切觉悟到, 为了能抵御列强的侵略, 中国有必要建立自己的航空工业。大学毕业后, 他考取了清华学堂公费留美, 专业是飞机设计。

1935 年秋, 进入麻省理工学院学习航空工程。学业成绩超群, 这使他感到作为一名中国人而自豪。然而, 学工程一定要到航空工厂去实习, 而工厂却不欢迎中国人。当他第二年取得了麻省理工学院的硕士学位后, 决定追随加利福尼亚理工学院的力学大师冯·卡门 (Theodore von Kármán), 学习与航空工程有关的基础理论, 即应用力学。

1936 年 10 月, 钱学森转学到加州理工学院, 开始了与冯·卡门先是师生后是亲密合作者的情谊。下面先介绍一下 20 世纪 30 年代力学研究的状况和背景。

20 世纪一开始, 航空技术的发展和流体力学的研究基本上是脱节的。1903 年, Wright 兄弟实现了第一次有人驾驶的动力飞行, 但流体力学家并没有给他们提供设计原则。19 世纪理想流体 (即无黏性流体) 力学的理论已经比较完整地建立起来, 但是这个理论的第一个结论被人称之为 D'Alembert 佯谬。它说明, 物体在无黏性的流体中运动, 既无阻力, 也无升力。理论和实际严重矛盾。只是到了 1904 年, 德国的普朗特 (L. Prandtl) 提出了边界层理论, 认为只要在紧贴物体

收稿日期: 2001-10-25

[†] 谨以此文祝贺钱学森先生 90 周年诞辰, 本文在“新世纪力学研讨会——钱学森技术科学思想的回顾与展望”会议上做大会报告宣读, 并已由国防工业出版社出版文集

表面的一薄层的流体中考虑黏性的作用，从而大大简化了流体力学方程，并求得了物体所受到的摩擦阻力。从此，由普朗特开创的应用力学便和航空技术紧密地结合起来，并且成为推动航空技术发展的理论基础。

如果说，上个世纪初是普朗特在德国的哥廷根开创了应用力学学派，那么到了 1930 年是普朗特的得意门生冯·卡门把应用力学从德国带到了美国。当时美国加州理工学院的校长密立根 (R. A. Millikan) 从德国把冯·卡门请去，主持该校的航空工程系。在普朗特和冯·卡门那个时代，一些国家的政府已经注意到飞机的军事用途，纷纷成立航空科研机构。第一次世界大战中大规模使用了飞机。飞机性能迅速提高，从双翼机发展到单翼机，从木布结构发展到全金属结构，从敞开到密闭式，从固定起落架到收放式起落架，飞机的升限、速度以至发动机的功率好几倍地提高。上述进步每一项都和应用力学研究的进展紧密相关。力学大师们围绕飞机的升力和阻力的原理，系统地开展理论研究和风洞试验，为工程师们提供设计飞机外形的原则和基本数据；研究材料和结构的强度原理，提供选择材料和结构形式的依据。可以认为，当时的欧洲科学家，特别是德国的以普朗特和冯·卡门为代表的 Göttingen 应用力学学派对于推动航空和发挥力学所起的核心作用。

现在世界闻名的加州理工学院，前身是不知名的 Throop 工学院，1920 年改名为加州理工学院，简称 Caltech。1922 年，密立根担任校务委员会主席（当时未设校长一职。他因著名的测定基本电荷的油滴试验获 1923 年诺贝尔奖），他不遗余力地邀请热心培养青年的杰出人才来校担任教授。1929 年 12 月，冯·卡门接受密立根的聘请，来到 Caltech 任教。

冯·卡门刚到 Caltech 不久，便感受到那里有着广泛的自由和独立思考的气氛。同时，他也发现那里的教学基本上是死记硬背，不注意培养学生创造性的思维能力。他陆续为培养年轻的航空工程师开出一系列新课，如空气动力学，航空应用弹性理论，动力气象学基础等。讲授总是从基本概念出发，以便提高学生运用原理的能力。冯·卡门一方面努力改进教学，另一方面与航空工业界保持紧密联系，开展科学研究。上世纪 30 年代中，美国航空界先驱 Douglas 公司、Lockheed 公司等先后在南加州落户开张。冯·卡门为 Douglas 公司的 DC-1 型飞机解决了因提高速度而发生颤振的问题，他采用了整流板，消除了形成振源的卡门涡列。他为了提高抗弯刚度，在金属板壳上加上加强筋，成功地使 DC-3 型飞机成为第一架全金属飞机。这些成就为 Caltech 在新兴飞机制造业中赢得重要地位而声名大振。

冯·卡门每周主持一次工作会议和一次学术活动，周周都开，神圣不可侵犯。在工作会议上，希望每个人都报告自己的工作，不管是教授还是学生，讨论十分活跃，说错了也不要紧。冯·卡门的指导思想显然是：所有的人都参加这个集体所从事的工程科学的原始研究，每个人的研究都是重要的工作，希望每个人都能充分发挥自己的学识和经验，并对别人作出贡献。因此这种活动极其成功，深受欢迎。

2 应用力学的研究^[1,4]

1935 年冯·卡门参加第五届 Volta 会议，这次会议标志着超声速时代的开始。从此，冯·卡门的学术研究转向为实现超声速飞机而创造力学理论。1936 年，钱学森到达加州理工学院，从师冯·卡门，在上述时代背景下开始做他的博士学位论文工作。冯·卡门建议他研究与高速飞行直接相关的考虑空气可压缩效应的问题。经过 3 年时间的紧张和艰苦的工作，1939 年他完成了极其出色的博士学位论文。论文内容丰富多采，包含四个部分。前面三个部分的工作都是冯·卡门建议做的，它们是：可压缩流体边界层；有倾角的回转体的超声速绕流以及应用恰普雷金变换求解二维亚声速流动。第四部分则是和同学马林纳合作研究的结果，内容是以逐次脉冲推进的探空火箭的飞行分析。

博士学位论文第一部分的内容涉及高速飞行体所受到的阻力和表面热效应。那时，人们普遍认为超声速飞行的空气阻力主要来自激波阻力，而表面摩擦阻力并不重要。至于热效应，一般认为飞

行体的表面被周围空气所冷却。问题的主要困难在于，飞行体周围的空气密度发生显著的变化，方程不再是线性的。钱学森采用了 von Mises 简化方程的做法，然后运用逐次迭代的解法，取得了成功，得到了有关阻力和热效应的崭新的重要结论：第一，在高速飞行中，可压缩性对表面摩擦具有重要影响，摩擦阻力大于激波阻力；第二，当飞行马赫数增大到一定数值，飞行体表面的空气薄层中所产生的热量不仅不能被忽略，而且将对飞行体起加热的作用。这一新结论十分重要，是从理论上预见实现高速飞行将面临的一大障碍，即后人所谓的“热障”，必须对飞行体表面采取有效的冷却或防热措施，才能实现高速飞行。

博士论文第三部分的内容是寻求计算高速飞机机翼面上压力分布的方法。在那个年代，对于亚声速流动，已有的方法只能计算机翼很薄或飞行速度较低的情况。1932年 Demtchenko 以及 1933年 Busemann 采用了查普雷金变换，把原来的非线性的方程化为线性方程，并将等熵关系曲线用驻点处的切线来代替，求得了翼面上的压力分布，可惜只适用于飞行速度小于 0.5 倍声速的情况。冯·卡门凭着对物理问题的洞察力，建议钱学森在求解变换后的线性方程时，不用驻点处的切线而改用流状态点处的切线来代替等熵关系曲线，可能会得到更好的结果。钱学森的研究证明，采用流状态点处的切线近似，果然得到更为精确的结果，而且可以把适用范围扩大到高亚声速的流动。原因在于：在流场的大部分区域，流速和声速的数值更接近于来流的数值，而不是接近于驻点处的数值。在第二次世界大战期间以及战后一个相当长的时期，上述方法被广泛用于飞机翼型的设计，这就是著名的“卡门·钱近似”方法。

上面只是对他博士论文的第一和第三两部分作了简介，从中可以看出，钱学森刚进入力学界便写出了对空气动力学的发展起重要作用的经典文献，展示出他的过人才华。

1939年6月，钱学森获得航空与数学博士学位。接着留校担任助理研究员，直到1944年。在这段时间里，先从事薄壳稳定性的研究，1940年结束了这项研究，并撰文发表，算是出了师。此后，钱学森逐渐成为冯·卡门的得力助手，并最终发展为亲密合作者。

在1939~1953年这十多年的时间里，钱学森在应用力学领域中，紧密联系高速飞行，为突破“声障”和“热障”所面临的前沿难题，几乎全方位地进行探索，并做出重大贡献。下面将介绍他在薄壳稳定性、跨声速流动以及稀薄气体力学等三个方面的研究工作。

1939年，钱学森获得博士学位后，开始对薄壳的失稳问题发生了兴趣。当时第二次世界大战已经开始，各国正在设计和制造全金属薄壳形式的飞机。薄壳结构的强度高而重量轻，当其所受载荷超过一定数值时，壳体会发生皱瘪而失效，称之为屈曲。设计师需要知道发生屈曲的临界载荷的大小，可是经典线性理论给出的数值却远高于试验值，只能依赖从相当分散的试验数据中整理得到的经验关系。为了解决上述矛盾，理论上必须考虑大挠度的影响，数学上遇到求解非线性方程的困难。在深入研究这一问题之前，钱学森首先对前人工作做了系统总结，剖析前人理论的优缺点，利用了当时可能得到的实验数据，认为应该从考虑有限挠度的弹性屈曲理论入手，采用能量法求取屈曲临界载荷。

钱学森首先研究球壳失稳问题。他认为经典理论之所以失败，在于没有考虑到，在加载过程中球壳除了保持球形位形以外，还可能存在位能更低的其他位形。壳体在受到外界干扰时，会从球形位形跃变到位能较低的某个位形。他认为，有必要区分经典线性理论所给出的“上”屈曲载荷以及壳体发生有限变形而屈曲的“下”屈曲载荷。前者可以在试验中小心避免不对称等初始缺陷而达到，而设计所需的临界载荷只能是后者。钱学森运用上述能量跃变原则，计算得到的“下”屈曲载荷值确实和试验值很接近。紧接着，钱学森把能量跃变原则推广到应用更为广泛的柱壳的情况。上述研究结果很快被设计师所采用。

1940年以后，钱学森又把主要精力放在空气动力学的研究上。为突破声障，实现高速飞行，研究跨声速流场是个重要课题。他在1944年和1946年发表在 NACA Technical Note 上的两篇文章是跨声速流动理论的经典文献。在前一篇中他讨论了跨声速流场中的极限线；而在与郭永怀合作的第二篇中则提出了上临界马赫数的重要概念。

对于给定机翼外形, 当均匀的可压缩理想气体的来流马赫数逐渐提高到达某一临界数值, 飞行体附近的最大流速会达到局部声速, 人称临界马赫数. 钱学森和郭永怀认为: 如果继续提高来流马赫数, 飞行体附近出现超声速的流动区域, 流场仍然会是连续的, 仍然存在数学上的连续解. 当来流马赫数进一步增加, 突然会出现不连续的流场, 并出现激波, 这时的来流马赫数可称为上临界马赫数, 它标志着流场从连续到不连续的突变, 而前面提到的那个临界马赫数则称为下临界马赫数. 应当说, 真正有实际意义的是上临界马赫数, 而不是以前大家关注的下临界马赫数. 因而上临界马赫数这一概念的提出乃是一个重大发现.

这个重要概念的提出固然是个大胆的设想, 但是要论证和计算它的存在则遇到数学求解的困难. 描述运动的偏微分方程不仅是非线性的, 而且流场中同时出现亚声速和超声速两个相邻的流区, 数学上分别对应椭圆型和双曲型的偏微分方程. 钱学森和郭永怀仔细地分析了变换中所出现的奇点的性质, 正确地得到了经过解析延拓的解; 并且利用超几何函数的渐近性质, 克服了级数收敛缓慢的困难, 得到了包括亚声速和超声速流区的整个混合流场, 从而进一步确定上临界马赫数的大小.

超级空气动力学——稀薄气体力学 (Superaerodynamics) 这个学科最早是由 A. F. Zahm 在 1934 年提出来的. 但是当时的飞机还到不了空气非常稀薄的高空, 所以研究只有纯学术的意义. 到了 40 年代中期, 钱学森考虑到, 远程喷气飞机的最优飞行高度估计在 100 km 左右, 那里的空气已经非常稀薄, 不能当作连续介质看待, 必须运用稀薄气体力学的概念和方法来指导飞机的设计. 他在 1946 年发表在《Journal of Aeronautical Sciences》上的“Superaerodynamics—Mechanics of Rarefied Gases”一文, 讨论这一流体力学新分支的基本概念和说明某些已经得到的结果, 以便推动这一流体力学分支的发展. 在这篇文章中他首先介绍了分子运动平均自由程 l 的概念, 并用 l 与物体的特征长度 L (或边界层厚度 λ) 之比 l/L (或 l/λ) 形成一个无量纲常数, 在由马赫数 Ma 和雷诺数 Re 构成的平面上, 以 l/λ 为指标把该平面划分为四个区域, 即: 自由分子流区, 过渡区 (其特征是分子间的碰撞和分子与物体表面的碰撞同等重要), 滑流区和气体动力学区. 於是, 可以由 Ma 数和 Re 数两个数值来判断流动属于哪种类型. 接着, 作者分别讨论了滑流的应力和边界条件, 小 Ma 数滑流的边界条件, 大 Ma 数自由分子流以及流过倾斜平板的自由分子流及相应的升力和阻力系数. 钱学森文中所提出的流动区域的划分原则被人们认为是研究稀薄气体力学的开创性工作.

3 喷气推进的研究^[1,4]

钱学森到加州理工学院的第一年, 他的师兄马林纳 (F. Malina) 等三人满怀希望地向导师冯·卡门提出一个非同寻常的要求, 希望支持他们研究探空火箭, 以便能够探测高度达到 30~80 km 处的宇宙射线和气象信息. 在当时美国人的心目中, 火箭是不切实际的玩意儿. 可是, 冯·卡门深知火箭的重要性, 决定保护和支援这几个青年做火箭的研究.

钱学森对他们的工作观察了一年以后, 第二年即 1937 年, 也决定参加他们这个火箭研究小组. 他参加他们的试验, 并在小组里担任理论家的角色, 为小组设计和改进小型液体推进剂火箭, 对发动机的热力学特性作理论分析, 包括: 分析计算燃烧室中的温度, 燃烧产物的膨胀对火箭效率的影响, 发动机的推力, 火箭的理想效率等等.

当时火箭的技术水平是不高的, 有人估计, 火箭可达到的高度只是 3 km, 还不能满足探空火箭的需要, 这就促使钱学森做进一步的分析. 钱学森在 1939 年发表在《Journal of Aeronautical Sciences》上的“Flight Analysis of a Sounding Rocket with Special Reference to Propulsion by Successive Impulses”一文 (即作者博士学位论文的第四部分), 探讨和论证了逐次推进的方案, 即采用硝化棉一类的固体火药作为推进剂快速燃烧排气而获得脉冲式推力的方案, 可以到达离地面 30 km 的高度, 满足探空火箭进行观测的需要.

1938 年 5 月, 美国陆军航空兵司令阿诺德 (H. Arnold) 亲临冯·卡门领导的古根海姆实验室

对火箭研究表示特别的关心；秋天，阿诺德进一步要求他们研制用火箭助推重型轰炸机起飞的装置，使轰炸机能在太平洋小岛的短跑道上起飞升空，并和冯·卡门签订了第一个合同。一年后，由于火箭研究工作卓有成效，又和他们签订了经费达一万美元的第二个合同。冯·卡门为此制订了 GALCIT-1 号计划。经过火箭小组的努力，终于研制成功新型的复合推进剂（次氯酸钾 + 煤焦油），火箭助推起飞器（英文简称 JATO）在 1941 年 8 月试飞成功。钱学森在这一计划的制订和实践中都做出了重要贡献。时至今日，火箭助推器仍然被用来当作飞机起飞时的备用推力。

1944 年，冯·卡门答应阿诺德将军的要求，组织一个科学咨询团，为未来 20~50 年空军发展制订规划。1945 年，科学咨询团为美国陆军航空兵完成了题为《Toward New Horizon》（迈向新高度）共 9 卷的带有展望和规划性的报告。作为该团核心成员的钱学森为《迈向新高度》提供了他自己的观点和思想。他在《迈向新高度》这一研究报告的第 3、4、6、7 和 8 卷以及技术情报附录中，详细地论述了有关高速空气动力学、脉冲式空气喷气发动机、冲压发动机、火箭、超声速箭形翼导弹以及核能作为飞行动力的可能性等方面的研究概貌、存在问题以及发展前景。这份报告为第二次世界大战以后美国代替德国在航空科技的领先地位，以及在 20 世纪下半叶美国空军称霸世界奠定了重要基础。钱学森对美国航空科学的发展所做的贡献是不可抹杀的；而钱学森这些研究工作也正是为他后来回到祖国发展中国人民自己的航空航天事业所做的充分准备。

4 开拓技术科学新领域：工程控制论和物理力学^[1,4]

4.1 工程控制论

钱学森亲身经历了流体力学作为一门技术科学，怎样从空气动力学工程师、水力工程师、气象工程师的工程技术实践中分离出来，并上升到理论又应用和革新实践的过程，特别是他自己从 30 年代到 50 年代参与超声速飞机以及火箭和喷气推进飞行器的研制过程中所做的力学研究，深刻理解工程实践 - 科学理论 - 工程实践之间的关系是多么重要。在第二次世界大战结束前后的一段时间里，钱学森在火箭研究中，已经发现，无论是最大射程、航向控制、燃烧稳定等问题都需要解决优化规划和反馈控制的技术和理论的问题。

1948 年 N. Wiener (维纳) 发表了《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine》（控制论）一书，开创了控制论这样一门新的学科，其对象是研究一个系统各个部分之间的相互作用的定性性质以及整个系统的运动状态。

基于钱学森具有从弹道火箭到可控和制导火箭技术的丰富的研究经验，他迅速感悟到维纳开创的控制论的重要性，很快便运用控制论的原理解决了一批喷气技术中稳定和制导系统的问题，诸如：火箭喷管的传递函数、远程火箭的自动导航以及火箭发动机燃烧的伺服稳定等问题。钱学森意识到，不仅在火箭技术的领域内，而且在整个工程技术的范围内，几乎到处存在着被控制的系统；而且有关的系统控制的技术也有了多方面的发展，因此很有必要用一种统观全局的方法，来充分了解和发挥上述导航技术和控制技术的潜在力量，以更广阔的眼界用更系统的方法来观察问题，寻求新方法，揭示新前景。于是，钱学森提出了一门新的技术科学：工程控制论。作者首先在 1953 年底在加州理工学院开设了“工程控制论”一课，接着于 1954 年出版了《Engineering Cybernetics》（工程控制论）一书。该书的出版在世界科技界引起广泛注意，随即被译成多种文字发行。

4.2 物理力学

钱学森在努力探索超声速飞机以及火箭和喷气推进飞行器的性能和原理的过程中，特别是在他研究火箭发动机内部的燃烧过程时，需要用到介质和材料在高速和高温状态下的成分和性能。可是，手册上查不到有关的数据，实验也得不到这些数据。钱学森应用统计力学、光谱学和化学动力学，研究了气体和液体的平衡和输运性质以及气体的热辐射性质等，从而开辟了一条崭新的通过技术科学解决工程技术问题的途径。

钱学森敏锐地意识到,在火箭技术、核能技术等重要领域,工程师们迫切需要高温、高压、超高温、超高压及放射线作用等条件下介质和材料的性质,诸如本构关系、输运性质及化学反应的平衡和动力学的数据等。如果完全依靠实验,会遇到很大困难。钱学森考虑到近代物理和化学的发展,对物质在原子核以外的微观结构已有相当的了解,有条件来建立一门新的技术科学,即物理力学。它的目的是想通过对物质的微观分析,把有关物质宏观性质的实验数据加以总结和整理,找出规律,得到需要的数据,甚至可以利用这些规律预见新物质材料的宏观性质,为发展新材料和新工艺服务。

1953年,钱学森在《Journal of American Rocket Society》上发表了“Physical Mechanics—A New Field in Engineering Science”一文,正式提出了物理力学这门新的技术科学。1956年在他创建的中国科学院力学研究所里成立了物理力学研究组,他亲自下功夫培养第一批物理力学的研究人员。1962年他编著的《物理力学讲义》正式出版,系统介绍物理力学的基本概念和研究方法,也介绍了他自己所做的有代表性的工作。1958年,中国科技大学成立,由钱学森主持,设置了物理力学专业,1963~1965年连续毕业了第三届学生,许多人被输送到力学研究所,成为该所物理力学研究室的生力军。

从钱学森倡导物理力学的研究到今天已有半个世纪了。自然科学领域的方方面面都已认识到,研究复杂的科学和技术问题均需要走宏观与微观相结合的道路。回想当年,由钱学森把S. S. Penner(潘纳)请到加州理工学院来合作研究,用光谱方法探测喷气发动机的燃烧过程,开展了包括对光谱吸收系数、发射率和辐射输运问题的研究。到了1961年,潘纳创办了一个新的学术期刊《Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer》,这标志着,钱学森所提倡的“定量光谱学”成为又一新学科。可见,物理力学在美国早已开花结果。而最近30年来在分子动力学模拟方面所取得的进步再次说明了物理力学的巨大生命力。

但是,非常遗憾的是,反而在钱学森亲自创建的力学研究所,亲手培植的物理力学研究室却在1993年被解散了。钱学森得知这一消息后便给崔季平写信说:“可以把院内各所有物理力学的力量集中在一个新单位,创新牌子。”可是他的建议却没有得到任何响应。

如今,钱学森所倡导的物理力学这门宏观和微观相结合的学科正在更广泛的范围内蓬勃发展。

5 坚持近代力学的发展道路^[5]

1956年钱学森受命创建中国科学院力学研究所,计划在弹性力学、塑性力学、流体力学、化学流体力学、物理力学和运筹学等方向上大展宏图。不久,大跃进运动改变了研究所的方向和面貌,全国力学界的情况也大同小异。

1961年钱学森在总结了大跃进期间力学界的经验教训以后,在人民日报上发表“近代力学的内容和任务”一文,系统论述近代力学的任务、工作方法、内容和发展方向等三个方面,及时指引全国力学界回到正确的轨道。

他认为近代力学有三个任务。第一,为工程师、设计师服务,解决他们在工作中碰到的新问题,依据力学理论进行分析和研究,然后给他们提供建议书;第二,从工程技术和生产实践所发生的新问题中提炼出具有一般性的课题,进行研究并予以解决,这样就不只是解决个别的具体问题,而是解决一系列的实际问题;第三,在掌握了生产实践知识和精辟的力学理论的基础上,创立新的科学见解,从而改进工程技术,改造生产。钱学森在谈到以上三项任务时,始终围绕着力学工作者必须用理论解决工程技术问题这一核心。他的这一思想应当作为我们从事力学研究,从选题到研究直到写出研究报告这一全过程的指导方针。

他在工作方法的一节中谈到:理论分析需要正确的抽象和概括,使分析得到简化而解决全局性的问题;必须讲究数学方法和演算技巧,需要和数学家和计算技术专家的合作;必须掌握实验技术,需要和物理学家和仪器专家的合作。总结起来,他说:“分析实验分析,再实验,再分析,这便是力学的研究方法。”

他在内容和发展方向一节中,除了谈到一般力学(振动与控制)、固体力学(弹性力学和塑性力学)和流体力学(不可压缩和可压缩流体力学)以外,着重谈到与高速飞行器、火箭乃至将来星际航行有关的交叉学科,例如,为解决高速飞行器的烧蚀问题所需的化学固体力学;研究发动机内燃烧原理的化学流体力学;与高速飞行器和星际航行有关的高温条件下的等离子体和电磁流体力学;与高温高压极端条件下材料性质有关的物理力学;甚至谈到地壳深处极高压条件下的物质第五态的力学等等。钱学森始终站得很高,看得很远,引导我们向着远大而重要的战略目标而进军。

文化大革命期间,钱学森离开了力学研究所,但是他一直关注着我国力学事业的发展。1995年还给力学学会写信,谈他对今日力学的认识。他在总结整个20世纪中力学发展情况的基础上,发表了对力学的性质和对象以及力学的研究方法的精辟见解。他认为:“力学是一门处理宏观问题的学问”,“(力学)是用理论,通过具体数字计算解答一个个实际问题。这些问题在过去都来自工程技术;但今后也会来自自然科学的研究”。为了能够“对实际问题做出数字解答,当然要用电子计算机。(这里)计算方法非常重要。”接着,他还谈到另一个手段是“巧妙设计的实验”,“用实验来验证理论的关键部分”,“有了对理论的把握,就可以心中有数地去解决实际问题了。”

从钱学森回国创建力学研究所和中国力学学会到今天将近半个世纪,他始终不渝地提醒我们,力学要熟悉工程实践,解决实际问题,要走在生产前面,要理论和实验相结合,要充分应用电子计算机的模拟手段,要和数学家、物理学家、计算技术专家和仪器专家合作,最终则是要给工程界以数字解答。然而,今天的力学界,浮躁之风盛行,难道我们不值得对照钱学森先生的科学实践和他提倡的科学思想进行一番认真的反思吗?

6 倡导技术科学的研究^[1,4,6]

从上面介绍的钱学森回国前在美国的一段研究经历中,我们可以看到,钱学森的科学工作早已越出力学这个领域,而把力学与其他学科结合起来,开创出象稀薄气体力学、喷气推进技术、工程控制论、物理力学等新的技术科学,并提倡核动力工程等其他技术科学。下面想谈谈钱学森对中国发展技术科学所做出的贡献。

早在1947年夏天,钱学森回国给浙江大学、交通大学和清华大学三所著名大学做“工程和工程科学”的讲演,目的是宣传工程科学的重要性,反映出他急盼祖国繁荣昌盛的赤子之心。讲演回顾了20世纪上半叶科学技术的研究愈发成为决定国家和国际事务中的关键这一震撼人心的历史事实,其中最富戏剧性的实例乃是第二次世界大战中雷达和原子弹的研制和应用,对世界民主力量的伟大胜利所作出的卓越贡献。钱学森意识到:纯科学的发现与工业应用之间的距离已经很短,而留长发的科学家和留短发的工程师之间的差别也非常之小,他们之间紧密合作的实际需要产生了一类新型人才,那就是工程科学家,他们在纯科学与工程之间架起桥梁,运用基础科学知识解决工程问题。钱学森在讲演中系统地介绍了工程科学的内涵、工程科学家的任务以及作为一名工程科学家需要接受什么样的教育和训练。

1949年祖国解放,钱学森历尽美国政府的阻挠和迫害,终于在1955年回到祖国。从此以后,钱学森积极提倡并指导工程科学的研究。在回国的第二个月里,就受命创建中国科学院力学研究所。他当时的建所模式不只限于力学,还包括了自动控制、工程经济、运筹学、物理力学等新学科,实际上是按照工程科学的模式来建所的。1956年起,钱学森和钱伟长一起创办了三期工程力学研究班;1958年钱学森和郭沫若、严济慈、华罗庚等一起组建了中国科技大学,开始大批培养工程科学家的工作。1957年钱学森在《科学通报》上发表了题为“论技术科学”的论文,按国内的习惯将“工程科学”改名为“技术科学”。论文进一步全面地论述了技术科学的范围、方法论、人才培养和科学技术工作的组织等各个方面。他认为,虽然自然科学是工程技术的基础,但它又不能包括工程技术中的规律。要把自然科学的理论应用到工程技术上去,并不是一个简单的推演工作,应该做科学理论和工程技术的综合工作。因此,有科学基础的工程理论既不是自然科

学也不是工程技术，而是两部分的有机结合，这就是人类知识的一个新部门：技术科学。钱学森这里指的自然科学是用来包括数学、物理、化学、以及生物学、地质学等科学。在谈到技术科学的研究方法时，钱学森强调技术科学研究离不开数学，但提醒青年注意，数学并不是技术科学的关键。真正的关键是对所研究问题的认识，要认识和分清现象的主要因素和次要因素。首先要收集有关问题的资料，特别是实验室和现场的观测数据，在分析资料的过程中充分依靠自然科学的规律，将它当作摸索道路的指南针，经过多次反复的理论和实验交错认识的过程，找出解决问题的途径。在问题认识清楚的基础上，就可以建立模型，模型不等于现象本身，却吸收了一切主要因素，略去了次要因素，而能反映现象的内在机理。下一步乃是由模型演算得到具体的数据结果，最后还需要将理论结果和事实相对照，经受考验。在关于研究方法的一节中，钱学森预见到电子计算机的发展前景及其应用威力，特别说明了电子计算机将会对技术科学的研究方法带来重要的变化，今天人们已经普遍使用了‘分析 - 实验 - 数值实验或分析’三位一体的研究方法，这说明半个世纪前钱学森的上述预见确实是高瞻远瞩。

如果说在研究方法上与自然科学相比有什么不同的话，那么技术科学包含更多的经验成分，通过对经验的科学分析，创造出工程技术的理论，从而开创新技术，领导工程技术前进。这篇论文还开列出一些新的发展方向，它们是：化学流体力学、物理力学、电磁流体力学、流变学、土和岩石力学、核反应堆理论、工程控制论、计算技术、工程光谱学、运用学（即后来所谓的运筹学）等。

半个世纪以来的实践证明，这些新的技术科学确实从形成到成长而且飞速地发展壮大，在国民经济和国防建设中发挥着重大的作用。两弹一星的研制成功便是突出的表现。这方面的科技工作的性质属于技术科学。虽说当时已经有了基本原理，别人也有成功的先例，但是我们是在外界严密封锁下，从基本原理和技术出发，独立探索而做成功的。结果是长了中国人的志气，扬了国威。

但是不能不看到，当前技术科学的研究形势很不能令人满意，科学界、政府和民众对技术科学的性质、作用、重要性并没有充分的认识。一个极端是按基础科学的标准来指导和要求技术科学；另一个极端是把技术科学研究统统当成生产问题，干脆把研究工作撂在一旁。其严重后果是不断引进，而谈不上不断创新，又怎能做到科教兴国。今天，我们重温钱学森先生关于技术科学的论述是何等的必要。

7 结 语

从前面所介绍的钱学森先生的科学实践活动中可以看出：他不但是一位造诣广博而精深的应用力学家和技术科学家，而且是一位具有远见卓识的战略科学家。他的深远的科学思想为我们这个时代的科学事业提供了丰硕的宝藏。我们不仅应当珍惜它，更应该深入学习它和充分应用它，建设起一支强大的科技队伍，在新世纪里把祖国建成繁荣富强的科技大国。

归纳起来，我们应当学习和发扬：

(1) 他一生进行科学研究的超前意识和务实作风。这里引用钱学森在纪念和赞扬他的挚友郭永怀的一段话：“一方面是精深的理论，一方面是火热的斗争，是冷与热的结合，是理论与实践的结合。这里没有胆小鬼的藏身处，也没有自私者的活动地；这里需要的是真才实学和献身精神。”这也十分恰当地反映了他本人的敬业精神和高尚情操。

(2) 他所继承和发扬力学大师普朗特冯·卡门的应用力学学派的优良传统。概括地说，应用力学家必须着眼于工程技术中带有普遍性的理论研究对象，通过艰苦细致的研究工作，提出新的科学创见，从而改进工程技术，形成新技术，产生新产业。

(3) 半个世纪来他始终如一地倡导的研究近代力学的方向和道路，即：1) 认识复杂现象要走宏观和微观相结合的道路；2) 抓紧开拓和发展力学与其他学科相互渗透结合的最活跃的交叉学科领域；3) 充分利用电子计算机的无穷潜力，并与实验和理论分析有机地结合起来。

(4) 为了提高我国的综合实力, 必须大力开展技术科学的研究. 技术科学是自然科学和工程技术之间的桥梁, 它把工程技术和其他重要应用作为科学研究的对象, 研究的目的是改造世界. 而且, 技术科学同基础科学一样, 也是人类认识事物客观规律性的一个独立的源泉.

(5) 他坚持科技以人为本, 始终重视技术科学家的培养. 他所强调的理工结合的方针应当在我国高等院校中刻不容缓地得到贯彻和落实.

致谢 李佩教授、郑哲敏教授、朱兆祥教授和朱照宣教授对本文的撰写提出过很好的意见, 作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 王寿云编. 钱学森文集. 北京: 科学出版社, 1991
- 2 Theodore von Kármán. Aerodynamics. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1952
- 3 冯·卡门、李·爱特生著. 冯·卡门——航空与航天时代的科学奇才. 曹开成译. 上海: 上海科学技术出版社, 1991
- 4 郑哲敏、谈庆明、涂元季、崔季平编. 钱学森手稿. 山西太原: 山西教育出版社, 2000
- 5 钱学森. 近代力学的内容和任务. 人民日报, 1961年11月10日
- 6 钱学森. 论技术科学. 科学通报, 1957, 2: 97~104

CONTRIBUTIONS TO DEVELOPMENT OF MODERN MECHANICS BY H.S. TSIEN

Tan Qingming

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract In order to investigate the possibility of realizing the high-speed flight with supersonic airplanes, rockets and guided missiles, Professor Hsue-Shen Tsien has made great contributions to research and development in the fields of Aerodynamics, Solid Mechanics, Flight Mechanics; and has founded several new branches in Engineering Sciences, i.e., Jet Propulsion Science & Technology, Engineering Cybernetics and Physical Mechanics, etc. Furthermore, he has made systematic exposition of the intension and development orientation for Modern Mechanics as well as Engineering Sciences. In this paper, his brilliant research work is introduced, and his foresighted scientific thought is explored and discussed tentatively.

Keywords Hsue-Shen Tsien, applied mechanics, jet propulsion, engineering sciences, engineering cybernetics, physical mechanics