

贺钱学森院士
90华诞

钱学森与力学

谈庆明

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

[摘要] 介绍了钱学森先生在近代力学和技术科学发展中的贡献, 特别是介绍了他为实现超声速飞行和火箭技术在一系列关键问题上所做的贡献。在研究过程中他不断开创出工程控制论、物理力学和喷气推进学等新的技术科学, 从而促进了航空航天技术的飞跃发展。我们要学习体现在他身上的超前意识和务实精神, 学习、理解并大力开展他所倡导的技术科学的研究工作。

[关键词] 钱学森; 力学; 技术科学

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, 笔者在这里谈谈自己的学习心得, 作为对科学家钱学森和近代力学史研究的探讨。

1 从学习“火车头”转向研究“飞机”^[1]

1929年, 钱学森中学毕业后, 眼见庞大的祖国疆土关山阻隔、军阀割据、交通落后, 便考入交通大学机械工程系, 学习铁道机械工程专业。

1934年, 钱学森以优异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。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, 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, 为抵御列强侵略, 必须建立自己国家的航空工业。因此, 他报考清华学堂公费留美, 专业是飞机设计。考试的专业科目是航空工程, 得到了极高的分数——87分, 终于被录取。这就是后来他自己说的从学习笨重的“火车头”转向研究轻巧的“飞机”的过程。

2 在美国的力学研究^[1,2]

1935年秋, 钱学森进入麻省理工学院航空工

程系学习。学业成绩超群, 这使他感到作为一名中国人而自豪。然而, 当时美国的航空工厂不欢迎中国人去实习。经过一年时间取得硕士学位以后, 他决定转学加利福尼亚理工学院(简称Caltech), 追随力学大师冯·卡门(Theodore von Kármán), 学习与航空工程有关的基础理论, 即应用力学。

2.1 应用力学研究的时代背景^[3,4]

20世纪一开始, 航空技术的发展与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。

那时, 不会求解有粘性的流体力学方程, 而无粘性流体力学的理论却说明, 物体在流体中运动既无阻力也无升力, 当然与实际不符。到了1904年, 德国的普朗特(L. Prandtl)提出了边界层理论, 只需在物体表面附近考虑粘性的作用, 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, 成为推动航空技术发展的理论基础。

20世纪的最初30年里, 西欧和俄国的力学大师们围绕飞机的升力和阻力的原理以及材料和结构强度的理论, 取得了丰硕成果, 为全金属飞机的设计和制造提供了可靠依据。

如果说, 20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年则是他的优秀学生冯·卡门把应用力学从德国带到了美国。

1929年底,冯·卡门到 Caltech 任教。他与航空公司保持紧密联系。他为 Douglas 公司解决了因提高速度而发生颤振的问题;他为了提高刚度,在金属板壳上加筋,使 Douglas 公司做出了第一架全金属飞机。这些成就为 Caltech 在新兴飞机工业中赢得重要地位,也体现了应用力学的巨大威力。

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。1936年,钱学森转学到加州理工学院,在上述时代背景下开始应用力学的学习和研究。

2.2 博士学位论文和卡门-钱近似方法^[2]

冯·卡门建议钱学森在博士论文的工作中,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年紧张和艰苦的工作,1939年钱学森完成了极其出色的学位论文。论文内容丰富多采,共4个部分。前3个部分的工作,即可压缩流体边界层、有倾角的回转体超声速绕流以及应用恰普雷金变换求解二维亚声速流动,是冯·卡门建议做的;第4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。

论文的第1部分涉及高速飞行体所受到的阻力和表面热效应。在那时的文献中,普遍认为超声速飞行的空气阻力主要来自击波阻力,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的空气所冷却。然而钱学森却得到了崭新的重要结论:第一,在高速飞行中,空气可压缩性对表面摩擦具有重要影响,摩擦阻力大于击波阻力;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,相反地将对飞行体起加热的作用。这一新结论的重要性在于,从理论上预见了实现高速飞行将面临的一大障碍,即后人所谓的“热障”,必须采取有效的冷却或防热措施。

论文的第3部分是寻求计算高速飞机翼面上压力分布的方法。那时,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年丹姆千科(Demtchenko)以及1933年布兹曼(Busemann)采用了查普雷金变换,把原来的非线性方程化为线性方程,用驻点处的切线代替等熵关系曲线,求得翼面上的压力分布,可惜只适用于飞行速度为马赫数 $Ma < 0.5$ 的情况。冯·卡门凭着对物理问题的洞察力,建议钱学森不用驻点处的切线而改用来流状态点处的切线代替等熵关系曲线,

可能会得到更好的结果。钱学森证明,虽然同样是切线近似,采用来流状态点处的切线近似,果然得到更为精确的结果,适用范围还可扩大到高亚声速的流动。在第二次世界大战期间及战后一个相当长的时期,上述近似计算方法广泛应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1和第3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。在1939~1953十多年里,钱学森在应用力学领域,紧密联系高速飞行,为突破“声障”和“热障”,几乎全方位地进行探索,并做出了重大贡献。

2.3 薄壳稳定性^[2]

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。这是因为:a.第二次世界大战已经开始,各国正在制造全金属薄壳型飞机。薄壳结构强度高而质量轻;但当载荷超过某一数值,会发生皱瘪而失效,称之为屈曲。设计师需要知道导致屈曲的临界载荷的大小,可是用经典线性理论得到的数值却远高于试验值。b.为了解决上述矛盾,理论上必须放弃小变形假设,而遇到求解非线性方程的困难;实验上对条件的控制和现象的观测要求有高的技术。钱学森系统总结了前人的工作,剖析了优缺点,利用当时可能得到的实验数据,认为应当考虑有限挠度的影响,采用能量法求取屈曲临界载荷。

钱学森首先研究球壳失稳的问题。他猜测,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,还可能存在多个位能更低的其他位形。壳体受到外界干扰时,会从位能高的球形位形跃变到位能较低的位形。他认为:有必要区分经典线性理论所给出的“上”屈曲载荷以及使壳体发生有限变形的“下”屈曲载荷。前者可以在试验中小心避免初始缺陷而达到,而在设计中所采用的临界载荷只能是后者。钱学森提出和运用上述能量跃变原则,得到的“下”屈曲载荷值确实和试验值很接近,因而被工程界接受。

1940年,钱学森进一步将能量跃变原则推广到应用更为广泛的柱壳的情况。他为了求取圆柱壳屈曲的临界载荷,寻找壳体可能达到的位形,进行了大量推导和演算,手稿长达800多页;然而正式

发表的论文却只有 10 页。难怪在完成这项研究时，他在存放手稿的信袋上用红笔写下了“Final”，即“最后的定稿”。作为一名严肃的科学家，他意识到该理论仍有不足之处，因此他又写下了“Nothing is final”这几个醒目的字，其中含有深刻的哲理。

2.4 跨声速流动^[2]

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，研究跨声速流场是个重要课题。他在 1944 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。前一篇中他讨论了跨声速流场中的极限线；而与郭永怀合作的第二篇则提出了上临界马赫数的重要概念。

对于给定机翼外形，当均匀的气体来流马赫数逐渐提高到某一临界值，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区，流动仍然会是连续的。当来流马赫数进一步增加，突然会出现不连续的流场，并出现击波，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分布到不连续分布的突变，而前面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，而不是以前大家所注意的下临界马赫数。因而上临界马赫数这一概念的提出乃是空气动力学的一个重大发现。

这个重要概念的提出固然是个大胆的设计，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，钱学森和郭永怀克服了困难，得到了包括亚声速和超声速流区的整个混合流场，从而进一步确定了上临界马赫数的大小。

2.5 稀薄气体力学^[2]

40 年代中期，钱学森考虑到远程喷气飞机的最优飞行高度可达 100 km 左右，那里的空气非常稀薄，不能当作常规流体力学中的连续介质看待，必须运用稀薄气体力学的概念和方法来指导设计。为此，钱学森 1946 年发表了“Superaerodynamics—Mechanics of Rarefied Gases”。这篇论文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 δ ）之比 l/L （或 l/δ ）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/δ 为指标把该平面划分为四个区域：自由分子流区、过渡区、滑流区和气体动力学区。于是，不同的流动问题可以由 Ma 数和 Re 数两个数值来判断属于哪类流动。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平板的升力和阻力系数。钱学森在这篇论文中所提出的关于流动区域的划分被认为是研究稀薄气体力学的开创性工作。

2.6 火箭和喷气推进技术^[2]

钱学森到 Caltech 做冯·卡门的博士生的那年，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。冯·卡门深知火箭的重要性，便同意他们可以利用实验室的设备，并答应马林纳的要求，做火箭推进和飞行特性方面的学位论文。

钱学森在一旁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小组。他参加试验，并担任理论家的角色，为小组设计和改进小型液体推进剂火箭，分析计算燃烧室的温度，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。

当时火箭的技术水平是不高的，估计火箭可达到的高度只有 3 km，不能满足探空火箭的需要。这就促使钱学森探讨采用什么样的发动机和燃烧方案可使火箭经济而高效地达到更高的高度。1939 年他发表了“Flight analysis of a sounding rocket with special reference to propulsion by successive impulses”（他的博士学位论文的第 4 部分），探讨和论证了采用逐次推进的方案可达 30 km 的高度，以便观测大气层的结构以及大气层外的物理现象。

1938 年 5 月，美国陆军航空兵司令阿诺德亲临 Caltech 对火箭研究表示关心；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。经火箭小组的努力，终于在 1941 年 8 月的试飞中取得成功。钱学森在研究计划的制订和研究实践中，都做出了重要贡献。

冯·卡门、马林纳、钱学森和索莫菲尔德除了研究火箭外，对其他推进方式也很感兴趣。1944 年，他们的研究得出结论：无论导弹或航天飞行，最好采用由涡轮式和冲压式两种喷气发动机的组合

作为第一级动力装置,以便充分利用大气层中足够的氧气;而火箭装置应该在越出大气层后才开动。这年春天,他们向军方呈交了研制冲压式发动机的建议报告。

2.7 《Toward New Horizon》——二次大战后美国空军建设远景发展蓝图^[2,4]

1945年以冯·卡门为首的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,为二战结束后美国空军的现代化提供了远景发展蓝图。作为咨询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。他总结了欧洲国家的研究经验,并且结合美国的研究经验,特别是他们自己的工作,在该报告的第3、4、6、7和8卷以及技术情报附录中,详细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。这份报告为二次大战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,也为他后来回到祖国发展中国人民自己的航空航天事业做好了充分准备。

2.8 加州理工学院的喷气推进中心的创始人^[4]

1949年,哥根海姆基金会任命钱学森为加州理工学院的喷气推进中心主任,并且赋予他以美国火箭先驱R. H. Goddard命名的喷气推进教授的荣誉称号。该中心有以下三个主要任务:a. 培训青年,为将航空技术推向新阶段培养先驱者;b. 研究喷气推进新思想,为新阶段的坚实发展提供基础知识;c. 促进喷气推进在和平时期的商业和科学方面的应用。

在很大程度上由于钱学森的坚持,中心的学科对象是航空工程和机械工程之间的交叉学科。中心设置的课程全面覆盖喷气推进系统的基本原理和飞行器的性能;研究课题则围绕喷气推进飞行器研究的前沿课题,诸如热应力和高温材料,热交换和冷却,燃烧稳定性和化学反应的平衡和动力学,喷气推进飞行器的性能等。经过中心培养的许多人员后来成为美国航空技术研究单位或军事部门的骨干。

2.9 工程控制论^[2]

1949年,维纳(N. Wiener)的《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the

Machine》(控制论)一书出版,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相互作用的定性性质及整个系统的运动状态。

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,敏锐地认识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,不仅在火箭技术领域,而且在整个工程技术范围内,几乎到处存在着被控制的系统,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等新技术的潜在力量,以更广阔的眼界用更系统的方法来观察有关问题,从而揭示前所未有的前景。于是,钱学森提出了一门新的技术科学——工程控制论。1953年底在Caltech开设了“工程控制论”课,接着于1954年出版了专著《Engineering Cybernetics》(工程控制论)。该书的出版在世界科技界引起广泛注目,随即被译成多种文字发行。

2.10 物理力学^[2]

钱学森在探索超声速飞机以及喷气推进飞行器的性能和原理的过程中,需要用到介质和材料在高速和高温状态下的成分和性能,可是实验得不到这些数据。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,开辟了一条通过技术科学解决工程技术问题的新途径。

第二次世界大战中原子弹的使用,引出了核反应工程的新领域,这里需要知道介质和材料在极高的压力和温度状态下的性能和行为,同样存在上述缺乏数据的困难。

钱学森敏锐地意识到,在火箭技术、核能技术等重要领域,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的数据等;然而实验却遇到很大困难。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了解,有条件建立一门新的技术科学,即物理力学。其目的是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,而且可以预见新型材料的宏观性质,为发展新材料和新工艺服务。

1953年,钱学森发表了“Physical mechanics—

a new field in engineering science”，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，他亲自下工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》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 年三届学生连续毕业，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至今已有半个世纪。自然科学界的方方面面都已认识到，研究复杂的问题均需要走宏观与微观相结合的道路。回想当年，钱学森曾把潘纳(S. S. Penner)请到加州理工学院，用光谱方法探测和研究喷气发动机的燃烧过程。1961 年，潘纳创办了新的学术期刊《Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer》，这标志钱学森所提倡的“定量光谱学”已成为一门新学科，物理力学在美国早已开花结果。

但是，令人遗憾的是，在钱学森亲自创建的力学研究所，由他亲手培植的物理力学研究室在 1993 年被解散了。

今天，钱学森所倡导的物理力学这门宏观、微观相结合的学科的核心思想正在更广泛的范围内蓬勃发展。

3 对中国发展技术科学的贡献^[2,5]

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，开创出像稀薄气体力学、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。

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越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发展，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人，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介绍了工程科学的内涵、工程科学家的任务以及培养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、物理力学等新学科，实际上是按照工程科学的框架模式来建所的。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”^[5]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、方法论以及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，而是两部分有机组织的总和，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。在上述基础上，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，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，他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。

“论技术科学”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在国民经济和国防建设中发挥了重大的作用。

钱学森认为,科学研究应当领导工业前进,走在生产前头。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。

4 结 语

从钱学森先生的科学实践中可以看出,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。我们应该深入学习和充分应用,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:

- 1) 学习和发扬他一生进行科学研究的超前意识和务实作风;
- 2) 继承和发扬力学大师普朗特-冯·卡门-钱学森的应用力学学派的优良传统;
- 3) 努力开拓他所倡导的研究近代力学的方向和道路,即:宏观和微观相结合,力学与其他学科相结合,数值模拟与实验和理论分析相结合;
- 4) 大力开展他所倡导的技术科学的研究,提高我国的综合实力;
- 5) 刻不容缓地贯彻和落实他所强调的理工结合的教育方针。

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[M]. 北京:科学出版社,1991
- [2] 郑哲敏,谈庆明,涂元季,等编. 钱学森手稿[M]. 太原:山西教育出版社,2000
- [3] von Kármán T. Aerodynamics[M]. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1952
- [4] 冯·卡门,李·爱特生. 冯·卡门[M]. 曹开成译. 上海:上海科学技术出版社,1991
- [5] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报,1957,(2):97~104

H. S. Tsien and His Work on Mechanics^①

Tan Qingming

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

[Abstract] The contributions by H. S. Tsien to modern mechanics and engineering sciences, especially his work on a series of key problems in aerodynamics, solid mechanics and jet propulsion, are introduced. Through his work, many new branches of engineering sciences were established, such as engineering cybernetics, physical mechanics, jet propulsion science, etc. The embodied foresight and realistic spirit are highlighted. Today in China, it is of great practical significance to advocate and carry forward his noble spirit, and to strengthen the research and development in the field of engineering sciences.

[Key words] Hsue-Shen Tsien; mechanics; engineering sciences

① 遵照作者意见,本文英文摘要中,钱学森先生的名字沿用英文拼写,未采用通常的汉语拼音 ——本刊编辑部