

从应用力学到工程科学

李家春^{1, 2}

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 工程科学起源于20世纪初德国以普朗特为代表的应用力学学派; 20世纪30年代应用力学研究中心转移到美国以冯·卡门为代表的古根海姆空气动力学实验室, 钱学森先生师从冯·卡门, 在这一领域做出了杰出贡献, 并明确提出、系统阐述了工程科学的思想。国内外航空、航天工程的实践已经证明, 工程科学可以加速科学革命、经济发展、社会进步。未来工程科学研究领域将从自然现象扩展到生命体乃至人文科学, 如: 工程管理、工程伦理和工程哲学, 并引领交叉学科领域的前沿研究。为适应这一发展趋势, 我们将通过强基础、阔领域、重实践、促创新, 加速复合型工程科学人才的培养。

关键词: 工程科学; 钱学森; 应用力学; 航空航天; 国科大

中图分类号: O3 ;V1 ;G4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2020)05-0429-06

在2020年国家将布局“十四五规划”之际, 科技教育受到社会各界的重视, 本次工程科学高峰论坛旨在研讨工程科学思想在工程相关专业人才培养中的地位和作用。众所周知, 工程科学概念是钱学森先生首先提出来的。要准确理解和把握这一概念, 不仅应当了解钱学森先生所从事的学科专业, 而且应当了解这一学科专业发展的历史。所以, 本文从应用力学的发展讲起, 把工程科学概念放在这样一个大背景中加以理解和把握, 阐明它的含义、历史性贡献和未来发展, 并结合当前的新工科建设, 就工程科学人才培养谈谈笔者的一些思考。

1 应用力学学派的兴起

回顾历史, 19~20世纪之交, 经典物理学大厦的上空出现了两朵乌云。笔者从事流体力学研究, 所以就从当时流体力学中亦存在的两个难题或者说类似的“两朵乌云”开始谈起。

第一个问题就是湍流。1883年, 雷诺完成了一系列流体在圆管中流动的经典实验(图1), 发现自

然界或工程中普遍存在两种流动状态: 层流和湍流, 湍流状态时的动量、质量、能量传输率远高于层流状态。科学家为了回答在什么条件下层流会变成湍流, 转换的完整过程是怎样的, 以及如何描述和计算完全发展的湍流奋斗了一个世纪。

第二个问题是动力飞行。1903年, 莱特兄弟成功完成了第一次动力飞行(图2), 发现动力飞行可以真正实现人类的飞行梦想。科学家和工程师为了回答动力飞行的原理, 如何计算阻力和升力并设计飞行器, 以及不同飞行速度的流动特征等问题努力了一个世纪。

为了攻克这两个难题, 出现了以普朗特、冯·卡门为代表的应用力学学派, 随后, 钱学森又发展了工程科学思想, 于是国际和中国的航空、航天工程飞速发展, 使人类进入太空时代。

十九世纪的德国十分重视教育, 哥廷根学派最早从数学王子高斯开始, 然后是黎曼、希尔伯特、克莱因等数学家。到19世纪末, 世界科技中心已经从英、法转移到德国。1893年, 克莱因在美国芝加

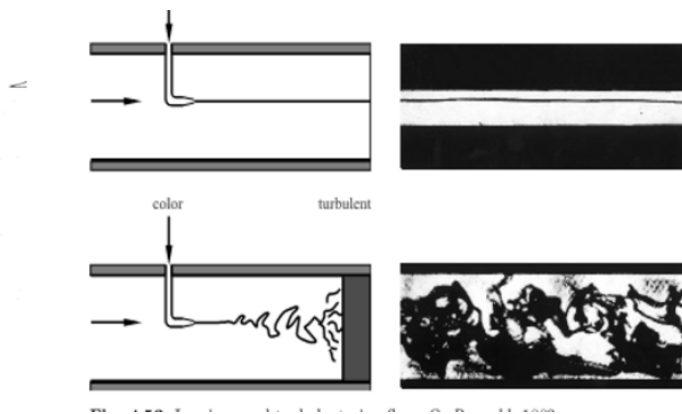


图1 O.雷诺的圆管流动试验发现了层流和湍流两种流动状态 (Philos. Trans. R.S. 174, 1883)



图2 1903年, 莱特兄弟成功研制了飞机, 实现了人类第一次动力飞行

哥参观世界博览会, 看到美国科技创新欣欣向荣, 正在赶超德国。克莱因认为, 哥廷根大学不能仅仅搞基础理论, 他倡导基础科学同工程的结合, 从而使自然科学成果尽快应用到工程技术中。于是, 他建立了三个应用科学系: 一个是希尔伯特的应用数学系, 一个是索莫菲尔特技术物理系, 还有一个就是应用力学系。他聘请普朗特担任应用力学系主任, 随后该系涌现了一批应用力学人才, 包括冯·诺依曼、柯朗、诺特、铁木辛柯等, 极大地推动了应用力学的飞速发展。

普朗特在这一时期做出重要贡献。他首先创立了边界层和升力线/面理论, 从而可在计算机时代以前简捷地计算阻力和升力、并进行飞机设计, 因此, 普朗特被公认为是近代力学的奠基人^[1]。随着飞行速度的提高, 他提出了普朗特-迈耶理论、普朗特-格劳特法则, 考虑可压缩效应。普朗特混合长度理论是湍流的早期研究成果。正是他在应用力学领域的这一系列贡献, 为航空航天技术发展和实现动力

飞行奠定了基础。

1930年代, 应用力学研究中心转移到美国。除了德国卷入世界大战的原因外, 美国亦更加重视人才引进。特别是加州理工学院的密里根院长, 他引进了遗传学家摩根和空气动力学家冯·卡门。冯·卡门担任了古根海姆空气动力学实验室主任, 从而吸引了世界各国的一批尖端人才, 包括中国的钱学森、郭永怀、林家翘等科学家, 使CIT成为国际航空航天工程人才的摇篮。冯·卡门和中国的科学家在这一领域做出杰出贡献。例如, 在高亚声速流方面, 提出了卡门-钱公式; 郭永怀先生全面诠释了跨声速流动特性, 提出上临界马赫数概念和激波边界层相互作用理论, 为突破声障奠定了理论基础。高超声速飞行、稀薄气体流动学科是由钱学森先生首创的, 林家翘先生解决了流动稳定性这样一个数学上和物理上的难题^[2]。火箭推进亦是钱学森先生探索的领域。由此可见, 在世界航空科学研究领域也记载了中国科学家的贡献。

2 工程科学思想的提出

工程科学思想是钱学森先生首先提出的。1947年钱学森先生回国后, 先后在浙大、交大、国立清华大学讲学, 报告的题目就是工程和工程科学, 次年在JCIE发表了以“工程与工程科学”(Engineering and Engineering Science)为题的文章^[3]。1956年, 钱学森回国, 参观了国内的高等院校、研究所等, 次年, 他又结合我国情况, 在《科学通报》发表文章“论技术科学”, 进一步阐明工程科学思想^[4]。

为什么钱学森先生会提出工程科学思想，从他的经历中可以略见一斑（图3）。在美国，他亲自经历火箭的研制，参加了美国航空航天计划“迈向新高度”（Towards new horizon）的规划和撰写。特别是在突破“声障”以后，人们意识到人类不久便能飞出大气层，所以，航天工程师将面临科学技术的新挑战。为了实现飞上太空的梦想，人类的知识不能局限于力学学科的范畴，必须要考虑高温气体的输运特性、自动控制等问题。1950~1955年钱学森先生在被美国移民局软禁期间撰写了《物理力学》与《工程控制论》两部工程科学的代表作，预见了新兴学科的重要性。所以，工程科学是应用力学的进一步拓展，强调学科交叉研究，适用于众多的科学和技术领域，符合现代科学技术发展的趋势。



图3 在中国科学院力学研究所主楼前的钱学森纪念铜像

工程科学的特点可以概括如下：其一是必须具有明确的应用目标；其二是直接解决工程技术关键问题；其三是基于科学认识、物理思想、数学方法来给出问题的解答；其四是加速自然科学与工程技术的结合，并能引领工业前进。现在科技革命日益加速的原因就是科学理论与工程技术的快速结合。所以，除了少部分科学家，比如纯粹数学家、理论物理学家等专门从事极其重要的基础理论外，大多数科学家要从事与应用相关的研究。

显然，工程科学可以加速科学革命、技术飞跃、经济发展与社会进步。国际航空航天工程和我国航天工程的实践都证明：工程科学是一条取得成功的捷径。

从国际航空航天的历程看：1903年，莱特兄弟首次动力飞行；1920~1940年，从低速飞机走向高速飞行；1947年，突破声障；1957年，第一颗人造卫

星上天；1961年，第一次载人飞行；1969年，实施阿波罗计划。1903~1969年，从首次动力飞行到登月大约用了60年时间。此后，还有前苏联的飞船、美国的天空实验室、航天飞机和国际空间站。

从中国航天工程看，1956年，钱学森起草《建立我国国防航空工业意见书》；1958年，科学院实施581计划，第二年力学所开始火箭推进、高速空气动力学、高温结构前沿研究；1965年，成立651设计院，1970年4月24日发射第一颗人造卫星（图4）；1975年，第一颗返回式卫星；1984年，第一颗同步卫星；2005年，神舟五号载人飞行；2011~2013年，发射天宫一号与神舟八、九、十号，实现交会对接；直到2016年的天宫二号于最近顺利返回。嫦娥工程也顺利进行，实现了绕、落、回的目标，先后大约也经历了60年左右的时间。现在的中国科学院大学雁栖湖校区，即当年的矿冶学校，实际上就是中国科学院的火箭试验基地，现在是中国科学院与“两弹一星”纪念馆馆址（图5）。当年中国科学院集中力量科技攻关，解决了其中的若干关键科学技术问题：其一，研制了



图4 我国1970年4月24日成功发射的第一颗人造卫星



图5 在中国科学院大学雁栖湖校区的中国科学院与“两弹一星”纪念馆

500kg推力的液氢液氧火箭发动机,为我国随后的液体火箭奠定基础;其二,卫星设计院的本体设计是我国空间科学和技术的开端;其三,烧蚀防热的理论和实验研究,是卫星回收、飞船回地的安全保障。

然而,随着21世纪科技发展,我们工程科学也必须在现有的基础上得到进一步提升,这是本次高端论坛的宗旨。为此,我们还应当有新的思考。

3 工程科学的未来发展

当前世界科技发展迅猛,一方面,基础理论酝酿着新的重大的突破,例如对宇宙起源、物质结构、认知科学等各领域的探索;另一方面,颠覆性、变革性技术不断涌现,包括纳米材料、先进制造、人工智能、基因工程、量子计算、聚变核能等。我们也可以明显地感觉到,当前产业革命的步伐正在不断加速。从1760年蒸汽机时代,到1860年电气时代,经历了100年时间。从1950年代发射人造卫星,建成核电站,经过1980年代超级计算机、互联网再到今天的5G通讯。很明显,跨越每个阶段所需时间从百年、几十年缩短到目前的十几年就可实现更新换代。现代科技对人类社会产生巨大的影响,比如说经济发展的速度,文明进步的程度,生活方式的转变等,科技正在日新月异地改变我们的世界。

新时代的中国已经成为世界经济大国,GDP总量位居世界第二。70年来的科技成就举世瞩目,如:天宫系列、嫦娥工程、高速铁路、北斗导航、量子科技、5G通讯、杂交水稻等。经过20世纪50~60年代的向科学进军,到80~90年代的科教兴国,再到目前的科技强国,现在国家比以往任何时期都更加重视科技和教育。然而,我们毕竟还是一个发展中国家,实现两个百年目标还需要艰巨努力,特别是在科学技术的原始创新方面,需要从目标、方向、体制、人才、合作等方面采取有力措施。在这一阶段,我国要高质量地完成工业化的进程,制造业占有举足轻重的地位,其中,工程科学可以发挥重要作用。

在这里我们列举工程科学若干领域的关键科学问题。在航天、航空工程方面,中国已有神舟系列、天宫系列、天舟系列等,未来也将建立空间站,所

以必须拥有先进的运输系统,以满足天地间人员往来和物资运输的需求。美国的航天飞机已经退役,飞船方式价格昂贵,必须探索新的途径,如可回收火箭、空天飞机等。航空领域我国已经走上自主研发的道路,我国的商用客机不仅要在材料、降噪、安全等达到先进指标,通过适航飞行考核,尤其要攻克飞机发动机研发中的卡脖子问题。海岸、海洋工程方面,我国在港口、桥梁建设方面世界领先,海洋工程目前的发展趋势之一是从海面到水下。我国的水下航行器、深潜器目前拥有一席之地,但离走向深远海的目标还有距离。目前,我国海洋平台多数是近海固定式的,半潜式深水钻井平台刚刚下水,要自主设计制造各种浮式平台以满足我国海洋油气开采的需求。交通能源工程方面,我国已经研发了和谐号、复兴号、磁悬浮等低阻力、低噪声的列车,运行在四纵四横高速铁路网。在能源利用方面已经形成化石能源、可再生能源和核能的完整综合体系,能源效率不断提高、污染物排放不断减少。目前我国自主研发的先进核电设备华龙一号已经成功并网,水合物、页岩气、煤层气等非常规能源的开发有发展潜力;我国可再生能源发展初具规模,通过太阳能、风能与储能等技术结合,使得可再生能源利用效率得到提高,张北将通过2022年举行冬奥会试点,成为可再生能源利用的示范基地。在生物医学工程方面,生物力学已经从宏观生物力学发展到了细胞、分子水平的力学生物学,针对人体健康在组织培养、人造器官、介入手术、靶向治疗、医学成像方面有广阔应用前景。

工程科学未来的发展趋势是研究领域不断拓展,学科交叉日益凸显。实际上,钱学森当年已经预见到这一趋势,比如从空气动力学、湍流的力学范畴拓展到物理力学、燃烧、磁流体力学、流变学、岩土工程的力学相近学科领域,再到运筹学、计算机技术、电子学、核工程等完全属于其他学科又跟力学交叉的领域。钱老到晚年还在关心系统科学、人体科学等。另一方面,现代力学本身的关注点也已经从力、运动扩展到介质,从宏观、细观扩展到微观,从机械运动扩展到物理、化学、天文、地质、

生物等运动，从理论扩展到先进计算和实验技术，研究对象也从自然科学扩展到工程技术再到生命体。现在看来，我们还有必要从自然科学扩展到人文社会科学，包括工程管理、工程伦理和工程哲学等，这也是学科交叉的一大趋势。因此，工程科学应当也有可能引领学科交叉领域前沿研究。

为了适应工程科学未来发展的这一趋势，我们必须培养复合型的工程科学人才，他们要懂得工程设计和实施原理，懂得工程问题的科学基础、工程分析的数学方法，在导师的指导下进行工程项目实践。中国科学院大学（简称国科大）的做法是：强基础、宽领域、重实践、促创新。具体措施包括建立通识教育的课程体系，学业导师的近距离辅导，科教融合的实验基地，国外访学的学术交流机制，大作业、毕业论文创新能力提升环节等，从而助力学院达到培养复合型工程技术人才的目标。此外，国科大工程科学学院积极参与教育部新工科建设项目，还得到了北京市高精尖学科建设项目的支持，在此过程中，积极学习国内外一流大学的经验，进一步促进该院的学科建设和人才培养。

中国科学院大学（图6）工程科学学院建院的宗旨是：以工程科学思想为指导，瞄准新时期“上天、入地、下海”国家重大战略需求的关键科学问题，将原创性研究与工程科学人才的培养有机

结合，建立以需求建基地、以基地办教育、以教育育人才、以人才促发展的科教融合新机制，培养尖端科技人才，成为未来工程科学家和工程技术领军人才的摇篮。我们深信，在未来通过弘扬钱学森先生工程科学思想，创新复合人才培养模式，创建世界一流工程科学学院，将为国家输送优秀的工程科学领军和骨干人才，为国家现代化建设做出贡献。



图6 中国科学院大学玉泉路校园全景

参考文献

- [1] Prandtl L. On the friction of a flat plate by fluid with very low viscosity[M]. Heidberg: Int.Cong.Math., 1904.
- [2] Von Karman T. From low speed aerodynamics to astronautics[M]. University of Maryland, 1963.
- [3] Tsien H S. Engineering and Engineering Sciences[J]. Journal of the Chinese Institution of Engineers, 1948.
- [4] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957, 4.

From Applied Mechanics to Engineering Science

Li Jiachun^{1, 2}

(1. *Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Engineering science originated from the school of Applied Mechanics represented by L. Prandtl in Germany at the beginning of the 20th century. In the 1930s, the center of Applied Mechanics was moved to the Guggenheim Aerodynamics Laboratory led by T. Von Kármán in the United States. In particular, Dr. Tsien made outstanding contributions in this field at that time and then clearly proposed and systematically elaborated the concept of engineering science. The practice of aeronautical & aerospace engineering at home and abroad has proved that engineering science can accelerate scientific revolution, economic development and social progress. When looking forward in the future, the field of engineering science research will extend from natural phenomena to living things and even the humanities, such as engineering management, engineering ethics and engineering philosophy, and lead the frontier research in the interdisciplinary field. In order to adapt to this new trend, we will speed up the cultivation of compound engineering science talents by strengthening foundation, broadening field, emphasizing practice and promoting innovation.

Key Words: engineering science; Tsien Hsue-shen; applied mechanics; aerospace; UCAS