



工程和工程科学*

钱学森**

1 引言

人们回顾半个世纪以来人类社会的进步, 无不对技术和科学研究作为国家和国际事务的一个决定性的因素的重要性, 所受到重视程度的巨大提高有深刻的印象. 很显然, 虽然在早期, 技术与科学研究是以未加计划的、个体的方式进行的, 可是到了今天, 在任何主要国家, 这种研究都是受到认真调控的. 因而, 如同长期以来的农业、金融政策或者外交关系一样, 技术与科学的研究现已成为国家的事情. 认真考察为什么研究工作的重要性得到如此重视, 自然地会得出这样的答案, 即研究工作现在是现代工业整体中的一个组成部分, 不提到研究工作就谈不上现代工业. 既然工业是国家实力和福利的基础, 技术与科学的研究就是国家富强的关键.

人们也许会说, 在工业时代的开创时期, 技术与科学的研究就与工业发展有关, 那么为什么今天把研究工作说得如此重要? 这个问题的答案是, 处于国内和国际竞争的需要, 迫使现代工业必须以越来越高的速度发展. 做到如此高的发展速度, 就必须大大强化研究工作, 把基础科学的发现几乎马上用上去. 也许没有什么比把战时雷达和核能的发展作为更突出的例子了. 雷达技术和核能的成功开发为盟方取得第二次世界大战的胜利做出了重要贡献是公认的事实. 短短数年, 紧张的研究工作把基础物理学的发现, 通过实用的工程, 变成了战争武器的成功应用. 这样, 纯科学的现实与工业的应用之间的距离现在很短了. 换句话说, 长

头发科学家和短头发工程师的差别其实很小, 为了使工业得到有成效的发展, 他们之间的密切合作是不可少的.

纯科学家与从事实用工作的工程师间密切合作的需要, 产生了一个新的职业——工程研究者或工程科学家. 他们形成纯科学和工程之间的桥梁. 他们是将基础科学知识应用于工程问题的那些人. 本文的目的是讨论工程科学家能够做什么, 也就是他们能为工程发展做些什么工作, 以及完成他们的任务需要接受什么样的教育和培训.

2 工程科学家对工程发展的贡献

工程科学家对工程发展的贡献简单地说, 就在于努力做到人力和财力的节省. 要做到两者的节省, 就要对面临的问题做一个充分的、全面的分析, 从而指出: (1) 所建议的工程方案的可行性究竟怎么样; (2) 如果可行, 实现这个建议最好的途径是什么; 以及最后 (3) 如果某一个项目失败了, 那么失败的原因是什么, 可能采取什么样的补救办法. 显然, 如果一个工程科学家能够完成上述任务, 那么他在任何一项研究和发展的工作中就会在很大程度上免除凑合和应付的方式. 所有努力和财力就能集中在最好的途径上, 或者说几乎没有其他更好的解决问题的方法具有最好的成功机会.

尽管会有不同意见, 但是上面给工程科学家所提的 3 个问题毕竟是工程中的 3 个基本问题. 什么是一个工程科学家能做而工程师却不能做的工作? 这个问题的答案是, 在工程职业变得越来越复杂的今天, 存在着专门化的需要. 为了满意地

* 本文的内容最初为 1947 年夏天, 在国立浙江大学、交通大学和国立清华大学的工科学生所做的讲演, 后发表于 *J of the Chinese Institution of Engineers*, 1948, 6, 1~14

** 麻省理工学院航空工程系空气动力学教授.

解决上述 3 个问题, 现时对知识的要求应包括良好的培训: 不仅在工程方面, 也要在数学、物理、化学方面都要有良好的培训. 这一点在下面几节还会做更详细的讨论. 因此, 一个工程科学家的培训与工程师的常规培训很不相同. 换句话说, 他必须是能够解决上面所说的工程发展中的 3 个基本问题的专家.

3 关于长程火箭的建议的可行性

为了更好地理解, 一个工程科学家通过什么样的途径来解决工程发展中的 3 个基本问题, 下面将描述几个能说明问题的例子. 第一个例子是关于长程火箭可行性的研究. 火箭的推进是由于所携带的推进剂进行燃烧从而排出的射流的作用. 火箭发动机的性能是用推进剂的比耗来表示的, 其定义是每小时需要消耗多少磅推进剂从而产生一磅的推力. 这一数值因大气压力的变化而略有不同, 但一般可以取作为常数, 即取其平均值. 这一推进剂的比耗就用来表示发动机的性能. 火箭的射程显然依赖于所携带的推进剂的总量, 或者依赖于推进剂总量与火箭总重量之比. 即推进剂的装载比. 火箭飞行时, 要克服的是空气阻力. 于是我们看到, 一个工程科学家为了解决长程火箭的可行性问题, 他必须掌握 3 类基本信息: 火箭发动机的性能、结构的效率以及高速飞行时的空气动力. 为了获得火箭发动机的性能, 他必须依靠火箭工程师以取得试验数据; 为了获得结构的效率, 他必须依靠测量应力的人以取得结构载荷的数据; 为了获得高速飞行时的空气动力, 他将求助于高速风洞以获取试验数据. 然后从事该工作的工程科学家必须对上述信息进行综合的工作, 此刻他需要运用良好的工程判断力, 应用动力学定律以及求解微分方程的技巧, 其结果是算出火箭的射程. 假如他利用最好的火箭发动机的性能、最低的燃料比耗的实际值; 假如他采用最好的结构以达到最高的推进剂的装载比; 并且假如他对火箭的外形采用了最好的空气动力学设计以减小空气阻力, 那么他将获得火箭所能达到的最大射程.

长程火箭问题的上述表述假设: 最好的发动机性能、最好的结构效率以及最好的空气动力学

外形对于分析者来说是已经知道的. 然而实际情况可能并不是那么容易. 一个工程科学家将发现, 以往的经验说明, 如果采用化学平衡和热力学平衡的假设仔细计算发动机燃烧室内的燃烧温度以及排出气体的成分, 再采用气相流动的动力学计算火箭排气速度的话, 推进剂性能的预报精度在 10% 以内; 然而确实做过试验的推进剂的种类却极少. 在寻求最好的可能的发动机性能的过程中, 他可能希望知道从未试验过的高能化学推进剂的可能的比耗值. 这意味着工程科学家对这些未曾试验过的推进剂已经进行了理论估算. 举例来说, 他可能希望计算液氟和液氢火箭的性能. 假如他做了这类计算, 他将发现有关化学火箭推进剂的两个重要事实, 它们是:

(1) 对于诸如二氧化碳和水这类通常的燃烧产物来说, 在燃烧室极高的温度下存在强烈的离解的趋势, 而且这些离解吸收热量. 所以使用低温量热计数据所计算的推进剂性能是全然不可靠的. 换句话说, 热力学和化学平衡在这里起着极其重要的作用.

(2) 不存在“令人惊奇”的推进剂能够使性能增大到现有推进剂的十倍, 或者说, 使比耗减少到十分之一. 这一点很容易从下面的表中看出来^[1]. 该表说明, 最好的推进剂是氟和氢, 两者燃烧所给出的比耗不小于较常用的硝酸和苯胺组合的一半.

由此看来, 进行此类研究, 工程科学家能够在一个新的工程领域中获得一个宽阔的方向. 他知道什么是所期望的, 并有能力对任何一个发明者的主张做出严格的判断. 这样的判断能力如果采用试凑应付的办法的话, 一般需要相当长的时间才能达到. 所以, 工程科学是缩短这一“学习某个行业”的严酷过程的有用的工具.

类似地, 工程科学家可能发现, 有关结构效率和空气动力的信息很不完全, 就迫使他研究一类特定的有希望的结构, 或者研究一类绕过空气动力学外形的高速流动, 以便确定在高速条件下可能产生的空气阻力. 换句话说, 为了解决长程火箭的可能性问题, 工程科学家可能不只是解决一个很困难的外弹道学问题, 而且可能还必须解决热力学和燃烧学的问题, 或者弹性力学、材料力学以及流体力学的问题. 可以说, 他的问题并不容易, 但是他得到的回报也是丰厚的.

表 1 火箭推进剂性能的计算值 (高度在海平面处, 燃烧室压力是 20 大气压)

氧化剂	燃料	氧化剂与燃料的重量比	燃烧室温度 °R	比耗磅, 每小时每磅推力
氟	肼	1.186	6 970	12.33
氟	肼	2.371	9 500	11.50
氟	氢	18.85	10 210	10.20
氟	氢	9.42	8 530	9.71
氟	氢	6.28	6 296	10.20
氧	乙醇 (75%+25% 水)	1.275	5 530	15.45
氧	汽油	2.62	5 930	14.95
氧	氢	3.80	5 500	10.20
发烟硝酸	苯胺	3.000	5 525	16.30

4 最好的解决方法 —— 裂变材料的生产

人们在工程实践中, 经常遇到这样的情况, 要在少数几种解决问题的可能方法中选出最好的方法. 这时工程科学家的服务再次显示其价值. 让我们举裂变材料的生产为例. 根据 H. D. Smith 的论述^[2], 存在下面几种不同的可能方法:

- (1) 用慢中子堆从天然铀生产钚 -239, 并化学分离钚.
- (2) 用电磁分离法从天然铀中的惰性铀 -238 生产铀 -235.
- (3) 利用热扩散法从铀 -238 分离生产铀 -235.
- (4) 利用气相扩散法进行同位素分离生产铀 -235.

除了第一种方法以外, 其他三种方法都包含一类物理过程, 其中被分离的材料具有“完全相同的”化学性质. 在美国研制原子弹开发核能的时期, 上述四种方法都被实施过. 这种同时采用所有可能的方法的方式正是战争时期的权宜之计, 因为时间紧迫而项目又亟需成功. 而在平时, 则应当召集工程科学家来对四种不同的过程进行分析, 从而确定其中哪一种方法是最经济的. 当然, 工程科学家将需要许多详细的信息, 这些信息必须从理论分析或实验中获取. 举例来说, 在第一种方法中, 他必须确定铀 -235 的裂变截面或裂变概率, 减速剂的共振吸收截面等. 然后他必须利用核物理的已知原理, 估算中子堆中的中子扩散过程、堆中的中子密度分布, 最后估算出中子堆的临界尺寸. 他也必须在他的计算中对铀块和减速剂的布置, 使用不同的方案而求得建造反应堆的最好的方法. 通过上述这些研究, 工程科学家就能说采用慢中子堆的方法来生产钚 -239 可能是最经济的方法.

采用类似的实验室实验和理论计算的手段, 工程科学家将可能估计出其他几种建议方法的经济性. 这样就能够对生产裂变材料的最好方法是什么的问题给出答案. 看来十分清楚, 假如对不同过程的相对经济性进行这样的分析是可能的, 生产钚的工艺, 即方法 (1) 将会入选. Leslie R. Groves 将军向 McMahan 委员会透露, 在 1945 年 6 月, 几种工艺每月所花费的运作费是:

Handford 钚工厂	\$ 3,500,000
橡树岭扩散工厂	\$6,000,000
橡树岭电磁工厂	\$12,000,000

所以 Handford 钚工厂是其中最为经济的一个, 除此之外, 事实上, 它还必须具有最大的生产裂变材料的能力.

接着我们假设, 工程科学家经过初步分析决定采用钚工艺, 那么会得到什么结果呢? 还是根据 Groves 将军的说法, 1945 年 6 月 30 日, 为工厂和设备所支付的投资是这样的:

生产设备:	
Handford 工厂	\$ 350,000,000
其他	\$ 892,000,000
—————	\$ 1,242,000,000
工人住宿:	
Handford 工厂	\$ 48,000,000
其他	\$ 114,500,000
—————	\$ 162,500,000
研究:	\$ 186,000,000
工人的补偿费和医药费:	\$ 4,500,000
—————	
总额:	\$ 1,595,000,000

所以说,假如战时美国指导核能开发的当局能够选定钚工艺,那么就能大致节省十亿美元.换句话说,假如当局当时能够充分利用工程科学家的服务,就能节省三分之二的投资.

5 失败的原因及补救办法 —— Tacoma 海峡大桥

要求一个工程科学家注意的第 3 个问题,是对某一项目的失败要能发现其原因以及提出补救的办法.前面讨论的两个问题是在启动某一工程的主体部分之前,对可行性和新的最好的开发方法进行研究;然而第 3 个问题当然是在事后进行的工作.让我们举 Tacoma 海峡大桥为例.这座桥在 1940 年 7 月 1 日开始通车.它是一座路基极窄的悬索桥,其尺寸可以从表 2 查出.

表 2 美国华盛顿州第一座 Tacoma 海峡大桥的尺寸

中心跨距	2800 英尺
西侧侧跨	1100 英尺
东侧侧跨	1100 英尺
西侧背索	497 英尺
东侧背索	261.8 英尺
总长	4759.2 英尺
车行道宽	26 英尺
包括人行道总宽	39 英尺

大桥完工以后,发现大桥极其柔软.在飓风的夜晚,常出现幻象效应,行驶着的汽车的前灯忽明忽暗,这是因为车道发生侧向和纵向的振荡.到了 1940 年 11 月 7 日的上午 10:00,大桥在强大的盛行风作用下开始发生强烈的扭转振荡.振幅逐渐增加,一个小时以后,最终桥身大概在中跨处折断.当然,大桥的失效在土木工程师中引起了浓厚的兴趣,这类破坏从未见过,其原因究竟是什么?土木工程师一般关注静力的作用,甚至考虑大幅值的情况.举例来说,大桥部件中的应力一般来说是每平方英寸几十吨的量级.现在作用在表面上的空气压力或风力可能是每平方英寸五分之一磅的量级.对于土木工程师来说,一开始很难明白为什么这样小的风力居然能够破坏这样坚固的大桥.

失效的真实机制最终由一个以 O. H. Armann, Th. von Kármán 和 G. B. Woodruff 组成的委员会给出解释^[3].他们的报告是工程科学家的研究工

作的典型例子.它包含模型试验和理论计算的内容.大桥失效的真实原因是风力所激发的共振.这一航空工程师所熟知的颤振现象,却完全超出了土木工程师的经验范围.风力虽小,但具有与车道相同的振荡周期,或者说,风力常与路面的振荡同步,而因此发展到导致毁坏的共振幅值.由此看出,对大桥采取减振及增强的综合措施从而增加大桥的自振频率,失效是能够避免的.这就是设计新桥的原则.

这里再次指出,一个工程科学家提供的服务能够澄清使人高度困惑的工程问题,并且能够被用来避免工程设计中出现更多的错误.

6 统一性 —— 工程科学中的基础研究

上述讨论可能使人得到这样的认识,工程科学的问题是一些个别的问题,而工程科学家的任务是处理特殊情况,提不出具有普遍性的方案.这种印象无论如何是不正确的.在当前工程发展的多种多样的问题中,在许多工程分支中,存在着重复发生的现象.这些现象能够从一些直接的常规的问题中提炼出来,而这些问题是工程科学家必须解决的而且能在个别的研究领域中得到表述的问题.这样研究的结果将不仅使一个工程领域受益,而且使所有的工程领域都得到好处.这就是工程科学的基础研究,通过这种研究将使大大分散的工程活动得到统一.

历史上,这样的工程科学的基础研究是由德国哥廷根大学的伟大的数学家 F. Klein 在第一次世界大战前夕开创的.他的学派已经产生了诸如 Th. von Kármán 和 S. Timoshenko 这样卓越的工程科学家.在那个年代,工程活动的主要领域必然涉及力学.由此工程科学的基础研究自然被简称为“应用力学”(angewandte mechanik).然而始终在扩展的工程领域现在已扩展到这样一些课题,它们超出了当初德国学派所设想的应用力学所处理的范围.我们可以把当前的工程科学的基础研究的课题分成如下 3 类:(1) 不属于应用力学老边界以内的那些领域的研究;(2) 靠近应用力学老边界的那些领域的研究;(3) 应用力学老边界以内的那些领域的研究.为了有助于了解工程科学中的基础研究的特征、它的门类以及它和各种工程问题之间的关系,下面将对这些研究领域进行详细的考察:

(1) 不属于应用力学老边界以内的那些领域

的研究

(a) 物质的固态

有关冶金的工程科学的实际进展, 超越吉布斯相律的应用并不多。事实上, 现在对材料的知识是通过数量极大而且乏味的实验室试验得到的。由此得到的大量的经验数据没有得到协调整理和系统分析。另一方面, 基于量子力学的固态物理理论已由物理学家发展成为纯科学的一个分支。换句话说, 在实际工程和科学研究之间存在一个宽阔的空隙, 对待这一空隙必须架起桥梁。在冶金领域中努力利用物理理论将不仅会对大量积累的经验数据作出系统的解释; 而且一定会在材料开发的领域揭示出新的可能性。还有一点可以肯定, 当材料的工程科学得到满意的发展以后, 寻求满足给定特性的工程材料的研究将会得到极大的促进。

另一个研究领域是陶瓷材料。现在的工程材料由包含原子晶体的金属所主导, 其中, 没有理由相信, 包含诸如陶瓷材料那样的离子晶体的其他材料不能被用作机械制造的工程材料。事实上, 最近对能耐极高温度的材料的需求, 自然把人们指引到这一研究方向。

(b) 电子学

电子工程能够分为两个主要部分: 处理电子管自身的部分以及处理电路和辐射场的部分。第二部分主要包含经典麦克斯韦理论的应用。尽管事实上此类理论计算可能非常复杂, 而且可能要求高等的数学技巧, 但是应用的结果的一般特征是在意料之中的。然而电子管的性能却很少有人做过综合性的分析。这些电子管的设计一般是在少数几个基本原理的指导下进行了大批试验而完成的。无论如何, 电子工程现已经历了发明和创业的英雄时期, 而且进入了工程开发的时期。在新的情况下, 各种器件必须实现细致的改进, 使用经验方法可能不是最经济的方法。特别对于很高频率的电子管来说, 其中电子的惯性效应不再能被忽略。看来有必要发展一种工程方法来计算在快速变化的外电磁场的综合作用下电子云的流场。假如能做这样的计算的话, 那么就能分析电子管或别的类似器件的特性, 而且实验数据也将能得到协调整理。

(c) 核工程

当人们还想对核的结构有充分理解之时, 有关核反应的一般解释似乎已经发展到了令人满意的程度。事实上, 有关核反应的诸如碰撞、俘获、

激发以及新粒子从复合核的辐射等基元过程已经能够分别予以测量和研究。假如这些经验数据可加以利用, 那么核反应的整体微观性能, 能够应用化学反应动力学方法来作出预报, 对于不可能的和不需要的过程, 可以在进一步的研究和大型试验中予以消除。将这种途径用于原子能的利用或原子工程, 看来能导致丰硕的成果, 而不会有不受控制实验中产生的危险。换句话说, 核反应的一个快速发展的时期看来即将到来, 而这可以和燃烧那样的分子反应的利用相比拟。

(2) 靠近应用力学老边界的那些领域的研究

(a) 燃烧

燃烧理论已由化学家主要从化学反应动力学的观点进行了研究。然而, 从喷气推进的最近的发展中产生的问题一般都包含很高速度的流动。在这样的问题中, 流体微元的惯性效应肯定不能被忽略。事实上, 对简单的一维问题的研究已经指出了, 因惯性效应而引起的过去未能预料的结果。所以完全和满意地求解燃烧问题必须把有关流体运动的科学, 即流体动力学与化学反应动力学这门科学结合起来。作为这类问题研究的开始, 必须研究扩散和湍流对燃烧的影响。

(b) 基于塑性变形的金属成形

大量金属成形工艺基于材料的塑性变形。举例来说, 广泛使用的板料金属成形处理就是采用了压制的工艺。这一成形工艺直至最近, 实际上还纯粹是凭经验实施的。在设计这种处理所用的模具时, 人们必须在少数几个经验原则的指导下, 采用试凑的办法。这种方法一般来说是非常不经济的。因此看来有必要发展一种满意的理论, 便于人们针对每一个别问题, 能够设计出成形用的模具, 而不必依赖大量试验。这一有关塑性成形的科学, 当然将基于弹性理论的方法以及有关固态物质的全面的知识, 而这正是在上一节中谈到的另一类研究课题。

(3) 应用力学老边界以内的那些领域的研究

(a) 湍流

在过去的 15 年中, 流体流动中的湍流问题已有大量的研究, 而且为了对这一领域中的工程问题求得满意的解答, 已经研究得到一些简单的定律。然而, 理论仍然不能解释基本的重要事实, 即湍流中的交换系数远比层流的大得多。对这一现象取得正确的认识是湍流问题的核心所在。可以相信, 这种认识只能通过对湍流的流场进行详尽

的观测, 并配合理论分析来达到. 必须实施有关湍流速度、关联系数以及扩散特性的测量.

另外一个可能的研究领域, 是将现在已经掌握的湍流知识应用到其他工程领域, 诸如燃烧和化学工程中的混合问题等. 可以相信, 这样的应用是极其有用的.

(b) 气体动力学

航空方面的最近进展使气体动力学这门科学成为最为重要和急需的知识之一, 其中的基本问题关系到流体的粘性和可压缩性的相互作用. 过去人们相信粘性效应或雷诺数与可压缩效应或马赫数是能够分离的. 但是, 现在证实这样的分离是不可能的. 另一方面, 相互作用的问题相当复杂, 特别是因为流体中可能出现湍流. 详细的现象必须同时运用理论分析和实验进行研究. 与这一研究相结合的是, 应当考虑第二黏性系数以及松弛时间的效应.

以极高速度飞行的可能性提出了另外一个非常有趣的在很高马赫数条件下的流体动力学问题. 人们知道, 在相当高的马赫数条件下, 譬如马赫数超过 5, 流体的行为非常象许多质点的流动. 换句话说, 流体对一个运动物体的反应, 将非常类似于牛顿基于在流体质点之间没有相互作用的假设下所预报的那样. 在极高的飞行高度的飞行问题, 引出另外一个有趣的问题, 这就是在极低密度条件下流体运动的问题. 在这类问题中, 流动中的分子的平均自由程与流体中运动物体的大小相当. 可以相信上述这些问题的解决对于今后的飞行任务——速度超过声速的跨海飞行是必不可少的.

从前面有关工程科学中不同领域的基础研究的讨论中, 似乎可以看出, 所涉及的课题是物理学的一般领域中的好课题. 那么为什么它们应当被称作是工程科学中的研究课题呢? 这有双重理由. 首先, 物理学家的观点与工程科学家的观点之间有一个基本差别. 物理学家的观点是纯科学家的观点, 主要兴趣在于把问题简化到这样的程度, 从而能找到一个“精确”的解答. 工程科学家则更有兴趣去求取提交给他的问题的解答. 问题将是复杂的, 所以只指望找到近似的解答, 然而对于工程目的来说却又足够精确. 所以, 物理学家将对一个过分简化的问题给出精确解, 而工程科学家要的是实际问题的近似解. 物理学家的的工作常常可能是不实用的, 而工程科学家的工作必须总是实用的. 将工程科学家从物理的一般领域分离出来的

第二个理由, 简单说来, 就是物理学家对工程问题没有深切的兴趣. 因为存在上述双重理由. 工程科学家被迫将物理学家放弃的课题接过来做, 发展其物理原理, 形成解决实际工程问题的工具.

7 工程科学家的培训

对于一个工程科学家来说, 他们的任务是解决提交给他的问题, 以及进行工程科学的基础研究. 他所需要接受的教育肯定和一个工程师的十分不同. 那么, 确切地说, 什么是一个工程科学家所必需的培训呢? 回答这个问题, 最好的办法可能是先来看看一个工程科学家必需具备哪些手段. 这些手段是:

- (1) 工程设计和实施的原理.
- (2) 工程问题的科学基础.
- (3) 工程分析的数学方法.

第一组的课目是常规的工程课目, 诸如机械制图、绘图和机械设计、工程材料和工艺、车间实习. 第二组的课目是物理和化学, 它们一般包含在一个好的工科课程表里. 但是这里, 工程科学家的培训和常规工程师的不同, 他必须掌握多得多的物理和化学的知识. 举例来说, 他在力学方面的知识必须不只限于刚体的静力学和动力学以及简单的梁、柱中的应力. 他必须学习弹塑性理论的原理. 他对流体运动的认识必须不能只限于水力学的的内容, 他必须学习流体动力学的原理. 他在热力学方面的知识不能只限于第一定律和第二定律, 或者理想的奥托循环或狄塞尔循环的计算, 他必须要从统计力学和热力学平衡更广泛的观点出发学习熵的物理意义. 然后他必须懂得从原子核到分子的物质的基本结构. 换句话说, 他必须学习许多物理学家或化学家所必须学习的课目.

第三组的课目是数学方法和数学原理, 后者是用来帮助理解数学方法的应用的. 这就包括这样一些课目: 微积分、复变函数、数学分析原理、常微分方程、偏微分方程. 换句话说, 他必须懂得一个应用数学家所必须掌握的课目中的大部分.

显然, 对于一个有发展前途的工程科学家来说, 不能希望把它的学习都挤在四年大学里. 事实上, 他必须在高中毕业后进入一个好的工学院, 先用三年时间学习一般的工科课目, 然后他必须用大约三年时间学习科学和数学. 这样一来, 在高中毕业后至少要用六年时间来培训一名工程科学家; 而现在的实际情况是, 常规培训只用四年时间.

在这种情况下，工程科学家肯定只能是在工程和工业界全体人员中占据很小百分比的专家，而且必须从具有天赋和爱好的人中进行培训。

然而，前面还只是讨论了工程科学家必须具备的手段。事实上，教给了他手段也并不意味他是在运用这些手段中受到了培训。怎么样才能让他在培训中学会运用这些手段呢？这里，培训的程度不能用学生听了几门课或在学院里学了多少年来量度。学习如何有效地运用这些工具只能通过实践来进行。当然，专家的指导有助于加速这一过程。所以，为了完成一个工程科学家的培训，在六年学院学习以后，对于一个有发展前途的工程科学家来说，还必须花一到两年的时间在一名经验丰富的资深人员的指导下从事一个专门问题的的工作。做到这点的一种好的途径可能是去一个设备完善的大学，在有权威的导师的指导下攻读一个博士学位。一个教育机构中的从容的学术氛围肯定能引导人们思索：什么是获得智慧的最重要的也是唯一的途径。智慧提供对复杂问题的洞察力，而洞察力正是成功地解决问题的关键。

8 结 语

培训一名有能力的工程科学家是个历时七到八年的漫长过程，而完成这样的培训所要求的努力和能力也相应地巨大，所幸回报也很大。从上述

工程科学家所完成的工作的特性的讨论中，可以看出，他们形成了任何一项工程发展项目中的核心，他们是工业新前沿的先驱。事实上，工程科学最重要的本质——将基础科学中的真理转化为人类福利的实际方法的技能，实际上超越了现在工业的范畴。医药是将化学、物理和生理学应用于治病和防病，农业是将化学、物理和植物生理学应用于生产食物，两者都是广义的工程，而且两者均将得益于工程科学的方法。因此，把工程科学家称为以科学为追求目标的最最直接的工作者是很恰当的。正如 Harold C. Urey 教授所说：“我们希望从人们生活中消灭苦役、不安和贫困，带给他们喜悦、悠闲和美丽。”

参 考 文 献

- 1 Seifert J S, Mills M M, Summerfield M. The Physics of Rockets. *American Journal of Physics*, 1947, 15: 1~21, 121~140, 255~272
- 2 Smyth H D. *Atomic Energy for Military Purposes*: Princeton University Press, 1945
- 3 Armann O H, von Kármán Th, Woodruff G B. The Failure of the Tacoma Narrows Bridge. Report to Federal Works Agency, March 28, 1941

(中国科学院力学研究所 谈庆明 译自

J of the Chinese Institution of Engineers,

1948, 6, 1~14

中国科学院力学研究所 盛宏至 校)

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCES

Hsue-Shen Tsien