

论技术科学^{*}

钱学森

中图分类号: TBI

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2010)04-0290-11

1 科学的历史发展与技术科学概念的形成

在人们从事生产的过程中,他们必然地累积了许多对自然界事物的经验。这些经验可以直接应用到生产上去,也可以先通过分析、整理和总结,然后再应用到生产上去。直接应用这一个方式是工艺的改进,是所谓工程技术,把经验来分析、整理和总结就是自然科学^①的起源。所以工程技术和科学研究只不过是人们处理生产经验和对自然界观察结果的两方面,基本上是同一来源,而且两方面工作的最终目的也是一样的,都是为了改进现有的和创造更新的生产方法,来丰富人们的生活。

因此在科学发展的早期,我们不能把科学家和工程师分开来。一位物理学家也同时是一位工程师,牛顿就是一个著名的例子。牛顿不但发现了力学上的三大定律,因而奠定了理论力学的基础,而且他也是一位结构工程师,他设计了一条在英国剑桥大学校址中的木结构桥,这桥据说至今还存在。再像欧拉,他是一个大数学家,同时他在工程结构的稳定问题上也作出了伟大贡献。但是在十九世纪中,当科学在资本主义社会中得到了迅速的发展,科学家的确和工程师分手了。科学家们忙于建立起一个自然科学的完整体系,而工程师们则忙于用在实际工作中所积累了的经验来改进生产方法。在欧洲的一些学者和科学家,对工程师是看不起的,认为他们是一些有技术,但

没有学问的人,而工程师们又认为科学家是一些不结合实际的幻想者。一般讲来,两方面的人缺乏相互之间的了解和合作。

当然,科学家和工程师分手的这种现象,也是事实的需要。每一方面的工作因发展而变得更复杂了,工作量也大了,要一一兼顾,自然是不可能的。分工就成为必需的。但是这也不能完全解释为什么分工之后不能保持紧密的联系,其中必定有更深入的原因。我觉得这原因是:当时科学的发展还没有达到一个完整体系的阶段,自然科学的各部门中虽然有些部分是建立起来了,但另一些部分又确是模糊的,不明确的。这也就是说:当时的自然科学因为它自身还有不少漏洞,还不是一个结实的结构,所以当时的自然科学还不能作为工程技术的可靠基础,把工程技术完全建筑在它的上面。例如:虽然热力学早已搞得很明白了,可是热力学的基本,也就是用分子的运动来解释热能现象的统计物理,就存在着许多困难。这些统计物理中的困难要等到量子力学的出现才能得到解决。就因为这些在自然科学中的缺陷,有一些纯由理论所推论出来的结果显然与事实不相符合,这也动摇了工程师们对当时自然科学的信心。所以我们可以完全了解在十九世纪中和二十世纪初年工程师们与科学家中间的隔膜。

但是在本世纪中自然科学的发展是非常快的,个别自然科学的部门在较早的年代也已经达

^{*} 本文转载自《科学通报》,1957年第4期,第97-104页。

^① 在这里,自然科学这一名词是用来包括数学、物理学、化学、以及生物学、地质学等科学。但是自然科学不包括工程技术。

到完整的阶段，电磁学和力学便是两个例子。而正好在这个时候电机工程和航空工程两个崭新的工程技术先后出现了。因为它们是当时的新技术，没有什么旧例和旧经验可作准则。工程师们为了迅速地建立起这两门技术就求助于电磁学和力学，用电磁学和力学作为电机工程和航空工程的理论基础。这样才又一次证明了自然科学与工程技术问题的密切关系，才指明了以前工程师们不重视自然科学的错误。而也就是在这个时代，物理学、化学等自然科学学科很快地发展成现代的科学，补足了它们以前的缺陷。所以在今天来看，我们对物质世界的认识，只要是在原子核以外，只要除开个别几点，是基本上没有问题了。在原子和分子世界中，有量子力学；在日常生活的世界里，有牛顿力学；在大宇宙的世界里，有一般相对论的力学。只有原子核内部的世界现在还没有一定的看法。因此我们也可以说，对工程师说来，自然科学现在已经很完整了，它已经是一切物质世界(包括工程技术在内)的可靠基础。

由这个事实出发，有许多科学家认为：一切工程技术可以看做是自然科学的应用，而一个工程师的培养只要在他的专门业务课程之外，再加上自然科学就行了，就可以保证他在以后工作中有解决新问题和克服困难的能力。在四十几年前的美国，他们确是这样看法。有名的麻省理工学院就是建立在这个原则上的。把工程师的培养和技术员的培养分开来，把工程师作为一个科学的应用者，这在当时是一个带有革命性的改革。这个改革在一定程度上是成功的，而这种培养工程师的方法也就被其他学校和其他国家中的工程技术学校所采用，逐渐成为一种典型的工程技术教育。由这种课程所培养出来的工程师比起老一辈的工程师来，的确有科学分析的能力，在许多困难的问题上不再完全靠经验了，能用自然科学理论来帮助解决问题。但这不过在一定程度上如此，至于课程改革原来的目的：把工程技术完全建立在自然科学的基础上的这个目的，是没有完

全实现的。我们先看一看课程的组成。这种课程是四年制，前两年着重在自然科学，后两年着重专门业务，但是这两部分之间没有能结合起来。有人说以这个办法受教育的学生，前两年他是一个学者，追求着自然界的真理，运用理论的分析而且做严密的实验，确是在高度学术空气中生活着的。但是一过了两年，进入了后一阶段的教育，他又忽然从学术空气中被赶出来，进入了工程师们所习惯的园地，放弃了分析方法，去研究经验公式了。我们知道这样培养出来的工程师一进入到实际工作中，不久就把他们学过的自然科学各个学科的大部分都忘了，数学也不大会用了，只不过还会运用自然科学的一般原则来帮助他的思考罢了。要真正以科学的理论来推演出他们在工作中所需要的准则，他们还是不能做到的。

其实这一种困难是可以理解的，因为美国麻省理工学院对工程技术的看法是有错误的地方的。错误在什么地方呢？我们可以这样看：自然科学的研究对象并不是大自然的整体，而是大自然中各个现象的抽象化了的、从它的环境中分离出来的东西。所以自然科学的实质是形式化了的、简单化了的自然界。因此，虽然关于原子核以外的世界，现在已经发现了许许多多的自然规律，但究竟自然科学还是要不断的发展的。在任何一个时代，今天也好，明天也好，一千年以后也好，科学理论绝不能把自然界完全包括进去。总有一些东西漏下了，是不属于当时的科学理论体系里的；总有些东西是不能从科学理论推演出来的。所以虽然自然科学是工程技术的基础，但它又不能够完全包括工程技术。如果我们要把自然科学的理论应用到工程技术上去，这不是一个简单的推演工作，而是一个非常困难、需要有高度创造性的工作。我们说科学理论应用到工程技术上去是不合适的，应该更确切地说科学理论和工程技术的综合。因此有科学基础的工程理论就不是自然科学的本身，也不是工程技术本身，它是介于自然科学与工程技术之间的，它也是两个不同部

门的人们生活经验的总和, 有组织的总和, 是化合物, 不是混合物。

显然, 我们不可能要求一个高等学校的学生仅仅用四年的功夫把这个非常困难的工作做好。他们最多只不过能把科学和工程混在一起, 绝不能让两者之间起化合作用, 所以美国麻州理工学院式的教育绝不能完全达到它预期的目的, 要作综合自然科学和工程技术, 要产生有科学依据的工程理论需要另一种事业的人。而这个工作内容本身也成为人们知识的一个新部门: 技术科学。它是从自然科学和工程技术的互相结合所产生出来的, 是为工程技术服务的一门学问。

由此看来, 为了不断地改进生产方法, 我们需要自然科学、技术科学和工程技术三个部门同时并进, 相互影响, 相互提携, 决不能有一面偏废。我们也必须承认这三个领域的分野不是很明晰的, 他们之间有交错的地方。如果从工作的人来说, 一人兼在两个部门, 或者甚至三个部门是可以的, 所以一个技术科学家也可以同时是一个工程师; 一个物理学家也可以同时是一个技术科学家。不但如此, 这三个领域的界限不是固定不移的, 现在我们认为技术科学的东西, 在一百年前是自然科学的研究问题, 只不过工作的方法和着重是有所不同罢了。我们要明确的是: 在任何一个时代, 这三个部门的分工是必需的, 我们肯定地要有自然科学家, 要有技术科学家, 也要有工程师。

2 技术科学的研究方法

既然技术科学是自然科学和工程技术的综合, 它自然有不同于自然科学, 也有不同于工程技术的地方。因此, 研究技术科学的方法也有些地方不同于研究其他学科的方法。

因为技术科学是工程技术的理论, 有它的严密组织, 研究它就离不了作为人们理论工具的数学。这个工具在技术科学的研究中是非常重要的, 每一个技术科学的工作者首先必须掌握数学分析

和计算的方法。也正因为如此, 某一些技术科学的发展, 必定要等待有了所需的数学方法以后才能进行, 例如近几十年来统计数学的成就就使得好几门技术科学(例如控制论和运用学)能够建立起来, 所以作为一个技术科学工作者, 除了掌握现有的数学方法以外, 还必须经常注意数学方面的发展, 要能灵敏地认出对技术科学有用的新数学, 快速地加以利用。他也要不时对数学家们提出在技术科学中发现的数学问题, 求得他们的协助, 来解决它。自然我们也可以说, 关于这一点, 技术科学与自然科学各部门的研究没有什么大的差别。但是实际上技术科学中的数学演算一般要比自然科学多, 数学对技术科学的重要性也就更明显些。也因为技术科学中数学计算多, 有时多得成了工作量中的主要部分, 这使得许多技术科学的青年工作者误认为数学是技术科学的关键。他们忘了数学只不过是一个工具, 到底不过是一个“宾”, 不是“主”。因此我们可以说: 一件好的技术科学的理论研究, 它所用的数学方法必定是最有效的; 但我们决不能反过来说, 所有用高深数学方法的技术科学研究就都是好的工作。

也是因为技术科学研究工作中, 用数学分析和计算的地方很多, 所以许多具体分析与计算的方法, 像摄动法、能量法等, 都是技术科学研究中所创造出来的。这方面贡献特别多的是技术科学中的一个部门——力学。惟其如此, 最近电子计算机的发展, 就对技术科学的研究有深切的影响。因为电子计算机能以从前不可想象的速度进行非常准确的计算, 有许多在以前因为计算太复杂而用实验方法来解决的问题, 现在都可以用计算方法来解决, 而且在时间方面以及所需的人力物力方面都可以比用实验方法更经济。这一点说明了电子计算机在技术科学研究中的重要性。在将来, 我们不能想象一个不懂得用电子计算机的技术科学工作者。但更要紧的是: 由于电子计算机的创造, 数字计算方法将更加多用, 技术科学的研究方法将起大的变化。我们才在这改革的

萌芽时期,而且电子计算机本身也在迅速地发展,将来到底能做到什么地步,现在还不能肯定,能肯定的是:下一代的技术科学工作者的工作方法必定比我们这一代有所不同。

我们在前面已经说过:数学方法只是技术科学研究中的工具,不是真正关键的部分。那么,关键的是什么呢?技术科学工作中最主要的一点是对所研究问题的认识。只有对一个问题认识了以后才能开始分析,才能开始计算。但是什么是对问题的认识呢?这里包含:确定问题的要点在哪里,什么是问题中现象的主要因素,什么是次要因素,哪些因素虽然也存在,可是它们对问题本身不起多大作用,因而这些因素就可以略而不计。要能做到这一步,我们必须首先做一些预备工作,收集有关研究题目的资料,特别是实验数据和现场观察的数据,把这些资料印入脑中,记住它,为做下一阶段工作的准备,下一个阶段就是真正创造的工作了。创造的过程是:运用自然科学的规律为摸索道路的指南针,在资料的森林里,找出一条道路来。这条道路代表了我们对研究的问题的认识,对现象机理的了解。也正如在密林中找道路一样,道路决难顺利地一找就找到,中间很可能要被不对头的踪迹所误,引入迷途,常常要走回头路。因为这个工作是最紧张的,需要集中全部思考力,所以最好不要为了查资料而打断了思考过程,最好能把全部有关资料记在脑中。当然,也可能在艰苦工作之后,发现资料不够完全,缺少某一方面的数据。那么为了解决问题,我们就得暂时把理论工作停下来,把力量转移到实验工作去,或现场观察上去,收集必需的数据资料。所以一个困难的研究题目,往往要理论和实验交错进行好几次,才能找出解决的途径。

把问题认识清楚以后,下一步就是建立模型。模型是什么呢?模型就是通过我们对问题现象的了解,利用我们考究得来的机理,吸收一切主要因素、略去一切不主要因素所制造出来的“一幅图画”,一个思想上的结构物。这是一个模型,

不是现象本身。因为这是根据我们的认识,把现象简单化了的东西,它只是形象化了的自然现象。模型的选择也因此与现象的内容有密切关系。同是一个对象,在一个问题中,我们着重了它本质的一方面,制造出一个模型。在另一个问题中,因为我们着重了它本质的另一面,也可以制造出另一个完全不同的模型。这两个不同的模型,看来是矛盾的,但这个矛盾通过对象本身的全面性质而统一起来。例如,在流体力学中,在一些低速流动现象中,空气是被认为不可压缩的,无黏性的。在另一些低速流动现象中,因为牵连到附面层现象,空气又变为有黏性的了。在高速流动现象中,空气又变成可压缩的了。所以同是空气,在不同的情况下,可以有不同的模型。这些互相矛盾的模型都被空气的本质所统一起来。

我们已经说过,在摸索问题关键点的时候,我们依靠自然科学的规律。这也说明技术科学的工作者必须要能彻底掌握这些客观规律,必须知道什么是原则上可行的,什么是原则上不可行的,譬如永动机就是不可行的。我们也可以说唯有彻底掌握了自然科学的规律,我们的探索才能不盲目,有方向。正如上面所说的,自然科学的规律是技术科学研究的指南针。

有了模型了,再下一步就是分析和计算了。在这里我们必须运用科学规律和数学方法。但这一步是“死”的,是推演。这一步的工作是出现在科学论文中的主要部分,但它不是技术科学工作中的主要创造部分。它的功用在于通过它才能使我们的理解和事实相比较,唯有由模型和演算得出具体数据结果,我们才能把理论结果和事实相对比,才可以把我们的理论加以考验。

由前面所说的技术科学工作方法看来,也许有人要问:技术科学的研究方法又有什么和自然科学研究方法不同的地方呢?我们可以说这里没有绝对的差别,但是有很重要的相对差别。我们可以说以自然科学和工程技术来对比,工程技术里是有比较多的原始经验成分,也就是没有严密

整理和分析过的经验成分。这些东西在自然科学里一般是很少的, 就是因为某一问题分析还不够成熟, 不可避免地含有经验成分, 那也是自然科学家们要努力消除的。但在技术科学里就不同了。它包含不少的经验成分, 而且因为研究对象的研究要求的不同, 这些经验成分总是不能免的。因此这也影响了技术科学的研究方法, 它在一定程度上是和自然科学的研究方法有所不同的。我们也可以从另一个方面来说, 技术科学是从实践的经验出发, 通过科学的分析和精炼, 创造出工程技术的理论。所以技术科学是从实际中来, 也是向实际中去的。它的主要的作用是从工程技术的实践, 提取具有一般性的研究对象, 它研究的成果就对那些工程技术问题有普遍的应用。也正因为如此, 技术科学工作者必须经常和工程师们联系, 知道生产过程中存在的实际问题。有时一个技术科学工作者也直接参加解决生产中发生的问题, 以取得实践的经验。照这样说, 一个技术科学工作者的知识面必然是很广阔的, 从自然科学一直到生产实践, 都要懂得。不仅知识广, 而且他还必须要能够灵活地把理论和实际结合起来, 创造出有科学根据的工程理论。

有了工程理论, 我们就不必完全依赖工作经验, 我们就可以预见, 这正如有了天体力学的理论, 天文学家们就可以预见行星的运动, 预告日食、月食等天文现象。由这一点看来, 工程理论又是新技术的预言工具。因而技术科学也能领导工程技术前进, 是推进工程技术的一股力量, 是技术更新、创造新技术所不可缺的一门学问。

3 力学与航空技术

我们现在举一个技术科学对工程技术所起作用的实例: 航空技术。在这里起重要作用的是力学这一个技术科学, 这我们在前面也已经讲到。力学对航空技术的贡献是有决定性的, 是技术科学与工程技术相互作用的典型。力学本身也就成为技术科学的一个范例, 也是我们现在对技术科

学这一个概念的来源。

在古典的力学中有两个重要的分支: 一个是流体力学, 一个是固体力学。流体力学是处理液体和气体的运动的, 所以它也就包括了气体动力学和空气动力学。固体力学是处理固体在外力或加速度作用下所产生的应力应变, 所以包括了弹性力学和塑性力学。显然, 流体力学与飞行器的外形设计和推进问题有密切关系, 而固体力学则与飞行器的结构设计有密切的关系。自然我们认识到流体力学也必然与许多其他工程技术有关系, 像水利工程、蒸汽或燃气涡轮, 船舶的设计等。固体力学也必然与所有工程技术中结构强度问题有关系。但是因为力学迅速发展的时期中, 也就是过去这五十年, 只有航空技术上的问题最迫切, 最严重, 所以与力学相互作用最强的是航空技术, 而不是上面所说的其他工程技术。

在飞机设计中一个基本问题是升力和阻力。升力是飞行所必需的, 然而有升力就必然产生阻力。怎么样才能在一定升力下减少阻力呢? 这也等于问: 什么是一定升力所产生的最小阻力呢? 流体力学的伟大科学家 L. 普朗特耳在受了开尔文勋爵意见的影响下, 创造了著名的有限翼展机翼理论, 给出了计算由升力所产生的阻力的方法, 这就是所谓感生阻力公式。普朗特耳的研究也指出了减少阻力的方法, 他的公式说在一定升力系数下, 感生阻力系数是与翼展比成反比例的。因此要减少感生阻力, 我们就应该加大翼展比, 也就是把翼面作得狭而长。

感生阻力的问题解决了, 接着下面的问题就是不由升力所产生的阻力了, 也就是所谓寄生阻力。这一部分阻力是由于空气的黏性而来的。空气的黏性很小, 但是它并不等于零。怎么样来考虑小黏性所产生的作用呢? 这也是流体力学对航空技术的一个大贡献。它指出小黏性的作用是局限于附在表面一层气流中, 也就是附面层中。流体力学也给出分析附面层的方法, 并且指出: 附面层有时会因为沿着表面在流向压力增加, 感到

运动的阻碍，因而从表面分离出去。这样分离了的附面层就造成涡流，减少了升力，加大了阻力。这些流体力学上研究的结果不但给设计飞机翼形和飞机舱形以原则性指导，而且指出，要减少寄生阻力，我们就必须减小附面层的面积，也就是减少表面面积。由于这一结果，飞机的设计才由多翼面的、带支柱的外形，走向单翼面、完全流线型化了的外形。

制造完全流线型化的单翼飞机，不能再用不够坚固的、旧的、钢架蒙布式的结构，而必须改用全金属的薄壳结构。但是这是一种新型的结构，工程师们没有足够的经验，要能设计出有高效能的结构，这还是要请教弹性力学家们。他们首先给出计算薄壳结构的折曲负荷或临界负荷的方法，也就是解决弹性稳定问题。虽然早在十九世纪欧拉就研究过这个问题，给出细柱临界负荷的公式，但是飞机上用的结构要比这复杂得多，而且薄壳是有表面曲度的，古典的、所谓小扰度理论是不正确的，它给出过高的临界负荷。在另一方面，有些表面曲度小的结构，虽然折曲了，但是仍然能担起更大的负载。所以弹性力学家们还研究了结构在超越临界负荷的情况，也就是解决了所谓“有效宽度”的问题。这一连串的研究都是在1933年前后作的，因此奠定了全金属飞机结构的理论基础。

在这里我们必须说明的是：结构强度的问题终了是要牵连到材料破坏问题上去的，因为强度就是在破坏时候的负载，而且对金属材料来说，在未破坏以前，也必先进入塑性变形阶段，因此也要牵连到塑性力学的问题。一直到现在，材料强度问题与塑性力学问题都在研究着，但都还没有得出定论。所以自然科学的已知规律显然还不能完全包括工程技术上的现象。但是力学工作者并不因此而放弃对结构强度问题的研究。他可以一面用弹性力学的理论，一面吸取工程实践上的经验和实验的结果，把它们综合起来，创造出有科学根据而又有实际意义的结构理论，这种在现

实条件下争取有用的理论的精神，是技术科学工作者所不可缺的。

由于上面所说的这些发展，在第二次世界大战中，飞机的时速已经达到了700公里，接近了声音传播的速度(约每小时1000公里)。当时因为初步实验上发现物体阻力在声速附近急骤加大，在工程师中间也有人以为要飞机超过声速是不可能的，说存在着声速的墙。就在这时候，气体动力学家们作出了翼面和机身在超声速气流中的运动理论，设计了超风速的风洞，作了许多超声速气流的实验。他们用理论和实验双方并进的方法证明超声速飞机的阻力系数实际上不会太大，所以并没有所谓声速的墙。在另一方面，气体动力学家也参加了喷气推进机的创造和发展，大大地增高了飞机推进机的效能，因而减少它的重量。力学家的这些贡献，促成了超声速飞行的实现。这一关一打破，航空的发展更快了。现在流体力学家正在努力于高超声速气动力学和稀薄气体动力学的研究，帮助超高空、超高速飞行的实现，因而也在促进星际航行的诞生。

因为技术科学的研究对象是具有一般性的，它的研究成果也有广泛的应用。力学的工作，虽然是由于航空技术迫切的要求，但是，现在已经得到的流体力学和固体力学的研究结果，对其他工程技术部门来说也有很大的帮助。例如燃气轮机的创制成功是离不开气体动力学的，而掌握了高速气流动力学以后，我们也就很自然地看到把高速化学反应应用到化学工业中去的可能性。这些力学在航空技术以外的应用对将来的工程技术都是非常重要的。它也说明了，通过技术科学研究中的总结，一个技术部门的经验与成就就能超越他们的局限性，伸展到其他方面去，推进了另一些技术的发展。技术科学家也是利用这一可能性来预见新技术，指出工程技术下一阶段的发展方向。

4 技术科学的一些新发展方向

我们在上一节中，约略地介绍了一些技术科

学的情况。但是流体力学、弹性力学和塑性力学都是比较成型的，已经有了不少工作的学科。现在，我们要谈一谈今后技术科学发展的几个方向，几个需要开拓的学科。为了简明起见，我们制了一张表。表的第一栏是学科的名称；第二和第三栏是这个学科在自然科学抽用的部分和在技术经验方面抽用的部分。这也就形成这个学科的资料，要从这两部分综合起来创造出这门技术科学；第

四栏是现在可以看出来的内容，也就是研究题目；第五栏是这门学科研究成果的应用，也因此可以表现出这门科学的重要性。我们从这个表里面可以看出第三栏的技术经验组成部分和第五栏的应用方面常常是相同的，这又一次说明技术科学基本上是从工程技术上来，到工程技术中去的学科。

表 1 也许太简单了，我们再来介绍一下各学科的大意。

表 1 技术科学的几个发展方向

| 部门学科 | 组成部分 | | 研究的内容 | 成果的应用 |
|--------|---|--|--|--|
| | 自然科学和技术科学方面 | 工程技术方面 | | |
| 化学流体力学 | 1. 流体力学, 气体动力学 2. 化学动力学 | 1. 化学工业 2. 冶金工业 3. 工业中燃烧装置 | 1. 有化学变化的流体运动 2. 固定和液体化的触媒床 3. 燃烧和爆震 4. 冲激管中的化学作用 | 1. 化学工程 2. 冶金工程 3. 工业燃烧问题 4. 内弹道问题 |
| 物理力学 | 1. 物理化学, 化学物理 2. 量子力学, 统计物理 3. 固体物理 | 1. 化学工业 2. 材料研究 | 1. 气体、液体、固体的热工性质 2. 固体材料强度及变形问题 3. 物质在不可逆过程中的性质 4. 气体在超高温中的性质 | 1. 一般工程技术 2. 高温技术 |
| 电磁流体力学 | 1. 流体力学 2. 电磁学 3. 电子物理 4. 天文观测 | 1. 超高速飞行技术 2. 原子能技术 | 1. 电磁流体的运动规律 | 1. 超高速飞行技术 2. 原子能技术 |
| 流变学 | 1. 流体力学 | 1. 油漆、食品工业等 2. 高分子化合物工业 | 1. 流变体测量方法的分析 2. 流变体运动规律 | 1. 轻工业生产技术和轻工 业产品的改进 2. 超高压润滑剂和轴承 |
| 土和岩石力学 | 1. 固体动力学, 固体力学 2. 强度理论 | 1. 挖土工程 2. 隧道工程 3. 爆破工程 4. 采矿工程 | 1. 土和岩石的物理性质 2. 爆破的动力学过程 3. 土壤加固问题 | 1. 土石工程 2. 采矿工程 3. 爆破工程 4. 挖土机械的设计 |
| 核反应堆理论 | 1. 原子核物理, 中子物理 2. 热传导 | 1. 原子能利用 | 1. 反应堆理论, 反应堆动态性能 | 1. 原子能利用 |
| 工程控制论 | | 1. 随同机械, 工业控制系统 2. 自动化生产方法 | 1. 各种控制系统的分析和综合 2. 自动测量的系统 3. 自动校正的系统 | 1. 工业控制系统 2. 生产过程自动化 |
| 计算技术 | 1. 数理逻辑 2. 控制论 | 1. 自动控制系统 2. 电子工艺学 | 1. 模拟计算机 2. 数据计算机 3. 复合计算机 | 1. 科学问题的计算 2. 自动控制系统 |
| 工程光谱学 | 1. 物理光学, 各种光谱 2. 量子力学, 统计物理 | 1. 工业分析仪器 | 1. 光谱分析 2. 质谱分析 3. 辐射在不均匀气体混合物中的规律 | 1. 工业分析 2. 生产过程自动化中的控制测量 |
| 运用学 | | 1. 工程经济 2. 经济规则 3. 运输规则 4. 生产规则 | 1. 线性规则, 动态规则 2. 运输后问题 3. 排队问题 | 1. 工程经济 2. 经济规则 3. 运输规则 4. 生产规则 5. 产品系列化问题 |

化学流体力学 这是一门研究流体中有化学变化、热的发生和吸收的动力学。因为有化学变化，所以流体各部分的成分就不能一样，成分不一样就引起了各种扩散过程。自然，因为有热能的发生和吸收，也有温度的不均匀性，有热传导的问题。所以，它基本上是一门比流体力学还要复杂的科学。

物理力学 这门技术科学的目的是由物质的微结构，原子、分子的性质，通过统计物理的方法来计算物质的宏观性质，这里也包含材料强度的物理理论。这也就是说我们希望用计算的方法来得到工程用的介质和材料的性质。这是一个节省时间、人力和物力的很上算的方法。虽然近代物理和化学的成就是很大的，但是要完全靠它们来推演出物质的宏观性质还是不可能的，在许多地方，我们要采用半理论半经验的方法来解决这个问题。这也说明了物理力学的内容和研究方法与统计物理、物理化学、化学物理是有所不同的。物理力学要在这些自然科学的基础上，更进一步地结合实际，求对工程技术有用的结果。

电磁流体力学 这是研究导电液体和气体在电磁场中的动力学。导电的液体是液体金属，它们在核子反应堆中常常被用为冷却剂。要传送液体金属可以用一种电磁泵，泵里面完全没有转动的机件，只靠转动的电磁场来推动液体金属。导电的气体是离子化了的气体，也就是高温的气体（在一万度以上的高温）。这种高温在超高速飞行器的附面层里可以出现。这里的问题是怎样才能有效地冷却表面，不使它的温度过分升高。

流变学 流变学是研究特别液体的动力学。这类液体的应力应变关系要比普通液体（像水）复杂得多，它包括胶体、油漆等。这门技术科学已经有多年的历史，只不过这方面的工作做得不够。譬如一方面我们可以用仪器测定油漆的各种性质，一方面我们对油漆也有些具体的要求，像用刷子刷上油漆，过后要不显刷子的印迹。但是现在的流变学就还不能把这两件事连起来，明确要

什么样的物理性质才能满足具体要求。要做到这样，就是流变学今后发展的主要方向。

土和岩石力学 我国现在正在进行大规模的基本建设，在土石工程中累积了不少经验，在大爆破作业中也学会了先进操作方法。但这些都还没有作出科学的总结，创造出土壤和岩石移动工程的理论，这是不应该的。土和岩石力学的研究任务就是要补足这个缺陷。此外，我们也要研究电流对土壤的影响，土壤中的电渗问题。

核反应堆理论 这门技术科学的内容是设计反应堆的理论，几年来这方面的工作一直是物理学家兼任的，现在应该把这部分工作计划为技术科学的一个部门，不再去麻烦物理学家。

工程控制论 这是生产过程自动化和自动控制系统的基礎理论。它比一般所谓自动调节和远距离操纵理论的范围要广，而它也正在引用最近系统数学的成就来更进一步扩大它的领域，为设计更完善的自动控制系统打下基础。

计算技术 这学科是为了设计更好的、多种多样的电子计算机，和更有效地使用电子计算机。现在在这一个方面工作的有无线电电子工程师、电路网络专家，也有计算数学专家和数理逻辑家。如果只把这些不同专业的人放在一起，他们只形成一个“混合物”，是不会有效地共同工作的。只有当这几方面的专家互相了解，互相贯通了他人的专业以后，也就是说结合起来成了“化合物”以后，这才能推进计算机的发展，做到这一步也就是把他们各个不同的专业变成一个共同的专业——计算技术这一门技术科学。

工程光谱学 要把生产过程自动化，就要能迅速地、精确地知道生产过程每一部分的情况，作为控制的依据。在许多化学工业、冶金工业和燃烧过程中，最主要的测定就是物质成分的分析。最快最准的测定方法就是光谱分析法和质谱分析法，而且这些分析的一套仪器也能自动化，不经过人的操作，就能将分析的结果传输到过程的控制系统中去。怎么样来设计这种自动仪器？这需

要理论。此外, 现在我们只知道怎样处理均匀气体的光谱, 如果我们更进一步处理不均匀气态的光谱, 像一个火焰的光谱, 用这样的光谱分析出其中每一点的不同成分, 那就需要更进一步来发展光在物质中传导的理论。这些问题就是工程光谱学的研究对象。

运用学 这门技术科学工作的内容是用近代数学的成就, 特别是统计数学的成就, 来研究最有效地使用人力、生产工具、武器、物资等等的方法和安排, 也就是把一切规划工作放在科学的基础上。自然, 以前作规划工作的人们也引用了些数学, 但是因为用的数学方法是很初级的, 工作的范围受了很大限制, 所以不能够彻底解决问题。运用学就是要用最有效的数学方法来突破这个限制, 创造出作规划的一般方法, 建立起规划的理论。我们可以看到, 运用学研究中所出现的因素与一般科学有所不同。它不研究物质的能量和动量, 也没有什么动力学问题。运用学专考究一个组织、一个系统的运用效果, 和组织间与系统间的消长关系。

我们在附表里和前面各节中介绍了些技术科学的发展新方向, 有的是新的学科, 有的是老学科但是要朝新的方向走。这里必须说明的是, 由于个人知识的限制, 我不可能把所有发展的方向都罗列出来, 列出来的是不完全的, 而其中有一半是和力学有关的。显然还有许多别的学科没有列出来, 举一个例子, 现在物理学家研究半导体, 但是他们研究的重点是半导体在电子器件和电力技术上的应用, 所以这样的一门学科实在是一门技术科学。此外也很显然的, 说这些是发展的新方向, 并不等于说老一点的技术科学部门就没有前途, 不必发展了。人们的知识是要永远前进的, 不会走到终点的。而且任何在这些旧部门工作的人, 任何流体力学家、弹性力学家、塑性力学家, 都知道在他们自己专业里面还存在着一连串的问题等待解决, 这些问题也和工程技术有密切关系, 不容忽视。

5 技术科学对其他科学的贡献

我们在前面已经提到自然科学、技术科学和工程技术之间的相互影响和相互提携, 这也就是说, 我们不能只看到自然科学作为工程技术的基础这一面, 而忽略了反过来的一面, 一个反馈作用, 也就是技术科学对自然科学的贡献。为什么有这一个可能性呢? 我们在第一节里就说明为什么自然科学是不可能尽善尽美的, 不可能把工程技术完全包括进来, 而技术科学却能把工程技术中的宝贵经验和初步理论精炼成具有比较普遍意义的规律, 这些技术科学的规律就可能含有一些自然科学现在还没有的东西。所以技术科学研究的成果再加以分析, 再加以提高就有可能成为自然科学的一部分。这里的一个明显例子就是工程控制论。工程控制论的内容就是完全从实际自动控制技术总结出来的, 没有设计和运用控制系统的经验, 绝不会有工程控制论。也可以说工程控制论在自然科学中是没有它的祖先的。但是工程控制论一搞出来, 我们很容易看到它的应用并不局限于人为的控制系统。在自然界里, 生物的生长和生存都有它们自己的相应控制系统, 而这些自然控制系统的运行规律也是依照工程控制论中的规律的。所以工程控制论中的一些规律, 必然是更广泛的控制论的一部分, 而这个更广泛的控制论就是一切控制系统(人为的和自然的)的理论, 它也必然是生物科学中不可缺少的, 是生物科学的一部分。现在有些人认为从前生物科学家因为没有控制论这一工具, 所以只看到了生命现象中的能量和物质运动问题, 没有注意到更关键的控制问题, 因而歪曲了实际, 得不到深入的了解。由此看来, 一门技术科学, 工程控制论, 对一门自然科学、生物科学, 是有非常重要的贡献的。

其实技术科学对其他科学的贡献还不限于自然科学。我们来看一看运用学。这门学科也是在自然科学领域里没有祖先的。它是由于改进规划工作的实际需要而产生的。规划工作中的工程经济、运输规划还可以说是工程技术, 而生产规划

就已经有点出了工程技术的范围，部分地踏入社会科学的领域中去了。现在运用学的历史还太短，内容还不丰富，但是我们肯定，再过些时候，当运用学有了进一步的发展以后，它的应用范围必定会更扩大，会更向社会科学部门伸展。我们这样说是有缘故的。考虑一下社会科学中的一个重要部门的政治经济学对社会主义部分有些什么研究的题目，这里有关运用学的至少有下列几个：

(一) 国民经济各部门间的关系，也就是生产生产资料的部门和生产消费资料的部门之间的关系，工农业生产部门和交通运输部门之间的关系，生产部门和商业部门、物食供应部门、财政金融部门等等之间的关系。

(二) 各地区间的关系，也就是在一个社会主义国家里面，因为各个地区人口条件和自然条件的差别，造成在某种程度上的地区相对独立性，不可能每一地区都完全平衡，每一地区都和其他地区有同样的发展程度，这里就产生了地区间的关系。

(三) 社会主义国家和别的国家的经济关系，也就是社会主义国家之间的关系和社会主义国家与资本主义国家之间的关系。

上面这一些经济关系的分析和研究可以用一个运用学里面的工具，线性规划来进行。自然，线性规划是一个初步的近似解法，但是运用学的发展自然会创造出更好的工具，像非线性规划和动态规划。所以我们相信一门技术科学，运用学，对政治经济学会作出很大的贡献。把政治经济学精确化，也就是把社会科学从量的侧面来精确化。

在这里我想应该附加一个说明。许多人一听见要把社会科学精确化一定会有意见，就要提出抗议说：社会科学是碰不得的，自然科学家也好，技术科学家也好，你们都请站开！我想这大可不必，但所以有些人会对社会科学的精确化有这样反应，也不是没有一定的理由。可能是因为怕如此一精确化，反而把社会科学搞坏了。在资本主

义国家中也的确有一批所谓度量经济学^① (Econometrics)家，他们的大本营在美国的芝加哥，目的是把数学的分析方法应用到经济学上去。他们已经搞了几十年了，但是没有搞出什么好结果，没有能解决经济上的什么问题。这是证明了经济学不能精确化吗？我想不是的。这些度量经济学家们的出发点是资本主义不正确的经济学说。用资本主义的不正确观点，怎样会得出与实际相符合的结果呢？如果度量经济学家成功了，那我们倒反而要担心了。我们知道引用数学不会把原则上不正确的东西变成正确，也不会把原则上正确的东西变成不正确，数学只是一个工具，一个加快我们运算的工具，使得我们的分析能够更深入，更精确。所以我们没有理由怕社会科学会因引用数学方法而搞坏了。

另一个对社会科学精确化的顾虑是怕社会现象中有许多因素不能确实的估计，因而认为精确化是不可能的。不能确实估计的因素可以在两种不同情况下出现，一种是统计资料不够，一种是因素本身确是不易预见的，例如工人劳动积极性。前一种情况是不应该有的，真正的困难倒是因为不采用数学分析方法，所以难以确定哪一个统计数字是重要的，因而统计资料有不切实用的情形。至于第二种情况，因素的可能变动大，不易固定，我想也不是放弃精确化社会科学的理由。谁都承认社会科学不是毫无客观规律的学问，只要有规律，这些规律就可以在在一定程度上用数来描述出来。如果一个因素不能固定，我们也可以不固定它，把它当作一个有某种统计性质的“随机变数”，也就是说标明这个因素不同数值的几率是什么，整个问题的演算仍然可以精确的进行。而且近代统计数学有多方面的发展，我们完全有条件来处理这种非决定性的运算，只不过计算的结果不是一定的某种情况，而是很精确地算出各种不同情况的出现几率是什么。这对规划工作来说是正确

^① 也有人把 Econometrics 译作技术经济，但是从它的内容来看，这个译名可能是不合适的。

的答案。而其实一件在起初认为不能用数字来描述的东西。只要我们这样地来做,我们就发现,通过这个工作能把我们的概念精确化,把我们的认识更推深一步。所以精确化不只限于量的精确,而更重要的一面是概念的精确化。而终了因为达到了概念的精确化也就能把量的精确化更提高一步。

再有一个反对把社会科学精确化的理由是说:社会现象中的因素如此之多,关系又如此之复杂,数学的运算怕是不能实行的。其实这一个理由现在也不成立了。现在我们已有了电子计算机,它的计算速度,远远超过人的计算速度,因此我们处理复杂问题的能力提高了千万倍,我们决不会只因为计算的困难而阻碍了我们的研究。

由此看来,我们没有理由反对把精密的数学方法引入到社会科学里。但是到底这样精确化又有什么好处呢?举个例子:精确化了的政治经济学就能把国民经济的规划做得更好、更正确,能使一切规划工作变成一个有系统的计算过程,那么就可以用电子计算机来帮助经济规划工作,所以能把规划所需的时间大大地缩短。也因为计算并不费事,我们就能经常的利用实际情报,重新作规划的计算,这样就能很快地校正规划中的偏

差和错误。我们甚至可以把整个系统放到一架电子计算机里面去,直接把新的统计资料传入计算机,把计算机作为经济系统的动态模型,那就可以经常不断的规划,经常不断的校正,这样一定能把经济规划提到远超过于现在的水平。所以我们可以想象得到,通过了运用学把数学方法引用到社会科学各部门中去,我们就能把社会科学中的某些问题更精密地、更具体地解决。当然,也许现在的社会科学家们会认为这样就把社会科学弄得不像社会科学了,但是之所以“不像”,正是因为有了新的东西,有了更丰富的内容,正是因为社会科学里产生了新的部门,这又有什么不好呢?

6 谢 语

作者在写这篇论文的时期,把内容的一部分或全部和中国科学院及中国科学院力学研究所的许多位同事讨论过。因为有了这些讨论,起先说得不清楚的地方说得更明白些了,起先说得不妥当而容易引起误解的地方也就修正了。作者在这里对他们给的帮助谨表谢意。

□责任编辑:王佩琼