

目 录

第 一 章	科学、社会 and 工程.....	(1)
第 二 章	工程设计的程序.....	(12)
第 三 章	工程设计课题的来源和辨认.....	(22)
第 四 章	工程设计中的创造性.....	(35)
第 五 章	系统设计.....	(51)
第 六 章	技术分析.....	(62)
第 七 章	经济分析.....	(80)
第 八 章	人的因素.....	(99)
第 九 章	法律因素.....	(121)
第 十 章	设计中的决策.....	(132)
第十一章	设计决策的实施.....	(148)

绪 论

1. 科学、社会和工程

2. 工程设计的程序

目 标

设计构思

评 价

决 策

交 流

第一章 科学、社会和工程

引 言

写这本书有几个目的：首先是为了使工程专业的学生能了解工程师们在其专业工作中所遵循的程序；我们还应考虑工程学作为科学原理和社会利益之间的桥梁所起的重要作用；我希望大家能够阐明，只要决心致力于工程事业就可以激发创造性思想并取得满意的社会成就。

对我们现今所处的科学时代，人们写的和说的都不少了。但对于科学、工程以及它们所处的社会所起的作用，却仍有很大的误解。在本世纪的五十年代和六十年代，科学成就和科学进步的热潮席卷世界，仿佛黄金时代即将来临。但十年过后，人们的兴趣又回到重新评价人类的目标上来，技术也因它破坏了环境而遭到非难。

在我们赞同和责备这一或另一种思潮之前，首先得考虑我们所说的“科学”、“社会”和“工程”是什么意思。我想你会有一些看法，但可能有很多方面你还没有想过。比如说，医院的空气调节器、宇航密封舱或植物研究中心是科学原理在工程上的应用吗？我期望你能立刻回答说是。医院里用的心脏起搏器和X光照相设备是什么？是谁设计了医院用的胃渗析设备？这些都是工程师们运用有关的科学理论知识设计出来的。

现在我们来考察几个定义，或许有助于理解科学、社会和工程的作用。

“科学是一种研究活动，它或者同论证真理并把它们联结成整体有关，或者是同对观测事实的系统分类并通过归纳出一般定律，对事实作程度不同的概括有关。”（《牛津辞典》）

科学研究的基本目标是探索我们周围世界的真正本质和事物从一种形式转化为另一种形式的机理。科学家试图建立起解释观察到的事实并预测其他情况下的结果的理论。在前一种情况下，这个理论是一个假说——对事实的一种可能的解释，它还未在各种不同条件下得到广泛的研究。经过多次检验和一些修正以后，这个假说最后将被普遍接受而同时成为一条定律。这就是科学研究活动的终点。

科学方法是由观察、假说、检验、观察……的循环往复组成的，最后得出关于一个普遍定律的建议。图 1.1 就说明了这种循环，我们将把它同后面讨论的工程方法加以比较。

我们来总结一下：科学研究的基本目标是确定那些决定着物理、化学、生物、社会等领域的变化过程的规律。

“社会是人类群体进行经常性活动的总系统，他们以其

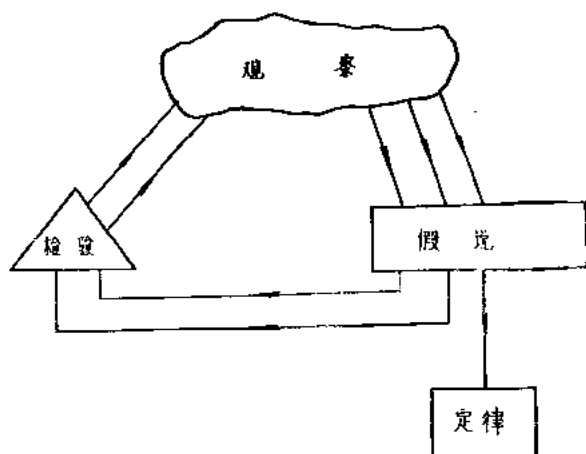


图 1.1 科学方法

性别、年龄、社会作用和地位相区别，又为各种不同的亲属关系纽带所联接。他们服从于共同的权威，分布在或多或少相邻接壤的地域里。社会凭借人类的生物再生产和信仰传递而世代代绵延不断。”（《小型百科全书》）

人们看到，那些决定社会性质的事实要受到历史、地理、气候、经济和心理等多种因素的影响。这些因素在空间和时间中的平衡是不稳定的，这意味着社会因地点和时间不同而不断有所变化。社会的性质，拿西欧来说，在有文字记载的历史中已发生了相当大的变化，并将继续变化下去。同时，在社会中、各城市、各国家和各大陆之间，也有空间变化，它们也随时间推移而变异。

既然工程活动是为了要增进社会利益，显然就应当充分理解社会的目标。这就提出了一系列关系到工程活动成败的重要问题。失败常常是由于设计者未能正确估价社会对他设计的产品的基本要求，我们可以想到导致设计者与消费者目

标互不协调的一些原因。

1. 他们所处社会的工业发展阶段不同；
2. 宗教的和哲学的信仰有差异；
3. 经济和社会环境的区别；
4. 地理和气候环境不同。

对设计者来说，在思想上跳出自己的日常环境而考虑预期的顾客的环境是很重要的。这样，他才能达到有意义的社会目标。

同样重要的是，设计者应使他的设计思想走在时代前面，并力图弄清在自己所设计的器械的可能使用期限内的社会目标。这在某些情况下可能是难以作到的，但较为成功的设计者正是那些具有远见卓识的人。当前，工业社会对环境问题的关注就是这种与时间有关的现象的一个例证。不久以前，社会的目标是需要电力、机动车和其他节省人力的工具，它们的成本都比较低。为此造成的后果是：污染、掠夺性开采和失业，这些现象现在越来越明显了。结果，社会正开始强调另外的价值标准，并对实现其目标的手段进行重新估价。

“工程是人类的一种活动，通过这种活动使自然力处于人类的控制下，并使事物的性质在装备和机器上发挥效用。”

（《小型百科全书》）

自然力是制约着不同输入所引起的各种变化性质的那些作用。人们对许多自然力的研究已经达到这样一种程度，科学定律已足以说明这种输入——输出的相互关系。比如，我们所掌握的关于机械运动、电流运动、化学反应的平衡等等定律，它们就规定着特定情况下的“输入——响应”特性。然而，在某些时候，对一个基本现象的简单的实验室研究同

它们在某些有用的器械上的应用则相距甚远。例如，把充气试管内气流的实验室研究同燃气轮机叶轮中气流的研究加以比较，可以看出在这两种场合都必须符合同样的气体动力学定律。但是，对后者的数学分析要困难得多，实际上，这是一个需要智力和创造性技能的领域，这是一个大有作为和报酬丰厚的领域。它要求工程师确定的反映实际状况的理论模型既是对现实的合理描述，同时又能用科学原理进行理论分析。这里显然需要折衷的平衡，就是说这里有给出各种答案的余地，以及对于什么是更正确的解有某种程度的不确定性。在采用新器械之前，这种不确定性正是制定研究和发展计划的主要原因。很多工科学生对科学的精确性和工程的近似性的分野感到难以接受，然而这正是工程专业的一个非常重要的方面。为此，我们将在后面更详细地讨论建立模型的各方面问题。

前面所引的定义中提到的装备和机器，不仅包括桥梁和汽车发动机，还包括全部工程产品。任何一种器械当其输入由一个地方转移到另一地方时不需改变形式，就都是装备。因此不仅桥梁和建筑物，而且电力系统、电子仪器、生产计划进度表和通讯系统都是装备。机器一般认为是涉及动力的产生和利用以及与之相关的形式的改变。发电机和内燃机显然是机器，空调设施、装卸设备和机动轮椅同样也是机器。

对支配自然力有一个不言而喻的要求，就是这种控制应给人类带来好处。正是工程的这个方面有时候会引起社会集团与技术的冲突。历史上的一次大对抗是棉纺工人和“新型”纺织机之间的冲突。每当引入一种新工具总会引起一些冲突，如人为的产品过剩，汽车道附近的房主对噪音的烦恼，重新培训的需要等。本书的目的不是讨论决定谋求社会

福利的活动的各种过程；不过，系统方法和创造性思维的研究对于推广工程方法论以解决人类社会问题是很有价值的。

工程活动的目标是运用科学原理去发展对人类社会有用的器械。假定对这些器械的需要已经确定，那么工程师的责任就是在社会、经济和时间约束的限制范围内满足这些需求。因此，实质上的程序必须是一个从需求到器械的单向过程。当然一下子发明出完全合乎需要的器械是很少见的，因此常常有某些思想发展和修正，造成工程方法中有某种程度的循环。这种工程方法可由图 1.2 来说明。

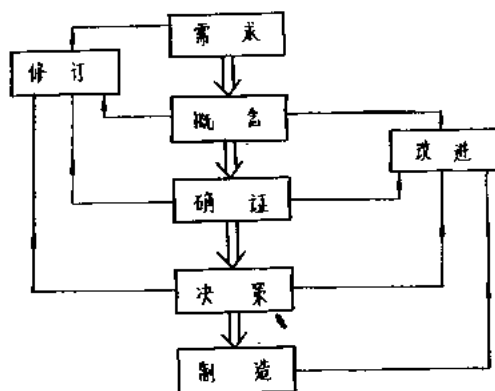


图 1.2 工程方法

这个流程图显示了从特定的需求到制定生产计划的单向路线以及改进和修正的反向循环。工程方法的中间阶段是概念发展（发明阶段），设计概念的验证、进行性能预测（分析阶段）和选择最合理的设计概念（决策阶段）。

在一开始，并不总是能够完全确定需求的，在概念发展阶段，设计者常常要进一步制定规范。在以后的阶段可能会证明不可能达到以前提出的某些要求。例如成本和性能常常

会得出相互矛盾的要求，如果把两者不合理地结合在一起，以后的分析将会表明至少有一种要求必须修正。同样，一组设计概念在进一步分析其细节时，不可能是完全合适的。人们经常会发现，以后的分析表明，如果按一定方式修改原有的设计概念，效果便会得到改善。

但是这里要告诫大家一句话，这话在后面还要说到，就是——虽然对设计完美性的正当追求会推动设计者大大地改进他的设想，并常常能逐步找到“完美”的解决方法。但是，对设计总要有费用和时间上的限制，所以，为了符合预定进度计划，设计者必须准备接受不那么完善的方案。熟练的设计者当然要达到成功和限制这两条标准，而这也正是初出茅庐的工程设计人员的努力方向。

如果比较图 1.1 和图 1.2，就会看出一些贯串于工程方法论之中的科学方法论的线索。工程方法中的概念——确证——改进这个循环与科学方法中的观察——假说——检验这个循环是相似的。当然还有区别，在工程中时间是重要的！

关 系

在目前为止，我们是把工程和科学作为独立的但又明显相关的两类科目来看待的。当然，事实上不可能离开应用去作纯粹的研究，从科学到工程是一个连续的系列，而个人在情况需要时会沿着这个系列来回移动。

在当代科学研究的多数领域里，都有高精度的设备和仪器，它们都是用工程方法制造出来的。空间探索为科学和工程之间这种相互作用相互依赖关系提供一个例证。拿人对月球表面的勘探来说吧，目标是科学的——要了解月球的性质

和形成。

图 1.3 的流程图概略的说明了在这项活动中提出的一组课题的细节。

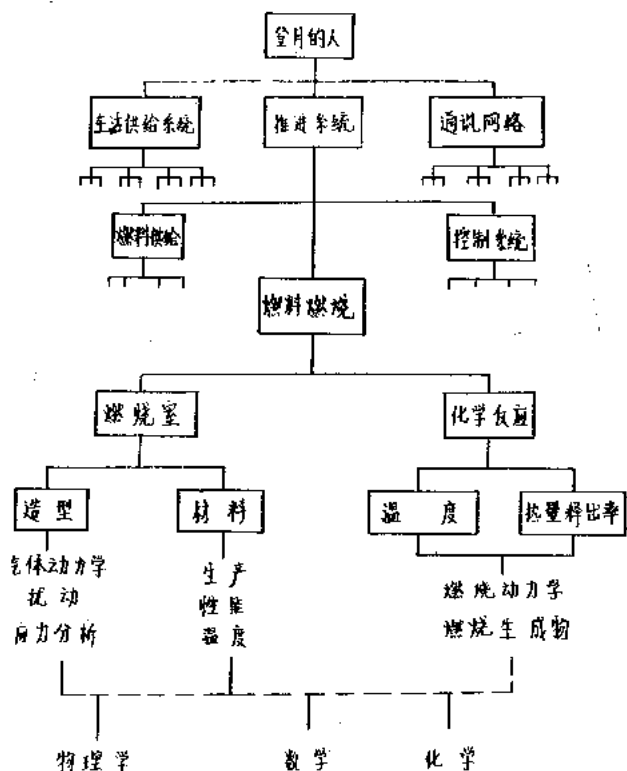


图 1.3

这个图表明，这项活动的最终目标虽然植根于科学的土壤，但要通过工程活动作为过渡环节才能实现。很明显，整个图显示了一个范围广泛的谱系。实际上这正是使空间探索为“民用”技术作出贡献的广阔基础。考察图 1.3 所示的推

进系统可以进一步说明科学与工程之间的相互作用。

根据关于要输送到月球去的有用负载的知识和引力物理学知识，可以确定推进系统的性能要求。（推力，持续时间，和控制的灵敏度都是重要因素。）在这一系列活动的另一端，是规定了燃烧、液流、气流和能量传递原理的科学定律。要求工程师设计出组成推进系统的各部件，以便在有关科学定律、操作可靠性、生产加工的经济性等要求的限度内达到所需要的性能。

在努力实现这些目标时，常常会发现对问题的某些方面缺乏必要的科学知识。例如，失重对固体和液体的混合物有何效应？在这样的情况下，可以按两种方式来处理。如果问题是急需解决并且可以采取适当补救措施，就可能用逼近法和根据有关经验的直觉来解决。另一种情况是，如果这个问题很关键而又没有适用的可靠措施，那就必须对它进行全面研究以便得出精确的设计数据。这种研究实质上是一种有预定目标的科学研究而且要遵循常规的科学方法论。在确定了适当的原理和定律后，工程师就把它们用于他的设计分析之中。

对问题和理论的这两种处理方式的后果之一，就是无法明确规定工程师和科学家的活动范围，这两种活动经常交织在一起。在科学研究中将有工程师参加，因为课题的领域与工程实践有密切关系，这些工程师对研究对象可能有更多知识；另一方面，有许多科学家参加工程设计工作，因为这是他们研究工作的自然扩展。

工程与社会的相互作用可以用城市交通的问题来说明。现代汽车工业的发展使私人汽车增长很快，这创造了一种新的生活方式，也产生了许多新问题，在城市更为突出。

本世纪二十年代悉尼附近的道路上行车很不舒服，晴天

尘土飞扬，雨天则道路泥泞，造成很多麻烦。显然要解决这个问题就要把路面铺平，使行车方便并且有安全的驾驶条件，这就促进了公路交通。但其后果则是大家熟知的交通拥挤，当然，通过公路的改建可以减轻拥挤现象，这就要加宽旧公路或铺设新公路。但这种解决方法又造成了很多社会问题，不得不拆毁一些房屋，居民需要迁移到邻近地区去，要不就得在居民区附近建设立体交叉公路。这些都改变了市容并给居住区附近带来交通噪音。

在这种情况下解决工程问题必须考虑到社会、政治和经济因素。地方和整个社会根据各自所受的影响可能对这个问题持不同看法，但必须达成谅解。当时的政府将代表民众按照自己的未来发展计划施加一定的政治压力，最后还有经济上的限制，它也受有关的地理和地质条件的影响。要成功的解决这个工程问题就要考虑所有这些条件，而且设计者必须了解它们的意义。

参 考 书 目

BAUER, R. A., Second Order Consequences, A Methodological Essay on the Impact of Technology. Cambridge, Mass., M. I. T. Press, 1969.

BEAKLEY, G. C. and LEACH, H. W., Engineering, An Introduction to a Creative Profession. New York Macmillan, 1967.

CROSS, H., Engineers and Ivory Towers. New York, McGraw-Hill, 1952.

GABOR, D., *Innovations, Scientific, Technological and Social*. Oxford Univ. Press, 1970.

HINTON, Lord C., *Engineers and Engineering*. Oxford Univ Press, 1970.

HOLLIDAY, L., *The Integration of Technologies*. London, Hutchinson, 1966.

KRICK, E. V., *Introduction to Engineering and Engineering Design*. New York, J. Wiley, 1970.

MORISON, E. E., *Men, Machines and Modern Times*. Cambridge, Mass., M. I. T. Press, 1966.

MUMFORD, L., *Technics and Civilization*. London, Routledge, 1934.

ROWLAND, J., *Epics of Invention* London, Werner Laurie, 1957.

TUSKA, C. D., *Inventors and Inventions*. New York, McGraw-Hill, 1957.

WALKER, G. R., *Modern Technology and Civilization*. New York, McGraw-Hill, 1962.

第二章 工程设计的程序

什么是工程设计？

为了说明工程设计一词的意思，人们提出了很多定义。按我的看法，莫里斯·阿西莫(Morris Asimow)提出的定义是概括了这个领域内所有各方面的最好的一个定义。

工程设计是“以满足人类需要——特别是可以用当代文明的技术因素来满足的需要——为目标的有目的活动。”(《设计概论》)这个定义强调了三个重要方面，说明工程设计是：

- (1) 一种有目的的活动；
- (2) 以满足人类需要为目标；
- (3) 基于技术因素。

当一个设计项目交给我们时，最重要的是要全面地理解这三方面的含义。我在绪论中已提到工程设计的定向性。工程专业的存在就在于有效地应用科学的原理去解决问题。这些问题需要在一定期限内解决，并应估计到经济的、人的和法律的因素。

上述定义着重强调的第二个方面是“满足人类需要。”这是设计工作中最重要的问题，也是工程学之所以存在的根本原因。这些需要可以用很多不同方式来表达，但我们必须了解到这项工程究竟是为什么人服务的。工程的第三个特点把它与其他可以满足人类需要的领域，如音乐、文学、美术、建筑和其他艺术活动分开来。按照定义，工程设计以科学原理的逻辑应用作为解决问题的基本方法，这就是它所限

定的领域。这并不是说工程设计就可以不考虑艺术和美学方面的问题，只是说在大多数情况下这些并不是所考虑的主要之点。

工程设计的特點

在指出工程设计的主要特征时，有一些要点是必须认识到的。在绪论中我们已经说到了一些，现在更具体地讨论一下。我们可以把工程设计看作是：

1. 有目标的；
2. 有多种形态的；
3. 受约束的；
4. 发展演化的；
5. 或然性的；
6. 进行价值比较的；
7. 综合考虑的。

有目标的——就是指头脑中有一个明确的目标。如果精心地确定设计课题，就能清楚地看到这些目标。然而，有许多这样的情况，由于未能精确地确定设计课题因而使目标模糊。因此，工程师的首要任务是认清真正的问题。我们将在下一章讨论这方面的问题。

有多种形态的——就是指对任何一个问题的可能解在数量上没有限制。其中有的确实不是可行的或合意的，但或许能被发展为更可接受的方案。另一方面，也可能有一些明显很够格的解。工程师的职责就是让思想自由地驰骋，然后选定一个想法，把它运用于实践。

受约束的——对工程设计者来说，选择的自由是受许多条件限制的。其中比较典型的有：

(a) 物理学、化学和数学等方面的基本规律。存在着重力，碳在空气中燃烧产生 CO_2 以及 $\int \cos pt dt = \frac{1}{p} \sin pt$ 。等等。

(b) 经济上的。可用于一个项目的资金、人员和物资都是有限的，这就是说工程师不可能做到尽善尽美，但应力求达到符合各方面经济限制条件出色的指标。

(c) 对人的考虑。各种个人的需求必须考虑在内，飞机驾驶员，起重机司机和家用开罐刀的使用者，在体力上和心理上都有一定的特点，这些特点将使设计方案受着很大的约束。还有，社会集团的要求也应纳入设计思考中去。这样我们就必须考虑美学的、文化的和宗教的因素，以及污染、噪音和公众的社会目标。

(d) 法律因素。有一系列限制设计者行动自由的法律上的根据，包括有关法令要求，专利法、合同和保证等。

(e) 生产设施。要把产品制造出来并最终分配到顾客手中，就必须在要求期限内利用合适的原材料。必要的生产设施、运输工具、安装和保养设备在用到时也都必须好使。

发展演化的——是指在设计过程中经常需要利用新的情报。设计工作中遇到的问题可能提示应采纳其他方案。因此，经常要进行修改并把它们纳入最后的设计中。这种情况与科学家的活动很相似，科学家在自己的研究领域内不断为追求完美而探索。虽然工程师不应片面地去追求完善，但他必须能够认识到不断改进他的方案的好处。为此，最好在拟定设计项目的限期范围时，就估计到很可能要对设计方案进行修改。

或然性的——所用资料和设计者的计算常常带有不确定

因素，工程师必须考虑到即便是在对设计方案作最终评定时也很难做到完全准确，考虑到这一点，经过精心设计仍可使自己的成果达到预定指标。当然，这就需要注意安全性和对可能有的弱点的容许值，这常常需要辅助材料或备用设备，它们将提高产品成本，这一点可能不得不对项目在临界状态下进行广泛研究和试制来弥补。在这方面，航空工业可提供许多实例，一架飞机的超重大大降低了它挣得收入的潜力，所以即使要进行许多试验把不确定性降低到最低限度，在经济上也是合算的。

进行价值比较的——设计和制造方案的最终抉择是根据相对价值和预估产品成本的比较而作出的。价值是一种相对的量，只能通过比较方法来确定。要准确地确定它是困难的，然而这是务必要做的事情。

综合考虑的——尽管有许多不确定的东西，有时间、完善性和费用等各方面要求的矛盾，以及缺乏充分的知识，但重要的是能满足需要。因此，必须在尽可能做到的范围内实现综合平衡，以求问题得到最有效的解决。随着时间的推移，人们将会发现，由于材料和技术的发展，经济的和劳动力市场的以及社会需要的变化，本质上相同的问题要采取不同的解决方法。桥梁结构形式的巨大变化就是多年来各种互相冲突的要求之间的平衡不断变化的一个例证。

设计者的特点

上一节里对设计特点的讨论，导致了对设计者的几点想法：有些从前面谈到的内容可以清楚看出，有些在后面几章中是会逐渐明白的。这里，需要把这些方面集中起来谈一下。要求设计者具备的特点有：