·发明与革新丛书·

谢强安
杨荣奎

工程科学方法论

GONGCHENG KEXUE FANGFA LUN

《发明与革新》杂志社

工程科学方法论

谢强安　杨荣奎　著

目　　录

第一章　绪　　论

研究自然科学的一般方法，包括观察、实验、模拟、比较、分类、假说、分析与综合、归纳和演绎，抽象和具体，以及数学方法、模型方法、系统方法、结构方法、信息方法、理想方法等等。其中观察、实验、分类等法，在学习工程科学的过程中较易理解，本书故不赘述；至于演绎、归纳、设证（假说）等法，是获取知识的基本方法，见诸各种书刊介绍，亦不列入本书重点介绍之列，仅在绪论部分简要阐明。

这本《工程科学方法论》，主要是介绍和探讨在解决工程科学中的若干常用方法。这些方法是人类思维的宝贵财富，是探索科学真理的钥匙，但它往往隐蔽在工程科学理论的后面，成为名符其实的幕后指挥者。当科学家们用钥匙打开真理宝库之门后，人们往往只注意看那些绚丽多彩、美不胜收的知识瑰宝，以至万千学生们为之倾倒、废寝忘餐，至于宝库之门是怎样打开的？我们不无遗憾地看到，反而往往被他们或她们所忽视。这种传统的为学之道，不能不说是一种很大的失策！

众所周知，凡出类拔萃的科学家，他们绝不单是丰富的知识取胜，他们同时也是思想家、方法学家。如果我们的教育只是使学生成为一个知识的贮存器，而日新月异的知识赖以开拓的方法，反而没有教会他们，从而大大的推迟了他们通过系统的方法去思考和开拓新知识领域的时刻，这也不能

不说是长久以来我们教育工作中的一个弊端！

有鉴于此，作者认为：除了给学生灌输一定量的必要的知识以外，更重要的是使学生对分析问题、解决问题的方法与途径有一定程度的了解。这样，不仅有利于学生深入地学好基本理论，还有利于培养学生探索创新的能力。古语云："工欲善其事，必先利其器"，其实，还要得其法才行。因此，为大学生，主要为高年级大学生提供一本方法论方面的参考书，看来是十分必要的。尽管作者才疏学浅，但社会的需要，鼓起了我们的勇气来尝试着承担这一颇为艰巨的任务。但愿能起到一点抛砖引玉的作用。

下面，我们简单温习与回味一下演绎法、归纳法、设证法的基本点：

演绎法的始祖是希腊哲学家亚里斯多得。此法之最大特点是先提出一些坚定不移的基本观念作为前提，据此，对个别事物或现象进行分析和推理，因而所得的结论也是肯定无疑的。

演绎法是把握共性的东西去推论个别。或者说，是从一般到个别的推理，是必然性的推理。作为演绎法的前提，到底是那些呢？众所周知，如几何学家提出的几何公理；哲学家提出的物质都在运动，物质都是可分的观点；物理学家提出的能量守恒观点，等等。都被认为是坚定不移的信念。是放之宇宙而皆准的。

传统的亚里斯多德三段论法，最好的说明了演绎法的特征；所谓三段论证法，是以大前提及小前提作为推论的前项，结论作为推论的后项，例如：

$$
\text{（前项）}\begin{cases}\text{大前提：一切不消耗能量的永动机是实现不了的。}\\ \text{小前提：X装置属于一种不消耗能量的永动机。}\end{cases}
$$

（后项）结论：所以X装置是一种空想。

显然，只要大前提被人们接受，小前提又包括在大前提之中，因之所得的结论必被人们所接受。然而，此种推断法的价值却遭到许多学者的非难，他们认为：演绎逻辑只是在复验已知的公理，无法推出新的知识，甚至被指责为不是为学的好方法。其实，尽管演绎法的特点是结论早存在于前提之中，但演绎推论的结果，可以使前提概念更为深入。例如学几何的学生，通过使几何习题（求证类习题）将发现，要层层剥去结论这位“新娘”的层层面纱，并非易事！而一旦剥去了之后，便会感到大前提之下原来有这么多的派生物，而每多认识一个派生物，也就增多了一份知识。反之，仅熟读若干大的原理、公理，而不能具体应用于复杂万千的物质世界，对于这些原理、公理的本身也只能是空洞的教条。换句语说，只能是不甚了了。

另一方面，所谓坚定不移的观念、原则，对于人们来说，并非天生自明的，只有通过实践的检验，才能真正确立其权威。人类文明史告诉我们，科学上的伟大成就往往是推翻了前人的“坚信不疑”的信念得来的。这是因为人类实践的深度和宽度与日俱增。例如在低速世界里，我们接受了牛顿的绝对时空观念，但发展到了高速世界的今日，我们就必须接受爱因斯坦的相对时空观念。因此，如果有人相信一些观念永恒不变，无可怀疑。那么，他要想在做学问上有大的突

破，恐非易事。

正因为演绎法逃脱不了前提的束缚，对开拓新知识领域缺乏活力。英国学者培根曾指责演绎逻辑法为旧工具，并提出它的新工具——归纳法。

归纳法是以观察、测量、实验为手段，在大量经验材料的基础上进行概括，把事物的本质和规律揭露出来，以求最终建立最普适的公理。譬如说，运动问题几千年来都因为它的复杂性而含混不清，直觉似乎告诉人们：要使一个物体运动起来，必须使它受力，否则物体便归于静止。因此，“力是使物体产生运动的原因”，从亚里斯多德开始，便认为是坚定不移的基本观念了。结果导至了对运动的不正确概念，使力学在一千多年的时间内停滞不前，直到三百多年前，伽里略凭借观察、实验和科学的推理才弄清了这一问题，得出了力是产生加速度的原因这一正确的结论，也就是现在使用的物理教科书中的牛顿定律。形成了现代力学中的一块基石，整个牛顿力学也就建筑在这块闪光的基石之上。它推动了许多门类的科学的迅速发展。

由此可见，以观察、测量与实验为手段，通过大量的事实，归纳出一些规律性的结论，如自然科学中的定律、定理等，并在此基点上运用演绎法，正确推理。这就是现代科学研究中的常用方法。

从已知推出未知，从过去预测未来，这是归纳法的精华所在。也是归纳法成为开拓新的知识领域、创造新境界的有力工具的原因。究其内核，全在于归纳法推论的结果、范围，大过前提，它可以突破前提的藩篱，而不象演绎法的推论总是被前提所束缚。

显然，我们也不能不看到，归纳逻辑的推论具有探险的性质，就是说它有时可以成功，有时也可以失败，结果飘忽不定。这可能使研究者不安，不过，这正给后者提供了发展的余地；成功的可能性，更鼓舞着许多学者去开拓科学王国中的处女地。但值得提醒读者注意的是：归纳推论要得到较高的成功机会，必须满足两个要求，一是取样要多，二是取样要有代表性。这样归纳出来的结果，才不致以偏概全。

作为第三个基本方法的设证法，又名假设法，为美国学者皮尔斯所倡导。

由于演绎法太重视人的理性功能，只在观念当中打转；归纳法则过于强调人的经验，易在事实的海洋中无舵航行。设证法则不然，它是根据已知的科学原理和科学事实拟定假设，把假设作为行动的指针(此点异于归纳法)，但是设证法的假设又不是永恒不变的(此点异于演绎法)，它必须经得起实践的检验。皮尔斯本人所提出的设证法的基本格式如下：

C这个事件令人惊异。但假如A是真的，则C事件就是理所当然。因此，我们有理由假设A是真的。

上述格式中，A就是假设。我们不妨拿物理学中的一个例子来套用这个公式：

Θ—L之谜，令人惊异。但假如弱相互作用下宇称不守恒，Θ—L之谜即可解决。因此，我们有理由假设，弱相互作用下宇称不守恒。这个假设于1956年由杨振宁、李政道共同提出，并由吴健雄成功地用实验证实。称之为“弱相互作用下宇称不守恒定律”，并荣获诺贝尔物理奖。由此可知设证法分为两个步骤：一是假设，二是求证。没有求证，便无法判定该假设是否成立。假设则是从已知达到未知的桥梁。

在知识的茫茫大海中，要找到一座桥梁，诚非易事。研究者在提出假设之后，对于假设的分析及推论，需借助于演绎法。而假设之是否成立，又得接受个别事实的验证，这又带有归纳法的色彩。因此，可以说求知的三大方法并非完全割裂，相反，虽各有侧重，但又互有联系。运用之妙，全在于研究者本人的造诣了。

演绎、归纳、设证三大方法乃是科学研究中最基本的方法，复盖在大方法下的具体工程科学方法是很多的。这些，正是本书所要探讨的主要内容。现简要介绍如下：

由于工程科学研究的对象都是很复杂的，作为一个研究者，首要的是将研究对象去芜存精，抓住主要矛盾来建立自己的研究模型，这就是理想模型法。

当一个工程科学模型提出来以后，通常问题仍是很复杂的，在处理它们时，我们应考虑能否将一个复杂问题分解为若干简单的或答案已知的问题的组合。应该看到，复杂事物总是由简单事物组成的。在这方面，我们重点介绍了叠加法。

在本书中提出了“参数极限化法”，因为在科学研究中贯穿着这样一种思想，即一种事物总是由另一种事物变来的。我们不能把我们所研究的对象孤立地、静止地看待。

有限近似法介绍了一些近似解决问题的方法，虽然数学色彩较浓，但本意不是强调数学方法本身，而是侧重指出它们所体现的实质是什么？是从何种意义上来体现其近似性。

比拟——模拟法，它体现了不同事物间的某种同一性，从而达到由此及彼的效果。因为，当一个系统不仅反映了它自身的规律，同时还反映了被它模拟的他系统的规律，那么，当这个系统的规律易于被我们掌握时，就显得特别有用。

思维形象化，就是在抽象思维过程中借助于图线、图形予以形象化，使其具有某种直观性，转化为形象思维。值得指出的是，如果把用图线、图形来解决问题的方法看成是初等的，认为只有运用较复杂的数学工具才是高明的，这是一种谬见！诚然，在研究某些工程科学问题中，在许多情况下之所以涉及较复杂的数学工具，仅仅是由于必要，而不是刻意追求。

现代科学的发展表明，各学科之间的分工越来越细，主要体现了学科的个性和侧重点不同。将侧重点不同的各学科中的观点、成果互相借鉴、移植，以达到共同提高的目的，这就是科学研究中的互相渗透法。渗透法已经产生了惊人的成果，创造出了不少边缘科学，提供了美妙万千的前景。

一个理论，看来似乎是完美无缺，然而由于新的情况不断出现，它们可能遇到严重的挑战，即已有理论已不能解释和解决新的实践。这时就要求我们突破旧框框的束缚，引入新观念。这就是飞跃，这就是革命！这就是科学不断发展的必由之路。在本书中名之曰“提出新观念法”。读者可从所举的例子中了解到是哪些原因和哪些困难迫使研究工作者去提出新观念、新理论的。

从反面入手法又可名之曰对称法。为了成功，我们必须研究失败；为了装配，也可先研究拆卸。解决工程科学问题，当然也包含在其中，例如在证明某些问题时，我们常使用所谓反证法，即为证明事物的是，却从该事物的非入手。

以上所介绍的，只是几种工程科学中的常用方法，或者说，只是把作者自己所熟悉的方法加以整理而已。挂一漏万，在所难免。又囿于作者的专业知识和学术水平，在每种方法中所列举的实例，取舍亦不免有失偏颇之处，敬希读者不吝指正是幸！

第二章　理想模型法

工程科学和其他一些学科一样，只能是对客观规律的一种近似写真。另一方面，工程科学的目的是指导和解决工程实践。一般说来，只要满足工程实践所要求的精确度就可以了。因此，“近似”作为一种思路，在研究工程科学理论中，占有十分突出的地位。一种近似思想是：将被研究的客体去粗取精，加以理想化，或赋与某种假定的成份（但必须经实践检验，具有一定程度的合理性）。例如，在许多情况下，我们将地球看成是一个半径为6500公里的几何球体，就是这种近似思想的一个体现。另外，也还有一种近似思想，体现在数学计算中，如众所周知：当α较小时，我们常取：

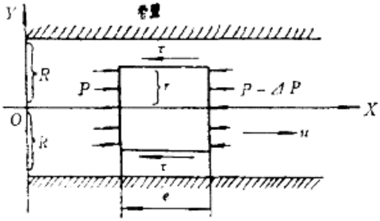
$\cos\alpha\approx 1$，$\sin\alpha\approx\alpha$ 来进行计算。本章所介绍的理想模型法属于前一种意义下的近似，亦即质的意义上的近似。（后一种则是量的意义上的近似）。

事实上，许多工程科学所研究的对象，不作这种质的近似是不可能的。例如前面提到的我们只能将地球看作一个几何球；否则，我们要计算出地球的凸凹不平的真实表面积，是多么不可想像！尽管，地球的真实表面积这个客观事实是存在的。不言而喻，用理想模型来代替真实客体，据以建立的理论与结果，与实践会有某种程度的偏离。修正这种偏离的方法之一是如我们在工程手册中常见的引入某些修正系数。一般情况下，这些修正系数都会允许针对不同情况在一

定范围内取值。

本章所选择的例子，不可能满足所有读者的爱好，仅仅提供读者作为一种借鉴而已。特别值得一提的是，本书已把经济工程包括在论述的范围之内了，这也许是合理的。

A〉**层流与牛顿液体模型**·这是流体力学中一个十分基本的理想模型，由此而建立的理论与结果有十分广泛的工程实用价值。所谓层流是指流动的雷诺数在一定范围内时，流动着的液体按速度的不同而分层地流动。所谓牛顿液体是指满足下面式子的粘性液体：$\tau=\mu\cdot\frac{\partial U}{\partial Y}$，式中$\tau$是流动着的液体分层面之间的切应力，$\mu$为该液体的动力粘度，U为流速，Y为垂直于流速U的座标。下面是基于以上两个理想模型而推导出的圆管内层流公式（习称《哈根一波稷叶》公式）：



如图所示，在内径为2R，长度为l的圆管内，粘度为μ的流体，在两端面压强差Δp作用下，向X轴正向流动。现在要确定这种情况下的流量值Q。前面说过，我们将针对层流与牛顿液体这个理想模型来寻求解答，即假定在各个同一半径的圆环面上具有同一的流速，并且当$r=R$时，流速

$u=o$，其次，因其是牛顿液体，故图中所示半径为r，长为l的这部分流体在向右流动过程中，它所受的粘滞阻力（即切应力τ与此圆柱体侧面积的乘积）等于$\tau\cdot 2\pi rl$。又因在等截面管子中，不存在流体沿X轴向的加速度，不然的话，流体将出现密度变化，而这在视为不可压缩的流体中，自然是不可能的。这样一来，考虑以上流体运动时，就可以不计惯性力。故可列出以下关于图示圆柱体液体流动时的运动方程：

$$\Delta P\cdot\pi r^2-\tau\cdot 2\pi rl=o$$

固　　$\tau-=\mu\dfrac{du}{dr}$

$\therefore$　　$\Delta p\cdot\pi r^2+2\pi rl\mu\dfrac{du}{dr}=o$

根据$r=R$时　$u=o$；解得：

$$u=\frac{\Delta P}{4\mu l}(R^2-r^2)$$

这就是流速随半径变化的分布规律。管中心处出现最大流速值：

$$U_{Max}=\Delta P\cdot R^2/4\mu l$$

由：　$Q=\int_0^R u\cdot 2\pi r dr$

得出：$Q=\pi\cdot\Delta P\cdot R^4/8\mu l$

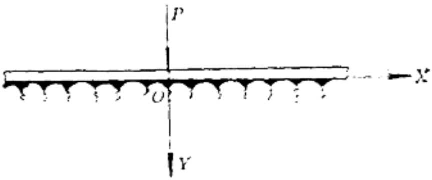
这就是哈根——波稷叶公式。实际圆管中的流量与此式计算结果是有偏离的，这就是因为以上推导出的公式结果是基于理想模型的基础之上，故丝毫不足为怪。现实中的圆管，其内壁均带有一定程度的粗糙度，管轴也不可能绝对的直，截面也带有一定程度的失圆度。这些，在理想模型中均未反映出来，但是在许多情况下，它们只是居于次要的地

位，也就是说，在工程意义上可以忽略不计。

B› **理想地基模型**·在研究置于地基上的受横向载荷的梁及板的弯曲问题时，一个常用的假设是：地基给与梁或板某点处的基础反力，正比梁或板这点的下挠值ω。这就是著名的文克勒尔地基模型。显然，这里将地基理想化了，如果要绝对真实地来描绘地基的力学性质，这是既不可能，也无必要的。下面以基础梁的弯曲作为例子，如大家所熟知的，梁的弯曲微分方程是：（参看下图）

$$EI\frac{d^4y}{dx^4}=q(x)$$

式中$q(x)$代表作用于梁上的横向分布载荷强度。如果没有其他外载，仅只考虑地基反力作用，那么可用“$-ky$”取代上面方程中的$q(x)$即可。（这里k即地基弹性系数）。对于



作用有一集中力P的无限长的弹性地基梁，可在以上方程基础上求解，只须将坐标原点取在P的作用处，且由变形的对称性，只研究梁右边一半的挠曲形式即可。注意到当$x\to\infty$时，梁的挠度与曲率应等于o，即：$\left.\frac{q^2y}{qx^2}\right|_{x\to\infty}=y_{x\to\infty}=o$；故试探解可取成如下形式：

$$y=e^{-\beta x}(C\cos\beta x+D\sin\beta x)$$

式中：$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}}$。

再考虑到X = o处应有 $\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x=0} = o$，于是得C = D；最后考虑条件：在X = o处，梁所受剪力应等于P/2，

即：$EI\left.\frac{d^3y}{dx^3}\right|_{x=0} = \frac{P}{2}$，由此决定出$C = P/8\beta EI$，

于是右半部梁的挠曲函数为：

$$Y = \frac{P\beta}{2K}e^{-\beta x}(\cos\beta x + \sin\beta x)$$

关于有限长的弹性地基梁问题，可运用叠加法予以解决，此方法我们在后面一章中作专门介绍。这里我们选用这个最简单的例子，只在于说明这个理想化了的地基模型是怎样被应用的。

C〉**粘着磨损与磨料磨损的计算模型**·粘着磨损是指摩擦表面存在相对运动时，由于固相焊合，接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面的现象。而磨料磨损则是由于较硬的磨料引起较软的物体表面材料脱落的现象。为了计算两接触面相对位移一单位长度所磨损的体积与正压力之间的关系，在摩擦学中引入了以下的一些理想模型：

I〉粘着磨损的计算模型是假定两接触表面上的粘结点都是一些半径为r的圆形，并且进而假定这些圆形是由半球形乳头经磨损而来。于是，由于每一粘结点的面积是πr^2，它所支承的载荷（垂直压力）即是$\pi r^2 Py$，这里Py是材料的屈服压强。容易设想，当两接触面相对位移等于2r时，此种粘结圆面积即完全脱开，每个粘结点被磨损的体积则是$\frac{2}{3}\pi r^3$。

如设整个接触面上有 n 个接触点，则两板相对位移单位距离时，被磨损的体积为：

$$V = \Sigma \frac{\frac{2}{3}\pi r^3}{2r} = \frac{\pi r^2}{3} n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A)$$

而此时两板间的垂直总压力值是：

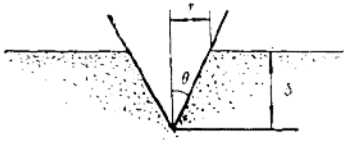
$$W = n \cdot \pi r^2 \cdot P_Y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (B)$$

联立(A)、(B)两式，消去参数n，即得出我们所需要的结果如下：

$$V = W/3p_Y$$

可见，在这种情况下，磨损量正比于正压力值，而与材料的屈服压强成反比，这是意料中的事。

Ⅱ›磨料磨损的计算 模型是假定 较硬的材料的接触面上凸出一些高低相等、锥角相同的圆锥状凸峰，当两板相对移动时，这些圆锥状凸峰将较软的接触面上的材料划去，从而形成磨损。



如图所示，当一个凸峰移动一单位距离时，它所划去的体积为$r\delta$，而$\delta = r \cdot ctg\,\theta$，故假定接触面上共有 n 个相同凸峰时，每位移一单位距离所磨损掉的体积是：

$$V = n \cdot r^2 ctg\,\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (C)$$

假定较软的材料的屈服压强为P_Y，则每一个凸峰所承受的垂直向载荷是$\frac{\pi r^2}{2}P_Y$，故总压力值

$$W = \frac{n\pi r^2 P_Y}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(D)}$$

将(C)、(D)两式联立消去n，即得我们所需要的结果如下：

$$V = 2w \cdot \mathrm{ctg}\,\theta / \pi P_Y$$

这一结果也说明了磨损量是正比于正压力W，而反比于材料的屈服压强。尽管这里引入的理想化模型是失之简单了一些，但事情的主要本质仍被反映出来了。

D）**完全气体与等熵过程模型**·学过气体动力学的读者十分清楚，这里提到的是气体动力学中最基本的概念（实质上是一种理想模型！）完全气体是指严格遵守状态方程：

$$P\upsilon = \frac{P}{\rho} = RT = \frac{R}{W}T$$

以及定容比热C_V为常数的一种理想气体。当压强为O或温度为无穷大时，真实气体精确地服从以上状态方程。在温度不低于临界温度时，只要压强低于临界压强，以上状态方程就相当准确的反映了真实气体的行为准则。但第二条假定对真实气体不及状态方程那样近似准确。特别对于在中等温度下，极高压强的超声速风洞流，应用完全气体模型进行计算，将产生显著的偏差。

所谓等熵流，是一种不计摩擦的理想绝热流动模型。在喷管之类流动中被广泛应用，有实验数据证实（参看A·H夏皮罗：可压缩流的动力学与热力学）用等熵流模型来估算火箭所产生的推力，其误差仅在百分之几以内。等熵流模型由以下关系式来定义：