

第一部分

普朗特纪念报告译文

50 年流动研究之教训

首届普朗特纪念报告，德国，哥廷根（Göttingen），1957 年 2 月 4 日

Albert Betz (Göttingen, Germany)

姚振汉 译 符 松 章光华 校（清华大学航天航空学院）

摘 要：我们对于流动过程的认识所取得的巨大进展，除得益于对许多具体问题的深入广泛研究之外，首先归功于一些有才华的研究者的伟大成就。这些成就为我们开辟了全新的领域，并促使我们的认识产生了巨大的飞跃。有才华的研究者的这种成就对于研究是最为重要的。可惜由于技术的发展所导致的批量生产、批量研究以及其它一些因素的影响，这类研究者的研究变得越来越困难了。因此必须采取有力举措，使他们重新获得良好的研究条件。

1 引言

1904 年路德维希·普朗特（Ludwig Prandtl）在海德堡的第 3 届国际数学家大会上做了一个引起轰动的报告“论粘性很小的流体运动”^[1]。他在报告中指出，当物体在流体中运动时，在物体表面处的一个薄层，即所谓边界层中，会发生巨大的能量损失。由此，他开辟了一条理解工程上重要流动过程的道路，同时也是理论上可以遵循并将由此得到的认知在实际中应用的道路。这个报告标志着现代流动理论的诞生。此外，由于当时正在兴起的航空事业对于解释许多流动过程提出了迫切的需求，一个庞大的科学领域很快就成长起来了，如今它已经变得如此庞大和丰富多彩，以致几乎没有人能够对它完全熟悉和精通。因此在经过半个世纪不平常的发展之后值得我们跟踪这条道路来回顾一下，我们的认识获得了哪些进步。我相信，人们能从这样的回顾中学到，追随进一步发展什么是重要的。这里我将很少对已经得到的许多具体成果加以展开，因为它们是如此众多、各种各样，在一个报告中难以全面综述。我准备在客观认知方面仅限于展开一些像边界层理论那样开辟了全新领域的巨大成就。此外，我准备除追随这些基础思想的进一步发展外，还要总结一下教训，我们的认识的进步主要靠什么，以及为了有效地促进这种进步人们应该做些什么。

2 一些最重要的进展

2.1 边界层理论^①

今天很难想象，在半个世纪之前人们对流动过程的认知还十分贫乏。人们只有一些

^① 译注：原文作者用疏排表示强调，译文用黑体字表示之，下同。

在实践中得到的重要的经验性认知。也存在一个早已建立的势流理论，即无损失流动过程的理论。但是，人们对一个物体在流体中运动时大量能量的损失，并由此使运动物体受到阻力是怎样发生的，还一无所知。当人们估计上述能量损失时，在有势流动中考虑了流体的粘性，但在大多数场合流体粘性是如此小，以致实际上起不到什么作用。由于人们对于能量损失的产生没有正确的解释，对于减小损失当然也就没有有效的方法了。当普朗特在前面提到的海德堡报告中清楚而令人信服地解释了，为什么在流体内部影响无足轻重的粘性，在流动固定边界表面处的一个薄层（即所谓的边界层）中，这个依然很小的粘性却产生了很强的影响，这就使我们对于流动过程的认识发生了一个根本的转变。因为流体附着于壁面，在粘性的影响下必定会发生一个从壁面处静止层到外部速度的逐渐过渡。粘性越小过渡层越薄，即使粘性很小，由于很高的速度梯度也会产生显著的剪应力。对于边界层外部势流的强烈影响也可以通过这个认识来理解，边界层在压力升高的情况下，可能不能再进入高压区而发生分离。普朗特在汉诺威用一个手工制造的小水槽所做的一个给人印象十分深刻的实验证明了他所报告理论的正确性。

差不多 10 年之后发生的一件意外使边界层的概念变得更复杂了：普朗特发现，在边界层内不仅能产生互相平行的层流流动，而且还能产生湍流流动，即带有重叠的涡状横向运动^[2]。著名的艾菲尔铁塔的建造者艾菲尔（Eiffel）在他的风洞中发现，球有两个阻力系数，其中一个是在低速情况下的，另一个是在高速情况下的。这个发现一时使人非常压抑，因为它动摇了整个模型试验的基础，模型试验是建立在模型和大型结构所受流体作用力的系数大致相等的基础上的。普朗特发现，阻力系数不同的原因是，在一种情况下边界层中的流动是层流的，而另一种情况下是湍流的。由模型到大型结构的转换必须要求，模型上起决定性作用的边界层要和原结构有相同的状态，即或者都是层流，或者都是湍流。层流和湍流状态在管道流动中很早以前就由雷诺（Reynolds）观察发现了。但是，湍流形态也能在边界层中出现且大大地改变边界层的性质，这是全新的发现，它使得边界层理论的推演更为困难。这就对边界层理论提出了的一个重要的根本性的相关问题。这个问题又可再分成两个子问题：湍流边界层的特性，以及边界层成为湍流的条件。首先，人们需要仔细研究湍流的规律。普朗特和冯·卡门（v. Kármán）是这一领域研究的先驱。对于管道流动的细致研究揭示了重要的普遍适用的规律。由普朗特引入的“混合长度”的概念使对试验结果的解释变得容易得多^[3]。雷诺的研究发现了层流的不稳定和它向湍流的转换。但是对于这一突变的理论认识在很长一个时期却与数学处理相冲突。对于这个稳定性问题，原有的理论研究得到的结果是流动始终稳定。直到 1921 年才由普朗特和 Tietjens 得到了边界层速度分布在一定情况下不稳定的证明^[4]。这个认识的重要性在于此时的粘性不再像预期的那样只起阻尼的作用，而是对流动起激励作用。这个问题到 1929 年由 Tollmien 从理论上彻底解决^[5]。

边界层的基本思想是简单明了的。由普朗特建立的边界层控制方程看起来也不很复杂。但是这个方程的数学求解却遇到了意外的困难。为了避开这个困难，冯·卡门对问题的提法做了简化^[6]：在许多情况下实际感兴趣的根本不是边界层中速度的精确分布，只要知道一个表征边界层的平均值就够了。对此，人们提出了许多简单的关系式。冯·卡门考

察了边界层中的质量流量和动量流量，稍后 Wiegardt 又引入了能量流量^[7]。这些相关变量的简单的关系式可以满足许多应用要求，对于其他少数情况也提供了非常有用的帮助。同时，还留下了许多问题有待解决，其中包括必须精确计算的速度分布规律。

随着时间的流逝，对于边界层问题的理论解变得越来越急需，于是，代价可承受的求解普朗特边界层方程的方法发展起来了。人们甚至发展到构造可以快速计算层流或湍流边界层的计算滑块装置。但是，这种解法从数学观点来看还有些不满意之处。这种方法一定程度上表现为绕开原则上的困难的一种计算技巧。满意的解应该是深入阐明这种困难的根源，并由此建立一种数学理论，它能概括这种以及类似的根源，并说明如何克服由此引起的困难。近来，像洪水泛滥一样涌现出大量关于边界层问题的理论工作，但是我认为这些巨大数量的工作恰恰是一个标志，说明边界层理论的基本问题还没有得到满意的解决。在这些大量工作之中也有一些很有价值的贡献，它们已成为意义广泛的基础理论。例如 Tollmien^[8]关于无扰流动中边界层转变的完善的数学描述。又如 Görtler^[9]首先详细讨论的壁面处的微商连接条件。但是，我们还缺少一个关于整个问题的满意的解法。按照我的观点来看，我们有些人把数学家们遗忘了。对于解决如此困难而基本的问题自然离不开有高超才能的数学家。这样的数学家很少研究这个问题，而要研究这个问题只有少数几位数学家是远远不够的。这是许多数学家的一种特殊的个性，他们只对搜寻很难的数学领域感兴趣，不乐意全身心投入地研究由外界给他们提出的问题，如果这些问题多少与实际应用有关，就会感觉这些工作对他们是不适合的，甚至是对于纯科学的亵渎。我相信这里存在一个教育上的错误。我们缺少像 Felix Klein 所表现的坚强的指导思想。这位数学家在他的领域内是个巨匠，他很清楚这种学科壁垒的危害，并以他的卓越的组织才能试图在纯科学、抽象科学和实际应用之间架起一座桥梁。他成功地建立了大学里全新的机构——应用研究所。我还记得，通过 Felix Klein 的努力建立了一个后来发展成为空气动力学研究所的机构。Felix Klein 懂得，鼓励像卡尔·隆格这样的学术造诣很高的数学家对应用问题感兴趣并卓有成效地参与。在他的周围呈现了一个技术科学的总参谋部。

在 Felix Klein 去世之后，他的最有才华的学生，如 Sommerfeld、普朗特及其他人继续遵循他的思想开展工作。但是在这一代学者也相继辞世之后，似乎不再有人追随 Felix Klein 的精神了。像 Felix Klein 这样的伟人是非常罕见的，也许一千年才出现一位。但是，一旦了解了天才的难得出现，就应激励我们，把伟人所取得的成就作为最珍贵的文化遗产来加以维护。

2.2 承载机翼理论

除边界层理论外，在承载机翼理论中也提出了新的基本知识。为了飞行人们需要飞行器运动时在与运动方向垂直的方向上受到一个很大的力，即所谓的升力，同时受到一个与运动方向相反的颇小的力，即阻力。后者必须由飞机发动机提供功率来克服。而升力与此相反，它不需要任何功率，因为它是和运动方向正交的，用来承受飞机的重量。为了能够用尽可能小的功率运载尽可能大的重量，必须采用这样的物体形状，其升力和阻力相比要尽可能的大。人们把这样的物体称为机翼或承载机翼。

这种阻力比升力小得多的情况，为理论处理提供了许多有利因素：由于流动是由力来决定的，而力主要是升力，因此人们在许多情况下可以把阻力完全略去，在有些场合至少在一次近似中可以略去阻力。于是人们可以把它看作一种无耗损流动，即所谓的有势流动。这样做在理论和数学描述上比有能量损失的流动要容易得多。机翼垂直于飞行方向的长度——翼展，通常比飞行方向的长度要大得多，这种情况可以使问题进一步简化。人们由此可以将垂直于展向的翼剖面形状影响和沿翼展方向机翼轮廓的影响分开来考虑。当然在更新的时代，特别是对于很高速的飞机必须考虑机翼的形状，而不能再采用这种可以分开考虑的假设。但是，这种简化对于承载机翼理论的如此卓有成效的发展是非常重要的。

下面介绍翼剖面影响。绕一个无限长翼展机翼的流动基本上主要是由 Kutta^[10]和儒可夫斯基 (Joukowski) ^[11]阐明的。两位研究者独立地发现了升力和绕翼剖面的环流之间的重要关系。这种环流的大小确定于它与绕翼剖面的无环量流动结合起来考虑必须在机翼的后缘形成平滑的尾流。两位研究者已提出了计算这种流动的简单方法。至此问题彻底解决了，后来的工作主要是对计算方法的简化和推广。如今人们将这个方法与边界层计算相结合，在正常范围内对阻力也能计算得相当好。对于标准翼剖面计算得到的翼型特性比风洞测量的结果更加精确可靠。

对于机翼轮廓影响的理解，特别是机翼侧端的绕流提出了一个内容丰富的课题。普朗特认识到这个翼端的附加绕流关系到能量损失，并由此产生阻力，这种阻力在给定升力沿翼展分布的情况下可以相当简单地计算出来，人们把它称为翼端阻力或诱导阻力。对这一认识的惊奇之处在于，仅仅基于有势流动的计算就得到了阻力，而人们通常以为有势流动是无耗散的，因此不产生阻力。其解释是：这里涉及的不是定常流动过程，更确切地说，在机翼端部产生的附加流动控制的区域越来越长，因而附加流动的动能也就越来越大。

顺便提一下，这种和扰动运动动能增大相联系的非定常过程是多数大阻力产生的根源，正如人们在非足够细长的物体上观察到的那样。由于边界层的分离不断形成新的涡旋，它的动能就引起阻力。这种人们亲眼可见的过程就是同一时期由冯·卡门发现的涡街^[12]。这种涡渐渐地由于流体的内摩擦而消失，在这一过程中流体的动能转化为热能。承载机翼的诱导阻力是对这个过程定量计算的第一个很好的实例。

当人们可以在给定升力分布的前提下计算诱导阻力之后，马上就面临新的问题：在给定总升力的条件下什么样的分布能使诱导阻力最小。这个问题在对诱导阻力成功描述之后就着手研究了。这个最小值问题的研究被证明是卓有成效的，它的解就是众所周知的椭圆形升力分布。关于最小阻力的大小，人们较容易地得到了它与升力大小及机翼展长之间的一个相当简单的关系式。

人们意外地发现，这个关于最小值问题的简单关系式，对于大多数实际遇到的机翼形状，包括与产生最佳的椭圆形分布的形状偏离很大的机翼形状，都符合得相当好。这个简单的重要公式被认为是年轻理论的伟大成就，并唤起了一种希望，即类似的理论在其他相关领域也能得到简单的结果。可惜这个愿望未能实现。人们可能要问：对于承载机翼理论来说，是否从一开始这个特别的成就是建立在偶然的特别合适的条件基础上

的？实际上就是如此。一方面，诱导阻力是在翼展长度上的一个积分值，它要比一个量沿翼展的分布容易计算得多。我们在边界层理论中也已看到，像冯·卡门那样考察流动的积分参量，问题马上变得容易得多。此外，还有两个有利因素。第一个因素与最小阻力公式有关。阻力是一个函数，但在其最小值邻近变化很慢，因此，当作为最小值前提的升力椭圆形分布不能精确满足时，阻力与其最小值的差别也不大。第二个因素是，人们初步考察时的机翼形状与最佳机翼形状的偏离所引起的升力分布与椭圆形分布的差别也是很小的。两个因素共同起作用，使比较大的机翼形状偏差仅引起升力分布相当小的差别，因而阻力的变化也非常小。由此得到的可贵经验促使人们对别的问题探寻有没有类似前提下的子问题，特别是最大、最小值问题。我不知道能不能找到这样的子问题，但是，我认为人们应该继续对此进行探索。

诱导阻力是承载力翼理论最初的重要成果之一。后来又出现了别的问题，人们马上发现，它的求解在数学上有很大的困难。对于给定的升力分布计算诱导阻力，并求得产生这种升力分布的机翼形状是比较简单的。但是反过来说，对于给定的机翼形状计算升力分布就遇到很大困难。当然，如今用巧妙设计的算法可以在可接受的计算成本下解决这个问题。但是，这里又关系到我在讨论边界层计算时已经提到的问题，这些解法绕过了原本的数学问题以及从高处揭示困难的根源并由此找到求解途径的过程。我曾经在我的博士论文中首次研究了这类问题的一种特殊情况——矩形翼，但是采用了收敛性很差的级数，结果发生了人们所说“向前堵塞”问题，这种算法根本不能用于实际应用。第一个可用的方法是洛茨小姐（Lotz）^[13]提出的。随着时间的推移，方法又改进了很多。据我所知，已经发展了上百种的算法。从方法种类之繁多可见所有这些方法内在的不足。根据我当年对这个问题首次工作时得到的印象，我认为需要对翼端的奇异性问题进行深入的数学研究。我也一直想亲自来研究这个问题，但因为一直有更紧迫的任务而未能真正着手。归根结底，我不是数学家，因此也许胜任不了这个任务。

2.3 高速度

在上面考察的两个领域，边界层理论和承载力翼理论中，一开始就有巨大的划时代的认识，而另一个重要的领域——高速流理论——则在不断的发展之中。许多重要的知识在过去的时代已经初具规模。它一部分来自汽轮机界，另一部分则来自弹道学界。这些知识的前一方面的创造者主要是 Stodola^[14]，另一方面的创造者是 Cranz^[15]，随着时间的推移这方面的知识自然越来越深入发展。人们认识到，无论速度范围低于或者高于声速，困难在于接近声速的范围，特别是部分低于声速、部分超过声速的过程。其中，从亚声速向超声速的转变是连续的，而由超声速向亚声速的转变通常是不连续的，要产生所谓的激波。

这个现象在汽轮机拉瓦尔（Laval）喷管的工作过程中已经被认识到。这种拉瓦尔喷管的截面先收缩然后扩张。在收缩段气体以亚声速流动，在足够的压差作用下在截面最小处达到声速，在扩张段以超声速流出。在适当的压差情况下，在扩张段将出现激波。人们对拉瓦尔喷管中的流动特性已经相当了解，但对物体的自由绕流问题的研究则遇到很大困难。现在，当飞机速度跨入声速范围之后，这个过程变得特别重要。人们迫切地要了

解激波影响下的边界层行为。所有这些工作都取得了很大进展，但是人们还不能说其中已经包含巨大的划时代的认识。我们对这种现象的足够满意的定量描述也还有很远的距离。

2.4 风洞

前面考察的三个研究领域涉及的是理论知识。在实验领域也取得了巨大的飞跃，这就是采用风洞作为空气动力学研究的最主要设备的模型技术。虽然原始的小型风洞较早就已应用，例如用于风车的研究。但是，它在各种流动问题研究中的系统应用则是由艾菲尔铁塔的建造者艾菲尔和普朗特几乎同时引入的。在艾菲尔的管道型风洞中测量段是低压支配的，它必须通过一个气室，即艾菲尔气室，与周围环境隔离开来。在普朗特型的风洞中测量段是大气压支配的，但是它必须用一个特殊的回流段供气，因而这种风洞造价比较昂贵。对于某些目的适用艾菲尔型，而另外一些适用普朗特型风洞。开始时由于艾菲尔风洞建造比较容易、造价较低而建得较多。后来它逐渐被普朗特风洞所取代。其主要原因是适合用普朗特风洞的研究任务发展较快。也许还有一个情况也起着作用，艾菲尔当年建造他的风洞时已经很老了，而普朗特当时还很年轻，因而有时间把他的风洞进一步发展并使之适应实际需要。

早期的风洞是一种便于操作而且相当便宜的设备，用于澄清各种各样的流动问题。人们总是习惯在遇到不清楚的问题时就求助于风洞。于是，主要从事风洞试验的人逐渐积累了大量经验，并可提供给咨询者。但是，随着时间的推移，人们给风洞提的问题越来越难了。为此，人们需要越来越大的风洞和越来越大的驱动功率。人们可以发现，最大风洞的功率每 10 年几乎要增大 10 倍。第一台普朗特风洞需要大约 30 马力^①，而现在几乎需要上百万马力。这自然已经谈不上是便宜而且便于操作的辅助设备了。人们必须要问，这样发展下去是否还有意义。从事这项工作的人指出，对于许多问题得不到比它得到的更好的结果。我认为，这一方面是艾菲尔和普朗特引进风洞的重要性的最清楚的标志；另一方面这又是一个我们时代知识的贫乏的见证。没有人再发现新的、简单的辅助工具来代替越来越大、大到极度的风洞。大约 20 年前，我就指出了风洞功率的这种增大的不合理性以及寻找别的途径的必要性。出于某些试验目的的人已经部分地采用了别的方法，例如采用滑翔机或者自由飞行模型。但是，这些方法的适用性还是相当有限的。我不是这方面的行家，但我有这样的印象：火箭推动和遥控的自由飞行模型可以发展成为有用的研究手段，其中，若要造价比较低廉的火箭发动机，或许可以考虑热水火箭。

避免投资极大型风洞的最重要手段看来是改进与比较简单的模型试验相关的理论。对此，我想以一个简单的例子来解释。上面已经提到，人们对于单个机翼已经很好地掌握了它的理论，对于单个机身也能计算得很好。对于机翼-机身组合只要确定互相之间的影响。对这个问题可以做理论分析，但仍然需要有效的实验验证，这种验证大多可以是非常简化的。为了使这类方法发展成为可用的，人们需要有很高的才干。他们必须同时很好地掌握理论和实验的可能性，此外也要像普朗特那样有本领，将错综复杂的问题

^① 1 马力=735.499W。

分解成几个简单的子问题来解决，同时又要关注问题整体，以便将子问题的解答重新组建为问题的整体。可惜，至今还没有发现这样有才华的人。这里缺乏的不是数学家，而是工程师和物理学家。

如今在原子研究中我们同样看到相应的向特大型发展的问题。那里同样需要富有才能的人来发现新的途径，使现在不得不用庞大的技术耗费来做的事情能用简单一些的方法来完成。

3 当代的发展方向

流动研究对于技术发展具有重要意义，这是它的又一个很大优点，但它同时也带来令人担心的弱点。对于技术的强烈兴趣给予了人们许多激励，防止了研究工作的片面性和僵化，而且也容易提供研究经费。但是，此后技术越来越向批量生产发展，这种趋势也对研究产生了影响，而且是令人担心的影响。其中特别是有才能的研究者的工作受到了负面影响，然而，我们也确实看到，正是这种情况给研究工作带来了伟大的根本性的进步。

当前技术生产的发展表现为在流水线上被高度分解的工作，通过采用工作速度越来越高的机器来代替手工，也许还必须和越来越强有力的自动化联系起来。这种方法有它的优点，生产的产品便宜，部分产品也比较好，但只有在足够批量生产和相应的消费的情况下是如此。但是，也出现了令人不高兴的附带现象：一些不适合批量生产和批量消费的物品在市场上消失了，哪怕它可能是非常迫切需要的。下面这种情况更严重些：生产设备越来越昂贵，而为了追求利润还要不间断地生产，于是生产超过了正常的需求，必须通过宣传来人为地创造需求。例如，人们发明了提高生活水平的口号，这种生活水平经常不是服务于使消费者更愉快，而是给厂商提高收入。消费者出现了对于非必需物品的支出，由此引起了对真正重要的生活需求和对文化质量的维护的限制。此外，由于过分和片面的批量生产，手工业者和熟练工人的地位以及他们的高超技能都受到了损害。

在研究领域人们也能看到完全类似的现象。飞机设计师提出的问题需要越来越大、越来越贵的风洞。为了满足经济上的需求，需要很多很快的测量。面对这种需求出现了现代的自动化的可能性。同样，为了充分利用试验结果，出现了程序控制的电子计算设备，它比普通的计算机要快上千倍甚至更多。将应变天平直接连接到这种计算机就可以提供处理好的测量结果，哪怕是比用常规方法要多上千倍的大量数据。但是，没有人再能对这样庞大的实验数据做仔细考察，因为那需要人们了解文件生成的机械和电子过程，然后从中把感兴趣的无法仔细考察到的实验数据找出来。自然，人们在工业批量生产的时代对于这种实验技术的进步是热情欢迎的。但是，就像商品的批量生产一样，测量结果的批量生产也有它的严重缺点。首先，它和研究工作已经没有太大的关系。它只是设计室需要的辅助工作要素。对于这种目的自动化的批量测量是特别适合的，面对的问题比较统一，试验的评定遵循统一的事先确定的观点进行。自动化的实施比较容易完成。所测量的力也在一个变化不太大的范围之内，因此大都可以用同样类型的模型来处理。

对于真正的研究，人们一般需要少量精心挑选的试验，其结果将按照各种观点来全面考察。只有这样，人们才能认识新的从前没有发现过的现象。普朗特的边界层试验或艾菲尔发现湍流边界层的球体试验就是这样的例子。自然也不能排除一位有才能的研究者从批量试验的结果中也能得出新的基础知识的可能性。在某些情况下，一位有才能的研究者作为管理大项目的顾问也能利用批量试验的有利条件。但是，这是颇为困难而且以往很少见的。

我们尽可能不要给有才能的研究者这种大设备的负担，而应给他们提供使他们有可能实现他们的想法的设备。有人（我相信这是在美国）曾经说过：当人们想要消除一个科学的竞争者时，只要设法使他得到一个大的研究所，管理这个研究所会妨碍他开展原先的研究工作。幸好，除了大型设备之外还有各种不同大小的试验设备，可用来进行真正的研究。我看危险的是，有才能的研究者也同样热衷于这些现代规模和数量的大设备，而不再重视他们本来的任务。

一位有才能的研究者用比较小的辅助设备也能进行很有意义的工作。但是，一旦研究结果对于经济或军事起了重要作用，马上他将会在对其感兴趣的领域内迅速把研究扩大，成为流水线上的研究。在航空方面就是这样的情况。现在我们发现，在核物理方面这种情况是最大规模的。大多数根本不在这种大型企业的研究者，当他得到邀请并对其感兴趣的职位提供必须的资金的时候，他们就往往要参加进去，而后来则常常对处境很不满意。开始给他提供了最充足的支持，当他建立起了必要条件，首先是将合适的助手拉过来，原来答应资金就越来越不够了。如果资金是从国家来的，就会遇到官僚主义的困难；如果是从经济部门来的，就可能因为经济危机而停止提供。在这种情况下研究者必须为保持他所建立起来的条件而奋斗。这种神经紧张的经济斗争自然对他本来的研究工作是十分不利的。

我看到另一个很大的危险是，在现今的环境中，一个有才能的年轻人很难被培养成为一个研究者。研究者必须学会独立地科学地思考。为此必须要有合适的工作，同时也需要有才能的研究者作为榜样来引导他们，就像普朗特给我们作出的榜样那样。普朗特能将一个小的试验做小的改动后一再重复，观察发生的现象，从而阐明其中的关系。外行人说“他在玩”，但这种“玩”的动力是他成功的一个重要前提。

批量研究也需要很多人。总是有一系列的单个问题，其实验和理论研究尽管有自动化设备和电子计算机的帮助，但仍有大量工作需要人工去做。有才能的实验和理论工作者的人数是很少的，我们必须尽可能多地把这些有才能的人争取过来。同时也会产生一批科学才能的贫乏者，在他们的生存竞争中，为了引人注目，一再将他们颇为平庸的工作充斥于期刊和会议。这自然会降低平均的科学水平。对于培养人的学校的要求也降低了。缺乏天赋者必定用死记硬背来代替。很少的天才因此失去了人们可以寄希望于他们的高水平工作的标准。此外还有出版物、广播、电影、电视等很强的外来影响，使人们独立思考的能力在不无忧虑的程度上受到了损害。有一本多次读过的关于愚蠢的书，其中，作者从精神病专家的观点说明了为什么在我们的西方文明中愚蠢一定会增加。除了其他影响之外，他也详细指出了刚刚提到的这些有害影响。