

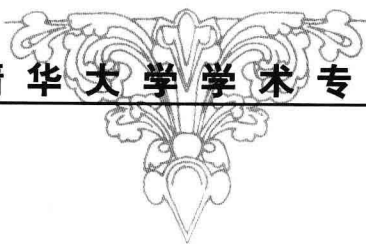
普朗特纪念报告译文集

——一部哥廷根学派的力学发展史

张维 符松 章光华 任文敏 编译



清华大学出版社



清华大学学术专著

普朗特纪念报告译文集

——一部哥廷根学派的力学发展史

张维 符松 章光华 任文敏 编译

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

普朗特教授是德国著名力学家、近代流体力学奠基人、哥廷根学派杰出代表。为纪念他的巨大贡献,1957年起,德国宇航学会和应用数学力学学会在每年应用力学和数学年会上,邀请一位国际著名力学家作纪念普朗特的报告。这些报告内容广泛深入,全面地阐述了普朗特的治学理念、学术成就、研究方法和人格魅力,涉及当时力学领域的最新研究成果和发展趋势,并附有大量参考文献,因而可以说是一部具有很高学术水平和代表性的现代哥廷根学派的力学发展史,是航天航空研发人员、力学研究工作者、教师和研究生极其珍贵的参考资料宝库。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

普朗特纪念报告译文集:一部哥廷根学派的力学发展史/张维等编译.--北京:清华大学出版社,2013
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-31346-5

I. ①普… II. ①张… III. ①流体力学-物理学史 IV. ①O35-091

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 012437 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京雅昌彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:57.75 字 数:1328 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版 印 次:2013 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~1000

定 价:249.00 元

产品编号:023862-01



庄逢甘院士序

在力学的发展史中，哥廷根学派有着特殊的地位，对流体力学尤其如此。哥廷根学派学术思想的实质是理论联系实际，基础研究与应用研究相互融合和相互促进，为工程实践服务；其代表人物是 F. Klein 和 L. Prandtl 等。德国宇航学会和应用数学力学学会为纪念普朗特的重要学术贡献，每年在学会的年会上举办一些普朗特纪念报告，这些报告既代表了当时力学界最有影响的一些学术成果，也是对哥廷根学派学术思想上的弘扬。清华大学的几位老师在张维先生别具慧眼的倡导下，将普朗特纪念报告收集整理，介绍给中国力学界，是一项十分有意义的工作。

哥廷根学派学术思想经冯·卡门传至美国，经钱学森、郭永怀、钱伟长和陆士嘉等传入中国，钱学森更创造性地提出力学是“技术科学”(Engineering and Engineering Sciences)，发展了哥廷学派的思想。我们清华大学的几位同志，在收集整理和翻译这些纪念报告中，深感哥廷根学派的重要意义，并进一步体会到钱学森“技术科学”思想对力学发展的重大作用，应该弘扬和推动这一学术思想并在中国力学界发扬光大。中国的青年学者，应当走哥廷根学派的道路，走理论联系实际的“技术科学”道路，切忌空谈。从工程实际出发，观察分析，提出新思想、新概念和新方法，然后再用在工程上，经过工程的检验。“理论不和实际符合，这样的理论不能叫作理论”。我们认为，当前力学的发展，尤其应该强调这一思想。

这本文集的出版可喜可贺。据了解，文集编者中的章光华和任文敏二位教授均已退休，但面对水平不一的众多样稿一丝不苟，展现了高尚的职业精神。我们希望，若干年后，普朗特纪念文集还能继续出版，使哥廷根学派在中国继续更加发扬光大。

庄逢甘
2010年2月16日

编者序

我们尊敬的中国科学院院士、中国工程院院士张维教授生前十分推崇哥廷根(Göttingen)学派的治学理念和学术风格。概括起来说,那就是理论与实践、科学与技术的紧密结合。张维教授特别重视哥廷根学派对力学学科发展的影响。他始终认为,力学理论应该建立在对自然现象和工程问题细致考察的基础上,而工程力学则应该是一门来源于工程又服务于工程的“技术科学”或“工程科学”。上述理念也正是哥廷根学派的学术传统。据此,他于1958年创建了清华大学工程力学数学系。

普朗特教授(Ludwig Prandtl, 1875—1953)是德国著名的力学家、近代流体力学的奠基人、哥廷根学派的杰出代表,他在近代流体力学和空气动力学方面的贡献对全世界相关领域的发展具有不可磨灭的影响。众所周知,普朗特教授的两项最突出的贡献是边界层理论和机翼理论。有了他的这两项奠基性工作,才使流体力学和空气动力学从抽象理论向应用科学跨出了最关键的步伐。除此之外,普朗特教授在诸如气体动力学,传热学、气象学、乃至固体力学等广大学科领域都有不容忽视的贡献,以致这些学科中的不少定律和常数都以他的名字命名。

普朗特教授于1953年逝世。为纪念他对力学的巨大贡献,从1957年起,德国宇航学会(DGLR)和应用数学力学学会(GAMM)在每年一届的应用力学和数学年会(Jahrstagung)上,都邀请一位国际著名的力学家(其中许多是普朗特教授的学生和同事)作一次纪念普朗特的报告(以下简称普朗特纪念报告),到2009年为止,这样的报告已进行了52次。这些报告的内容既广泛且深入,全面地阐述了普朗特的治学理念、学术成就、研究方法和人格魅力,同时也涉及了当代流体力学和固体力学的研究成果和发展趋势。综合这五十多篇报告,可以说是一部高水平的哥廷根学派的力学发展史。

张维教授专长固体力学,他的夫人陆士嘉教授曾师从普朗特,并在其门下获博士学位,因而他对普朗特的治学理念和学术成就有深刻的认识,生前非常推崇。他在世的最后两年,潜心收集和研究了各届年会上的普朗特纪念报告(这些报告从未综合在一起发表)。他远见卓识地认为,这些报告对于我们了解过去、当前和未来的力学发展道路是一部非常有益的好教材,对于推动我国力学学科发展是一部很有价值的学术文献。由于普朗特纪念报告大部分是用德文发表的,为了便于我国广大力学工作者阅读,张维教授生前曾亲自组织国内的专家学者进行翻译。不幸的是,他突然逝世,竟未留下翻译组织工作的详细资料。经我们多方努力,才找到张维教授就此事与之联系过的部分专家学者,再由我们,特别是符松教授的重新组织、安排以及清华大学航天航空学院的大力支持,才得以完成翻译和编辑工作。幸得清华大学出版社的大力支持,这本译文集今日方能出版面世。这总算实现了张维教授的遗愿,同时我们也能以此表达对张维教授的深切怀念。

这本译文集按年份排序。自1957年至今,一年一次的普朗特纪念报告应有52篇(其中1970年因故未有报告)。遗憾的是,虽经多方努力,在公开出版的文献中我们只收集

到四十余篇报告，这多少给我们留下了些缺失感。除一年一次正式邀请的普朗特纪念报告外，张维教授生前还精选了6篇与普朗特的学术活动有关的文章，包括普朗特本人撰写的著名论文《论摩擦很小的流体运动》、他的学生和亲密合作者撰写的关于普朗特人格魅力的文章、记述普朗特建立并长期工作的“威廉皇帝研究所”的文章，以及三篇有关边界层理论发展历史的文章。这些文章写得生动活泼，对我们了解哥廷根学派的治学风格很有帮助。上述6篇文章我们也请专家译出并收集于译文集的第二部分。

我们认为，这本译文集的出版是一项重要的学术交流工作，希望它对我国的学者和研究生了解哥廷根学派、了解普朗特教授的生平事迹和学术成就，以及了解当代力学（特别是流体力学）的发展有所帮助。我们在每篇译文的最后，都注明了该文的原载刊物，以便读者查阅原文。我们也曾与原文的出版机构和部分报告的作者取得过联系，得到了他们的大力支持，对于他们惠允译文集的出版我们表示衷心感谢。我们特别感谢德国宇航协会（DGLR）前主席 Laschka 教授，他对普朗特纪念报告的翻译工作十分关心和支持。Laschka 教授与译文集的发起人张维教授有深厚友谊，他在张先生谢世后来中国访问时，还特地到清华大学来关注报告的翻译工作。我们还要感谢德国亚琛工业大学 Reimerdes 教授在报告翻译工作中给予的指导和帮助。

报告的翻译工作由相关专业的专家承担，对于他们的大力支持和在百忙中抽出时间承译，我们表示深切的谢意。按原承译要求，各位译者要自己请人校对，但由于种种原因，大部分译者未能请到合适的校阅人。为对读者负责，我们不得不花费大量时间对照原文进行校对，部分译稿在校对中几近重译，这一艰苦细致的工作以及统一译文的格式、专业用语和编辑工作是由清华大学的章光华教授和任文敏教授完成的，符松教授初审了全部译文。校改后的译文，大部分已请原译者复核，但为加快出版进度，一小部分非本校同仁的译文未及请本人复核，尚请鉴谅。本译文集的出版，虽经我们努力，但由于涉及的研究领域广泛和时间紧迫，其中不当之处在所难免，尚冀广大读者不吝批评指正，我们对此将十分感谢。

由于发表原作者文章的期刊以及发表时间先后不同，各篇原文本身及其参考文献的录入格式略有差别。另外，不同译者的译文形式上也不尽相同，例如，人名译为汉字抑或照录原文等。我们考虑到，如果完全统一，则改动较大，反而可能导致错误和不便，因而未能做到完全统一。但是，基本格式、专业术语以及凡已译出的人名地名，我们都尽量做到按国内规范力求统一。

我国与哥廷根学派渊源深远的流体力学家庄逢甘、张涵信、崔尔杰三位院士对于这些报告的翻译出版非常支持，庄逢甘院士欣然为本文集作序，对纪念报告的科学价值给予了高度评价，对哥廷根学派学术思想在中国的传承和发扬十分赞许。这也是对翻译工作的肯定和鼓励，对此我们表示十分感谢。

编者谨识

2010.3 于北京清华园

目 录

庄逢甘院士序	I
编者序	III

第一部分 普朗特纪念报告译文

第 1 届 (1957) 50 年流动研究之教训, Albert Betz	3
第 2 届 (1958) 航空研究之当代问题, Hugh. L. Dryden	15
第 3 届 (1959) 关于低粘性流动中旋涡区的形成, Maurice Roy	43
第 4 届 (1960) 热浮力流和传热, Ernst Schmidt	58
第 5 届 (1961) 获得物理问题一致有效近似解的方法, M. J. Lighthill	74
第 6 届 (1962) 1962 年流体物理的几个方面, Walter Tollmien	90
第 7 届 (1963) 数学家在空气动力学研究中的任务, Robert Sauer	107
第 8 届 (1964) 空气动力学在建筑工程中的应用, Jakob Ackeret	120
第 9 届 (1965) 航空航天工程中的最小值问题, Adolf Busemann	141
第 10 届 (1966) 机翼空气动力学的一些新成果, Hermann Schlichting	154
第 11 届 (1967) 机翼理论的一些发展, Dietrich Küchemann	190
第 12 届 (1968) SAAB 37 “VIGGEN” 飞机的气动弹性研究, Helmut Wittmeyer	209
第 13 届 (1969) 流体力学中线性化的可能性与界限, Klaus Oswatitsch	229
第 14 届 (1971) 行进波, Paul Germain	238
第 15 届 (1972) 多体系统动力学的进展, K. Magnus	257
第 16 届 (1973) 激波, E. Becker	267
第 17 届 (1974) 关于塑性理论发展的思考, Walclaw Olszak	294
第 18 届 (1975) 通往流体力学问题的精确途径, Fritz Schultz-Grunow	319
第 19 届 (1976) 流体力学近似解及其物理解释, Eric Truckenbrodt	333
第 20 届 (1977) 一些特殊的边界层问题, A. D. Young	350
第 21 届 (1978) 粘性导热介质的流动不稳定性, Jürgen Zierep	372
第 22 届 (1979) 流动中的纵向涡, Hubert Ludwig	382
第 23 届 (1980) 非线性声学——回顾与展望, Nikolaus ROTT	395
第 24 届 (1981) 流动声学的新进展, Ernst-August Mueller	407
第 25 届 (1982) 热毛细管流 (热 MARANGONI 对流), Walter WUEST	423
第 26 届 (1983) 尾流运动学, Karl Wieghardt	436
第 27 届 (1984) 湍流中的拟序结构与普朗特的混合长度理论, Marten T. LANDAHL	450
第 28 届 (1985) 弹性稳定, WT Koiter	465

第 29 届 (1986) 流动的不稳定性和向湍流的转捩, John T. STUART	474
第 30 届 (1987) 机翼理论的发展, R Eppler	497
第 31 届 (1988) 激波的 Mach 反射, H. Hornung	516
第 32 届 (1989) 1985 年后 Prandtl 边界层理论的意义, K. Gersten	535
第 33 届 (1990) 自由剪切湍流的边界层理论, W. Schneider	550
第 34 届 (1991) 关于湍流流动计算方法的发展, J. C. Rotta	577
第 37 届 (1994) 粘性流动的分区, H. Oertel jr.	594
摩擦流动中几个区域的数学分析, Oertel, Jr. H.; Delfs, J.	608
第 39 届 (1996) 40 年从事 L.普朗特创立的边界层流动的教学和研究回顾, INGEN, J. L. VAN	627
第 41 届 (1998) 经典气体的非经典流动现象, A. Kluwick	653
第 42 届 (1999) 细长涡, Egon Krause	678
第 44 届 (2001) 飞行模拟和控制设计的空气动力学进展, Peter G. Hamel	704
第 46 届 (2003) 流量测量中的流体力学问题, Wolfgang Merzkirch	735
第 47 届 (2004) 前飞状态下直升机旋翼的流固相互作用, Siegfried Wagner	749
第 48 届 (2005) 后掠机翼的发展, 一项技术挑战 (摘要), Hans-Ulrich Meier	773
第 49 届 (2006) 可压缩湍流: 预测和分析, Rainer Friedrich	775
第 51 届 (2008) 具有跨声速压缩机的现代飞机推进器中的流动, Dietmar K. Hennecke	804

第二部分 其他纪念文章译文

1. (1904) 论粘性很小的流体运动, Ludwig Prandtl	817
2. (1955) 边界层理论和实验 50 年, Hugh L. Dryden	823
3. (1959) 近 30 年来边界层理论的发展, Hermann Schlichting	833
4. (1975) 路德维希·普朗特——人格魅力及影响, Henry Görtler	858
5. (1977) 边界层理论发展史, Itiro Tani	871
6. (1987) 路德维希·普朗特和他的威廉皇帝研究所, A K. Oswatitsch	891
后记	913

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，其中一个是发生在低速情况下的，另一个是发生在高速情况下的。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捩。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。

诱导阻力是承载机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承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，边界层理论和承载机翼理论中，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，并可提供给资询者。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。