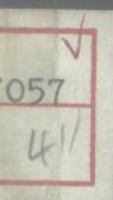


# 流体力学实验教程

[英] M. A. 普林特 [奥] L. 伯斯威特 著 计量出版社



52.7057  
595

# 流体力学实验教程

〔英〕M.A. 普林特

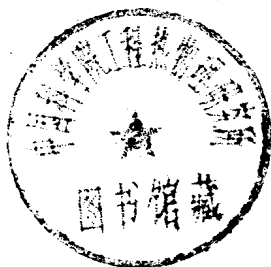
著

〔奥〕L. 伯斯威特

康振黄 李展举 邹盛铨

译

秦贵治 陈君楷 王平子



计量出版社

1986·北京

√ 101775

## 内 容 提 要

本书共介绍十三个典型的流体力学实验,对每一实验相应的理论都有扼要的阐述。主要实验有:自由空气射流;各种喷管中的膨胀;层流边界层和湍流边界层;各种条件下的压力和速度分布、升力和阻力系数的测量。还介绍了各种流动显示技术。另附有计算机程序和实验报告书。

本书主要作为大专院校流体力学专业本科学生和研究生实验课教材,也可供有关工程技术人员阅读。

2-F61/12  
Fluid Mechanics A Laboratory Course  
M.A. Plint and L. Böswirth  
Charles Griffin & Company Limited 1978

### 流体力学实验教程

〔英〕M.A. 普林特 〔奥〕L. 伯斯威特 著

康振黄 李展举 邹盛铨 译  
秦贵治 陈君楷 王平子

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32 印张 7 3/4

字数 179 千字 印数 1—7 000

1983年1月第一版 1986年1月第一次印刷

统一书号 15210·483

定价 1.90元

## 译者的话

据有关方面反应,我国当前毕业的理工科大学生,步入社会参加工作后,不是理论知识不足,而是普遍动手能力不强,往往须要经过一定时间的实际锻炼之后,才能较好地适应和胜任具体的工作。因此,加强学校的实验课教学环节,是一个亟待解决的问题。译者多年从事流体力学教学,苦于没有一本完整的实验教程。M. A. Plint 和 L. Böswirth 的《流体力学实验教程》正是这方面一本不可多得的教材,它以易于接受的形式给读者以足够的资料,使之能够完成流体力学基础的各种实验,并能收到较好的效果。原书在 1975 年用德文出版,1978 年用英文出版以来,普遍受到好评。为此,我们把它翻译出来供读者参考。对原书印刷错误之处译文中已予校正。译文不当之处,祈读者指正。

本书依次由康振黄、李展举、秦贵治、邹盛铨、王平子、陈君楷译;康振黄、邹盛铨校。

康振黄 1983 春节于蓉

## 序

对于工程人员的训练，有一种共同的想法，即无论是专家水平的或是技术员水平的训练，都应包括一定实验课作为其组成部分。在本书所涉及的领域，即流体力学领域里，可能更是这样。有许多现象，在初见时，常使人引以为奇，要解释它们，单靠理论是不够的，还必须以实际观察作为补充。事实上，可以指明，对于有些主题部分，实验室观察，或者至少是课堂演示，应当在理论阐明之前进行。而且，许多实验技术并不是容易的事情，因而去熟练掌握它们就更见重要。

在工科教师之间，对实验课的意见分歧，主要是在教学法方面。是应当给学生以全部的指导，例如按哪个开关，开哪个阀门，或是应当留给他们自己去搞清楚？他们应当只是按照预定的形式去填写结果，或是应当让他们自己把结果组织成一种有机联系的形式？是要求作一个正式的报告，还是只要求单纯陈述其发现和进行简短的讨论？我们对于要学生做的事情规定到何种程度，留给他们多大的余地去研究他们感到有兴趣的东西？

作这种讨论不是著者的目的。我们所致力的是提供不论采取何种教学方法均属必需的基本材料。我们首要的目的是力求使教师的准备工作减少到可以从事的程度。我们想使本书能够适合两种不同方式的使用：或者有讲课教师完全参加，或者在一位实验室技师或助理的一定水平的有限指导和监督下，由学生独立进行。各章的编排尽量便利这一目的。

101775

每章都从有关理论的提要开始，其重点放在基本的物理事实上。著者的有些阐述可能被认为是不合常规的；然而，我们希望这些阐述，能被认识到在解决本学科的传统困难部分，是有启发的。

每章在引论性理论之后，接着就对有关的实验和适用的仪器进行介绍。著者在此并不因为提到特殊的设备而引以为歉，因为我们相信，如果我们仅仅限于就一般而论，我们著作的价值势必大为降低。实验室作业中所遇到的困难，几乎总是实践细节上的问题，它们在实验实际进行之前是不会出现的。就这方面来说，可以强调指出的是，所介绍的每一个实验都曾由这位或那位著者，使用书中提到的仪器亲自完成过。当然，这不是想要叫读者务必使用同样的仪器；而是要指出，由于所介绍的各种实验都曾实际完成过，这一事实，可以保证读者使用适当的设备作这些实验时，预期不会有严重的障碍。

其次，对于特定的实验，给出的都是特定的而不是一般的数学理论。每位教师将可回忆起他在匆忙中必须记住一些东西的情形，诸如各种形式的伯努利方程的量纲，用每秒米表示的空气速度和用毫米水柱压力表示的速度之间的关系，或者各种常用粘度单位之间的关系等等。

接着是对实验程序的简要说明。我们不想对学生作过度细致的说明，而是要指出那些主要容易出岔子的地方，并且提醒学生注意那些在教学实验室和更高级实验室中都经常影响实验结果可靠性的误差和疏忽。

教师在编排一堂实验课时，面临的一个主要任务是要预备适合记录和算出结果用的实验报告纸，为减少这方面工作，著者已为每一种主要实验准备了实验报告书（见附录IV）。

在实验程序一节之后，接着便是介绍一个典型的实验，提出相应的实验报告书和讨论突出的特点。实际测量结果是用来作例子的。但通常只对一次观察完全给出了结果，以免鼓励只从书中抄袭结果。最后，作为对该章论题的一般推广，对进一步的实验工作作了一些提示。我们希望这些提示对于学生们在课程行将结束时常常着手进行的那类设计工作，能成为有用设想的来源。有关所用的一般性实验方法的指示书，在附录Ⅱ中给出。附录Ⅲ讨论在处理实验结果中简单的计算机程序的使用问题。在所介绍的诸实验中，有许多应用计算机的可能性。在这个附录中提出了一些典型的程序。

本书所介绍的实验的范围，适合于学位水平课程的内容；作一些必要的省略和简化，它们同样也可以适合于技术人员水平的课程，例如那些为取得普通和高级国家工程学文凭所设立的课程。

简单提一下本书的来历。它是两位著者在奥地利梅德林，联邦高级技术理论及实验研究所（Mödling, Höhere Technische Bundeslehr-und Versuchsanstalt）彼此合作一年之久产生的成果。一位著者是奥地利一所学院的固定成员，这所学院是在奥地利同类工程学校中最大的学院。另一位著者则多年在英国从事工程学实验室设备的研制工作。本书的两种版本，一种英文的和一种德文的，均已完成。希望本书能附带起到一点小小的作用，促使大陆的和英国的工程教育体制的特点及各自的优点有相互的了解。

本书的一个续篇，关于热力学实验课，正在准备中。本书全部使用国际单位制（SI）。

著者衷心感谢英国、德国和奥地利许多杰出的教师的建议和帮助；特别要提出的是 Brunel 大学的 George Jackson

教授，伦敦帝国学院现任热力学讲师 E. Glaister 博士和帝国学院水力学高级讲师 Paul Minton 先生。

最后，著者要表示对奥地利联邦教育及艺术文化部 (Austrian Bundesministerium für Unterricht und kunst) 的 H. Schlöss、博士教授的感谢，没有他的帮助和鼓励，本书是不可能写成的。

M. A. Plint

L. Böswirth

Wokingham/Mödling

1977. 4

## 主要符号

根据英国标准1991：部分1（1976）和部分3（1961）；  
文字符号，标记和缩写。

|        |          |
|--------|----------|
| $a$    | 加速度，音速   |
| $A$    | 表面积，截面积  |
| $c, C$ | 常数       |
| $C_D$  | 阻力系数     |
| $C_L$  | 升力系数     |
| $C_o$  | 收缩系数     |
| $C_d$  | 出流系数     |
| $C_f$  | 表面摩擦系数   |
| $C_v$  | 速度系数     |
| $c_p$  | 定压比热     |
| $c_v$  | 定容比热     |
| $D$    | 阻力       |
| $d$    | 直径       |
| $E$    | 能量       |
| $F$    | 力        |
| $f$    | 管流中的摩擦因子 |
| $g$    | 重力加速度    |
| $H$    | 油柱高      |
| $h$    | 液柱高，油楔宽  |
| $i$    | 观察指标     |
| $K$    | 开尔文      |

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| $k$       | 薄膜厚度比                   |
| $L$       | 升力                      |
| $l$       | 长度                      |
| $m$       | 质量                      |
| $\dot{m}$ | 质量流量                    |
| $n$       | 转/分, 垂直于流线的坐标           |
| $p$       | 压力, 动量                  |
| $\dot{p}$ | 动量流量                    |
| $p_t$     | 总压                      |
| $p_v$     | 动压(滞止压)*                |
| $p_s$     | 静压                      |
| $\dot{q}$ | 体积流量                    |
| $R$       | 圆柱体半径, 气体常数             |
| $r$       | 曲线的半径                   |
| $s$       | 轴承间隙                    |
| $T$       | 开尔文温度                   |
| $t$       | 时间, 翼型厚度, 摄氏温度          |
| $V$       | 体积, 无量纲速度               |
| $\dot{V}$ | 体积流量                    |
| $v$       | 速度                      |
| $v_s$     | 比容                      |
| $W$       | 速度函数 (附录A. I, 表A. I. 1) |
| $w$       | 比重                      |
| $x, y, z$ | 直角坐标                    |
| $(Ma)$    | 马赫数                     |
| $(Re)$    | 雷诺数                     |

---

\* 本书有时将动压叫作滞止压, 而一般教科书称总压为滞止压——译者注

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| (S)             | 萨默菲数                   |
| $\alpha$        | 入射角, 一般的角度             |
| $\gamma$        | $C_p/C_v$              |
| $\delta$        | 边界层厚度, 半楔形角            |
| $\delta_1$      | 位移厚度                   |
| $\varepsilon_0$ | 湍流中的表观粘度               |
| $\rho$          | 密度                     |
| $\eta$          | 距壁面的无量纲距离              |
| $\mu$           | 动力粘度, 马赫角              |
| $\nu$           | 运动粘度                   |
| $\tau$          | 剪应力                    |
| $\phi$          | 一般的角度                  |
| $\Gamma$        | 环量                     |
| $\Psi$          | 喷管的流函数 (附录 1, 表 A.1.1) |

# 目 录

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 序 .....                            | (1)  |
| 主要符号 .....                         | (1)  |
| 第一章 本书的目的和使用方法 .....               | (1)  |
| 第二章 流体流动的流型 .....                  | (5)  |
| 2.1 引 言 .....                      | (5)  |
| 2.2 势 流 .....                      | (5)  |
| 2.3 流动显示技术 .....                   | (9)  |
| 2.4 雷诺数和相似性 .....                  | (15) |
| 2.5 层流和湍流 .....                    | (18) |
| 第三章 动量定理 .....                     | (21) |
| 3.1 理论基础 .....                     | (21) |
| 3.2 动量定理: 实验 .....                 | (24) |
| 3.2.1 实验 1: 自由空气射流 .....           | (24) |
| 3.2.2 测量和计算 .....                  | (27) |
| 3.2.3 结果的讨论 .....                  | (30) |
| 3.2.4 进一步的实验和问题 .....              | (31) |
| 3.2.5 实验 2: 阻力的测量: 力-动量定理的应用 ..... | (32) |
| 3.2.6 测量和计算 .....                  | (38) |
| 3.2.7 结果的讨论 .....                  | (42) |
| 3.2.8 进一步的实验和问题 .....              | (44) |
| 第四章 伯努利方程 .....                    | (46) |
| 4.1 理想流体定常流动的伯努利方程 .....           | (46) |
| 4.2 伯努利方程: 实验 .....                | (49) |
| 4.2.1 实验 3: 圆柱体的压力分布: 阻力系数 .....   | (49) |
| 4.2.2 测量与计算 .....                  | (52) |
| 4.2.3 结果的讨论 .....                  | (54) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 4.2.4 进一步的实验和问题.....                  | (55)  |
| <b>第五章 边界层</b> .....                  | (57)  |
| 5.1 研究发现的简要回顾.....                    | (57)  |
| 5.2 边界层: 实验.....                      | (61)  |
| 5.2.1 实验 4: 平板上的层流及湍流边界层 .....        | (61)  |
| 5.2.2 测量和计算 .....                     | (64)  |
| 5.2.3 结果的讨论 .....                     | (66)  |
| 5.2.4 进一步的实验和问题 .....                 | (66)  |
| <b>第六章 管流</b> .....                   | (68)  |
| 6.1 理论撮要.....                         | (68)  |
| 6.1.1 层流管流 .....                      | (69)  |
| 6.1.2 湍流管流 .....                      | (70)  |
| 6.1.3 利用喷嘴和小孔测量流量.....                | (73)  |
| 6.2 管道与喷嘴内的流动.....                    | (75)  |
| 6.2.1 实验 5: 在光滑管中的速度分布剖面及压力损失 .....   | (75)  |
| 6.2.2 测量及计算 .....                     | (76)  |
| 6.2.3 结果的讨论 .....                     | (79)  |
| 6.2.4 进一步的实验和问题.....                  | (79)  |
| 6.2.5 实验 6: 通过喷嘴和小孔的流动: 流量测量 .....    | (80)  |
| 6.2.6 测量及计算 .....                     | (81)  |
| 6.2.7 结果的讨论 .....                     | (84)  |
| 6.2.8 进一步的实验和问题.....                  | (86)  |
| <b>第七章 翼型</b> .....                   | (87)  |
| 7.1 翼型升力研究: 库塔-儒可夫斯基公式 .....          | (87)  |
| 7.2 翼型: 实验.....                       | (94)  |
| 7.2.1 实验 7: 围绕翼型的压力分布, 升力系数, 环量 ..... | (94)  |
| 7.2.2 测量和计算 .....                     | (95)  |
| 7.2.3 结果的讨论 .....                     | (96)  |
| 7.2.4 进一步的实验 .....                    | (96)  |
| 7.3 实验 1 到 7: 一般的讨论.....              | (97)  |
| <b>第八章 可压缩流体的流动</b> .....             | (106) |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| 8.1 可压缩流: 基本方程 .....                 | (106)        |
| 8.1.1 理想气体的能量方程 .....                | (106)        |
| 8.1.2 声 速 .....                      | (107)        |
| 8.1.3 压缩激波: 正激波 .....                | (109)        |
| 8.1.4 压缩激波: 斜激波 .....                | (110)        |
| 8.1.5 普朗特-迈耶膨胀 .....                 | (113)        |
| 8.1.6 通过双楔形翼型的二维流 .....              | (113)        |
| 8.1.7 超声速流中升力的产生 .....               | (114)        |
| 8.2 喷管中的可压缩流 .....                   | (115)        |
| 8.2.1 理想气体一维等熵膨胀的基本方程 .....          | (115)        |
| 8.2.2 实验 8: 收敛喷管和收敛-扩张喷管; 质量流量 ..... | (121)        |
| 8.2.3 测量和计算 .....                    | (122)        |
| 8.2.4 结果的讨论 .....                    | (125)        |
| 8.2.5 进一步的实验和问题 .....                | (128)        |
| 8.2.6 实验 9: 在收敛-扩张(拉伐尔)喷管中的膨胀 .....  | (128)        |
| 8.2.7 测量和计算 .....                    | (129)        |
| 8.2.8 结果的讨论 .....                    | (129)        |
| 8.2.9 进一步的实验和问题 .....                | (131)        |
| 8.2.10 实验 10: 平行喷管中高亚声速的膨胀 .....     | (132)        |
| 8.2.11 测量和计算 .....                   | (134)        |
| 8.2.12 结果的讨论 .....                   | (134)        |
| 8.2.13 进一步的实验和问题 .....               | (135)        |
| 8.3 平面超声速流 .....                     | (135)        |
| 8.3.1 实验 11: 通过双楔形翼型的超声速流 .....      | (135)        |
| 8.3.2 测量和计算 .....                    | (136)        |
| 8.3.3 结果的讨论 .....                    | (138)        |
| 8.3.4 进一步的实验和问题 .....                | (141)        |
| <b>第九章 液体动力润滑 .....</b>              | <b>(142)</b> |
| 9.1 液体动力润滑的基本理论 .....                | (142)        |
| 9.2 液体动力润滑实验 .....                   | (148)        |
| 9.2.1 实验 12: 收敛油楔中的压力分布 .....        | (148)        |

|        |                           |       |
|--------|---------------------------|-------|
| 9.2.2  | 测量与计算 .....               | (150) |
| 9.2.3  | 结果的讨论 .....               | (151) |
| 9.2.4  | 进一步的实验和问题 .....           | (152) |
| 9.2.5  | 实验 13: 自动空气轴承中的压力分布 ..... | (152) |
| 9.2.6  | 测量和计算 .....               | (158) |
| 9.2.7  | 结果的讨论 .....               | (159) |
| 9.2.8  | 进一步的实验和问题 .....           | (160) |
| 附录 I   | 标准公式和常数 .....             | (161) |
| 附录 II  | 实验室实习及实验方法 .....          | (167) |
| 附录 III | 计算机程序 .....               | (177) |
| 附录 IV  | 实验报告书 .....               | (185) |
| 参考文献   | .....                     | (230) |

## 第一章 本书的目的和使用方法

本书的目的简单地可以说是：它要以易于接受的形式，给予学生足够的资料，使他们能够完成包罗流体力学基础的广阔范围的实验工作，而毫不浪费努力。

各章的安排是：每章都从准备理论的一个简短提要开始，给随后的实验奠定基础；这当然不是一种广泛的罗列，而是一种“辅助记忆录”(*aide-memoire*)，以唤起对课堂上已学过的基本原理的清新记忆。我们希望使用本书的教师将会发现，这个提要为一次准备实验讲课构成了一份充实的讲稿。这种讲课建议最好在实验时间前几天进行。另一方面，在进入实验室之前，学生还应该自己再学习这一段，并且应该回溯到有关的课堂笔记和教科书。有一些属于更高深性质并且对实验的理解不是很根本的材料，用小体字印刷，更初级的学生可以略去它。

接着是介绍实验和著者作这些实验用的仪器。当然，读者不必都要使用同样的仪器。但建议学生应在预定上课时间之前一些时候，事先观察仪器，例如，可以在上一次实验时间将近结束的时候进行。

再下面一段是叙述该项实验特定的理论基础，确定各种常数和无量纲集以及提出计算结果用的数学程序的要点。常用公式在附录 I 中给出。关于实验方法的一段应当仔细学习，并且还应当以对仪器的检查和实验室可能备有的更详细的指导书作为补充。

至此，学生应当能够进行实验工作了。读者将会发现，

在二至三小时的一次实验时间内，取一组读数，作一条初步的实验结果的曲线，尽可能完成所有必需的计算，通常就够一组三至四名学生忙碌的了。适合记录观察结果和绘制结果曲线的实验报告书，缩小了比例，复制于附录Ⅳ中。许多情况下，结果的处理可归结为一个简单计算机程序的题目，各种提示在附录Ⅲ中给出。

在实验过程的描述之后，每一章都给出了一或二组典型的结果来说明算出它们的方法。给出对实验结果的深入讨论，并不被认为是恰当的；这是，或者说应该是学生作业的一个部分，如果他们想要从其实验室经验中获得最大好处的话。但是，对从观察结果中产生的那些，须要作讨论的问题，还是作了各种提示。

最后，每章在结束的时候，对在很多情况下使用同样一些仪器进行更高级实验工作的进一步可能性作了提示。我们希望这在计划更高等的设计工作中会有用处。本书的安排力求与这些课题的理论教学中通常采用的计划相同。此外，还要强调指出，各个实验在其相应的课题已经在课堂讲到之后，即应尽快进行，以最大限度地加强教学效果。

第二章是这种安排方式的一个例外情况，这章涉及的是各种流动显示方法。流动显示实验室对于许多更加困难的流动特征的了解，是一种极有价值的辅助手段，建议在实验和课堂教学计划的进程中，应该反复参观。对于这些流动特征，只有在学习了其数学理论，研究了速度和压力的定量测量结果并对流动进行了观察研究之后，方能充分了解。

力-动量定理应该在伯努利方程之前先学习，还是应当反过来，这还是一个有意见分歧的问题。前者更具基础性，但实验测量结果用后者更容易加以解释；一些读者可能因此宁愿在作第三章的那些实验之前，先作第四章中的实验。