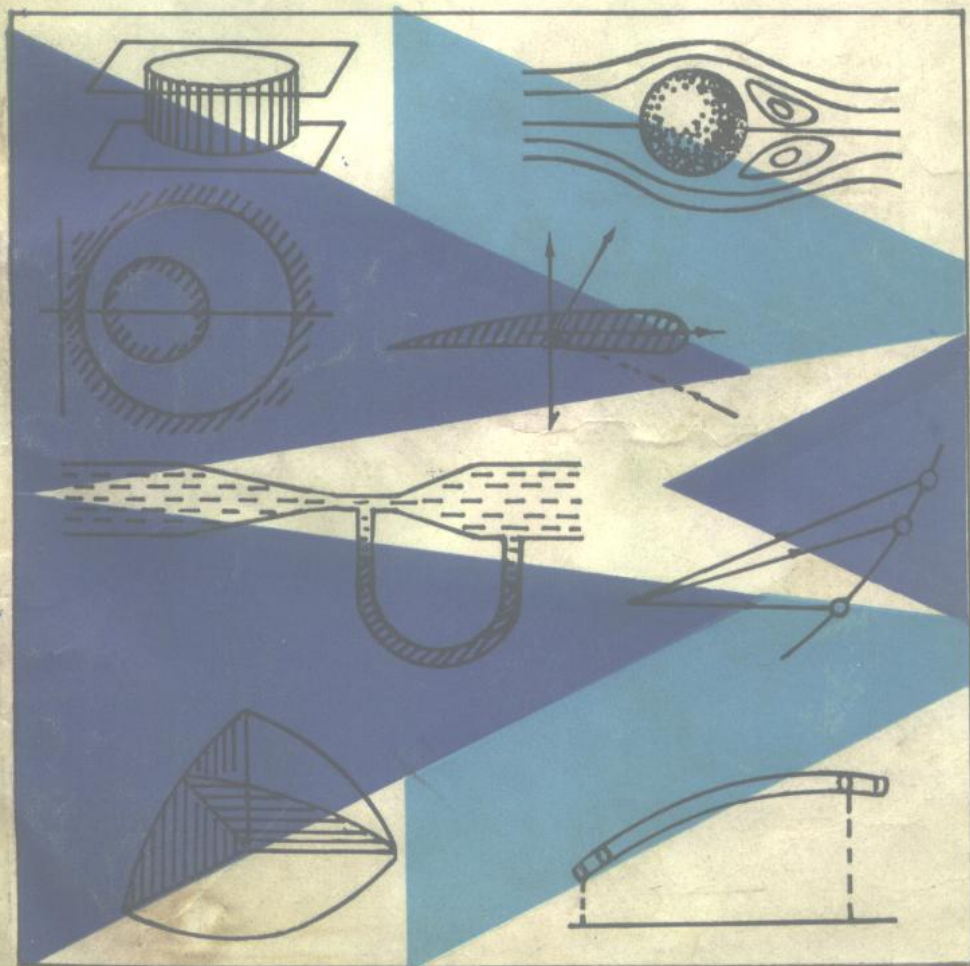


408

理论流体力学

Theoretical Hydrodynamics



52.712
203

理论流体动力学

[美] L. M. 米尔恩-汤姆森 著

李裕立 晏名文 译

晏名文 校



机械工业出版社

101449

本书是世界名著。它既是流体动力学基础理论书籍，又是百科全书式专著。全书共 23 章，主要内容有：伯努利定理及其各种推论；矢量张量和复变函数预备知识；从复变数的统一观点详尽阐述二维势流理论及其各种应用，包括柱体绕流、射流潜流、带空腔的流动、直涡线和旋涡尾迹引起的阻力、在重力作用下有自由面的流动的精确分析方法和线性重力波；用保角映射方法分析三维轴对称流动球和椭球的一般运动；一般旋涡运动和有限翼展机翼诱导阻力；亚音速和超音速流动导论；粘性流动理论基础；小雷诺数流动近似方法；二维层流边界层理论等。每章之后附有大量习题。

本书可作为理工科大学机械、造船、航空、水利、海岸海洋工程以及力学等专业师生的教学参考书，也可作为广大科技人员的进修读物。

ZF65/03
THEORETICAL HYDRODYNAMICS

L. M. MILNE-THOMSON, C. B. E.

FIFTH EDITION

Revised

Reprinted 1979

THE MACMILLAN PRESS LTD

理论流体力学

[英] L. M. 米尔恩-汤姆森 著

李谷立 晏名文 译

晏名文 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 27·插页 2·字数 701 千字

1984 年 9 月北京第一版·1984 年 9 月北京第一次印刷

印数 00,001—11,500·定价 4.00 元

统一书号：15033·549G

译者序

流体动力学最近加紧向相邻学科渗透，并借助电子计算机扩大其在工程技术领域中的应用。然而无论哪一发展方向都脱离不开原有理论基础。我国已经出版了一些自编和翻译的流体动力学书籍，但是理论阐述得深透而又全面的并不多。为了广大科技人员充实理论知识，增强研究设计能力，为了有助于提高我国理工大学流体动力学的理论教学水平，我们翻译了英国著名学者米尔恩-汤姆森著的《理论流体动力学》。

这部巨著是流体动力学的经典名著，在世界各国同行中享有很高声誉。从问世以来该书五次修订，多次重印，发行世界各地。

本书概念清晰直观，理论透彻系统完整，内容详尽，包括近代理论成就。书中许多材料在一般教材中是找不到的。因此本书既是优秀教学参考书，又是渊博的百科全书式专著和指南。全书有 600 多道习题，有的不久前还是研究课题，有的则可作为正文的补充。因此对大学有关专业师生和自学者来说，本书是独一无二的习题集。

本书作者的论述是第一流的。尽管书中有些问题是经典性的，但是他仍力图用现代观点进行阐述，介绍较新成果，指出发展方向。他在阐述同一问题时绝不重复已有的版本，例如他采用两个复变数的函数统一论述了二维问题，包括非定常流动；在旋涡理论部分作者应用现代观点叙述得相当完整。至于书中采用的并矢理论，我国读者对此并不熟悉，因此在书后加入了有关附录。

中译本是按原书 1968 年修订的第五版，1979 年重印的版本译校的，并参考了 1964 年苏联出版的俄译本，附上若干俄译本的注释和附录。本书第 1~14、18、19、21~23 等章和俄译本附录由李裕立译，第 15~17、20 章由晏名文译。全书由晏名文校订。由于译者水平有限，加以译校匆促，书中谬误疏漏在所难免，请予指正。

作者序

本世纪以前,由于计算和观察结果之间有很大差别,理想流体动力学逐渐被看作是一门学院式学科,因而得不到实际应用。然而,兰彻斯特提出的理想流体环量理论解释了机翼升力;普朗特作出了关于边界层之外流体粘性可以忽略的假设。于是人们最终承认,这些成就给理想流体动力学的发展以新的推动力。这门学科始终是船舶设计师必不可少的学问,并且由于现代飞机的出现,这门学科跨入了先进科学的行列。

流体运动的研究自然分为两部分:(1)实验研究或应用研究;(2)理论研究。后者力图解释实验结果,预测尚未实验的过程。因此应用研究和理论研究彼此相辅相成。本书仅阐述理论研究。

当一种科学理论变得更精确时,它确实要更数学化。但并不是说,所用的数学工具变得更复杂更深奥,而是说,当基本定律能用数学表述清楚时,许多有用的结果可以通过精确的数学方法得到。本书的目的在于对流体运动的数学理论作透彻、清楚而又有条理的入门介绍。这些理论对于流体动力学和空气动力学都是有用的。本书是在作者的理论流体动力学讲义的基础上编写而成的。此讲义我在格林威治曾向英国皇家海军造船队(Royal Corps of Naval Constructors)的初级班学员讲授过。

作者决心彻底打破理论流体动力学的传统叙述方法,自始至终采用矢量符号和矢量方法。对于二维流动,则采用上述方法的自然变型复变函数理论。在流体动力学中,这些方法的应用本身不是什么新东西,但是就作者所知,在流体动力学中完全采用这些方法的,在本书问世以前还未有过。读者所需的数学预备知识不超出普通数学分析教程的范围。根据需要书中补充了必要的数学工具。因此在这方面作者试图使本书保持适当的完整性。因为我们处理的是实际问题,因此书中广泛采用了插图(甚至在理想模型

中也是如此)。全书的插图约有 400 幅。为了便于参考,这些插图是按相应的章节编号的[⊖]。

作者试图通过章节顺序编排使叙述的题目加以合理分类。当然,这样的顺序决不是唯一的,但是它似乎有某些优点。第 1 章带有绪论性质,主要介绍以著名的伯努利定理为基础的各种推论。顺便提到,伯努利应该看作流体动力学之父。

第 2 章阐述矢量和张量的这样一些性质:在分析流体单元的运动和建立流体动力学方程时,这些性质是很重要的。这里引入的矢量与坐标系的选择无关。矢量运算的基本性质是通过运算微积分方法推导出来的。这里阐述的运算微积分方法容易应用于,并且直接导出斯托克斯定理、高斯定理和格林定理。因为这是一本关于流体动力学的书,而不是介绍矢量的书,因此对矢量理论只作简要叙述。另一方面,在安排矢量理论的内容时,考虑到了对矢量运算不熟悉的读者的要求。作者建议,读者要完全精通本章的内容,如果必要的话,应该经常查阅。本教程充分注意所研究的现象的物理意义。一般说来,在特殊的坐标系中描述现象,其物理意义会弄得模糊起来。但是求出适当的坐标函数应是完成问题的数学描述的最后阶段。在第 3 章根据矢量方法研究了流体运动的连续性、动力学方程、压力、能量和涡量的一般性质。在这里矢量方法的优点是显而易见的。

第 4 章,在不用复变数的条件下阐述了二维运动的固有特性。第 5 章离开本书的主题;引进定义为矢量算子的复变数,并且证明了以后要用的一些定理。特别是,鉴于保角映射在以后的应用中有很重要的意义,对它的性质进行了相当详细的讨论。

第 6 到 15 章构成一个整体;并且试图从复变数的统一观点,对二维运动进行详细讨论,其中充分应用关于圆的定理(6.21 节)、Area 定理(5.43 节)、保角映射和布拉修斯定理及其推广。第 6 章从讨论势流开始,接着在第 7 章研究简单的茹柯夫斯基翼型。第

[⊖] 应该指出,章节编号的整数部分表示章数,例如 4.21 节位于 4.50 节以前,并且两节都属于第 4 章。——原注。

8章讨论源汇。在第9章中详细研究了柱体运动,并且得到包括加速运动情形在内的广义库塔-茹柯夫斯基定理(9.53节)。第10章讨论施瓦兹-克里斯托弗尔保角映射定理及某些直接应用。第11、12章介绍进一步的应用问题:射流、潜流的间断运动,以及在柱体后面流动中的空腔,包括优秀的勒维-奇维塔方法。第13章讨论直线旋涡、卡内满街以及物体后面的旋涡尾迹所引起的阻力。第14章是新增加的。这一章论述了当重力场存在时,且有自由面的二维运动的各种精确分析方法。第15章谈到上一章题目的一些近似方法,一般是线性化方法。重点是波动问题。

在第16章中引进斯托克斯流函数,将保角映射方法应用于三维轴对称问题。球体和椭球的一般运动在第17章里作了论述。在第18章中应用对矢量的偏微分(2.71节),得到矢量形式的克希霍夫方程。这样用两个矢量方程代替了原来的六个方程。据信,到现在为止这个方法仍然是新的,并且为研究稳定性问题提供了可能性。第19章一般地讨论旋涡运动,并且介绍了这种运动对有限翼展机翼的特殊应用。

第20章可以作为亚音速和超音速可压缩流体运动理论的导论。可压缩流体中的源已在8.90节讨论过,而可压缩流体中的旋涡已在13.8节中作了阐述。

第21章以令人信服的逻辑推理,把张量方法应用于粘性流体流动,特别是粘性液体流动。指出这一点是有意义的:对于任何正交坐标系,用矢量方法推导粘性液体中的应力分量是多么简单。

第22章是新增加的,论述小雷诺数流动和一些有关的近似方法,包括将复变数理论应用于斯托克斯流动这样新颖的方法。

第23章也是新增加的,概述二维层流边界层理论。

在每章后面都附有习题。全书共有621道习题,其中很多取自试题。我对那些提供试题的单位和个人表示衷心的感谢。这些试题中有的来自剑桥大学的数学荣誉学位考试,有的来自伦敦大学的理科硕士学位考试,有的来自英国皇家海军学院的少校船舶设计师考试。除此以外,还包括在我的讲义中使用过的其它各种

来源的题目,现在还不知道它们的出处。L. N. G. Filon 教授后来给我约 100 道习题。在这些习题中有的很容易,有的却很难,可以作为正文的补充。

在叙述定理时,我尽可能把它和它的发现者的名字联系起来,作为它的来源的充分说明。但是不应当设想,在每一种情况下这里的表示方法和最初定理的原来表示方法一样。例如高斯可能用比喻方法和符号形式讨论并表述了 2.60 节中的高斯定理。书中在适当的地方附上参考文献。但是我并不打算将参考文献系统地列出来。我仿效拉姆(Lamb, 1849~1934)将负号与速度势梯度联系在一起。在准备出版新版本时,我有机会采纳许多读者提出的建议,对此表示衷心感谢。

本书出版以来受到了热情欢迎。这鼓励我继续研究进一步的改进。除了材料编排有较大更动和采用了一些新的叙述方法以外,第五版与第四版的差别在于:作了若干重要的补充,包括重力作用下的流动,小雷诺数流动和边界层等章。

由于我的同事 W. R. Dean 教授和我以前的学生 W. E. Conway 博士的帮助,大大减轻了我的繁重的校对工作。他们两位对本书还提出了很多宝贵的建议。我对这两位朋友表示深切的谢意。

L. M. 米尔恩-汤姆森, 1971, 8.

希腊字母表

希腊字母		英文读音
α	A	alpha
β	B	beta
γ	Γ	gamma
δ	Δ	delta
ϵ	E	epsilon
ζ	Z	zeta
η	H	eta
θ	Θ	theta
ι	I	iota
κ	K	kappa
λ	Λ	lambda
μ	M	mu
ν	N	nu
ξ	E	xi
\omicron	O	omicron
π	$\tilde{\omega}$ Π	pi
ρ	P	rho
σ	Σ	sigma
τ	T	tau
υ	Υ	upsilon
ϕ	Φ	phi
χ	X	chi
ψ	Ψ	psi
ω	Ω	omega

历史大事记

伯努利(D. Bernoulli, 1700~1783)首先采用流体动力学这一术语,将流体静力学和水力学包括在这门科学之内。他还发现了以他的名字命名的著名定理。

达朗贝尔(d'Alembert, 1717~1783)研究了物体在流体中运动的阻力,发现了以他的名字命名的疑难,并且提出了液体运动的质量守恒原理(连续方程)。

欧拉(Euler, 1707~1783)建立了理想流体运动方程,并且发展了有关数学理论。拉格朗日(Lagrange, 1736~1813)继续进行了这方面的工作。

纳维(Navier, 1785~1836)从分子相互作用的某一假设出发,导出了粘性流体运动方程。

斯托克斯(Stokes, 1819~1903)也导出了粘性流体运动方程。他可以看作是近代流体动力学理论的奠基人。

兰金(Rankine, 1820~1872)发展了源汇理论。

赫姆荷兹(Helmholtz, 1821~1894)提出速度势这一术语,建立了旋涡运动和间断运动的理论,在这一领域作出了重要贡献。

克希霍夫(Kirchhoff, 1824~1887)与瑞利(Rayleigh, 1842~1919)继续研究流体的间断运动以及这种运动引起的阻力。

雷诺(O. Reynolds, 1842~1912)研究了粘性流体运动,提出层流和湍流概念,并且指出由一种流动急剧转变为另一种流动。

茹柯夫斯基(Н. Е. Жуковский, 1847~1921)对机翼理论和机翼设计作出了杰出贡献,发现了以他的名字命名的翼型。

兰彻斯特(Lanchester, 1868~1945)对近代飞行理论作出了两项重要贡献:

(1) 引进作为升力原因的环量概念:

(2) 引进作为诱导阻力原因的翼尖旋涡概念。在 1894 年举行的伯明翰自然科学史学会的会议上,他阐述了自己的理论。但是这个理论当时并未发表,一直到 1907 年才在他的“空气动力学”一书中发表出来。

普朗特(Prandtl, 1875~1953)在 1904 年提出了划时代的边界层理论,从而使粘性流体概念和无粘性流体概念协调起来。

照片图

(所有照片中的流动方向都是从左向右)

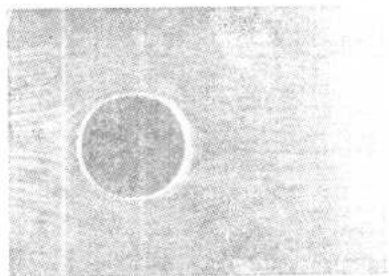


图1 无粘的圆柱
绕流(势流)

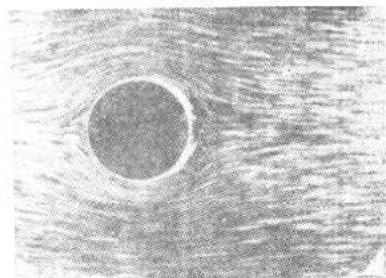


图2 圆柱后面边界层中的回流;
边界层物质的积聚

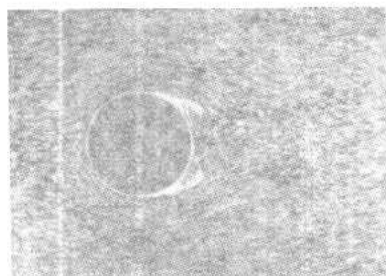


图3 形成两个旋涡;流动
从圆柱体分离

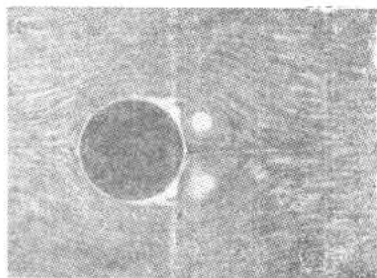


图4 旋涡尺寸增大

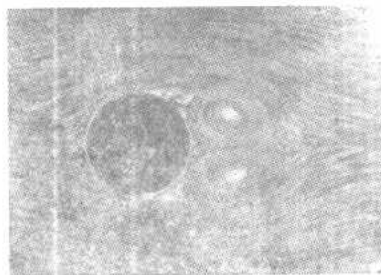


图5 旋涡经一段时间
得到的最后绕流照片

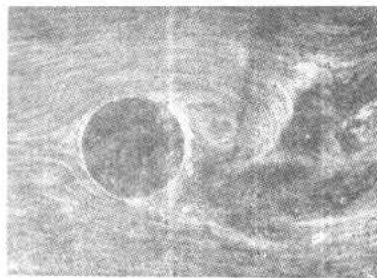


图6 旋涡仍在增长,最后流动图
案变为不对称,尾流破碎

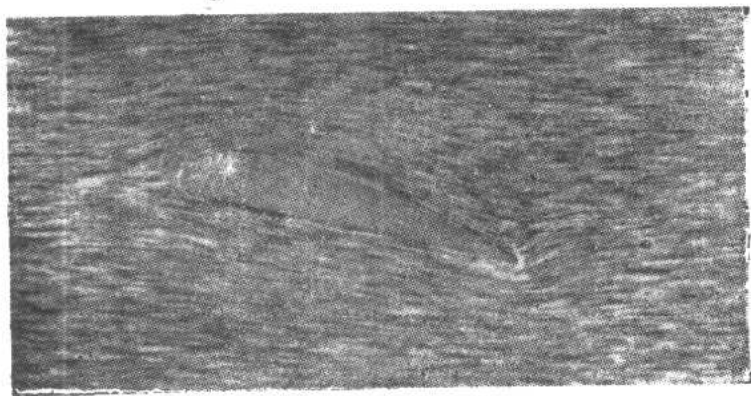


图7 起动后初始时刻的翼型绕流的流线

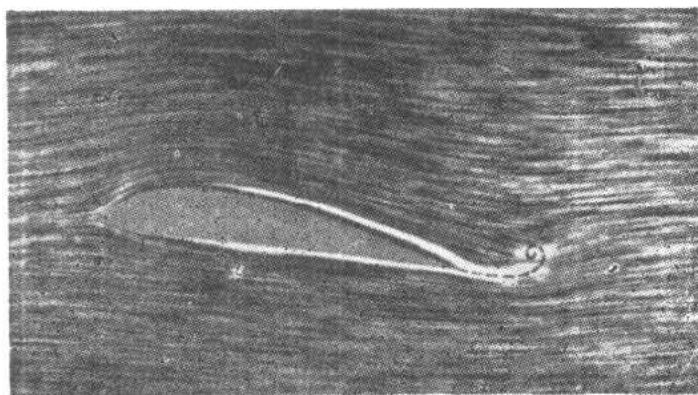


图8 起动涡形成,并随流体流向下游

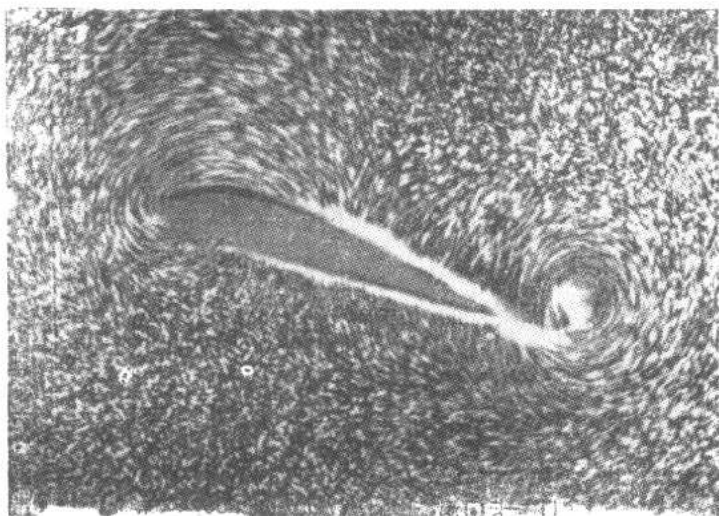


图9 类似于图7, 但照相机相对于未扰动流体是静止的, 曝光时间较短, 冲角较大, 因而有较大的起动涡

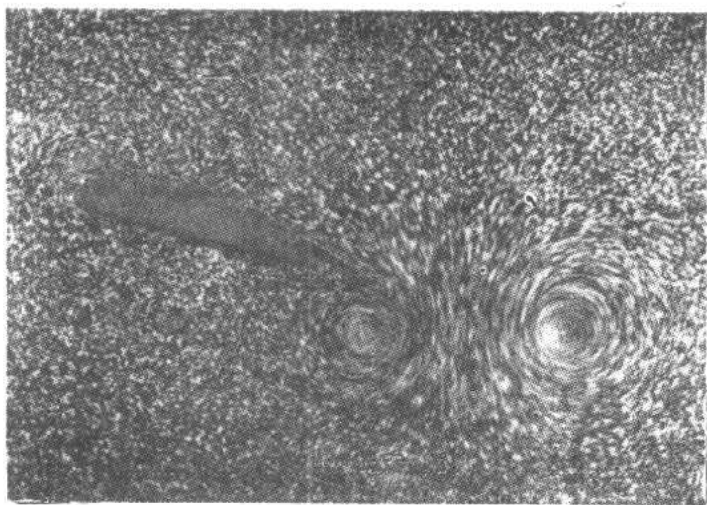


图10 起动涡形成后, 翼型停下时拍的流动照片

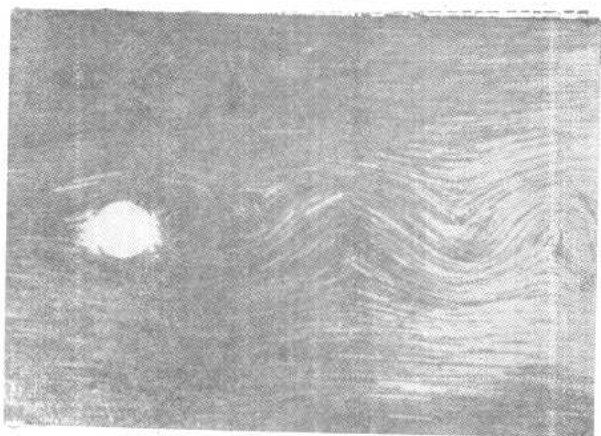


图 11 卡门涡街; 雷诺数 $wl/\nu = 250$, 照相机
相对于圆柱体是静止的

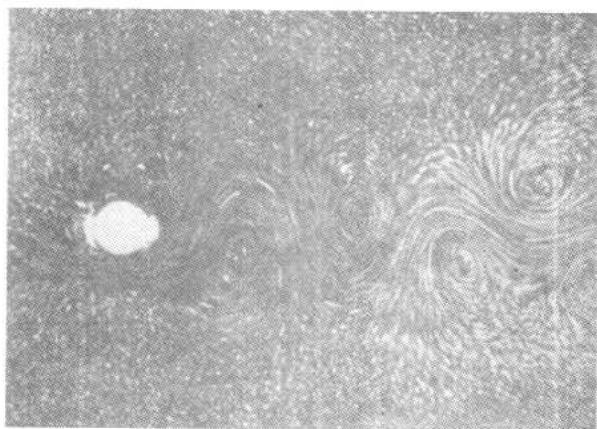


图 12 卡门涡街; 雷诺数 $wl/\nu = 250$, 照相机
相对于未扰动流体是静止的

目 录

译者序

作者序

希腊字母表

历史大事记

第 1 章 伯努利方程 1

1.0. 导论 1

1.01. 物理量的量纲 3

1.1. 速度 4

1.11. 流线和质点轨迹 5

1.12. 流管和流丝 6

1.13. 流体团 7

1.2. 密度 7

1.3. 压力 8

1.4. 伯努利定理 9

1.41. 渠道流动 11

1.43. 液体的伯努利定理中的常数 11

1.44. 流体动压力 12

1.5. 皮托管 13

1.6. 气体膨胀时所作的功 14

1.61. 正压流动的伯努利定理 15

1.62. 伯努利定理在绝热膨胀中的应用 16

1.63. 亚音速及超音速流动 18

1.64. 收缩管中的气流 19

1.7. 汾丘里管 19

1.71. 用汾丘里管测定气流速度 20

1.8. 孔口出流 21

1.81. 托里析利定理 21

1.82. 收缩系数 22

1.9. 欧拉动量定理 24

1.91.	作用在细管壁上的力	24
1.92.	达朗贝尔疑难	25
1.93.	障碍物绕流	26
第1章	习题	28
第2章	矢量和张量	31
2.1.	标量和矢量	31
2.11.	两个矢量的标量积	32
2.12.	两个矢量的矢量积	32
2.121.	分配律	34
2.13.	三重标量积	34
2.14.	三重矢量积	35
2.15.	矢量的分解	36
2.16.	张量	36
2.19.	标量场和矢量场	41
2.20.	曲线积分、曲面积分和体积分	41
2.22.	坐标的标量函数的变化	44
2.23.	算子($\mathbf{a}\nabla$)	46
2.24.	算子 ∇ 的广义定义	46
2.32.	施于一矢量或标量的微分算子	48
2.33.	施于乘积的某些算子	49
2.34.	将算子 ∇ 应用于某些乘积	50
2.40.	流体单元运动的分析	52
2.41.	涡量	54
2.42.	环量	54
2.50.	斯托克斯定理	55
2.51.	斯托克斯定理的推论	57
2.52.	无旋运动	58
2.53.	保守力场	59
2.60.	高斯定理	60
2.61.	高斯定理的推论	61
2.615.	螺旋管矢量构成的等强度管	62
2.62.	格林定理	63
2.63.	格林定理的应用	64
2.70.	笛卡儿坐标	66