

[苏联] Ф. И. 弗兰克里 A. A. 依里依娜

E. A. 卡尔波維奇著

彈丸空气动力学



国防工业出版社

PDG

目 录

前言.....	7
序.....	8
第一章 导管中的流动和压力的初等理論	34
§1. 气体流的基本参量	34
√ §2. 空气动力和力矩；它們的系数	57
§3. 等熵气体流的基本方程	62
§4. 从容器中流出的气体的等熵定常流。气态参量与气流速度的关系。拉伐尔噴管	85
§5. 正激波	100
§6. 斜激波	108
§7. 压力的初級理論	122
§8. 压力的初級理論（續）	139
§9. 导管中的摩擦和热傳导。空气动力损失和热损失	167
习题	171
第二章 摩擦和热傳导的理論基础	174
§1. 粘性导热气体的基本运动方程	174
§2. 粘性流体在常断面圆管中的层流定常流。摩擦系数	185
§3. 边界层的理論基础	188
§4. 平面薄板层流边界层中的摩擦	199
§5. 繞任意周綫环流时的层流边界层。层流边界层的分离	216
§6. 圆管中的乱流和薄片的乱流边界层	222
√ §7. 迴轉体的摩擦阻力和抑制彈丸旋轉的力矩的計算	236
习题	246
第三章 炮彈空气动力学的实验方法	253
√ §1. 用射击测定彈丸的空气动力特征数	253
√ §2. 高速风洞	258
√ §3. 空气流速度的测定	264

§ 4. 在风洞中作用于物体上的力和力矩、压力和摩擦应力 的测定	274
§ 5. 气体动力学的相似	277
习题	282
第四章 气体的平面平行等熵定常流。无限翼展的机翼	
理论	287
§ 1. 气体平面平行流的基本方程	288
§ 2. 环绕圆柱体的流动	308
§ 3. 欧拉问题和关于升力的儒可夫斯基定理。查浦雷金公式	317
§ 4. 环绕儒可夫斯基——查浦雷金翼型的流动	331
§ 5. 薄翼理论	347
§ 6. 高亚音速的情况	360
§ 7. 高亚音速时无限翼展机翼的理论。C.A. 贺利斯基阿 諾維奇法	372
§ 8. 欧拉问题和对于高亚音速关于升力的儒可夫斯基定理	384
§ 9. 亚音速时薄翼的线性化理论	389
§ 10. 气体的平面平行定常流。超音速的情况	394
§ 11. 用特性线法求平面平行超音速流动的问题	407
§ 12. 绕凹角的流动。超音速气流环绕楔和平面薄板的流动	425
§ 13. 环绕任意尖前缘无限翼展机翼的流动	432
§ 14. 无限翼展机翼有侧滑的飞行	445
习题	448
第五章 有限翼展机翼理论	462
§ 1. 以亚音速的速度运行的机翼 (简引)	463
§ 2. 以超音速的速度运行的机翼 (简引)	473
§ 3. 一般方程	480
§ 4. 点源的位。延迟位。运动的源	486
§ 5. 以亚音速运行的机翼	504
§ 6. 超音速气流中的有限翼展机翼。齐次解法	516
§ 7. 超音速气流中的三角形机翼	535
§ 8. 高超音速时的长方机翼	565
§ 9. E.A. 克拉西里希柯娃法	574

§ 10. 迎角为零时环绕对称机翼的流动。波阻	601
§ 11. 有限翼展机翼理论最重要的公式	619
习题	624
第六章 具有轴对称性的绝热定常流。环绕迴轉体的环流	631
§ 1. 亚音速的情况。贺利斯契阿諾維奇法的应用	631
§ 2. 超音速的情况。特性綫法的应用	657
§ 3. 环绕细长迴轉体的流动。亚音速的情况	720
§ 4. 环绕细长迴轉体的流动。超音速的情况	746
习题	764

彈丸空气动力学

著者: Ф.И.弗蘭克里
〔苏联〕 А.А.依里依娜
Е.А.卡爾波維奇
譯者: 張 協
校者: 張 述 祖



中国科学院力学研究所
图书室

重 印 說 明

本书是利用旧紙型重印的，其中第 1—33 頁刪去，全書頁碼不銜接，這次重印尚未更正，希請讀者諒解。

КУРС АЭРОДИНАМИКИ В ПРИМЕНЕНИИ
АРТИЛЛЕРИИ СЦММ СНАРЕДВМ

【苏联】Ф. И. Франкль, А. А. Имина

Е. А. Карпович

ОБОРОНГИЗ 1952

•
弹 丸 空 气 动 力 学

張 粉 譯

張 逸 祖 校

•
國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

•
850×1168 1/32 印張 23 9/16 714 千字

1958 年 6 月第一版 1964 年 9 月第二次印刷 印数：801~1,450 册

統一書号：15034·146 定价：（科七）4.40 元

目 录

前言.....	7
序.....	8
第一章 导管中的流动和压力的初等理論	34
§1. 气体流的基本参量	34
✓ §2. 空气动力和力矩；它們的系数	57
§3. 等熵气体流的基本方程	62
§4. 从容器中流出的气体的等熵定常流。气态参量与气流速度的关系。拉伐尔噴管	85
§5. 正激波	100
§6. 斜激波	108
§7. 压力的初級理論	122
§8. 压力的初級理論（續）	139
§9. 导管中的摩擦和热傳导。空气动力損失和热損失	167
习题	171
第二章 摩擦和热傳导的理論基础	174
§1. 粘性导热气体的基本运动方程	174
§2. 粘性流体在常断面圆管中的层流定常流。摩擦系数	185
§3. 边界层的理論基础	188
§4. 平面薄板层流边界层中的摩擦	199
§5. 繞任意周綫环流时的层流边界层。层流边界层的分离	216
§6. 圆管中的乱流和薄片的乱流边界层	222
✓ §7. 迴轉体的摩擦阻力和抑制彈丸旋轉的力矩的計算	236
习题	246
第三章 炮彈空气动力学的实验方法	253
✓ §1. 用射击测定彈丸的空气动力特征数	253
✓ §2. 高速风洞	258
✓ §3. 空气流速度的測定	264

§ 4. 在风洞中作用于物体上的力和力矩、压力和摩擦应力的测定	274
§ 5. 气体动力学的相似	277
习题	282
第四章 气体的平面平行等熵定常流。无限翼展的机翼	
理论	287
§ 1. 气体平面平行流的基本方程	288
§ 2. 环绕圆柱体的流动	308
§ 3. 欧拉问题和关于升力的儒可夫斯基定理。查浦雷金公式	317
§ 4. 环绕儒可夫斯基——查浦雷金翼型的流动	331
§ 5. 薄翼理论	347
§ 6. 高亚音速的情况	360
§ 7. 高亚音速时无限翼展机翼的理论。C.A. 贺利斯基阿 诺维奇法	372
§ 8. 欧拉问题和对于高亚音速关于升力的儒可夫斯基定理	384
§ 9. 亚音速时薄翼的线性化理论	389
§ 10. 气体的平面平行定常流。超音速的情况	394
§ 11. 用特性线法求平面平行超音速流动的问题	407
§ 12. 绕凹角的流动。超音速气流环绕楔和平面薄板的流动	425
§ 13. 环绕任意尖前缘无限翼展机翼的流动	432
§ 14. 无限翼展机翼有侧滑的飞行	445
习题	448
第五章 有限翼展机翼理论	462
§ 1. 以亚音速的速度运行的机翼 (简引)	463
§ 2. 以超音速的速度运行的机翼 (简引)	473
§ 3. 一般方程	480
§ 4. 点源的位。延迟位。运动的源	486
§ 5. 以亚音速运行的机翼	504
§ 6. 超音速气流中的有限翼展机翼。齐次解法	516
§ 7. 超音速气流中的三角形机翼	535
§ 8. 高超音速时的长方机翼	565
§ 9. E.A. 克拉西里希柯娃法	574

§ 10. 迎角为零时环绕对称机翼的流动。波阻	601
§ 11. 有限翼展机翼理论最重要的公式	619
习题	624
第六章 具有轴对称性的绝热定常流。环绕迴轉体的环流	631
§ 1. 亚音速的情况。贺利斯契阿諾維奇法的应用	631
§ 2. 超音速的情况。特性綫法的应用	657
§ 3. 环绕细长迴轉体的流动。亚音速的情况	720
§ 4. 环绕细长迴轉体的流动。超音速的情况	746
习题	764

前 言

本書系根据苏联国防出版社1952年印的Ф.И. Франкль, А. А. Имина, Е.А.Карповил 合著的《Курс Аэродинамики в применении артиллерии сдм снарядов»一書譯出。

本書适用于从事彈道研究的人員，也适于炮兵彈藥方面的技術人員和靶場工作人員等參閱。

由于譯者學識淺陋，文字水平不高，書中所譯一切理論和詞句，难免有不當之處，甚至是錯誤。希望讀者指正。

本書譯稿曾由張述祖教授校正，提出很多寶貴意見。譯者謹致以深切的謝意。

譯 者

1957年5月

序

本教程包括空气动力学中解釋和計算炮彈在空气中的运动所必需的各篇。

空气动力学是流体的力学或流体力学的一部分。后者分为流体静力学——关于液体和气体的平衡的知識，和流体动力学——关于液体和气体在运动时諸质点間的相互作用，以及它們与位于运动着的液体或气体中的物体之間的相互作用的知識。

空气动力学是流体力学各篇中的一篇，在十九和二十世紀之交，它形成了一門独立的科学。

空气动力学的研究对象主要是空气与在空气中运动的物体（首先是飞机和炮彈）之間的相互作用。

这样，我們把彈丸的空气动力学理解为在彈丸的給定运动时空气运动的理論，以及空气作用于彈丸上的力和力矩的理論●。

空气动力学問題的一部分系在流体力学的另一篇——气体动力学(气体的动力学)中討論。把气体动力学理解为伴随有很大的密度改变的那些气体运动的理論，这里很大的意思是指在研究这些运动时，不能把气体密度的改变忽略不計。这些現象特别是发生于物体以与音速可以比拟的速度或者是以高于音速的速度在空气中运动时。因此高速空气动力学是气体动力学的一部分；自然它占有本教程較大的一部分。

本教程不涉及不属于炮彈空气动力学的气体动力学問題，例如气体在炮膛內的运动問題。

本教程的結構系由它的目的决定的。在第一章中討論有关作用于彈丸上的压力的問題。这些問題可以用初等的数学方法叙述。单是在这一章中讀者就已熟悉影响压力的所有最重要的物理現象。

● 应当把彈丸飞行的动力学与彈丸空气动力学区别开来，彈丸飞行的动力学叫做外彈道学。如果认为空气动力学的定律已經知道，这門科学使我們可以求出彈丸在空气中的运动。

在第二章中叙述摩擦力的理論和通过在空气中运动着的物体表面的热傳导的理論。因此在第一章和第二章里所討論的是在彈丸空气动力学中起作用的主要物理現象。在第三章里叙述实验研究的最重要的方法，特別是在風洞中的模型实验的方法和空气动力（气体动力）相似理論。

以后各章系用于闡述需要比較复杂的数学方法的理論的各篇。在第四章里叙述在亚音速时和在超音速时作用于无限翼展机翼上的压力的理論。这个理論在邏輯上和历史上都先于相应的有限翼展机翼（彈丸的尾翼）的理論和旋轉体（彈体）的理論，有限翼展机翼的理論和旋轉体的理論在本书的第五章和第六章里叙述。这时首先是对超音速空气动力学感兴趣的讀者，可以不預先研究比較困难的亚音速空气动力学，而直接研究这两章相应的部分。研究超音速时的彈体空气动力学，需要熟悉超音速时平面平行流的理論；为了这个目的而預先研究最困难的第五章是不需要的。

作者們认为必須預先告訴讀者，使得他不把这一教程中所讲的結果和方法看作是不容改进和使其更为准确的教条。空气动力学发展的很快，任何一个专家，哪怕他只是几个月不注視文献，他便已經开始大大落后了。

前四章主要是 Ф. И. 佛兰克尔写的，第六章和第四章的一部分是 A. A. 伊里伊娜写的，第五章是 E. A. 卡尔諾維奇写的。练习题大部分是 B. A. 切尔諾娃編写和解出的，作者們对她表示謝忱。总編輯是 Ф. И. 佛兰克尔。

作者們对于苏联科学院的通訊院士 Л. И. 謝費夫对原稿的仔細审查和許多意見表示謝忱。

原
书
缺
页

10-33

第一章

导管中的流动和压力的初等理論

§ 1. 气体流的基本参量

气体物理学中的知識

叙述气体动力学的过程系利用空間坐标 x, y, z 和時間 t 。如果質点的速度在各坐标軸上的投影（以 u, v, w 表示它們），以及状态的諸物理参量都已知为 x, y, z, t 的函数，那末过程便完全确定。我們將用“右手”坐标系，亦即这样一种坐标系，当沿着与 x 軸的方向相反的方向看时，我們看到 y 軸轉到 z 軸是沿着逆时針的方向旋轉90°的角。

在气体动力学过程中，起作用的主要是下面一些表征气体在某一点某一瞬間的状态的物理参量：压力 p ，密度 ρ ，絕對温度 T ，单位質量的內能 e ，粘滯系数 μ 和导热系数 λ 。

状态的独立参量只有两个，作为这样的参量可以取，例如，密度和絕對温度。

1. 气体的状态方程

决定气体的压力与密度和温度的关系的方程叫做气体状态方程。

压力乃是在法綫方向上作用于充滿气体的容器器壁单位面积上的力，此力与气体的密度和温度有关。压力是用气体的分子因其不規則的热运动而引起对于器壁的撞击来解释。

气体状态的理論，所謂气体分子运动学說，早就为十八世紀俄羅斯的院士Д.Н. 柏努里在他的“流体动力学”一書的第十章中和M.B.

罗蒙諾索夫在他的著作“空气彈力理論的實驗”中（刊载于1747~48年的“彼得格勒科学院評論”中）奠下基础。只是过了一百多年以后，这个理論才在克勞修斯，馬克斯韋，范德瓦耳斯和玻耳茲曼的著作中得到了进一步的发展。

Д.И. 柏努里在上述著作中首次引用了绝对温度，認為它与热运动的平均速度的平方成比例。他所得出的状态方程在現今的記載中有如下形式

$$p = \frac{\hat{R} \rho T}{1 - \left(\frac{b}{4} \rho \right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (I.1)$$

式中 $\hat{R}$ 为气体常数， b 为余容，等于一个克分子所占的体积的四倍。密度很小时，方程 (I.1) 变为方程

$$p = \hat{R} \rho T, \quad (I.2)$$

这已为柏努里本人所指出。

当 $\frac{b}{4} \rho \ll 1$ 时，也就是当气体的单位体积中所含有的分子的体积比一小得很多，并且各分子間的引力不起作用时，方程 (I.2) 可以应用。在这样一些条件下，我們說是理想气体或完全气体。在普通的条件下，大气可以看作是完全气体。

一直到現在，在高温和密度大到分子間的距离与分子直径的大小为同一数量級时（在此情况下，分子的自由路程长与两个相邻的分子表面間的距离相同），柏努里方程 (I.1) 还保持着它的意义。不过在一般的情况下，需要严格地区分开这两个概念：如果气体的密度不是非常的大，則自由路程长比邻近的分子之间的距离大得多。在上面所举的著作中罗蒙諾索夫首次指出了这一点，在此著作中同样也初次引用分子的自由路程长这个概念（罗蒙諾索夫的“振动的空間”）。

如果把 $(\rho b)^2$ 量与一相較可以忽略不計，則在計算分子的自由

路程长的数值时，得状态方程

$$P = \frac{\hat{R}\rho T}{1 - b\rho}, \quad (1.3)$$

此式在1873年才为范得瓦耳斯根据罗蒙諾索夫的物理观念得出。方程(1.3)现时使用于内彈道学中。当密度很小，直到 $b\rho$ 的一次幂与一相較可以忽略时，方程(1.3)則变为完全气体的状态方程(1.2)。

最后，如果同样还考虑分子互相吸引的影响，則在最簡單的假設下得范得瓦耳斯方程

$$p = \frac{\hat{R}\rho T}{1 - b\rho} - a\rho^2, \quad (1.4)$$

这个方程在密度大并且温度不很高时正确，它使我們可以解釋由气态到液态的轉变。现时所得出的其中特别是保証由方程(1.3)变为方程(1.1)的更精确的状态方程，这里我們不再詳細地講了。因为以后我們只是与完全气体的方程发生关系。

現在來說明状态方程中的常数 $\hat{R}$ 的意义。由气体分子运动学說的观点来看，方程(1.2)可写为如下形式

$$p = \frac{\overline{c^2}}{3}\rho, \quad (1.5)$$

式中 $\overline{c^2}$ 为分子平均速度的平方。如果用 m 表示分子的质量，用 N 表示单位体积內的分子数，此方程将取如下形式

$$p = \frac{\overline{mc^2}}{3}N. \quad (1.6)$$

如馬克斯韋所証出，具有同一温度的两种气体，其分子的动能相等。因而，分子的动能乃是温度的一种度量，这就使得我們可以用能量的单位来度量温度。这时有一个換算系数，即玻耳茲曼常数 k ，此