

超音速空气动力学

A. 費里著



國防工業出版社

超 音 速 空 气 动 力 学

A. 費 里 著

郭达进、巢以明译



国防工业出版社

編者的話

本書系根据 A. 費里所著 Elements of aerodynamics of supersonic flows 的俄譯本 Аэродинамика сверхзвуковых течений (苏联 Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953), 并参照英文原本譯出。在俄譯本与英文原本有出入之处, 一般以英文原本为准。

在此書中作者从工程观点以初等形式闡述了, 机翼、迴轉体和扩压器等的超音速流动現象与近似計算方法。理論基础只作概述, 而对工程計算方法則予以偏重。書末附有計算圖表。因此此書特別适合于高等航空院校学生、飞机設計師与設計員参考。

此書內容多采用美国五十年代以前的研究結果。應該指出, 在这些問題上苏联科学家提供了丰富而又卓越的研究成果; 另外, 在五十年代中高速空气动力学又有了長足的發展, 因此, 此書仅供学习与計算时参考。

A. 費里 著 ‘Аэродинамика сверхзвуковых течений’
(Государственное издательство технико-теоретической литературы 1953 年第一版)

*

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

850×1168 $1/32$ 印張 $14\frac{5}{16}$ 352 千字

1959 年 8 月第一版

1959 年 8 月第一次印刷

印数: 0,001—3,600 册 定价: (11)2.65 元

NO. 2910

目 录

原作者序	7
第一章 概論	9
§ 1 流体运动的一般方程 旋流及无旋流	9
§ 2 音速和 M 数	15
§ 3 等熵流中可压缩性的影响	18
§ 4 一元流动	19
§ 5 亚音速与超音速流动现象间的差别	21
第二章 二元流动理論 位流 特性綫 微小扰动	28
§ 6 位流微分方程	28
§ 7 純超音速流动 特性綫	30
§ 8 特性綫方程	31
§ 9 M 数、压强和速度沿特性綫的变化規律	33
§ 10 临界速度与極限速度	38
§ 11 特性綫方程的几何解說	40
§ 12 微小扰动理論	47
第三章 冲波理論	51
§ 13 定常流动的冲波方程	51
§ 14 冲波方程的圖解法 冲波極綫	57
§ 15 冲波極綫的物理解說	62
§ 16 通过冲波时流动过程的性質	64
§ 17 通过冲波熵的变化 波阻	66
§ 18 粘性和热傳导对冲波結構的影响	69
第四章 二元流动理論——冲波与膨脹波的相互干扰与 反射	71
§ 19 冲波与膨脹波的相互干扰或反射的可能性	71
§ 20 膨脹波間的相互干扰	74
§ 21 冲波与膨脹波間的相互干扰	78
§ 22 冲波的相互干扰	81

§ 23 固壁上膨胀波与冲波的反射	84
§ 24 在具不同速度的流动区域中膨胀波与冲波的反射	86
第五章 二元流动理论 旋流特性线理论	90
§ 25 旋流的特殊流函数及微分方程式	90
§ 26 旋流的特性线系	94
第六章 超音速流动中物理量的测量	100
§ 27 空气动力现象中流动的物理量的测量	100
§ 28 测定静压及按压强测量结果决定 M 数	100
§ 29 以压强测量来决定气流速度方向	103
§ 30 温度测量	107
§ 31 密度测量	109
§ 32 应用光线折射来决定密度变化的方法	118
第七章 超音速翼型	123
§ 33 利用特性线理论及冲波理论研究超音速翼型的特性	123
§ 34 用介析法决定翼型的举力及阻力系数	131
§ 35 翼型举力及阻力系数公式在某些形状翼型上的应用	137
§ 36 用介析法决定翼型的纵向力矩系数及焦点	146
§ 37 超音速翼型的实验结果	148
§ 38 超音速双翼	159
第八章 平面喷管	165
§ 39 喷管与扩压管	165
§ 40 平面喷管超音速段的理论设计	166
§ 41 平面超音速射流分析	172
§ 42 出口截面静压强高于外界压强的射流	173
§ 43 喷管出口静压强低于外界压强时的射流	174
§ 44 超音速射流的冲量	180
第九章 超音速扩压管	182
§ 45 理想扩压管	182
§ 46 扩压管中稳定气流的两种不同条件	183
§ 47 超音速扩压管内稳定气流条件与出口条件的关系	191
§ 48 超音速扩压管的效率	192
§ 49 可变形状的扩压管及外部压缩的扩压管	195

第十章 三元流动的普遍关系式	199
§ 50 三元流动的速度位	199
§ 51 位流方程	200
§ 52 近似形式的速度位方程	204
§ 53 近似形式的运动微分方程解的初步探討 源、匯和偶極流 方程	206
第十一章 迴轉体空气动力的研究 (小扰动理論)	213
§ 54 迴轉体的小扰动法	213
§ 55 細長体的軸对称流动	215
§ 56 小扰动方程在有攻角的迴轉体繞流問題中的应用	226
§ 57 有攻角的迴轉体 (極細長的迴轉体) 的举力和力矩	229
第十二章 錐体繞流現象 速度圖法	241
§ 58 錐型流的一般方程式	241
§ 59 其軸平行于气流的圓錐	248
§ 60 錐体計算結果的分析	252
§ 61 有攻角的圓錐体繞流	261
第十三章 三元流动的特性綫	267
§ 62 軸对称流动的特性綫 (位流理論)	267
§ 63 軸对称流动的特性綫 (旋流理論)	282
§ 64 三元非軸对称流的特性綫	288
第十四章 超音速机翼的压阻	299
§ 65 导論	299
§ 66 零攻角时有限翼展对称机翼点源分布的确定	304
§ 67 由各种不同平面形状的等强度点源分布所引起的誘导速度 在 x 軸方向分量的确定	308
§ 68 零举假設必要性的探討	323
§ 69 不同型式点源分布的疊加及其在实际問題上的应用	326
第十五章 超音速机翼的举力和誘导阻力	361
§ 70 概論	361
§ 71 超音速举力綫及基元举力面	365
§ 72 三角机翼	370
§ 73 矩形翼	385

附录	超音速流动计算用表	397
表 1	等熵流动	397
表 2	二元特性线的数值关系	406
表 3	正冲波前后流体诸物理量之间的数值关系	408
表 4	冲波前后流体诸物理量之间的数值关系	412
表 5	斜冲波前后流体诸物理量之间的数值关系	413
参考书目		441

超 音 速 空 气 动 力 学

A. 費 里 著

郭达进、巢以明译

国防工业出版社

編者的話

本書系根据 A. 費里所著 Elements of aerodynamics of supersonic flows 的俄譯本 Аэродинамика сверхзвуковых течений (苏联Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953), 并参照英文原本譯出。在俄譯本与英文原本有出入之处, 一般以英文原本为准。

在此書中作者从工程观点以初等形式闡述了, 机翼、迴轉体和扩压器等的超音速流动現象与近似計算方法。理論基础只作概述, 而对工程計算方法則予以偏重。書末附有計算圖表。因而此書特別适合于高等航空院校学生、飞机設計師与設計員参考。

此書內容多采用美国五十年代以前的研究結果。應該指出, 在这些問題上苏联科学家提供了丰富而又卓越的研究成果; 另外, 在五十年代中高速空气动力学又有了長足的發展, 因此, 此書仅供学习与計算时参考。

А. Ферри 著 ‘Аэродинамика сверхзвуковых течений’
(Государственное издательство технико-теоретической литературы 1953 年第一版)

*

国防工業出版社

北京市書刊出版业营业許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

850×1168 $1/32$ 印張 $14\frac{5}{16}$ 352 千字

1959 年 8 月第一版

1959 年 8 月第一次印刷

印数: 0,001—3,600 册 定价: (11)2.65 元

NO. 2910

目 录

原作者序	7
第一章 概論	9
§1 流体运动的一般方程 旋流及无旋流	9
§2 音速和 M 数	15
§3 等熵流中可压缩性的影响	18
§4 一元流动	19
§5 亚音速与超音速流动现象间的差别	21
第二章 二元流动理論 位流 特性綫 微小扰动	28
§6 位流微分方程	28
§7 純超音速流动 特性綫	30
§8 特性綫方程	31
§9 M 数、压强和速度沿特性綫的变化規律	33
§10 临界速度与極限速度	38
§11 特性綫方程的几何解說	40
§12 微小扰动理論	47
第三章 冲波理論	51
§13 定常流动的冲波方程	51
§14 冲波方程的圖解法 冲波極綫	57
§15 冲波極綫的物理解說	62
§16 通过冲波时流动过程的性質	64
§17 通过冲波熵的变化 波阻	66
§18 粘性和热傳导对冲波結構的影响	69
第四章 二元流动理論——冲波与膨脹波的相互干扰与 反射	71
§19 冲波与膨脹波的相互干扰或反射的可能性	71
§20 膨脹波間的相互干扰	74
§21 冲波与膨脹波間的相互干扰	78
§22 冲波的相互干扰	81

§ 23 固壁上膨胀波与冲波的反射	84
§ 24 在具不同速度的流动区域中膨胀波与冲波的反射	86
第五章 二元流动理论 旋流特性线理论	90
§ 25 旋流的特殊流函数及微分方程式	90
§ 26 旋流的特性线系	94
第六章 超音速流动中物理量的测量	100
§ 27 空气动力现象中流动的物理量的测量	100
§ 28 测定静压及按压强测量结果决定 M 数	100
§ 29 以压强测量来决定气流速度方向	103
§ 30 温度测量	107
§ 31 密度测量	109
§ 32 应用光线折射来决定密度变化的方法	118
第七章 超音速翼型	123
§ 33 利用特性线理论及冲波理论研究超音速翼型的特性	123
§ 34 用介析法决定翼型的举力及阻力系数	131
§ 35 翼型举力及阻力系数公式在某些形状翼型上的应用	137
§ 36 用介析法决定翼型的纵向力矩系数及焦点	146
§ 37 超音速翼型的实验结果	148
§ 38 超音速双翼	159
第八章 平面喷管	165
§ 39 喷管与扩压管	165
§ 40 平面喷管超音速段的理论设计	166
§ 41 平面超音速射流分析	172
§ 42 出口截面静压强高于外界压强的射流	173
§ 43 喷管出口静压强低于外界压强时的射流	174
§ 44 超音速射流的冲量	180
第九章 超音速扩压管	182
§ 45 理想扩压管	182
§ 46 扩压管中稳定气流的两种不同条件	183
§ 47 超音速扩压管内稳定气流条件与出口条件的关系	191
§ 48 超音速扩压管的效率	192
§ 49 可变形状的扩压管及外部压缩的扩压管	195

第十章 三元流动的普遍关系式	199
§ 50 三元流动的速度位	199
§ 51 位流方程	200
§ 52 近似形式的速度位方程	204
§ 53 近似形式的运动微分方程解的初步探討 源、匯和偶極流 方程	206
第十一章 迴轉体空气动力的研究 (小扰动理論)	213
§ 54 迴轉体的小扰动法	213
§ 55 細長体的軸对称流动	215
§ 56 小扰动方程在有攻角的迴轉体繞流問題中的应用	226
§ 57 有攻角的迴轉体 (極細長的迴轉体) 的举力和力矩	229
第十二章 錐体繞流現象 速度圖法	241
§ 58 錐型流的一般方程式	241
§ 59 其軸平行于气流的圓錐	248
§ 60 錐体計算結果的分析	252
§ 61 有攻角的圓錐体繞流	261
第十三章 三元流动的特性綫	267
§ 62 軸对称流动的特性綫 (位流理論)	267
§ 63 軸对称流动的特性綫 (旋流理論)	282
§ 64 三元非軸对称流的特性綫	288
第十四章 超音速机翼的压阻	299
§ 65 导論	299
§ 66 零攻角时有限翼展对称机翼点源分布的确定	304
§ 67 由各种不同平面形状的等强度点源分布所引起的誘导速度 在 x 軸方向分量的确定	308
§ 68 零举假設必要性的探討	323
§ 69 不同型式点源分布的疊加及其在实际問題上的应用	326
第十五章 超音速机翼的举力和誘导阻力	361
§ 70 概論	361
§ 71 超音速举力綫及基元举力面	365
§ 72 三角机翼	370
§ 73 矩形翼	385

附录 超音速流动计算用表	397
表 1 等熵流动	397
表 2 二元特性綫的数值关系	406
表 3 正冲波前后流体諸物理量之間的数值关系	408
表 4 冲波前后流体諸物理量之間的数值关系	412
表 5 斜冲波前后流体諸物理量之間的数值关系	413
参考書目	441
附圖	443

原作者序

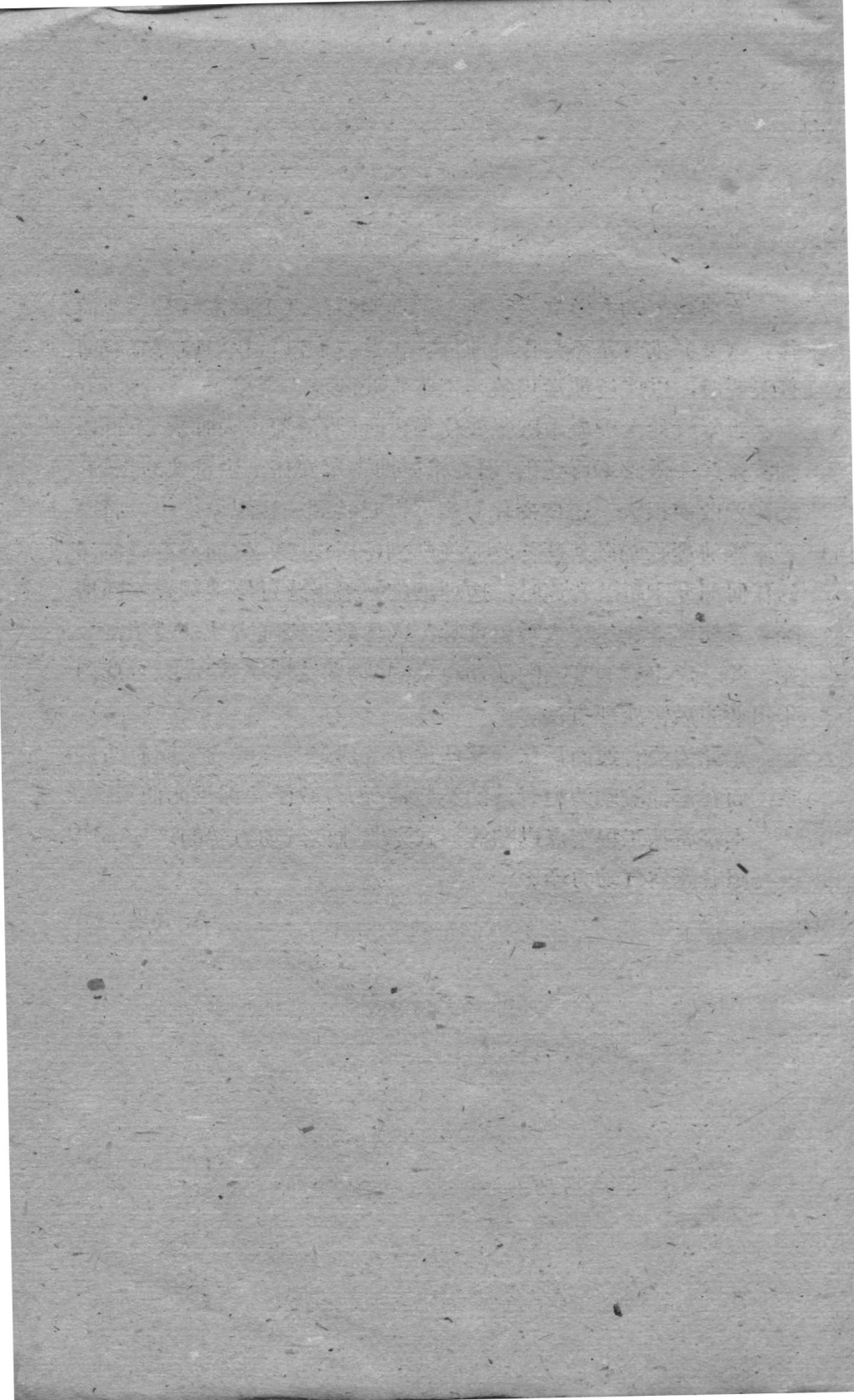
古典空气动力学立足于两个基本假设：（1）空气是理想流体；（2）空气是不可压缩流体。由此二假设可作出位流存在的普遍假设，以广泛地运用数学工具来处理流动现象。

当空气动力现象中压强变化很大时（当流速增大时），不可压缩流体这一假设不再正确，因为相应地密度变化产生重要的影响，使流速改变很大。密度变化影响可以归并到一般现象之中，将不可压缩流理论加以某些修改后推广到可压缩流。然而只有当流动的任何部分未超过音速时，这种推广一般讲才近似地符合实际情况。当局部音速达到或被超过时，这种数学处理方法一般须加改变。此时产生新的复杂的流动现象，其物理特性完全改观。对此须采用新的数学处理方法。

起始为亚音速而后仅在某些地方变成超音速的流动尤为复杂，而在起始流动为超音速的某些情况下，数学处理反而简单些。

本书将从工程观点以初等形式来阐述空气动力学的这一部门——超音速空气动力学。

A. 费里



第一章 概論

§ 1 流体运动的一般方程 旋流及无旋流

欧拉方程 考虑一相对于正交坐标系 x 、 y 、 z 的无粘性可压缩定常（绝对或相对）流动（圖 1）。在定常流动中，所有的流动参数，如速度、密度等只是独立变量 x 、 y 、 z 的函数。为了确定

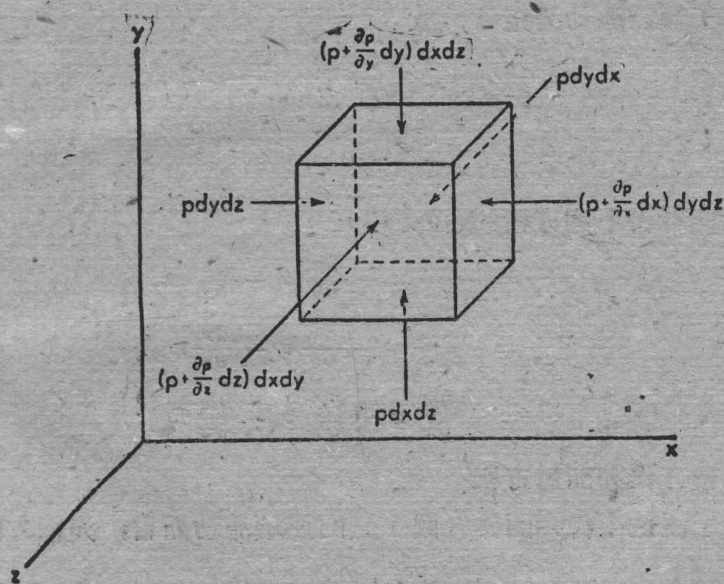


圖 1 元体的平衡

流体的运动，必須在給定边界条件下找出流动参数依 x 、 y 、 z 而变的規律来。假定这些参数連續变化（不存在不連續），而整个流場中它們的导数为有限。考虑一无限小的平行六面体 $dx dy dz$ ，对元体平面 $dy dz$ 、 $dx dz$ 和 $dx dy$ 应用动量定理，可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= -\rho \frac{du}{dt}, \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= -\rho \frac{dv}{dt}, \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho \frac{dw}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其矢量表达式为

$$-\frac{1}{\rho} \text{grad } p = -\frac{dV}{dt}, \quad (1a)$$

其中 u 、 v 、 w 是速度 V 在 x 、 y 、 z 軸上的分量， t ——時間， p ——压强， ρ ——密度。当作用力方向和座标軸方向一致时即認定是正的。于此不考虑質量力。

由于假設流动为定常，故

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt}, \quad (16)$$

因为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0。$$

由此可得下列方程(欧拉方程)：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= -\frac{\partial u}{\partial x} u - \frac{\partial u}{\partial y} v - \frac{\partial u}{\partial z} w, \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= -\frac{\partial v}{\partial x} u - \frac{\partial v}{\partial y} v - \frac{\partial v}{\partial z} w, \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= -\frac{\partial w}{\partial x} u - \frac{\partial w}{\partial y} v - \frac{\partial w}{\partial z} w. \end{aligned} \right\} \quad (1b)$$

連續方程和能量方程

对于流过平行六面体(圖 1)的連續流动而言，連續方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

在此情况下， dt 時間內压力所作的功应和平行六面体内質量的动能和內能的变化总和相等。如以 U 表單位質量的內能，則能量方程可写为：

$$\begin{aligned} -dx dy dz dt \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) \right] \\ = \rho dx dy dz (dU + V dV). \end{aligned} \quad (3)$$

由方程 (2) 可得：