

冲击波理論及 气体动力学概論

Г. Б. 捷里多維奇 著



國防工業出版社

冲击波理論及 气体动力学概論

Я. Б. 捷里多維奇 著
吳 伯 澤 譯

內 容 簡 介

本书是冲击波理論及可压缩流体的流体力学領域中的一本基础理論書籍。书中討論了气体动力学原理和某些問題的解法、冲击波的产生、傳播及其破坏作用，并描述了冲击波中发生的某些特殊現象。

本书供有关研究人員、高等院校師生閱讀。

ТЕОРИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И ВВЕДЕНИЕ В ГАЗОДИНАМИКУ

Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР 1946

冲击波理論及气体动力学概論

吳 伯 譯

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

国防工業出版社印刷厂印刷 新华书店北京發行所發行

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 7 $\frac{3}{8}$ 199 千字

1963年6月第一版 1963年9月第二次印刷 印数：1,001—2,600册

統一書号：15034·491 定价：(11-6) 1.75 元

目 录

譯者前言

緒論	7
§ 1. 气体动力学方程	11
附录	15
§ 2. 声学原理; 声速	20
§ 3. 气体流过噴管和噴嘴的情形	38
§ 4. 超声速流的性質	48
§ 5. 气体在长圓筒內的流动	53
§ 6. 与坐标对時間的比有关的运动	60
§ 7. 冲击波理論. 引言	71
§ 8. 惠柯尼奧絕热曲綫. 从守恒方程导出的这一曲綫	72
§ 9. 惠柯尼奧絕热曲綫的性質. 空气中和水中的冲击波	77
§ 10. 冲击波問題的历史	84
§ 11. 用曲綫解釋冲击波理論的方法. 临界点附近的波	88
§ 12. 冲击波陣面的結構	99
§ 13. 冲击波在具有緩慢激发的內自由度的气体中的傳播	106
§ 14. 冲击波的产生	110
§ 15. 在大幅度振动中的冲击波	117
§ 16. 任意突变的傳播	122
§ 17. 物体的超声速繞流	133
§ 18. 反作用力理論	141
§ 19. 冲击波的反射	153
§ 20. 炸葯的作用. 导論	157
§ 21. 爆炸和爆炸波傳播的相似性	161
§ 22. 冲击波所引起的破坏的模拟与相似性	168
§ 23. 在装葯近旁发生的現象	172
§ 24. 爆炸波在离装葯很远处傳播的規律	181

补充 I 气体中的大幅度冲击波.....	205
补充 II 被强冲击波压缩过的固体向真空膨胀时发生的 物理现象.....	245

1255361

冲击波理論及
气体动力学概論

Я. Б. 捷里多維奇 著
吳 伯 澤 譯



国防工业出版社

1255361
6324

內 容 簡 介

本书是冲击波理論及可压缩流体的流体力学領域中的一本基础理論书籍。书中討論了气体动力学原理和某些問題的解法、冲击波的产生、傳播及其破坏作用，并描述了冲击波中发生的某些特殊現象。

本书供有关研究人員、高等院校师生閱讀。

ТЕОРИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И ВВЕДЕНИЕ В ГАЗОДИНАМИКУ

Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР 1946

冲击波理論及气体动力学概論

吳 伯 譯

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 7 $\frac{3}{8}$ 199 千字

1963年6月第一版 1963年9月第二次印刷 印数：1,001—2,600册

統一书号：15034·491 定价：(11-6) 1.75 元

譯者前言

随着現代科学技术的发展，人們愈来愈常碰到冲击波和物体的超声速运动，例如，在研究現代彈道火箭的运动，在研究用冲击波加热等离子体(以实现可控热核反应)的可能性，以及其他等等，都必然要碰到这类問題。要解决这些問題，就不能不求助于冲击波理論和可压缩流体(气体)的流体力学。

本书就是这一領域中的一本基础理論书籍，书中討論了气体动力学原理和某些問題的解法、冲击波的产生、傳播及其破坏作用，并描述了冲击波中发生的某些特殊現象。关于本书的內容和写法，作者在緒論中已經有很詳細的說明，这里便不再贅述了。

應該提出的是，本书是在 1945 年写成的。从这个时期以来，在冲击波理論和气体动力学方面已經有了巨大的进展，因此，本书就未能包括許多最新的成就。考虑到这一点，在翻譯本书时，我們接受了本书作者的建議，把作者和萊塞尔在 1957 和 1958 年合写的两篇論文“气体中的大幅度冲击波”和“被强冲击波压缩过的固体向真空膨胀时发生的物理現象”同时譯出放在本书的末尾，作为本书的补充。这两篇論文概述了本书出版后十几年来在冲击波方面的理論和实验工作，同时，在文后还列出了丰富的文献目录，以备考查。这样，便基本上弥补了上述的缺陷。

本书作者 ~~Л. Д. 捷里多維奇~~ 院士对本书的翻譯表示了巨大的关怀，并 ~~給予~~ 譯者很多帮助，譯者謹借此机会向作者表示謝意。

本书的譯名基本上是采用了比較通用的名詞，但是，由于在这一領域中有些通用的名詞也還不是很統一的(如声速、音速、穩恒流、定态流、定常流、等等)。碰到这种情况时，譯者只好选用自己主

觀上認為比較妥善的譯名，這樣，就難免有選擇不當的地方。此外，限于譯者的水平，譯文中也一定有許多不妥之處。譯者懇請讀者們指出，以冀于再版時改正。

吳伯澤 1959, 11, 7, 北京

目 录

譯者前言

緒論	7
§ 1. 气体动力学方程	11
附录	15
§ 2. 声学原理; 声速	20
§ 3. 气体流过噴管和噴嘴的情形	38
§ 4. 超声速流的性質	48
§ 5. 气体在长圓筒內的流动	53
§ 6. 与坐标对時間的比有关的运动	60
§ 7. 冲击波理論. 引言	71
§ 8. 惠柯尼奧絕热曲綫. 从守恒方程导出的这一曲綫	72
§ 9. 惠柯尼奧絕热曲綫的性質. 空气中和水中的冲击波	77
§ 10. 冲击波問題的历史	84
§ 11. 用曲綫解釋冲击波理論的方法. 临界点附近的波	88
§ 12. 冲击波陣面的結構	99
§ 13. 冲击波在具有緩慢激发的內自由度的气体中的傳播	106
§ 14. 冲击波的产生	110
§ 15. 在大幅度振动中的冲击波	117
§ 16. 任意突变的傳播	122
§ 17. 物体的超声速繞流	133
§ 18. 反作用力理論	141
§ 19. 冲击波的反射	153
§ 20. 炸葯的作用. 导論	157
§ 21. 爆炸和爆炸波傳播的相似性	161
§ 22. 冲击波所引起的破坏的模拟与相似性	168
§ 23. 在装葯近旁发生的現象	172
§ 24. 爆炸波在离装葯很远处傳播的規律	181

补充 I 气体中的大幅度冲击波.....	205
补充 II 被强冲击波压缩过的固体向真空膨胀时发生的 物理现象.....	245

緒 論

气体动力学是流体力学——研究流体(液体和气体)的运动的科学——的一个組成部分。

气体动力学的特点,是它必須考虑到物体的压缩性。液体在一般条件下可以看作是不可压缩的,而气体即使在压力改变很小时,其体积也会显著地发生变化。

显然,只有在問題中牽涉到巨大的压力降时,才有必要对气体应用气体动力学的專門的公式和定律。当气体的运动速度不大时,通常可以把它看成和液体运动一样,而其体积的改变和压缩性忽略不計。

随着条件的不同,在气流中产生的压力差的数量級可以在 $\frac{\rho u^2}{2}$ ——动压力头的大小(按照伯努利公式)——到 $\rho u c$ 的範圍內变化,这里 c 是声速, u 是运动速度, ρ 是气体的密度,同时,气体的压力近似地等于 ρc^2 。

把这些表式比較一下,便可以看出,在任何情况下,只要速度小于声速,压力差比起压力本身来总是很小的,因此,通常可以把物質的压缩性略去不計。

气体动力学的課題也就决定于此。

气体动力学是研究大压力降和大速度下的运动的科学,此时速度达到了声速的規模。

在相似理論中,常常采用下面的符号来表示运动速度对声速的比:

$$\frac{u}{c} = Ba,$$

其中 Ba 是所謂巴爾斯多判据。

气体动力学所研究的是 Ba 的值近于 1 时的运动。当 $Ba \ll 1$ 时，气体动力学的一般方程便取极限而变为不可压缩液体的流体动力学方程了。

以后我们将把不可压缩液体的基本流体动力学定律当作是已知的，而不再讨论有关公式的推导了。

考虑压缩性意味着有考虑物质状态的改变的必要。假如说在流体动力学中，在耗散力（粘滞性）的作用下的确也发生了液体的释热和液体温度的改变，那么，这些情形也不致使体积发生变化；液体内部的变化并不会反过来影响冲流的性质本身，因此，对于流体动力学所研究的现象来说，这些变化是不太重要的。

在气体动力学中，我们则经常会碰到气流内部物质状态的变化。气体动力学的这个特点使我们有必要用热力学来解释所有现象，这使得热力学对于气体动力学成为必不可少的。

在本书中，我们只想讨论一些特殊的气体动力学现象，也就是说，只想讨论那些在不可压缩液体的力学中找不到类比的現象。

在某些情形中，即使采用气体动力学和考虑到压缩性，也只能在不可压缩液体的一般流体动力学公式中加上不大的修正，对于这样的情况，我们也不想加以讨论。本书的重点并不放在气体动力学的计算方法、复杂的二维的和三维的流动的数值积分法上面，相反地，我们要特别详细地来建立气体动力学的原理、极限规律和最简单问题的解法。

在本书中，我们不是从普遍的推及特殊的，而是从简单的扩大到复杂的。我们不是先写出形式最为普遍的、计及所有因素的气体动力学方程、寻找普遍解、再用简化这些普遍解的方法过渡到简单情况的特殊解，而是先解决简单的、基本的、描述了现象的个别部分的问题，以求进一步从这些个别的特殊解来构成更复杂的问题的解答。

气体动力学的几个主要的应用范围如下。

第一个、也是目前最熟知的和研究得最詳尽的应用范围,在于解决运动速度很大的物体被繞流的各种問題。这里首先是关于在小于声速的速度下运动物体所受阻力和浮力的一般公式中的修正的問題,亦即对于今天的航空來說已經存在的修正的問題。其次,当我们过渡到大于声速的速度时,运动物体被繞流的整个图景就发生根本的改变。这样的速度在外彈道学中(亦即在关于炮彈运动的科学中)和在研究噴气式飞机的运动时都会碰到。

气体动力学在物体以声速数量級的速度或以超声速在气体中运动的問題上的应用这一部分,在現有的教科书中已經有极为詳細的闡述,所以,我們对它的討論將是最少的。

第二个最重要的应用范围是关于气体在管道(噴嘴和管子)中运动的問題。此时,假如气体的速度达到或超过声速,气体动力学便又是不可少的。在这个范围内,流动的性质、速度和流量对压力降的依賴关系都发生了定性的改变。这个范围内的問題对于渦輪、火箭彈和发动机理論是很重要的。

至于声的学說——声学,那么,它是气体动力学中考虑到运动媒质的压縮性的一个独特的部分。在声的作用下媒质运动的速度和压力变化的幅度都很小。但是,在考察任何运动的最初的起始阶段和在考察速变的、特别是周期性的运动时,对压縮性是不能不加以考虑的。

从許多角度来看,冲击波都有特殊的意义,它也是本书的中心問題。从一方面說,不导入突变(即冲击波)而对方程求积分的企图会导致这样或那样的荒謬的結果,并使这些方程变成不可解的,而冲击波理論正好能够解釋这些荒謬的結果,并可建立任何条件下的运动规范。

从另一方面說,冲击波本身就是一个怪异的现象。冲击波的怪异之处在于:即使不引入任何关于耗散力(粘滯性和导热性)的假設,从基本考虑出发,我們也能得到断定熵要增长的冲击波規

律,亦即断定在冲击波中发生的过程具有不可逆性的規律。

从这个观点看来,即使不談冲击波的应用,冲击波在邏輯上也是很有趣的。

奇妙的是,所有基本关系式和基本的原則性的观点,都是在五十多年以前,也就是在还没有任何实验資料、而冲击波也尚未被实验者研究过以前,由于对一般气体动力学方程的研究建立起来的。

按照厄米里·儒格的十分形象的說法,“冲击波最初是在理論家的笔尖下出現的”。

我們不能不为上一世紀偉大的天才們的分析 and 理論探討的深度而感到惊异,在这些天才中,首先應該提起德国数学家帕尔加尔特·利曼、英国物理学家倫金、法国火炮专家惠柯尼奧,他們曾經从不同的方面独立地建立了冲击波理論,这一理論直到今天也还没有失去它的价值。

最后,近年来对冲击波日益提高的兴趣,是与爆炸的破坏作用和爆炸在爆炸物質(能够起化学反应的)中的傳播的問題分不开的。我們必須精确地知道被冲击波压缩过的物質的状态,知道压缩的速度和波的其他諸如此类的属性。本书就是爆炸理論的导論。

本书的主要部分(§§1—17 和 §19)还在1941年初就投入印刷过程。但由于战争时期条件的限制,出版日期推迟了。在1943—1944年間补充了:§18——反作用力理論,以及 §§20—24,在这几节中詳細地討論了随爆炸而发生的爆炸产物的膨脹、空气爆炸波的产生及傳播等决定着爆炸的破坏作用的現象。

作者衷心地感謝 H. H. 安德列也夫、B. II. 康士坦丁諾夫、J. Д. 朗道、M. A. 薩多夫斯基、O. M. 托捷斯、Ю. Б. 哈利頓等教授,他們审閱了手稿并提出了寶貴的指示。

文献:通俗的流体动力学导論^[22] ●,某些气体动力学的普通教科书^[4,23,24,27,35,39,106]。

§1. 气体动力学方程

現在先忽略質量力(重力)的作用,以及(參閱下文)耗散力(即粘滯性和導熱性)的作用,而寫出氣體動力學的幾個方程。為簡單起見,我們將寫出一維情形的方程;要把這樣的方程推廣到二維和三維的情況去,是沒有什麼困難的。

我們從連續性方程(即表明物質守恆律的方程)着手。

象通常一樣,用 $\frac{d}{dt}$ 表示對時間的實質微商——對一定粒子沿其路徑所取的微商;而用 $\frac{\partial}{\partial t}$ 表示對時間的局部微商,這種微商表征着所要研究的量在空間一定點上的變化,這樣,我們便可寫出

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u \frac{\partial\rho}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1.1)$$

或

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial\rho}{\partial x}. \quad (1.2)$$

這兩個公式當然是完全等價的。為了導出第一個公式,我們觀察一個含有一定量物質的物質層的运动。而在導出第二個公式時,我們所考察的則是密度在空間的一定點上的變化。

運動方程與不可壓縮液體的運動方程並無不同之處。這個方程是

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (1.3)$$

最後,第三個方程從本質上說來是一個新的方程,它表示出氣體動力學的特徵。這就是狀態變化方程。

在不可压缩液体的流体力学中,除第一、二个方程外,我们又添加了不可压缩性方程 $\rho = \text{恒量}$ 。那么,在可压缩液体中,怎样才能找到密度和压力之间的关系呢?

液体的密度、温度和压力是由所谓物态方程联系起来的。知道了热容,我们就可以把温度和能量联系起来。为了决定密度与压力之间的关系,还必须再写出一个方程——运动液体的能量方程。在没有耗散力(粘滞性和导热性)时,我们有

$$dE = -p dv;$$

$$\frac{dE}{dt} = -p \frac{dv}{dt} = -p \frac{d\left(\frac{1}{\rho}\right)}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt}, \quad (1.4) \ominus$$

其中 v 是比容,它是密度 ρ 的倒数。

我们所研究的这个或那个物质元的能量,只有依靠它周围的液体(气体)体积对它所做的压缩功,才有可能发生变化。

如果回忆一下热力学的基本公式

$$dE = TdS - p dv, \quad (1.5) \ominus$$

那么,从能量方程出发,对于现在所讨论的没有耗散力的情况,就很容易十分自然地导出

$$TdS = 0; \quad \frac{dS}{dt} = 0. \quad (1.6)$$

换句话说,物质的状态是按绝热曲线变化的,是在恒熵下变化的。

大家都知道,对于热容恒定的理想气体来说,绝热曲线的方程是

⊖ 方程 (1.4) 是属于一定的液体分子系集的(拉格朗日表象)。在欧勒的表象中,对于固定在空间中的一定的体积元而言,能量方程具有较为复杂的形式。

⊖ 我们把方程 (1.5) 用于其他状态完全取决于给定的比容 v 和比熵 S 的物质。但是,它不能用于(譬如说)不处于化学平衡状态的系统,因为在这种系统中在运动时所发生不可逆的化学反应。