



《中国工程物理研究院科技丛书》第 015 号

二维非定常流和激波

王继海 著

科学出版社

0734.7

W 0.2

380760

《中国工程物理研究院科技丛书》第 015 号

二维非定常流和激波

王继海 著



科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了二维非定常流和激波理论,主要包括:流体力学方程组;激波极曲线方法、激波的反射和折射;Whitham 方法、二维激波的传播及互相作用;线性化方法,小扰动激波;界面不稳定性;爆轰驱动和射流。

本书反映了国内外在有关方面发展水平,也综合了作者及其同事们卅多年来大量研究成果。

本书可供从事现代流体力学、爆炸力学工作的科研人员、工程技术人员、高校教师、研究生和高年级大学生阅读,亦可供从事惯性核聚变和天体演化研究工作的人员参考,还可作为有关专业的研究生教材。

《中国工程物理研究院科技丛书》第 015 号

二维非定常流和激波

王继海 著

责任编辑 廖德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994 年 12 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1994 年 12 月第一次印刷 印张:16 5/8

印数:1-1 540 000 字数:433 000

ISBN 7-03-004376-6/O · 756

定 价: 21.00 元

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院 30 年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 30 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果,内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 30 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989 年 1 月 25 日

《中国工程物理研究院科技丛书》

第二届编审委员会

主 任 杜祥琬

副主任 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔画为序)

水鸿寿 方乃相 王之康 王铁铮 刘庆兆

汤绍源 陈银亮 吴宏志 汪源浚 张永昌

张寿齐 张仕发 杨成龙 周正朝 姚景华

姜学贤 赵维晋 俞大光 胡再军 徐锡申

徐玉彬 高天祐 高国桐 董海山 赖祖武

丛书编辑部负责人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

- | | | | |
|-----|---------------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | | |
| | 董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989年10月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | | |
| | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990年2月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | | |
| | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991年11月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | | |
| | 胡家骥 著 | 科学出版社 | 1991年12月 |
| 005 | 再人遥测技术(上册) | | |
| | 谢铭勋著 | 国防工业出版社 | 1992年5月 |
| 006 | 再人遥测技术(下册) | | |
| | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 007 | 映象与混沌 | | |
| | 陈式刚著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | | |
| | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992年7月 |
| 009 | 粘性消去和差分格式粘性 | | |
| | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993年3月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | | |
| | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993年5月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | | |
| | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993年5月 |
| 012 | 炸药热分析 | | |
| | 楚士晋著 | 科学出版社 | 1994年12月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术 | | |
| | 刘庆兆主编 | 科学出版社 | 1994年12月 |

- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长著 科学出版社 1994 年 12 月
- 015 二维非定常流和激波
王继海著 科学出版社 1994 年 12 月

序

激波是一种常见的自然现象。闪电、地震、火山喷发或陨星撞击过程中都出现激波。除了自然力造成的激波外,各种人造激波更为普遍。快速挥动牛鞭发出的尖锐响声,表明已出现弱激波。炸药或核爆炸产生的爆炸波是一种具有独特结构的激波。燃烧中的爆轰波则是带化学反应的激波。物质分界面和稀疏波经常伴随激波出现。这些非定常波的产生、传播以及相互干扰,支配着整个流动的特性。

在爆炸中,激波及支持其运动的能量占绝大部分。因此对于爆炸破坏,激波起着主要作用。激波对飞行器阻力、稳定性以及局部区域的压力和气动加热特性起着决定性的影响。此外激波快速加热以及稀疏波冷却效应在工程中已显示广泛的应用前景。因此激波现象的研究受到人们的重视。

将近半世纪前 R. Courant 和 K. O. Friedrichs 出版了专著 *Supersonic Flow and Shock Waves* 系统总结了此前的研究成果。从那时起,有关研究工作广泛展出,成果不断涌现。但系统总结这方面的成就专著尚不多见。本书作者是多年从事本领域研究工作的专家,在本人丰富实践经验的基础上精选具有重要意义的成果(包括本单位的成果)加以系统的归纳,写成这本专著。本书着重对激波和界面这些强间断面运动的分析及有效的求解方法的描述。

本书的出版对激波研究工作具有学术意义和实用价值。这是一本很有参考价值的专著,对推动激波和非定常流研究工作的发展,一定会大有裨益。我很乐意借此机会将它介绍给从事激波研究或将要从事有关科技工作的读者,相信他们会从中有所收获。

俞鸿儒

1994. 7

引 言

在流体力学中,表征物理量急剧变化从而反映流场主要特性的强间断的运动,尤其是激波(亦称冲击波)的运动是极其重要的。1948年出版的 R. Courant 和 K. O. Friedrichs 合著的 *Supersonic Flow and Shock Waves* (中译本见:R. 木可朗, K. O. 弗里德里克斯, 超音速流和冲击波, 北京, 科学出版社, 1986 年, 402 页) 是一本重要著作, 它系统地总结了这个时期以前在一维非定常流动和二维定常流动中关于激波问题的主要研究成果, 并为其完善和广泛应用奠定了基础。60 年代初写成而于前不久出版的周毓麟先生的著作(一维非定常流体力学, 北京, 科学出版社, 1990 年, 419 页) 则是 R. Courant 和 K. O. Friedrichs 的书在一维非定常流动方面的进一步发展。

然而, 随着现代科学技术各个领域的发展, 特别是爆炸力学, 爆轰学、高速空气动力学、水力学、天体物理学、空间科学、惯性约束核聚变以及其它学科的发展, 我们需要进一步研究二维非定常流动中以激波为代表的法向间断和以不同物质交界面为代表的切向间断运动的问题。我们知道, 上述强间断的运动和流体运动是相互关联的。流体力学方程组是拟线性的, 在二维非定常情况下, 各个物理量的变化依赖于两个空间坐标和一个时间变量。对于这样一般性的问题, 往往只能依靠发展和使用相应的计算方法, 应用有关编码, 在大型计算机上进行数值模拟。由于二维非定常流动的复杂性和多样性, 对于各种不同的问题, 常常要根据其特点, 选用与之相适应的数值方法。例如单就坐标系而言, 就存在欧拉和拉格朗日两种网格选择方法。而每种方法中, 又存在各种逼近和具体的处理办法。在激波的计算中, 又要求选用合适的人为粘性。近年来发展的各种高分辨率格式, 对于激波及相关问题的计算, 展示了良好的前景, 但还存在许多待解决的问题。总之, 每种数值方法, 都有各自的优点、缺陷和相应的适用范围。在当前发展阶段, 普适的二维

非定常流体力学计算方法是不存在的。关于计算方法方面的问题，读者可参阅李德元等的著作（李德元、徐国荣、水鸿寿等，二维非定常流体力学计算方法，北京，科学出版社，1987年，382页）。

本书的目的在于讨论各现代学科的发展实际中所提出的一些较为重要而又具有一定普遍意义有关激波和物质界面运动的二维非定常流体力学问题。正如 R. Courant 和 K. O. Friedrichs 在他们那本名著的序言中所说的“一些重要的分支还集中于若干特殊类型问题上，……其普遍性并非总是很鲜明的”，本书对于有关问题的分类也只具有相对的普适性。作者虽然也希望像他们那样“力求发挥并强调这些普遍性的观点”，但由于二维非定常流动的复杂性，这里所遇到的困难却更多。这或许是在目前已出版的各种中外文文献中，尚未见到类似著作的主要原因。这里，我们尽量论述每个分支上问题的共性，所采用处理方法的特点及其适用范围和实际意义。在本书所包含的各有关问题的分析和处理过程中，我们着重叙述其解析和近似解析解法。因此，对所采用假定的合理性，所获得结果的正确性及其和实验与数值模拟结果的比较，都尽量在有关的章节中予以强调说明。从这种意义上讲，本书亦可供从事有关方面的实验和数值模拟的工作者参考。我们在这里也遇到 R. Courant 和 K. O. Friedrichs 在那本书中提到的不可能做到“面面俱到”的问题。本书的内容主要取自近数十年来公开文献上发表的材料，也有一些内容涉及到作者本人及其同事和朋友们的许多工作。少部分内容关系到过去完成而又未及时发表的工作，这里只能扼要述及并注明来源。对有关内容的选择是有一定考虑的。对于有些工作，虽然就其内容而言是和本书讨论的分支有关，但或者是由于使用的方法过于复杂，或者是有关内容过于偏狭，很难在实际中获得广泛的应用和发展，再加上本书的篇幅限制，均将其略去，其中也包括作者本人的某些工作。有的工作也只能简单提到。这种选择当然会受到本人主观条件的限制。

本书原稿的框架，作为研究生教材，已经使用了十多年，现在根据新的材料加以扩充、修改出版。我们认为读者已具有一定的流

体力学方面知识,熟悉一维非定常流动的概念,特别是激波、简单波方面的基本知识(参阅上面提到的两本书)。

第一章是带有入门性质的,这里简要地介绍流体力学方程组(理想流体、不可压流体和粘性流体)及其守恒形式、间断面上条件及其分类、三维非定常流动的自然坐标系和在其基础上建立的二、三维不定常流体力学的特征线方法。关于激波和接触间断的计算,则是一维非定常流动有关处理的推广。这些都是阅读后面几章所必须掌握的知识。

第二章叙述分析和计算二维激波、爆轰波和物质交界面相互作用的简单方法,即定常化方法,亦称激波极曲线方法。R. Courant 和 K. O. Friedrichs 关于理想气体中定常激波的一些处理方法,在这里得到发展和推广。我们从满足任意状态方程的一般介质出发,导出了定常斜激波、理想爆轰波和稀疏波的普适关系式。利用这些关系式及其所确定的反映波前波后压力变化和速度方向变化之间关系的极曲线,讨论二维激波、爆轰波在固壁上的正规和马赫反射,给出计算激波、爆轰波在界面上折射的研究方法,讨论两不等强度激波的二维碰撞和追赶问题。用此方法,可以研究物质自由表面的对称和非对称的正规碰撞及形成射流的极限角。由于使用了普适的状态方程和爆炸力学实际背景需要,有关处理方法大都在凝聚介质的实例上展示,这对于气体也同样有效的。

第三章介绍处理二、三维非定常激波传播和相互作用的一种近似而又十分有效的方法,即 CCW 方法,亦称 Whitham 方法或激波动力学方法。首先介绍变截面管道中激波传播的所谓 Whitham 规则,利用此规则得到激波速度变化和管道截面积变化之间的关系。在此基础上,利用几何关系,导出描绘二维和三维激波运动的激波动力学方程组。接着介绍它们在求解激波在尖角上绕射和马赫反射问题中的应用,这里亦可获得激波在圆角上绕射问题的近似解析解。激波在其它简单几何形体(锥、柱、球)上绕射问题和激波稳定性问题亦可用此方法进行研究。这里讨论了激波动力学方程组的强间断和简单波的有关性质,构造了 Riemann 问

题,获得和一维非定常流动中十分类似的任意间断分解的四种结果。利用这个结果,可以有效地解决两个激波交叉而后分解的问题及二维活塞问题。本章也应用简单波理论,讨论和计算激波在自由表面上的非正规反射和界面上非正规折射问题。结合这类应用,讨论了方法中存在的问题并给出了能正确反映扰动在激波阵面上传播速度的一种改进的途径。为了能求解更为一般的问题,本章还介绍了激波动力学方程组的二维特征线方法。由于上述激波问题的实验,都是在气体激波管中进行的,因此许多例子大都是针对气体的,但是我们总是经常注意把有关研究推广到任意介质,特别是凝聚介质的情形。本章的最后一部分介绍激波动力学方法的若干推广。首先是将其运用于波前介质运动的情况,用以解决激波在尖角上反射所形成的反射激波波形的计算。此方法还可推广用于外力场,例如引力场中激波的传播,解决天体中的有关问题。近年来,此方法被推广应用于非理想爆轰波的传播问题的研究和计算。这里,对这种所谓 DSD(爆轰激波动力学)方法也做扼要的介绍。

第四章叙述用线性化方法,求解含小扰动激波运动问题。由于初始或边界条件的影响,可形成一些对平面有微小偏离的激波。这样的问题可用线性波动方程的初边值问题来描绘。激波的小角绕射和马赫反射、激波沿薄物体上滑移绕射、激波在微曲表面上的垂直反射及平面激波的稳定性问题,都可用此方法研究。由于线性方程的初边值问题的求解方法很多,因而能够求解的这类问题也很多。本章仅通过一些典型问题,展示各种解题方法和所获得的物理结果,并不企图去追求包罗有关方面的全部进展。利用线性化方法也可以求解弱激波的绕射问题,这里亦不做详细介绍。

不同密度的流体交界面的不稳定性在现代的惯性约束热核聚变和天体物理学的恒星演化研究中具有十分重要的实际应用背景。第五章使用较大的篇幅来叙述这类问题。这里着重介绍重力场中或加速运动情况下的 Rayleigh-Taylor 不稳定性、激波和界面相互作用引发的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性、切向速度差激发的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性及烧蚀不稳定性等。这里讨论物理

性质如表面张力、粘性和弹性恢复应力对界面不稳定性的致稳作用。除了平面界面外,还介绍球面和柱面情形,其中包括气泡和液滴问题。后者在水力学和多相流中有重要的应用背景。这里给出了气泡坍塌过程中扰动发展的 WKB 近似解。除了线性阶段外,还着重介绍界面不稳定性几个非线性发展阶段,讨论了若干近似解析解,列举了一些实验和各种数值计算结果。界面不稳定性后期发展导致的湍流混合不仅在热核聚变和天体演化中起到作用,而且也是湍流研究中的重要课题,近年来人们给予了高度的重视。这里我们将介绍有关方面的研究工作,简单叙述用湍流和两相流模型研究界面不稳定性导致后期混合的一些进展。

第六章主要是运用第二章所获得的若干结果,研究在爆炸力学方面有重要意义的爆轰的二维驱动和射流问题。有关过程的研究对于认识常规兵器和爆炸加工中的一些问题是有作用的。利用爆轰波折射的结果作为初始条件,在一定的近似下,研究了爆轰对平板、圆管等简单结构的驱动加速过程。介绍了由碰撞引起的聚能射流、自由表面射流和激波自由面反射引起的微质量发射现象。讨论了圆管坍塌和平板非对称碰撞的射流问题。这些内容主要是作为第二章结果的延伸,对于许多与之无关的工程方面的研究,均未涉及。

作者向周光召先生表示敬意,他的许多工作,以及他早年在工作上对作者给予的指导和帮助对本书的形成起到了重要作用。本书收集了国内外学者和朋友们的研究成果,作者也在这里向他们致意。俞鸿儒、章冠人先生审阅了书稿,俞鸿儒先生还特意为本书写了序言。作者谨向他们致谢。

目 录

第一章 流体力学方程组	(1)
1.1 理想流体	(1)
1.2 间断面及其分类.....	(10)
1.3 理想不可压缩流体.....	(15)
1.4 粘性流体.....	(18)
1.5 自然坐标系和特征线方法.....	(23)
参考文献	(36)
第二章 激波极曲线方法,激波的反射和折射	(38)
2.1 斜激波极曲线.....	(38)
2.2 定常稀疏波.....	(59)
2.3 激波、爆轰波在固壁上的正规反射	(74)
2.4 马赫反射.....	(82)
2.5 激波、爆轰波在自由面上的正规反射	(94)
2.6 激波、爆轰波的正规折射.....	(101)
2.7 两非对称激波的正规斜碰撞和追赶	(122)
2.8 自由面超声速碰撞和射流极限角	(131)
参考文献.....	(146)
第三章 Whitham 方法,二维激波的传播和相互作用 ...	(149)
3.1 Whitham 规则	(150)
3.2 二维 Whitham 方程组及间断面上关系	(162)
3.3 激波在尖角上的绕射	(172)
3.4 激波在圆角上的绕射	(180)
3.5 激波的马赫反射	(185)
3.6 两任意交叉激波的分解和二维活塞问题	(197)
3.7 三维 Whitham 方法和特征线计算问题.....	(207)

3.8	激波在锥、柱和球上的绕射	(220)
3.9	薄物体上激波的绕射	(231)
3.10	激波的稳定性	(240)
3.11	Whitham 方法的改进和推广	(254)
	参考文献	(271)
第四章	线性化方法、小扰动激波	(275)
4.1	方程和边界条件的线性化	(275)
4.2	激波在小角上的绕射和马赫反射、Lighthill 方法	(283)
4.3	激波在微曲壁面上的绕射、丁汝-Ludloff 方法	(304)
4.4	激波和近于平面固壁的对碰	(321)
4.5	平面激波稳定性	(335)
	参考文献	(345)
第五章	界面不稳定性	(348)
5.1	理想不可压流体的 Taylor 不稳定性和 Helmholtz 不稳定性	(348)
5.2	粘性流体的界面不稳定性	(368)
5.3	弹粘性介质中的 Rayleigh-Taylor 不稳定性	(377)
5.4	烧蚀和相变面不稳定性问题	(383)
5.5	球面和柱面界面不稳定性	(388)
5.6	非线性界面不稳定性 I, 近似解析解	(415)
5.7	非线性界面不稳定性 II, 实验和数值模拟	(446)
5.8	湍流混合问题	(454)
	参考文献	(471)
第六章	爆轰驱动和射流	(479)
6.1	聚能射流和自由面喷射	(479)
6.2	滑移爆轰对平板的驱动和碰撞射流	(492)
6.3	滑移爆轰对柱壳的驱动	(505)
	参考文献	(515)

第一章 流体力学方程组

本章将简要地引入流体力学方程组及相应的间断面条件,并介绍自然坐标系及三维不定常流动的特征线方法。这些内容是为了方便读者阅读后面的内容而写的。那些需要详细了解有关内容的读者,可参阅本章末给出的参考文献[1~6]。

1.1 理想流体

流体力学研究的对象主要是气体和液体的运动。固体(包括金属和非金属)在高温高压下,具有流体的性质,也是本书所讨论的重要客体。流体力学研究流体的运动时,是把流体看作宏观的连续介质来处理的。我们所讨论的流体微元(亦称流团)在整个流体中可以认为是足够小的,但它的尺度却又比分子间的距离大得多。我们将要谈到的对空间变量的微分和积分,都是相对于宏观的尺度而言的。流体的速度 u ,则是指流团的宏观平均速度。

为了描绘流体的运动状态,我们还要在局部热力学平衡的条件下,使用一些热力学量。常用的热力学量有压力¹⁾ p ,密度 ρ (或其倒数比容 V),熵 S ,比内能 e ,焓 I ,温度 T 等。热力学量间满足一定的热力学关系式。上述这些热力学量中,独立的只有两个。在不定常流动的情况下,流体速度 u 以及各热力学量都是空间坐标 r 和时间 t 的函数。

下面,我们导出理想流体力学方程组及其相应的守恒形式。理想流体定义为无粘性、且流团间无热传导的流体。设流体中有一固定的有限体积 V_0 。在某个时刻 t ,该体积内流体的质量为

1) 文献上亦称压强。

$$\int_{V_0} \rho dv$$

这里 dv 为体积元。

设该固定体积 V_0 的表面积为 Σ_0 ，流体可以通过它流进或流出该体积 V_0 。显然，单位时间内，流出该体积的质量是

$$\int_{\Sigma_0} \rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{s} = \int_{\Sigma_0} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds$$

这里 $d\mathbf{s} = \mathbf{n} ds$ 为 Σ_0 的面积元矢量， $\mathbf{n}$ 为外法线方向单位矢量。由质量守恒，该体积 V_0 内质量变化率应等于单位时间通过其表面 Σ_0 流入的质量，即

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0} \rho dv = - \int_{\Sigma_0} \rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{s} = - \int_{\Sigma_0} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds \quad (1.1)$$

$\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ 是单位时间通过单位面积的质量流。而 $\rho \mathbf{u}$ 称为流体质量流密度矢量，它的方向和 $\mathbf{u}$ 的方向一致，它的大小表示单位时间流出与速度方向垂直的单位面积的质量。由高斯公式

$$\int_{\Sigma_0} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds = \int_{V_0} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) dv$$

并考虑 V_0 的固定性而将(1.1)式中的微分和积分符号对调，得到

$$\int_{V_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \right] dv = 0$$

由于这个积分对任意固定的 V_0 都成立，故被积函数应为零，从而我们得到下列质量守恒方程的微分形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.2)$$

此方程通常称为连续性方程。

再讨论该体积 V_0 内流体受力情况。周围流体通过它的表面