

科学版



研究生教学丛书

一维不定常流体动力学教程

卢芳云 编著



科学出版社

www.sciencep.com

科学版研究生教学丛书

一维不定常流体动力学教程

卢芳云 编著

国防科技大学研究生教材专项经费资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍一维不定常流体动力学的基本概念和系统理论,着重分析一维流体运动中非线性波的产生、波的传播等特性及其相互作用,介绍一维流场问题的求解方法和重要结论及其在实际问题中的应用,为流体动力学和冲击波研究提供基础理论.本书内容包括基本控制方程组、特征线基本理论、一维不定常连续流动、冲击波、波的相互作用、自模拟运动等.

本书可作为高等学校工程力学、流体动力学、应用数学和兵器科学等相关专业的研究生教材,也可从事相关领域工作的科研人员和工程技术人员提供理论参考.

图书在版编目(CIP)数据

一维不定常流体动力学教程/卢芳云编著. —北京:科学出版社,2006
(科学版研究生教学丛书)

ISBN 7-03-016968-9

I. 一… II. 卢… III. 一维流动-流体动力学-研究生-教材 IV. O351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 015268 号

责任编辑:李鹏奇 王 静 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 7 月第一次印刷 印张: 16 3/4

印数: 1—2 500

字数: 314 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本书是高等学校工程力学等专业的基础理论课程“一维不定常流体动力学”的教材,该课程主要讲授一维不定常流体动力学的基本概念和系统理论,求解一维不定常流问题的基本方法和重要结论,并重点介绍研究一维不定常冲击波和可压缩等熵流动所需的基本知识.本书分析了一维流体运动中各种非线性波的产生、结构、传播等特性以及它们之间的相互作用,并介绍了流体运动场问题的一些精确与近似求解解的方法及其在实际问题中的应用.

由于“一维不定常流体动力学”的研究思想和方法比较独到,专业性和学术性较强,一些概念比较抽象,初学者不易理解,多年来学生一直反映学习的起点较高,接受起来比较艰难,老师们也感觉教起来比较困难.本书作者根据自己10余年的教学经验,在广泛调研的基础上综合学生反映的情况,并参考国内外同类教材和专著,同时融入多年在该领域工作的经验,依据讲稿,完成了本书的编写.

本教材在保证学术性的前提下,强调夯实基础和培养解决实际问题的能力.在论述上本书力图把物理与数学有机结合起来,把理论与应用紧密结合起来,使读者掌握流体动力学应用与理论研究所需的知识和方法.重点突出了一维不定常流体动力学问题的基本理论、方法,以及重要结论的物理思想和物理意义,希望有利于学生理解基本现象,掌握问题实质.同时结合具有实际应用背景的示例分析,使学生加深理解和学会运用一维不定常流体动力学的方法论,解决相关领域的实际问题.为了帮助学生更好地理解 and 掌握课程内容和相关概念,作者还为每章编制了练习题.

教材的内容分为7个部分,每一部分都围绕一个中心问题展开.

绪论部分的核心是以联系的眼光论述本教材研究内容的作用、地位和目标.从连续介质力学、流体力学、非定常流体动力学到一维非定常流,从大到小、从宽到窄地引出本教材的研究内容.以学科之间、课程之间的横向联系,课程主线和学科内部各知识点的纵向联系,以及基本理论框架的构成和学科应用背景为牵引,展示本课程的作用、地位和目标,使读者了解本书的概貌及其与实际问题的关联,希望用“为什么”来激发学生的学习兴趣.

第1章围绕基本控制方程组的相关知识展开,包括热力学和本构关系的基本知识、基本方程组的建立和各种类型,使学生能由此及彼地理解基本方程组整个体系,内容上又不局限于一维方程,这样有利于学生日后在实际工作中的拓宽运

用,但又不过分强调数学推导,有助于学生理解基本方程组的物理思想.作为铺垫,第1章增加了可压缩流基本概念和流体运动与变形两节内容,旨在为学生的学习减小梯度,使初学者也能点到为止地理解相关名词,保证后续内容的及时掌握.这样的体系构造的内容比较完备,自成体系,且循序渐进,方便学生自学和理解流体动力学基本体系.

第2章将特征线基本理论从连续流动的内容中独立出来,主要是让读者充分理解特征线方法及其在流体动力学中的意义.对特征线方法的描述采用了从数学意义到物理意义、从个别情形到一般情形、从理论概念到实际应用的方法,旨在帮助学生理解特征线问题(这一直是个难点).

第3章和第4章分别围绕不定常连续流动稀疏波(压缩波)和带间断面的流动冲击波等各类流动的求解和应用展开,是本书的重点内容.书中基于偏微分方程组的分析,对简单波的定义、性质、物理图像和求解过程进行了系统论述,对连续流动的一般情形也给出了典型的应用分析.特别对冲击波的本质进行了较深入的分析,有助于读者以联系的眼光理解波的概念,理解冲击波的相关性质.建立了包括凝聚介质和多方气体的冲击波关系式,对冲击波的应用给出了多方面的分析,使书中内容具有更广泛的参考意义.

第5章专门介绍波的相互作用问题,其目的就是要突出分析波相互作用的方法—— $p-u$ 图法,以及不同波系结构的融合,集中展示贴近实际应用的问题.作者根据自己对问题的理解过程和多年的教学经验,总结了一种新的思路来分析波的相互作用问题和引出 $p-u$ 曲线分析方法.新的思路从引出问题、介绍求解方法到分析各类问题的发展过程一气呵成,抓住主线,连贯、衔接地带出相关概念和结论;对不同的问题强调共性,使学生能抓住问题的本质,举一反三地掌握所学内容,并能由此及彼地进行运用推广.

第6章介绍一种特殊的解析求解方法:自模拟解法及其理论依据,结论性地给出自模拟运动的性质特点,旨在让学生了解自模拟运动的解法,因为这个方法在历史上为原子弹的设计作出过重要贡献,现在在流体动力学领域也有一定的运用.但由于复杂流体动力学问题的求解已基本上借助于计算流体动力学,规律性的认识可以通过平面波问题理解,因此自模拟解法的应用见少,但作为一种解析分析方法,其对一维不定常流动问题的意义是明显的.本书在内容上强调自模拟运动的相关概念、分析思路和求解结果,淡化了许多求解过程和数学方法的描述,但是突出了一些结论性的东西,后者在实际应用中是很有价值的.

综合历届学生的反映,为了帮助学生理解问题、掌握方法,第3章(连续流动)和第4章(冲击波)中都增加了有关理论应用的分析示例,选择了基础性较强、类型较全面的例题,层次分明地突出物理图像和求解思路.同时,针对同一个问题采用不同的分析方法,运用联系和发展的思想求解实际问题,以拓宽学生

的思维,促进灵活运用.这样做即可帮助学生加深理解,又有利于他们今后在实际工作中运用和拓展知识解决实际问题,使教材更适合于教与学的需要.

每章后面都配有习题,有利于读者自习和复习,进行学习效果的自我检查.习题的内容覆盖教材的授课内容,突出了要求掌握的重点内容.习题类型多样,有思考题、证明题和计算题,还有大作业类型的问题,其中不乏与实际情况联系密切的问题.作者希望通过习题,读者能理解本书内容,掌握研究方法,同时将所学知识与实际应用联系起来,增加学习兴趣,培养解决实际问题,尤其是爆炸力学领域相关问题的能力.

考虑到课程内容较难理解的特点,教材采取了层层深入,突出物理思想和图像的编写模式.对于原理的描述,强调理解贯通,不只停留在表面和结论上,使学生尽可能知其然亦知其所以然,这既可以保证学术性又扎实了学生的基础.对于应用示例,我们选择基础性较强、应用较典型的例题,放弃专业性较强、过程特别烦琐的示例,使学生易接受、好发挥.在问题的描述和分析过程中,突出物理图像和求解思路,淡化数学过程,但不放弃必要的推导.教材还配备了大量精选插图,与教材内容配套,适时地与教材文字相呼应.

近几年的教学尝试表明,上述思想体系的运用使教学效果有了明显提高,学生对问题的理解明显加深,对方法的运用明显更加灵活,能够能动和联系地运用一维不定常流体动力学的方法论来分析实际问题.这正是本书编写的初衷.

作者特别感谢不定常流体动力学领域的前辈周毓麟院士和李维新老师.虽然从未谋面,但正是他们的专著首先把作者带到不定常流体动力学这个殿堂,然后为作者展开了教学的舞台.我们的教学最先就是以两位前辈的专著为教材开始的,后来的讲稿从他们的专著中吸取了很多养分和精华,也成就了本书的雏形,因此没有他们的引导是难以想象的.在此,特向两位前辈表示深深的感谢和敬意.

作者要感谢我的学生们为本书的出版提供的无私帮助.皮爱国、田占东、林玉亮、吴会民、王晓燕等帮忙录入了部分文字,绘制了部分插图,陈荣、赵鹏铎和崔云霄等为本书中公式和文字的校对、统稿排版提供了帮助.另外,顾良英女士帮助录入了大部分文字.

本书的编写和出版要感谢国防科技大学学科建设的项目支持和经费资助.

希望本书能为相关课程的教学提供一个有用的工具,为不定常流体动力学的学习者提供有益的帮助,能为从事流体动力学、爆炸力学专业的理论研究者 and 工程技术人员提供理论参考.

作者

2006年3月于长沙

符 号 表

除文中特殊说明外，下列符号的意义全书通用.

符 号	意 义
x_i (x, y, z)	欧拉空间坐标
X_i (X, Y, Z)	拉格朗日空间坐标
u_i (u, v, w)	质点速度
t	时间
σ_{ij}	应力
ϵ_{ij}	应变率
Σ_{ij}	切应力，黏性应力
p	压力
ρ	密度
τ	比容
T	温度
R	气体常数
c_V	定容比热
c_p	定压比热
D	冲击波速度
e	内能
i	热焓
S	熵
F	体力
q	热流密度
c_0	声速
c_L	纵波波速
c_T	横波波速
E, G	材料弹性常数

目 录

绪论	1
第 1 章 基本控制方程组	5
1.1 可压缩流与波的概念	5
1.2 物体的运动和变形	16
1.3 流体应力应变(率)关系	21
1.4 热力学基本概念	31
1.5 流体动力学基本方程组微分形式	44
1.6 流体动力学方程组的积分形式	64
习题 1	68
第 2 章 特征线基本理论	70
2.1 特征线的意义	70
2.2 小扰动的认识	72
2.3 特征线存在的本质	74
2.4 一维平面绝热流动	79
2.5 特征线基本性质	87
习题 2	89
第 3 章 一维不定常连续流动	91
3.1 可约双曲型偏微分方程组	91
3.2 简单波	95
3.3 稀疏波与压缩波	103
3.4 等熵流动的通解	112
3.5 稀疏波问题求解举例	120
习题 3	144
第 4 章 冲击波	148
4.1 冲击波的概念	148
4.2 冲击波关系式	150
4.3 冲击波的基本性质	166
4.4 弱冲击波近似	179
4.5 冲击波问题求解举例	184

习题 4	188
第 5 章 波的相互作用	190
5.1 波相互作用的基本情况	190
5.2 p - u 曲线分析方法	194
5.3 波与波相互作用	202
5.4 波与界面相互作用	208
5.5 黎曼问题分析	219
习题 5	223
第 6 章 自模拟运动	226
6.1 量纲分析	227
6.2 自模拟运动	233
6.3 自模拟运动的常微分方程组	237
6.4 点爆炸问题的自模拟解	241
6.5 球面冲击波的收聚运动	246
习题 6	254
参考文献	256

绪 论

1. 连续介质力学

固体力学、流体力学和空气动力学是我们已熟知的名词，也是力学学科的主要方向，各自有着鲜明的应用背景。由于研究对象的形态各异，力学特征不同，固体力学、流体力学和空气动力学对物质的研究各有侧重。通常把流体定义为在剪力作用下连续变形的物质。当剪力作用于固体时，固体产生一定程度的变形，只要作用力不变，变形也不变。流体则不同，对于静止流体，无论是黏性流体还是无黏性流体，只要受到剪力的作用，其各微元之间必表现出相对运动，可能产生任意大变形。所以常说“流体不能抵抗剪应力”。气体和液体同属于流体，两者的差别在于可压缩性的大小。由于固体的特征是具有强度效应，能抵抗变形，故固体力学的研究范畴侧重于材料和结构的受力与变形状况、刚体运动和弹性波问题等。运动流体表现出黏性和可压缩性，因此流体力学关心流动过程的黏性效应和波传播现象等，并由此提出了诸如雷诺数、马赫数、层流、湍流等相关概念。作为流体力学的一个应用方面，空气动力学更注重气体的可压缩性和声波的传播，其直接的应用背景是航空设计的需求。

物质的存在形式是相对的，三种形态在一定条件下可以转换。例如，在理想流体的假定下可以忽略流体的黏性；在加热软化或熔化和受力发生塑性变形的情况下，固体丧失承载能力。物质形态变化后，介质的力学特征随之发生变化，不变的是物质本身宏观上的连续性，共有的是自然界的基本守恒规律。基于这个意义，连续介质力学为固体力学、流体力学提供了共同的理论基础。

连续介质假定认为介质在空间连续分布，介质中的任一微元，其体积与物体体积相比足够小，而线度与分子间的距离相比却足够大，大到足以包含为数极多的分子。在这种理想化情形之下，一个微元体上的平均性质，如平均质量密度、平均位移、平均相互作用力等随其在介质中的位置而连续变化。连续介质概念中常用到“质点”这一术语，它代表的就是介质的最小微元，这个微元包含了很多分子，但几何上只把它当作一个点看待。质点速度就是指整个微元的速度，它是微元之中各分子状态统计平均的效果，而非各分子的速度。从统计物理的知识可知，这种平均效果是对物体宏观性质的描述。虽然实际材料的微观结构与连续介质的概念并不一致，但是大多数表征材料微观结构的尺度一般要比介质变形的尺度小得多，而且即使在某些特殊情况下微结构产生了一些重要现象，这些现象也

可以通过连续介质的宏观特性反映出来。

研究连续介质的力学就是连续介质力学，它的任务是决定连续体物质对外力的响应特性。连续介质力学的理论建立在应力、运动和变形的基本概念基础上，同时也建立在质量、动量和能量守恒三大定律以及本构关系（物态方程）的基础上。三个守恒定律反映了介质运动的普遍规律，本构关系则体现了某种介质的物理特性和力学特性，两者结合共同演绎出丰富的力学现象。不论本构关系如何，基本的守恒定律概括了一切力学现象的共同特性，我们称之为基本控制方程组。

2. 流体动力学

连续介质力学是一门经典学科，流体动力学是其中的一个部分。连续介质力学基本控制方程组就是流体动力学的理论基础。介质三维运动的基本控制方程组是一组非线性偏微分方程，由这个方程组求解介质动力学问题将涉及大量的数学分析，只有少数简单（但仍然重要）的问题（例如一维问题）可以从基本控制方程组求得解析解，这便是本书要解决的主要问题。

为了求得解析解，在一定条件下，运用基于特征线的数学方法可以有效地获得流场物理量的时间空间分布；对于瞬态波，包括强间断波和弱间断波，可以将坐标系建立在波阵面上，用相当直接和简单的方式得到流场物理量之间的关系式；如果问题具有动力相似性，如自模拟问题，还可以用简单方便的量纲分析方法求得流场的解。

更多的问题难以用纯数学分析方法得到直观的解析解。对一般的流体力学问题，数值求解已经成为一个应用普遍又行之有效的研究手段，由此产生的计算流体动力学（英文简称为 CFD，computational fluid dynamics）已成为一门比较成熟的学科，许多商业软件都具备处理流体运动过程动态波传播问题的功能。这个进展得益于电子计算机的迅猛发展和广泛应用。

流体动力学是一门古老而又年轻的学科。随着现代科学技术的迅速发展，流体动力学的研究领域已远远超出了它的奠基者牛顿、欧拉、伯努利等人两个世纪以前创立这门学科时所研究的范围。今天，流体动力学已演化出许多分支，除了基本的航空、水利应用以外，诸如宇航、核爆等这些当代重要的尖端科学技术都与流体动力学的研究密切相关。从微小的等离子体的运动到宏大的新星大爆发等天体现象，从各类武器的机理和效应到人体内血液流动等生理现象，都可借助流体动力学的理论进行研究。

3. 不定常流体动力学

在描述爆炸、爆轰和冲击波等现象时，流体动力学的理论显得卓有成效。爆炸与冲击的作用对象不外乎两类：固体和流体（液体和气体）。对于固体介质，

当忽略其剪切强度时,应作为可压缩流体处理.对于爆炸和冲击等强动载过程,除了过程的瞬时性、高应变率和局部效应等特征以外,还伴随有材料的大变形、塑性流动和破坏等现象.强动载作用下,固体介质将发生从固体力学特征向流体力学特征的转变,由此,流体动力学理论成为描述强动载问题的有力工具.同时,在这个过程中,与一般固体力学中波传播问题不同的是材料的非线性,与流体动力学其他问题不同之处在于过程的非线性.因为材料的塑性流动和大变形以及非线性瞬态波过程的存在,使不定常可压缩流体动力学理论被特别用于描述强动载问题.因此,流体动力学相关的一些基本概念、方法和重要结果都是研究爆炸与冲击波现象必须掌握的基本知识.

流体动力学研究包括理论研究、实验研究和数值计算三个方面.实验研究的重要性是不言而喻的,它是整个流体动力学的本源.由于流体动力学问题的复杂性和电子计算机的发展,数值计算也越来越显得不可或缺,计算流体动力学已成为一个独立分支得到迅速发展.流体动力学的理论研究则对流体运动过程中的状态量建立数学描述,通过合理近似获得解析解.从这些解,可以了解模型流场的现象和规律,为实际流体运动的深入研究提供必要和基本的论据,并指导进一步的实验研究.对于数值方法,问题的解析解可以用来指导计算格式和计算参数等的选取,也可以用来检验计算方法的精度,比较方法的优劣等.因此,了解和掌握理论研究的基本方法和重要成果,对实验工作和数值计算都是必要的和有益的,这也是本书的内容与目的所在.

对任何流体动力学问题获得解析解是不现实的.当涉及材料非线性、几何非线性和过程非线性等复杂分析时,情况尤其如此.爆轰与冲击波问题集中体现了这些非线性响应,而这正是本书的应用背景.因此本书的思路是从流体动力学方程组出发,对模型问题给出解析解,从而建立对非线性波问题的物理认识,并推而广之.具体说来是以一维不定常流体动力学问题为模型,主要以多方气体为研究对象,通过简单可行的数学处理获得直观合理的物理图像,进而对非线性波的现象与研究方法建立全面的认识.之所以研究一维问题,一方面因为一维不定常问题具有很强的应用背景,如平面撞击、空中点爆炸、一维管道流动和内弹道问题等,更重要的是一维问题常常为流体动力学解析研究方法的实现提供了条件,从而为揭示和认识可压缩流的典型现象和物理本质提供了一个很好的理解途径.本书将以流体动力学基本理论和研究方法为主要内容,重点研究一维不定常可压缩流动问题.

4. 一维不定常流体动力学

在对流体动力学问题进行理论研究时,首先需要建立关于波运动的概念.例如,扰动源在流动中造成的影响以声波形式向四周传播,瞬时能量释放和外来冲

撞等化学或物理作用将在介质中产生爆轰波、冲击波, 流体流动中存在压缩波和稀疏波传播等. 许多复杂的流动问题可分解成两个或几个波的相互作用来研究. 借助于各种形式波的运动, 可以对流动过程给出清晰的物理图像, 进行有效的数学描述.

其次, 讨论流体动力学问题, 需要掌握一定的热力学基础知识, 并对流体的本构关系有所了解. 运动流体的状态由运动量 (速度 u) 及一些状态量 (如压力 p , 密度 ρ , 内能 e 和温度 T 等) 来描述. 基于连续介质假定, 这些量都是对连续介质状态的宏观描述, 我们称这些宏观状态量为热力学量. 流体动力学的任务就是研究流体运动过程中这些热力学量的变化规律, 流体的变形性质和热力学物态方程是影响流体运动特征的重要因素.

特征线的概念在流体动力学中具有特别的意义, 上述波的运动图像可以用特征线方法建立起来. 特征线方法是求解流体动力学问题的一个重要数学方法, 原则上能用它求解各种流动问题. 它提供了诸如依赖区、影响域和简单波区等概念, 使我们可以清楚地看出问题的初始条件、边界条件是怎样对流动过程起作用的. 另外, 它还把流场划分为不同的波动区域进行求解, 能清楚地揭示运动的物理过程.

流体动力学中一个重要内容是冲击波. 冲击波不仅是现实应用中存在的现象, 在数学上它是流体动力学方程组非线性发展的产物. 作为间断面, 它还求解间断两边区域中的流动问题提供了边界条件. 研究冲击波的运动规律具有重要的实用价值和学术意义.

在变常流体动力学中, 线性化方法、特征线方法、速度图法、量纲分析方法等是流体动力学熟知而有效的方法.

以上简单引出了本书的主要内容, 了解和掌握这些内容, 对流体动力学的理论研究是必需的. 作为研究生教材, 本书旨在为兵器科学、工程力学、流体力学、应用数学和航天工程等相关专业的研究生学习专业基础理论提供指导, 着重分析一维流体运动中非线性波的结构、传播等特性以及它们之间的相互作用, 介绍流体运动问题的一些精确解和近似解以及求解方法, 并通过对典型问题的详细求解来描述这些解法在实际问题中的应用. 希望读者通过本书的学习, 理解相关的物理问题, 同时掌握基本理论的应用技巧.

第 1 章 基本控制方程组

1.1 可压缩流与波的概念

1.1.1 可压缩流相关概念

1. 流体力学相关概念

设想一个能够把其中的介质看作连续介质的最小体积 $\delta V'$ ，其中的质量为 δm ，定义一点的密度 ρ 为

$$\rho = \lim_{\delta V' \rightarrow \delta V} \frac{\delta m}{\delta V}. \quad (1.1.1)$$

一点的流体速度 u 是指某瞬时通过该点的流体微团的瞬时速度。流体微团指尺寸可以与 $\delta V'$ 相比拟的最小流体质团，有时候也简称为质点。某一时刻，流场中处处与速度矢量相切的曲线称为流场的瞬时流线。如果流动是定常的，流线将不随时间变化，这时流线与流体微团的运动轨迹——迹线重合。定常流是指在空间某一点的任何状态量都不随时间变化的流动。

可以用两种方法来描述流体的运动。一种是拉格朗日方法，它研究的是单个流体微团或质点的经历，确定某个指定流体微团在每一瞬时的位置、密度、应力状态等物理量，以及从一个质点到另一个质点物理量的变化。另一种是欧拉方法，它着眼于空间固定点，确定在每一瞬时通过该点的流体微团的密度、压力等物理量，以及从一个空间点到另一个空间点物理量的变化。

系统定义为确定物质的任意组合，系统之外的一切都称为环境或外界；系统的边界定义为将系统和环境分开的假想表面。利用系统这个概念可以把注意力集中于感兴趣的物体或物质上，并观察系统与环境的相互关系。流体有极大的可流动性，对于运动着的流体，很难确定流体系统的边界，这时利用一个有流体通过的给定空间体积来分析问题会更简单些，由此引出了控制体的概念。控制体定义为流体流过的、固定在空间的一个任意体积，占据控制体的流体本身是随时间改变的。控制体的边界面称为控制面，它总是封闭的表面，但可以是单连通的也可以是多连通的。

2. 一点的应力

体力或质量力是指与物体体积或质量成正比的力，这类力由力场产生，例如

重力、磁力和电力等,对于加速坐标系,惯性力(如离心力)也包括在内.表面力是在控制面上由控制体外物质施加给控制体内物质的作用力.设想流体中有一个平面,面积为 δA ,此表面一侧的流体必作用于另一侧的流体,这种作用力称为表面力.作用在面积 δA 上的表面力可以分解成垂直于表面 δA 的分量 $\delta F_{\text{垂直}}$ 和位于 δA 平面内的分量 $\delta F_{\text{切向}}$.正应力 σ 定义为单位面积上表面力的垂直分量取极限;剪应力 Σ 定义为单位面积表面力的切向分量取极限,如式(1.1.2)和式(1.1.3)所示.

$$\sigma = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_{\text{垂直}}}{\delta A}, \quad (1.1.2)$$

$$\Sigma = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_{\text{切向}}}{\delta A}, \quad (1.1.3)$$

式中面积 $\delta A'$ 与体积 $\delta V'$ 有可比拟的尺度.

剪应力正比于剪应变率的流体称为牛顿流体,其比例系数称为黏性系数.黏性系数为零的流体定义为理想流体.理想流体和静止流体不承受剪应力,运动黏性流体的应力状态用九个应力分量描述.

3. 系统的状态与过程

系统的状态就是系统的一种情况或外貌.通过详细的物理参量的描述,可以把一种状态和其他状态区别开来.系统的状态量是系统的任何一个可观察到的特性,如位置、速度、方向、压力、密度等物理量.足够数量的独立状态量就能完全确定一个系统的状态.

过程是状态的变化,它部分地由系统所经历的一系列状态来描述.在一个过程中,系统与环境之间可能发生某种相互作用,过程的描述就是要说明这种相互作用.例如,绝热过程是系统与环境不发生热交换的过程,但这时,系统内部的质点之间可以有热交换.循环是系统的起始状态与终末状态相同的过程,即初始和终末状态的所有状态量的数值都相同.经过一个过程后描述状态的所有物理量又恢复原状,即可以消除过程的效应,则此过程是可逆的.如果没有办法使系统和环境恢复到起始状态,则过程是不可逆的.任何实际过程都是不可逆的,这也是热力学第二定律的一个内容.造成不可逆的原因有黏性、热传导、质量扩散等.可逆的绝热过程为等熵过程,等熵过程中每一步的熵相同.定义比热比 $\gamma = c_p/c_v$,其中 c_p 和 c_v 分别是定压比热和定容比热,在等熵过程中, γ 起着很重要的作用.

4. 扰动的传播速度

如图1.1.1所示,假定在理想流体一维流场中有一个扰动沿 x 方向传播,

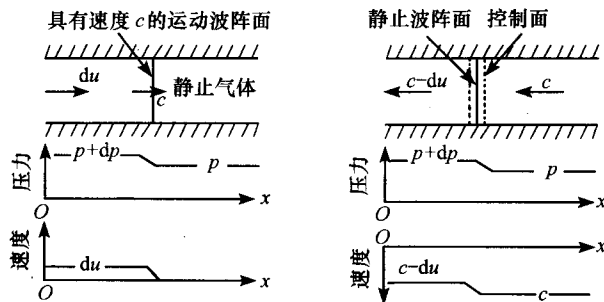


图 1.1.1 一维平面扰动的传播

传播速度为 c . 围绕扰动阵面取控制面, 建立与扰动阵面一起运动的坐标系, 忽略作用于控制体上的剪力和体力, 对控制面写出扰动前后的动量守恒关系式为

$$A[p - (p + dp)] = A\rho c[(c - du) - c]$$

或

$$dp = \rho c du, \quad (1.1.4)$$

式中 A 为横截面积, u 为流体运动速度. 同时写出质量守恒关系式为

$$A\rho c = A(\rho + d\rho)(c - du)$$

或

$$d\rho/\rho = du/c, \quad (1.1.5)$$

由上面式 (1.1.4) 和式 (1.1.5) 解出扰动的传播速度 c

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho}. \quad (1.1.6)$$

由于上述过程未考虑不可逆因素, 因此过程是等熵的, 式 (1.1.6) 即声速定义式

$$c_0^2 = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_s, \quad (1.1.7)$$

上式中下标 S 表示等熵. 由此可见, 扰动是以声速传播的. 完全气体的声速可表示成 $c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\gamma RT}$, 常态下空气中的声速为 $c = 20.1 \sqrt{T}$. 将式 (1.1.7)

与压缩模量 K 的定义式 $\frac{1}{K} = -\left(\frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{d\tau}{dp} \right)$ (其中 $\tau = 1/\rho$ 为比容) 比较知, 声速是流体可压缩性的表现. 按照定义式 (1.1.7), 不可压缩流体密度不变, 因此声速为无限大, 这时, 流体中任何一点发出的扰动在其他地方同时感受到. 不可压缩流体只是一种理想情况, 对于实际流体, 当密度的相对变化很小时也被当作不可压缩流体处理.

在研究波的传播时, 一个很有用的组合量是声阻抗, 定义声阻抗为 ρc 或 $A\rho c$.

5. 流体力学领域的划分

声学的范围是流体的运动速度 u 远小于声速 c ，压力、温度、密度的相对变化可以较大。

不可压缩流体力学的范围是指，流体速度小于声速，密度的相对变化不大，但压力、温度的相对变化可以非常大。计算压力变化时，由于略去可压缩性引起的误差大约等于流速与声速比值平方的四分之一，因此，用不可压缩流体处理流体力学的许多亚声速问题引起的误差很小。

可压缩流体力学的范围是指流体速度与声速的大小可比拟，且压力、温度、密度的相对变化都比较大。

不可压缩流、亚声速流和超声速流之间的物理差别在于介质的可压缩性。考察在可压缩介质中做匀速直线运动的点源扰动形成的波传播效应，此点源在每一瞬间都发出一道扰动波，此波相对于介质以球面形式从点源传播出去。在任何瞬时波传播造成的流场压力是全部发出波引起的压力变化的叠加。图 1.1.2 给出了运动点源扰动造成的波传播图像。图中 0 点代表扰动源的现时位置，-1 点代表

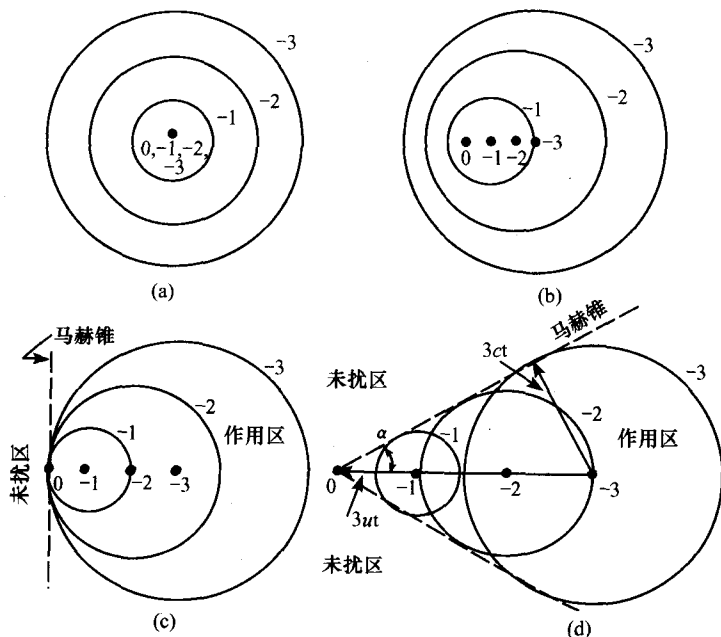


图 1.1.2 均匀运动的点源扰动引起的波传播

- (a) 扰动点源静止；(b) 扰动点源以亚声速运动；
(c) 扰动点源以声速运动；(d) 扰动点源以超声速运动