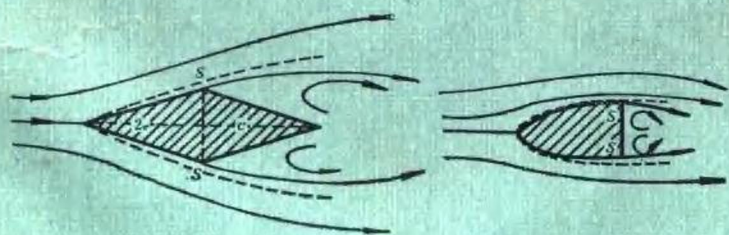


气体动力学

林兆福 编

717438



北京航空航天大学出版社

717438

V211/28

气体动力学

林兆福 编

HK30/16



航空工业出版社



C0317583

内 容 简 介

本书主要研究可压缩流体动力学的基本理论和在航空发动机上的应用。同时讨论了用定比热气动函数来研究气体引射器中的一些问题，并介绍了一种新型的变比热气动函数。

全书共分六章。在内容上特别注意了加强基础、突出工程应用及贯彻循序渐进和少而精的原则。书中采用国务院颁布的“法定计量单位”，在书后附有各种必需的数值表。

本书可供航空发动机专业的学生作为教科书或参考书，也可供有关的工程技术人员参考。

气 体 动 力 学

QITI DONGLIXUE

林兆福 编

责任编辑 郭维烈

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京航空航天大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张：15.25 字数：410千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷 印数：2000册

ISBN 7-81012-074-3/V·008 定价：2.90元

前 言

本书是根据几年来的教学实践,在原讲义的基础上,并参考了西北工业大学、北京航空学院、南京航空学院合编的《气体动力学基础》等编写的。主要考虑可压缩流体的动力学基本原理。

全书共分六章。在介绍了气体动力学的基本概念之后,重点介绍了一维定常流的基本方程和一维定常管流及其在航空发动机中的应用。对膨胀波、激波和粘性流等问题也做了简单的讨论。

本书在讨论了定比热的气动函数后,介绍了气体引射器,其目的是把它作为气动函数应用的一个实例,同时探讨引射器中的一些问题。除此之外,本书还介绍了一种新型的变比热气动函数。这两部分内容集中了范作民副教授的部分科研成果。

在编写本书的过程中,编者本着由浅入深、循序渐进,少而精的原则,着重于物理概念的阐述,避免过于繁琐的数学推导,力图加强基础理论、突出工程观点。并在每章后附有习题,以期使学生在知识和能力两个方面同时增长。

范作民副教授对文稿进行了全面的审查,提出了不少改进意见,并向编者提供了自己的部分研究成果。邓福庆教授在百忙中也非常仔细地审阅了部分文稿,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,教学经验浅陋,书中难免有不妥之处,望读者批评指正。

编 者

1987. 8.

符 号

A	面积	米 ²
a	加速度	米/秒 ²
a	音速	米/秒
c_p	定压比热容	焦耳/公斤·开
D	直径	米
E	总能量	焦耳
F	作用力	牛顿
f	摩擦系数	
g	重力加速度	米/秒 ²
H	高度	米
H	焓	焦耳
h	比焓	焦耳/公斤
J	冲量	牛顿
j	密流	公斤/米 ² ·秒
K_n	克努森数	
k	定熵指数	
L	长度	米
M	力矩	牛顿·米
Ma	马赫数	
m	质量	公斤
N	功率	瓦特
n	多变指数	
p	压强	牛顿/米 ²

\dot{Q}	换热量	焦耳
q	比换热量	焦耳/公斤
q_m	质量流量	公斤/秒
q_V	体积流量	米 ³ /秒
R	气体常数	焦耳/公斤·开
Re	雷诺数	
r	半径	米
S	熵	焦耳/开
s	比熵	焦耳/公斤·开
T	温度	开
t	时间	秒
U	内能	焦耳
u	比内能	焦耳/公斤
V	速度	米/秒
V	体积	米 ³
v	比容	米 ³ /公斤
W	功	焦耳
μ	动力粘性系数	牛顿·秒/米 ²
ν	运动粘性系数	厘米 ² /秒
ρ	密度	公斤/米 ³
λ	速度系数	
λ	平均自由行程	米
τ	摩擦应力	牛顿/米 ²
σ	总压恢复系数	
α	气动系数	
β	气动系数	
ψ	熵函数	
ξ	沿程损失系数	
β	激波角	度

上标

* 滞止状态

下标

cr 临界状态

目 录

第一章 绪论

§1-1	气体动力学的研究对象和目的	(1)
§1-2	气体动力学的研究方法	(2)
§1-3	连续介质的假设	(4)
§1-4	连续介质中一点处的密度	(7)
§1-5	气体的压缩性、粘性和导热性	(9)
一	气体的压缩性	(9)
二	气体的粘性	(9)
三	气体的导热性	(14)
§1-6	作用在流体上的力	(15)
§1-7	国际标准大气	(18)
一	国际标准大气	(18)
二	标准大气性质表	(21)
§1-8	流体运动的数学描述方法	(22)
一	拉格朗日法	(22)
二	欧拉法	(25)
三	流体运动的分类	(28)
§1-9	迹线和流线	(29)
一	迹线	(29)
二	流线	(31)
三	流管	(35)
§1-10	绝对坐标系与相对坐标系	(36)
习题		(39)

第二章 一维定常流的基本方程

§2-1 体系和控制体	(43)
一 体系	(43)
二 控制体	(44)
§2-2 连续方程	(45)
一 用欧拉法推导连续方程	(45)
二 用拉格朗日法推导连续方程	(46)
三 微分形式的连续方程	(49)
§2-3 动量方程	(50)
一 积分形式的动量方程	(50)
二 动量方程的应用	(57)
§2-4 动量矩方程	(65)
§2-5 微分形式的动量方程	(68)
§2-6 贝努利方程	(71)
一 贝努利方程的推导	(71)
二 贝努利方程的应用	(73)
§2-7 能量方程	(79)
一 能量方程的推导	(79)
二 能量方程与贝努利方程的关系	(83)
三 能量方程的应用	(85)
§2-8 热力学第二定律	(87)
§2-9 音速和马赫数	(87)
一 音速	(87)
二 马赫数	(93)
§2-10 滞止参数	(97)
一 滞止状态	(97)
二 滞止焓和滞止温度	(99)
三 滞止压强	(100)

四	滞止密度	(101)
五	滞止音速	(102)
六	滞止参数在流动中的变化规律	(102)
七	压缩性因子	(107)
八	静压和总压的测量	(108)
§2-11	临界参数、极限速度和速度系数	(110)
一	临界参数	(110)
二	极限速度	(112)
三	速度系数	(114)
§2-12	气体动力学函数	(119)
一	函数 $\tau(\lambda)$ 、 $\pi(\lambda)$ 和 $\varepsilon(\lambda)$	(119)
二	流量函数	(121)
三	冲量函数	(126)
四	气体动力学函数表	(129)
五	气动函数的应用	(130)
§2-13	气体引射器	(137)
一	临界状态的引射系数	(138)
二	增压比的计算	(143)
§2-14	变比热气动函数	(147)
一	气动系数的概念	(147)
二	用 Ma 数表示的变比热气动函数	(148)
三	用 λ 数表示的变比热气动函数	(152)
四	气动系数 α 的图线	(155)
五	变比热气动函数的应用	(157)
习题		(158)

第三章 膨胀波

§3-1	膨胀波的形成	(167)
一	微弱扰动在气流中的传播	(167)

二	膨胀波的形成及其特点	(172)
§3-2	普朗特-迈耶流动	(175)
一	普朗特-迈耶流动	(175)
二	普朗特-迈耶流动的主导方程	(178)
三	完全气体的普朗特-迈耶函数	(180)
四	普朗特-迈耶函数表	(182)
§3-3	微弱压缩波	(185)
§3-4	波的反射和相交	(187)
一	膨胀波在直固体壁面上的反射	(188)
二	膨胀波的相交	(189)
三	膨胀波在自由边界上的反射	(191)
四	膨胀波与压缩波相交	(193)
习题		(194)

第四章 激波

§4-1	正激波的形成	(200)
§4-2	激波的性质	(203)
一	激波的传播速度和激波强度	(203)
二	激波的厚度	(206)
三	在空间运动的激波	(207)
§4-3	正激波	(208)
一	正激波的基本方程	(208)
二	等截面管流的范诺线和瑞利线	(209)
三	完全气体中的正激波	(214)
四	正激波表	(220)
§4-4	平面斜激波	(222)
一	斜激波的形成	(222)
二	斜激波的基本方程	(223)
三	完全气体中的斜激波	(225)

四	斜激波的图线和表格	(230)
五	用正激波表计算斜激波	(241)
§4-5	激波极线图	(246)
§4-6	激波的反射和相交	(250)
一	激波在固体壁面上的反射	(251)
二	激波在自由边界上的反射	(254)
三	异侧激波的相交	(255)
四	同侧激波的相交	(256)
	习题	(257)

第五章 一维定常管流

§5-1	变截面管流	(264)
一	截面积变化对气流参数的影响	(264)
二	收缩喷管	(271)
三	拉瓦尔喷管	(285)
四	超音速风洞—多喉道管流	(296)
§5-2	等截面摩擦管流	(302)
一	摩擦对气流参数的影响	(302)
二	定比热完全气体的范诺线	(307)
三	摩擦管流的计算公式	(309)
四	摩擦壅塞	(316)
五	压强对摩擦管流的影响	(324)
§5-3	换热管流	(331)
一	热交换对气流参数的影响	(331)
二	定比热完全气体的瑞利线	(339)
三	换热管流的计算公式	(340)
四	换热壅塞	(345)
五	反压对加热管流流动状态的影响	(352)
六	热阻	(355)

§5-4 复杂的一维定常管流	(356)
一 基本方程	(357)
二 速度变化的综合公式	(358)
习题	(362)

第六章 粘性流基础

§6-1 层流和紊流	(372)
一 层流和紊流	(372)
二 雷诺数	(373)
§6-2 充分发展的管中层流流动	(377)
一 圆管内层流的进口段	(377)
二 速度分布	(378)
三 沿程损失的计算	(381)
§6-3 流体在管中的紊流流动	(382)
一 紊流的脉动现象与时均化	(382)
二 紊流流动的三个区域	(384)
三 速度分布	(385)
四 充分发展的紊流的沿程损失	(386)
§6-4 局部损失	(389)
一 局部损失的计算	(389)
二 减少局部损失的措施	(395)
§6-5 附面层	(396)
一 附面层概念	(396)
二 附面层厚度	(398)
三 附面层的积分方程式	(400)
四 沿平板附面层积分方程式计算	(405)
五 曲壁附面层的分离现象	(411)
习题	(413)
附录一 标准大气性质表	(416)

附录二	气体动力学函数表.....	(417)
附录三	普朗特-迈耶函数表	(445)
附录四	正激波表.....	(448)
附录五	斜激波前后气流参数表.....	(455)
附录六	有摩擦的等截面绝热流函数表.....	(465)
附录七	滞止温度变化的等截面无摩擦流动函数表.....	(468)
参考文献	(470)

第一章 绪 论

§1-1 气体动力学的研究对象和目的

气体动力学是研究可压缩流体，特别是气体在流动过程中气体运动的基本规律以及气体与物体之间相互作用的一门科学。气体的流动可以在物体内部进行，也可以在物体外部进行。前者的例子有：空气流过喷气发动机的扩压进气道、燃气通过尾喷管及空气在风洞内的流动等；后者的例子有：空气流过飞机和导弹的壳体以及螺旋桨的桨叶等。在这些内部和外部的流动过程中，气体运动的规律各不相同，例如在扩压进气道中，空气的速度减小，压强和温度上升，而总焓保持不变。由于空气速度和压强的改变，引起空气和物体之间产生力的作用，这种力可以是阻力，也可以是升力或者是推力；由于空气温度的改变，引起空气和物体之间有热量的交换；有时由于气体和物体之间有力的作用，还可以形成机械功的交换，如用轴传动的空气压气机和燃气涡轮。在所有上述这些过程中，虽然气体运动的规律各不相同，但是它们随时随地都遵从一些共同性的基本定律，这些基本定律是：

1. 质量守恒定律
2. 牛顿第二定律
3. 热力学第一定律
4. 热力学第二定律

研究气体动力学的目的，就是找出这些共同性的基本规律以及考虑如何正确地应用这些规律解决工程技术问题，并预计新的流动情况。

气体动力学是现代流体力学的一个分支。流体力学主要研究

流体（液体和气体）的平衡和运动的规律。它可分为流体静力学和流体动力学，不可压缩流体力学，可压缩流体力学，牛顿流体力学和非牛顿流体力学等，而气体动力学也可以叫做可压缩流体力学，主要研究气体的可压缩性呈显著作用时的流动规律以及气体和物体之间的相互作用。

流体力学的另一个分支是空气动力学，它是流体力学用于研究飞行器运动的进一步发展。与气体动力学的主要区别在于它主要研究空气流过飞行器外部时的运动规律，而气体动力学侧重于研究气体（空气、燃气等）在物体内部（如发动机内）的运动规律。

学习气体动力学需要有热力学的基础。因为在发动机和其它许多设备中能量的转换是在工质流动的过程中实现的。而热力学是研究能量、能量转换及其与物质性质之间的关系的科学，它侧重于静止的体系，而气体动力学侧重于力的作用，讨论管道内流动状态发生变化的热力过程。

§1-2 气体动力学的研究方法

气体动力学的研究方法和物理学的其它各分支的研究方法一样，有实验研究，理论分析和数值方法三种。这三种方法不是互相排斥，而是相互取长补短，互相促进，彼此影响的。

实验研究方法在气体动力学中有着广泛的应用。气体动力学的实验研究主要在水洞、风洞、激波管等实验设备中进行模型试验或实物试验。它的主要优点在于它能在与所研究的问题完全相同或大体相同的条件下进行观测，因此通过试验得出的结果较为真实，一般来说是可靠的。然而，实验研究的方法往往受到一定的限制。首先要受到模型尺寸的限制，例如，为了模拟真实流动，安排实验时最好使几个无量纲参数都能满足要求，但这在实际上总会遇到困难，对这些无量纲参数，我们只能择其主要牺牲其

余，其次是实验还要受到边界的影响，如一架飞机在无限大的空间中飞行，用风洞模拟这种情况时要受到风洞壁面的干扰。此外，在实验中测量本身也会影响所得的结果。再有，实验往往耗费大量的人力、物力，因此经常遇到许多困难。

理论分析的方法一般包括下列几个步骤：(1) 通过实验和观察对气体的性质及运动的特征进行分析研究，找出其影响的因素，并根据不同的问题分析哪些是主要的影响因素，哪些是次要的影响因素，然后，抓住主要的影响因素忽略次要的影响因素对气体及运动进行简化和近似，抽象出合理的理论模型。在这一步骤中，一方面要善于根据不同的问题分清主次影响因素；另一方面根据找到的主要影响因素对所研究的问题提出便于理论处理的理论模型。(2) 对于上述理论模型，根据已总结出来的基本定律以及有关气体性质的经验公式，建立描写气体运动规律的封闭方程组（微分形式或积分形式）以及相应的初始条件和边界条件。(3) 利用各种数学工具准确地或近似地解出方程组。(4) 求出方程组的解答后，必须对它进行分析，以揭示由解所表示出来的物理量的变化规律，并将它与实验结果进行比较，确定解的准确度及适用范围。(5) 考虑次要的影响因素对结果进行必要的修正。

理论分析方法的特点在于科学的抽象，从而能够利用数学方法求出理论结果，清晰地、普遍地揭示出气体运动的内在规律。然而，由于数学发展水平的限制，理论研究方法往往只能局限于比较简单的理论模型，因此不能满足研究更复杂更符合实际的流动问题。

近年来，随着计算机和一系列有效的近似计算方法，如有限差分法、有限元法、有限基本解方法等等的发展，使数值方法在气体动力学研究方法中的作用和地位不断提高，并已成为与实验研究、理论分析并列的具有同等重要意义的研究方法。目前，应用各种有效的数值计算方法和计算机已能迅速地、准确地确定出