



工业和信息化部“十二五”规划教材

空气与气体 动力学基础

徐 敏 ◎ 主编



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

空气与气体动力学基础

徐 敏 主编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书阐述了空气动力学的基础理论。全书共含 9 章内容,包括概论、流体力学基础知识、流体运动学与动力学基础、不可压理想流体绕物体的流动、高速可压缩流基础知识、一维定常可压缩管内流动、附面层和黏性流动、绕翼型的低速流动及绕翼型的可压缩流动。

本书可作为航空航天类院校有关专业的基础教材,特别是供飞行器设计、宇航动力、能源动力学、工程流体力学等专业及相邻专业的本科学生使用,也可供从事空气动力工作和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气与气体动力学基础/徐敏主编. —西安:西北工业大学出版社,2015.2

ISBN 978-7-5612-4347-3

I. ①空… II. ①徐… III. ①空气动力学②气体动力学 IV. ①V211.1②O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 047464 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:15.75

字 数:382 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

前 言

本书从飞行器设计的角度出发,按照空气动力学科体系,阐述空气运动所遵循的基本规律以及飞行器在低速、亚声速和超声速绕流时的空气动力特性。本书可作为航空航天类院校有关专业的基础教材,特别是供飞行器设计、宇航动力、能源动力学、工程流体力学等专业及相邻专业的本科学生使用,也可供从事空气动力工作和有关科技人员参考。

全书共分9章。第0章从空气动力学的发展历史到空气动力学应用进行了简要的阐述,并明确指出了学习本书的目的;第1章介绍流体力学的基础知识,主要阐述流体介质的基本属性和流体静力学基础;第2章介绍流体运动学和动力学基础;第3章介绍不可压理想流体绕物体的流动;第4章介绍高速可压缩流动的基础知识;第5章介绍一维管道流动的基础知识以及拉伐尔喷管工作的基本原理;第6章简要介绍黏性流动和附面层基本概念,推导平板摩擦阻力的简化求解方法;第7,8章分别介绍不可压流与可压流绕翼型的流体特性和空气动力特性。

编写本书的初衷旨在使读者对于飞行器在空气中运动时所产生的气动现象建立明晰的物理概念,对于空气动力变化的规律有较深刻的理解,并为学习其他专业课程打下坚实的基础。

本书由西北工业大学航天学院徐敏(第0章和第6章)、安效民(第4,7,8章)、康伟(第1~3章)和李强(第5章)共同编写。全书最后由徐敏作了统稿和校阅。

由于学识水平有限,加上时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2015年1月

目 录

第 0 章 概论	1
0.1 空气动力学问题概述	1
0.2 空气动力学发展概述	2
0.3 空气动力学分类	4
0.4 飞行器气动问题和气动设计	4
0.5 空气动力学的研究方法	6
0.6 未来飞行器的气动问题	8
第 1 章 流体力学基础知识	9
1.1 流体介质	9
1.2 流体静力学基础	17
1.3 标准大气	20
习题	24
第 2 章 流体运动学和动力学基础	25
2.1 流场	25
2.2 流体微团的运动分析	29
2.3 旋涡运动	35
2.4 连续方程和流函数	42
2.5 欧拉运动方程及其积分	47
2.6 能量方程	53
习题	54
第 3 章 不可压理想流体绕物体的流动	57
3.1 不可压理想流体的无旋运动	57
3.2 拉普拉斯方程的基本解	60
3.3 绕圆柱的流动	66
习题	72
第 4 章 高速可压缩流基础知识	74
4.1 热力学基础知识	74
4.2 声速和马赫数	77
4.3 高速一维定常流	79

4.4 马赫波与膨胀波·····	83
4.5 激波·····	90
习题·····	100
第5章 一维定常可压缩管内流动·····	102
5.1 理想气体在变截面管道中的流动·····	102
5.2 收缩喷管·····	106
5.3 拉伐尔喷管·····	111
5.4 超声速内压式进气道及其他变截面管流·····	120
习题·····	128
第6章 附面层和黏性流动·····	130
6.1 纳维-斯托克斯方程·····	130
6.2 附面层概念·····	139
6.3 附面层微分方程及摩擦阻力计算·····	144
6.4 有压强梯度的黏流及分离·····	149
6.5 高速可压流附面层·····	153
习题·····	160
第7章 绕翼型的低速流动·····	162
7.1 翼型的几何参数与气动参数·····	162
7.2 低速翼型的气动特性概述·····	166
7.3 库塔-儒可夫斯基后缘条件和环量的确定·····	168
7.4 薄翼型理论·····	171
7.5 任意形状翼型绕流的数值方法——面元法·····	185
7.6 实用低速翼型的气动特性·····	188
习题·····	191
第8章 绕翼型的可压缩流动·····	195
8.1 速度位方程·····	195
8.2 小扰动线化理论·····	196
8.3 亚声速流中薄翼型的气动特性·····	199
8.4 超声速流中的翼型·····	202
习题·····	208
附录·····	210
参考文献·····	245

第 0 章 概 论

0.1 空气动力学问题概述

空气动力学是研究空气与物体之间有相对运动(物体在空气中运动或物体不动、空气流过物体)时空气运动的基本规律以及空气与物体之间的作用力的科学。换言之,空气动力学是一门关于运动空气的科学。

众所周知,空气动力学是和飞机的产生、发展联系在一起的。它是飞行器研制的重要支撑技术。事实上,空气动力学研究的对象包括所有在大气层内的飞行器(如飞机、导弹、飞船、航天运载器等)。这门科学还要涉及飞行器的飞行性能、飞行稳定性和操纵性问题。在民生的其他方面,空气动力学同样也是应用广泛,如汽车制造、轮船、高速列车、建筑、矿井通风、风机制造、汽轮机、天气预报等等。

空气相对于物体的运动,可以在物体的外部进行(像空气流过飞机表面、导弹表面和螺旋桨等),也可以在物体的内部进行(像空气在风洞内部和飞行器的进气道内部等的流动)。在这些外部或内部流动中,尽管空气的具体运动和研究运动的目的有所不同,但它们都发生一些共同的流动现象和遵循一些共同的流动规律,例如质量守恒、牛顿第二定律、能量守恒和热力学第一定律、第二定律等。

空气/气体动力学是现代流体力学的一个分支。它们之间的关系如图 0-1 所示。

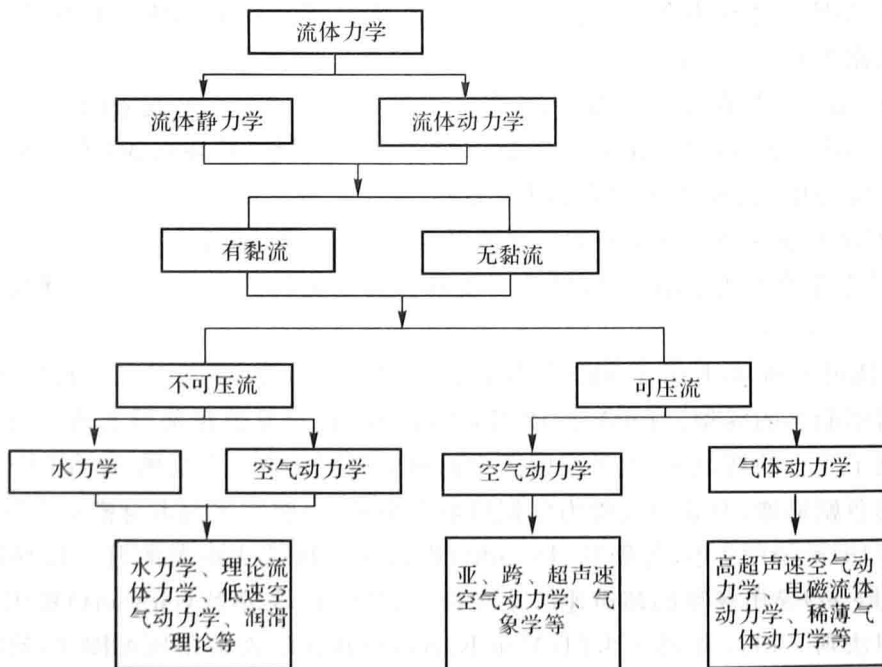


图 0-1 流体力学与空气/气体动力学的关系图

研究空气动力学的目的,不仅是要认识这些流动现象的基本实质,找出这些共同性的基本规律在空气动力学中的表述,更是要应用这些规律能动地解决飞行器的空气动力问题和与之有关的工程技术问题,如飞行器的气动外形设计、发动机设计、飞行性能设计和控制系统设计。

0.2 空气动力学发展概述

空气动力学是现代流体力学的一个分支,它是从流体力学发展而来的。18世纪是流体力学的创建阶段。伯努利(Bernoulli)在1738年编写的《流体动力学》一书中,建立了不可压流体的压强和速度之间的关系,即伯努利公式。欧拉(Euler)在1755年建立了理想不可压流体运动的基本方程组,奠定了连续介质力学的基础。达朗贝尔(D'Alembert)提出了著名的达朗贝尔原理,“达朗贝尔疑题”就是他在1744年提出的。拉格朗日(Lagrange)改善了欧拉、达朗贝尔方法,并发展了流体动力学的解析方法。关于研究气流对物体的作用力,最早是牛顿(Newton)于1726年提出关于流体对斜板的作用力公式,它实际上是在撞击理论的基础上提出来的,没有考虑到流体的流动性。

19世纪是流体动力学的基础理论全面发展的阶段。泊桑(Poisson)于1826年解决了第一个空间流动问题——关于绕球的无旋流动问题。拉普拉斯(Laplace)于1827年提出著名的拉普拉斯方程。兰金(Rankine)指出理想不可压流体运动的位函数和流函数,分别满足拉普拉斯方程,并于1868年提出将直匀流动叠加到源(汇)、偶极子等流动上,以构成所谓的奇点法。海姆霍兹(Helmholtz)创立了旋涡运动理论。

19世纪还形成了流体动力学的两个重要分支:黏性流体动力学和空气-气体动力学。纳维(Navier)从分子相互作用的某一假设出发,于1826年导出黏性流体运动方程。斯托克斯(Stokes)于1845年在另一国家也独立地导出了黏性流体运动方程。雷诺(Reynolds)在1876~1883年试验黏性流体在小直径圆管中的流动时,发现了流体运动的层流和紊流性质,1895年他导得了雷诺方程——平均N-S方程。

空气-气体动力学是在流体动力学、热力学和声学的基础上发展起来的。空气-气体动力学的基本方程组出现在1850年前后。兰金于1870年、雨果纳(Hugoniot)于1887年分别建立了激波前后气流的压强、速度和温度之间的关系。

20世纪创建了空气动力学完整的科学体系,并得到了蓬勃发展。

19世纪后半叶的工业革命,蒸汽机的出现和工业叶轮机的产生,使人们萌发了建造飞机的想法。

1906年,儒可夫斯基(Joukowski)发表了著名的升力公式,奠定了二维机翼理论的基础,并提出以他名字命名的翼型。1903年12月,莱特(Wright)兄弟在美国实现了飞机试飞的成功。从此开创了飞行的新纪元,人类征服天空的愿望得以实现。尔后的60年间,飞机的速度、高度和航程的急剧递增,乃是空气动力学促进航空事业、而航空实践本身推动空气动力学迅速发展的时期。1918~1919年,普朗特(Prandtl)提出了大展弦比机翼的升力线理论。1925年阿克来特(Ackeret)导出翼型的超声速线化理论。1939年,戈泰特(Gothert)提出了亚声速三维机翼的相似法则。1944年冯·卡门(Von Karman)和钱学森采用速度图法,研究和推导得到了比普朗特-格劳沃(Glauert)法则更为精确的亚声速相似率公式。1946年钱学森首先提出

了高超声速相仿律。

与上面所述的无黏空气动力学发展的同时,黏性流体动力学也得到迅猛发展。普朗特于1904年首先提出划时代的附面层理论,从而使流体流动的无黏流动与黏性流动科学地协调起来,在数学和工程之间架起了桥梁。1921年波尔豪生(Pohlhausen)将普朗特附面层微分方程通过积分,得到附面层动量方程,应用于解决不可压有逆压梯度的黏性流动。1925年普朗特又提出实用的附面层混合长度理论。1938年冯·卡门和钱学森用附面层动量方程解得可压流平板附面层问题。1945年林家翘发展了附面层稳定性理论,并在1955年发表了著名的《流体动力学稳定性理论》。

于1946年出现了第一台计算机以后,由于它的飞速发展,同样地给流体力学—空气动力学以巨大影响。从20世纪60年代起,研究流体-空气动力学的数值计算方法蓬勃发展起来,形成了计算流体-空气动力学这门崭新的科学,并推进到一个新阶段。目前,利用高性能计算机、现代计算方法及空气、气体动力学知识,不仅可以实现从飞行器部件、组合体到全机(弹)的复杂绕流流场计算,而且计算结果的精度与可靠性也随着计算机、计算技术及空气动力学、流体力学的知识,以及实验验证技术的进步与完善而不断地得到提高并直接应用于飞行器设计,大大缩短了新型飞行器研制的周期,同时大幅度降低了研制成本。可见,随着计算空气动力学、计算流体力学的进一步发展,其将在实际工程技术问题中发挥出越来越大的作用。

我国祖先在航空和空气动力学研究方面,对世界有很大的贡献。古人非常向往人类的天空飞行,所以很早就有了神奇、美丽的神话和传说。在与大自然的斗争中,我国祖先认识了风与空气动力的关系,并创造了各种利用空气动力的方法来为自己服务。例如为大家熟知的风筝、火箭、竹蜻蜓和气球等,它们也流传到了国外。

新中国成立以前,我国自己没有独立完整的航空工业,要用飞机得到国外去买,国内只有修理厂,空气动力学研究更谈不上。1934年后旧中国几所高等学校虽设立了航空工程系,但毕业出来的学生不是失业,就是改行做了别事。

新中国建立伊始,党和政府高瞻远瞩,对建立航空工业给予高度重视和大力扶持。20世纪50年代到60年代初,是中国航空工业崛起的时期;60年代到70年代期间,我国基本建成了门类齐全的航空工业体系;实行改革开放政策以后,我国航空工业跨入了新的发展时期,开始建设有中国特色的社会主义航空工业。

空气动力学的发展,是离不开航空工业发展的。50年代初,我国在经历飞机仿设计时期以后,很快走上了自行设计的道路。在空气动力学的发展中,从对不同飞行速度阶段的翼型配置研究,发展到对不同机翼平面形状气动布局形式的研究,解决了飞机设计中面临的重大空气动力问题,保证了我国自行制造不同类型的飞机安全地投入运行。随着自行研制的逐步发展,空气动力学方面的研究也不断前进,目前为未来飞机而研究先进空气动力布局正在进行。

在进气道的空气动力研究方面,先后对亚声速、跨声速和超声速飞机的发动机的不同形式进气布局进行了研究,取得了可喜的进展。

对风洞设计和建设,我国克服了前进道路上的重重困难,从无到有,从小到大,逐步到配套完善,现在我国有了自行设计、堪称世界一流的研究空气动力的风洞和试验设备。20世纪80年代中期,我国就已具备了尺寸和速度配套的风洞群和先进的测试设备,能够承担和满足现代飞机研制的气动试验需要。

当前,我国计算空气动力学的研究,已能为不同飞行速度的机翼、机身组合体和全机带外

挂的空气动力计算,为进气道流动方面确定先进总体气动布局方案提供准确选择。它为缩短我国飞机研制周期、降低研制费用、提高设计质量开辟了新的途径。

1983年,我国出版了《航空气动力手册》一书,这是一个内容广、实用性强的工具书,它吸收了当前国外有价值的气动计算方法和20世纪70年代以来的最新科技成果。它的出版改变了我国使用多个国家手册的混乱局面,它还可用于航天、兵器及有关系统。

0.3 空气动力学分类

从空气动力学的发展进程可以看出,20世纪初,随着普朗特附面层理论和儒可夫斯基升力定理的出现,开始有了促进飞机发展的现代空气动力学,紧接着的20多年,低速空气动力学得到了完善的发展。随着飞机飞行速度的提高,空气密度视作不变的假设已不适用。从30年代末到第二次世界大战结束前后,把空气密度作为变量的亚声速空气动力学理论得到了发展并渐臻完善。第二次世界大战期间及以后,航空发动机功率的提高和喷气技术的出现,使飞机飞行的速度突破了“声障”,达到了超声速,推动了当时空气动力学中的超声速这个分支即超声速空气动力学或气体动力学的发展。

介于亚声速空气动力学和超声速空气动力学之间的所谓跨声速空气动力学,其研究流动的性质,是属于亚声速流动和超声速流动并存于流场的混合流动。由于跨声速空气动力学本身的复杂性和描写流动方程的非线性性质,目前还有不少需要进一步研究和解决的课题。

1957年10月,第一颗人造卫星在苏联发射成功,标志着航天技术的兴起。在20世纪50年代末和60年代,由于飞行速度大于声速5倍以上的飞行器的出现,推动了高超声速空气动力学的发展。随着人造卫星和航天飞机飞行的成功,研究稀薄空气中飞行器飞行的稀薄空气动力学(包括滑流和自由分子流),以及研究卫星回收和航天飞机返回地球所遇到的气动热障的所谓气体热力化学动力学和电磁流体力学的任务,也摆到了我们的面前。

除了研究航空和航天方面的空气动力学外,还要研究气象方面、建筑物的风压、风机中的流动,以及气流工作的许多工业问题,研究与它们有关的空气动力学,称为工业空气动力学。

0.4 飞行器气动问题和气动设计

0.4.1 飞行器气动问题

以飞机为例,飞机气动问题主要有以下几个方面:

(1)外形复杂,流场复杂。

(2)气动力方面,一般飞机要求升阻比大。航天飞机不仅要求升阻比大,还要满足无动力滑翔及宇航员的生理要求。

(3)操纵面多(升降舵、副翼、襟翼、方向舵和减速板),因此,操纵面效率、铰链力矩及缝隙影响十分重要。

(4)具有推力矢量控制系统。

(5)重复使用,要求系统可靠性高。

(6)航天飞机气动热环境为高比焓、低热流、长时间,热结构问题是最为突出的特征,需具有良好的热防护系统(TPS)。

(7)航天飞机飞行速度范围大($Ma=0\sim 30$ 以上),飞行高度区域大($H=0\sim 130\text{km}$ 以上),需要考虑马赫数、黏性、低密度、真实气体效应。

(8)由于飞机结构弹性力、惯性力和空气动力的相互影,可能出现危险的颤振、发散和操纵面反效问题,即气动弹性问题。

0.4.2 飞行器气动设计

设计是将某种构想变为现实的一段工作,是为制造提供必要依据。设计方法是指在该过程中所用的方法,包括理论、技术及手段。与空气动力密切相关的飞行器设计问题有总体技术指标、气动参数及动力系统、控制、制导和导航系统等。通过建模,利用模拟方法将上述关系用模块构成设计回路相互联系起来,可以相互反馈数值信息,经多次迭代、折中、优化,最终实现飞行器总体设计的要求。这些工作称为飞行器气动设计。以飞行器的现代设计要求来看,这样的任务显得很单薄,没有充分体现气动设计在飞行器设计中的重要地位和所起的作用。传统的气动设计任务是提供气动数据,预测并分析该飞行器气动外形的空气动力特性,设计飞行器各部件的气动外形及其相对位置。传统的气动设计工作方式是由不同专业的研究人员通过多次协调、多次修改原方案,进行大量的风洞选型试验,最终才能确定飞行器的外形。显而易见,这样做的缺点是消耗大量的时间、精力和经费,甚至会因为人为的因素导致方案的夭折。

现代化的气动设计工作方式是在统一的目标下,要求各专业人员提出技术指标及约束条件,经讨论确认后,通过建模将不同学科问题模块化,并直接连接起来,构成设计问题(见图0-2)。这个回路的最大优点是子系统的需求可以直接反馈到气动模块,子系统和气动模块可以相互交换信息。

现代化的气动设计工作方式的特点:

(1)可以充分利用计算机的先进技术;可以充分利用航空航天气动力/气动热力学的最新研究成果(包括理论和试验);可以充分利用建模和模拟方法;可以充分利用虚拟现实技术;可以充分利用现代化优化算法等。

(2)真正体现了科学、公正、可靠、高效;飞行器气动设计首先提出气动设计要解决的基本问题和解决方法,然后建立气动设计回路及一体化设计系统,用设计系统进行综合分析 with 评估,尽量发现矛盾,经多次迭代,尽早地修改与折中。

气动设计过程贯穿飞行器概念研究、方案设计、初样设计、定型和生产全过程。

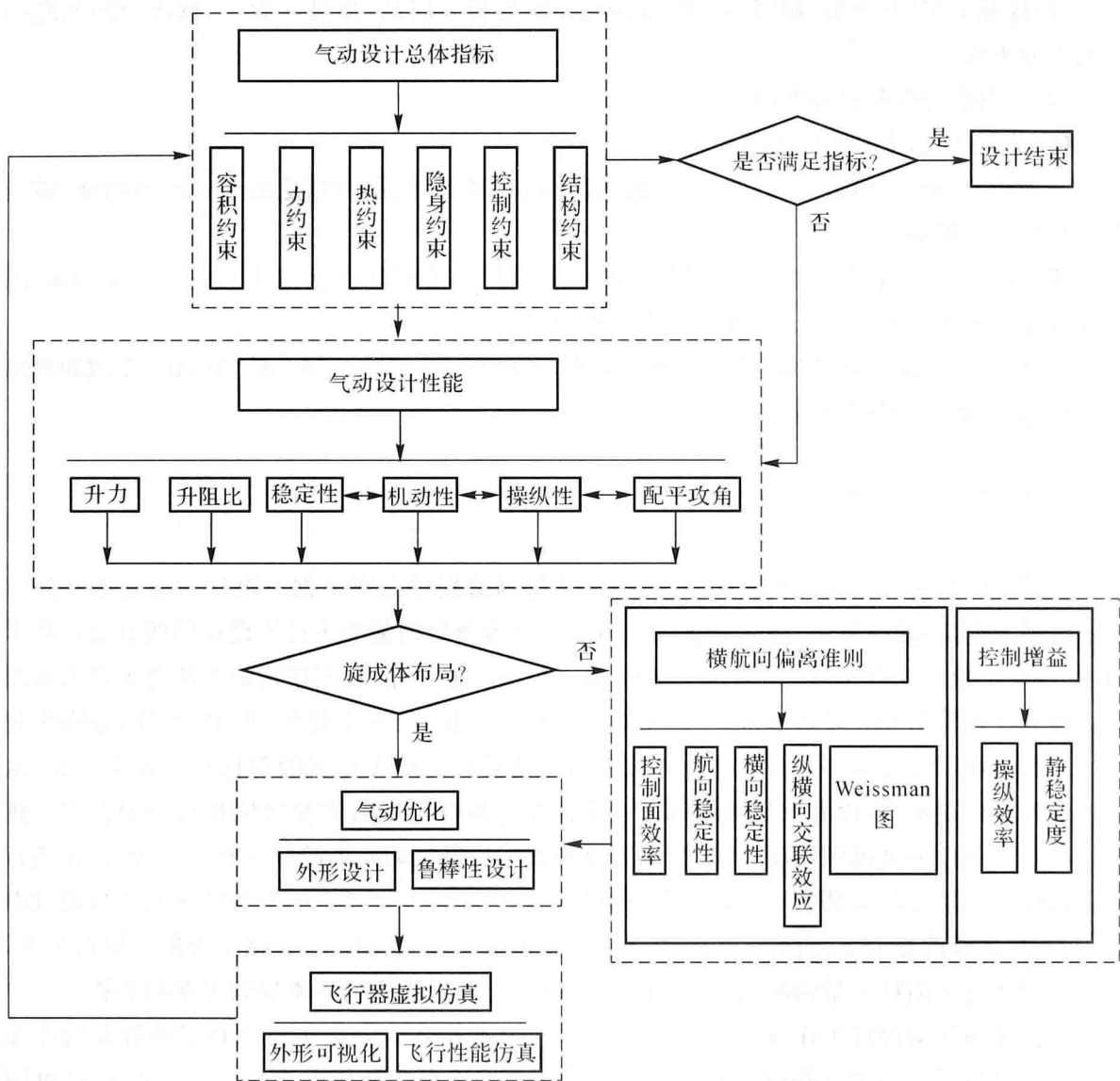


图 0-2 飞行器气动设计流程图

0.5 空气动力学研究方法

空气动力学研究是航空航天科学技术研究的重要组成部分,是飞行器研制的“先行官”。其研究方法,分为地面模拟实验、理论计算及数值计算、飞行模拟实验 3 种。3 种方法之间是相互补充的关系。通过这些方法以寻求最好的飞行器气动布局形式,确定整个飞行范围作用在飞行器上的力和力矩,以得到其最终性能,并保证飞行器的操纵稳定性。

0.5.1 地面模拟实验

地面模拟实验研究方法在空气动力学中有着广泛的应用,其手段主要依靠风洞、水洞、激波管,以及测试设备进行模型实验。其优点在于,它能在与所研究的问题完全相同或大体相同的条件下,进行模拟和观测,因此所得结果较为真实、可靠。但是,实验研究的方法往往也受到一定的限制,例如受到模型尺寸的限制、实验边界的影响、模型支撑的影响,以及一些相似参数很难满足。特别是对于高超声速飞行器地面模拟实验面临更大的困难。如马赫数 $Ma=5\sim 10$,高超声速风洞耗用能量大,因此实验段相应很小,考虑到风洞堵塞度和流动边界干扰的制约,飞行器实验模型小,雷诺数 Re 不能满足要求。另外,高超声速气动热环境与热结构实验以及化学非平衡等实验还有待研究。此外实验测量的本身也会影响到所得结果的精度,并且实验往往要耗费大量的人力和物力,因此这种方法亦常常遇到困难。

0.5.2 理论分析方法及数值计算

理论分析方法一般包括以下步骤:

- (1)通过实验或观察,对问题进行分析研究,找出其影响的主要因素,忽略因素的次要方面,从而抽象出近似的合理的理论模型;
- (2)运用基本的定律、原理和数学分析,建立描写问题的数学方程,以及相应的边界条件和起始条件;
- (3)利用各种数学方法准确地或近似地解出方程;
- (4)对所得的结果进行分析、判断,并通过必要的实验与之比较,确定其精度和适用范围;
- (5)考虑未计及的因素,对公式或结果进行必要的修正。

理论分析方法的特点,在于它的科学抽象,能够利用数学方法求得理论结果,以揭示问题的内在规律。然而,往往由于数学发展水平的限制,又由于理论模型抽象的简化,因而难以满足研究复杂的实际问题的需要。

20 世纪 70 年代以来,随着大型高速电子计算机的出现和 Euler 方程及 N-S 方程的求解技术的提高,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)能计算各类复杂组合体的亚、跨、超以及高超声速绕流特性。目前,计算机的存储量和运算速度基本能保证飞行器的一般气动特性计算,一些三维流动的计算机程序已经成为了工业标准,成为飞行器设计、汽车和发动机设计、造船、土木建筑工程、工业制造工程(陶瓷复合材料制造、铁液铸造等)、环境工程(供暖、空气调节和建筑物内空气流通等)设计和预测过程中的一种工具。特别是对有些往往无法进行实验而又难以作出理论分析的问题,采用数值方法进行研究,可以计算和解决,使得数值方法在空气动力学研究方法中的作用和地位不断提高。当然,数值方法也有其局限性,即数值计算的可靠性问题,这是该学科不断发展需解决的问题。

0.5.3 飞行模拟实验

飞行器设计所需要的准确的、最可靠的气动数据只有通过飞行实验才能取得。飞行实验

有模型自由飞实验、无人驾驶实验机飞行实验和真实飞行器飞行实验。

进入 20 世纪 40 年代,许多致力于航空航天高技术发展的国家,都深刻地体会到,无人驾驶实验(验证)机是获得气动力、气动热和其他非气动特性的必要研究手段。与地面(风洞)实验相比,用尺寸较大的自由飞行实验机进行研究既花钱又费力。但是人们认为这种实验能完全模拟动力学自由飞飞行实验;无风洞的洞壁/支架干扰,模型尺寸或试验雷诺数可以足够大,并能满足一些特殊要求,甚至其尺寸可以接近真实飞行器。与有人驾驶飞行器飞行实验相比,模型自由飞实验模型结构的完整性和系统的可靠性可以降低一些,不必考虑人员的安全问题,因此在实际中应用较多。

理论的分析结果需要和实验结果作比较,以确认理论的可用性、精确度,并促使理论进一步发展。反过来,实验也需要理论指导,否则会陷入盲目的状态,失去方向。总之,空气动力学研究的 3 种方法都是非常重要的。不同的研究阶段需要不同的研究方法。在飞行器初步设计阶段,利用理论分析和计算能快速完成选型工作。精细设计阶段,数值计算和风洞实验是主要研究手段。定型后飞行实验成为主力。

0.6 未来飞行器的气动问题

针对航天领域气动设计问题来说,飞行器的发展趋势是速度越来越快,空域越来越大,飞行速域越来越宽。空气动力学面临的问题也越来越多,越来越复杂。随着人类航天活动的不断深入,也为空气动力学的发展提出了更高的要求和发展方向。

未来空气动力学的发展除了研究空气动力学某些关键基础科学问题(如高超声速可压缩湍流、转捩及其控制、非定常分离、旋涡运动的机理及控制等)外,还要重视开展以下的研究课题:

- (1)建立科学合理的数学模型;
- (2)可靠性设计方法研究;
- (3)将鲁棒性设计原理应用于飞行器布局 and 性能设计;
- (4)高超声速吸气式飞行器研究。主要研究内容:①复杂组合体多学科一体化优化设计,以实现质量轻、隐身、最佳气动布局及优良的操纵性、稳定性、机动气动特性;②力矩平衡问题,机体推进一体化使得整个力的分布变得难以预测,力矩变化剧烈,后体和尾喷管一体化使得尾流对配平翼的影响很大。

第1章 流体力学基础知识

物体和流体作相对运动时,物体会受到流体对它的作用力和力矩。这些力和力矩的分布情况及其合力,不仅仅取决于物体的形状(包括运动时的姿态)和速度,还取决于流体的具体属性,如密度、黏性、弹性、传热性和流动性等。本章要讲的是流体力学的基础知识。

1.1 流体介质

1.1.1 连续介质假设

流体是液体和气体的总称。和固体不同,流体没有确定的几何形状。把流体盛满在某容器内,它的形状就取该容器的几何形状。流体的这种容易流动(或抗拒变形能力很弱)的特性,称之为易流性。

在流体中,气体和液体又有所不同。一定量的液体虽无确定的几何形状,但却有一定的体积,在容器中能够形成一定的自由表面。而气体则不同,它连体积也是不确定的,气体总是能够充满容纳它的整个容器。

在物理学中,我们知道流体是由大量分子组成的,每个分子在不断地作不规则的热运动,彼此不时碰撞,交换着动量和能量。分子之间距离很大,分子的平均自由程比分子本身的尺寸大得多。以空气为例,在标准状况下,空气分子的平均自由程约为 $6 \times 10^{-6} \text{ cm}$,而空气分子的平均直径约为 $3.7 \times 10^{-8} \text{ cm}$,两者之比约为 170 : 1。液体虽然比气体稠密得多,但分子之间仍然有相当的距离。因此,从微观上来说,流体是一种有间隙的不连续介质。

但是,在流体力学和空气动力学中,详细地去研究分子的微观运动是不必要的。因为工程上所研究的物体总是有一定的体积,其特征尺寸一般以米(m)计,至少以厘米(cm)计,比流体分子的平均自由程大得多。流体的运动既然是由物体所引起的,流体受物体的扰动而运动时,必然是大量流体分子一起运动的。因此,在流体力学领域里,一般并不需要详细地研究流体分子的个别运动,而是研究流体的宏观运动。因此,我们采用连续介质假设,即把流体看成连绵一片的、没有间隙的、充满了它所占据的空间的连续介质。

由于采用了连续介质假设,因而在分析流体运动时,要取一小块微元流体做分析的对象,这块微元流体称之为流体微团。流体微团包含有许多流体分子,流体微团的特性反映了这些分子的统计特性。但是,相对于工程上物体的特征尺寸而言,流体微团的尺寸是无限微小的,可以近似地看成一点。

在流体力学中,连续介质假设很有用。根据连续介质假设,可以把流体介质的一切物理属性,如密度、速度、压强等都看作是空间的连续函数。因此,在解决流体力学实际问题时就可以应用数学分析这一有力工具来处理。

连续介质假设是建立在流体分子平均自由程远远小于物体的特征尺寸的基础上的。在某些情况下,例如 120km 的高空,空气分子的平均自由程可以和飞行器的特征尺寸同一数量级,连续介质假设就不再成立。这时,必须把空气看成为不连续的介质,这个范围的空气动力学称之为稀薄空气动力学,不属于本书的范围。

1.1.2 流体的密度、压强和温度

1. 流体内部一点处的密度

在连续介质假设的前提下,可以对流体微团乃至流体内部某一几何点处的密度下定义。

围绕流体内部某一点 P 处划取一块微小空间,设这块空间的容积为 $\Delta\tau$,其中所包含的介质的质量为 Δm (见图 1-1),则该空间内介质的平均密度 $\bar{\rho}$ 为

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta m}{\Delta\tau} \quad (1-1)$$

为了讨论问题方便起见,首先假设微元容积取得相当大,然后围绕 P 点使其缩小,研究随微元容积变小介质平均密度变化的规律。图 1-2 表示微元容积趋于零时,真实的平均密度 $\bar{\rho}$ 的变化情况。该图给出的是 P 点周围的介质密度较 P 点处为大的情况。从图中可以看出,当微元容积向某一个定值 $(\Delta\tau)_0$ 逐渐缩小时,其平均密度逐渐向某一定值 ρ_p 趋近。直至微元容积小到某个值 $(\Delta\tau)_0$ 或略小于该值时,介质平均密度有一个相当稳定的值,即 ρ_p 。这是因为在微元容积缩小过程中,包含在微元单位容积内的分子数目越来越稳定,单个分子的个性没有显示出来。如果继续缩小微元容积,

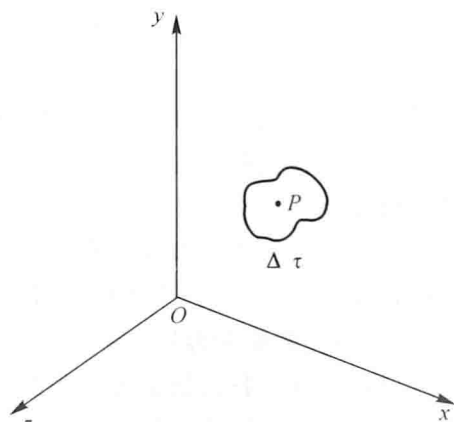


图 1-1 流体密度

向零趋近时,单位微元容积内所包含的介质分子数目就不可能保持常数。在某一瞬间来看问题:如果恰好有几个分子飞出微元容积,平均密度就会突然显著变小;如果恰好有几个分子飞入微元容积,平均密度又会突然显著变大。微元容积缩得越小,这种平均密度忽大忽小变化的情况越严重。因此,在连续介质假设前提下,流体内部某一点 P 处的密度应为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow (\Delta\tau)_0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} \quad (1-2)$$

由于 $(\Delta\tau)_0$ 相对于实际物体的特征尺寸来说很小,因此,流体内部一点处的密度可定义为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} \quad (1-3)$$

空气动力学里所用的密度都是质量密度,即单位容积中所具有的介质质量。在国际单位制中,质量密度的单位为 kg/m^3 。

在海平面上,温度为 288K 和一个标准大气压时的水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$,而空气的密度为 $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在以后的分析中,往往要取一块尺寸极微小的介质来看它的运动情况或分析它所受的力。既然采用了连续介质的假设,当然不能再取分子,这样的一块尺寸极微小的介质,称它为

“微团”。流体微团中包含有足够多的分子,但相对于物体特征尺寸而言,它又是无限微小的。

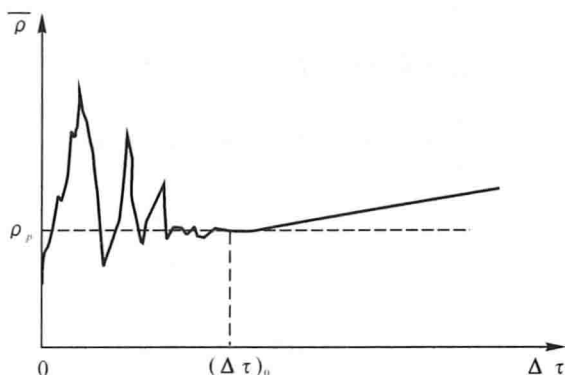


图 1-2 平均密度随微元容积变化情况

2. 理想流体中一点处的压强各向同性

在无黏流体中,不论流体是静止的还是流动的,流体内部任一点处的压强都是各向同性的。这就是说,在理想流体内部压强不因受压面的方位不同而变化,压强只是空间坐标的函数(若流动参数随时间而变化,则压强还是时间的函数)。在 P 点附近取坐标系 $Oxyz$ 。沿 3 个坐标轴取 3 个微段长度, $OA = dx$, $OB = dy$, $OC = dz$,以 O, A, B, C 为顶点作一个微小的四面体,把 P 点包围在中间,如图 1-3 所示。设作用在 BOC 面中点处的压强为 p_x , AOC 面中点处的压强为 p_y , AOB 面中点处的压强为 p_z ,斜面 ABC 中点处的压强为 p ,这些压强是毗邻流体对其表面作用的结果。

下面研究该四面体的力平衡关系。先看沿 x 轴方向的力平衡。作用在 BOC 面上的总的压力为 $p_x(\frac{1}{2}dydz)$,指向 x 轴正方向;作用在斜面 ABC 上的总的压力为 $p(dS)$,其中 dS 为斜面 ABC 的面积,这个力在 x 轴方向的分力为 $p(dS)\cos(\mathbf{n}, x)$,指向 x 轴负方向,其中 $\mathbf{n}$ 为斜面 ABC 的法线方向;此外,该四面体内的流体可能因在作加速运动而有惯性力,或因处于某种力场中而受力(如引力)。但是,这些力的大小都与四面体内流体质量成正比,而质量等于该微四面体的体积($\frac{1}{6}dxdydz$)乘以密度,因此,与压强的作用

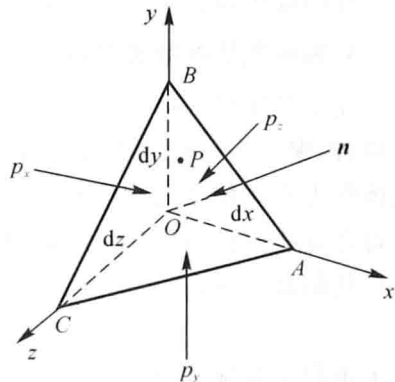


图 1-3 微四面体及其压强

相比较,这些力是高阶小量。由此可得, x 轴方向的力平衡方程可写为

$$\frac{1}{2}p_x dydz - p\cos(\mathbf{n}, x)dS + 3 \text{ 阶小量项} = 0$$

同理可得, y 轴和 z 轴向的力平衡方程为

$$\frac{1}{2}p_y dzdx - p\cos(\mathbf{n}, y)dS + 3 \text{ 阶小量项} = 0$$

$$\frac{1}{2}p_z dxdy - p\cos(\mathbf{n}, z)dS + 3 \text{ 阶小量项} = 0$$

令 dx, dy, dz 趋于零,略去 3 阶小量项,可得