

KEXUEMUJIZHE

科学目击者

空气动力技术

北京未来新世纪教育科学研究所 编



新疆青少年出版社
喀什维吾尔文出版社

科学目击者

空气动力技术

北京未来新世纪教育科学研究所 编

新疆青少年出版社
喀什维吾尔文出版社

图书在版编目(CIP)数据

科学目击者/张兴主编. —喀什:喀什维吾尔文出版社;乌鲁木齐:新疆青少年出版社, 2005. 12

ISBN 7-5373-1406-3

I. 科... II. 张... III. 自然科学—普及读物 IV. N49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 160577 号

科学目击者 空气动力技术

北京未来新世纪教育科学研究所 编

新疆青少年出版社 出版
喀什维吾尔文出版社

(乌鲁木齐市胜利路 100 号 邮编:830001)

北京市朝教印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 32 开

印张:600 字数:7200 千

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

印数:1-3000

ISBN 7-5373-1406-3 总定价:1680.00 元(共 200 册)

如有印装质量问题请直接同承印厂调换

前言

同仁们常议当年读书之难，奔波四处，往往求一书而不得，遂以为今日之憾。忆苦之余，遂萌发组编一套丛书之念，望今日学生不复有我辈之憾。

现今科教发展迅速，自非我年少时所能比。即便是个小地方的书馆，也是书籍林总，琳琅满目，所包甚广，一套小小的丛书置身其中，无异于沧海一粟。所以我等不奢望以此套丛书贪雪中送炭之功，惟愿能成锦上添花之美，此为我们奋力编辑的目的所在。

有鉴于此，我们将《科学目击者》呈献给大家。它事例新颖，文字精彩，内容上囊括了宇宙、自然、地理、人体、科技、动物、植物等科学奥秘知识，涵盖面极广。对于致力于奥秘探索的朋友们来说，这是一个生机勃勃、变幻无穷、具有无限魅力的科学世界。它将以最生动的文字，最缜密的思维，最精彩的图片，与您一起畅游瑰丽多姿的奥秘世界，一起探索种种扑朔迷离的科学疑云。

《科学目击者》所涉知识繁杂，实非少数几人所能完成，所以我们在编稿之时，于众多专家学者的著作多有借鉴，在此深表谢意。由于时间仓促，纰漏在所难免如果给读者您的阅读带来不便，敬请批评指正。

编 者

目 录

一	空气动力学.....	1
	1. 激波	10
	2. 湍流	12
	3. 边界层	13
	4. 空气动力噪声	16
	5. 音爆	18
	6. 旋涡	19
	7. 音障	20
	8. 热障	22
二	气动特性	23
	1. 机身空气动力特性	23
	2. 空气动力干扰	26
	3. 面积律	28
	4. 地面效应	30
	5. 翼空气动力特性	32
	6. 水上飞机水动特性	34

7. 有翼导弹空气动力特性	39
8. 高速弹头气动特性	42
三 技术设备	46
1. 风洞	49
2. 超高速实验设备	53
3. 水槽和水洞	58
4. 风洞实验技术	60
5. 风洞测量方法	62
6. 流动显示方法	66
7. 风洞天平	68
8. 计算空气动力学	70
9. 气动热力学	74
10. 非定常空气动力学	78
11. 飞行与弹道学	80
12. 航程和航时	84
13. 起飞	86
14. 下滑和着陆	87

一 空气动力学

20 世纪以来,飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,都是与空气动力学的发展分不开的。亚音速飞机为获得高升阻比采用大展弦比机翼;跨音速飞机为了减小波阻采用后掠机翼,机翼和机身的布置满足面积律;超音速飞机为了利用旋涡升力采用细长机翼;高超音速再入飞行器为了减少气动加热采用钝的前缘形状,这些都是在航空航天技术中成功地应用空气动力学研究成果的典型例子。除此以外,空气动力学在气象、交通、建筑、能源、化工、环境保护、自动控制等领域都得到广泛的应用。

研究空气和其他气体的运动以及它们与物体相对运动时相互作用的科学,简称为气动力学。空气动力学重点研究飞行器的飞行原理,是航空航天技术最重要的理论基础之一。在任何一种飞行器的设计中,必须解决两方面的气动问题:一是在确定新飞行器所要求的性能后,

寻找满足要求的外形和气动措施；一是在确定飞行器外形和其他条件后，预测飞行器的气动特性，为飞行器性能计算和结构、控制系统的设计提供依据。这些在飞行速度接近到超过声速（又称音速）时更为重要。

学科分支 空气动力学是流体力学的一个分支。气体流动在不同的速度范围呈现不同的特点。飞行器的飞行马赫数大于 0.3 时，就必须考虑空气压缩性。当飞行速度接近音速时，在飞行器的绕流中会出现局部的超音速区，在其后形成激波，使迎面阻力剧增。当飞行速度超过音速几倍时，由于高速气流的温度升高，气体内部发生种种物理化学变化，这时必须同时考虑气体的热力现象和动力现象，研究这些现象的学科就是空气动力学的一个分支气动热力学。根据不同的马赫数(M)，可将空气动力学分成亚音速空气动力学(M 约小于 0.8)、跨音速空气动力学(M 在 0.8~1.2 之间)、超音速空气动力学(M 在 1.2~5.0 之间)和高超音速空气动力学(M 大于 5.0)。当雷诺数(Re)足够大时，仅在速度梯度和温度梯度较大的区域如边界层和尾迹内，气体的粘性对流动才有明显的影响。根据粘性是否可以忽略，空气动力学可分为无粘性(理想)空气动力学和粘性空气动力学。粘性空气动力学中最重要的是边界层理论。根据不同的克努

曾数 Kn (气体分子平均自由路程与流动的特征长度之比, Kn 约等于 M/Re), 气体流动又可分成连续流 (Kn 约小于 0.01)、滑流 (Kn 在 0.01~0.1 之间)、过渡流 (Kn 在 0.1~10 之间) 和自由分子流 (Kn 约大于 10)。讨论后三种流动的空气动力学叫做稀薄空气动力学。对于自由分子流, 描述连续介质运动的方程如纳维尔—斯托克斯方程已不再适用, 可采用玻耳兹曼方程。按照流场是否具有外边界, 空气动力学可分为研究飞行器外部绕流的外流空气动力学和研究发动机、风洞等管道内流动的内流空气动力学。按照流场是否与时间有关, 可分为定常空气动力学和非定常空气动力学。按研究方法不同, 又可分为理论空气动力学和实验空气动力学。随着计算机的发展, 计算空气动力学已成为动力学一个独立的分支学科。空气动力学还同其他学科相互渗透, 形成许多学科交叉的边缘学科, 如气动弹性力学、磁流体力学等。

发展概况 空气动力学的发展经历了低速、高速和新变革三个时期。

低速时期 自古人类就渴望能够像鸟一样飞行, 但流传下来的许多关于飞行的传说并没有提供空气动力学的思想和经验。18 世纪以前, 人类尚未掌握空气动力学的知识。在 L. 达·芬奇绘制扑翼机和直升机的草图时,

也没有计算过它们的空气动力特性。1726年, I. 牛顿根据质点撞击平板时的动量损失, 提出了计算气动升力的第一个理论, 结果, 过低地估计了升力(后来人们发现这相当于 M 数趋于无穷大时的情况)。1876年, B. 瑞利根据平面后面形成空穴的假设而提出的理论同样不符合实际结果。

直到 20 世纪初, 在航空事业发展的推动下, 英国 F. W. 兰彻斯特、德国 M. W. 库塔和俄国 H. E. 茹科夫斯基等人, 在研究环流的基础上提出了正确估计二维机翼升力的公式。接着, 德国 L. 普朗特和兰彻斯特利用涡系代表机翼, 创立了有限翼展的机翼理论。与此同时, 1904年, 普朗特提出了边界层概念, 解决了当时无粘空气动力学的实验结果之间的矛盾。在实验方面, 1871年英国 F. H. 韦纳姆建造了第一座开路式风洞, 美国莱特兄弟 1900年建造了一座截面为 406×406 平方毫米、长 1.8 米的风洞, 用天平测出了机翼升力、全机阻力和压力中心数据, 在这座风洞的空气动力实验的基础上, 实现了人类第一次动力飞行。随后 G. 艾菲尔在法国和普朗特在德国分别建造了开口和闭口的回路风洞。1928年在英国的国家物理实验室, 建造了直径为 78 毫米的超音速风洞。

高速时期 第二次世界大战前后,由于军用航空的需要和航天技术的兴起,高速空气动力学得到了迅速的发展。在这个阶段中建立了亚音速、跨音速、超音速和高超音速无粘流和高速边界层的系统理论,研究了各类飞行器在不同速度范围的气动特性,将空气动力学的研究内容从力扩展到热、光和电磁等效应。这些研究成果对突破高速飞行的音障和热障起了决定性的作用。在这一过程中 T. von. 卡门和他的学生作出了重要的贡献。1939 年,卡门和钱学森开创了著名的亚音速流近似处理方法。1941 年钱学森将卡门的超音速流中的细长体近似推广到有迎(攻)角情况。1946 年,钱学森和郭永怀合作进行了跨音速混合流动的研究。同年,钱学森提出了高超音速相似律和稀薄空气动力学的区域划分。1953 年郭永怀研究了激波边界层的相互作用,在这项研究中成功地发展了一种有效的奇异摄动法。在这段时期内,各类风洞都得到了发展,但跨音速风洞由于气流壅塞效应遇到了困难。1947 年,美国国家航空咨询委员会首先建造了试验段尺寸为 304 毫米的开槽壁高速风洞,消除了壅塞,建立了近音速流,为发展跨音速风洞奠定了基础。早在第二次世界大战期间德国就开始建造常规高超音速风洞,但直到 20 世纪 60 年代,各类超高速实验设备

才日臻成熟。

新变革时期 20 世纪 60 年代后期,航天飞机综合运用了航空和航天技术,在飞行器的设计中出现了飞机与发动机一体化的需要。同时,空气动力学还将与控制技术结合起来。另一方面,计算机的发展改变了理论空气动力学的面貌,计算空气动力学的出现,使飞行器的空气动力设计产生了重大的变革。计算机作为气体流动的数学模拟设备,代替了部分风洞的作用,并且正在与风洞实验结合起来。在空气动力实验中,计算机已成为风洞不可分离的伙伴。

学科内容 为航空航天技术服务的空气动力学主要包括飞行器空气动力学、非定常空气动力学、内流空气动力学和气动热力学等内容。

飞行器空气动力学 它针对各类飞行器(飞行、导弹、火箭、再入飞行器等)的特点,研究满足其性能要求的气动外形,研究气动特性随几何外形、飞行姿态、马赫数、雷诺数等基本因素的变化,并提供相应的计算方法。飞行器空气动力学不仅研究各个单独部件如机翼、尾翼、控制面、机身以及各类增升装置等的气动外形和气动特性,而且在研究各部件之间以及飞行器与外挂物之间的空气动力干扰的基础上,研究整个飞行器的气动布局 and 气动

特性。根据飞行器的气动特性,可以进一步研究飞行器的性能、操纵性和稳定性,从而,空气动力学便同飞行力学结合起来。

非定常空气动力学 飞行器的空气绕流和气动特性取决于飞行器运动的特点。在稳定运动中,它们不随时间变化,可以用定常空气动力学来解决问题。但在研究飞行的动稳定性、大气湍流的影响、颤振、抖振、地面风载、脉动压力、噪声时,必须考虑气流的不均匀性(例如阵风)、流场的不稳定性(例如分离流动)和飞行器摆动或旋转造成的绕流的非定常性带来的影响。根据非定常流动的不同形式,如瞬态型、振荡型和随机型等,已出现了不同的理论和实验方法。

内流空气动力学 研究发动机、风洞、枪炮等受管道限制的内部流动,是空气动力学为航空航天技术服务的又一重要方面。对于涡轮喷气发动机,内流空气动力学研究进气道和喷管流动、压气机和涡轮的叶栅绕流以及在燃烧室内的燃烧和热交换过程。进气道位置对发动机性能和尾喷流对飞机性能都有重要的影响,因此,还需要考虑内流与外流的相互作用。其他各种类型的发动机,如火箭发动机、冲压发动机、涡轮风扇发动机、升力发动机等,都有各自特殊的气动问题。

气动热力学 气动加热是影响飞行器和发动机的可靠性和气动性能的重要问题。气动热力学就是根据飞行器的运动特点分析气动加热的规律和寻找相应的防热方案。如陡峭再入的弹头,加热的速率很高,一般采用烧蚀防热。高超音速飞机飞行速度稍低,加热速率较小,但加热的时间很长,一般采用冷却、隔热等防热技术。

研究方法 空气动力学是通过理论和实验的途径并在理论和实验结合的过程中发展起来的。理论研究首先是在实验的基础上建立正确的流动模型。气体可以以很多自由度按不同的规律运动,但像超音速钝体绕流这样的复杂的流动总是由流线型流动、旋涡或环流、边界层、尾迹、激波和膨胀波(仅限于超音速流动)等成分组成,因而在仔细考察上述流动现象和它们相互作用的基础上,有可能建立反映流动本质的流动模型,然后应用质量、动量和能量守恒定律建立正确描述流动的基本方程。一般来说,这些方程都是非线性的,采用适当的简化假设后可以应用在场论基础上发展起来的各种解析方法和奇异摄动法来求解。在数值计算方面,已经广泛采用有限差分、有限元素、有限基本解等离散点的计算方法。在数值计算中,采用的方程和边界条件既要正确地反映流动的物理本质,又要便于数学处理,而采用的方法既需注意数学

上的收敛性、稳定性,又需注意它们在求解实际问题时的实用性。

实验方法包括地面模拟试验和飞行试验。风洞因气流易于控制和便于测量等原因,已成为空气动力学最主要的实验设备。在地面模拟设备中,只要满足必要的相似准则就可以模拟真实飞行器的流场,但是满足全部相似准则的完全模拟是十分困难的,只能实现保证主要因素相似的局部模拟。风洞实验既能为飞行器设计直接提供数据,也能用于空气动力学的基础研究和应用研究,为理论提供流动模型和验证理论,为设计提供新思想和新概念。为了提高风洞的实验能力,需要不断提高风洞性能(例如提高雷诺数、减少洞壁干扰和支架干扰、降低气流的湍流度等)、发展先进测试技术(例如采用各种微型探头、非接触测量技术和动态流场测量技术等)、提高数据的质量、提高风洞运转效率、建立将风洞实验结果外推到飞行条件的方法。而风洞与计算机的结合可大大增加风洞的实验能力。地面模拟试验并不能完全复现真实的飞行条件,因此除地面模拟试验外,还要利用火箭、试验飞机和火箭橇等进行模型自由飞试验和进行真实飞行器的飞行试验。地面模拟试验、飞行试验和理论计算,已成为解决气动问题的互相联系、互相依赖、互相补充和互相

验证的三种手段。

随着空气动力学研究方法和研究手段的发展,要求建立由模拟范围和用途各不相同的风洞组成的风洞群,以及速度超过几亿次每秒的巨型计算机。

1. 激波

运动气体中的强压缩波。气体中微弱扰动是以当地音速向四周传播的。飞行器以亚音速飞行时,扰动传播速度比飞行器飞行速度大,所以扰动集中不起来,这时整个流场上流动参数(包括流速、压强等)的分布是连续的。而当飞行器以超音速飞行时,扰动来不及传到飞行器的前面去,结果前面的气体受到飞行器突跃式的压缩,形成集中的强扰动,这时出现一个压缩过程的界面,称为激波。经过激波,气体的压强、密度、温度都会突然升高,流速则突然下降。压强的跃升产生可闻的爆响。飞机在较低的空域中作超音速飞行时,地面上的人可以听见这种响声,即所谓音爆。利用经过激波气体密度突变的特性,可以用光学仪器把激波拍摄下来。理想气体的激波没有厚度,是数学意义的不连续面。实际气体有粘性和传热性,这种物理性质使激波成为连续式的,不过其过程仍十