



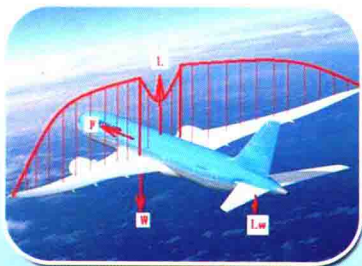
基础航空理论系列教材

FUNDAMENTALS OF AVIATION THEORY TEXTBOOK SERIES FOR PILOTS

刘永学 主编

空气动力学

AERODYNAMICS



航空工业出版社

空气动力学

刘永学 主编



航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书从飞行应用的角度,系统地介绍飞机与空气相对运动时空气流动的规律,以及飞机空气动力的产生原因及其变化规律。第一、二章介绍大气及气流的基本概念和基本定理;第三、四章分析升力和阻力的产生及变化;第五章比较各种增升装置的增升原理及对飞行的影响;第六章讨论气动布局对飞机低速气动特性的影响;第七章介绍螺旋桨空气动力特性;第八章介绍高速气流特性;第九章重点分析空气压缩性对高速飞行中升阻力特性的影响。

本书针对飞行员作战训练需求,突出核心知识点的飞行应用。编写过程中在认知模式、知识结构上做了新的尝试,注意知识层面的深入与拓宽,侧重于使飞行人员掌握空气动力学的基本概念、基本原理和基本规律,熟悉空气动力学的分析方法。本书是本科飞行学员的航空理论教材,也可供专(兼)职航空理论教员和部队飞行员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气动力学 / 刘永学主编. --北京:航空工业出版社,2019.1

ISBN 978-7-5165-1826-7

I. ①空… II. ①刘… III. ①空气动力学 IV. ①V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 013606 号

空气动力学

Kongqi Donglixue

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019年1月第1版

2019年1月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:10.75

字数:276千字

印数:1—4000

定价:56.00元

基础航空理论系列教材总前言

航空理论教育是以飞行人员为主要对象,以专业基础理论、航空装备理论、飞行技术理论、战术飞行理论及其他相关理论为主要内容的教育训练活动,是航空兵部队作战训练的重要组成部分,是中国空军飞行人才培养过程中一项重要而特殊的理论教育内容,在军事飞行职业理论体系中具有基础性和长效性作用。

中国人民解放军空军航空大学传承于1946年我党我军创办的东北民主联军航空学校(即“东北老航校”),是一所以飞行人才培养为主,航空飞行指挥与航空工程技术专业兼容的综合性军事高等学府。迄今,已为国家和军队建设培养出8万余名飞行人才和7万余名航空工程技术人才,涌现出了王海、张积慧、刘玉堤、杜凤瑞等一大批战斗英雄,航天英雄杨利伟、翟志刚,英雄航天员费俊龙、聂海胜等都是毕业学员优秀代表,被誉为“飞行员的摇篮”“航天员的摇篮”“英雄的摇篮”和“将军的摇篮”。

2014年以来,空军航空大学立足几十年的航空理论教育积累,针对先进信息化、体系化航空装备快速列装,以及作战样式、作战形态、训练体制深刻变革,对传统航空理论知识体系带来的冲击挑战和现实需求,突出问题导向、深化改革创新,坚持面向战场、面向部队、面向未来,全面推进航理教育转型升级,优化重构了与本科教育相适应、与装备发展相协调、与作战训练相吻合的航理教育体系。这套基础航空理论系列教材即在此背景下,历经多轮研讨、多期教学实践检验后编写而成,共包括《空气动力学》《飞机飞行力学》《空中领航学》《航空气象学》《飞机结构与系统》《航空动力装置》《仪表电气设备原理》《航空信息设备原理》《综合航空电子系统原理》《机载武器与火力控制》《飞行安全基础》和《航空兵战术基础》。

这套教材在编写过程中,注重把握以下几点:体现基础性,突出共性基础理论,强化为各机型改装、各阶段飞行训练提供通用基础理论支撑,弱化具体机型应用,为后续机型改装留有接口;体现先进性,突出与中外、军地相关院校比较研究,吸收借鉴实战化训练最新理论应用成果,适当增加学科专业前沿知识;体现应用性,突出专业理论的飞行实践应用,弱化冗余学术描述和工程技术应用,在飞行视角下重构内容体系;体现可读性,由资深飞行员和专业理论教员担任主审,名词概念、专业术语和公式符号执行国家标准、军用标准和行业规范,文字表述力求准确流畅、简明扼要、深入浅出。

时任空军航空大学校长、特级飞行员付国强少将亲自主持了教材体系改革、论证和编写工作,现任校长、特级飞行员唐维忠少将具体指导了教材修订和出版工作。上级机关、相关院校和部队领导、飞行人员和专家在教材论证、编写、试用和审订过程中均给予了大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

作为迄今国内首套公开出版的军事飞行领域航空理论教材,相信会使更多的航空科技工作者、航空飞行实践者和爱好者从中获益,希望能够对军民航领域飞行人才培养改革创新起到促进作用。囿于编者水平和时间所限,教材中尚有许多可探讨乃至不当之处,恳请读者朋友及业界同仁批评指正。

2019年1月

前 言

空气动力学是研究物体与空气相对运动时,空气流动的规律和作用在物体上的空气动力的产生原因与变化规律的一门学科,是流体力学的一个分支。本书从“飞机为什么能飞”这个基本问题入手,分析空气流动规律及飞机空气动力基本理论,侧重解决飞行实际中的空气动力学问题。

本书依据军事飞行人才培养方案,按照航空理论教材建设的有关规定编写,同时吸纳了近年来空军飞行训练改革的最新成果,力求适应部队实战化训练和武器装备更新发展的现实需求。依此遴选核心知识点,构建教材纲目,注重共性基础理论在飞行上的应用。

本书由刘永学担任主编,李颂、李元凯、刘小雷担任副主编。第一、二章由罗凯和刘永学编写,第三章由刘永学和华欣编写,第四章由刘小雷和王铎编写,第五章由刘永学和任博编写,第六章由李元凯和贺鹏编写,第七章由任广旭编写,第八、九章由李颂和曹文斌编写。全书由谭俊毅、曲连江和姜希俊主审。

本书编写过程中,主要参考了空军已有的教程、教材、手册和其他有关的国内外教材、资料。由于水平有限,书中难免有错讹之处,恳请读者批评指正。

编 者

2018年10月

目 录

第一章 大 气	(1)
第一节 大气分层.....	(1)
第二节 标准大气.....	(3)
复习思考题.....	(4)
第二章 气流的基本概念和基本定理	(5)
第一节 气流的描述.....	(5)
第二节 连续性定理.....	(9)
第三节 伯努利定理	(10)
第四节 边界层	(11)
复习思考题	(17)
第三章 升 力	(18)
第一节 升力的产生	(18)
第二节 升力的变化	(25)
复习思考题	(34)
第四章 阻 力	(35)
第一节 阻力的产生	(35)
第二节 阻力的变化	(39)
第三节 升阻比和极曲线	(43)
复习思考题	(46)
第五章 增升装置	(47)
第一节 襟 翼	(47)
第二节 缝 翼	(52)
第三节 边界层控制装置	(53)
复习思考题	(54)
第六章 气动布局对低速气动特性的影响	(55)
第一节 后掠翼	(55)
第二节 三角翼	(60)
第三节 边条翼	(62)
第四节 鸭式布局	(64)
第五节 前掠翼	(68)
第六节 其他气动布局形式	(69)
复习思考题	(71)

第七章 螺旋桨空气动力特性	(72)
第一节 螺旋桨一般介绍	(72)
第二节 螺旋桨的拉力	(75)
第三节 螺旋桨有效功率	(78)
第四节 螺旋桨的副作用	(80)
复习思考题	(84)
第八章 高速气流特性	(85)
第一节 空气的压缩性	(85)
第二节 弱扰动的传播	(86)
第三节 高速一维定常流动的能量方程及其应用	(91)
第四节 激波和膨胀波	(93)
第五节 局部激波的产生及发展	(102)
复习思考题	(105)
第九章 飞机的高速空气动力特性	(106)
第一节 空气压缩性对高速气动特性的影响	(106)
第二节 高速飞机的典型翼型	(122)
第三节 气动布局对高速气动特性的影响	(127)
第四节 跨声速面积律与超声速面积律	(137)
复习思考题	(139)
附 录	(140)
附录一 标准大气	(140)
附录二 伯努利方程的推导	(142)
附录三 升力公式的推导	(144)
附录四 后掠翼升、阻力系数的推导	(145)
附录五 螺旋桨拉力公式的推导	(146)
附录六 声速公式的推导	(148)
附录七 高速一维定常流动能量方程的推导	(149)
附录八 激波传播速度公式的推导	(151)
附录九 薄板翼型超声速升力系数公式的推导	(153)
附录十 常用符号	(154)
附录十一 专业术语中英文对照	(158)
参考文献	(165)

第一章 大 气

学习提示：通过本章学习，掌握空气的密度、温度和压力之间的关系，以及标准大气条件下大气状态参数随高度的变化规律，为理解大气状态参数对气流特性和飞机气动特性的影响及气动力计算奠定基础。

飞机是在大气中飞行的，要认识飞机在大气中运动的规律，必须先了解有关大气的基本知识。

第一节 大气分层

大气是指覆盖在地球表面从地表到 2000km 高度的空气层。大气层没有明显的上限，在 2000km 高度以上，大气极其稀薄，并逐渐向宇宙空间过渡。所有依靠固定翼或可动的翼面飞行的、或是其发动机需要吸入空气才能工作的飞行器，都只能在大气层内较低的高度内飞行。因此，大气的性质对于所有航空器的飞行都是非常重要的。

空气的密度、温度和压力（压强）是确定空气状态的三个主要参数，飞机空气动力的大小和飞行性能的优劣，都与这些参数有关。在大气层内，温度、压力、密度等均随高度发生变化。根据完全气体状态方程，密度 ρ 、温度 T 和压力 p 间具有如下关系

$$\frac{p}{\rho T} = R \quad (1-1)$$

式中 R —— 气体常数， $J/(kg \cdot K)$ 。对空气而言， $R = 287 J/(kg \cdot K)$ 。

(1) 压力和密度的关系。空气受到压缩时，压力升高，则相同体积能容纳更多的空气，即空气密度会增大。相反，当空气膨胀时，压力下降，其密度也下降。根据式 (1-1)，如果温度不变，则密度与压力成正比。

(2) 温度和密度的关系。压力一定，空气受热则会膨胀，从而给定体积内空气的质量将减少，其密度将减小。反之，温度降低，密度将增大。因此空气密度与温度成反比，见式 (1-1)。所以，在大气层内，随高度升高，大气压力显著下降，使得大气密度也大幅减小；同时，高度升高时温度下降，又使得大气密度有所增大。综合来看，压力是大气密度随高度变化的决定性因素。

(3) 压力和温度的关系。从式 (1-1) 可以看出，一定质量的空气，如保持体积（或密度）不变，温度升高，压力会增大。

按照温度的垂直分布，大气层可分为对流层、平流层、中间层、热层和外层等五层。

一、对流层

对流层是位于大气层最下部，具有明显对流运动的气层。对流层厚度随地球纬度和季节而异。就纬度而言，对流层上界在低纬度地区为 16~18km，中纬度地区为 10~12km，高纬度地区为 8~9km。夏季较冬季厚。

由于对流层大气热量主要来自于地表辐射，因此，在对流层内，气温随高度增加而直线下降（平均递减率为 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）。对流层集中了约 $3/4$ 的大气质量和几乎全部的水汽，空气上下对流剧烈，风向、风速经常变化，常出现云、雨、雾、雪、雷电等天气，由此导致的颠簸、扰动气流、风切变、下冲暴流等天气对飞行活动影响很大，其中雷电还可能影响通信。气象要素在短时间和小范围内的剧烈变化不仅影响飞机的空气动力特性，还会影响飞机起降和超低空飞行；高空飞行时，气温低会引起飞机结冰。温度变化还会引起飞机各金属部件伸缩，改变机件间隙，甚至影响其正常工作。风会影响飞机的起飞着陆、航程、空中加油等任务，风向和风速的变化会影响飞行方向、飞行时间和飞行距离。

二、平流层

平流层（旧称同温层）位于对流层的上面，其顶界约为 50km。平流层的气温受地面的影响很小，但在一定高度（约 20km）以上，平流层中的臭氧层会大量吸收太阳紫外线而使气温迅速升高。因此，高度低于 20km 范围内，随高度增加，气温基本保持不变（约为 216K）；到 20km 左右，气温升高较快，到了平流层顶界，气温升至 230~240K。本层所含空气质量约占整个大气的 $1/4$ 。

在平流层内，大气主要是水平方向的流动，空气垂直运动不显著，因而气流比较平稳。平流层内水汽含量极少，通常没有复杂的天气现象，空气阻力较小，对飞行安全的影响较小，这是有利的一面；但空气稀薄，操纵飞机的反应较迟缓，这是不利的一面。战斗机（又称歼击机）和民航客机巡航飞行时通常选择平流层，有利于发挥飞机的航时、航程性能。随着航空科学技术的发展，能在平流层飞行的飞机日益增多。

三、中间层

中间层是大气中自平流层顶至距地面约 85km 高度之间的大气层。中间层的热量主要来自于平流层，而且几乎没有臭氧吸收太阳紫外线。在这一层内，气温随高度增加迅速降低。由于中间层上部温度较低，下部温度较高，空气垂直运动相当强烈，因此，这一层又称为高空对流层。当航天飞机以很高的速度再入地球大气层时，通常会在中间层范围发生与地面通信联络的严重恶化，甚至完全中断，这就是俗称的“黑障”。

四、热层

热层是自中间层顶至距地面 250km（太阳宁静期）或 500km（太阳活动期）高度之间的空气层。在热层内，由于直接吸收太阳辐射，气温随高度增加而升高，昼间最高可达 1700°C 左右，夜间最低也在 200°C 左右。热层内空气密度极小，空气处于高度电离状态。

五、外层

外层（又称散逸层）是大气中距地面 500km 以上的气层，是地球大气与宇宙空间的过渡带。外层空气极其稀薄，大气粒子很少相互碰撞，有些速度较大的中性粒子能克服地球引力逸入星际空间。

可见，航空器的飞行环境主要是对流层和平流层。人造地球卫星、火箭、宇宙飞船和航天飞机等可以到达中间层以上。

距离地表 20~100km 的区域称为临近空间，它包含了平流层绝大部分区域、中间层的全部和热层的底部，是介于传统航空领域与航天领域之间的过渡空间，具有重要的战略价值。目前临近空间飞行器主要分为低速飞行器和高速飞行器两种。低速飞行器主要包括临近空间浮空器、太阳能飞机和氢能源无人机等。高速飞行器主要是指高超声速武器，它是一种战略型武器。

第二节 标准大气

低层大气状态参数 (p 、 ρ 、 T) 因在地球上地理位置的不同或时间的不同而变化，而飞机的飞行性能又与大气状态密切相关。为便于计算和比较飞机的性能，选取标准大气状态作为大气数据基准。标准大气是概略反映某地区气温、气压、空气密度等大气物理属性随高度分布的大气模型。准确地说，标准大气反映的是根据大量的实际测量资料，按中纬度地区的平均气象条件制定并颁布的大气温度、压力、密度等物理参数随高度的变化规律。

国际标准大气 (ISA) 以海平面为零高度，规定在海平面上大气温度 $T_0 = 288.15\text{K}$ ，压力 $p_0 = 101325\text{Pa}$ (760mmHg)，密度 $\rho_0 = 1.225\text{kg/m}^3$ ；在对流层内，高度每增加 1km，温度降低 6.5℃。在对流层顶， $T = 216.65\text{K}$ ($t = -56.5^\circ\text{C}$)。对流层内高度 H (m) 处的温度为

$$T (\text{K}) = 288.15 - 0.0065H, \text{ 或 } t (^\circ\text{C}) = 15 - 0.0065H$$

高度 11~20km 的平流层内，气温不变 ($t = -56.5^\circ\text{C}$)；高度 20~32km，每升高 1km，温度上升 1℃，即

$$T (\text{K}) = 216.65 + 0.001 (H - 20000) \text{ 或 } t (^\circ\text{C}) = -56.5 + 0.001 (H - 20000)$$

某一高度上的大气压力可以看作是面积为 1m^2 的一根上端无界的空气柱的质量所致，压力随高度的变化规律为 $dp/dH = -g\rho$ 。根据完全气体状态方程 $\rho = p/RT$ ，并考虑上述温度—高度关系式，可以得到压力—高度（或温度）关系式如下：

在对流层，某一高度上空气的压力和密度与海平面标准大气的压力和密度之比分别为（取气体常数 $R = 287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ）

$$\frac{p_H}{p_0} = \left(\frac{288.15 - 0.0065H}{288.15} \right)^{5.25588} = \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^{5.25588}, \quad \frac{\rho_H}{\rho_0} = \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^{4.25588}$$

在平流层内，到 20km 高度为止， $T=216.65\text{K}$ ，压力比和密度比为

$$\frac{p_H}{p_{11}} = \frac{\rho_H}{\rho_{11}} = \exp\left(\frac{11000-H}{6341.62}\right)$$

式中，高度 11km 处的参数 $p_{11} = 22638.2\text{Pa}$ ， $\rho_{11} = 0.36392\text{kg/m}^3$ 。

在 20~32km 之间，压力比和密度比为

$$\frac{p_H}{p_{20}} = \left(\frac{T_H}{216.65}\right)^{-34.1632}, \quad \frac{\rho_H}{\rho_{20}} = \left(\frac{T_H}{216.65}\right)^{-35.1632}$$

式中，高度 20km 处的参数 $p_{20} = 5519.6\text{Pa}$ ， $\rho_{20} = 0.08803\text{kg/m}^3$ 。

根据以上关系，可求出不同高度的大气温度、压力、密度等参数，并可计算出大气状态的其他参数。这些参数在进行真速和表速的换算，计算飞机的基本飞行性能、起飞和着陆性能及机动飞行性能等方面经常用到。

将这些参数列成表格，称为标准大气表，见附录一。

复习思考题

1. 飞机的巡航高度通常选择在哪一高度层，为什么？
2. 假设飞行高度为 5800m，确定该高度上标准大气的密度、压力和温度。
3. 查阅资料，说出临近空间飞行器的特点。
4. 高空飞行与中低空飞行相比，杆舵效能会降低，为什么？
5. 中午飞行与早、晚飞行相比，着陆拉平阶段前进距离长，为什么？

第二章 气流的基本概念和基本定理

学习提示：通过本章学习，掌握描述气流的相关概念及连续性定理、伯努利定理的数学表达式、物理意义及使用条件，理解边界层的性质及分离原因，为分析空气动力的产生及变化奠定基础。

第一节 气流的描述

气流特性是认识飞机上空气动力产生与变化的基础。研究气流特性时，必须对描述气流的一些基本概念有所了解。这是因为实际问题往往非常复杂，运用数学工具进行分析计算时十分困难，因而常常需要在物理上假设一些前提，并建立已为实验所证实的诸多基本概念和一些合理的模型，以便人们在分析过程中作直观的探讨，进而近似地分析和研究所要解决的复杂的实际问题。

一、连续介质假设

众所周知，空气是由大量微小的气体分子组成的；空气的分子之间存在间隙，每个空气分子都在不断地作无规则的热运动。在分子作热运动过程中，空气分子两次碰撞之间所走过的平均路程称为空气分子的平均自由程。分析分子运动的最基本方法是先分析每一个分子的运动规律，然后用统计方法求得大量分子微观量的平均值，这种研究方法是统计力学所采用的方法，不过它对于实际计算显得过于繁琐。

世界上现役战斗机的飞行高度范围主要在大气的对流层，这个范围内的空气十分稠密，所包含的空气质量约占整个大气质量的 $3/4$ 。在标准大气条件下，每立方厘米大气内约有 2.7×10^{19} 个空气分子，空气分子的平均自由程约为 $7.0 \times 10^{-8} \text{m}$ ；所以在目前一般飞机飞行的高度范围内，空气分子的平均自由程与飞机的特征长度（表示飞机尺寸大小的有代表性的长度，如飞机翼展或机翼弦长）相比，是极其微小的。在这样的条件下，空气作用在物体表面的力，是大量空气分子不断撞击物体表面的结果。空气动力是大量空气分子共同作用的统计平均结果，不是由个别分子的具体运动决定的。空气动力学的任务是研究空气和飞机的相互作用，研究的是空气的宏观运动规律。因此，在空气动力学领域，在绝大多数情况下一般都抛开无规则的分子热运动，不考虑实际空气的微观结构，另用一种简化的模型——空气微团来代替空气的真实微观结构，只从宏观上研究空气对飞机的作用力。空气微团是指含有较多空气分子的很小一团空气，它的几何尺寸远远小于飞行器的特征尺

寸，但却远远大于空气分子的平均自由程，以保证每个微团包含足够多的空气分子，使空气密度的统计平均值有确切的意义。空气微团所表现出来的特性不是单个分子的行为，而是空气的整体属性。需要说明的是，今后本书所讲的空气的运动速度是指空气微团质心的宏观运动速度，有别于空气分子的热运动的速度概念；而空间某一点的密度则是指质心与该点重合的空气微团的密度。

连续介质假设就是把空气看成是由空气微团组成的没有间隙的连续体。由连续介质假设所带来的最大简化是：不必研究大量分子的瞬间状态，而只需研究描述空气宏观状态的物理量，如压力 p 、密度 ρ 、温度 T 、速度 V 等。有了这个假设，就可以把空气的 p 、 ρ 、 T 、 V 等状态参数看作是空间坐标以及时间的连续函数，因而在分析空气动力学问题时，就可以广泛地应用数学上有关连续函数的解析方法。

二、气流和相对气流

气流就是空气的流动。有风的时候，我们会感到有空气的力量作用在身上。但是无风的时候，如果骑自行车飞跑，或乘敞篷汽车奔驰，同样会感到有空气的力量作用在身上。这两种情况虽有不同：一种是空气流动、物体不动；另一种是空气静止、物体运动。但是只要空气与物体之间有了相对运动，也就是有空气对于物体的相对流动（简称相对气流），就会有空气动力产生。事实证明，其他条件一定时，只要空气与物体之间的相对速度相同，所产生的空气动力就是相同的。根据相对运动原理，可以让空气以与飞机运动速度相等的速度流过静止的飞机，来研究空气动力的产生原因和变化规律。

空气动力学中，将飞机前方未经扰动的来流称为自由流（或简称为来流），其流动参数如速度、压力、密度等数学表达式一般加下标“ ∞ ”。

三、定常流动和非定常流动

流体运动都是在一定的空间内进行的，通常把运动流体所占据的空间称为流场。

空气的流动，有定常流动和非定常流动两种形式。

定常流动（又称稳定流动）是指流场中任一点的流动参数（如气流速度的大小和方向、气流的压力、密度等）不随时间变化的流动。定常流动可分为两种类型。

(1) 典型的附着流型。气流以一定角度流过机翼，流动情形会随机翼形状发生变化，但气流没有从机翼表面分离。

(2) 脱体涡流型。这是定常流动和非定常流动之间的中间状态。由于边界层（旧称附面层）的影响，通常在尖前缘处气流发生分离，不仅没有变成无规律的湍流（旧称紊流），反而形成强烈的涡流区，这种涡流是稳定而可控的，能够提供附加的升力。对于后掠翼或三角翼，尤其在大迎角下，会出现这种流动类型，更多细节将在第六章第二节介绍。

非定常流动（又称不稳定流动）是指流场中至少存在一点的流动参数（如气流速度的大小和方向、气流的压力、密度等）随时间变化的流动。如桥墩后面的漩涡（见图 2-1）和汽车行驶时车后的涡流等。

四、流线、流管与流谱

(一) 流线

流线是用来描述流场各点流动方向的曲线，即某一瞬时，曲线上任一点处的切线方向都与该点处的流体微团的速度矢量方向一致。通常，画若干条流线来显示整个流场在某一瞬时的情况。

流线的概念为研究流体的运动提供了很大方便，因为通过流场中的流线可以把流场中各点处的流体微团的速度方向很清楚地表示出来。运用流线的概念研究流体运动时应注意以下方面。

(1) 位于空间各点处的流体微团在某一指定瞬时只能有一个速度方向，所以不能有两两条流线同时通过一点，即两条流线不能相交。

(2) 在定常流动中，流线形状不随时间改变，且与迹线（是流场中的运动流体微团在一段时间内所经过的所有空间点的集合）重合；而在非定常流动中，流线的形状和位置要随时间变化，所以迹线与流线不重合。

(二) 流管

由通过流场中任意一条非流线的闭合曲线 C 上各点的流线围成的管子称为流管。图 2-2 为流管的三维立体示意图。二维剖面图中，常用两条流线来代表流管，两条流线间的距离可反映流管粗细程度。

流管的侧表面是由流线组成的。根据流线的定义，流线上各点处的流体微团没有法向分速，两条流线不能相交，所以流管表面各点的速度方向始终与流管表面相切。在定常流动中，流管的形状是不随时间改变的。因此，在流管以内或以外的流体微团只能始终保持在流管以内或以外流动，流体微团不能穿越流管表面。这样，虽然流管只是假想的管子，但它却好像真正的固体管壁一样，把流管内外的流体完全分隔开来。

(三) 流谱

包含流线和涡流等能够反映流体流动全貌的图形称为流谱，简称流谱。流谱是对流体流过固体物体时流动全貌的记录。为了研究空气的流动情形，1871 年在英国建成了世界上第一座风洞。目前风洞的种类很多，风洞的用途除流场显示以外，主要用于空气动力参数的测量等方面。图 2-3 是一座简易的直流式低速烟风洞示意图。

通过观察试验时与空气密度接近的烟流随空气的流动情况，就可以直接看到空气流过机翼剖面或其他物体剖面时的流谱。试验中空气相对于物体剖面的流动是二维流，其流谱是二维流谱，也称剖面流谱。

图 2-4 是根据烟风洞试验结果记录的几个典型物体的剖面流谱。从图中可以看出不同物体剖面流谱的相同点和不同点。

观察流谱的形状时，主要观察物体与远前方来流方向间的关系、流管截面积大小变化

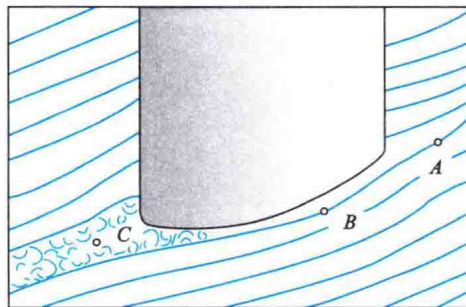


图 2-1 河水流过桥墩时的情形

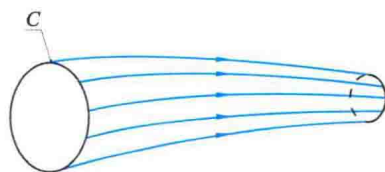


图 2-2 流管

情况、涡流区的大小以及涡流区与物体间的相对位置关系等。

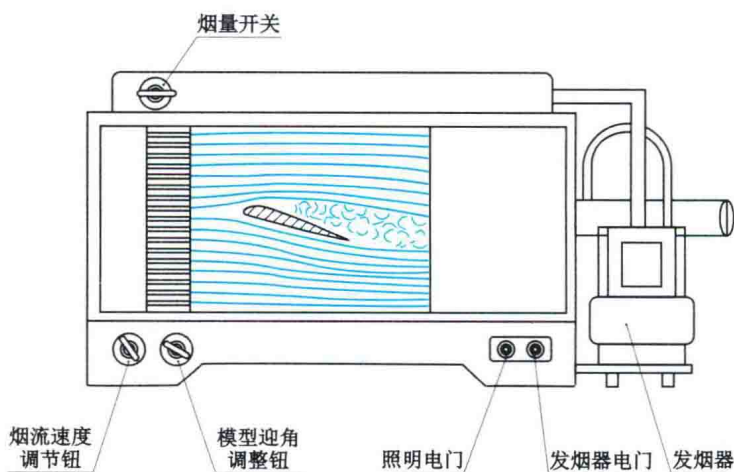


图 2-3 烟风洞

试验结果表明如下关系。

(1) 在低速气流中，流谱的形状取决于两点：一是物体的剖面形状，二是物体与气流的相对位置关系。在低速范围内，流谱形状不随气流速度的大小变化而变化。

(2) 流谱剖面中，两条相邻流线可以看作是一个流管的管壁，两条流线中间的空气就好像顺着管子流动一样。如图 2-4 中所示，物体表面凸起的地方，相邻两条流线间的距离减小，说明流管变细；气流受到阻挡和顺气流方向物面收缩的区域，如物体剖面的前部和机翼上表面后部，流管变粗。

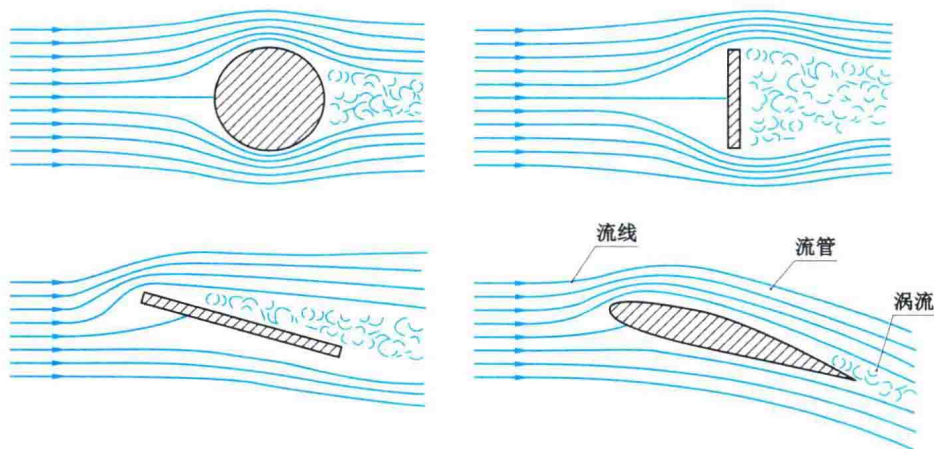


图 2-4 几个典型物体的剖面流谱

流体流过固体时通常会产生涡流（汽车和轮船行驶时其后面的涡流都是典型的例子）。低速气流流经物体时产生的涡流区的大小和相对位置取决于以下两点：物体的剖面形状和物体与远前方相对气流方向的关系。

第二节 连续性定理

连续性定理与下一节的伯努利定理概括了气流流管截面积、流速和压力之间的关系，揭示了气流特性以及空气动力之所以产生、变化的最基本的规律。连续性定理主要描述的是质量不能创造也不能消失，简言之，空气质量流量是一个常数。

假设空气流过一个各处截面积不同的流管，如图 2-5 所示。任取两个垂直于管轴 s 的截面 $a-b$ 和 $c-d$ 所夹的一段流管作为研究对象。在这段流管中，气流由截面 $a-b$ 流入，由截面 $c-d$ 流出。设截面 $a-b$ 的面积、流速和空气密度分别为 A_1 、 V_1 、 ρ_1 ；截面 $c-d$ 的面积、流速和空气密度分别为 A_2 、 V_2 、 ρ_2 ，则单位时间内经 $a-b$ 截面流入的空气质量为 $\rho_1 V_1 A_1$ ，经截面 $c-d$ 流出的空气质量为 $\rho_2 V_2 A_2$ 。

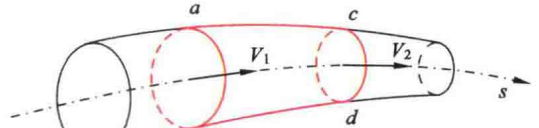


图 2-5 空气在流管中的流动

由于把流体作为连续介质来看待，即流体连续地充满它所在的空间；而且对于定常流动，流场中任一固定点的空气密度不随时间变化，所以，在空气流过流管的过程中，流管中任何部分的空气都不会变得稠密或稀薄，所以说流入截面 $a-b$ 和流出截面 $c-d$ 的空气质量应该相等，即

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (2-1)$$

因为 $a-b$ 和 $c-d$ 这两个截面是任意选取的，所以，对于一维定常流动，沿同一流管任一截面上恒有

$$\rho VA = m_q \quad (2-2)$$

式中： m_q ——流量，单位时间流过同一流管任一截面的空气质量， kg/s 。对于定常流动，单位时间内流过同一流管任意截面的流量为一常数。

式 (2-2) 为连续性定理的一般表达式，其物理意义是：在一维定常流动中，单位时间内通过同一流管任一截面的流体质量都相等。该式既适用于可压流体，也适用于不可压流体；既适用于理想流体，也适用于黏性流体。

在低速气流（不可压气流）中，空气密度基本不随流速变化，将整个流场中各处的空气密度 ρ 都看作是常数，则连续方程可简化为

$$VA = \text{常数} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 是不可压缩流体的一维定常流动的连续方程，其物理意义是：在不可压缩的一维定常流动中，单位时间内通过同一流管任一截面的流体体积都相等。该式还说明，在不可压缩的一维定常流动中，同一流管各截面上的流速与截面积成反比，即流管粗的地方流速慢，流管细的地方流速快。这种现象，在日常生活中也常常可以遇到，如穿堂风比院子里的风大，平坦河道的河水在河道窄的地方比河道宽的地方流得快等。