

军队院校“2110工程”建设项目
海军院校重点建设教材

飞行学员系列教材

飞行原理基础

Fundamentals of Flight Principles

贾忠湖◎主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

飞行原理基础

贾忠湖 主编

康小伟 柳文林 郭卫刚 王允良 参编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是海军院校重点建设教材。全书共分7章,内容与飞行实践紧密相关,是海军飞行学员必须掌握的专业基础知识。主要内容包括低速和高速气流特性、飞机的低速和高速空气动力特性、螺旋桨的空气动力特性、飞机的运动方程和平衡、飞机的飞行性能等。

本书使用对象主要是海军飞行学员,也可供相关航空专业工程技术人员和学员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行原理基础 / 贾忠湖主编. —北京:国防工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-118-10358-8

I. ①飞... II. ①贾... III. ①飞行原理 IV. ①V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 202747 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 360 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

《飞行原理基础》为海军院校重点建设教材。本书的主要内容与飞行实践紧密相关,是海军飞行学员必须掌握的专业基础知识。考虑到学员未来飞行实践的需要,主要内容围绕飞机空气动力的产生原因及其变化规律、飞机的运动和平衡、飞机的飞行性能等方面展开,注重基础理论的系统性,强调物理概念和基本原理,对于学员在飞行实践中理解和掌握飞行技术动作、提高技战术水平和保证飞行安全具有重要意义。使用对象主要是海军飞行学员,也可供相关航空专业工程技术人员和学员参考。

全书共分7章。第1章低速气流特性,主要介绍低速气流的基本概念、低速一维流动的基本方程和低速边界层;第2章飞机的低速空气动力特性,主要介绍飞机低速空气动力的产生原因和变化规律;第3章高速气流特性,主要介绍高速一维流动基本方程和超声速气流的加减速特性;第4章飞机的高速空气动力特性,主要介绍翼型和三维机翼的高速空气动力特性;第5章螺旋桨的性能,主要介绍螺旋桨的空气动力特性;第6章飞机的运动方程和平衡,主要介绍常用坐标轴系、飞机基本运动方程和飞机的平衡性能;第7章飞机的飞行性能,主要介绍飞机的平飞性能、上升和下滑性能、续航性能、机动飞行性能、起飞和着陆性能。本书每章都有小结,并附有复习思考题,供学员复习参考和课后作业。另外每章都给出相应的扩展阅读资料,希望能激发学员学习兴趣,拓展知识面。本书后附有三个实验指导书,便于指导学员进行空气动力实验。书中带“*”内容为选学内容,供学员自学提高。

本书由海军航空工程学院贾忠湖副教授主编,康小伟、柳文林、郭卫刚、王允良参加编写,康小伟、姜明坤进行了部分绘图工作。全书由胡国才教授审稿。

本书在编写过程中,参阅了大量的国内外书籍和文献资料,学院各级领导和机关给予大力支持和指导,有关专家提出了许多宝贵意见和建议,在此谨表示衷心感谢。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者
2015年7月

第1章 低速气流特性

关键词	1
1.1 气流的有关基本概念	1
1.1.1 连续介质假设	1
1.1.2 流场、定常流动和非定常流动	2
1.1.3 流线、流管和流谱	3
1.1.4 运动的转换	5
1.2 一维定常流动的基本方程	6
1.2.1 连续方程	7
1.2.2 伯努利方程	8
1.3 低速边界层	12
1.3.1 空气的黏性	12
1.3.2 边界层的产生及性质	14
1.3.3 层流边界层和湍流边界层	15
1.3.4 边界层的分离	16
1.3.5 雷诺数	17
本章小结	18
复习思考题	19
扩展阅读	20

第2章 飞机的低速空气动力特性

关键词	23
2.1 机翼的形状及几何参数	23
2.1.1 翼型及几何参数	23
2.1.2 机翼的平面形状及几何参数	25
2.2 升力的产生和变化	26
2.2.1 升力的产生	26
2.2.2 升力公式及影响升力的因素	30
2.2.3 升力系数曲线	33

2.3	阻力的产生和变化	35
2.3.1	阻力的产生	35
2.3.2	阻力公式及影响阻力的因素	38
2.3.3	阻力系数曲线	39
2.4	侧力的产生和变化	40
2.4.1	侧力的产生	41
2.4.2	侧力公式及影响侧力的因素	41
2.4.3	侧力系数曲线	41
2.5	后掠翼与三角翼的低速空气动力特性	42
2.5.1	后掠翼的低速空气动力特性	42
2.5.2	三角翼的低速空气动力特性	47
2.6	升阻比和飞机极曲线	49
2.6.1	升阻比	50
2.6.2	飞机极曲线	51
2.7	飞机的增升装置	52
2.7.1	襟翼的增升原理	53
2.7.2	放襟翼后飞机空气动力的变化	54
2.7.3	其他增升装置简介	55
2.8	地面效应	57
2.8.1	地面效应对流场的影响	57
2.8.2	地面效应对飞机空气动力的影响	58
	本章小结	59
	复习思考题	59
	扩展阅读	61

第3章 高速气流特性

	关键词	62
3.1	高速一维定常流动	62
3.1.1	空气压缩性	62
3.1.2	声波与声速	63
3.1.3	马赫数	64
3.1.4	一维绝热流动的能量方程	67
3.1.5	气流参数随马赫数的变化	68
*3.1.6	空气动力加热	69
3.2	激波和膨胀波	70
3.2.1	流管截面积随流速的变化	70
3.2.2	膨胀波	71
3.2.3	激波	72
*3.2.4	超声速飞行中的声爆	76

本章小结	76
复习思考题	77
扩展阅读	77

第4章 飞机的高速空气动力特性

关键词	82
4.1 翼型的高速空气动力特性	82
4.1.1 翼型的亚声速空气动力特性	82
4.1.2 翼型的跨声速空气动力特性	86
4.1.3 翼型的超声速空气动力特性	92
4.1.4 高速飞机的翼型特点	95
*4.1.5 高亚声速翼型	97
4.2 后掠翼和三角翼的高速空气动力特性	98
4.2.1 后掠翼的亚声速空气动力特性	98
4.2.2 后掠翼的跨声速空气动力特性	98
4.2.3 超声速前后缘与亚声速前后缘	101
4.2.4 三角翼的跨、超声速空气动力特性	102
4.3 现代战斗机气动布局	104
4.3.1 边条翼	104
4.3.2 变后掠翼	106
4.3.3 鸭式布局	107
4.3.4 无尾布局	109
4.3.5 翼身融合体	110
4.3.6 前掠翼	111
4.3.7 三翼面布局	113
4.3.8 隐身飞机气动布局	115
4.3.9 自适应机翼	118
*4.4 空气动力干扰	119
4.4.1 机翼与机身的相互干扰	119
4.4.2 机翼对平尾的干扰	120
4.4.3 跨声速面积律与超声速面积律	121
本章小结	123
复习思考题	123
扩展阅读	124

第5章 螺旋桨的性能

5.1 螺旋桨空气动力特性	127
5.1.1 螺旋桨一般介绍	127
5.1.2 螺旋桨的拉力	129

5.1.3 螺旋桨的副作用	132
5.2 螺旋桨的功率和效率	136
5.2.1 螺旋桨旋转所需功率	136
5.2.2 螺旋桨有效功率	137
5.2.3 螺旋桨效率	137
5.3 螺旋桨的负拉力	139
5.3.1 螺旋桨的基本工作状态	139
5.3.2 发动机正常工作时产生的负拉力	140
5.3.3 发动机空中停车时产生的负拉力	143
本章小结	148
复习思考题	149
扩展阅读	149

第6章 飞机的运动方程和平衡

6.1 常用坐标轴系	151
6.1.1 飞机重心及其位置表示法	151
6.1.2 坐标轴系	152
6.2 飞机的基本运动方程	156
6.2.1 质心运动方程(力方程)	156
6.2.2 绕质心的转动方程(力矩方程)	157
6.3 飞机的平衡	158
6.3.1 飞机的俯仰平衡	159
6.3.2 飞机的横侧平衡	162
6.3.3 飞机的方向平衡	163
本章小结	164
复习思考题	164
扩展阅读	165

第7章 飞机的飞行性能

7.1 飞机发动机特性简介	166
7.1.1 发动机特性的主要评定指标	167
7.1.2 发动机特性	169
7.2 平飞性能	171
7.2.1 平飞运动方程	172
7.2.2 平飞阻力(平飞需用推力)曲线	172
7.2.3 平飞性能指标	176
7.2.4 影响平飞性能的因素	182
7.3 上升和下滑性能	183
7.3.1 上升性能	183

7.3.2	下滑性能	187
7.3.3	稳定风对飞机上升和下滑性能的影响	191
7.4	续航性能	192
7.4.1	基本知识	193
7.4.2	最佳巡航状态的初步分析	195
7.5	机动飞行性能	197
7.5.1	载荷因数	198
7.5.2	水平面内的机动性能	200
7.5.3	铅垂平面内的机动性能	206
7.5.4	机动性能的综合分析	208
7.6	起飞和着陆性能	211
7.6.1	起飞性能计算与分析	211
7.6.2	着陆性能计算与分析	216
	本章小结	219
	复习思考题	219
	扩展阅读	221

空气动力学实验

实验一	雷诺实验	225
实验二	翼型表面压强分布测量实验	227
实验三	全机气动力系数测量实验	229

附录

附录 A	标准大气	231
附录 B	声速公式的推导	234
附录 C	激波传播速度公式的推导	235
附录 D	薄板翼型的超声速气动力系数公式的推导	235
附录 E	拉力公式的推导	237
附录 F	常用名词术语符号对照表	239

参考文献	243
------------	-----

低速气流特性

关键词

连续介质假设(continuous medium hypothesis)

连续方程(continuity equation)

动压(dynamic pressure)

边界层(boundary layer)

流线(stream line)

伯努利方程(Bernoulli equation)

黏性(viscosity)

雷诺数(Reynolds number)

飞机之所以能在空中飞行,并能根据飞行员或自动驾驶装置的操纵、控制完成各种不同的飞行动作,依靠的是空气给飞机的作用力,这些作用力是飞机与空气有相对运动时产生的,称为空气动力。要弄清空气动力产生的原因及其变化规律,首先要掌握气流特性。

气流是指空气的流动。通常规定,气流速度小于声速(声速的概念见本书第3章)的0.3倍称为低速气流,大于声速的0.3倍称为高速气流。本章将介绍低速气流的一些基础知识,包括气流的有关基本概念、一维定常流动的基本方程和低速边界层等。

1.1 气流的有关基本概念

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,这是因为实际问题的复杂性,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,并建立已被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实际问题。本节所述的气流有关基本概念主要包括连续介质、流场、定常流动、非定常流动、流线、流管和流谱等。

1.1.1 连续介质假设

众所周知,空气实际上是由大量微小的空气分子组成的;空气分子之间存在间隙,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对每一个分子运用运动定律,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过程显得过于繁琐。

目前,世界上现役的战斗机活动的高度范围主要在大气的对流层,而这个范围内的空气十分稠密,所包含的空气质量几乎占整个大气质量的 $3/4$ 。在标准大气(标准大气状态参数随高度的变化见本书附录A)状况下,空气的分子密度约为 2.7×10^{19} 个/ cm^3 ,空气分子的平均自由程约为 7.0×10^{-8} 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,如飞机两翼尖之间的距离或机翼弦长)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。而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,所以在空气动力学领域,一般都抛开无规则的分子运动,不考虑实际空气的微观结构,用一种简化的模型来代替空气的真实微观结构,只从宏观上研究空气微团对飞机的作用力。

所谓空气微团,是指含有较多空气分子的很小一团空气,它与飞行器特征尺寸相比是微不足道的,同时它还要包含足够多的空气分子数目,要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每个分子的行为,而是整个空气的总体属性。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。

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

1.1.2 流场、定常流动和非定常流动

1.1.2.1 流场

空气、水等都是流体。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。

在研究流体流动规律或流体与物体间的相互作用力时,通常只选取物体附近的一定范围的空间作为研究对象,我们讨论的流场通常在这个范围内。前面所述,采用连续介质假设后,研究空气流动的最小单位为空气微团,广义地讲,研究流体运动的最小单位即为流体微团。但在研究流体的运动时,并不是具体看某一流体微团如何运动,而是通过分析流场中每一个固定空间点流体微团的 p, ρ, T, V 等状态参数随时间的变化,以及研究由某一空间点转到另一个空间点时这些参数的变化,从而得到流体的运动规律,这种研究流体运动的方法称为欧拉法;而如果是研究流体中某一指定微团的 p, ρ, T, V 等状态参数随时间的变化,这种方法称为拉格朗日方法。运用拉格朗日方法研究流体运动时,在数学上往往碰到诸多困难,所以在空气动力学中一般都采用欧拉法。

流场中每一固定点的位置可以用空间笛卡儿坐标(x, y, z)来确定,流动规律用不同瞬

时(t)各点流体的状态参数(压力、密度、速度等)描述。这样,流体的状态参数都是坐标和时间的函数,即

$$\begin{aligned} p &= f_1(x, y, z, t) \\ \rho &= f_2(x, y, z, t) \\ T &= f_3(x, y, z, t) \\ V_x &= f_4(x, y, z, t) \\ V_y &= f_5(x, y, z, t) \\ V_z &= f_6(x, y, z, t) \end{aligned} \tag{1.1}$$

式中: V_x 、 V_y 、 V_z 分别为速度 $\mathbf{V}$ 在 x, y, z 三个坐标轴方向上的分量。

1.1.2.2 定常流动与非定常流动

式(1.1)中的4个自变量(x, y, z, t)中空间变量和时间变量的物理意义不同,就时间变量来讲,流场中流体的流动,有定常流动和非定常流动两种形式。

流场中任一固定点的气流速度、压强、温度、密度等状态参数均不随时间变化的流动,称为定常流动;反之,如果气流状态参数随时间变化,则是非定常流动。

如图1-1所示,平坦河面中间各点处水的状态参数都不随时间变化,这些区域的流动是定常流动;而桥墩后面的旋涡区的流动,则是非定常流动。

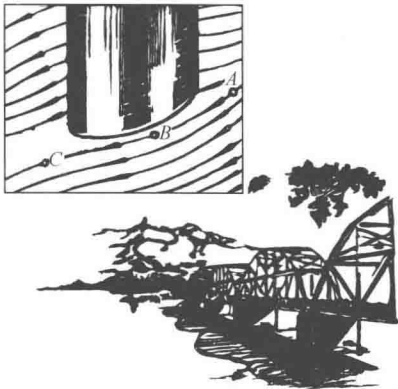


图1-1 河水流过桥墩时的情形

对于定常流动,状态参数与时间变量无关,仅是空间坐标的函数,即

$$\begin{aligned} p &= f_1(x, y, z) \\ \rho &= f_2(x, y, z) \\ T &= f_3(x, y, z) \\ V_x &= f_4(x, y, z) \\ &\vdots \end{aligned} \tag{1.2}$$

对于非定常流动,各状态参数不仅是空间位置的函数,同时还是时间的函数,其函数关系式如式(1.1)。

几何学中用“维”表示空间独立而互相正交的方位数,通常的空间有三维,平面或曲面有二维,直线或曲线只有一维。对于流体流动,如果流体在流动中的状态参数是三个空间坐标的函数,这样的流动称为三维流动或空间流动,简称三维流;如果是两个空间坐标的函数,称为二维流动或平面流动,简称二维流;如果仅是一个空间坐标的函数则一维流动,简称一维流。

1.1.3 流线、流管和流谱

1.1.3.1 流线

流线是为直观描述流场中流体的流动情况而定义的,其定义与物理学中的磁感应线

类似。流线是流场中的这样一条曲线,在给定的某一时刻,质心位于该曲线上各点的流体微团的速度方向都与该曲线上微团所在处的切线相重合,如图 1-2 所示。

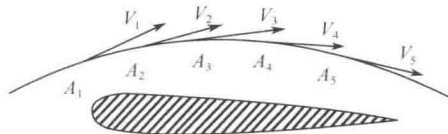


图 1-2 流线

流线的概念为我们研究流体的运动提供了很大方便,因为通过流场中的所有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。不过要正确地运用流线的概念去研究流体的运动应该注意:

(1) 因为空间每一点在任意一个瞬间都只能有一个速度方向,所以不能有两条流线同时通过同一点,即两条流线不能相交。

(2) 在定常流动中,流线的形状和位置不随时间变化,迹线(任何一个流体微团在流场中的运动轨迹)与流线是重合的;而在非定常流动中,流线的形状和位置要随时间变化,迹线与流线不重合。

通常,画若干条流线来显示整个流场在某一瞬时的流动情况。

1.1.3.2 流管

由通过流场中任意一个非流线的闭合曲线 C 上各点的流线围成的管子称为流管。图 1-3 为流管三维立体示意图,在二维剖面图中,流管管壁的剖面图为两条相邻的流线。

由于流管的侧表面是由流线组成,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,而在定常流动中,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,把流管内外流体流动完全分隔开。

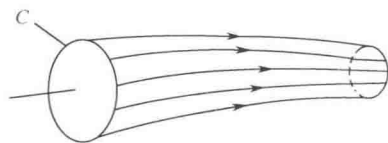


图 1-3 流管

1.1.3.3 流谱

包含流线和涡流等能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 年世界上建成了第一座风洞,目前风洞的种类很多,分类标准也不唯一。按实验段气流的速度可将风洞分为低速风洞和高速风洞(包括亚声速风洞、跨声速风洞、超声速风洞、高超声速风洞和高焓高超声速风洞等)两大类。图 1-4 是一座简易的直流式低速烟风洞,它用风扇驱动气流,实验用模型安装在实验段,在实验段前方的稳定段装有一排烟管,通过观察实验时与空气密度接近的烟流随空气流动,人们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。实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,也称为剖面流谱。

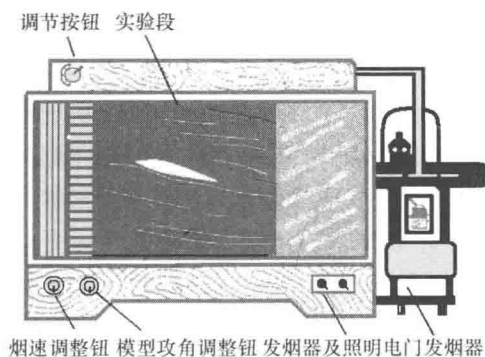


图 1-4 烟风洞

图 1-5 是根据烟风洞实验结果记录的几个典型物体的剖面流谱。仔细观察一下,这些流谱有哪些共同点和不同点?

观察流谱的形状时,主要观察流管剖面面积大小变化情况、涡流区的大小以及涡流区与物体间的相对位置等。

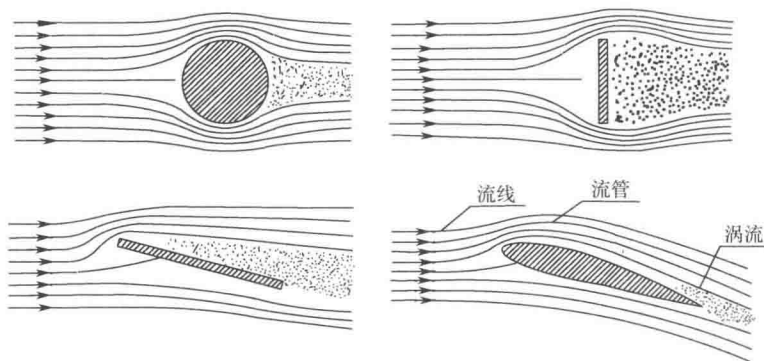


图 1-5 几个典型物体的剖面流谱

实验结果表明:

(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。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。

空气流过固体物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)。涡流区的大小和相对位置取决于物体的剖面形状和物体在相对气流中与远前方相对气流方向的位置关系。

1.1.4 运动的转换

如前所述可知,研究定常流动要比研究非定常流动简单得多。运动转换的目的在于:选取适当的坐标系,变非定常流动为定常流动,从而使流动问题的处理得到简化。运动转

换的理论依据是运动的相对性原理,即:将一等速直线运动加到某一运动物体上时,物体上受到的作用力保持不变。

考虑一个在静止空气中以速度 V_∞ 向前运动的机翼,其流动情况如图 1-6(a) 所示。机翼运动时,其头部(前缘)不断排开空气,尾部(后缘)则不断吸入空气,对于以地面为参考系的观察者而言,任一空间点处气流参数都是时间 t 的函数,流动是非定常的。根据运动相对性原理,如果在图 1-6(b) 机翼运动中,同时选择一个与机翼运动速度大小相等、方向相同的参考系,则机翼和空气之间互相作用及相对运动的状态不变。此时机翼相对静止,而空气则以速度 V_∞ 流向机翼,这相当于观察者置身于固定在机翼上的坐标系中,该坐标系中任何一点的气流参数与时间 t 无关,因而流动是定常的。

这种将物体在静止空气中运动转换为空气流过静止物体的流动方法称为运动转换。通过运动转换,可以将非定常流动变为定常流动,当进行解析处理时,少了一个变量 t ,使问题得到简化,而作用在物体上的空气动力却仍保持不变,空气动力学最主要实验设备——风洞,就是根据运动的相对性原理而设计的,以后各章节也将主要研究空气流过相对静止物体的情况。

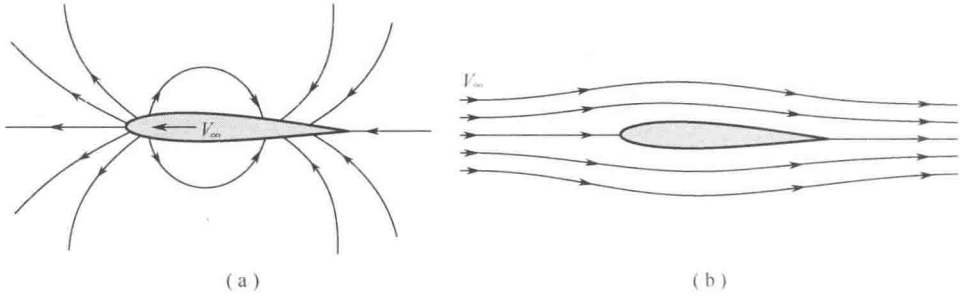


图 1-6 定常流动和运动转换

1.2 一维定常流动的基本方程

所谓一维定常流动,就是指垂直于流动方向的各个流管截面上,流动参数(p, ρ, T, V 等)都均匀一致且不随时间变化。在一维定常流动中,通常取流管各截面的中心点连接而成的曲线作为坐标(图 1-7),记这个坐标为 s ,则在一维定常流动中,流体的状态参数仅仅是 s 的函数: $p = p(s), \rho = \rho(s), V = V(s), T = T(s) \dots$

一维定常流动是一种最简单的理想化流动模型。流体在空间内的实际流动一般都不是真正的一维流动,但我们可以将整个流场划分成许多流管,在每一个十分细小的流管中,流体的流动就可以近似看成是一维的。另外,严格地讲,在同一坐标 s 对应的截面上的各状态参数也不均一,但对于截面上的不同参数,我们可以通过采用取平均值的方法,将实际流动当作一维流来近似处理。

本节将推导出—维定常流动的两个基本方程,并说明其物理意义、使用条件及其实际应用。这两个方程建立了气流各状态参数(如流管截面积 A 、流速 V 和压强 p 等)之间的数量关

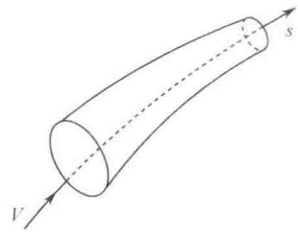


图 1-7 一维定常流动

系,根据这些关系就有可能从理论上来研究和计算一些基本的低速气流特性问题。

1.2.1 连续方程

连续方程是把质量守恒定律应用于运动流体所得到的数学关系式,故又称之为质量方程,它是空气动力学中最基本和最常用的方程之一。

1.2.1.1 连续方程的表达式

在图 1-8 所示的一维流管中,任取两个垂直于管轴 s 的截面 $a-b$ 和 $c-d$ 构成区域 $abcd$,选取这一控制体为研究对象。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 , 则单位时间内经截面 $a-b$ 流入的空气质量为 $\rho_1 A_1 V_1$, 经截面 $c-d$ 流出的空气质量为 $\rho_2 A_2 V_2$ 。

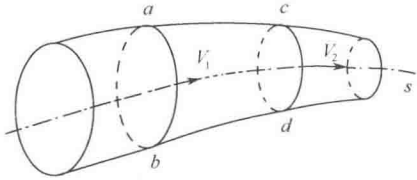


图 1-8 空气在流管中流动

单位时间内流入的空气质量 $\rho_1 A_1 V_1$ 和流出的空气质量 $\rho_2 A_2 V_2$ 之间是什么关系呢?

由于我们是把流体作为连续介质来对待的,即流体连续充满它所在的空间;而且对于定常流动,流场中任意一固定点的空气密度不随时间变化,根据物理学中的质量守恒定律可知,单位时间内流入截面 $a-b$ 和流出截面 $c-d$ 的空气质量应该是相等的,即

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (1.3)$$

因为 $abcd$ 控制体是任意选取的,所以,对于一维定常流动,沿同一流管任意截面上恒有

$$\rho V A = \dot{m} \quad (1.4)$$

式(1.4)即为一维定常流动的连续方程。式中 $\dot{m}$ 是常数,称为质量流量,单位是 kg/s , 它表示单位时间流过同一流管任一截面的空气质量。

在低速气流中,空气密度基本不随流速变化。这种密度不随流速变化的气流称为不可压缩气流或非压缩气流。如果将整个流场中各处的空气密度(ρ)都看作是常数,那么,沿流管恒有

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = C \quad (1.5)$$

式中: C 也是常数,单位是 m^3/s , 它表示单位时间内流过同一流管任一截面的空气体积。

1.2.1.2 连续方程的物理意义

式(1.4)是一维定常流动的连续方程,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。而式(1.5)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:在不可压缩流体的一维定常流动中,单位时间内通过同一流管任一截面的流体体积都相等。

式(1.5)还说明,在不可压缩流体的一维定常流动中,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在河道宽的

地方流得快。

1.2.1.3 连续方程的使用条件

从连续方程的推导过程可以看出,尽管式(1.4)和式(1.5)都被称为一维定常流动的连续方程,但式(1.5)仅适用于不可压缩流体,而式(1.4)对于可压缩和不可压缩流体都适用,就是说它也适用于密度随流速变化的流体。

推导方程时,对流体有无黏性未加限制,因而,它既适用于理想流体(忽略黏性作用的流体),也适用于黏性流体。有关理想流体和黏性流体将在第1.3节中介绍。

1.2.2 伯努利方程

伯努利定理是瑞士物理学家丹尼尔·伯努利(Daniel Bernoulli)在1738年首先提出的,以后又由多名科学家做了发展和推广。伯努利方程是伯努利定理的数学表达式,它是空气动力学中的又一个重要方程。

1.2.2.1 伯努利方程的表达式

在定常流动的流场中取一微细流管,设流管轴线 s 的正向与流动方向一致。如图1-9(a)所示,沿流管轴线任取一微段 ds 。图1-9(b)是微段 ds 的正视图,设截面 $a-a$ 的面积、压强和速度分别是 A, p, V ;截面 $b-b$ 的面积、压强和速度分别 $A+dA, p+dp, V+dV$ 。

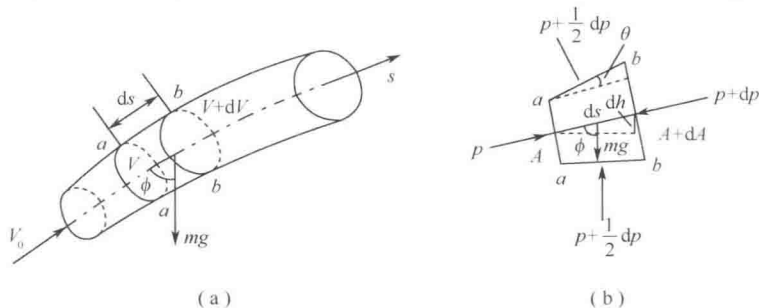


图1-9 流体微段上的作用力

沿着 s 方向,对微段 ds 使用动量定理。规定沿 s 轴正向为正,则微段 ds 在 s 轴方向所受外力有:

- (1) 截面 $a-a$ 上沿 s 轴正向的压力 pA ;
- (2) 截面 $b-b$ 上沿 s 轴正向的压力 $-(p+dp)(A+dA)$;
- (3) 微段侧表面所受的压强在 s 轴上的投影:

微段侧表面的压强的平均值为 $[p+(p+dp)]/2$,记微段的侧面积为 $A_{\text{侧}}$,则侧表面受到的压力为

$$\frac{1}{2}[p+(p+dp)]A_{\text{侧}} = \left(p + \frac{1}{2}dp\right)A_{\text{侧}}$$

该作用力在 s 轴线上的投影为 $(p+dp/2)A_{\text{侧}}\sin\theta$,式中 θ 为微段侧面 $a-b$ 与 s 轴的夹角(为了简化,近似认为微段侧面各处的 θ 角都相等),而式中的 $A_{\text{侧}}\sin\theta$ 就是微段侧面积在截面 $b-b$ 上的投影,其大小就等于 dA 。所以,侧表面所受的压强在 s 轴上的投影为