

空气动力学

陈再新 刘福长 鲍国华 编



航空工业出版社

空 气 动 力 学

陈再新 刘福长 鲍国华 编

航空工业出版社

1993

(京)新登字 161 号

内 容 提 要

本书为航空高等院校通用教材。

除绪论外,全书共分十二章。第一章为流体基本属性;第二章为理想流体运动学和动力学基础;第三章为几种简单的不可压位流及其叠加;第四章为低速附面层;第五、六章分别阐述低速翼型和机翼的气动特性;第七章为高速可压流动;第八、九章分别为亚音速流动和超音速、跨音速流动的翼型和机翼的气动特性;第十章为细长旋成体的气动特性;第十一章为机翼-机身-尾翼组合体的气动特性;第十二章为高超音速流动基础。

各章首先着重从物理概念的角度,讲清问题的实质,这也是本书的特点;对当今飞行器空气动力的基本理论和计算方法,书中都作了清晰的阐述;并注意分析有关参数对空气动力特性的影响。

本书供飞行器(飞机、导弹)设计专业、工程流体力学专业以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。

空 气 动 力 学

陈再新 刘福长 鲍国华 编

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号)

—邮政编码: 100029—

南京航空航天大学印刷厂印刷

1993 年 8 月第 1 版

1993 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 25.5

印数: 1—1 800

字数: 633 千字

ISBN 7-80046-575-6/G · 096

定 价: 12.00 元

前 言

本书是根据 1990 年 10 月西安会议所确定的、由三个航空院校为飞行器设计和工程流体力学专业大类设置的主干课《空气动力学》所拟订的教学大纲编写的。本书从飞行器设计的角度出发,按照空气动力学体系,阐述空气运动所遵循的基本规律以及飞行器在低速、亚音速和超音速绕流时的空气动力特性。考虑到不同专业的学习要求,在取材上本书提供一定的选择余地。本书的主要对象是航空院校飞机设计、直升机设计、工程流体力学、飞行力学以及导弹设计等专业的本科学生,作为教学时数 90 小时的教材,亦可作为相邻专业学生的教材或科技人员的参考书。

本书绪论,阐述空气动力学研究的基本任务以及它的发展,并对我国对空气动力学的研究和发展作了概述。

全书共分十二章。第一章介绍流体的属性和标准大气;第二章讲流体运动学和动力学基础,重要的伯努利方程就在这里介绍;第三章讲不可压理想流体绕物体的流动,介绍源(汇)、涡、偶极子及它们的叠加;第四章介绍低速附面层的概念及平板摩擦阻力的计算方法;第五章讲低速翼型(二维机翼)的空气动力特性,主要介绍薄翼型理论;第六章讲机翼低速空气动力特性,重点讲大展弦比直机翼升力线理论所计算得到的空气动力特性;第七章讲高速可压流动,为后面研究飞行器的高速气动特性提供基础知识;接着,第八章、第九章分别介绍亚音速流和超音速流机翼(包括翼型)的气动特性。这样,对机翼的气动特性已经有了系统的、全面的理解。下面,第十章讲旋成体机身低、高速的气动特性,其中主要介绍细长旋成体理论。在介绍了单独机翼和机身的气动特性以后,第十一章介绍机翼-机身-尾翼组合体的相互干扰概念以及组合体气动特性的基本计算方法。最后,第十二章介绍高超音速流动基础。

由于计算空气动力学的发展和数值方法的重要性,本书给以应有地位,在第三章、第四章、第五章和第六章都安排了一定的数值计算的基本内容,为后面机翼、机身或组合体的气动特性的数值计算打下基础。

本书绪论、第八章、第九章、第十章和第十一章由南京航空航天大学陈再新同志编写;第一章、第二章、第三章和第四章由西北工业大学鲍国华同志编写;第五章、第六章、第七章和第十二章由北京航空航天大学刘福长同志编写。全书最后由陈再新同志作了统稿和校阅。

本书承北京航空航天大学张炳暄教授审阅,提出不少宝贵意见,谨致谢忱。由于编者水平有限,加上时间仓促,错误和不妥之处在所难免,诚恳希望读者批评指正。

编 者

1993 年 8 月

目 录

绪论	(1)
0. 1 空气动力学研究的基本任务	(1)
0. 2 空气动力学发展概述	(1)
0. 3 空气动力学分类	(2)
0. 4 空气动力学研究方法	(3)
0. 5 我国空气动力学研究发展概述	(4)
第一章 流体介质	(5)
1. 1 连续介质假设	(5)
1. 2 流体的密度、压强和温度	(6)
1. 2. 1 流体内部一点处的密度	(6)
1. 2. 2 理想流体中一点处的压强各向同性	(7)
1. 2. 3 完全气体的状态方程	(8)
1. 3 气体的压缩性、粘性和传热性	(8)
1. 3. 1 压缩性	(8)
1. 3. 2 粘性	(9)
1. 3. 3 传热性	(11)
1. 4 流体的模型化	(11)
1. 4. 1 理想流体	(11)
1. 4. 2 不可压流体	(12)
1. 4. 3 绝热流体	(12)
1. 5 标准大气	(13)
1. 5. 1 大气的分层	(13)
1. 5. 2 密度、温度和压强随高度的变化	(14)
1. 5. 3 标准大气	(16)
习题	(17)
第二章 流体运动学和动力学基础	(18)
2. 1 流场	(18)
2. 1. 1 流场及其描述方法	(18)
2. 1. 2 迹线、流线和流管	(19)
2. 2 流体微团运动的分析	(21)
2. 2. 1 微团运动的分析	(21)
2. 2. 2 散度、旋度和速度位	(23)
2. 3 连续方程和流函数	(26)

2. 3. 1	连续方程	(26)
2. 3. 2	流函数	(27)
2. 4	旋涡运动	(31)
2. 4. 1	涡线、涡管及旋涡强度	(31)
2. 4. 2	速度环量; 斯托克斯定理	(32)
2. 4. 3	直线涡的诱导速度及毕奥-萨瓦定律	(34)
2. 4. 4	海姆霍兹旋涡定理	(36)
2. 5	欧拉运动方程及其积分	(36)
2. 5. 1	欧拉运动方程	(37)
2. 5. 2	伯努利方程	(39)
2. 6	流体力学中的动量定理	(42)
2. 6. 1	动量定理的一般原理	(42)
2. 6. 2	动量定理的例子	(44)
	习题	(46)
第三章	不可压理想流体绕物体的流动	(49)
3. 1	不可压理想流体的无旋运动	(49)
3. 1. 1	基本方程和边界条件	(49)
3. 1. 2	流动的叠加	(51)
3. 2	不可压位流流动叠加举例	(52)
3. 2. 1	直匀流、点源和点涡	(52)
3. 2. 2	直匀流中的点源	(54)
3. 2. 3	等强度的点源和点汇——偶极子	(56)
3. 3	绕圆柱的无环量和有环量流动	(58)
3. 3. 1	绕圆柱的无环量流动	(58)
3. 3. 2	绕圆柱的有环量流动; 库塔-儒可夫斯基定理	(60)
3. 4	二维对称物体绕流的数值解	(63)
	习题	(65)
第四章	低速附面层	(67)
4. 1	附面层概念	(67)
4. 1. 1	粘性流体和理想流体	(67)
4. 1. 2	层流和紊流	(68)
4. 1. 3	附面层内沿物面法线方向压强不变	(70)
4. 1. 4	附面层的厚度	(71)
4. 2	附面层微分方程	(73)
4. 2. 1	附面层微分方程的推导	(73)
4. 2. 2	附面层微分方程的数值解	(74)
4. 3	卡门动量积分关系式	(81)
4. 3. 1	卡门动量积分关系式的推导	(81)

4. 3. 2	卡门动量积分关系式的应用	(83)
4. 4	低速平板附面层及摩擦阻力计算	(88)
4. 4. 1	平板层流附面层	(89)
4. 4. 2	平板紊流附面层	(91)
4. 4. 3	平板混合附面层	(93)
4. 5	附面层的分离	(94)
4. 5. 1	附面层的分离	(94)
4. 5. 2	流动状态对分离的影响	(95)
4. 5. 3	分离与压差阻力	(96)
	习题	(96)
第五章	低速翼型的气动特性	(98)
5. 1	翼型的几何参数	(98)
5. 1. 1	几何弦长 b	(98)
5. 1. 2	翼型表面无量纲坐标	(98)
5. 1. 3	弯度分布函数 $\bar{y}_f(\bar{x})$; 相对弯度 $\bar{f}$; 最大弯度位置 $\bar{x}_f$	(99)
5. 1. 4	厚度分布函数 $\bar{y}_e(\bar{x})$; 相对厚度 $\bar{c}$; 最大厚度位置 $\bar{x}_e$	(99)
5. 1. 5	前缘半径 r_L , 后缘角 τ	(99)
5. 1. 6	常用低速翼型编号法	(99)
5. 2	翼型空气动力系数	(100)
5. 2. 1	翼型的迎角和空气动力	(100)
5. 2. 2	翼型空气动力系数	(101)
5. 3	低速翼型气动特性概述	(101)
5. 3. 1	绕流图画	(101)
5. 3. 2	翼型气动力系数随迎角 α 变化曲线	(102)
5. 4	库塔-儒可夫斯基后缘条件; 环量的确定	(103)
5. 4. 1	库塔-儒可夫斯基后缘条件	(103)
5. 4. 2	环量的产生和后缘条件的关系	(105)
5. 5	任意翼型位流解法	(105)
5. 5. 1	保角变换法	(106)
5. 5. 2	绕翼型位流的数值算法——面元法	(107)
5. 6	薄翼型理论	(111)
5. 6. 1	流动的分解	(111)
5. 6. 2	迎角-弯度问题	(113)
5. 6. 3	厚度问题的解	(120)
5. 7	厚翼型理论	(121)
5. 7. 1	对称厚翼型无升力流的数值算法	(121)
5. 7. 2	任意厚翼型有升力时的数值算法	(123)
5. 8	实用低速翼型的气动特性	(124)

5. 8. 1	翼型表面压强分布 $C_p(\bar{x})$	(124)
5. 8. 2	翼型升力特性	(124)
5. 8. 3	翼型纵向力矩特性	(125)
5. 8. 4	压心位置 $\bar{x}_p$ 和焦点位置 $\bar{x}_F$	(125)
5. 8. 5	翼型阻力特性和极曲线	(127)
附录	$I_n = \int_0^\pi \frac{\cos n\theta d\theta}{\cos\theta - \cos\theta_1} = \pi \frac{\sin n\theta_1}{\sin\theta_1}$ 的证明	(128)
习题		(129)

第六章 机翼低速气动特性 (132)

6. 1	机翼的几何参数	(132)
6. 1. 1	平面形状和平面几何参数	(132)
6. 1. 2	几何扭转角 φ_m	(133)
6. 1. 3	上(下)反角 ψ	(134)
6. 2	机翼的空气动力系数	(134)
6. 3	大展弦比直机翼的气动特性	(134)
6. 3. 1	绕流流态及其特点分析	(135)
6. 3. 2	气动模型和升力线假设	(136)
6. 3. 3	升力线理论	(136)
6. 3. 4	大展弦比直机翼的失速特性	(151)
6. 4	后掠翼的低速气动特性	(152)
6. 4. 1	无限翼展斜置翼的气动特性	(152)
6. 4. 2	后掠翼的流态和载荷特性	(154)
6. 4. 3	升力面理论	(154)
6. 4. 4	梯形后掠翼的升力面理论解	(162)
6. 5	小展弦比机翼的低速气动特性	(163)
6. 5. 1	小展弦比机翼的绕流特点	(163)
6. 5. 2	计算三角翼气动特性的“前缘吸力比拟”法	(164)
6. 6	机翼低速气动特性的工程计算	(167)
6. 6. 1	剖面升力系数展向分布 $C_y(z)$	(167)
6. 6. 2	升力特性	(169)
6. 6. 3	纵向力矩特性	(170)
6. 6. 4	阻力特性	(171)

附录	小展弦比锐前缘三角翼 C_{yp} 和 C_{yv} 公式的推导	(173)
----	--	-------

习题		(174)
----	-------	-------

第七章 高速可压流动 (177)

7. 1	热力学基础知识	(177)
7. 1. 1	完全气体假设; 状态方程; 内能和焓	(177)
7. 1. 2	热力学第一定律	(178)

7. 1. 3	热力学第二定律	(179)
7. 2	音速和马赫数	(180)
7. 2. 1	微弱扰动在介质中的传播速度——音速	(180)
7. 2. 2	马赫数 M 及其物理意义	(181)
7. 3	高速一维定常流	(182)
7. 3. 1	一维定常绝热流的能量方程	(182)
7. 3. 2	一维定常绝热流参数间的基本关系式	(183)
7. 4	小扰动影响区的划分; 马赫锥	(188)
7. 5	马赫波	(189)
7. 6	膨胀波	(190)
7. 6. 1	膨胀波前后参数变化与外折角关系式	(191)
7. 6. 2	超音速气流绕小外折角的近似关系式	(192)
7. 7	激波	(194)
7. 7. 1	正激波	(195)
7. 7. 2	平面斜激波	(197)
7. 7. 3	圆锥激波	(202)
7. 8	高速可压流附面层	(204)
7. 8. 1	温度附面层和层内温度分布	(204)
7. 8. 2	绝热壁面的恢复温度及复温因子	(205)
7. 8. 3	可压流中平板摩阻系数的计算	(206)
7. 8. 4	壁面热流密度 q_w 的计算	(209)
7. 9	激波与附面层相互干扰	(209)
	习题	(210)
第八章	亚音速翼型和机翼的气动特性	(213)
8. 1	亚音速可压流中绕翼型流动的特点	(213)
8. 2	定常理想可压流速度位方程	(214)
8. 3	小扰动线化理论	(215)
8. 3. 1	速度位方程的线化	(215)
8. 3. 2	压强系数的线化	(216)
8. 3. 3	边界条件的线化	(217)
8. 4	亚音速可压流中薄翼型的气动特性	(218)
8. 4. 1	绕波形壁面的二维亚音速流动	(218)
8. 4. 2	亚音速可压流薄翼型的气动特性	(220)
8. 5	亚音速薄机翼的气动特性及 M_∞ 数对气动特性的影响	(223)
8. 5. 1	相应机翼形状之间的变换	(223)
8. 5. 2	亚音速薄机翼的升力和俯仰力矩特性	(223)
8. 5. 3	亚音速流时 M_∞ 数对机翼空气动力特性的影响	(228)
	习题	(230)

第九章 超音速和跨音速机翼的气动特性	(232)
9. 1 超音速薄翼型的绕流和近似理论	(232)
9. 1. 1 超音速薄翼型绕流的特点	(232)
9. 1. 2 薄翼型超音速气动特性的一级近似理论	(235)
9. 1. 3 超音速翼型二级近似理论简述	(246)
9. 2 无限翼展斜置翼的超音速气动特性	(247)
9. 3 薄机翼超音速绕流的基本概念	(249)
9. 3. 1 前、后马赫锥概念	(249)
9. 3. 2 前缘、后缘和侧缘	(250)
9. 3. 3 二维流区与三维流区	(251)
9. 3. 4 有限翼展薄机翼的超音速绕流特性	(252)
9. 3. 5 锥型流场概念	(253)
9. 4 超音速源 (汇) 强度的确定和零迎角厚度机翼超音速 绕流时的压强分布	(254)
9. 4. 1 超音速线化方程基本解和源 (汇) 强度的确定	(254)
9. 4. 2 等剖面斜率的零迎角三角翼在超音速 绕流时的压强分布	(257)
9. 5 典型平面形状机翼的超音速气动特性	(259)
9. 5. 1 典型平面形状机翼的压强分布	(259)
9. 5. 2 超音速流中矩形平板机翼与三角形平板机翼的 升力特性和俯仰力矩特性	(261)
9. 5. 3 机翼的超音速阻力特性	(264)
9. 6 机翼的跨音速气动特性	(271)
9. 6. 1 翼型的临界马赫数	(271)
9. 6. 2 薄翼型的跨音速绕流图画; 翼型气动特性随 M_∞ 数的变化	(272)
9. 6. 3 机翼主要几何参数对跨音速气动特性的影响	(275)
9. 6. 4 跨音速机翼气动特性的相似参数	(276)
9. 6. 5 一种适用于跨音速流的超临界翼型	(277)
习题	(278)
第十章 细长旋成体的气动特性	(280)
10. 1 旋成体的几何参数及其绕流图画	(280)
10. 1. 1 旋成体的几何参数	(280)
10. 1. 2 绕旋成体的流动图画	(281)
10. 2 柱坐标系下的线化位流方程; 边界条件和压强系数	(282)
10. 2. 1 柱坐标系下的线化位流方程	(282)
10. 2. 2 物面边界条件和压强系数	(282)
10. 3 细长旋成体线化位流方程基本解	(283)

10. 3. 1	轴对称流基本解	(283)
10. 3. 2	小迎角横向流动基本解	(285)
10. 4	超音速流动中旋成体多项式数值解法	(287)
10. 4. 1	旋成体轴对称超音速流动	(287)
10. 4. 2	有迎角时绕旋成体的超音速流动	(290)
10. 5	细长旋成体理论	(290)
10. 5. 1	轴对称流中细长旋成体的压强分布	(291)
10. 5. 2	小迎角绕流时细长旋成体表面的压强分布	(295)
10. 5. 3	细长旋成体的气动特性	(297)
10. 6	超音速旋成体的空气动力最有利形状	(302)
10. 6. 1	用类比法解细长旋成体的零升波阻	(302)
10. 6. 2	对无收缩尾部给定 $S_M/L_{\frac{1}{2}}$ 时旋成体的最有利形状 ——Kármán 旋成体	(304)
10. 6. 3	对尖头尖尾给定 V/L^3 时旋成体的最有利形状 ——Sears-Haack 旋成体	(305)
10. 7	大迎角绕流时旋成体横流理论	(306)
	习题	(308)

第十一章 机翼-机身-尾翼组合体的气动特性

11. 1	机翼-机身-尾翼组合体的几何参数	(310)
11. 2	翼身组合体气动干扰的基本概念	(312)
11. 2. 1	机身对机翼的干扰	(312)
11. 2. 2	机翼对机身的干扰	(313)
11. 2. 3	翼身组合体的升力组成	(313)
11. 3	对称面内不可压流绕翼身组合体的升力	(314)
11. 4	细长体位流理论	(315)
11. 4. 1	横向流动扰动速度位	(315)
11. 4. 2	平板机翼-圆柱机身组合体的载荷系数	(317)
11. 4. 3	细长体理论应用举例	(319)
11. 5	非小展弦比平板翼-圆柱机身组合体气动特性的工程估算法	(323)
11. 5. 1	翼身组合体的升力特性	(323)
11. 5. 2	翼身组合体压力中心的确定	(326)
11. 6	翼身组合体对水平尾翼的干扰; 升降舵不偏时水平尾翼的升力	(327)
11. 6. 1	单独机翼和翼身组合体对平尾的干扰	(328)
11. 6. 2	升降舵不偏时平尾机身组合体的升力	(334)
11. 7	机翼-机身-平尾组合体的升力系数和纵向力矩系数	(335)
11. 7. 1	机翼-机身-平尾组合体的升力系数	(335)
11. 7. 2	机翼-机身-平尾组合体的纵向力矩系数	(336)
11. 8	机翼-机身-平尾组合体的阻力系数; 关于面积律概念	(337)

11. 8. 1 全机阻力系数	(337)
11. 8. 2 关于面积律概念	(338)
附录 横流扰动速度位式 (11-20) 的推导	(340)
习题	(343)
第十二章 高超音速流基础	(345)
12. 1 高超音速绕流的新特征	(345)
12. 2 高超音速无粘流的激波关系式	(348)
12. 2. 1 平面斜激波前后参数的简化关系式	(348)
12. 2. 2 正激波前后参数关系式	(349)
12. 3 高超音速流相仿律	(351)
12. 3. 1 小扰动时斜激波的近似关系式	(351)
12. 3. 2 高超音速流膨胀波的近似关系式	(352)
12. 3. 3 高超音速流相仿律	(353)
12. 4 高超音速气动特性的近似计算	(354)
12. 4. 1 牛顿公式	(354)
12. 4. 2 修正的牛顿公式	(356)
12. 4. 3 典型物体高超音速气动特性	(357)
12. 5 高超音速飞行器的气动加热和热防护	(365)
12. 5. 1 导热率和气动加热的预计	(365)
12. 5. 2 高超音速飞行器的热防护	(367)
12. 6 高超音速飞行器气动特性“异常”及原因分析	(368)
习题	(369)
主要参考资料	(370)
附表	(371)

绪 论

0. 1 空气动力学研究的基本任务

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，空气动力学是一门所谓关于运动空气的科学。

众所周知，空气动力学是和飞机的发生、发展联系在一起的。在这个意义上，这门科学还要涉及到飞机的飞行性能、稳定性和操纵性问题。事实上，空气动力学的研究对象还限于飞机。

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性的流动规律，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。

研究空气动力学的基本任务，不仅要认识这些流动所发生现象的基本实质，要找出这些共同性的基本规律在空气动力学中的表述，并且研究如何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，并对流动的新情况、新进展加以预测。

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创段。伯努利 (Bernoulli) 在 1738 年发表“流体力学”一书中，建立了不可压流体的压强、高度和速度之间的关系，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——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 世纪还形成了流体力学的两个重要分支：粘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 年导出粘性流体运动方程。斯托克斯 (Stokes) 于 1845 年在另一国家也独立地导出了粘性流体运动方程。雷诺 (Reynolds) 在 1876~1883 年试验粘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力学、热力学和声学发展的基础上发展的。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, 蒸气机的出现和工业叶轮机的产生, 使人们萌发建造飞机的想法。

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, 并提出以他的名字命名的翼型。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的迅速发展的时期。1918~1919 年, 普朗特 (Prandtl) 提出了大展弦比机翼的升力线理论, 1925 年阿克莱特 (Ackeret) 导出翼型的超音速线化理论, 1939 年, 戈泰特 (Göthert) 提出了亚音速三维机翼的相似法则, 1944 年冯·卡门 (Von Kármán) 和钱学森采用速度图法, 研究和导得了比普朗特-葛劳渥 (Glauert) 法则更为精确的亚音速相似律公式, 1946 年钱学森首先提出高超音速相似律。

与上面所述的无粘空气动力学发展的同时, 粘性流体动力学也得到迅猛的发展。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粘流动与粘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粘性流动; 1925 年普朗特又提出实用的附面层混合长理论; 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, 同样地亦给流体力学-空气动力学以巨大影响。从 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。

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, 开始有了提供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, 已不复存在, 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音速空气动力学理论, 得到了发展并渐臻完善。二次大战期间及以后, 由于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“音障”, 达到了超音速, 推动了当时空气动力学中的超音速这个分支即超音速空气动力学或气体动力学的发展。

介于亚音速空气动力学和超音速空气动力学之间的所谓跨音速空气动力学, 其研究流动的性质, 是属于亚音速流动和超音速流动并存于流场的混合流动, 由于跨音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，第一颗人造地球卫星在前苏联发射成功，标志航天技术的兴起。在50年代末和60年代，由于飞行速度大于音速五倍以上的飞行器的出现，推动了高超音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 空气动力学研究方法

空气动力学研究是航空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，如同物理学各个分支的研究方法一样，有实验研究、理论分析和数值计算三种方法。这些方法不是相互排斥、而是相互补充的。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。

实验研究方法在空气动力学中有广泛的应用，其手段主要依靠风洞、水洞、激波管，以及测试设备进行模型试验或飞行试验。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，进行模拟与观测，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和试验边界的影响，此外实验测量的本身也会影响所得结果的精度，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。

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）对所得解答进行分析、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。

近十多年来，随着大型高速电子计算机的出现，以及一系列有效的近似计算方法（例如有限差分法、有限元素法，和有限基本解法等）的发展，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。与实验方法相比，其研究所需费用比较少；对有些往往无法进行实验而又难于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。当然，数值方法也有其局限性，有时数值计算的结果，其可靠性较差。

实验研究、理论分析和数值计算三种方法，各有利弊，它们相互促进，使空气动力学的研究不断发展和推进到新的阶段。

0. 5 我国空气动力学研究发展概述

我国祖先在航空和空气动力学的研究方面,和其它很多方面一样,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。

解放以前,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,空气动力学的研究更谈不上。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,也是改行做了别事。

解放后,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。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,是离不开航空工业的发展的。50年代初,我国在经历空气动力仿设计时期以后,很快走上了自行设计的道路。在空气动力方面的发展中,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。

进气道的空气动力研究方面,先后对亚音速、跨音速和超音速飞机的发动机的不同形式进气布局,进行了有成效的研究,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,逐步做到配套完善,现在我国有了自行设计、堪称世界一流的为空气动力研究的风洞和实验设备。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方面,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。

由于飞机的结构弹性力、惯性力和空气动力的相互影响,形成飞机在大速压时,出现危险的颤振、发散和操纵面反效问题,研究防止出现这种情况的边缘学科,就是气动弹性力学。当前,我国气动弹性力学的研究,取得了长足的进展,能够自行解决飞行中出现的各种问题,保证飞行的安全。

1983年,我国编写了《航空空气动力手册》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。

第一章 流体介质

固体物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，而且还取决于流体的具体属性，如密度、粘性、弹性、传热性和流动性等。本章要讲的是和流动有关的流体介质的各项属性。

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，每个分子都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 比 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 m 计，至少以 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，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。流体微团中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，可以近似地看成一个点。

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。因而，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，例如在 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