

绪 论

1 课程介绍

“飞行原理”作为飞行技术专业的专业核心课程,是私用飞机飞行员(private pilot,PP)、商用飞机飞行员(commercial pilot,CP)及航线运输机飞行员(airline transport pilot,ATP)必须掌握的基础理论知识。该课程主要解决“飞机为什么能飞”“飞机怎样飞”及“飞机怎样飞得更好”这三个问题,主要涉及空气动力学、飞行力学及飞行技术学科。下面简要介绍这三个学科。

1) 空气动力学

空气动力学主要解决“飞机为什么能飞”这个问题。空气动力学就是研究物体与空气之间相对运动规律的一门学科,即研究物体在空气中运动或者物体不动而空气流过物体时,空气的运动规律及作用力(空气内部的和空气对物体的)所服从的规律。飞机是重于空气的航空器,它离地升空的条件之一是必须有一个力来克服自身的重力,这个力就是空气动力。飞机空气动力学主要研究空气与飞机之间的相对运动规律,以及产生在飞机上的空气动力。由于本教材的研究对象为飞机,因此,本教材所涉及的空气动力学为飞机空气动力学。

2) 飞行力学

飞行力学主要解决“飞机怎样飞”及“飞机怎样飞得更好”这两个问题。飞行力学是以空气动力学为基础,研究飞行器运动规律和特性的系统性、综合性学科,在飞行器设计等领域有着广泛的应用。

飞行力学包括飞行品质和飞行性能:

飞行品质是指飞行员能够安全、舒适地驾驶飞机,使其在整个飞行包线内较好地完成任务时所呈现出来的特性。飞机只有具有良好的飞行品质,飞行员才能得心应手地操纵飞机。飞行品质可以从狭义和广义两个方面来定义。狭义的飞行品质是指飞机的稳定性和操纵性,广义的飞行品质是指飞机的品质或特性,它决定了飞行员能够顺利地、精确地完成指定任务所要求的具体操纵性能。飞行品质从某种意义上来说,反映了对人机系统特性的效果。好的飞行品质指飞机的人机系统特性好,飞行员飞行时感觉很舒适,飞行强度合适。因此,飞行品质不仅包括飞机本身的特性,还包括飞行员本身的动态特性,以及影响飞行员完成飞行任务的各种因素。本教材仅讨论飞机本身的特性,即飞机的稳定性和操纵性。



飞行性能是指飞机在气动力和发动机拉力/推力等外力作用下所表现出来的运动能力。飞机性能分为设计性能(也称为适航性能)和运行性能。设计性能主要与所能携带的商载及完成的飞行任务剖面有关,是表征飞机飞行能力最直观的总体性指标,通常描述为飞机设计的吨位数及能飞多高、多快、多远、多久等能力技术特征。在飞机的设计阶段,设计性能指标的确定主要依靠风洞试验、数值计算及工程估算等方法,并以此确定飞机的气动特性,结合发动机地面试验及数学模型分析确定的装机后推力、油耗特性,最终确定飞机的性能。运行性能是指当飞机交付运营人后,在执行每一次飞行任务时所表现出来的性能。运行性能不仅与设计性能有关,还取决于执行飞行任务时的实际条件,如起降机场条件、航线情况、气象条件、实际商载等。在民用航空领域,无论是设计性能还是运行性能,均需满足民航航空规章的要求,这也是民用飞机与军用飞机的最大区别之一。和飞行性能相关的规章内容将在后面详细介绍。本教材仅讨论小型飞机的飞行性能。

3) 飞行技术

飞行技术主要解决实际飞行训练中具体飞行科目的操纵原理问题。例如,基本飞行中的直线平飞、平飞转弯、爬升和爬升转弯、下降和下降转弯(即所谓的“四个基本飞行机动”),机动飞行中的小速度飞行、大坡度盘旋、懒“8”字等和特殊飞行中的失速、螺旋、多发飞机一发失效后的飞行等科目的操纵原理。本教材仅讨论单发陆地飞机私用驾驶员执照、仪表等级及多发陆地飞机商用驾驶员执照训练中所涉及的科目。

2 与本课程相关的民航规章介绍

所有的民用航空活动是在规章体系之下进行的。目前,中国民航也有一套完整的规章体系。中国民用航空规章是由中国民用航空主管部门——中国民用航空局依据《中华人民共和国民用航空法》和《国际民用航空公约》制定和发布的关于民用航空活动各个方面的专业性、具有法律效力的行政管理法规。在中国境内从事民用航空活动的任何个人或单位必须遵守其各项规定。这些规章覆盖了民用航空的各个方面,涉及航空器管理、参与民航活动的人员执照管理、机场管理、航行管理、航空营运、空中交通管理、搜寻救援、事故调查等。下面重点介绍与飞机性能相关的规章。如前所述,飞机性能分为适航性能和运行性能。飞机的适航性能包含了按照 CCAR-23、CCAR-25 等规章取证的数据。飞机的运行性能包括飞机运行所需的限制、程序和性能数据,它必须满足 CCAR-91、CCAR-135、CCAR-121 等相应的规章要求。

1) 与飞机适航性能相关的规章

CCAR-23 部——《正常类飞机适航规定》。用于颁发和更改正常类飞机型号合格证的适航标准。按照中国民用航空规章第 21 部的规定申请正常类飞机型号合格证或申请对该合格证进行更改的法人,必须表明符合本部中适用的要求。现行有效的版本为 CCAR-23-R4,与前一版本 CCAR-23-R3 相比,改动较大。CCAR-23-R3 于 2004 年制定,名字为《正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定》,主要规定小型飞机适航审定的技术性要求,对提高我国小型飞机的安全水平、促进民用航空事业的稳步健康发展发挥了重要作用。在 CCAR-23-R3 中,明确给出了四种类别的定义。

随着航空科学技术的进步、航空工业和航空运输业的发展以及人们对航空安全性认识



的深化,小型飞机适航要求在不断发展和更新,该规章中部分内容难以适应行业发展需要。为此,中国民航局全面修订了该《规定》,以进一步强化民航安全管理,确保民航飞行安全。原《规定》按照座位数量、起飞重量、动力装置等将小型飞机划分为正常类、实用类、特技类和通勤类。新规定中将所有小型飞机统称为正常类飞机,同时按座位数量划分为4个审定等级、按飞行速度划分为2个性能等级,对各等级飞机的飞行性能、结构设计等规定了相应的审定要求,规章名称也相应调整为《正常类飞机适航规定》。

CCAR-25 部——《运输类飞机适航标准》。用于颁发和更改运输类飞机型号合格证的适航标准。根据中国民用航空规章的规定申请或更改运输类飞机型号合格证的申请人必须表明符合本规定中适用的要求。目前,全球运输类飞机主要的制造商有美国的波音公司、法国的空中客车公司及中国的中国商用飞机有限责任公司。

波音公司是全球最大的航空航天业公司,也是世界领先的民用和军用飞机制造商。波音公司建立初期以生产军用飞机为主,并涉足民用运输机。其中,以其20世纪30年代研制开发的P-26驱逐机及波音247型民用客机比较出名。1938年研制开发的波音307型是第一种带增压客舱的民用客机。20世纪60年代以后,波音公司的主要业务由军用飞机转向商用飞机。1957年在KC-135空中加油机的基础上研制成功的波音707是该公司的首架喷气式民用客机,共获得上千架订单。自此波音公司在喷气式商用飞机领域一发不可收拾,先后发展了波音717、波音727、波音737、波音747、波音757、波音767、波音777、波音787一系列型号,逐步确立了全球主要商用飞机制造商的地位。其中,波音737是在全世界被广泛使用的中短程窄体民航客机,分为737经典型(737-300/400/500)和737NG(600/700/800/900)。波音747一经问世就占据了世界最大的远程宽体民航客机头把交椅的位置,直到2008年才被空中客车公司的A380取代。

空中客车公司是欧洲一家飞机研发、制造公司,1970年12月成立于法国。空中客车公司作为一家欧洲航空公司的联合企业,其创建的初衷是为了同波音公司竞争。空中客车公司首款民用飞机是A300,这是在法国、德国、英国、荷兰和西班牙等国政府支持下研制的双发宽体客机。之后陆续研制了A300系列、A310系列、A320系列、A330系列、A340系列、A380系列和A350系列。其中,A320系列是该公司研制的双发中短程150座级客机,包括A318、A319、A320及A321四种客机。A320是一种真正的创新型飞机,为单通道飞机建立了一个新的标准。A320由于较宽的客舱给乘客提供了更大的舒适性,因而可采用更宽的座椅和更宽敞的客舱空间,它比其竞争者飞得更远、更快,因而具有更好的使用经济性。在此基础上又发展了较大型和较小型,即186座的A321、124座的A319、107座的A318。A320系列客机在设计中采用“以新制胜”的方针,采用先进的设计和生产技术,以及新的结构材料和先进的数字式机载电子设备,是世界上第一种采用电传操纵系统的亚音速民航运输机。

中国商用飞机有限责任公司(Commercial Aircraft Corporation of China Ltd, COMAC)(以下简称“中国商飞”)。于2008年5月11日在上海成立,是我国实施国家大型飞机重大专项中大型客机项目的主体,也是统筹干线飞机和支线飞机发展、实现我国民用飞机产业化的主要载体。主要的民机产品有:ARJ21(Advanced Regional Jet for the 21st Century),是70~90座级的中、短航程新支线涡扇飞机,是中国首架拥有自主知识产权的涡扇支线飞机,适应以中国西部高温高原机场起降和复杂航路越障为目标的营运要求。C919



为国产中短程干线客机,基本型布局为 168 座,标准航程为 4 075km,增大航程为 5 555km,经济寿命达 9 万飞行小时,与空客 A320、波音 737 属于同级别飞机。C 是 China 的首字母,也是中国商用飞机有限责任公司英文名称缩写 COMAC 的首字母,同时还寓意着立志跻身国际大型客机市场,与 Airbus(空中客车公司)和 Boeing(波音公司)一道在国际大型客机制造业中形成 ABC 并立的格局。第一个“9”的寓意是天长地久,“19”代表的是中国首型大型客机最大载客量为 190 座。C919 项目于 2008 年 11 月启动,2017 年 5 月 5 日成功首飞。C919 客机的发展目标是为 8~10 年后的民用航空市场提供安全、舒适、节能、环保、具有竞争力的中、短程单通道商用运输机。CRJ929 宽体客机是中俄两国企业的重大战略合作项目。2016 年 6 月 25 日,在两国元首见证下,中国商飞与俄罗斯联合航空制造集团公司(UAC)签署了项目合资合同。2017 年 5 月 22 日,双方的合资企业——中俄国际商用飞机有限责任公司(CRAIC)在上海成立。2018 年 3 月 22 日,CRJ929 项目正式启动发动机及主要机载系统联合概念定义(JCDP)工作。2018 年 5 月 30 日,合资公司完成推进系统方案征询书(RFP)的全部回收工作。CRJ929 复合材料的使用量将超过 50%,UAC 将负责建造复合材料机翼,而中国商飞将负责制造复合材料机身。中国商飞将全力打造安全、经济、舒适、环保的大型客机,让中国的大型客机早日飞上蓝天。中国商飞将以钢铁般的意志和百折不挠的精神,努力实现自主创新、体制机制创新和管理创新,建设国际一流的航空企业,最终目的是挑战波音与空中客车在全球大型客机市场的垄断地位。

2) 与飞机运行性能相关的规章

CCAR-91 部——《一般运行和飞行规则》。在中华人民共和国境内实施运行的所有民用航空器(不包括系留气球、风筝、无人火箭、无人自由气球和民用无人驾驶航空器)应当遵守本规则中相应的飞行和运行规定。对于公共航空运输运行,除应当遵守本规则适用的飞行和运行规定外,还应当遵守公共航空运输运行规章中的规定。

CCAR-135 部——《小型商业运输和空中游览运营人运行合格审定规则》。在中华人民共和国境内依法设立的航空运营人所实施的以取酬为目的的下列商业飞行活动应当遵守本规则中相应的飞行和运行规定。(1)使用下列小型航空器实施的定期、不定期载客或者载货飞行,以及长途空中游览飞行:①正常类、实用类、特技类和通勤类飞机;②正常类直升机。(2)使用下列运输类飞机实施的载货或者不定期载客飞行:①旅客座位数(不包括机组座位)30 座及以下;②最大商载在 3 400kg 及以下。(3)使用运输类直升机实施的定期、不定期载客或者载货飞行。(4)下列短途空中游览飞行:①除自由气球外,航空器的起飞和着陆满足下列条件之一的空中游览飞行:a.在同一起降点完成,并且航空器在飞行时距起降点的直线距离不超过 40km;b.在两个直线距离不超过 40km 的起降点间实施。②使用自由气球在运营人的运行规范中经批准的飞行区域内实施,并且每次飞行的起飞和着陆地点应当包含在该区域之内的空中游览飞行。

CCAR-121 部——《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》。在中华人民共和国境内依法设立的航空运营人实施的公共航空运输运行,应当遵守本规则中相应的飞行和运行规定。主要的公共航空运输运行包括:(1)使用最大起飞全重超过 5 700kg 的多发飞机实施的定期载客运输飞行;(2)使用旅客座位数超过 30 座或者最大商载超过 3 400kg 的多发飞机实施的不定期载客运输飞行;(3)使用最大商载超过 3 400kg 的多发飞机实施的全货物运输飞行。



CHAPTER

第 I 篇



空气动力学

1 空气动力学的研究任务

空气动力学是研究物体与空气之间相对运动规律的一门学科,即研究物体在空气中运动或者物体不动而空气流过物体时,空气的运动规律及作用力(空气内部的和空气对物体的)所服从的规律。它广泛应用于各种工程技术领域,如汽车、高速列车、风机、汽轮机、船舶制造,建筑物、桥梁建造,矿井通风、天气预报等,而对于航空(飞机、直升机等)和航天(火箭、导弹、航天飞机、宇宙飞船、卫星等)领域则有特别重要的意义。

众所周知,飞机是重于空气的航空器,它之所以能够在大气中持续飞行,全靠空气的反作用力来克服其自身的重力;与此同时,空气还会产生一个阻碍飞机前进的力。飞机空气动力学主要研究空气与飞机之间的相对运动规律,以及产生在飞机上的空气动力。空气动力是当飞机在空气中运动时,空气分子撞击在飞机表面形成的,即压力分布。将总空气动力进行分解,用于克服飞机重量的力称为升力,分解出来的另一个与运动方向相反的力称为阻力,如图 1 所示。

因此,飞机空气动力学的研究任务是掌握空气和飞机之间的相对运动规律,以及作用在飞机表面的空气动力的产生机理,即升力和阻力的形成原因。

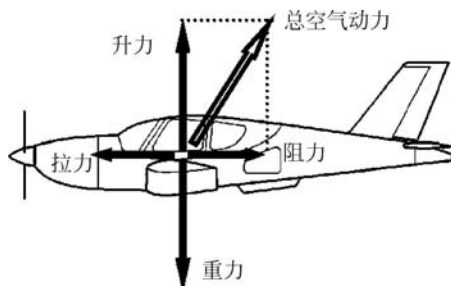


图1 飞机运动时,作用在飞机上的力

2 空气动力学的发展概况

空气动力学是现代流体力学的一个分支,是从流体力学发展而来的。流体力学可分为流体静力学和流体动力学,其中前者研究的是流体静止时,其中的作用力规律;后者研究的是流体运动时,其运动的规律和作用力的规律。空气动力学则是将流体动力学应用于研究飞行器运动的进一步发展。流体力学包含的内容和研究领域大致如图2所示。

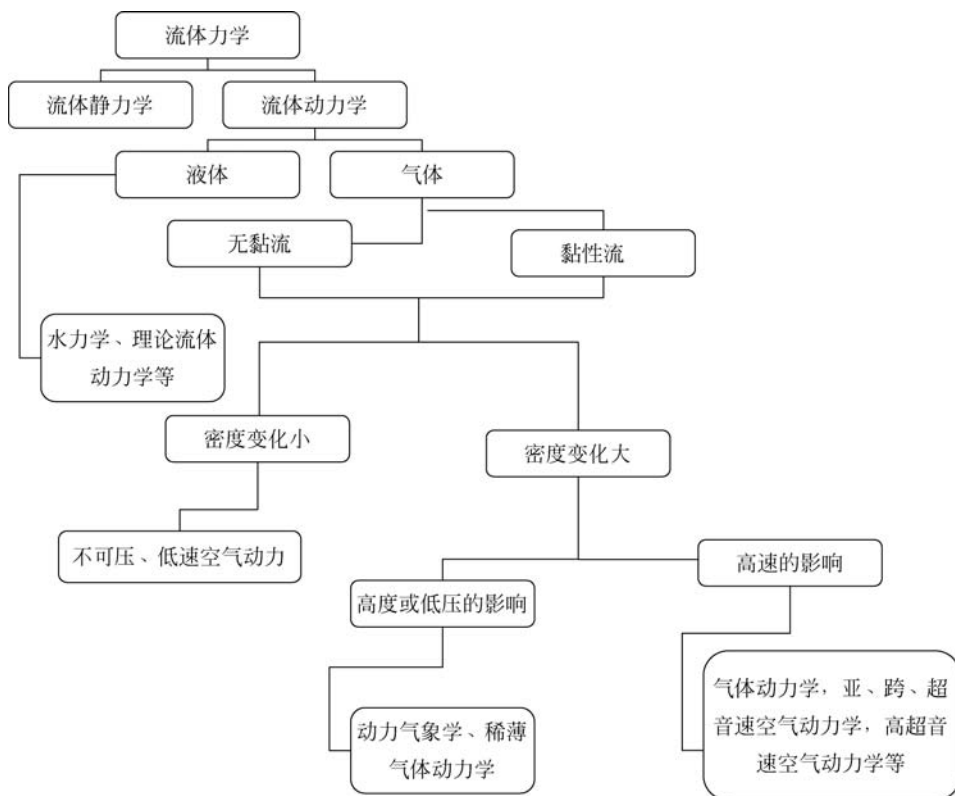


图2 流体力学的研究领域

1) 国外空气动力学发展概况

最早对空气动力学的研究可以追溯到人类对鸟或弹丸在飞行时的受力和力的作用方式



的种种猜测。17 世纪后期,荷兰物理学家惠更斯首先估算出物体在空气中运动的阻力;1726 年,英国科学家牛顿(Isaac Newton,1642—1727)应用力学原理和演绎方法得出:在空气中运动的物体所受的力,正比于物体运动速度的二次方、物体的特征面积及空气的密度。这一工作可以看作空气动力学经典理论的开始。

瑞士科学家伯努利(Daniel Bernoulli,1700—1782)于 1738 年建立了无黏流的流速和压力之间的关系,即伯努利方程。1755 年,瑞士数学家欧拉(Leonard Euler,1707—1783)得出了描述无黏性流体运动的微分方程,即欧拉方程。这些微分形式的动力学方程在特定条件下可以积分,得出很有实用价值的结果。到了 19 世纪,流体力学的基础理论得到了全面的发展。苏格兰的物理学家兰金(William John Macquorn Rankine,1820—1872)于 1858 年提出了涡核模型,1868 年又提出将匀直流动叠加到源(汇)、偶极子等流动上,构成了理论分析的奇点法。德国物理学家亥姆霍兹(Herman Ludwig Ferdinand Von Helmholtz,1821—1894)于 1858 年创立了旋涡运动理论。

上述理论建立在理想流体即无黏流假设的基础上。法国与爱尔兰科学家纳维(L. M. H Navier,1785—1836)和斯托克斯(S. G. G Stokes,1819—1903)分别于 1827 年和 1845 年独立推导出黏性流体运动的不可压缩流体动量守恒的运动方程,后称为纳维-斯托克斯方程(N-S 方程),至今仍是研究黏性流动的基础。英国物理学家雷诺(Osborne Reynolds,1819—1903)于 1883 年从黏性流体在小直径圆管中的流动实验中发现,实际黏性流动有两种流态,即层流和紊流,其相应的阻力规律也不相同,决定流态的是个无量纲参数,即来流速度乘以物体特征长度与运动黏度之比,此参数后来定名为雷诺数(Re)。

到 19 世纪末,经典流体力学的基础已经形成。20 世纪以来,随着航空事业的迅速发展,空气动力学便从流体力学中独立出来并形成力学的一个新分支。20 世纪是空气动力学蓬勃独立的时期,并逐渐形成了完整科学体系。

航空要解决的首要问题是如何获得飞行器所需要的升力,减小飞行器的阻力和提高它的飞行速度。这就要从理论和实践上研究飞行器与空气相对运动时作用力的产生及其规律。1894 年,英国人兰彻斯特首先提出无限翼展机翼或翼型产生升力的环量理论,以及有限翼展机翼产生升力的涡旋理论等。但兰彻斯特的理论在当时并未得到广泛重视。

1901—1910 年,库塔和茹科夫斯基分别独立地提出了翼型的环量和升力理论,并给出升力理论的数学形式,建立了二维机翼理论。1904 年,德国的普朗特发表了著名的低速流动的边界层理论,该理论指出,在不同的流动区域中控制方程可有不同的简化形式。

边界层理论极大地推进了空气动力学的发展。普朗特还把有限翼展的三维机翼理论系统化,给出它的数学结果,从而创立了有限翼展机翼的升力线理论。但它不能适用于失速、后掠和小展弦比的情况。1946 年,美国人琼斯提出了小展弦比机翼理论,利用这一理论和边界层理论,可以足够精确地计算出机翼上的压力分布和表面摩擦阻力。

近代航空和喷气技术的迅速发展使飞行速度迅猛提高。在高速运动的情况下,必须把流体力学和热力学这两门学科结合起来才能正确认识和解决高速空气动力学中的问题。1887—1896 年,奥地利科学家马赫在研究弹丸运动扰动的传播时指出:在小于或大于音速的不同流动中,弹丸引起的扰动传播特征是根本不同的。

在高速流动中,流动速度与当地音速之比是一个重要的无量纲参数。1929 年,德国空气动力学家阿克莱特首先把这个无量纲参数与马赫的名字联系起来,10 年后,马赫数这个



特征参数在气体动力学中得到广泛引用。

小扰动在超音速流中传播会叠加起来,形成有限量的突跃——激波。在许多实际超音速流动中也存在着激波。气流通过激波流场时,参量发生突跃,熵增加而总能量保持不变。

英国科学家兰金在 1870 年、法国科学家许贡纽在 1887 年分别独立地建立了气流通过激波应满足的关系式,为超音速流场的数学处理提供了正确的边界条件。对于薄翼小扰动问题,阿克莱特在 1925 年提出了二维线化机翼理论,以后又相应地出现了三维机翼的线化理论。这些超音速流的线化理论圆满地解决了流动中小扰动的影响问题。

在飞行速度或流动速度接近音速时,飞行器的气动性能发生急剧变化,阻力突增,升力骤降。飞行器的操纵性和稳定性极度恶化,这就是航空史上著名的音障。大推力发动机的出现冲破了音障,但并没有很好地解决复杂的跨音速流动问题。直至 20 世纪 60 年代以后,由于跨音速巡航飞行、机动飞行,以及发展高效率喷气发动机的要求,跨音速流动的研究受到重视,并有了很大的发展。

远程导弹和人造卫星的研制推动了高超音速空气动力学的发展。在 20 世纪 50 年代到 60 年代初,确立了高超音速无黏流理论和气动力的工程计算方法。60 年代初,高超音速流动数值计算也得到了迅速的发展。通过研究这些现象和规律,发展了高温气体动力学、高速边界层理论和非平衡流动理论等。

2) 我国空气动力学发展概况

新中国成立前,我国没有独立完成的航空工业,飞机都是从国外购买的,当时国内只有飞机修理厂,1934 年后我国才有几所高校设立了航空工程系。新中国成立后,我国的航空和航天工业获得很大发展,有力地促进了我国空气动力学的发展。20 世纪 50 年代初,我国在经历了空气动力仿型设计以后,很快走上了自主设计的道路。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的不同类型的飞机能够安全投入使用。随着自行研制的逐步发展,我国在空气动力学方面的研究也不断深入。飞机与发动机进气道的空气动力研究也经历了由亚音速、跨音速到超音速飞机发动机不同形式进气布局的发展阶段,并取得了可喜的进展。

在外流方面,由钱学森和郭永怀带领的科学家团队成功地发展了我国的火箭、导弹与航天飞行器技术及相关的空气动力学理论。在内流方面,吴仲华的三元流面理论推动了世界航空动力及叶轮机械气动热力学的发展,为新型动力机械,尤其是新型大功率、高推重比的航空动力设计奠定了坚实的理论基础,为我国争得了荣誉。

总的来说,空气动力学的发展经历了低速、高速和新变革三个时期。

(1) 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,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马赫数趋于无穷大时的情况)。1876 年,瑞利根据平板后面形成空穴的假设而提出的理论同样不符合实际。直到 20 世纪初,在航空事业发展的推动下,英国的兰彻斯特、德国的库塔和俄国的茹科夫斯基等人,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,德国人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,解决了当时无黏空气动力学的实验结果之间的矛盾。在实验方面,1871年,英国人韦纳姆建造了第一座开路式风洞,美国莱特兄弟于1900年建造了一座截面为 $406\text{mm} \times 406\text{mm}$ 、长 1.8m 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,艾菲尔在法国、普朗特在德国分别建造了开口和闭口的回路风洞。1928年,英国国家物理实验室建造了直径为 78mm 的超音速风洞。

(2) 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。在这一阶段建立了亚音速、跨音速、超音速和高超音速无黏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到了决定性的作用。在这一过程中,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(见卡门-钱学森公式)。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。在这一时期,各类风洞得到了发展,但跨音速风洞由于气流壅塞效应(见高速一维管流)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 304mm 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。

(3) 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现状,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。

3 空气动力学的分类

空气动力学按照研究的对象可以分为飞行器空气动力学和工业空气动力学,详见图3。

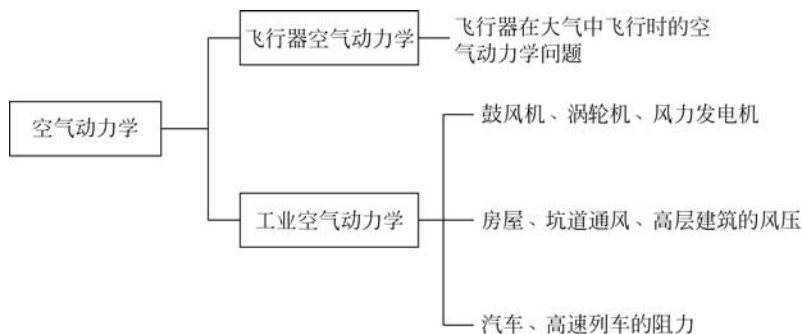


图3 空气动力学的分类(按照研究对象分类)



如果按照空气介质的运动速度来划分,可以分为低速和高速空气动力学。低速和高速空气动力学是以马赫数(Ma)0.4 为界进行划分的, $Ma < 0.4$ 的称为低速流动, $Ma > 0.4$ 的称为高速流动,详见图 4。

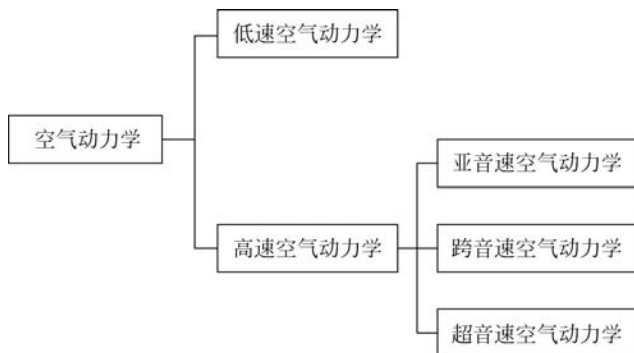


图 4 空气动力学的分类(按照空气介质的运动速度分类)

4 空气动力学的研究方法

空气动力学研究是航空和航天技术研究的重要组成部分,是飞行器气动布局与气体设计的理论依据。其研究方法和物理学各个分支的研究方法一样,包括实验研究、理论分析和数值计算三种,如图 5 所示。与此相对应,就产生了实验空气动力学、理论空气动力学和计算空气动力学三个分支学科,如图 6 所示。这三种方法并不是互相排斥的,而是相互补充的。另外,通过恰当的空气动力学分析还可以寻求最佳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,以得到其最终的性能,并保证飞行器的稳定、操纵性与飞行安全。



图 5 空气动力学的研究方法



图 6 空气动力学的三个分支学科

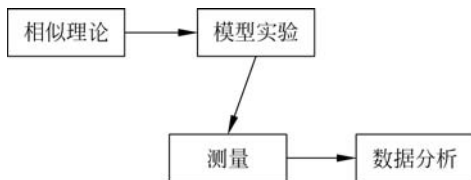


图 7 实验研究方法的步骤

空气动力学的实验研究主要是依靠风洞、水洞、激波管及测试设备进行模型试验或飞行试验。实验研究方法的优点在于,依据相似理论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,具体步骤如图 7 所示。实验研究方法