

高等教育“十三五”规划教材·无人机应用技术

无人机空气动力学与飞行原理

符长青◎编著



西北工业大学出版社

教育“十三五”规划教材·无人机应用技术

WURENJI KONGQI DONGLIXUE YU FEIXING YUANLI

无人机空气动力学与飞行原理

符长青 编著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书是一本系统介绍无人机空气动力学与飞行原理的专业课程教材。全书共分三篇 8 章, 第一篇基础篇, 包括 2 章: 第 1 章无人机空气动力学基本知识, 第 2 章无人机飞行原理与翼型特性; 第二篇固定翼无人机篇, 包括 3 章: 第 3 章固定翼无人机空气动力学, 第 4 章固定翼无人机飞行平衡、稳定性和操纵性, 第 5 章固定翼无人机的飞行性能分析; 第三篇旋翼无人机篇, 包括 3 章, 第 6 章旋翼无人机空气动力学, 第 7 章旋翼无人机飞行平衡、稳定性和操纵性, 第 8 章旋翼无人机飞行性能分析。本书内容丰富、深入浅出、概念清楚易懂, 具有很强的可操作性。

本书可作为高等院校无人机相关专业学生的专业课程教材, 也可作为从事无人机科研、生产制造、使用运维和培训机构工作人员, 以及广大无人机爱好者的学习和培训教材, 对于希望全面了解无人机空气动力学与飞行原理知识的各类读者, 本书亦是一相良好的拓展读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

无人机空气动力学与飞行原理/符长青编著. —西安:
西北工业大学出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-5612-6075-3

I. ①无… II. ①符… III. ①无人驾驶—空气动力学
②无人机驾驶飞机—飞行原理 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 148254 号

策划编辑: 杨 军

责任编辑: 马文静

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号

邮编: 710072

电 话: (029)88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印刷者: 陕西向阳印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm

1/16

印 张: 13

字 数: 310 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

前 言

无人机(无人驾驶飞机,英文为 Unmanned Aerial Vehicle)是一种机上没有搭载驾驶员,由无线电遥控的自动化、智能化驾驶的飞行器。一般来说无人机分为固定翼无人机和旋翼无人机两大类,无人机是高科技、新技术的集中载体,具有体积小、造价低、效费比高、生存能力强、机动性能好、操作简单、使用方便、用途广泛等优点,可广泛应用于民用和军事的诸多领域。

无人机与有人驾驶飞行器(以下简称有人机)相比有许多不同,包括使用和功能上的差别,而造成这些差别的根本因素就是“人”。无“飞行员座舱”是无人机的主要特点,正是这一特点,成就了无人机使用上的特殊优越性。对于任何一种无人机来说,基本上都具备以下四个方面的突出优势:

(1)效用成本比较低,机动性好,使用方便。无人机可以毫无顾忌地执行各种高风险任务,例如战场侦察,尤其是对敌纵深目标的侦察。对于有人机而言,战场侦察历来都是一项十分危险的任务。这种危险不仅来自于飞行员的生命受到威胁,而且一旦有人驾驶侦察机的飞行员被对方俘虏或扣留,必然会引起政治和外交上的很大麻烦。因此,无人机可以避免人员伤亡代价,使用成本比较低。

战场上的危险任务还包括对敌防空压制、攻击和电子战等。另外,无人机在民用领域也发展迅速,已有许多领域在使用,例如电力巡检、应急救援、反恐监视等,这些都可以由无人机去完成。

(2)生存能力强。无人机可以长时间持续飞行,在很大程度上提高了作战能力和作战效能。由于无须考虑飞行员的生理承受力等因素,无人机的尺寸、过载、飞行高度等完全可依据任务需要来设计,因而可以在隐蔽性、灵活性、机动性方面表现得非常出色。例如,无人机可以飞到有人机无法进入的高空而获得宝贵的高度优势,可以不知疲倦地长时间进行侦察监视而使目标无处遁形,可以战时急速飞越别国领空而不被对方锁定,可以出其不意地锁定并实时打击时敏目标,还可以像昆虫一样进入窄小区域侦察而不为人所知等。这些有人飞机无法企及的性能优势极大地拓展了无人机的应用空间。

(3)生产成本低。无人机的研制、生产和使用成本明显低于有人机。由于“无人”的原因,无人机在设计时完全不必考虑飞行员(人)的需求,进而可简化机载设备和平台的设计要求,使得无人机的研制、生产成本远远低于有人机。另外,无人机的使用、训练和维护费用也比有人机低得多。

(4)发展空间大。随着载人型多旋翼无人机的快速发展,载人的多旋翼无人机作为人们出行用新型的航空交通运输工具,具有可在自家后院或家门口起飞降落,飞行速度快,在途时间短,以及操作简单、安全可靠、舒适便捷等许多优点。载人型多旋翼无人机作为“飞行汽车”,为人们创造了一种全新的交通方式,成为几乎人人都可以安全驾驶的飞行器。不久的将来,就会

像如今地面上的小汽车一样,在人们的生活中普及开来,从而有助于解决许多大城市长期存在的地面交通拥堵等难题,成为居民不可或缺的交通运输工具。

在当前激烈的全球市场竞争中,无人机应用领域的拓展飞快,世界无人机市场近年来获得了迅猛发展。有统计数据预测,未来 10 年,国内外无人机市场规模有望超预期实现年均 30% 以上的加速增长。

为了深化我国创新创业教育改革,优化专业结构,提高教育质量,促进学生在创新创业中全面发展,适应和服务经济社会发展和国家战略需求,把创新创业教育融入人才培养体系,改革教育教学内容方法,改进课程,强化实践。本书着眼于切实增强深入推进高等院校创新创业教育改革的责任感和紧迫感,全面提高人才培养质量,为促进大众创业万众创新和建设创新型国家提供有力人才支撑。为了便于教学需要,本书配有教学课件。

本书层次分明,体系完整,适合作为高等院校相关专业学生的专业课程教材,也适合作为从事无人机科研、生产制造、使用运维和培训机构工作人员,以及广大无人机爱好者的学习和培训教材,对于希望全面了解无人机空气动力学与飞行原理知识的各类读者,本书也是一本较好的参考读物。

由于水平与精力所限,书中难免有偏颇与不足之处,敬请各位同行、专家和读者指正。

编者

2018 年 1 月

目 录

第一篇 基础篇

第 1 章 无人机空气动力学基本知识	3
1.1 无人机空气动力学的基本概念	3
1.2 大气飞行环境的基本知识	5
1.3 大气的基本物理性质	7
1.4 空气流场的基本概念	12
习题	16
第 2 章 无人机飞行原理与翼型特性	17
2.1 固定翼无人机飞行的基本原理	17
2.2 旋翼无人机飞行的基本原理	19
2.3 翼型的几何参数和主要类型	24
2.4 翼型空气动力特性和影响因素	28
2.5 翼型的发展历程和固定翼无人机的翼型选择	36
2.6 固定翼无人机的翼型设计	43
习题	46

第二篇 固定翼无人机篇

第 3 章 固定翼无人机空气动力学	49
3.1 固定翼无人机气动结构的组成和布局	49
3.2 固定翼无人机机翼及其气动特性	52
3.3 改善固定翼无人机机翼气动性能的方法	55
3.4 固定翼无人机的飞行阻力	61
3.5 固定翼无人机的低速空气动力性能	66
习题	71

第 4 章 固定翼无人机飞行平衡、稳定性和操纵性	72
4.1 固定翼无人机的重心、坐标轴和力矩	72
4.2 固定翼无人机的平衡.....	74
4.3 固定翼无人机的稳定性.....	76
4.4 固定翼无人机的操纵性.....	88
习题	92
第 5 章 固定翼无人机的飞行性能分析	93
5.1 固定翼无人机飞行性能分析的基本知识.....	93
5.2 固定翼无人机的基本飞行性能.....	95
5.3 固定翼无人机的起飞	105
5.4 固定翼无人机的着陆和回收	109
习题.....	112

第三篇 旋翼无人机篇

第 6 章 旋翼无人机空气动力学	115
6.1 旋翼无人机气动结构的组成和旋翼结构	115
6.2 旋翼工作原理与参数的无因次化	120
6.3 旋翼动量理论	124
6.4 旋翼叶素理论	128
6.5 旋翼经典涡流理论	132
6.6 共轴双旋翼和多旋翼空气动力分析	137
习题.....	149
第 7 章 旋翼无人机飞行平衡、稳定性和操纵性	151
7.1 旋翼无人机的机体轴系和所受到的外力	151
7.2 旋翼无人机的平衡	155
7.3 旋翼无人机的稳定性	160
7.4 旋翼无人机的操纵性	167
习题.....	173
第 8 章 旋翼无人机飞行性能分析	174
8.1 功率飞行器的基本概念	174

8.2 旋翼无人机垂直和爬升飞行性能分析	176
8.3 旋翼无人机前飞性能分析	179
8.4 旋翼无人机特殊性能分析	191
8.5 电动旋翼无人机飞行性能分析	194
习题	198
参考文献	199

第一篇 基 础

第1章 无人机空气动力学基本知识

1.1 无人机空气动力学的基本概念

无人机空气动力学是指飞行器在空气中运动时所受到的空气动力作用及其运动规律的学科。它是飞行器设计的重要组成部分，也是飞行器性能分析和优化的重要依据。本章将介绍无人机空气动力学的基本概念、分类、研究方法以及其在飞行器设计中的应用。

1.1.1 空气动力学的定义及其分类

空气动力学是指研究

物体在流体中运动时所受到的流体动力作用及其运动规律的学科。空气动力学是流体力学的一个分支，主要研究物体在流体中运动时所受到的流体动力作用及其运动规律。空气动力学可以分为空气动力学和液体动力学两大类。空气动力学主要研究物体在气体中的运动，而液体动力学主要研究物体在液体中的运动。

第一篇 基础篇

空气动力学是飞行器设计的重要组成部分，也是飞行器性能分析和优化的重要依据。本章将介绍无人机空气动力学的基本概念、分类、研究方法以及其在飞行器设计中的应用。

1.1.2 空气动力学的研究方法

空气动力学的研究方法可以分为理论分析、实验研究和数值模拟三大类。理论分析主要基于流体力学的基本原理，通过数学推导和求解方程来研究流体的运动规律。实验研究主要通过风洞实验、飞行试验等方法来研究流体的运动规律。数值模拟则是利用计算机技术，通过数值求解流体力学方程来研究流体的运动规律。随着计算机技术的不断发展，数值模拟在空气动力学中的应用越来越广泛。

1.1.3 空气动力学在飞行器设计中的应用

空气动力学在飞行器设计中的应用非常广泛，主要体现在以下几个方面：首先，在飞行器的气动外形设计中，空气动力学起着至关重要的作用。通过空气动力学分析，可以优化飞行器的外形，减小阻力，提高升力，从而提高飞行器的性能和燃油效率。其次，在飞行器的稳定性和操纵性设计中，空气动力学起着至关重要的作用。通过空气动力学分析，可以研究飞行器的稳定性和操纵性，确保飞行器在各种飞行状态下都能保持良好的稳定性和操纵性。最后，在飞行器的性能分析和优化中，空气动力学起着至关重要的作用。通过空气动力学分析，可以研究飞行器的性能，找出性能瓶颈，进行优化设计，从而提高飞行器的性能。

1.1.4 空气动力学的未来发展

随着科学技术的不断进步，空气动力学在飞行器设计中的应用将更加广泛。未来，空气动力学将更加注重多学科交叉融合，与材料科学、计算机科学、控制科学等领域进行深度融合，推动飞行器设计技术的创新发展。同时，随着计算能力的不断提升，数值模拟在空气动力学中的应用将更加深入，为飞行器设计提供更加准确、高效的分析工具。

总之，空气动力学是飞行器设计的重要组成部分，也是飞行器性能分析和优化的重要依据。通过深入研究空气动力学的基本概念、分类、研究方法以及其在飞行器设计中的应用，可以为飞行器的设计提供更加科学、合理的依据，推动飞行器技术的不断发展。

第1章 无人机空气动力学基本知识

1.1 无人机空气动力学的基本概念

无人机空气动力学属于飞行器空气动力学范畴。在各类飞行器、各类流体运动形态,以及各种流体介质中,空气动力学或流体力学的普遍方程(连续方程、动量方程和能量方程)与基本解法是相通的。

1.1.1 空气动力学的定义和研究方法

1. 空气动力学的定义

空气动力学来源于流体力学,流体力学是物理学的一个重要分支,它主要研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。流体动力学研究的是流体运动时,其运动规律和作用力的规律。

空气动力学主要研究物体和空气之间有相对运动时,即物体在空气中运动时,空气的运动规律及作用力所服从的规律,具体包括气体做相对运动情况下的受力特性、气体流动规律和伴随发生的物理化学变化。传统意义上的空气动力学,是指飞行器的空气动力学。

2. 空气动力学研究方法

空气动力学是航空技术研究的重要组成部分,是飞行器气动布局设计的理论依据。其研究方法,如同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方法。这些方法并不相互排斥,而是相互补充的。另外,通过恰当的空气动力学知识还可以寻求最好的飞行器气动布局形式、确定整个飞行范围内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性、稳定性与飞行安全。

(1) 实验研究方法

其研究手段主要依靠风洞、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,依据相似理论,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,实验研究的方法多会受到一定的限制,例如,受模型尺寸的限制和实验条件的影响,此外,实验测量的手段也会影响所得结果的精度,并且实验通常会耗费大量的人力和物力。

(2) 理论分析方法

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,从而抽象出近似合理的理论模型。
- 2) 运用基本定律、原理和数学分析,建立描述问题的数学方程,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) 对所得结果进行分析、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,由于受到数学发展水平的限制以及理论模型抽象的简化,难以得到工程上认为满意的有价值结果。

(3) 数值计算方法

自 20 世纪 70 年代以来,随着大型高速电子计算机的不断更新与发展,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,使得数值计算方法在空气动力学研究中的作用和地位不断提高。与实验方法相比,其研究所需费用较少,对某些无法进行实验而又难于做出理论分析的问题,采用数值方法进行研究,可以得到解决。当然,数值方法也有其不足,需要不断发展与完善。

综上所述,实验研究、理论分析和数值计算这三种方法,各有利弊,只有扬长避短,相互促进,相互补充,协同共进,才能更好地推动空气动力学的研究与发展。

1.1.2 无人机空气动力学的定义、内容和工具

1. 无人机空气动力学的定义

无人机空气动力学是研究无人机与周围空气有相对运动时所产生的空气动力的一门科学,它是将空气动力学的普遍原理应用到固定翼无人机这一特定研究对象上。无人机包括固定翼无人机和旋翼无人机两大类型,因此固定翼无人机空气动力学的研究对象也就有针对性地区分为两部分:固定翼无人机空气动力学和旋翼无人机空气动力学。

2. 无人机空气动力学研究的内容

无人机空气动力学研究的内容主要有:

(1) 基本理论方面

阐明无人机飞行过程中与周围空气相互作用的空气动力现象、流动现象、流场分布等,分析空气流动时无无人机的受力情况,以便对无人机的几何外形进行改地,来改善无人机的气动特性,提高无人机的飞行性能,增进飞行品质。

(2) 性能计算方面

在理论和实验的基础上,分析主要构造参数对无人机飞行性能的影响,建立无人机的空气动力计算方法,为无人机设计所用。

(3) 飞行力学方面

它主要包括性能计算,例如速度、高度、航程和燃油消耗量的定量计算;飞行动力学正解技术以及飞行动力学逆解技术(即由给定的飞行轨迹求解所需的操纵规律等)。

(4) 飞行品质方面

研究整架无人机的平衡问题及其对控制系统与功率变化的反应;分析无人机在各种飞行状态下的稳定性及操纵性,包括对大气紊流的反应及如何控制的问题等。

1.2 大气飞行环境的基本知识

大气飞行环境主要指飞行器在大气层内飞行时所处环境条件。大气环境对无人机的空气动力性能、发动机的工作状态、操纵人员都有非常重要的影响。只有了解和掌握了大气的特性和变化规律,并设法克服或减少飞行环境对无人机的影响,才能保证无人机安全可靠地飞行。

1.2.1 大气飞行环境的定义和组成

1. 大气飞行环境的定义

大气层又叫大气圈,是指环绕在地球周围的空气层,地球就被这一层很厚的大气层包围着。飞行器在大气层内飞行时所处环境条件,称为大气飞行环境。包围地球的空气层,即大气是航空器的唯一飞行活动环境,也是导弹和航天器的重要飞行环境。

在地球引力作用下,大量气体聚集在地球周围,形成数千千米的大气层。气体密度随离地面高度的增加而变得愈来愈稀薄。探空火箭在 3 000 km 高空仍发现有稀薄大气,有人认为,大气层的上界可能延伸到离地面 6 400 km 左右。

2. 大气的组成

包围在地球周围的一层气体,称为大气。大气是混合气体,其组成成分是地球长期演化的结果,据科学家估算,大气质量约 6 000 亿吨,约占地球总质量的百万分之一。大气由干空气、水分及悬浮其中的粉尘颗粒物组成。

1) 干空气的组成包括 78% 的氮气、21% 的氧气,以及少量的其他气体,例如氩气、二氧化碳、氟气和臭氧等。

2) 水蒸气是低层大气的重要成分,含量不多,只占大气总容积的 0.4%,是大气中含量变化最大的气体。大气中的水蒸气主要来自地表海洋、江、河、湖等水体表面蒸发和植物体的蒸腾,并通过大气垂直运动输送到大气高层。水分子是云、雨水、雾等形成的必要条件,参与全球的水循环。

3) 粉尘颗粒物主要是悬浮在大气中的固态、液态的微粒,主要来源于有机物燃烧的烟粒、风吹扬起的尘土、火山灰尘、宇宙尘埃、海水浪花飞溅起的盐粒、植物花粉、细菌微生物以及工业排放物等,大多集中在大气底层。大气杂质对太阳辐射和地面辐射具有一定的吸收和散射作用,影响着大气温度的变化。杂质大部分是吸湿性的,往往成为水汽凝结核心。

1.2.2 大气的分层

大气层的空气密度随高度的增加而减小,越高空气越稀薄,但没有明显的界线。整个大气层随高度不同表现出不同的特点,分为对流层、平流层、中间层、电离层(暖层)和散逸层,再上面就是星际空间了,如图 1-1 所示。航空器飞行的大气环境是对流层和平流层。

1. 对流层

对流层是最接近地球表面的一层大气层,该层空气的移动是以上升气流和下降气流为主的对流运动,故称做“对流层”。对流层最显著的特点是有强烈的对流运动,是天气变化最复杂的层次。地球上的水受太阳照射而蒸发,水蒸气几乎都存在于对流层,刮风、下雨、降雪等天气

现象也都发生在对流层内。恶劣的天气条件会危及飞行安全,因此对流层是对飞行影响最严重的层次。

对流层是大气中最稠密的一层,由于地球引力作用,对流层集中了全部大气质量的 3/4。但它的厚度在地球各处不一,其下界与地面相接,上界高度随地理纬度和季节的变化而变化。在低纬度地区(如赤道上空)平均高度为 17~18 km,在中纬度地区平均高度为 10~12 km,南北极地区平均高度为 8~9 km,并且夏季高于冬季。

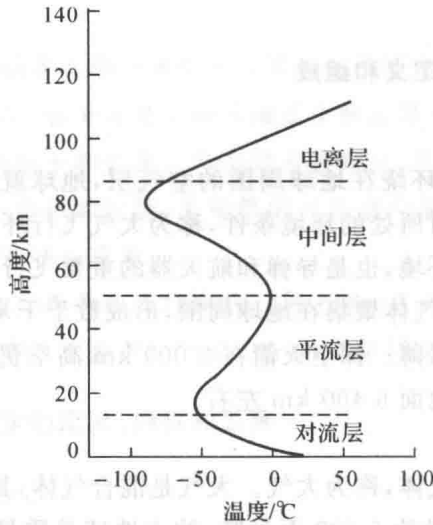


图 1-1 大气层分布示意图

2. 平流层

平流层位于对流层之上,其上界伸展到 50~55 km。在平流层内,气流主要表现为水平方向运动,对流现象减弱,因此这一大气层叫作“平流层”,又称“同温层”。由于平流层内基本上没有水蒸气,晴朗无云,很少发生天气变化,而且在平流层中,空气没有垂直方向运动,只有水平方向的风,气流平稳,空气阻力小,是航空器比较理想的飞行空间,目前大型客机大多飞行于此层。

平流层空气稀薄,所包含的大气质量占整个大气质量的 1/4 左右。在平流层 20~30 km 高处,氧分子在紫外线作用下,形成臭氧层,像一道屏障保护着地球上的生物免受太阳高能粒子的袭击。大气层随着高度的增加,气温最初基本保持不变(约 -56.5°C),这是因为受地面温度影响较小,到约 20 km 以上,气温升高较快,到了平流层顶气温升至 $0\sim 20^{\circ}\text{C}$,其原因是该层存在大量臭氧能直接吸收太阳辐射的热。

3. 中间层

中间层位于平流层之上,距地球表面 50~85 km。这一层空气更为稀薄,质量仅占整个大气质量的 1/3 000。该层的突出特征是气温随高度的增加而迅速降低,在这一层的顶部气温可低至 160~190 K,几乎是整个大气层中的最低温度。这种温度垂直分布有利于气流垂直运动发展,因而空气的垂直对流强烈。

4. 电离层

中间层之上是电离层,该层顶端距离地面大约 800 km。这层的大气已极稀薄,其温度因为大气大量吸收太阳紫外辐射线而升高,层内温度很高,所以也称“暖层”。该层的另一个重

要特征是空气处于部分电离或完全电离的状态,存在相当多的自由电子和离子,能反射无线电短波,从而使地面上可以实现短波无线电通信。许多有趣的天文现象,如极光、流星等都发生在电离层中。电离层的变化会影响飞行器的无线电通信。

5. 散逸层

散逸层在电离层之上,即距离地平面 800 km 以上的大气层,是地球大气的最外层,由带电粒子所组成。该层空气极其稀薄,同时又远离地面,受地球的引力作用较小,因而大气分子不断地向星际空间逃逸。大气外层的上界为 2 000~3 000 km,航天器脱离这一层后便进入了太空。

1.3 大气的基本物理性质

物体在大气中做相对运动时,物体会受到空气对它的作用力和力矩。这些力和力矩的分布情况及其合力,不仅取决于物体的形状(包括运动时的姿态)和速度,还取决于气体的属性,如密度、黏性、弹性、传热性和流动性等。

1.3.1 连续介质假设和空气特性

1. 连续介质假设

气体与固体不同,气体没有确定的几何形状。把气体盛入某容器内,它的形状就取决于该容器的几何形状。气体总是能够充满容纳它的整个容器。

在空气动力学中,认为物体在大气中运动时,空气受到物体的扰动,必然是大量气体分子一起运动的。因此,一般不需要详细地研究气体分子的个别运动,而是研究气体的宏观运动。可以把气体看成连绵一片的、没有间隙的、充满了它所占据的空间的连续介质,即连续介质假设。

连续介质假设在空气动力学中很重要。根据连续介质假设,可以把气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。因此,在解决空气动力学实际问题时,就可以应用数学分析这一有力工具来处理。

2. 空气密度

空气密度是指单位体积内的空气质量。在连续介质假设的前提下,对气体微团乃至气体内部某一几何点处的密度给出如下定义:质量为 m 的空气,如果其体积为 V ,则密度 ρ 为空气密度, ρ 的国际单位为千克每立方米(kg/m^3)。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

空气是由分子组成的,空气的密度大,说明单位体积内的空气分子多,比较稠密;反之,空气密度小,则空气比较稀薄。大气层的空气密度随高度的增加而减小,越高空气越稀薄。在 10 km 高度下,空气密度只相当于海平面空气密度的 1/3。空气密度随高度的这种变化,不仅对作用在固定翼无人机上的空气动力大小有影响,还对发动机产生的推力大小有很大影响。随着空气密度的减小,发动机功率会相应减小并产生其他方面的变化。

3. 空气温度

空气温度是指空气的冷热程度,主要有三种标定方法:摄氏温度、华氏温度和绝对温度。

大多数国家用摄氏温度来表示,单位是摄氏度(°C);少数国家和地区(如美国)使用华氏温度,单位是华氏度(°F)。两种单位的换算公式为

$$t_C = (t_F - 32) \times \frac{5}{9} \quad (1-2)$$

式中, t_C 为摄氏温度(°C); t_F 为华氏温度(°F)。

理论计算中常用热力学温度来表示,单位是开尔文(K)。热力学温度和摄氏温度之间的换算公式为

$$T_K = t_C + 273.15 \quad (1-3)$$

式中, T_K 为热力学温度(K)。

在大约 11 km 高度以下的大气层内,随着高度增加,大气温度下降,近似按线性变化。

4. 空气压力

空气压力是指空气的压强,即物体单位面积上所承受的空气的垂直作用力。压力单位为帕斯卡(简称“帕”,字母为“Pa”),表示 1 牛顿力作用在 1 平方米上, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$,或者单位为“kgf/cm²”,表示 1 公斤的压力作用在 1 平方厘米上,其中 $1 \text{ kgf} \approx 9.8 \text{ N}$ 。

地球大气密度具有由地面向高空递减的特性,即单位体积的大气质量随高度的增加而递减,气压亦有相同的变化,即随着高度的增加,气压不断降低。大气压力随着高度的增加基本呈线性下降,航空器一直使用该规律来确定飞行的高度,如图 1-2 所示。固定翼无人机如果飞行高度太高,空气密度和空气压力很小,发动机的效率就会很低,因此固定翼无人机的飞行高度是有限制的,即所谓“升限”。

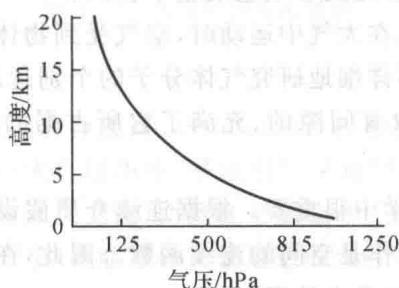


图 1-2 大气压力随高度的变化

5. 大气温度、密度和压力随高度的变化

(1) 大气温度、密度和压力在海平面上的标准值

在海平面上的标准值为: $T_0 = 288.2 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_0 = 101\,325 \text{ N/m}^2 = 760 \text{ mm Hg} = 1.034 \text{ kgf/cm}^2$; $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。其中下标“0”代表海平面(即高度为零)的参数值;气体压力单位也有用毫米汞柱(mmHg)表示的。在海平面上的空气压力 p_0 称为 1 个大气压,在工程计算中有时会简单地把 1 kgf/cm^2 算作 1 个大气压。

(2) 大气温度随高度的变化规律:

1) 在对流层中(高度 H 在 11 000 m 以下),空气温度递减。空气温度随高度分布的规律是高度每上升 1 000 m,温度下降 $6.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 在平流层中(高度 H 在 11 000~20 000 m 之间),温度保持为常数, $T = 216.7 \text{ K} = -56.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3) 高度由 20 000 m 到 32 000 m, 高度 H 每上升 1 000 m, 温度上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 大气密度随高度的变化的规律

1) 由大气温度和大气压力计算大气密度, 大气密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 可由当时大气温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 和大气压力 $p(\text{mmHg})$ 通过式(1-4)求出。

$$\rho = 0.465 p / (273.15 + t) \quad (1-4)$$

2) 粗略估算标准大气中空气的相对密度。

i. 当高度 $H \leq 13\text{ km}$ 时, 空气的相对密度 $\Delta = \rho_H / \rho_0$ 由下式计算:

$$\Delta = (20 - H) / (20 + H) \quad (1-5)$$

ii. 当高度 $13\text{ km} \leq H \leq 18\text{ km}$ 时, 空气的相对密度 $\Delta = \rho_H / \rho_0$ 由下式计算:

$$\Delta = 0.315 \times (25 - H) / (5 + H) \quad (1-6)$$

(4) 大气压力随高度的变化的规律

1) 当高度 $H \leq 11\text{ km}$ 时, 空气的相对压力 (p_H / p_0) 由下式计算:

$$(p_H / p_0) = (1 - 0.022\ 57H)^{5.256} \quad (1-7)$$

2) 当高度 $H \geq 11\text{ km}$ 时, 空气的相对压力 (p_H / p_0) 由下式计算:

$$(p_H / p_0) = 0.752\Delta \quad (1-8)$$

1.3.2 空气的压缩性、黏性和国际标准大气

1. 空气的压缩性

空气的压缩性是指一定量的空气, 当其所受到的压力或温度改变时, 其密度或体积也要发生相应变化的物理性质。不同状态的物质, 其压缩性也不同, 液体对这种变化的反应很小, 因此一般认为液体是不可压缩的; 而气体对这种变化的反应很大, 一般认为气体是可压缩的物质。

工程实践表明, 当空气的流动速度不大时, 即对应于固定翼无人机低速飞行时, 空气的压力变化一般不大, 空气密度的变化很小, 空气的压缩性对固定翼无人机的飞行影响很小。因此, 在研究低速气流流动的规律时, 可以略去气流密度的变化而不考虑空气的压缩性, 认为密度是一个不变的数值, 把气流当成是不可压缩的气流, 这样研究低速气流问题比较方便, 而且不会影响空气动力计算结果的工程精度。但是, 当气流速度较高时, 即对应于固定翼无人机高速飞行时, 由于速度变化所引起的压力变化较大, 由此而产生的气流密度的改变就不可忽略, 这时就必须考虑空气的压缩性。

2. 空气的黏性

空气的黏性是空气在流动过程中表现出的一种物理性质。空气的黏性力是相邻空气分子之间相互运动时产生的牵扯作用力, 也叫做空气的内摩擦力。造成空气具有黏性的主要原因是空气分子的不规则运动, 表现为气体的内摩擦。由于黏性的耗能作用, 在无外界能量补充的情况下, 运动的空气将逐渐停止下来。实验研究表明, 空气黏性大小取决于以下四个方面:

(1) 速度梯度

速度梯度越大, 相邻两层空气做不规则运动所引起的动量变化越大, 两层之间空气的牵扯力越大, 黏性力就越大。

(2) 空气温度

空气温度越高, 空气分子不规则运动速度越大, 空气层之间交换的分子数越多, 黏性越大。