



新视野民航飞行技术专业规划教材

飞行原理

朱一锟 编著



*Flight
Principles*



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



新视野民航飞行技术专业规划教材

飞行原理

朱一锴 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书共分 10 章,主要内容包括绪论和大气基本知识、流体沿流管流动的基本知识、飞机的低速/高速空气动力特性、飞机重量和重心位置与内部装载(配平)、飞机的动力装置(含螺旋桨式飞机)的基本性能、飞机飞行性能和飞机稳定性与操纵性分析等。

针对飞行技术专业航线运输机飞行员的培养要求,飞行员不仅要获得大学本科学历教育证书,而且还要获得专业驾照,故本书在上述内容的选择上,不仅注重基本概念的介绍,而且也注重实用性,并且有一定的力学理论水平。

本书可为航空类院校飞行技术专业学生、在职飞行员以及航空工程技术人员提供有效的学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行原理 / 朱一锬编著. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2018. 9

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2753 - 2

I. ①飞… II. ①朱… III. ①飞行原理 IV.

①V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 146331 号

版权所有,侵权必究。

飞行原理

朱一锬 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

艺堂印刷(天津)有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:22.75 字数:485 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷 印数:1 500 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2753 - 2 定价:79.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

作为北京航空航天大学(简称北航)飞行学院飞行技术专业系列教材建设规划,《飞行原理》是首批计划出版的专业课程教材之一。2016年11月,北航飞行学院召开了首批专业课程的大纲审定工作会议。中国南方航空公司冯华南、高飞、田刚,中国国际航空公司常厚东、李拥军出席了会议,并提出了宝贵的意见和建议,这对教材的编写有很大的帮助。

本教材是为培养航线运输机飞行员(Airline Transport Pilot, ATP)所用的,与通用型飞机飞行员(如 Private Pilot, PP)不同,前者是专业飞行员,后者多为航空爱好者或私用飞机驾驶员。飞行员如何能安全、有效地操控飞机;在学习飞行中,如何能与飞行教官进行有效交流,相当程度上都取决于对飞机飞行原理的理解与掌握。因此,教材内容的选取必须要有一定的力学理论基础,又要有一定的实用性,还要保证基本概念与内容的正确,力图使学员不仅知其然,也要知其所以然。

本教材依据由浅入深的原则,首先阐述飞机为什么能飞,然后是如何飞才能发挥出飞机固有的优良性能,最后是如何飞才能保证飞行的安全性。

考虑到学员们将去国外英语国家航校学习飞行,为便于熟悉国外教材资料和接受国外常用术语,本教材中各个物理量的单位,既用到了公制单位制,又重点介绍了英制工程单位制。

鉴于作者的专业水平和实际经验有限,书中疏漏及不足在所难免,欢迎读者提出批评与指正。

作 者

2018年11月



第 1 章 绪论和大气基本知识	1
1.1 为什么要学习飞行原理	1
1.2 学习本教材的基本要求	2
1.3 大气的基本知识	2
1.3.1 大气层概况	3
1.3.2 大气的三个物理参数 ρ 、 p 、 T 和气体状态方程式	4
1.3.3 空气的粘性与粘性系数	6
1.3.4 空气的可压缩性和声速	7
1.3.5 小扰动波在空气中的传播规律和马赫数 Ma	11
1.3.6 流体的连续性假设.....	13
1.4 国际标准大气(ISA)	13
1.4.1 为什么需要 ISA	13
1.4.2 制定 ISA 的基准	13
1.5 应用举例——飞行高度.....	16
1.5.1 机场的海拔高度 H_a (亦称绝对高度)	16
1.5.2 飞机的压力高度 H_p (或 H).....	16
1.5.3 飞机的密度高度 H_ρ	18
第 2 章 流体沿流管的低速流动	20
2.1 相对运动原理.....	20
2.2 流体流动现象的观察与描述.....	21
2.2.1 流体流动现象的观察(可视化方法).....	21
2.2.2 流场、流线、流面、流管和流量	23
2.2.3 定常流动与非定常流动.....	23
2.3 流体沿流管低速流动的连续方程.....	24
2.4 无粘流体沿流管低速流动的能量方程.....	25
2.5 伯努利(Bernoulli)方程	26
2.5.1 流管水平放置的情况.....	26

2.5.2	文氏管的流动	27
2.6	流速的测量	28
2.6.1	低速气流流过 $\alpha=0$ 轴对称物体的绕流图画	28
2.6.2	空速管测速原理	29
2.6.3	各种空速的定义	30
2.7	低速粘性管流的基本知识	32
2.7.1	粘性流体的两种典型流态	32
2.7.2	粘性流体在收缩或扩张管内的流动	34
第3章	飞机的低速空气动力特性	36
3.1	飞机的外形与气动布局	36
3.1.1	概述	36
3.1.2	机翼的外形和几何参数	39
3.1.3	机身的外形和几何参数	43
3.2	低速时翼型的升力与力矩特性	44
3.2.1	对称翼型的绕流图画和空气动力	44
3.2.2	非对称翼型的绕流图画和空气动力	51
3.3	低速时空气粘性对翼型空气动力的影响	56
3.3.1	翼型的粘性阻力特性	57
3.3.2	粘性对翼型升力和力矩特性的影响	61
3.4	低速时翼型空气动力特性小结	63
3.4.1	翼型的升力公式、俯仰力矩公式和阻力公式	63
3.4.2	翼型的阻力极曲线	64
3.5	低速时气动操纵面翼型与襟翼翼型的空气动力	67
3.5.1	气动操纵面翼型的空气动力特性	67
3.5.2	襟翼翼型的空气动力特性	70
3.6	低速时机翼的空气动力特性	76
3.6.1	机翼展弦比 A 的影响	76
3.6.2	机翼梢根比 λ 的影响	80
3.6.3	机翼后掠角 $\Lambda_{1/4}$ 的影响	82
3.6.4	机翼展向扭转角的影响	82
3.6.5	梯形后掠机翼的空气动力特性	83
3.7	低速时飞机的空气动力特性	88
3.7.1	飞机的升力特性	88
3.7.2	飞机的阻力特性	90
3.7.3	飞机的阻力极曲线	92
3.8	飞机的俯仰力矩特性	92

第 4 章 流体沿流管的高速流动	94
4.1 概 述	94
4.2 空气沿流管高速流动时的连续方程	94
4.3 空气沿流管高速流动时的能量方程	95
4.3.1 高速流动时的能量方程	95
4.3.2 高速流动时能量方程的各种形式	96
4.4 可压、无粘气流的总参数和静参数	96
4.4.1 气流的总温 T_0	96
4.4.2 气流的总压 p_0	97
4.4.3 气流的总密度 ρ_0	98
4.5 空气沿流管高速流动的动量方程	98
4.6 流速和流管横截面积变化的关系	99
4.6.1 低速、无粘流动的关系式	99
4.6.2 高速、无粘流动的关系式	100
4.7 实用例子	102
4.7.1 涡轮喷气发动机的进气道和尾喷管	102
4.7.2 火箭发动机的尾喷管	103
第 5 章 飞机的高速空气动力特性	105
5.1 超声速气流中的激波和膨胀波现象	105
5.1.1 超声速气流中的激波现象	105
5.1.2 超声速气流中的膨胀波现象	108
5.2 超声速时翼型的空气动力特性	111
5.2.1 翼型的厚度波阻力和厚度波阻力系数	111
5.2.2 翼型的升力系数和迎角波阻力系数	113
5.2.3 翼型的俯仰力矩特性(气动中心和压力中心)	115
5.2.4 翼型的阻力特性	116
5.3 亚声速与跨声速时翼型的空气动力特性	116
5.3.1 亚声速时翼型的空气动力特性	116
5.3.2 跨声速时翼型的空气动力特性	117
5.4 高速飞机的外形和空气动力特性	122
5.4.1 选用薄翼型或高速翼型	122
5.4.2 采用后掠机翼和小展弦比机翼	123
5.4.3 高速飞机的空气动力特性	126
第 6 章 飞机飞行性能分析需要的其他原始数据	131
6.1 飞机的重量和重心位置	131
6.1.1 飞机重量和重心位置的重要性	131

6.1.2	飞机的重量及其限制	132
6.1.3	一次航班飞行中飞机的各个重量与重量限制检查	134
6.1.4	飞机的重心、重心位置与内部装载(配平).....	135
6.2	螺旋桨式飞机的可用拉力与可用功率	142
6.2.1	螺旋桨产生可用拉力的原理	142
6.2.2	可用功率和可用拉力	148
6.3	涡轮喷气发动机的可用推力和可用功率	152
6.3.1	涡轮喷气发动机的推力	152
6.3.2	涡扇喷气发动机的情况	152
6.3.3	涡喷发动机的可用推力与可用功率特性曲线	153
6.4	飞机发动机的燃油流量特性	155
6.4.1	涡轮喷气发动机的燃油流量特性	155
6.4.2	活塞式发动机的燃油流量特性	156
6.5	飞机的坐标轴系和飞行中的相关角度	158
6.5.1	有关飞机的坐标轴系	158
6.5.2	飞机飞行中的相关角度	159
6.5.3	飞机的纵向飞行和侧向飞行	161
第7章	飞机的基本飞行性能	163
7.1	飞机纵向定直平飞性能	163
7.1.1	飞机纵向定直平飞的姿态和受力平衡方程	163
7.1.2	飞机定直平飞中的需用速度和升力系数	164
7.1.3	飞机定直平飞中的需用推力 T_r 和需用功率 P_r	166
7.1.4	飞机定直平飞性能的确 定——图解法	172
7.1.5	运营中诸参数(WATC)变化对定直平飞性能的影响	173
7.1.6	飞机定直平飞范围(定直平飞包线)	179
7.1.7	飞机定直平飞的静操纵原理	182
7.2	飞机纵向定直爬升飞行性能	184
7.2.1	飞机纵向定直爬升的姿态和受力平衡方程	184
7.2.2	飞机纵向定直爬升的阻力 D_c (需用推力)和需用功率 P_c	186
7.2.3	飞机纵向定直爬升性能的确 定——图解法	187
7.2.4	运营中诸参数(WATC)变化对定直爬升性能的影响	190
7.2.5	飞机爬升综合性能与常值风的影响	192
7.2.6	飞机定直爬升飞行的静操纵原理	198
7.3	飞机纵向定直下降飞行性能	199
7.3.1	飞机纵向定直下降的姿态角和受力平衡方程	199
7.3.2	飞机纵向定直下降的阻力 D_D (需用推力)和需用功率 P_D	201

7.3.3	飞机纵向定直下降飞行性能的确定——图解法	202
7.3.4	运营中诸参数(WATC)变化对定直下降性能的影响	203
7.3.5	飞机下降综合性能与常值风的影响	203
7.3.6	飞机无动力定直下滑飞行性能	206
7.3.7	飞机定直下降飞行的静操纵原理	209
7.4	飞机定直巡航飞行性能	209
7.4.1	巡航飞行的基本概念、航程和航时	209
7.4.2	飞机的比航程 SR 和比航时 SE 曲线	211
7.4.3	运营中诸参数(WATC)变化对定直巡航性能的影响	214
7.4.4	飞机定直巡航的航程和航时计算	218
7.4.5	常值风的利用与飞机巡航性能综合图表	220
第 8 章	飞机的机动飞行性能	229
8.1	飞机正常盘旋的静操纵原理与性能	229
8.1.1	飞机正常盘旋飞行的定义和静操纵原理	229
8.1.2	飞机正常盘旋飞行中的基本关系式	233
8.1.3	飞机正常盘旋飞行性能	236
8.1.4	飞机的设计机动飞行包线($V-n$ 图)	240
8.2	飞机的起飞性能	244
8.2.1	机场场地概况和飞机的起飞过程与特点	244
8.2.2	飞机起飞滑跑过程中的受力分析与操纵	249
8.2.3	飞机起飞需用长度(距离) L_{TO} 和需用时间 t_{TO}	251
8.2.4	运营中诸参数对 L_{TO} 和 t_{TO} 的影响分析	253
8.2.5	飞机起飞性能图表简介	260
8.2.6	多发动机飞机单发停车的起飞问题	263
8.3	飞机的着陆飞行性能	267
8.3.1	飞机着陆飞行过程与特点	267
8.3.2	飞机着陆滑跑中的受力分析	272
8.3.3	飞机着陆需用长度(距离) L_L 与需用时间 t_L	273
8.3.4	运营中诸参数对 L_L 和 t_L 的影响分析	274
8.3.5	飞机着陆飞行性能图表简介	277
8.3.6	地面效应(ground effect)	281
8.3.7	复杂、恶劣天气现象对飞行性能的影响	284
第 9 章	飞机纵向定直飞行中的稳定性与操纵性	292
9.1	飞机纵向定直飞行中的俯仰力矩特性	292
9.1.1	飞机各部件空气动力提供的俯仰力矩	292
9.1.2	飞机动力装置工作对俯仰力矩的贡献	295

9.1.3	偏转升降舵产生的俯仰操纵力矩	298
9.1.4	飞机对重心的俯仰力矩系数公式	299
9.1.5	飞机纵向俯仰力矩平衡的两种状态	300
9.2	飞机纵向定直飞行中的纵向静稳定性	301
9.2.1	飞机纵向静稳定性的定义	301
9.2.2	保证飞机具有纵向静稳定性的条件	301
9.2.3	两种不同性质的升降舵偏角 δ_e 的平衡曲线	302
9.3	飞机纵向定直飞行中的纵向静操纵性	304
9.3.1	飞机纵向静操纵性的定义	304
9.3.2	对飞机纵向静操纵性的基本要求	304
9.3.3	保证飞机具有纵向静操纵性的条件	305
9.3.4	运营中飞机重心位置 h 和飞行高度 H 的变化对飞机 纵向静操纵性的影响	305
9.3.5	改善飞机纵向静操纵性的措施	308
9.3.6	高速飞行中出现的速度静不稳定性与马赫数配平装置	309
9.3.7	飞机起飞、着陆中升降舵操纵效能检查	310
9.4	飞机纵向定直飞行的动稳定性和动操纵性	312
9.4.1	飞机纵向动稳定性与静稳定性的区别	312
9.4.2	飞机纵向动稳定性的描述方法	312
9.4.3	飞机纵向受扰运动的两种振荡模态	313
9.4.4	飞机纵向动稳定性小结	317
9.4.5	飞机纵向动操纵性简介	317
第 10 章	飞机侧向定直飞行中的稳定性与操纵性	322
10.1	飞机侧向定直飞行的特点	322
10.2	飞机的横向静稳定性	323
10.2.1	飞机横向静稳定性的定义	323
10.2.2	飞机横向静稳定性的表示方法	324
10.2.3	如何保证飞机具有横向静稳定性	324
10.2.4	飞机横向静稳定性导数 $C_{l\beta}$ 的变化情况	327
10.3	飞机的横向力(亦称侧向力)特性	328
10.3.1	飞机横向力系数的导数 $C_{Y\beta}$	328
10.3.2	飞机横向力系数导数 $C_{Y\beta}$ 的变化情况	329
10.4	飞机的方向静稳定性	330
10.4.1	飞机方向静稳定性的定义	330
10.4.2	飞机方向静稳定性的表示方法	330
10.4.3	如何保证飞机具有方向静稳定性	331

10.4.4	飞机方向静稳定性导数 $C_{n\beta}$ 的变化情况	331
10.5	飞机副翼和方向舵的操纵效能	333
10.5.1	飞机副翼的操纵效能 $C_{l\delta_a}$	333
10.5.2	飞机方向舵的操纵效能 $C_{m\delta_r}$	334
10.6	定直侧滑飞行中飞机侧向平衡曲线与侧向静操纵性	335
10.6.1	定直侧滑飞行中飞机的侧向平衡曲线	335
10.6.2	定直侧滑飞行中飞机的侧向静操纵性	336
10.7	侧风进近着陆飞行中侧向平衡与操纵	337
10.7.1	正侧风对进近着陆飞行的影响	337
10.7.2	修正偏流的进近着陆方法	338
10.7.3	有侧风时对着陆航线飞行的影响	340
10.8	双发飞机空中单发停车后飞机的侧向平衡与操纵	340
10.8.1	双发喷气式飞机空中左发停车失效	340
10.8.2	双发喷气式飞机左发停车失效后做侧向定直飞行的 平衡与操纵	341
10.8.3	双发喷气式飞机右发停车失效后做侧向定直飞行的 平衡与操纵	344
10.9	飞机侧向飞行中的动稳定性与动操纵性	345
10.9.1	飞机侧向飞行动稳定性的特点	345
10.9.2	飞机侧向受扰运动的模态	347
10.9.3	飞机侧向飞行中的动稳定性小结	348
10.9.4	飞机侧向飞行中的动操纵性	349
附录	国际单位、英制单位及其换算	351
	参考文献	352

第 1 章

绪论和大气基本知识

1.1 为什么要学习飞行原理

为什么要学习飞行原理？无论是对于通用航空飞行员(包括私用飞机飞行员,即 Private Pilot, PP), 还是商用飞机飞行员(Commerical Pilot, CP), 或者对航线运输机飞行员(Airline Transport Pilot, ATP)来说, 在登机学习和掌握特定飞机的飞行技术之前, 都会提出这个问题。

要回答这个问题, 可以从飞行原理要介绍的内容中找到答案。

飞行原理主要介绍三个方面的内容:

- ① 飞机为什么能离开地面在空气中飞行呢? 这涉及到飞机的空气动力学问题。
- ② 如何飞, 飞机才会飞得快一点、高一点、远一点或者留空时间长一点呢? 这涉及到飞机的飞行性能问题。
- ③ 怎么飞, 才能保证飞机飞行状态具有良好的稳定性与可操纵性呢? 这涉及到飞机飞行时的稳定性与操纵性问题, 还涉及到飞行安全问题。

有关这三方面问题的知识, 是基础性的和原理性的知识, 是飞行员与飞行教员之间交流的基础, 也是学习飞行技术的第一步。

况且, 由于民航飞行专业的特殊性, 飞行员除了要获得学历教育(含大学本科、大学专科或其他学历)证书外, 还需要获取专业驾照, 如 PPL、CPL 或 ATPL 才能上岗。本教材将提供学历证书和专业驾照考试所需要的基本知识和内容。

综上, 就能回答为什么要学习飞行原理这个问题了。

对于北京航空航天大学飞行学院“飞行技术”专业来讲, 培养的是 ATP, 是大学本科学历教育。所以, 在《飞行原理》教材选材的深度上, 有别于驾照教育(PPL 或 CPL)所采用的飞行原理理论教材。后者大多只从物理概念出发就得出结论, 不讲清机理, 只要求“知其然”, 而不知其“所以然”。但对于 ATP 的大学本科学历教育来

讲,对所讲内容,不仅要“知其然”,而且还要求知道一些“所以然”。对介绍的一些基础理论与公式,都有一定物理、数学上的说明与推导,有一定力学理论水平。其原因是我们培养的是专业飞行员,而不是航空爱好者或“爱飞客”。

澳大利亚航空理论中心所编教材中有句话说得好:“Good, clear knowledge minimizes flight training hours”。我们要坚信,“知识就是力量”这句话,并永远铭记在心!

1.2 学习本教材的基本要求

本教材是为 ATP 大学本科学历教育编写的,内容丰富,涉及面广泛,有一定的深度和难度。要学好本教材所讲内容,重点要放在三个方面上,即基本概念(含符号)、基本公式和基本图形。我们只简单举几个例子来说明。

基本概念方面:比如在介绍飞机的纵向俯仰力矩特性中,有飞机的零升力矩系数 C_{m0} 、空气动力中心位置(或称焦点位置) h_{ac} 和压力中心位置 h_{cp} 。它们各代表什么意思?它们的大小取决于什么因素?它们彼此之间存在什么关系式呢?

基本符号方面:比如有关飞机飞行的速度概念方面有众多的符号,它们代表什么意思?它们的大小与什么参数有关?这里只写出几个: V_{∞} 、 V_s 、 V_{min} 、 V_{mp} 、 V_{md} 、 V_{max} 、 $V_{max RC}$ 、 $V_{max r}$ 、 $V_{min \gamma}$ 、 $V_{min RD}$ 、 $V_{max SR}$ 、 V_{LRC} 、 $V_{max SE}$ 等。

基本方程或公式方面:比如低速伯努利方程,高速能量方程与动量方程,飞机平飞升力公式和阻力公式等。它们是如何得到的?可用来说明什么问题?

基本图形方面:比如飞机的升力特性曲线,飞机的阻力极曲线,飞机平飞需用推力曲线和平飞需用功率曲线,飞机平飞的升降舵偏角平衡曲线图等。应能绘制出这些图形的变化趋势,并指明影响这些曲线图的主要参数。

要掌握上述三个基本要求,首先要听好课堂讲授,其次要熟读教材。但是,读书不能只是看书,而必须要自己动手做摘要或笔记。湖南岳麓书院有句话说得好:“读书必须过笔”。澳大利亚航空理论中心也有句话说:“make your own notes and summary that you prepare is the most important aid to your learning”。它们讲的都是一个道理。最后,就是要不断复习、熟记,直到熟练掌握这些内容的精髓为止,并在飞行实践中得到印证。

1.3 大气的基本知识

包围地球表面的空气层称作大气层。对于飞机而言,没有空气,飞机就根本无法飞行。空气的各种物理性质或参数,如空气的密度、压力和温度等,不仅影响到作用在飞机上的空气动力的大小,也影响到飞机发动机的性能,如产生的推力和耗油率的大小等。许多飞行仪表的工作,比如空速表、高度表等,也与空气的状态参数紧密相关。

1.3.1 大气层概况

先说大气的组成。大气或空气是多种气体的混合物,主要成分是氮气和氧气。从质量或体积上所占比例来看,氮气和氧气分别占78%、21%,或76%、23%左右,其余是不到1%的氩、二氧化碳和水气等多种气体。从目前飞机飞行的最大速度上限来看,可将空气视作单一的气体,称作空气或大气。如果最大飞行速度再提高,则空气的组成个体的作用将显现出来,必须单独考虑。

分层次是大气层的主要特征,如图1.1所示,一般可分为对流层(troposphere)、平流层(stratosphere)、中间层(mesosphere)、热层(thermosphere)和散逸层(ionosphere)五层。

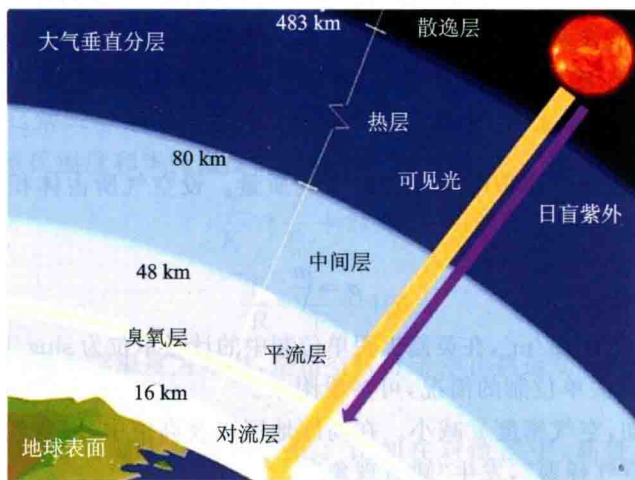


图 1.1

1. 对流层

围绕地球,对流层的高度并不一样。在赤道地区,对流层顶为13~17 km。极地地区,对流层顶为7~8 km。平均高度约为11 km (36 089 ft),空气质量的3/4以及几乎全部的水气、悬浮颗粒等都集中在此层中。在此层中,空气的对流活动相当频繁,有时还相当强烈。此即该层命名的由来。云、雨、雪、雷电等天气现象都发生在此层。

2. 平流层

它的层顶在50~55 km之间,下层在11~24 km之间,空气温度近似为常数(约为-56.5℃)。不像对流层那样,平流层是一个相对平静的空气层。最具特色的地方除了平流下层空气温度近似保持不变外,还有水平方向的风,实测风速达到过37 m/s(或120 ft/s)左右。

3. 其他层

其他各层情况,可参看航空气象教材。

一般飞机活动的高度范围:高速超声速飞机活动高度范围为 0~32 km。英法合制的协和号超声速旅客运输飞机,平飞高度升限为 13.5 km。一般喷气式民航飞机为 0~12 km;螺旋桨式飞机为 0~6 km;通用小型螺旋桨飞机为 0~3 km。换句话说,民用飞机大都在对流层中活动。

1.3.2 大气的三个物理参数 ρ 、 p 、 T 和气体状态方程式

大气的物理参数主要有五个。前三个称为大气的状态参数,即空气的密度 ρ 、压强 p (俗称压力)和温度 T ;后两个称为性质参数,分别是空气的粘性和可压缩性。空气的粘性一般用粘性系数 μ 或运动粘性系数 ν 来表示。空气的可压缩性一般用空气的体积弹性模量 E 或声速 c (指声波在空气中的传播速度)来表示。

1. 空气的密度 ρ

空气密度是指单位体积中所包含的空气质量。设空气所占体积为 V ,其中包含的质量为 m ,则有

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

密度 ρ 的单位为 kg/m^3 ,在英制工程单位制中的计量单位为 slug/ft^3 。1 $\text{slug}/\text{ft}^3 = 515.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。有关单位制的简况,可参看附录。

高度 H 增加,空气密度 ρ 减小。在高原地区以及高空中,因空气密度 ρ 的下降,会导致常说的“空气稀薄”,发生“缺氧现象”。

2. 空气的压力 p

空气的压力(严格讲应称为压强)是指空气作用在单位面积上的法向力。

在航空气象学中,把静止大气中的大气压力视为单位面积上所承受的空气柱重力,如图 1.2 所示。在地面上设空气柱底面积为 A ,由底部垂直向上画出的空气柱直到大气层外边界。它所包含的空气重量为 W_a ,则地面上空气的静压力 p 为

$$p = \frac{W_a}{A} \quad (1-2)$$

p 的单位为 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$,或 hPa (百帕)等。英制为 lb/ft^2 (或写为 psf),或 lb/in^2 (psi)。1 $\text{psf} = 47.88 \text{ Pa} = 0.4788 \text{ hPa}$ 。也有用汞柱高来表示 p 大小的,即 inHg 。

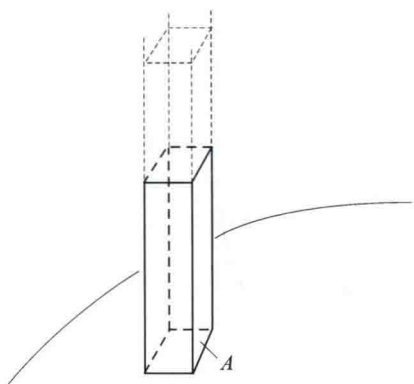


图 1.2

1 inHg=338.6 Pa。

高度 H 增加,由底部向上画出的空气柱所包含的空气重量 W_a 减小,因而 p 将下降。在低高度范围,每上升 30 ft,空气静压力 p 下降 1 hPa。在较高的高度范围,空气静压力下降还要快一些,因为空气的密度快速减小,导致空气柱重量快速减小。

3. 空气的温度 T

空气的温度是指空气分子运动平均动能,俗称空气冷热的程度。

对于空气温度的测量,日常生活中有摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 和华氏温度 $t_{\text{F}}(^{\circ}\text{F})$ 两种计量方式。我国采用摄氏温度,欧美都采用华氏温度。两者之间有如下换算公式,即

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{t_{\text{F}}}{^{\circ}\text{F}} - 32 \right) \quad (1-3a)$$

$$\frac{t_{\text{F}}}{^{\circ}\text{F}} = \frac{9}{5} \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 32 \quad (1-3b)$$

工程计算中,常采取热力学温度,一种是开氏温度 $T(\text{K})$,另一种是兰氏温度 $T(^{\circ}\text{R})$,它们与摄氏温度和华氏温度的关系为

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 273.15 \quad (1-4)$$

$$\frac{T}{^{\circ}\text{R}} = \frac{t_{\text{F}}}{^{\circ}\text{F}} + 460 \quad (1-5)$$

换句话说,当热力学温度为零时,是指空气分子停止热运动时的温度。在热力学温度中,此时 $T = -273.15^{\circ}\text{C}$ 。

高度 H 增加,空气温度将发生变化。比如在对流层中,高度增加,空气温度下降。

4. 完全(干燥)气体的状态方程

在高中物理中,介绍过理想气体(在此处称之为完全气体)状态参数 ρ 、 p 、 T 之间有一个关系式,称为完全气体的状态方程,即

$$p = \rho RT \quad (1-6)$$

式中, R 称为气体常数。在国际单位制中,若 $[T] = ^{\circ}\text{K}$ (方括号代表括号内的物理量所采用的单位), $[p] = \text{Pa}$, $[\rho] = \text{kg}/\text{m}^3$, 则式(1-6)中的 $R = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K})$ 。在英制工程单位制中,若 $[T] = ^{\circ}\text{R}$, $[p] = \text{psf}$, $[\rho] = \text{slug}/\text{ft}^3$, 则式(1-6)中的 $R = 1716 \text{ lb} \cdot \text{ft}/(\text{slug} \cdot ^{\circ}\text{R})$ 。

在大气层中,同一高度上空气的三个状态参数 ρ 、 p 、 T 之间的关系,十分接近于完全气体的情况,故也采用式(1-6)来表示。知道空气的两个状态参数(比如 p 和 T),第三个参数 ρ 则可求出。

不过,上述关系只适用于干燥空气;当空气中含有的水蒸气量较高时,它不适用。人们常误认为水蒸气比同等体积的干燥空气重,实际上并非如此。空气中所含水蒸

气量越多,空气的密度越小。

1.3.3 空气的粘性与粘性系数

空气的这个特性是比较难以理解的。它在静止的空气中,也难以显现出来。

1. 流体粘性的定义

一般来说,流体[包括气体(比如空气)和液体(比如水)]内部产生相对滑动时,相邻两个运动速度不同的流动层间会产生互相牵扯的内摩擦力的特性,称作流体的粘性。

参看图 1.3。流体以速度 V_∞ 平行流过平板壁面。紧贴壁面的一层流体,因固体壁面的吸附作用,流速降为零。于是相邻上一层流体与紧贴壁面的流体层产生了速度差 ΔV 并相互滑动;一层拖慢一层,形成如图 1.3(a)所示 $V=V(z)$ 的速度分布。各层之间会产生内摩擦力 F_τ 。

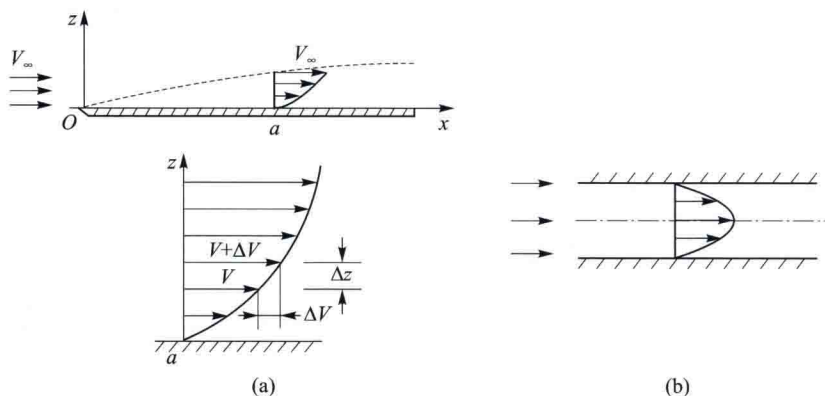


图 1.3

视来流流速 V_∞ 大小的变化,壁面上因粘性影响产生的区域(图上从 O 点起,沿 Ox 轴方向画出的虚线与壁面之间区域)也是变化的。在 $x=a$ 处,沿 z 方向,当 $V \rightarrow V_\infty$ 时,壁面的影响宣告结束。

图 1.3(b)是流体(如水)流过管道时,沿截面的流速分布,中心处流速大,而内壁上的 $V=0$ 。这也是水具有粘性作用的体现。

2. 流体粘性系数 μ 的定义和粘性内摩擦应力 τ

参看图 1.3(a),相邻两层流体的接触面积为 A ,速度梯度为 $\Delta V/\Delta z$,则流体的内摩擦力 F_τ 为

$$F_\tau = \mu \left(\frac{\Delta V}{\Delta z} \right) A \quad (1-7)$$

或