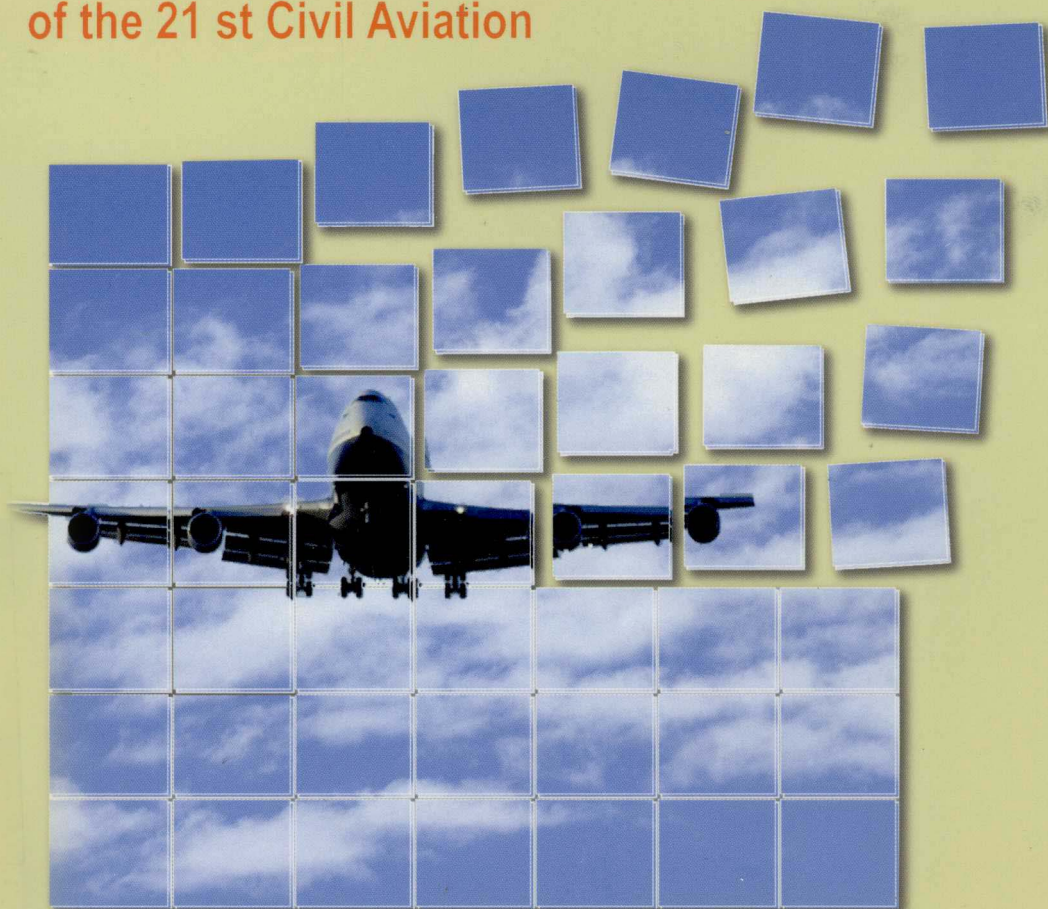


21 世纪民航高等教育系列教材

大气数据系统

赵淑荣 罗云林 编

Textbook Series of the Higher Education
of the 21 st Civil Aviation



兵器工业出版社

大气数据系统

赵淑荣 罗云林 编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括三大部分：典型大气数据仪表、大气数据计算机部分及输出显示部分。第一部分主要介绍常用的气压式高度表，马赫空速表的基本原理、理论依据及基本结构；第二部分介绍全静压系统的基本构型及部件功能；第三部分主要阐述现代航空电子系统的大气数据计算机系统的原理及结构。

本书不仅可作为民用航空电子专业、航空仪表专业的教科书，也可供从事航空仪表、航空电子系统维修及研究的工程技术人员、广大航空爱好者使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大气数据系统/赵淑荣, 罗云林编. —北京: 兵器工业出版社, 2004.8

ISBN 7-80172-298-1

I. 大... II. ①赵... ②罗... III. 计算机应用—飞行仪表 IV. V241.4—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 088571 号

出版发行: 兵器工业出版社
责任编辑: 朱丽均
责任技编: 魏丽华
邮编社址: 100089 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京瑞达方舟印务有限公司
版 次: 2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—1250

封面设计: 底晓娟
责任校对: 全 静
责任印制: 王京华
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 11.5
字 数: 250 千字
定 价: 26.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

大气数据仪表及大气数据计算机系统为飞机主要飞行仪表及飞行状态参数测量系统，是航空电子系统的主要组成部分之一。随着近代电子技术及民航事业的发展，机载的航空电子系统有了很大的变化。本书着重介绍了大气数据仪表的基本原理及典型结构，并结合当前我国新型飞机的具体设备，详细介绍了大气数据计算机系统的组成及工作原理，阐述了现代飞机电子设备所涉及的新知识、新理论和新技术。

本书的内容分为八章：第一章概论；第二章飞行高度及高度变化率的测量；第三章马赫/空速表；第四章全/静压系统；第五章大气数据计算机系统；第六章大气数据计算机的基本计算方法；第七章传感器的校正；第八章大气数据计算机系统输出及显示仪表。

本书分析了大气数据与飞行器飞行参数之间的关系。对实现模拟计算及数字计算的各种方案做了较详细论述，并对当代飞机大气数据参数与各相关设备的交联关系进行了综合性整理，对掌握不断发展、更新的飞机设备有指导作用。本教材涉及到设计思路，但重点是飞机设备的工作原理及应用知识，故本教材主要适用于航空器维修专业。

由于书中涉及较多外国设备及仪器、仪表，所以保留了部分非我国法定计量单位，如 ft, mile, mmHg, mmH₂O 等，但在这些单位第一次出现时，均加有页末注，以说明其与法定计量单位之间的换算关系。

本教材由肖建德主审，可能还存在缺点和错误，殷切期望读者给予批评、指正。

编者于中国民航学院

2004 年 3 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 前言	(1)
第二节 地球大气层	(2)
第三节 与大气数据相关的参数	(4)
第四节 标准大气	(5)
第五节 大气参数的测量单位	(10)
思考题	(13)
第二章 飞行高度及高度变化率的测量	(14)
第一节 飞行高度分类及其定义	(14)
第二节 测量飞行高度的方法	(15)
第三节 气压式高度表	(16)
第四节 高度变化率的测量	(24)
思考题	(32)
第三章 马赫/空速表	(33)
第一节 空速测量的理论基础	(34)
第二节 真空速	(40)
第三节 指示空速表	(44)
第四节 马赫数	(47)
第五节 常用空速术语定义及关系式	(49)
思考题	(51)
第四章 全/静压系统	(52)
第一节 全/静压管	(52)
第二节 全/静压系统构型 (波音 737-700)	(57)
第三节 全/静压系统指示仪表——备用高度/空速指示器	(60)
第四节 大迎角飞行时全/静压系统仪表的指示特点	(61)
第五节 攻角和侧滑角的测量	(63)
思考题	(66)

第五章 大气数据计算机系统	(67)
第一节 大气数据计算机系统功能	(67)
第二节 基本解算关系	(68)
第三节 模拟式大气数据计算机	(72)
第四节 数字式大气数据计算机	(73)
思考题	(111)
第六章 大气数据计算机的基本计算方法	(112)
第一节 大气数据计算公式的一般处理方法	(112)
第二节 最佳非等距线性插值点的选取法	(117)
第三节 实用参数计算	(120)
思考题	(124)
第七章 传感器的校正	(125)
第一节 传感器的静特性校正方法	(125)
第二节 传感器的温度补偿	(127)
第三节 静压源误差校正 (SSEC)	(130)
思考题	(133)
第八章 大气数据计算机系统输出及显示仪表	(134)
第一节 输出信息	(134)
第二节 电动高度表	(138)
第三节 马赫/空速表	(144)
第四节 数字显示高度表	(147)
第五节 综合显示仪表	(147)
思考题	(150)
参考文献	(151)

第一章 概 论

第一节 前 言

在飞机座舱仪表板上，大气数据仪表，如气压高度表、空速表、马赫数表、升降速度表等，占据明显的地位。飞机驾驶员只有随时掌握这些仪表指示的飞行参数及其变化情况，才能确保飞行安全，完成飞行任务。

20 世纪 50 年代前期，除座舱仪表板上装有大气数据仪表外，飞机上还有少数其他设备使用大气数据信息，而这些大气数据信息的测量、传递都是靠分立式仪表或传感器实现的。

50 年代后期，航空事业发展较快，各种高性能飞机相继出现，机载设备随之增多，且性能越来越完善。许多航空电子设备，如仪表指引系统、自动驾驶仪、导航系统、发动机控制系统、飞行数据记录系统、失速警告系统、空中交通管制系统等，都需要大气数据作为原始信息。

随着航空事业的发展，分立式仪表及传感器越来越不能适应高性能飞机的要求，如自动驾驶仪的增益调节、高度和空速保持及伺服回路控制速率等都需要大气数据信息。每一种新的要求通常导致一种新的大气数据传感器的出现，一个分立式传感器只能输出一个信号，当需要大量大气数据信息时，就必须重复使用大量的传感器。这样，不仅增加了数量和体积，而且会使全/静压管路的长度和容量增加，从而增大了全/静压系统的延时误差。此外，由于气流的扰动，使静压孔实际收集到的静压与飞机周围自由气流的压力不相等，从而产生静压源误差。全/静压系统的延迟误差和静压源误差会导致自动驾驶仪控制伺服系统的稳定性变差，因此不能适应高性能飞机的要求。大气数据计算机的出现，解决了高性能飞机的动态响应要求和大量信息要求。大气数据计算机将大量的分立式压力传感器综合为两个传感器，即静压传感器和全压传感器，利用闭环伺服回路技术，通过高度、空速、马赫数等函数解算（函数凸轮或函数电位计），向自动驾驶仪及需要大气数据信息的系统传送所要求的参数。这种综合设备就是众所周知的中央大气数据计算机（CADC）。

模拟式中央大气数据计算机系统与分立大气仪表相比，在结构上有很大改进，整体重量减轻 50%，大大减少了管路的复杂性。全/静压系统的总容量明显减少，从而气动时间常数减小到最低值，自动驾驶仪的动态稳定性有了很大改进。中央大气数据计算机根据静压、全压、总温三个基本原始参数，可以求解出若干个所需的飞行参数，输出目视或控制信号。

模拟式中央大气数据计算机一直持续使用到 20 世纪 60 年代。随着对飞机性能要求的提高，需要越来越多的大气数据及其函数，输出参数包括静压、动压、气压高度、指示空速、

真空速、马赫数、静温、总温、当量空速、空气密度等，及它们的速率和各种函数，使得中央大气数据计算机越来越复杂。一般说来，每增加一个大气数据参数，中央大气数据计算机就要增添一个新的伺服系统和函数解算装置，而每个函数又派生出许多不同形式的输出，仅高度信息输出形式就有：单转子三线同步器、多转子二线同步器、线性二线同步器、带离合器的同步输出、各种线性直流电位计、各种非直流电位计、数字式高度编码、高度控制开关信号等。每个函数伺服系统都有几个输出信号。因此中央大气数据计算机成了一种非常复杂的模拟计算机。系统的复杂性带来功率损耗，重量、体积的增大及平均故障间隔缩短（50~500 h），因此，可靠性成为一个严重问题。

精密的集成电路和运算放大器的出现，使得设计固态模拟式大气数据计算机成为可能，从而去掉了大气数据计算机中的齿轮、凸轮、测速马达、同步器、电位计等伺服机构。随着数字式计算机的微型化，固态模拟式大气数据计算机很快向混合式大气数据计算机方向发展。

20世纪70年代，混合式大气数据计算机（HADC）是大气数据计算机发展的最重要阶段。它以微处理器为核心，具有各种形式的模拟和数字输入/输出功能。

混合式大气数据计算机与机电模拟式大气数据计算机相比，体积和重量减少了约1/2，实际平均故障间隔为2000~3000工作小时，可靠性大大提高了。

20世纪80年代，推出了数字式大气数据计算机（DADC）。这是按照航空运输工业规范ARINC706和ARINC429标准设计的，应用先进的微处理器和半导体存储器技术，由工作程序直接完成大气数据的计算、输入/输出，计算机有处理模拟量、离散量和数字输入的能力，经计算提供数字和离散量输出。典型的ARINC706重量约13 lb^①，平均故障间隔为15000 h。由于采用了ARINC429总线结构，所以，可向飞机上所有具备ARINC429接口的电子设备提供大气数据信息。可以预料，数字式大气数据计算机随着微型计算机技术的迅速发展，将实现计算机功能和监控功能的更加完善，进一步减小体积、重量、功耗；进一步提高可靠性、准确性和计算速度，其价格也将逐渐降低。

第二节 地球大气层

一、地球大气层

地球表面被一层厚厚的大气层包围着。飞机在大气层内运动时要和周围的介质（空气）发生关系，为了弄清楚飞行时介质对飞机的作用，首先必须了解大气层的组成和空气的一些物理性能。

根据大气层的某些物理性能，可以把大气层分为五层：对流层（变温层）、平流层（同温层）、中间层、电离层（热层）和散逸层。

对流层的平均高度在地球中纬度地区约11 km，在赤道约17 km，在两极约8 km。对流层内的空气温度、密度和气压随着高度的增加而下降，并且由于地球对大气的引力作用，在

① 1 lb=0.4536 kg

对流层内几乎包含了全部大气质量的 3/4，因此该层的大气密度最大，大气压力也最高。大气中含有大量的水蒸气及其他微粒，所以云、雨、雪、雹及暴风等气象变化也仅仅在对流层中。另外，由于地形和地面温度的影响，对流层内不仅有空气的水平流动，还有垂直流动，形成水平方向和垂直方向的突风。对流层内空气的组成成分保持不变。

从对流层顶部到离地面约 30 km 之间称为平流层。在平流层中，空气只有水平方向的流动，没有雷雨等现象，故得名为平流层。同时该层的空气温度几乎不变，在同一纬度处可以近似看作常数，常年平均值为 -56.5°C ，所以又称为同温层。同温层内集中了全部大气质量的 1/4，所以大气的绝大部分集中在对流层和平流层这两层大气内，而且目前大部分的飞机也只在这两层内活动。

中间层从离地面 30 km 到 80~100 km 为止。中间层内含有大量的臭氧，大气质量只占全部大气总质量的 1/3000。在这一层中，温度先随高度增加而上升，后又随高度增加而下降。

中间层以上到离地面 500 km 左右就是电离层。这一层内含有大量的离子（主要是带负电的离子），它能反射无线电波，所以又称为热层。高度在 150 km 以上时，由于空气非常稀薄，已听不到声音。

散逸层位于距地面 500~1600 km 之间，这里的空气质量只占全部空气质量的 10^{-11} ，是大气的最外层，因此也称之为“外层大气”。

二、大气紊流

大气紊流（或称湍流）是指大气中空气紊乱流动的现象。大大小小的漩涡和不规则的波动交织在一起，使得大气中某一区域中任一点的风向、风速呈现随机的变化。飞机在这样的区域内飞行，就会产生飞行颠簸。大气紊流的形成原因是多种多样的。近地面风与地表摩擦，造成风速在垂直方向上存在梯度，形成大气边界层，会产生紊流；大气的锋区附近，由于温度和风速的水平差异巨大，会产生紊流；逆温层、对流层顶及其他性质的大气界面的波动，由于失去了稳定性，也会产生紊流；地表受热不均，引起空气不规则流动，甚至气流流过建筑物，飞机飞过留下的尾迹，都会造成紊流。

大气紊流的一个重要特征是具有明显的间断性，紊流区呈现为“片块”状。紊乱流动的区域与相对平静的区域之间往往存在着明显的边界。这就常使得飞行颠簸具有突发性。

风切变通常是指空间任意两点之间风矢量（风向和风速）的变化。对飞行中的飞机而言，风切变与大气紊流类似，主要表现为沿航路的突风。因此，风切变与大气紊流之间很难截然区分。不过通常把那些尺度较大、具有某种规律性的突风遭遇归之为风切变，而那些随机扰动归之于大气紊流。

微下冲气流是对飞行危害最大的风切变类型。现代喷气式飞机在起飞、着陆过程中就会遇到超过自己爬升或下滑速率的下降气流，人们把这种强的下降气流叫作下冲气流。在飞行中，特别在起飞/着陆过程中，必须高度重视。

下冲气流接近地面时，由于受到地面的阻挡，将改变流向，形成辐射的外流。图 1-1 所示为一个典型下冲气流风场的垂直剖面。显然，起落飞机穿越这种下冲气流将经受过逆风到顺风的急剧变化和强的下降气流作用。专家们认为，风切变的这种组合对飞机的飞行是最有害的。

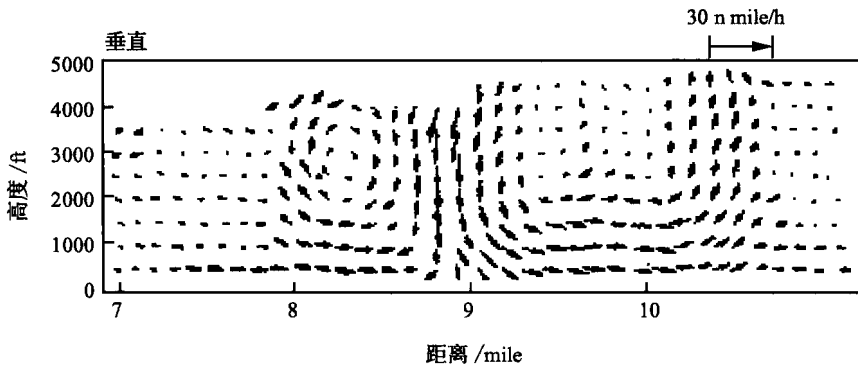


图 1-1 多普勒雷达探测到的下冲气流的风剖面

这些大气变化都会对飞机周围的环境产生影响，进而影响大气数据的测量精度。

第三节 与大气数据相关的参数

1. 静压 (p_s): 飞机周围自由空气的压力。它是空气分子无规则运动中，单位面积上空气分子撞击力的总和。

2. 动压 (p_d): 气流的定向运动具有动能，当气流到达驻点时，动能变为压力能和热能，从而压力升高，温度升高。单位面积上升高的压力称为动压。

$$p_d = \frac{1}{2} \rho_H v^2$$

式中， ρ_H ——标准大气 H 高度上的空气密度；

v ——空速。

3. 冲压 (p_c): 其定义与动压相同。区别是，动压是不可压缩的流体的理想定义。而冲压是考虑了空气的可压缩性。当流速小于 0.3 Ma 时，冲压近似等于动压。

4. 全压 (p_t): 是动压和静压之和，即气流到达驻点时，单位面积上的总压力，所以全压又叫总压。

5. 总温 (T_t): 气流到达驻点时获得的气温叫总温，它包括空气静温和动能所转化的热量，所以总温比静温高。

6. 静温 (T_s): 飞机周围自由空气所具有的温度，它是空气分子无规则运动产生的热量。

7. 攻角 (AOA): 飞机的质量中心运动轨迹与飞机纵轴之间的夹角。攻角又叫迎角，它是在飞机竖轴和纵轴所在平面内测量的角度。

8. 侧滑角 (SSA): 飞机的质量中心运动轨迹与飞机纵轴之间的夹角，它是在飞机的横轴和纵轴所在平面内测量的角度。

第四节 标准大气

标准大气(大气模型)是为了满足飞机仪表标准化的需要,1920年分别由美国和欧洲制定的两个稍有差异的独立模式。国际民航组织(ICAO)于1952年11月7日正式通过了新的标准大气之后,解决了欧美之间的差异。后来虽然对50000 ft^①以上的数据进行了几次修订,但ICAO标准大气仍继续应用。1972年由航空与航天器技术委员会起草,国际民航组织(ICAO)和世界气象组织(WMO)等参加讨论并得到世界各主要国家同意的“国际标准大气”,由国际标准化组织(ISO)正式编入《国际标准 ISO2533—标准大气》。该标准规定了2000~8000 m高度范围内大气各参数高度的关系。

国际标准大气规定如下:

1. 空气为干燥清洁的理想气体,并遵循理想气体方程所确立的关系:

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

式中, p ——气体的压强 (Pa);

ρ ——空气密度 (kg/m^3);

R ——空气气体常数 ($287.05287 \text{ m}^2/\text{K}\cdot\text{s}^2$);

T ——气体的温度 (K)。

2. 国际标准大气以平均海平面作为零高度。海平面大气的标准状态是,气压 p_0 为 760 mmHg^② (或 1013 mbar^③ 或 29.921 inHg^④), 气温 T_0 为 +15°C, 密度 ρ_0 为 $0.125 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。

3. 为了便于探讨大气中压力分布,国际标准大气引用了重力势高度 H 的概念。重力势 Φ 表示地球大气层内某一给定点上空气微粒的势能。在地球重力场内,具有坐标为 x 、 y 、 z 的任一点都可以用此点的重力势 $\Phi(x, y, z)$ 来表示。当 $\Phi(x, y, z)$ 等于常数所确定的面上,所有点的势能都相等时,这个面称为“等位势面”或“等重力势面”。当空气微粒沿地球外法线从位势为 Φ_1 的面移动到位势为 Φ_2 ($\Phi_2 = \Phi_1 + dp$) 的面时,单位质量所做的功为:

$$\begin{aligned} d\Phi &= g_h dz \\ &= g_h dh \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\Phi = \int_0^h g_h dh \quad (1-3)$$

式中, h ——几何高度 (m);

① 1 ft = 30.48 cm

② 1 mmHg = 133.3224 Pa

③ 1 mbar = 100 Pa

④ 1 inHg = 3386.38896 Pa

g_h ——随几何高度 h 变化的自由落体加速度 (m/s^2)。

重力势 Φ 除以标准自由落体加速度 g_n , 得到长度量纲 (m) 的量, 用符号 H 表示, 则:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\Phi}{g_n} \\ &= \frac{1}{g_{n_0}} \int_0^h g_n dh \end{aligned} \quad (1-4)$$

或

$$dh = \frac{g_h}{g_n} dh \quad (1-5)$$

H 值叫重力势高度并用平均海平面作为重力势高度 H 和几何高度 h 的共同基准。

众所周知, 重力是万有引力和地球自转产生的离心力的矢量和, 所以重力是地理纬度和距地心的径向距离的复杂函数。在标准大气重要条件上, 只计万有引力时, 用下式足够精确地求得不同高度的重力加速度:

$$g_h = g_n \left(\frac{r}{r+h} \right) \quad (1-6)$$

式中, $r=6356766$ (m) ——地球的公称半径。

重力加速度随地理纬度 Φ 的变化关系可用朗伯方程表示:

$$g_\Phi = 9.80616(1 - 0.0026373 \cos 2\Phi + 0.0000059 \cos^2 2\Phi) \quad (1-7)$$

在平均海平面上, 由式 (1-6) 所计算的重力加速度及其垂直梯度非常接近按式(1-7)计算的纬度为 $45^\circ 32' 33''$ 的值。

式 (1-6) 代入式 (1-5) 积分后可得重力势高度 H 与几何高度 h 之间的关系:

$$H = \frac{rh}{r+h} \quad (1-8)$$

$$h = \frac{rH}{r-H} \quad (1-9)$$

4. 国际标准大气规定的高度分层、大气温度 T 及气温垂直梯度 β 值, 如表 1-1 所示。

表 1-1 大气温度、温度梯度和高度分层

重力势高度 H/km	温度 T/K	温度梯度 $\beta/K \cdot km^{-1}$
-2.00	301.15	-6.50
0.00	288.15	-6.50
11.00	216.65	0.00
20.00	216.65	+1.00
32.00	228.65	+2.80
47.00	270.65	0.00
51.00	270.65	-2.80
71.00	214.65	-2.00
80.00	196.65	

每一层大气的温度均取为重力势高度的线性函数，即：

$$T_H = T_b + \beta(H + H_b) \quad (1-10)$$

式中， H_b 和 T_b 分别为相应层的重力势高度和大气温度的下界面值， β 为气温的垂直变化率 ($\beta = dT/dH$)。

5. 国际标准大气条件，气压与高度的关系。

设大气相对于地球是静止的，即大气没有水平方向和垂直方向的运动。由于重力的作用，在任意几何高度上，截面积为 dF ，高度为 dh 的微段气柱，其上下表面间的压力差为 dp ，其静平衡条件由静止大气方程确定：

$$dp \cdot dF + \rho g_h dF dh = 0 \quad (1-11)$$

或

$$\begin{aligned} \frac{dp}{p} &= -\rho g_h \\ &= -\frac{\rho g_h}{RT} \end{aligned} \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 改写为：

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g_h}{RT} dh$$

将式 (1-5) 代入上式，得

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g_n}{RT} dH \quad (1-13)$$

当 $\beta \neq 0$ 时，将 $T = T_H = T_b + \beta(H - H_b)$ 代入上式，并在 H_b 至 H ， p_b 至 p_H 的区间积分，即：

$$\int_{p_b}^{p_H} \frac{dp}{p} = \int_{H_b}^H \frac{-g_n dH}{R[T_b + \beta(H - H_b)]}$$

整理上式得：

$$p_H = p_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b}(H - H_b) \right]^{-g_n/\beta R} \quad (1-14)$$

$$H = \frac{T_b}{\beta} \left[\left(\frac{p_H}{p_b} \right)^{-\beta R/g_n} - 1 \right] + H_b \quad (1-15)$$

或

$$\ln p_H = \ln p_b - \frac{g_n}{\beta R} \ln \left[\frac{T_b + \beta(H - H_b)}{T_b} \right] \quad (1-16)$$

当 $\beta = 0$ 时，则：

$$p_H = p_b e^{-\frac{g_n(H-H_b)}{RT_b}} \quad (1-17)$$

$$H = H_b + \frac{RT_b}{g_b} \ln \frac{p_b}{p_H} \quad (1-18)$$

或

$$\ln p_H = \ln p_b - \frac{g_b}{RT_b} (H - H_b) \quad (1-19)$$

上述各式表达了国际标准大气规定的条件下重力势高度 H 与相应高度上的大气压力 p_H 和大气温度间的关系, 故重力势高度又称为标准气压高度并将相应的公式称为标准气压高度公式。为了使用方便, 常将标准大气各参数与高度的关系绘成曲线, 制成表格, 如表 1-2 所示。

表 1-2 国际标准大气参数表

高度 H/km	绝对压力		温度 T_H/K	密度 $\rho_H/(\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4})$	相对密度 $\Delta = \frac{\rho_H}{\rho_0}$	Δ
	p_H/mmHg	$p_H/\text{kgf}/\text{m}^2$				
0.5	806.17	10960.0	291.3	0.1311	1.0489	1.024
0.0	760.00	10332.3	288.0	0.1250	1.0000	1.000
0.5	716.00	9734.0	284.8	0.1191	0.9529	0.9762
1.0	674.08	9164.2	281.5	0.1134	0.9074	0.9526
1.5	634.17	8621.7	278.3	0.1079	0.8637	0.9294
2.0	596.20	8105.4	275.0	0.1027	0.8216	0.9064
2.5	560.09	7614.5	271.8	0.0976	0.7810	0.8837
3.0	525.77	7148.0	268.5	0.0927	0.7421	0.8615
3.5	493.18	6704.8	265.3	0.0880	0.7046	0.8394
4.0	462.24	6284.2	262.0	0.0836	0.6686	0.8174
4.5	432.89	5885.2	258.8	0.0792	0.6340	0.7962
5.0	405.07	5507.0	255.5	0.0751	0.6008	0.7751
6.0	353.76	4809.5	249.0	0.0673	0.5384	0.7340
7.0	307.85	4185.3	242.5	0.0601	0.4811	0.6941
8.0	266.89	3628.4	236.0	0.0535	0.4286	0.6548
9.0	230.46	3133.1	229.5	0.0475	0.3805	0.6168
10.0	198.16	2694.0	223.0	0.0421	0.3367	0.5803
11.0	169.63	2306.1	216.5	0.0371	0.2969	0.5449
12.0	144.87	1969.5	216.5	0.0317	0.2536	0.5036
13.0	123.72	1682.0	216.5	0.0271	0.2166	0.4654
14.0	105.67	1436.5	216.5	0.0231	0.1850	0.4301
15.0	90.24	1226.9	216.5	0.0197	0.1580	0.3975

续表

高度 H/km	绝对压力		温度 T_H/K	密度 $\rho_H/(\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4})$	相对密度 $\Delta = \frac{\rho_H}{\rho_0}$	Δ
	p_H/mmHg	$p_H/\text{kgf}/\text{m}^2$				
16.0	77.07	1047.8	216.5	0.0169	0.1349	0.3673
17.0	65.82	894.8	216.5	0.0144	0.1152	0.3394
18.0	56.21	764.2	216.5	0.0123	0.09839	0.3137
19.0	48.01	652.7	216.5	0.0105	0.08403	0.2899
20.0	41.00	557.4	216.5	0.0090	0.07177	0.2679
21.0	35.02	476.1	216.5	0.0077	0.06129	0.2476
22.0	29.90	406.6	216.5	0.0065	0.05234	0.2288
23.0	25.54	347.2	216.5	0.0056	0.04470	0.2114
24.0	21.81	296.5	216.5	0.0048	0.03818	0.1954
25.0	18.63	253.3	216.5	0.0041	0.03261	0.1806
26.0	15.94	216.8	219.5	34.40×10^{-4}	275.2×10^{-4}	0.1659
27.0	13.69	186.1	222.4	29.14×10^{-4}	233.1×10^{-4}	0.1526
28.0	11.79	160.3	225.4	24.76×10^{-4}	198.1×10^{-4}	0.1407
29.0	10.16	138.1	228.4	21.07×10^{-4}	168.5×10^{-4}	0.1298
30.0	8.77	119.3	231.4	17.96×10^{-4}	143.7×10^{-4}	0.1199
31.0	7.59	103.2	234.3	15.34×10^{-4}	122.7×10^{-4}	0.1108
32.0	6.58	89.47	237.3	13.13×10^{-4}	105.1×10^{-4}	0.1025
33.0	5.72	77.77	240.2	11.27×10^{-4}	90.19×10^{-4}	0.0950
34.0	4.97	67.64	243.2	9.687×10^{-4}	77.49×10^{-4}	8.802×10^{-2}
35.0	4.34	59.00	246.2	8.347×10^{-4}	66.87×10^{-4}	8.172×10^{-2}
36.0	3.79	51.49	249.1	7.198×10^{-4}	57.58×10^{-4}	7.588×10^{-2}
37.0	3.31	45.05	252.1	6.224×10^{-4}	49.80×10^{-4}	7.057×10^{-2}
38.0	2.90	39.45	255.0	5.386×10^{-4}	43.08×10^{-4}	6.563×10^{-2}
39.0	2.55	34.62	258.0	4.673×10^{-4}	37.39×10^{-4}	6.114×10^{-2}
40.0	2.24	30.40	261.0	4.058×10^{-4}	32.46×10^{-4}	5.697×10^{-2}
41.0	1.97	26.76	263.9	3.532×10^{-4}	28.25×10^{-4}	5.316×10^{-2}
42.0	1.74	23.59	266.9	3.079×10^{-4}	24.63×10^{-4}	4.963×10^{-2}
43.0	1.52	20.81	269.8	2.686×10^{-4}	21.46×10^{-4}	4.636×10^{-2}
44.0	1.35	18.39	272.8	2.348×10^{-4}	18.79×10^{-4}	4.334×10^{-2}
45.0	1.20	16.28	275.7	2.056×10^{-4}	16.45×10^{-4}	4.056×10^{-2}
46.0	1.06	14.43	278.7	1.803×10^{-4}	14.43×10^{-4}	3.799×10^{-2}

续表

高度 H/km	绝对压力		温度 T_H/K	密度 $\rho_H/(\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4})$	相对密度 $\Delta = \frac{\rho_H}{\rho_0}$	Δ
	p_H/mmHg	$p_H/\text{kgf}/\text{m}^2$				
47.0	0.94	12.81	281.6	1.584×10^{-4}	12.67×10^{-4}	3.560×10^{-2}
48.0	0.84	11.37	282.7	1.400×10^{-4}	11.20×10^{-4}	3.347×10^{-2}
49.0	0.74	10.09	282.7	1.243×10^{-4}	9.946×10^{-4}	3.157×10^{-2}
50.0	0.66	8.958	282.7	1.104×10^{-4}	8.829×10^{-4}	2.972×10^{-2}
51.0	0.58	7.953	282.7	0.9799×10^{-4}	7.839×10^{-4}	2.800×10^{-2}
52.0	0.52	7.061	282.7	0.8700×10^{-4}	6.960×10^{-4}	2.638×10^{-2}
53.0	0.46	6.282	282.7	0.7741×10^{-4}	6.192×10^{-4}	2.488×10^{-2}
54.0	0.41	5.566	280.5	0.6910×10^{-4}	5.528×10^{-4}	2.351×10^{-2}
55.0	0.36	4.934	276.7	0.6210×10^{-4}	4.968×10^{-4}	2.229×10^{-2}
56.0	0.32	4.363	272.8	0.5569×10^{-4}	4.455×10^{-4}	2.111×10^{-2}
57.0	0.28	3.857	269.0	0.4993×10^{-4}	3.995×10^{-4}	1.998×10^{-2}

第五节 大气参数的测量单位

1. 压力单位

压力是单位面积上的作用力。由于单位制不同以及使用场合的差异，压力单位也有很多种。下面介绍几种常用的压力单位。

(1) 帕斯卡 (Pa)：每平方米的面积上作用有关牛顿的力。它是国际单位制 (SI) 中规定的压力单位，也是我国国标中规定的压力单位。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

(2) 标准大气压 (atm)：当气温为 0°C 、重力加速度为 $9.80665 \text{ m}/\text{s}^2$ 、高度为 0.760 m 、密度为 $13.5951 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 水银柱所产生的压力。

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

(3) 工程大气压 (at)： 1 cm^2 的面积上均匀作用有 1 kg 力所产生的压力。

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

(4) 巴 (bar)： 1 cm^2 的面积上均匀作用有 10^6 dyn 的力所产生的压力。

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyn}/\text{cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

巴是厘米、克、秒制中的压力单位，常用于气象和航空测量技术中，巴的 $1/1000$ 写作为 (mbar) 或 (mb)。

(5) 毫米液柱：以液柱（水银或水或其他液体）高度来表示压力的大小。常用的有毫米汞柱（mmHg）和毫米水柱（mmH₂O）。1毫米汞柱压力又称为1托（1 Torr）。在标准大气条件下，即温度 $t=0^{\circ}\text{C}$ 、重量密度 $r_n=1.33322 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、重力加速度 $g_n=9.80665 \text{ m/s}^2$ 时，

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atm} = 133.322 \text{ Pa}$$

而对于水来说，温度 $t=4^{\circ}\text{C}$ 、重量密度 $r_n=1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 、重力加速度 $g_n=9.80665 \text{ m/s}^2$ 时。

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$$

(6) 磅力/英寸² (PSI)：1 in² 的面积上均匀作用 1 lb 力时所产生的压力。

$$1 \text{ PSI} = 1(\text{lb}/\text{in}^2) = 6.89479 \times 10^3 \text{ Pa}$$

下面由表 1-3 和表 1-4 示出各种压力单位换算关系。

表 1-3 压力单位换算表 (一)

	帕 (斯卡) (Pa) (N/m ²)	达因/厘米 ² (dyn/cm ²)	牛/毫米 ² (N/mm ²)	千克力/厘米 ² (kgf/cm ²)	磅力/英寸 ² (lbf/in ²)	标准大气压 (atm)
1 帕 (Pa)	1	10	1×10^{-6}	1.01972×10^{-6}	1.45038×10^{-4}	9.86923×10^{-6}
1 标准大气压 (atm)	101325	1.01325×10^6	0.101325	1.03323	14.6959	1
1 达因/厘米 ² (dyn/cm ²)	0.1	1	1×10^{-7}	1.01972×10^{-6}	1.45038×10^{-6}	0.986923×10^{-6}
1 牛/毫米 ² (N/mm ²)	1×10^8	1×10^6	1	10.1972	145.038	9.86923
千克力/厘米 ² (kgf/cm ²)	9.80655×10^4	0.980655×10^6	9.80665×10^{-2}	1	14.2233	0.967841
磅力/英寸 ² (lbf/in ²)	6.89476×10^3	6.89476×10^4	6.89476×10^{-3}	0.070307	1	0.0680462

表 1-4 压力单位换算表 (二)

	帕 (Pa) (N/m ²)	巴 (bar)	毫巴 (mbar)	标准大气压 (atm)	托 (Torr)	千克力/厘米 ² (kgf/cm ²)
1 帕 (Pa)	1	1×10^{-5}	0.01	9.86923×10^{-6}	0.750062×10^{-2}	1.01972×10^{-6}
1 巴 (bar)	1×10^5	1	1000	0.986923	750.062	1.01972
1 毫巴 (mbar)	1×10^2	1×10^{-3}	1	9.86923×10^{-4}	0.750062	1.01972×10^{-3}