

自然界及工程技术中的 空气动力学

[苏联] B. П. 卡兹涅夫斯基著

吳 小 椿 譯

內 容 提 要

本書以日常生活中的例子說明空气动力学的基本理論，可以帮助讀者理解空气动力現象本質。書中对飞行器的發展过程及未来远景作了概括的闡述，給青年們提出了进一步征服自然的偉大任务。

本書可供中等学校学生作課外讀物，也可供一般与空气动力学有关的工作人員作参考。

自然界及工程技术中的空气动力学 АЭРОДИНАМИКА В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

原 著 者 [苏联]В. П. Казневский
原出版者 УЧПЕДГИЗ. 1955年版
譯 者 吳 小 椿

*

科学技術出版社出版

(上海愚園西路 336 弄 1 号)

上海市書刊出版業營業許可証出 0 7 9 号

上海市印刷五厂印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書号: 13119·72

开本 787×1092 1/32 · 印張 3 13/16 · 字數 81,000

1957 年 2 月第 1 版

1957 年 2 月第 1 次印刷 印數 1—5,000

定价: (10) 0.55 元

序 言

航空工程、火箭技术和通风技术的迅速发展是和一门叫做空气动力学的科学成就紧密联系着的。

空气动力学是研究空气(气体)运动的规律以及物体与绕流过它的空气之间的相互作用力的科学。

如果我们观察飞机、直升飞机、火箭、枪弹、汽车、通风机的桨叶、风力发动机桨叶和降落伞的运动；以及鸟类、昆虫、飞鱼、飞栗鼠、枫树种子的飞行，或者水的运动现象，沙旋风等等，在所有这些各式各样的情况下都有空气动力的作用。

在自然界和工程技术中有无数个物体与空气或与其他气体发生相互作用的例子。

在空气或其他气体流动时会发生什么现象呢？如果在这气流中放入物体，或者相反地使物体在静止不动的气体中运动又会发生什么现象呢？

空气动力学就会回答这些问题。在本书中将要阐述空气动力学的基本规律和它在自然界及工程中的应用。

俄国科学家是空气动力学的奠基人

自古以来人们就怀着嫉妒的心情注视着鸟的飞行。他们看到鸟儿扑动着翅膀在空中多么轻巧地飞行着，怎样在空中展翅翱翔。这个自然界中的实例唤起人们飞行的愿望。这个愿望由俄国科学家、研究家和设计家的手中实现了，在他们研究和征服空气的过程中作出了巨大贡献。天才科学家，俄国第一个院士

M. B. 罗蒙諾索夫 1754 年在自己的研究基础上設計和制成了历史上第一架直升飞机，并且用它来把自己創造的气象仪器升到空中。

另一位天才的学者 Д. И. 敏杰列叶夫也对空气动力学的发展作出了巨大貢獻。他进行了液体阻力的研究工作，并把它作为进一步研究物体在空气中的运动的基础。

1882 年，俄国海軍軍官 А. Ф. 莫扎伊斯基制成了世界上第一架飞机，并完成了飞行。可惜莫扎伊斯基的飞行在当时并不能給他帶來光荣。

自然界及工程技术中的飞行問題与空气动力学有着各种各样錯綜复杂的联系。偉大的俄国空气动力学家 Н. Е. 儒可夫斯基教授在研究了鳥的翱翔和滑翔机的运动以后，創立了一門新的科学——飞行力学。

他首創了机翼和螺旋槳理論，并用它解釋了支持飞机在空中飞行的升力来源。

Н. Е. 儒可夫斯基教授是飞机飞行科学理論的創造者。他在航空、风力发动机、螺旋推进器、鳥的飞行、旋风和渦流現象等方面給人們留下了許多杰出的著作。

1918 年 Н. Е. 儒可夫斯基在 В. И. 列宁的指示下建立了中央航空流体动力学研究院 (ЦАГИ)，这个研究院在发展現代化航空技术上起了巨大作用。

Н. Е. 儒可夫斯基的学生 С. А. 察普雷金院士是空气动力学的一个新部門——高速空气动力学的奠基者。这門科学为現代飞机、火箭、蒸汽渦輪机和空气压缩机的叶片所能达到的高速开辟了道路。

Н. Е. 儒可夫斯基的另一个学生 Б. Н. 尤列叶夫院士在机

翼、螺旋槳以及直升飞机的理論和計算方面进行了巨大的研究工作。

最近十年来杰出的苏联学者 С. А. 赫利斯契安諾維奇院士对高速气流情况下物体繞流問題进行了巨大的研究工作。此外苏联学者 И. В. 奧斯托斯拉夫斯基教授, Я. М. 謝列布里斯基教授, А. А. 多罗德尼岑教授等人都在空气动力学方面获得了巨大成就。

这样, 苏維埃的空气动力学家們就以自己优秀的研究成果帮助了著名的飞机設計家 А. Н. 屠波列夫, С. В. 伊留申, А. И. 米高揚, С. А. 拉沃奇金等人創造出完善的新型飞机。

目 录

序言

第一章 空气动力学基本概念	1
1. 大气	1
2. 两个空气动力学方程式	5
3. 物体在空气中的运动	11
4. 升力的产生	18
5. 高速下的空气动力	26
第二章 工程技术中的空气动力学	30
1. 风洞	30
2. 飞机	36
3. 滑翔机	51
4. 螺旋桨	58
5. 直升飞机	62
6. 降落伞	67
7. 枪炮和火箭炮	71
8. 风力发动机	79
9. 汽车的空气动力学	83
第三章 自然界中的空气动力学	86
1. 鳥的飞行	86
2. 昆虫的飞行	96
3. 哺乳动物、魚和植物的飞行	101
4. 大气中的空气动力现象	108
結束語	116

第一章 空气动力学基本概念

1. 大 气

地面空气的特性对物体在空气中的运动有很大的影响。

要研究物体在空气中的运动就应当先熟悉空气的特性。大气层由地面一直扩展到极高的高空。靠近地球表面空气的压力和密度有很重大的意义。空气的压力和密度随高度的增加而降低,在800~1300千米的高度上空气逐渐地(无形地),变成非常稀薄的气体,它的密度变到非常小,每一立方厘米里仅存几十个分子。

空气的密度对物体的运动起着巨大的作用,这就是空气密度越大,它对运动物体的影响越大。

通常在空气动力学中都把重度和密度区分开来。

重度就是单位体积空气的重量。

密度就是包含在单位体积内的空气的质量。由下面就可以看出高度增加后密度降低得有多末快,在①5千米高度时,密度下降为地面的62.5%,在20千米高空,密度下降为地面的6.41%。由于密度的降低,高空中任何物体的空气阻力都要比地面减少。当火箭在12千米高空飞行时,那里空气密度只有海

① 显然,重度和密度不是别的,而是用工程单位制度表现出来的比重和密度。以后在本书中所有的计算和结论中都采用工程单位制度(米—千克—秒)——原注

平面上的 25%，因此火箭也仅承受原阻力的四分之一，而在 32 千米的高空，阻力就只有原来的 1%。由此可见高空飞行是多么地有利。

空气动力主要是以压力的形式作用在物体上的。

象任何气体状态的物质一样，在空气的分子间都有不大的相互作用力，这种力量比液体分子间的相互作用力小得多。

空气的分子经常处于一种不断的、无规则的运动状态。通常认为气体的压力是运动分子碰到障碍物时碰撞力的总合。分子

的运动速度和碰撞障碍物的次数，取决于气体温度和单位容积内所含的气体分子的数目。

在工程技术上压强是以每平方厘米上作用多少千克来计算的（千克/厘米²）。1 千克/厘米²的压强叫做一个工程大气压，并用 1 *at*. 的方式标出。物理上计算大气压时（物理上的大气压写作 *atm*）采用海平面上的大气压，这相当于一个贯穿整个

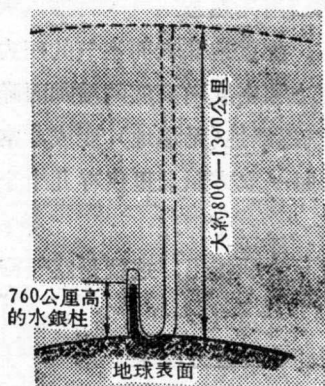


图 1. 大气压力被 760 毫米高的水银柱所平衡

大气层的空气柱的压强。这个气柱的压力等于 0°C 时，760 毫米高的水银柱所产生的压强（图 1）。

测量压力的仪表叫做压力计。仅用以测量大气压的压力计叫做气压计。

象在海洋中底层的水的质点所承受的压力比表面上水的压力大一样，在“空气的海洋”里靠近地面的空气质点所受的压力也比高处的质点大。下层空气被压缩的程度也比所有比它高的

地方厉害。

为了实际上的应用,人們測出在对流层里高度每增加100米气压就下降 0.01 atm 。

空气的特性在一个高度和另一个高度上是不相同的。在我們所处的緯度上,地面附近的大气压也会变化。当溫度由 -45°C 变动到 $+35^{\circ}\text{C}$ 时,压强可由 730 毫米的水銀柱增加到 780 毫米。由于空气密度的变化,作用于物体上的空气动力也有变化。結果在不同時間、不同位置上的飞机或者模型所承受的力也有很大的不同。为了便于空气动力計算,和比較試驗的結果,就商定把一定高度上的气压、溫度、密度和声音傳播速度看作是不随进行試驗的時間和場所而改变的常数,并相应地拟訂出国际标准大气表(MCA),表上的压力、溫度、空气密度和音速虽然是人为确定的,毕竟还是接近于中緯度大气的夏季情况的平均数据。在国际标准大气表上,海平面的情况采用这样的数据:气压为 760 毫米水銀柱高,气温 $t=15^{\circ}\text{C}$, 密度 $\rho=0.125$

$\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$ ●, 声音的傳播速度 341 米/秒。

高度增加时这些数量的变化,可以很明显地由所附的国际标准大气表內看出来。

大气分成对流层(变溫层)、平流层(同溫层)、和电离层。离地面 9~11 千米以內的空气层叫对流层,那里有大量的云、风和暴风雨。那里发生着所有的气象变化——这就是制造天气的洪炉。对流层里气温和气压随离开地面高度的增加而降低。在对流层以上一直到 80~90 千米高度的那一层空气叫平流层。层

● 工程單位制(千克—米—秒)中,密度的單位为 $\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$ ——原注

国际标准大气表

高度 H (以米表示)	压力 P (以多少毫米水银 柱高表示)	温度 t° (以摄氏度数表示)	密度 ρ ($\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$)
0	760.0	+15.0	0.125
500	716.0	11.8	0.119
1,000	674.0	8.5	0.113
2,000	596.1	2.0	0.103
3,000	525.7	- 4.5	0.092
4,000	462.2	-11.0	0.083
5,000	404.8	-17.5	0.075
6,000	353.7	-24.0	0.067
7,000	307.8	-30.5	0.060
8,000	266.8	-37.0	0.053
9,000	230.4	-43.5	0.047
10,000	198.1	-50.0	0.042
11,000	169.5	-56.5	0.037
15,000	90.2	-56.5	0.019
20,000	40.9	-56.5	0.008
25,000	18.6	-56.5	0.004
30,000	8.4	-56.5	0.001

內在 11~30 千米的高空的空气温度約为零下 50~60°C, 在 30~55 千米高度又升高到零上 40~50°C, 在平流层的上层空气的温度又重新降到零下 70~80°C。平流层里几乎没有水蒸汽, 偶而也会出现云朵。平流层内經常吹着大风。电离层是最高的一层大气, 大約从 80~90 千米的高度上开始一直扩展到 800~1,300 千米。这层空气已經电离了。

苏联的飞行家和气象学家对于对流层和平流层的下层已有

足够的了解。大家都知道 1933 年苏联的同温层气球“苏联号”到达 19 千米高度的英雄飞行, 1934 年“奥索^①. 1 号”到达 22 千米的高空; 莫勒察諾夫教授設計的、裝有自动記錄儀器的探空气球一直飞到 40~42 千米的高空。

近年来人們对电离层研究的兴趣增加了, 已經开始进行現代远程火箭路綫的研究。

研究高空大气层有許多方法。其中包括放送气象用的火箭, 观测流星——隕石的墜落(在 80~130 千米高空), 观察有时在高达 1,000~1,200 千米处出現的北极光, 和应用无綫电物理学方法等。

2. 两个空气动力学方程式

气体或液体流动遵循着两个重要的方程式: 流动連續性方程式和柏努利方程式。

我們將通过下面的例子認識它們。

流动連續性方程式有时又称为流量不变或者連續方程式。

我們观察在平原上靜靜流过的河。如果河流在从横断面或所謂水流断面很大的地方, 流到两岸狹窄的河床时, 它的横断面减少了, 流动的速度就加快了。

我們想一想: 为什么河水在窄的地方会流快了呢? 要解决这个问题就应注意到水的流量, 流量这个名詞就是指單位時間內通过这个横断面的水的质量。如果水連續地流动, 沿途沒有分流出去的, 那末無論在河流的大的断面或小断面上水的流量都

① 奥索是苏联国防飞行化学建設后援会的简称——譯者

一样。所以，为了要在小断面上与大断面上流出同样多的水量，小断面上的流速就应该快一些。

当水流或气流在管中通过，或者环绕各种物体时，也象水在河中流动一样。在窄狭的地方运动速度加快，在宽阔的地方流动得慢。

罗蒙诺索夫的质量不灭定律是作为流动连续性方程式的基础的。例如：有多少空气进入风洞就一定有同样多的空气由那里流出来。

每秒进入管口的空气质量是不难计算出来的。因此必须把横断面积乘以气流速度，再乘以空气密度（图 2）。这样就得到：

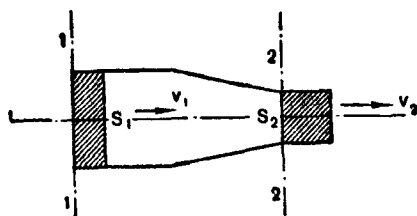


图 2. 导出流动连续性方程式

$$G_1 = S_1 v_1 \rho$$

式中：

G_1 ——流量

S_1 ——横断面积

v_1 ——气流速度

ρ ——密度

在同样一段时间内，由另一管口也流出相同流量的空气。

$$G_2 = S_2 v_2 \rho$$

使两方程式的右端相等，就得到连续性方程式：

$$S_1 v_1 \rho = S_2 v_2 \rho$$

消去 ρ 得到

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

或

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

这就是說：流动速度与气流的横断面成反比。

柏努利方程式

这个方程式广泛地应用于空气动力学計算中。它是由杰出的学者、物理学家和气象学家、彼得堡科学院院士达尼尔·柏努利(1700~1782)得出的。

柏努利方程式可以用通过逐渐狭小的管路中的气流为例来说明(图3)。

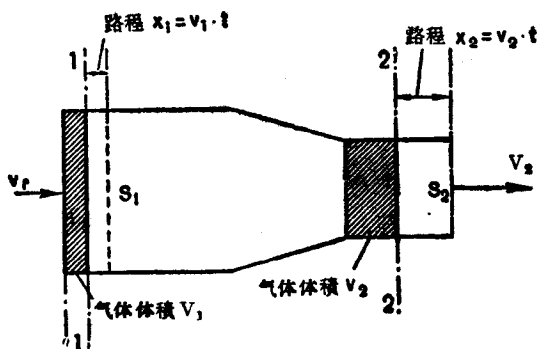


图 3. 导出柏努利方程式

在管子狭窄的一端空气流速比宽阔的一端大，所以气流在细管中的运动加快。只有在力的作用下才能产生加速运动。这个力是由于压力差产生的。因此，在管子的宽阔部分的压力一定要比狭窄的地方大。

在时间 t 内，通过 1—1 断面流入的气体体积等于

$$V_1 = S_1 x_1 = S_1 v_1 t$$

在同一时间 t 内, 通过 2—2 断面流出的气体体积等于

$$V_2 = S_2 x_2 = S_2 v_2 t$$

流入气体为克服静压力所作的功等于

$$A_1 = F_1 x_1 = P_1 S_1 v_1 t$$

这里: $F_1 = P_1 S_1$; P_1 —1—1 面上的静压力。

流出气体所作的功:

$$A_2 = F_2 x_2' = P_2 S_2 v_2 t$$

这里: 力 $F_2 = P_2 S_2$; P_2 —2—2 面上的静压力。

流入气体的动能等于

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{S_1 v_1 \rho t v_1^2}{2}$$

这里: 气体的质量 $m = S_1 v_1 \rho t$, 而 ρ 是气体密度^①

流出气体的动能

$$\frac{mv_2^2}{2} = \frac{S_2 v_2 \rho t v_2^2}{2}$$

这里: 气体质量 $m = S_2 v_2 \rho t$

根据能量不灭定律, 流出气体和流入气体的总能量是相等的, 可得到下式:

$$P_1 S_1 v_1 t + \frac{S_1 v_1 \rho t v_1^2}{2} = P_2 S_2 v_2 t + \frac{S_2 v_2 \rho t v_2^2}{2}.$$

又注意到流入和流出气体体积相等。

$$S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$$

就得到下面的形式

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

^① 质量等于密度乘体积, $v_1 t$ 是在 t 时间内流入气流所走的路程, 再乘上面积 S 后就是相应的体积——译者

这就是柏努利方程式(这种形式适用于亚音速的流动)。

P_1 及 P_2 是 1—1 面及 2—2 面上的静压力 (以千克/厘米² 计算)。

$\frac{\rho v_1^2}{2}$ 及 $\frac{\rho v_2^2}{2}$ 是 1—1 面及 2—2 面的速度压头 (以千克/厘米² 计算)。

静压力可以由作用于管壁上的压力来量度出来, 这时, 气流是沿管壁运动。可以用一根管口平面和流向平行的有刻度的细管子来测量 (图 4)。

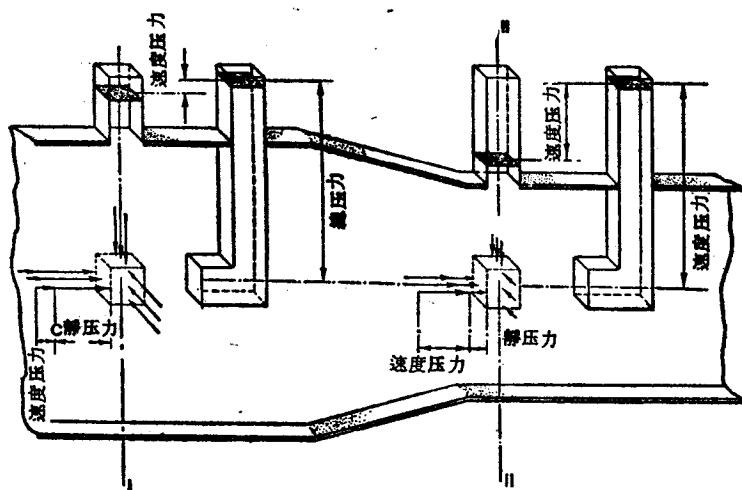


图 4. I—I 断面上气流流速小——静压力大; 在 II—II 断面上流速增加了——静压力减低

速度压头, 或有时称为动压力或速度压力, 可以认为是 (运动着的气体) 作用于物体正对着气流的那个表面上的气体压力。

静压力和动压力之和称为总压力。如果在气流中插入一根

有刻度的細管，并把它末端弯曲，使入口正对着迎面的气流，就可以测出总压力。

速度压头根据管中总压力和静压力之差决定。

当摩擦力的影响可以忽略时，总压力在任何断面上保持为常数。

速度压头随着气流速度的增加而增加。当增加速度时静压力将会怎样变化呢？显然，它必須降低，否則总压力將不能保持常数。速度和静压力間的依从关系，可以举一系列的例子來說明。

当两条平行地行駛着的船相遇时（图 5a），在两条船之間流过的水的相对运动速度比外面快，結果两条船之間的静压力比外面小；在这个压力差的作用下，两条船开始彼此接近，可能发生互撞。1912 年，当英国輪船“奥林普”号以特別大的速度超过另一船时，就发生了类似的情况，使船出事。

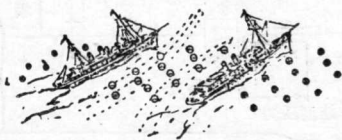


图 5. a 流过两艘靠得很近的船只的水的流速，在两船之間比外面快，因此，两船間水的静压力比外面小

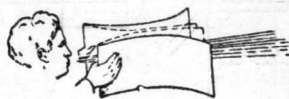


图 5. 6 紙片之間的压力比外面小，因此，紙片相向靠攏

你自己也可以进行些容易的实驗来验证它，拿两张薄紙弯成半圓形，并把它們紧紧地靠在一起，然后在它們中間試着吹气。你就会很惊奇地注意到，紙片不但不彼此分开，反而会彼此靠攏（图 56）。

另一个实验也很有趣。如果拿一条向下卷曲的纸片，沿着它的上面吹气，它就会伸直（图 5B）。

很强的飓风吹过房子的尖顶时，空气的速度提高，在顶上造成稀薄带，在房顶下面强大的空气压力就造成升力，可能把房顶掀去（图 5r）。

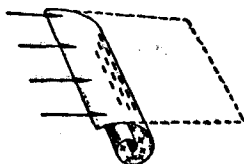


图 5. B 如果沿着弯曲纸条的上面吹气，在压力差的作用下它会伸直

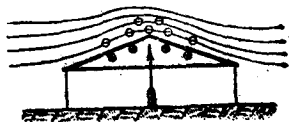


图 5. r 风引起静压力差，在屋顶上造成升力

3. 物体在空气中的运动

了解了空气的特性以后，我们来观察一下任意物体在空气中的运动。为此，我们把它化为一个最简单的情况——气体作用到方向垂直于它的长方形板的情况。例如，使一块大的层板在空气中移动，或相反地把它放在吹向它的气流中。空气会压向薄板，阻止它运动。空气对物体的反作用通常称为物体的阻力或者“迎面阻力”，并且用 Q 来表示。“迎面阻力”这个名词说明，这个力量作用在和气流相遇的物体上，并阻止物体的运动，因为力的方向是直接对着物体的。产生迎面阻力的原因，基本上的解释是：它是由于物体前后的压力差，物体表面与空气的摩擦力和在运动物体后面产生的旋涡影响所造成的。当气流流到物体前面时，形成稍微增高压力的空气区域，这就迫使撞上来的空气流在物体前面预先让开（图 6）。