

高等学校教学用书



空气动力学 实验指导书

A. E. 馬尔丹諾夫, Д. С. 高尔謝宁著



高等教育出版社

高等学校教学用书



空气动力学实验指导书

A. B. 馬尔丹諾夫, Д. С. 高尔謝宁著
張桂联等译校

高等教育出版社

本書原系根据苏联国立国防工业出版社(Государственное издательство оборонной промышленности)出版、馬尔丹諾夫(А. К. Мартынов)、列緬尼可夫(А. А. Ременников)和高尔謝宁(Д. С. Горщенин)合著“空气动力学实验指导书”(Руководство к практическим занятиям в аэродинамической лаборатории) 1948年版譯出,現按1956年版修訂。旧版原書經苏联高等教育部审定为高等航空学校教学参考書,譯本書名为“空气动力学实验手册”。新版原書为莫斯科航空学院丛書之一,著者为馬尔丹諾夫和高尔謝宁两人,譯本改用現名。

本書簡單介紹近代空气动力学实验的基本原理,叙述某些典型实验的进行方法和空气动力学实验室中所用的主要仪器,并包含了整理实验結果所需用的計算公式。

本書旧版由顧高墀和連淇祥翻譯,張桂联和夏培厚校訂,并由顧高墀按原書新版修訂。

空气动力学实验指导书

A. K. 馬尔丹諾夫, Д. С. 高尔謝宁著

張桂联等譯校

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号
(北京市書刊出版業營業許可証出字第054号)

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店发行

統一書号 15010·417 开本 850×1168 1/32 印张 4 13/16 插頁 1

字數 111,000 印数 3,201—5,000 定价 (4) ¥ 0.70

1954年12月第1版

1959年7月第2版 1959年7月上海第3次印刷

序

近代航空制造业之所以能蓬勃發展，都是靠了大規模的基于先进理論的空气动力学实验。因此在培养航空工程师的过程中，实验空气动力学就成一專門的課程。每一航空工程师，不管他的专业为何，都要学会如何正确地去安排实验，去估計实验的精确度，以及根据实验結果来推出他所需要的結論。

空气动力学实验課的目的在于帮助学生更进一步掌握那些在空气动力学課程(特别是实验空气动力学課程)講課中所学到的全部知識。实验課还帮助学生养成習慣，去灵活运用空动計算中常用的基本关系式。此外，在空动实验室中，学生还将熟悉实验方法、实验設備以及整理实验数据的方法。

为了使學生通过空动实验課后有所得益，就必须要求學生在实验前好好地預習理論課程中有关的章节，在实验小組工作中充分發揮各人的主动精神，并养成用测微比压計、气动力天平以及其他各种仪器工作的習慣，此外还要学会如何整理实验結果。

在本書这次的第二版中，列入了十九个最有兴趣的典型空动实验作业。这本实验指导書是按照以奥尔忠尼啓則 (С. Орджоникидзе) 命名的莫斯科航空学院空气动力学实验室的情况編写的，但其中大部分实验作业在任何空动实验室中都能适用。

每一实验作业預計在两个学时內完成，包括教师的講解在內。

作者对莫斯科航空学院飞机空气动力学教研室的全体同志——教师和实验員致以深切的謝意，感謝他們每天辛勤地为改进空动实验而努力。特別要感謝斯特拉捷娃 (Н. В. Стражева) 副教授，她审閱了全部手稿并提出了很多寶貴的意見。

規定符号

S —机翼面积;中截面积(公尺²)。

F —面积(公尺²)。

a —試驗时比压計内液面的位置(公厘)。

a_0 —試驗前比压計内液面的位置(公厘)。

h —試驗时比压計内酒精面的高度(公厘)。

h_0 —試驗前比压計内酒精面的高度(公厘)。

Δh —比压計容槽内液面高度的改变量(公厘)。

φ —比压計支管的傾斜度($^{\circ}$)。

x, y, z —風軸系中的坐标。

x_1, y_1, z_1 —机体軸系中的坐标。

r —向量半徑;分度盘半徑(公厘)。

l —距离,長度,翼展(公尺)。

b —翼弦(公尺)。

α —冲角($^{\circ}$)。

$\Delta\alpha_r$ —由風洞誘导作用而造成的洗流角($^{\circ}$)。

$\Delta\alpha_{CK}$ —風洞中气流的偏斜角($^{\circ}$)。

S_B —升降舵面积(公尺²)。

b_B —升降舵弦長(公尺)。

δ_B —升降舵傾斜角($^{\circ}$)。

R —螺旋桨半徑(公尺)。

δ —附面层厚度(公厘)。

V —流速;螺旋桨前进速度(公尺/秒)。

ν —运动粘性系数(公尺²/秒)。

n_0 —每秒轉数(1/秒)。

n_M —每分轉数(1/分)。

ω —角速度(1/秒)。

a —音速(公尺/秒)。

u —附面层内的速度(公尺/秒)。

u_0 —附面层边界上的速度(公尺/秒)。

p —压强;大气中水蒸汽压强(公斤/公尺²)。

B —大气压(公厘水銀柱)。

- γ —比重(單位体积的重量)(公斤/公尺³)。
 ρ —空气的質量密度(公斤·秒²/公尺⁴)。
 Q —液体量,迎面阻力;荷重(公斤)。
 ΔQ —迎面阻力改变量;模型支撑的迎面阻力(公斤)。
 q —速度头(公斤/公尺²)。
 τ_0 —物面上的摩擦应力(公斤/公尺²)。
 P —在天平上量得的举力;螺旋桨的拉力(公斤)。
 Y —升力(公斤)。
 ΔP —模型支撑的側向力(公斤)。
 M_x —俯仰力矩(公斤·公尺)。
 T —螺旋桨功率(机械單位)(公斤·公尺/秒)。
 M_H —螺旋桨旋轉的抵抗力矩(公斤·公尺)。
 N —功率(馬力)。
 M_m —铰鏈力矩(公斤·公尺)。
 K —測微比压計系数;机翼升阻比。
 ϵ_p —考虑空气压缩性的修正系数。
 ξ —風速管系数。
 ζ —水力損失系数。
 μ —風洞流場系数。
 m —比例尺。
 $\bar{p}$ —压强系数。
 R —考虑粘性的相似判別数。
 M —考虑压缩性的相似判別数。
 c_x —迎面阻力系数。
 c_{xi} —誘导阻力系数。
 c_y —升力系数。
 ϵ —气流紊流度。
 λ —展弦比;螺旋桨相对进程(或称速比)。
 $m_z(c_m)$ —俯仰力矩系数。
 m_y —偏航力矩系数。
 m_m —铰鏈力矩系数。
 α —螺旋桨拉力系数。
 β —螺旋桨功率系数。
 η —螺旋桨效率。

目 录

序	4
規定符号	5
緒論	1
确定風洞中气流速度的方法	7
实验 1. 校准測微比压計	14
实验 2. 校准風速管	22
实验 3. 測定風洞实验段中的速度場	27
实验 4. 順流物表面的压强分布	31
实验 5. 根据圓球面上的压强落差測定气流紊流度	39
实验 6. 測定圓球的正面阻力和風洞的原始气流紊流度	46
实验 7. 繪制机翼的極曲綫	52
实验 8. 用三分力天平測定飞机或机翼模型的升力、正面阻力和俯仰力矩	63
实验 9. 測定旋成体(机身)的正面阻力	73
实验 10. 測定飞机模型的縱向靜安定性	76
实验 11. 測定升降舵上鉸鏈力矩的水平尾翼模型試驗	83
实验 12. 測定尾翼区的气流下洗角和气流阻滯系数	87
实验 13. 測定飞机模型的航向靜安定性	93
实验 14. 机翼附面層中的流速分布	96
实验 15. 測定超音速風洞气流的 M 数和机翼面上的局部 M 数分布	103
实验 16. 在烟風洞中获得繞机翼的流譜	112
实验 17. 用冲量法測定机翼型阻	119
实验 18. 測定螺旋桨的地面性能	125
实验 19. 測定螺旋桨在飞行中的特性	131

緒 論

任何實驗，不管是空氣動力學的或其他課程的，都和理論一樣對科學發展起着主導的作用。正是靠了實驗，才証實了空氣動力學的基本規律，才確定了各種飛行器本身或其各組成部分繞流現象的實際形態，才在氣動力計算中對這些飛行器的氣動力特性作了修正，使其數值更為精確，因而才保證了近代航空獲得如我們目前這樣清楚地看到的那種進展。

近代空氣動力學的奠基者——偉大的俄羅斯學者儒柯夫斯基 (Н. Е. Жуковский) 和恰普雷金 (С. А. Чаплыгин) 對實驗特別重視。他們建立了一系列的空動實驗室，在這些實驗室中很有成就地發展了實驗空氣動力學。1902年，儒柯夫斯基在莫斯科大学創辦了空動實驗室。1906年，又在莫斯科高等工業學校 (МВТУ) 建立了空動實驗室 (該室後來移入莫斯科航空學院)。到1910年又在彼得堡 (即現在的列寧格勒) 多科性工學院建立了空動實驗室。

近代的航空工程師廣泛利用了空動實驗室，在設計任何一種飛行器的過程中，他每一步都感到需要空動實驗。每一學生——未來的工程師都應好好熟悉空動實驗室及其設備，並應完成一系列在原理上極端重要的實驗作業。學生應養成一種技能來使用實驗室中基本儀器 (如風速管和測微比壓計)，應研究基本的動力測量裝置 (例如氣動力天平) 的系統簡圖。此外學生還必須對實驗結果所應引進的修正值具有清晰的概念，並能實地地去估計所作實驗的精確性。

氣流繞過飛行器各組成部分時所發生的運動學和動力學方面

的现象,是很复杂的。空动实验室在帮助学生明确了解这些复杂现象的物理本质中就起着重大的作用。只有明确建立了这些物理概念以后,才能顺利地学习“实验空气动力学”,“飞机空气力学”,“飞机安定性和操纵性”这些课程。

学生在作实验前,必须首先温习一下实验空气动力学课中的有关章节(根据讲义或馬尔丹諾夫所著的“实验空气动力学”书来温习)。在各人对所分配的实验作业任务都了解清楚后,就须画下实验仪器设备的简图,并注明实验物如何安装。此外还要画下传力机构的示意图。实验物(如机翼、机身、螺旋桨等)的图形都应認真画出,采用較大的比例尺并注明各部分的主要尺寸^①。

各人把实验安排简图以及进行实验的具体细节了解清楚后(如有困难,可取得教师的指导),就须测出一系列对任何实验都必要的数据,并应帮助学生测出那个表征实验条件的最重要参数——空气密度 ρ 。为了确定密度,必须先量出室内的大气压、空气温度及其湿度(通过蒸汽压强 p_n 来表示出)。

大气压用气压计来量出。最好在实验开始前及结束后各量一次。如果两次读数有变化时,就取其算术平均数。大气压的量测精确度应达到0.1公厘水银柱高。

大气温度用普通的摄氏温度表量出。由于实验设备长时间工作后,室温会引起很大变化,因此在整个实验过程中就须反复量测室温。在某一段实验时间内的计算用温度也取其算术平均值。温度的量测精确度不得低于 0.5°C 。

空气湿度虽然在大多数实验情况下对密度影响不大,但当气温较高或大气中水蒸汽接近饱和状态时,则对密度以及最后对实验结果影响就可能非常大。因此作普通低速实验时最好也能测一下湿度;当在高速风洞中作实验或在湿度较高的大气中作实验时,

^① 实验表格形式示于附录2和3。

則必須要測定空氣濕度。

如不計空氣濕度的影響，則空氣密度可按下式確定：

$$\rho = \frac{1}{8} \frac{B}{760} \frac{288}{(273+t)} = 0.04737 \frac{B}{T}$$

或按圖 1 所示的曲線查出。

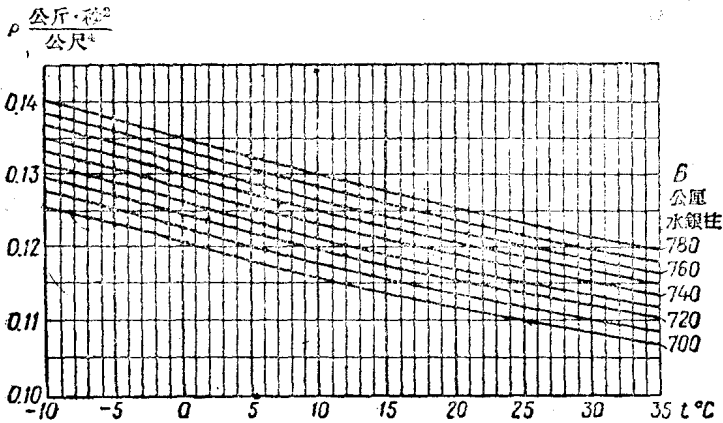


圖 1. 空氣密度對大氣壓和溫度的關係曲線。

在同一溫度和氣壓下，潮濕的空氣總比乾燥的空氣輕。空氣的濕度通常都以相對濕度 x 來表示。它等於空氣中實際所包含的水蒸汽量和同一溫度下達到飽和狀態時所包含的水蒸汽量之比，即

$$x = \frac{\gamma_{\text{н.п.}}}{\gamma_{\text{н.п.}}} = \frac{\rho_{\text{н.п.}}}{\rho_{\text{н.п.}}}$$

在每一溫度下，空氣中所能包含的水蒸汽都有一定的飽和量。在此狀態下，水蒸汽的壓強和密度分別達到其飽和值 $p_{\text{н.п.}}$ 和 $\rho_{\text{н.п.}}$ 。表 1 中列入不同溫度下飽和蒸汽的壓強和密度。

在表 1 中所列的溫度範圍內，氣體的狀態方程式亦適用於水蒸汽。於是得

表1. 饱和蒸汽压和密度

$t^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{H. II}}$ 公厘水银柱	$\rho_{\text{H. II}}$ 公斤·秒 ² /公尺 ⁴	$t^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{H. II}}$ 公厘水银柱	$\rho_{\text{H. II}}$ 公斤·秒 ² /公尺 ⁴
-10	2.159	0.000227	+15	12.79	0.00131
0	4.579	0.000433	+30	31.8	0.0031
+20	9.21	0.000958	+50	92.5	0.00849

$$p_{\text{H}} = x p_{\text{H. II. 0}}$$

现来找出一计算湿空气密度 $\rho_{\text{B. II}}$ 的公式。根据道尔顿的分压定理知,混合气体的压强等于其组成部分气体的分压之和。同时由于状态方程式不论对湿空气或干空气都适用,因此湿空气的密度就等于干空气密度 ρ 和水蒸汽密度 ρ_{H} 之和,即

$$\rho_{\text{B. II}} = \rho + \rho_{\text{H. 0}}$$

最后得

$$\rho_{\text{B. II}} = \frac{p}{gRT} + \frac{p_{\text{H}}}{gR_{\text{H}}T},$$

式中 R 和 R_{H} 分别为干空气和水蒸汽的气体常数。根据道尔顿定理得

$$p = p_{\text{B. II}} - p_{\text{H. 0}}$$

最后得湿空气密度的计算公式如下:

$$\rho_{\text{B. II}} = \frac{p_{\text{B. II}} - x p_{\text{H. II}}}{gRT} + \frac{x p_{\text{H. II}}}{gR_{\text{H}}T} = \frac{p_{\text{B. II}}}{gRT} \left[1 - \frac{x p_{\text{H. II}}}{p_{\text{B. II}}} \left(1 - \frac{R}{R_{\text{H}}} \right) \right].$$

如果再把具体数值代入 ($R=29.27$ 和 $R_{\text{H}}=47.1$), 即得

$$\rho_{\text{B. II}} = \frac{p_{\text{B. II}}}{gRT} \left(1 - 0.378 \frac{x p_{\text{H. II}}}{p_{\text{B. II}}} \right). \quad (1)$$

由上式知,如实验时气温 $t=50^{\circ}\text{C}$, 而空气中水蒸汽达到最大饱和时(即 $x=1$ 时);则忽略湿度影响后所引起的空气密度误差会超出 4.5%。

和用(1)式进行計算时,必須先測出空气的相对湿度 x 。通常在空动實驗室中,都先用湿度計量出室內水蒸汽分压 p_n 后再間接推算出。湿度計如圖 2 所示。它由两个溫度計組成。其中之一的玻璃球保持干燥,另一則包以潮湿的紗布。由于水分蒸發,包以湿布的温度計示数必較干燥者为低。令前者的示数为 t' , 而后者的示数(亦即等于室温)为 t 。

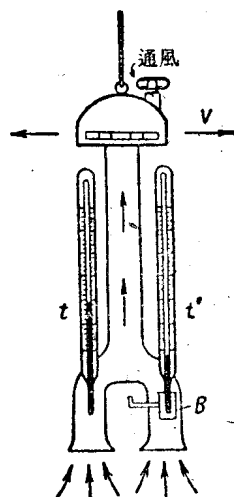


圖 2. 湿度計簡圖。

再令 S 为湿溫度計表面积; v 为蒸發速度(以單位時間內水分蒸發量来衡量)。当水分蒸發所带走的热量剛好等于外界傳入的热量时,湿溫度計就达到热平衡状态。所带走的热量等于蒸發速度和某一系数 E (具有一定的量綱)的乘积。傳入的热量应等于面积 S , 温差 $t-t'$ (即相当于周圍空气和溫度計本身之間的温差)和比例常数 A (具有一定的量綱)的乘积。于是在热平衡状态下

$$AS(t-t') = Ev, \quad (2)$$

蒸發速度和下列两参数成比例关系:——液体的蒸發面积(即相当于湿溫度計的表面积 S)以及液体蒸發温度 t' 下的饱和蒸汽压 $p_{n,n}$ 和液面上蒸汽压 p_n 之差。蒸發速度 v 又与大气成反比。故 v 可表示为

$$v = \frac{CS}{B}(p_{n,n} - p_n),$$

式中 C 为一常数。以上式代入热平衡式(2), 即得

$$AS(t-t') = \frac{ECS}{B}(p_{n,n} - p_n).$$

数值 $\frac{A}{EC} = a$ 可从湿度表上查出。在一般風洞实验情况下, 可取一平均值 0.00066。于是最后就得計算蒸汽压的公式

$$p_n = p_{n,n} - 6.6B(t-t') \times 10^{-4}。$$

在此式中, 大气压 B 以及蒸汽压 $p_{n,n}$ 和 p_n 的單位都用公厘水銀柱高来表示。

确定風洞中气流速度的方法

I. 用空气压强感受器(即風速管)測風速

近代在風洞中測風速时,最普遍的是使用風速管。这种管子亦称为空气压强感受器。这种仪器上开有两种孔;其中之一量度总压,另一則量度靜压。如果总压和靜压之差为 $(p_{\text{полн}} - p)$, 則气流速 V (考虑到空气压缩性影响)可按下式算出:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{p_{\text{полн}} - p}{(1 + \varepsilon_p)}} \text{ 公尺/秒。}$$

在不可压流动下:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} q} \text{ 公尺/秒,}$$

式中 ρ 为風洞实验段中的气流密度;

ε_p 为修正空气压缩性影响的系数;在不可压流中, $\varepsilon_p = 0$;

$q = \frac{1}{2} \rho V^2$ 为气流速度头或动压强。

測量气流速时,必須仔細考虑到大气压和气温的影响。

大气压用气压計量出,以公厘水銀柱高表示。气温則以 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

空气密度根据下式算出(見緒論):

$$\rho = 0.04737 \frac{B}{T} \quad (3)$$

从公式(3)可估計实验过程中压强和温度变化对空气密度的影响。

例如,如果大气压在实验过程中改变了5公厘水银柱(这是稀有的情形),则在温度不变的情况下($t=t_0$)空气密度的变化等于:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \times 100 = \frac{5}{760} 100 = 0.65\%;$$

另一方面如果压强不变($B=B_0$),而空气温度改变了 3°C ,则

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \times 100 = \frac{3}{288} 100 \cong 1.05\%,$$

在实验期内,气温改变 3°C 并不是罕见的。因此,温度对空气密度 ρ 的影响比压强的影响大。所以从实验开始直到終了,必须时时检查气温表上的温度。

在标准状态下($B_0=760$ 公厘水银柱, $t_0=15^\circ\text{C}$),空气密度等于:

$$\rho_0 = 0.125 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{公尺}^4.$$

将 ρ 数值代入公式(3)中,略去压缩性的影响,就得到

$$V = \sqrt{42.2 \frac{(273+t^\circ\text{C})}{B} q}.$$

由此很清楚看到,测出速度头 q 、大气压 B 以及温度 t 后;就可计算出速度的数值(公尺/秒)。

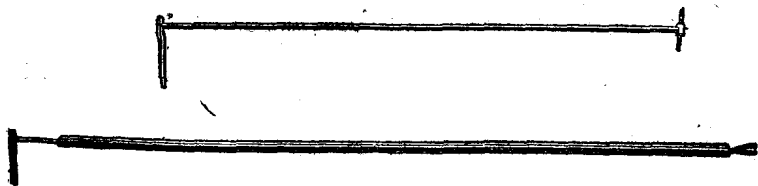


圖3. 不同形式的空气压强感受器。

圖3示靜压和总压感受器的形式。圖4則示这两种压强感受器合装在一起时的形式。

在不可压流中,靜压 p 和速度头 q 满足下列方程式:

$$p_{\text{полн}} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + p_2,$$

由此可見,靜压 p 随風速 V 改变。

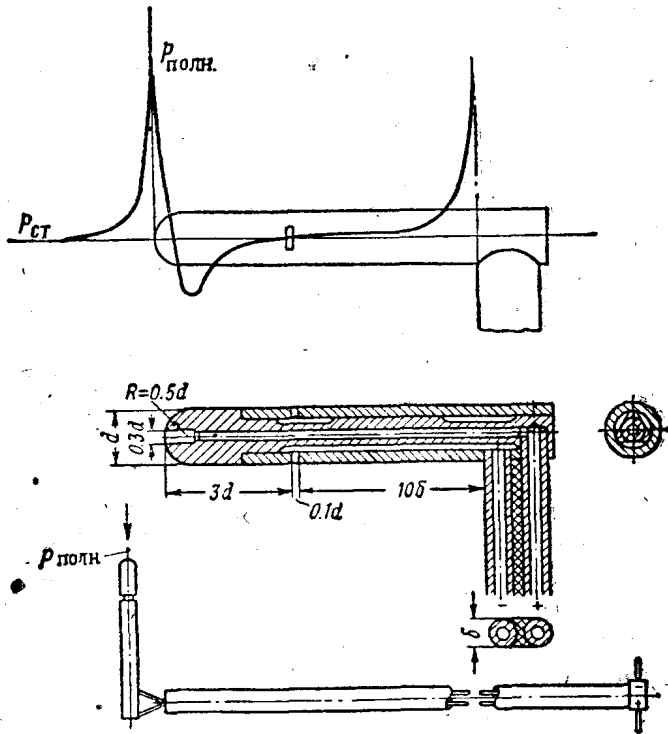


圖 4. 压强感受器(即風速管)簡圖。

風速管的繞流形式如下所述。气流接近風速管时改变方向, 分开从風速管四周繞过去。在气流分叉处流速大大地降低; 因此在風速管前形成一停滯区(此間流速極为緩慢)。如果沿風速管軸取一很細的流管(相对于風速管头部尺寸而言); 則气流进入停滯区后, 流速就几乎减慢到零; 而压强很快增高, 在駐点上达到总压

值 $p_{\text{полн}}$ 。在离驻点后不远的地方,压强又从 $p_{\text{полн}}$ 降到 p (见图4)。以后顺着气流方向压强继续降低;特别接近 $p_{\text{мсет}} = p$ 的点时,压强很快地下降。以后压强重新又增高;随着远离风速管前端的程度,最后渐趋于静压强值。风速管上装了托柄后,又使托柄前的气流受到阻滞而增高压强。在风速管上就不难找到一位置,使该处压强刚好等于静压值。实际制造风速管时最好就把静压孔开在这里。

图4所示的仪器并不是压强感受器的唯一形式。有些风速管形式基本上和上述者类似;但为了消除托柄的影响,就在离托柄较远处开一环形槽,或在风速管侧面(即不与托柄轴位于同一平面内,以避免托柄影响)开一排小孔。飞机上所用的风管,通常都无托柄。

如把总压导向精密比压计的一根支管,而静压导向另一支管;则在比压计上就直接指示出压强差

$$p_{\text{полн}} - p = \frac{1}{2} \rho V^2 = q$$

这样,利用了“风速管——比压计”,动压强或速度头就可近似地量得(见下面)。

压强差 $p_{\text{полн}} - p$ 可以通过比压计上液柱面的高度差来表示,但此时必须估计出比压计上读数的准确程度。于是得:

$$p_{\text{полн}} - p = \gamma_{\text{ж}}(h - h_0) = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{\gamma_{\text{в}}}{2g} \cdot V^2, \quad (4)$$

式中 $\gamma_{\text{в}}$ 为 $B_0 = 760$ 公厘水银柱, $t_0 = 15^\circ\text{C}$ 时单位体积空气的重量;
 $\gamma_{\text{ж}}$ 为同一情况下,单位体积测压液的重量。

由此得:
$$V = \sqrt{2g \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{в}}} (h - h_0)}.$$

如果测微比压计里面用的是酒精,那么在 $t_0 = 15^\circ\text{C}$ 时它的单