

高等學校教學用書

空氣動力學實驗手冊

A. K. МАРТЫНОВ, А. А. РЕМЕННИКОВ, Д. С. ГОРШЕНИН 著

顧 高 擲 連 洪 祥 譯
張 桂 聯 夏 培 厚 校 訂

高等教育出版社

高等學校教學用書



空氣動力學實驗手冊

A. K. 馬爾丹諾夫, A. A. 雷民里可夫, Д. С. 高爾謝寧著

A. K. 馬爾丹諾夫校訂

顧高堉 連洪祥譯

張桂聯 夏培厚校訂

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國防出版社 (Оборонгиз) 1948 年出版的馬爾丹諾夫 (А. К. Мартынов)、雷民里可夫 (А. А. Ромееняков)、高爾謝寧 (Д. С. Горшенин) 所著“空氣動力學實驗手冊” (Руководство к практическим занятиям в аэродинамической лаборатории) 譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等航空學校參考書。

本書內有十四個可供高等學校學生在空氣動力學實驗室內進行的典型實驗。

本書對某些實驗用的儀器及設備有詳細的描述，並給有計算公式的推演。

空氣動力學實驗手冊

書號166(課160)

馬 爾 丹 諾 夫 等 著

顧 高 堦 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 珠 璣 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

春 明 印 書 館 印 刷

上 海 新 昌 路 四 八 一 弄 二 號

開本850×1079 1/28 印張8 12/14 字數 83,000

一九五四年十二月上海第一版 印數 1—2,200

一九五四年十二月上海第一次印刷 定價 洋7,000

序 言

實驗空氣動力學是高等航空學校中的主要事業課程之一。現代的飛機製造首先要依靠實驗空氣動力學的研究。就像這課程的名稱所表示的那樣，“實驗”是它的基礎。因此，每一個航空工程師，除了與他的狹窄的專業化有關的知識以外，應當通曉實驗空氣動力學的基本原理。在應用空氣動力學實驗室的實驗結果時，航空工程師應當能夠有意識地，批判地對待他所獲得的那些資料。因此他應當掌握實驗的基礎，能親自進行實驗並估計所做的實驗的準確度。

近代的空氣動力學實驗需要複雜的貴重的儀器，實驗者的高度熟練技術，常常需要長時期的訓練。但是，實驗的主要原理以及基本儀器的圖式改變得並不顯著。

在空氣動力學實驗室中實習的目的是：對實驗室的熟悉，培養學生使用基本儀器來進行實驗的技能，建立對實驗的準確程度的觀念，以及樹立對實驗結果中所引進校正數的正確的態度。

由於在實驗室中，學生是以幾個人一小組來進行實驗，因此必須指出實驗過程中發揮主動性的重要意義。自然，只有那用自己的親手在壓力計，空氣動力天秤以及其他的儀器上進行實驗，並親自作出實驗結果的曲線的學生，才能從實驗課程中得到實惠。

這本書內有十四個實驗，都是關於實驗空氣動力學在飛機製造上的應用的各種最重要的問題。當然，這些實驗不能夠滿足航空事業的非常迅速發展的全部需要。

此書是為符合以C. 奧爾忠尼啓則為名的莫斯科航空學院的空氣動力學實驗室而編成的。但是，大多數的實驗可以在任何一個空氣動力學實驗室內進行。

在對本書的校對中，維·爾·亞力山大洛夫教授提供了一系列寶貴的意見，作者在此謹致謝意。

規 定 的 符 號

(1) 幾何數量

S —抗翼面積;中截面積。

F —面積。

a —試驗時壓力計內液體新月面的位置。

a_0 —試驗前壓力計內液體新月面的位置。

h —試驗時壓力計內酒精的水平高度;從翼弦至模型在空氣動力天秤上懸掛點的距離。

h_0 —試驗前壓力計內酒精的水平高度。

Δh —壓力計容槽內液體水平高度改變的數量。

α —壓力計支管的傾斜度。

x, y, z —一般直角系統的坐標。

x_1, y_1, z_1 —機體軸系統的坐標。

r —向量半徑;分度盤半徑。

r_0 —球的半徑。

l —距離,長度,翼展。

b —翼弦。

Θ —球坐標的角度。

α —衝角。

$\Delta\alpha_r$ —由風洞誘導作用而造成的洗流角。

$\Delta\alpha_{ek}$ —風洞中氣流的偏斜角。

S_B —升降舵面積。

b_B —升降舵弦長。

δ_B —升降舵傾斜度。

R —螺旋槳半徑。

δ —附面層厚度。

(2) 運動數量及表示溫度的數量

t —試驗時的空氣溫度;時間。

T —絕熱溫度。

V —流速;螺旋槳前進速度。

V_0 —附面層外的流速。

φ —速度位。

ν —運動粘性係數。

n_r —每秒轉數。

n_n —螺旋槳每分鐘轉數。

n_M —馬達每分鐘轉數。

ω —角速度。

α —音速。

u —附面層內的速度。

u_0 —附面層邊界上的速度。

(3) 表示質量, 力, 和力矩的符號

p —壓力; 大氣中水蒸汽壓力。

B —大氣壓力, 水銀柱公厘數。

γ —比重(單位體積的重量)。

ρ —空氣的質量密度。

Q —液體量, 正面阻力; 荷重。

ΔQ —正面阻力改變量; 模型托網的正面阻力。

φ —修正彌沙(Фюса)式壓力計管子傾斜度的因次係數。

q —速度壓力頭。

τ_0 —摩擦應力。

P —(1) 在天秤上量得的舉力; (2) 螺旋槳牽引力。

Y —舉力。

ΔZ —模型托網的側向力。

M_{x1} —俯仰力矩。

T —螺旋槳功率(機械單位)。

M_x —螺旋槳旋轉的抵抗力矩。

N —功率(馬力)。

M_M —鉸鏈力矩。

(4) 無因次係數的符號

K —壓力計係數; 機翼昇阻比。

ε_p —考慮空氣壓縮性的校正係數。

ξ —風速管係數。

ξ_1 —水力損失係數。

μ —風洞流場係數。

m —比例尺。

$\bar{p}$ —壓力係數。

Re —雷氏數。

Ma —馬赫數。

c_x —正面阻力係數。

c_{x1} —誘導阻力係數。

c_y —舉力係數。

$\bar{e}$ —氣流紊度。

λ —展弦比；螺旋槳相對進距。

m_x —俯仰力矩係數。

m_m —鉸鏈力矩係數。

α —螺旋槳拉力係數。

β —螺旋槳功率係數。

η —螺旋槳效率。

目 錄

序言

規定的符號

空氣動力學實驗室中的實驗須知	1
實驗 1. 校準測微壓力計	3
實驗 2. 校準風速管	9
實驗 3. 風洞實驗段中的速度場	18
實驗 4. 順流物表面的壓力分佈	22
實驗 5. 由圓球面上的壓力遞差確定氣流紊流度	28
實驗 6. 圓球的正面阻力以及風洞的原始紊流度	34
實驗 7. 機身的正面阻力	39
實驗 8. 繪製機翼的極曲線	41
實驗 9. 測驗飛機模型的縱向靜穩定性	52
實驗 10. 測定螺旋槳的地面性能	59
實驗 11. 確定昇降舵鉸矩的水平尾翼實驗	64
實驗 12. 確定螺旋槳的特性	67
實驗 13. 在三分力天平上確定飛機模型的昇力、正面阻力以及 俯仰力矩	77
實驗 14. 機翼附面层中的流速分佈	87
附錄 1. 三分力天平 ABHK-1 的校準	94
附錄 2. 實驗表格	96

空氣動力學實驗手冊

空氣動力學實驗室中的實驗須知

在作每一個實驗前必須首先求得下列各讀數：

(1) 用準確到 0.1 毫米水銀柱的氣壓表求得大氣壓力。

(2) 用準確到 0.5°C 的溫度表求得空氣溫度。

(3) 在實驗室溫度較高時，還須量出亞斯曼乾濕表的乾、濕二溫度表的讀數。

爲了正確地確定空氣密度 ρ ，上述諸讀數是必需的。度量空氣溫度和度量大氣壓力的步驟，應當已經從物理課程裏知道，至於空氣濕度的確定，在一般情況下是比較次要的（當溫度不太高，並且空氣裏的水蒸汽遠遠在飽和狀態下時），但是最好還是測定它，即使只測定一次也好，熟悉確定空氣濕度的方法是有用的，而且在新式設備，如高速風洞的試驗裏是必需的。

學生們可以從 B. H. 尤列也夫的“實驗空氣動力學”第一冊找到通風乾濕表的說明。這裏只提到這些儀器的原理的最基本的知識。

乾濕表是以兩個溫度表組成——一個乾的和一個濕的；濕溫度計的儲液泡緊密地覆以細麻布，麻布的外端接到盛有水的容器，該容器的位置要比溫度計的液泡略低。

由於水的蒸發，使溫度計冷卻而指示出某個溫度 t' ，此讀數低於乾燥溫度表所指示的空氣溫度 t 。

從測到的溫度 t 和 t' 可以找到大氣中的水蒸汽壓力 p ，此壓力用工程壓力單位公斤/公尺²或用水銀柱公厘數表示之。例如，在 B. H. 尤列也夫的“實驗空氣動力學”1936 年版(26 頁)上的公式中就是用水銀柱

高度表示的，Г. Н. 尤列也夫所用的公式推證如下：

令 s —濕溫度表的表面積， v —蒸發速度，在物理學上用單位時間內從溫度表表面蒸發的水的質量來度量。假如濕溫度表從它的週圍的物體得到的熱量，等於由於水的蒸發所失去的熱量，那麼，它就停止冷卻（即是建立了熱平衡）。獲得熱量的多少，要符合牛頓的放熱定律，獲得的熱量正比於表面 s 及週圍介質與本身溫度差 $t-t'$ ；失去的熱量正比於蒸發速度 v ；因此，設 A 和 E 為有因次的比例係數，當濕溫度計到熱平衡時，我們則得公式：

$$As(t-t') = Ev. \quad (a)$$

蒸發速度 v 與各種主要物理因素的依從關係，根據道爾頓定律定出：蒸發速度 v 正比於液體自由面 s ，並且正比於蒸發中的液體在溫度 t' 時蒸氣飽和壓力 p' 與實際在液體上的水蒸汽壓力 p 之差。此外， v 反比於在液面上的其他氣體的壓力 B （例如，在現在這種情形，就是空氣壓力）。

所有上述這些，使我們得到下面的關係：

$$v = \frac{Cs}{B}(p'-p),$$

這裏 C —常數，它的因次是液體在它的單位表面積上的蒸發速度，即：

$$\frac{\text{克質量}}{\text{秒} \cdot \text{厘米}^2} (\text{CGS 絕對單位}) \text{ 或 } \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{公尺}^3} (\text{公尺} \cdot \text{公斤} \cdot \text{秒工程單位})$$

將上式的 v 代入 (a) 式，得：

$$As(t-t') = \frac{ECs}{B}(p'-p).$$

消去 s 並以 a 表示 $\frac{A}{EC}$ ，最後得：

$$p = p' - aB(t-t'),$$

若將水蒸汽壓力 p 和 p' 以及大氣壓力 B ，以公厘水銀柱表示，則

$$B_a = B'_{a,a} - aB(t-t'),$$

此處 B —大氣壓力，水銀柱公厘。

B_n 和 $B'_{n,n}$ —水蒸汽壓力和 t' 時飽和水蒸汽壓力, 水銀柱公厘。

常數 a 與溫度 t' 的關係可以從有關乾濕表的圖表裏查到, 一般可取平均值 $a=0.00066$, 於是得到 B. H. 尤列也夫書中的公式^①:

$$B_n = B'_{n,n} - 6.6 B(t-t') \cdot 10^{-4}。$$

在進行試驗前, 學生們應自己求得各儀器的係數 $K, \xi, \mu, \sin \alpha$ 和各物理數量: γ, t, B, ρ 。

實驗 1. 校準測微壓力計

實驗目的 對以後試驗中使用的基本儀器, 獲得處理和使用它們的初步知識, 熟悉它們的構造; 估計測量的誤差, 並且研究如何整理試驗所得的資料(正確而合理的安排計算及作表的方法)。

必要的儀器設備:

1. 二個測微壓力計, 充滿 γ 值已定的酒精; 其中一個壓力計的 K 值應當是已知的。
2. 吸氣器, 作為減低壓力計管內壓力之用。
3. 當缺乏吸氣器而又必須在管內用抽氣的方法造成低壓力時, 則需要夾子和三通管。
4. 橡皮管, 作為連結壓力計之用。

試驗時間: 管內酒精高度上昇時測定 10—12 個讀數, 高度下降時測定 2—3 個讀數 (反向讀數)—20 分鐘。

整理試驗結果的時間 30—40 分鐘。

將試驗結果繪成圖表, 並求出所校正壓力計的係數。

計算公式

$$p_a - p_0 = (a_s - a_{0s}) \gamma_s K_s \sin \alpha_s。$$

$$p_a - p_0 = (a_T - a_{0T}) \gamma_T K_T \sin \alpha_T。$$

$$(a_s - a_{0s}) K_s \gamma_s = (a_T - a_{0T}) K_T \gamma_T。$$

$$K_T = \frac{\gamma_s (a_s - a_{0s})}{\gamma_T (a_T - a_{0T})} K_s = K_s \operatorname{tg} \beta。$$

^① 空氣相對濕度及密度的確定, 請參看 B. H. 尤列也夫所著的教科書第一部, 1936 年版, 25—26 頁。

在現代，蘇聯的空氣動力學實驗室中，一般都採用這兩種壓力計，即 ИАГН 式和福沙式(Фурка)。

在熟悉各種壓力計之前，首先應研究各種壓力計構造上的共同特點，壓力計由二支充有液體的管子構成，其中一個具有較大的橫截面積，稱為容槽或貯液器。從風洞中接兩個橡皮管子將空氣壓力傳到壓力計的兩個支管內，因而在兩個支管內液體的自由面上，作用着不同的壓力。當貯液器內液面上的壓力大於玻璃管內液面上的壓力時則貯液器內的液面下降，玻璃管內的液面上昇。

以 p_2 表示增高後的壓力， p_1 下降後的壓力，在平衡狀態下利用巴斯加原理：

$$\frac{p_2}{\gamma_m} - \Delta h = \frac{p_1}{\gamma_m} + a_H \cdot \sin \alpha, \quad (a)$$

此處 $\gamma_m = \gamma - \gamma_v$;

γ —壓力計內液體單位體積的重量(在真空內);

γ_v —傳導壓力 p_1 和 p_2 的介質的單位體積重量(在真空內);

a_H —在玻璃支管上所量得液面的位移;

Δh —液面在寬的支管(即貯存器)內的位移;

α —玻璃支管的軸與水平面之間的角度。

因此，壓力差將等於：

$$p_2 - p_1 = \gamma_m \left(a_H + \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \right) \sin \alpha, \quad (b)$$

此處 $a_H = a - a_0$; a_0 和 a —在細玻璃支管側面的刻度上液面位置在試驗前及試驗中的讀數。

液體新月面的位移可代表壓力差(注意玻璃支管的面積小)，在一定的壓力差($p_2 - p_1$)時，如果 α 愈小，則液面的位移則愈大，因此，減小 α ，就能直接增大讀數，也就是增加讀數的準確度，也就意味著增加測量的準確度，也可以說，儀器就會變得“更靈敏”一些。但是，這只是在 α 不小過某一極限時才對；當 $\sin \alpha < \frac{1}{20}$ 時，由於壓力計內液體毛細管現

象的作用，開始產生度量的誤差。

除了將一個支管放在傾斜位置，因而增加讀數準確度的方法之外；在精密的壓力計中，用光學方法來增加準確性（例如：潑朗都和恰脫克式壓力計）。

如果壓力計貯存器的直徑等於 D 公厘，小支管的直徑是 d 公厘；那麼，簡單的計算一下從寬支管流入小支管的液體的體積，就可以得下式

$$\Delta h = \frac{d^2}{D^2} a_H,$$

例如，當 $d=7$ 公厘， $D=100$ 公厘，則 Δh 差不多等於 a_H 的 0.5%。

將 Δh 代入 (6) 式，則得到下面壓力差的關係：

$$p_2 - p_1 = \gamma_m a_H \left(1 + \frac{d^2}{D^2 \sin \alpha} \right) \sin \alpha, \quad (B)$$

從此式可以看出， Δh 的影響可以用一個校正係數 $K = 1 + \frac{d^2}{D^2 \sin \alpha}$ 來代表， K 稱為壓力計係數。由於 K 的引用，只須求出一個讀數，即只須求 a_H 的讀數，因此，誤差就減少了一半。

由此壓力計的應用公式可得如下的形式：

$$p_2 - p_1 = (a - a_0) \gamma_m K \sin \alpha. \quad (1)$$

在空氣動力學試驗室中， $p_2 - p_1$ 總是空氣壓力之差，因此：

$$\gamma_m = \gamma - \gamma_v = (\gamma - 1.225) \text{ 仟克/米}^3.$$

在度量微小的壓力差時，壓力計中一般採用輕液體，例如酒精，甲苯之類，對大的壓力差則用水銀或其他液體，由於水對玻璃的不好的附着性，使新月面的讀數不準確，所以測微壓力計中很少用水。

在第一種情形（用酒精）：

$$\gamma_m = 800 - 1.225 = 798.775 \text{ 仟克/米}^3.$$

在第二種情形（水）：

$$\gamma_m = 1000 - 1.225 = 998.775 \text{ 仟克/米}^3.$$

很顯然，在這兩種情形下都可以認為

$$\gamma_m \approx \gamma,$$

亦即，可以將空氣的浮力略去不計，空氣浮力對重液體（水銀，四溴二烷之類）單位體積真實重量的影響，更加可以忽略。在一定溫度 t_0° 下液體比重 γ 可預先用液體比重計求得，如果試驗是在 t° 下進行，則必須將 γ 校正到對應的溫度利用下式：

$$\gamma' = \frac{\gamma}{1 + \alpha(t^\circ - t_0^\circ)},$$

此處 γ —在溫度 t_0° 時，壓力計內液體的單位體積重量；

γ' —在 t° 時，此液體的單位體積重量；

α —液體的體積膨脹係數。

在尋常溫度下的酒精，通常的近似值是 $\alpha = 0.0011$ ，因此，如果要 γ 變化 1%，溫度的變化 $\Delta t^\circ = t^\circ - t_0^\circ$ 至少不小於 10° ，在較小的溫度變化時， γ 的修正可以完全略去。

在應用壓力計公式(1)之前，學生應先自己定出 γ 的單位，以使壓力計上度量 a 和 a_0 的刻度以一般通用的毫米為單位，而不用其他單位。

ПАГН 式，福沙式 (Фурса) 壓力計都有傾斜的玻璃管，ПАГН 式壓力計的傾斜度 ($\sin \alpha$) 是以玻璃支管和貯存器一道轉動而造成，福沙式壓力計則只轉動玻璃支管而貯存器固定不動，因此，在這兩種式樣中，玻璃支管（或稱度量支管）的傾斜度是可改變的，支管是固定在特殊的支臂上，而支臂上每一個固定支管的孔旁有表示 $\sin \alpha$ 或 $0.8 \sin \alpha$ 的數字，此處 0.8—無水酒精（也就是不穩形態的酒精）的單位體積重量。

當 $t = 15^\circ\text{C}$ 時，乘積

$$\varphi = 0.8 \sin \alpha$$

在福沙式壓力計中稱為傾斜度係數，因此對這種壓力計，有新的應用公式：

$$p_2 - p_1 = (a - a_0) \varphi \frac{\gamma}{0.8} K。$$

圖 1 所示為壓力計校正試驗的裝置略圖。

如果已知 K 值, 就能從所給的壓力計讀數 a 和 a_0 及所採用的 γ 和 α 來計算壓力差; 試驗一的任務之一, 就是要利用公式 (1) 來確定 K 值。 K 值不能直接由公式

$$K = 1 + \frac{d^2}{D^2 \sin \alpha}$$

來決定, 因為除了毛細現象在壓力計內的影響外, 還有另一原因, 這是因為壓力計支管的不夠準確, 所以在支管中 d 可能會沿着管長方向變化, 而且由於貯存器製造上的缺點, 內徑 D 也可能改變。

K 值是用特殊的試驗來決定, 就是將已知 K 值的標準壓力計的讀數, 與作試驗用 (即待校正) 的壓力計的讀數作比較。

為此目的, 將兩個壓力計聯結如圖 1, 而使他們得到同一壓力差 $p_2 - p_1$ 。

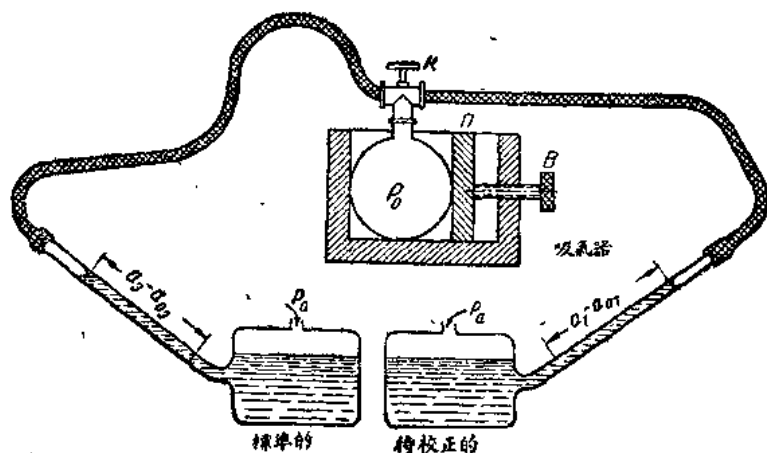


圖 1. 壓力計的校正 (裝置略圖)。

在第 3 頁上計算公式中所有關於標準壓力計的數值都附有符號 “ S ”, 所有關於待校正壓力計的數值則附以符號 “ T ”。從草圖上可以看出如何保證兩個壓力計的壓力差的一致。此壓力差是 $p_2 - p_0$, 其中 p_2 — 大氣壓力, p_0 — 用特殊器具 (吸氣器或直接用嘴吸氣) 在壓力計的度量支管內造成的低壓。

吸氣器的作用清晰地表示在草圖上(參看圖 1): 螺絲 B 的螺絲母固定在木匣子上, 扭轉螺絲 B 時螺絲就壓着間隔片 II 向左移動, 因而壓縮放置在木匣內的氣球(或橡皮球)將裏面的空氣壓出去。然後關閉氣門 K , 並將通徑壓力計玻璃支管的橡皮管接上, 以後扭開氣門 K , 再轉動螺絲 B , 使它向外移動, 這樣, 原來充滿了橡皮管以及玻璃支管內的空氣都要會膨脹, 流入氣球而把間隔片 II 向右推動。

各處空氣的壓力下降使壓力計玻璃支管內的酒精上升。適當地調節螺絲, 使酒精不超過最高的刻度, 然後再關閉氣門 K , 在兩個壓力計支管內的酒精都靜止後, 同時由標尺上記下讀數。

因為每一個讀數, 無論是標準壓力計的或是待校正壓力計的, 都可能有偶然的錯誤, 因此, 在找尋 K_T 的試驗中就必須記下相當多的讀數, 方法是這樣的, 重新打開氣門, 再用螺絲與間隔片壓縮氣球, 增高管內氣壓而減低酒精高度一直到零, K_T 的平均值可以用作圖法求得(圖 2)以 $\gamma_T(a_T - a_{0T})$ 為橫坐標, $\gamma_0(a_0 - a_{00})$ 為縱坐標, 圖上直線斜傾角的正切值乘上 K_0 即得 K_T 。

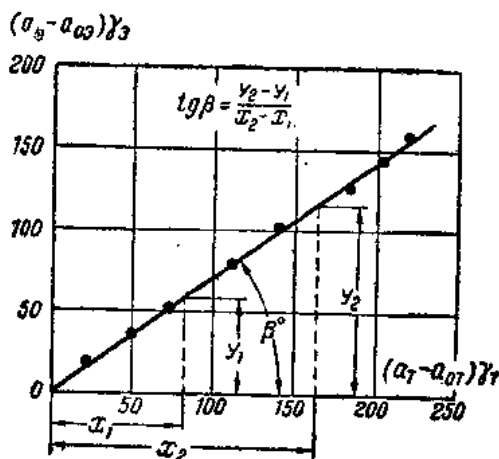


圖 2. 壓力計校正試驗曲線。

如果壓力計內液體新月面的位置有一些振動, 那麼兩個壓力計的讀數就應當同時記下。因此, 觀測者之間應當事先約定一個信號。

將記錄紙上所記下的試驗結果繪成曲線, 爲了決定 $\lg \beta$ 的值, 先經過試驗點(當這些點不太散漫時)繪一條直線, 然後在此直線上取

兩個相距不太近的點 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，以它們橫坐標之差去除縱坐標之差即得 $\operatorname{tg} \beta$ 。

上述測微壓力計的校正法稱為第二校正法。

另一種校正法稱為第一(原始)校正法，用於標準測微壓力計，茲敘述於下：

將精確地稱出的重量 Q 的液體，注入測微壓力計的寬支管(貯存器)，並量出因此而引起的玻璃支管內液體新月面的位移，如果寬支管的截面積為 F ，注入的液體量為 Q ，在寬支管內液面的上升高度就是 $\Delta h = \frac{Q}{\gamma F}$ 。該上升高度相當於在支管內加上壓力，

$$\Delta p = \Delta h \cdot \gamma = \frac{Q}{F} = a \left(1 + \frac{d^2}{D^2 \sin \alpha} \right) \gamma \sin \alpha。$$

將這辦法重複幾次，就可得 $\Delta p = f(a)$ ，應用此曲線，從每一個 a 的讀數，就可立刻得出 Δp 。

應當注意，這種方法的優點在於校正的結果已經考慮到了測微壓力計的全部缺陷(例如剖面直徑的不準確等)。因此，就可以準確地在標尺上刻出讀數。

實驗 2. 校準風速管

實驗目的 比較待校正風速管與標準風速管的風速管係數，並決定風速管安裝角對此係數的影響。

必要儀器設備

1. 兩個係數 K 已知的測微壓力計及已知 γ 的酒精。
2. 標準風速管(事先已定出係數 ξ 的風速管，頂好是一個以原始校正法校正過的風速管)。
3. 測定待校正風速管與風洞中心軸間夾角的儀器，例如，裝置在風洞壁上，附有準線的雙透鏡。
4. 調整待校正風速管傾角 α 的分度盤，分度盤的範圍是 $\pm 45^\circ$ ，刻度間隔不小於 5° 。