

中国科学院地球物理研究所

# 云雾的观测仪器和方法问题

张佑年等著

(内部资料·注意保存)

科学出版社

中国科学院地球物理研究所

# 云雾观测的仪器和方法问题

张佑年等著

(内部资料·注意保存)

科学出版社

1963

## 內 容 簡 介

本书是中国科学院地球物理研究所研究云雾物理方面的同志，为了开展云雾降水微物理观测的研究工作，所设计制作的有关云雾微物理观测所必需的仪器的总结。并对观测方法的一些问题作了详细的讨论。

书中主要阐述了三用滴谱仪、总含水量仪、风速模量脉动仪和含水量探空仪等仪器的原理、结构和性能，并对仪器的误差作了详细的分析和讨论。此外，还介绍了自制气象雷达天线仰角控制器，并对滴谱油法取样的併合概率和用羣滴法测定铜离子李塞根环的扩大倍数等问题作了讨论。

本书可供气象研究者、业务工作者和有关高等院校教育工作者参考。

## 云雾观测的仪器和方法问题

张佑年等著

\*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街117号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 科学出版社发行

\*

1963年5月第一版

书号：2713 字数：87,000

1963年5月第一次印刷

开本：787×1092 1/16

(京) 0001—1,300

印张：4

定价：0.60元

# 目 录

|                     |              |
|---------------------|--------------|
| 前 言                 | (1)          |
| 三用滴譜仪的机械結構設計        | 张佑年 (2)      |
| 总含水量仪               | 陈哲明 赵燕曾 (16) |
| 云雾中风速模量脉动仪          | 周明煜 陈章昭 (26) |
| 含水量探空仪試制的初步报告       | 袁 箴 顾震潮 (33) |
| 自制气象雷达天綫仰角控制器       | 王学寬 (41)     |
| 滴譜油法取样的并合概率         | 陈章昭 (46)     |
| 用羣滴方法測定銅离子李塞根环的扩大倍数 | 何珍珍 (52)     |

## 前 言

在云雾物理变化过程中因子极其复杂,观测很不容易。同时,云雾物理方面还不象天气学那样,已有基本的定型仪器进行普遍的、经常性的观测。因此,对于云雾物理的实际情况就了解得很不够,这对于云雾物理这门学科的发展,也就有了一定的限制。

不但如此,又由于在云雾物理的观测工作中,定型的基本仪器还很少,目前在國內也还没有成批的生产,所以如果要从事云雾降水物理的研究工作,首先必須自行設計和制造一些云雾物理的观测仪器,才能全面地开展研究工作。

因此,云雾物理观测仪器的設計和制造,对于我们开展云雾物理的研究工作来说,是一个十分重要的問題。近几年来,我們初步制作了几种云雾物理方面的仪器。这些仪器有的已应用于实际工作,有的虽系初步試制,但經野外实际試测,工作性能和效果还是比较好的,所以这些設計和制作可以作为进一步工作的参考。为此,我們把現有的几种仪器的試制报告汇集在一起,印成本书。但由于我們的水平和条件的限制,在內容方面一定存在不少的問題,我們希望通过大家的指正,能使这些仪器得到进一步的改进。

# 三用滴譜儀的機械結構設計

張 佑 年

## 提 要

本文主要是總結了三用滴譜儀的機械結構設計問題。滴譜儀的取样是應用了慣性沉淀的原理，因此對儀器結構的設計，主要是使其能加速雲霧質點達到必要的流速，以便利用其慣性在取样片上很好的沉淀。儀器除能進行雲霧滴譜的觀測外，還能觀測雲霧含水量和大气中的鹽核。文中對儀器的結構、性能和誤差作了詳細的分析和討論。

## 一、引 言

雲霧物理學科的研究工作在我國已經逐步開展，不少研究單位建立了高山雲霧觀測站，展開了野外雲霧宏觀及微觀物理的觀測研究工作。在研究雲霧微觀物理過程中，鑑於雲霧滴譜、雲滴濃度的觀測十分重要，因此在國外已製成電動滴譜儀進行觀測。但是，考慮到我國的具體情況，各雲霧觀測站還不是全部都有電和野外觀測的流動性，所以我們設計製造了一種全機械式的三用滴譜儀。近兩年來，利用這種滴譜儀在野外已取得了不少觀測資料。為了野外工作的便利，這種儀器除可以觀測滴譜外，只要換一個取样頭，就可以觀測含水量和鹽核。這樣一物三用，就減少了儀器的數量，對觀測工作是很方便的。

三用滴譜儀是按照下列四點基本性能和要求，進行設計試制的。

(1) 滴譜取样時最高抽氣風速為 20—30 米/秒，誤差為  $\pm 5\%$  左右；含水量鹽核取样時，抽氣風速應為 35 米/秒左右，誤差為  $\pm 5\%$ 。

(2) 取样暴露時間應定時，而且可以調整。暴露時間由 0.1 秒到 0.5 秒，誤差為  $\pm 10\%$ 。

(3) 滴譜取样最好是連續的。

(4) 含水量取样時，取样片在氣流流動方向上的位置應可以調整。

根據兩年來野外工作的實際考驗和不斷的改進，三用滴譜儀的結構已逐步完善，目前已基本上定型。本文下面介紹的主要是三用滴譜儀機械結構的設計部分。

## 二、儀器的結構設計

### 1. 結 構 概 述

三用滴譜儀的取样是應用慣性沉淀原理，因此對儀器結構的設計，主要要求是使其能加速雲霧質點達到必要的流速，以便利用其慣性，在取样片上很好的沉淀。因此，三用滴譜儀實際上就是一個微型風洞與取样機構組合而成。

儀器的結構如圖 1 所示。滴譜儀是手搖式的，通常在不費力的情況下，手搖轉數為每秒一圈左右。這樣的轉速通過增速齒輪箱(1)，使裝有風扇的輸出軸達到高速旋轉，因而加速了雲霧氣流的流速。流速的大小由“U”形管壓力計(4)指示。

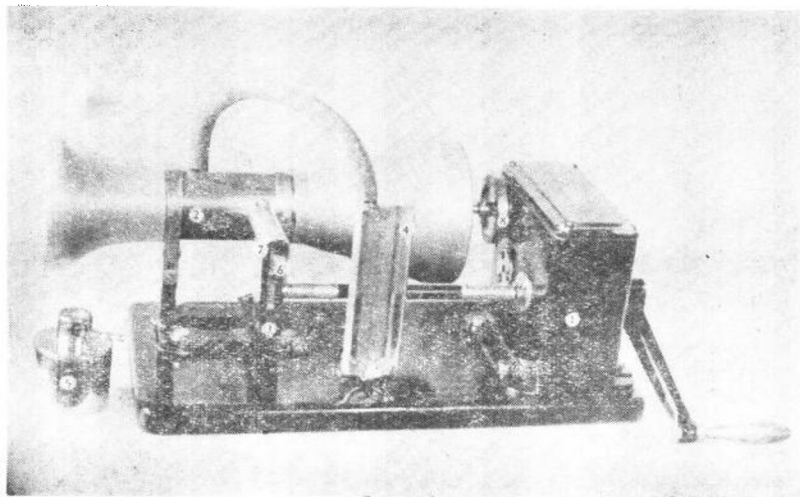


圖 1. 三 用 滴 譜 儀

顯然，手搖轉速是很不均勻的，這勢必影響氣流流速的穩定，為了減小這種影響，在輸出的風扇軸上裝了一個慣性輪(8)。

風洞洞身(2)分成三段——入口段、直段(工作段)與出口段。滴譜取樣機構(3)安裝在工作段的後半部，取樣時只要將裝着取樣片的芯子(6)插入機構的導向套筒內，就可使其等速移動，並得到暴露時間一定的取樣樣品。為了在取樣前後避免外界雲霧水滴打到取樣片上，造成滴譜的誤差，因而在取樣機構上安裝了擋風筒(7)。

取含水量及鹽核的樣品時，只要將入口段擰下，換上觀測含水量和鹽核的取樣頭(5)，即可抽氣取樣。

## 2. 增速齒輪箱的設計

### (1) 增速比的確定

使靜止空氣加速的能量是通過旋轉着的風扇來自人體的，因此設計時應使風扇軸具有高轉數。實驗證明，在微型風洞結構尺寸近於本設計尺寸時，為達到必需的风速值，風扇軸轉數應在 15000 轉/分左右。在正常的工作過程中，為了使手搖不太費力，取手搖轉速為每秒 1—1.2 轉是適宜的。因此初設增速比為 200，手搖轉速若為 1.2 轉/秒，則風扇轉數近於 15000 轉/分。

齒輪箱輸出軸上工作負荷不大，為設計及加工的方便，齒輪採用了相同模數、四級增速、各級增速比相同的方案。

計算：取齒輪模數  $m = 0.9$ ，

大齒輪齒數  $z_{1,3,5,7} = 60$ ，

小齒輪齒數  $z_{2,4,6,8} = 16$ ，

則大齒輪節圓直徑

$$D_{1,3,5,7} = m z_{1,3,5,7} = 0.9 \times 60 = 54 \text{ 毫米},$$

小齒輪節圓直徑

$$D_{2,4,6,8} = m z_{2,4,6,8} = 0.9 \times 16 = 14.4 \text{ 毫米},$$

总的增速比

$$i = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3}{z_4} \cdot \frac{z_5}{z_6} \cdot \frac{z_7}{z_8} = \left(\frac{60}{16}\right)^4 \doteq 198,$$

这个数值接近于初設数值 200.

若手搖为 1 轉/秒,則風扇軸轉数为 11880 轉/分.

## (2) 增速箱結構形式

定型的滴譜儀增速箱結構是采用三軸六支承的型式。图 2 为其传动結構示意图,图 3 表示出各軸的相互位置。

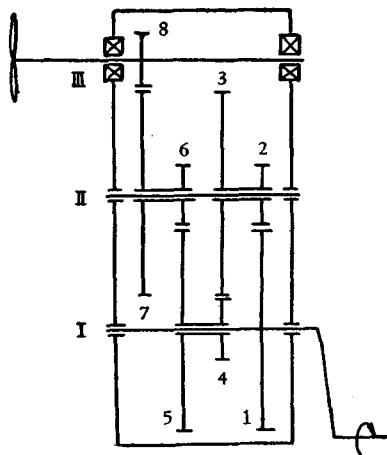


图 2.

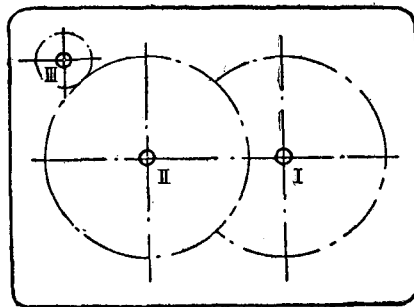


图 3.

風扇軸(軸 III) 所以置于箱体的一角, 主要是根据滴譜儀取样机构的要求, 同时也有利于抽气排风。

箱体設計为整体式, 由鑄造而成。这样容易保証加工精度, 便于成批生产和齒輪箱的潤滑。

## (3) 支承和潤滑

齒輪箱支承型式及潤滑方式的选取, 在很大程度上是决定于各軸的轉数和齒輪的圓周速度。若取手搖轉速  $n_1 = 1.2$  轉/秒, 由計算可知, 齒輪 6 与 7 的轉数为 3800 轉/分, 而齒輪 8 轉数为 14300 轉/分。这样高的轉数理应都采用滾珠軸承, 但限于增速箱的結構型式, 齒輪 6 与 7 是空套在軸上旋轉的, 难于装置滾珠軸承, 所以只在末級齒輪軸上采用了一对滾珠軸承。

采用滾珠軸承可以减少支承磨損, 增加仪器使用寿命; 减少摩擦力矩, 有利于提高轉速和改善手搖不均匀性; 能使風扇軸有很高的对中心性以保証仪器的装配質量。

在手搖轉数为 1.2 轉/秒时, 由計算可知, 齒輪 5 与 6 的圓周速度近于 2.9 米/秒, 而齒輪 7 与 8 的圓周速度近于 10.8 米/秒。这样的齒輪圓周速度使增速齒輪箱有条件采用稀油飞溅的方式来潤滑, 同时滾珠軸承亦可应用这种方式进行潤滑。这对于野外工作的仪

器是很方便的。

#### (4) 輸出軸的設計和風扇的平衡

在儀器儀表另件的設計中，一般是不進行材料的強度和變形的計算。增速齒輪箱輸出風扇軸的尺寸，主要是根據儀器的結構要求而設計的。但是由於風扇軸是在很高的轉速（15000 轉/分）下帶着風扇工作的，因此對於在這種工作條件下可能發生的現象不能不予以考慮，同時也有必要進行一些驗算。

風扇裝在軸端旋轉工作，由於工藝上的問題，風扇完全有可能是不平衡的，因而裝在軸上的風扇就偏離風扇軸軸綫，儘管偏離很小，但在高轉速情況下，也會產生很大的離心力。這種離心力即成了風扇軸的附加载荷，因而會使軸彎曲變形，使風扇軸旋轉工作時發生擺動。軸的彎曲變形一經發生，又會進一步加大離心力，從而使變形繼續增加。假若軸的彈性反作用力不能平衡附加的離心力，從理論上來說軸的變形會無限增大，直到軸斷裂不能工作為止。產生這種現象時的轉數稱為軸的臨界轉數。另外，從儀器結構要求上對軸的彎曲變形也是有所限制的。在微型風洞結構尺寸一定的條件下，為使抽氣效率增大，在設計風扇與出口管壁之間的徑向間隙  $\delta$  時，取值愈小愈好。但是考慮  $\delta$  值的大小時，不能不考慮到風扇軸旋轉工作時的擺動情況和儀器的裝配精度（參閱圖 4）。

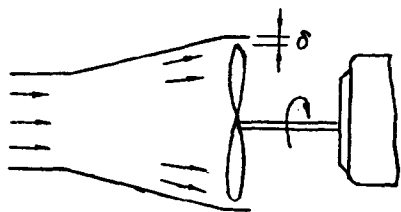


圖 4.

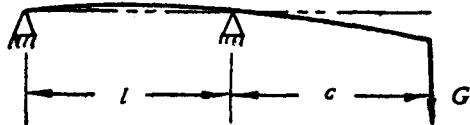


圖 5.

圖 5 畫出了風扇軸支承特點及集中載荷作用點的位置。若令風扇重量為 25 克，風扇軸直徑為 5 毫米，風扇軸轉數為 15000 轉/分，支承與載荷位置的尺寸  $l = c = 42$  毫米，風扇重心與風扇軸綫偏離為 1 毫米，則對於一根碳鋼軸在風扇工作時所產生的離心力近於 6 公斤。在此附加载荷下，軸的彎曲變形近於 0.5 毫米。由此看出，當風扇不平衡度（為風扇重量與其重心對風扇旋轉軸綫偏離的乘積）為 2.5 克厘米時，在軸高速旋轉下，附加载荷所產生的彎曲變形等於徑向間隙  $\delta$  的一半。這就意味着在裝配微型風洞洞身與增速箱時，若徑向間隙  $\delta$  有 0.5 毫米的偏差，則風扇高速旋轉時就會發生風扇碰壁的現象，這顯然是不允許的。所以風扇的設計與加工，必須注意它的結構對稱和工藝上的平衡。

風扇軸的臨界轉數  $n_{kp}$  的驗算，可由近似公式<sup>[6]</sup>

$$n_{kp} \approx 300 \sqrt{\frac{3EI}{G(l+c)c^2}}$$

算得。將前述的結構參數代入上式，則  $n_{kp}$  約為 20000 轉/分。實際上由於風扇軸兩支承間一段軸的直徑大於 5 毫米，因此  $n_{kp}$  還會增大。但是三用滴譜儀在使用時，風扇軸的最高轉數不大於 15000 轉/分，所以軸不會破壞。

### 3. 微型風洞洞身設計

滴譜的取样是應用慣性捕獲的原理，因此要求雲霧氣流應該具有一定的流速。微型

风洞的洞身就是制造和引导这种气流的场所。为了使所取得的样品能有较好的准确性和代表性,微型风洞的设计主要是解决云滴进口和在取样片上的沉淀(打着)问题,以及保证云雾气流的均匀稳定问题。

根据气溶胶力学的理论,某一取样片捕获云滴的捕获系数  $E$  是惯性系数  $K = \frac{d^2 \rho u_\infty}{18 \eta l}$

的函数(具体函数关系随取样片形状而不同)。 $d$  是云滴直径,  $\rho$  是云滴密度,  $\eta$  是空气粘性系数,  $l$  是取样片的特性长度,  $u_\infty$  是均匀气流的流速。显然,  $d$  愈大或  $u_\infty$  愈大,则  $K$  愈大,  $E$  也愈大。要想捕获到大小不同的全部云滴,只有使  $u_\infty$  为无限大,但事实上是不可能的。

为了保证取样片上能尽量多的捕获到很小的云滴,抽气速度希望愈大愈好(如要捕获到直径  $5 \mu$  以上的云滴,抽气速度总要在 10 米/秒以上才行)。

但是,滴谱仪还要解决一个云滴进口的问题,假若抽气速度与外界自然风速不等,则进入风洞的云滴浓度就会偏大或偏小。为了使吸入风洞的云滴浓度保持不变,应当采用薄壁直管、同速取样,然而这种方法还有较大缺点。首先,薄壁直管对外面风向的变化非常敏感,在风向与进气口轴线成一定角度取样时,云滴的进口系数将大大减小。而自然风向是很不稳定的,在几秒钟之内经常有  $10^\circ - 30^\circ$  的变化。其次,薄壁直管对气流流速的分布也有直接影响,均匀气流由于管子入口壁的阻力,在流入管内后流速分布的均匀性也就被破坏。因此为了保证捕获质量,必须正确设计微型风洞的入口段。

野外工作中自然风速常常是在 10 米/秒左右,而三用滴谱仪从考虑打着,和在手摇不太费力的情况下,抽气速度设计为 15—25 米/秒左右。为了初步解决(详细的分析可参考文献[9])进口与打着的矛盾,和降低滴谱浓度在自然风向变化时对直管入口的敏感性,我们将入口尺寸加大,成喇叭口形状。为了使进入的气流流速分布尽快的趋于均匀,喇叭口最好设计成流线形。但是实验证明<sup>[1,3]</sup>,入口形状用圆弧线代替已足够满意(其他抛物线、椭圆曲线亦可以),同时这对设计和制造也方便得多。

考虑到制造装配和使用上的方便,洞身设计为三段,即入口段、工作段(直管)和出口段。入口段设计如以上所述。工作段应有足够的长度,以便更好的保证气流流速在管内分布的均匀性。它的内径与取样芯子宽度之比应不小于 10:1,这样就可以忽略由于取样芯子横贯管子,而引起的气流流速的变化。出口段的扩散角可设计为  $10^\circ - 15^\circ$  左右。如扩散角小一些可以减少气流的扩散损失,但增加了出口段的长度;大些,则有相反的结果。洞身内壁应力求光滑,减少摩擦损失。段与段的连接处要平整,否则,将引起气流流速的附加不均匀性,这一点特别是对入口段与工作段的连接处更为重要。

#### 4. 滴谱取样机构的设计

对滴谱取样机构使用性能上的要求,大致可以归纳为下列四点:

1. 能连续取样品 5—10 片。
2. 取样暴露时间范围为 0.1—0.5 秒,误差为  $\leq \pm 10\%$ 。
3. 在同一次取样中,样片各点的暴露时间相等。
4. 机构力求简单紧凑,使用方便,易于维护。

根据这四点要求,经过几种方案的分析比较,我们采用了下面的方案。

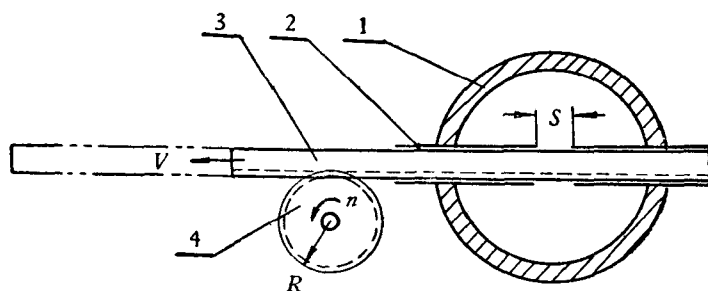


图 6.

設計原理图如图 6 所示：1 为工作段管子，2 为导引取样芯子的导向套管，3 为做成齿条形式的取样芯子，4 为齿輪。在滴譜取样时齿輪 4 与手搖軸同速轉动，并带动取样芯子以一定的綫速度  $V$  移动，并通过两导向套管之間的間隙  $S$ ，达到定时取样。以  $t$  代表暴露時間，則有

$$t = \frac{S}{v} = \frac{S}{2\pi n R} \quad (1)$$

由暴露時間的公式可知，为了使  $t$  增加，可以加大  $S$  或减小  $R$  与  $n$ 。从結構上考虑，变换齿輪大小  $R$  是不方便的，而改变  $S$  与  $n$  是可能的。根据这种方案設計了下面的具体結構。

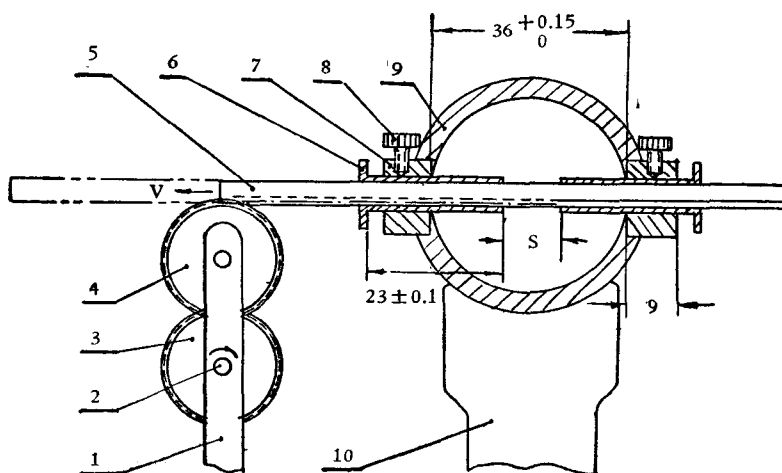


图 7.

参閱图 7 支承 1 上装有一对相同的齿輪，齿輪 3 固定在轉軸 2 上，而轉軸是通过一根軟軸(未划出，可参見图 1)与手搖軸相連接的，所以齿輪 3 与手搖軸同步轉动。因为手搖軸与水平位置上的取样芯子(5)距离較远，故加了一个中間齿輪 4，它分别与齿輪 3 和齿条芯子 5 嚙合。滴譜仪手搖工作时，取样芯子即以  $R\omega$  的綫速度在导向套筒(6)的方形孔中等速运动，取样芯子在迎着气流来向的一面装有长条的取样片(未划出)。取样片在芯子上的位置是这样安排的：取样前，齿条芯子一端与齿輪 4 接近嚙合时，取样片恰好破

右边的导向套筒盖住,这时尽管手摇抽风,取样芯子不向前运动,取样片亦不会暴露打湿。如要取样,只要用手指轻轻将齿条芯子向左一推,使其与齿轮啮合,芯子在齿轮4的带动下即自行前进,取样片经过两导向套筒之间的空隙时取样。取样芯子向前运动到取样片恰好全部进入左面导向套筒时,由于齿条齿数中断,齿轮4开始空转,芯子不再前进,取样过程就此结束。

暴露时间的改变可以通过调整  $S$  来达到。导向套筒上面刻有刻度用来指示  $S$  的大小。固定在直管(9)上的两个套架(7)是支持导向套筒的,它上面各有一个固定螺丝(8)用来固定调好位置的导向套筒。此外,亦可直接改变手摇转速  $n$ ,使  $t$  值改变。

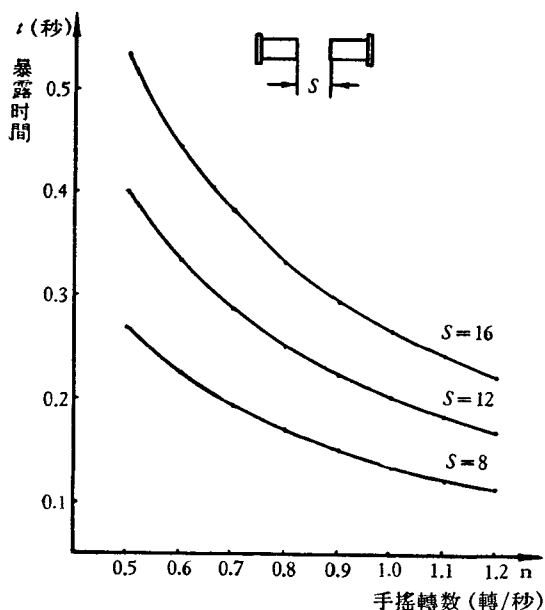


图 8. 三用滴谱仪暴露时间查定曲线

11, 取样架在销子4的导引下可沿直线移动,从而改变进气孔与取样片的距离。

装卸取样片时,只要拧下进气头,再拧下压紧螺母即可进行

含水量取样头亦可用来取大气中盐核,这时只要将吸水纸取样片换成涂有明胶、硝酸

在野外工作中,暴露时间是直接根据手摇转速  $n$  的大小,在给定暴露时间查定曲线上查出的(图 8)。

## 5. 含水量取样头的設計

含水量取样头的具体结构如图 9 所示。取样片(7)用压紧螺母(8)压在取样架(3)上,取样架套在支座(5)的导孔中,并使取样片垂直于进气头(1)上直径为 6 毫米的进气孔。含水量取样仍采用惯性沉淀原理。云雾气流以 30—35 米/秒的速度经过进气孔喷射到吸水纸取样片上,于是云滴打湿吸水纸形成一个圆斑,即完成取样。取样片的沉淀效率与进气口到取样片的距离有着密切关系,所以取样架设计成可调式的。拧动调节螺母

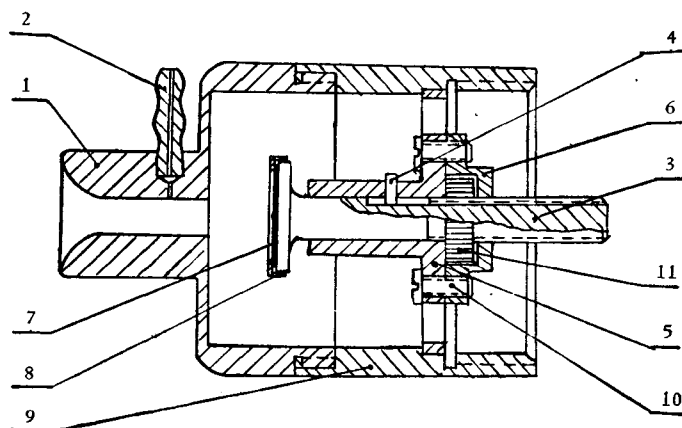


图 9.

銀和甘油溶液的玻璃片,就可象取含水量时一样的方法获取大气中的盐核。

为了保证测压嘴(2)的装配质量,减少仪器重量和缩小外廓尺寸,进气头上进气嘴设计成凸出的。不过进气嘴应足够长,以避免嘴子后面台阶对入口断面处气流流场的影  
响。

### 三、仪器性能及其检定

#### 1. 流速测量方法

三用滴谱仪是手摇式的,因此抽气风速很难稳定,但是要求的风速测量准确度也不高,同时又为了仪器在野外使用时的方便,微型风洞采用了用最简单的“U”形管压力计指示的静压法,测量管内抽气速度。

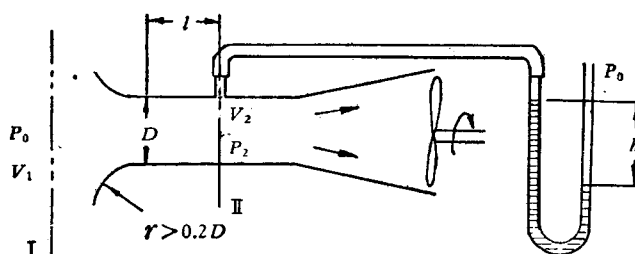


图 10.

根据伯努利方程有:

$$P_0 = P_2 + \frac{\gamma V_2^2}{2g} + H_{\text{损}},$$

或

$$V_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P_2) - H_{\text{损}}}, \quad (2)$$

其中  $P_0$ ——大气压力,

$P_2 V_2$ ——管内气流的静压力和流速,

$\rho$ ——大气密度,

$H_{\text{损}}$ ——从入口到测压嘴间摩擦阻力损失。

为了野外使用上的方便,压力计测量液体选用纯水,其比重  $\gamma_*$  为 1。若忽略  $H_{\text{损}}$  项(可以通过检定得到订正),则有

$$V_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P_2)} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \gamma_* h} = \sqrt{\frac{2}{\rho} h}, \quad (2a)$$

其中  $h$ ——“U”形管压力计两水柱高度差。

由上述的测量原理导出的公式,同样适用于外界有自然风,即  $V_1 \approx 0$  的情况,因为“U”形管开口端不论自然风有无,它只能感受大气压力  $P_0$ ,在这种情况下“U”形管指示仍是感受  $P_0 - P_2$ 。不过为了防止自然风斜吹“U”形管开口端对压力指示造成的影响,在开口端需要加一段多孔的橡皮管保护起来。

## 2. 流速誤差分析及其訂正

### (1) 大气密度变化的訂正

根据公式(2a)很容易由压力計讀数  $h$  求得管内风速值  $V_2$ , 但是仪器使用时并不是在标准状态下工作, 因此大气密度  $\rho$  值就会随着不同的拔海高度(如在高山)及天气状况的不同而变化, 因而就产生了流速的系統誤差. 为了訂正这种誤差, 并考虑到使用上的方便, 繪制了两个图表. 图 11 是根据公式(3)繪制的、大气密度  $\rho$  随大气压力与大气温度改变的曲綫图; 图 12 是根据公式(2a)繪制的、在不同的大气密度  $\rho$  下由压力計讀数  $h$  查取抽气风速  $V$  的曲綫图.

大气密度与大气压力、大气温度的关系公式, 可以由气态方程式导出<sup>[4]</sup>:

$$\rho = \frac{1}{8} \frac{P_1}{760} \frac{288}{273 + t_1} = 0.04737 \frac{P_1}{273 + t_1} \quad \left( \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \right) \quad (3)$$

其中  $P_1$ ——工作点实测大气压力(毫米, 水銀柱高),

$t_1$ ——工作点实测大气温度( $^{\circ}\text{C}$ ).

例如: 設地面大气压力为 760 毫米高水銀柱, 温度为  $15^{\circ}\text{C}$ , 大气密度  $\rho = 0.125$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>, 当压力計指示  $h$  为 39 毫米高水柱时, 根据公式可算出抽气速度  $V_2 = 25$  米/秒. 若工作地点設在 1500 米的高山上, 此时气压为 634 毫米高水銀柱, 温度为  $5^{\circ}\text{C}$ , 由公式(3)可算出  $\rho = 0.108$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>,  $h$  仍为 39 毫米高水柱时, 由公式(2a)可算出  $V_2 = 26.8$  米/秒. 风速相对誤差为 7%, 这已超出风速測量誤差的范围 ( $\pm 5\%$ ). 所以大气密

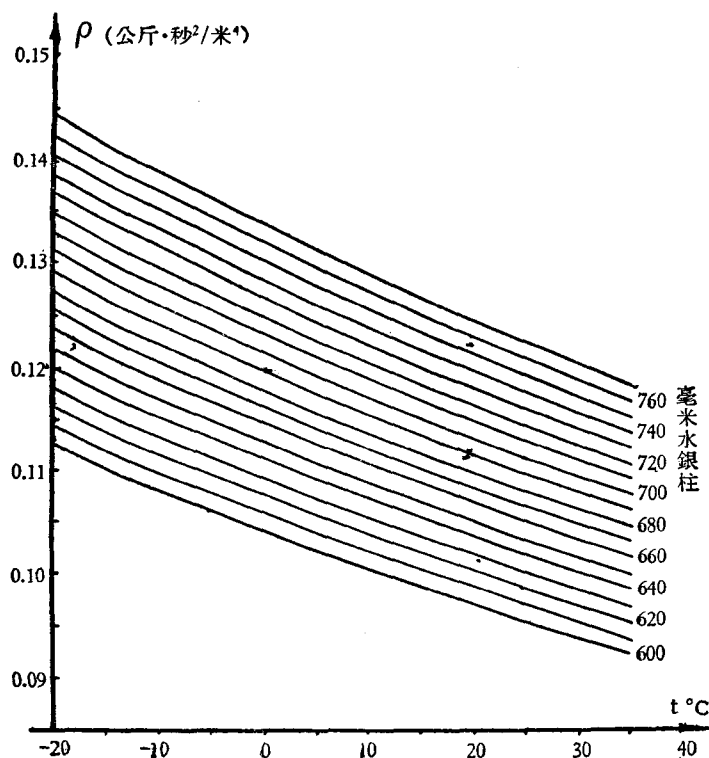


图 11. 大气压力、密度、温度关系曲綫

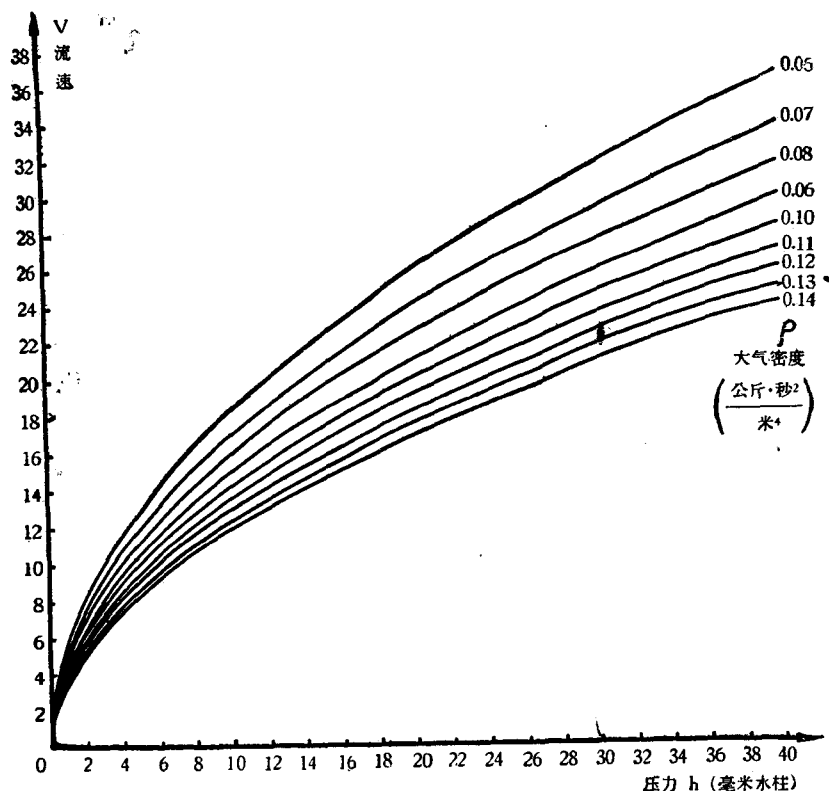


图 12. 风速查取曲线

度的变化在仪器的流速测量上不能不予以考虑。

### (2) 摩擦阻力损失误差

在公式(2a)中曾忽略一项摩擦阻力损失项  $H_{\text{损}}$ ，这样算出的流速值会偏高。 $H_{\text{损}}$  由两项组成，一项是微型风洞入口部分的摩擦阻力损失；一项是风洞直管段的摩擦损失。根据一些实验资料<sup>[3]</sup> 可以算出，微型风洞在本设计的结构尺寸下， $H_{\text{损}}$  约为压力测量值的百分之五。显而易见，若不计  $H_{\text{损}}$  项，则风速的测量值就会造成 2.5% 的相对误差。

另外，由于测压嘴的钻孔及安装质量的不同，也将影响流速测量值。所以对于上述的摩擦阻力误差和测压嘴的安装误差，在使用仪器前必须进行流速的检定。

流速的检定工作是用微型皮托管进行的。在不同的流速下，分别读取同一流速时的皮托管压力计读数 and 仪器压力计读数，然后根据皮托管压力计每个读数由公式(2a)算出相应的一组流速值，即可绘出一条理论风速曲线（或称真正风速曲线）。根据仪器压力计读数与由皮托管压力计读数算出的流速值，即可绘出仪器的实验风速曲线。这两条曲线就组成了三用滴谱仪流速订正曲线（图 13）。

### (3) 温度及重力加速度改变引起的误差<sup>[2]</sup>

这种误差是液体压力计所固有的，因为用液柱高度量测压力，对于水应换算为 4°C（对于水银应换算为 0°C），并应取标准的重力加速度  $g = 980.665 \text{ 厘米/秒}^2$ （相当于地理纬度  $\varphi = 45^\circ$  时的  $g$ ）。但是读数是其他温度及重力加速度下读取的，所以形成误差。此外，压力计刻度尺是在室温下刻度的，温度的变化使刻度尺的分度（两相邻标记之间的

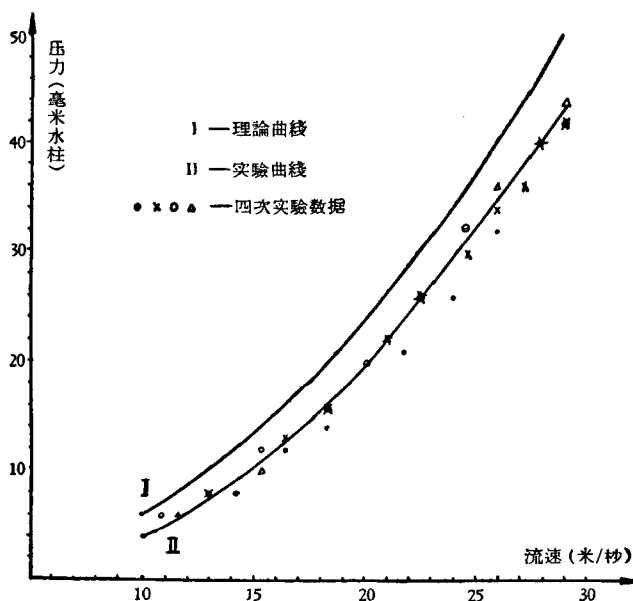


图 13. 三用滴譜仪流速訂正曲綫

間隔)改变,这也是形成讀数誤差的原因。但是它們的誤差很小,可以忽略不計。

#### (4) 風扇轉速不穩定所形成的誤差

因为三用滴譜仪手搖轉速不穩定,所以風扇轉速亦不穩定,因此管內气流流速亦会忽快忽慢,致使压力計水柱上下摆动,讀数困难,造成了誤差。手搖轉速的不穩定性随着轉速的增加而加大,这与操作者的体力及使用熟練程度有关。表 1 是多次試驗的結果。这是在手搖三至五圈的时间間隔內,“U”形管压力計在不同水柱高度差时,压力指示的起伏量(毫米水柱)。

表 1.

| 压 力:<br>(毫米,水柱高) | 风 速<br>(米/秒) | 試 驗 次 数 |     |     |     | 相 对<br>誤差% |
|------------------|--------------|---------|-----|-----|-----|------------|
|                  |              | 1       | 2   | 3   | 4   |            |
| 10               | 14~15        | 0.6     | 0.4 | 0.4 | 0.4 | ±4%        |
| 20               | 20±0.5       | 1.5     | 1.0 | 1.0 | 1.0 | ±5%        |
| 30               | 24~25        | 2.0     | 2.0 | 2.0 | 2.0 | ±6%        |
| 40               | 28±0.5       | 2.4     | 3.0 |     | 3.0 | ±7.5%      |

試驗之所以觀測三至五圈时间間隔內的水柱起伏量,是因为仪器取一次样的时间仅需要手搖一圈多。由表 1 可以看出,手搖誤差还是較大的,而且是难以消除的。这正反映了手搖式滴譜仪的缺点。

#### (5) 判讀誤差

选用“U”形管压力計作为測量装置,由于本身准确度不高,用眼睛判讀讀数时就会产生判讀誤差。經驗証明,判讀的絕對誤差为 0.5 毫米左右。“U”形管压力計是二次讀数,所以絕對誤差为 1 毫米。三用滴譜仪工作条件不好,判讀誤差是不可避免的,而絕對誤差为 ±1.5 毫米水柱高是可能的,所以判讀誤差定为 ±1.5 毫米水柱高。

## (6) 流速的总误差

前面已经指出, 在应用公式(2)时, 对大气密度  $\rho$  的误差和摩擦阻力损失  $H_{\text{摩}}$  都曾进行了订正和检定, 这样它们的残余误差就完全可以忽略不计了(相对于压力  $h$  的误差——见后)。于是公式(2a)可以写成

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} h} = K \cdot h^{\frac{1}{2}},$$

其中  $K$  可近似地作为常数。

对于函数关系为

$$N = \frac{K a^m b^n c^p}{d^q e^r}$$

形式的相对误差公式, 有

$$E_r \leq m \left| \frac{\Delta a}{a} \right| + n \left| \frac{\Delta b}{b} \right| + p \left| \frac{\Delta c}{c} \right| + q \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + r \left| \frac{\Delta e}{e} \right|. \quad (4)$$

因此流速的相对误差可以写成

$$E_r^v = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{2} E_r^h, \quad (5)$$

其中  $E_r^h$  为压力的相对误差。

对于压力的相对误差, 根据前几节的分析主要是手摇转速的不稳定造成的误差(以  $E_1$  表示其相对误差)和判读误差(以  $E_2$  表其相对误差)所组成。按照偶然误差的扩展定理

$$E_r^h = \pm \sqrt{E_1^2 + E_2^2},$$

代入  $E_1$  和  $E_2$  的数值, 即可算出在不同压力下的  $E_r^h$  值, 再根据公式(5)就可以算出相应的  $E_r^v$  值。

表 2.

| 压 力<br>(毫米水柱高) | 近似风速 <sup>1)</sup><br>(米/秒) | 手 摇 相 对<br>误差 $E_1$   | 判 读 相 对<br>误差 $E_2$ | 压力相 对<br>误差 $E_r^h$ | 速 度 相 对<br>误差 $E_r^v$ |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 10             | 13~14                       | ±4%                   | ±15%                | ±17%                | ±8.5%                 |
| 15             | 15.5~17                     | (±4.5%) <sup>2)</sup> | ±10%                | ±11%                | ±5.5%                 |
| 20             | 18~19.5                     | ±5%                   | ±7.5%               | ±9%                 | ±4.5%                 |
| 30             | 22.5~24                     | ±6%                   | ±5%                 | ±7.8%               | ±3.9%                 |
| 40             | 26~28                       | ±7.5%                 | ±3.8%               | ±8.4%               | ±4.2%                 |

1) 因为大气密度的变化, 所以某一压力高度就对应着一个风速范围。

2) 实验中未取此数据, 现近似地取前后两项数值的平均值应用。

## 3. 滴谱取样暴露时间的误差分析

滴谱取样暴露时间是根据公式

$$t = \frac{S}{2\pi n R}$$

计算得出的。函数  $t$  的误差是由变数  $S$ ,  $n$ ,  $R$  所决定(参见图6)。