

一种用于实验室的热线式云含水量仪

W. D. Keith 等

1. 概 述

在雷暴电荷模拟实验等实验室研究工作中,了解模拟云的液水含量(LWC)是不可缺少的。人们以往都采用烟熏玻璃片、Formvar 印模仪、Knollenberg 光学探头及干湿表等手段测定云中液体水含量(LWC),但大多存在着成本高、准确度差或计算繁重等固有缺点。本文介绍一种结构简单的热线式测量装置,其准确度达 0.04 g/m^3 , 响应时间小于 0.5 s 。

2. 实验装置

装置探头上的热线为直径 $80 \mu\text{m}$ 、长 40 mm 的单股钨丝,探头装在转动支臂一端的 H 形框架上(见图 1)。云中水滴随热线周围的气流而动,只有具有足够动量的较大水滴才

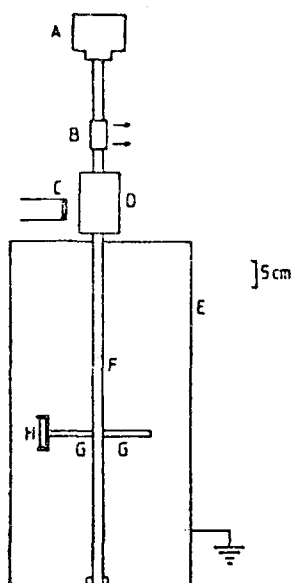


图 1 热线测量装置。A. 电动机, B. 集电环, C. 簧片开关, D. 控制电路, E. 外壳, F. 中心转轴, G. 支臂, H. 热线

可撞及热线。假设水滴碰撞效率与收集效率相等,并在 2.8 m/s 转速下,热线收集所有直径大于 $10 \mu\text{m}$ 的碰撞水滴,那么,若有相当一部分水滴的直径小于 $10 \mu\text{m}$,则 LWC 被低估。选择使用 2.8 m/s 转速可获得最大信号输出。增加转速将会增大信号输出,但不可无限定地增加,因曾出现支臂和热线把云中水滴“扫”一空之情况。低于 2.8 m/s 转速时,收集效率变低而致使装置不能有效地工作。

3. 温控电路

测量装置的温控电路如图 2 所示。热线由一连串的稳幅电压脉冲加热,并改变脉冲的标空比来控制热线的平均电功耗。IC 1 做无稳态多谐振荡器之用,可设定总循环时间,并以一定间隔触发 IC 2 而使 TR 1 导通,满串脉冲电压就加在了由 R_7 、 R_9 、 R_{10} 和热线 R_8 构成的电桥上;热线被加热直至电桥达到平衡时,IC 3 (一个 LM 311 电压比较器)让 IC 2 复位而使 TR 1 截止,经过电桥和热线的电压则下降至零。IC 1 的每一个循环都会使上述运行重复一次。循环时间与热线的热响应时间相比,要设定得足够短,以保证在 TR 1 截止时间内,热线的温度下降量小于热线对环境的温度高出量。

若热线在某设定温度下的阻值为 R_w ,那么 TR 1 导通时,加在热线上的电压就为:

$$V_w = \frac{R_w}{R_w + R_7} V_s \quad (1)$$

其中, V_s 是电源电压。

在此期间,热线的耗散功率就为:

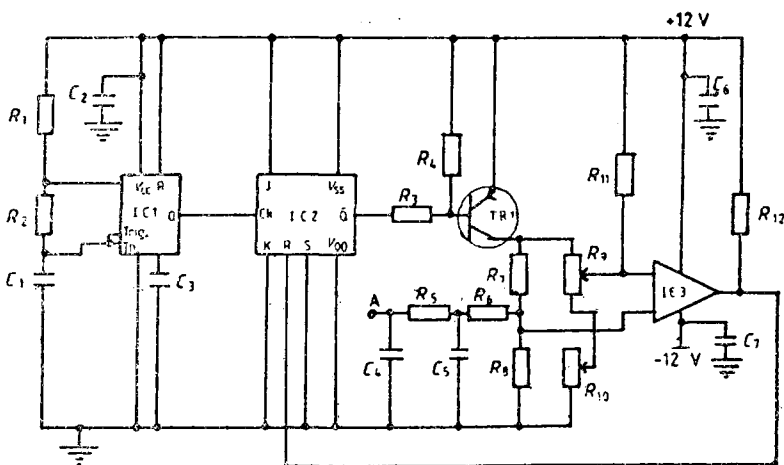


图 2 温控电路。IC 1:555 时基电路, IC 2:4027JK 触发器, IC 3: LM 311 电压比较器。TR 1:TIP 146

$$P_w = \frac{V_w^2}{R_w} = \frac{R_w}{(R_w + R_7)^2} V_s^2 \quad (2)$$

若导通时间为 τ_{on} , 总循环时间为 τ , 那么热线的平均耗散功率即为:

$$\bar{P}_w = P_w \frac{\tau_{on}}{\tau} = \frac{R_w V_s^2}{(R_w + R_7)^2} \cdot \frac{\tau_{on}}{\tau} \quad (3)$$

热线的平均电压为:

$$\bar{V}_w = V_w \frac{\tau_{on}}{\tau} = \frac{R_w V_s}{R_w + R_7} \cdot \frac{\tau_{on}}{\tau} \quad (4)$$

实际上, $\bar{V}_w$ 由图中 R_5 、 R_6 、 C_4 和 C_5 所构成的低通滤波器的输出端 A 点处得到。由(3)和(4)式可得:

$$\bar{P}_w = \frac{V_s}{R_w + R_7} \bar{V}_w \quad (5)$$

由于得到了电压与功耗的线性关系, 于是电压的相对变化就等于功耗的相对变化, 即

$$\frac{d\bar{V}_w}{\bar{V}_w} = \frac{d\bar{P}_w}{\bar{P}_w} \quad (6)$$

在传统的控制电路中,

$$P_w = \frac{V_w^2}{R_w} \quad (7)$$

于是有

$$\frac{dV_w}{V_w} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_w}{P_w} \quad (8)$$

从(6)和(8)式可看出脉宽调制控制电路的输出对功耗变化的灵敏度比传统电路的高出一倍。另一个优点是, 控制晶体管耗散的减少降低了整机功耗, 也减轻了仪器重量。

传统电路还需进行频率补偿调整以取得最佳性能并消除不稳定性, 而脉宽调制控制电路则不需要如此。

用一台描笔式记录器监测输出。零点偏置设定在 1.5 V, 这可使记录器灵敏度达 50 mV/cm。输出信号的读取分度为 ± 10 mV, 其相应分辨率是 ± 0.02 g/m³。

4. 校准和结果

探头热线工作温度定在 76°C。若定得太高, 热线表面会发生水膜沸腾而在水滴和热线间生成绝缘蒸气层。76°C 和 96°C 时的响应分别是 7.27 g/m³V 和 9.33 g/m³V, 表明较低的工作温度可得到较好的响应; 但在 56°C 和 36°C 时, 热线对水滴呈饱和状态而导致蒸发时间过长。在探头相对的支臂上装有长 100 mm、直径 1.5875 mm 的收集棒。云的 LWC 由转动 t 时间内堆结在收集棒上的雾凇重量导出。对两种不同的云用 Knoll-enberg 光学探头得出滴谱来计算收集棒碰撞效率平均值(CE), 计算公式为:

$$CE = \frac{1}{N_{\text{总}}} \sum_{d=0.75}^{43} N_d E_d \quad (9)$$

其中, $N_{\text{总}}$ 为每立方厘米中含水滴总数; N_d 为直径在 Δd 内的水滴数; E_d 是对直径为 $d(\mu\text{m})$ 的水滴的碰撞效率。

计算所得收集棒平均碰撞效率为 57%,

对两种云来说相差不到1%。各种云雾均使用喷雾器产生,且具有平均滴直径为 $12\mu\text{m}$ 的宽滴谱。

校准首先在 -9°C 进行,然后在 -3°C 和 -14°C 进行。图3示出了校准结果,从中可看出仪器具有依赖于LWC和环境气温的线性响应。这些直线方程为:

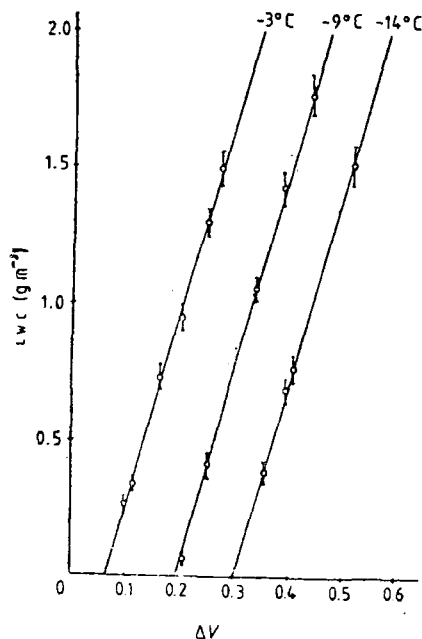


图3 校准曲线

$$LWC = 7.27 V + 0.1575 T \quad (10)$$

由于这些直线相互平行,可以只用一条直线来表示,并引入一个如下给出的温度系数:

$$V_{\text{校}} = \Delta V_r + 0.022 \Delta T \quad (11)$$

其中, $V_{\text{校}}$ 是校准曲线上的电压; ΔV_r 是高于 1.5V 的记录输出; ΔT 是与 -9°C 的温差(高于 -9°C 为正,低于 -9°C 为负)。

换用相同技术条件和相同长度的热线不会使校准发生变化。校准的检查也很简便,方法是在已知温度下在无云空气中旋转热线,监测输出并将其与先前的校准做对比。

5. 结论

这种热线式测量装置只需简单校准,输出数据以电压-时间图形式给出,适于云雾实验室使用,探头坚固,易于制作,成本低。误差来源是收集棒上雾凇重量、收集棒直径和转速、收集时间。仪器响应时间小于 0.5s ,准确度在 $1\text{g}/\text{m}^3$ 时为4%, $0.5\text{g}/\text{m}^3$ 时为4.6%, $0.06\text{g}/\text{m}^3$ 时为13.2%。

宗万水摘译自J.Phys.E: Sci.Instrum.

1986, 19(6)

力昌校