

§ 2 露点湿度计

露点法是一种古老的湿度测量方法,从经典的 Regnault 露点仪算起,它也就有一百多年的历史了。随着科学技术的发展,露点技术臻于完善。现代的光电露点仪采用热电制冷,并且可以自动补偿零点和连续跟踪测量露点。带有单板微处理机的露点仪还可以把露点温度同时转换为相对湿度等测量单位。高精度露点仪在一般湿度范围的测量准确度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

露点仪建立在可靠的理论基础之上,具有准确度高,测量范围宽的特点,其准确度仅次于重量法湿度计。因此,它不仅是一种工作仪器,而且也是长期以来普遍采用的标准仪器。露点仪广泛用于工业过程和实验室的湿度测量与控制,以及气象学中的探空测量等。在现代湿度测量技术中占有相当重要的位置。

众所周知,湿度测量方法很多,在这些方法中,除了露点法以外,其余方法基本上都有一个共同的特点,即湿度示值大体上与水汽压成线性关系^[1]。可以用下面的通式来表示,

$$\text{湿度示值} = ke \quad (2.2.1)$$

式中 e 为湿气中的水汽分压, k 是与仪器有关的比例系数,并受温度影响。我们前面已经介绍了饱和水汽压随温度变化的关系,它

可以近似地用下式表示,

$$\lg e_w = \frac{M}{T} + c \quad (2.2.2)$$

式中 M 和 c 为常数。由此看出,要使某些湿度计在宽的温度范围内保持高精度是十分困难的。换句话说,这些湿度计的使用范围受到限制,而露点湿度计则不然。关于热力学露点温度的严格定义我们在第一章 §3 中已经给出。简单来说,露点是指定压下湿气体被冷却到和水(或冰)饱和时的温度。因此按照式(2.2.2)露点温度可以表示为

$$T_d = \frac{M}{\lg e_w - c} \quad (2.2.3)$$

式(2.2.3)表明露点温度仅取决于水汽压力。因而,露点仪原则上能在相当广阔的范围内进行从高湿到低湿的测量,其准确度视温度测量技术水平等因素而定。当然,实际上露点仪的测量准确度还受其它因素的影响,但是同其它方法相比,它不存在原理方面的局限性。随着科学技术的发展,露点测量的准确度亦相应地提高到一个新水平。

一、露点湿度计的原理和发展

1. Regnault 原理

露点湿度计的原理可以通过一个简单的实验来说明。若将一个光洁的金属表面放到相对湿度低于 100% 的空气中并使之冷却,当温度降到某一数值时,靠近该表面的相对湿度达到 100%,这时将有露在表面上形成。因为在这个温度下空气中的水汽达到了饱和,冷表面附着的水膜和空气中的水份处于动态平衡,也就是说,在单位时间内离开和返回到表面上的水分子数相同,如图 2.2.1 所示。这就是 Regnault 原理。该原理可以叙述为:当一定体积的湿空气在恒定的总压力下被均匀降温时,在冷却的过程中,气体和水汽两者的分压力保持不变,直到空气中的水汽达到饱和

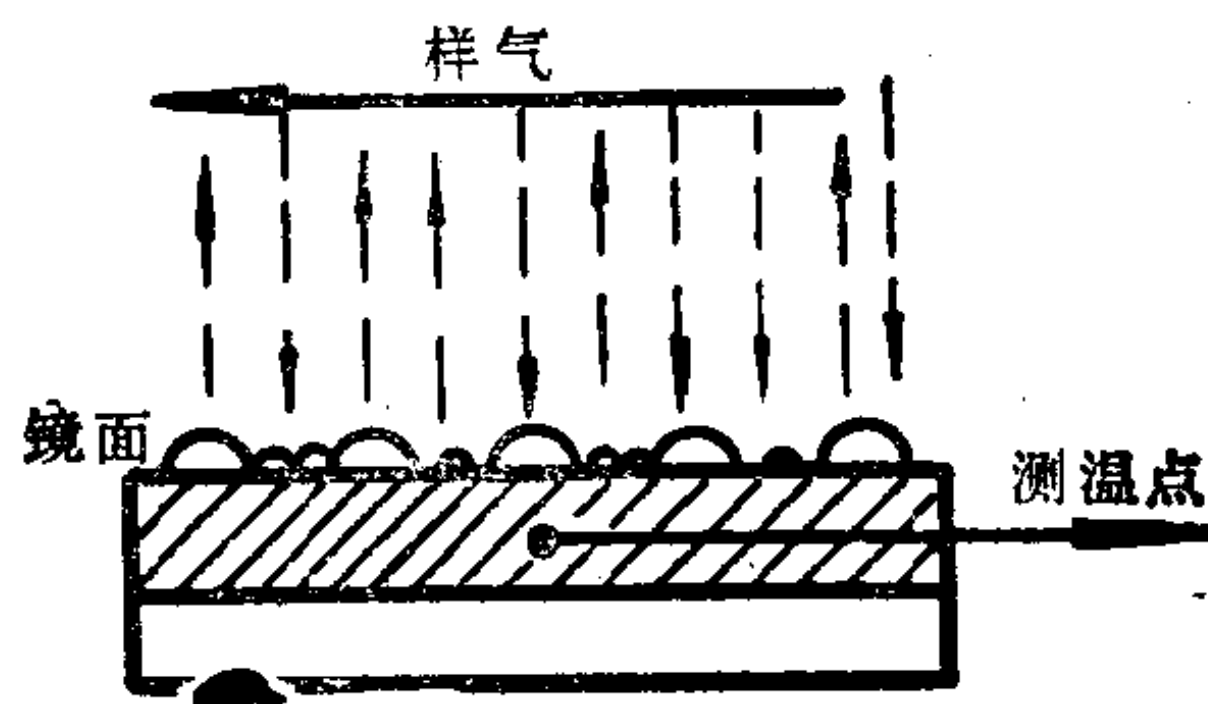


图 2.2.1 露点仪原理图

状态, 该状态叫做露点。如果空气的温度是 T_a , 露生成的温度为 T_d , 则湿空气的相对湿度可以通过下式算出,

$$U = \frac{\text{在露点温度}(T_d)\text{时的饱和水汽分压}}{\text{在原来温度}(T_a)\text{时的饱和水汽分压}} \times 100\% \quad (2.2.4)$$

式中饱和水汽压的数值可以通过查表得到。在 0°C 以下, 水汽达到饱和时, 水在镜面上结冰, 此时的温度又叫做霜点。过去, 人们习惯上不予区别, 通称为露点。图 2.2.2 的(a)和(b)分别为露点和霜点的显微照片。如果用目视观察露和霜的形成, 我们可以看到, 它们都是在镜面某一个固定的地方首先出现, 然后很快地扩展到整个镜面。因此要对露(霜)点作出正确判断, 往往需要有一个熟练过程。

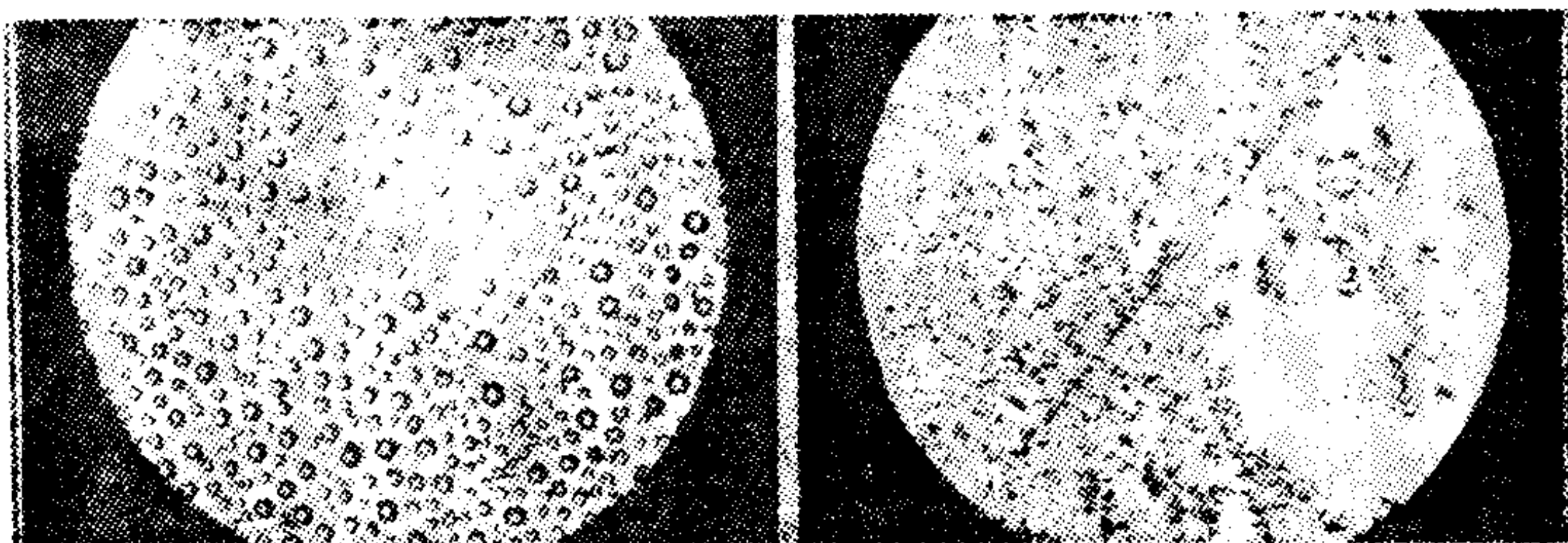


图2.2.2 镜面上的露和霜

2. 理想气体的露点温度^[2]

Regnault 原理表明, 露点法的理论基础是湿空气在冷却过程中水汽分压保持不变, 而且是以气体和水汽都遵守理想气体定律

为前提的。下面我们利用理想气体定律来证明这一点。

假设湿空气的体积为 V_0 , 总压力为 P , 水汽分压为 e , m_a 和 m_v 分别表示体积为 V_0 的湿空气中干空气和水汽的质量。如果湿空气在总压力 P 不变的条件下均匀冷却到温度 T_d , 在该温度下饱和水汽压为 e_w , 那么从理想气体定律, 对于初始状态有:

$$(P-e)V_0 = m_a RT/M_a \quad (2.2.5)$$

$$eV_0 = m_v RT/M_w \quad (2.2.6)$$

式中 T 表示初始温度, M_a 和 M_w 分别表示气体和水汽的分子量。

将式(2.2.5)除以式(2.2.6)可得如下关系:

$$\frac{P-e}{e} = \frac{m_a/M_a}{m_v/M_w} \quad (2.2.7)$$

如果最终体积用 V 表示, 则有

$$V(P-e_w) = m_a RT_d/M_a \quad (2.2.8)$$

$$Ve_w = m_v RT_d/M_w \quad (2.2.9)$$

同理得

$$\frac{P-e_w}{e_w} = \frac{m_a/M_a}{m_v/M_w} \quad (2.2.10)$$

比较式(2.2.7)和(2.2.10)有

$$\frac{P-e}{e} = \frac{P-e_w}{e_w} \quad (2.2.11)$$

于是由式(2.2.11)可得 $P/e_w = P/e$, 即 $e_w = e$ 。

由此可以得出结论, 在整个冷却过程中, 水汽压力保持不变。

3. 露点湿度计的发展

如前所述, 露点法是湿度测量史上最早发展起来的方法之一。据文献记载^[3], 第一台露点湿度计是 1660 年在意大利的佛罗伦萨发明的。它实际上是一个圆锥形的冷凝器, 其中装有雪或冰, 使器壁的温度保持在 0°C 。这样, 空气中的水汽便在其光滑的外壁上冷凝, 进而通过流下的露滴的速度来确定空气湿度。这种方法当然是非常粗糙的, 谈不上什么准确性。但是利用这种现象来测量湿度,

却具有极其重要的意义。大约在一个世纪后，即1751年 LeRoy 发现了冷凝温度和湿度的关系，并利用这种关系制造了一种冷凝湿度计。这种湿度计的工作原理是把冰加到一个装有水的容器中，使容器的温度不断下降，当观察到容器的外壁上出现露时，即记下水的温度。这个温度就是露点。在其后的一个世纪中，又先后出现了近十种露点式的湿度计，其中值得提出的是 Soldner 于1809年第一个用人工制冷的方法(乙醚蒸发)冷却表面，并注意到露的形成和消失的温度。

1827年 Damell 按照 LeRoy 的方法原理制造了以其名字命名的湿度计，这种湿度计具备了现代露点仪的特征，可以说是它的雏型，如图2.2.3所示。玻璃U形管两端连接两个空心球体，左球中装有易挥发的乙醚，并插入一支温度计。U型管右端玻璃球用细纱布包裹。测量时右球上的纱布用水或乙醚浸湿，这样左球内的乙醚蒸气进入右球并被冷凝。结果左球内的乙醚蒸气压下降，使乙醚不断蒸发，于是在左球内形成一个制冷过程。当左球的表面温度降低到某一数值时，周围空气中的水汽就在其表面上冷凝。记下这个温度，然后再将系统加热，并读取露滴消失时的温度，取两者的平均值作为露点的温度。

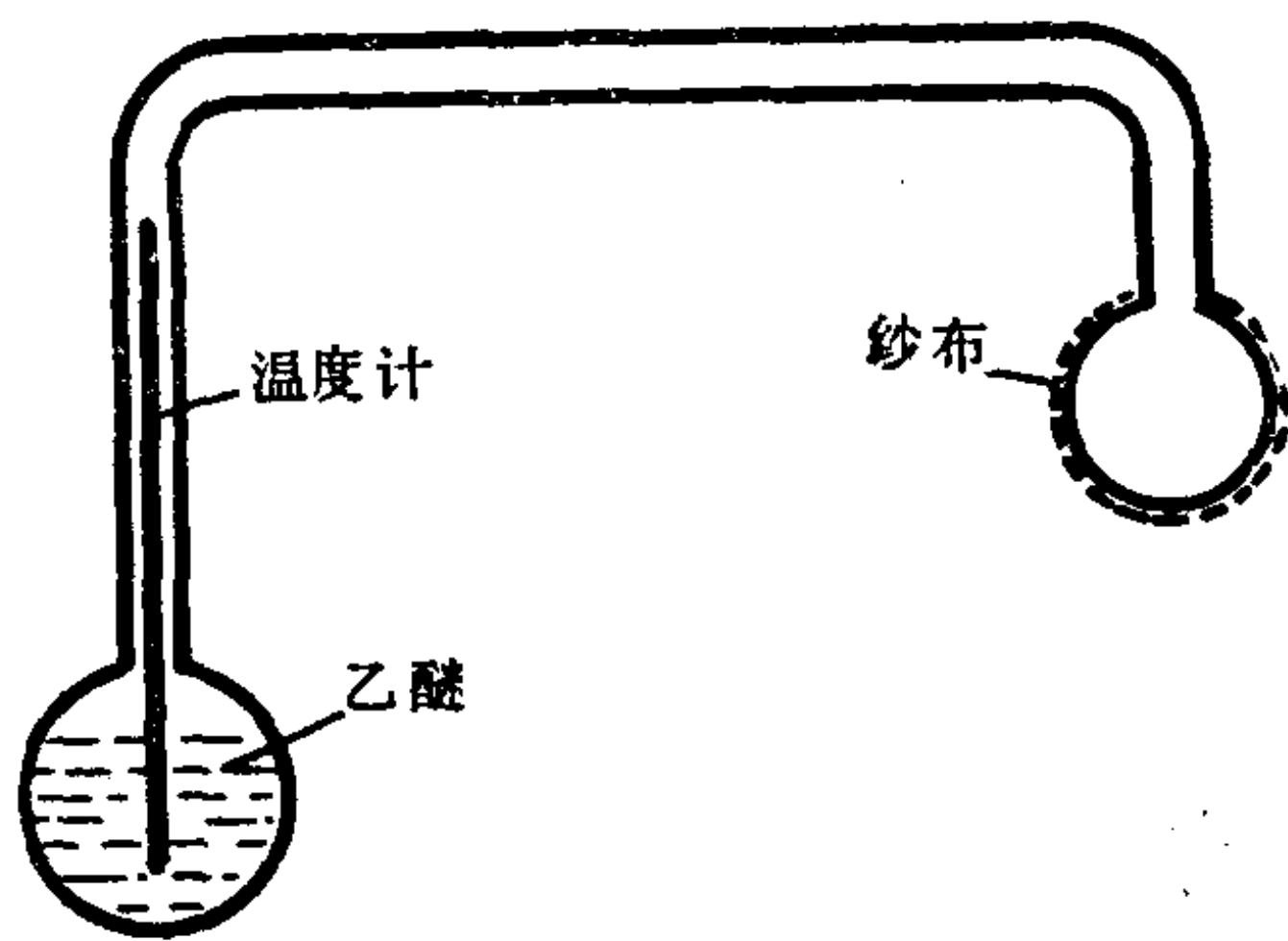
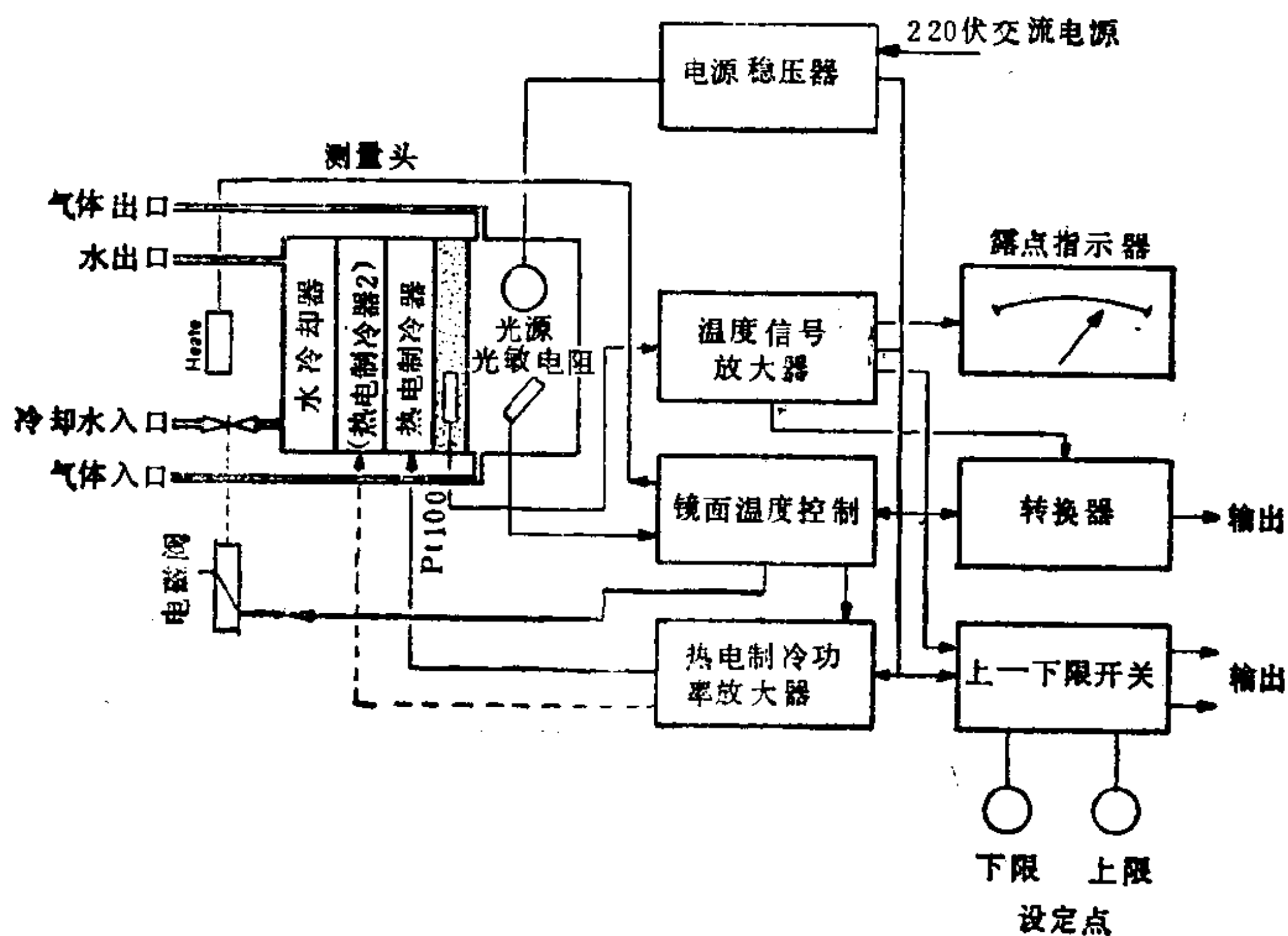


图2.2.3 Damel 露点仪

十九世纪中叶，人们掌握了空气中的水汽分压只与温度有关这一重要性质。1845年 Regnault 在前人的基础上，系统地说明了他设计的露点湿度计的原理，如前所述，这是现代露点仪的基础，被称为 Regnault 原理。Regnault 露点仪有各种变型，其中常见的结构形式是用银套管作镜面，用乙醚蒸发制冷，用目测法确定露的生成，由玻璃温度计指示露点。1851年 Ronalds 对 Regnault 露点仪进行改进，首先采用光学方法观察露的形成。



下文将详细地予以介绍。

展过程主要集中在下面四个问题上：

其一，制冷方法，即结露表面(镜面)的降温方法。

其二，露点温度的测量方法。

其三，露的检测方法和镜面温度的控制技术。

其四，镜面材料的选择。

这些问题我们将在本章的有关部分分别进行讨论。