

## § 6 光学型湿度计

### 一、红外吸收湿度计

吸收光谱法在现代湿度测量技术中占有一个重要的位置。它包括红外和紫外吸收。这里首先介绍当前广泛应用的红外吸收湿度计。

众所周知，包括水在内的许多化合物的分子在红外波段都有吸收光谱带，吸收带光谱的强弱和所在的波段是由分子的结构来决定的。每一种分子都有它所特有的一组“特征吸收带”，红外吸收湿度计就是利用这一原理发展起来的湿度测量技术。

可见光是电磁波谱中能引起人的视觉的波段。红外光是不可见的，故亦称为红外辐射，其波长范围从  $0.76\mu\text{m}$  到  $500\mu\text{m}$ ，介于微波和可见光之间。在光谱技术中，人们常常把它划分为近红外、中红外和远红外三个区。湿度测量主要是利用近红外区，其波长范围从  $0.76\mu\text{m}$  到  $15\mu\text{m}$ ，相应的波数为  $13160\text{cm}^{-1}$  到  $677\text{cm}^{-1}$ 。在近红外区，水汽有很多吸收带，如以  $0.93$ 、 $1.38$ 、 $1.87$ 、 $2.7$ 、 $6.3$  和  $14.5\mu\text{m}$  为中心的光谱带，在中红外和远红外区还有更多的吸收带。近年来，在高空探测中还使用远红外光谱，例如美国空军用远红外光谱仪探测同温层湿度，所用的水汽吸收带为  $32.7$  到  $33.3\mu\text{m}$ 。

早在 1884 年 Langley 研究地球大气层对太阳热量的吸收时就发现在近红外波段有几个吸收带，其后人们证实这主要是由于大气中大量存在的水汽和二氧化碳引起的。本世纪初，Fowle 首先把水汽能吸收一定波长的红外辐射这一特性用于湿度测量，研制成测量大气湿度的红外湿度计<sup>[1]</sup>。该仪器采用涅恩斯特灯作光

源和棱镜分光系统，使用  $1.1$  和  $1.4\mu\text{m}$  之间的吸收带，光程为  $250\text{m}$ 。此后，地球物理和湿度测量领域中的科学工作者沿着 Fowle 的途径，根据不同的目的研制出具有不同结构和特性的各种红外湿度计。

从四十年代起，美国气象局就从事红外湿度计的研究工作，经过 20 年的努力，取得令人满意的结果<sup>[2]</sup>。

六十年代以来，遥感技术的应用，进一步刺激了红外湿度计的发展。目前机载红外湿度计可以直接给出大气湿度的水平分布图，气象卫星上使用红外分光计能测出水汽的垂直分布。知道了水汽的浓度分布就可以通过反演技术来确定同温层的温度，这对于了解大气过程、准确地进行天气预报是非常重要的。此外，在工业领域中也越来越广泛地应用红外湿度计测量气体，特别是固体和液体中的水分。由于激光技术的发展，七十年代初开始出现用激光作光源的红外湿度计<sup>[3][4]</sup>。红外激光器能产生功率高、光谱窄的单色红外辐射，从而大大地提高了红外湿度计的性能。

### 1. 基本原理

从理论上讲，所有温度高于绝对零度的物体都产生红外辐射，它是由分子运动造成的。分子光谱通常分为三种类型：仅由分子转动产生的光谱位于红外和微波区；由分子的振动和转动产生的光谱位于红外，偶尔出现在可见区；由分子的振动、转动和电子运动共同产生的光谱通常出现在可见、紫外和舒曼区。水汽对于以上各个光谱区的特定频率都会出现选择性吸收。

物质的分子通常处于稳定的最低能态，即基态。如果分子受到外来的激发，就会吸收外来的能量从基态跃进到较高的能态，即激发态。两个状态之间的能量差决定了吸收光谱的特征。例如水汽受到红外辐射照射后，就会有选择地吸收某些频率的辐射，使辐射发生能量衰减，而水汽本身则温度升高。因此，物质的吸收光谱与其结构密切相关。下面我们再具体地说一下水汽的红外吸收机理。



由于组成水分子的两个氢原子和一个氧原子不在一条直线上，而是成 105 度 3 分的夹角结构，因而整个水分子不呈电中性，而以电偶极子的形式存在，其最大的红外吸收波长与偶极子的极化程度有关，也就是说与水分子的聚集状态有关。对水汽来说，水一般以单分子的形式存在；而以固态或液态形式存在的水则以 $(\text{H}_2\text{O})_2$ 、 $(\text{H}_2\text{O})_3$ 或数目更多的聚合形式出现。所以在选择吸收带时，应考虑水的聚集状态和所在的介质的情况。

水汽对于红外辐射的吸收与分子跃迁到较高的振动能和转动能态有关。H和O原子之间有可能存在三种形式的相对振动，而整个水分子还有可能有各种旋转运动，后者可以通过分子的质量中心的三条互相垂直的坐标轴来表征，如图 2.6.1 所示。水分子的三种振动形式和相应的波数见表 2.6.1<sup>[5]</sup>。由于三个原子呈非线性结构，故其自由度 $Z=3N-6$  ( $N$ =原子数)=3，三个自由度的能量都在红外辐射范围。图 2.6.2 是分别以 1.37、1.87、2.7、

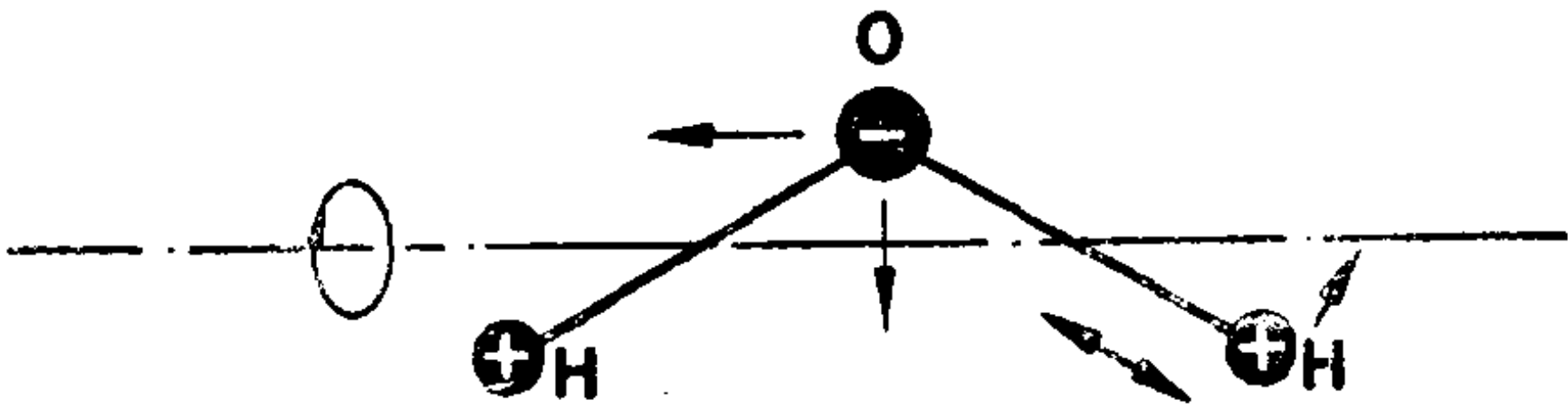


图2.6.1 水分子的转动和振动

表 2.6.1 水分子的振动形式与波数

| 振 动 形 式 | 波 数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) |
|---------|--------------------------|
| 形变振动    | 1595                     |
| 对称振动    | 3657                     |
| 非对称振动   | 3756                     |

4.3 和 6.0 $\mu\text{m}$ 为中心的吸收带(其中 4.3 $\mu\text{m}$  为二氧化碳的特征吸收带)。由此可见，水汽的吸收光谱是不连续的。

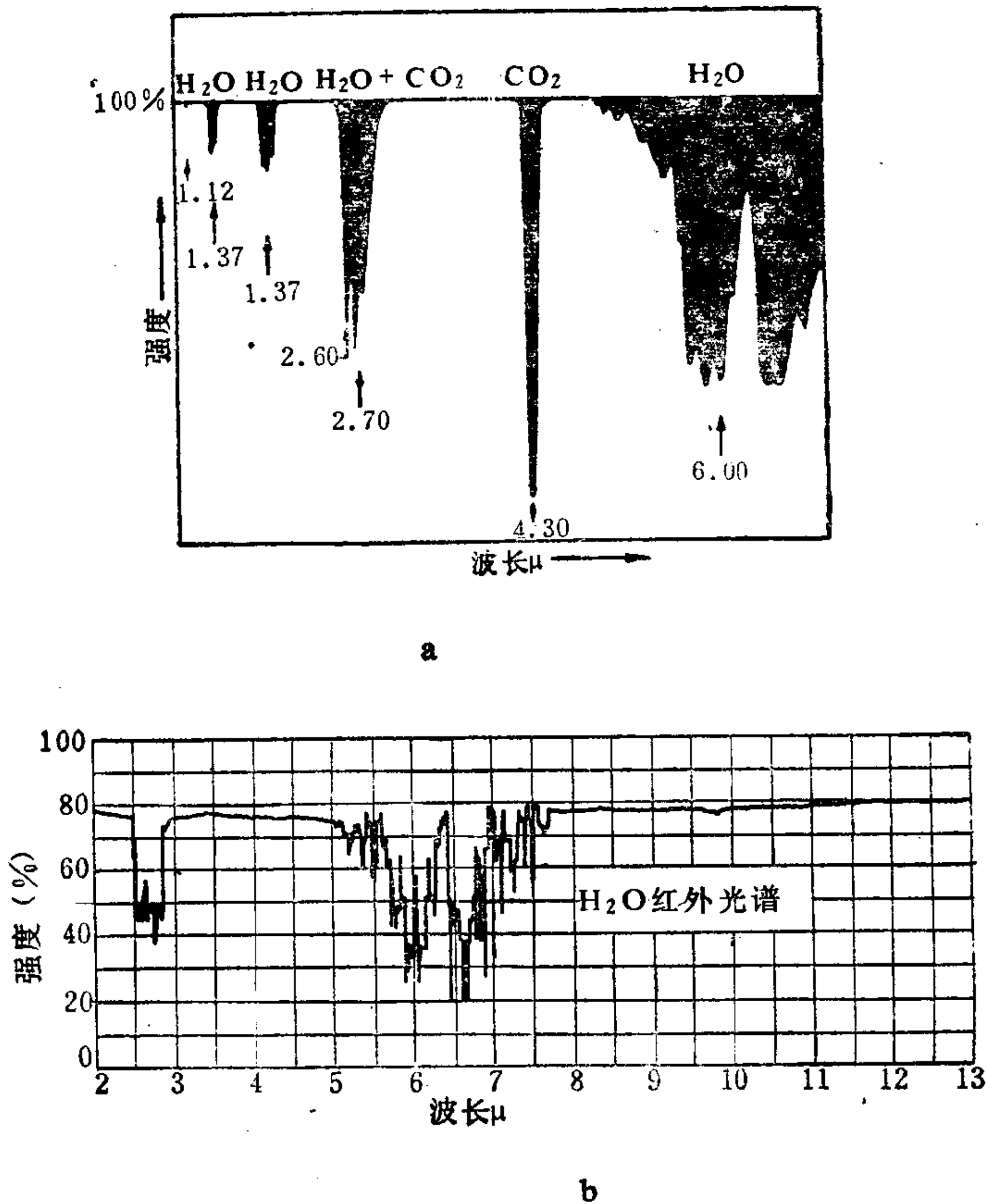


图2.6.2 (a)水和二氧化碳的近红外光谱  
(b)水的谱线

用吸收光谱法对物质的浓度进行测定通常根据 Beer 定律进行，其计算式如下：

$$I=I_0\exp(-k\rho x/\rho_0) \tag{2.6.1}$$

式中  $I_0$  为入射光强度， $I$  是入射光通过试样后的强度， $x$  是光程



(即入射光通过的试样厚度),  $k$  是吸收系数, 它取决于入射光的波长和试样的性质。 $\rho$  为吸收气体的密度,  $\rho_0$  是吸收气体标准状态下的密度。如果在给定的波长范围内, 知道了吸收系数, 根据 Beer 定律, 原则上就可以测定水汽浓度。但是在有其它气体存在时情况就复杂了。因为别的气体的吸收带有时可能会和水汽的吸收带重合, 从而产生干扰。例如二氧化碳气体在红外波段有 2.7、4.35 和 14.5 $\mu\text{m}$  三个吸收带, 其中 2.7 和 14.5 $\mu\text{m}$  两个吸收带与水汽重合, 而且当气体总的压力较高时, 其它气体的吸收带出现展宽, 亦会对测量产生干扰。由此将引起吸收系数的明显改变。所以如果仪器的单色性不高, 不能严格地分辨分子光谱的精细结构的话, Beer 定律就不适用, 这已为实践所证实。

从理论观点出发, Elsasser 建议对于有限范围的吸收可用下式表示:

$$A = (P/P_0)^{1/2} (T_0/T)^{1/4} K(W)^{1/2} \quad (2.6.2)$$

式中  $A$  为相对吸收,  $T_0$  和  $P_0$  分别为标准温度和压力,  $K$  是与吸收带有关的常数,  $W$  是每单位湿空气中水汽的质量。方程表明红外湿度测量与温度和压力有关, 而就大气湿度的测量来说, 压力影响是主要的, 温度则是次要的因素。因为  $A$  与压力的平方根成线性关系, 在测量高度差别较大时, 大气压力的变化就非常明显, 所以其影响必须予以考虑。Elsasser 指出, 这种关系适用于有限的吸收范围, 对于强烈的吸收带, 吸收的增加与水汽质量的增加完全符合方程中的比例关系, 吸收的增加要小一些。因为 Elsasser 方程只适用于有限的范围, 所以同样未能反映吸收与水汽质量之间的普适关系。

迄今为止, 尚未找到吸收与水汽质量之间的普适关系式, 但这并不意味着方法缺乏可靠的依据。在实践中可以通过实验方法来确定一定范围内吸收与水汽质量之间的经验关系。

一旦光程和主要结构确定下来, 红外湿度计设计中的主要问题就是水汽吸收带的选择。从图 2.6.2 可以看出, 不同的吸收带

有不同的吸收率。这一特性使红外湿度计光谱范围的选择有很大的自由性。显然，对于长光程和高湿，应选用弱吸收带，例如  $0.93\mu\text{m}$ ；对于短光程和低湿，则使用强烈吸收的光谱带更为有利。研究表明，不应使光程中发生百分之百的吸收，最大吸收率为 40% 或更低一些为宜。这样才能获得最佳的效果<sup>[5]</sup>。在大气湿度测量中所遇到的水汽浓度范围，一般从每立方米零点几克到 30 克之间。对于水汽浓度为  $30\text{gcm}^{-3}$  的光路，其吸收不应超过 40%，此时，若光程为 1 m 或更短，则选用  $1.38\mu\text{m}$  的吸收带可满足要求。

在水汽吸收带的选择中，必须考虑其它气体的干扰。如上所述，在大气湿度测量中，二氧化碳的干扰是一个突出的问题，应当避免选用与之重叠的吸收带。

## 2. 仪器的基本组成

上面已经说到，红外辐射穿过被测气体时，其辐射能被水汽所吸收，并且吸收强度与水汽的浓度存在一定的关系。红外湿度计的工作原理就是建立在这个基础上的。具体地说，是利用给定的光路和选定的水汽吸收带，通过测量水汽对红外辐射的吸收来确定气体的绝对湿度。根据不同的目的和测量对象，红外湿度计可以采用不同的结构形式。一般来说，仪器主要由红外辐射源、单色器(色散系统或滤光器)、检测器和电子放大器等部分组成。红外湿度计的种类很多，如果从光路系统来划分，可分为单光路和双光路系统。后者有一个参比光路，可以抵消光源不稳定、放大器增量的变化，以及其它气体的干扰等因素的影响。故现代较为精密的红外湿度计都采用双光路系统。下面简单介绍几种常见类型的结构原理。

基于不同的晶体能反射不同波长的红外辐射原理的红外湿度计 其示意图见图 2.6.3。例如入射光经过水晶的多次反射，最后只剩下波长为  $8.8\mu\text{m}$  的红外辐射，它基本上不被水汽吸收。但是经过方解石多次反射而残留  $6.8\mu\text{m}$  的红外辐射则绝大部分被水



汽吸收。两者最后分别由温差热电偶测量其温度。通过相互比较，便知道光路上被测量气体的湿度。

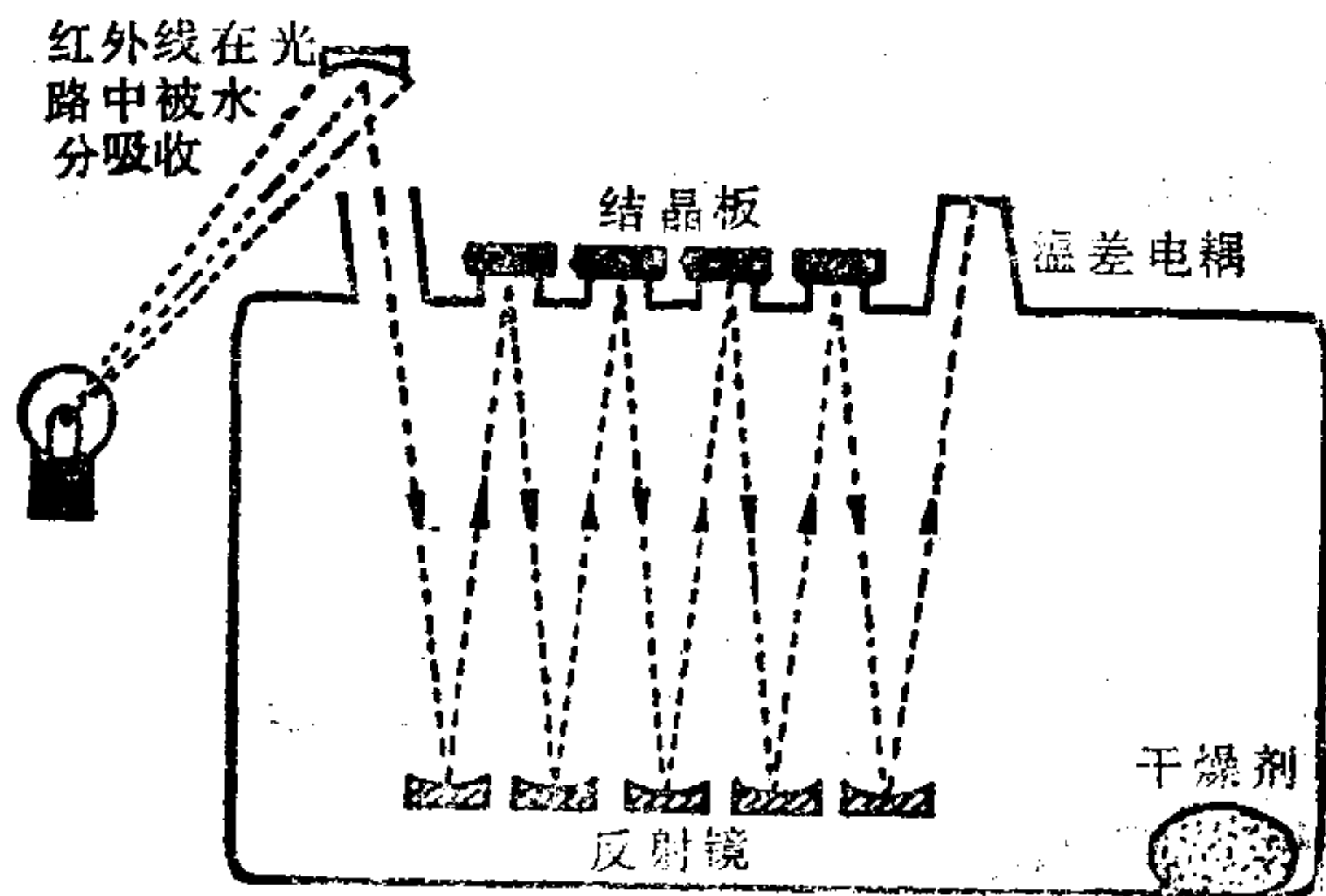


图2.6.3 晶体反射式红外湿度计

采用透过率不同的滤光片(或光电管)作为单色器的红外湿度计 通过能被水汽吸收和不被水汽吸收的两种不同波长的红外辐射进行比较来测量光路上的气体湿度，图 2.6.4 是用两种透过率不同的滤光片交替地遮隔光路、由检测光电管测定两种波长的红外辐射通量的测量系统。水汽吸收  $1.1\mu\text{m}$  的红外辐射，而不吸收作为参比的  $0.944\mu\text{m}$  波长的红外辐射。

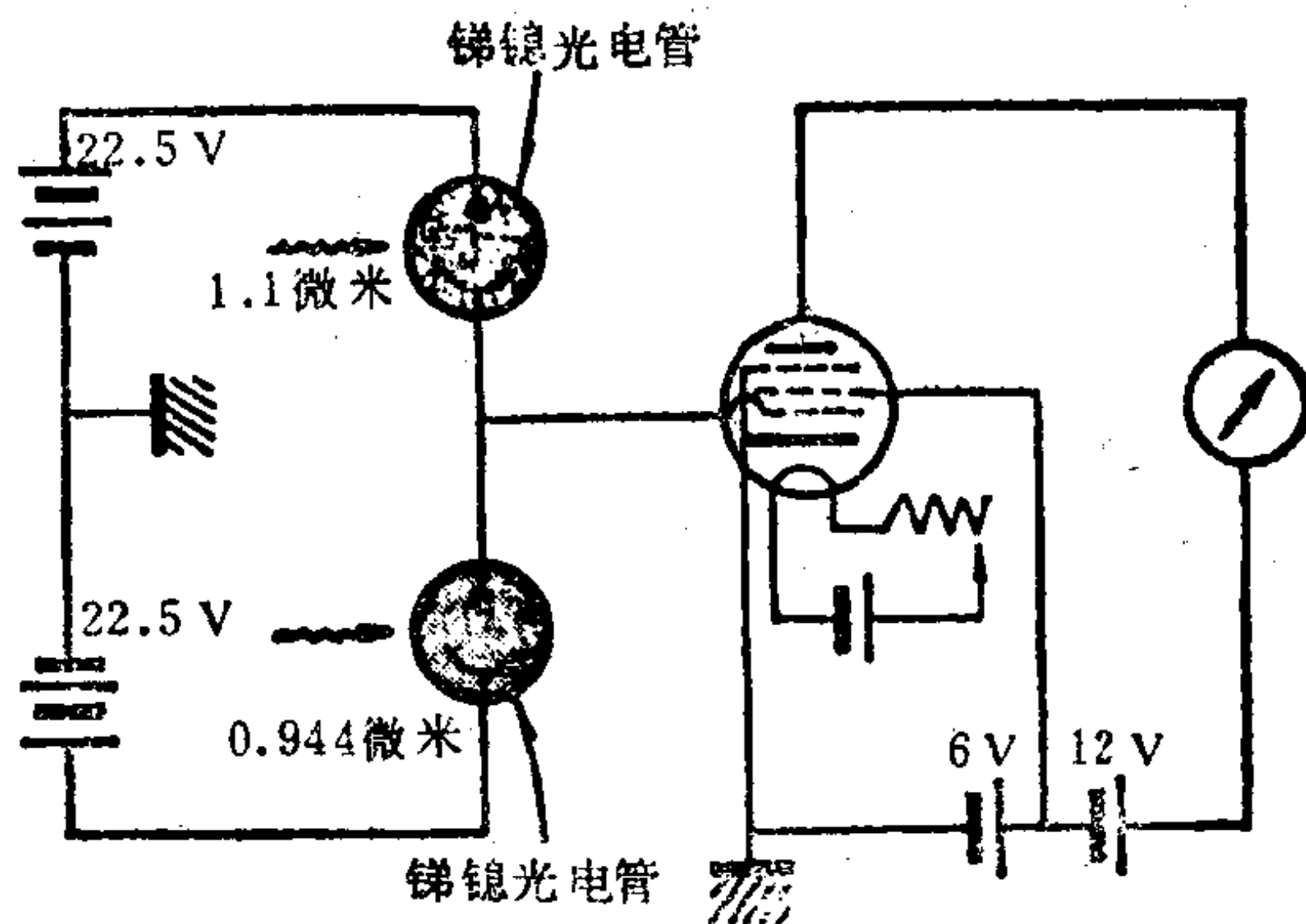


图2.6.4 利用不同类型的光电管比较波长不同的红外线能量间接算出光路上的湿度

采用光学零位平衡法的双光束红外湿度计<sup>[6]</sup> 如图 2.6.5 所示, 来自灯泡光源的光束通过准直透镜之后变成平行光, 固定在圆盘上的扇形滤光片以  $1800\text{转}\cdot\text{分}^{-1}$  的速度转动, 使  $2.60\mu\text{m}$  的吸收光谱带和  $2.65\mu\text{m}$  的参比光谱带交替通过滤光片, 而后进入检测光路。光线用准直透镜聚焦在玻璃漫射板上。硫化铅检测器

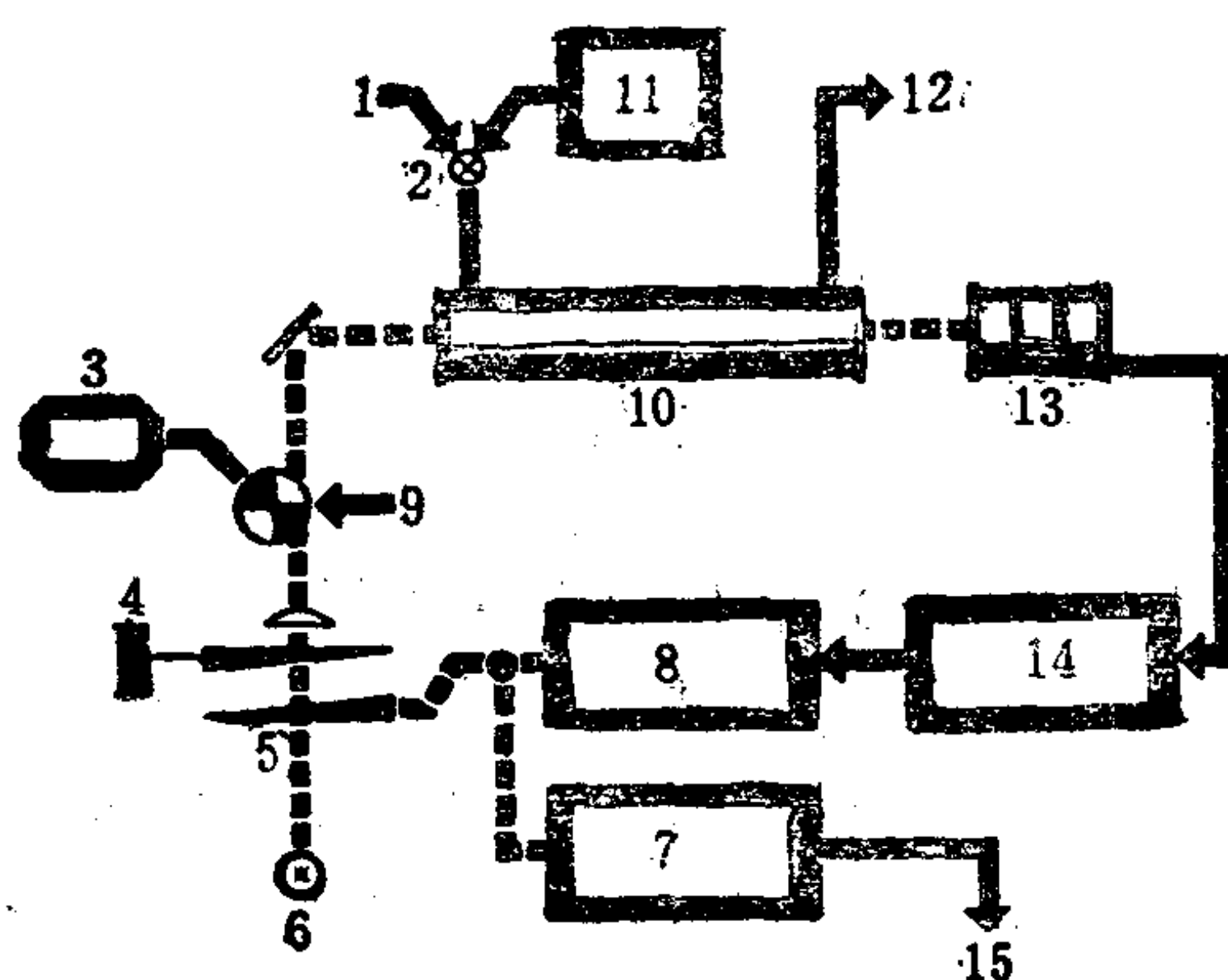


图2.6.5 红外湿度计结构流程示意图

1. 样气入口 2. 三通伐 3. 同步电机 4. 手动调节针 5. 平衡楔尖 6. 红外辐射源 7. 输出转换器 8. 伺服马达 9. 滤光片 10. 感应管 11. 干燥空气 12. 接真空泵 13. 检测器 14. 伺服放大器 15. 接记录器

位于漫射板后面。漫射板的作用是使辐射均匀地照到检测器上, 以消除后者各点上灵敏度不一致的影响。由于滤光片以每秒钟 60 次的频率交替地插入光路, 被放大器接收的光敏元件电信号的相差为  $180^\circ$  度, 若吸收和参比光谱的能量衰减情况相同, 则两个信号互相抵消, 输出为零, 即建立光学零点平衡状态。

若在光路中存在被测气体, 由于水汽吸收  $2.60\mu\text{m}$  波长的辐射能, 破坏了平衡状态, 检测器就发生信号输出。为了使系统重新建立平衡, 来自检测器的信号经过放大器放大后之后, 用以驱动相敏伺服调节器来移动楔形玻璃滤光器, 利用其厚度的变化改



变两种波长光束的透射比，从而实现自动补偿。显然，楔形滤光器所削弱的能量就是样气吸收的能量。通过楔形滤光器的随动机构可模拟指示被测气体的相对吸收。

红外湿度计性能的提高主要取决于仪器的色散系统。因为能谱的分辨率越高，吸收带越窄，干扰越小，灵敏度就越高。因此，近代红外湿度计朝着采用棱镜、光栅色散系统和激光光源的方向发展。

### 3. 标定与压力对测量的影响<sup>[6][7]</sup>

从红外湿度计的原理来说，它可以测量气体的绝对湿度，但必须首先进行标定，给出分度曲线。标定的方法可以用重量法或恒湿发生器进行。重量法只涉及基本量——质量的测定而无需求助于与发生器有关的温度、压力、饱和度等的间接测量。因此，从理论角度来看，直接采用重量法标定更为合适。Wood 曾经介绍用重量法校准红外湿度计的方法，其要点是测量一定量的蒸馏水，并使之蒸发到干空气流中从而得到已知水汽密度的湿气。然后分别将干气和湿气通入湿度计中定标。此后，如要检查仪器的稳定性，只需用干气进行检查。对于采用光学零点平衡法的结构，若检测器没有信号输出，则表明仪器正常，如果发现漂移，可通过调节检测器的输出来校正。图 2.6.6 为光程 1 m 的红外湿度计的分度曲线。

关于压力对测量的影响，前面已经指出，在气象探测时，由于压力变化比较大，其影响远远超过温度因素。Fosket 对水汽浓度从 2 到  $17\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，压力从 200hPa 变化到 1000hPa 进行的实验，结果如图 2.6.7 示。实验表明，当压力为 1000hPa 时，仪器读数为 12.7，相应的水汽浓度为  $6.0\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；而压力在 500hPa 时，为  $6.8\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这说明如果在 1000hPa 标定的仪器在 500hPa 下使用，测量结果将偏低大约 12%。类似地，对于标定压力为 1000hPa，水汽浓度为  $4\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时，误差大约 9%，Wood 选择  $2.7\mu\text{m}$  吸收带，在同样条件下进行的压力影响试验。误差分别为 25% 和 20%

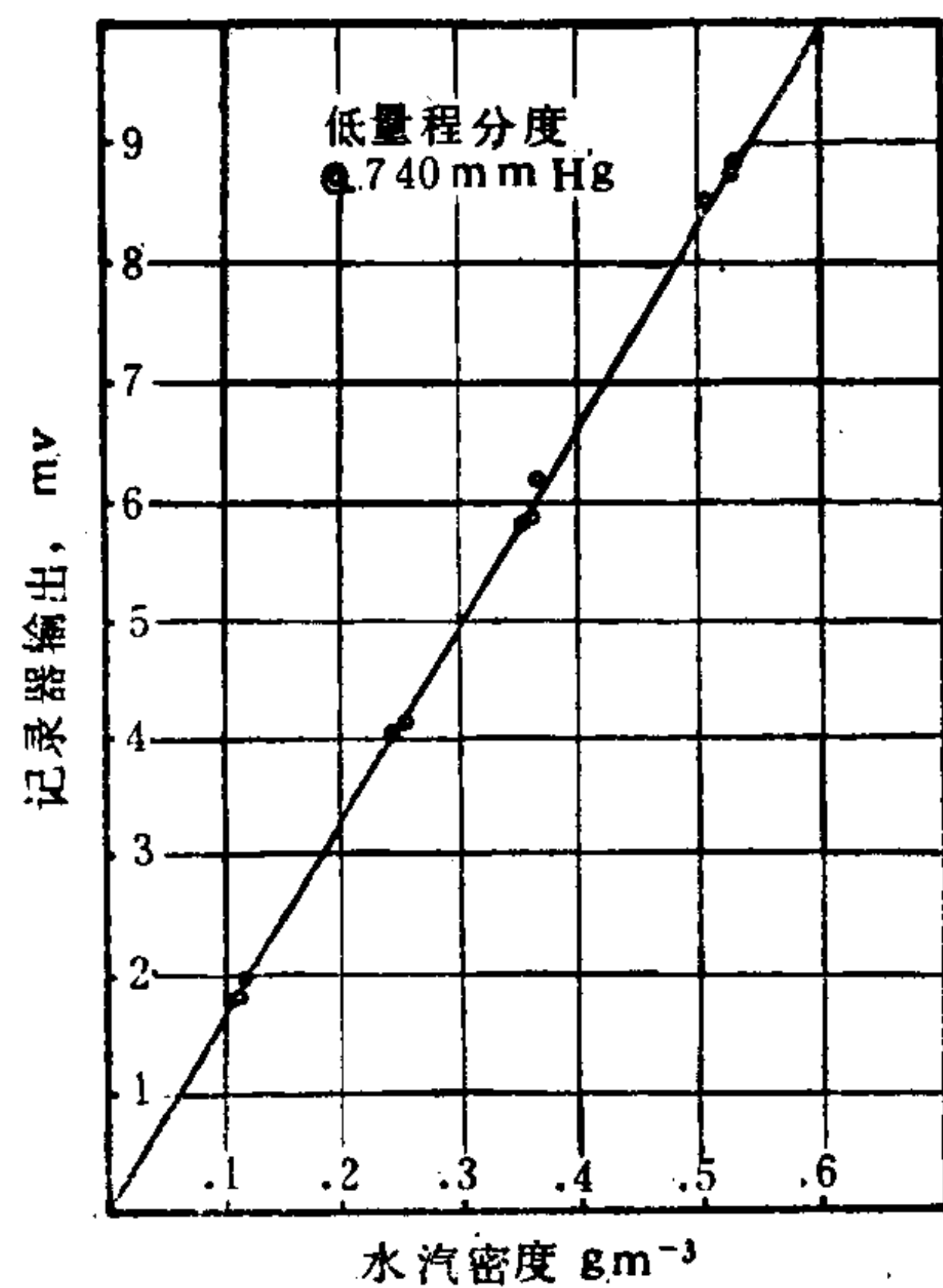


图2.6.6 红外湿度计低量程的典型分度曲线

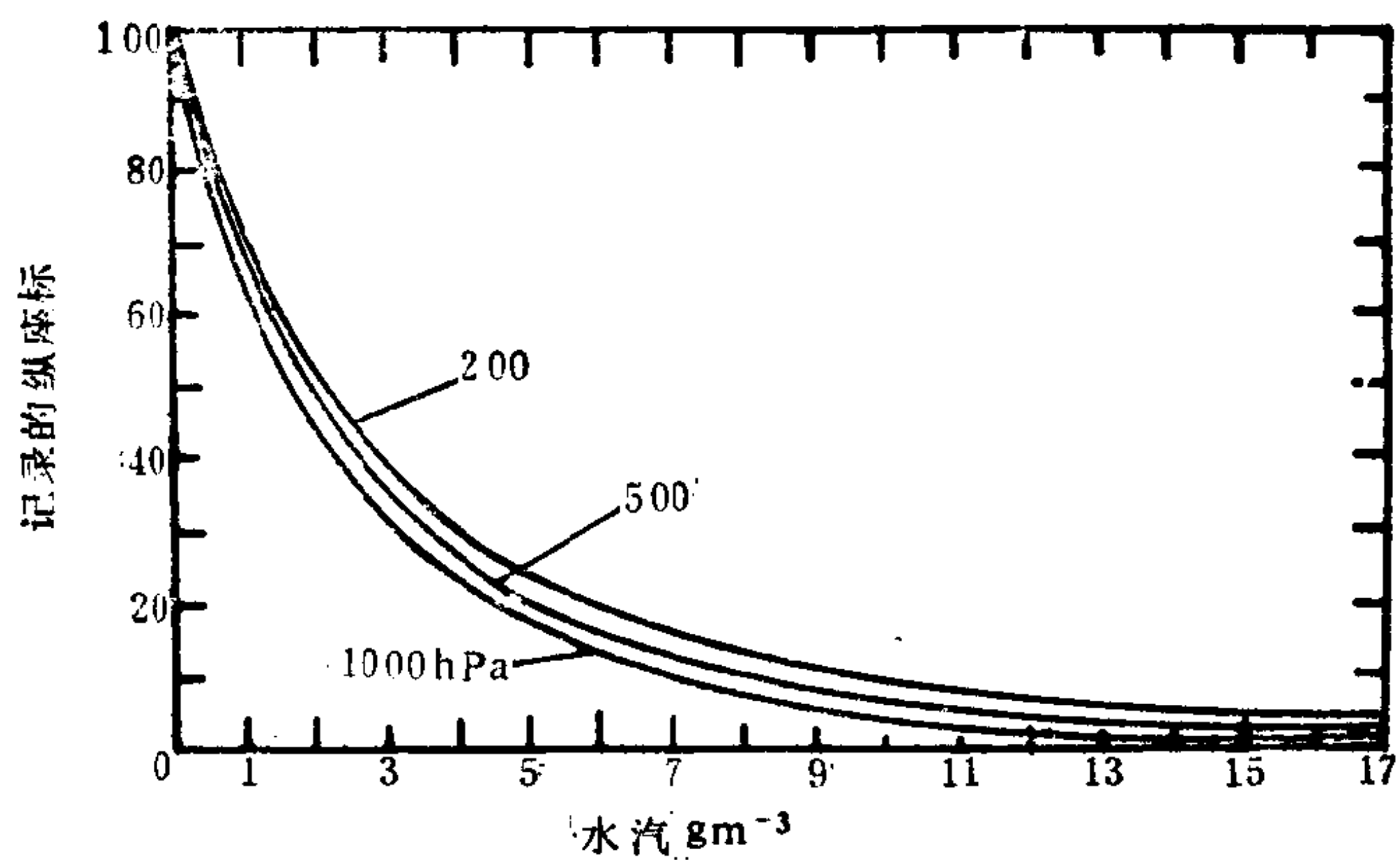


图2.6.7 红外吸收湿度计的绝对湿度示值与压力的关系



目前人们在致力于探讨吸收函数的压力项的准确形式,以便对不同压力下的测量结果进行修正。

#### 4. 小结

红外湿度计有吸收光谱法所固有的优点。同其它湿度计相比,它有如下几个突出的优点:

(1) 对于低湿范围的测量,有很高的灵敏度。

(2) 在非常宽的水汽浓度范围具有快速响应的特性,能连续测量瞬时湿度。

(3) 在不破坏样气状态的情况下,能进行短光程和长光程的湿度测量,即具有测量小空间和大空间湿度的能力。

(4) 能在不改变试样浓度的情况下测量其湿度。

正如别的湿度测量方法一样,红外湿度计也有其缺点或不足之处。首先是仪器的结构较为复杂,价格也比较昂贵。另外,压力和温度的影响以及长期稳定性等问题还有待进一步深入探讨。

尽管红外吸收湿度测量法在理论上和仪器性能结构上还有不完善之处,但是随着红外技术的发展,可以预料,此法在湿度测量领域中将占有越来越重要的地位。

## 二、紫外吸收湿度计

如前所述,利用水汽吸收紫外辐射的特性,可制成紫外吸收型的湿度计。

美国国家大气研究中心(NCAR)的A.L.Buck<sup>[8][9]</sup>在 Samson<sup>[10]</sup>和Tillman<sup>[11,12]</sup>等人研究的基础上,于七十年代后期研制成功的变光程L- $\alpha$ (Lyman-alpha)湿度计已在实验室、场地和探空中使用。这种湿度计的响应时间仅为12毫秒,在环境温度从-70到+40°C的范围内,测量露点温度的范围从-35°C到+30°C,测量准确度为1°C露点温度,重复性小于0.02°C。500小时内的稳定性也可达1°C露点温度。显然这是一种具有良好性能,适于大气探测的湿度计。不足之处是寿命和稳定性尚待进一步提高。

## 1. 原理

式(2.6.1)给出了比尔定律的基本形式, 如果吸收气体仅为水汽, 则式(2.6.1)可改写成

$$\rho = (\rho_0/kx) \ln(I_0/I) \quad (2.6.3)$$

通过实验知道  $I_0$  后, 则接收强度  $I$  的测量可作为绝对湿度  $\rho$  的测量。

但是湿度计是测量与其他气体共存的水汽数量的, 其他共存气体也可能吸收紫外辐射。另外, 紫外辐射也不可能是绝对单一波长  $\lambda$  的单色光, 而是从  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  一段范围的辐射。这样普遍形式的比尔定律可以写成:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) \exp\left[-\sum_{j=1}^n k_j(\lambda) \rho_j x / \rho_{0j}\right] d\lambda \quad (2.6.4)$$

或者把  $I_0$ 、 $I$  用与其相当的电压输出  $V_0$ 、 $V$  来代替, 式(2.6.3)则变成:

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_0(\lambda) \exp\left[-\sum_{j=1}^n k_j(\lambda) \rho_j x / \rho_{0j}\right] d\lambda \quad (2.6.5)$$

上面两式中  $j$  代表能够吸收紫外辐射气体的种类, 作为地面湿度测量时, 除了水汽外还有氧气( $O_2$ ); 对于高空探测, 还有臭氧( $O_3$ ), 即式(2.6.5)中  $j=3$ 。在标准状态下, 这些气体的吸收系数如下:

$$H_2O: k_1 = 387 \text{ cm}^{-1}$$

$$O_2: k_2 = 0.35 \text{ cm}^{-1}$$

$$O_3: k_3 = 640 \text{ cm}^{-1}$$

图 2.6.8 给出了在  $L-\alpha$  光谱带作为波长函数的水汽和氧气的吸收系数。这时式(2.6.5)可简化为

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_0(\lambda) \exp\left[-\sum_{j=1}^3 k_j(\lambda) \rho_j x / \rho_{0j}\right] d\lambda \quad (2.6.6)$$

因此为了准确测量湿度, 人们必须考虑尽量减少除  $L-\alpha$  谱线以



外光谱线的影响以及其他气体的吸收造成的影响。

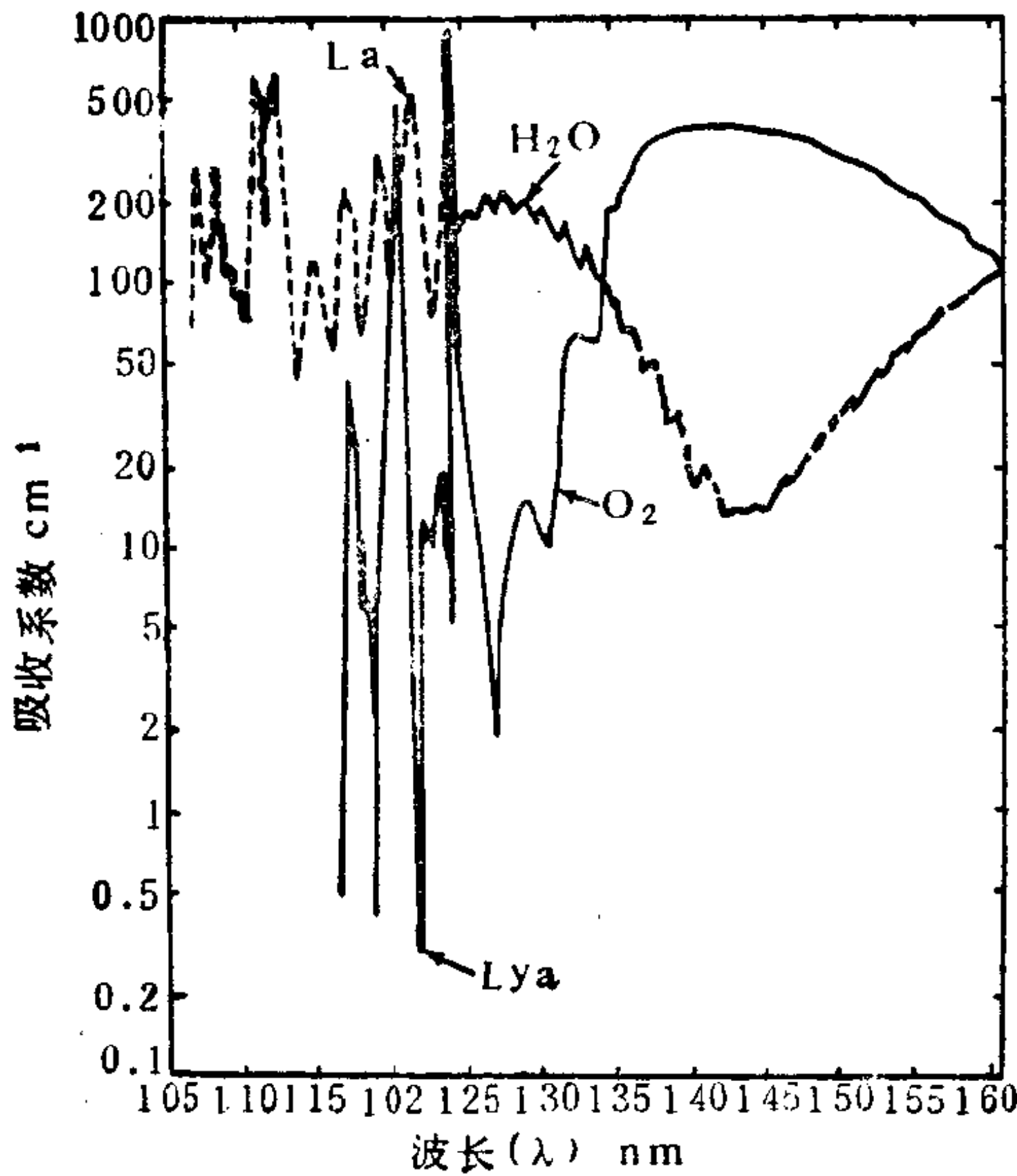


图2.6.6 水汽和氧气相对波长的吸收系数

如式(2.6.3)所示，湿度测量要从式(2.6.5)对  $\rho$  求解，实际上是不可能的。因此在实践中是采用经验的方法决定函数。

$$\rho = f_v(V'')/x \tag{2.6.7}$$

式中  $V''$  是  $\ln V$  扣除  $V_0$  的影响和其他气体吸收等影响修正后结果，下面将介绍其决定方法。

2. 组成和结构

和红外湿度计相似，紫外湿度计也有单光路和双光路之分，选择的原则取决于使用要求和技术经济指标。但它们的主要组成部分相同，即包括紫外辐射光源、检测器和数据处理系统。这里仅以 Buck 研制的变光程 L- $\alpha$  湿度计为例加以说明。

这种湿度计由三个部分组成(参看图 2.6.9)；

辐射光源、光程和检测器和处理信号的电子系统。

现代技术可以做到光源和检测器相当稳定，光程亦可精确地调整和测量。但是检测器的接收窗口的传递却存在某些问题，即窗口的传输随时间而变化。这可能是由于大气中的成分与紫外辐射反应造成的。这是实践中必须解决的关键问题之一。

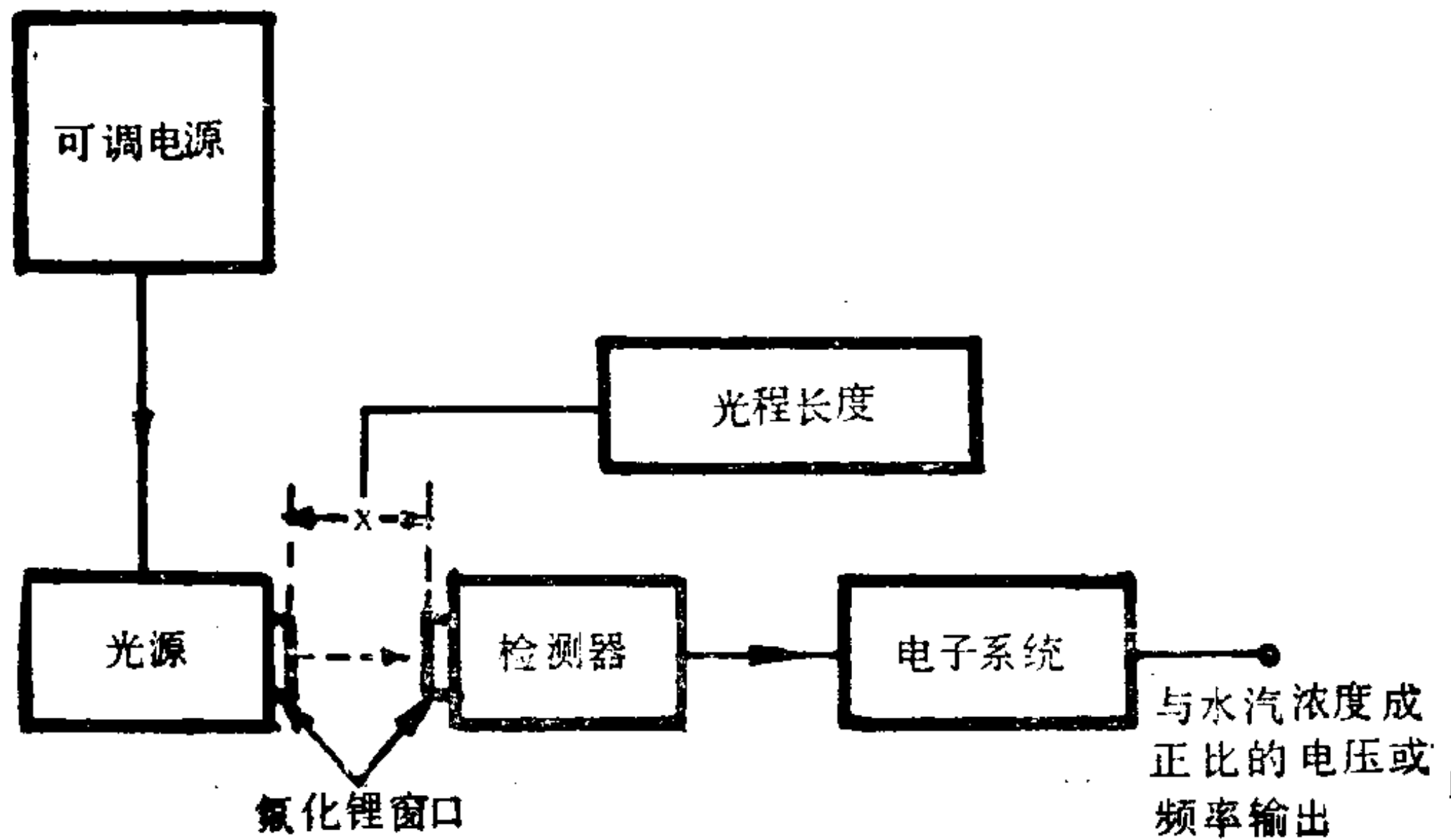


图2.6.9 单光程紫外吸收湿度计流程图

**辐射源** 尽管辐射源光谱的单色性并不直接影响测量系统的特性，但是把其它谱线的影响减到最小有许多好处，因此人们力求获得单一谱线的紫外辐射源。

Buck<sup>[13]</sup>把普通的电离灯加上铀化氢进一步改善辐射源光谱的单色性。

通用的辐射源是一种充有氢气的 DC 激发的冷阴极电离灯。为了提高这种灯的寿命，氢气需要一定的压力(大约 10hPa)，但是从另外一个角度看，为了获得最纯的 L- $\alpha$  辐射，应尽可能减小氢分子相对氢原子的辐射，人们则希望降低辐射灯中氢气的压力。把  $\text{UH}_3$  密封在辐射管中，作为一种氢的发生源，从而实现上述目标，而且这样做并不损害灯的寿命。所以人们称其为  $\text{UH}_3$  辐



射源。图 2.6.10 是这种紫外辐射灯的结构示意图。它的最佳充氢压力是  $1.3\text{Pa}$ ，并另外充大约  $1300\text{Pa}$  的氖气，借助一加热器， $\text{UH}_3$  在  $130 \pm 0.05^\circ\text{C}$  下工作。

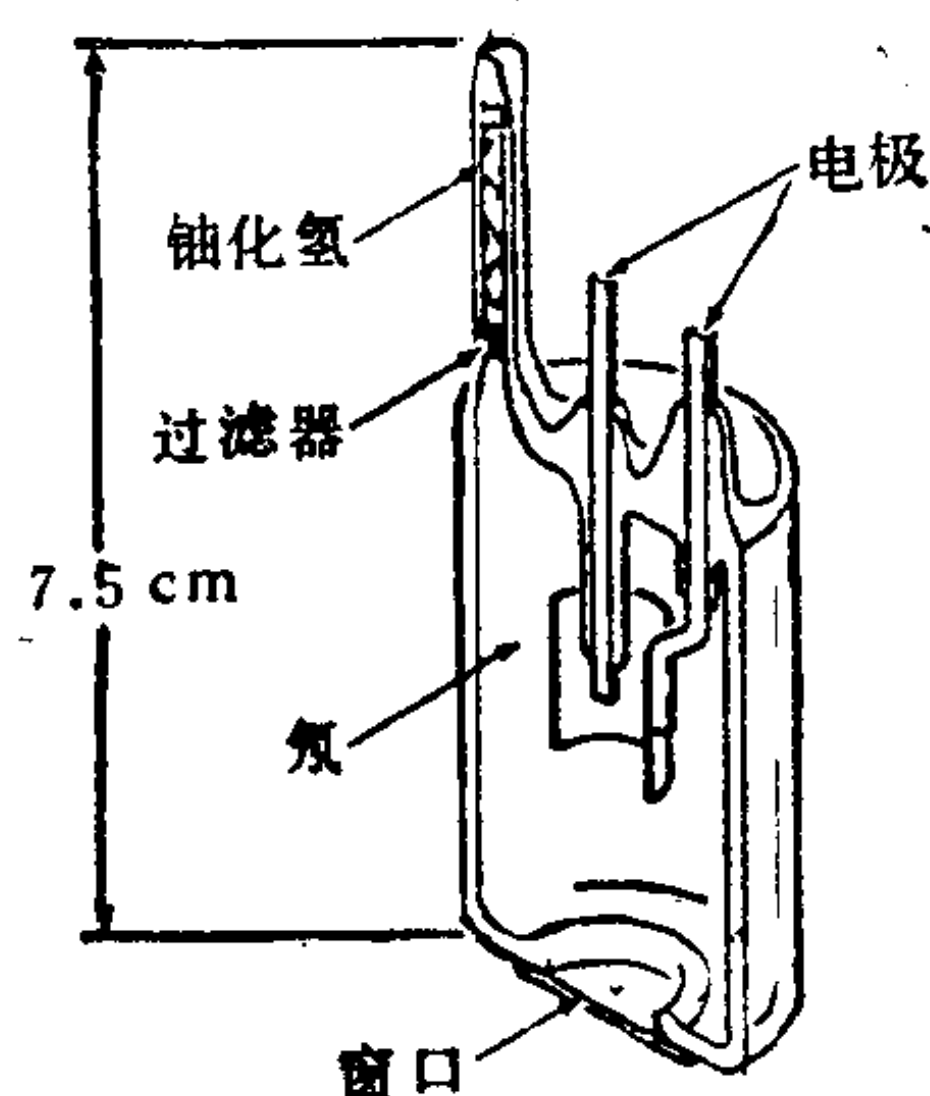


图2.6.10 铀化氢辐射源

光程和检测器 对于不同的湿度范围，为了使  $L-\alpha$  辐射被水汽吸收减弱到  $1/e$ ，需要不同的光程，例如，露点温度从  $+40^\circ\text{C}$

到  $-20^\circ\text{C}$ ，相应的光程从  $0.41\text{mm}$  变化到  $19.4\text{mm}$ 。因此，对不同的测量范围应选择其最佳光程。变光程技术不仅可以改善紫外湿度计在宽范围的测量特性，并且可以通过采用两个光程测量同一湿度的方法，使仪器自校。美国 NCAR 研制的变光程紫外湿度计光程可在  $2$  到  $100\text{mm}$  之间变化。它采用伺服导向螺杆控制光程的长度，其光程控制的准确度可达  $\pm 0.05\text{mm}$ 。当然亦可采用最简单的手动调节机构。

不言而喻，检测器主要是紫外吸收器。最简单的检测器是一氧化氮光电离室。在  $1050\text{\AA}$  到  $1353\text{\AA}$  的范围内对辐射十分敏感，响应时间约为  $10^{-3}\text{s}$ 。

窗口采用氟化锂。由于窗口必须暴露在大气中，如何保证氟化锂窗口的传输特性不变，是紫外湿度计的最大难点之一。首先是大气中的某些物质与它可能发生表面反应。使其传输  $L-\alpha$  辐射的水平大大下降，每小时变化达  $0.8\%$ 。其次，当在高湿或有液体水存在时，窗口上吸附的水汽膜的厚度波动。这样，一方面致使测量系统的吸收与理论发生偏差，另一方面使膜达到平衡所需的时间加长。Tillman 建议使用其他材料薄膜涂覆氟化锂，这样做具有许多优点。

处理信号的电子系统 检测器输出的信号  $V(I)$  借助简单的

模拟线路即可作为湿度值指示，但是为了得到最好的准确度，需要数字处理系统，它的任务是实现对增益变化、氧气的吸收和辐射光源的非理想特性等进行修正。这时需要对大气压力、温度、光程和检测器输出综合处理。

### 3. 仪器的标定和检测

式(2.6.7)给出

$$\rho = f_v(V)/x$$

式中

$$V'' = \ln V - \ln V_0 - f_c(x) - f_{21}(px/T) \quad (2.6.8)$$

$f_c$  是光源的准直修正， $f_{21}$  是氧吸收修正。它可以通过理论来决定， $f_v$  和  $f_c$  由实验确定。

$f_c$  和  $f_v$  的确定方法如下：

首先测定在干燥氮气(相当于真空)下在某范围光程内仪器的输出，即可决定  $f_c$ 。通过测量在某范围光程和湿度时仪器的输出可以获得  $\rho x - V''$  曲线，系统的增益  $V$ 。则任意确定为 1。在特定的辐射源和检测器整个使用期间，该函数可望保持不变。典型的实验曲线参看图 2.6.11 和 2.6.12。

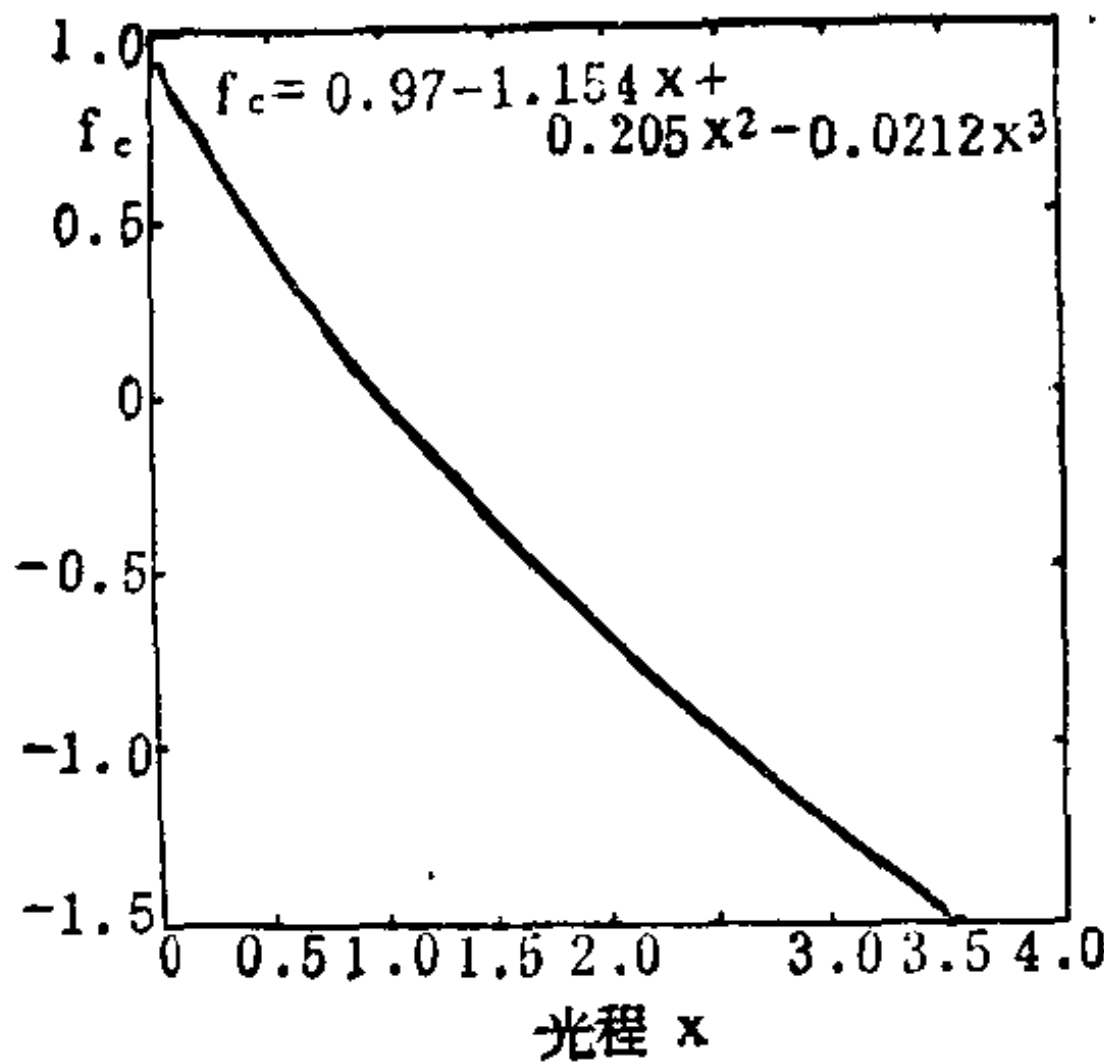


图2.6.11 辐射源准直修正 $f_c$

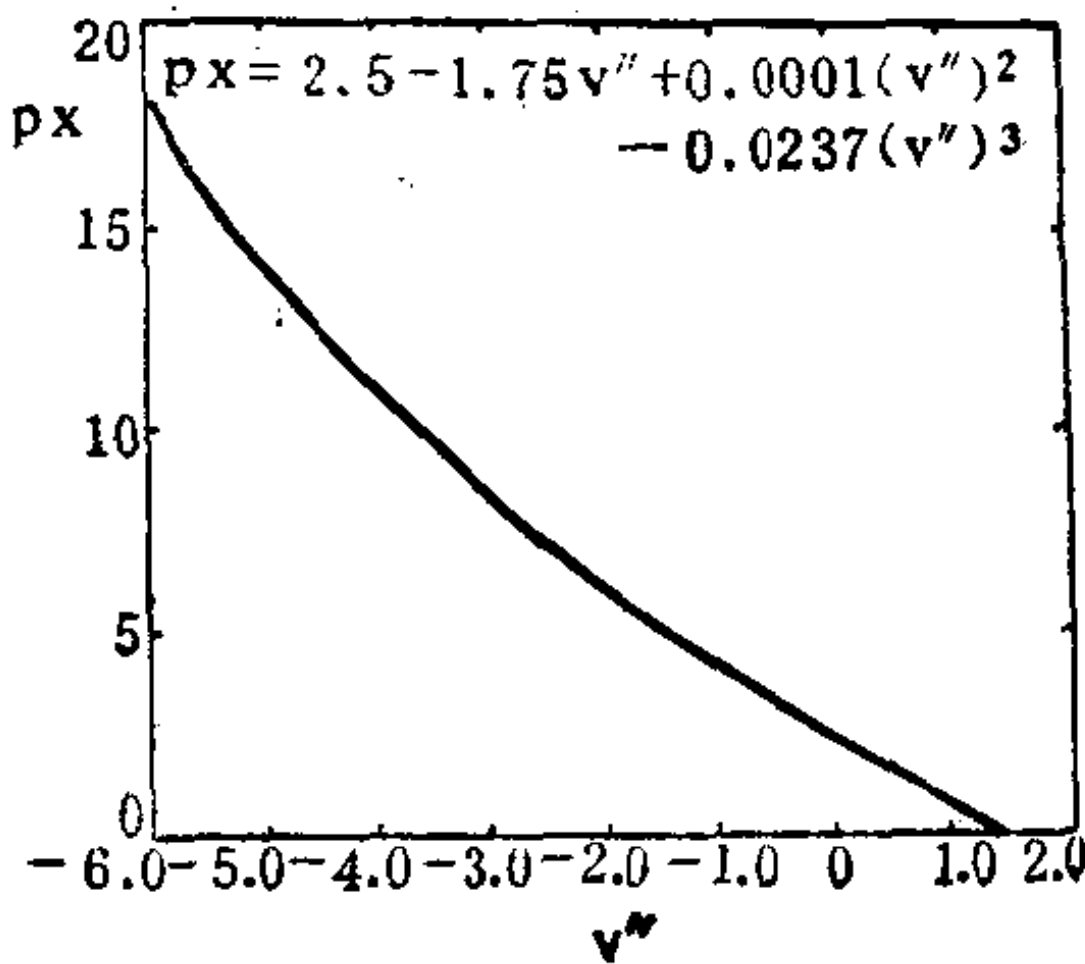


图2.6.12 铈化氢作光源的典型标定曲线



仪器系统增益  $V_0$  的变化将使  $f_v$  曲线在  $X$  轴方向水平移动。通过改变光程操作可以进行修正。在两个光程  $x_1$  和  $x_2$  下进行测量, 从式(2.6.1)有

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 \exp[-k\rho x_1/\rho_0] \\ V_2 &= V_0 \exp[-k\rho x_2/\rho_0] \end{aligned} \right\} \quad (2.6.9)$$

$V_2$  除以  $V_1$  得

$$V' = V_2/V_1 = \exp[-k\rho(x_2 - x_1)/\rho_0] \quad (2.6.10)$$

从式(2.6.10)可知, 此时仪器输出的比值与  $V_0$  的变化无关。这意味着通过调整式(2.6.8)中的  $V_0$  可以使两次测量的  $\rho$  相等。这相当于直接对式(2.6.10)求解。

在正常情况下, 这种仪器的自校不需要频繁进行, 每天几次即可。为避免仪器自校期间被测湿度变化引入的误差, 可以采用多次测量取平均值的方法。这种可变光路自校系统解决了窗口传输随时间变化带来的影响。

### 三、微波湿度计

从广义上说, 微波湿度计是利用 cm 或 mm 级的电磁波在介质中传播的特性进行湿度与水分测量的仪器。这些特性包括能量损耗、折射和反射等。测量的对象可以是固体、液体或气体。用微波法测量湿度的方式很多, 有空间波法、反射法, 波导法等等, 根据不同的测量对象和要求可选用不同的方式。

Becker 和 Autler<sup>[14]</sup> 最早利用水汽对厘米段波长的电磁辐射的吸收特性来测定大气湿度, 其原理大体上和红外吸收湿度计相同。

近年来, 微波湿度计在气象探测和工业领域中的应用发展很快。工业上已广泛地用于木材、纸张、烟草、粮食、食品、建筑材料、煤炭、石油等原材料和产品水分含量的测定。由于不同的物质有不同的介电常数, 而水的介电常数比许多物质高得多, 因此, 物质中含水量发生微小的变化, 都会使复合介电常数发生变化, 当微波



通过被测介质时,其能量亦随介电常数而变化。目前多数测量固体和液体含水量的微波水分计的工作原理,都是以材料的介电常数与含水量之间存在的函数关系为基础,通过微波电路将介电常数的改变量转换为微波幅度、相位或频率的改变量,再进一步变换成湿度量值<sup>[15]</sup>。因为在无线电技术中频率的测量精度比相位和波幅的测量精度高,所以微波电路多采用测量频率的形式。

对于大气和气体的湿度测量,常常采用折射型微波湿度计。它是在研究无线电波在大气中传播特性的微波折射仪的基础上发展而来的。空气对微波的折射率定义为在真空中的传播速度与在空气中的传播速度之比。微波折射仪利用空腔谐振器作为传感器。具有固定尺寸的腔式谐振器的谐振频率,是由腔内介质的折射率确定的。因此,谐振频率的测量可看作是介质的折射率或介电常数的测量。干空气或其它干气的折射率或介电常数是确定的,当其中含有水汽成分时,其折射率或介电常数就发生变化。折射型微波湿度计就是利用这一原理设计的。传感器部分由两个腔式谐振器组成,一个是参比腔,其中充满干气。另一个是试样腔,充以被测气体。通过两个谐振频率之差的测量,即可测量气体的湿度。本世纪五十年代,美国标准局和气象局先后开展折射型微波湿度计的研制工作<sup>[16][17][18]</sup>。其后又进行改进,于七十年代中期研制成自动数字式微波湿度计<sup>[19][20][21]</sup>。

为使微波湿度计更加实用化、小型化,三浦太郎和山本隆洋研制了一种新型的微波湿度计<sup>[22]</sup>。他们用电介质谐振器代替空腔谐振器,由测量谐振频率的变化改为测量Q值的变化,并且采用小型可靠的集成电路。仪器对于中等以上的湿度测量具有良好的重复性,而且操作简单,价格也较低。

下面我们着重介绍折射型微波湿度计。

### 1. 折射型微波湿度计理论

对于给定的谐振腔,介质的折射率由下式确定:

$$n = v^0 / v = f^0 / f \quad (2.6.11)$$

式中  $n$  是折射率,  $v^0$  是电磁波在真空中的传播速度,  $v$  是同一电磁波通过介质的速度,  $f^0$  是在真空中的谐振频率,  $f$  是在介质中的谐振频率。

对于两个几何形状和尺寸相同的腔体, 一个充以干气(参比腔), 另一个充以湿空气(样气腔), 它们之间的折射率之差为

$$n_s - n_r = [(f_r - f_s)/f_s] n_r \quad (2.6.12)$$

式中下标  $s$  和  $r$  分别代表样气腔和参比腔。

把折射率  $n$  按比例放大为  $N = (n - 1) \times 10^6$ , 并代入方程(2.6.12), 得

$$N_s - N_r = n_r [(f_r - f_s)/f_s] \times 10^6 \quad (2.6.13)$$

Essen 和 Froome<sup>[23]</sup> 给出了放大的折射率  $N$  和湿空气含水量的关系式, 对于参比腔为

$$N_r = \frac{a(p_{\text{空气}})_r}{T} + \frac{b(p_{\text{CO}_2})_r}{T} \quad (2.6.14)$$

对于样气腔为

$$N_s = \frac{a(p_{\text{空气}})_s}{T} + \frac{b(p_{\text{CO}_2})_s}{T} + \frac{c(p_{\text{H}_2\text{O}})_s}{T} + \frac{d(p_{\text{H}_2\text{O}})_s}{T^2} \quad (2.6.15)$$

式中的  $p_{\text{空气}}$ ,  $p_{\text{CO}_2}$  和  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为不包括  $\text{CO}_2$  的干空气,  $\text{CO}_2$  和水汽的分压力,  $T$  是以  $\text{K}$  表示的空氣的绝对温度;  $a, b, c, d$  为经验常数。若两个腔的总压力  $p$  相同, 利用道尔顿分压定律可得

$$\Delta N = c_1(p_{\text{H}_2\text{O}})_s + c_2[(p_{\text{CO}_2})_s - (p_{\text{CO}_2})_r] \quad (2.6.16)$$

式中,  $c_1 = (c - a)/T + d/T^2$

$$c^2 = (b - a)/T$$

$$\Delta N = N_s - N_r$$

将式(2.6.15)和(2.6.16)对水汽分压求解得

$$(p_{\text{H}_2\text{O}})_s = n_r \frac{f_r - f_s}{c_1 f_s} \times 10^6 - \frac{c_2}{c_1} [(p_{\text{CO}_2})_s - (p_{\text{CO}_2})_r] \quad (2.6.17)$$

式(2.6.17)中由于  $\text{CO}_2$  影响构成的第二项对水汽分压  $(p_{\text{H}_2\text{O}})_s$  测定值的影响仅为  $1.4 \times 10^{-5}$ , 可以忽略不计, 因此可以简



化为

$$(p_{\text{H}_2\text{O}})_s = n_r [(f_r - f_s) / c_1 f_s] \times 10^6 \quad (2.6.18)$$

当气体压力在 950hPa 到 1030hPa 之间变化,并且两个腔的温度保持恒定时,可以取  $n_r = 1.000237$ ,由此引入的不确定度仅为  $1 \times 10^{-5}$ 。可见,水汽分压与两个腔的谐振频率差成线性关系。

## 2. 折射型微波湿度计概述

如上所述,在恒定的温度和压力下,空气对微波的折射率仅仅是水汽压力的函数。换句话说,对于给定的谐振腔,其谐振频率仅仅受水汽的含量影响。根据谐振腔输出谐振频率的处理方式可以把湿度计分成几种类型。常见的一种类型是采用直接测量频率差的方法,即比较试样腔与参比腔的谐振频率,通过拍频得到的差频信号变换成与之成正比的物理量。另一种类型是利用零位平衡原理,用频率伺服控制技术使试样腔和参比腔之间的频率差为零。具体的方法之一是通过调节插入谐振腔的微动铁杆的深度改变其谐振频率,使试样腔和参比腔的频率相同,即频率差为零。对微动铁杆的位置进行标定或通过机械传动机构带动指针直接指示水汽的量值,也可以连接一个电位计和记录器连续记录输出的量值。这种方法在早期使用较为普遍,其缺点是机械部件容易磨损,而且受振动的影响。近年来,由于拍频技术的广泛应用,后者已逐渐被淘汰。这里我们以美国标准局研制的自动读字式微波湿度计(II型)为例,具体地介绍一下第一种类型微波湿度计的工作原理。

下面是这种湿度计的原理方框图。参比腔和试样腔分别由独立的振荡器提供微波信号。每个振荡器由各自的锁闭线路控制,迫使振荡器在腔的谐振频率下工作。频率差由混频器输出,通过频率计数器显示。用湿度发生器进行标定,即可得到与频率相对应的湿度值。

湿度计的气体流程如图 2.6.14 示。两个谐振腔置于 50℃ 的恒温箱内。样气经过加热器预热之后进入恒温箱内的换热器,气

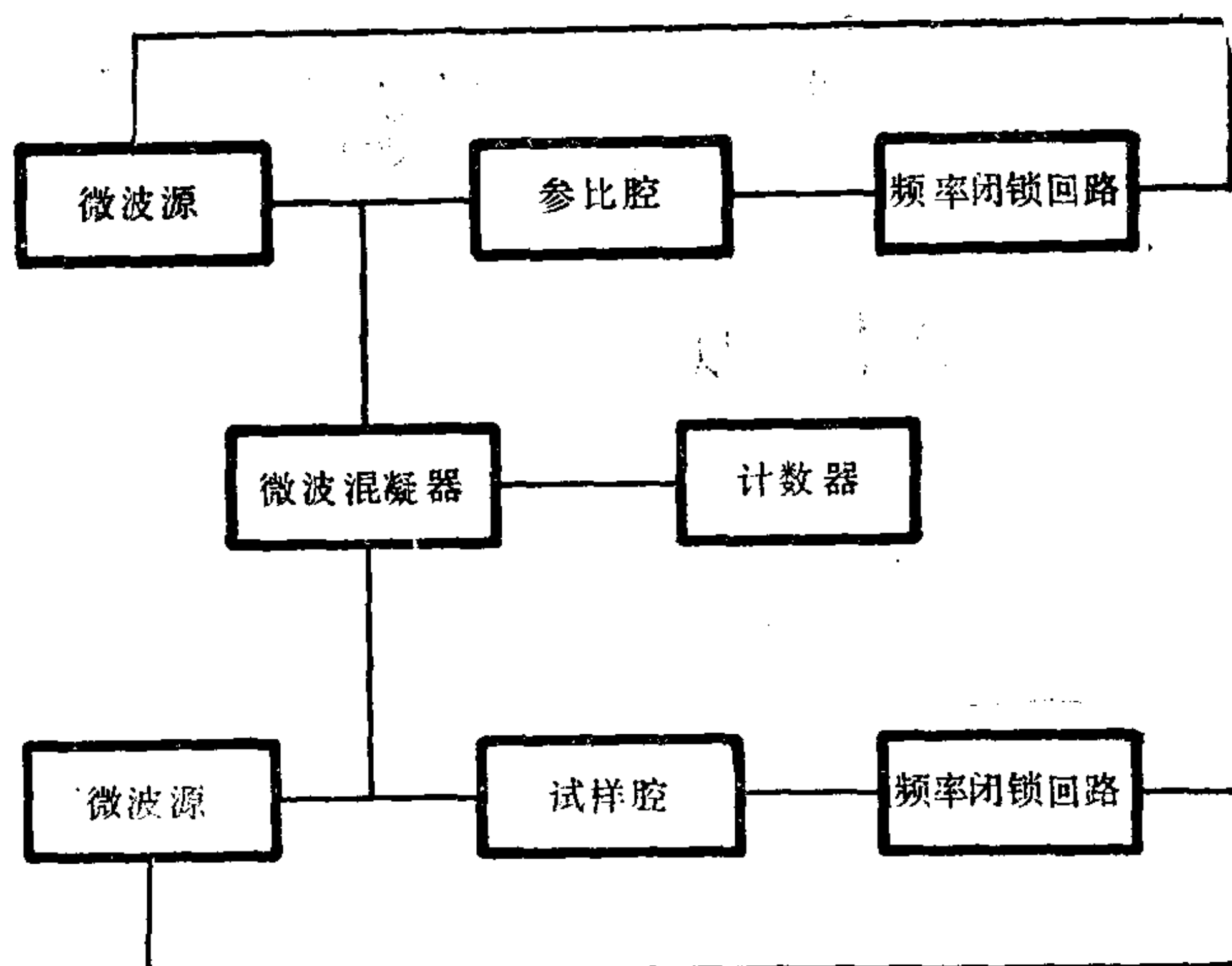


图2.6.13 微波湿度计方框图  
(注：图中微波混频器应为微波混频器)

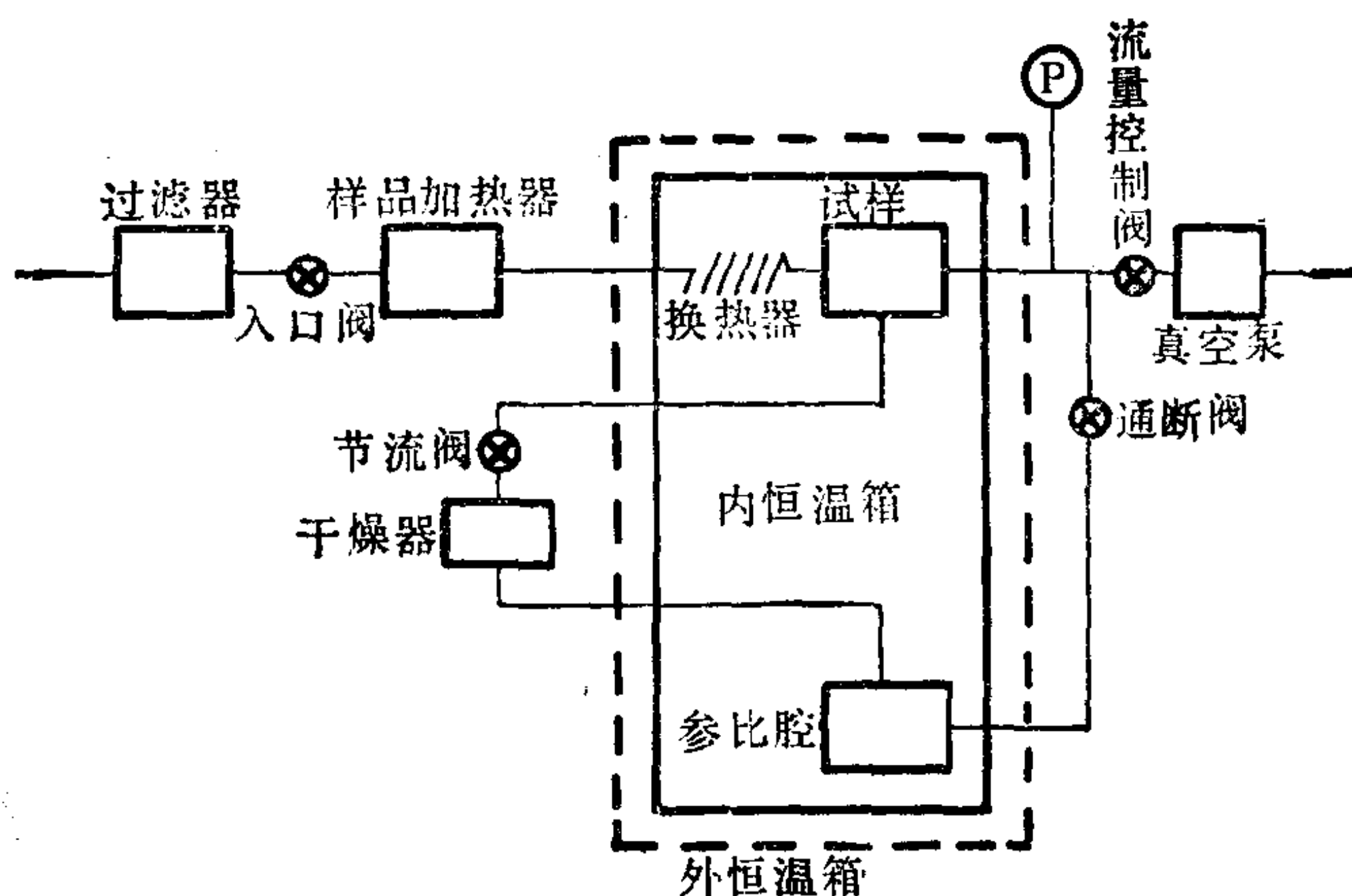


图2.6.14 微波湿度计空气流程

体被进一步加热到腔体的温度,然后进入试样腔。样气大部分经由试样腔排空,其中一小部分通过干燥器进入参比腔再排空。采用这种流程结构可保证两个腔的温度和压力相同。



### 3. 测量误差的一般分析

对于建立在经验方程基础上的测量方法,确定其准确度应当十分慎重,必须对有可能产生误差的各个环节进行全面的分析,最后加以合成。最可靠的办法是用湿度发生器进行校正。

微波湿度计的理论表明,水汽压是折射率、温度和压力的函数。因此仪器的误差来源主要包括标准频率发生器的误差,经验常数的误差以及温度、压力和参比气的干燥程度等。

对于 9200MHz,温度从 16°C 到 30°C 的实验条件给出的极限误差为  $\pm 0.33\%$ 。Crain 通过精密的实验得到了大致相同的结果。下面我们着重讨论一下其中的几个误差源。

**有关频率温度系数的问题** 我们知道,仪器的稳定性主要取决于谐振腔尺寸的恒定性,因为谐振腔尺寸的变化将改变它的谐振频率。因此,使谐振腔在恒定的温度下工作是一个很重要的问题,并且腔体结构应选用膨胀系数和吸湿性尽量小的材料,如石英和不锈钢等。另外,被测气体在进入腔体之前应当进行充分换热,以消除气流对腔体的热干扰。Magee 和 Crain 的实验表明,如果腔体的温度变化 0.1°C,由此产生的水汽压误差为 0.00065hPa/hPa。

**压力影响** 对于大气湿度测量来说,由于空气需要通过真空泵或小型空压机引入,因此试样腔中的压力将低于或高于周围的大气压力。因为折射率是压力的函数,而且压力变化直接改变被测气体的水汽密度,所以压力的变化将产生测量误差。另外,被测气体的流速与压力有关,而流速又影响仪器的时间常数。因此考虑这个问题的原则是,在力求使参比腔、试样腔和周围大气压力尽量接近的前提下,适当兼顾仪器的时间常数,即选择适当的流速。实验指出,对于 10hPa 的水汽压,如果腔内出现 49hPa 的大气压力降,将使水汽压降低 0.048hPa。

**参比腔气体干燥程度的影响** 在其它条件固定的情况下,若气体足够干燥,参比腔的谐振频率应该是恒定的,相反,则会产生系统偏差。



此外,如果湿度计的输由记录器给出,则准确度还受记录器性能和结构的影响。

微波湿度计自问世以来,主要是用在大气湿度测量方面,近年来逐渐发展到用于工业流程控制。由于仪器具有灵敏度和准确度高、量程宽和性能稳定等一系列优点,美国标准局已将它列为二级标准。作为标准使用的数字式微波湿度计的工作露点范围从 $-55^{\circ}\text{C}$ 到 $+44^{\circ}\text{C}$ 。相应的露点不确定度 $40^{\circ}\text{C}$ 是 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ 是 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ 是 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ 是 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ,  $-52^{\circ}\text{C}$ 是 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 。