

§ 4.7 风速传感器

§ 4.7.1 电晕离子式

工作原理 离子式风速传感器的原理是高压电晕放电使得周围介质产生电离，而电离出来的带电粒子在气流中发生偏移，通过对这种偏移量的测量来反映出风速和风向。其工作原理图如图4.7.1所示。

当源极 3 相对于收集极 2 保持高压正电位时，在源极附近就存在着强电场。气体在强电场的作用下产生了电晕放电，游离的正离子沿电场方向移动流向收集极 1 和 2，这就形成了正离子流即电流。

$$I = qn_+ AV_d \quad (4.7-1)$$

式中 V_d —在电场作用下产生的正离子漂移速度（厘米/秒）；

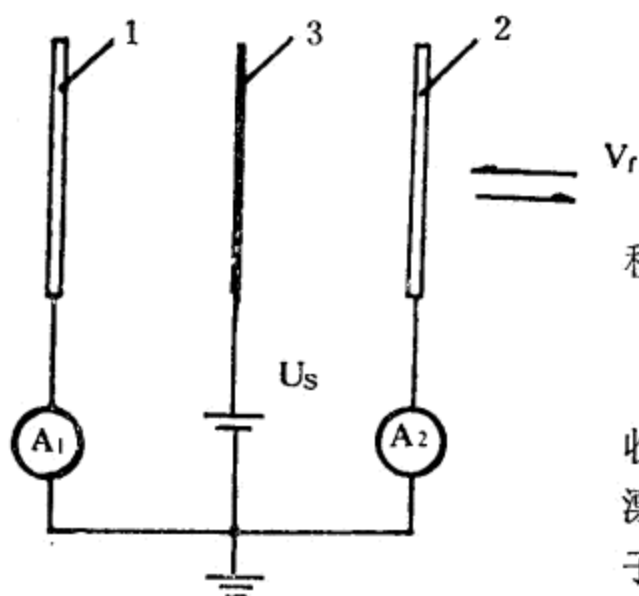


图 4.7.1 离子风速传感器原理图

1、2. 收集极；3. 源极； u_s . 高压源； A_1 、 A_2 . 微电流表。

A —收集极面积(平方厘米)；

n_+ —正离子密度(每立方厘米的粒子数)；

q —每个正离子的电荷量(库仑)。

当无风时，正离子流向收集极 1 和向收集极 2 的漂移速度相等，正离子电流也相等，即

$$I_1 = I_2 = qn_+AV_d$$

当有风时，设风速为 V_f ，且风向是由收集极 2 流向收集极 1。此时向收集极 2 漂移的正离子流受阻，离子漂移的总速度为 $V_2 = V_d - V_f$ ；向收集极 1 漂移的正离子流加速，离子漂移的总速度为 $V_1 = V_d + V_f$ 。收集极 1 和 2 上的正离子电流分别为

$$I_1 = qn_+A(V_d + V_f)$$

$$I_2 = qn_+A(V_d - V_f)$$

故电流表 A_1 和 A_2 的读数就不相等，其差值为 $\Delta I = I_1 - I_2 = 2qn_+AV_f = KV_f$ 。如果风向由收集极 1 向收集极 2 运动时，其差值为 $\Delta I = I_2 - I_1 = -2qn_+AV_f = -KV_f$ 。从而看出电流差的大小正比于风速 V_f 。正负符号代表风向的变化，而与离子漂移的速度无关。若取电流 I_1 与 I_2 之和 $\Sigma I = 2qn_+AV_d$ ，则 ΣI 与风速无关，而与离子漂移的速度成正比。

在通常情况下，由于宇宙射线与地层放射性物质的作用，气体总是存在少量带电粒子。这些带电粒子在外加电场的作用下，就会沿着电场方向运动，并在源极附近激烈碰撞气体分子，使气体分子游离。随着外加电压的升高，源极附近的电场强度超过空气击穿电场强度（约30千伏/厘米），就会在局部地区产生击穿，出现电晕放电。由公式得到正离子流与外加电压的关系由下式表示：

$$I = K(U - u_K)^2$$

(4.7-2)

式中 U —外加电压值；

U_K —起始电晕电压值。

当外加电压 U 未达到起始电晕电压 U_K 时无电晕电流。当 $U > U_K$ ，电晕电流与 $U - U_K$ 成平方关系。电晕电流上升很快。

但是源极与收集极之间离子的速度又与气体的特性有关。为了保证源极在工作期间离子流不受环境的气温、气压和湿度的影响，能测出稳定的风速，高压电源必须保证离子流为恒定，即离子流速 V_d 不变。

结 构 传感器头由收集极、源极、支架、联接座及护罩组成。结构图如图4.7.2所示。

收集极要求导电性好、透风度好。侧面是有一定刚度的铜栅网状导体。铜丝栅的粗细应避免形成任何负电晕。网眼在满足透风度好的条件下，网孔越小，收集电流越大。两个收集极与源极的距离不但要求相等，而且要求平行。

源极是在金属环上焊接一条直径很细的镍络丝，加高压后产生电晕。源极为单丝，可使起始电压值低，产生的电晕电流较平稳，对风速变化较敏感。为了改善源极与收集极之

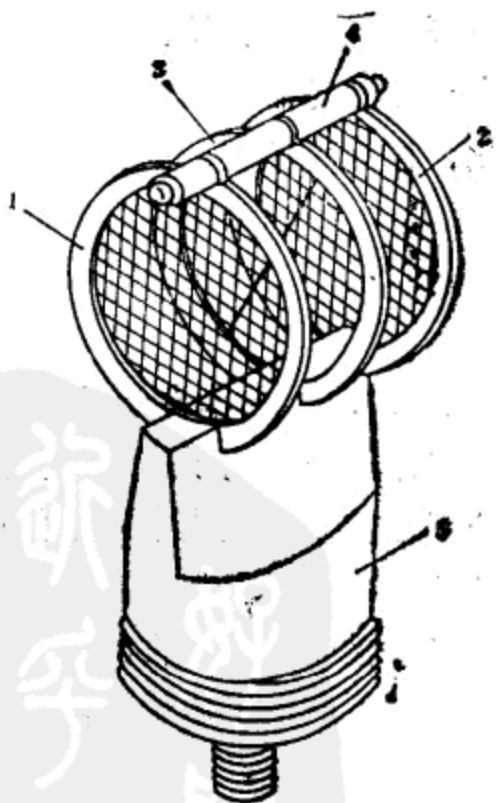


图 4.7.2 离子风速传感器结构图
1、2. 收集极 3. 源极 4. 支架 5. 联接座

间漏电流,把源极的金属环嵌到绝缘框架上。

支架是用等距离的绝缘套绝缘源极与收集极,并固定它们之间的距离。此绝缘套要求有特别高的电阻,以便减少漏电流。绝缘套以聚四氟乙烯为最理想的材料。

源极和收集极用支架固定后,再固定在联接座上。源极的高压引线和收集极的引线都由联接座引出。

电 路 该传感器的电路由两个微电流放大器、一个差分放大器、一个加法放大器和一个高压电源组成。电路方框图如图4.7.3所示。

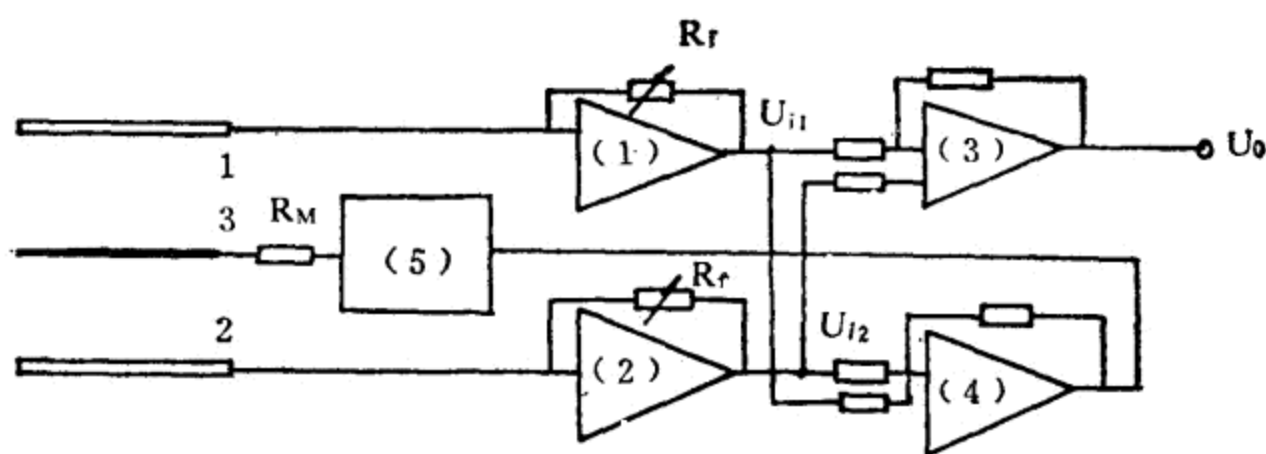


图 4.7.3 离子风速传感器电路方框图

1、2. 收集极 3. 源极 (1)、(2). 微电流放大器 (3). 差分放大器 (4). 加法放大器 (5). 高压电源

当传感器处在无风速时,收集极两边收集的离子电流理应当相等,但实际上测得的离子电流总有误差。这是由于工艺误差,尤其是源极和收集极之间的距离未能制成完全对称而造成的。为了消除在无风状态下两边收集极的电流误差,在微电流放大器中增加了反馈电阻,使差分放大器输出电压 u_0 基本为零。当传感器处在有风时,两边收集的离子电流就不同了,通过微电流放大器输出的电压就出现 $u_{i1} > u_{i2}$ 或者 $u_{i2} > u_{i1}$,而差分放大器输出的电压值及符号有变化。通过风洞标定,使差分放大器输出的电压值和风速成线性关系。用数字显示风速的大小。

为了使离子漂移速度为恒定值,将电流放大器得到的 u_{i1} 、 u_{i2} 分别输入给加法器,经加法器给高压电源以负反馈。为了限制源极电流以消除源极与收集极之间的放电现象,在高压输出端串入一个 R_M 电阻。高压电源由稳压、振荡和倍压等部分组成。高压引出通过特制的电缆线和高压插头座十分可靠地接到传感器上。

主要性能 离子式风速传感器经风洞性能试验,能测试最大风速20米/秒,最小风速1米/秒,误差不超过1米/秒。这些性能是由电路所决定的。当风速一定时,不同风向的横风风量对物体的影响是不一样的。该传感器能感受不同风向和风速的横风风量,满足横风风量的余弦规律。

电晕放电较易实现也较安全。它的优点是无形机械磨损,惯性小,灵敏度高,能很快反应出风速和风向的变化。又由于它具有较好的余弦特性,因而定向风的测量已被军工采用。如果在结构上加以改进,可测管道的质量流。

国外已用于测量车辆内燃机的进气量,控制给定燃料流量以保证最佳的气、油混和。但当气流中混有导电介质时,该传感器就无法使用。

§ 4.7.2 射线离子式

工作原理 射线风速传感器的原理是,由于气体的运动改变辐射源所产生的离子浓度,

将引起一个差动电流，这个差动电流正比于风速。其原理图如图 4.7.4 所示。

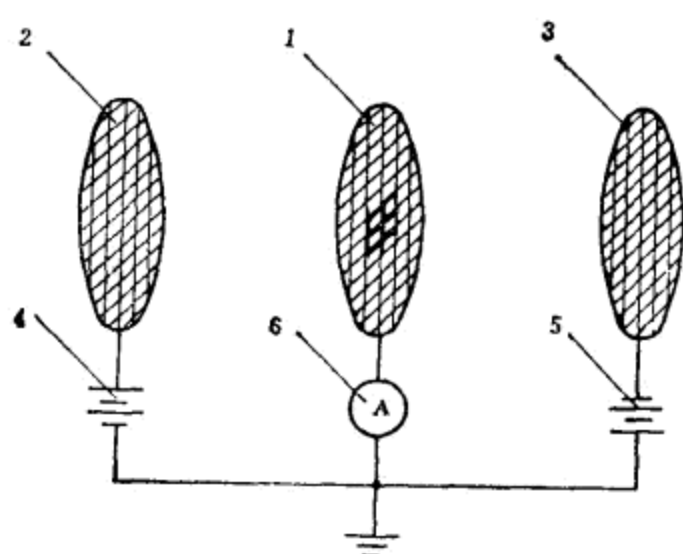


图 4.7.4 射线式风速传感器原理图

1. 辐射源电极；2、3. 外屏式电极；4. 正高压源；5. 负高压源；6. 电流表。

两个外屏式电极对称地放在 α 辐射源电极的两侧，且与辐射源同轴。辐射源电极和两个外屏式电极均有很好的透风度。辐射源使两个外屏电极之间的空气电离。而两个外屏式电极相对 α 辐射源电极带有相反的电压，以便在 α 辐射源的两边维持相等的电场。正负电源由两个外屏式电极供电。

在辐射源电极与两侧外屏式电极之间的空气介质大部分被 α 粒子所电离，同时又由于两个外屏式电极之间存在着电场，则空气中带负电荷的粒子从它各自的原点向正电极 2 飘移运动，而带正电荷的离子向负电极 3 作飘移运动。

当无风时，负粒子的飘移速度近似等于正离子的飘移速度，结果稳定状态粒子流趋向于平衡。在这种情况下，离子空间电荷的电场分量相对于辐射源电极互相中和，因此在电流表 A 上没有电流指示。

当存在着平行于电场的风速分量时，这个风速分量对离子的飘移又附加了一个速度，使离子流和它们各自的电场分量失去平衡，在电流表上就有电流指示。这个不平衡电流与风速分量成正比，用风速单位进行标定就可测出风速大小。

结 构 该传感器的传感头结构简单。外屏式电极是由一对透风度好的圆形网状电极组成，其外缘是用较薄而刚度较好的金属环作支撑框，里面用金属丝构成网状。而辐射源电极也和外屏式电极一样，只是在电极的中央复盖着一层 α 粒子放射源，并在 α 材料上涂有一层永久惰性金属，使 α 放射剂量减弱在需要的范围内。为了获得最均匀的电场和电离场，以及使传感头敏感区中的任何离子分布的畸变最小，这三个电极应具有几何尺寸小和结构紧凑的特点。同时 α 辐射源是在中心对称的 α 材料框架上涂了一层永久性惰性金属，用绝缘支架固定着，并由垂直的绝缘支架支撑着，使这个传感头处于工作位置。传感头上有不锈钢制成的半圆形的护罩保护着。

电 路 射线式风速传感器的电路方框图如图 4.7.5 所示，它由正负高压源及微电流放大器组成。

该传感器相对于地电位有正电压源和负电压源，它们输出分别接到外屏式电极 2、3 上。这两个电压源都是由稳压、振荡和倍压而组成。辐射源电极的一端接微电流放大器，此放

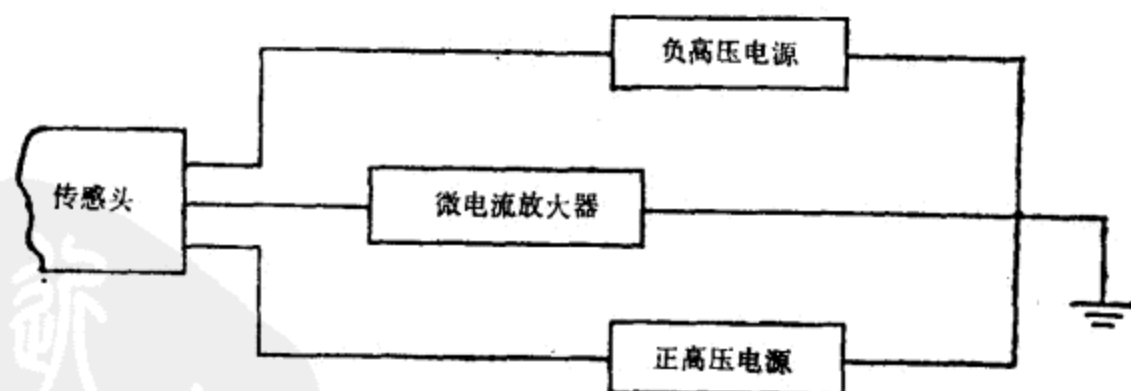


图 4.7.5 射线式风速传感器电路方框图

大器的地电位必需与正负电压源的地电位连接起来。微电流放大器一般用集成运算放大器，它能测微安级电流。如加一个场效应管，可测毫微安级电流；加一个静电计管，能组成灵敏度较高的微电流放大器，可测出 $10^{-14}A$ 的微小电流。微电流放大器输出电压正比于风速的大小。

射线式风速传感器灵敏度高,能很快反应出风速和风向的变化;能感受不同风向和风速的横风风量,故可以做成非常精确的风速仪。国外已用在军工上测量定向风及在低风速计中使用。同时还能应用在测量发动机的进气量,测出气体贮藏设备附近漏气现象等等。辐射源的工艺是该传感器的关键。

§ 4.7.3 热敏电阻式

工作原理 恒温风速计是一个自动调节系统。它的传感器头部是由热敏电阻来感受风速变化的。在不同风速下,使处于不同热平衡状态的感应头的工作温度基本维持不变,即阻值基本恒定。感应头所消耗的功率等于在该风速下传递给周围空气的热量。根据热平衡方程式可以知

$$\varepsilon = A + BV^n \quad (4.7-3)$$

$$\text{或} \quad \varepsilon = \frac{I_R^2 R_t}{t - t_0} \quad (4.7-4)$$

式中 ε —耗散系数(毫瓦/度);

A, B, n —由探头的热参数、形状、尺寸、结构和气流特性所决定的常数;

V —气流的速度(米/秒);

t_0 —气流温度($^{\circ}\text{C}$);

t —热敏电阻的工作温度($^{\circ}\text{C}$);

I_R —热敏电阻上通过的电流(毫安);

R_t —对应于工作温度 t 的热敏电阻的阻值(千欧)。

传感器的消耗电能随风速不同而不同,所以流经传感器的电流和加给它的电压以及与之相应的电量均可以作为风速的测量。

结 构 恒温风速计的探头由测杆和测头座体组成,其结构如图 4.7.6 所示。

测杆可保护热敏电阻,它按使用要求可伸长和缩短测头。测头座体是用聚四氟乙烯棒制成。它耐高温,绝缘好。座体上面固定四根磷铜支柱,用来焊接热敏电阻测速探头及温度补偿用的热敏电阻。测速用的热敏电阻是由锰镍铜铁的氧化物烧结而成珠状,引出线为铂金丝。由于珠状热敏电阻体积小,因而耗散系数也很小。为了防止氧化,在珠状热敏电阻的外表面涂一层玻璃粉并烧结。温度补偿的热敏电阻为片状。

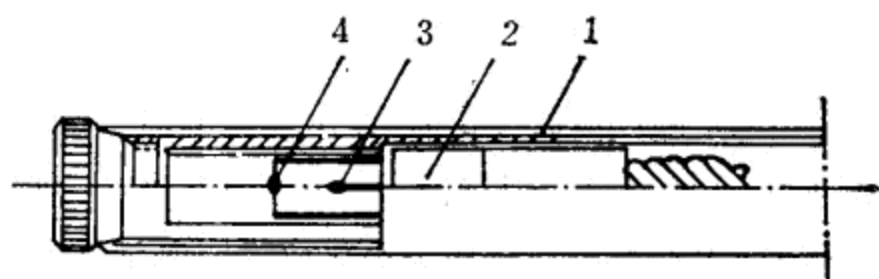


图 4.7.6 恒温风速计测头结构图

1. 测杆 2. 测头座体 3. 补偿热敏电阻 4. 珠状热敏电阻

电阻体积小,因而耗散系数也很小。为了防止氧化,在珠状热敏电阻的外表面涂一层玻璃粉并烧结。温度补偿的热敏电阻为片状。

电 路 恒温风速计的电路包括两大部分:一是恒温自动调节系统电路;二是线性化电路。如图 4.7.7 所示。

恒温自动调节系统由测量电桥、电压放大器、电压电流跟随器、起始电流和给定环节等部分闭环组成。测量电桥由探头 R_{11} 、调整电阻 R_2 和桥臂电阻 R_3, R_4 组成。桥路电流由直流电源经过晶体管供给。如果调整桥路电流的大小使得受电流加热的探头在零风速下具有与调整电阻相同的阻值,则桥路输出为零。当风速变化时,桥路输出也发生变化。电压放大器 A_1 将桥路输出电压 u_{AB} 放大,再驱动电压电流跟随器。电压放大的倍数应使系统具有足够的恒温精度,保证系统工作稳定。电压电流跟随器由组件放大器 A_2 、晶体管变阻器 T 、可变电阻 R_5 和负载组成。其作用是将放大的桥路输出电压的变化转换成桥路电流的变

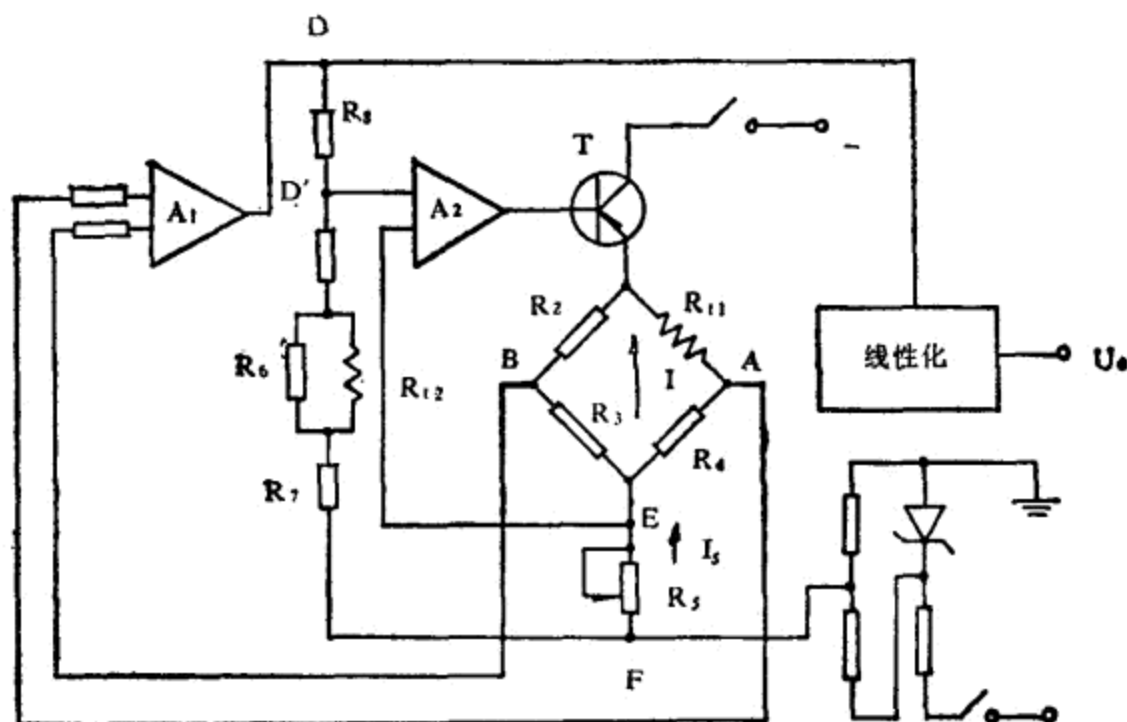


图 4.7.7 恒温风速计电路方框图

化。由于放大器 A_2 不带反馈，增益极高，因此其输入端电位差趋近于零， $u_{D'F} = u_{EF}$ 。当忽略放大器输入偏流时，有 $u_{EF} = -I_s R_5 = -I R_5$ ，于是 $I = -u_{D'F} / R_5$ ，也就是说，电压和电流的变换关系由可变电阻 R_5 的大小决定。初始电流给定环节是一个稳压分压器。它的分压端与电压电流跟随器的输入、输出的共同端 F 相接，就是给定电桥处于平衡状态的起始工作电流。当风速为零时，通过传感头的电流将热敏电阻加热至一定温度（约 130°C ），电桥处于平衡状态，桥路供电电压恒定不变。当风速增高或降低时，由于热平衡关系的变化，探头温度降低或升高，其阻值增大或减少。与此相应，测量电桥的输出电压发生变化，经电压放大器放大后，由电压电流跟随器变换成测量电桥电流的变化，使流经探头的电流增大或减少。于是探头温度回升或下降，电桥重新趋于平衡。自动补偿是一个包含热敏电阻 R_{12} 的分压器。当 R_{12} 随风温而变化时，这个分压器的分压比也随之而变化。为感受风温的变化， R_{12} 与 R_1 同装在测杆上。但选择 R_{12} 和其他补偿环节参数时，必须保证 R_{12} 流过的电流足够小，本身并不发热。因而其阻值不反应风速而只反应风温。

虽然输出电压和风速不是线性关系，近似于 $1/4$ 次方，但可用函数变换器使之线性化，即使任意函数经逐段近似变为很多直线段来代替。通过线性化，使输出的电压值与风速大致成线性关系。

主要性能 恒温风速传感器可测风速范围是，低速档 $0.04 \sim 3$ 米/秒，高速档 $2.5 \sim 30$ 米/秒，测量误差为 $\pm 4\%$ 。反应时间快档 3 秒，慢档 10 秒。测杆引线长 5 米。

该种传感器由于能很快地响应风速的变化，因而被加热的元件可以做得很小，而式样也可多种。它的优点是有风温补偿线路，频率响应较好，稍加改装可测瞬时风速，高速范围理论上不受限制。其缺点是不稳定，测头分散性大，以及标定和读出系统都比较复杂。它可用于取暖通风、空气调节、气象、农业、冷藏干燥及室内外模型气流速度的测定。

§ 4.7.4 热线式

工作原理 热线式风速传感器是测量加热电阻丝（热线）在气流作用下的热功交换数值。根据热传导理论，被加热的电阻丝在气流场中，由于气流的作用而损失能量的大小正比于气流的速度，其关系是一个指数曲线。通过自动控制电路，可以控制热线的加热电压跟随风速大

小的改变而使热线温度保持恒定。因此,通过对加热电压变化的测量,就可以得到风速的数值。

结 构 该传感头由敏感元件、外罩和支撑骨架等组成。其结构如图 4.7.8 所示。

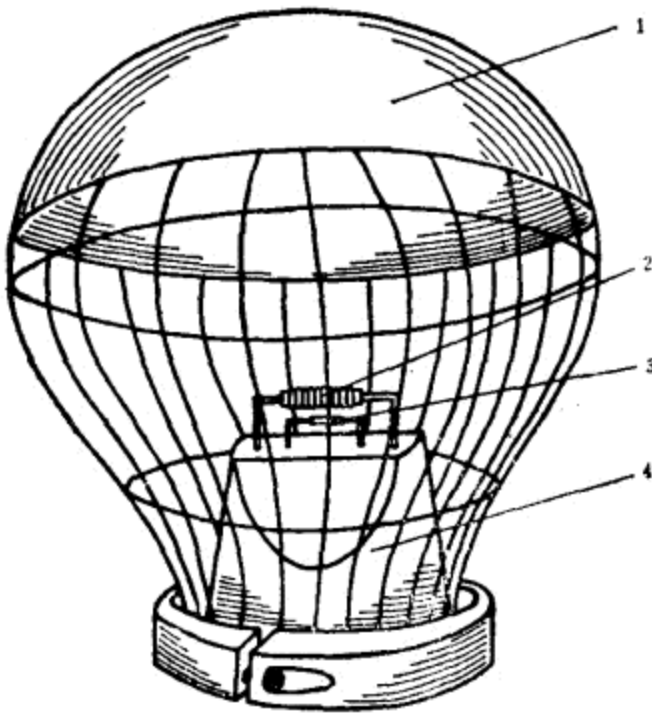


图 4.7.8 热线式传感头结构图
1. 外罩 2. 热线敏感元件 3. 热敏电阻
4. 支架

敏感元件热线是由直径很细而电阻温度系数很高的镍铁合金丝,均匀地绕在一根空心的瓷棒上制成。绕成的热线电阻在 $125 \pm 5^\circ\text{C}$ 的恒温箱内经 48 小时老化处理后,涂上一层很薄的 F01—10 高温漆,再经 100°C 烘烤,最后在 20°C 下测出需要的电阻值。为了测试精确,不引起湍流,空心瓷棒要细,支撑热线的骨架需要有一定的坡度。骨架由玻璃钢制成,上面伸出两根磷铜支柱,用来焊接热线电阻的两端。为了防止太阳辐射增温及其它外界影响,传感头的最外面有一个不锈钢罩。

电 路 传感器的电路由主控快速自动平衡电桥和线性化两部分组成。电路方框图如图 4.7.9 所示。

集成稳压电源输出电压加到 W_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_0 、 R_T 和 R_W 构成的电桥上。其中 R_1 、 R_2 和 R_0 为精密绕线电阻, R_3 为带指示的多圈电位器, R_W 为热

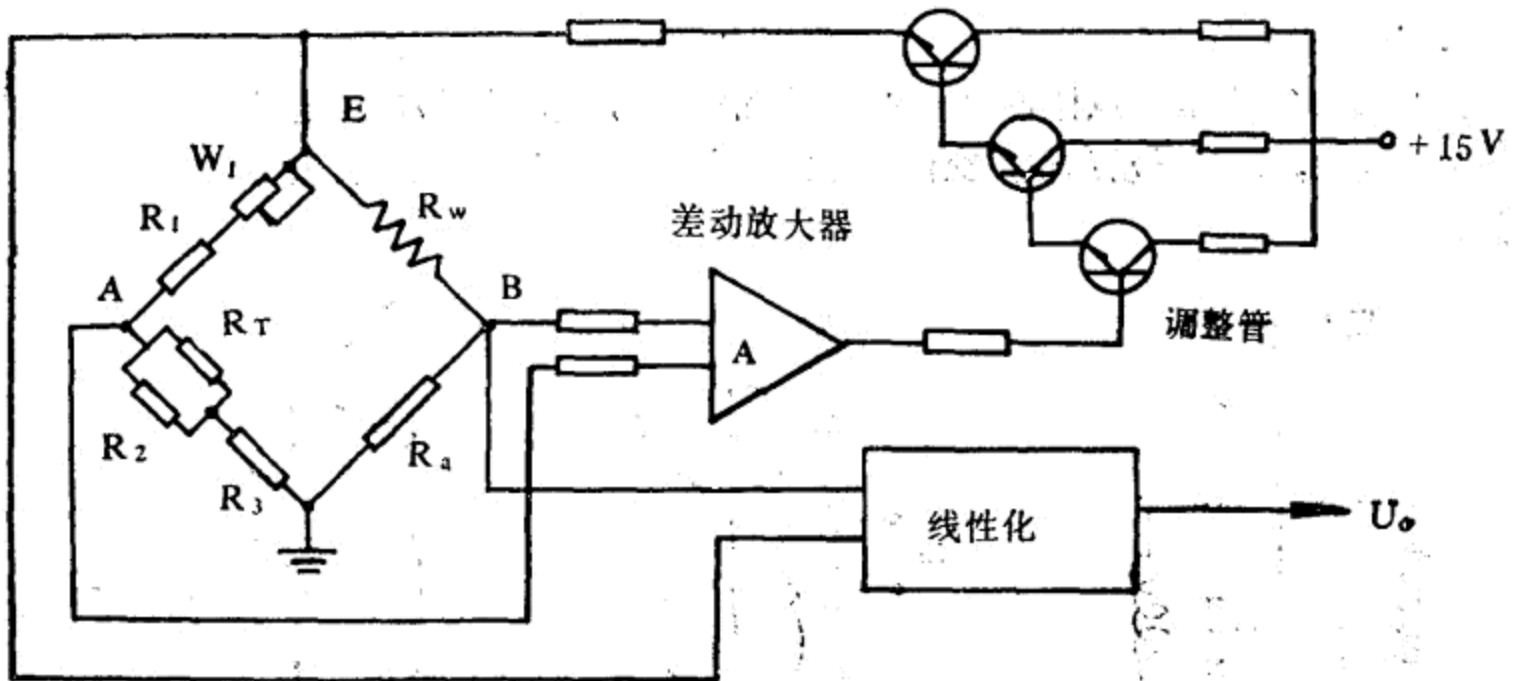


图 4.7.9 热线式传感器电路方框图

线。当无风时电桥平衡, $u_B = u_A = 0$, 输出电压 u_E 不变, 热线电阻 R_W 的温度 T_W 保持在控制值上; 当风速增大时, 热线电阻 R_W 的热线温度降低, 阻值减小, u_B 发生变化, 电桥不平衡, u_B 和 u_A 之间产生电压差信号, 经过高增益的比例积分放大器及调整管, 使稳压电源输出电压 V_E 增加, 流过热线上的电流也增大, 直到 R_W 的温度回到原来的控制温度 T_W , 电桥恢复平衡为止。热线温度是由参考点 A 的电压所决定, 旋转精密多圈电位器 W_1 可改变热线的控制温度。与 R_2 并联的热敏电阻 R_T 封装在传感器的头上, 可以补偿环境温度。线性化电路是采用精度较高的由对数和反对数放大器构成的对数元件组成, 经线性化处理后, 通过线性表头即可读出风速的大小。

主要性能 该传感器能测量的风速范围为 0—20 米/秒, 滞后时间小于 5 秒。调节热线的温度 T_w 可改变线路测量的灵敏度。对极弱的风速也能测量。

该传感器灵敏度高, 结构简单, 体积小, 操作方便, 灵敏度可任意调整, 测量范围广, 响应快, 性能稳定。传感头对介质环境影响很小, 适于远距离遥测。也可用于遥测大气中南北方向的风。国外已使用在军工上作定向风测试。

§ 4.7.5 叶片式或其它

1. 叶片式

一个轴流叶片风轮带动一台测速发电机, 测速发电机的输出被送进放大器的输入端, 放大器即输出正比于风速大小的直流电压。在流场中轴流风轮是风速的敏感器件, 测速发电机是风轮的负载。风轮的转速也即测速发电机的转速 n 与风速 V 成正比, 而测速发电机的输出电压 u_0 又正比于测速发电机的转速, 因此输出电压 u_0 正比于风速 V 。经放大器放大, 风洞标定后, 以数字显示风速。

叶片式主要用于测定向风。

2. 热球式风速传感器

在测杆的头部有一个直径约为 0.8 毫米的玻璃球, 球内绕有加热玻璃球用的镍铬丝线圈和两个串联的热电偶。热电偶的冷端连接在磷铜质的支柱上, 直接暴露在气流中。当一定大小的电流通过加热线圈后, 球内热电偶产生热电势, 其大小和气流的速度有关。气流速度大时, 热电势小。反之则大。热电势经运算放大器放大后, 用表头指示。经标定后, 表头的读数即为风速。

3. 风杯式

图 4.7.10(a) 是利用风杯带动一块 8 极磁钢在定子线圈中转动, 使定子线圈中产生交流信号。风速越大, 风杯转动越快, 交流信号的频率也就越高。如测得交流信号频率, 也就测得了风速。

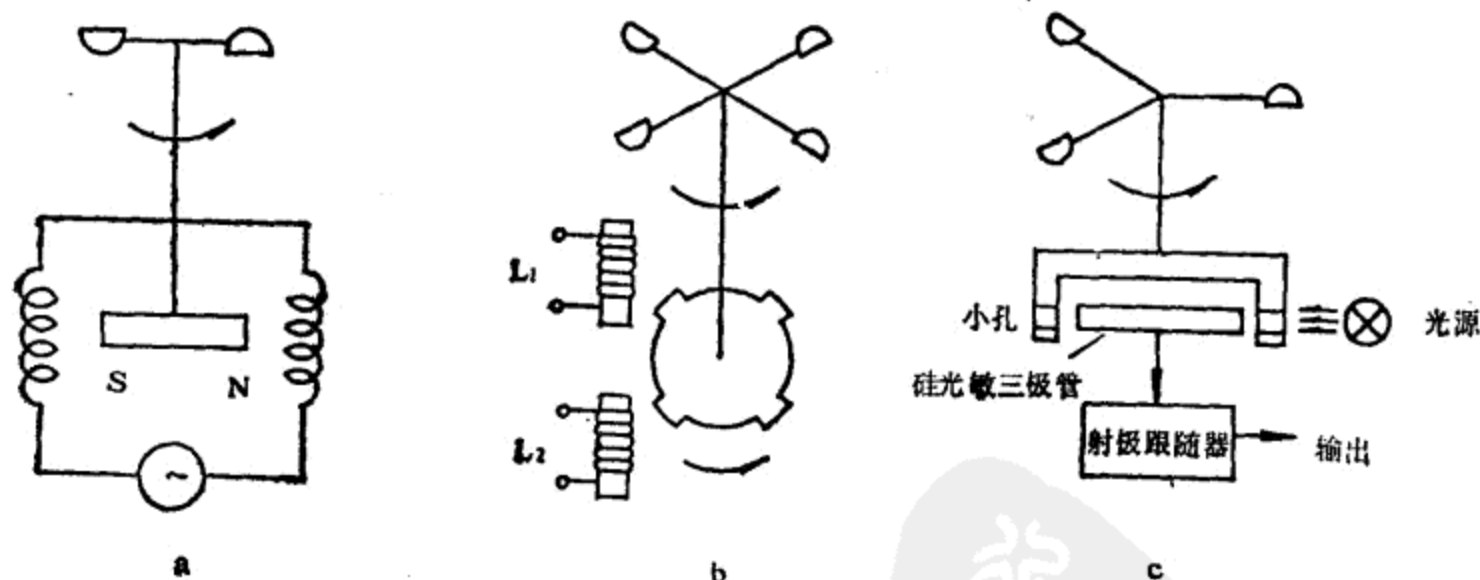


图 4.7.10 风杯式风速传感器原理图

图 4.7.10(b) 是球形或锥形的风杯。当风杯在气流中旋转时其旋转速度与风速成正比。在风杯轴下端装一个四齿薄铝圆盘, 铝盘的齿刚好置于 L_1 和 L_2 之间。当铝盘随同风杯一起旋转到铝齿恰好处于 L_1 和 L_2 之间时, 激磁线圈 L_1 的磁力线大部分在铝齿上产生涡流, L_2 耦合的信号不足以维持电路振荡。只有齿片移开后耦合恢复, 振荡才重新建立。由于圆盘上有四个齿, 因此风杯每旋转一周, 开关电路将输出四个正脉冲。测量单位时间内的脉冲

数,便可算出风速大小。

还有一种是在小型三风杯转轴上装有一轻质金属小盘,小盘外沿开有等距离的若干小孔,盘内装有硅光敏三极管,盘外有一微形电珠作光源。如图4.7.10(c)所示。当风杯随风转动时,小盘随之旋转,光源即被断续遮蔽,从而使光敏三极管内阻发生变化,产生电脉冲并通过一组射随器转变为相应幅度的脉冲讯号输出。测量脉冲频率便可算出风速大小。

其它测风速传感器还有激光式、压板式、拖球式及复杂的声学风速计等。

通用的风速表是风杯式,或是叶片式。它们在结构上和电路上虽都比较简单,但却存在有质量惯性和支撑摩擦问题,从而限制了它们在非常低的风速下的使用。热敏电阻和热线型的风速计虽能很快地响应风速的变化,但它们有不稳定性,读出和标定系统比较复杂。热电偶虽可做得很小,但它的稳定性不好,标定及读出系统也较复杂。离子式风速仪惯性小,质量和运转摩擦也极小,反应敏感动作快。它是一种非常精确的风速仪,可用于测定向风。