

农机电测基础知识

广东农林学院农机系

1976·5

第八章 农机电测技术基本知识

在现代的测量技术中，用电测量的方法来测量非电物理量（一般称为非电量电测），得到了广泛的应用。因为这种方法，一般来说，具有较高的准确性和灵敏度，可测量变化频率较高的过程，便于记录，多线测量和遥测。电测法的基本原理是用变换器将被测物理量变换成电学量（如电阻、电容、电感等），然后用电子测量仪对该电量进行测量。

毛主席教导我们：“我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步的爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化强国”。在毛主席革命路线指引下，我国科学技术飞速发展，先进技术一经出现，很快就被推广，由于农业机械科学的特点，使得非电量电测技术在农业机械的科研、生产部门中逐渐的被采用。下面介绍在农机试验中用得最广泛的电阻变换器及其测量方法。

§8-1 电阻应变仪的基本原理

一、粘贴式电阻变换器（又称电阻应变片、电阻片）

1.1 电阻丝的应变效应

应变效应即是电阻丝的电阻值随其变形（拉长或缩短）而发生改变的一种现象。假如一电阻丝长为 l ，电阻为 R ，变形后长度变化了 Δl ，则该电阻丝的应变 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ，在此应变下，电阻丝的电阻也相应变化了 ΔR ，则 ΔR ，则 ΔR 和 ε 有如下关系式：

$$\Delta R = K \cdot \varepsilon \cdot R \quad (8-1)$$

式中 K 为电阻丝的灵敏度系数，它的定义为单位应变的电阻变化率。它受二个因素的影响，一个是受压力后材料的几何形状发生变化而引起的，另一个是受力后材料的电阻率发生变化而引起的，因为对电阻系数在金属变形时的变化规律还未有深入研究，所以， K 只能从实验中求出，不同金属的 K 值是不相同的，一般 $K = -12 \sim +6.5$ 。当知道了 K 值，并用电子仪测得了电阻的变化，即可由公式 (8-1) 求得相应的应变值。在实际上，很少用直线形的电阻丝，而是将电阻丝弯成一定尺寸的栅状，这就成为电阻应变片（又叫电阻片），图 8-1 为电阻片的结构图。T 为支持片，支持片为很薄的纸或胶片，用胶与线栅贴在一起，如将这个电阻片贴到试件上，由于胶片和支撑片很薄（仅 0.05 毫米左右），所以，线栅就可以完全同试件表面一起变形。

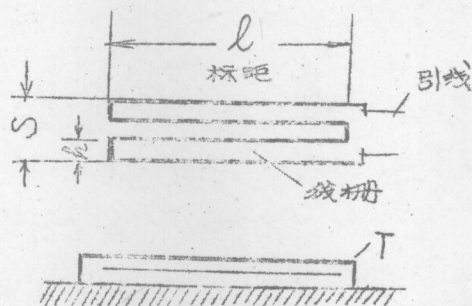


图 8-1 电阻片结构示意图

电阻片粘在零件的表面上，当零件受力后，不仅沿电阻片的纵向有应变，在横向（垂直于电阻片轴线方向）亦有应变，此应变的方向（拉或压）和纵向的应变相反，因而使电阻片的电阻变化减小了，也就是降低了电阻片的灵敏度系数。这种现象，称为横向效应。由于电阻片一定要做成栅状，其横向部份是不可避免的，所以，电阻片的灵敏度系数一定要比电阻丝的灵敏度系数小一些。

要注意，不是任何金属材料都能做电阻片，对制作应变片的电阻材料的要求是：

- 1) 灵敏度系数 K 应尽可能大；
- 2) 灵敏度系数 K 在尽可能大的应变范围内是常数。
- 3) 具有足够的热稳定性，电阻率受温度变化的影响小，亦即电阻温度系数低。
- 4) 电阻率高。这样，当在一定的电阻值要求下（如 120 或

350 Ω)，线材的长度短，这样，可以减少应变的尺寸。

5) 优良的加工与焊接性能。

6) 和其他金属接触时，接触热电势小。

在我国电阻片的制作中，用得最普遍的材料是康铜，其性能基本上能满足上述要求，它的灵敏度系数在2左右。

如果用胶将一定阻值的电阻片粘在某零件的表面上，当另件受力变形后，电阻片亦随着变形，并且其电阻值也发生相应的变化，此时如将电阻片接入测量电路中量出其电阻值的变化量，即可由式(8-1)算出另件应变的大小。不过式中的K应是电阻片的灵敏度系数。

1.2 电阻片的结构和性能

(一) 电阻片的结构：

为了使用方便，将金属线材作成某种栅状，并加上支承片而构成电阻片。电阻片一般可分为金属线式、金属箔式和半导体式。

(1) 金属线式电阻片：常用的二种形式，见图8-2。是用圆形断面的线材制成，线材直径在0.012~0.05毫米之间，引出线为直径在0.2~0.3毫米之间的镀锡铜线或为黄铜片；支持片为带胶的两片为纸或箔胶片，线栅夹在中间。纸为多孔性不含油分的纸，有用厚为0.015毫米的高级卷烟纸，或电容器(绝缘)纸用的。目前，我国常用的是拷贝纸。支持胶片常用环氧树脂胶或酚醛胶制成。

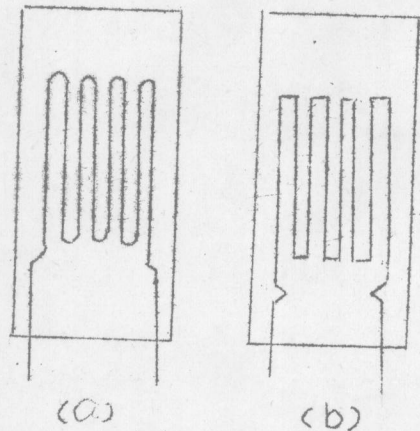


图8-2 金属线式电阻片

图(a)为圆角线栅式，是最常见的形式。其制造设备和手续都较简单，但其横向效应较直角线栅为大。

图(b)为直角线栅式, 纵向部分是较细的线材, 横向部分是粗得多的线材。两者是焊接在一起的, 因横向部分是粗线, 其电阻值较低, 因而电阻片的横向效应小。

(2) 金属箔式电阻片: 其形状见图8-3, 是用极薄的 ($0.001 \sim 0.01$ 毫米) 金属箔片 (一般为康铜或特殊的合金)

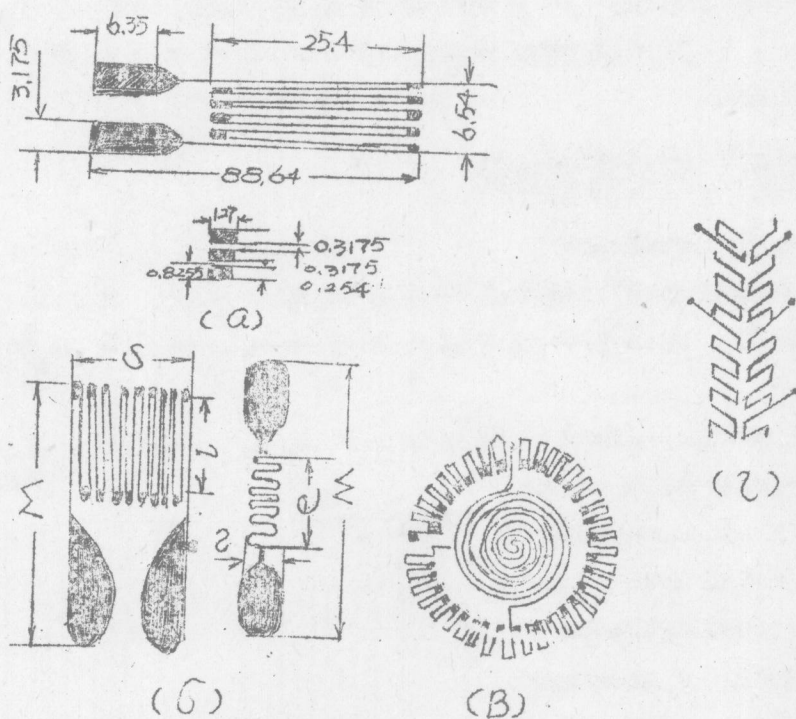


图8-3 箔式电阻片

腐蚀而成。制造时, 先在金属箔片上用防腐蚀油印刷上所需要的线栅形状, 并在箔片的另一面均匀地敷上另一层聚合胶并加温使之聚合成固体胶片, 然后用强酸将没有防腐蚀油的地方腐蚀掉, 就成为所需要的线栅形状。由于采用了印刷的办法, 使之制造的线形状可十分准确, 并很容易制成任何需要的形状, 如图8-3(B)为用以贴在轴上测量扭矩的。图(C)为一圆形式, 其转角处特别粗, 这样可大大减少横向效应。用以焊接导线的地方, 不是用另外的引出线, 而是靠本身逐渐变宽而形成的条带, 这样做简化了

手续，并且避免了金属线式电阻片引出线与线栅接合处因截面积有突变（产生应力集中）而易于折断的缺点。由于线材为长方形截面，在同样截面积的情况下，其周长比圆截面的周长大，周长大即线材的表面积大，这样就使线材与膜的接触面大，因而能更好地随同试件变形，并改善了其散热条件，可允许流过较大的电流，所以，这种电阻片可以用较高的电压供给测量电路，以增加输出信号的强度。

(3) 半导体应变片：对一块半导体的某一轴向（不是所有轴向都行），施以一定的应力时，其电阻率就会产生较大的变化，因为应力是和应变成正比的，因而就可以用晶体承受应力后产生的电阻变化来反应应变的大小。半导体应变片就是根据此种压阻效应的原理制成的。由于受应力后电阻率变化很大，因此，它比一般的金属线式电阻片或箔片电阻片的灵敏度要高出60~80倍以上。由于其灵敏度系数非常大，使用时往往可以省掉了放大器。图8-4为半导体应变片的外形图。

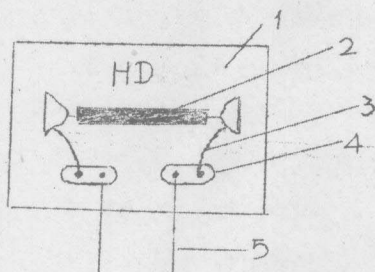


图8-4 半导体应变片外形图

- | | |
|--------|---------|
| 1—胶膜垫底 | 2—p-Si片 |
| 3—内引线 | 4—焊接电极 |
| 5—外引线 | |

制造半导体应变片的材料有

锗、硅、锑化铜、磷化铟、磷化铜与砷化铟等。一般用锗、硅，因为它们能获得比较大的压阻效应。

半导体应变片的优点是灵敏度系数高，机械滞后小，横向效应小。尤以第一优点最为突出，给使用上带来很大的方便，与之配合的电子测量仪可以大大简化。但这种应变片亦存在一定的缺点，即：

- ①，电阻和灵敏度系数的温度稳定性差，
- ②，当测量较大应变时，非线性较严重，
- ③，由于半导体材料的电阻率离散程度大，使得应变片的灵敏度系数的离散程度大，一般在 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ （金属箔式应

应变片可控制在 $\pm 1\%$), 这使测量结果有 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ 的误差。

因为有这么些缺点, 尤其是①、②两项缺点, 半导体应变片虽在60年代初期就投入生产, 但其推广普及并不如当初所期望的快, 到目前为止, 还是常规应变片占统治地位。

是否选用半导体应变片, 要根据测量精度要求, 测量对象和环境条件等因素来考虑。在有些情况下, 选用半导体应变片特别合适。例如用于教学教材以说明某种物理现象时, 测量高度灵敏的半导体应变片, 直接用电表显示出来结果是较好的。因为精确度不是主要的要求, 如使用常规应变片及随之而来的复杂的电子仪, 定会不必要的吸引学员的注意力。

(二) 电阻片的主要参数。

为了更好的使用应变片, 应该知道它的主要参数。所谓主要参数, 包括应变片的尺寸, 电阻值、允许电流等。

(1) 几何尺寸: 标距 l (见图4-35) 即线栅纵向直线部分的长度, 一般为 $12 \sim 180$ 毫米, 箔式可做得小一些, 其标距在 $0.4 \sim 180$ 毫米范围内。标距小时, 整个电阻片的尺寸小, 使之能贴在较难接近的地方进行应变测量, 并测得的应变值可反应出另件上某点应变的接近真实的情况。但标距太小, 会使横向效应的作用显著, 而降低了电阻片的灵敏度; l 小, 则线材的总长度下降, 因而电阻片的阻值下降。而我们要求电阻片有足够的电阻值。

线栅横向的尺寸 S , 以较小为好, 但太小使电阻下降, 一般 S 值在 10 毫米以下。线栅两线间的距离, 一般为 $0.1 \sim 0.3$ 毫米, 太小了散热不好。

(2) 电阻片的原始电阻, 一般在 $80 \sim 1000$ 欧姆之间, 我国常用的为 120Ω 。电阻值的大小, 要与测量电路的参数配合。

(3) 允许电流: 流经线材的电流, 有一定的限制, 如该电流太大, 则线材的温度上升, 影响了胶的性能, 甚至使其结构破坏, 不能继续进行测量, 在使中要加以改善, 因此, 不能使供桥电压过高。

1.3 电阻片的粘贴

(一) 粘贴剂(胶)的种类

应变片是用粘合剂粘贴到试件上的。在应变测量时，粘合剂所形成的胶层起着非常重要的作用，它要正确无误地将试件的应变传递到线栅上去。粘合剂在或大或小的程度上影响应变片的工作特性，应变片在测量系统中，是关键性的元件，而试验的成功或失败，往往决定于粘合剂的使用，粘贴方法是否正确。在农业机械的田间试验中，进行多种参数测量时，往往个别应变片的失效，会给工作带来很大的损失。所以，粘合剂的选择和粘贴工艺是应予以极大注意的问题。用于应变片粘贴的粘合剂大致有如下几种，现分述如下：

有机粘合剂中最常见的为可溶性粘合剂，此种胶的固化过程是溶剂的挥发过程，在固化(干燥)过程中，有80%的物质挥发掉。最常用的为丙酮富赛路胶(即万能胶)，是将纯赛路胶溶解在丙酮中得到的。常用的配方是，赛路胶6~8克，丙酮100克，表8-1为一种快干丙酮赛路胶的成分。表8-2为干燥时间与干燥时温度的关系，由表可见，干燥时温度越高，干燥的时间越短。最常用的干燥范围为：粘贴片后自然干燥1.5小时，然后加热7小时，加热温度为试件表面达 $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，再自然冷却4小时。该规范所用的时间是保证可靠测量的最短时间。

表8-1 快干丙酮赛路胶成分

赛 路 胶	15%
丙 酮	23%
醋酸戊酯 $\text{CH}_3\text{CO}\cdot\text{O}\cdot\text{C}_5\text{H}_{11}$	30%
乙 醚	30%
松 香	2%

表8-2 丙酮赛璐珞胶不同温度下的干燥时间

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	时间 (小时)
8 ~ 20 $^{\circ}\text{C}$	36 ~ 24
20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$	24 ~ 12
75 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$	4 ~ 2

此种胶的使用较方便，干燥时可不需加温，加压（如不加温干燥时间可长一些），并且制造容易，所以得到广泛的使用。尤其适于大机件上（例如机架）作应变力测量时用，其使用温度为60 $^{\circ}\text{C}$ 以下。这种胶会吸收空气中的水分而变质，使电阻片工作不稳定，故不宜作长期测量用。

有机粘合剂的另一类为靠分子聚合反应而固化的胶。多为靠提高温度使粘合剂的分子聚合或高分子而固化，在我国常用的有环氧树脂胶、酚醛——聚乙烯醇缩丁醛胶， α 羟基丙稀酸酯胶、酚醛——环氧胶等。

环氧树脂胶因对各种材料有良好的粘合性能而得到广泛的应用。作为粘胶剂，其优点是粘附力强（抗拉、抗剪强度高），固化收缩小，能耐化学药品，溶剂和油类以及具有很好的防潮性能和电绝缘性能。使用方便。只需加接触压力，在室温或不高的温度下就能固化。改变其组分配方，可获得很广的易变性。环氧树脂胶粘剂是目前最优良的粘胶剂。主要缺点是，固化后耐热性及韧性比较差，通过添加增韧剂，如酚醛树脂、脲醛、聚酰胺及改变组分后可以改进这些性能。

环氧树脂胶是一种多组分粘胶剂。它以环氧树脂为主体，添加固化剂、促进剂、增塑剂、增韧剂、填料、稀释剂等配制而成。各种组分起不同作用，并有多种种类。环氧树脂胶多是需加温固化的，也有常温固化的。

有一种酚醛——环氧胶粘剂被推荐作为电阻片粘贴胶的品种。酚醛树脂加入环氧树脂改性后，可提高其耐热性，并有一定强度，故可用作较高温度使用的电阻片粘贴胶。其粘接性能良好。

无腐蚀性，电绝缘性及热稳定性良好。与康铜丝配合做成的电阻片，性能相对稳定，室温下能线性地传递应变达 3000 微应变 ($\mu\epsilon$) 以上，可在 $250 \sim 300^\circ\text{C}$ 使用，可在 150°C 的温度下固化完全。成本低廉。缺点是粘贴固化工艺太麻烦。

最近， α 氰基丙烯酸酯快干胶，由于它具有许多优点而被普遍采用。它有 α 氰基丙烯酸甲酯（又叫“501”号胶）和 α 氰基丙烯酸乙酯（又叫“502”号胶）二种，它是一种粘度小（“502”胶的粘度较大，流动性适当），能在室温下迅速固化（“502”胶比“501”胶的胶合固化时间短，但粘结强度更高），对多种材料（如金属、橡胶、塑料、玻璃、木材等）都有良好的粘合性能的胶粘剂。可在 70°C 以下长期使用，并能抗一般有机试剂，（醇、醚、酮、酯、油等），粘结强度大。电绝缘性能好。使用方便，可在室温下受空气中微量水汽催化而聚合固化，不需外加固化剂与催化剂。但正因此是快干胶，使用时，电阻片一经涂胶，要迅速粘好。而且这种胶的耐水性差，抗酸、碱、腐蚀能力不强。储存期短，易变质（“502”比“501”号胶储存期更短）。 α 氰基丙烯酸酯胶固化后，可溶于硝基甲烷或二甲苯酰胺。胶液宜低温放置，于 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 可存放一年以上。室温 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 时存放 3~5 个月不变质。

随着我国科学技术的飞跃发展，将会提供更多的性能不同的胶粘剂，对于我们的工作用哪一种胶好呢？这就要求我们在掌握各种胶的性能的基础上，根据使用条件，具体问题具体分析了。没有绝对的好胶或坏胶，都是在一定条件下而转化的。只要运用的得当，不仅好胶能发挥其优点，就是普通胶也会得到满意的效果，比如环氧树脂胶，具有那么多的优点，但因其粘度比较大，使用手续太烦，就限制了它的使用。又如赛璐珞胶，尽管其粘附性能差，又易受潮变质，但使用手续简便，在某些情况下（如大型机架的强度测量）多采用它。

（二）电阻片的粘贴工艺

试件表面的清理：粘贴电阻片处的表面光洁度，一般为 $\nabla\nabla 6$ ，粘贴前要用的细砂纸打平，不应有刀痕存在。但表面也不宜过于光滑，这样会影响粘贴的牢固性，最好用砂纸打出极

细的交叉纹来。如被测试件表面有油漆、铁锈和污物时，要用砂轮、锉刀或化学腐蚀的方法除去，油泥等则用煤油、酒精清洗，然后再用细砂纸打光，最后，将表面用四氯化碳或丙酮洗净，马上进行粘贴。如不立刻进行粘贴，则应用凡士林涂在表面上进行保护。

粘贴及干燥： 粘贴电阻片的方法，视所用的胶和电阻片的类型而异，一般是先在试件表面上敷上一层胶，然后，在电阻片的粘贴表面上敷上一层胶，室温中放置1~1.5分钟后，将电阻片贴在试件表面上，并找正方向，为使位置准确，一般事先在试件表面和电阻片上划好线。然后用橡皮滚子或手指沿一个方向，小心地滚压电阻片表面，以便将电阻片表面与试件之间多余的胶挤出来（胶过厚就会使电阻片不能真实地反应试件表面的变形而产生较大的测量误差）。上述步骤完成后，进行干燥。用丙酮或酒精作胶时，可在室温下进行干燥，如提高温度，可加快干燥过程，如在干燥时加上一旦压力，可使粘贴质量提高。聚合胶的干燥，要加温加压，因为这种胶在干燥过程中产生气体，加压的目的，是防止内部产生气泡。加温是为着加快聚合速度，可在恒温箱或干燥箱中加温，或用红外线照射。

干燥完后，在电阻片的引出线上，焊上连接导线，并固定之。

电阻片粘贴质量的检查： 可先用万用电表检查线栅有无断路现象，其电阻值是否与额定值相符，如断路或电阻值与额定值差异很大，则需将此片清除，再粘贴新的电阻片。第二步，进行线栅与试件之间的绝缘电阻的测量。绝缘电阻小时，表示粘贴的质量不好，或干燥过程进行得不恰当。一般情况下，要求绝缘电阻在50~100兆欧以上。在短期动态测量时，可允许低至10兆欧。测量电阻片绝缘用的仪表，其测量电压最好在40伏以下。如测量电压过高时，则要注意测量时间不能过长，以防将电阻击穿。

贴于试件表面的电阻片非常容易吸收空气中的潮气而使胶的粘贴性能变坏。为了防潮、防脏物、防机械损伤，可在电阻片上敷上保护涂料，以对电阻片进行保护。保护涂料的成分是多种多

样的。例如，有一种防潮剂的成分为腊 8%、石蜡 32%、凡士林 15%、无油松香 35%、机油 10%。配好后加热至 150℃，并保持 20 分钟，然后降至 40℃ 时敷用。敷层的厚度为 2 毫米左右。改害到机田在西间试验时，工作条件较差，敷防潮剂后，应再包扎上数层织物，每层上涂有硝基涂料。为了防止机械损伤，可在防潮层上用一定方法固定铁皮或橡皮。

二、测量电桥电路

2.1 电桥

试件变形后，电阻它的电阻变化是极小的，有时只有百分之几欧，甚至更小。这个微小的电阻变化，是一般的电表难以量出的，要用特别的电路才能将之测出。惠斯通电桥，是最常用的测量电路，这种电桥可分为直流和交流两种，现分述于下：

(一) 直流电桥。

用直流电源的电桥为直流电桥，见图 8-5，图上 R_a 、 R_b 、 R_c 、 R_d 为四个电阻，组成电桥的四个臂，电压为 U 的直流电源接到电桥的输入顶点（即 E、F 两点），电桥的输出顶点（P、Q 两点）接到电流表上，电流表的内阻为 R_g ，图上标出了各支路电流的正方向和符号：

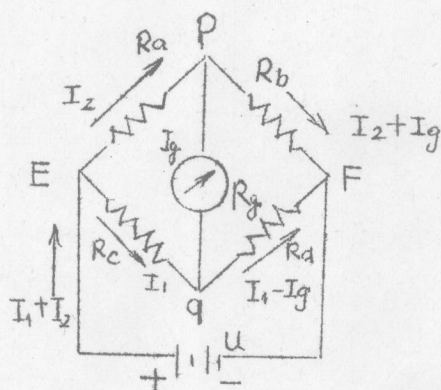


图 8-5 直流电桥

应用克希荷夫第二定律：在 R_c 、 R_a 、 U 回路中：

$$I_1 R_c + (I_1 - I_g) R_d = U \quad \text{----- (A)}$$

在 R_a 、 R_g 、 R_c 回路中：

$$I_g R_g + I_1 R_c - I_2 R_a = 0 \quad \text{----- (B)}$$

在 R_g 、 R_b 、 R_d 回路中

$$I_g R_g + (I_2 + I_g) R_b - (I_1 - I_g) R_a = 0 \quad \text{----- (c)}$$

解 (A)、(B)、(C) 三联立方程式，得流经电流表的电流

$$I_g = \frac{U (R_a R_d - R_b R_c)}{R_g (R_a + R_b) (R_c + R_d) + R_a R_b (R_c + R_d) + R_c R_d (R_a + R_b)} \quad (8-2)$$

一般在测量前先使电桥处于平衡状态，即使 $I_g = 0$ ，从上式可知，只要满足：

$$R_a \cdot R_d - R_b \cdot R_c = 0$$

或者

$$\frac{R_a}{R_c} = \frac{R_b}{R_d} \quad \text{----- (8-3)}$$

电桥即处在平衡状态。如电阻中有一个或数个是贴在试件上的电阻片，当其电阻变化时，就打破了上述公式的平衡关系，使 $I_g \neq 0$ 。因此，在电表上就有读数。从公式 (8-2) 知 I_g 与电阻变化（例如 R_a 的值从 R_a 变为 $R_a + \Delta R_a$ ）的关系是非线性的。但在 ΔR_a 的值不太大时，这种非线性是极小的。我们就很容易根据电表的读数来确定电阻的变化值。电表的刻度盘上可直接刻上电阻的变化值；或进一步刻上应变值；或刻上被测的弹性元件变形的力。上述这种测量方法叫做

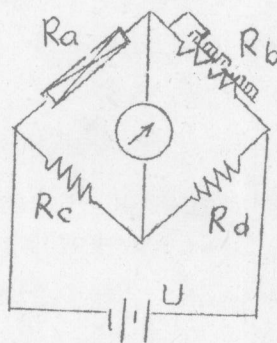


图 8-6 零位测量法

偏位法。还有一种测量方法叫做另位法。如图 8-6 所示。 R_a 为电阻片， R_b 为有刻度的变阻器，在 R_a 所在的试件未受力前使电桥四个臂（组成电桥的每一个电阻称为一臂）的阻值，符合公式 (8-3) 的关系，电桥处于平衡状态。当试件受力后，电阻片的电阻从 R_a 变到 $R_a + \Delta R_a$ 时，平衡被破坏，电表有了读数，这时，人为地调节变阻器 R_b 的阻值，使电桥又回到平衡状态（即电表指 0），这时，必存在下列关系。

$$\frac{R_a + \Delta R_a}{R_c} = \frac{R_b + \Delta R_b}{R_d}$$

交叉相乘并移项，得：

$$R_a \cdot R_d - R_b \cdot R_c + R_a \Delta R_a = R_c \cdot \Delta R_b$$

根据公式 (8-3) 考虑到：

$$R_a \cdot R_d - R_b \cdot R_c = 0$$

则得：

$$\Delta R_a = \frac{R_c}{R_d} \cdot \Delta R_b = K \cdot \Delta R_b$$

式中：K 为常数。

$$K = \frac{R_c}{R_d}$$

因为变阻器的电阻变化值 ΔR_b ，可以从它的刻度尺上读出，从而可根据上式求得 ΔR_a 值来。

(二) 交流电桥。

一般情况下，电桥输出功率是很小的，往往不足以推动电表，尤其是推动记录装置进行工作。所以需要将电桥的输出信号加以放大。直流电桥的输出信号是直流，故需直流放大器，由于直流放大器的另点飘流问题较难解决而采用音频载波的放大器的工作效果较好，所以多采用交流供电电桥（其交流电的频率一般为数赫兹），以便用载波放大器进行放大。因为电子管放大器的输入阻抗都很高，远远高于电桥各臂的阻值，因而不能用电流的大小来表征电桥的输出，需要用输出电压来表征。我们可直接用直流电桥的结果，得：

$$U = I_g R_g = \frac{U (R_a R_d - R_b R_c)}{(R_a + R_b)(R_c + R_d) + \frac{R_a R_b (R_c + R_d)}{R_g} + \frac{R_c R_d (R_a + R_b)}{R_g}}$$

电桥平衡的条件依然是 $\frac{R_a}{R_c} = \frac{R_d}{R_b}$ ，此时， $U = 0$ ，当 R_a 变化了 ΔR_a 后，电桥平衡被破坏，这时：

$$U = \frac{\Delta R_a \cdot R_b}{(R_a + R_b)(R_c + R_d)} \cdot U \quad \text{--- (8-4)}$$

在推导过程中，略去了分母中的 $\frac{R_a \cdot R_b}{R_g} \cdot (R_c + R_d)$ 和 $\frac{R_c R_d}{R_g} (R_a + R_b)$ 两项，因为这两项的值比 $(R_a + R_b) \cdot (R_c + R_d)$ 项小得多，略去后对结果影响不大。式中 U 为供桥交流电源电压的有效值。

2.2 温度补偿和电桥平衡装置

(一) 温度补偿

在测量过程中，如果温度变化了 Δt ，则电阻片的阻值 R 也要产生相应的变化，例如变化了 ΔR_t ，这时，有关公式：

$$\Delta R_t = \alpha \cdot R \cdot \Delta t$$

式中， α 为电阻片线材的电阻温度系数。

因温度变化而引起的电阻变化有时相当大，会给测量带来较大的误差，所以，一定要设法消除它。我们可采用加一片温度补偿片的办法解决之。见图 8-7。 R_a 为工作电阻片， R_b 为温度补偿电阻片。后者为一与工作电阻片同类型的电阻片（线材相同，公称原始电阻值相同），将之贴在一块材料与工作片所在相同的物体上，并且该物体要与试件处在同样的温度环境下，只是不受力，在测量前使电桥处于平衡状态。

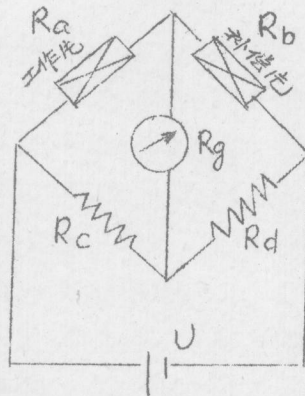


图 8-7 有温度补偿片的测量电桥

即： $\frac{R_a}{R_c} = \frac{R_b}{R_d}$ ，则 $\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d}$

当环境温度变化了 Δt 后，则 R_a 变为 $R_a + \alpha \Delta R_a \cdot \Delta t$ ，

R_b 变为 $R_b + \alpha R_b \cdot \Delta t$; 此时, 看下等式是否相等。

$$\frac{R_a + \alpha R_a \cdot \Delta t}{R_b + \alpha R_b \cdot \Delta t} = \frac{R_c}{R_d}$$

左边 $\frac{R_a + \alpha R_a \cdot \Delta t}{R_b + \alpha R_b \cdot \Delta t} = \frac{R_a (1 + \alpha \Delta t)}{R_b (1 + \alpha \Delta t)} = \frac{R_a}{R_b}$

所以, 电桥四臂的比例关系是符合平衡条件, 电桥无输出, 这样, 在加一温度补偿片之后, 就使电桥的输出不受温度变化的影响。

温度变化后, 试件的膨胀和收缩和工作电阻片线材的膨胀和收缩, 因材料不同是不全一致的, 这就使工作电阻片产生附加的变形, 其电阻值也要因此而产生变化, 所以要求温度补偿片贴在一块与试件材料相同的物体上, 这就可抵消因温度变化而引起的附加变形的影响, 其原理与上述的相同。

(二) 电桥的平衡装置

在用零位法测量时, 要变动某桥臂电阻的阻值, 使电桥重新平衡, 并且无论是零位法或偏位法, 电桥在测量前要进行平衡, 因为组成桥臂的各电阻片其名义的原始电阻值是相同的, 但实际上有 2% 的制造误差, 所以电阻片接入电桥后是不平衡的, 因而电桥需要有平衡装置。在直流电桥中, 只要做电阻的平衡即可。在交流电桥中, 还要做电容的平衡; 电容的不平衡是因为电阻片线栅之间的分布电容不相同, 电阻片与仪口相联的导线间的分布电容及它们与地之间的分布电容不相同而引起的。

图 8-8 为几种平衡装置。(b) 为用小阻值电位器串接在桥臂上; (c) 为用大阻值电位器并联在桥臂上; (a) 为无触点平衡装置, 是利用两个电阻片贴在一金属弹性薄片上, 利用金属的变形, 使电阻变化来平衡电桥。这两片电阻片是处在仪口内部的, 并非工作片; (d) 为电阻、电容平衡装置。

由于电桥输出信号很小, 一般都用放大器将之放大 (检波、滤波), 这两部分放在一起构成一台仪口, 我国称之为应变仪。

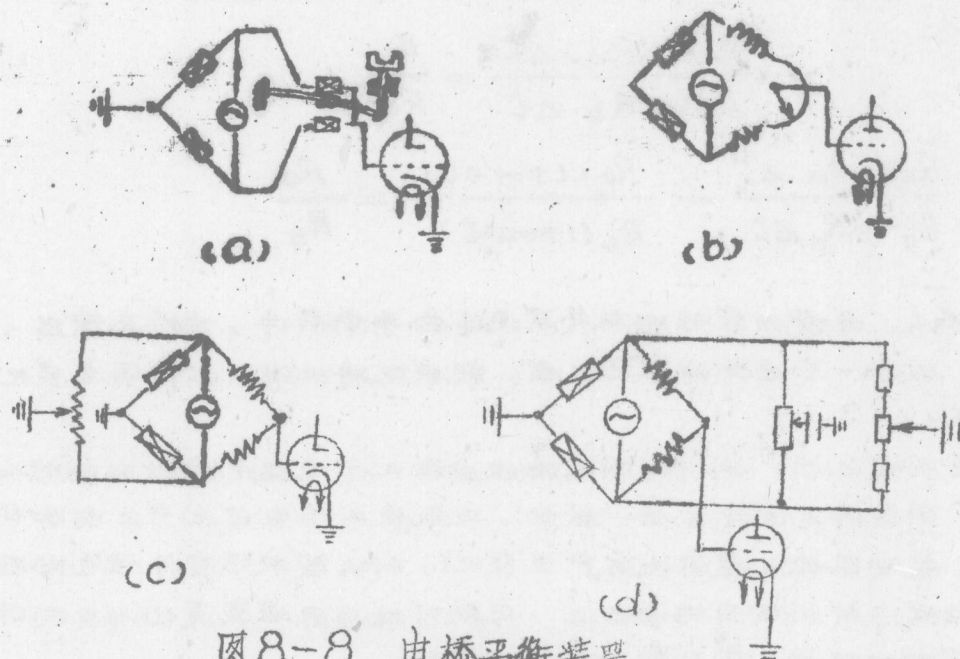


图8-8 电桥平衡装置

三、半桥接线及全桥接线

前页的分析都是假定电桥中只有一臂为工作臂，即电桥的一个臂是贴在弹性元件上，并随之一一起变形的电阻片。在实际测量中，为了避免温度影响，导线影响，或者因应变小而需提高测量的灵敏度，或者在组合变形中为区分出某一外力时，一般可采用一定的接线方法来达到这些目的。

下面对这个问题进行讨论。在一般情况下，电桥四个臂的电阻都用相同的阻值，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，且 $R_g = R$ ，直流供桥（图8-9）

当只有 R_1 臂为工作臂时，变形后其电阻变为 $R + \Delta R$ ，将各电阻值代入公式（8-2），并因 $\Delta R/R$ 即假定 R_1 为不变化（值一般小于1%），故可假定分母中的 $R_1 = R$ ，

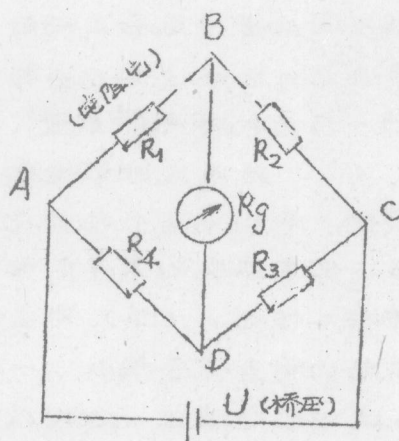


图8-9