

# 理解并测量

## 导电油墨和胶粘剂的电阻率

在有效生产、操作薄膜开关以及其他加法电路之前，你必须了解影响其导电能力的变量。

### 电学基础概念

物质中原子之间的电子流动产生了电流。一些材料如金属的电子可轻易地在原子之间流动，这些材料被称为导体。

通常，与水管相连接的水泵被用来比拟说明流经材料或者电路中的电流。当水泵被关闭时，水不会流过水管。当水泵打开，它会对水施加一个导致水产生流动的作用力。如果水管被盖上管帽，来自水泵的作用力不会使水流过水管。不过一旦移除管帽，或者水管尾部被接回到水泵入口，那么水将流经水管。如果水泵施加更大的作用力，在一定时间内会有更多的水流过水管。

在电路中，必须存在一种作用于电子使其流动的力。我们称该作用力为电动势 (emf)。电压电源如电池有一个正极接线柱 (+) 和一个负极接线柱 (-)。与水泵类似，当电池的负极接线柱与导电材料相连时，电池会对材料施加一个作用力 (emf)。由于同性电荷相互排斥，而导体中原子表面的自由电子带有负电荷，因此电子应该会朝远离电池负极接线柱的方向流去。然而，正如与水泵相连的水管被盖上管帽一样，如果电子无处可去，那么它们将不会流经导体。如果电池或电压电源的负极接线柱和正极接线柱都与导体相连，那么电子会受到负极接线柱的排斥而离开，然后流向



作者唐·班菲尔德先生，美国Conductive Compounds公司产品经理和创办人之一。

## 表面电阻率光谱



图1

## 薄片与球形导电粒子的比较

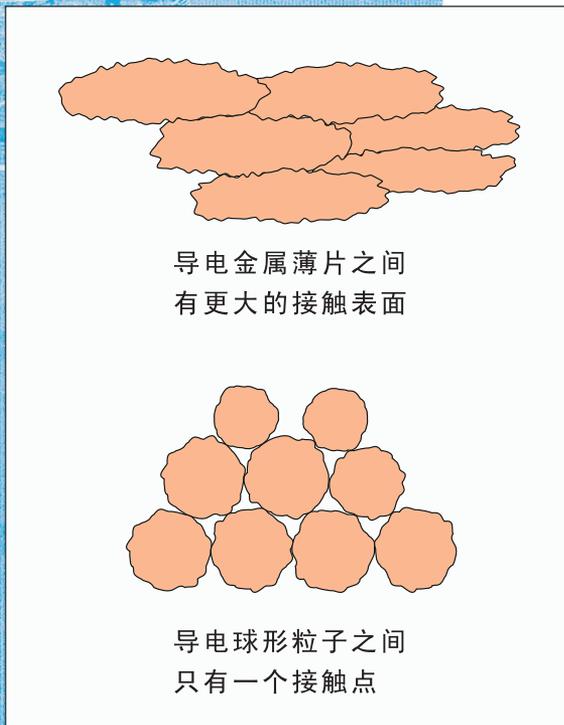


图2

正极接线柱。在负极接线柱施加的电动势越大，电子流动的速度就越快。电动势被称之为电压。电动势或者电压存在于电源中——它不会流经导电材料，理解这一点是很重要的。正是材料或者电路中的电子才在电压作用下而流动，这与水因水泵所施加的作用力而流经水管相类似。

电子因电压作用而流动的速度被称为电流，即在一定的时间内流经一个点的电荷数量。随着电动势或者电压升高，电流也将变大。

在上述水泵和水管例子中，如果我们使水泵保持运转以对水施加相同的作用力，但同时我们将大口径水管换成小口径水管，那么会产生什么情况呢？由于小口径的水管将限制水流动，因而在一定时间内流经水管的水量会更少。同样，如果我们在某个节点上使水管卷曲造成开口变小，或者任由水垢在水管内壁沉积以致水与水管内壁表面的摩擦力增加，那么水流会受到阻力。

在电路中，电阻是阻止电子因外加电压作用而流经材料的力量。导体如金属的电阻极小，在外加电压作用下，可使电子顺利流动。绝缘体如塑料的电阻大，电子不能在其中顺利流动。

在上述水泵例子中，如果矿物质在水管内壁沉积致使表面变得粗糙，水管开口变窄，那么水泵必须施加更大的作用力，才能在一定的单位时间内获得相同的水流量。当电路中的电阻增大时，就要求施加更大的电压才能保持电流不变。

欧姆定律给出了在导体如固体金属中电流、电压和电阻之间的关系：

$$I = E/R$$

式中：

**I**指电流，单位是安培

**E**指电压，单位是伏特

**R**指电阻，单位是欧姆（Ω）

在欧姆定律中的电流I、电压E和电阻R之间，只有对于固体导体如金属而言三者才是线性关系。

为了比较一种材料相对另一种材料的导电能力有多强，我们可以测量材料的电阻。为此，我们使用一种被称为欧姆计的仪器。当欧姆计与材料相连时，它施加一个电压，然后测量在给定电压下经过材料的电流。根据欧姆定律，电阻与电流成反比，因此欧姆计经过校正将所测得的电流（安培）转换成电阻（欧姆或者Ω）。电阻小，意味着这种材料比电阻大的材料更容易导电。

早期的科学家（包括本杰明·富兰克林在内）错误地假设电流是由于正电荷粒子流经导体而引起的。因而他们认为电流方向是从电池的正极接线柱经过导体到达电池的负极接线柱。虽然实际上是电子从负极接线柱流向正极接线柱，但我们仍然在使用这种被称为常规电流的定义。

## 材料的电导率

在电子电路中，在电压电源与诸如发光二极管（LED）等元器件之间必定存在导电通路。在传统的刚性和柔性电路中，固体金属如铜被用于导电通路，固体金属焊锡被用来将元件焊接在导电通路中。在诸如薄膜开关和触摸屏等加成法电路中，导电层在基材上逐步增加，其中聚合物导电油墨被用于制作导电通路，聚合物导电胶粘剂的作用则是在导电通路上粘贴元件。由于聚酯薄膜被用作薄膜开关的底基材料，而熔化焊锡需要高温，因而薄膜开关不能使用传统的金属焊锡材料，并且在大多数情况下由聚合物导电油墨制作的导电通路不可焊接。

用于薄膜开关和触摸屏等领域的胶粘剂和油墨都含有两种成分：塑料聚合物粘合剂和导电填料。粘合剂的作用是将导电填料粒子结合在一起，使导电填料与聚酯薄膜基材相粘。在导电油墨中，粘合剂通常是一种热塑性材料。热塑性材料是固体材料，可溶解于溶剂或者受热直至熔化变成液体。油墨中的溶剂仅用于将

热塑性粘合剂溶解成液体，从而使填料混入油墨中，并且油墨也可以使用网版印刷。一旦溶剂被蒸发或者热塑性材料被冷却，热塑性材料会重新转变成固体，可再次受热熔化或者溶解于溶剂中。因此，溶剂型油墨一旦涂覆和干燥，油墨中的粘合剂就不能受高温作用或者与某些溶剂相接触。

大多数导电胶粘剂中的聚合物粘合剂是一种热固树脂。热固树脂与热塑性材料的不同之处在于前者受热后会发生化学反应，使热固树脂交联或者硬化。一旦热固树脂硬化，它就不能重新转变成液体。因此，热固树脂一旦硬化，通常都要比热塑性材料更耐溶剂和高温。用于导电胶粘剂的热固树脂大多都是环氧树脂。环氧胶粘剂大致分两类：双组分和单组分胶粘剂。在双组分环氧导电胶粘剂中，成分A含有环氧聚合物和银粉。成分B是一种与环氧树脂粘合剂相混后，使交联化学反应发

## 渗流临界点

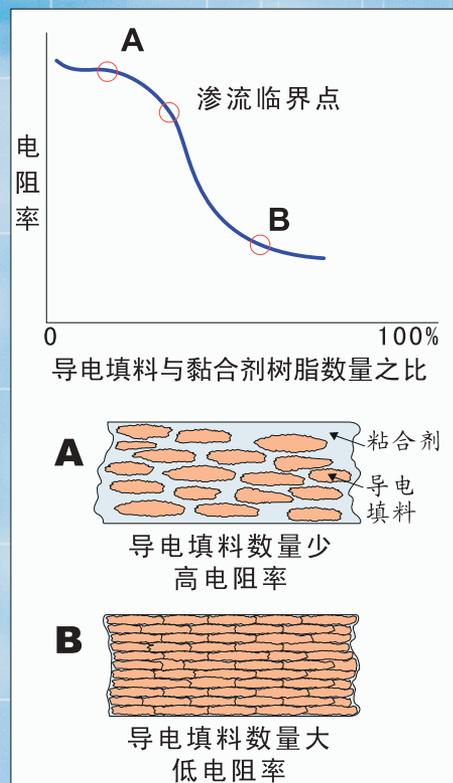


图3

## 溶剂型油墨的渗流临界点

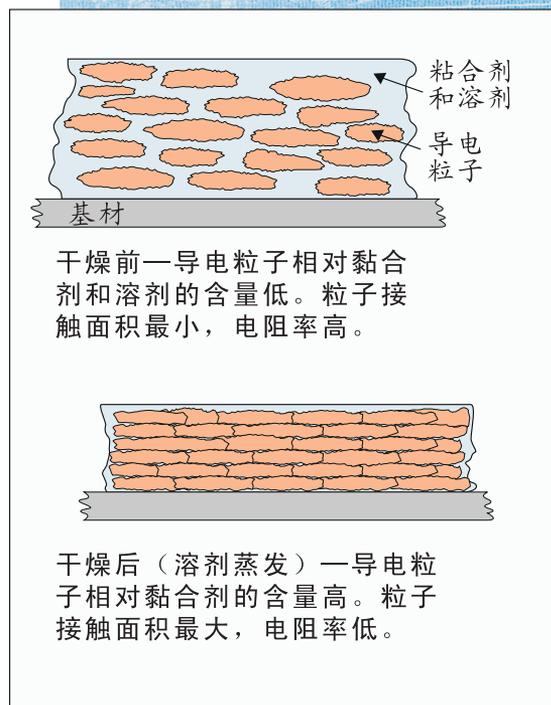


图4

生的化学物质。受热后交联会加速。单组分环氧胶粘剂系统是预先混合好的材料，在室温下成分A、B之间的化学反应极为缓慢，不过在对胶粘剂加热到高温后，速度会急剧增加。

绝大多数导电胶粘剂和导电油墨用银作为导电金属填料。价格便宜而导电性强的金属如铜在胶粘剂和油墨中起初会很有效，但电阻却会随时间流逝而大幅增加。其原因在于所有金属与空气或者水中的氧气或其他氧化剂接触后都会氧化，导致金属氧化物开始在金属表面沉积，其中最常见的例子是在含铁金属表面形成的铁锈，成分为氧化铁。就多数金属而言，这种在表面生成的金属氧化物层具有极差的导电性。由银和金产生的金属氧化物层的导电性非常强。在多数聚合物导电油墨中，碳粉被用作导电填料。

## 绝大多数导电胶粘剂和导电油墨用银作为导电金属填料。价格便宜而导电性强的金属如铜在胶粘剂和油墨中起初会很有效，不过电阻却会随时间流逝而大幅增加。

聚合物导电胶粘剂和油墨的电阻比固体金属高很多。图1说明了从绝缘体如塑料到导体如金属等不同材料的电阻（或者电阻率）范围。当与纯金属相比较时，导电油墨和导电胶粘剂之所以具有更高的电阻，是因为即使电子可以毫不费力地流经金属粒子，但是当电子必须从一个金属粒子跳到另一个金属粒子上时会遭遇巨大的阻力。纵然金属粒子

被紧密地压缩在一起，电子越过粒子之间间隙所遭遇的阻力（电阻）相比流经金属粒子内的阻力（电阻）还是更大。假设在含有金属填料的油墨或者胶粘剂中，电子必须穿越数千个粒子到粒子的间隙，那么就很容易明白其电阻比固体金属的电阻高出一大截的原因。

为了使导电油墨或者胶粘剂中的电阻降至最小，尽可能增大金属粒子之间的表面接触面积至关重要。早期的银墨和银胶都把球形金属粒子用作导电填料。当这些金属球相互接触时，在粒子之间只有一个非常小的接触点，如图2所示。为了增加粒子间的接触面积，通常要使用一种被辗平的金属薄片结构。当薄片组合到一起时，在粒子之间存在相当大的接触面积，并且电子从一个粒子流向另一个粒子可利用更多的途径。

### 表面电阻率

表面电阻率 = 在两个电极之间所测得的电阻 ( $\Omega$ ) / ( $\Omega/Sq$ )

表面电阻率电极构造简图

两个电极必须组成一个正方形的盒子，电极之间的距离与电极长度相等。

注：长度和宽度单位相互抵消后留下  $\Omega/Sq$ ，与电极尺寸无关。

图5

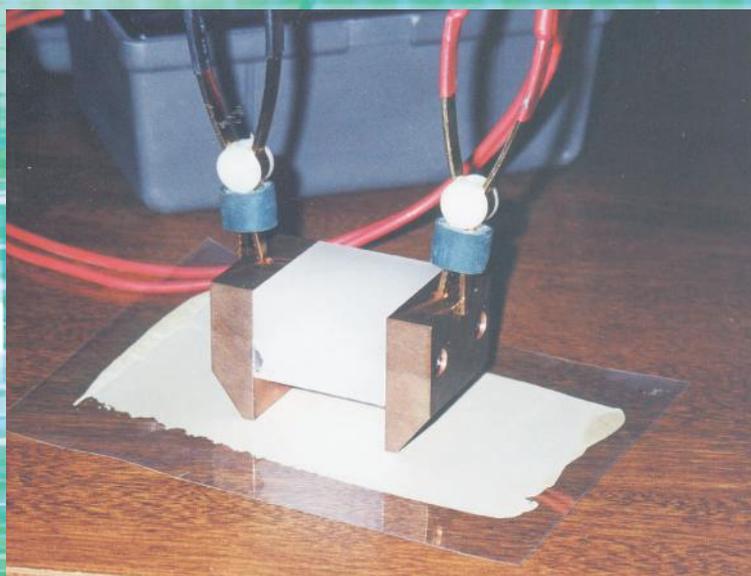


图6 使用一个与欧姆计相连的正方形盒子电极测量表面电阻率。

另一个对聚合物导电油墨和胶粘剂的电导率有帮助的现象是渗流临界点

(percolation point)。正如前文所述，塑料聚合物粘合剂具有非常大的电阻。如果我们向粘合剂中添加少量的强导电性金属填料，由于金属粒子之间存在巨大的间隙，电阻不会发生变化。随着我们持续向粘合剂中添加金属填料，电阻率将保持不变直至我们到达一个点，此时一些金属粒子开始彼此接触。在这个点即渗流临界点之后，只要添加少量金属填料即可使油墨或者胶粘剂的电阻率急剧下降（图3）。如果继续添加金属填料，我们最终将到达一个电阻率趋于稳定的点，此时添加金属填料并不能提高油墨或者胶粘剂的电阻率。实际上，在此之后再添加金属填料，相反会因为导电粒子不能有效结合在一起而导致油墨的粘附力和耐磨损性开始下降。好的油墨和胶粘剂配方设计将会是：朝向渗流临界点曲线的底部开始趋平的位置添加最优的金属薄片结构。

在多数导电油墨和环氧胶粘剂中，液体材料具有高电阻率。这是因为当溶剂存在于油墨中时，在银粒子之间存在巨大间隙。随着溶剂蒸发，金属填料相对粘合剂的数量便开始增加，直到金属薄片最终相互接触，致使整个系统可以导电（图4）。同样，环氧胶粘剂通常会因交联或者硬化而略有收缩，导致金属薄片粒子被拉得更近。为了使电阻降至最低，导电油墨完全干燥以及导电胶粘剂彻底交联必不可少。

正如图3中的渗流临界点曲线显示的那样，油墨系统中即使只有少量的溶剂残留也会导致电阻显著增加。

## 测量电阻率 对材料进行比较

为了对材料的导电能力进行比较，我们测量材料的电阻。在一块已完工的薄膜开关表面，我们将欧姆计的正极探针和负极探针置于干燥后的网印油墨线路上，然后测量两点之间的电阻，单位为欧姆。一般来说，大多数薄膜开关生产商规定所有导电通路的点到点电阻必须为100Ω或者更低。是否有一种方法可对来自一家生产商或者几家生产商的不同油墨和胶粘剂的电阻进行比较，而不必真正采用丝网印刷和测试材料呢？

有两种计算材料电阻的方法：表面电阻率（有时被称为薄片电阻率）和体积电阻率。

对于表面电阻率，我们试图测量通过导电材料顶层的电阻。测量方法是：将两个与欧姆计相连的电极（正极和负极）置于网印导电片材表面，使两个电极在电极的整个长度方向都与材料相接触（图5、图6）。两块电极必须与材料表面密切接触。通常，人们会在电极顶部放置一件重物，以使电极与材料表面的接触更加紧密。材料表面必须平滑，无隆起和孔穴。所使用的电极处于一个正方形的盒子结构中，电极长度必须与两块电极内壁表面的距离绝对相等。实际上两块电极形成了正方形的

## 强导电性材料的表面电阻率

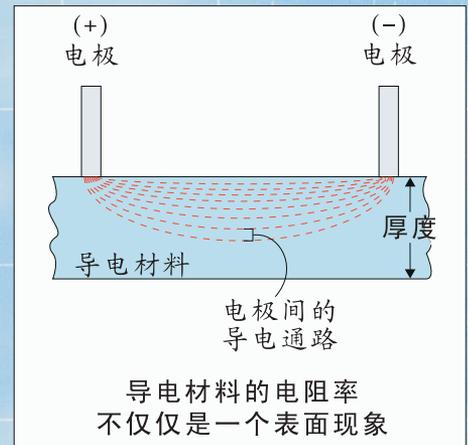


图7

## 体积电阻率

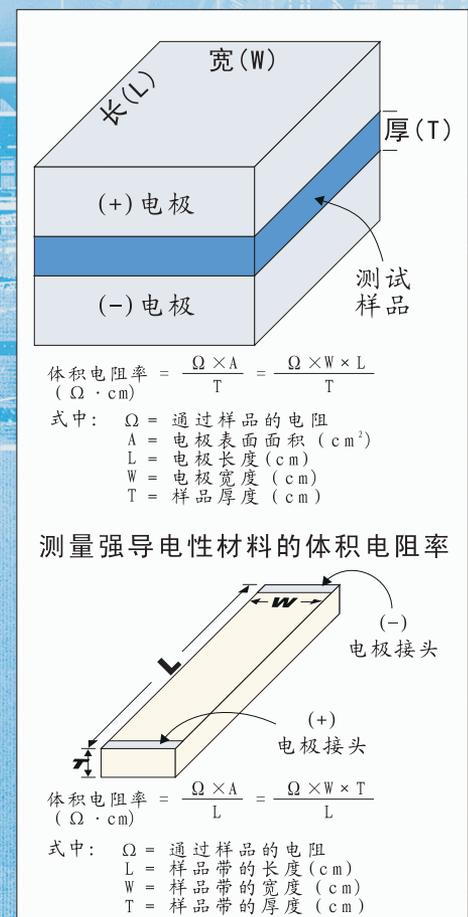


图8

相对两边。当以这种方式测量表面电阻时，可通过欧姆计读出电阻值，单位是欧姆每平方（ $\Omega/Sq$ ）。由于两个电极的距离（电极宽度）与电极长度相同，因而无论是1英寸的电极还是1厘米的电极，单位都相互抵消，如果电极结构是一个理想的正方形，那么表面电阻率的单位是欧姆每平方（ $\Omega/Sq$ ）。

在使用低电压处理绝缘材料或者诸如绝缘材料表面的抗静电涂层等弱导电性材料时，表面电阻率是一个比较精确的测量方法。当计算强导电性材料的表面电阻率时，出现的问题是潜在假定电子从负电极出发，仅穿越导电层的顶部表面到达正电极。如图7所示，电子

运动不只是一个表面现象。即使大多数电子会选择两个电极之间的最短路径，但仍有一些电子会从负电极出发，穿越导电层的横截面而到达正电极。

通过在表面电阻率测量前为导电材料指定一个精确的印刷厚度值，大多数测试方法使上述影响降至最小。尽管这不会彻底根除体积效应，但它的确实使每种样品所受的影响实现了标准化。

计算电阻率的另一种方法是体积电阻率，它为一种材料相对于另一种材料的导电性强弱给出了更加精确的描述。体积电阻率不是将电子运动仅视为表面现象，而是测量经过给定材料的一个横截面的电阻。

通常，片材被置于两个具有相同表面面积的电极之间，然后测量通过该材料的电阻（图8与图9）。

一旦读出电阻值，体积电阻率则使用下列公式进行计算(如图8所示)：

$$\text{体积电阻率} = \frac{\text{电阻}(\Omega) \times \text{电极面积}}{\text{厚度}}$$

$$\text{电阻}(\Omega) \times \text{长度} \times \text{宽度} = \text{厚度}$$

式中长度、宽度和厚度的单位为厘米

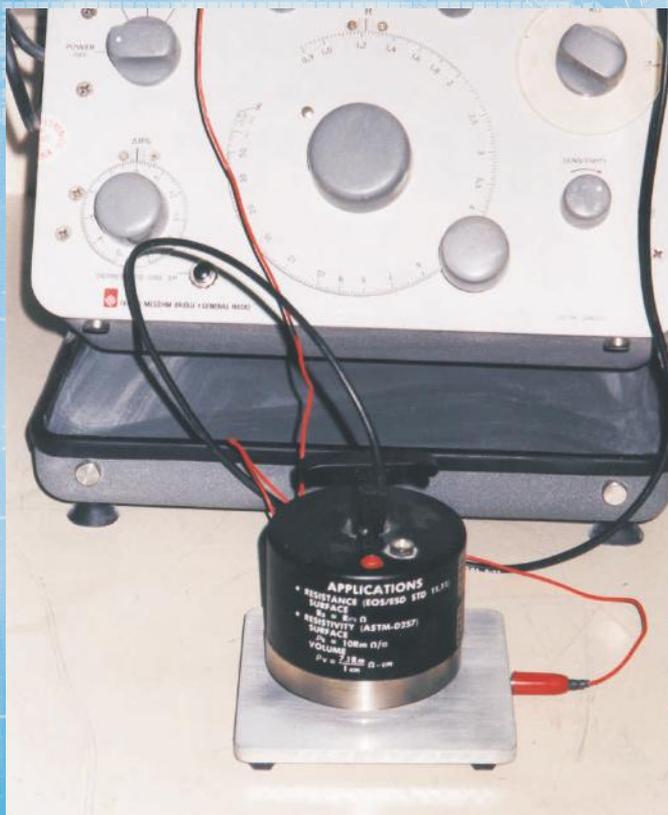


图9 使用一块圆形电极和铝板测量体积电阻率。一块薄的材料样品被置于铝板之上，受力的电极则被置于样品之上。顶端的电极是负极，底部的铝板是正极。测量通过样品的电阻，应用上面的公式计算出体积电阻率。

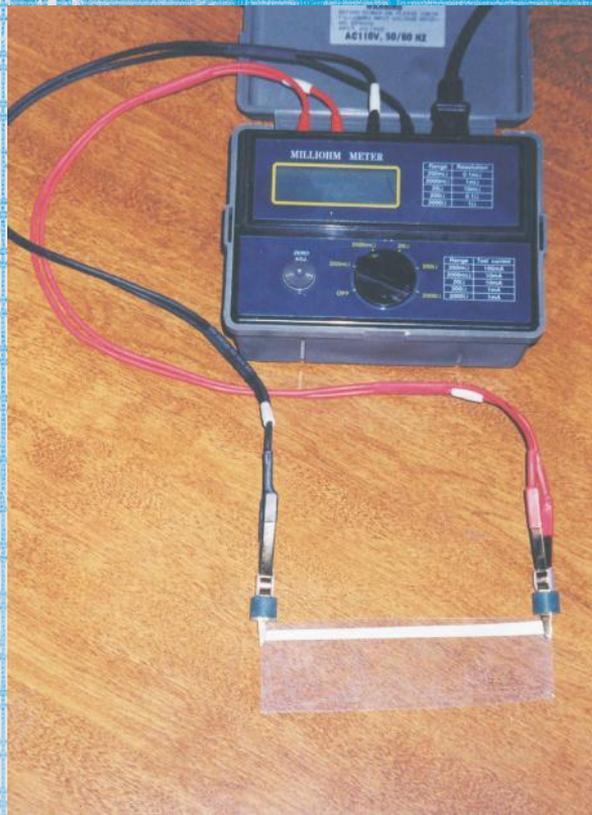


图10 测量流经长、薄导电银胶样品带的体积电阻率。

对于绝缘或者弱导电性材料，体积电阻率的测试方法非常精确。对于强导电性材料，由于导电材料的表面积如此之大，而其内阻相对厚度非常小，以致难以获得精确的电阻读数。为了克服这个问题，另外一个可接受的强导电性材料体积电阻率的测量方法是将导电材料网版印刷或者涂布成为一条长且窄的线（图8）。通常会使用长为6英寸（15.2 cm），宽为0.25英寸（0.64 cm），厚为0.001英寸（0.0025 cm）的条带结构。

对于上述结构的样品，我们测量它两端的电阻，欧姆计的探针务必要跨越条带的整个宽度并与样品密切接触（图10）。为了计算该样品的体积电阻率，我们对上述公式稍作修改（图8）：

$$\text{体积电阻率} = (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\frac{\text{电阻} (\Omega) \times \text{电极面积}}{\text{样品长度}} =$$

$$\frac{\text{电阻} (\Omega) \times \frac{\text{样品厚度} \times \text{样品宽度}}{\text{样品长度}}}{\text{样品长度}}$$

对于环氧导电胶粘剂，这种带状样品可通过以下方法轻易制成：小心地在聚酯薄膜上按照0.25英寸的距离分隔两条透明胶带，接着用一把锋利的金属薄片刮平胶带，仔细消除气泡和隆起。一旦胶带准备就绪，环氧导电胶粘剂就被置于两条胶带之间的间隙中，将剃刀刀片倾斜一个小角度作为刮墨刀使用，缓缓将环氧胶粘剂向

当涉及如何将表面电阻率转换成体积电阻率或者导电通路上的点到点电阻时，通常会出现问题。

不幸的是，没有办法可以正确地将表面电阻率转换成体积电阻率，或者把体积电阻率转换成表面电阻率。

下拉，直至它平滑连贯地填满胶带之间的间隙。小心翼翼地剥去两条胶带，将材料放到加热炉中使之发生交联后，你会得到一个适合测试的窄长环氧导电胶带。仔细测量样品的长度（探针之间的距离）、样品厚度和样品宽度，三者的单位皆为厘米。确保样品表面平滑，厚度和宽度一致。

使用透明的背胶胶带制作一条薄溶剂型导电油墨带比较困难，这是因为溶剂会溶解胶带上的胶粘剂，使导电油墨渗入到胶带下面。导电油墨样品带的最佳制作方

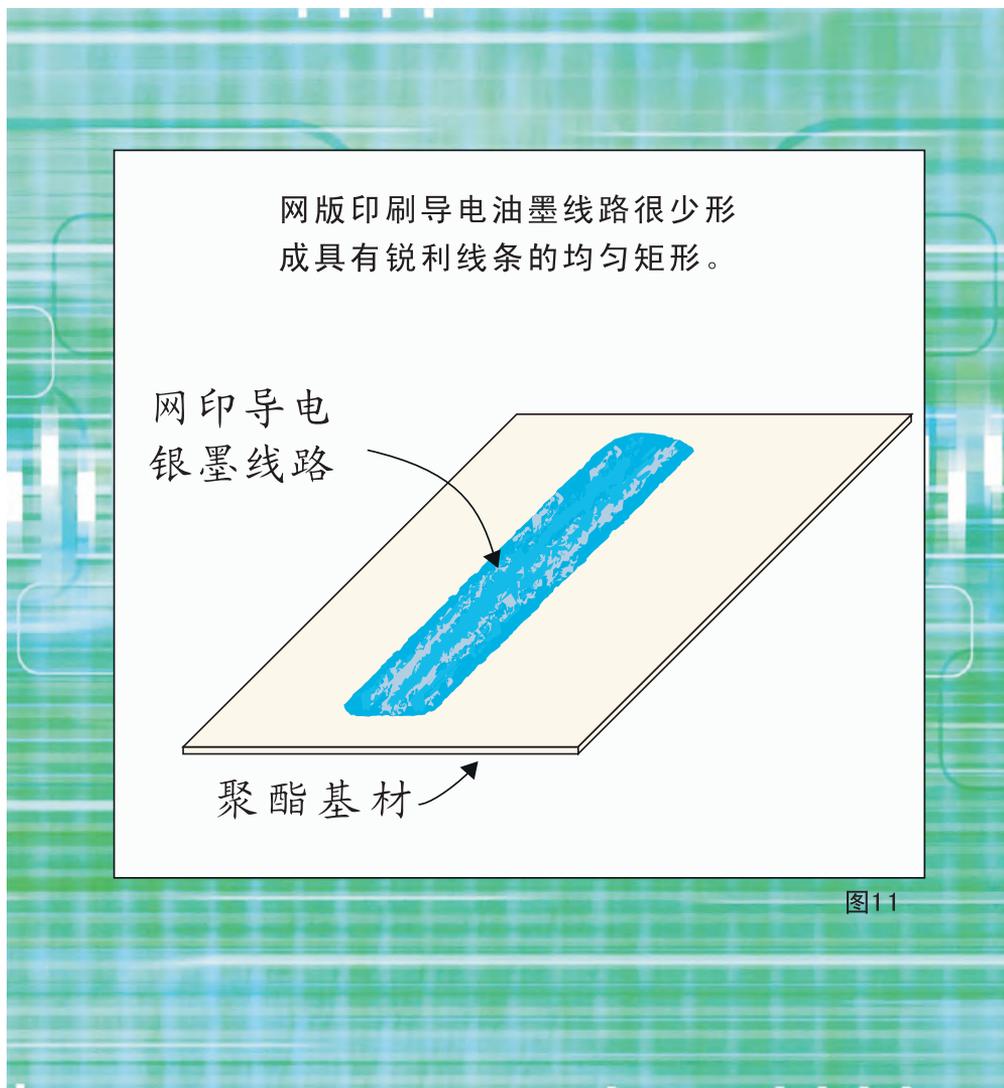


图11

法是：在聚酯薄膜上涂布者丝网印刷一条宽墨路，然后精确裁切出一条宽为0.25英寸的聚酯薄膜和导电油墨样品带以便测量。

当涉及如何将表面电阻率转换成体积电阻率或者导电通路上的点到点电阻时，通常会出现问题。不幸的是，没有办法可以正确地将表面电阻率转换成体积电阻率，或者把体积电阻率转换成表面电阻率。

既然表面电阻率表示通过导电材料正方形盒子表面的电阻，那么在表面电阻率和印刷导电路路的点到点电阻之间可产生一个近似的相关性。假定我们有一条宽为0.04英寸、长为4英寸的导电路路。如果我们想象把这条4英寸长的线路分成尺寸为0.04英寸×0.04英寸，相互连接的正方形盒子，那么在导电通路上将有100个这样的正方形盒子（4英寸/0.04英寸=100）。由于表面电阻率始终代表通过导电材料正方形盒子表面的电阻，因此我们可以得到导电材料的表面电阻率（单位是 $\Omega/Sq$ ），然后将之与沿着4英寸×0.04英寸导电路路上的100个正方形盒子相乘，从而算出导电路路上一端到另一端的总电阻。

例如，假定我们有一种表面电阻率为 $0.01\Omega/Sq$ 的导电银墨，这条4英寸×0.04英寸的导电通路获得上述表面电阻率数值的油墨样品具有相同的厚度，并且导电通路在宽度和厚度方向都均匀一致，同时无孔穴或者污染物，那么就可以估算出从导电通路一端到另一端的总电阻。

我们已确定这条导电通路由100个0.04英寸×0.04英寸的正方形盒子组成。由于通过一

个由上述导电油墨制成的正方形盒子表面的表面电阻率是 $0.01\Omega/Sq$ ，因而导电路路点到点的总电阻为：

$$0.10\ \Omega/Sq \times 100\ Sq = 10\ \Omega$$

尽管这个被估算出的电阻值非常接近实际值，不过在精确性要求极高的情况下，设计人员必须谨慎使用上述换算方法。

当试图在网版印刷导电路路的表面电阻率和总电阻率之间建立相关性时，一个可能会导致错误结果的因素是：在设法对一条长线路采用表面电阻率数值时，我们错误地假定电子只穿越导体的表面，而不是穿越导体的整个横截面。另一个影响因素是：网印导电路路不是一种具有锐利转角、宽度和厚度的完全清晰的通路（图11）。正如我们早先所举的水泵和受约束的水管例子一样，导电通路体积上的任何变化，如厚度变化、圆角以及通路上的空隙和污染物都会对电子流动产生阻力，从而更难以使用导电油墨的表面电阻率预测导电通路的总电阻。

美国特种印刷及制像协会（SGIA）推出了一种可在表面电阻率和总电阻率之间建立相关性的新测试方法——ASTM F1896-98（印刷导电材料电阻率的测定方法）。当把导电油墨的表面电阻率转换成导电通路上的点到点电阻时，这种方法在尽最大可能减少导致误差的影响因素方面极为有效。

设计人员被告诫要使用由实际电路测得的电阻值对导电油墨的表面电阻率和导电通路上的点到点电阻之间的相关性结果进行验证。在生产中要保持严密的过程控制，以便使孔穴、污染物和厚度变化降至最

少，这将显著减少导电通路上点到点电阻的变化，尤其当处理导电碳墨或者银/碳混合导电油墨时，导电通路要求电阻具有紧公差（close tolerance）。

以下列举了部分用于测量材料电阻率/电导率的测试方法，以供参考。

规范	描述
ASTM F 1896-98	用于测定印刷导电材料电阻率的测试方法
ASTM D 4496	中等导电性材料的直流电阻或者电导
ASTM D 257	绝缘材料的直流电阻或电导
ASTM D 991	导电和抗静电产品的体积电阻率
ASTM D 2739 90	导电胶粘剂的体积电阻率

## 结论

导电胶粘剂和油墨对于薄膜开关以及其他加成法电路的生产 and 长期工作至关重要。理解这些材料的导电原理以及影响其导电能力的变量，对于尽最大可能地减小电阻或者减少在电压源与元器件之间的电路到电路的电阻变化不无裨益。评估导电材料的电阻率有两种方法：表面电阻率和体积电阻率。对于两种方法得到的电阻率数值，现在无法在二者之间建立直接的相关性。尽管利用表面电阻率估算导电通路上的点到点电阻可以得到不错的近似值，但这个结果应该始终基于实际制作的电路进行验证。■

翻译: 闵耀霞  
电邮: mary\_cmyk@sina.com