



3.1 传输线的构成

再次强调,信号是靠两点承载的,信号的传输是在两个分支上同时进行的。这个道理说起来其实再简单不过。如上一章提到的电池信号,沿着两根长长的平直导线传输,两根导线便是信号传输路径的两个分支,如图 3-1 所示。这样的信号传输场景简明、清晰、对称,一目了然。

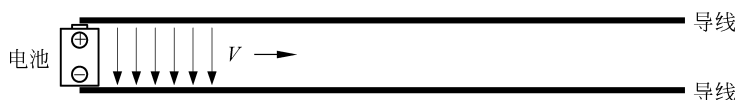


图 3-1 电池信号沿着上、下两根导线组成的传输路径行进

但是我们常常在另外一些非对称的场景中陷入麻痹和疏忽,忘记信号“两支传输”的本性。例如印制电路板的“地”,它所承担的零电压参考角色和大平面形态,会使初学者无端地觉得与信号传输路径毫无关系。但事实上,“地”是印制电路板上信号传输路径必不可少的“第二支”。

在信号完整性这个学科范畴内,为了突出和强调信号“两支传输”的本质属性,信号的传输路径被赋予一个专门的名称——传输线。图 3-1 中的两根长直导线构成的电池信号的传输路径和图 3-2 中走线和地平面构成的印制电路板信号传输路径就是传输线的两个实例。

理论上讲,任何两个导体,不论其形状、尺寸和彼此的远近,只要共同用于一个信号的传输,便一起构成传输线。说到传输线,必然是指两个导体所组成的共同体。我们不能仅仅指着图 3-2 上的印制电路板走线说“这是一根传输线”,脱离了下面的地平面,孤立的一根走线根本无法将信号从一端传到另一端。对学习信号完整性的初学者而言,这是“传输线”一词在字面意义之下所表达的最重要的内涵,也几乎是全部的内涵。认识到这一点,也就认识了传输线。

印制电路板上的传输线,按照传输路径两分支几何结构关系的不同,可分为两种:微带线和带状线。两种结构的横截面如图 3-3 所示。印制电路板的表层走线和其下的平面层构

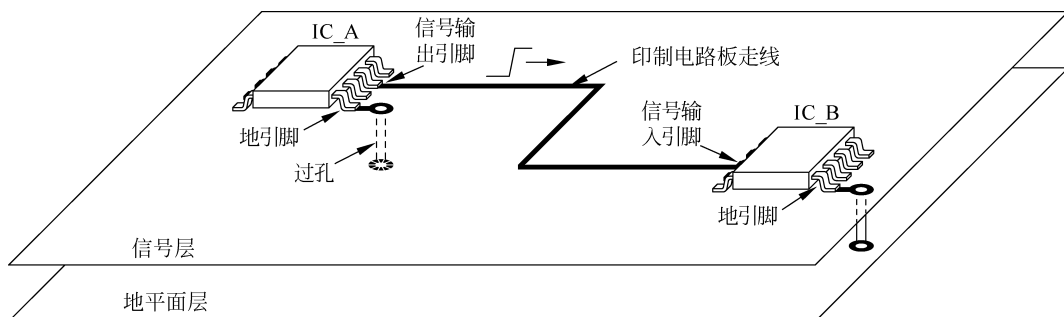


图 3-2 印制电路板上的信号在走线与地平面层组成的传输路径上行进

成微带线，而内层走线与其上、下平面层构成带状线（这个结构中的上、下两平面层一起承担路径的“第二支”角色）。这两个名称是从电磁场理论中沿用而来的，“传输线”一词也从电磁场理论沿用而来。这样的理论背景让初学者感到它们深不可及。确实，这些细枝末节逐渐向我们揭示出电磁场理论在信号完整性学科中的基础地位。信号完整性领域内的很多现象，需要运用电磁场和电磁波的知识加以理解。信号传输越“高速”的时候，越是如此。在人们通常的印象中，电磁场理论深奥、晦涩、抽象、费解，对于习惯了在逻辑层面和电路层面工作的数字电路设计师来说尤其如此。但这并不意味着不能以轻松而简捷的方式进行学习。信号完整性是一门实践学科，其根本目的是要解决实际问题。对我们而言，重要的是理解问题的成因，知晓解决的办法。理论中的东西，在实际中找到对应，就会觉得它们浅显易懂。“微带线”和“带状线”这样的名称听起来学术味十足，似乎大有深意，其实所表达的也就是印制电路板上传输线的两种几何结构关系，仅此而已。

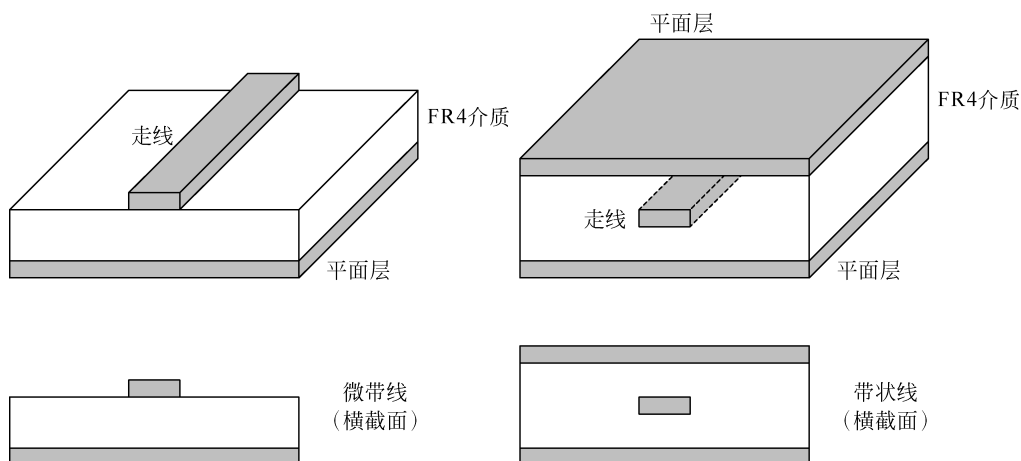


图 3-3 微带线和带状线

在印制电路板之外，最常见的一个传输线实例是同轴电缆，如图 3-4 所示。传送有线闭路电视信号到电视机的信号线便是同轴电缆的一种，其横截面呈同心圆结构。电缆的中心

是一根金属导线,导线外裹上绝缘材料层,在绝缘层之外再套上一层网状金属层,最外面是塑料外套。习惯上把网状金属层称作“屏蔽层”,因为它将电缆中心的导线完全包起来,可保护中心导线不受外界电磁干扰。但应当知晓,屏蔽只是网状金属层次要的功能,它首要的、本质的功能乃是和中心导线一起构成信号传输路径的两个分支。

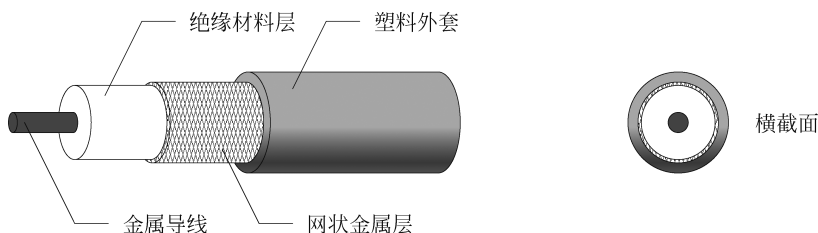


图 3-4 同轴电缆

微带线、带状线和同轴电缆,都属于“非对称”的传输线结构,因为从它们的横截面图来看,组成传输线的两支导体的形状和尺寸不相同。而前面的电池信号用以传输的两根平行长直导线组成的传输线,则属于“对称”的传输线结构,两支导体一模一样,没有分别。实际应用中典型的采用对称结构的传输线是双绞线,由两根相互绞合缠绕的导线组成,分别作为传输线的第一支和第二支。在平时用于计算机联网的网线中,包含了四对这样的双绞线,如图 3-5 所示。

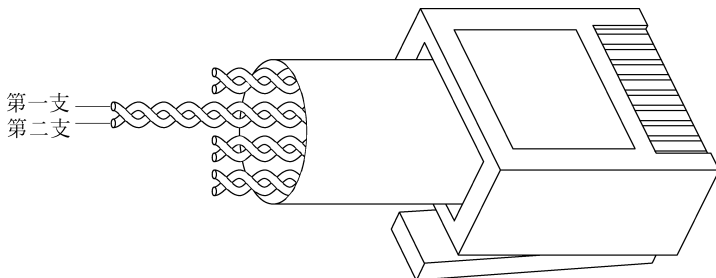


图 3-5 双绞线

3.2 传输线阻抗

把信号的传输过程看作是一个挨一个分节电容的充电、放电,这是精妙的分解技巧,它使我们能够将一个连续的事件过程拆开来加以分析。现在继续分析电池信号在长直导线上的传输过程,把目光投向导线上的某一节具体的分节电容,设其为从信号发送端开始的第 n 节分节电容,如图 3-6 所示。

当信号刚刚到达第 n 节分节电容的时刻,前面的 $n-1$ 节分节电容已经完成了充电,建立起与电池相等的电压 V ,而第 n 节分节电容尚未被充电。从这时开始,电压 V 将向第 n 节分节电容充电。在充电的过程中,第 n 节分节电容和在它之前已经充电完成的部分构成

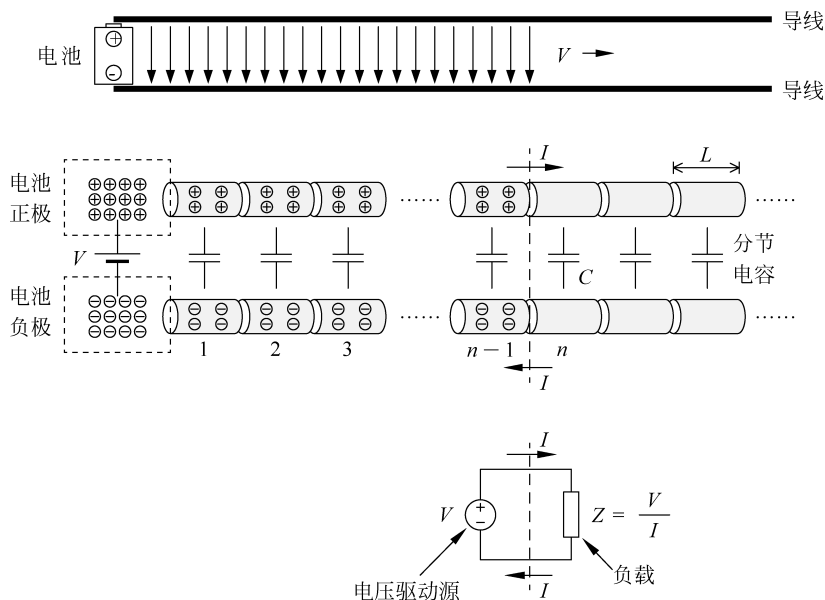


图 3-6 正在充电的分节电容与已充电完成部分构成负载和驱动源的关系

了负载和驱动源的关系：前面的 $n-1$ 节分节电容可以看作是电池正极和负极的延长部分，它们共同表现为一个电压为 V 的电压驱动源，而第 n 节分节电容则是这个电压驱动源所连接的负载。

为电容负载充电，意味着电压驱动源将向电容的两极注入电荷。前已述及，在充电完成后，注入第 n 节分节电容的电荷总量为 $Q = CV$ (C 为分节电容值， V 为充电电压)，其中与电压驱动源正极连接的导线分节获得正电荷 $+Q$ ，与电压驱动源负极连接的导线分节获得负电荷 $-Q$ 。这些电荷全部是从相邻的第 $n-1$ 节分节电容移动过来的，全部电荷移动到位花费的时间也即第 n 节分节电容的充电时间，为

$$T = \frac{L}{v}$$

其中， v 为信号传输速度， L 为导线分节长度。

所以，如果在第 $n-1$ 节导线分节和第 n 节导线分节的分界面上（如图 3-6 虚线所示部位）进行观测，在时间 T 内，上、下两根导线上各有 $+Q$ 和 $-Q$ 的电荷流过分界面，从第 $n-1$ 节导线分节进入第 n 节导线分节。电荷的移动形成电流，上、下两根导线的分界面上都将有电流流过。按照电流强度的定义，电流的大小计算如下：

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{CV}{\frac{L}{v}} = \frac{vCV}{L}$$

其中， v 为信号传输速度， L 为导线分节长度， C 为分节电容值， V 为充电电压。

在充电的过程中，第 $n-1$ 节导线分节因为向第 n 节导线分节提供充电电荷而失去自

身电荷,但失去的电荷会立即被第 $n-2$ 节导线分节补充,第 $n-2$ 节失去的又会被第 $n-3$ 节补充……,最终的电荷来源出自电池。因此,电流 I 是在从电池到第 n 节导线分节的整个路径上流动。电流的方向与正电荷的移动方向一致,与负电荷的移动方向相反。在上面一根导线上,电流从电池正极流向第 n 节导线分节,而在下面一根导线上,电流从第 n 节导线分节流向电池负极。两根导线上的电流大小相等,方向相反。

实际上,两根导线上的电流是同一个电流回路的两部分。这个回路的电流流动过程是这样的:电流从电池正极流出,依次流过上面一根导线的前 $n-1$ 节导线分节,再流经上、下两根导线的第 n 节导线分节组成的分节电容,从上面一根导线来到下面一根导线,最后沿下面一根导线的前 $n-1$ 节导线分节回到电池负极,形成完整回路,如图 3-7 所示。

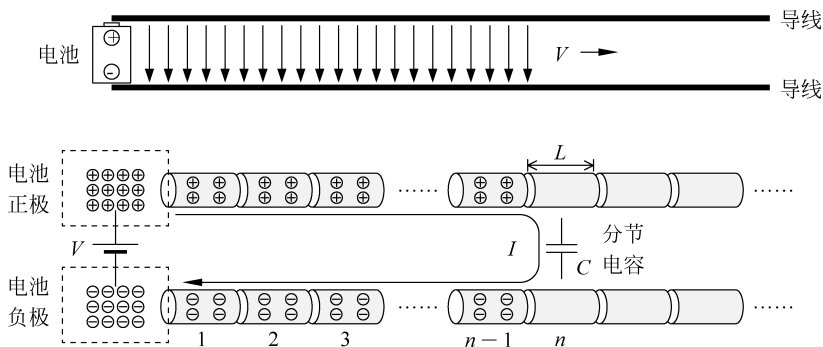


图 3-7 在对第 n 节分节电容进行充电时的电流流动路径

电流“流经”第 n 节分节电容,这意味着上、下两根导线在第 n 节导线分节处尽管彼此并未相连,却有电流从它们之间流过。这似乎难以理解,但确实如此。若非这样,上、下两根导线上的电流将成为不属于任何回路的电流“孤段”,而自然界中任何电流都只能以回路形式存在,不可能有这样的电流“孤段”。

可能我们对这个电流的形态仍然感到困惑,难道真的有电荷穿越空气在上下两根导线之间移动吗?这当然是不可能的。如果仅仅是看到了两根彼此不相连的长长导线,将很难想象电流是怎么从一根流到另一根的。而一旦将分处上、下两根导线的导线分节看作是一个分节电容的有机整体,这个电流就变得清晰而易于理解。根据电路基础理论我们知道,电流是能够“流过”电容的,而且在“流过”的过程中并没有电荷真正地穿越电容内部的绝缘层从一个极板移动到另一个极板。我们在分析电路时从来都是将电容作为一个器件的整体来考虑,所以也无须关心其内部的具体情况,只要有电荷进入一极,同时又有极性相同的电荷从另一极离开,那么这就是流过电容的电流。现在在信号传输到第 n 节导线分节时发生着同样的事情,正电荷进入分节电容的一极(上面一根导线的第 n 节导线分节),又有同样多的正电荷从分节电容的另一极(下面一根导线的第 n 节导线分节)离开(负电荷进入就等同于正电荷离开),这就是流在两根导线之间的电流。我们再次领略了使用分节电容的方法分析信号传输过程的精妙之处。

现在再转到负载和驱动源的角度。上面说到,第 n 节分节电容在被充电的过程中扮演

着“负载”的角色,它在电压 V 的驱动下产生了电流 I 。这样的负载行为与我们熟知的阻抗行为一致,因此可以借用“阻抗”这一物理量来描述信号传输到第 n 节导线分节时所感受到导线的电学特征,并与通常电路含义下的阻抗相区别,将这一阻抗称为“传输线阻抗”。

传输线阻抗的计算方法仍然遵循欧姆定律的定义,取为电压与电流之比。第 n 节分节电容的传输线阻抗为

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{\frac{vCV}{L}} = \frac{1}{\frac{vC}{L}} = \frac{1}{vC_L}$$

其中, V 为充电电压, I 为流过分节电容的电流, v 为信号传输速度, L 为导线分节长度, C 为分节电容值。

式中, $C_L = \frac{C}{L}$ 。这是将第 n 节分节电容 C 除以导线分节长度 L 得到的值,表示每单位长度的导线间电容。这是两根均匀、平行的长直导线,从任何一个导线分节计算都将得到相同的 C_L 值,所以 C_L 也是整个传输线上每单位长度的电容。 C_L 是两根导线所组成的信号传输通道所具有的固有属性,决定 C_L 大小的因素是两根导线的材质、形状、尺寸、彼此的间距和外部介质环境(本例中是空气)。具体的计算关系无须深入,但可以通过一些实例了解 C_L 的大致数值量级:两根横截面直径为 0.5mm 的长直铜导线,在空气中以间距 10mm 平行放置,则每单位长度的导线间电容为 0.08pF/cm。如果将这两根铜导线的间距缩小到 5mm,则每单位长度的导线间电容为 0.12pF/cm,如图 3-8 所示。

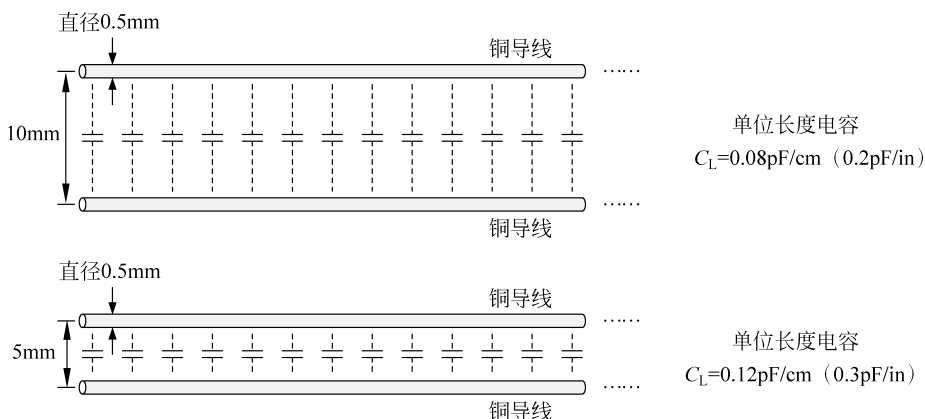


图 3-8 平行长直铜导线间每单位长度电容

下面是一个微带线(印制电路板表层走线)的例子。走线线宽为 8mil(密耳, $1\text{mil} = 0.001\text{in} = 0.0254\text{mm}$),走线与平面层间距为 5mil,则走线与平面间的每单位长度电容 C_L 约为 1.16pF/cm,如图 3-9 所示。

由第 n 节导线分节处的传输线阻抗 Z 的计算式来看,它是一个只与信号的传输速度 v 和单位长度的导线间电容 C_L 有关的值,而 v 和 C_L 在每一节导线分节上都是相等的,所以

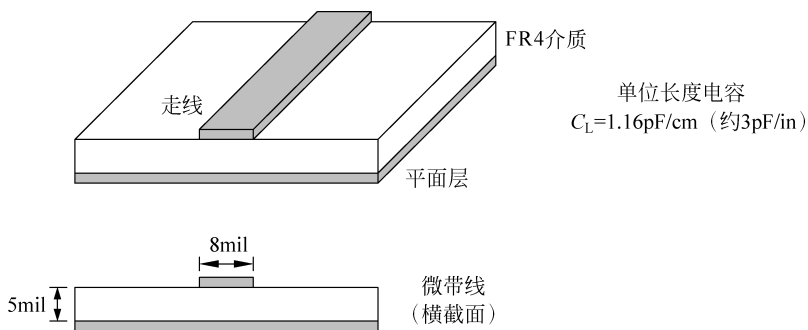


图 3-9 微带线(印制电路板表层走线)每单位长度电容

每一节导线分节处的传输线阻抗都是相等的,都为 $Z = \frac{1}{vC_L}$ 。

这个计算式是普遍适用的,其他类型的传输线,如微带线、带状线和同轴电缆等,都能这样计算传输线阻抗。同时注意到,这个计算式中并未出现导线分节的长度 L 。可见导线分节的长度不影响传输线阻抗的分析结果,无论 L 的取值为多少,都会得出 $Z = \frac{1}{vC_L}$ 的计算式。当取 L 为一个无穷小的值时,导线分节缩为导线上的一点,在这一点处,传输线阻抗的值仍为 $Z = \frac{1}{vC_L}$ 。这样,传输线阻抗在导线的每一点上都具有了意义。

两根平行长直导线组成的传输线、印制电路板上的微带线和带状线、同轴电缆,这些传输线的共有特征是导体和绝缘介质的材质、形状和尺寸等在整个路径上没有变化,沿着传输线上任何一点的横截面都是相同的,见图 3-3 和图 3-4。这样的传输线称为均匀传输线。可想而知,均匀传输线上每一点处的传输线阻抗都是相等的。

如图 3-9 所示的微带线,单位长度电容 C_L 为 1.16 pF/cm (即 $1.16 \times 10^{-10} \text{ F/m}$),信号在其上的传输速度 v 为 $1.73 \times 10^8 \text{ m/s}$ (略高于真空中光速的一半),则传输线阻抗为

$$Z = \frac{1}{vC_L} = \frac{1}{1.73 \times 10^8 \times 1.16 \times 10^{-10}} \approx 50(\Omega)$$

沿着这个微带线上每一点的传输线阻抗都是 50Ω ,于是人们通常直截了当地说“这个微带线的阻抗是 50Ω ”,或者“这是个 50Ω 的微带线”。从微波和电磁场专业毕业的工程师能够轻松理解这个 50Ω 的正确含义,但对于今天从事数字设计的绝大多数并不具有微波或电磁场专业背景的工程师来说,这是最早的一个令我们困惑的信号完整性话题。回想初入门径的时候,前辈、学长不经意地指着印制电路板上的一根走线说它的阻抗是 50Ω ,那时我们想当然地理解这句话的意思是说这根走线从一端到另一端的“电阻”是 50Ω 。但是渐渐地出现了不对劲的地方,不止这一根,许多其他的走线,包括那些明显比这一根长很多或短很多的走线,阻抗也都是 50Ω ,这实在是令人费解。

这是全然不同的两个概念。当说到一根走线的电阻,这表征的是一个从走线一端到另一端的量,它的内容分布范围只限于走线自身。而走线的传输线阻抗则是处于走线和平面

层之间,其内容分布范围是由走线和平面层所组成的整个传输线整体。直观地讲,电阻是在走线上“横向”分布的,而传输线阻抗是在走线和平面层之间“纵向”分布的,如图 3-10 所示。

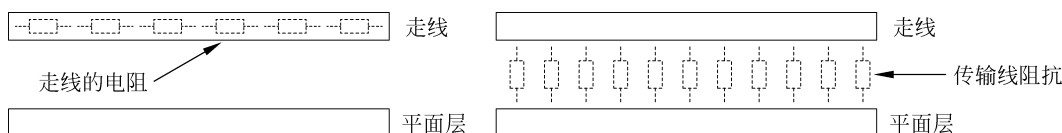


图 3-10 走线电阻和传输线阻抗的分布方向不同

正因为传输线“阻抗”是“纵向”分布的,才能在走线的某一点上具有实际意义。而“横向”分布的“电阻”是不可能存在于走线的某一点上的,它是一个需要在两点之间进行描述的量,必然对应着“一段”走线,而不是走线上的“一点”。当然,这个要求对传输线“阻抗”其实也是一样的,无论是“电阻”还是“阻抗”,都必须是在于两点之间的量。只不过对“纵向”分布的传输线阻抗来说,两点中只有一点是在走线上,另一点则在平面层上。因此,可以指着走线的某一点说“这一点的阻抗是 50Ω ”,这句话的完整含义是,在这一点上,走线与下方的平面层共同构成的传输线阻抗是 50Ω 。

电阻的大小完全是由走线自己决定的。根据在中学物理课上就已熟知的计算关系,走线的电阻 R 由导体金属材质的电阻率 ρ 、走线横截面积 S 和走线长度 L 决定,计算式如下:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

除此之外的其他任何因素(印制电路板的绝缘介质、走线与平面层的间距等)都不影响走线电阻的值。在印制电路板上,所有走线的电阻率 ρ 是相同的,相同线宽、厚度的走线其横截面积 S 也相等,只有长度 L 是因具体走线的不同而千差万别的。那么,各个具体走线的电阻值也将是千差万别的,不可能出现大量走线都具有同一个电阻值的情况。

而且,我们不必经过计算,仅凭主观直觉,也会感到 50Ω 这样一个值对于一根印制电路板走线的电阻来说实在是太大了。如果用万用表对自己身边的印制电路板走线电阻进行实际测量,会发现读数是相当小的,其数值量级不会超过 1Ω 。运用上面的计算式计算,铜金属走线的电阻率为 $0.72 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{in}$,则典型的 5mil 宽、1.4mil 厚、1in 长的铜走线的电阻为

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0.72 \times 10^{-6} \times \frac{1}{0.005 \times 0.0014} \approx 0.1(\Omega)$$

这个电阻微乎其微,以至于我们通常都把它忽略掉,直接认为走线的电阻为 0。可见, 50Ω 这样的值是不可能指走线“电阻”的。

将传输线“阻抗”与走线“电阻”混为一谈几乎是所有初学者不可避免要走的弯路,我们很多人正是在这个问题的驱使下开始信号完整性理论的学习。澄清传输线阻抗与电阻的区别让我们初次领略了信号完整性理论的“深厚”。这是一个经典的话题,足以作为学习信号完整性理论的入门标志——当我们彻底地理解了传输线阻抗的含义并能阐明它与电阻的区别,就已跨进信号完整性学科的大门。

传输线阻抗分布于整个传输线之上。沿着传输线的每一点,都对应着这一点的传输线

阻抗。但是,阻抗对于信号的作用却不是传输线上所有的点共同施加的。这是何意?参见图 3-11。某微带线(印制电路板表层走线)被信号驱动源注入一个从低到高的跳变,图中画出在信号传输过程中某时刻微带线上的电流分布图。电流仅仅在当前信号传输所到的那一点流过传输线阻抗,在其之前和之后的传输线部分都无电流流过传输线阻抗。经由这一点,分别在走线和平面层上流动的电流分支被连接结合,形成完整回路。

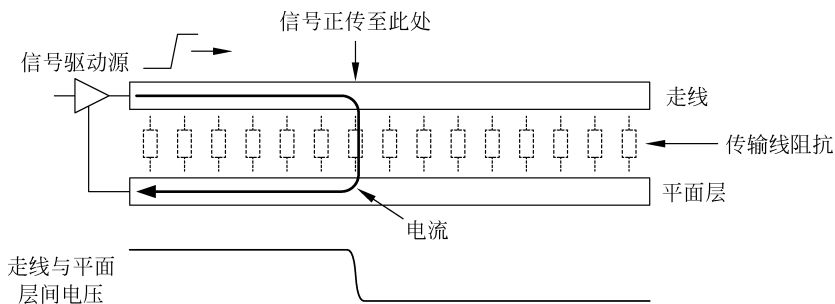


图 3-11 信号在微带线上传输时的电流分布

阻抗或电阻,其作用机制的外在表现是当电压加于其身时,会有电流流过。现在整个传输线上仅在信号所到的那一点上有这样的作用表现。对于信号尚未到达的传输线部分,没有电流流过阻抗我们能够理解,因为电压尚未到达。但信号已经走过的传输线部分,为何也没有电流流过阻抗呢?

不应忘记,传输线阻抗的承载实体是分节电容。电流流过电容的前提是为其施加变化的电压,稳定不变的电压加在电容两端,不会有电流流过,如图 3-12 所示。电容的阻抗,便是这样,只存在于变化的电压之中,没有变化的电压,也就无所谓阻抗。

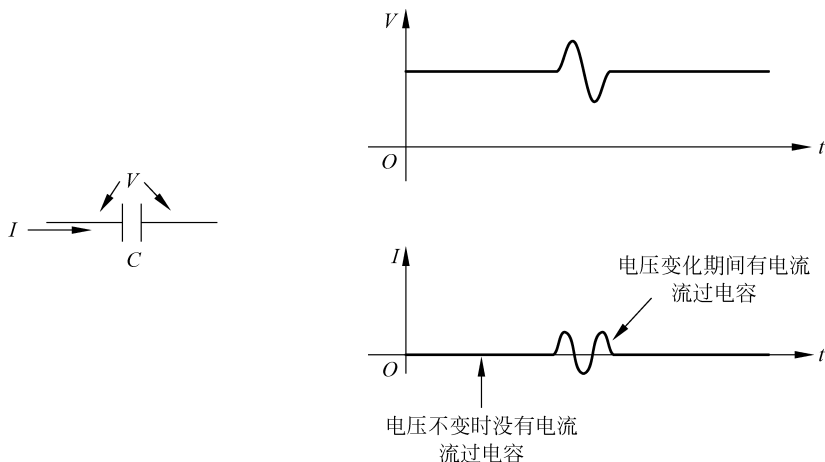


图 3-12 电容两端电压变化时有电流流过电容

在信号已经走过的部分,分节电容已经充电完成,电压不再变化,没有电流流过。只有信号最前沿的那一个分节电容,正经历着电压从低到高的充电变化过程,成为整个电流回路

的汇接点,如图 3-13 所示。这个电流汇接点会伴随着信号的传播而沿着传输线向行进,汇接点所到之处,也就是传输线阻抗正在发挥作用的地方。这就是传输线阻抗的瞬时性——信号在沿着传输线传播的每个时刻,它都感受到当前所在那一点的传输线阻抗,一旦它越过这一点,这一点的阻抗也就不再产生作用。

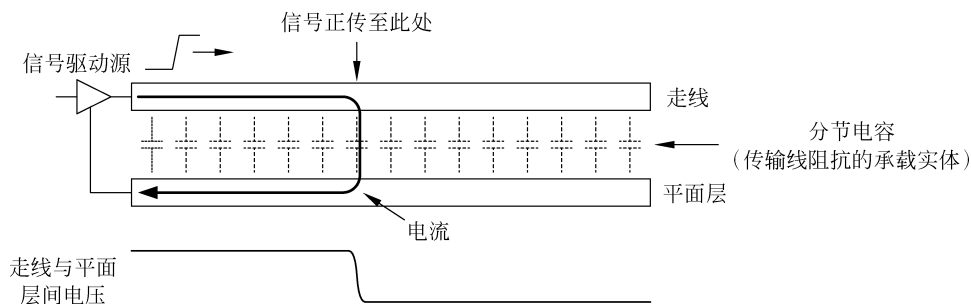


图 3-13 分节电容作为电流汇接点将走线与平面层的电流汇接成完整回路

当信号传遍整个传输线,到达接收端,在从发送端到传输线到接收端的整个路径上都建立起稳定一致的电平状态,无论是高或低电平,所有的分节电容都已充电或放电完成,这时电压不再变化,传输线上任何一点都没有从走线流向平面层的电流存在,所有点上的传输线阻抗都不产生作用,就好像根本不存在。待到信号驱动源的输出电平状态再次发生改变,一个新的“跳变”(高到低跳变或低到高跳变)被注入传输线,一切过程再次开始,阻抗在传输线上的每一点上依次发挥作用,履行作为电流汇接点的职责,将信号推向前进。传输线阻抗因“跳变”的存在而存在,如图 3-14 所示。

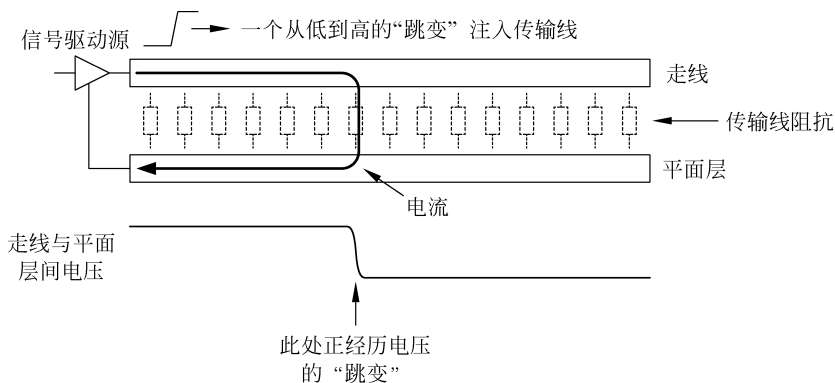


图 3-14 传输线阻抗因信号“跳变”的存在而存在

数字信号传输的关键是“跳变”的传输。接下来会看到,所有的信号完整性故障现象都是因“跳变”而触发。如果没有“跳变”,一切信号完整性问题都将不存在。但没有了“跳变”,所有的数字电路都将是一潭死水,不能执行任何功能。“跳变”是数字电路的生命脉动,因为“跳变”,信息在电路中流动;因为“跳变”,指令在电路中下达;因为“跳变”,功能在电路中执行;也因为“跳变”,信号完整性问题成为我们在数字电路的高速时代不得不考虑的设计关键。