

provide the best service !

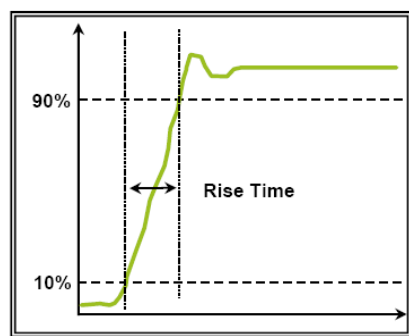
COMTECH 科通

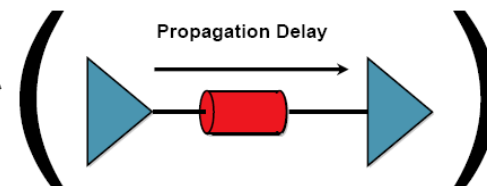
高速PCB设计仿真与分析

—— 科通数字技术

高速电路

- 凡是大于50MHz的信号，就是高速信号
- 信号是否高速和频率没有直接关系，而是信号上升/下降沿小于50 ps时就认为是高速信号
- 当信号所在的传输路径长度大于 $1/6 \lambda$ ，信号被认为是高速信号
- 当信号沿着传输路径传输，发生了严重的趋肤效应和电离损耗时，被认为是高速信号



$$\leq 4 \sim 6 * \left(\text{Propagation Delay} \right)$$


A diagram illustrating propagation delay. It shows two blue triangles representing signal sources or sinks, connected by a red cylinder representing a transmission line. An arrow labeled "Propagation Delay" points from the first triangle to the second.

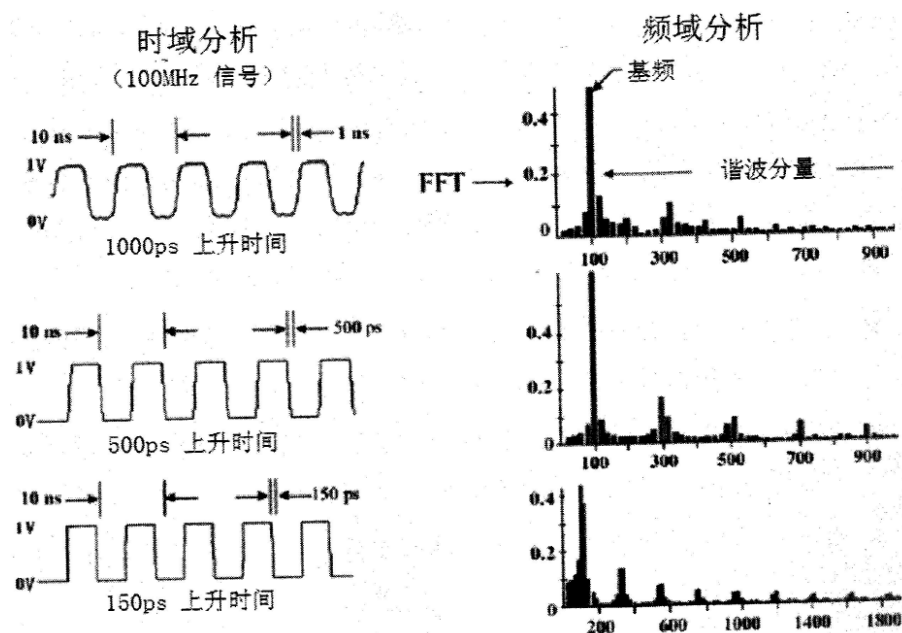
“高频” 还是 “高速”

• 高频信号和高速信号之间没有联系？

- 频率变高时，对应的建立保持时间也会随之改变，为了保证足够的有效信号宽度，上升、下降时间也会随之变小
- 例如 100M HZ的信号，上升下降时间分别为1nS, 那么有效信号宽度是 $10-1-1 = 8$ nS, 如果频率上升到200M HZ, 如果不减小上升下降时间的话 信号宽度仅剩 $5-1-1 = 3$ nS

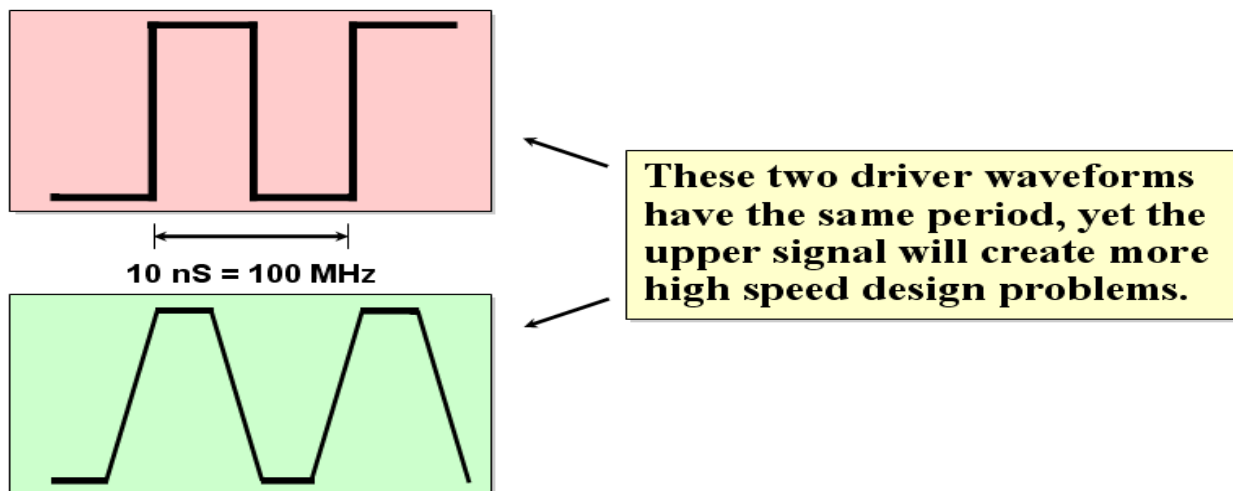
• 高频 == 高速？

- 不尽然，但是频率升高会带来高速问题，是充分条件而非充要条件
- 不能仅仅从频率上判断是否是高速信号，而应该分析其包含的高频分量，其实就是边沿速度。



周期信号及频谱分布

导致高速问题的真正原因



- 决定信号完整性问题严重程度的是上升/下降沿时间，并非频率
- 如果在确保正确的电气连接的前提下，电路仍不能稳定的高性能工作，而需要进行特殊的布局，布线，匹配，屏蔽等处理，那么，这就是“高速”设计。

微波电磁波简介

- 频率为**300M~300G HZ**的电磁波称做微波，波长范围在**1m~0.1mm**之间

| 微波波段 | 波长 | 频率 |
|------|----------|----------|
| UHF | 1m~10cm | 300M~3G |
| SHF | 10cm~1cm | 3G~30G |
| EHF | 1cm~1mm | 30G~300G |

根据电磁波频率、波长与速度的关系 $f \times \lambda = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 可知，微波的波长如上表所示，对于微波波段的划分和命名，国内外还有多种方法，此处不再罗列和介绍

- 不同工作频率的微波系统具有不同的技术特性、生产成本也用途
- 工作频率越高，大气传输和传输线传输的传输损耗越大



微波传输线

- 微波等效电路物理量

| | | |
|--------|------|-------------------------|
| 低频电路系统 | 物理量 | 电压、电流、电阻、电容、电感 |
| | 传输系统 | 可见回路形式电路 |
| | 电路模型 | 分立元件电路、集总模型 |
| 微波电路系统 | 物理量 | 功率、损耗、特征阻抗、传输模式 |
| | 传输系统 | 可见和不可见介质回路形式、大气，波导和传输线等 |
| | 电路模型 | 麦克斯韦方程，等效分布模型 |

微波传输线

- 微波传输线等效电路

- $Z = R + j\omega L$

- $Y = G + j\omega C$

- 有损传输线

- $Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$

- 无损传输线

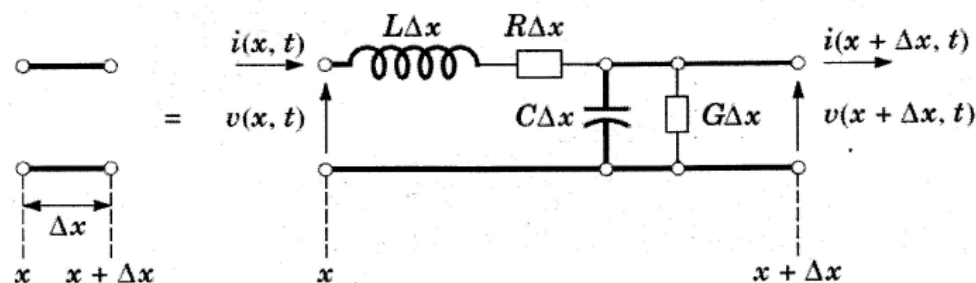
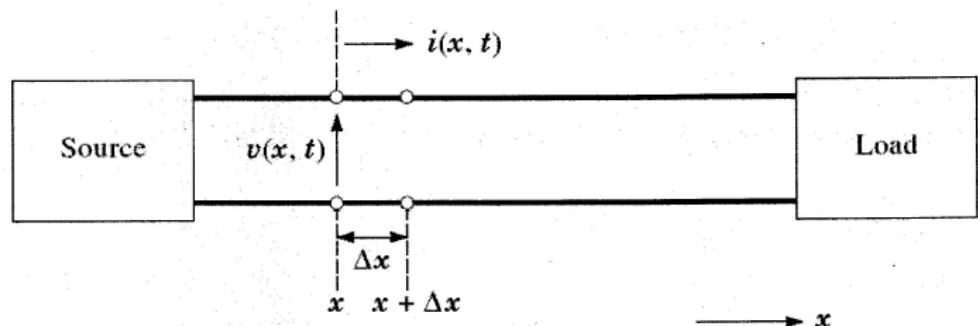
- $\sqrt{\frac{L}{C}}$

- 由于

- $R \ll j\omega L$

- $G \ll j\omega C$

- 因此对于损耗不大的传输线我们也近似等效无损传输线分析



微波传输线等效电路

电磁波反射

- 当信号在介质中传播的时候，如果遇到障碍，即阻抗不连续的非均匀传输介质，将会产生很强的反射
- 研究反射是研究高速设计问题的基础和出发点
- $\rho = (Z_L - Z_S) / (Z_L + Z_S)$

Z_S

Z_L



$$\rho = (Z_L - Z_S) / (Z_L + Z_S)$$

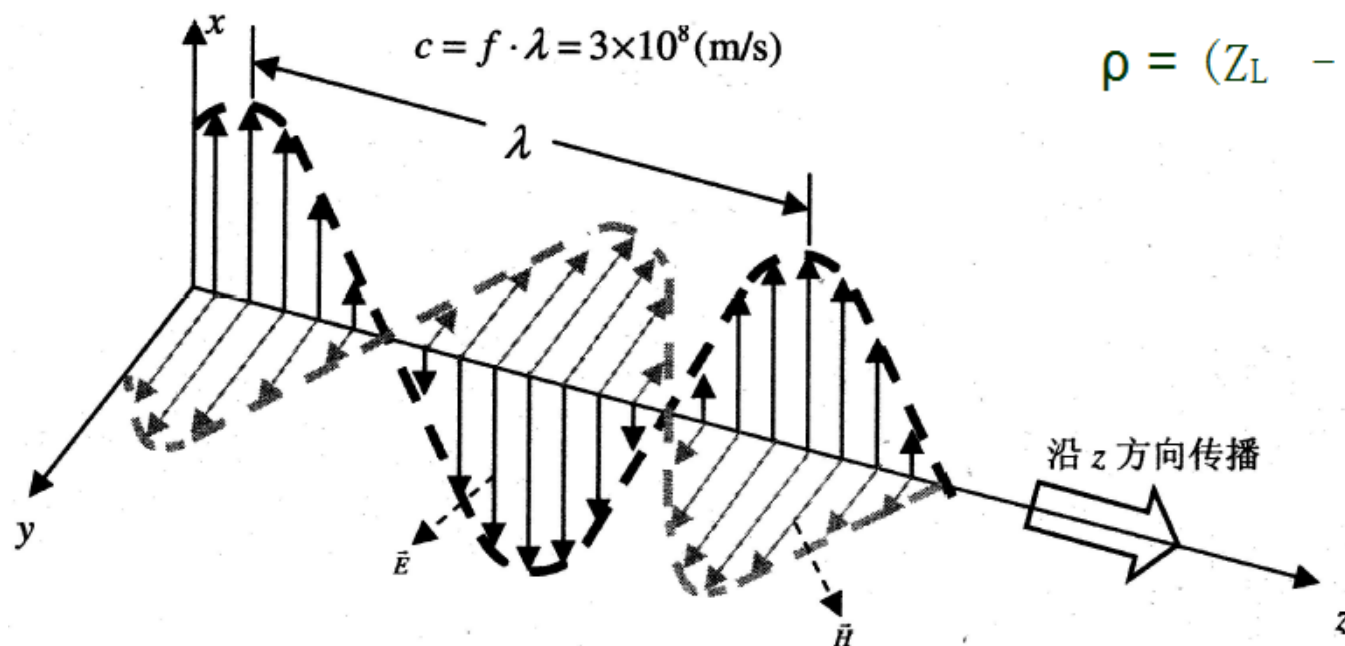


图 2-3 TEM 电磁波传输示意图

反射系数推倒过程

- X=0处电压电流表达式

$$V_0 = V_{0+} + V_{0-}$$

$$I_0 = I_{0+} - I_{0-}$$

- 该传输线特征阻抗为 Z_0 ，有如下等式

$$I_0 = I_{0+} - I_{0-} = \frac{V_{0+}}{Z_0} - \frac{V_{0-}}{Z_0}$$

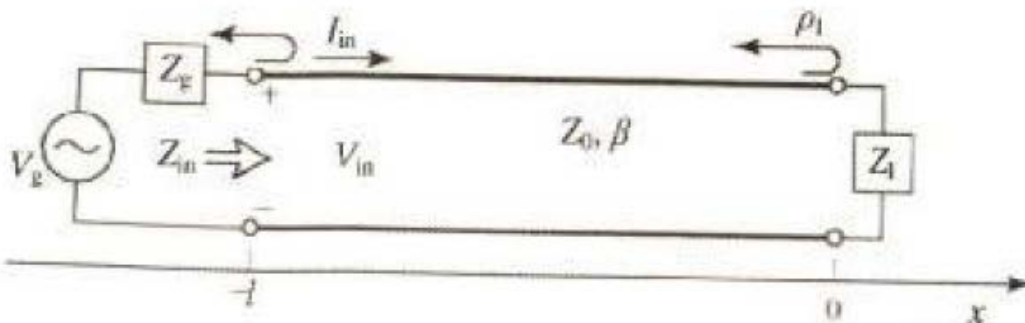


图 2-4 传输线反射电路

- 从负载端看，电压电流的关系

$$Z_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V_{0+} + V_{0-}}{I_0}$$

- 将 I_0 表达式带入，消除 I_0 项

$$Z_L = \frac{V_{0+} + V_{0-}}{I_0} = \frac{V_{0+} + V_{0-}}{V_{0+} - V_{0-}} \cdot Z_0$$

- 得到负载端的反射系数

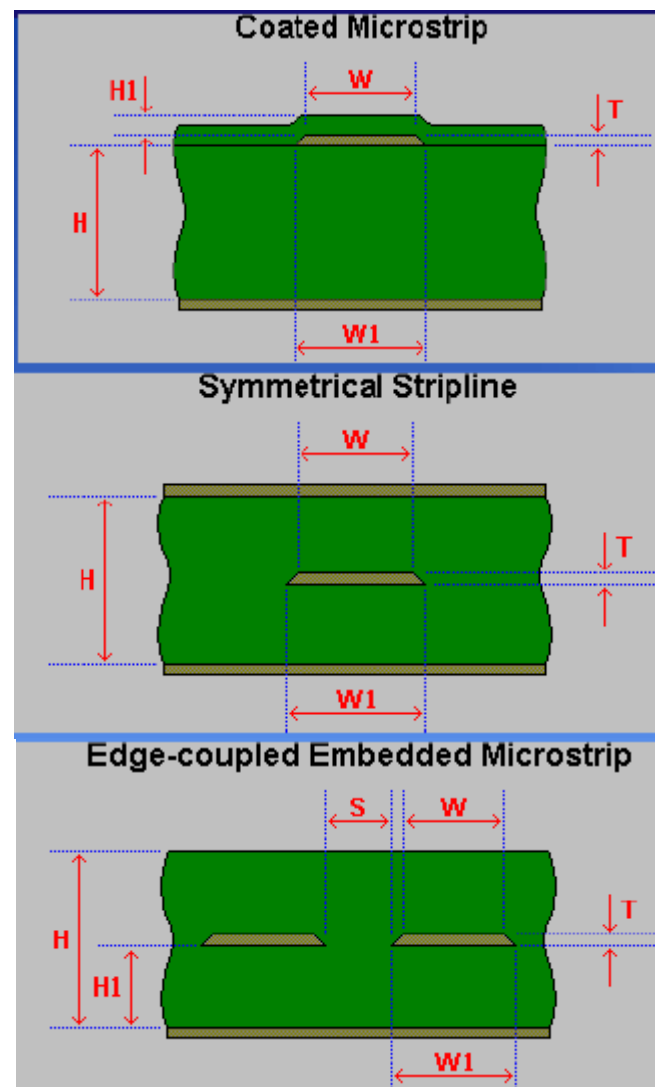
$$\frac{V_{0-}}{V_{0+}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \rho_l$$

同理导出在源端反射系数

$$\rho = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_0 + Z_L}$$

微波传输介质

- 微带线
 - PCB中，微带线是一种用电介质将导线与接地平面隔开的传输线
 - 铜皮厚度、线宽、走线与接地面之间的介质厚度以及电介质的介电常数决定了微带线阻抗的大小
- 带状线
 - 带状线是一条位于两层导电平面之间的电介质中的铜带
 - 特性和微带线类似
- 差分传输线
- 差分阻抗
 - $Z_{diff} = 2 * Z_0 * (1 - k)$



微带线

- PCB中，微带线是一种用电介质将导线与接地平面隔开的传输线
- 导线的厚度、宽度、与地平面的介质厚度以及电介质的介电常数决定了微带线的特征阻抗大小
- FR-4材料（介电常数在4.5~5之间）
- 微带线W越大，Z越小；W远大于介质厚度H时，精度较高，否则就需要修正。W远大于H是目前工艺能实现的
- 特征阻抗Z和传输延迟都是工作频率的函数
工作频率升高时，微带线的色散将增大，基于准静态分析法的近似公式精度变差。因此毫米波（30G以上）频段，微带线电路的理论计算比较困难
- 频率低于4G，可以忽略色散效应
- 频率升高，介电常数也增大

$$\text{特征阻抗: } Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon + 1.41}} \ln \frac{5.98h}{0.8W + t} (\Omega)$$

$$\text{传播延迟: } t_{pd} = 85\sqrt{0.457\epsilon + 0.67} (\text{ps/inch})$$

$$\text{等效电容: } C_0 = 1000 \frac{t_{pd}}{Z_0} (\text{pF/ft})$$

$$\text{等效电感: } L_0 = Z_0^2 \cdot C_0 (\text{pH/ft})$$

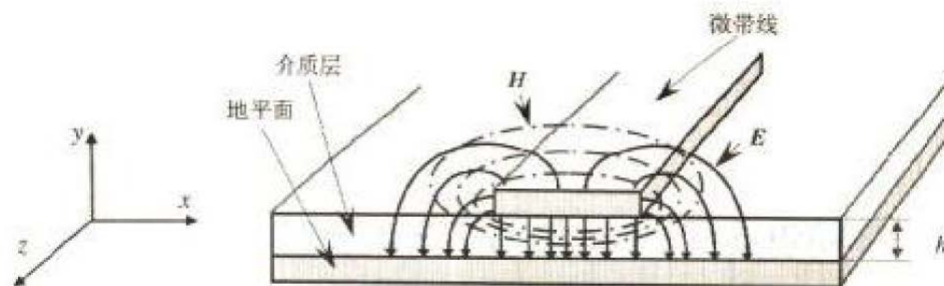


图 2-5 微带线的电路结构

微带线的损耗

- 微带线导体表面的欧姆损耗
 - 介质基片厚度减小，则两导体间磁力线密度增大，损耗将增加
 - 导体表面光洁度下降，或者导体电导率减小，损耗增加
 - 由于趋肤效应存在，工作频率升高损耗增加
- 微带线介质损耗
 - 物理机制是介质中的漏电，电子在微波激励下的热振动等
- 微带线的辐射损耗
 - 辐射不但会形成损耗，还会对周围系统带来干扰
 - 加大介质厚度 H 、减小导线宽度 W 、提高导体介质基片的光洁度可以减小欧姆损耗；但是加大介质厚度 H 和减小 W 将增加辐射损耗，因此要权衡
 - H 和 W 的确定，不但要考虑损耗因素，还要考虑单模传输条件、特征阻抗等
 - 由于微带线损耗过大，不宜作为微波系统之间的传输线，仅用做板级或者芯片级互联

带状线

- 带状线是一条位于两层导电平面之间的电介质中的铜带线

特征阻抗: $Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{4e}{0.67\pi W(0.8 + t/W)} (\Omega)$

传播延迟: $t_{pd} = 85\sqrt{\epsilon} (\text{ps/inch})$

等效电容: $C_0 = 1000 \frac{t_{pd}}{Z_0} (\text{pF/ft})$

等效电感: $L_0 = Z_0^2 \cdot C_0 (\text{pH/ft})$

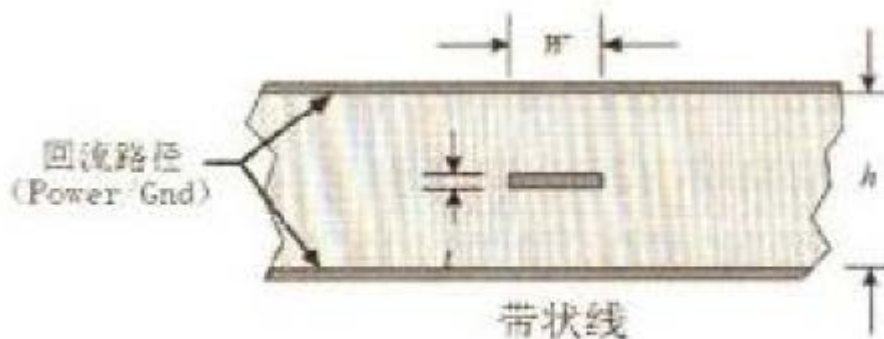


图 2-7 带状线的几何结构

差分传输线

- 和单端传输线一样，差分传输线也有微带线和带状线两种形式，其等效电路模型和分析方法与单端信号基本一致

- 差分传输会存在以下两种情况

- 差模信号方式

$$Z_{\text{Odd}} = \frac{V_1}{i_1} = \frac{V_2}{i_2} = Z_0 \cdot (1 - k)$$

- 共模信号方式

$$Z_{\text{Even}} = \frac{V_1}{i_1 + i_2} = \frac{V_1}{2 \cdot i_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_1}{i_1} = \frac{1}{2} Z_0 \cdot (1 + k)$$

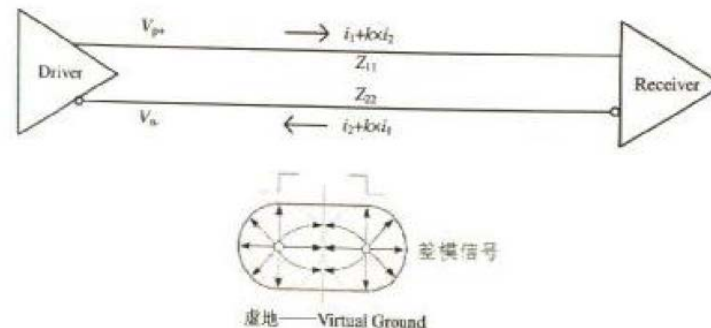


图 2-12 差分传输线差模信号方式

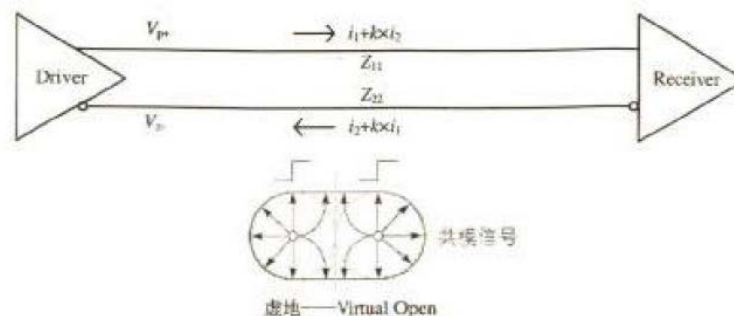


图 2-13 差分传输线共模信号方式

差分阻抗

- 差分驱动端发出的信号是

$$V_p = V_{\text{Even}} + \frac{1}{2} V_{\text{Diff}}$$

$$V_n = V_{\text{Even}} - \frac{1}{2} V_{\text{Diff}}$$

- 接收端输入的有效信号是

$$V_{\text{Diff}} = V_p - V_n$$

- 由此可以看出，每根传输线上具有一半的差分信号能量，其差模传输阻抗为 $Z_{\text{Odd}} = Z_0 \cdot (1 - k)$ ，所以从整个要传输的差分信号 V_{diff} 的角度看，其传输阻抗就应该为单线差模阻抗的2倍（因为单根线上的传输电流没有改变，而最终接收端接收到的差分信号为完整的 V_{Diff} ）

$$Z_{\text{Diff}} = 2 \cdot Z_{\text{Odd}} = 2 \cdot Z_0 \cdot (1 - k) (\Omega)$$

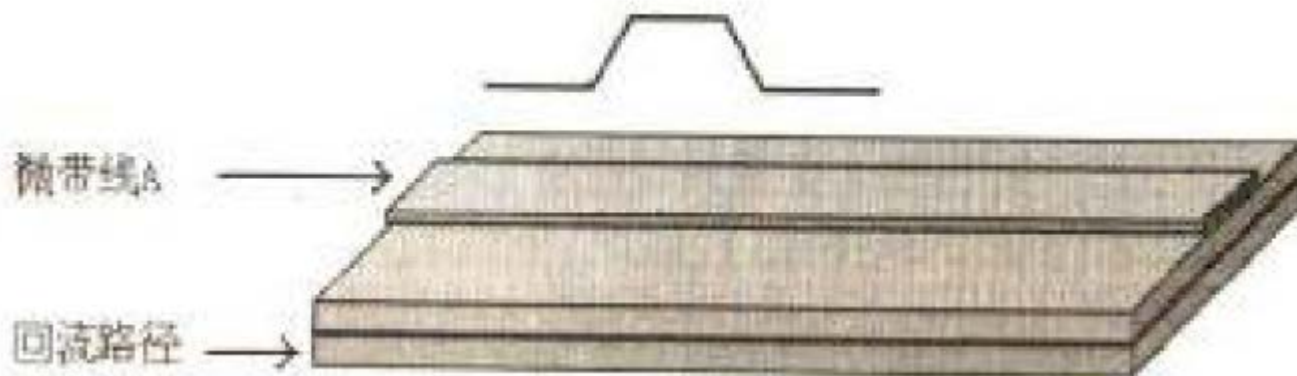
- 50欧单线传输阻抗设计出100欧的差分阻抗
- 工程上普遍使用的差分阻抗计算公式为：

$$\text{微带线差分阻抗, } Z_{\text{Diff}} = 2 \cdot Z_0 \cdot \left(1 - 0.48 \cdot e^{-0.96 \frac{S}{h}} \right) (\Omega)$$

$$\text{带状线差分阻抗, } Z_{\text{Diff}} = 2 \cdot Z_0 \cdot \left(1 - 0.347 \cdot e^{-2.9 \frac{S}{h}} \right) (\Omega)$$

阻抗的困惑

- 微带线A的“阻抗”为零，因为它是一段铜线，可以认为为零
- 微带线A的“阻抗”为无穷大，因为它末端开路
- 微带线A的“阻抗”为 Z_0 ，是它的特征阻抗值



为什么要考虑阻抗

- 由于传输线的阻抗不连续，引起信号的反射，从而引起信号本身的畸变
- 由于传输线的耦合（耦合是阻抗构成的一部分），引起信号间的串扰，造成邻近区域信号的畸变
- 由于电源系统某个区域的分布阻抗过大，是的该区域供电不足，谐振，从而造成相关器件的性能损失甚至混乱失效
- 由于以上各种阻抗特性的不可控带来的高速信号畸变或者电源系统紊乱，最后影响到系统的**EMI**
- 总而言之，在高速系统中，所有的工作特性都取决于组成系统各部分的阻抗特性，所有的现象都可以用阻抗特性来解释

瞬时阻抗和特征阻抗

- 当信号在传输线上传输时，每向前传输一个等效电路（ Δx ）都要在所经过的路径上建立相应的电磁场，依据阻抗定义，此最小单元的等效阻抗就是此刻的瞬时阻抗。
- 信号不停地传播，那么对于每个时刻，信号传输到传输线的某个特定单元位置，由这个位置上的等效电路构成的阻抗，就是该信号此时的瞬时阻抗
- 瞬时阻抗和信号传输的时刻相关，也和传输线的位置相关
- 理想情况，如果每个时刻，该传输线上的每个最小传输单元的等效电路，其物理特性完全一致。此时信号在传输线上传输时，每个瞬时阻抗都完全一致，我们就将瞬时阻抗定义为该传输线的特征阻抗
- 连续并且均匀的传输介质 的由来

为什么是50欧

- 历史原因，早期的电子仪器，已经设计成要求信号传输阻抗为50欧姆，很多的电子系统测试仪器已经按照这个接口标准，设计成50欧，延续历史习惯原因
- 50欧的传输阻抗设计，有利于目前工艺技术和设备参数进行大规模生产
- CMOS器件的输出阻抗一般在几十欧姆
- 使用50欧姆传输阻抗设计，是对功耗、串扰、匹配、信号延迟、负载电容以及系统集成等几个方面的综合权衡的考虑，有利于整个系统的性能优化

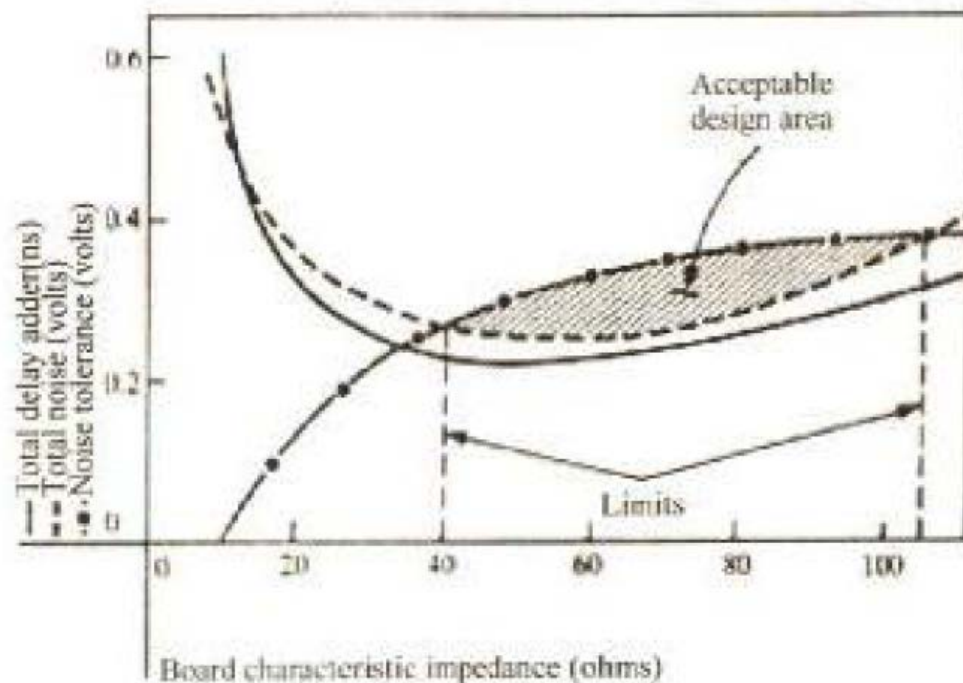
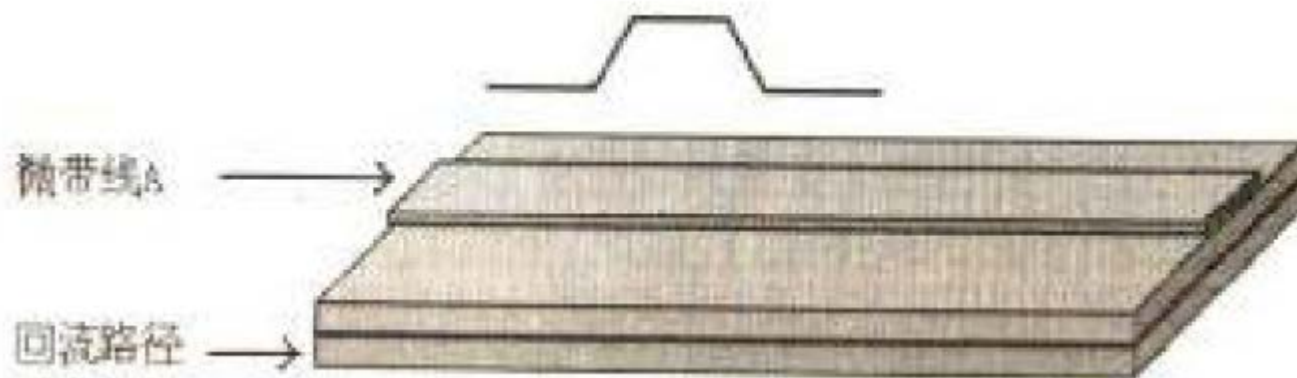


图 2-17 电路板特征阻抗曲线

“阻抗”困惑之答案

- 微带线A阻抗为零，因为它是一段铜线
 - 这种理解是把导线A当作一个导体，混淆了导体A一端到另一端的直流电阻和我们这里说的阻抗概念。导体A的直流电阻的确为零，但它不是我们研究的对象
- 微带线A的阻抗为无穷大，因为它末端开路
 - 这种理解比第一种更近了一步，是把导体A及相应的回流路径当作传输线来看待，这个是对的。但是，作为传输线的阻抗，应该是具有瞬时的时间意义，是信号在传输线中高速行进过程中表现的物理特性。当信号到达传输线A的末端，并已经建立起稳态过程后，就失去了阻抗的瞬时意义，如果根据这个判断阻抗是“开路，无穷大”是不对的
- 微带线的阻抗为 Z ，
 - 此种理解完全了解了阻抗的含义，这里的阻抗是指A的瞬时阻抗，绝非电阻



Thanks!

