

【高速先生原创|学习笔记系列】谜一样的电感

作者：陈亮 一博科技高速先生团队队员

前面我们一起回顾了电容，相信大家对电容以及影响电容的因素有了充分的了解。今天我们就一起来看看电感。要理解电感，一定离不开电磁场，今天的我们有幸站在巨人的肩膀上看世界，能够相对直观的了解电磁场的形成与变化。

电场的场源电荷的库仑力叠加成电场力，电场力驱动电荷定向移动形成电流。电流通过导线 A 时，导线 A 周围会产生磁力线圈构成磁场。当电流发生变化，导线 A 周围的磁场也随之变化，因此导线 A 上会形成感应电动势。感应电动势形成感应电流，感应电流产生的磁场将抵消原电流产生磁场的变化，即阻止原电流的变化。导线 A 周围的导线 B 也会受到变化磁场的影响，导线 B 感受到变化磁场从而产生感应电动势形成感应电流，导线 B 上的感应电流产生的磁场将抵消导线 A 原电流产生磁场的变化，即阻止导线 A 原电流的变化。

要理解电感，首先得知道电感的分类。使用正确的限定词，除了有助于自己理解记忆电感，更可以避免误用术语引起误会。1：流过单位安培电流时，环绕在导体周围的磁力线匝数称为**电感**。2：当单位安培电流通过导体时，环绕在该导体周围的磁力线匝数，称为导线的**自感**。导线的自感与其他导线的电流无关，且自身电流产生的磁力线匝数不变。3：导体通过单位安培电流时，一部分磁力线圈会环绕在另一导体周围。这部分磁力线圈匝数就是**互感**。且互感是相互的，我的一部分磁力线圈环绕在你周围，你也有相同数量的磁力线圈也会环绕在我周围。互感的大小受两导线间距的影响，两导线的距离靠近，互感增加，反之减小。4：自感加上互感的影响，其结果就是**有效电感**。电流方向不同，互感的影响也是不一样的。

如果相邻的 A/B 两导体内电流方向相同。

有效电感=互感+自感 即 $N_{total} = N_b + N_{ab} = (L_b + L_{ab}) * I$

如果相邻的 A/B 两导体内电流方向相反。

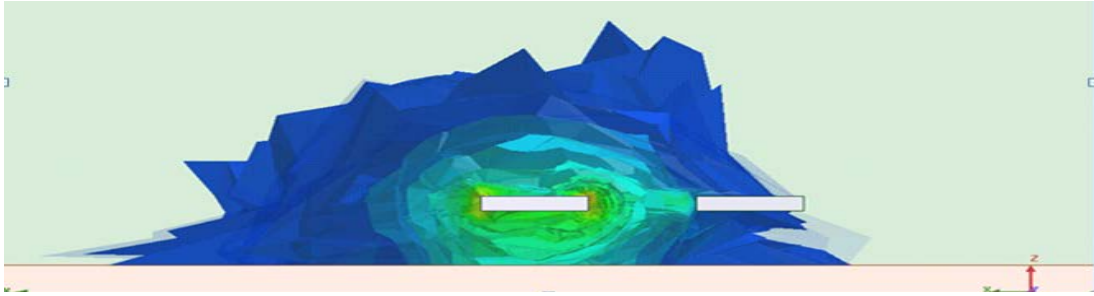
有效电感=互感-自感 即 $N_{total} = N_b - N_{ab} = (L_b - L_{ab}) * I$

信号在传输线上本质是一种交变电磁场，由于线间的互感，磁场变化时会在另一根导线上产生感应电压。感性耦合产生的感应电压与容性耦合产生的感应电流共同构成是串扰。因为感应电压和感应电流的大小都受导体间距和电压变化速度影响。所以影响串扰大小的主要因素是导线的间距和信号频率。所以为了保证系统的高速运行，传输线通常增加两传输线的间距，减小传输线间的互感和互容，从而减小串扰。但是实际项目中，传输线间距是多少才合适呢？（下记是串扰示意图）

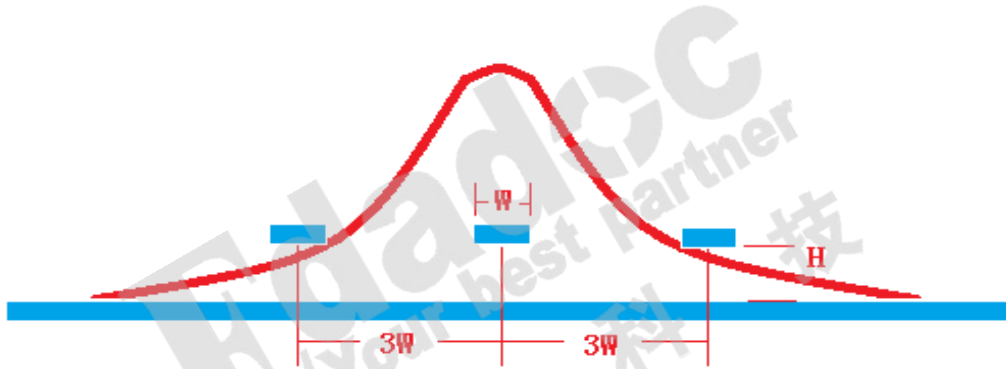
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





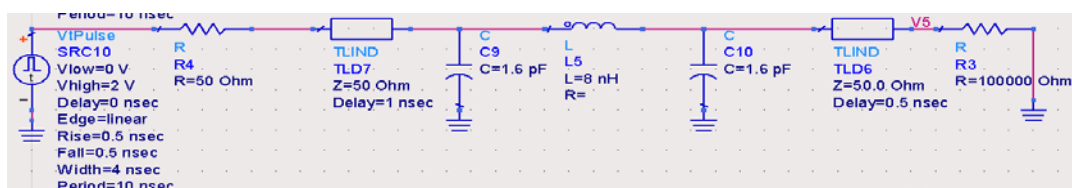
传输线中有电流通过时，电磁场能量分布类似正态分布，约 70% 地能量集中在导线周围 $3H$ 范围内。如果两导线距离大于 $3H$ ，两导线之间的互感会急剧下降，能效降低的串扰量。这就是 PCB 设计工程师 $3H/W$ 经验法则的由来。根据经验法则两线间距 $3W$ 情况下，近端串扰约在 1.9%，远端串扰约-2.2%（仅微带线，带状线几乎没有远端串扰，这也是我们建议高速传输线在内层布线的原因）。 H 是指走线到参考层的高度，因为常用 50 欧姆阻抗线线宽 W 接近 H ，为了量化通常用 W 表述，实际设计中 W 通常都大于 H 。另外减小 H 能加强与 GND 平面的耦合，使能量集中在更小的范围，相同间距下串扰更小。由于 H 减小，阻抗线线宽也会减小，不需要额外空间就增加了间距，再次减少串扰。有这个技能你 get 到了吗？（下记是 $3W$ 经验法则的示意图）



高速链路中我们通常使用均匀传输线以保证阻抗连续性，使信号在传输线中没有反射如果在传输线中途有感性突变，信号会受到怎样的影响？小陈自己脑补了一波：由于传输线中有额外的 L ，根据阻抗公式 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 瞬态阻抗变大，信号在此发生反射。那我要怎么改善呢？小陈又脑洞了一波：既然你增加了电感，那我兵来将挡，水来土掩。通过在电感突变的地方进行容性补偿，增加电容使阻抗再次平衡，消除反射。真实情况会是我想的这样吗？我们来验证一下。

我用软件搭建一个 50 欧姆阻抗的传输线链路，并进行了端接，激励源是频率为 1GHz，源电压是 2V。通过分压，加载到传输线上的电压是 1V，在末端全反射时瞬态电压是 2V。模拟传输线中途有感性突变时，观察信号传输到末端时的波形。并尝试通过容性补偿，观察能否消除感性突变的影响。

感性突变 8nH 时：补偿电容计算： $C=L/(Z^2)$ $C=8/50*50=3.2\text{pf}$ 为了更好的补偿效果，分成 2 个 1.6pf 并联。

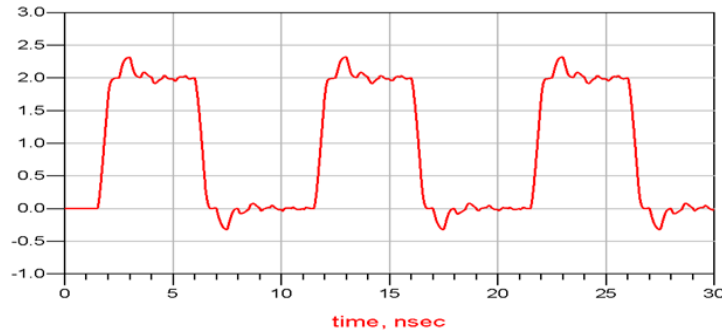


容性补偿前的信号波形图：

如何关注

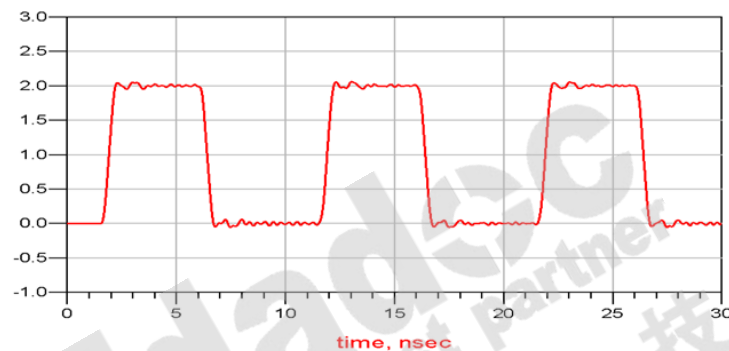
- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





通过信号仿真波形可以看到，由于传输线中途有 8nH 的感性突变，反射使信号产生过冲，过冲幅度约是 300mV 。

容性补偿后信号波形图：



通过信号仿真波形可以看到，基本消除了信号过冲，只有一些几十 mV 的毛刺。通过局部电容补偿，提升局部的电容，根据阻抗公式，容性上升，阻抗下降，从而抵消高电感对阻抗的影响，是阻抗达到平衡，消除或改善反射，信号过冲消失。在实际设计中增加容性的方式不一定是放置电容器，加宽线宽（增大两极板耦合面积）、减小到参考层间距（减小两极板距离），更高的介电常数的材料，这些方法都能提升走线的单位长度电容，降低阻抗。优化方案都来自于电容系列我们了解过的影响电容量三要素。

而电感器是具电感性的装置，通常是导磁体芯上缠绕线圈构成。它有通直流阻交流的特性。电感阻碍电流的变化，因此电感上的电流不会发生突变。根据这一特性，电感器在电路中对交流信号进行隔离、滤波或与电容器、电阻器等组成谐振电路。关于电感器应用我们只做一个了解，更多的是基于电感的基本原理，分析高速传输链路中的寄生电感对信号的影响。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



【关于一博】

深圳市一博科技股份有限公司（简称一博科技）成立于 2003 年 3 月，专注于高速 PCB 设计、PCB 制板、SMT 焊接加工和供应链服务。我司在中国、美国、日本设立研发机构，全球研发工程师 600 余人。

一博旗下 PCB 板厂位于深圳松岗，采用来自日本、德国等一流加工设备，TPS 精益生产管理以及品质管控体系的引入，致力为广大客户提供高品质、高多层的制板服务。

一博旗下 PCBA 总厂位于深圳，并在上海、成都、长沙设立分厂，厂房面积 23000 平米，现有 30 条 SMT 产线，配备全新进口富士 XPF、NXT3、AIMEX III、全自动锡膏印刷机、十温区回流炉、波峰焊等高端设备，并配有 AOI、XRAY、SPI、智能首件测试仪、全自动分板机、BGA 返修台、三防漆等设备，专注研发打样、中小批量的 SMT 贴片、组装等服务。作为国内 SMT 快件厂商，48 小时准交率超过 95%。常备一万余种 YAGEO、MURATA、AVX、KEMET 等全系列阻容以及常用电感、磁珠、连接器、晶振、二三极管，并提供全 BOM 元器件服务。

PCB 设计、制板、贴片、物料一站式硬件创新平台，缩短客户研发周期，方便省心。

EDADOC, Your Best Partner.

【关于高速先生】

高速先生由深圳市一博科技有限公司 R&D 技术研究部创办，用浅显易懂的方式讲述高速设计，成立至今保持每周发布两篇原创技术文章，已和大家分享了百余篇呕心沥血之作，深受业内专业人士欢迎，是中国高速电路第一自媒体品牌。



扫一扫，即可关注

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习

