

最小回路在EMC设计中的应用

王保均

广州金升阳科技有限公司，广州 510663

摘要：从最小回路实验着手，阐述最小回路在EMC设计中的应用。

关键词：电磁兼容，引线，小回路

Minimum Loop Applying in the EMC Design

WANG Baojun

MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663

Abstract: This electronic document express how to follow the Minimum Loop rule in the EMC design, by presenting some practical experiments.

Keywords: EMC, Leading Wire, Minimum Loop

1 引言

EMC 设计在原理图阶段较为容易，一旦进入 PCB 设计与实际布线、引线的走线，让很多初入门的工程师极为苦恼，本文从最小回路原理着手，介绍其在设计中的应用。

2 最小回路实验及应用

2.1 最小回路原理简介

小回路原理的出现时间，较难有确切的考证，目前业界对其也不够重视，参见图 1：

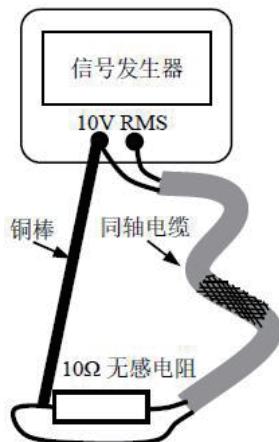


图 1 最小回路原理实验接线图

信号发生器为 REK 品牌的 RAG-101 低频信号发生器和家用音频放大器的组合，可以产生 10Hz 到 1MHz 信号，家用音频放大器来扩展低频信号发生器的输出功率，在图 1 中，当铜棒不接时， 10Ω 无感电阻通过同轴电缆连接在音频功率放大器上，同轴电缆可以选用屏蔽线，屏蔽线也有自己的特性阻抗，和无感电阻的阻值一样，随便取值并不影响实验的结果，同轴电缆的芯和屏蔽层的直流内阻要进行一定的选取，芯和屏蔽层的直流内阻之和最好在 0.1Ω 至 1Ω 之间；铜棒的内阻很低，这里选取直径为 1.6mm 的漆包线来代替，有效长度仅为 200mm，直流内阻仅为 $1.8m\Omega$ ，按图 1 连接好以后，进行实验。

型号为 TCPA300 的电流探头夹在铜棒上，观察铜棒中的电流。

实验采用正弦波即可，当工作频率较低时，信号发生器的输出频率为 100Hz 时，可以发现，100Hz 的电流是经过铜棒、 10Ω 无感电阻、同轴电缆的芯线流回信号发生器，如图 2 所示：

实验表明，当频率较低时，如 $< 800\text{Hz}$ ，电流均为通过铜棒、 10Ω 无感电阻、同轴电缆的芯线流回信号发生器，电流的回路扫过的面积较大；

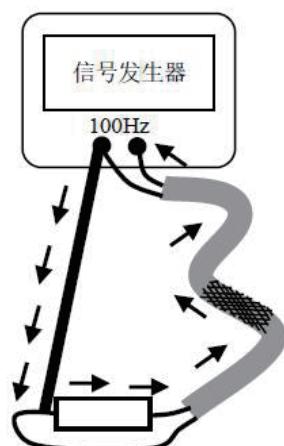


图 2 频率较低时的电流流向图

当把频率上升至 3KHz 时，会发现，铜棒里仍有电流，部分电流会出现在同轴电缆的屏蔽层中；而把频率上升至 10KHz 以上时，铜棒中的电流消失，如图 3 所示：

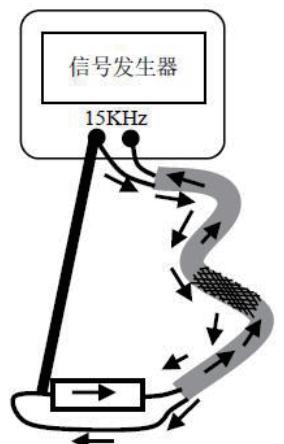


图 3 频率较高时的电流流向图

实验表明，当频率较高时，如 $\geq 10\text{KHz}$ ，电流流过途径为：通过同轴电缆的芯线、 10Ω 无感电阻、同轴电缆的屏蔽层流回信号发生器，电流的回路扫过的面积较小。

在高频信号下，铜棒相当于虚断。

当然，实验的结果受家用音频放大器机内的电路的回路扫过的面积、同轴电缆的长度、接线形成的小回路等影响，而略有区别。

实验的启示：

- 1) 10KHz 以上即为高频信号；
- 2) 高频信号总是在寻找最小电流回路；

3) 最小回路的本质是回路电感量小。

2.2 最小回路的模型与应用

最小回路在电路中无处不在，而且其最小回路面积不可能做成零，由于电路中各种分布电容的存在，以及大量的滤波、退耦电容的存在，包括引线，总是可以等效为下述两种模型：

- 1) 平行传输线；
- 2) 天线。

2.2.1 平行传输线

平行走线在 PCB 布板中很常见，不仅美观，而且让 PCB 看起来很简洁，在这种情况下，平行线将呈现一种特殊的电气状态，即呈现出特性阻抗。俗称平行传输线、扁平馈线、馈线，同轴电缆也是一种具有特性阻抗的平行传输线，由于在 PCB 板不能自然出现，本文不讨论。

馈线是早期电视机与室外天线连接的信号线，外形扁平，且为对称双线，两线之间有较宽的距离，距离平行而相等，传统理论认为：保持较宽的距离以减小线间分布电容对电视天线微弱信号的衰减。线体为绝缘塑料，外部没有屏蔽层，抗干扰能力较差。

目前由于有线电视、数字电视的普及，信号线完全由同轴电缆取代而变得不多见。

老式的电话线都是平行走线，受传统理论影响，两条线保持较宽的距离以减小线间分布电容对音频信号的衰减。

平行走线形成的馈线，具有特性阻抗，特性阻抗是指当馈线无限长时该馈线所具有的阻抗，是阻止电流通过导体的一种电阻名称，它不是常规意义上的直流电阻。

一条馈线的特性阻抗是由馈线的电导率、分布电容以及阻值组合后的综合特性。假设一根均匀馈线无限延伸，其发射端在某一频率下的阻抗称为特性阻抗 (Characteristic Impedance)。它由诸如导体的集合尺寸、导体的中心距离、PCB 本身的结构、PCB 绝缘材料的介电常数等因素决定，与馈线的长短无关。

早期的传统理论认为：保持较宽的距离，以减小线间分布电容对传输信号的衰减。所以我们看到早期的电话线都架空，且两者之间保持平行，目前的理论认为：让两条平行线之间距离无限接近，小回路的面积为零，这样反而可以传输高频信号，其理论基础就是图 3 得出的实验结论。

成功的案例仍是电话线，采用双绞线后，从任一角度

观察,由于相邻的绞合形成的回路,其产生的磁通可以抵消,如图 4 所示:



图 4 双绞线回路抵消示意图

这样,双绞线的长度很长,但从整体上看,其电流构成的回路面积仍很小,所以家用电话后来被加装 ADSL 拨号上网,其下行可以达到 16M 的速度,而上行可以达到 2M 的速度,电话线中实际流动的高频信号的频率高达 50MHz。

平行传输线的瓶颈阻抗(由于距离变化引起的)是影响信号品质及完整性的重要因素。如果信号传播过程中,特征阻抗保持一致,那么信号就可以十分平稳的向前传播,因而情况变得十分简单。如果特征阻抗发生了改变,信号中能量的一部分就会往回反射,信号传输辐射增大从而产生辐射干扰,同样,其抗干扰的能力也大幅下降。

图 4 的双绞线用法,在 PCB 上同样可以实现,采用双面板或多层板,结合金属化过孔,可以实现双绞线的效果,如下图 5 所示:



图 5 PCB 板上实现双绞线式的最小回路

当然,要考虑金属化过孔设置引起的特征阻抗改变,即瓶颈阻抗变化而导致特性不良,利用仿真软件和特征阻抗的计算公式,可以良好地解决这一问题。也可以在 PCB 板的不同层,设置相同投影形状、且投影形成面积为零的走线,来实现最小回路,中间在必要时也可以利用金属化过孔实现双绞线式的最小回路。

利用双绞线式的最小回路原理,可以极大地降低电力电子领域中,由于阶跃信号而产生的电磁辐射干扰,同时也提高了电路的抗干扰能力。

2.2.2 天线

天线理论是电力电子系统所忽略的一门技术,而它恰恰是解决 EMC 问题的一门独特技术,它的起源很早,由于最小回路原理的提出,让天线相关知识也可以用最小回路原理来解释。

由于存在爬电距离的要求,以及 PCB 在蚀刻时对最小间距有要求,最小回路在 PCB 中并不存在,即使使用上述的双绞线原理,仍存在局部的最小回路,这时,利用“最小回路”构成的天线工作原理,可以快速地应用于设计中。

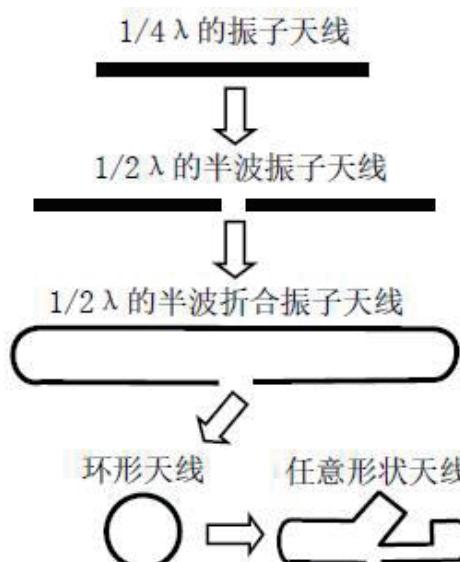


图 6 天线与最小回路的演化

$1/4$ 波长 (λ) 振子天线是一种开环结构的环路,具有良好的辐射与接收能力,高频信号的 $1/4$ 波长若与天线的长度相同,天线就具有良好的辐射与接收能力,它的馈电方式为不平衡馈电;进一步演变为半波振子天线,它的馈电方式为平衡馈电;进而演变为 $1/2\lambda$ 的半波折合振子天线;进而演化出通频带很宽的环形天线,老式电视机上就配有这样的环形天线,它的增益低,但通频带很宽;可以看到,在 PCB 设计中,任何环路都可以构成一定面积的天线,其形状可能是任意的。

天线一旦形成,那么回路中存在阶跃信号时,该天线会自动选出与之谐振的频率发射出去,反之,若系统周围存在干扰信号,该天线会自动选出与之谐振的频率接收下来,当信号足够强时,破坏电路的稳态工作。

电路板上的平行传输线本身也是一种特殊天线,如平行传输线末端使用高频滤波电容产生短路,那么,它对外呈现特殊的阻抗,对于大部分信信号来说,由于短路作用,

该回路有较好的吸收作用，但是若某信号的频率，对应的波长是平行传输线长度的 4 倍，即平行传输线长度为信号的 $1/4$ 波长上，那么该平行传输线呈开路状态，其原理为：众所周知，高频信号发送出去以后，由于阻抗不完全匹配，就会有一部分波通过平行传输线反射回来。这一部分反射波与原来发射出去的入射波叠加起来就会形成驻波。良好工作的天线，驻波比达到 1 是最佳的，事实上很难达到，一般达到 1.5 以下视为工况良好。驻波在平行传输线各点的振幅是相对固定的。对于 $1/4$ 波长末端短路的平行传输线而言，其末端因为短路所以电流为最大，端电压为小值。而对信号端而言，因为相差 $1/4$ 波长，正好是电压为最大而电流为最小。即，对信号端而言，阻抗却达到最大， $1/4$ 波长平行传输线对于该波长的信号来说，接近开路，因此损耗很小，即这种方式的滤波电路，对特定波长是不存在滤波作用的。

若这个波长刚好落成附近的强干扰源上，那么系统将无法正常工作，比如，附近存在频段相对固定的无线电设备，如 800MHz、900MHz、1.8GHz、2.4GHz 等等通信设备，再如部分大型设备附近的短波电台、电视台，对它们的二次谐波也要足够重视，在布板时，尽可能不出现上述频率的 $1/4\lambda$ 的走线，否则，附近有人接打移动电话，系统会出现不稳定的工况。

事实上，最小回路的灵活应用，可以少走很多弯路，留意 PCB 板上的各种最小回路，尽可能地让它们的面积减小，这样，辐射或接收的频率会上升，频率越高，常见的阶跃信号其频谱所包括的能量也越低，这样来提高 EMC 的性能；或与系统中存在的主干扰源（包括环境）的波长进行错开设计，确保不放大，不谐振、不辐射干扰源的信号，这样来提高 EMC 的性能。另外，在回路面积不好取小的情况下，也可以利用 TRIZ 原理（Teoriya Resheniya Izobreatelskikh Zadatch，发明问题解决理论）对回路进行改变，四十个发明原理中，分割、分离、

不对称、合并、嵌套抵消、预加反作用、中介物都可以用于 EMC 设计、整改中，配合最小回路原理，在现有平台上提升 EMC 性能至最佳工况。

3 应用中的注意事项

应用 TRIZ 的四十个发明原理的分割、分离、不对称、合并、嵌套抵消、预加反作用、中介物来解决 EMC 问题，需要注意以下问题：

1) 分割、分离：可以把一个大的回路分割为二个及以上的回路，一般利用电感和电容来分割，在电容中，如 X7R 的电容，其本身在 3-5MHz 出现谐振点，在这个频率范围内，电容呈低阻状态，容量消失，而过了这个点，又呈高阻状态，处于反谐振峰，这时都不能视为电容；那么这种情况，要并联一只 NPO 的电容来协助工作；

2) 不对称：比如，形状的不对称，破坏原有的引线中出现平行线、特定频率的谐振点、破坏特性阻抗达到传输的均衡；双绞线中面积各不相等，既可以实现小回路，又可以破坏特性阻抗，来避免振铃信号的产生；

3) 合并：磁集成就是一种合并，有时去了回路中的电感，让回路变大，辐射的频率降低，辐射的效率同步降低，也可以取得良好的效果；再如，利用共模电感的差模漏感，也可以实现滤波作用；

4) 嵌套抵消：在一个大回路中，放入一个略小的回路，让它们的磁通抵消，这样获得良好的 EMC 性能。

作者简介

王保均（1971），男，本科，工程师，目前为广州金升阳科技有限公司研发中心总工，主要从事小功率开关电源设计、研究工作，有无线电通信、高保真音响设计的研究背景，gd_bbk@163.com。