

使用 Mathcad 分析信号完整性，第 2 部分

Mathcad 可以求解复杂的 SI 表达式，包括那些带有复数项、虚数项、对数函数和指数函数的表达式。



ABE (ABBAS) RIAZI 博士

MATHCAD 能高效灵活地求解数学方程。

它可以处理含有标量（一个数字）、向量（数列）和矩阵（数字的矩阵数组）的解析表达式。通常，用“数组”一词来指代向量或矩阵。

Mathcad 的对数功能包括 $\ln(z)$ 和 $\log(z,b)$ ，前者返回 z 的自然对数 ($z \neq 0$)，后者输出 z 的以 b 为底的对数 (z or $b \neq 0$)。如果忽略 b ，则 $\log(z,b)$ 等于以 10 为底的对数。因此， $\log(z)$ 返回非零值 z 的常用对数。

让我们应用 Mathcad 来分析奇偶模阻抗的耦合概念。

与耦合迹线（即非常靠近的迹线）相关的电场和磁场会产生相互作用，作用方式取决于每条线的信号模式。此类相互作用将改变有效特性阻抗和传输速度。图 5 显示了一种耦合微带的奇偶电场（蓝色）和磁场（红色）分布，这是使用 Mentor Graphics 的 HyperLynx 软件计算出来的。

若激发两条耦合迹线的信号等幅但极性相反（相位相差 180 度），则这两条耦合迹线将产生奇模，也称为差模。若激发这两条迹线的信号相位完全相同，则产生的是偶模，也称为共模。每条迹线的特性阻抗 Z_0 、奇模阻抗 Z_{0o} 和偶模阻抗 Z_{0e} 之间的关系由以下方程决定¹¹：

$$Z_0 = (Z_{0o} * Z_{0e})^{0.5} \tag{方程 1}$$

对于任何几何形状， Z_{0o} 和 Z_{0e} 取决于耦合能量的耦合等效幅度，而耦合能量取决于奇模阻抗和偶模阻抗。图 6 显示了用 Mathcad 求解的四分之一波长匹配线的阻抗公式。

与公共接地 / 公共回路处相比，耦合迹线之间的场力线更为密集。因此，随着耦合的增强，电感增高而电容降低，致使偶模阻抗可能增高¹¹。

在 $Z_0 = 60$ 欧姆的弱耦合（例如 $k = 0.03$ ）系统中，计算结果是 $Z_{0e} = 61.83$ 欧姆， $Z_{0o} = 58.23$ 欧姆。对于 $Z_0 = 60$ 欧姆的强耦合 ($k = 0.7$) 情况，计算结果是 $Z_{0e} = 142.83$ 欧姆， $Z_{0o} = 25.21$ 欧姆。由此可见，在强耦合情况下， Z_{0e} 和 Z_{0o} 可能与 Z_0 相差较大。绘制耦合对的 Z_{0o} 和 Z_{0e} 时，常常需要对照迹线间距¹²。

从这些图形可以看出，如果迹线间距较大（对应于弱耦合），则 Z_{0o} 和 Z_{0e} 接近 Z_0 。但如果迹线间距较小（导致强耦合），则阻抗差异显著。

在探查拓扑的正确¹² 终端，以最大程度减少反射并保持信号完整性时，务必要考虑奇偶模阻抗值。

我们再看一个例子，这次应用 Mathcad 处理共面结构的情况。此例表明，此软件能够处理双曲线三角函数（例如 $\text{Tanh}()$ ）和特殊函数（例如完全椭圆积分的比率）。

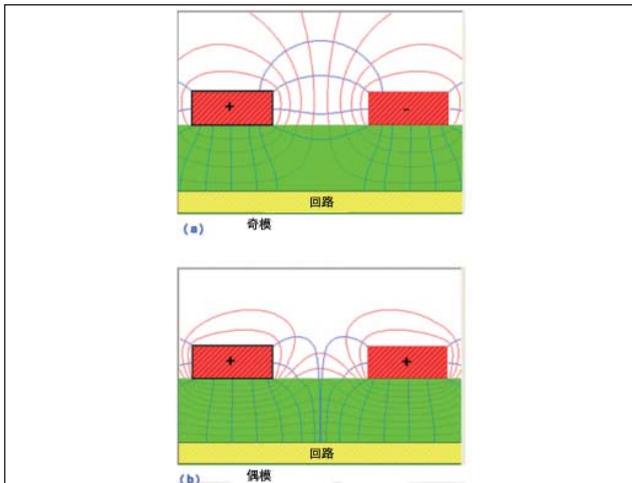


图 5. 模拟的耦合微带场力线和等位线：(a) 奇模和 (b) 偶模。

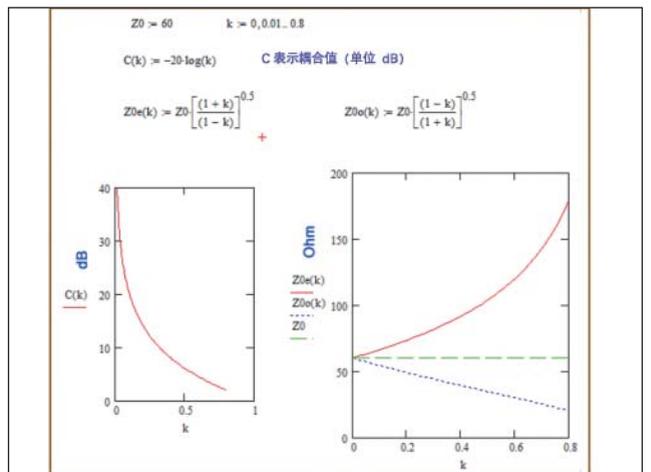


图 6. 奇偶模阻抗计算。

共面波导 (CPW) 是一种传输线几何形状, 它在介质衬底的上方有一条中心载流迹线, 两侧接地线越过对称的缝隙, 延伸到各自的迹线侧面。CPW 传输线有多种不同类型, 包括接地的 CPW¹³ 和不接地的 CPW。前者在衬底下有另一条接地线; 至于后者, 与信号迹线共面的两侧接地线为其提供了唯一的返回路径。

CPW 的损耗正切可能低于微带 (信号主要通过空气耦合), 集肤效应损耗则是高于微带 (场集中在迹线边缘和接地面)。CPW 通常由这几项定义: 中心导带宽度 w 、缝隙宽度 g 、衬底高度 h 和衬底介质材料。金属厚度 t 可能也是一个重要因素, 特别是在 $t \geq 0.1w$ 或 $t \geq 0.1g$ 时。

CPW 的特性阻抗 Z_0 可以藉由改变迹线宽度、与接地面的间距以及介质厚度或材料来控制¹⁴。

共面传输线结构在以下方面提供了与微带类似的优势: 对于可以贴附表面安装元件的外露表面迹线, 信号将在表面迹线上传送。但与微带不同的是, CPW (至少在不接地的形式中) 在表面安装元件和基础接地面之间的寄生损耗可以很低。也可以缩窄迹线¹³, 以匹配元件焊盘宽度, 同时保持阻抗不变。

CPW 还可以为双层电路板提供良好的抗固有串扰性能, 因为它对电路板接地面是否有背面不太敏感。

CPW 的主要缺点是, 与微带或带状线相比, 它的设计难度更高。如果 CPW 的长宽比 (缝隙与迹线宽度之比) 变得过高或过低, 则寄生模可能会取代所需的 CPW 模, 从而导致性能低下。图 7 显示了接地的共面几何形状。图 8 提供了用于计算此类共面结构的阻抗的 Mathcad 脚本。

在图 7 和图 8 中, a 表示迹线宽度, b 表示迹线宽度与间距之和, 这与 Wadell¹³ 所用的表示法相同。但在许多其他出版物中, 迹线宽度用 w 表示, 与相邻接地迹线的间距用 s 表示 (也称为缝隙宽度, 用 g 表示)。在图 8 中, Ratio1 和 Ratio2 的表达式称为第一类完全椭圆¹³ 积分的比率。

在信号完整性中, 将出现一些包含复数 (实数和虚数) 项的量。例如, 介质材料¹⁵ 的电容率包含一个实数部分 (介电常数) 和一个虚数部分 (损耗)。另一个例子: 通过旁路电容¹⁶ 的阻抗, 它包含一个实数部分 (等效串联电阻 ESR) 和一个虚数项 (容抗/感抗)。确定这些量可能需要使用复代数或微积分。

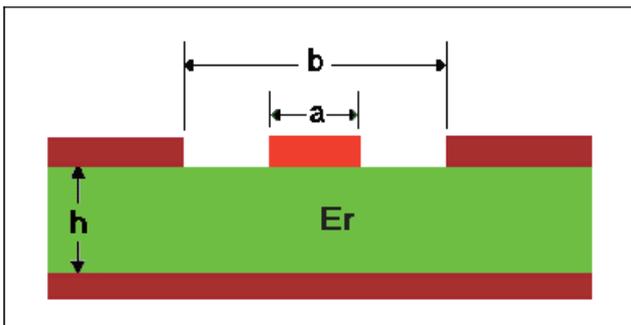


图 7. 带接地面的共面结构。

Mathcad 接受 $Re + (Im)i$ 形式的复数¹⁷, 其中 (Re) 和 (Im) 代表普通数。虚数可以后跟 i 或 j ; 但 Mathcad 通常显示后跟 i 的虚数, 其中 i 等于 -1 的平方根。在 Mathcad 公式中键入复数时, 请务必注意, 不能使用单独的 i 或 j 来表示虚数单位, 而必须键入 $1i$ 或 $1j$, 否则会将 i 或 j 理解为变量。当光标位于包含 $1i$ 或 $1j$ 的方程之外时, Mathcad 将隐藏多余的 1。在本文的第 3 部分中, 将讨论 Mathcad 在单端信号传播和差分信号传播方面的应用。PCD&F

致谢

谨此对 Broadcom Corporation 的 Mohammad Tabatabai 先生表示诚挚谢意。

ABE (ABBAS) RIAZI 博士是 Broadcom Corporation (位于美国加州欧文市) 的电子设计高级研究员, 他的联系方式是: ariazi@broadcom.com。

参考文献

11. "Even and odd mode impedances", Microwave Encyclopedia, 2006 年。
12. "Even mode impedance - an introduction", Polar Instruments Ltd., 应用注解 AP157。
13. Brian C. Wadell, "Transmission Line Design Handbook", 1991 年, Artech House, 第 73-89 页, 及第 464-467 页。
14. Rick Hartley, "RF / Microwave PC Board Design and Layout", L-3 Avionics Systems。
15. A. Kumar and S. Sharma, "Measurement of Dielectric Constant and Loss Factor of the Dielectric Material at Microwave Frequencies", Progress in Electromagnetic Research, PIER 69, 47-54, 2007 年。
16. Douglas G. Brooks, "ESR and Bypass Capacitor Self Resonant Behavior How to Select Bypass Caps", UltraCAD Design Inc., 2000 年。
17. Alan Felzer, "Introduction to Mathcad", 2003 年 8 月。

图 8. 适用于共面结构的 Mathcad 脚本。