使用 Mathcad 分析信号完整性，第 1 部分

诸如 Mathcad 之类的数学工具可以求解各种 SI 问题。

ABE (ABBAS) RIAZI 博士

MATHCAD 软件具有强大的功能，可以处理方程、数字、文本和图形。此软件用一种易于阅读的方式来表示数学公式和数值。Mathcad 允许在整个文档中加入图形和文本，并且，如有必要可以将结果文件保存为 HTML 格式，以便在网站上公布。

实践证明，Mathcad 是进行各种工程设计的宝贵工具，而且适用于一些引人关注的信号完整性应用[1,2,3]。例如，Johnson 等人[1,4]提出了使用 Mathcad 计算以下各项的方法：DC 铜电阻、平行板的电容、圆形回路 / 同轴电缆 / 微带线的电感，以及傅立叶正变换和傅立叶逆变换（即 FFT 和 IFFT）。此外，Brooks[2]论述了如何使用此软件进行傅立叶变换和方波分解，Norte[3]示范了如何使用 Mathcad 来模拟单端和差分对高速拓扑。

图 1 描绘了非对称带状结构，我们以它为例，说明如何使用 Mathcad 来分析此结构。对于非对称带状线（也称为偏置的带状线），信号层夹在两个平面层之间，但更靠近其中一个平面（即 H1 不等于 H）。将 H1 设为等于 H 会导致居中（或对称）带状线的情况。

图 2 说明了在 Mathcad 中进行的特性阻抗 Z0 和传播延迟 (Tpd) 计算。图 2 顶部定义了参数 Er、H、H1 和 W。Z0 和 Tpd 的计算公式分别是方程 1 和 2。

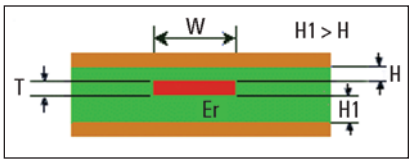

图 1. 非对称带状线几何形状。

图中说明，在 Er = 4.2、H = 5 密耳、H1 = 8 密耳、W = 6 密耳和 T = 0.7 密耳时，Z0 = 43.06 欧姆，Tpd = 2.084 毫微秒 / 英尺。在 Mathcad 文件中，可以轻松更改参数值，以查看所有变量和依赖于它们的图形的变化情况。例如，如果将 Er 设为 4.0、H 设为 6 密耳、H1 设为 10 密耳、W 设为 5 密耳、T 设为 1.4，则会算出 Z0 等于 52.7 欧姆，Tpd 等于 2.034 毫微秒 / 英尺。

$$Er := 4.2 \qquad H := 5 \qquad H1 := 8 \qquad W := 6 \qquad T := 0.70$$

$$Z0 := \left(\frac{80}{\sqrt{Er}}\right)\cdot\left[\ln\left[1.9\cdot\frac{(2\cdot H+T)}{(0.8\cdot W+T)}\right]\right]\cdot\left(1-\frac{H}{4\cdot H1}\right) \qquad \text{方程 1}$$

$$Tpd := 1.017\sqrt{Er} \qquad \text{方程 2}$$

H、H1、W 和 T 的单位均为密耳，Z0 的单位为欧姆，而 Tpd 的单位为毫微秒/英尺

Z0 = 43.06 欧姆　　Tpd = 2.084 毫微秒/英尺

图 2. 使用 Mathcad 为偏置的带状线计算 Z0 和 Tpd。

用这种分析法来确定阻抗没有使用场求解器[5]那么准确。但是，分析法提供了计算 Z0 的高效方法，而且，它可以帮助认识不同的阻抗参数对阻抗的具体影响。

Mathcad 允许在同一个文档中加入文本、公式、图片、方程和图形。下一个涉及过孔电感的示例演示了这项功能。

每个过孔都具有寄生电容和电感。对数字设计而言，过孔电感通常比过孔电容更重要。与过孔关联的寄生电感可能会降低信号完整性[6]，以及减弱电源旁路电容的效能[1]。过孔电感在分析配电网 (PDN) 时也很重要，因为它会增加电源和负载之间的阻抗[7]。

下面举例说明了如何使用 Mathcad 来计算过孔（局部）电感：

图 3 中的 L(h) 方程是孤立过孔（与其他过孔相距甚远）电感的准确表达式。

如果附近有其他过孔，则还必须考虑互感[7]。

通常，Mathcad 会依次对程序中的每条语句求值[8]，但是，有时候希望仅在满足特定的条件时才对语句求值。要这样做，可以加入“if”语句。

为举例说明，将使用 Mathcad 的这项功能对串行连接 SCSI (SAS) 通道的插入损耗公式[9]进行求值。传输线路的损耗可能会影响高速信号的振幅并导致 ISI[5,10]。因此，在设计或测试高速通道时，考虑有关损耗的规范极其重要。

$$h := 50, 100, \ldots 1{,}000 \qquad d := 12$$

其中 h 是过孔长度，而 d 是过孔管的直径。

$$L(h) := 5.08\cdot h\cdot\left(\ln\left(4\cdot\frac{h}{d}\right)+1\right)$$

当 h 和 d 的单位是密耳时，L(h) 的单位是 pH。

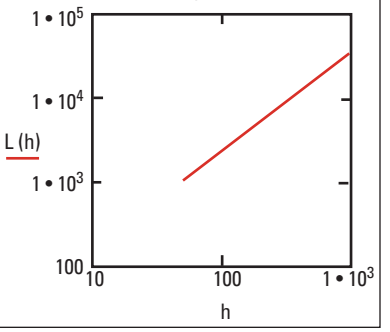

图 3. 使用 Mathcad 计算过孔电感。

例如，PCI Express Gen1 的损耗预算被规定为在 1.25 GHz 频率时为 13.2 dB。

对于 SAS，插入损耗 (SDD21) 的大小由一组方程确定。可以使用 Mathcad 分析这些方程，如图 4 所示。

通过以上示例，可以看到 Mathcad 为分析和求解信号完整性问题提供了强大的功能。本文的第 2 部分将会探讨其他与数学相关的 SI 应用。 PCD&F

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

参考文献

1. Howard Johnson 和 Martin Graham 合著的“High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic”，Prentice Hall 1993 年出版，页码 258-260 和 409-439。
2. Douglas Brooks，“Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design”，Prentice Hall 2003 年出版，页码 18-21。
3. David Norte，“Learn Signal Integrity Design Principles With Mathcad”，The EMC, Signal and Power Integrity Institute，2005 年出版，页码 5-29 和 41-48。
4. Howard Johnson 和 Martin Graham 合著，“High-Speed Signal Propagation: Advanced Black Magic”，Prentice Hall 2003 年出版，页码 249-250。
5. Eric Bogatin，“Signal-Integrity Simplified”，Prentice Hall 2004 年出版，页码 257-262 和 334-335。
6. Stephen H. Hall、Garrett W. Hall、James A. McCall 合著，“High-Speed Digital System Design A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices”，John Wiley & Sons Inc.，2000 年出版，页码 102-104。
7. Istvan Novak 和 Jason R. Miller 合著，“Frequency Domain Characterization of Power Distribution Networks”，Artech House Inc.，2007 年出版，页码 43-54。
8. “Mathcad 2001 User’s Guide”（《Mathcad 2001 用户指南》），Math Soft Inc. 2001 年出版，第 286 页。
9. “Information technology – Serial Attached SCSI – 1.1 (SAS-1.1)”，美国国家标准工作草案，项目 T10/1601-D，修订版 10，2005 年 9 月 21 日，页码 136-146。
10. Abe Riazi，“Timing Analysis Techniques for Digital PCBs”，*Printed Circuit Design & Fab*，2008 年 2 月，页码 17-19。

SAS 通道的插入损耗（在 50 MHz 到 5.0 GHz 的频率范围内）：

$f := 50.00 \cdot 10^6, 51.00 \cdot 10^6 \ldots 5 \cdot 10^9$ 单位为 Hz 的 f

$$|SDD21(f)| := \begin{cases} -10.884 & \text{if } f > 3 \cdot 10^9 \\ -20 \cdot \log(2.71828) \cdot [(6.5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{0.5}) + (2 \cdot 10^{-10} \cdot f) + (3.3 \cdot 10^{-20} \cdot f^2)] & \text{otherwise} \end{cases}$$

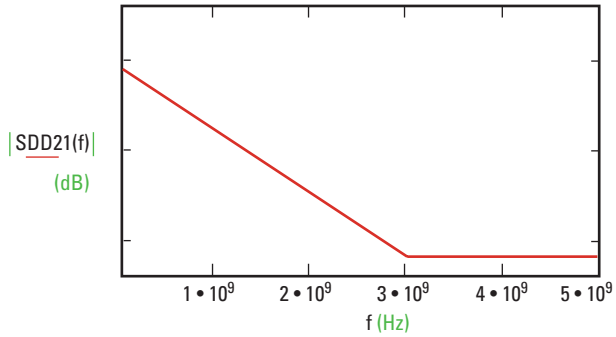

图 4. SAS (3.0 Gb/s) 的 SDD21 大小（单位为 dB）计算。