

关于特性阻抗的定义*

徐云生

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

A. S. Omer

(Arbeitsbereich Hochfrequenztechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg, Germany)

摘要 现有的关于特性阻抗概念的定义物理上模糊或者不精确。在描述传输线之间不连续性的基础上, 给出特性阻抗的普遍定义, 它可以运用到任何形式传输结构中无源元件的设计。因此, 一个给定结构的特性可以唯一地描述, 但特性阻抗的绝对数值不再有意义。作为例子, 运用这一定义设计了微带阻抗变换器。采用模匹配方法进行的数值计算, 验证了设计的正确性。

关键词 特性阻抗 不连续性 微带阻抗变换器

特性阻抗是微波理论特别是微波元件和电路设计理论中广泛应用的一个重要概念。众所周知, 现有的关于特性阻抗的各种定义除了对 TEM 波传输结构外, 在物理上是模糊的。定义的不唯一性导致了对同一个问题不同的结果^[1]。视所研究问题的具体情况, 某种定义可能比另一些更为恰当。例如, 对于微带传输线, 功率-电流定义被认为较为恰当^[2], 而对鱼鳍线或槽线, 功率-电压定义更为合适^[3]。但理论本身无法回答为何对某一类传输结构采用某一种定义结果会更好些, 只能用实验验证。继续遵循寻找“恰当”定义的传统思路似乎难以解决上述问题。随着频率的增高或者涉及到非 TEM 波和非准 TEM 波传输结构, 传统定义的局限性表现得越来越明显。本文尝试给出一个新的处理方法。

在微波电路设计理论中, 一段均匀传输线通常用 2 个参量来描述, 一个是主模的传播常数或等效介电常数, 而另一个为特性阻抗。前者物理概念上清楚, 它描述主模的传播特性, 而后者实际上起了描述不同传输线之间不连续性的作用。我们注意到, 如果根本不涉及到不连续性, 特性阻抗的值并不需要知道。但是, 现有的各种定义都不是基于对不连续性的描述之上, 称这类定义为“静态”定义。它的含义是: 特性阻抗值仅由只与传输线主模特性有关的参量决定, 不考虑不同传输线之间的相互作用, 不包含高次模对不连续性的影响。这是“静态”定义模糊或不精确的关键所在。一个阶梯不连续性在“静态”定义中通常描述为特性阻抗值的变化, 尽管人们可以在不连续性处引入某种等效电容或电感以改善精度, 但定义的“静态”特性依然没有改变。

1995-07-12 收稿, 1996-03-21 收修改稿

* 中国科技大学青年科学基金资助项目

由于众所周知的简单事实,传输线之间的不连续性不可能仅由这些传输线主模的特性精确地描述,采用任何“静态”定义来描述不连续性严格地说不精确的,尽管在工程设计中并不是总是引起很大的误差.这一点对于象同轴线这样的 TEM 波传输结构同样成立,尽管这类传输线特性阻抗的“静态”定义本身物理上是清楚的.

在过去的 20 年中,人们提出了各种各样的全波分析方法来求解微带和其他平面以及非平面传输结构中传输或不连续性问题.但是当这些方法和结果应用到电路设计中时,却不得不计算“静态”定义下的特性阻抗值.这显然是不经济的.一方面,人们付出艰苦努力耗费大量机时以精确地分析所研究的问题.而另一方面,精确的分析结果却转换为包含模糊或不精确概念的电路模型,从而使得这些全波分析方法的价值大为减小.

下面将给出本文提出的特性阻抗的“动态”定义.它的含义是:特性阻抗值将在精确描述不连续性的基础上确定,如果不连续性发生变化,特性阻抗值也将随之改变.

1 特性阻抗的“动态”定义

假定所考虑的传输结构无损各向同性.一个如图 1(a)所示的边界增大型传输线不连续性在不连续性平面可以用图 1(b)中的电路模型来等效.其中, T 和 T' 分别为第 1 和第 2 个传输线中紧靠不连续性处的参考平面, β_1 和 β_2 分别为第 1 和第 2 个传输线的传播常数, l_1 和 l_2 分别为由不连续性所引起的在第 1 和第 2 传输线中附加的等效传输线的长度, θ_1 和 θ_2 为相应的电长度,而 Z_1 和 Z_2 则分别定义为第 1 和第 2 个传输线的特性阻抗.也就是说,图 1(a)中

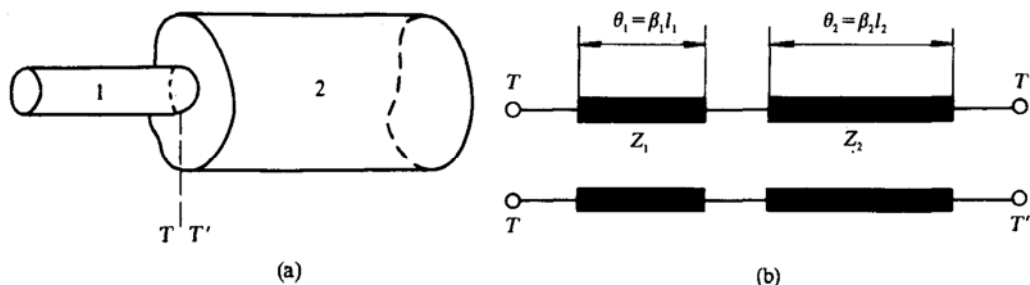


图 1 边界增大型不连续性(a)和不连续性平面的等效电路(b)

的阶梯不连续性在 T - T' 处可以用电长度分别为 θ_1 和 θ_2 、特性阻抗值分别为 Z_1 和 Z_2 的二段传输线的不具有其它杂散电参量的直接连接来等效.很容易看到,如此定义的特性阻抗 Z_1 和 Z_2 不能唯一地确定.一个无损互易二端口网络只有 3 个独立实参量,而图 1(b)的等效电路中有 4 个.但是,如果规定边界增大型传输线不连续性对应特性阻抗值的增加,则特性阻抗值之比 $r = Z_2/Z_1$ 可以唯一确定.实际上,特性阻抗值的唯一确定既无必要也不可能.特性阻抗值之比 r 及等效传输线电长度 θ_1 和 θ_2 已经唯一地描述了不连续性的特性.如果一个给定的传输线和其它各种不同的传输线连接, r 及 θ_1 和 θ_2 都将以某种未知的方式取值.因此,象任何一种传统定义中那样的相对于一个给定传输线的一个固定特性阻抗值是不可能正确地反映这种变化规律的.与此相反,在一个给定不连续性处得到的特性阻抗值,应当仅对这个不连续性成立,如果不连续性发生变化,特性阻抗值也将相应地变化.

图 1(b)中等效电路在参考面 T - T' 处的二端口散射矩阵参量可表为

$$S_{11} = \frac{r-1}{r+1} e^{-j2\theta_1}, \quad S_{12} = S_{21} = \frac{2\sqrt{r}}{r+1} e^{-j(\theta_1+\theta_2)}, \quad S_{22} = -\frac{r-1}{r+1} e^{-j2\theta_2}. \quad (1)$$

由此可将等效电路参量 r , θ_1 和 θ_2 用散射矩阵参量来表达:

$$r = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}, \quad \theta_1 = -\frac{\varphi_{11}}{2} \pm n\pi, \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_{22}}{2} \pm m\pi, \quad (2)$$

其中 φ_{11} 和 φ_{22} 分别代表 S_{11} 和 S_{22} 的相角, n 和 m 为任意整数. 只要用全波数值分析方法算出不连续性处的散射矩阵、特性阻抗之比 r 以及等效电长度 θ_1 和 θ_2 , 则可精确地确定高次模对不连续性的影响也就完全包含在其中.

当应用微波电路设计和综合方法时, 人们也许更愿意使用特性阻抗的具体数值而不是仅仅使用特性阻抗值之比. 它们可以用如下方法产生: (1) 对于给定的单个不连续性, 可以让其中一个传输线的特性阻抗取任意值, 而另一个的特性阻抗值由特性阻抗值之比 r 确定; (2) 对于由多个不连续性级联构成的系统, 不能再简单照此进行, 否则会引起矛盾. 但可以让第 1 个传输线的特性阻抗取任意值, 用第 2 和第 1 个传输线之间的不连续性来确定第 2 个传输线的特性阻抗值, 用第 3 和第 2 个传输线之间的不连续性来确定第 3 个传输线的特性阻抗值, 如此等等.

2 微带阻抗变换器的设计

本节将运用前面的定义设计一个二节微带阻抗变换器(如图 2 所示). 我们使用的原型是“1/4 波长均匀阻抗变换器”^[4]. 输入端微带的导体带宽度为 5.740 mm, 在准静态近似下用经典的保角变换方法计算得到的特性阻抗值约为 10Ω. 正如前所述, 在本文的定义下, 可以让输入端的特性阻抗取任意值而不影响最终结果. 我们设计输出端和输入端的特性阻抗值之比 $R=5$, 导体带的宽度 W_1 , W_2 和 W_3 可以通过依次计算在相应不连续性处本文定义下的特性阻抗值得到. 本文采用的计算方法是模匹配^[5]. 阻抗变换节的长度 L_1 和 L_2 为 1/4 波长减去不连续性引起的附加的等效传输线长度. 这样, 高次模对不连续性的影响容易地但是完全地得到了考虑. 这是采用图 1(b)等效电路的优点之一.

为了比较, 也采用了保角变换方法得到的特性阻抗公式进行了设计. 最后, 对所设计的 2 种变换器结构进行了精确的分析, 结果已在图 2 中给出. 为清楚起见, 通带及其附近的功率衰

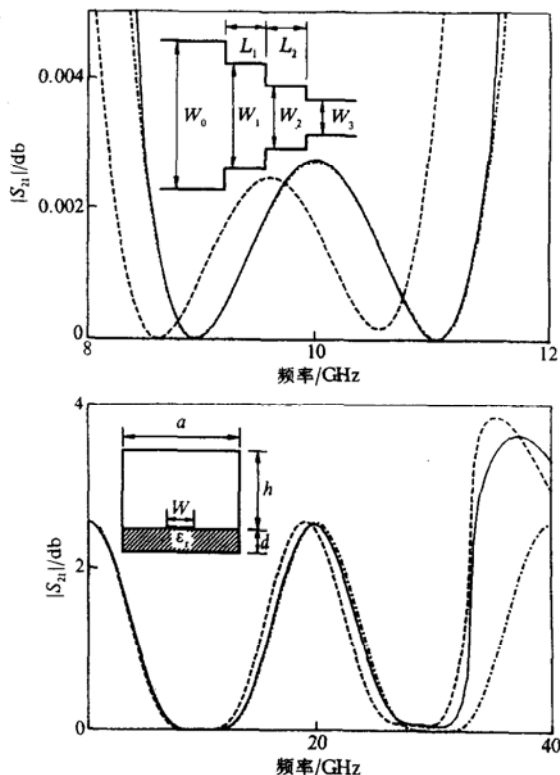


图 2 二节微带阻抗变换器的功率衰减系数
 $\epsilon_r = 2.2$, $a = 8.28$, $h = 2.54$, $d = 0.254$ mm; 原型(点划线): 带宽 30%, 驻波比 1.05, 中心频率 10GHz; 本文方法设计结果(实线): $W_0 = 5.740$, $W_1 = 3.637$, $W_2 = 1.428$, $W_3 = 0.8023$, $L_1 = 5.012$, $L_2 = 5.171$ mm; 保角变换方法设计结果(虚线): $W_0 = 5.740$, $W_1 = 3.607$, $W_2 = 1.401$, $W_3 = 0.7892$, $L_1 = 5.248$, $L_2 = 5.388$ mm

减系数也专门画出。可以看到,采用本文定义设计的结果与变换器原型的特性吻合得非常好,在通带内它们几乎一致,而采用保角变换法得到特性阻抗值所进行的设计则引起边界频率0.5GHz的误差。这个例子表明,图1(b)中的等效电路及其据此定义的特性阻抗的确对不连续性提供了精确的描述。

3 结论

总结本文定义的主要特点如下:(1)通过本文的定义,特性阻抗的概念在微波元件设计和综合中起了它本来应起的作用,即描述传输线之间的不连续性;(2)本文提出的定义是唯一的,不在于它能唯一地确定特性阻抗值;而在于用特性阻抗值及其等效电长度参量能够唯一地描述一个给定不连续性的特性;(3)只要在一个级联不连续性系统中,单个不连续性都能视为一个二端口网络,本文的定义是精确和普遍的。现有的定义只能在一定范围内近似有效,并且人们总是面对这样的问题:所采用的某个特殊定义是否“恰当”。而本文定义适用于任何形式的传输结构,包括TEM波或准TEM波传输线、平面传输线、常规波导等等。

作者相信,在本文所叙述的理论之后,人们可以充分利用各种全波数值分析方法改进无源元件的设计精度。对非TEM波和非准TEM波传输结构,本文的理论或许是既能给出合理设计又具有普遍性的一种值得推荐的方法。

参 考 文 献

- 1 Bianco B, Panini L, Parodi M *et al.* Some considerations about the frequency dependence of the characteristic impedance of uniform microstrips. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1978, 26(3):182~185
- 2 Jansen R H, Kirschning M. Arguments and an accurate model for the power-current formulation of microstrip characteristic impedance. *AEÜ*, 1983, 37(3):108~112
- 3 Jansen R H. Unified user-oriented computation of shielded, covered and open planar microwave and millimeter-wave transmission line characteristics. *Proc IEE MOA*, 1979, 3:14~22
- 4 Matthaei G L, Young L, Jones E M T. *Microwave Filters, Impedancematching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964
- 5 Xu Y S, Marquardt J, Omar A S. Analysis of discontinuities of microstrip and suspended substrate lines. *IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig*, 1992, 413~416