

无损均匀传输线的 PSpice 仿真分析

李世琼, 宗 伟

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 在正弦稳态情况下, 无损均匀传输线终端开路、短路或接纯电抗时, 传输线上会出现驻波。无损线的特性阻抗是纯电阻, 所以负载匹配时沿线任一点的电压和电流同相位。PSpice 中的无损线模型与有损线模型有很大区别, 无损线的长度用归一化长度表示。应用 PSpice 可以对无损线进行时域仿真和频域仿真, 时域仿真可以获得线上任一点的电压、电流、瞬时功率随时间变化的曲线, 频域仿真可以获得线上任一点的频率特性。

关键词: 无损均匀传输线; PSpice 模型; 时域特性; 频率特性

中图分类号: TN811+.5; TN74

文献标识码: A

文章编号: 1008-0686(2008)01-0095-04

Simulation of Lossless Uniform Transmission Lines by PSpice

LI Shi-qiong, ZONG Wei

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In sinusoidal steady-state, if the terminal of lossless uniform transmission lines is open circuit or short circuit or reactance load, the voltage and current of the transmission lines are all standing waves. If the lossless uniform transmission lines and load are match, every point's voltage and current are same phase. Using the model of lossless uniform transmission lines in PSpice, the time characteristic and frequency characteristic should be obtained.

Keywords: lossless uniform transmission lines; PSpice model; time characteristic; frequency characteristic

两根传输线单位长度的电阻 R_0 、电感 L_0 、电容 C_0 、电导 G_0 称为传输线的原参数。如果沿线原参数到处相等, 则称为均匀传输线; 当 R_0 和 G_0 不为零时, 称为有损均匀传输线。当 R_0 和 G_0 均为零时, 称为无损均匀传输线。在电子工程实际中因为工作频率较高, 所以 $\omega L_0 \gg R_0$, $\omega C_0 \gg G_0$, 可将损耗略去不计, 即 $R_0 = 0$, $G_0 = 0$ 。无损线的时域和频域特性与有损线有很大区别。

1 均匀传输线的方程及无损线的解答

均匀传输线方程是一组偏微分方程

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若无损均匀传输线始端电源是角频率为 ω 的正弦时间函数, 在电路达到稳态的情况下, 沿线的电压、电流是同一频率的正弦时间函数。若传输线终端开路、短路或接纯电抗负载, 传输线上的电压、电流均为驻波。此时传输线方程的解称为驻波解答。

$$\left. \begin{aligned} u_{oc} &= \sqrt{2} U_2 \cos(\beta x) \sin(\omega t) \\ i_{oc} &= \frac{\sqrt{2} U_2}{Z_c} \sin(\beta x) \cos(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收稿日期: 2007-07-06; 修回日期: 2007-08-02

作者简介: 李世琼(1973-), 女, 硕士, 讲师, 从事电路、电磁测量的科研和教学工作, E-mail: lishiqiong@ncepu.edu.cn

宗 伟(1959-), 女, 硕士, 教授, 从事电路、信号与系统的科研和教学工作。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\left. \begin{aligned} u_{sc} &= \sqrt{2}Z_c I_2 \sin(\beta x) \cos(\omega t) \\ i_{sc} &= \sqrt{2}I_2 \cos(\beta x) \sin(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)和式(3)是无损均匀传输线终端开路 and 短路时的驻波解答。式中 U_2 为传输线终端的开路电压, I_2 为传输线终端的短路电流。 $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$ 是无损线传播常数的虚部, $Z_c = \sqrt{L_0 / C_0}$ 是无损线的特性阻抗。若传输线终端接纯电抗负载, 可将纯电抗等效为一段开路或短路的无损线, 得到与式(2)或(3)类似的解答。

无损均匀传输线终端接特性阻抗时, 从沿线任何位置向终端看的输入阻抗总等于特性阻抗。此时传输线工作在匹配状态, 沿线任一点的电压、电流均同相位, 并且电压、电流幅值不衰减, 相位随线长而变化, 其电压表达式为 $\dot{U} = U_1 e^{-j\beta x}$, 式中 U_1 为始端电压有效值, x 为线上某点到始端的距离。

2 无损均匀传输线的 PSpice 模型

从理论上讲, 只需将有损均匀传输线的模型中令 $R_0 = G_0 = 0$ 即可看作无损均匀传输线, 但实际的无损线往往并没有给出原参数, 而是给定了特性阻抗, 这时若要用有损均匀传输线的模型表示就有困难。

PSpice 提供的无损均匀传输线模型位于 PSpice/analog 库, 模型名称为 T, 需要设置的元件特性参数及其含义如表 1 所示。

表 1 无损均匀传输线模型的参数

参数	F	NL	Z0
含义	频率	归一化长度	特性阻抗

表 1 中 $NL = L / \lambda_0$, L 为传输线的实际长度, λ_0 为根据无损线参数确定的波长, λ_0 与电源频率无关, 它由无损线模型参数里的频率 F 确定, $\lambda_0 = v / F$, v 为电磁波在传输线中传播的速度。则归一化长度 NL 与实际长度 L 的关系为:

$$NL = \frac{L \cdot F}{v} \quad (4)$$

所以使用无损均匀传输线模型时, 需要首先计算传输线的归一化长度。

传输线参数里的频率 F 只用于计算 NL , 与电源的频率没有必然关系。设电源频率为 f , 则

$$L = NL \cdot \lambda_0 = NL \cdot \lambda \cdot \frac{f}{F} \quad (5)$$

式(5)中 λ 表示电源信号的波长。

3 PSpice 仿真分析

3.1 时域仿真

[例 1] 空气中一段无损耗传输线的特性阻抗 $Z_c = 10 \Omega$, 长度为 1m 。当频率为 300MHz 和 150MHz 时, 画出终端开路、短路、接匹配负载及接任意负载时, 无损线上的电压和电流波形。

PSpice 仿真电路如图 1 所示。图中负载 $R_2 = 100\text{M}\Omega$, 相当于终端开路。匹配负载时 R_2 取 10Ω , 终端短路时 R_2 取 0 。图 1 中电源为正弦电源, 幅值 10V , 频率 300MHz , 电阻 R_4 充当电源内阻。T1、T4、T6、T5 都是无损均匀传输线模型, 模型参数的频率均设为 300MHz , 归一化的长度分别为 $0.1, 0.15, 0.25, 0.35$ 。这样它们左侧结点距终端的距离分别为 $0.1\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.85\lambda$ 。

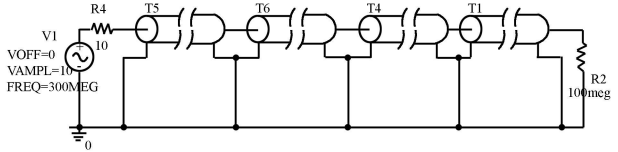


图 1 PSpice 仿真电路

对图 1 电路进行时域扫描 (Time Domain), 得到的电压、电流曲线如图 2 至图 4 所示。

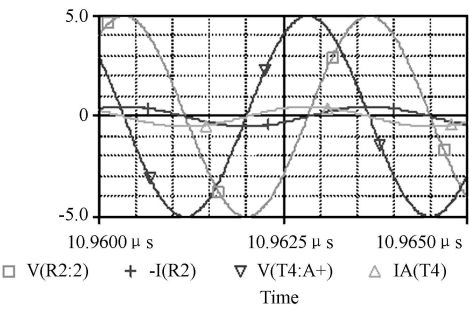
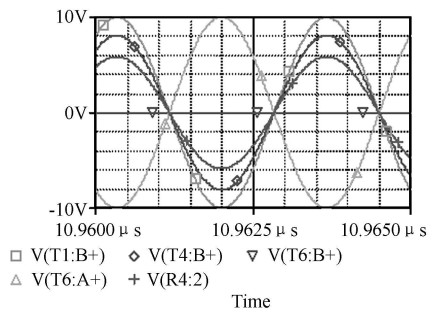


图 2 负载匹配时到终端 $x = 0, 0.25\lambda$ 处电压、电流波形

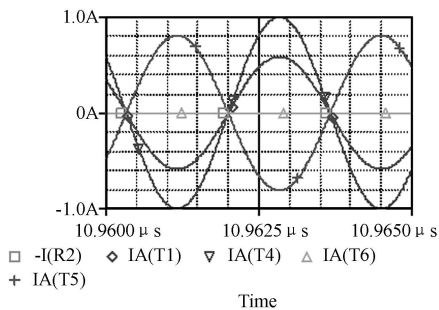
图 2 是负载匹配时无损线上的电压和电流波形, 其中图例为“□”和“+”的曲线是终端处的电压和电流, 图例为“ ”和“△”的曲线是到终端距离为 0.25λ 处的电压和电流。由图 2 可看出此时无损线上每一点上的电压和电流都同相位, 并且沿线电压和电流的幅值不衰减。用光标定位功能可读出电压幅值为 5V , 电流幅值为 0.5A , 输入阻抗 $Z_{in} = 10\Omega$ 。

图 3 是无损线空载时到终端距离 $x = 0, 0.1\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.85\lambda$ (图例亦按此顺序排列, 以下同) 处的波形, 其中图 3(a) 为电压波形, 图 3(b) 为电流波形。由图 3 可直观地看到驻波的特点, 终端开路

时, 到终端距离 $x = 0, 0.5\lambda$ 处, 亦即 T1 的右侧结点 (T1 的 B+ 结点)、T6 的左侧结点 (T6 的 A+ 结点) 为电压的波腹即电流的波节; $x = 0.25\lambda$ 处, 亦即 T4 的左侧结点, 为电压的波节和电流的波腹。波腹处的幅值始终为极值, 波节处的幅值始终为零。终端短路和负载为纯电抗时的分析方法与此类似, 不再赘述。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图 3 空载时到终端距离 $x = 0, 0.1\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.85\lambda$ 处电压、电流波形

例 1 中, 当频率为 150MHz 时, 架空线上信号的波长为 2m, 若仍旧分析 $x = 0, 0.25\lambda$ 处的波形, 则需要将图 1 中无损线模型参数的频率也改为 150MHz, 仿真结果完全类似, 但此时传输线的长度和信号的周期均是 300MHz 时的两倍。

若图 1 中无损线模型参数没有修改, 只有电源频率降低为 150MHz, 那么 T1, T4, T6, T5 左侧结点距终端的距离分别为 $0.05\lambda, 0.125\lambda, 0.25\lambda, 0.425\lambda$, 无损线空载时各结点的电压波形如图 4 所示。将图 4 与图 3(a) 对比可看到各点电压明显不同, 图 4 表明 T6 的左侧为电压的波节。

若取图 1 中参数为 $R = 20\Omega, L = 0.01\mu\text{H}$, 其它设置均不变, 那么到终端距离处的电压波形如图 5 所示, 不再是驻波。

3.2 频域仿真

对无损线进行频域仿真, 可以读出不同频率时

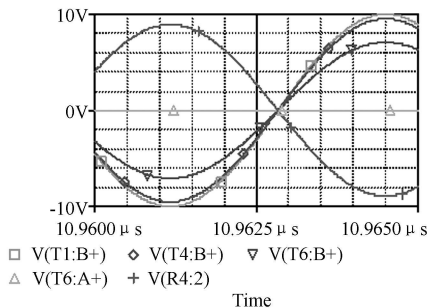


图 4 图 1 中只将电源频率改为 150MHz 后各点的电压

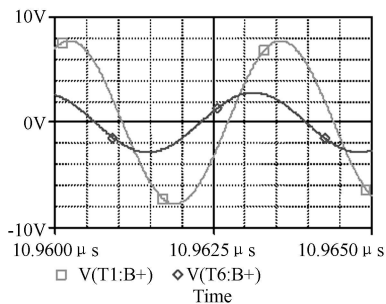
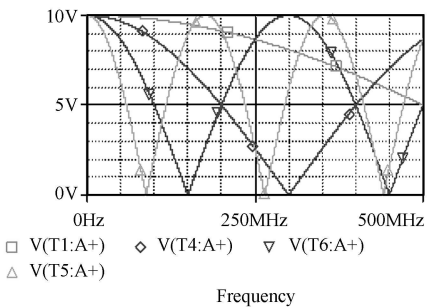
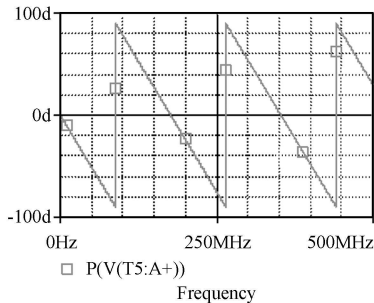


图 5 图 1 电路接其它负载时电压波形



(a) T1、T4、T6、T5 左侧结点的幅频特性



(b) T5 左侧结点的相频特性

图 6 图 1 电路的频率特性

线上的各点电压、电流的相量。将图 1 电源类型改为 VAC, 电源的有效值为 10V, 内阻 10Ω , 电路其它参数的设置均不变。进行交流扫描, 频率范围为 1Hz ~ 500MHz, 图 6(a) 为 T1、T4、T6、T5 左侧结点的幅频特性, 图 6(b) 为 T5 左侧结点的相频特性。

(下转第 109 页)

参考文献:

- [1] 康华光. 电子技术基础模拟部分(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 2.
- [2] 王传新. 思维流程图教学法在模拟电子电路教学中的应用[J]. 南京: 电气电子教学学报, 1998, Vol 20(4).
- [3] 赵一群. 从放大电路谈模拟电子技术的教学[J]. 南京: 电气电子教学学报, 2001 Vol 23(6).

- [4] 闫洪亮, 于涛. 模拟电子技术课程难点建议[J]. 河南: 平顶山师专学报, 1999 Vol 14(4).
- [5] 赵明富. EDA 技术与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 12.
- [6] [美] Charles K. Alexander 等著. 电路基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [7] 杨坤德等. 基本放大电路多媒体课件研制[J]. 南京: 电气电子教学学报, 1999, Vol 21(3).

(上接第 97 页李世琼等文)

使用光标定位功能, 由图 6 可以读出空载时 T5 左侧(亦即传输线始端)的电压相量。频率为 300MHz 时, $\dot{U}_{T5, A+} = 5.8862 \angle 53.968^\circ V$; 频率为 150MHz 时, $\dot{U}_{T5, A+} = 8.8959 \angle 26.566^\circ V$ 。

[例 2] 两段特性阻抗分别为 Z_{c1} 和 Z_{c2} 的无损线相连, 如图 7 所示。已知终端所接负载, $Z_2 = (50 + j50) \Omega$, $Z_{c1} = 75 \Omega$, $Z_{c2} = 50 \Omega$ 两段线的长度都已知为 0.2λ 。试求 1—1' 端口的输入阻抗。

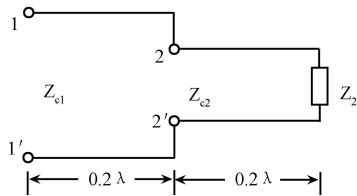


图 7 例 2 电路图

不妨设电源电压有效值为 10kV, 电源内阻 10Ω , 电源频率和无损线参数的频率均为 50Hz, 将 Z_2 的感抗折算为等效电感。对电路进行频域仿真得到 1—1' 处的电压、电流(关联参考方向)的频率特性如图 8 所示。坐标 1 为幅频特性, 坐标 2 为相频特性。使用光标定位功能可读出 50Hz 处电压相量为 $\dot{U}_{1-1'} = 8.9784 \angle 6.3087^\circ kV$, 电流相量 $\dot{I}_{1-1'} = 145.983 \angle -42.518^\circ A$, 可计算得输入阻抗 $Z_{1-1'} = \dot{U}_{1-1'} / \dot{I}_{1-1'} = (40.5 + j46.3) \Omega$ 。

4 结论

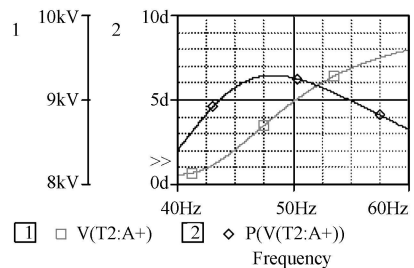
(1) PSpice 提供了无损均匀传输的模型, 需要设置的参数有频率、归一化长度和特性阻抗, 其中频率与电源的频率无关, 只是用于计算归一化长度。

(2) 对无损均匀传输线进行时域分析, 可得到线上任一点的电压、电流、瞬时功率(直接选择 PSpice 中的瞬时功率变量即可)波形, 根据波形可以观察幅

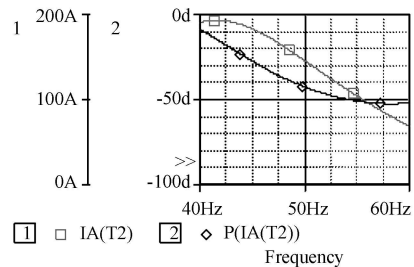
值、相位的变化规律。

(3) 对无损线进行频域分析, 可得到线上任一点的频率特性, 使用光标定位功能可读出任意频率时线上某一点的电压、电流相量。

(4) 一段确定长度的无损均匀传输线, 其电压、电流的分布既与负载有关, 也与电源的频率有关。



(a) 电压的频率特性



(b) 电流的频率特性

图 8 例 2 电路处电压、电流的频率特性

参考文献:

- [1] 李世琼, 宗伟. 有损均匀传输线的 PSpice 仿真分析[J]. 南京: 电气电子教学学报, 2007, 29(03)
- [2] 梁贵书, 任宇, 崔翔. 抛物线型有损耗非均匀线的灵敏度分析[J]. 北京: 华北电力大学学报, 2004, 31(3): 19-22
- [3] 邱关源, 罗先觉. 电路. 第 5 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [4] 王辅春. 电子电路 CAD 与 OrCAD 教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005