

PW 级 Z 箍缩驱动源指数传输线的电路模拟*

曾 正 中

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 采用 PSPICE 软件,以 PW 级 Z 箍缩驱动源指数传输线为例,模拟分析了用有限多段分段阶跃变阻抗传输线序列模拟连续指数变阻抗传输线时,直角波、半周期正弦、全周期正弦平方等入射脉冲的电压和功率传输效率与分段数以及脉冲参数的关系,并计算了水电阻率对功率传输效率的影响。模拟结果表明:直角波波头的电压和功率传输效率随分段数增大而迅速趋近于理想传输线变压器的值;但对于非直角波入射脉冲而言,分段数并非越多越好,而是存在一个与传输线电长度和输入脉冲波前时间相应的最佳值;随着水电阻率下降,功率传输效率加速降低。

关键词: 电路模拟; 指数传输线; 脉冲传输; 传输效率; Z 箍缩等离子体驱动源

中图分类号: TL503 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20112307.1985

变阻抗传输线是新型 Z 箍缩驱动源系统的一种关键部件^[1-2],它的传输性能直接关系到整个系统的性能和造价,输出波形及效率的计算是其分析设计的关键环节。尽管 CST 等电磁场计算软件可以处理变阻抗传输线的传输问题,但电路模拟在变阻抗线的分析设计中仍然占有重要的地位,因为它可以从装置全系统的角度反映变阻抗线与其它组成部分之间的相互作用。美国在变阻抗传输线的电路模拟方面发展较早,至今仍在用 TL-CODE 和 SCREAMER 等专用电路模拟软件进行脉冲功率系统和部件的电路模拟分析^[1-4]。本文尝试在通用电路模拟软件 PSPICE 基础上,探索变阻抗传输线电路模拟的有效方法及参数选取。

1 分段阶跃变阻抗线逼近连续变阻抗线

设连续变阻抗传输线总长度为 l ,两端正确匹配。将其按长度均匀划分为 N 段,从输入端到输出端各分点处的阻抗值依次为 $Z_1, \dots, Z_{n1}, Z_{n2}, Z_{n3}, \dots, Z_2$,如图 1 所示。现设想用 N 段长度相同、阻抗不同、总长度为 l 的分段恒阻抗阶跃变阻抗线,组成一个传输线序列,即分段阶跃变阻抗模拟传输线序列或模拟序列,来模拟该连续变阻抗线,各段恒阻抗线的阻抗值以其相应变阻抗线分段两端阻抗值的几何平均值代表。根据传输线主模理论^[5],对直角波波头,该模拟序列某分点 n 处(不含输入、输出端点)的透射系数为

$$\rho_n = \frac{2 \sqrt{Z_n Z_{n+1}}}{\sqrt{Z_{n-1} Z_n} + \sqrt{Z_n Z_{n+1}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{Z_{n-1}/Z_{n+1}}} \quad (1)$$

假设该连续变阻抗线的阻抗变化曲线可表示为 $Z(x) = Z_1 f(x)$,并且在 N 充分大时, $\sqrt{Z_{n-1}/Z_{n+1}}$ 可表示为

$$\sqrt{Z_{n-1}/Z_{n+1}} = 1 - 2F(l)k' \frac{l}{N} + o(\frac{l}{N}) \quad (2)$$

式中: $F(l)$ 是与连续变阻抗线的分点位置无关的线长度 l 的函数; k' 为实常数; $o(l/N)$ 是关于 l/N 的高阶无穷小量。则式(1)可简化为

$$\rho_n = \frac{1}{1 - F(l)k'l/N} \quad (3)$$

即透射系数与分点位置无关,因此该模拟序列总的透射系数可以写为

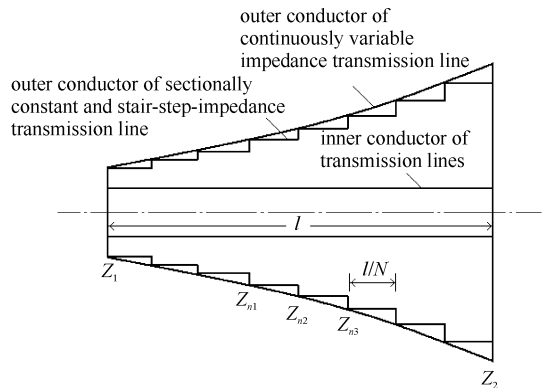


Fig. 1 Schematic of serial, sectional transmission line with impedances constant in each section but stair-step-varied between sections

图 1 分段阶跃变阻抗线序列逼近连续变阻抗线示意图

* 收稿日期:2010-12-10; 修订日期:2011-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50637010)

作者简介:曾正中(1956—),男,博士,研究员,主要从事脉冲功率技术研究;zeng_zz@126.com。

$$\rho_N = \frac{2 \sqrt{f(l/N)}}{1 + \sqrt{f(l/N)}} \left[\frac{1}{1 - F(l)k' \frac{l}{N}} \right]^{N-1} \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2} f(l - l/N)}} \quad (4)$$

式中:右边第 1 个因子对应输入端处的透射系数;第 3 个因子对应输出端处的透射系数。当 $N \rightarrow \infty$ 时,有

$$\rho = \lim_{N \rightarrow \infty} \rho_N = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{1 - F(l)k' \frac{l}{N}} \right]^{N-1} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[1 + F(l)k' \frac{l}{N} \right]^N = e^{F(l)k'l}, \quad (5)$$

可被视为连续变阻抗线的前向波电压变比(传输效率)。对于指数线^[5], $Z(x) = Z_1 e^{kx}$, $F(l) = 1, k' = k/2$, 则

$$\rho = e^{kl/2} = \sqrt{Z_2/Z_1} \quad (6)$$

此结果与理想变压器的电压变比相同,此时波头(瞬时最大)功率传输效率为 1。

还可以证明,对于指数线,若各段恒阻抗线的阻抗值以其相应变阻抗线分段两端阻抗值的算术或方根平均值代表,也将得到式(6)的结果。这是容易理解的,因为分段数充分大时,上述几何、算术及方根平均值趋于相同。但是,当不满足充分大的条件时,差别是明显的。因此,对指数线宜采用几何平均,因为此时它与另一个合理的代表阻抗值——各段中点的阻抗值相等。

2 指数线的电路模拟

取阻抗按指数变化的水线,其电长度 $u = 1\ 234\ \text{ns}$, $Z_1 = 16.2\ \text{m}\Omega$, $Z_2 = 260\ \text{m}\Omega$ ^[1]。入射脉冲为 3 种波形:直角波; $\sin \omega_0 t, 0 \leq t \leq \pi/\omega_0$, 其余时间为 0; $[1 - \cos(1.818\omega_0 t)]/2$ 或 $\sin^2(1.818\omega_0 t/2), 0 \leq t \leq 2\pi/(1.818\omega_0)$, 其余时间为 0。其中第 2, 3 种波形 10% ~ 90% 的上升时间相同,用 PSPICE 的 E 类受控源实现;直角波用 PSPICE 的 PWL 电源模拟。按此方法构成分段阶跃变阻抗模拟传输线序列,其末端用阻值为 Z_2 的电阻匹配,始端用阻值为 Z_1 的电阻与理想电压源串联进行匹配,模拟电路原理如图 2 所示。计算时用几何平均求各分段的代表阻抗。

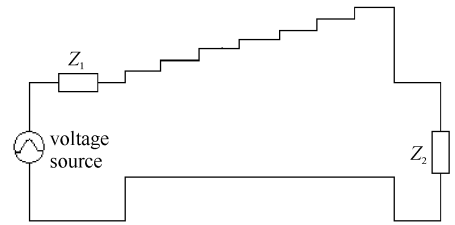


Fig. 2 Schematic of simulation of variable impedance transmission line with PSPICE
图 2 PSPICE 模拟变阻抗线电路原理图

对于直角波,模拟的波头电压和功率传输效率随分段数增大而迅速提高,并且趋近于理想变压器的值,这与前面的解析分析完全一致,如表 1 等 4 列所示。

对于第 2, 3 种脉冲波形和每个分段数,改变 ω_0 从而移动脉冲的频谱,可以看到每个分段数都存在一个最大电压和功率传输效率,与之相应存在一个最小 ω_0 , 当进一步增大 ω_0 时,电压和功率传输效率保持稳定不再增加。表 1 中第 2~3 列列出了 2 种波形对于不同分段数的模拟最大功率传输效率及其相应最小 ω_0 , 其中对应每个分段数,上面一行数值是最小 ω_0 , 下面一行数值是模拟最大功率传输效率,后者与相同分段数的直角波波头功率传输效率相等。

从表 1 数据可以看到,为使模拟所得功率传输效率达到最大值,对第 2, 3 种波形,分段数与 ω_0 之间分别存在约束关系

$$N/\omega_0 = \pi/2, \quad N/\omega_0 = 1.818\pi/4 \quad (7)$$

不难验证,式(7)等价于

$$\tau_i/u' = 2, \quad N = 2u/\tau_i \quad (8)$$

式中: u' 为各分段的波传输时间; τ_i 为输入脉冲的波前时间。

式(8)中第 1 式物理含义非常清楚,即输入脉冲的波前时间应等于各分段波传输时间的 2 倍,这样恰好能避免以分段阶跃变阻抗线序列模拟连续变阻抗线所造成的阻抗跃变点处反射的影响,从而获得最大的模拟传输效率。第 2 式则说明,对于一定的

表 1 不同分段数、不同脉冲波形的模拟最大功率传输效率和相应最小 ω_0 值

Table 1 Simulated maximum power efficiency and corresponding minimum ω_0 for different sectioning numbers and pulses

N	$\sin(\omega_0 t)$	$\frac{1 - \cos(1.818\omega_0 t)}{2}$	front of rectangular wave
10	63.36	6.98	83.33
	83.33	83.88	
20	12.8	13.9	91.04
	91.04	91.04	
40	25.5	27.9	95.36
	95.36	95.36	
80	51.0	55.8	97.62
	97.62	97.62	
160	102	112	98.81
	98.81	98.81	

传输线电长度和输入脉冲波前时间,存在一个最佳分段数,它恰好能避免阻抗跃变的影响,从而获得最大的模拟传输效率。

例如,取文献[1]参数,此时 $\tau_f = 112.2 \text{ ns}$,按式(8)第 2 式得到最佳分段数为 $N = 22 (2u' = 112.2 \text{ ns})$,相应功率传输效率为 91.81%。而如果分别取 $N = 20$ 和 $N = 40$,对应 $2u' = 123.4$ 和 61.7 ns ,功率传输效率分别为 91.04%和 89.76%,由于 $2u'$ 与 τ_f 不相等,模拟所得传输效率均低于最佳分段时的值。

可以验证,对其它非直角波和传输线,用式(8)确定分段数后,其模拟功率传输效率也等于相同分段数的直角波波头功率传输效率。对直角波而言,波前时间为 0,按式(8)分段数应为无穷大,也是正确的。

3 电路模拟与近似解析解的比较

根据文献[5],可得指数传输线前向波瞬时输出功率效率的拉普拉斯变换一级近似为

$$\eta(p) = 1 - \frac{k^2 u}{8T^2} \frac{1}{p} \tag{9}$$

式中: $p = \sigma + j\omega$,其中, $\sigma > 0$,为具有频率量纲的任意正实常数, $\omega > 0$,为频率; T 为波在传输线单位长度上的传输时间,近似条件可写为 $\omega > |k/T|$ 。

取逆变换后再作合理近似,可得第 2,3 种波形的输出功率传输效率分别为

$$\eta_{p_2} = \left[1 - \frac{\ln^2(Z_2/Z_1)}{8u\omega_0} \right]^2, \quad \eta_{p_3} = \left[1 - \frac{\ln^2(Z_2/Z_1)}{16u} \frac{\pi}{1.818\omega_0} \right]^2 \tag{10}$$

由式(10)可算得 2 种波形在表 1 中所列最小 ω_0 下的功率传输效率,及相应最佳分段数情况下的电路模拟最大功率效率,结果如表 2 所示。

表 2 两种波形在不同 ω_0 下的功率传输效率与相应最佳分段数情况下的电路模拟结果

Table 2 Power transmission efficiency from Eq. (10) for different ω_0 compared with that from circuit simulation under corresponding conditions

N	minimum ω_0	power efficiency	minimum ω_0	power efficiency	maximum power
	for N with pulse 2/MHz	from Eq. (10) (left eq.)/%	for N with pulse 3/MHz	from Eq. (10) (right Eq.)/%	efficiency from circuit simulation
10	6.36	76.96	6.98	81.61	83.88
20	12.7	88.09	14.0	90.60	91.04
40	25.5	93.97	27.9	95.22	95.36
80	51.0	96.96	55.8	97.60	97.62
160	102	98.48	112	98.80	98.81

从表 2 可见,电路模拟最大效率与近似解析解在脉冲的 ω_0 较低时相差比较明显,但随着 ω_0 增大,差距很快缩小。其原因主要是脉冲频谱随 ω_0 增大而上移,使式(10)的成立条件 $\omega > |k/T|$ 更强,结果更接近主模理论下的正确解。而电路模拟在消除了阻抗跃变影响之后,除主模假设外并无其它特殊限定,因此高频时的近似解析解与电路模拟结果都趋于主模理论下的正确解。由此可以进一步推断,根据式(8)选取电路模拟分段数所得的模拟结果是原连续变阻抗线在主模理论下的正确解。

4 水电阻率对功率传输效率的影响

在各分段恒阻抗线的端部,对地接入模拟泄漏电阻,模拟水电阻率对功率传输效率的影响。各段模拟泄漏电阻的阻值按照整体径向指数变阻抗传输线的波阻抗变化规律进行相应设置,其计算公式为

$$R_n = \frac{\rho_w}{\Delta r} \frac{Z_1}{Z_0} e^{k(n-0.5)\Delta r} \tag{11}$$

式中: ρ_w 为水的电阻率; Δr 为各段长度; Z_0 为水介质的波阻抗 (42.15Ω); $n = 1, 2, 3, \dots, N$ (1 对应输入端, N 对应输出端)。表 3 给出了水电阻率从 $5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 降低到 $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 时的功率传输效率模拟结果,参数分别为 $u = 1234.2 \text{ ns}$, $Z_1 = 16.2 \text{ m}\Omega$, $Z_2 = 260 \text{ m}\Omega$, $k = 0.0674/\text{m}$ 。对于第 2 种波形, $\omega_0 = 14 \text{ MHz}$, $\tau_f =$

表 3 水电阻率对功率传输效率影响模拟结果

Table 3 Simulation results of the effect of water resistivity on power efficiency

$\rho_w / (\text{M}\Omega \cdot \text{cm})$	$\eta / \%$
∞	91.81
5	88.48
4	87.67
3	86.34
2	83.73
1	76.57

112.2 ns, $N=22$ 。从表 3 可见,水电阻率对功率传输效率的影响显著,随着水电阻率的下降,功率传输效率加速降低。

若采用 PSPICE 有损传输线模型模拟水电阻率的影响(输入参数较使用集总泄漏电阻多),则所得功率传输效率仅有微小增加,水电阻率对功率传输效率影响的规律则不变。

5 结 论

变阻抗传输线的电路模拟与解析求解方法一样,都是基于主模或分布参数理论的,其差别主要在于前者引入了阻抗阶跃变化的分段点,后者则依赖于高频近似。在解决了消除阻抗阶跃变影响的问题之后,根据高频下二者趋于相同的事实可以推断,按式(8)选取最佳分段数之后,电路模拟的结果是原连续变阻抗线在主模理论下的正确解,而这与脉冲的频率无关。对于变阻抗传输线的电路模拟而言,分段数并非总是越多越好,而应当按式(8)确定,这样的模拟结果才是可信的。对直角波而言,波前时间为 0,故分段数应为无穷大。但是在工程实际中,直角波是不存在的,这时分段数就不是越多越好了。采用本文的分段方法,模拟计算了水电阻率对功率传输效率的影响,结果表明随着水电阻率的下降,功率传输效率加速降低。本文的结果为含有变阻抗传输线的脉冲功率系统的电路模拟提供一条有效便捷的途径。

参考文献:

- [1] Stygar W A, Cuneo M E, Headley D I, et al. Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators [J]. *Phys Rev Special Topics Accel and Beams*, 2007, **10**: 030401.
- [2] Welch D R, Genoni T C, Rose D V, et al. Optimized transmission-line impedance transformers for petawatt-class pulse-power accelerators [J]. *Phys Rev Special Topics Accel and Beams*, 2008, **11**: 030401.
- [3] Kiefer M L, Widner M M. SCREAMER—a single-line pulsed power design tool[C]//Proc of the 5th IEEE International Pulsed Power Conference. 1985: 685-688.
- [4] 宋盛义, 仇旭. TLCODE 模拟方法介绍[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 614-618. (Song Shengyi, Qiu Xu. Introduction to TLCODE simulation method. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 614-618)
- [5] Lewis I A D, Wells F H. Millimicrosecond pulse techniques[M]. Beijing: Science Press, 1965: 80-82.

Circuit simulation of exponential transmission line for petawatt Z-pinch plasma drivers

Zeng Zhengzhong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-1, Xi'an 710024, China)

Abstract: It was demonstrated, based on the PSPICE circuit simulation, that the sectioning number for the circuit simulation of an exponential transmission line should be determined as twice the line's one-way electromagnetic wave transport time (electric length) divided by the wave-front of input pulse, owing to elimination of the wave reflections caused by artificial impedance discontinuity in the line's circuit simulation model, which employs a serial and sectional transmission line with impedances constant in each section but stair-step-varied between sections, and with total electric length the same as that of the exponential line under simulation. A pulse of 112.2 ns wave-front propagates through an exponential water transmission line of 1 234.2 ns one-way transport time will give the best sectioning number of 22, when the constant impedance of each section is given by the geometric mean of the two ends' impedances of the corresponding section on the exponential line under simulation. This sectioning rule is equivalent to the statement that the two-way transport time of each section should be equal to the input pulse's wave-front.

Key words: circuit simulation; exponential transmission line; pulse transmission; transmission efficiency; Z-pinch plasma driver