

文章编号: 1001-4322(2008)05-0867-04

水介质同轴线型方波脉冲延时线*

高 峰, 石金水, 李 劲

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了水介质同轴型方波脉冲延时线的基本原理和基本特性参数, 并对延时线传输脉冲的脉冲损耗和脉冲畸变的主要影响因素进行了理论分析。在理论分析的基础上, 设计、建立了一套延迟 500 ns、阻抗为 12 Ω 的水介质同轴线型方波脉冲延时线, 并进行了初步的实验研究。实验结果表明: 该延时线输入方波脉冲前沿为 18 ns, 输出方波脉冲前沿增加到 26 ns; 方波脉冲幅度损耗率为 9.6%; 延迟时间为 476 ns。

关键词: 同轴线; 脉冲延时线; 水介质; 衰减率; 趋肤效应

中图分类号: TM836 **文献标识码:** A

近年来, 高重复率的脉冲串广泛应用于加速器、高功率微波等研究领域。高重复频率脉冲发生器的负载一般是感应腔^[1-2]、二极管电子枪^[3]等, 这些负载是非线性元件, 很难与脉冲发生器的输出阻抗完全匹配, 这就不可避免地要产生反射脉冲。当脉冲串的第一个脉冲到达负载时, 就会产生一个反射脉冲经由脉冲形成线回到负载而影响第二个主脉冲的波形和幅度, 为了消除这个反射脉冲对主脉冲的影响, 需要对反射脉冲进行瞬态隔离^[4], 美国洛斯阿拉莫斯实验室的 PHERMEX 双脉冲(脉冲间的间隔为 20 ns)注入器用 70 ns 电长度的电缆来隔离反射脉冲^[5]。当需要隔离反射脉冲数百 ns 时, 若仍然用电缆进行瞬态隔离, 传输主脉冲的脉冲幅度损耗和脉冲波形畸变都会很大, 且几何长度会很长。水介质同轴线型方波脉冲延时线应用于对反射脉冲进行瞬态隔离, 本文主要对该延时线传输主脉冲的脉冲幅度损耗和脉冲波形畸变进行了分析, 并进行了初步的实验研究。

1 水介质同轴线型方波脉冲延时线理论分析

1.1 基本参数计算

水介质同轴线型方波脉冲延时线是传输介质为去离子水的同轴传输线, 水介质的相对介电常数比较高(约 81), 延时线的几何长度就不会太长。脉冲在延时线中的传输主要是以 TEM 模式电磁波传播的, 可用分布参数电路的方法进行分析。延时线的等效电路图如图 1 所示, 其中 R_0, L_0 是单位长度串联的电阻和电感; G_0, C_0 是单位长度并联的电导和电容。

利用基尔霍夫第一定律和基尔霍夫第二定律, 分析延时线的等效电路, 可以得到著名的电报方程^[6]

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

经过对电报方程分析, 可以得到水介质同轴线型方波脉冲延时线基本参数的近似计算公式。其特性阻抗 $Z = (20/3)\ln(b/a)$, 其中, a 为内导体的外直径, b 为外导体的内直径。电磁脉冲在延时线中的传播速度, $v = c/9$, 其中, c 为光速。电长度是表征脉冲延时线的重要参数, 它决定瞬态隔离反射脉冲的时间, 1 μs 电长度的脉冲延时线可以在第一个主脉冲后 2 μs 的时间长度内隔离反射脉冲, 避免反射脉冲对后续主脉冲的影响。根据电磁波在延时线中的传播速度和延时线的几何长度可计算出脉冲延时线的电长度 $\tau = l/v$, 其中, l 为延时

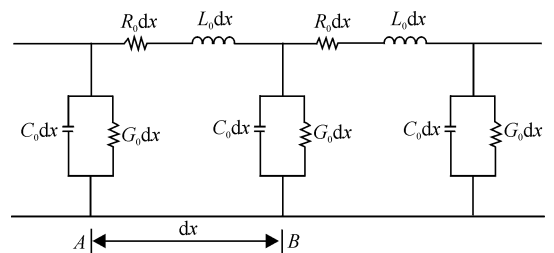


Fig. 1 Equivalent circuit diagram of delay-line

图 1 延时线等效电路图

* 收稿日期: 2007-09-25; 修订日期: 2008-04-07

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 高峰(1979—), 男, 助理研究员, 从事脉冲功率技术研究; gaozhenfeng@sina.com。

线的几何长度。

1.2 损耗畸变分析

方波脉冲通过水介质同轴线型方波脉冲延时线时,脉冲幅度会有一定程度的衰减,波形也会有一定程度的畸变^[7]。影响脉冲幅度损耗和波形畸变的主要因素有两种:金属导体中的损耗和水介质泄漏的损耗。方波脉冲在金属导体中的损耗主要表征为热损耗(焦耳热),也就是说,脉冲通过延时线时,导体内自由电子在电场的作用下而形成传导电流,这些电流的焦耳热会消耗电磁场的能量^[8]。当传输的方波脉冲的频率很高时,将出现趋肤效应。方波脉冲频率很高时,延时线的电压衰减因子^[4]为

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{R_s}{Z_0} \sqrt{\frac{\omega}{2}} \quad (2)$$

式中: R_s 为分流电阻, $R_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\sigma_c}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$, σ_c 为内外导体的电导率, μ_r 为相对磁导率, μ_0 为真空磁导率; Z_0 为延时线特性阻抗; ω 为方波脉冲的圆频率。趋肤效应引起的脉冲幅度的衰减率(即输出的脉冲幅度减去输入的脉冲幅度与输入脉冲幅度的比率)可表示为 $(1 - e^{-2\alpha l}) \times 100\%$ 。

普通水中含有很多正负离子和杂质,经过处理后的去离子水才能充当传输介质。当去离子水的电阻率不高时,方波脉冲经过延时线传输过程中,水介质会发生泄漏(即电容电阻自放电),泄漏时间常数为

$$\tau_b = \rho_m \epsilon = \frac{\rho_m \epsilon_r}{4\pi \times 9 \times 10^9} \quad (3)$$

式中: ρ_m 为绝缘电介质的电阻率; ϵ_r 为相对介电常数。当脉冲延时线的电长度为 τ 时,泄漏损耗引起的脉冲幅度的衰减率为 $(1 - e^{-\tau/\tau_b}) \times 100\%$ 。

2 实验装置及实验布局

经过理论分析并考虑应用需求,设计了一套水介质同轴线型方波脉冲延时线原理性实验装置,利用该实验装置进行初步的实验。通过实验可以了解水介质延时线对脉冲幅度损耗和波形畸变的大小,比较它对传输脉冲的幅度衰减率与理论分析的衰减率,验证理论上脉冲幅度损耗分析的准确性;通过实验还可以了解该延时线的频率响应以及它对传输脉冲前沿的损失大小。

实验装置设计的基本物理参数:阻抗 12Ω ;电长度约 500 ns ;内导体外径 5 mm ,外导体内径 30 mm 。若输入脉冲前沿为 10 ns ,理论预估趋肤效应损耗为 8.7% ,水介质泄漏损耗为 1.8% ($400 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$)。根据该水介质延时线的物理设计对该装置进行了机械设计,加工、安装后的装置外观图如图 2 所示。该实验装置的内外导体中心轴长实测为 16.1 m ,理论计算它的电长度 $\tau = 483 \text{ ns}$ 。该装置采用直角弯连接的方式减小了装置的空间长度(约 1.6 m),连接处需要用绝缘材料进行支撑,它既能对内导体进行支撑又不与外导体导通,该装置利用有机玻璃板作绝缘支撑。图 2 中,装置的左端放有一块 60 cm 刻度的钢板尺。



Fig. 2 Photo of delay-line equipment

图 2 延时装置图

利用该延时线装置进行了初步的实验,实验系统还包括脉冲发生器、电阻分压器、电阻负载等。实验系统布局方框图如图 3 所示。脉冲发生器产生一个方波脉冲经过延时线传输到 12Ω 的电阻负载上,通过测试延时线输入端和输出端的脉冲信号,获知脉冲幅度损耗率以及波形畸变大小。延时线输入端测试回路的电阻分压器(No. 1)的分压比为 $1:200$,输出端测试回路的电阻分压器(No. 2)的分压比为 $1:185$ 。

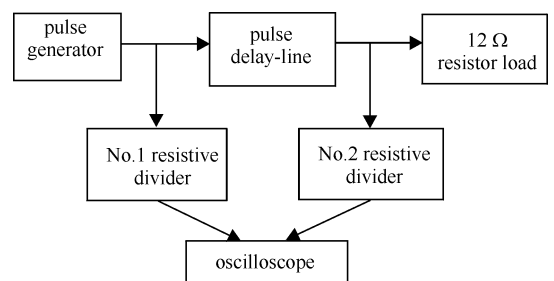


Fig. 3 Block diagram of experimental system

图 3 实验系统方框图

3 实验结果及结果分析

利用示波器监视输入端和输出端的脉冲信号,测试结果如图 4 所示。图 5 是图 4 中第一个脉冲和第二个

脉冲的覆盖图。

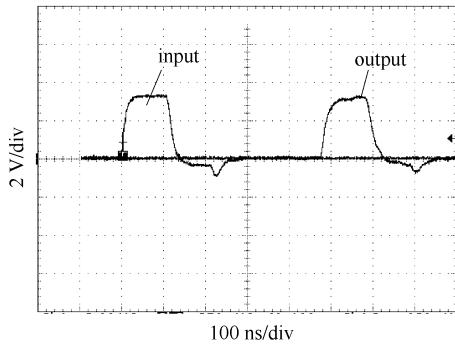


Fig. 4 Delay-line test result

图 4 延时线实验结果

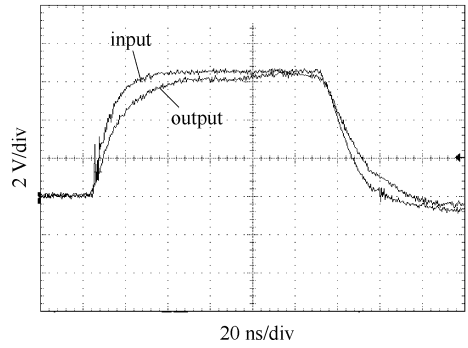


Fig. 5 Overlap of first pulse and second pulse

图 5 输入输出脉冲覆盖图

图 4 中,第一个脉冲是延时线的输入脉冲,即在输入端测得的脉冲信号,脉冲幅度为 648 V,脉冲前沿 18 ns,脉冲宽度约 100 ns;第二个脉冲是延时线的输出脉冲,即在 12 Ω 负载上测得的脉冲信号,脉冲幅度为 586 V,脉冲前沿 26 ns,脉冲宽度约 100 ns。延时线的电长度即延迟时间为 476 ns(第一个脉冲起点到第二个脉冲起点的脉冲间隔)。

由实验结果可知,该脉冲延时线对传输脉冲的脉冲幅度损耗率约为 9.6%,经过传输后脉冲的前沿增加了 8 ns;输出脉冲平顶有一个上升的台阶(约 5%)。由于输入脉冲的前沿为 18 ns,经过理论计算趋肤效应损耗率为 6.5%,水介质泄漏损耗率为 2.8%(实验过程测得水介质电阻率为 250 MΩ·m),则总损耗率为 9.3%。由此可知,实验得到的脉冲幅度损耗率与理论计算的损耗率基本一致,这就是说,延时线的损耗主要由趋肤效应影响和水介质泄漏影响造成的,它们在引起脉冲幅度的衰减同时,也影响了输出脉冲的前沿。

连接处是利用有机玻璃进行支撑的,有机玻璃的介电常数为 2.55,与水介质的介电常数相差很大,为了模拟这段绝缘支撑的阻抗突变引起的延时线不均匀性对脉冲传输的影响,可以把连接处看作一段传输线。传输线的基本特性参数可以根据绝缘支撑的几何尺寸进行计算,经过计算阻抗为 67 Ω、电长度为 0.8 ns。利用 PSpice 程序内置无损传输线元件建立模拟延时线不均匀性对脉冲传输影响的模型,并利用该程序进行模拟运算,模拟的结果如图 6 所示,第一个脉冲是输入的方波脉冲,第二个脉冲是经过传输后的输出脉冲,即在 12 Ω 电阻负载上监测到的信号。从图中的模拟结果可以得知,绝缘支撑的阻抗突变引起的延时线不均匀性会导致脉冲平顶小幅波动,由此可推断,实验结果中脉冲平顶的上升台阶与脉冲延时线不均匀性(连接处阻抗不匹配)的影响有很大关系。

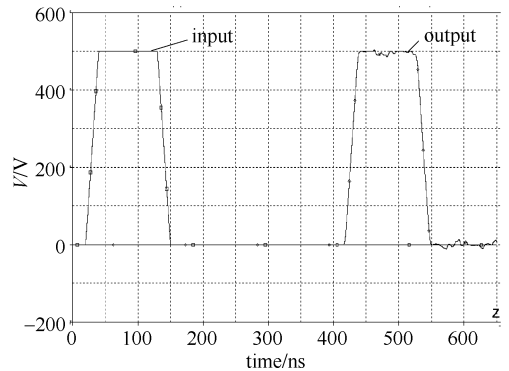


Fig. 6 Simulation of delay-line's nonuniformity effect

图 6 延时线不均匀性影响模拟

4 结 语

实验结果表明,水介质同轴型脉冲延时线对主脉冲的损耗率比较小,可以用来瞬态隔离反射脉冲。实验所得到的脉冲幅度损耗率和理论分析得出的脉冲幅度损耗率基本一致,这也说明该损耗分析是有效的、可信的。脉冲延时线的不均匀性会影响传输脉冲的波形,机械设计过程中要尽量保证延时线的均匀性,绝缘支撑可以考虑利用与水介质介电常数相当的陶瓷材料。

致 谢： 此项研究得到了邓建军研究员和室领导的大力支持,实验过程还得到了潘海峰等的帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献：

[1] Prichard A. Technological improvements in the DARHT II accelerator cells[C]//IEEE Particle Accelerator Conference. 2005:169-170.
 [2] 李劲,戴光森,刘小平,等. 3.5MeV 注入器脉冲功率系统[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2):263-267. (Li J, Dai G S, Liu X P, et al.

3. 5 MeV pulsed power system for LIA injector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2):263-267)
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005. (Liu X S. High pulsed power technology. Beijing: National Defence Industry Press, 2005)
- [4] Chen Y J. A novel design for a high power superconducting delay line[C]//IEEE Particle Accelerator Conference. 1997:1305-1507.
- [5] Carlson R L, Kang M, Melton J G. A 600-kV double-pulsar for the PHERMEX electron gun[C]//IEEE Pulse Power Conference. 1997: 1698-1700.
- [6] Pai S T, Zhang Q. Introduction to high power pulse technology[M]. Word Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1995:83-85.
- [7] Mesyats A. Pulsed power[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisers, 2005:111-115.
- [8] 李承祖,赵凤章. 电动力学教程[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1997:181-187. (Li C Z, Zhao F Z. Tutorial of electrodynamics. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997:181-187)

Water dielectric coaxial pulse delay-line

GAO Feng, SHI Jin-shui, LI Jin

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-106, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The basic principle and characteristic parameter of water dielectric coaxial pulse delay-line are introduced, and the main reasons of pulse losses and pulse distortion in the process of pulse transmission are analyzed. A test equipment of water dielectric coaxial pulse delay-line has been built, and its characteristic impedance is 12Ω . The elementary test results indicate a pulse loss rate of 9.6% and a delay time of 476 ns.

Key words: Coaxial line; Pulse delay-line; Water dielectric; Attenuation rate; Skin-effect