

文章编号： 1001-4322(2006)12-2078-04

螺旋线型水介质长脉冲形成线的设计与改进*

刘振祥， 张建德

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要： 设计了长 2.2 m、直径 0.40 m、工作电压 400 kV、脉宽 200 ns 的螺旋线型水介质脉冲形成线加速器，并进行了实验研究。为消除输出脉冲的前沿上冲和后沿拖尾现象，分析了脉冲形成线中的连接段与螺旋线阻抗的不匹配对输出波形的影响。用高分子材料加工了内径为 10 cm，外径为 18 cm 的高阻抗环套在螺旋线与主开关之间的连接段上，使这一段的阻抗与螺旋线阻抗接近，并使其电长度减小，消除了前沿上冲，减弱了后沿拖尾，得到了上升沿约 18 ns、下降沿约 40 ns 的近似方波高电压脉冲输出。

关键词： 长脉冲； 螺旋线型脉冲形成线； 水介质； 上冲； 拖尾

中图分类号： TL503 文献标识码： A

为了使脉冲功率源小型化，螺旋线型脉冲形成线加速器的研究和应用越来越受到人们的关注^[1-7]，采用螺旋线取代加速器中的同轴线型脉冲形成线，可以在不增加加速器体积的情况下得到脉宽更大的电压脉冲^[7]，但螺旋线与主开关之间的连接部分与螺旋线很难达到阻抗匹配，这使输出波形出现前沿上冲和后沿拖尾现象，而且螺旋线的螺旋角越大，这种现象越严重。S. D. Korovin^[1]等人采用变压器油作为绝缘介质，利用长 2.1 m 的螺旋线产生了 110 ns 的高电压脉冲，脉冲前沿出现了一个约为 20 ns 的上冲，后沿也存在严重的拖尾现象。本文设计了一套水介质螺旋线型脉冲形成线加速器，并在螺旋线的连接部分加高阻抗环的方法解决了前沿上冲和后沿拖尾的问题。

1 基本理论

无限长同轴屏蔽螺旋线的示意图如图 1 所示，其单位长度电容、电感分别为^[8,9]

$$C_0 = C_1 [1 + (\epsilon_r - 1) D(\gamma r_1)] [1 - K_c^2]^{-1} \quad (1)$$

$$L_0 = L_1 [1 - K_1^2] \quad (2)$$

式中： C_1, L_1 分别为孤立螺旋线的单位长度的电容、电感； ϵ_r 为内外筒之间电介质的相对介电常数； K_c, K_1 分别为内外筒之间的电容耦合系数和电感耦合系数； $D(\gamma r_1)$ 为介质影响的修正系数，它们分别为

$$C_1 = 2\pi\epsilon_0 [I_0(\gamma r_1) K_0(\gamma r_1)] \quad (3)$$

$$L_1 = -\frac{\mu_0 \beta^2}{2\pi \gamma^2} I_1(\gamma r_1) K_1(\gamma r_1) \cot^2 \psi \quad (4)$$

$$K_c^2 = [I_0(\gamma r_1) K_0(\gamma r_2)] [I_0(\gamma r_2) K_0(\gamma r_1)] \quad (5)$$

$$K_1^2 = [I_1(\gamma r_1) K_1(\gamma r_2)] [I_1(\gamma r_2) K_1(\gamma r_1)] \quad (6)$$

$$D(\gamma r_1) = \gamma r_1 I_0(\gamma r_1) K_1(\gamma r_1) \quad (7)$$

式中： r_1, r_2 分别为屏蔽螺旋线的内筒半径和外筒半径； ϵ_0 为真空介电常数； ψ 是内筒螺旋线的螺旋角； I_0, I_1 分别为 0 阶和 1 阶第一类变型 Bessel 函数； K_0, K_1 分别为第二类 0 阶和 1 阶变型 Bessel 函数； γ, β 分别为电磁波在径向、轴向的传播常数^[10]。

由式(1)~(7)可得同轴屏蔽螺旋线的特性阻抗和电磁波传播速度为

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} \quad (8)$$

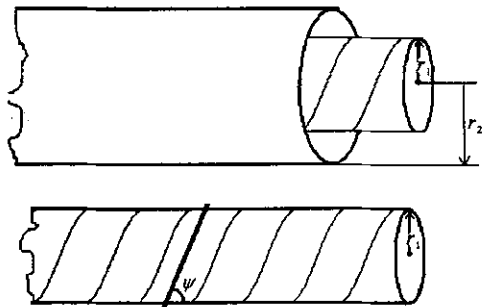


Fig. 1 Schematic of metal shield coaxial helix line
图 1 同轴屏蔽螺旋线结构示意图

* 收稿日期 2006-07-19； 修订日期 2006-11-06
基金项目 国家 863 计划项目资助课题
作者简介 刘振祥(1967—)男，副教授，博士生，主要从事脉冲功率技术研究；lxz_hunan@sina.com。

$$V_0 = 1 / \sqrt{L_0 C_0} \tag{9}$$

式中 L_0 为无限长同轴屏蔽螺旋线的单位长度电感。

2 螺旋线型脉冲形成线的设计

设计要求在阻抗为 20Ω 的负载上输出电压为 400 kV 、脉宽为 200 ns 的脉冲，需要确定的结构参数：内外筒的半径和长度、内筒导体的螺旋角和匝间距等。计算螺旋线型脉冲形成线尺寸的方法和计算同轴线型脉冲形成线尺寸的方法不同，由公式(8)(9)可知，螺旋线型脉冲形成线的电长度不但与其长度有关，而且与螺旋角有关，螺旋角的大小又影响到其特性阻抗的大小。在设计时，绝缘强度可以根据 Martin 经验公式计算，脉宽和阻抗可以根据公式(8)(9)进行计算，即

$$k_- t^{-1/3} (2\pi r_1 l_1 + 2\pi r_1^2)^{-1/10} > \frac{V_B}{r_1 \ln(r_2/r_1)} \tag{10}$$

(满足内筒绝缘强度要求)

$$k_+ t^{-1/3} (2\pi r_2 l_2 + 2\pi r_2^2)^{-1/10} > \frac{V_B}{r_2 \ln(r_2/r_1)} \tag{11}$$

(满足外筒绝缘强度要求)

$$2l_1/V_0 = \tau_0 \tag{12}$$

(满足电长度要求)

式中 x 为充电过程中的高电压作用时间， l_1 、 l_2 分别为内外筒的长度（由于开关与内筒连接，外筒比内筒长 0.25 m ，即 $l_2 = l_1 + 0.25 \text{ m}$ ）， k_- 、 k_+ 分别为去离子水的负极和正极击穿常数， $k_- = 0.6$ ， $k_+ = 0.3$ ， V_B 为脉冲形成线的最大工作电压，这里取 1 MV ； τ_0 为输出脉冲宽度。

为了根据(10)~(12)式和(8)式确定结构参数 l_1 、 l_2 、 r_1 、 r_2 和 ψ 的大小，我们采用编程计算的方法，找出满足条件的多个参数组合，并根据实际情况从中选取一组。通过计算确定的结构参数为：螺旋线内筒半径 10 cm ，长度 80 cm ，螺旋角 80° ，外筒半径 19 cm ，长度 110 cm 。

为了确定匝间距，我们利用 Karat 程序对螺旋线表面轴向电场的分布和变化情况进行了模拟。当形成线内充有水介质 ($\epsilon_r = 80$)，充电电压为 1 MV 、开关上升沿为 6 ns 时，在负载电阻为 1Ω 的情况下，螺旋线表面附近一点（距离螺旋线表面 0.5 cm ）的轴向电场变化情况如图 2 所示。在电压波后沿经过的时间内（在 $60 \text{ ns} < t < 90 \text{ ns}$ 和 $165 \text{ ns} < t < 195 \text{ ns}$ ），匝间轴向电场强度 E_z 较大，但最大值不大于 100 kV/cm 。由于电压波后沿在螺旋线匝间度越时间一般小于 50 ns ，如果用 0.5 cm 厚的不锈钢管沿螺旋方向开槽来加工螺旋线，则去离子水中脉冲的负极击穿场强 E_b 大于 130 kV/cm ，因此确定匝间距为 1 cm 。考虑到端部电场分布比较复杂，且电压波在端部发生反射，将匝间距在端部渐变为 2 cm 。

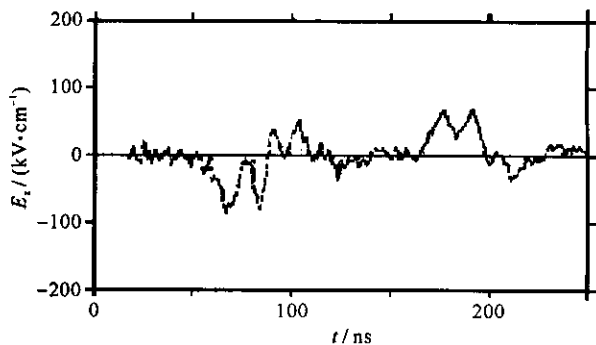


Fig. 2 Axial electric field of a point 0.5 cm away from the helix line
图 2 距离螺旋线表面 0.5 cm 一点处的轴向电场

螺旋线内筒容易扭曲、变形，为了将它固定牢固，我们选用尼龙棒作支撑。将直径为 19 cm 的尼龙棒放入螺旋线内部，并在尼龙棒的两端各拧上四个不锈钢螺丝，使它与螺旋线紧密地固定在一起。加速器采用脉冲变压器充电，主开关采用气体火花隙自击穿开关，其整体结构如图 3 所示。

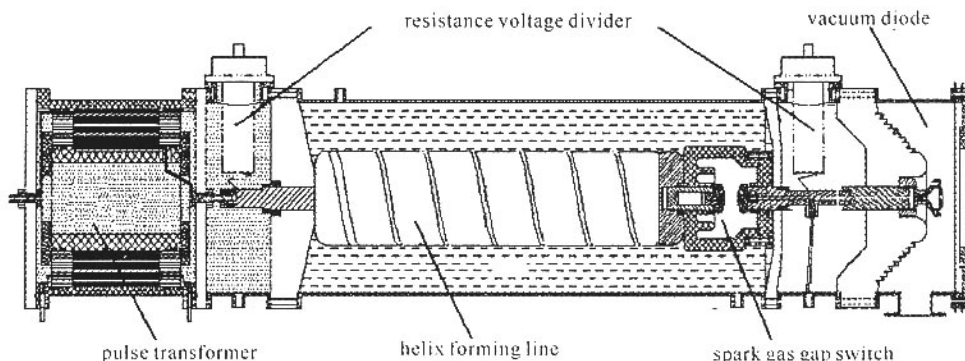


Fig. 3 Schematic of helix forming line accelerator
图 3 螺旋线加速器结构图

3 初步实验结果

实验使用带阳极网的虚阴极振荡器作负载,测得二极管上的输出电压波形如图 4 所示,脉宽为 296 ns (FWHM),上升沿约 12 ns,下降沿接近 150 ns。和文献 [1] 中类似,输出脉冲前沿出现一个约 6 ns 的上冲,后沿也存在严重的拖尾现象,这是由于脉冲形成线中靠近开关的一端约 6 cm 长的同轴连接段,如图 5 所示,同轴连接段的特性阻抗只有 4.3Ω ,与螺旋线的阻抗不匹配,使得输出脉冲的前沿出现上冲。这样的脉冲驱动高功率微波源时,产生的电子束能散度较大,前沿上冲对束波相互作用起振过程的模式选择会产生不利影响。

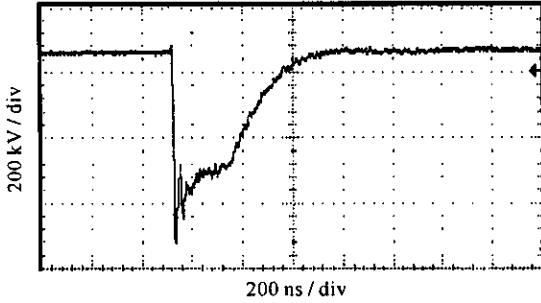


Fig. 4 Voltage waveform on the diode
图 4 二极管电压波形

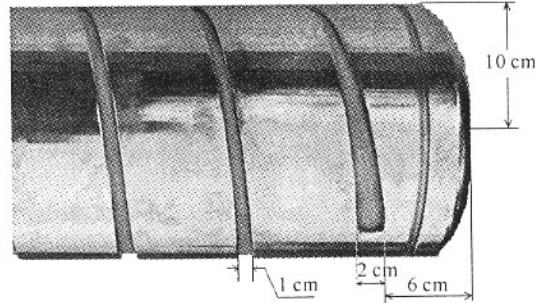


Fig. 5 Inner conductor structure of the helix line
图 5 螺旋线内筒结构图

4 分析与改进

为了研究脉冲形成线中的同轴段对输出波形的影响,将脉冲形成线简化为图 6 所示的 Pspice 模型,其中 PFL_1 为螺旋线部分, PFL_2 为同轴线部分, C, R, K, R_L 分别为充电电容、限流电阻、主开关和匹配负载。模拟发现:当同轴段与螺旋线阻抗相等,即阻抗匹配时,负载上的电压为方波脉冲,其幅值为充电电压的一半;当同轴段阻抗小于螺旋线阻抗时,脉冲的前沿出现一个上冲,如图 7 所示,这是因为开关 K 导通后,同轴线上的右行电压波首先到达负载,并在负载发生反射和透射,反射波和入射波极性相同,二者叠加后的幅值大于充电电压的二分之一,因而形成上冲,从图 7 可以看出,形成上冲的宽度为同轴段电长度的两倍,脉冲后沿也存在拖尾。同轴段的阻抗越小、电长度越大,上冲和拖尾幅度越大;当同轴段阻抗大于螺旋线阻抗时,负载上的电压脉冲没有前沿上冲现象,但脉冲的前沿增大,后沿出现拖尾,如图 8 所示,同轴段的阻抗越大、电长度越大,脉冲前沿和后沿也越大。

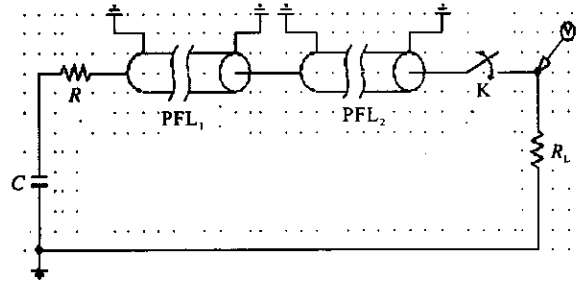


Fig. 6 Equivalent circuit of the accelerator
图 6 加速器等效电路示意图

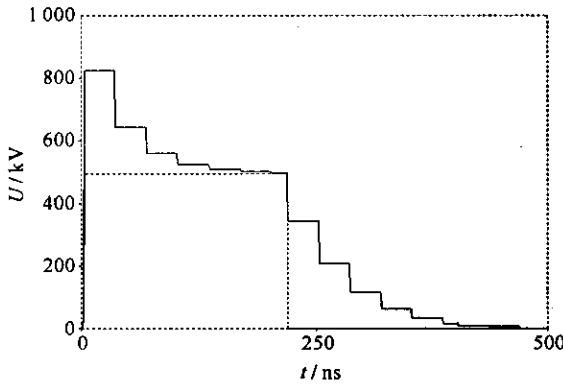


Fig. 7 Voltage waveform with impedance of the coaxial section being smaller than that of the helix line
图 7 同轴段阻抗小于螺旋线阻抗时的模拟电压波形

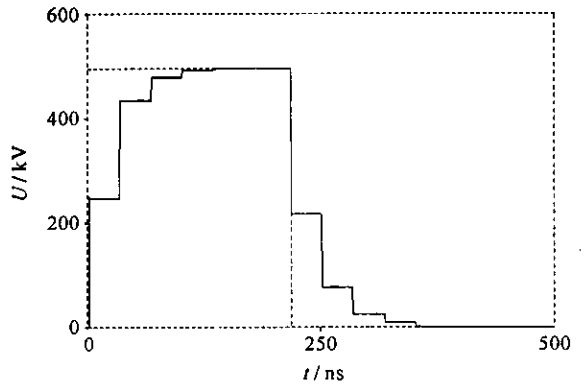


Fig. 8 Voltage waveform with impedance of the coaxial section being bigger than that of the helix line
图 8 同轴段阻抗大于螺旋线阻抗时的模拟电压波形

实验测得的脉冲前沿上冲宽度略大于同轴部分电长度的两倍,这是因为开关导通后,螺旋线第一匝的电流流向和同轴部分的一样,没有沿着螺旋方向前进,所以螺旋线前端的低阻抗段长度实际上大于 6 cm。

要消除负载电压脉冲的上冲和拖尾,就必须使同轴段的阻抗等于螺旋线的阻抗,而在实际情况中很难使两者的阻抗相等,为了消除脉冲上冲,可以使同轴段阻抗稍大于螺旋线的阻抗,同时尽量减小同轴段的电长度,以

减小阻抗不匹配对脉冲前后沿的影响。

我们用超高分子量聚乙烯材料($\epsilon_r = 2.3$)加工了一个长 10 cm 的高阻抗环,内径为 10 cm,外径为 18 cm。为了避免环的表面发生水击穿现象,提高耐压强度,应使环表面与内外筒之间夹角接近 45° ,同时对环的边缘进行倒角。将高阻抗环套在同轴段时,这一段的特性阻抗变为 23Ω ,电长度变为 0.5 ns。

图 9 是加上高阻抗环后输出的电压波形,由图 9 可见,前沿上冲消失了,上升沿约 18 ns,下降沿约 40 ns,脉冲顶部约 200 ns,是一个近似方波的脉冲。

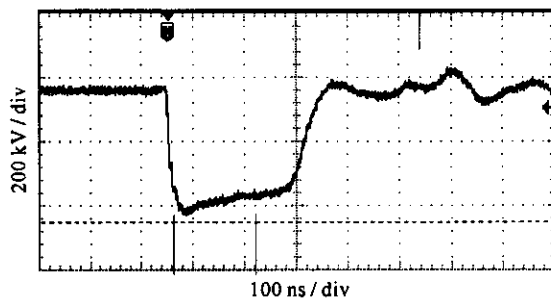


Fig. 9 Voltage waveform on the diode with the high impedance annulus on the joint section
图 9 连接段加高阻抗环时得到的电压波形

5 结 论

在设计长脉冲形成线加速器时,采用水介质的螺旋线型脉冲形成线,可以大大减小加速器的长度。本文利用长 0.8 m 的螺旋线产生了脉宽约 200 ns 的高电压脉冲。在与螺旋线阻抗不匹配的连接段,加上一个阻抗等于或者稍大于螺旋线阻抗的高阻抗环,并减小这一段的电长度,可以消除前沿上冲,减小后沿拖尾,得到较好的高电压脉冲输出,能够满足一些长脉冲功率源的应用需求。

参考文献：

- [1] Korovin S D, Gubanov V P, Gunin A V, et al. Repetitive nanosecond high-voltage generator based on spiral forming line [C]//IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science. 2001, 2:1249.
- [2] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, et al. Periodically pulsed high voltage generator based on Tesla transformer and spiral forming line [C]//IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science. 2001:336.
- [3] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, et al. A nanosecond high-voltage periodically pulsed generator based on a helix forming line [J]. *Priroda i Tekhnika Eksperimenta*, 2002, 45(1):73.
- [4] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines [J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, 21(2):197.
- [5] 梁川, 夏连胜, 章林文. 螺旋线型水介质 Blumlein 线的初步研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30(1):43. (Liang C, Xia L S, Zhang L W. Primary research on water helical Blumlein line. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(1):43)
- [6] 杨建华, 钟辉煌, 舒挺, 等. 水介质 Blumlein 型螺旋脉冲形成线的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8):1191. (Yang J H, Zhong H H, Shu T, et al. Water-dielectric Blumlein type of PFL with spiral line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8):1191)
- [7] Liu Z X, Zhang J D. Investigation of helical pulse forming line [J]. *Plasma Science and Technology*, 2006, 8(5):596-599.
- [8] Kino G S, Paik S F. Circuit theory of coupled transmission systems [J]. *J Appl Phys*, 1962, 33(10):3002-3008.
- [9] Paik S F. Design formulas for helix dispersion shaping [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1969, 16(12):1010-1014.
- [10] 刘盛纲. 微波电子学导论 [M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (Liu S G. Introduction to microwave electronics. Beijing: National Defence Industry Press, 1985)

Design and improvement of water-dielectric helix long-pulse forming line

LIU Zhen-xiang, ZHANG Jian-de

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on a water-dielectric helix line, a 2.2 m long accelerator with a diameter of 0.4 m was designed and tested. The influence of the impedance mismatching between the joint section in pulse forming line and the helical line on the voltage waveform of the diode was analyzed. A high impedance annulus made of macromolecule material with an inner radius of 10 cm and an outer radius of 18 cm was added to the joint section. By making the impedance of the joint section be close to that of the helical line and the electric length minish, the upshot was eliminated, the fall time was minished, and a square pulse with a risetime about 18 ns, a fall time about 40 ns and a pulse top duration about 200 ns was obtained.

Key words: Long pulse; Helix pulse forming line; Water dielectric; Upshot; Delay