

Z 箍缩装置外磁绝缘传输线全尺寸粒子模拟研究*

郭帆 李永东[†] 王洪广 刘纯亮 呼义翔 张鹏飞 马萌

(西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2010年7月25日收到;2010年12月24日收到修改稿)

采用电路模拟得到的柱孔结构处向外磁绝缘传输线传输的电压反射波来等效 Z 箍缩装置中的柱孔结构至丝阵负载部分, 实现了 Z 箍缩装置四层外磁绝缘传输线的全尺寸粒子模拟. 为了进一步提高柱孔结构和丝阵负载等效电路模型的精度, 通过粒子模拟, 对电路模拟得到的电压反射波进行了修正. PBFA Z 装置四层外磁绝缘传输线部分的全尺寸粒子模拟结果表明, 修正电压反射波后得到的绝缘堆处电压波形和电流波形比原有电路模拟结果更接近实验结果. 另外, 利用粒子模拟结果分析和解释了丝阵负载内爆对外磁绝缘传输线脉冲功率传输物理过程的影响.

关键词: Z 箍缩, 外磁绝缘传输线, 粒子模拟, 等效电路模型

PACS: 29.27.-a

1. 引言

Z 箍缩(Z-pinch)装置主要用来研究惯性约束核聚变、天体物理学、辐射物理学和开展其他高能物理实验^[1], 现有 Z 箍缩装置主要是美国 Sandia 实验室的 PBFA Z, ZR 和我国中国工程物理研究院的初级实验平台(primary test station, PTS)^[2]. 美国海军实验室和 Sandia 实验室在 Z 箍缩的实验和数值模拟工作中目前处于国际领先地位.

在 Z 箍缩装置中, 要将 TW, MV 量级的高功率脉冲馈送到丝阵负载, 需要采用真空磁绝缘传输线(magnetically insulated transmission line, MITL)来保证能量的高效传输和汇聚. 实际 Z 箍缩装置真空部分的设计是通过电路模拟和粒子模拟反复修改得到的^[3]. 电路模拟方法适用于脉冲功率系统的工程设计, 但需要为系统中每部分建立准确的等效电路模型; 粒子模拟方法可以通过实时模拟得到束-场相互作用过程的电参数演变规律, 但计算开销大, 速度慢, 适用于脉冲功率系统关键真空器件的局部模拟. 国外针对脉冲功率系统相继开发了电路模拟软件 BERTHA^[4], SCREAMER^[5], TLCODE^[6] 和粒子模拟软件 LSP^[7]. 国内西安交通大学和西北核技术研

究所合作研制的 UNIPIC 软件^[8] 也具备脉冲功率系统真空器件粒子模拟的能力. Z 箍缩装置的真空部分包括真空喇叭段、外 MITL、柱孔结构、内 MITL 和丝阵负载. 由于外 MITL 整体尺寸大、尺度变化范围跨越 cm 量级到 m 量级, 与丝阵负载结合到一起进行 3 维粒子模拟很困难. 本文用电路模拟得到的电压反射波等效外 MITL 后端柱孔结构至丝阵负载部分^[9], 实现了四层外 MITL 的 2.5 维全尺寸粒子模拟. 参照实验结果, 通过粒子模拟对电压反射波进行修正, 为进一步提高柱孔结构和丝阵负载等效电路模型提供依据. 本文粒子模拟采用 UNPIC 软件, 选取了 PBFA Z 装置真空部分进行模拟研究.

2. 基于电路模拟的电压反射波计算

2.1. PBFA Z 装置

PBFA Z 装置的整体直径为 33 m, 从外到里依次为油、水和真空部分^[10], 真空部分的剖视图如图 1 所示. 该装置将 11.4 MJ 的能量储存在 36 台同样的脉冲发生器中, 脉冲发生器首先向中间储能水电容器充电, 通过激光触发气体开关, 中间储能水电容器向第二个同轴水传输线充电, 然后通过自击穿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:50637010)和国家自然科学基金(批准号:50807045)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn

水开关,使能量输出到水介质板状传输线,这个能量再穿过绝缘堆进入真空部分^[11].

真空部分分为 A, B, C, D 四层,能量依次从最外边的水传输线分别经过绝缘堆、真空喇叭段、外 MITL,柱孔结构、内 MITL 最后到达丝阵负载.绝缘堆将水传输线和真空部分隔离,绝缘堆最终的设计结构为: A, B 两层各有 5 个绝缘器, C, D 两层各有

6 个绝缘器,绝缘器之间用均压环隔开^[12].柱孔结构将四层外 MITL 的能量汇聚起来传输到单条内 MITL,而内 MITL 直接连接丝阵负载,由于柱孔结构处会存在零磁场区,导致磁绝缘被局部破坏,产生电流损失,对脉冲功率的传输效率有较大的影响^[7,13].

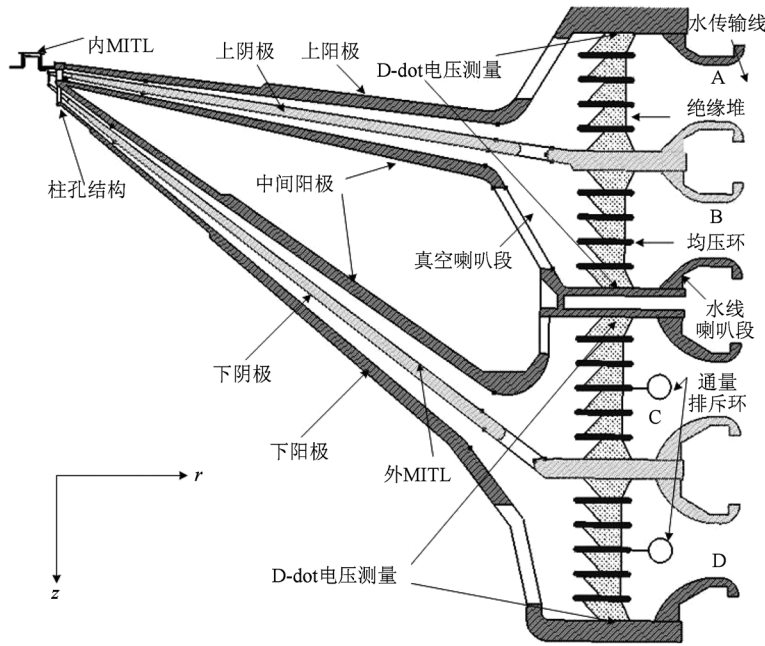


图1 PBFA Z 装置真空部分结构图

2.2. 丝阵负载模型

在电路模拟时一般将丝阵负载等效为一个随时间变化的电感和一个阻值不变的电阻串联^[10],根据零维丝阵内爆动力学方程,丝阵负载电感的表达式为^[14]

$$mh \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial L_r}{\partial r} I^2, \quad (1)$$

$$L_r = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \left[\frac{1}{N} \ln\left(\frac{R}{ND}\right) + \frac{N-1}{N} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) + \frac{N-1}{N} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \right], \quad (2)$$

式中 m 为单位高度的丝阵质量, h 为丝阵高度, r 为丝阵动态半径, L_r 为丝阵动态电感, I 为流过丝阵的电流(即内 MITL 的阴极电流)、 μ_0 为真空中磁导率, R 为回流罩半径, N 为丝阵根数, D 为单丝直径, r_0 为丝阵初始半径.文献[10]中电路模拟结果与实验结果进行比较后发现,该模型在丝阵负载内爆初

始阶段还是较精确的.

2.3. 电路模拟

采用 TLCODE 方法,对整个 PBFA Z 装置的真空部分建立等效电路模型,分解为 261 个具有特定阻抗和传输时间的传输线单元,等效电路模型中只包括传输线和电阻.在 MITL 部分由于阴极表面电场强度将超过电子发射阈值,阴极产生爆炸电子发射,磁绝缘形成前,电子在阴阳极间的电场作用下被加速到阳极产生损失电流,损失电流的大小由损失电阻求解^[14],同时为了计入电子电流的存在对传输线阻抗的影响,在电路模拟中引入流阻抗^[14,15].柱孔结构划分为三个传输线单元进行等效电路建模,丝阵负载取 PBFA Z 装置 shot51^[11]柱状钨丝阵负载参数,采用零维丝阵内爆动力学方程建模.真空部分输入端加入的前向电压波采用文献[16]所给出的波形,如图 2 所示.

利用电路模拟得到的四层外 MITL 和柱孔结构

相连处传输线单元后端开路电压 E_p 和界面电压 V_p , 即可得到四层外 MITL 和柱孔结构相连处由于阻抗不匹配从柱孔结构反射回来传向四层外 MITL 的电压反射波 $V_- = V_p - E_p/2$ 如图 3 所示.

电路模拟得到的 A, B, C, D 四层绝缘堆处电压波形和电流波形如图 4—7 所示. 与文献 [11] 中的实验结果相比较, 电路模拟得到的每层绝缘堆处电压都大于实验测量值, 且电压波形的下降沿明显慢于实验测量结果; 对于绝缘堆处电流, 除了 A 层和实验结果符合得较好, 其余各层绝缘堆电流都小于实验测量结果. 分析表明, 产生该误差的主要原因是柱孔结构处结构复杂、丝阵负载内爆时物理过程复杂, 利用上述等效电路模型对柱孔结构和丝阵负载进行建模与实际物理模型存在一定的误差, 该误差导致了电路模拟所得绝缘堆处电压波形、电流波形和实验结果的不一致.

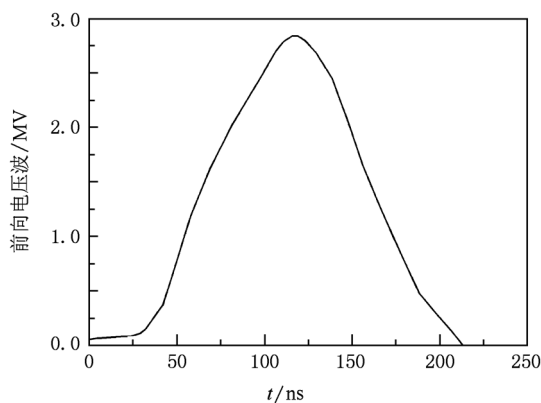


图 2 每层入射的前向电压波波形

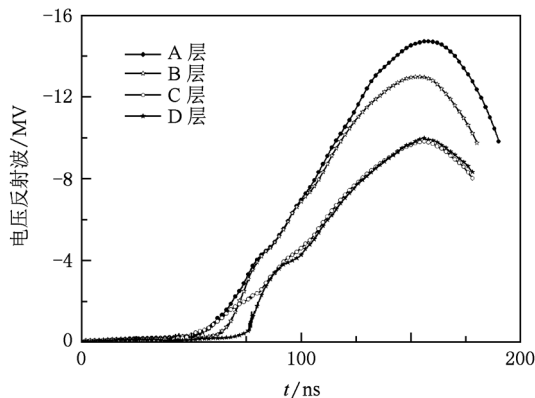


图 3 电路模拟得到的四层电压反射波波形

3. 外磁绝缘传输线全尺寸粒子模拟

粒子模拟方法基于第一性原理, 即以麦克斯韦方程描述电磁场, 以牛顿-洛伦兹方程描述带电粒子运动. 粒子模拟通过交替求解麦克斯韦方程和牛顿-洛伦兹方程, 实现物理过程的动态实时仿真^[8].

对四层外 MITL 进行全尺寸粒子模拟时, 用电路模拟得到的从柱孔结构处向外 MITL 传输的电压反射波来等效柱孔结构至丝阵负载部分. 粒子模拟的区域包括 A, B, C, D 四层水传输线喇叭段、绝缘堆、真空喇叭段到外 MITL 和柱孔结构相连的部分. 输入端和外 MITL 与柱孔结构相连处都采用吸收边界条件, 输入端加入与电路模拟相同的前向电压波 (如图 2 所示), 在四层外 MITL 的末端加入用于等效柱孔结构至丝阵负载部分的电压反射波. 模拟区域之所以包括绝缘堆部分是为了和实验测量得到的绝缘堆电压波形和电流波形进行比对; 同时包括水传输线喇叭段部分是由于图 2 所给出的前向电压波波形是在水传输线中通过实验测量和计算所得结果. 水传输线喇叭段至外 MITL 部分体积庞大, 对该部分进行 3 维全尺寸粒子模拟难以实现, 考虑到该部分具有轴对称性质, 可以采用 2.5 维粒子模拟, 从而有效地减小计算量. 因此, 用电压反射波来等效柱孔结构至丝阵负载部分不仅可以回避丝阵负载内爆过程在粒子模拟中的建模, 而且不需要对复杂的柱孔结构进行 3 维建模, 从而实现水传输线喇叭段至外 MITL 部分的全尺寸粒子模拟.

在水传输线喇叭段部分, 纯水的相对介电常数为 80.0, 因此设定前向电压波的相速度为 $1/\sqrt{80}c$ (c 为真空中的光速), 绝缘堆材料的相对介电常数为 2.55. 模拟区域中阴阳极最小间隙为 1.0 cm, 网格划分时 z 方向网格长度为 0.1 cm, 能够保证最小间隙处有 10 个网格, r 方向网格长度为 0.15 cm, 电子发射阈值设定为 240 kV/cm ^[10].

4. 粒子模拟结果

在粒子模拟中直接用电路模拟得到的电压反射波对柱孔结构至丝阵负载部分进行等效, 得到的 A, B, C, D 四层绝缘堆处电压波形、电流波形与电路模拟结果基本一致, 与实验结果存在一定差别. 根据电路模拟所得绝缘堆处电压偏大、电流偏小的现

象,可以推断电路模拟得到 A,B,C,D 四层从柱孔结构向外 MITL 传输的电压反射波比实际值偏小. 因此,考虑采用放大每层电压反射波的方法对其进行反复修正,直到粒子模拟所得绝缘堆电压波形和电流波形结果与实验测量结果符合得较好. 经测试,将电路模拟得到的 A,B,C,D 四层电压反射波分别用放大系数 1.3,1.35,1.6,1.7 进行修正,可以得到和实验结果比较接近的绝缘堆电压波形和电流波形.

图4—7 中同样给出了经过修正 A,B,C,D 四层电压反射波后,粒子模拟得到的每层绝缘堆处电压波形和电流波形. 从图中可以看出,经过修正电压反射波后,粒子模拟得到的每层绝缘堆电压波形的最大值相比电路模拟结果减小,更加接近实验结果,在脉冲的下降沿粒子模拟结果和实验结果也符合的更好;同时粒子模拟得到每层绝缘堆电流波形的最大值相比电路模拟结果增大,更加接近实验结果. 图 8 所示为绝缘堆处四层总的功率波形,图中也给出了实验测量得到的结果. 从图中可以看出,绝缘堆处总的功率波形与实验结果符合得较好,除了在脉冲上升沿粒子模拟得到的功率值比实验结果超出约 10%.

在粒子模拟得到正确结果的前提下,可以进一步通过诊断外 MITL 中电子电流的变化情况,来分析和解释丝阵负载内爆对外 MITL 中脉冲功率传输物理过程的影响,并且给出外 MITL 工作过程中电子实空间分布的物理图像.

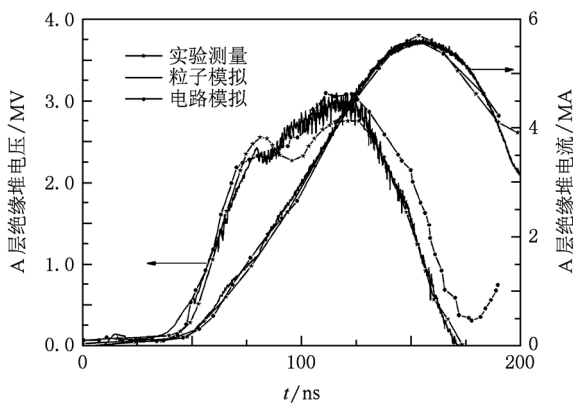


图 4 A 层绝缘堆处的电压波形和电流波形

图 9 所示为离负载 63.5 cm 处四层传输线总的电子电流随时间变化的波形图. 丝阵负载的有效负载阻抗(负载处电压除以流过负载的电流)在电流流过丝阵负载的初始阶段约等于零,即丝阵负载刚

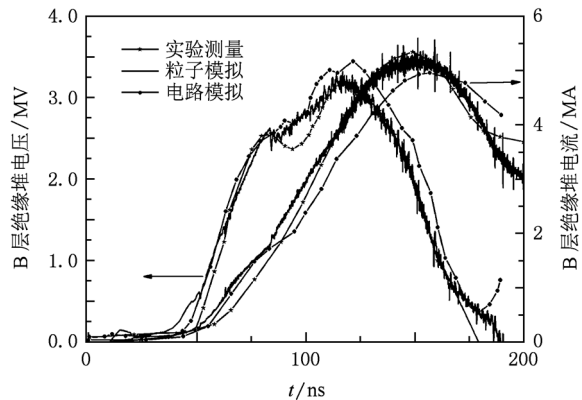


图 5 B 层绝缘堆处的电压波形和电流波形

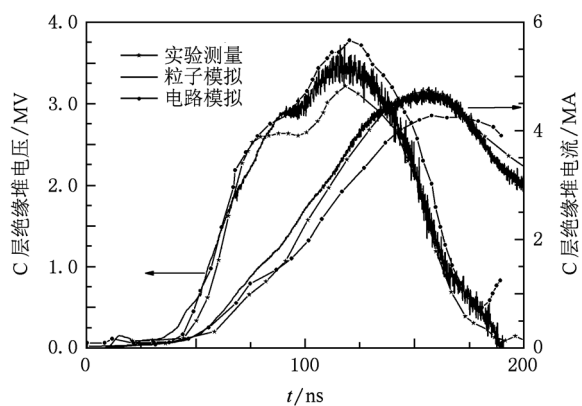


图 6 C 层绝缘堆处的电压波形和电流波形

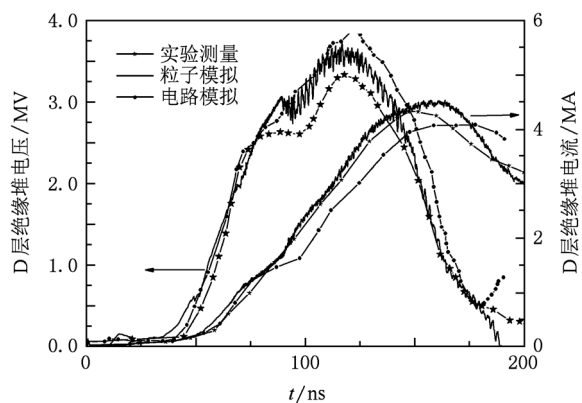


图 7 D 层绝缘堆处的电压波形和电流波形

开始可以看成短路负载,在滞止辐射阶段,有效负载阻抗的最大值也只有 0.6Ω ^[17]. 从图中可以看出,大约在 62 ns 时刻开始有电子电流,对应外 MITL 段的阴极电场强度超过电子发射阈值,外 MITL 开始发射电子,此时丝阵负载虽然近似为短路负载,加载到负载的前向电压波被全反射回来传向绝缘

堆,但是由于前向电压波的幅值较小,从负载反射回来的电压反射波幅值也较小,不足以有效减少电子电流,电子电流随着每层前向电压的增加迅速增大,MITL 近似工作在自限制流状态下,随着每层前向电压的增加,从短路负载反射回来的电压反射波幅值也增加,该电压反射波使 MITL 中的部分电子电流转化为阴极电流,电子电流开始减小,发生电子再俘获过程^[18],对应图 9 所示第一个电子电流的极值位置;当丝阵负载进入内爆阶段后,有效负载阻抗开始增加,反射系数增大,此时前向电压波还未到达最大值,电子电流又开始增加,形成了图 9 所示的第二个电子电流的极值位置.

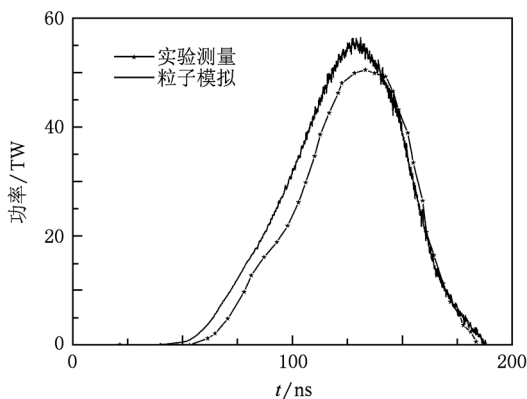


图 8 四层绝缘堆处总的功率波形

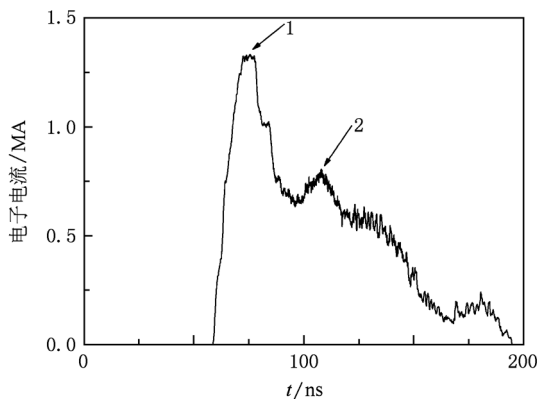


图 9 离负载 63.5 cm 处总的电子电流波形

图 10 给出了 70.0 ns 时刻四层外 MITL 中形成磁绝缘的电子实空间分布. 从图中可以看出,真空喇叭段部分由于阴、阳极间隙较大,没有电子发射,

实际上在整个脉冲的传输阶段,真空喇叭段部分都没有显著的电子发射,因此在电路模拟时该部分可以处理为真空传输线. 外 MITL 靠近负载的部分,最小间隙仅 1.0 cm 左右,此时电流未达到临界磁绝缘电流值,部分电子损失到阳极,有损失电流的存在,在等效电路建模时也需要加以考虑.

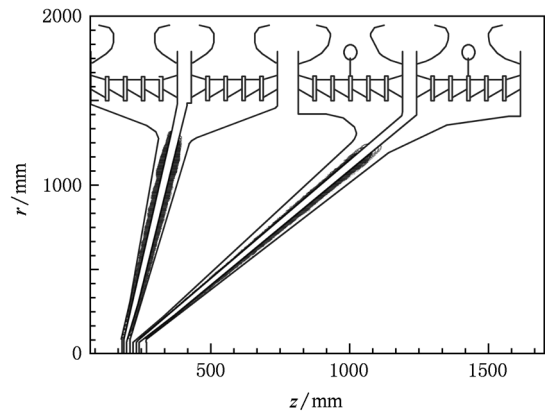


图 10 70.0 ns 时四层外磁绝缘传输线中的电子实空间分布图

5. 结 论

本文结合电路模拟和粒子模拟,将电路模拟得到的从柱孔结构处向外 MITL 传输的电压反射波加入到粒子模拟中对柱孔结构至丝阵负载部分进行等效,首次实现了 Z 箍缩装置四层外磁绝缘传输线的全尺寸粒子模拟. 通过反复的粒子模拟测试,对电路模拟得到的四层电压反射波进行修正,修正电压反射波后,粒子模拟得到的绝缘堆电压波形和电流波形比原有电路模拟结果更接近实验结果. 修正系数表征了电路模拟中柱孔结构和丝阵负载建模的不准确性,利用这些修正系数可以进一步优化柱孔结构和丝阵负载的等效电路模型,使电路模拟能够更精确应用于实际 Z 箍缩脉冲功率系统的工程设计,这些将在今后的工作中进一步加以研究. 另外,本文还利用粒子模拟得到了四层外 MITL 的电子电流波形,分析和解释了丝阵负载内爆对外 MITL 脉冲功率传输物理过程的影响,并通过分析四层外 MITL 中电子实空间分布图,为等效电路建模提出了建议.

- [1] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lü M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈、蒯斌、曾正中、王文生、邱孟通、王亮平、丛培天、吕敏 2006 物理学报 **55** 5917]
- [2] Ding N, Zhang Y, Ning C, Shu X J, Xiao D L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3027 (in Chinese) [丁宁、张扬、宁成、束小建、肖德龙 2008 物理学报 **57** 3027]
- [3] Spielman R B, Long F, Martin T H, Poukey J W, Seidel D B, Shoup W, Stygar W A, McDaniel D H, Mostrom M A, Struve K W, Corcoran P, Smith I, Spence P 1995 *Proceedings of the 10th IEEE International Pulsed Power Conference* Albuquerque, New Mexico, July 3—6, 1995 p396
- [4] Hinshelwood D D, *Naval Res. Lab.* Washington, DC, NRL Memorandum Report **5185**, Nov. 21, 1983
- [5] Kiefer M L, Widner M M 1985 *Proceedings of the 5th IEEE International Pulsed Power Conference* Arlington, Virginia, June 10—12, 1985 p685
- [6] Weseloh W N 1989 *Proceedings of the 7th IEEE International Pulsed Power Conference* Monterey, California, June 11—14, 1989 p989
- [7] Rose D V, Welch D R, Hughes T P, Clark R E 2008 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 060401
- [8] Li Y D, Wang H G, Liu C L, Zhang D H, Wang J G, Wang Y 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1866 (in Chinese) [李永东、王洪广、刘纯亮、张殿辉、王建国、王玥 2009 强激光与粒子束 **21** 1866]
- [9] Schumer J W, Ottinger P F, Olson C L 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2652
- [10] Stygar W A, Corcoran P A, Ives H C, Spielman R B, Douglas J W, Whitney B A, Mostrom M A, Wagoner T C, Speas C S, Gilliland T L, Allshouse G A, Clark R E, Donovan G L, Hughes T P, Humphreys D R, Jaramillo D M, Johnson M F, Kellogg J W, Leeper R J, Long F W, Martin T H, Mulville T D, Pelock M D, Peyton B P, Poukey J W, Ramirez J J, Reynolds P G, Seamen J F, Seidel D B, Seth A P, Sharpe A W, Shoup R W, Smith J W, Van De Valde D M, Wavrik R W 2009 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** 120401
- [11] Spielman R B, Stygar W A, Seamen J F, Long F, Ives H, Garcia R, Wagoner T, Struve K W, Mostrom M, Smith I, Spence P, Corcoran P 1997 *Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference* Baltimore, Maryland, June 29—July 2, 1997 p709
- [12] Mostrom M A, Hughes T P, Clark R E, Stygar W A, Spielman R B 1997 *Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference* Baltimore, Maryland, June 29—July 2, 1997 p460
- [13] Liu L Q, Meng L, Deng J J, Song S Y, Zou W K, Liu D G, Liu S G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1643 (in Chinese) [刘腊群、蒙林、邓建军、宋盛义、邹文康、刘大刚、刘盛刚 2010 物理学报 **59** 1643]
- [14] Song S Y, Gu Y C, Guan Y C, Zou W K 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 482 (in Chinese) [宋盛义、顾元朝、关永超、邹文康 2008 强激光与粒子束 **20** 482]
- [15] Mendel C W Jr, Rosenthal S E 1995 *Phys. Plasma* **2** 1332
- [16] Struve K W, Martin T H, Spielman R B, Stygar W A, Corcoran P A, Douglas J W 1997 *Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference* Baltimore, Maryland, June 29—July 2, 1997 p162
- [17] Pointon T D, Stygar W A, Spielman R B, Ives H C, Struve K W 2001 *Phys. Plasmas* **8** 4534
- [18] Zou W K, Deng J J, Song S Y 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 992 (in Chinese) [邹文康、邓建军、宋盛义 2007 强激光与粒子束 **19** 992]

Particle-in-cell simulation of outer magnetically insulated transmission line of Z-pinch accelerator^{*}

Guo Fan Li Yong-Dong[†] Wang Hong-Guang Liu Chun-Liang Hu Yi-Xiang Zhang Peng-Fei Ma Meng
(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 25 July 2010; revised manuscript received 24 December 2010)

Abstract

In order to implement the particle-in-cell (PIC) simulation of four outer magnetically insulated transmission lines (MITL) of Z-pinch accelerator, we adopt the backward-going transmission line voltage wave at the double post-hole convolute (DHPC) travelling in the outer MITL direction, which is gained in circuit simulation to model the part from DHPC to Z-pinch load. For the purpose of enhancing the accuracy of equivalent circuit model of DHPC and Z-pinch load, the backward-going transmission line voltage wave that is computed by circuit simulation is rescaled by PIC simulation. The insulator voltage and current waves that are obtained in the PIC simulation of four outer MITLs of PBFA Z can match the electrical measurements better than those obtained by the circuit simulation. Moreover, the influence of Z-pinch load implosion on the process of pulsed power coupling in the outer MITL is analyzed and explained.

Keywords: Z-pinch, outer magnetically insulated transmission line, particle-in-cell simulation, equivalent circuit model

PACS: 29.27.-a

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50637010) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50807045).

[†] Corresponding author. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn