

单路脉冲功率真空装置的三维数值模拟研究*

黄培培[†] 刘大刚 刘腊群 王辉辉 夏梦局 陈颖

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2013年5月5日收到; 2013年6月16日收到修改稿)

研究了单路脉冲功率真空装置中脉冲功率的馈入、汇聚及传输, 在 CHIPIC 平台上, 采用多台计算机进行分进程并行计算的方法, 突破了单台计算机的内存及运行速度限制, 对单路脉冲功率的馈入、汇聚及传输装置进行建模, 并设置相应的参数, 从而对该大尺度装置进行了整体模拟. 模拟得到的该器件各个部分的阴阳极间电压、阴阳极电流等一些重要的物理参数. 模拟结果表明: 该单路真空脉冲功率器件整体都可以保持磁绝缘状态, 并达到了很好的功率汇聚的作用. 该工作验证了真空状态下脉冲功率产生及传输器件的可行性, 为进一步的实验研究提供了有力保证.

关键词: 单路脉冲功率真空装置, 并行计算, 数值模拟, 磁绝缘

PACS: 29.27.-a

DOI: 10.7498/aps.62.192901

1 引言

Z 箍缩装置对惯性约束聚变、天体物理学、辐射物理学等现代物理学领域有相当重要的作用^[1]. 在 Z 箍缩装置中, 往往采用多路传输汇聚的方式, 以实现功率在中心区域的汇聚^[2]. 传统 Z 箍缩装置中的脉冲功率产生器件及传输线通常分别放置在油区与水区中^[3-5], 但在传输 MV, TW 量级的高功率脉冲时, 为保证油与水不被击穿, 需要较大的阴阳极间距, 因而整个装置将十分庞大^[6]. 若采用磁绝缘^[7,8]脉冲功率真空装置, 则无需很大的阴阳极间距, 就可有效地实现脉冲功率的馈入与传输, 其每个单路装置的体积相对传统装置更小, 可实现更多路数的脉冲功率汇聚, 从而达到更大的工作电流.

另一方面, 由于脉冲功率真空装置中单路器件各个部分的性能及阻抗的匹配都对传输效率有很大的影响, 因此需要对单路器件的脉冲功率产生、传输及汇聚进行整体的模拟研究. 而每个单路装置的长度达到几十米, 若采用单台计算机对整个器件直接进行串行建模计算, 不仅计算时间漫长, 而且计算机的虚拟内存也将满足不了计算的需求. 在此

基础上, 本文从数值模拟的角度出发, 以粒子模拟软件 CHIPIC^[9,10] (该软件可对磁绝缘传输线进行有效地模拟^[11]) 为基础, 采用多台计算机进行分进程并行计算^[12,13]的方法, 对单路脉冲功率的产生、传输及汇聚进行了三维粒子模拟 (PIC) 研究, 并进行了相关分析.

2 数值模型的实现方法

2.1 器件的基本结构

由引言所述, 单路脉冲功率真空装置的研究对于整个 Z 箍缩装置的研究有着代表性的意义. 图 1 为单路脉冲功率真空装置的内部尺寸结构, 内半径 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 分别为 584 mm, 573 mm, 563 mm, 553 mm, 543 mm, 180 mm, 外半径 R_1, R_2 分别为 600 mm, 200 mm, 二极管间距 d 为 14 mm. 为该装置是由 5 个互相串联的 LTD 组件构成的脉冲功率产生器件 (每个组件又分别包含有 10 个 LTD 模块)、圆锥形 MITL 汇聚段以及 1 m 长同轴型 MITL 传输段构成.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175040) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 515171696@qq.com

2.2 脉冲功率的馈入及叠加

单路脉冲功率真空装置左端的脉冲功率产生器件是由 5 个互相串联的 LTD 组件构成的, 而每个组件包含 10 个 LTD 输入模块. 每个 LTD 组件的结构示意图如图 2 所示.

每个 LTD 输入模块输入的脉冲电压波形如图 3 所示. 但由于 50 个 LTD 输入模块分布在长 19 m

左右的真空传输线上, 电磁波从左至右的传播时间约为 63 ns. 因此, 需考虑各个 LTD 输入模块输入电压的延时, 也就是当前面输入的电磁波传播到当前 LTD 所在位置时, 该 LTD 的输入电压才开始加载, 这样才能保证 50 个 LTD 输入模块的峰值恰好相互叠加达到最大. 模拟中设置二极管阴极表面的发射阈值为 20 kV/cm, 其他区域的阴极表面的发射阈值为 200 kV/cm^[11].

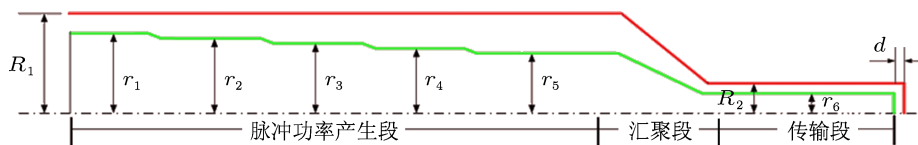


图 1 单路脉冲功率产生及传输结构内部的具体尺寸

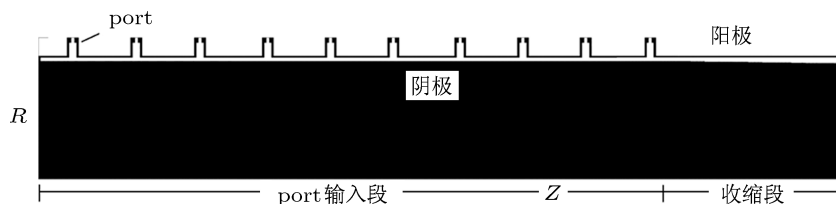


图 2 LTD 组件结构示意图

2.3 脉冲功率的汇聚及传输

本器件的汇聚以及传输段是由一段圆锥形 MITL 和一段 1 m 长的同轴 MITL 组成的, 本文采用在汇聚段末端连接一段 1 m 长的均匀同轴型 MITL, 然后再连接一个二极管作为负载. 其结构示意图如图 4 所示.

由于现在现在应用的脉冲功率产生及传输器件的传输电压在 4.2 MV 左右, 所以在选择负载的时候, 一定要保证整个器件的磁绝缘. 由 Creedon 的层流理论^[7] 可得同轴磁绝缘传输线的最小磁绝缘电流 I_{min} 的表达式为

$$I_{min} = I_{\alpha} g \gamma_m \left(\operatorname{arcosh} \gamma_m + \frac{\gamma_0 - \gamma_m}{\sqrt{\gamma_m^2 - 1}} \right), \quad (1)$$

式中, $I_{\alpha} = 2\pi m_0 c^2 / (\mu_0 c e)$, m_0 为单个电子的静止

质量, c 为真空中光速, μ_0 为自由空间磁导率, e 为单个电子的电子量; g 为几何因子, 对于同轴传输线 $g = 60/Z$ (其中, Z 为传输线的真空阻抗); γ_m 为电

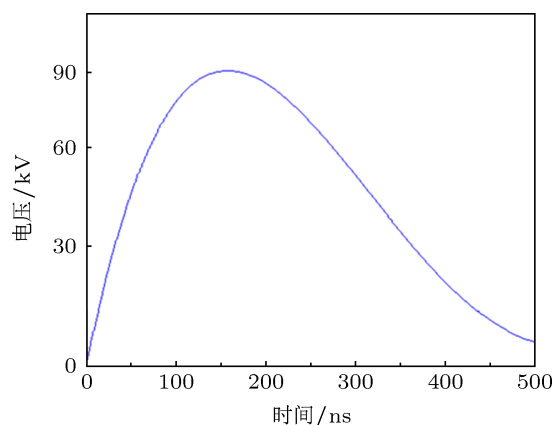


图 3 模拟中每个 PORT 端口输入的电电压波

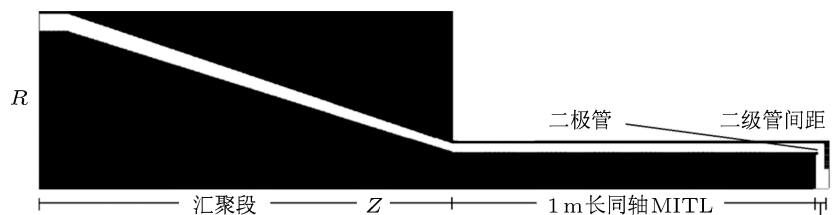


图 4 脉冲功率的汇聚及传输段示意图

子鞘边缘处的电子相对论因子; $\gamma_0 = 1 + eV_0/m_0c^2$, V_0 为阳极电势. 当 $V_0 = 4.2$ MV 时, 由 (1) 式计算出 $I_{\min} = 886.88$ kA. 为了保证整个器件的磁绝缘, 所以加载的负载阻抗最大值 Z_{\max} 的表达式为

$$Z_{\max} = \frac{V_0}{I_{\min}}. \quad (2)$$

所以由 (2) 式计算出二极管阻抗

$$Z_{\max} = 4.7 \Omega,$$

所以为了保证整个传输器件的磁绝缘, 选取二极管的阻抗为 4.2Ω , 二极管间距选择为 14 mm.

2.4 并行算法下的三维模型的建立

图 1 所示的单路脉冲功率装置根据功能的不同, 可划分为三个不同的部分, 即真空脉冲功率产生器件 (由 5 个 LTD 组件串联起来的真空传输线), 真空脉冲功率汇聚器件 (圆锥形 MITL) 以及真空脉冲功率传输器件 (1 m 长的均匀同轴形 MITL). 本文采用三维柱坐标首先对单路脉冲功率产生及汇聚器件建模.

模拟的参数设定如下: 由于在每个模块后面均有一个内筒半径收缩区域, 半径变化量在 11 mm 左右, 为保证计算的精度这些区域 R 方向的网格大小划分为 1 mm, 其他区域均为 3 mm; Z 方向网格大小仅在二极管所在区域为 1 mm, 其他选取为 3 mm; 角向网格大小为 36° ; 时间步长为 0.9 ps. 由于器件结构大, 网格划分小, 导致整个结构的网格

数目非常巨大, 总体网格数目在 4.3×10^7 个左右, 在对整体器件的模拟过程中, 需要占用计算机的总内存为 9888 MB, 目前市场上普遍销售的个人计算机的虚拟内存满足不了对整个器件建模的要求. 因此, 需要采用 8 台计算机分 32 个进程对其进行三维建模. 在整个模拟过程中, 由于电子发射面积大, 电子数目比较多, 模拟耗时大于 300 h.

三维粒子模拟 (PIC) 的并行算法, 主要是基于时域有限差分法 (FDTD), 更新和传递物理量 (电磁场信息、电流密度、电荷密度和粒子信息等); 为了采取适当的并行策略实现程序, 初步的思想是将整个区域分成数个子区域分别交给不同进程来计算, 利用消息传递函数在各相邻子区域间传递消息. 也就是说, 并行算法的实现是利用分治的思想, 将计算区域分割为多个子区域, 相邻子区域间存在公共网格来进行数据交换.

本文以 FDTD-PIC 算法为基础, 实现了一种基于分段建模和连接体交换数据的大尺度器件模拟并行算法, 能大幅减少解析时进程的内存使用量, 实现了大尺度器件并行模拟这一功能.

基于分段建模和连接体交换数据的大尺度器件并行算法是以 FDTD-PIC 算法为基础, 并且将器件分成几段, 分别在不同的计算机或者是计算节点上建模和解析, 并只在公共网格区域互相交换数据 [12,13]. 具体的实现过程如图 5 所示, 灰色区域表示公共网格区:

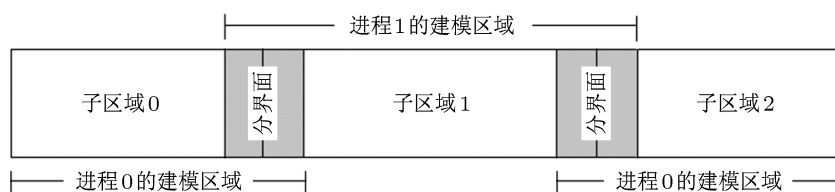


图 5 大尺度器件模拟并行算法建模示意图

对于场信息的交换来说, 只需将切向磁场 B_x 和 B_y 与切向的电流密度 J_x 和 J_y 传递给后面的进程, 就能正确的刷新 E_x 和 E_y . 这样就只需要交换一次磁场信息. 具体的交换信息过程如图 6 所示, 灰色区域表示公共区域.

本文模拟所采用的就是大尺度模拟并行算法, 具体的建模完成后所得的剖面结构如图 7 所示, 在每个分段的连接处的灰色区域表示公共网格区 (10 个网格), 图中还标出了模拟中每个电压、电流观测点的位置. 用来观察阴阳极之间的电压、阳极电

流、阴极电流以及空间电子流等相关物理参数.

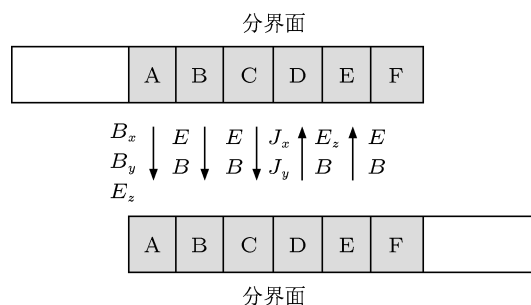


图 6 连接体内的消息传递示意图

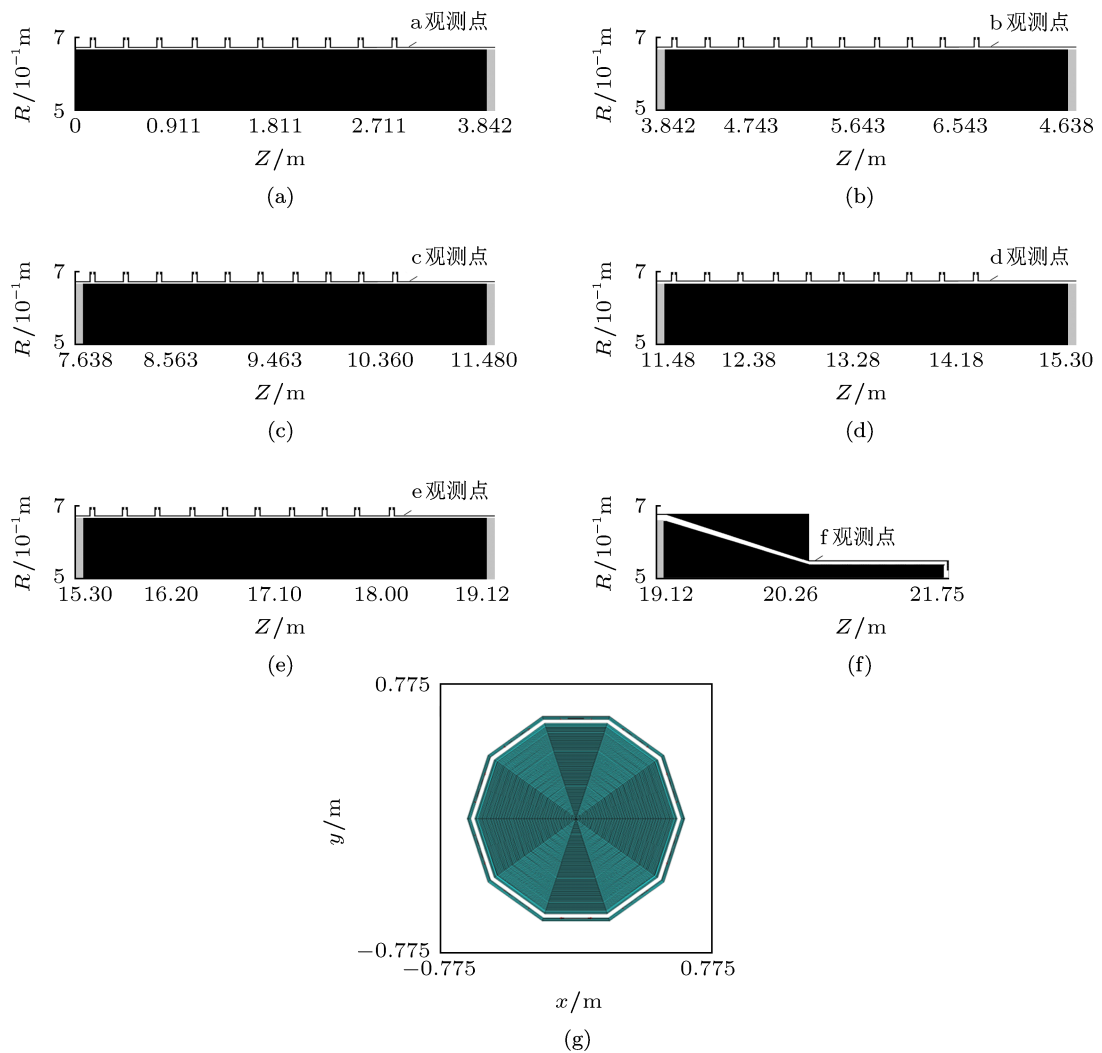


图7 三维建模剖面图 (a) 第一个 LTD 组件; (b) 第二个 LTD 组件; (c) 第三个 LTD 组件; (d) 第四个 LTD 组件; (e) 第五个 LTD 组件; (f) 圆锥形收缩段及二极管区域; (g) 横截面

3 模拟结果分析

图 8 至图 11 分别为模拟所得的每个观测点的阴阳极间电压、阳极电流、阴极电流和空间电子流随时间的变化关系. 表 1 为图 8 至图 11 中各个观测量的峰值大小, 对比这些数据可以发现: 通过真空传输结构将 50 个峰值电压为 90 kV 的 LTD 串联后其输出电压峰值能达到 4.18 MV. 另外, 阳极电流从左至右逐步减小, 从第一个模块的末端传输到第五个模块的末端阳极电流损失约了 0.01 MA. 电流损失较小, 该传输器件的传输效率还是比较好的. 而阴极电流从左到右逐步增大, 但是在第五段 (E 观测点处) 出现轻微的下降, 可能是由于模拟测量值存在着相应的误差所引起的.

在整个器件的模拟过程中, 脉冲功率产生器件从第一个组件开始, 其阴极表面依次达到发射阈值,

产生电子发射. 然而, 由于此时二极管的阴极表面电场还不够强, 不能使二极管阴极发射电子形成回路电流. 因此, 在脉冲功率产生器件内将先建立起一个电子流的“损失前沿区”. 从图 8 至图 10 中都可以看到一个电压或电流减小的区域, 这是由脉冲功率器件中刚建立的“损失前沿区”导通阴阳极造成的. 随着脉冲功率向右传播, 二极管将开始工作, 形成回路电流, 整个器件也将随之达到较好的磁绝缘状态.

图 11 中 A—D 观测点的空间电子流都随时间产生了较大的波动, 这是由于这些观测点位于真空阻抗变化区域附近, 真空阻抗变化导致电子流产生“涡流”, 致使观测值发生波动. 而第五个组件末端连接的是一段与之真空阻抗匹配的传输线, 因此 E 观测点空间电子流的观测值相对较为平滑.

图 12 为模拟所得的 322 ns 时刻整个器件的电

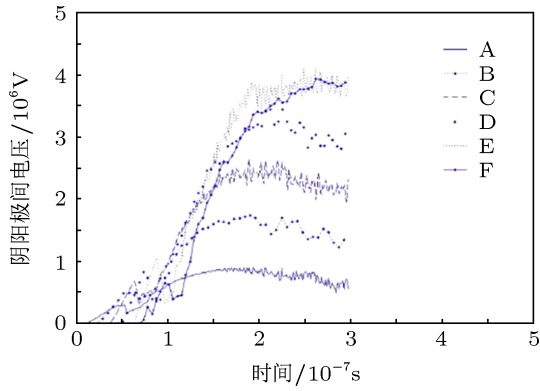


图8 A—F 观测点处电压

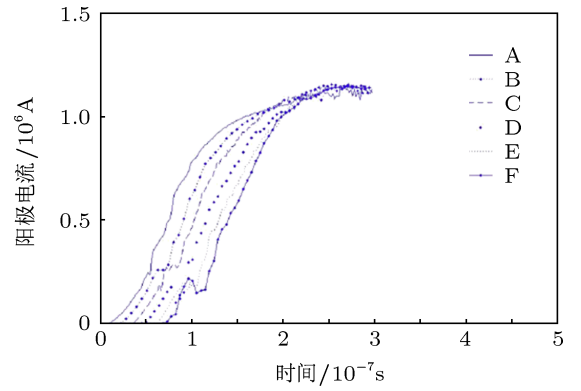


图9 A—F 观测点处阴极电流

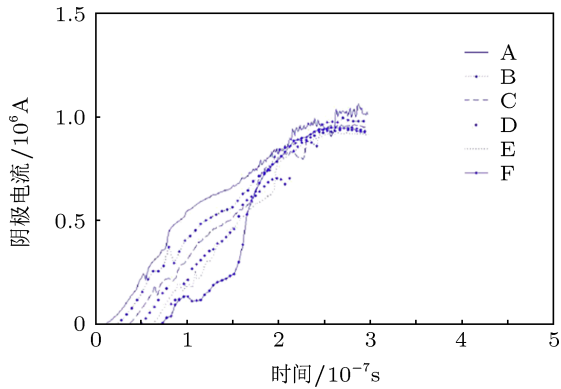


图10 A—F 观测点处阳极电流

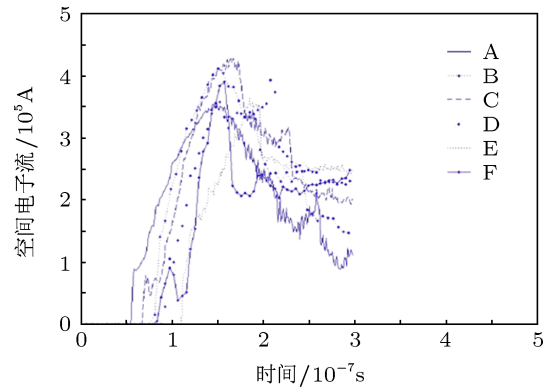


图11 A—F 观测点处空间电子流

表1 各个观察点的电压及阴极电流峰值大小

观测点位置	A 观测点	B 观测点	C 观测点	D 观测点	E 观测点	F 观测点
电压/MV	0.90	1.80	2.70	3.50	4.18	4.14
阴极电流/MA	1.10	1.02	0.97	0.96	0.93	0.96
阳极电流/MA	1.17	1.17	1.17	1.16	1.16	1.15

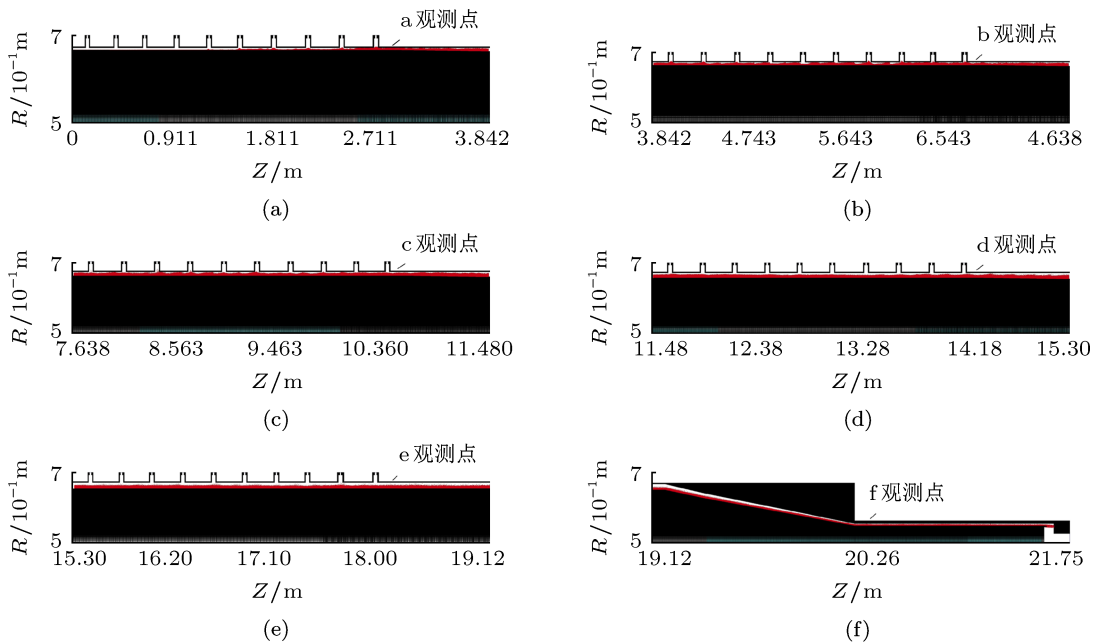


图12 322 ns 时刻的电子相空间图 (a) 第一个 LTD 组件; (b) 第二个 LTD 组件; (c) 第三个 LTD 组件; (d) 第四个 LTD 组件; (e) 第五个 LTD 组件; (f) 收缩段及二极管区域

子相空间图,从图中可以看出整个器件在该时刻处于较好的磁绝缘状态.在与每个组件末端连接的阴极半径收缩区域附近,部分电子运动到阳极使传输电流产生损失.这是由于在该区域,器件真空阻抗发生变化,引起电子层变得不稳定造成的.

4 结论

本文在 CHIPIC 软件基础上,采用多台计算机

进行分进程并行计算的方法,实现了对单路真空脉冲功率器件的建模,成功地对单路脉冲功率的产生、传输及汇聚进行了整体的三维粒子模拟.模拟得到了该器件各个部分的阴阳极间电压、阴阳极电流等一些重要的物理参数,该结果表明整个单路真空脉冲功率器件可以保证磁绝缘,并达到了很好的功率汇聚的作用.该工作验证了真空状态下脉冲功率产生及传输器件的可行性,为进一步的实验研究提供了有力保证.

-
- [1] Guo F, Li Y D, Wang H G, Liu C L, Hu Y X, Zhang P F, Ma M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 102901 (in Chinese) [郭帆, 李永东, 王洪广, 刘纯亮, 呼义翔, 张鹏飞, 马萌 2011 物理学报 **60** 102901]
- [2] Song S Y 2004 *Ph. D. Thesis* (Mianyang: Institute of Fluid Physics) p4 (in Chinese) [宋盛义 2004 博士学位论文 (绵阳: 流体物理研究所) 第 4 页]
- [3] Spielman R B, Stygar W A, Struve K W, Seamen J F 1997 *IEEE Particle Accelerator Conference* May 12–16, 1997 p1235
- [4] 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, Corcoan P, Smith I, Spence P 1995 *IEEE Pulsed Power Conference* Jul 03–06, 1995 p396
- [5] Stygar W A, Spielman R B, Allshouse G O, Deeney C, Humphreys D R, Ives H C, Long F W, Martin T H, Matzen M K, McDaniel D H, Mendel Jr C W, Mix L P, Nash T J, Poukey J W, Ramirez J J, Sanford T W L, Seamen J F, Seidel D B, Smith J W, van De Valde D M, Wavrik R W, Corcoran P A, Douglas J W, Smith I D, Mostrom M A, Struve K W, Hughes T P, Clark R E, Shoup R W, Wagoner T C, Gilliland T L, Peyton B P 1997 *IEEE Pulsed Power Conference* Jun 29–Jul 02, 1997 p591
- [6] 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]
- [7] Greedon J M 1977 *Phys. Appl.* **48** 1070
- [8] Wang H H, Meng L, Liu D G, Liu L Q, Yang C 2012 *Physics of Plasmas* **19** 103506
- [9] Zhou J, LIU D G, Liao C 2012 *Journal of Plasma Physics* **79** 69
- [10] Zhou J, Liu D G, Liao C, Li Z H *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 2002
- [11] Liu L Q, Liu D G, Wang X Q, Zou W K, Yang C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 162901 (in Chinese) [刘腊群, 刘大刚, 王学琼, 邹文康, 杨超 2012 物理学报 **61** 162901]
- [12] Liao C, Zhou J, Liu D G, Liu S G 2011 *High power laser and particle beams* **23** 1020 (in Chinese) [廖臣, 周俊, 刘大刚, 刘盛刚 2011 强激光与粒子束 **23** 1020]
- [13] Liao C, Liu D G, Liu S G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6709 (in Chinese) [廖臣, 刘大刚, 刘盛刚 2009 物理学报 **58** 6709]

Three-dimensional numerical simulation of the single-channel pulsed-power vacuum device*

Huang Pei-Pei[†] Liu Da-Gang Liu La-Qun Wang Hui-Hui
Xia Meng-Ju Chen Ying

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 5 May 2013; revised manuscript received 16 June 2013)

Abstract

A single-channel pulsed-power vacuum device is studied. Based on the platform of CHIPIC, the limitation of memory and computation speeds of a single computer is broken through by the method of parallel computation of multi-computers. For the model of the whole device, the models of the parts of feed-in, convergence and transmission in the single-channel pulsed-power device are built, and the parameters are set up. The obtained voltages between the cathode and anode, as well as the currents of the cathode and the anode using the proposed models are in accordance with the theoretical ones. The single-channel pulsed-power vacuum device also can retain magnetically insulated and achieve the function of convergence of power. This shows the feasibility of the single-channel pulsed-power vacuum device.

Keywords: single-channel pulsed-power vacuum device, parallel computation, numerical simulation, magnetically insulation

PACS: 29.27.-a

DOI: 10.7498/aps.62.192901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175040).

[†] Corresponding author. E-mail: 515171696@qq.com