

磁绝缘传输线中心汇流区数值模拟的实现*

刘腊群^{1)†} 蒙 林¹⁾ 邓建军²⁾ 宋盛义²⁾ 邹文康²⁾ 刘大刚¹⁾ 刘盛纲¹⁾

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2009 年 3 月 23 日收到; 2009 年 6 月 4 日收到修改稿)

介绍了磁绝缘的形成原理以及模拟中采用的基本空间和时间算法. 成功地使用了非均匀网格模型, 实现了对结构复杂的中心汇流区的三维数值建模; 运用金属支撑杆模型, 实现了负载的数值建模. 探讨了 MPI 并行算法运用到模拟中的可行性及其应用价值. 最后以 Z 加速器上 MITL 的中心汇流区为例, 验证了模拟的正确性.

关键词: 磁绝缘, 支撑杆, MPI 并行, 中心汇流区

PACC: 2921

1. 引 言

如今, 许多像 Z 箍缩^[1-3]这样的大型高功率脉冲物理实验中需要用到 MV, TW 量级的高功率电脉冲. 这样一个脉冲在介质区传播时由于受介质电场击穿强度的限制, 要求介质的空间尺度较大, 而脉冲功率装置驱动的靶空间尺度一般都很小, 因此传输部件必须经历空间压缩过程, 其结果是靶区附近将承受非常高的场强, 以致几乎所有的介质传输线都将被击穿, 从而使传输失效. 因此, 只能采用磁绝缘传输线(MITL)这种特殊器件, 才能进行功率的汇聚, 从而获得 MV, TW 量级的高功率电脉冲.

对比其他结构的 MITL, 四层圆盘锥形 MITL 具有能够承载更高的传输功率的优点. 然而, 由于它的中心汇流区采用了‘柱-孔’结构来实现功率汇聚的作用, 使得该区域的内部结构变得异常复杂. 这导致了磁绝缘现象在该区域被破坏, 从而出现传导电流的损失. 因此, 对中心汇流区的研究变得非常重要. 另一方面, 由于受到了实际条件的制约, 通常使用的一些数据测量方法在此都不适用. 因此, 想要在实验中获得某个具体位置的相关参数非常困难, 而通过数值模拟可以找出结构上哪些地方对结果比较敏感, 从而优化设计.

本文从模拟的角度出发, 重点研究了如何实现

磁绝缘传输线中心汇流区的数值模拟.

2. 磁绝缘传输线的基本理论

2.1. 磁绝缘的基本原理

在真空传输线中, 当电压增大、阴极表面场强超过电子发射阈值(一般为 250 kV/cm), 大量电子开始从阴极发射出来, 并在电场作用下向阳极运动, 形成空间电子电流, 造成传输损失. 磁绝缘传输线就是导体传导电流自身产生的磁场或者外加磁场产生的磁场使阴极发射的电子的运动方向发生偏转, 电子不再达到阳极, 真空间隙保持高压绝缘, 高功率脉冲从而能够有效传输至负载的现象^[4].

2.2. 中心汇流区的结构及物理特性

图 1 所示是本文选取的四层圆盘锥形 MITL 的中心汇流区所处的位置及它的具体结构. 从图中可以看到, 中心汇流区的‘柱-孔’结构破坏了传输线原本的圆周对称, 从而在此区域形成所谓的‘零磁位区’^[5]. 这将导致磁绝缘在中心汇流区失效, 大量的电子在该区域将直接打到阳极或阳极柱上, 形成横向空间电荷流. 因此, 中心汇流区是四层圆盘锥形 MITL 传导电流的主要损失区域.

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2007CB310401)资助的课题.

† E-mail: liulaqun@yahoo.cn

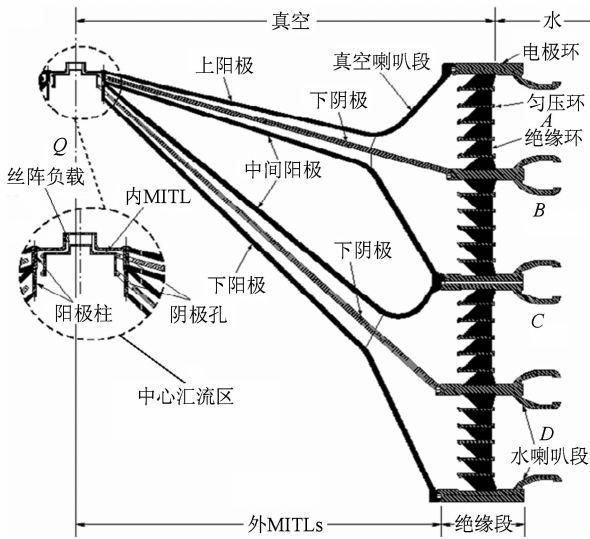


图1 中心汇流区的位置及结构示意图

3. 数值模拟的实现

3.1. 基本空间和时间算法

图2所示是本文选取的三维 Yee 网格模型^[6], 此模型将空间任一矩形网格上的 E 和 H 的六个分量依据坐标方向的不同将磁场和电场放在全网格点或半网格点上. 这样就实现了磁场分量与电场分量的相互环绕, 实现了电磁场的循环迭代计算. 为获得计算的精度, 在时间的迭代上本文采用蛙跳模型^[6], 如图3所示. 此模型采取将电场 E 和磁场 B 分别放在全步长时刻与半步长时刻进行相互迭代计算, 来实现时间上的循环计算.

3.2. 中心汇流区的建模方法

由于中心汇流区采用了‘柱-孔’结构, 器件构型复杂, 且模拟的区域空间尺度小, 这对模拟过程中三维模型的建立提出了很高的要求. 对此, 可采取如下几种方法: 1) 在三个方向上的网格划分都非常小, 保证整个模型, 尤其是阳极柱和阴极孔的精度; 2) 利用器件的周期对称性(本文模拟的是12孔四层圆盘锥形 MITL, 因此整个器件可划分为12个对称周期), 采用周期性对称边界条件, 只建立一个周期进行模拟, 从而简化三维模型; 3) 选取合适的三维函数, 构建阴极孔结构(如图4). 然而, 在构建三维模型时, 有些计算区域需较细网格才能满足计

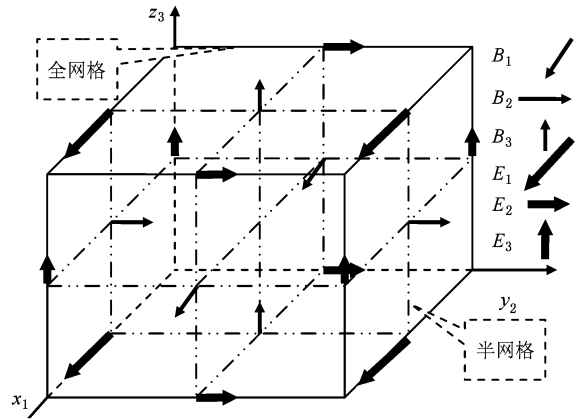


图2 三 Yee 网格模型

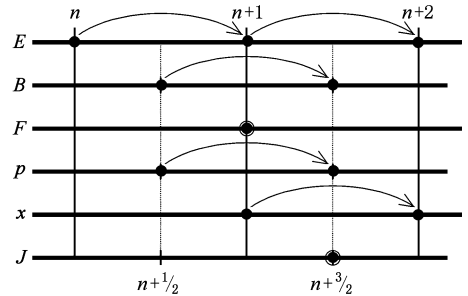


图3 蛙跳模型

算需要, 而有些区域则只需较粗网格. 但是在进行计算时又要求两个临近网格单元的变化限制在25%之内, 并且网格单元长宽比(纵横比)限制在5之内^[7], 为了满足这个限定条件, 就必须采用适合的网格划分算法. 本文采用了一种简单 Pade 网格划分算法^[7]来实现非均匀网格的划分(如图5).

它用到的 Pade 函数的简化形式 $x_i = (1 + ai) / b + ci$. 其中, x_i 为第 i 个空间网格的位置, a, b, c 为常数. 在某一区域上划分网格, 有3个参数可供择, 即区域长度、区域的网格数、区域起始点网格大小. 系数 a, b, c 是这3个参数的函数表达式. 在给定的条件下, 可以计算出我们称为 Pade 渐变的网格划分, 这样可以十分容易地画出自己所需要的渐变非均匀网格, 并且该网格可以有效的控制因网格剧变对电场计算带来的不利影响.

3.3. 负载模拟的实现

连接阴阳极之间的金属丝阵负载(如图6)在模拟中的实现, 对于模拟是否成功起决定性的作用. 这是由于, 只有在模拟中建立与实际情况相符的负

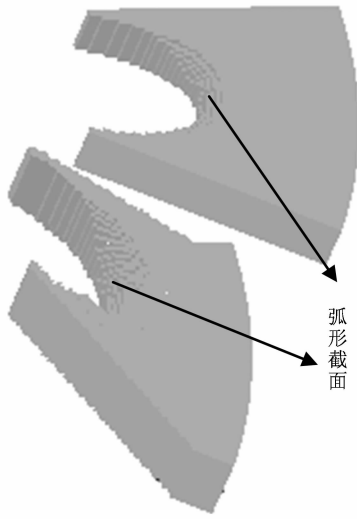


图 4 阴极孔的内部结构

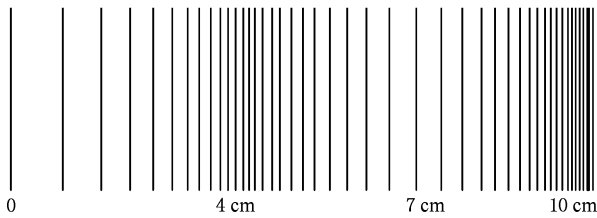


图 5 Pade 函数网格划分

载才能导通阴阳极,形成负载电流.磁绝缘现象所需的强磁场就是由这个电流回路在器件中产生.然而,由于金属丝阵负载中金属丝的直径通常只有十几微米,远小于一个网格的大小,而通常要对一个物体建模都要求物体在各方向的尺度不小于一个网格.因此,若想通过划分网格来对负载进行建模是很难实现的.所以本文引进了金属支撑杆^[8]这样一个数值模型来模拟负载的电阻等一些重要物理

特性,并设置观察命令输出负载电流随时间的变化图.图 6 所示是支撑杆在矩形网格中的 3 维立体模型.图中假设支撑杆方向是 y 轴方向,支撑杆半径为 a ,流过的电流为 I , x 轴方向网格步长为 Δx , z 轴方向网格步长为 Δz .关于支撑杆具体的实现方法参考了文献[8].

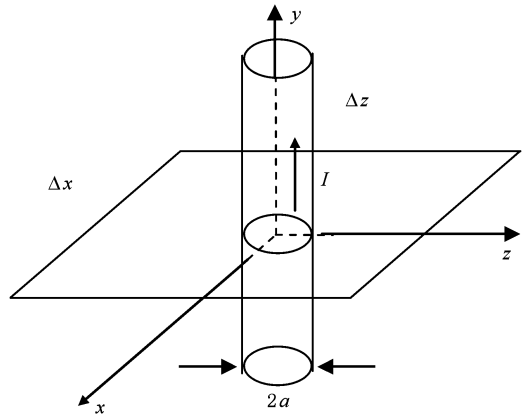


图 6 支撑杆的立体网格模型

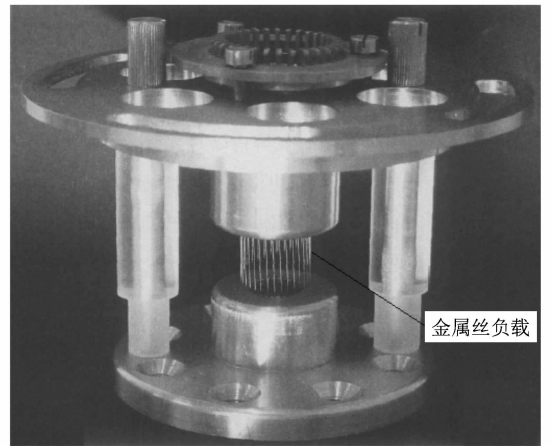


图 7 金属丝负载实物图

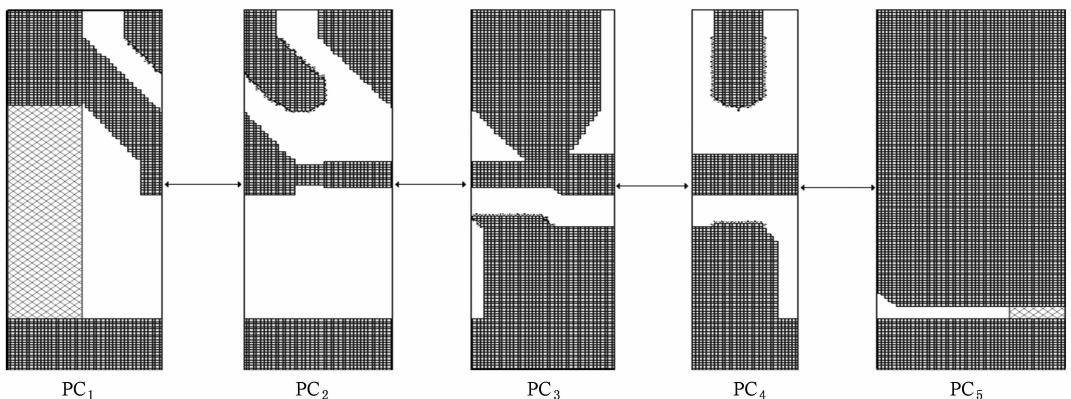


图 8 五台 PC 机分段计算示意图

从图 7 可以看出,在实际器件中负载是由几十根金属丝组成. 本文采用在阴阳极之间搭建一系列金属支撑杆的方式模拟负载,从而尽可能的保证模拟与实际相符.

3.4. 并行算法的应用

在前面提到本文采用了非均匀网格和周期性对称边界条件等方法减少了空间网格数量,然而,由于该器件要求网格划分很细,因此在三维建模过程中划分的网格数目仍然非常庞大(约 1.12×10^6 个). 这样不仅会导致对电磁场的计算量增加很多,还会引起模拟过程中宏粒子的发射量增大,带来巨大的计算量. 因此,单台微机的模拟耗时较长,通常需要一个星期左右才能完成一次模拟. 针对此问题,本文引入了 MPI 并行算法以加快模拟速度. 图 8 所示的是五台 PC 机分段计算示意图.

4. 模拟验证

本文按照以上方法编制了一款 MITL 数值模拟软件,并以美国 Sandia 实验室的四层圆盘锥形磁绝缘传输线的中心汇流区为实例(如图 9),进行了模拟验证. 在建模过程中,对器件结构进行了近似化处理(如图 10),具体的方法参考了相关文献^[9],并将相关结果与文献[9]上的结论进行了对比. 模拟区域为 $r = 140 \text{ mm}$, $z = 200 \text{ mm}$,角向为一个周期,即 $\varphi = 30^\circ$. 负载的电阻参数约为 0.167Ω ,模拟时间为 160 ns .

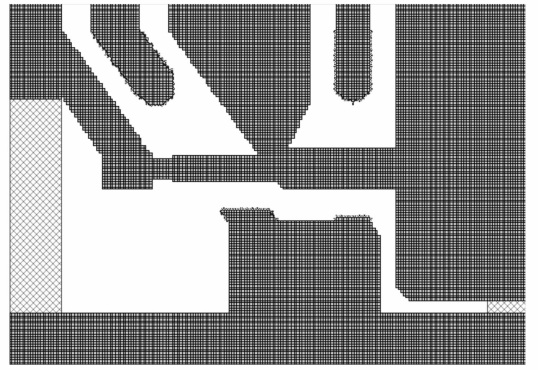


图 10 简化处理的中心汇流区模型图

周期的三维结构图. 图 12 显示的是阳极柱与阴极孔的空间关系. 从图中可以清晰地看到阳极柱在穿过两个阴极孔后将三个阳极连接起来,起到了汇流的作用.

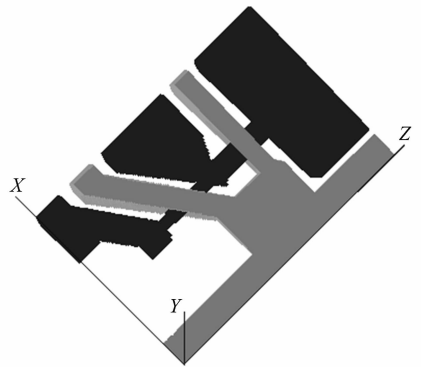


图 11 一个对称周期的三维结构图

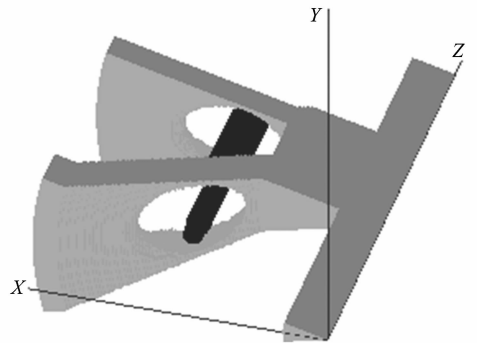


图 12 阳极柱与阴极孔的空间关系图

在实际情况下,负载电阻大小的不同将对整个器件上电磁场产生不同程度的影响. 本文对加入不同大小负载电阻的冷腔进行了模拟,发现在数值模拟中也发生了与实际情况相符的反馈现象. 图 13、

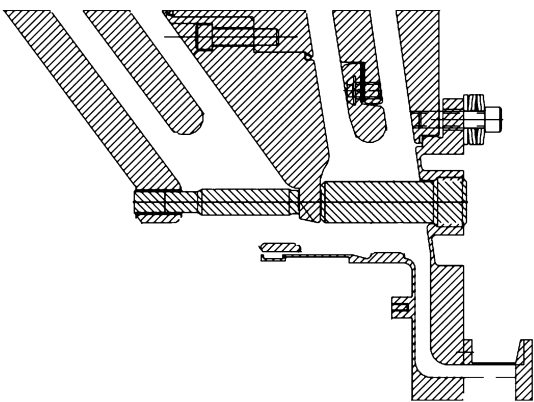


图 9 中心汇流区示意图

4.1. 模拟结果

图 11 是采用非均匀网格方法,建立的一个对称

图 14 分别是对加有 0.208Ω 与 0.167Ω 两种不同大小负载的冷腔进行模拟后,在输入端口附近测得的电压波形图. 对比发现,两种情况下测得的 $A(r = 130 \text{ mm}, z = 50 \text{ mm}, \theta = 0^\circ)$, $B(r = 130 \text{ mm}, z = 62 \text{ mm}, \theta = 0^\circ)$ 两点之间电压波形的峰值大小分别为 4.1516 MV 与 3.5897 MV ,具有明显的差别. 这与实际情况相符,同时也间接地反映了用金属支撑杆建立负载模型的正确性.

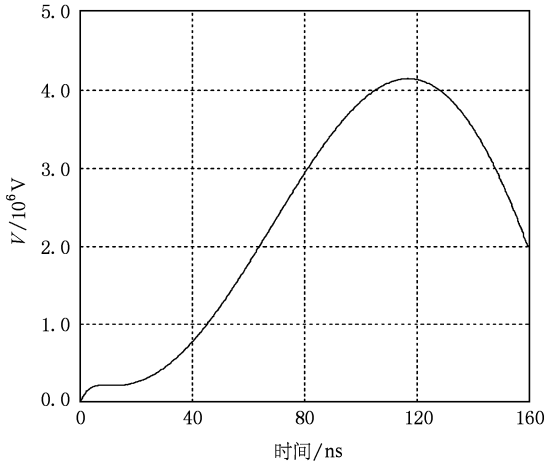


图 13 冷腔负载为 0.208Ω 时 A, B 两点间的电压波形图

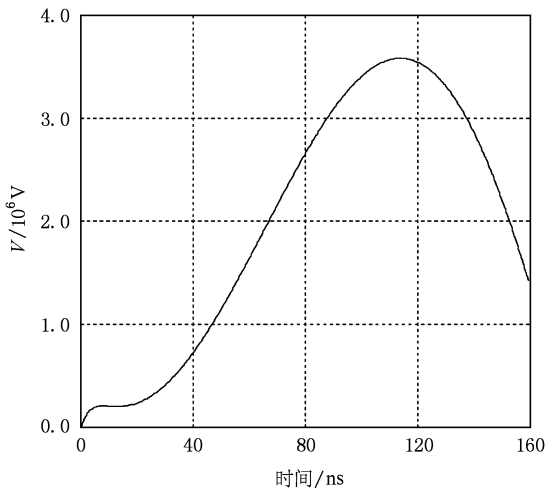


图 14 冷腔负载为 0.167Ω 时 A, B 两点间的电压波形图

图 15、图 16 分别表示的是 $\theta = 0^\circ, \theta = \pm 15^\circ$ 处的角向磁场等位图. 从图中可以看出:在中心汇流区产生了一些磁场为零的区域,即所谓的‘零磁位区’(零磁位区对应的等势线在图中已作标明). 在实际器件的工作过程中,有很大一部分电流将损失在与该区域相交的阳极上. 这些零磁位区在模拟开始不久后就已建立,并一直存在于整个模拟过程

中,这与实际情况相符.

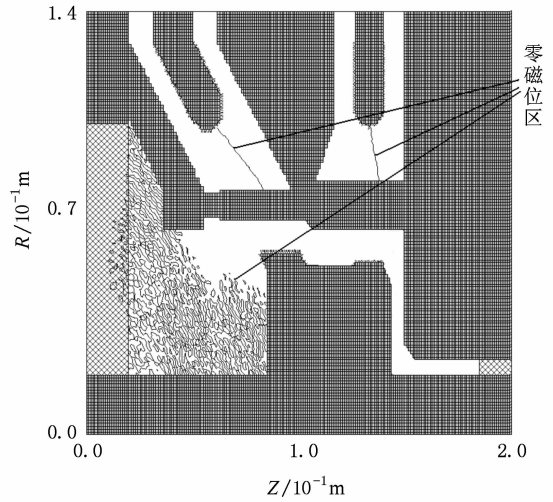


图 15 $\theta = 0^\circ$ 处的角向磁场等位图

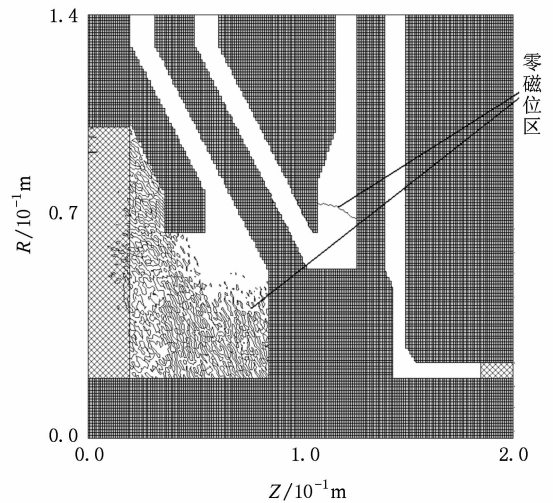


图 16 $\theta = \pm 15^\circ$ 处的角向磁场等位图

图 17、图 18 分别是 41.9 ns 时刻 $\theta = 0^\circ$ 处的相空间剖面图与三维相空间图,从图中可以看到明显的磁绝缘现象. 另外,该软件支持三维相空间图的输出,因此可以非常直观地观察粒子与器件的三维空间关系. 此命令还能支持随意地旋转三维相空间图,从而可以从各个角度来观察粒子与器件的空间关系.

图 19、图 20 分别代表的是冷腔和热腔模拟中测得的负载电流随时间的变化关系. 对比两条曲线可以看出冷腔与热腔各个时刻的负载电流大小基本一样,通过计算对比发现:在只考虑有电子发射的情况下,负载电流在达到峰值 18.67 MA 时,热腔

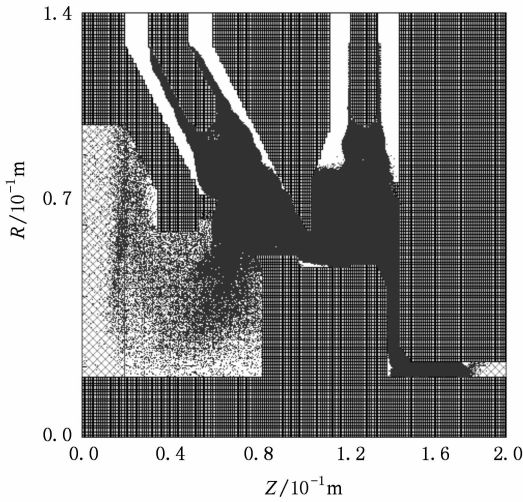


图 17 41.9 ns 时刻 $\theta = 0^\circ$ 处的相空间图



图 18 41.9 ns 时刻的三维相空间图

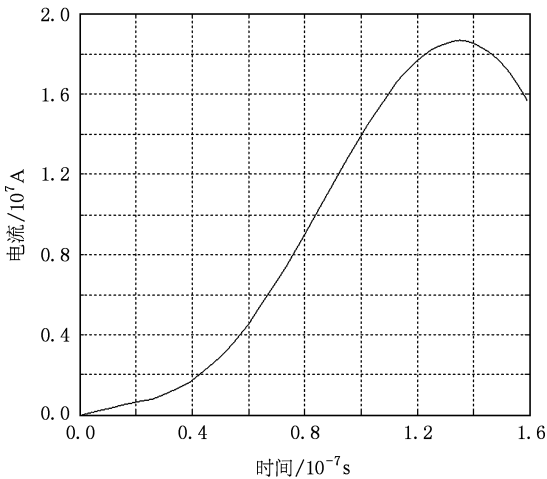


图 19 冷腔负载电流随时间变化图

时损失 100 kA) 非常接近。

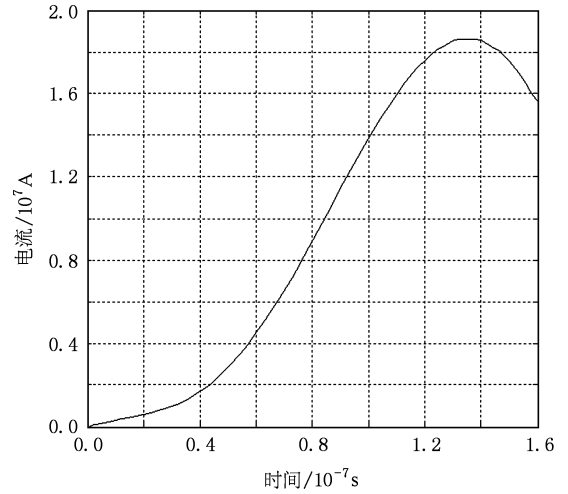


图 20 热腔负载电流随时间变化图

图 21、图 22 是分别用串行和并行对热腔进行模拟,在测得的 A,B 两点间的电压时间变化图. 从图中可看出串并行软件算出的结果是一致的,也就是说加入的并行的代码不会影响程序运算的准确性. 表 1 显示的是并行机器台数与加速比的关系. 从表 1 中显示的结果来看,采用 MPI 并行的加速效果非常明显.

表 1 并行机器台数与加速比的关系

计算机台数	计算时间/h	加速比
1	207	1
2	123	1.68
4	90	2.29
5	83	2.51

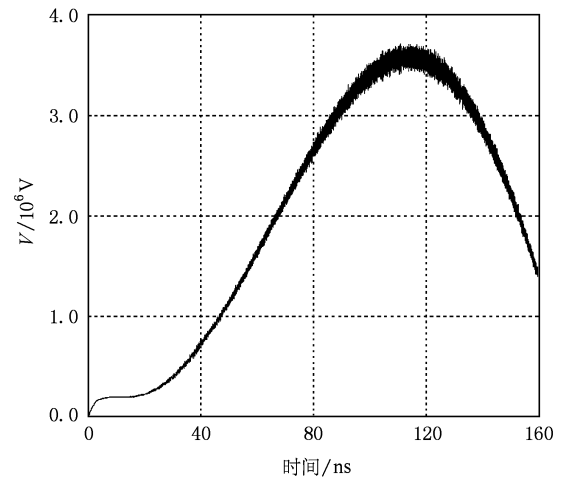


图 21 串行输出的 A,B 两点间的电压波形图

在中心汇流区损失的传输电流为 80 kA. 这与文献 [6] 提供的理论预测数据(达到峰值电流 18.5 MA

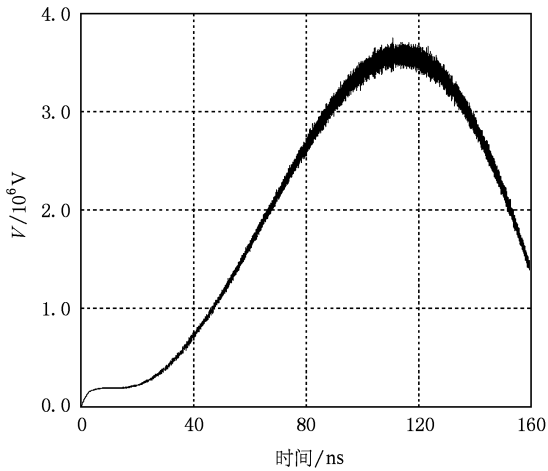


图 22 并行输出的 A, B 两点间的电压波形图

5. 结 论

本文采用数值模拟方法,对如何实现磁绝缘传输线的数值模拟的几个关键问题进行了研究,并将它们应用到了软件的编写开发中.然后利用该软件对磁绝缘传输线的工作过程进行了模拟,例举了部分结果来证明本文所采用的方法与软件编写的正确性.然而,本文只是实现了对磁绝缘传输线有电子发射过程的模拟与分析.在实际情况下,由于器件表面通常会吸附有少量的空气分子及其他杂质,这些杂质会在电子轰击器件表面产生高温后分解成正负离子,另外电子的轰击还会导致大量二次电子发射,这些粒子的产生都会引起较大的电流损耗.因此,实现对这些物理过程的模拟对提高磁绝缘传输线的认识是非常重要的,这些将在今后的工作中进行研究.

- [1] Ning C, Ding L, Yang Z H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 338 (in Chinese) [宁成、丁宁、杨震华 2007 物理学报 **56** 338]
- [2] 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]
- [3] Ning C, Yang Z H, Ding L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [宁成、杨震华、丁宁 2004 物理学报 **53** 808]
- [4] 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]
- [5] Pointon T D, Langston W L, Savage M E 2007 *IEEE ICOPS* 2004 **1** 272
- [6] Wang B Z 2002 *Electromagnetics Calculation* (Beijing: Science Press) p53 (in Chinese) [王秉中 2002 计算电磁学(北京:科学出版社)第53页]
- [7] Liu D G 2008 *Ph. D. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) p24 (in Chinese) [刘大刚 2008 博士学位论文(成都:电子科技大学)第24页]
- [8] Liu D G, Zhu D J, Zhou J, Liu S G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6924 (in Chinese) [刘大刚、祝大军、周俊、刘盛纲 2007 物理学报 **56** 6924]
- [9] Rose D V, Welch D R, Hughes T P, Clark R E 2008 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 06401

The implementation of the computer simulation of magnetically insulated transmission lines in post-hole convolute *

Liu La-Qun^{1)†} Meng Lin¹⁾ Deng Jian-Jun²⁾ Song Sheng-Yi²⁾
Zou Wen-Kang²⁾ Liu Da-Gang¹⁾ Liu Sheng-Gang¹⁾

1) (*School of Physical Electronics, University of electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

2) (*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China*)

(Received 23 March 2009; revised manuscript received 4 June 2009)

Abstract

This paper presents the formation of the magnetic insulation and the basic principles of its computer simulation. This paper uses the non-uniform grid model successfully to fulfill the requirement of three-dimensional simulation modeling of the double post-hole convolute whose structures are complex. By using the metallic struts to realize the load modeling of the computer implementation, we explored the feasibility of applying the MPI parallel algorithm in the simulation. Finally the simulation results are checked by using the double post-hole convolute of vacuum section of the Z accelerator as an example.

Keywords: magnetically insulation, strut, MPI parallel algorithm, double post-hole convolute

PACC: 2921

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB310401).

† E-mail: liulaqun@yahoo.co