

带螺旋支撑杆的同轴磁绝缘传输线三维数值模拟的实现*

刘腊群^{1)†} 刘大刚¹⁾ 王学琼¹⁾ 邹文康²⁾ 杨超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)

(2011年11月5日收到; 2012年1月14日收到修改稿)

依据实际器件尺寸, 建立了带螺旋支撑杆的同轴磁绝缘传输线三维数值模拟模型; 选取合适的二极管阴阳极间距作为传输线负载; 设置相应的模拟参数对其进行模拟. 将模拟结果与实验数据进行对比, 证明了模拟的可靠性; 并结合相应的实验数据, 分析了同轴磁绝缘传输线在加入螺旋支撑结构后对其传输效率的影响.

关键词: 三维数值模拟, 螺旋支撑杆, 磁绝缘传输线

PACS: 29.27.-a

1 引言

Z 箍缩装置主要用来开展高能物理实验, 对惯性约束聚变、天体物理学、辐射物理学等相关领域进行研究^[1]. 该装置主要由脉冲功率的储存、传输及汇聚几个部分组成^[2], 其中, 脉冲功率传输部分的设计至关重要. 美国 Sandia 实验室的 Z 加速器, ZR 加速器 (PBFA Z, ZR) 装置^[3-5]的脉冲功率传输部分采用油和水作为绝缘材料填充同轴传输线, 即通常所称的“油区”和“水区”. 但采用这样的方式来传输 MV, TW 量级的高功率脉冲^[6], 要求阴阳极间距较大才能保证填充介质不被击穿. 因此, 整个 Z 箍缩装置将非常复杂庞大, 维护非常困难. 采用同轴磁绝缘传输线来实现脉冲功率的传输, 能使装置结构较为简单, 同时可有效地缩小其所占空间.

然而, 在实际应用中, 用来传输脉冲功率的同轴磁绝缘传输线 (MITL) 的长度一般会有几米甚至十几米长, 若不在传输线中间加入相应的支撑结构托住内导体, 在重力的作用下其轴线势必会向下偏离水平位置. 为了固定内导体的位置, 实际器件

中需采用螺旋金属支撑杆连接内外导体作为支撑结构. 选取螺旋支撑杆作为支撑结构, 是因为其本身具有较强的电感, 在传输脉冲电压时会产生相应的感应电势, 从而保持阴阳极间的电势差. 但这种结构的引入势必会造成传输线的传输效率降低, 因此, 需要对螺旋支撑杆结构加入后的传输线效率进行研究. 可是其物理过程又较为复杂, 理论分析很难得出相关结论. 本文正是基于这一点, 从数值模拟的角度出发, 以我国自主研发的数值模拟软件——CHIPIC3D 为基础, 对其开展三维模拟研究工作. 同时, 结合实验数据分析了模拟结果, 证明了数值模拟的可靠性.

2 数值模型的实现方法

2.1 器件的基本结构及三维模型的建立

图 1 所示为一带螺旋支撑杆同轴磁绝缘传输线的剖面结构, 其轴向长度为 $L = 1270$ mm, 内筒半径 $R_c = 120$ mm, 外筒内半径 $R_a = 150$ mm, 采用环状阴极结构二极管作为负载, 环的宽度为 0.055 m. 在其中间部位加入如图中所示的螺旋支

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175040) 资助的课题.

† E-mail: liulaqun@yahoo.cn

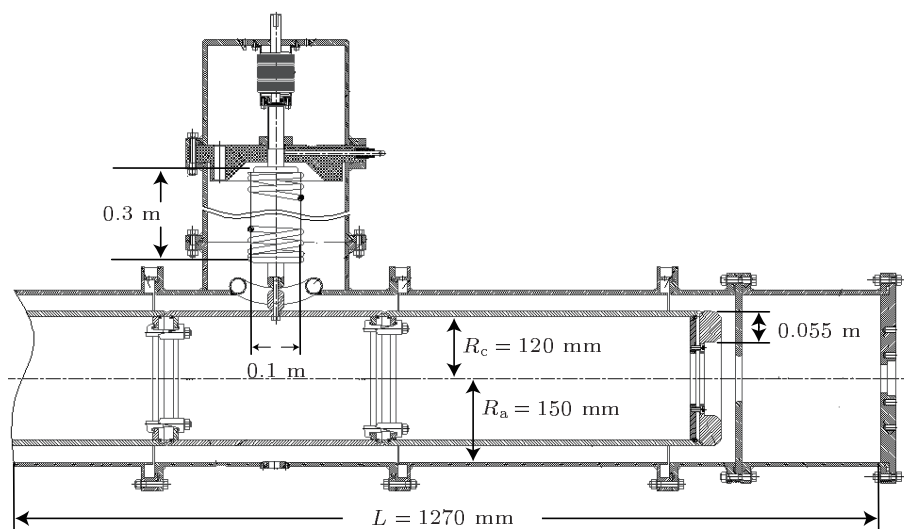


图1 带螺旋支撑杆同轴磁绝缘传输线的结构图

撑结构对阴阳极进行固定, 其中螺旋线长为 0.3 m, 线圈直径为 0.1 m, 线径为 5 mm, 总匝数为 19.5 匝, 电感为 9.7 μH 的螺旋状支撑杆, 外部采用与阳极相连内径为 0.245 m 的圆环形导体对其进行封闭.

通常情况下, 对于沿轴向旋转对称的结构在数值模拟建模中均采用柱坐标或极坐标. 然而由于该结构的螺旋支撑杆部分打破了原有的轴对称, 且其建模尺度要求较为精细, 要想实现准确建模需采用直角坐标. 因此, 本文采用直角坐标, 所得模型如图 2 所示. 图 2 中, 左端 PORT 端口加载输入驱动电压, 阴极表面设为爆炸式发射面. 其中, 同轴状脉冲传输区域的阴极发射阈值为 200 kV/cm, 环状二极管区域的发射阈值为 20 kV/cm.

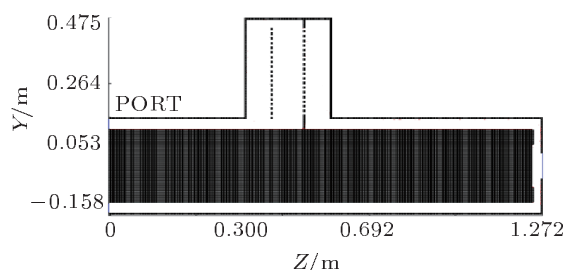


图2 三维建模图

2.2 负载二极管阴阳极间距的选择

由 Greedon^[7] 提出的层流理论可知, 对于结构确定的磁绝缘传输线, 当其阳极电势为 V_a 时, 磁绝缘形成后电子边缘的电势 V_m 由阳极电流 I_a 决定. 同时该理论还指出, 存在一个最小磁绝缘电

流 $I_{a\min}$, 其表达式为

$$I_{a\min} = I_0 g \gamma_m^3 \ln[\gamma_m + (\gamma_m^2 - 1)^{1/2}], \quad (1)$$

其中, $I_0 = 8500 \text{ A}$, 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 可表示成如下关系式:

$$\gamma_m = 1 + eV_m/m_e c^2. \quad (2)$$

同时, γ_m 与 V_a 二者又可通过如下关系式联系起来:

$$\begin{aligned} & \gamma_m + (\gamma_m^2 - 1)^{3/2} \ln[\gamma_m + (\gamma_m^2 - 1)^{1/2}] \\ & = 1 + eV_a/m_e c^2, \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 和 (3) 式中 e 为电子电荷, m_e 为电子质量.

若磁绝缘传输线真空阻抗一定, 则可由 (1) 和 (3) 式求出不同电压 V_a 对应的最小磁绝缘电流 $I_{a\min}$. 本文模拟的同轴磁绝缘传输线的真空阻抗为 13.4Ω , 图 3 表示它的最小磁绝缘电流 $I_{a\min}$ 随阳极电势 V_a 的变化关系.

另外, 由于在完全磁绝缘的状态下, 阳极电流主要决定于二极管的工作电流, 因此, 需选取合适的二极管阴阳极间距, 使传输线处于磁绝缘状态. 本文首先构建一段与实际结构同轴段一样的同轴传输线, 右端同样采用二极管作为负载. 模拟过程中在左 PORT 端口输入峰值为 1 MV、电压与时间呈正弦关系的脉冲波, 周期为 400 ns. 采取调节二极管阴阳极间距 d 的方式, 分别对 d 等于 30, 25, 20, 15, 10 和 5 mm) 的情况进行数值模拟. 模拟中设置相应命令, 观测二极管阴阳极间的电压、电流. 图 4 和图 5 分别表示的是以上各种情况下二极管

电压和电流随时间的变化关系. 将不同 d 值对应的峰值电压及峰值电流值在图 3 中标出. 显而易见, 当 $d = 5, 10$ mm 时, 阴阳极间电压较小, 阴极表面无法达到发射阈值; 当 $d = 15$ mm 时, 传输线处于磁绝缘状态; 当 d 超过 15—20 mm 之间的某一值时, 传输线将不能产生磁绝缘. 考虑以上原因, 本文模拟结构及相关实验装置取 $d = 15$ mm.

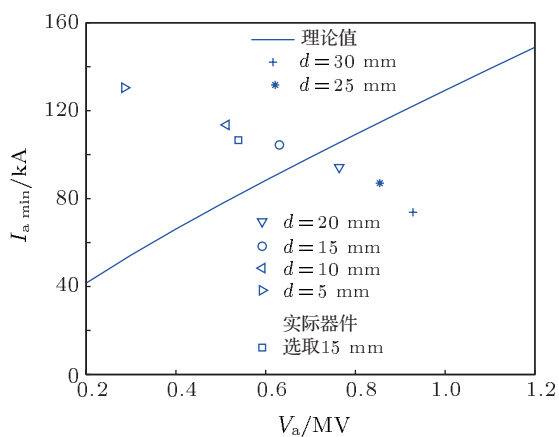


图 3 最小磁绝缘电流与阳极电势的关系

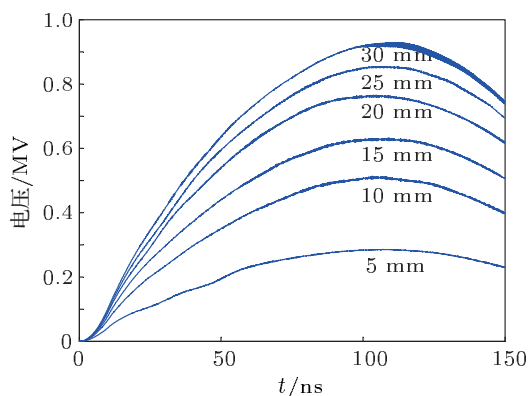


图 4 不同 d 值时负载二极管工作电压随时间的变化

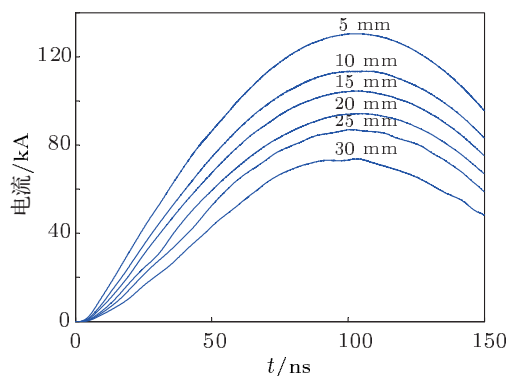


图 5 不同 d 值时负载二极管工作电流随时间的变化

2.3 模拟参数的设置

数值模拟中网格大小的选取对模拟的用时及准确度有较大影响. 若网格划分过小, 虽然能保证模拟的精度, 但由于所模拟的器件过大, 网格数将非常多, 耗时过长; 反之, 若网格划分过大, 虽然能节约模拟时间, 但精度上存在一定的问题. 由于该器件对网格划分精度要求最高的为螺旋支撑杆部分, 因此本文首先截取该部分, 对划分不同网格大小的模型进行了模拟. 图 6 表示的是在输入一个脉冲电压时, 分别选取网格大小为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 和 3.5 mm 时螺旋支撑杆中心位置的磁场随时间的变化关系 (选取磁场作对比, 是由于螺旋支撑杆在这里主要起一个电感的作用, 因此首先需考虑的是网格变化对磁场是否有影响). 通过对比发现, 当网格取小于 3.0 mm 时, 计算结果精度没有多大变化. 在综合考虑计算耗时及计算精度等因素后, 本文建模时, 三个方向的网格大小均划分为 2.5 mm. 此时, 该器件划分的网格数约为 146 万个, 模拟时间为 150 ns, 步长为 0.0014 ns, 采用 HIHG_Q 算法进行模拟计算. 模拟过程中在左 PORT 端口输入峰值为 1 MV, 电压与时间呈正弦关系的脉冲波, 周期为 400 ns. 为得到相关模拟参数, 分析螺旋支撑杆的加入对传输效率的影响, 分别在螺旋支撑杆的前后端, 选取离支撑杆较远的 $Z = 300, 692$ mm (如图 2 所示, 这两个位置由于离支撑杆较远, 可以认为同轴传输线 360° 圆周上的传导电流密度分布趋于均匀) 以及二极管处设置相关命令, 分别观察阴阳极之间的电压、阴极电流、阳极电流等关键物理参数.

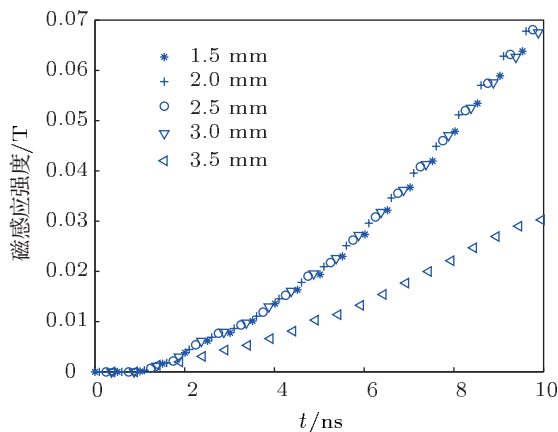


图 6 不同网格大小计算所得的磁场对比

3 模拟结果分析

图 7 为模拟所得的 $Z = 300 \text{ mm}$ 处的阴阳极电压随时间的变化, 其在 96.9 ns 时刻达到峰值 548.9 kV , 而实验中测得的峰值电压约为 550 kV , 如图 8 所示. 同时, 模拟中观察到从 37 ns 左右开始阴阳极电压有所下降, 直到 45 ns 左右才开始恢复上升趋势. 这主要是由于在此时间段内, 传输线阴极开始发射电子, 但真空部分磁场依然不够强, 不足以使这部分电子产生磁绝缘, 导致其运动到阳极造成电压的下降.

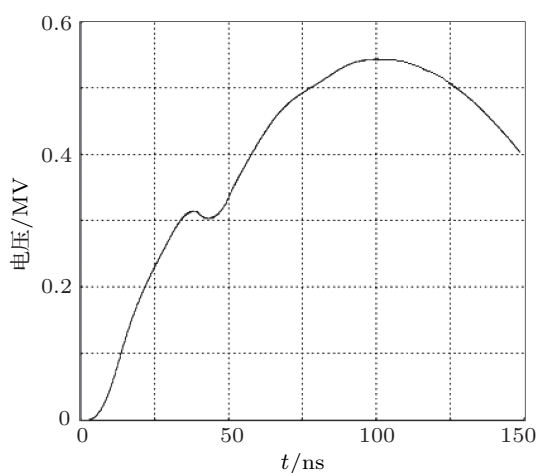


图 7 模拟所得 $Z = 300 \text{ mm}$ 处的阴阳极电压

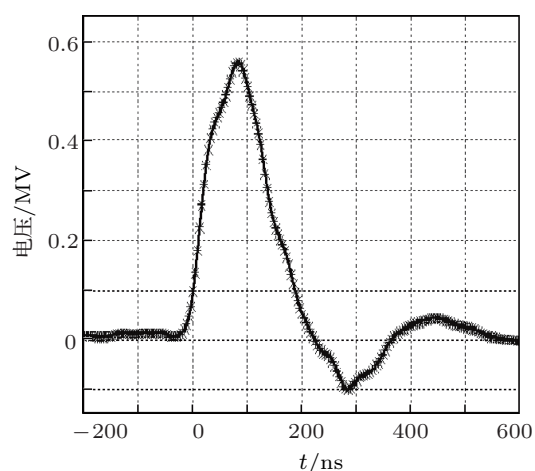


图 8 实验测得的阴阳极电压

图 9 和图 10 分别为模拟所得的 $Z = 300 \text{ mm}$ 及 $Z = 692 \text{ mm}$ 处的阳极电流随时间的变化关系, 峰值电流分别为 114.4 及 108.8 kA . 因此, 模拟

所得的在螺旋支撑结构部分传输线阳极损失的电流约为 5.6 kA . 而实验测得这两处的阳极电流均为 103 kA , 且 692 mm 处略高于 300 mm 处, 这与物理规律不符. 出现这种情况可能是由于实验测量值存在着相应的误差.

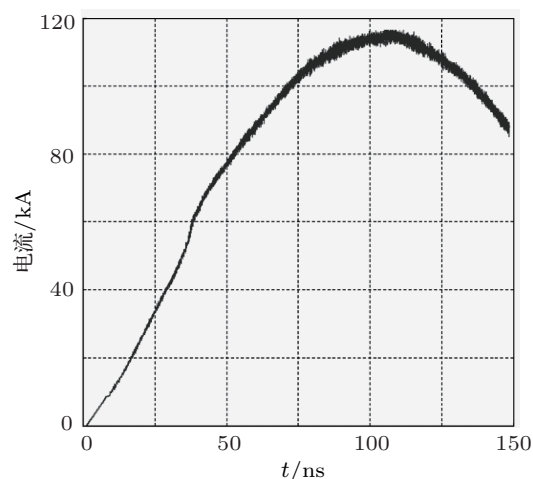


图 9 模拟所得 $Z = 300 \text{ mm}$ 处的阳极电流

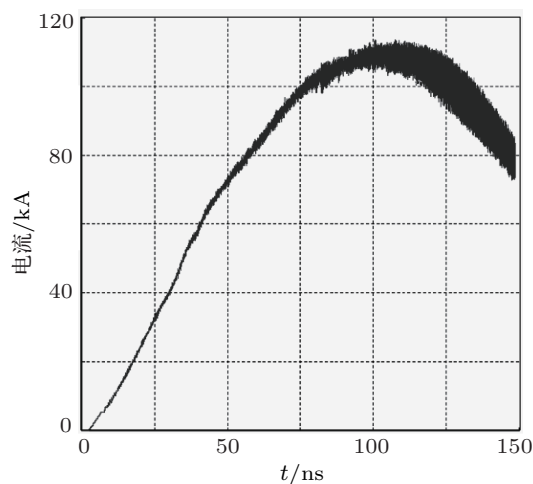


图 10 模拟所得 $Z = 692 \text{ mm}$ 处的阳极电流

图 11 和图 12 分别为模拟所得的 $Z = 300 \text{ mm}$ 及 $Z = 692 \text{ mm}$ 处的阴极电流随时间的变化关系. 其峰值电流分别为 106.9 及 97.4 kA . 因此, 模拟所得的在螺旋支撑结构部分传输线阴极损失的电流约为 9.5 kA . 而实验测得这两处的阴极电流分别为 94.4 和 91.6 kA . 通过以上数据分析表明, 螺旋支撑杆结构的引入对同轴磁绝缘传输线的传输效率的影响在可接受范围内; 同时, 模拟结果与实验测量数据之间相互印证, 证明了数值模拟的准确性.

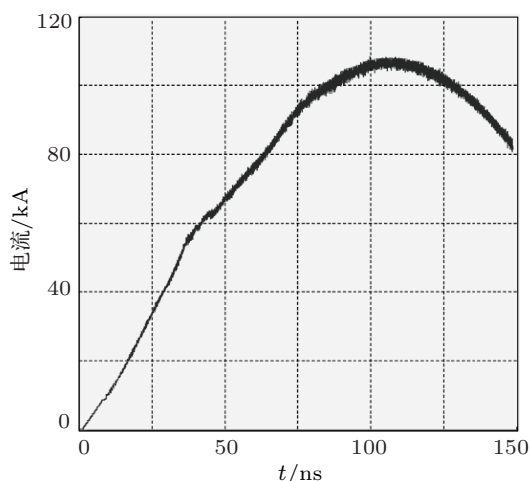


图 11 模拟所得 $Z = 300 \text{ mm}$ 处阴极电流

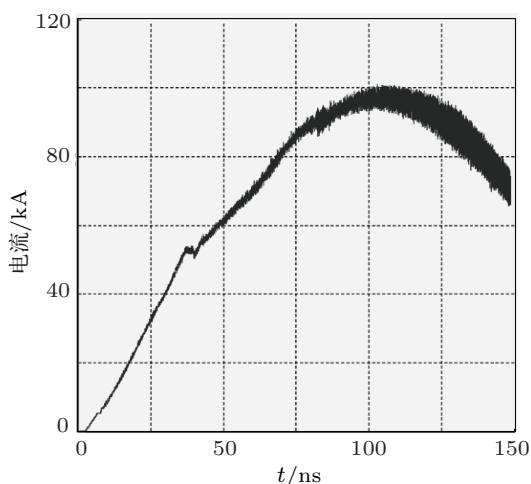


图 12 模拟所得 $Z = 692 \text{ mm}$ 处阴极电流

图 13 为 116 ns 时刻的粒子实空间图。从图 13 可以看出, 在螺旋支撑杆所在区域, 部分粒子向阳

极运动, 造成了传输电流的损失. 这是由于螺旋支撑杆的加入, 导致了该部分角向磁场变得较弱, 与支撑杆前端相连的同轴传输线形成的电子流在此处无法形成磁绝缘, 从而形成电流损失. 同时, 与支撑杆后端口相连的同轴传输线, 由于也受到支撑杆的影响, 导致该区域电子流绝缘效果不是很好, 造成了部分电流的损失. 但随着磁场逐步恢复正常, 其后面部分又逐渐恢复磁绝缘. 因此, 可以认为螺旋支撑杆结构的加入, 主要对支撑结构部分以及与支撑结构前、后端口相邻的同轴传输线部分的磁绝缘性能造成了影响, 其他部分仍能保持在较好的磁绝缘状态.

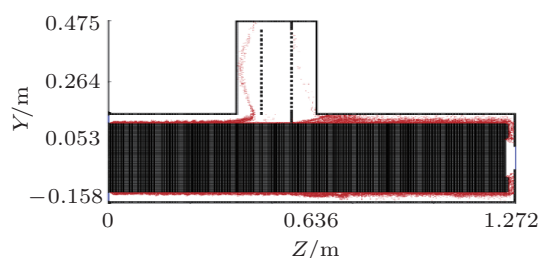


图 13 模拟所得 116 ns 时刻的粒子实空间图

4 结论

本文成功实现了带螺旋支撑杆同轴磁绝缘传输线这样一种大尺度脉冲功率传输器件的三维建模, 并对其进行了数值模拟. 观测了支撑前后的阴阳极电流等一些重要的物理参数, 并与实验数据进行了对比, 结果表明数值模拟具有较高的准确性. 同时, 将模拟结果与实验数据相结合, 分析了造成支撑杆区域电流损失的主要原因.

- [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. Dissertation* (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 *Proceedings of IEEE Particle Accelerator Conference*, Vancouver, Canada, 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, Corcoran P, Smith I, Spence P 1995 *Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference*, Albuquerque, USA, July 3–6, 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 *Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference*, Baltimore, Maryland, Jun 29–July 2, 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, 刘盛纲 2010 物理学报 **59** 1643]
- [7] Greedon J M 1977 *Phys. Appl.* **48** 1070

The implementation of the three-dimensional numerical simulation of the coaxial magnetically insulated transmission line with helical inductor*

Liu La-Qun^{1)†} Liu Da-Gang¹⁾ Wang Xue-Qiong¹⁾
Zou Wen-Kang²⁾ Yang Chao¹⁾

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

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

(Received 5 November 2011; revised manuscript received 14 January 2012)

Abstract

According to the actual device size, a three-dimensional numerical simulation model of the coaxial magnetically insulated transmission line with a helical inductor is developed. The diode with an appropriate distance between anode and cathode is selected as a load of the transmission line. Setting the device parameters, the device is simulated. Comparing the simulation results with the experimental data, the reliability of the simulation is proved. By combining with the corresponding experimental data, the transmission efficiency of the coaxial magnetically insulated transmission lines with adding the structure of helical inductor is analyzed.

Keywords: three-dimensional numerical simulation, helical inductor, magnetically insulated transmission line

PACS: 29.27.-a

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

† E-mail: liulaqun@yahoo.cn