

“聚龙一号”4 层绝缘堆和真空区电路模拟方法*

毛重阳, 薛 创, 肖德龙, 丁 宁

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 建立了“聚龙一号”驱动器 4 层绝缘堆和真空区电路模型。在 4 层绝缘堆入口处, 采用预测-校正的计算方法处理 4 层绝缘堆的输入电流分配问题, 避免了复杂的二维电路模拟, 既保证了精度, 又大大提高了计算效率。将此新模型加入 FCM-PTS 程序中, 与零维负载内爆动力学程序耦合, 得到了各层外磁绝缘传输线的电流波形模拟结果, 并改善了负载电流峰值的模拟结果与实验结果的一致性。

关键词: “聚龙一号”; 绝缘堆; 磁绝缘传输线; FCM-PTS; 电路模拟; Z 箍缩

中图分类号: O411.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190330

Simulation method of quadruple-level circuit model for stack and vacuum section of Julong-I facility

Mao Chongyang, Xue Chuang, Xiao Delong, Ding Ning

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: The quadruple-level circuit model for stack and vacuum section of Julong-I facility was established. To avoid complicated two-dimensional circuit simulation, the prediction-correction method was used to deal with the distribution of currents at the entrance of the quadruple-level insulation stack. The accuracy and efficiency were both ensured by this method. By applying this model to the FCM-PTS code coupled with the snow-plow model for the Z-pinch load, the current for each level of the outer magnetic insulation transmission line was obtained, while the coincidence of load currents between simulation and experiment was also improved.

Key words: Julong-I; insulation stack; magnetic insulation transmission line; FCM-PTS; circuit simulation; Z-pinch

“聚龙一号”(Julong-I, 又称 PTS) 是目前国内最大的 Z 箍缩驱动器。该装置由中国工程物理研究院研制, 于 2013 年建成, 并已开展了单层钨丝阵、双层钨丝阵、动态黑腔等多种类型负载的实验, 其输出电流可达 7~8 MA。在双层钨丝阵实验中测量到了峰值功率数十 TW、能量数百 kJ 的 X 射线脉冲^[1-4]。该装置由 24 个支路并联而成, 每个支路的脉冲由 Marx 发生器输出, 经过中间储能器、激光触发开关、脉冲形成线、自击穿水开关和三平板传输线等结构, 汇聚至绝缘堆, 再经过外磁绝缘传输线、柱孔盘旋面、内磁绝缘传输线, 最终传输至负载。

电路模拟是进行驱动器设计和实验物理设计的重要工具。国内外的研究人员针对不同的驱动器建立了 TLCCODE^[5], SCREAMER^[6], FAST^[7-8], FCM-PTS^[9-10], LCM-PTS^[11], FCM-CZ30^[12] 等多个电路模拟程序。其中, FCM-PTS 程序是由北京应用物理与计算数学研究所建立的针对“聚龙一号”驱动器的一维全电路模拟程序, 该程序与 Z 箍缩内爆磁流体动力学模拟程序耦合, 实现了 Z 箍缩驱动器与负载的耦合模拟。通过耦合模拟, 能够获得驱动器各位置的电压和电流波形, 分析实验中驱动器的工作状态, 研究负载电流峰值、上升时间等特征量随驱动器参数、负载参数的变律^[13]。

但是, “聚龙一号”驱动器的绝缘堆和外磁绝缘传输线都由 4 层并联而成, 且 4 层各不相同^[14]。在 FCM-PTS 程序中, 为了简便, 绝缘堆和外磁绝缘传输线都只有 1 层^[10]。这种单层模型节省了计算时间, 提高了收敛性, 但也导致绝缘堆、外磁绝缘传输线、负载的电压电流等物理量的模拟结果与实验结果存在一定的差距, 且无法分析各层绝缘堆和外磁绝缘传输线的工作状态。例如, 当实验中绝缘堆的某一层发生闪络时, 无法通过模拟判断究竟是哪一层发生了闪络, 也无法判断闪络的强度和位置以及闪络带来的影响。因此, 为了获得更加细致的驱

* 收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2019-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51790522, 51790524, 51907008); 中国博士后科学基金项目 (2017M620692)

作者简介: 毛重阳 (1990—), 男, 博士, 助理研究员, 从事脉冲功率技术和 Z 箍缩数值模拟研究; chongyangmao@sina.com。

动器各层绝缘堆和外磁绝缘传输线的工作状态,得到与实验结果更为接近的模拟结果,本文建立了“聚龙一号”驱动器的4层绝缘堆和真空区电路模型,并通过预测-校正方法设计算法,在保证模拟精度的条件下避免了二维模拟的复杂性。

1 模型建立

图1为原FCM-PTS程序中的“聚龙一号”驱动器单层绝缘堆及真空区电路模型。其中绝缘堆(stack)采用传输线模型,外磁绝缘传输线(outer MITL)用一个电感表示,内磁绝缘传输线(inner MITL)用一个电感表示,外磁绝缘传输线、柱孔盘旋面和内磁绝缘传输线的漏电流损耗统一用一个电阻 R_{loss} 表示,负载(load)由内爆动力学模拟程序确定。

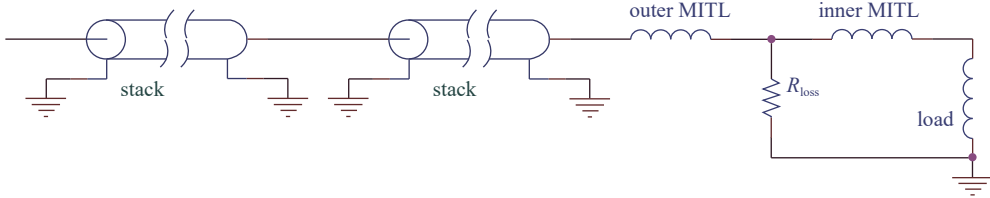


Fig. 1 Single-level circuit model for the stack and vacuum section of Julong-I

图1 “聚龙一号”单层绝缘堆和真空区电路模型

图2为改进后的“聚龙一号”驱动器4层绝缘堆及真空区电路模型。与单层模型相比,4层模型的改进包括以下3个方面:(1)将原模型中的单层绝缘堆细化为与实际驱动器结构一致的4层,分别记作A, B, C, D层,每层的电路模型根据各层实际等效电路参数确定;(2)将原模型中的单层外磁绝缘传输线细化为与实际驱动器结构一致的4层,同样分别记作A, B, C, D层,每层的电路模型根据各层实际等效电路参数确定;(3)增加柱孔盘旋面的等效电感,用DPHC1, DPHC2, DPHC3表示。

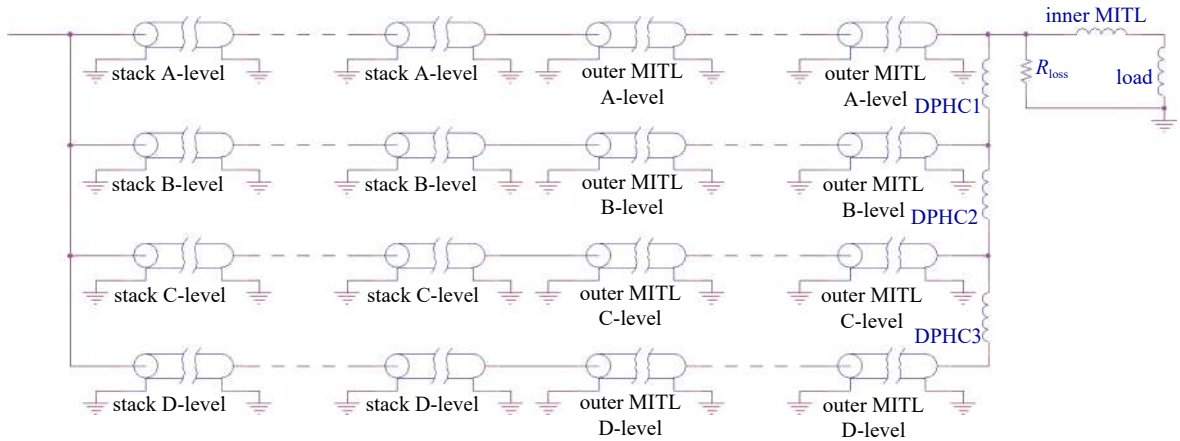


Fig. 2 Quadruple-level circuit model for the stack and vacuum section of Julong-I

图2 “聚龙一号”4层绝缘堆和真空区电路模型

2 算法介绍

按照4层电路模型,如果采用严格的全隐式算法,在绝缘堆入口处的电路模型是二维的^[15],这会导致计算量比之前的一维电路模型大大增加,不利于与后端磁流体动力学模拟程序耦合后开展实验的设计和研究工作。因此,本文采用的算法将4层绝缘堆与其前端的24个支路电路模型分离,分别采用全隐式算法模拟,再加上分界面条件,避免了二维模拟的复杂性,并保证了足够高的模拟精度。该算法中外磁绝缘传输线出口处的电压由后端负载部分模拟得到,本文重点讨论如何通过预测-校正方法确定4层绝缘堆的输入电流和输入电压。

设第 n 步绝缘堆前24个支路的总输出电流为 I_{in}^n ,4层绝缘堆的各层输入电流分别为 $I_i^n (i = 1, 2, 3, 4)$ 。根据基尔霍夫电流定律,显然有

$$I_{in}^n = \sum_{i=1}^4 I_i^n \quad (1)$$

设第 n 步绝缘堆前24个支路的输出电压为 U_{in}^n ,4层绝缘堆的各层输入电压分别为 $U_i^n (i = 1, 2, 3, 4)$ 。根据基尔霍

夫电压定律,显然有

$$U_{\text{in}}^n = U_1^n = U_2^n = U_3^n = U_4^n \quad (2)$$

另外,4层绝缘堆在入口附近的设计参数是相同的,区别在于各层后半段。因此,设每层绝缘堆入口处第1小段的特性阻抗都为 Z 。

假设第 n 步各点电压和各支路电流已知,接下来要确定第 $n+1$ 步的物理量 I_{in}^{n+1} , I_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$), U_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)和 U_{in}^{n+1} ,注意第 $n+1$ 步各物理量也必须满足基尔霍夫定律式(1)和式(2)。

具体步骤如下:

①对绝缘堆前24个支路进行计算,得到其总输出电流为 I_{in}^{n+1} ;

②将24个支路总输出电流的增量($I_{\text{in}}^{n+1} - I_{\text{in}}^n$)平均分配到4层,即

$$\tilde{I}_i^{n+1} = I_i^n + \frac{I_{\text{in}}^{n+1} - I_{\text{in}}^n}{4}, \quad i=1,2,3,4 \quad (3)$$

这就是 I_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)的预测值,容易判断 \tilde{I}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)和 I_{in}^{n+1} 满足式(1);

③以上一步得到的 \tilde{I}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)为各层绝缘堆的输入电流,对各层分别模拟得到 U_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)的预测值 \tilde{U}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$);

④需要特别注意,上一步得到的 \tilde{U}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)并不一定满足式(2),取其平均值作为 U_{in}^{n+1} 的预测值 $\tilde{U}_{\text{in}}^{n+1}$,即

$$\tilde{U}_{\text{in}}^{n+1} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \tilde{U}_i^{n+1} \quad (4)$$

⑤检验 $\tilde{U}_{\text{in}}^{n+1}$ 与 \tilde{U}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)之差绝对值的最大值是否小于 ΔU ,即

$$\max_i \left(\left| \tilde{U}_{\text{in}}^{n+1} - \tilde{U}_i^{n+1} \right| \right) \leq \Delta U, \quad i=1,2,3,4 \quad (5)$$

其中 ΔU 为设定的电压误差最大值, ΔU 越小,则模拟结果精度越高,计算耗时越长;

⑥如果式(5)成立,则

$$I_i^{n+1} = \tilde{I}_i^{n+1}, \quad i=1,2,3,4 \quad (6)$$

$$U_i^{n+1} = \tilde{U}_i^{n+1}, \quad i=1,2,3,4 \quad (7)$$

$$U_{\text{in}}^{n+1} = \tilde{U}_{\text{in}}^{n+1} \quad (8)$$

如果式(5)不成立,则需要校正。 I_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)的校正值为

$$I_i^{n+1} = \tilde{I}_i^{n+1} + \frac{\tilde{U}_{\text{in}}^{n+1} - \tilde{U}_i^{n+1}}{Z}, \quad i=1,2,3,4 \quad (9)$$

将式(9)得到的 I_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)作为新的 \tilde{I}_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)重复上述步骤③~⑥,直至式(5)成立,按照式(6)~(8)得到校正后的 I_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$), U_i^{n+1} ($i=1,2,3,4$)和 U_{in}^{n+1} ,容易验证这样得到的结果满足式(1)和式(2)。

3 模拟结果

将FCM-PTS程序中的单层绝缘堆和真空区模型用本文的4层模型代替。另外,在4层模型中, R_{loss} 代表的漏电流通道不再包括外磁绝缘传输线的漏电流,所以 R_{loss} 的阻值应大于其在单层模型中的阻值,以减小流过 R_{loss} 的电流。除此之外其他部分的模型及参数不变,负载采用零维雪耙模型^[6]。针对“聚龙一号”装置0125发次实验的负载参数^[10],将模拟结果和实验结果进行了对比。

图3为采用4层模型的FCM-PTS程序模拟结果与实验结果的对比。从中可以看出,模拟和实验结果都表明A,B,C,D层电流幅值依次减小。通过设置各层电路参数值,可以判断各层的漏电流大小和位置。模拟中发现,A,B两层漏电流较大,C,D两层漏电流较小。

图4为负载电流的模拟和实验结果对比。从中可以看出,与单层模型相比,4层模型的模拟结果与实验结果的一致性更好。

4 结论

本文建立了“聚龙一号”驱动器4层绝缘堆和真空区的电路模型,并据此进一步发展了FCM-PTS程序,得到了

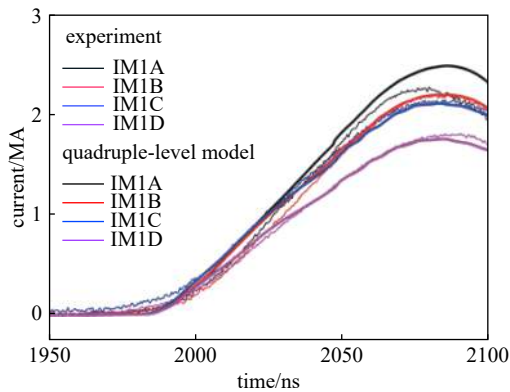


Fig. 3 Comparison of the currents from experiment and simulation for each level of the outer MITL

图3 外磁绝缘传输线各层电流的实验结果与模拟结果对比

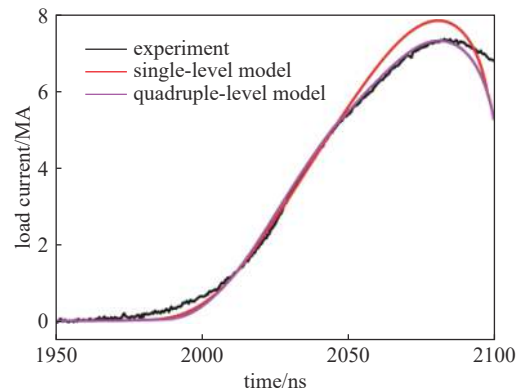


Fig. 4 Comparison of the load currents from experiment, single-level model, and quadruple-level model

图4 负载电流的实验结果、单层与4层电路模型模拟结果对比

以下结论:通过预测-校正方法处理4层绝缘堆入口处的电流分配问题,避免了复杂的二维电路模拟,并保证了模拟结果具有较高的精度;在FCM-PTS程序中采用4层绝缘堆和真空区电路模型,得到了各层外磁绝缘传输线的电流波形,并改善了负载电流的模拟结果与实验结果的一致性。

实验中由于24个支路不完全同步,绝缘堆和外磁绝缘传输线的电压电流在角向分布不完全对称,本文的一维模型无法描述此不对称性。在之后的工作中,可以进一步建立每层绝缘堆和外磁绝缘传输线的 $R-\theta$ 二维模型,并采用本文的方法获得各层的输入电流和输入电压。

致谢 本文得到了中物院流体物理研究所、核物理与化学研究所、激光聚变研究中心相关实验团队的帮助和支持,特此表示感谢。

参考文献:

- [1] Deng Jianjun, Xie Weiping, Feng Shuping, et al. From concept to reality—A review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, 1: 48-58.
- [2] Deng Jianjun, Xie Weiping, Feng Suping, et al. Initial performance of the Primary Test Stand[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2013, 41(10): 2580-2583.
- [3] Deng Jianjun, Shi Jinshui, Xie Weiping, et al. Overview of pulsed power research at CAEP[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2015, 43(8): 2760-2765.
- [4] 黄显宾, 任晓东, 但加坤, 等. 基于聚龙一号的钨丝阵Z箍缩内爆辐射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 025006. (Huang Xianbin, Ren Xiaodong, Dan Jiakun, et al. Characteristics of tungsten wire array Z-pinch implosion radiation on PTS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 025006)
- [5] Weseloh W N. TLCODE—A transmission line code for pulsed power design[C]//Proceedings of 7th IEEE International Pulsed Power Conference. 1989: 989-992.
- [6] Kiefer M L, Widner M M. SCREAMER—A single-line pulsed-power design tool[C]//Proceedings of 5th IEEE International Pulsed Power Conference. 1985: 685-688.
- [7] Zou Wenkang, Guo Fan, Chen Lin, et al. Full circuit calculation for electromagnetic pulse transmission in a high current facility[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2014, 17: 110401.
- [8] 郭帆, 王贵林, 邹文康, 等. 聚龙一号装置磁驱动加载实验的全电路模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 125001. (Guo Fan, Wang Guilin, Zou Wenkang, et al. Full circuit calculation of magnetically driven experiment on PTS facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 125001)
- [9] 薛创, 丁宁, 孙顺凯, 等. 脉冲功率驱动器与Z箍缩负载耦合的全电路数值模拟[J]. *物理学报*, 2014, 63: 125207. (Xue Chuang, Ding Ning, Sun Shunkai, et al. Full circuit model for coupling pulsed power driver with Z-pinch load[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 125207)
- [10] 薛创, 丁宁, 张扬, 等. 聚龙一号电磁脉冲形成与传输过程的全电路模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015014. (Xue Chuang, Ding Ning, Zhang Yang, et al. Full circuit simulation for electromagnetic pulse forming and transmission in the PTS facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015014)
- [11] 薛创, 丁宁, 肖德龙, 等. 聚龙一号驱动Z箍缩负载内爆的简化电路模型[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 125004. (Xue Chuang, Ding Ning, Xiao Delong, et al. Lumped circuit model for the PTS driving Z pinch load implosion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 125004)
- [12] Mao Chongyang, Sun Fengju, Xue Chuang, et al. Full-circuit simulation of next generation China Z-pinch driver CZ30[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47(6): 2910-2915.
- [13] 毛重阳, 薛创, 肖德龙, 等. 聚龙一号主开关导通时刻对负载电流的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 015001. (Mao Chongyang, Xue Chuang, Xiao Delong, et al. Full circuit simulation for influence of the laser-triggered gas switches' closing time on load current in PTS facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 015001)
- [14] 王勐, 关永超, 宋盛义, 等. PTS装置分层真空轴向绝缘堆设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 777-781. (Wang Meng, Guan Yongchao, Song Shengyi, et

al. Design of vacuum insulator stack [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 777-781)

[15] Corcoran P A, Whitney B A, Bailey V L, et al. Circuit modeling techniques applied to ZR[C]//*Proceedings of 17th IEEE International Pulsed Power Conference*. 2009: 150-155.

[16] Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K. The physics of fast Z-pinch[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2000, 72(1): 167-223.

勘 误

《强激光与粒子束》2019年31卷第2期020101论文：

高功率半导体激光器倍频实现紫外光输出

胡列懋，李志永，刘松阳，宁方晋，谭荣清

(1. 中国科学院电子学研究所 高功率气体激光技术部, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

Second harmonic generation of ultraviolet laser based on laser diode array

Hu Liemao, Li Zhiyong, Liu Songyang, Ning Fangjin, Tan Rongqing

(1. *Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

更正为：

高功率半导体激光器倍频实现紫外光输出

胡列懋^{1,2}，李志永¹，刘松阳^{1,2}，宁方晋¹，谭荣清^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所 高功率气体激光技术部, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

Second harmonic generation of ultraviolet laser based on laser diode array

Hu Liemao^{1,2}, Li Zhiyong¹, Liu Songyang^{1,2}, Ning Fangjin¹, Tan Rongqing^{1,2}

(1. *Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

本刊网站 www.hplpb.com.cn 上电子版已做相应更新，特此说明。