

15 MA Z 箍缩装置真空磁绝缘传输线鞘层电子流分析*

龚振洲¹⁾ 魏浩^{1)2)†} 范思源¹⁾ 洪亚平¹⁾ 吴撼宇²⁾ 邱爱慈¹⁾²⁾

1) (西安交通大学, 电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) (西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2022 年 9 月 30 日收到; 2022 年 11 月 5 日收到修改稿)

基于建立的 15 MA Z 箍缩装置等效电路模型, 获得了外层磁绝缘传输线 (magnetically-insulated transmission line, MITL) 鞘层电子流分布规律: 从时间上看, 鞘层电子流幅值先减小、后增大, 波形呈“马鞍”型; 从空间上看, 鞘层电子流沿着功率流方向逐渐减小. 分析了 MITL 参数, 包括恒阻抗段真空阻抗、恒间隙段间距, 以及柱孔盘旋面位置半径对 MITL 末端鞘层电子流的影响. 计算结果显示: MITL 末端鞘层电子流受 MITL 末端阻抗和柱孔盘旋面位置半径的影响较大. 当 15 MA 装置四层 MITL 并联真空阻抗从 $0.42\ \Omega$ 增大到 $0.84\ \Omega$ 时, 在负载聚爆前 5 ns 时刻, MITL 末端鞘层电子流从 184.7 kA 降低至 106.9 kA, 负载峰值电流减小约 0.5 MA.

关键词: Z 箍缩, 磁绝缘传输线, 鞘层电子流, 真空阻抗

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.72.20221901

1 引言

快 Z 箍缩在惯性约束聚变、强辐射物理、实验室天体物理等领域有重要的应用. 美国 ZR 装置是目前国际上电流最大、峰值功率最高的 Z 箍缩装置 (26 MA, 85 TW)^[1], 中国工程物理研究院 10 MA 装置是国内已建成的最大的 Z 箍缩研究平台 (10 MA, ~ 25 TW)^[2,3]. ZR 装置和 10 MA 装置中心汇流区采用 4 层绝缘堆-圆盘锥磁绝缘传输线 (magnetically-insulated transmission line, MITL) 并联汇流. 国内外正积极开展下一代超高功率 Z 箍缩装置概念设计和关键技术研究^[4-7].

能量的高效传输汇聚是制约大型 Z 箍缩装置向更高功率发展的核心技术之一. 大量研究表明, Z 箍缩装置中心汇流区存在电流损失^[8-12]. 减小损

失电流、提高电流传输效率成为中心汇流区设计面临的关键科学问题^[13-16]. 研究表明外层 MITL 产生的鞘层电子流会在柱孔盘旋面 (post-hole convolute, PHC) 阳极附近汇聚, 可使阳极柱电极表面电场强度达 50—100 MV/cm, 阳极柱吸附物在强电场作用下被释放、并迅速被电离形成等离子体^[11]. Waisman 等^[11]认为, 相对于欧姆加热、电子轰击等, 这种机制更易导致 PHC 产生电极等离子体. 因此, 减小外层 MITL 鞘层电子流、进而降低 PHC 和内层 MITL 电流损失, 是 Z 箍缩装置中心汇流区优化设计的重要任务.

基于建立的 15 MA 装置中心汇流区全电路模型^[17], 研究了 MITL 典型参数 (外层 MITL 恒阻抗段真空阻抗、外层 MITL 最小间距和 PHC 位置半径) 对 MITL 鞘层电子流的影响规律, 可为未来大型 Z 箍缩装置中心汇流区优化设计提供参考.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51790524, 11975186) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weihaoyy@sina.com

2 15 MA 装置 MITL 系统

15 MA 装置中心汇流区示意图如图 1 所示. 初级源采用 24 路快脉冲直线型变压器 (linear transformer driver, LTD) 并联, 24 路 LTD 脉冲源分为上下两层, 每层 12 路圆周均匀布置^[17]. 每一路 LTD 输出连接阻抗匹配的水介质同轴传输线, 同轴水线连接中央水池. 在水池内部, 24 路矩形三板传输线分为上下两层, 连接到 4 层高压绝缘堆. LTD 脉冲源、同轴传输线、三板传输线阻抗基本匹配. 4 层绝缘堆连接 4 层 MITL, 每层 MITL 都是由恒阻抗段和恒间隙段组成, 并经 PHC 并联汇入内 MITL 及负载系统.

3 鞘层电子流计算方法

当外层 MITL 阴极表面电场强度超过真空电子发射阈值 (本文不锈钢电极取 240 kV/cm) 后, 阴极表面开始发射电子. 随着 MITL 电流增大、磁

场增强, 阴极发射电子在自磁场作用下建立磁绝缘. 进入稳态磁绝缘后, MITL 阴极电流由两部分组成, 一部分是沿阴极表面流动的传导电流, 另一部分是在紧贴阴极表面、在真空中流动的真空鞘层电子流. 采用 Mendel 一维稳态磁压力平衡模型计算鞘层电子流^[18]:

$$V_a = Z_0(I_a^2 - I_k^2)^{1/2} - \frac{mc^2}{2e} \left(\frac{I_a^2}{I_k^2} - 1 \right), \quad (1)$$

其中, V_a 为阳极电压, I_a 为阳极电流, I_k 为阴极电流, Z_0 为真空阻抗, m 为电子静止质量, c 为光速, e 为电子电荷量.

阴极表面形成的大量等离子体在电磁场及等离子体内部压力共同作用下向阳极扩散, 使外层 MITL 阴阳电极有效间隙距离减小, (1) 式修正为 (2) 式^[19]:

$$V_a = Z_0 \left[1 - \frac{v_c t}{h_0} \right] (I_a^2 - I_k^2)^{1/2} - \frac{mc^2}{2e} \left(\frac{I_a^2}{I_k^2} - 1 \right), \quad (2)$$

其中, v_c 为阴极等离子体扩散速度, 本文取 $v_c = 2.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ^[19]; h_0 为外层 MITL 阴阳电极间隙.

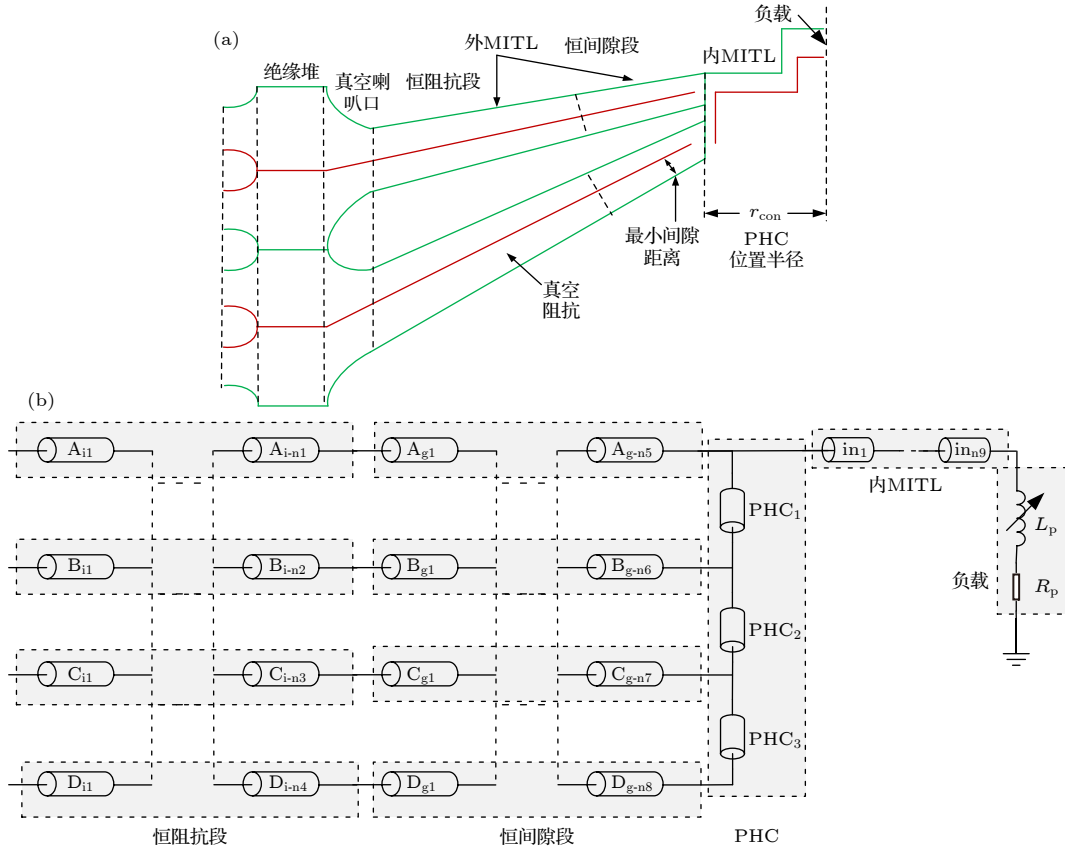


图 1 15 MA 装置中心汇流区示意图 (a) MITL 结构示意图; (b) 电路编码示意图

Fig. 1. Cross-sectional view of the central converging region of the 15 MA driver: (a) Schematic drawing of MITL; (b) coding diagram.

若考虑鞘层电子流内部的电子碰撞效应, (2) 式进一步修正为 (3) 式^[3]:

$$V_a = \frac{2}{3} Z_0 [1 - (v_{ct}/h_0)] (I_a^2 - I_k^2)^{1/2}. \quad (3)$$

本文基于建立 15 MA 装置 TL-code 电路模型^[17], 当 15 MA 装置 LTD 脉冲源充电 ± 70 kV, 采用金属丝阵负载, 其高度 2 cm、半径 2 cm、质量 3 mg. 采用零维模型模拟丝阵负载的动态过程^[20], 假定收缩比为 10:1. 采用 (1)—(3) 式三种计算方法, 获得 MITL 阳极和阴极电流, 进而获得 15 MA 装置 MITL 末端鞘层电子流 ($I_f = I_a - I_k$) 如图 2 所示.

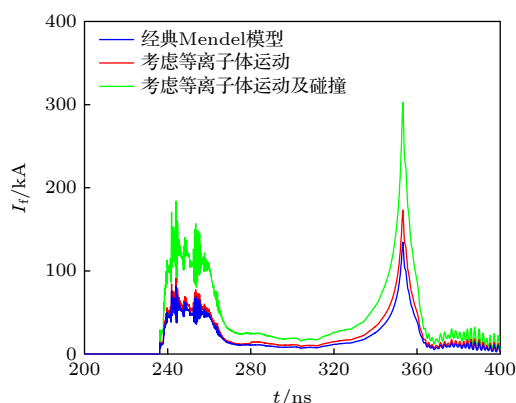


图 2 三种模型计算 15 MA 装置 MITL 末端鞘层电子流对比
Fig. 2. Comparison of the electron flow currents of the 15 MA driver of the three models.

相比于经典 Mendel 模型, 考虑外层 MITL 阴极等离子体运动后鞘层电子流并没有明显增大, 这是因为对于上升时间约 100 ns 的脉冲电流, 在脉冲前沿阶段, 阴极等离子体横向运动距离约 2.5 mm, 对外层 MITL 有效间隙距离影响较小. 当考虑磁绝缘鞘层电子碰撞时, 外层 MITL 恒间隙段末端的鞘层电子流幅值增大近 1 倍, 这主要是因为碰撞模型考虑了电子在垂直于功率流方向上的横向运动分量, 使得电子鞘层厚度增大、MITL 阴阳电极有效间隙减小. Stygar 等^[18,19]指出, 在短间隙、长脉冲条件下 (电子鞘层厚度相比于外层 MITL 电极间隙不可忽略), 考虑电子碰撞效应后, 电路模拟结果与实验吻合度更高. 下文有关鞘层电子流的计算均采用碰撞模型.

以 15 MA 装置 D 层为例, 当真空阻抗为 3Ω 时, 恒阻抗段始端、末端和恒间隙末端 3 个典型位置的鞘层电子流对比如图 3 所示. 结果显示: 恒间隙末端最先形成磁绝缘, 从外到内, 鞘层电子流幅值沿功率流方向逐渐减小.

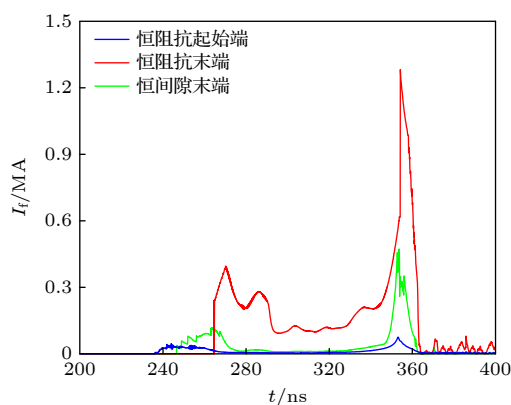


图 3 15 MA 装置 D 层 MITL 三个典型位置鞘层电子流对比
Fig. 3. Comparison of the electron flow currents in three typical locations of D-level MITL of the 15 MA driver.

由图 3 可知, 外层 MITL 鞘层电子流随时间变化呈“马鞍”型, 在脉冲电流起始阶段, 鞘层电子流幅值较大; 随着脉冲电流增大, 鞘层电子流逐渐减小; 在负载聚爆时刻, 鞘层电子流又进一步增大, 这主要是因为起始阶段电流较小, 对磁绝缘鞘层电子的束缚较弱, 负载聚爆时刻负载等效阻抗增大, MITL 电压急剧增大. 本文选取 1/3 负载峰值电流时刻、峰值电流时刻、负载聚爆前 5 ns 三个典型时刻, 来分析外层 MITL 恒阻抗段真空阻抗、外层 MITL 最小间隙距离、PHC 位置半径等对 MITL 恒间隙末端鞘层电子流分布特性的影响.

4 MITL 参数对鞘层电子流的影响

电路模型中^[17], 改变图 1(b) 中 $A_{i1}-A_{i-n1}$, $B_{i1}-B_{i-n2}$, $C_{i1}-C_{i-n3}$ 以及 $D_{i1}-D_{i-n4}$ 传输线单元的阻抗来研究外层 MITL 真空阻抗的影响; 通过改变 $A_{g1}-A_{g-n5}$, $B_{g1}-B_{g-n6}$, $C_{g1}-C_{g-n7}$ 以及 $D_{g1}-D_{g-n8}$ 传输线单元的阻抗来研究外层 MITL 最小间隙距离的影响; 通过改变外层 MITL 恒间隙段和内 MITL 传输线单元 ($i_{n1}-i_{n9}$) 的长度及阻抗来研究 PHC 位置半径的影响. 几种典型 MITL 参数对比如表 1 所列.

1) 组 I, II 和 III 用于研究外层 MITL 真空阻抗对鞘层电子流的影响, 组 I 各层 MITL 真空阻抗是组 II 的 1.414 倍, 组 II 真空阻抗是组 III 的 1.414 倍.

2) 组 II, IV 和 V 用于研究外层 MITL 最小间隙距离的影响, 组 IV 最小间隙距离是组 II 的 1.414 倍, 组 II 是对组 V 的 1.414 倍.

表 1 几种 MITL 典型参数对比

Table 1. Comparison of the structural parameters of the MITL of the different designs.

组	A层阻抗 Z_A/Ω	B层阻抗 Z_B/Ω	C层阻抗 Z_C/Ω	D层阻抗 Z_D/Ω	四层并联阻抗 Z_{MITL}/Ω	最小间隙距离 h/mm	PHC位置半径 r_{con}/cm	中心区初始 电感/nH
I	2.83	2.83	4.24	4.24	0.84	10.00	7.65	11.37
II	2.00	2.00	3.00	3.00	0.60	10.00	7.65	10.50
III	1.41	1.41	2.12	2.12	0.42	10.00	7.65	9.94
IV	2.00	2.00	3.00	3.00	0.60	14.10	7.65	10.84
V	2.00	2.00	3.00	3.00	0.60	7.10	7.65	10.33
VI	2.00	2.00	3.00	3.00	0.60	10.00	10.82	10.90
VII	2.00	2.00	3.00	3.00	0.60	10.00	5.41	10.11

3) 组 II, VI 和 VII 用于研究 PHC 位置半径的影响, 组 VI 中 PHC 位置半径是组 II 的 1.414 倍, 组 II 是组 VII 的 1.414 倍.

4.1 外层 MITL 真空阻抗

当 15 MA 装置外层 MITL 分别采用组 I, II 和 III 三种典型参数时, 4 层 MITL 末端鞘层电子流之和如图 4 所示, 其中 t_1 表示 1/3 负载峰值电流时刻, t_2 表示负载峰值电流时刻, t_3 表示负载聚爆前 5 ns 时刻. 计算结果显示: 组 I, II 和 III 三种参数下外层 MITL 末端鞘层电子流差别不大. 当 4 层 MITL 并联真空阻抗由 0.42 Ω 增大至 0.84 Ω 时, 峰值电流时刻, 组 I, II 和 III 三种 MITL 末端鞘层电子流分别约为 42.2 kA, 32.3 kA 和 25.1 kA, 负载峰值电流分别为 13.2 MA, 13.1 MA 和 12.7 MA; 聚爆前 5 ns 时刻, MITL 末端鞘层电子流分别为 184.7 kA, 141.4 kA 和 106.9 kA.

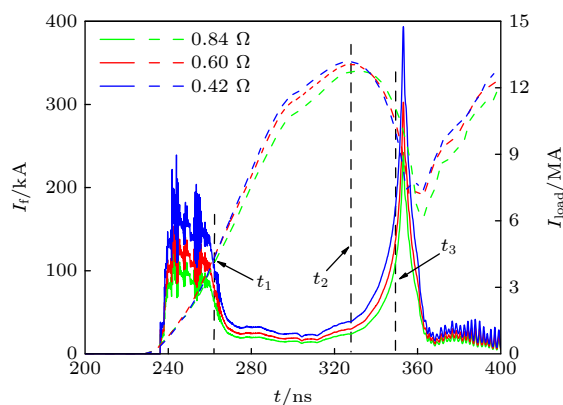


图 4 外层 MITL 恒阻抗段真空阻抗对鞘层电子流和负载电流的影响, 图中虚线表示负载电流, 实线表示鞘层电子流
Fig. 4. Influence of the vacuum impedance of constant-impedance MITL on the electron flow current and load current. The dotted lines in the figure represent the load currents, and the solid lines represent the electron flow currents.

4.2 外层 MITL 最小间隙距离

当 15 MA 装置外层 MITL 分别采用组 II, IV 和 V 三种典型参数时, 4 层 MITL 末端鞘层电子流如图 5 所示. 当 MITL 末端最小间隙距离分别为 14.10 mm、10.00 mm 和 7.10 mm 时, 负载峰值电流分别为 12.8 MA, 13.1 MA 和 12.9 MA. 负载聚爆前 5 ns 时刻, 总鞘层电子流分别为 85.1 kA, 141.4 kA 和 181.9 kA.

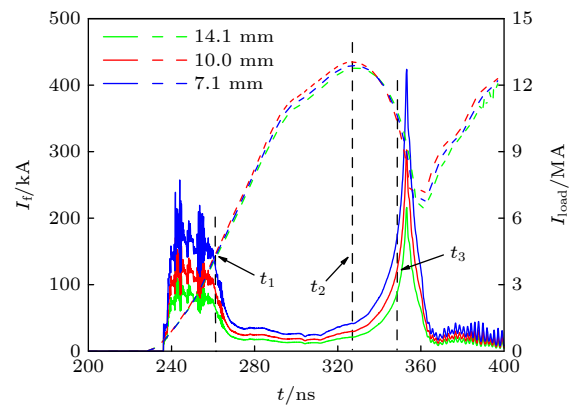


图 5 外层 MITL 最小间隙距离对鞘层电子流和负载电流的影响, 图中虚线表示负载电流, 实线表示鞘层电子流
Fig. 5. Influence of the minimum gap of outer MITL on the electron flow current and load current. The dotted lines in the figure represent the load currents, and the solid lines represent the electron flow currents.

4.3 PHC 位置半径

当 15 MA 装置外层 MITL 分别采用组 II, VI 和 VII 三种典型参数时, 4 层 MITL 末端鞘层电子流如图 6 所示. 当 PHC 位置半径从 7.65 cm 增大到 10.82 cm, 负载聚爆前 5 ns 时刻, MITL 末端鞘层电子流由 141.4 kA 增大至 234.1 kA, 这是因为当外层 MITL 最小间隙距离不变时, 增大 PHC 位置半径减小了 MITL 末端真空阻抗. 随着 PHC 位置

半径从 7.65 cm 外移到 10.82 cm, 虽然外层 MITL 和柱孔盘旋结构电感减小, 但是由于内 MITL 电感增大, 整个中心汇流区初始电感增大约 0.4 nH, 导致负载峰值电流降低约 0.3 MA. 当 PHC 位置半径从 7.65 cm 减小至 5.41 cm 时, 鞘层电子流和负载峰值电流变化较小.

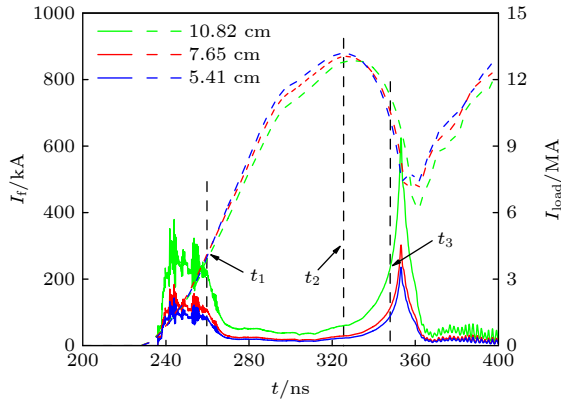


图 6 PHC 位置半径对鞘层电子流和负载电流的影响, 图中虚线表示负载电流, 实线表示鞘层电子流

Fig. 6. Influence of the location of PHC on the electron flow current and load current. The dotted lines in the figure represent the load currents, and the solid lines represent the electron flow currents.

5 结 论

针对 15 MA Z 箍缩装置, 考虑了磁绝缘鞘层电子之间的相互碰撞, 建立了 MITL 鞘层电子流计算方法, 获得了外层 MITL 鞘层电子流分布特性. 从时间分布上看, 鞘层电子流随时间变化呈马鞍形, 在脉冲起始时刻, 鞘层电子流比较大; 进入稳态磁绝缘后鞘层电子流逐渐减小; 在聚爆时刻前后, 鞘层电子流再次急剧增大. 分析了外层 MITL 典型参数 (恒阻抗段真空阻抗、最小间隙距离、PHC 位置半径) 对真空鞘层电子流的影响规律, 结果表明, 外层 MITL 的真空阻抗越小、MITL 末端最小间隙越小、PHC 位置半径越大, 鞘层电子流越大. 为了减小 MITL 末端鞘层电子流, 可适当增大 MITL 真空阻抗和最小间隙距离, 但由此将增大中

心汇流区初始电感, 降低了负载峰值电流; 减小 PHC 位置半径 (PHC 半径位置更靠近负载轴心), 可有效降低鞘层电子流, 但存在极限值.

参考文献

- [1] Hutsel B T, Corcoran P A, Cuneo M E, et al. 2018 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **21** 030401
- [2] Zou W K, Guo F, Wang G L, Chen L, Wei B, Song S Y 2015 *High Volt. Eng.* **41** 1844 (in Chinese) [邹文康, 郭帆, 王贵林, 陈林, 卫兵, 宋盛义 2015 *高电压技术* **41** 1844]
- [3] Deng J J, Xie W P, Feng S P, et al. 2016 *Matter Radiat. Extremes* **1** 48
- [4] Stygar W A, Awe T J, Bailey J E, et al. 2015 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **18** 110401
- [5] Spielman R B, Froula D H, Brent G, et al. 2017 *Matter Radiat. Extremes* **5** 204
- [6] Spielman R B, Reisman D B 2019 *Matter Radiat. Extremes* **4** 027402
- [7] Chen L, Zou W K, Zhou L J, et al. 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 030401
- [8] Madrid E A, Rose D V, Welch D R, et al. 2013 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **16** 120401
- [9] Rose D V, Madrid E A, Welch D R, Clark R E, Mostrom C B, Stygar W A, Cuneo M E 2015 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **18** 030402
- [10] Gomez M R, Gilgenbach R M, Cuneo M E, et al. 2017 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **20** 010401
- [11] Waisman E M, Desjarlais M P, Cuneo M E 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 030402
- [12] Rose D V, Waisman E M, Desjarlais M P, Hutsel B T, Cuneo M E, Welch D, Bennett N, Laity G R 2020 *Phys. Rev. Accel. Beams* **23** 080401
- [13] Mazarakis M G, Cuneo M E, Fowler W E, et al. 2013 *The 19th IEEE Pulsed Power Conference San Francisco, CA, USA, June 16–21 2013* p1
- [14] Bennett N, Welch D R, Jennings C A, et al. 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 120401
- [15] Bennett N, Welch D R, Laity G, Rose D V, Cuneo M E 2021 *Phys. Rev. Accel. Beams* **24** 060401
- [16] Welch D R, Bennett N, Genoni T C, Thoma C, Rose D V 2020 *Phys. Rev. Accel. Beams* **23** 110401
- [17] Gong Z Z, Wei H, Fan S Y, Sun F J, Wu H Y, Qiu A C 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 105202 (in Chinese) [龚振洲, 魏浩, 范思源, 孙凤举, 吴撼宇, 邱爱慈 2022 *物理学报* **71** 105202]
- [18] Stygar W A, Wagoner T C, Ives H C, et al. 2006 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **9** 090401
- [19] Stygar W A, Corcoran P A, Ives H C, et al. 2009 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** 120401
- [20] Jennings C A, Chittenden J P, Cuneo M E, et al. 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 529

Analysis of electron flow current in vacuum magnetically-insulated-transmission-line sheath for 15-MA Z-pinch driver*

Gong Zhen-Zhou¹⁾ Wei Hao^{1)2)†} Fan Si-Yuan¹⁾

Hong Ya-Ping¹⁾ Wu Han-Yu²⁾ Qiu Ai-Ci¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 30 September 2022; revised manuscript received 5 November 2022)

Abstract

The 15-MA driver is powered by 24 linear-transformer-driver (LTD) modules connected electrically in parallel. The magnetically-insulated-transmission-line (MITL) system of the 15-MA driver adopts a four-level design. It is expected that the primary source delivers a more than 15 MA current to a physics load. The typical one-dimensional steady-state pressure-balance model is adopted to calculate the electron flow current of the outer MITLs of the 15-MA driver after the magnetic insulation has been established. The cathode plasma expansion and the collisional flow electrons are considered on the basis of that model. Multiple designs with different characteristic parameters of the MITL system include the vacuum impedance of the constant-impedance segment of the outer-MITL, the minimum gap of the outer-MITL, and the location of the post-hole convolute (PHC). The flow currents of these designs are calculated in three typical times (1/3 peak load current time, peak load current time, and 5 ns before the Z-pinch stagnation) by establishing the equivalent circuit model of the 15-MA driver. The influences of these characteristic parameters on the electrical pulse transmission and convergence of the 15 MA driver are obtained. The calculation results show that the electron flow current at the end of MITL is greatly affected by the impedance of the end of MITL after the electron flow current has entered into the steady state magnetic insulation. The flow current decreases from 184.7 kA to 106.9 kA, while the load current is reduced by 0.5 MA, as the vacuum impedance increases from 0.42 Ω to 0.84 Ω . This is mainly because the central inductance increases by about 1.43 nH (from 9.94 nH to 11.37 nH). In the time of 5 ns before load stagnation, the flow current decreases from 181.9 kA to 85.1 kA as the minimum gap of the outer-MITL increases from 7.10 mm to 14.00 mm, and the peak load current drops only by about 0.1 MA. The flow current and load current decrease slowly as the location radius of the PHC decreases until the radius decreases to 7.65 mm. The research in this paper is helpful in guiding the structure optimization for the central converging region of future Z-pinch driver.

Keywords: Z-pinch, magnetically insulated transmission line, electron flow current, vacuum impedance

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.72.20221901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51790524, 11975186).

† Corresponding author. E-mail: weihaoyy@sina.com



15 MA Z箍缩装置真空磁绝缘传输线鞘层电子流分析

龚振洲 魏浩 范思源 洪亚平 吴撼宇 邱爱慈

Analysis of electron flow current in vacuum magnetically-insulated-transmission-line sheath for 15-MA Z-pinch driver

Gong Zhen-Zhou Wei Hao Fan Si-Yuan Hong Ya-Ping Wu Han-Yu Qiu Ai-Ci

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 035204 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221901

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

15 MA Z箍缩装置真空磁绝缘传输线损失电流的电路模拟

Circuit simulation of current loss in magnetically insulated transmission line system in 15- MA Z-pinch driver

物理学报. 2022, 71(10): 105202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212378>

磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

物理学报. 2020, 69(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

Z箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学

Numerical studies on dynamics of Z-pinch dynamic hohlraum driven target implosion

物理学报. 2018, 67(2): 025203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171640>

一种用于Z箍缩实验的软X射线成像系统

Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments

物理学报. 2021, 70(4): 045203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200957>

有耗介质层上多导体传输线的电磁耦合时域分析方法

Time domain hybrid method for coupling analysis of multi-conductor transmission lines on the lossy dielectric layer excited by ambient wave

物理学报. 2020, 69(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191214>

介质部分填充平行平板传输线微放电过程分析

Multipactor in parallel-plate transmission line partially filled with dielectric material

物理学报. 2018, 67(15): 157901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180351>