

大型 Z 箍缩装置中心汇流区电感计算

龚振洲¹, 魏浩², 范思源¹, 孙凤举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, 710049, 西安;

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, 710024, 西安)

摘要: 为了快速估算大型 Z 箍缩装置中心汇流区电感, 研究 Z 箍缩装置电功率和能量传输效率的规律, 对 Z 箍缩装置中心汇流区做近似处理, 给出了绝缘堆、真空喇叭口、真空磁绝缘传输线、汇流柱等部件电感近似计算公式, 建立了一种快速估算 Z 箍缩装置中心汇流区电感的方法, 获得了中心汇流区电感与电气参数(绝缘堆峰值电压)和结构参数(中心汇流区半径及分层数、真空磁绝缘传输线倾角)的定量关系。在此基础上, 建立了典型 Z 箍缩装置简化电路模型, 实现了从中心汇流区结构参数→电气参数→输出电流的自洽电路模拟, 获得了中心汇流区分层数及半径对 Z 箍缩装置短路电流的影响规律。计算结果表明: 所提电感计算方法获得国际典型 Z 箍缩装置的中心汇流区电感与文献最大误差为 3.3%; 中心汇流区电感随分层数增大而减小、随半径先减小后增大, 存在使中心汇流区电感最小的优化半径。所提方法可为同类型 Z 箍缩装置的设计提供理论参考。

关键词: Z 箍缩; 中心汇流区; 电感计算; 绝缘堆; 磁绝缘传输线

中图分类号: TM83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202206001 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0001-08



OSID 码

Inductance Calculation of the Central Converging Region of High Current Z-Pinch Driver

GONG Zhenzhou¹, WEI Hao², FAN Siyuan¹, SUN Fengju², QIU Aici^{1,2}

(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)

Abstract: To quickly calculate the inductance of the central converging region and reveal the laws of the power and energy transmission efficiency of the high current Z-pinch driver, an analytical method is established to calculate the central inductance by an approximation of the structure of the central converging region, providing the approximate calculation formulas of inductance of insulator stacks, vacuum flare, vacuum magnetically insulated transmission lines and post-hole convolute. The quantitative relation between the central inductance and the electric (peak voltage of insulator stack) and structural parameters (radius and number of levels of the central confluence region, vacuum magnetically insulated transmission lines) was discussed. The simplified circuit of the typical Z-pinch driver was modeled on this basis, and the self-consistent circuit model of the structural parameters → electric parameters → load current was set up. Finally, the influence of the level and radius of the stack on the short-circuit load current of the driver is obtained. The results show that the maximum error between the inductance obtained by the method proposed

收稿日期: 2021-10-29。 作者简介: 龚振洲(1996—),男,博士生;魏浩(通信作者),男,副研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51790524,11975186)。

网络出版时间: 2022-03-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220314.1718.005.html>

and values given in the literature of the international typical Z-pinch drivers is 3.3%. The central inductance decreases with the increase of the number of levels of the central region, decreases first with the radius and then increases, and there is an optimization radius that minimizes the central inductance. This method proposed can provide a theoretical reference for the design of the same type of Z-pinch drivers.

Keywords: Z-pinch; central converging region; inductance calculation; insulator stack; magnetically-insulated-transmission-line

近几十年来,随着电磁驱动内爆的快速发展,国际上积极开展快 Z 箍缩研究。为了满足 Z 箍缩在惯性约束聚变、辐射物理、天体物理等领域的研究需求,对 Z 箍缩装置的功率和电流提出了越来越高的要求。国际上已建或在建的大型 Z 箍缩装置主要有美国的 ZR 装置^[1-3]、中国的 10 MA 装置^[4-7]、俄罗斯的 Baikal 装置^[8-9]等。

大型 Z 箍缩装置需要电脉冲传输与汇聚系统(简称为中心汇流区)将空间尺度数十米量级的多路初级脉冲源产生的电脉冲传输汇聚至厘米级尺度的物理负载。中心汇流区通常包括水介质传输线、多层真空绝缘堆、真空圆盘锥磁绝缘传输线(magnetically insulated transmission line, MITL)、多层柱孔盘旋结构(简称为汇流柱(post-hole convolute, PHC))等,典型的 Z 箍缩装置中心汇流区如图 1 所示。中心汇流区参数,特别是中心汇流区电感对 Z 箍缩装置能量和功率传输效率具有十分重要的影响。为了提高能量和功率传输效率,通常需要尽可能减小中心汇流区电感,然而受绝缘堆耐受电压^[10-12]、等离子体运动引起 MITL 间隙闭合^[2,13]等因素制约,中心汇流区电感不可能无限降低。快速和精确估算中心汇流区电感对大型 Z 箍缩装置总体设计、电路模拟和参数优化具有重要意义。

中心汇流区结构复杂,难以直接通过解析方法准确计算电感。三维电磁模拟虽然能够准确计算电感,但存在计算耗时长、计算效率低等问题。美国圣地亚国家实验室的 Stygar 等给出了中心汇流区电感与绝缘堆电压的定标关系式^[14],该方法基于美国典型 Z 箍缩装置中心汇流区电感优化结果,给出了与 Z、Saturn 相近绝缘堆运行场强下中心汇流区电感最小值,然而当绝缘堆运行场强变化或者中心汇流区结构变化时,就难以应用该式直接给出汇流区电感。中国工程物理研究院的宋盛义推导了圆盘锥真空磁绝缘传输线的真空电感公式^[15],但忽略了汇流柱电感。汇流柱结构复杂,电感难以直接求解。华北电力大学的倪筹帷等提出了载流细导体的位移

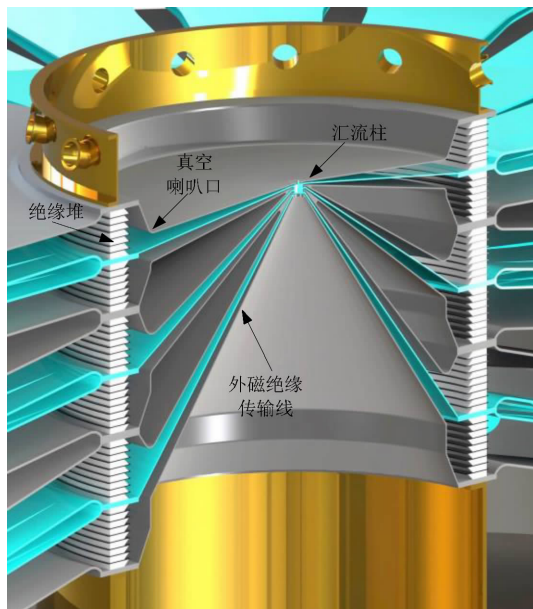


图1 美国的 Z-300 装置中心汇流区示意图^[16]

Fig. 1 Diagram of the central converging region of the Z-300 in the United States^[16]

电流模型,推导了载流细导体的自感和互感计算公式^[17]。崔翔通过建立载流细导体的传导电流模型,给出了更简化的载流细导体的自感和互感计算公式^[18]。

本文借鉴上述电感计算方法,对 Z 箍缩装置中心汇流区几何结构做近似处理,分别给出绝缘堆、真空喇叭口、真空 MITL、汇流柱等部件的电感近似计算公式,建立了一种中心汇流区电感快速估算方法,采用三维电磁模拟对计算方法准确性进行了验证。分析了典型结构参数对中心汇流区电感的影响规律,建立了典型 Z 箍缩装置简化电路模型,实现了从结构参数→电气参数→负载电流的自治电路模拟。

1 电感计算方法

中心汇流区简化示意如图 2 所示,图中 r_{center} 为中心汇流区半径。

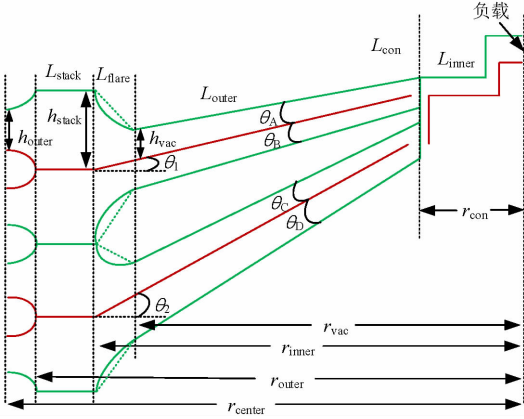


图 2 中心汇流区简化示意图

Fig. 2 Simplified diagram of the central converging region

中心汇流区电感 L_{center} 由以下 6 部分组成

$$L_{\text{center}} = L_{\text{stack}} + L_{\text{flare}} + L_{\text{outer}} + L_{\text{con}} + L_{\text{inner}} + L_{\text{load}}(t) \quad (1)$$

式中 L_{stack} 、 L_{flare} 、 L_{outer} 、 L_{con} 、 L_{inner} 和 $L_{\text{load}}(t)$ 分别表示绝缘堆、真空喇叭段、外 MITL、汇流柱、内 MITL 和负载的电感。

1.1 绝缘堆电感

绝缘堆可近似为径向传输线,所以有

$$L_{\text{stack}} = \frac{\mu_0 h_{\text{stack}}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{\text{outer}}}{r_{\text{inner}}}\right) \quad (2)$$

式中: μ 为真空磁导率; h_{stack} 为绝缘堆高度; r_{outer} 为绝缘堆外半径; r_{inner} 为绝缘堆内半径。

1.2 真空喇叭口电感

真空喇叭口形状不规则,难以直接求解电感,对其弧形轮廓进行线性等效,如图 2 所示,所以有

$$L_{\text{flare}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{r=r_{\text{vac}}}^{r_{\text{inner}}} \frac{k_1 r + b_1}{r} dr = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[k_1 (r_{\text{inner}} - r_{\text{vac}}) + b_1 \ln\left(\frac{r_{\text{inner}}}{r_{\text{vac}}}\right) \right] \quad (3)$$

式中: k_1 和 b_1 分别表示以绝缘堆最内侧为坐标原点的真空喇叭口间隙变化的斜率和截距, $k_1 = h_{\text{stack}}$, $b_1 = (h_{\text{vac}} - h_{\text{stack}})/(r_{\text{inner}} - r_{\text{vac}})$; h_{vac} 为真空喇叭口最内侧阴阳极间隙距离; r_{vac} 为真空喇叭口内半径。

1.3 外 MITL 电感

外 MITL 如图 3 所示,分为恒阻抗段 S_1 和恒间隙段 S_2 。恒阻抗段的真空阻抗不变,随着半径减小,阴阳电极间隙距离逐渐减小;恒间隙段保持阴阳极间隙距离不变,真空阻抗随半径减小迅速增大。

恒阻抗段 S_1 电感有

$$L_{\text{outer}_i} = Z_{\text{MITL}} \tau \quad (4)$$

式中: Z_{MITL} 是外 MITL 恒阻抗段真空阻抗; $\tau = (r_{\text{vac}} - r_{\text{hold}})/c \sin(90^\circ - \theta_1)$ 是电磁波传输时间; r_{hold} 为恒

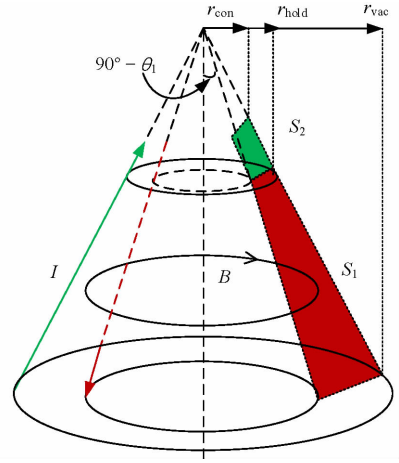


图 3 外 MITL 简化示意图

Fig. 3 Simplified diagram of the outer-MITL

阻抗段与恒间隙段分界位置半径。

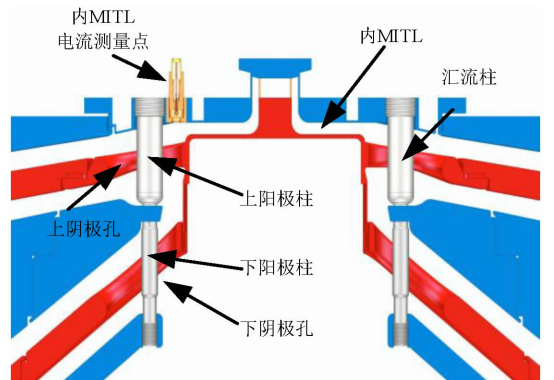
恒间隙段 S_2 电感有

$$L_{\text{outer}_g} = \frac{\mu_0 h_{\text{ak}}}{2\pi \sin(90^\circ - \theta_1)} \ln\left(\frac{r_{\text{hold}}}{r_{\text{con}}}\right) \quad (5)$$

式中: h_{ak} 是恒间隙段间隙距离; r_{con} 是汇流柱的位置半径。

1.4 柱孔盘旋结构和内 MITL 电感

通常采用柱孔盘旋结构将多层外 MITL 电流汇聚至内 MITL。柱孔盘旋结构电感受汇流柱位置、阳极柱直径、阴极孔形状及尺寸、负载构型等因素影响很大。美国 Z 装置采用的双层柱孔盘旋结构和内 MITL 如图 4 所示,采用 12 对汇流柱汇流,汇流柱和内 MITL 电感之和约为 3.15 nH^[2]。本文定义距离装置中心半径 6~10 cm 区域为汇流柱区域,双层柱孔盘旋结构等效电感如图 5 所示。

图 4 美国 Z 装置的汇流柱和内 MITL 结构示意图^[2]Fig. 4 The diagram of the PHC and inner-MITL of the Z machine in the United States^[2]

假设电磁波同时到达 A、B、C 和 D 这 4 层 MITL,则汇流柱电感 L_{con} 可表示为

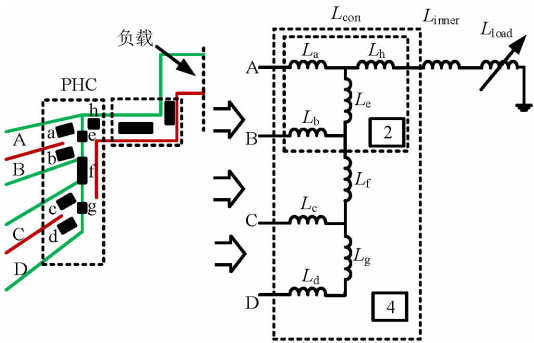


图 5 双层汇流柱等效电感示意图

Fig. 5 The diagram of the inductance distribution of the DPHC

$$L_{con} = \{[(L_d + L_g) \parallel L_c + L_f] \parallel L_b + L_e\} \parallel L_a + L_h$$

(6)

电感 L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_d 和 L_h 可近似为圆盘结构, 电感 L_e 、 L_f 和 L_g 的计算见本文首页 OSID 码中的开放科学数据。

当给定中心汇流区电气参数(绝缘堆峰值电压 U_{stack} 、绝缘堆平均运行场强 E_{av})和结构参数(单片绝缘子厚度 h_{ins} 、单片均压环厚度 h_{ring} 、绝缘堆径向宽度 Δr_{ins} 、真空喇叭段径向宽度 Δr_{vac} 、外 MITL 真空阻抗 Z_{MITL} 、外 MITL 恒间隙段距离 h_{ak} 、中心汇流区半径 r_{center} 、汇流柱半径 r_{con} 和外 MITL 上层倾角 θ_1)时,通过数值求解式(1)~(6),可获得中心汇流区电感 L_{center} 。

2 电感计算方法准确性验证

采用本文电感计算方法,计算国际上几个典型 Z 箍缩装置的中心汇流区电感。表 1 给出了典型 Z 箍缩装置中心汇流区的参数。表 2 给出了中心区电感的本文计算值 L_c 与文献参考值 L_r 的对比,表中中心区电感偏差的计算方法为 $(L_c - L_r)/L_r \times 100\%$ 。可以看出,最大偏差为 3.3%。

3 某装置中心汇流区电感计算

以表 3 给定的某装置中心汇流区参数为例,绝缘堆耐受电压约 1.6 MV,中心汇流区半径为 1.1 m,绝缘堆由 A~D 共 4 层组成,A 和 B 层由 5 片绝缘环和 4 片均压环组成,C 和 D 层由 6 片绝缘环和 5 片均压环组成,每片绝缘环和均压环厚度分别为 3 cm 和 0.8 cm。整个绝缘堆高度 105 cm,4 层外 MITL 真空阻抗分别为 2、2、3、3 Ω 。柱孔盘旋结构和内 MITL 结构参数与 Z 装置相同^[2]。

表 1 典型 Z 箍缩装置的中心汇流区参数

Table 1 Parameters of the central converging region of typical Z-pinch drivers

参数	数值			
	Z	PTS	Z300	Z800
绝缘堆峰值电压/MV	3.40	2.50	7.70	15.00
绝缘堆平均运行场强/(kV·cm ⁻¹)	90.00	90.00	200.00	200.00
单片绝缘子厚度/cm	5.72	5.20	5.72	5.72
单片均压环厚度/cm	0.95	0.80	0.95	0.95
绝缘堆径向宽度/cm	20.00	16.60	25.00	25.00
真空喇叭口径向宽度/cm	20.00	26.00	25.00	25.00
外 MITL 真空阻抗/ Ω	A 层	1.98	2.82	5.00
	B 层	2.02	2.78	5.00
	C 层	2.74	3.17	5.00
	D 层	2.73	3.17	5.00
	E 层		5.00	5.00
	F 层		5.00	5.00
外 MITL 恒间隙段间隙距离/cm	1.00	1.00	1.17	1.17
中心汇流区半径/m	1.70	1.44	2.39	2.65
汇流柱位置半径/cm	7.60	8.00	15.00	15.00
外 MITL 上层倾角/(°)	18.00	32.70	6.00	6.00

表 2 本文方法获得的典型 Z 箍缩装置电感与文献结果对比

Table 2 Comparisons of the central inductance calculated by the method of this paper and the reference value of typical Z-pinch machines

装置	中心区电感/nH		电感偏差/%
	文献参考值	本文计算值	
Z	6.05 ^[2]	6.15	1.7
PTS	8.94 ^[7]	8.75	2.1
Z300	10.11 ^[16]	9.78	3.3
Z800	13.50 ^[16]	13.15	2.6

注:不包括汇流柱、内 MITL 以及负载电感。

采用本文方法计算中心汇流区总电感,结果约为 7.94 nH。表 4 给出了电感的本文计算值 L_{AC} 与三维电磁模型计算值 L_{EM} 的对比,表中电感偏差计算方法为 $(L_{EM} - L_{AM})/L_{EM} \times 100\%$ 。可以看出,总电感 L_{center} 计算偏差为 2.2%。

表 3 某装置中心汇流区参数

Table 3 Parameters of the current converging region of a driver

参数	数值	
绝缘堆峰值电压 $U_{\text{stack}}/\text{MV}$	1.6	
绝缘堆平均运行场强 $E_{\text{av}}/(\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1})$	120	
单片绝缘子厚度 h_{ins}/cm	3	
单片均压环厚度 $h_{\text{ring}}/\text{cm}$	0.8	
绝缘堆径向宽度 $\Delta r_{\text{ins}}/\text{cm}$	15	
真空喇叭段径向宽度 $\Delta r_{\text{vac}}/\text{cm}$	15	
外 MITL 真空阻抗 Z_{MITL}/Ω	A 层	2
	B 层	2
	C 层	3
	D 层	3
外 MITL 恒间隙段间隙距离 h_{ak}/cm	1	
中心汇流区半径 $r_{\text{center}}/\text{m}$	1.1	
汇流柱位置半径 r_{con}/cm	7.6	
外 MITL 上层阴极倾角 $\theta_1/(\circ)$	18	

表 4 本文电感计算结果与数值计算结果对比

Table 4 Comparison of the results between the value calculated by the method of this paper and numerical simulation

组成部分	电感/nH		电感偏差/%
	三维电磁模型计算值	本文计算值	
绝缘堆	2.33	2.31	0.86
真空喇叭口	1.18	1.14	3.40
外 MITL	1.34	1.38	2.90
汇流柱	1.15	0.91	20.90
内 MITL	2.12	2.20	3.80
总电感	8.12	7.94	2.20

4 中心汇流区电感的变化规律

图 6 给出了绝缘堆径向宽度 Δr_{ins} 、真空喇叭段径向宽度 Δr_{vac} 这两个参数对中心汇流区电感 L_{center} 的影响规律。可以看出, L_{center} 随 Δr_{ins} 和 Δr_{vac} 增大而增大, 且 L_{center} 对 Δr_{ins} 变化更敏感。

中心汇流区电感 L_{center} 随外 MITL 倾角 θ_1 的变化如图 7 所示。可以看出, 当外 MITL 倾斜角度 θ_1 从 0° 增大到 40° 时, 中心汇流区总电感 L_{center} 从 7.8 nH 增长到 8.3 nH。虽然 L_{center} 增加不多, 但是各层电感差异增大。图 7 同时给出了中心汇流区柱孔上游的每层电感 $L_{\text{o_A}}$ 、 $L_{\text{o_B}}$ 、 $L_{\text{o_C}}$ 和 $L_{\text{o_D}}$ (包括绝缘堆和

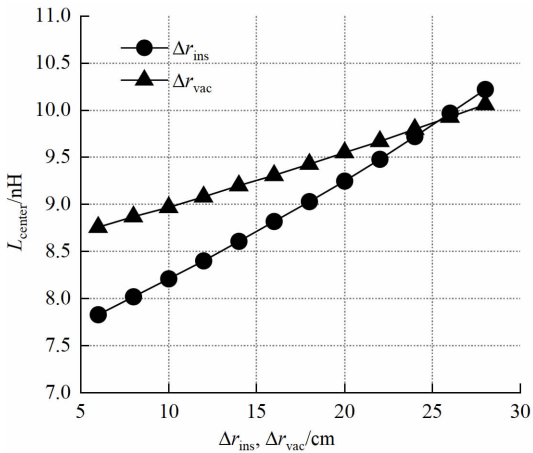


图 6 Δr_{ins} 和 Δr_{vac} 变化对电感 L_{center} 的影响

Fig. 6 The influence of Δr_{ins} and Δr_{vac} on L_{center}

真空喇叭口电感) 的变化。最上层的 A 层电感最小, 最下层的 D 层电感最大。当 $\theta_1 = 40^\circ$ 时, A 层电感为 18.5 nH, D 层电感为 23.6 nH。各层电感差异增大, 导致层间电流差异增大, D 层绝缘堆电压高、电流小, 增加了真空磁绝缘失效的风险。

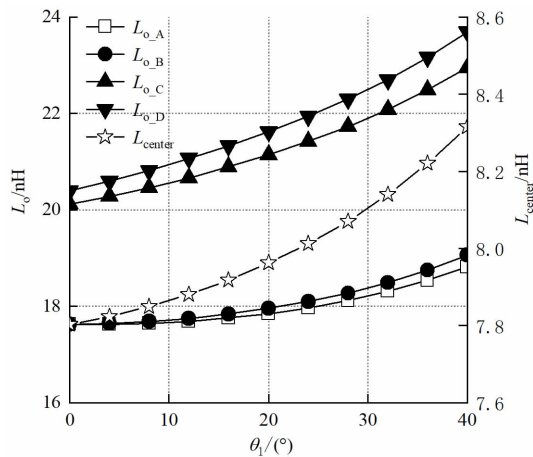


图 7 外 MITL 倾角对中心汇流区总电感和各层电感的影响

Fig. 7 The influence of the outer-MITL angle on the central inductance and inductance of each level

中心汇流区半径和绝缘堆分层数是中心汇流区的重要参数。图 8 给出了不同分层数下中心汇流区半径 r_{center} 变化对电感 L_{center} 的影响 (分层数为 2 时, 汇流柱的电感变化较小, 本文忽略其变化)。可以看出, 中心汇流区半径相同时, 分层数为 4 时的中心汇流区电感小于分层数为 2 时的。对于给定的分层数, 存在使得中心汇流区电感最小的半径优化值。当分层数为 2 层、 r_{center} 取 1.5 m 时, 中心汇流区电感最小, 为 12.2 nH; 当分层数为 4 层、 r_{center} 取 1.3 m 时, 中心汇流区电感最小, 为 8.5 nH。

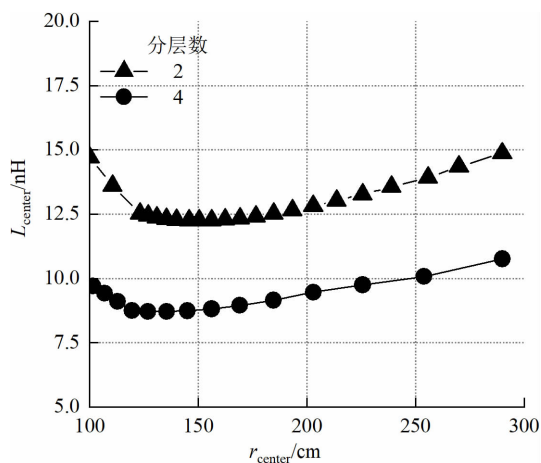
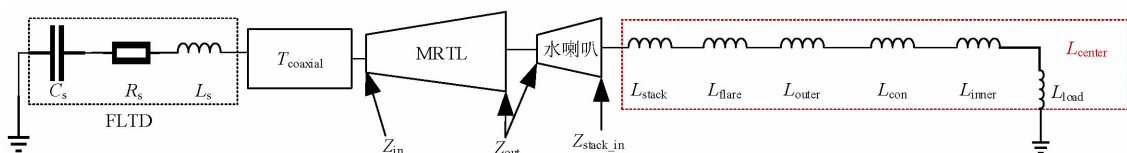
图8 中心汇流区半径 r_{center} 对电感 L_{center} 的影响Fig. 8 The influence of r_{center} on L_{center} 

图9 典型 LTD 驱动脉冲功率装置电路模型

Fig. 9 Circuit model of a typical LTD source pulsed-power driver

当初级脉冲源采用快脉冲直线变压器驱动源 (FLTD) 时^[19-24], 等效电阻 R_s 、电感 L_s 和电容 C_s 分别满足

$$\begin{cases} R_s = \frac{n_c}{n_b n_m} R_b \\ L_s = \frac{n_c}{n_b n_m} L_b \\ C_s = \frac{n_b n_m}{n_c} C_b \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_b 为单级 FLTD 模块内并联支路数; n_c 为单路 FLTD 初级源模块串联数; n_m 为装置初级源并联路数; R_b 为支路电阻; L_b 为支路电感; C_b 为支路电容。本文取 $n_b = 23$, $n_c = 10$, $n_m = 16$, $C_b = 50 \text{ nF}$, $L_b = 200 \text{ nH}$, $R_b = 0.3 \Omega$ 。

同轴输出水线特征阻抗、MRTL 输入阻抗 Z_{in} 通常与初级脉冲源输出阻抗 Z_s 匹配, 由式(8)计算取 Z_s 为 0.066Ω 。MRTL 输出阻抗 Z_{out} 满足式(9), 一般需要保证 $Z_{\text{out}} > Z_{\text{in}}$ ^[25-26]。 Z_s 和 Z_{out} 的计算式分别为

$$Z_s = 1.1 \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} + 0.8 R_s \quad (8)$$

5 中心汇流区电感对电流的影响

图9给出了典型 Z 箍缩装置简化电路模型^[16], 主要包括初级脉冲源(等效电容 C_s 、电感 L_s 和电阻 R_s)、同轴输出水线、整体径向传输线(MRTL)、水喇叭段、中心汇流区和负载等。

前文已获得中心汇流区电感 L_{center} 随分层数、中心汇流区半径等参数的变化规律, 因此若能获得 MRTL 和真空喇叭段参数与分层数、中心汇流区半径的关系, 就可以通过电路模拟获得中心汇流区结构参数变化时 Z 箍缩装置输出参数的变化规律, 从而实现了从结构参数→电气参数→负载电流的自治电路模拟。

$$Z_{\text{out}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \frac{h_{\text{outer}}}{2\pi r_{\text{center}}} \quad (9)$$

式中: μ_r 为相对磁导率; ϵ 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; k 为分层数; h_{outer} 为整体径向传输线末端阴阳极间隙距离, 本文取满足水绝缘要求的最小距离。

水喇叭段入口阻抗等于 MRTL 出口阻抗, 水喇叭段出口阻抗等于绝缘堆入口阻抗 $Z_{\text{stack_in}}$, 绝缘堆入口阻抗 $Z_{\text{stack_in}}$ 满足

$$Z_{\text{stack_in}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \frac{h_{\text{stack}}}{2\pi r_{\text{outer}}} \quad (10)$$

本文假定 FLTD 初级源出口半径保持 7.5 m , 同轴水线长度保持 4 m , MRTL 长度为 $3.5 \text{ m} - r_{\text{center}}$ 。电路模拟中假定负载为短路, 短路电感为 1.11 nH ^[2]。

图10给出了不同分层数情况下, 装置峰值短路电流随中心汇流区半径的变化规律。可以看出, 对于给定的初级脉冲源, 存在使短路电流最大的中心汇流区半径优化值。分层数 $k=2$, $r_{\text{center}}=2.3 \text{ m}$ 时, 短路峰值电流最大为 14 MA ; $k=4$, $r_{\text{center}}=1.8 \text{ m}$ 时, 短路峰值电流最大为 17.5 MA 。当 $r_{\text{center}}=1.0 \text{ m}$ 、中心汇流区分层数为 2 和 4 层时, 峰值电流分别

为 11.3 MA 和 15.4 MA。

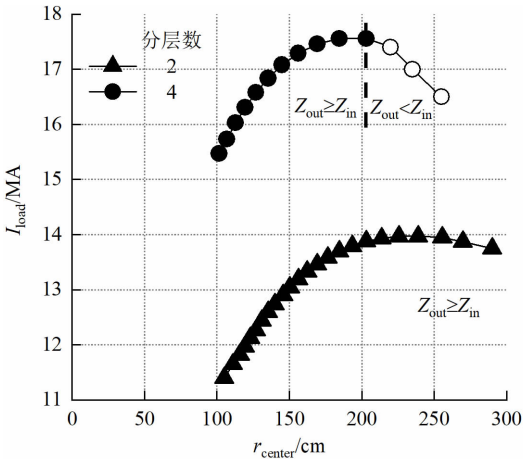


图 10 中心汇流区半径对短路电流的影响
Fig. 10 The influence of r_{center} on short-circuit current

6 结 论

本文在对 Z 箍缩装置中心汇流区简化基础上,给出了一种快速计算中心汇流区电感的方法,分析了典型结构参数对中心汇流区电感和装置负载短路电流的影响,获得如下结论。

(1)本文电感计算方法获得国际上典型 Z 箍缩装置的中心汇流区电感与文献最大误差为 3.3%。

(2)本文获得了中心汇流区电感 L_{center} 随结构参数的变化规律。 L_{center} 随中心汇流区分层数增大而减小;对于给定的分层数, L_{center} 随中心汇流区半径先减小后增大,存在使中心汇流区电感最小的优化半径。

(3)对于给定的初级脉冲源,存在使装置短路电流最大的中心汇流区半径优化值。对于本文给定装置参数:当分层数 $k=2$ 、 $r_{\text{center}}=2.3\text{ m}$ 时,短路峰值电流最大为 14 MA;当分层数 $k=4$ 、 $r_{\text{center}}=1.8\text{ m}$ 时,短路峰值电流最大为 17.5 MA。

参考文献:

[1] SPIELMAN R B, STYGAR W A, SEAMEN J F, et al. Pulsed power performance of PBFA Z [C]// 1997 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 709-714.

[2] STYGAR W A, CORCORAN P A, IVES H C, et al. 55-TW magnetically insulated transmission-line system: design, simulations, and performance [J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2009, 12(12): 120401.

[3] SAVAGE M E, BENNETT L F, BLISS D E, et al.

An overview of pulse compression and power flow in the upgraded Z pulsed power driver [C]// 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 979-984.

[4] SONG S Y, GUAN Y C, ZOU W K, et al. Circuit modeling for PTS's magnetically insulated transmission lines [C]// 2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-6.

[5] DENG Jianjun, XIE Weiping, FENG Suping, et al. Initial performance of the primary test stand [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 2580-2583.

[6] 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(1): 48-58.

[7] 邹文康. 电流前沿对真空磁绝缘线传输特性的影响研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015: 39-40.

[8] GRABOVSKY E V, AZIZOV E A, ALIKHANOV S G, et al. Development of X-ray facility "Baikal" based on 900 MJ inductive store and related problems [C]// 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 773-776.

[9] 蔡红春, 陈林, 蒋吉昊, 等. 热核聚变装置“贝加尔”概念设计 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(11): 110201-1-110201-7.

CAI Hongchun, CHEN Lin, JIANG Jihao, et al. Conceptual design of thermonuclear facility "Baikal" [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(11): 110201-1-110201-7.

[10] 王勐. 真空轴向绝缘堆闪络概率分析方法研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2006: 103-106.

[11] 高巍, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲下真空绝缘沿面闪络特性实验研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 58-61.

GAO Wei, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. Investigation of flashover characteristics under nanosecond pulse in vacuum [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 58-61.

[12] STYGAR W A, LOTT J A, WAGONER T C, et al. Improved design of a high-voltage vacuum-insulator interface [J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2005, 8(5): 050401.

[13] HUTSEL B T, CORCORAN P A, CUNEO M E, et al. Transmission-line-circuit model of an 85-TW, 25-

- MA pulsed-power accelerator [J]. *Physical Review: Accelerators and Beams*, 2018, 21(3): 030401.
- [14] STYGAR W A, CUNEO M E, VESEY R A, et al. Theoretical Z-pinch scaling relations for thermonuclear-fusion experiments [J]. *Physical Review: E*, 2005, 72(2): 026404.
- [15] 宋盛义. 圆盘锥磁绝缘传输系统电磁性能及结构力学理论计算 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2004: 36-39.
- [16] STYGAR W A, AWE T J, BAILEY J E, et al. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2015, 18(11): 110401.
- [17] 倪筹帷, 赵志斌, 崔翔. 考虑位移电流的部分电感计算方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 5181-5187.
- NI Chouwei, ZHAO Zhibin, CUI Xiang. Computing method partial inductance for conductor segments by considering displacement current [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2017, 37(17): 5181-5187.
- [18] 崔翔. 电流连续的细导体段模型的磁场及电感 [J]. *物理学报*, 2020, 69(3): 60-71.
- CUI Xiang. Magnetic field and inductance of filament conductor segment model with current continuity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(3): 60-71.
- [19] HE Xu, SUN Fengju, QIU Aici, et al. Four-stage linear transformer driver with sharing shell: EM model, simulation, and performance [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(1): 358-364.
- [20] ZHOU Lin, LI Zhenghong, WANG Zhen, et al. Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments [J]. *Physical Review: Accelerators and Beams*, 2016, 19(3): 030401.
- [21] 陈林, 邹文康, 谢卫平, 等. 1 MV/100 kA 快脉冲直线型变压器驱动源装置设计 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(4): 935-940.
- CHEN Lin, ZOU Wenkang, XIE Weiping, et al. Design of the 1 MV/100 kA fast linear transformer driver generator [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(4): 935-940.
- [22] CONTI F, VALENZUELA J C, FADEEV V, et al. MA-class linear transformer driver for Z-pinch research [J]. *Physical Review: Accelerators and Beams*, 2020, 23(9): 090401.
- [23] CHEN Lin, ZOU Wenkang, ZHOU Liangji, et al. Development of a fusion-oriented pulsed power module [J]. *Physical Review: Accelerators and Beams*, 2019, 22(3): 030401.
- [24] 石琦, 邱爱慈, 王志国, 等. 内置触发方式下单级 FLTD 触发脉冲参数及影响因素 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 51-57.
- SHI Qi, QIU Aici, WANG Zhiguo, et al. Characteristics and influencing factors of one-stage FLTD trigger pulse with internal trigger brick mode [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 51-57.
- [25] STYGAR W A, CUNEO M E, HEADLEY D I, et al. Architecture of petawatt-class Z-pinch accelerators [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2007, 10(3): 030401.
- [26] FAN Siyuan, WEI Hao, GONG Zhenzhou, et al. Analytic model and optimization of transmission-line impedance transformers for tens of MA-class pulsed power accelerator [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(10): 3162-3172.

(编辑 陶晴 亢列梅)