第 52 卷 第 4 期：1936-1946 高电压技术 Vol.52, No.4: 1936-1946
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251363

基于贝杰龙算法的单级 LTD 全电路数值模拟

降宏瑜[1,2]，姜晓峰[2]，孙凤举[2]，楼　成[2]，魏　浩[2]，邱爱慈[1,2]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 西北核技术研究所强脉冲辐射模拟与效应全国重点实验室，西安 710024）

摘　要：基于贝杰龙算法，建立了直线型变压器驱动源(linear transformer driver，LTD)放电支路和单级模块的全电路数值计算模型，结合气体开关火花通道电阻和单级 LTD 模块放电特性的实验结果对模型进行验证，实现了从放电支路到单级模块的自洽模拟。结果表明，考虑了气体开关火花通道电阻动态特性、放电支路间电磁耦合、开关触发导通时刻的电路模型，能够精确预测单级 LTD 的输出特性。单级 LTD 在充电±100 kV 时，驱动近似匹配电阻负载，输出峰值功率为 82 GW，负载的能量利用效率约为 80%，其中气体开关火花通道电阻损耗能量占比为 5.7%。该单级 LTD 全电路仿真方法可为 LTD 型脉冲功率装置的全电路模型仿真奠定基础。
关键词：直线型变压器驱动源；贝杰龙算法；气体开关火花通道电阻；支路互感；能量效率

Full-circuit Numerical Simulation of Single-stage LTD Cavity Based on the Bergeron Algorithm

JIANG Hongyu[1,2], JIANG Xiaofeng[2], SUN Fengju[2], LOU Cheng[2], WEI Hao[2], QIU Aici[1,2]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract：Based on the Bergeron algorithm, a full-circuit numerical calculation model of the discharge branch and the single-stage cavity of linear transformer driver (LTD) is established. The self-consistent simulation from discharge branches to the LTD cavity is realized by combining experimental results from spark channel resistance tests of gas switches and discharge characteristic tests of the LTD cavity. The results show that the output characteristics of the LTD cavity can be accurately predicted by taking into account the dynamic characteristics of the spark channel resistance of gas switches, the electromagnetic coupling between the discharge branches, and the triggering closed time of gas switches. When the LTD cavity is charged at ±100 kV, the peak output power is 82 GW, and the resistance load energy efficiency is about 80%; meanwhile, the energy loss ratio due to gas switch spark channel resistance is 5.7%. The single-stage LTD full-circuit simulation method established in this paper lays a foundation for the simulation of LTD pulsed power devices.
Key words：linear transformer driver(LTD); Bergeron algorithm; spark channel resistance of gas switches; mutual inductance of discharge bricks; energy efficiency

0　引言

直线型变压器驱动源(linear transformer driver，LTD)作为下一代大型脉冲功率源极有前景的技术路线之一，可用于建设电流数十兆安、前沿百纳秒、功率数百太瓦的脉冲驱动源，满足 Z 箍缩惯性约束聚变点火、强脉冲 X 射线辐射环境模拟等研究的迫切需求[1-4]。建立 LTD 全电路数值计算模型，快速准确计算 LTD 输出性能(电流、电压、功率等)，研究气体开关导通特性、磁芯状态、脉冲传输叠加、负载耦合等因素对脉冲源输出特性的影响，是 LTD 设计优化不可或缺的关键环节[5-6]。

在 LTD 电路模拟方面，美国圣地亚国家实验室、俄罗斯大电流研究所、法国原子能协会等基于传输线编码(transmission line code，TL-code)方法[7]、电路仿真代码 SCREAMER[8]和 BERTHA[9]、商用 PSpice 软件[10]等构建了放电支路和 LTD 脉冲源的电路模型[11-12]。国内主要采用 TL-code、PSpice 等

基金资助项目：国家自然科学基金(12275222)；陕西省自然科学基础研究计划(2025JC-JCQN039)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (12275222), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(2025JC-JCQN039).

开展了 LTD 输出特性及影响因素研究[13-16]，也关注了放电支路间的电磁耦合[5]、开关导通时刻分散性[17-18]、开关自放电[19]、磁芯特性[20-21]等，模拟计算结果与实验数据较相符。

对 LTD 电路模型进行瞬态分析时，PSpice 软件将电路的电流电压问题转换为微分方程组，更多地使用迭代法，不可避免产生计算不收敛的问题[22]。项目组开展了基于贝杰龙算法(Bergeron algorithm)的单路 LTD 脉冲源电路模型研究，验证了模型的准确性[23]。贝杰龙算法不用求解微分方程组，不会出现计算不收敛的情况，其基本思想是将传输线和储能元件的瞬态模型离散化，等效为并联的独立电流源和导纳元件[24]，相比将电路元件等效为串联的电压源和电阻元件的 TL-code 方法[25]，在处理电磁耦合电路时具有优势[23-24]。

本文在前期研究基础上，详细给出了基于贝杰龙算法的 LTD 放电支路和单级模块全电路模型建立方法，考虑了气体开关火花通道电阻动态特性、放电支路间电磁耦合、开关触发导通时刻等参数，以西安交通大学和西北核技术研究所联合研制的气体绝缘 MA 单级 LTD 模块[26]为例，结合气体开关火花通道电阻和 LTD 模块放电特性的实验结果对模型进行验证，实现了从放电支路到单级模块的自洽模拟，并计算了 LTD 的电阻损耗和能量传输效率。

1 电路模型

1.1 放电支路

正负充电的 2 个电容器和 1 个气体开关串联组成 LTD 的基本放电单元，称作放电支路[26]。电容器容值确定时，将放电支路连接假负载或者短路，进行支路参数测试，可获得其等效电感和电阻等电气参数。典型的放电支路示意图[27]及其连接负载的等效电路如图 1 所示。C_{brick} 为支路电容，等于 2 个电容器的等效串联电容；L_{brick} 为电容器、连接段以及开关电极结构的等效串联电感；R_{brick} 为支路内阻，为固定值，包括了电容器内阻、连接电阻等；S 为开关，在设置时间导通；L_{switch} 为开关火花通道电感；R_{swich} 为开关火花通道电阻，为一个随时间变化的动态值；L_{load} 为负载电感；R_{load} 为负载电阻。

基于贝杰龙算法[24]，将电容、电感等储能元件离散化，得到的计算电路如图 2 所示，图中 I_{Cbrick}、I_{Lbrick}、I_{Lswtich}、I_{Lload} 为等效电流源，U_{Cbrick}、U_{Lbrick}、U_{Lswtich}、U_{Lload} 为电路各节点电压，U_{load} 的值可由 U_{Lswtich}、U_{Lload} 计算。R_{Cbrick}、R_{Lbrick}、R_{Lswtich}、R_{Lload} 分别为电路中电容电感元件所对应的等值电阻。

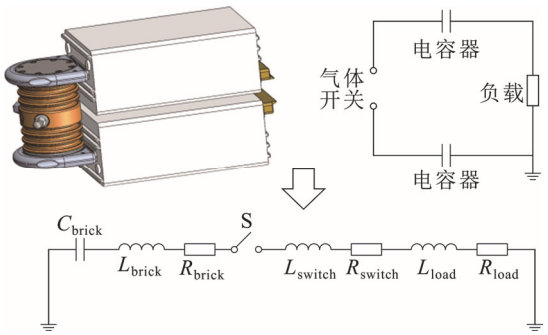


图 1 放电支路连接负载电路

Fig.1 Circuit of the discharge branch connected with load

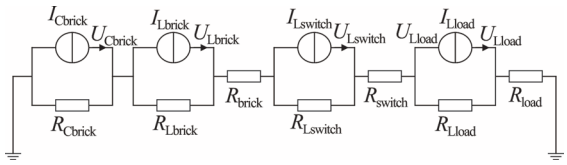


图 2 放电支路的贝杰龙计算电路

Fig.2 Bergeron algorithm equivalent circuit of the discharge branch

列出该电路的节点电压方程：

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{brick}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{brick}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{brick}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{brick}}=\left[U_{\mathrm{Cbrick}}\quad U_{\mathrm{Lbrick}}\quad U_{\mathrm{Lswitch}}\quad U_{\mathrm{load}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{brick}}=\left[I_{\mathrm{Cbrick}}\quad I_{\mathrm{Lbrick}}\quad I_{\mathrm{Lswitch}}\quad I_{\mathrm{load}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{brick}}$ 为电路节点导纳矩阵。以 I_{Cbrick} 和 I_{Lbrick} 为例，其更新方程分别为：

$$I_{\mathrm{Cbrick}}(t)=-2\left(0-U_{\mathrm{Cbrick}}(t)\right)/R_{\mathrm{Cbrick}}-I_{\mathrm{Cbrick}}(t-\Delta t) \tag{4}$$

$$I_{\mathrm{Lbrick}}(t)=2\left(U_{\mathrm{Cbrick}}(t)-U_{\mathrm{Lbrick}}(t)\right)/R_{\mathrm{Lbrick}}+I_{\mathrm{Lbrick}}(t-\Delta t) \tag{5}$$

式中：Δt 为计算时间步长。R_{brick} 初始值为数百吉欧，在开关导通时刻，R_{brick} 阻值设置其为实际值。为简化计算，LTD 电路模型一般将气体开关火花通道电阻简化为固定值，通过短路放电实验测得支路电感和电阻参数[28]，也可将通道电阻由电感近似等效[5]，通过模拟和实验对比获得等效参数。然而，气体开关火花通道电阻对输出脉冲的幅值、前沿有较大影响[29]，为准确反映电阻动态特性对 LTD 放电支路以及模块的影响，需要在 LTD 电路中引入简单准确的电阻模型。

气体开关阻值与导通电流及通流时间密切相关，在放电过程中呈非线性变化。几十年来，研究者建立了多种气体放电火花通道电阻模型，描述了

电火花在电路中作为非线性电阻的复杂物理过程。常用的模型包括 Toepler, Rompe and Weizel, Braginskii 和 Vlastós 等，这些火花通道电阻模型有一个通用的形式[30]，即：

$$R(t) \propto \left(\int_0^t i^m(\tau) \mathrm{d}\tau \right)^{-1/p} \tag{6}$$

式中：m 和 p 为正实指数；$i(\tau)$为时刻 τ 通过开关间隙的电流。常数项与间隙距离、气体密度或压强等因素有关。对于考虑了火化通道电阻动态过程的 LTD 气体开关电路模型，一般采用 Rompe and Weizel 或 Braginskii 模型，常数项直接采用理论模型公式计算[17,31]。实际上，公式计算结果与其电阻实际值无法完全吻合，应对常数项进行修正[32]。基于实验测量结果，通过模型计算拟合，获得常数项的准确值。在求解贝杰龙算法电路时，根据通过开关火花通道电阻 R_{switch} 的电流，利用公式更新下一步该电阻的值，从而实现气体开关火花通道电阻的动态变化。

1.2 单级 LTD 模型

单级模块作为 LTD 脉冲源“多级串联、多路并联”的基本单元，由 N 个放电支路并联。单级 LTD 模块驱动负载的电路如图 3 所示，主要由放电支路、磁芯支路和负载 3 部分构成。放电支路中，$C_{\mathrm{b}1}$—$C_{\mathrm{b}N}$ 为各支路等效电容，$L_{\mathrm{b}1}$—$L_{\mathrm{b}N}$ 分别为各支路等效电感，$R_{\mathrm{b}1}$—$R_{\mathrm{b}N}$ 分别为各支路等效电阻。针对 LTD 正常工况的输出特性，电路模型磁芯回路中的励磁电流相比主电流占比非常小，因此可将磁芯等效为并联的损耗电阻和电感来处理[26]，R_{core} 为等效磁芯损耗电阻，L_{core} 为磁芯电感。负载等效为电感 L_{load} 和电阻 R_{load} 串联。

电容、电感元件离散化后的贝杰龙计算电路见图 4，可列写节点电压方程组进行计算。图 4 中，$I_{\mathrm{Cb}1}$—$I_{\mathrm{Cb}N}$、$I_{\mathrm{Lb}1}$—$I_{\mathrm{Lb}N}$、I_{Lcore} 和 I_{Lload} 分别为放电支路电容、电感、磁芯支路电感和负载电感的等效电流源，$U_{\mathrm{Cb}1}$—$U_{\mathrm{Cb}N}$、$U_{\mathrm{Lb}1}$—$U_{\mathrm{Lb}N}$、U_{Lload} 和 U_{load} 为电路各节点电压，$R_{\mathrm{Cb}1}$—$R_{\mathrm{Cb}N}$、$R_{\mathrm{Lb}1}$—$R_{\mathrm{Lb}N}$、R_{Lcore}、R_{Lload} 分别为电路中电容、电感等元件所对应的等值电阻。

LTD 模块放电时，支路之间处于强耦合状态，放电参数相比单支路时会发生变化，进而影响 LTD 模块的输出性能。研究表明，LTD 模块中支路之间互感约占支路电感的 13%，不可忽略[33]。根据电磁感应原理，支路 2 的电流在支路 1 产生感应电压，在对支路 1 列写节点电压电流方程时，须增加支路 2 的互感和电流对其的贡献[24]。

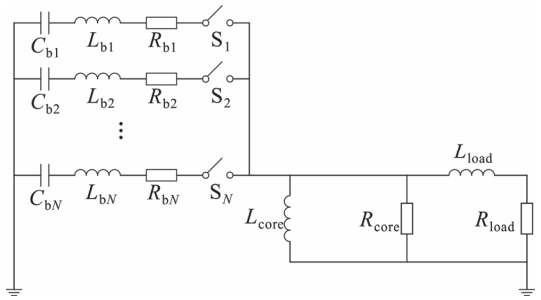


图 3 单级 LTD 电路

Fig.3 Circuit of the single-stage LTD cavity

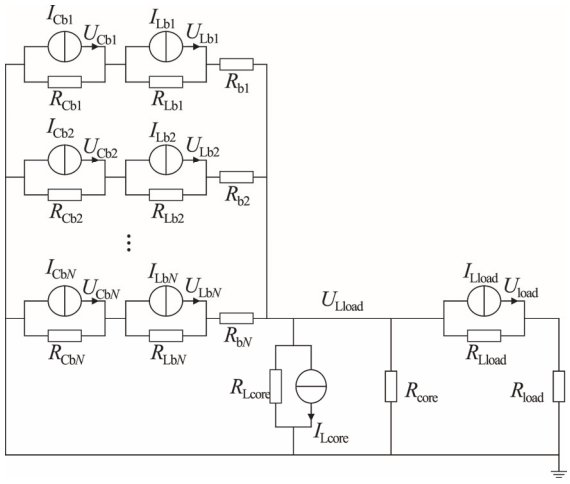


图 4 单级 LTD 的贝杰龙计算电路

Fig.4 Bergeron algorithm equivalent circuit of the single-stage LTD cavity

将图 3 电路中 LTD 放电支路的电容、电感、电阻按矩阵表示，即：

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{cavity}} = \begin{bmatrix} C_{\mathrm{b}1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_{\mathrm{b}2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_{\mathrm{b}N} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{cavity}} = \begin{bmatrix} L_{\mathrm{b}1} & M_{\mathrm{b}12} & M_{\mathrm{b}13} & \cdots & M_{\mathrm{b}1N} \\ M_{\mathrm{b}21} & L_{\mathrm{b}2} & M_{\mathrm{b}23} & \cdots & M_{\mathrm{b}2N} \\ M_{\mathrm{b}31} & M_{\mathrm{b}32} & L_{\mathrm{b}3} & \cdots & M_{\mathrm{b}3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{\mathrm{b}N1} & M_{\mathrm{b}N2} & M_{\mathrm{b}N3} & \cdots & L_{\mathrm{b}N} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{cavity}} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{b}1} & R_{\mathrm{b}2} & \cdots & R_{\mathrm{b}N} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{\mathrm{cavity}}$ 为模块电容矩阵；$\boldsymbol{L}_{\mathrm{cavity}}$ 为模块电感矩阵；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{cavity}}$ 为模块电阻向量。与无支路电感耦合电路对比，具有支路电感耦合的电感矩阵由对角矩阵变成满阵，非对角元素则是其他放电支路耦合的贡献，即 $M_{\mathrm{b}12}$ 为第 1 个支路与第 2 个支路间的互感，依次

类推。将图 4 中各支路相同位置的电压电流按列向量表示，可得到如图 5 所示的计算电路。

节点电压和等效电流源分别为：

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{C}}=\left[U_{\mathrm{Cb1}}\quad U_{\mathrm{Cb2}}\quad\cdots\quad U_{\mathrm{Cb}N}\right]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}=\left[U_{\mathrm{Lb1}}\quad U_{\mathrm{Lb2}}\quad\cdots\quad U_{\mathrm{Lb}N}\right]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{C}}=\left[I_{\mathrm{Cb1}}\quad I_{\mathrm{Cb2}}\quad\cdots\quad I_{\mathrm{Cb}N}\right]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\left[I_{\mathrm{Lb1}}\quad I_{\mathrm{Lb2}}\quad\cdots\quad I_{\mathrm{Lb}N}\right]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

电容和电感矩阵的等值电阻分别为：

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{C}}=\Delta t/(2\boldsymbol{C}_{\mathrm{cavity}}^{-1}) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{L}}=2\boldsymbol{L}_{\mathrm{cavity}}/\Delta t \tag{15}$$

由此列出该电路的节点电压方程进行求解，即：

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{cavity}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{cavity}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{cavity}} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{cavity}}=\left[\boldsymbol{U}_{\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}{}^{\mathrm{T}}\quad U_{\mathrm{Lload}}\quad U_{\mathrm{load}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{cavity}}=\left[\boldsymbol{I}_{\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}{}^{\mathrm{T}}\quad I_{\mathrm{Lcore}}\quad I_{\mathrm{Lload}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

在单级 LTD 中，开关触发导通时间存在抖动，设置每个开关导通时刻为满足均值 t_{delay} 和方差 t_{jitter} 的正态分布随机数，以模拟主支路开关放电分散性对 LTD 输出特性的影响。也可根据实验中测得放电支路电流波形，获得开关实际的导通时刻代入模型，计算模块的输出参数。

2 实验验证

2.1 放电支路实验

由 1 个气体开关和 2 个 100 nF 电容器组成放电支路，结合实验测试与模拟仿真，确定气体开关火花通道电阻参数。气体开关为四间隙串联结构[34]，每个间隙距离为 6 mm。实验布局如图 6 所示，在变压器油中开展实验。放电支路串联氯化铵水电阻假负载，调节电阻率使负载电阻与支路阻抗近似匹配，负载溶液保持循环以保证阻值稳定。支路与假负载间有一段连接导线，用于放置 Pearson 线圈以测量回路电流。2 个北极星探头 PVM-5 分别测量开关正负电极电压，二者测量数据相减即为开关两端电压。

开关工作电压为±60 kV，气压分别为 0.31、0.27、0.23 MPa，相对应的工作系数分别为 60%、65%、70%，耐压 3 s 后触发导通，如图 7(a)、(b)所示为各气压下 2 发实验测得支路电流和开关两端电压。可见，改变气压对输出波形基本无影响。

根据 2.2 节所述放电支路模型，计算获得电阻模型(见式(4))中的常数项。电容 C_{brick}=50 nF，电感

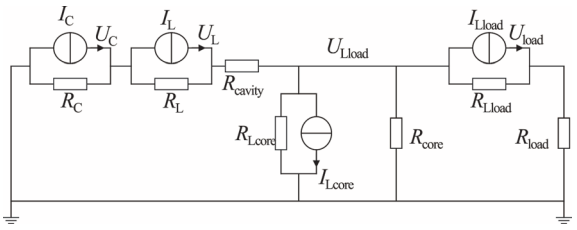


图 5 以矩阵计算的单级 LTD 贝杰龙计算电路

Fig.5 Bergeron algorithm equivalent circuit of the single-stage LTD cavity based on matrix calculation

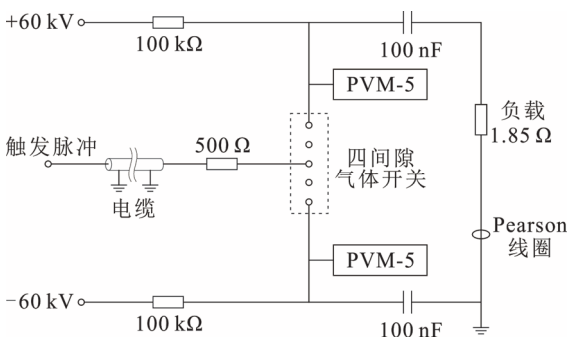


图 6 放电支路实验布局

Fig.6 Experimental layout of the discharge branch

L_{brick}=142 nH，内阻 R_{brick}=0.25 Ω，负载电感 L_{load}=60 nH，负载电阻 R_{load}=1.85 Ω。

气体开关火花通道的直径随放电电流变化而变化，但通常很细(10^{-4} m 量级)，它相对于回流电极的距离而言小得多，因此开关火花通道电感 L_{switch} 的值可利用高频导线或者同轴线电感的计算方法近似[35]，即：

$$L_{\mathrm{switch}}=14d=33.6\ \mathrm{nH} \tag{19}$$

式中：d 为开关间隙距离，即 2.4 cm。忽略多通道放电对电阻和电感的影响。

开关两端电压 U_{switch} 的初始值实验测得为 123 kV，在电路中的计算式[36]为：

$$U_{\mathrm{switch}}=L_{\mathrm{switch}}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{switch}}I \tag{20}$$

R_{switch} 分别采用 Rompe-Weizel 模型[37]和 Braginskii 模型[38]计算，即：

$$R_{\mathrm{switch}}(t)=\frac{A_{\mathrm{Rompe\text{-}Weizel}}}{\left(\int_0^t i^2(\tau)\mathrm{d}\tau\right)^{1/2}} \tag{21}$$

$$R_{\mathrm{switch}}(t)=\frac{A_{\mathrm{Braginskii}}}{\int_0^t i^{2/3}(\tau)\mathrm{d}\tau} \tag{22}$$

式中：$A_{\mathrm{Rompe\text{-}Weizel}}$ 和 $A_{\mathrm{Braginskii}}$ 分别为常数项，当取值分别为 1.6 和 0.000 015 时，采用 2 个电阻公式的电路

模型计算所得支路电流、开关两端电压和开关火花通道电阻波形与实验结果相符，如图 7 所示。开关导通时，火花通道电阻由百吉欧快速下降，降到 1 Ω 以下需要 50~70 ns，与文献[39]基于光谱分析的测量结果基本一致。回路电流上升时间(0~100%)为 150 ns，在电流峰值时火花通道阻值约为 0.2 Ω。

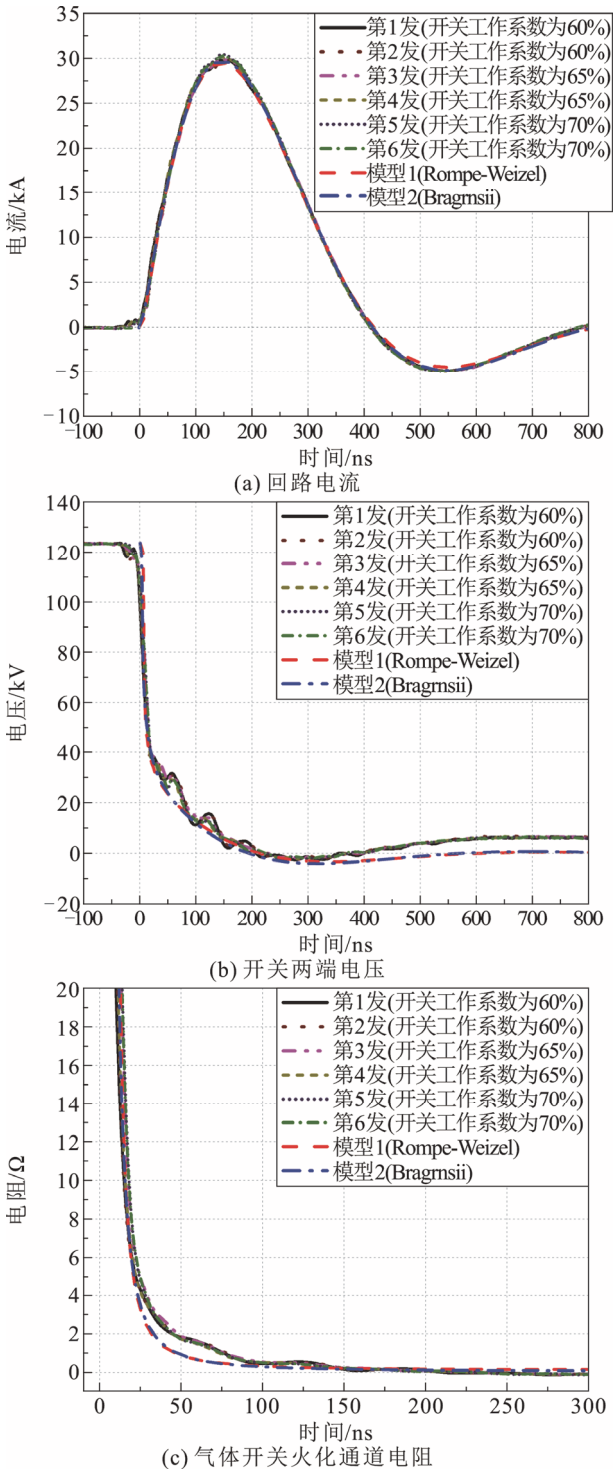


图 7 支路实验结果与模拟仿真对比

Fig.7 Discharge branch experimental results compared with simulation

2.2 单级 LTD 模块实验

气体绝缘 MA 单级 LTD 模块去掉上绝缘板和盖板的示意图如图 8 所示[26]，24 个放电支路沿圆周轮辐状布置，包括了 23 个主放电支路和 1 个触发支路。模块直径 Φ=2 290 mm，高度为 346 mm，初级腔体采用 SF_6 气体绝缘。

主放电支路为 2.1 节所测试的放电支路，编号从 1—23，认为各支路的电路参数一致，即对应于单级 LTD 模型中元件参数为：

$$C_{b1}=C_{b2}=\cdots=C_{bN}=C_{brick}=50\ \text{nF} \tag{23}$$

$$L_{b1}=L_{b2}=\cdots=L_{bN}=L_{brick}+L_{switch}=175.6\ \text{nH} \tag{24}$$

$$R_{b1}=R_{b2}=\cdots=R_{bN}=R_{brick}=0.25\ \Omega \tag{25}$$

实验研究表明，模块中其他支路对单支路的总互感约为 22.5 nH[31]。文献[40]计算了模块不同位置支路对单支路的互感与总互感的占比，表 1 以 1 号支路为例，计算了其余支路与该支路的互感，当某支路与 1 号支路夹角>90°时，认为其与 1 号支路的互感为 0。由此得到了模块电感矩阵 $\boldsymbol{L}_{cavity}$。

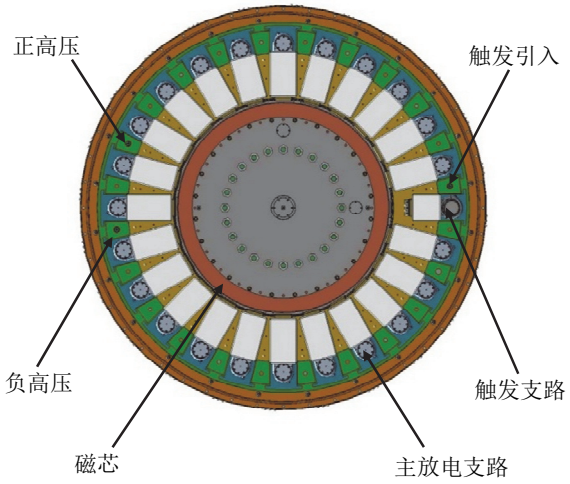


图 8 MA 级气体绝缘单级 LTD 模块示意图

Fig.8 Gas-insulated mega-ampere-class LTD cavity

表 1 模块中各支路与 1 号支路的互感相关参数

Table 1 Mutual inductance parameters of each branch with No.1 brick in the LTD cavity

互感名称	两支路夹角/(°)	支路间隔数	占互感总和之比/%	互感计算值/nH
M_{b12}	15	0	39.0	8.8
M_{b13}	30	1	7.1	1.6
M_{b14}	45	2	2.3	0.5
M_{b15}	60	3	0.9	0.2
M_{b16}	75	4	0.4	0.1
M_{b17}	90	5	0.2	0.05

单级 LTD 模型中，磁芯励磁电感 L_{core}=10 μH，损耗电阻 R_{core}=45 Ω[26]。负载为氯化铵水溶液假负载，参数为 L_{load}=6.7 nH[26]，R_{load}=0.087 Ω。

LTD 模块负载电流由 Rogowski 自积分电流线圈测量，负载电压由位于负载中心的电阻分压器测量[26]。模块中各支路开关的绝缘外壳对应中间接地电极位置，装配了 B-dot 探头以监测支路放电电流[33]。由于探头的灵敏度取决于其与开关内部放电电弧的轴向相对位置，而气体开关击穿放电时，火花通道在环形电极上的位置具有随机性，导致该探头的灵敏度无法准确标定。因此，B-dot 探头主要用于判断开关闭合时刻以及电流波形的前沿、脉宽等特征。

如文献[34]所述，该单级 LTD 模块充电为 ±80 kV，工作系数为 65%，每工作 3 发后对磁芯进行反向磁化使其充分复位，简称去磁。模块连续运行 303 发，正常发次共 299 发，其中，模块去磁后第 1 发正常触发 100 发，去磁后第 2 发正常触发 99 发，去磁后第 3 发正常触发 100 发。开关自放次数为 4 次，其中 1 次为去磁后第 1 发主支路气体开关充电完成耐压过程中发生自放。模块去磁后第 2 发和第 3 发正常触发时，磁芯饱和使其等效电感增大，导致模块输出电流峰值较低，故选取模块去磁后正常触发的典型发次实验波形，根据 B-dot 所测得支路电流获得开关导通时刻，开关火花通道电阻分别采用 Rompe-Weizel 模型和 Braginskii 模型，验证本文建立的单级 LTD 电路模型的准确性。

2.2.1 开关同步放电

第 13 发，模块去磁后正常触发，图 9 给出了负载电流和负载电压的实验波形和模拟波形的对比。实验波形未作滤波处理，具有高频振荡是脉冲放电时腔体中的电容、电感等寄生参数的影响，电路模型对这部分进行简化。可见，采用本文的贝杰龙计算模型，2 种开关电阻模型获得的电流和电压波形基本相符，与实验结果的主脉冲(正半周)一致性较好，峰值、前沿、脉宽等波形特征偏差小于 5%，其差异主要体现在放电电流的负半周，这主要由磁芯状态和损耗引起，在此暂不做讨论。电流峰值为 765 kA，电压峰值为 67 kV，前沿约为 112 ns。

图 10 给出了各个放电支路电流实验波形和模拟波形。由于 B-dot 的灵敏度未进行标定，因此根据模拟结果对支路电流幅值进行归一化，采用 Braginskii 电阻模型计算了支路电流，23 只开关导通时刻分散性为 16 ns。各个放电支路模拟和实验波形基本相符。开关导通时刻相对晚的放电支路由于受互感影响，电流前沿更快，电流峰值更高。

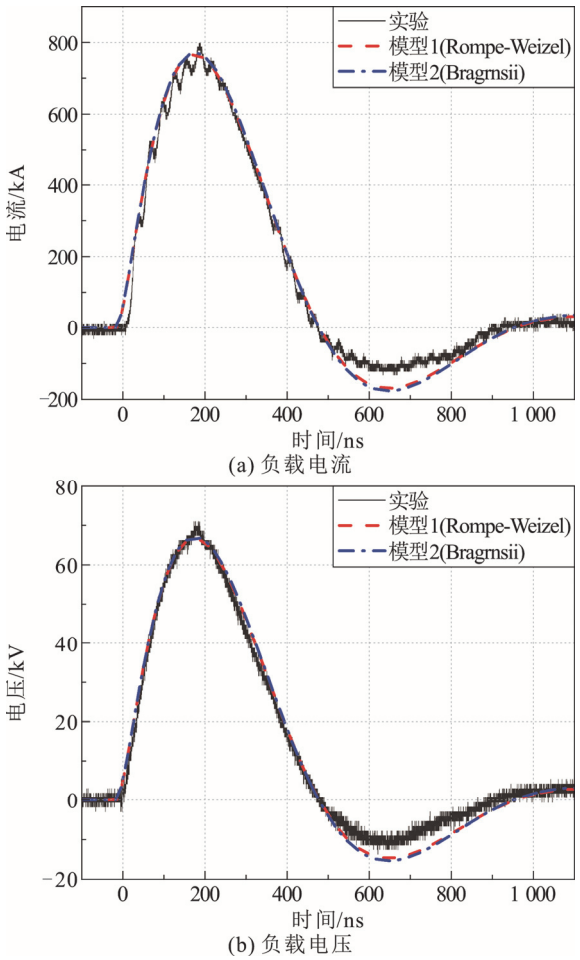


图 9 第 13 发模块实验结果与模拟仿真对比

Fig.9 LTD cavity experimental results of shot-13 compared with simulation

2.2.2 开关不同步放电

第 43 发，模块去磁后正常触发，其中，5 号和 22 号 2 个开关未同步，负载电流和电压实验波形与模型计算结果对比如图 11 所示。正半周较相符。电流峰值为 740 kA，电压峰值为 63 kV，相比第 13 发低了 3%和 6%，前沿约为 112 ns。

图 12 分别给出了各个放电支路电流实验波形和模拟波形。5 号和 22 号开关分别滞后约 200 ns 和 270 ns。文献[33]对此状态进行了分析，若某支路开关放电不同步(其他支路同步)，则当其他支路电流过零时，不同步支路因互感获得反向最大磁通变化率，产生负互感电压，与源电压抵消。这样会减小该支路等效电感，折算到 *RLC* 等效电路的回路阻抗变小，导致其电流振荡，振荡频率甚至比某支

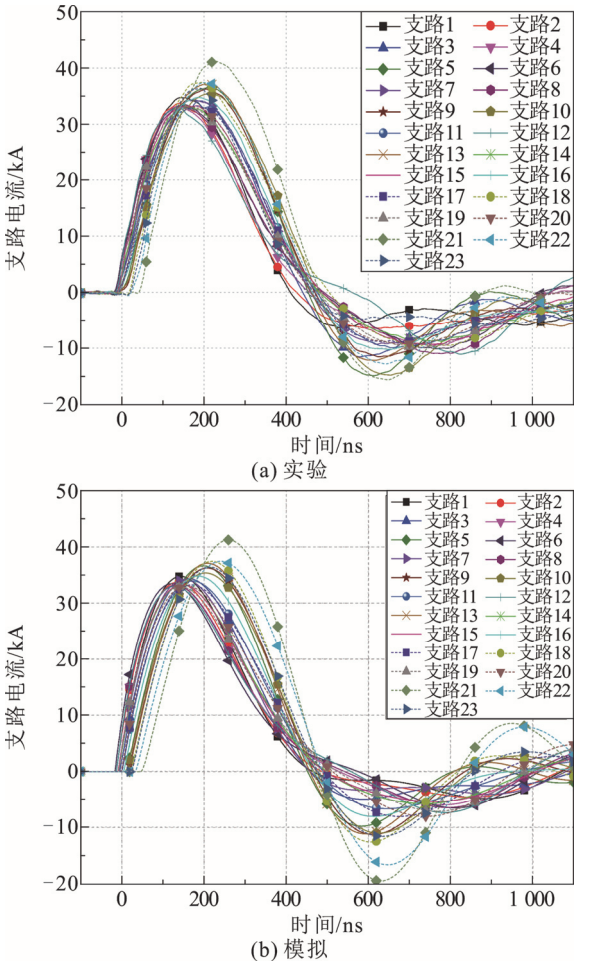


图 10 第 13 发模块实验各支路电流波形

Fig.10 Current waveform of each brick in shot-13

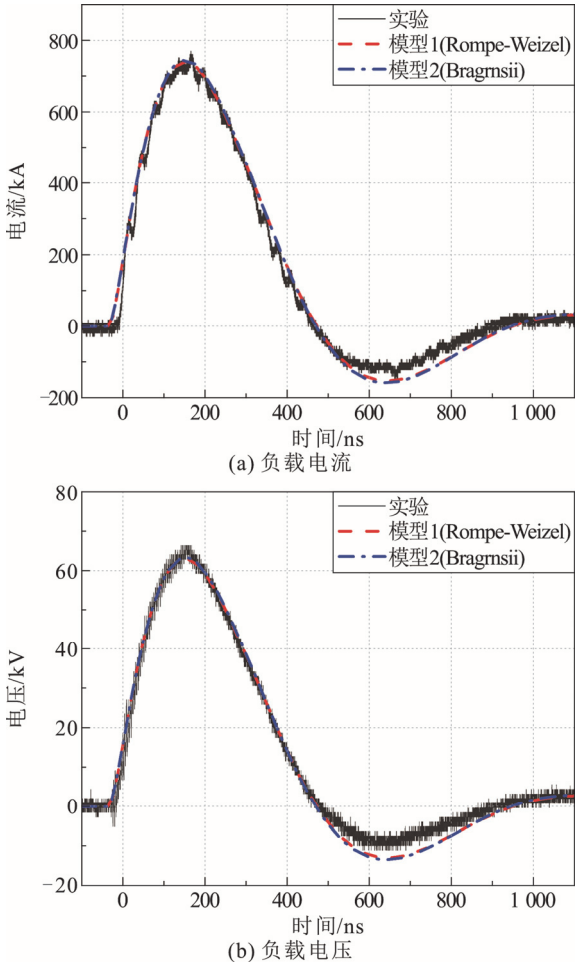


图 11 第 43 发模块实验结果与模拟仿真对比

Fig.11 LTD cavity experimental results of shot-43 compared with simulation

路自放电时更快，振荡电流峰值也比自放电时高。本文模型能够较好地反映这个状态，模拟获得的各个支路放电波形的振荡周期均能够与实验较相符。

此外，5 号和 22 号支路在导通前，实验测量有反向电流，这是由于开关 B-dot 探头处于 LTD 模块腔体内，不仅感应支路电流的磁场，也会感应到 LTD 腔体表面流过的初级电流的磁场。LTD 模块正常工作情况下磁芯泄漏电流较小，B-dot 离腔体壁距离较远，因此泄漏电流在 B-dot 上感应电压几乎可以忽略。当某开关导通滞后较多时，B-dot 首先感应到的是其余开关导通后的 LTD 模块腔体壁流过的初级电流，与该开关内的电流方向相反。

2.2.3 开关自放电

第 226 发，模块去磁后加电，第 23 号开关在耐压时自放电，测得该支路电流波形。在模型中，设置其余 22 个开关导通时刻远大于该自放开关，模拟计算支路放电电流，模拟波形与实测波形较相符，如图 13 所示。因负载电阻相比单支路匹配电阻小得多，因此当支路开关发生自击穿时，放电电流呈短路振荡。电流峰值约为 70 kA。

2.3 单级 LTD 模块输出特性

进行了单级模块在±100 kV 下输出特性测试，每发去磁，开关工作系数为 65%，气压为 0.53 MPa，假负载阻值仍为 0.087 Ω。典型发次的输出波形和模型计算结果如图 14 所示。开关导通时刻分散性为 8 ns，电流峰值为 975 kA，电压峰值为 84 kV，前沿约为 110 ns。

模块充电±100 kV 时，总储能 E_{cavity} 的计算式为：

$$E_{\text{cavity}} = 0.5NC_{\text{brick}}U_{\text{switch}}^2 = 0.5\times23\times50\times10^{-9}\times\left(200\times10^3\right)^2\ \text{J} = 23\ \text{kJ} \tag{26}$$

根据电路模型，计算了单级模块的输出功率和能量，如图 15 所示。模块输出峰值功率为 82 GW，负载电流脉冲正半周时间为 480 ns，负载能量为

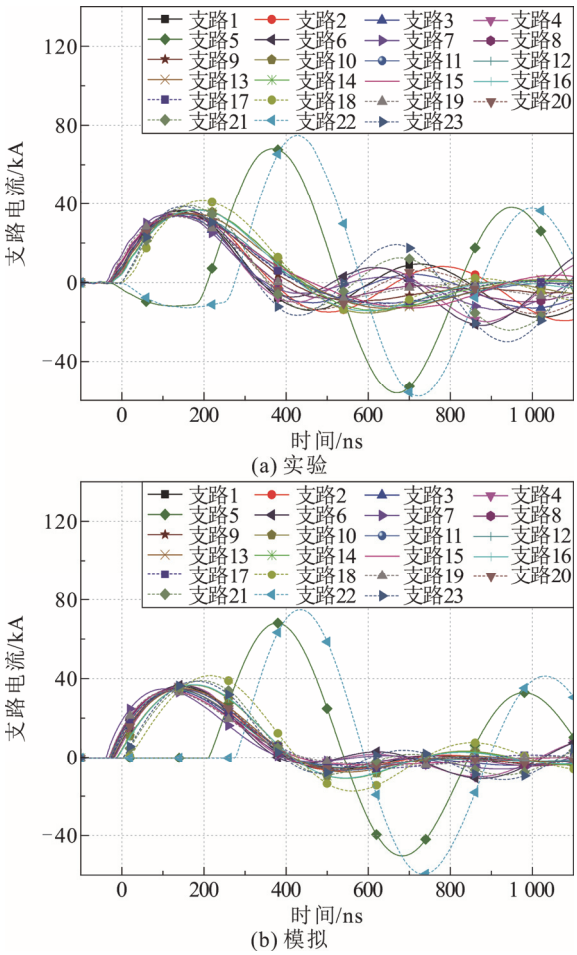


图 12 第 43 发模块实验各支路电流波形

Fig.12 Current waveform of each brick in shot-43

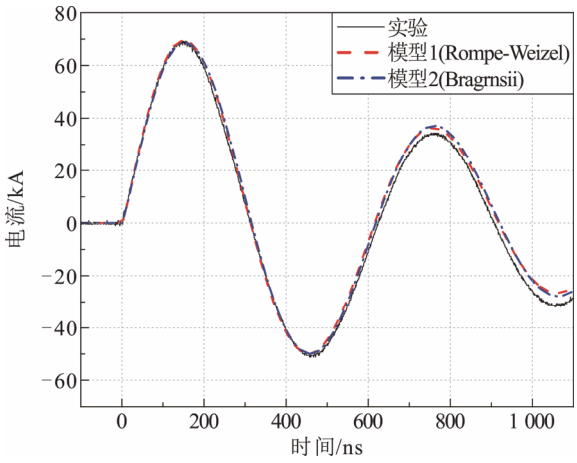


图 13 第 226 发模块实验自放支路电流波形实验与模拟对比

Fig.13 Experimental and simulation comparison of the self-discharge branch current waveform in shot-226

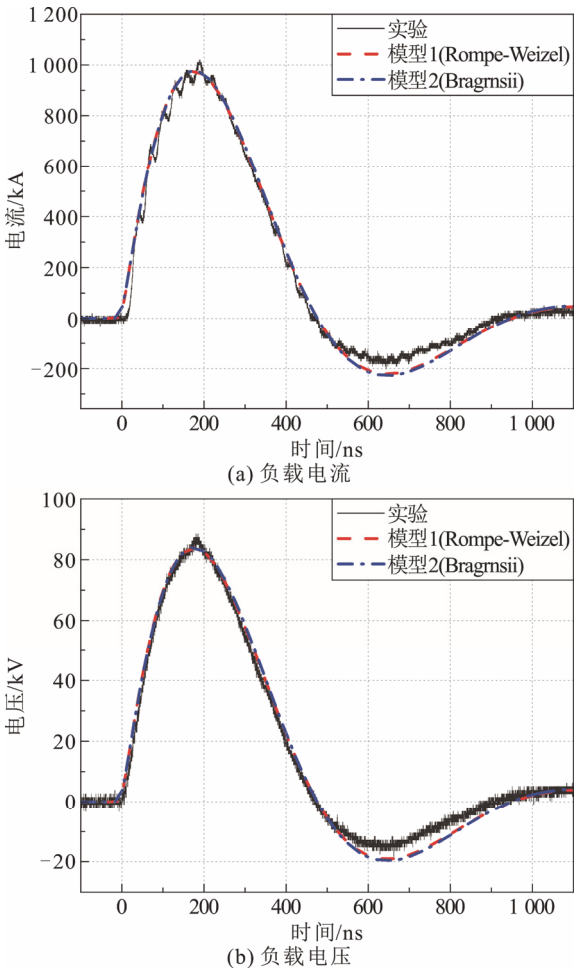


图 14 模块充电±100 kV 典型实验波形与模拟仿真对比

Fig.14 LTD cavity experimental results when charged at ±100 kV compared with simulation

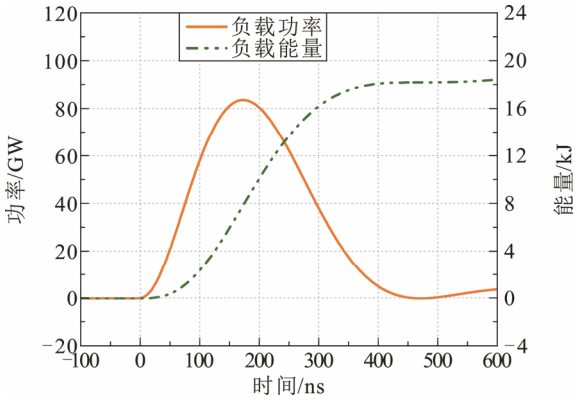


图 15 模块充电±100 kV 时负载功率和能量

Fig.15 Load power and energy when the LTD cavity charged ±100 kV

18.2 kJ。模块各部分在脉冲正半周的能量占比如图 16 所示。负载能量与总储能的占比为 80%，剩余 20%消耗在支路中，其中开关导通电阻消耗约 5.7%。因为假负载与模块阻抗未完全匹配，到 480 ns 时，电容器仍残余能量 5%，其余约 9.3%由支路内阻消耗能量。

在电路模型中，设置假负载阻值为 0.15 Ω，其余参数不变，计算了单级模块的输出功率和能量以及模块各部分在脉冲正半周的能量占比，分别如图

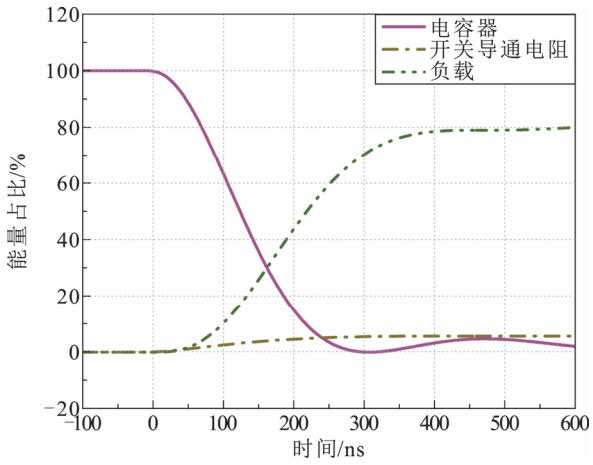


图 16 模块充电±100 kV 时各部分能量占比

Fig.16 Energy ratio of each part when the LTD cavity is charged at ±100 kV

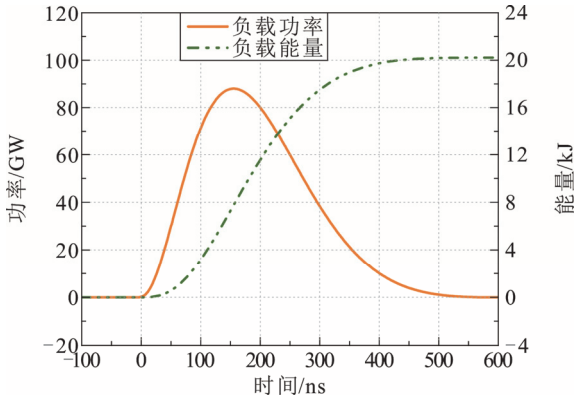


图 17 模块充电±100 kV、阻抗匹配时负载功率和能量

Fig.17 Load power and energy when the LTD cavity is charged at ±100 kV and impedance is matched

17 和图 18 所示。此时，假负载与模块阻抗完全匹配，模块输出功率峰值可达 88 GW，负载能量为 20.2 kJ。开关导通电阻损耗约占 4.4%，支路内阻消耗能量约 7.8%，LTD 模块驱动匹配电阻负载的能量效率约为 87.8%。

3 结论

1）考虑了气体开关火花通道电阻动态特性、放电支路间电磁耦合、开关触发导通时刻的电路模型，可较为精确地预测单级 LTD 输出特性，对于模块开关正常同步放电或异常不同步放电以及开关自放电等状态，仿真结果与实验波形较相符。

2）对常数项进行修正后的 Rompe and Weizel 或 Braginskii 模型均可较为准确地反映气体开关火花通道电阻的动态变化过程。

3）单级 LTD 模块充电±100 kV，输出峰值功率为 82 GW，电阻负载能量效率约为 80%，其中气体开关火花通道电阻能量损耗与总储能的占比为 5.7%。

4）本文模型未考虑磁芯状态对放电电流的负半周的影响，导致模拟与实验出现差异，下一步将在电路中引入精确的磁芯模型，以更为准确地反映 LTD 脉冲源工作过程。

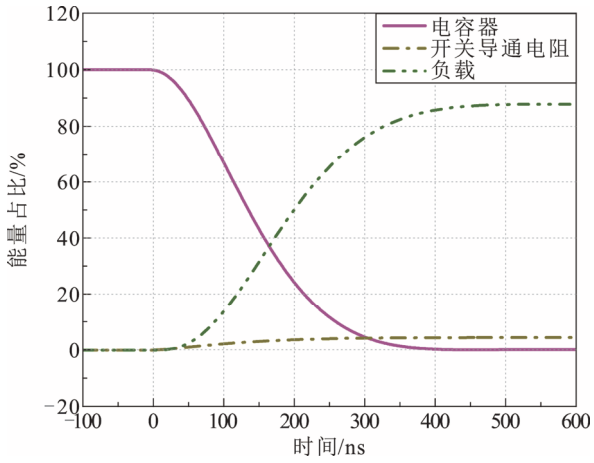


图 18 模块充电±100 kV、阻抗匹配时各部分能量占比

Fig.18 Energy ratio of each part when the LTD cavity is charged at ±100 kV and impedance is matched

参考文献 References

[1] 孙凤举，邱爱慈，魏 浩，等. 快 Z 箍缩百太瓦级脉冲驱动源概念设计的发展[J]. 现代应用物理，2017，8(2)：020102.
SUN Fengju, QIU Aici, WEI Hao, et al. Development of conceptual design on fast Z-pinch pulsed power driver with hundreds of terawatt[J]. Modern Applied Physics, 2017, 8(2): 020102.

[2] 邱爱慈，吴 坚，孙凤举，等. Z 箍缩动力学行为及其直接驱动型脉冲源研究进展[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：7007-7023.
QIU Aici, WU Jian, SUN Fengju, et al. Research progress on Z-pinch dynamics and its direct-driven pulsed power technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7007-7023.

[3] KIM A A, MAZARAKIS M G. The story of the LTD development[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4): 749-756.

[4] 陈 林，王 勐，邹文康，等. 中物院快脉冲直线型变压器驱动源技术研究进展[J]. 高电压技术，2015，41(6)：1798-1806.
CHEN Lin, WANG Meng, ZOU Wenkang, et al. Recent advances in fast linear transformer driver in CAEP[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1798-1806.

[5] 魏 浩，刘 鹏，孙凤举，等. 直线变压器驱动源感应腔电路建模方法[J]. 强激光与粒子束，2012，24(5)：1201-1205.
WEI Hao, LIU Peng, SUN Fengju, et al. Modeling induction cavity used in linear transformer drivers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1201-1205.

[6] 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.

[7] WESELOH W N. Tlcode-a transmission line code for pulsed power design[C]//Proceedings of the 7th Pulsed Power Conference. Monterey, USA: IEEE, 1989: 989-992.

[8] KIEFER M L, WIDNER M M. SCREAMER: a single-line pulsed-power design tool[C]//Proceedings of the 5th IEEE Pulsed Power Conference. Arlington, USA: IEEE, 1985: 685.

[9] HARJES C, ELIZONDO J, STRUVE K, et al. Circuit modeling for ZR[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, USA: IEEE, 2003: 917-920.

[10] KIM A A, KOVALCHUK B M, BASTRIKOV A N, et al. 100 ns current rise time LTD stage[C]//Proceedings of 2001 Pulsed Power Plasma Science, 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas, USA: IEEE, 2001: 1491-1494.

[11] LECKBEE J J, MAENCHEN J E, JOHNSON D L, et al. Design, simulation, and fault analysis of a 6.5-MV LTD for flash X-ray radiography[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(5): 1888-1899.

[12] DOUGLASS J D, HUTSEL B T, LECKBEE J J, et al. 100 GW linear transformer driver cavity: design, simulations, and performance[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2018, 21(12): 120401.

[13] 周 全，李雨泰，王新新，等. Z-800 装置的全电路仿真及优化设计[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2610-2615.
ZHOU Quan, LI Yutai, WANG Xinxin, et al. Full circuit simulation and optimization design for Z-800[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2610-2615.

[14] 龚振洲，魏 浩，范思源，等. 15 MA Z 箍缩装置真空磁绝缘传输线损失电流的电路模拟[J]. 物理学报，2022，71(10)：105202.
GONG Zhenzhou, WEI Hao, FAN Siyuan, et al. Circuit simulation of current loss in magnetically insulated transmission line system in 15-MA Z-pinch driver[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(10): 105202.

[15] 范思源，魏 浩，李鹏超，等. 多路并联直线型变压器驱动源装置的二维电路模型[J]. 西安交通大学学报，2026，60(2)：1-10.
FAN Siyuan, WEI Hao, LI Pengchao, et al. A two-dimensional circuit model for multi-module parallel linear-transformer-driver accelerators[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60(2): 1-10.

[16] LIU P, SUN F J, YIN J H, et al. Effect of cavity-triggering sequences on output parameters of LTD-based drivers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(5): 1247-1253.

[17] CHEN L, LIU Y B, WANG Z G, et al. Numerical study on key factors affecting synchronization of multiple spark-gap switches in single-stage LTD[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(2): 507-514.

[18] LIU P, SUN F J, WEI H, et al. Influences of switching jitter on the operational performances of linear transformer drivers-based drivers[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(4): 347-352.

[19] HE X, SUN F J, JIANG X F, et al. Characteristics of switch prefire generated fault voltages transmitted in a four-stage LTD module[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(6): 1904-1911.

[20] WEI Z Y, RAO X N, HE X, et al. Circuit simulation with nonlinear magnetic core of a new linear transformer driver stage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 4084-4090.

[21] 万臻博，丁卫东，孙凤举. 直线变压器驱动源磁芯磁化过程的仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1792-1800.
WAN Zhenbo, DING Weidong, SUN Fengju. Simulation research on magnetization processes of magnetic cores in linear transformer driver[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1792-1800.

[22] 吴少琴，宋 宁. PSpice 仿真中收敛问题研究[J]. 现代电子技术，2008，31(20)：24-26.
WU Shaoqin, SONG Ning. Investigation in PSpice convergence problem[J]. Modern Electronics Technique, 2008, 31(20): 24-26.

[23] 降宏瑜，姜晓峰，王志国，等. 单路 LTD 脉冲源触发时序优化方法[J]. 高电压技术，2025，51(12)：6085-6093.
JIANG Hongyu, JIANG Xiaofeng, WANG Zhiguo, et al. Trigger timing optimization method of single-module LTD pulsed source[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(12): 6085-6093.

[24] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京：清华大学出版社，2015：106-166.
HE Jinliang. Theory and methods for time and frequency domain electromagnetic transient analysis[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2015: 106-166.

[25] 宋盛义，仇 旭. TLCODE 模拟方法介绍[J]. 强激光与粒子束，2005，17(4)：614-618.
SONG Shengyi, QIU Xu. Introduction to TLCODE simulation method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 614-618.

[26] JIANG X F, SUN F J, WANG Z G, et al. A gas-insulated mega-ampere-class linear transformer driver with pluggable bricks[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(12): 123303.

[27] 孙凤举，邱爱慈，姜晓峰，等. 基于共用腔体与内置触发的 12 级串联太瓦级 LTD 脉冲源[J]. 现代应用物理，2022，13(4)：040404.
SUN Fengju, QIU Aici, JIANG Xiaofeng, et al. Twelve-stage linear transformer driver with one terra-watts power on a sharing common cavity shell and internal in-situ triggering method[J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(4): 040404.

[28] JIANG H Y, JIANG X F, SUN F J, et al. Design and experiment analysis of a low inductance three-electrode field-distortion gas switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 4114-4120.

[29] 彭建昌. 开关火花电阻对脉冲前沿的影响[J]. 强激光与粒子束，2011，23(11)：2881-2884.
PENG Jianchang. Influence of spark resistance on output pulse front edge of gas switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 2881-2884.

[30] ROSE J W, COFFEY M W, FLAMMER P D, et al. Nonlinear spark resistance and capacitive circuit models of electrostatic discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2): 462-470.

[31] WEN Z M, WANG Z G, LIU Y B, et al. Study on multichannel discharge characteristics of multigap gas switch gaps[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(11): 3348-3357.

[32] 孙 旭，苏建仓，张喜波，等. 气体火花开关电阻特性[J]. 强激光与粒子束，2012，24(4)：843-846.
SUN Xu, SU Jiancang, ZHANG Xibo, et al. Resistance properties of gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 843-846.

[33] 姜晓峰，孙凤举，王志国，等. 兆安级直线变压器驱动源中气体开关闭合分散性的实验研究[J]. 现代应用物理，2022，13(4)：040405.
JIANG Xiaofeng, SUN Fengju, WANG Zhiguo, et al. Close dispersion of gas switch in the driving source of mega ampere linear transformer[J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(4): 040405.

[34] 降宏瑜，姜晓峰，王志国，等. LTD 多间隙气体开关电场优化及自放率实验研究[J]. 现代应用物理，2022，13(4)：040410.
JIANG Hongyu, JIANG Xiaofeng, WANG Zhiguo, et al. Electric field optimization and pre-fire rate of LTD multi-gap gas switch[J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(4): 040410.

[35] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安：陕西科学技术出版社，

2003：26.
ZENG Zhengzhong. Introduction to practical pulsed power technology[M]. Xi’an, China: Shaanxi Science and Technology Press, 2003: 26.

[36] WOODWORTH J R, ALEXANDER J A, GRUNER F R, et al. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2009, 12(6): 060401.

[37] ROMPE R, WEIZEL W. Über das toeplersche funkengesetz[J]. Zeitschrift für Physik, 1944, 122(9): 636-639.

[38] BRAGINSKII S I. Theory of the development of a spark channel[J]. Soviet Physics-JETP, 1958, 34(6): 1068-1074.

[39] 李晓昂，李志兵，张乔根，等. 气体间隙放电火花电阻的光谱诊断[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1390-1395.
LI Xiao’ang, LI Zhibing, ZHANG Qiaogen, et al. Spectroscopic diagnostics on spark resistance of gas discharge[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1390-1395.

[40] 姜晓峰. LTD 高功率支路放电特性及其对单级模块特性影响研究[D]. 西安：西安交通大学，2023.
JIANG Xiaofeng. Research on discharge characteristics of high power brick in LTD and its influence on single-stage LTD characteristics[D]. Xi’an, China: Xi’an Jiaotong University, 2023.



降宏瑜
1992—，男，博士生，助理研究员
主要从事高功率气体开关、直线型变压器驱动源方面的研究工作
E-mail: jianghongyu@nint.ac.cn

JIANG Hongyu
Ph.D. candidate



孙凤举(通信作者)
1967—，男，博士，研究员
主要从事直线型变压器驱动源、感应电压叠加器等脉冲功率加速器方面的研究工作
E-mail: sunfengju@nint.ac.cn

SUN Fengju
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-09-15 修回日期 2026-02-02 编辑 曾文君