

脉冲功率驱动器与Z箍缩负载耦合的全电路数值模拟*

薛创 丁宁[†] 孙顺凯 肖德龙 张扬 黄俊 宁成 束小建

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2013年9月28日收到; 2014年1月29日收到修改稿)

为了研究电磁能量从脉冲功率驱动器到Z箍缩负载的传输与转化过程, 采用电路模型描述驱动器关键部件的充放电过程, 采用辐射磁流体模型描述负载的动力学过程并获取动态电感和动态电阻参数, 建立了驱动器与负载耦合的全电路数值模拟程序. 将该程序应用于“强光一号”装置, 研究表明, 模拟获得的驱动器电压波形、负载电流波形与实验结果符合较好, 各段水介质传输线上电磁脉冲宽度逐级压缩, 功率逐级放大. 在典型的钨丝阵Z箍缩辐射源物理实验条件下, 当初级储能电容器充电35 kV时, 中储电容处的电磁功率(峰值)为0.23 TW, 上升时间(10%—90%)为550 ns, 形成线处的电磁功率为0.80 TW, 上升时间为160 ns, 水介质传输线末端的电磁功率为1.46 TW, 上升时间为45 ns. 负载电流为1.5 MA, 产生的X射线辐射功率为0.58 TW.

关键词: Z箍缩, 脉冲功率驱动器, 电路模拟, 磁流体动力学

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 52.30.Cv, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.63.125207

1 引言

Z箍缩是由脉冲功率驱动器对负载提供大电流和强磁场, 使负载等离子体在洛仑兹力作用下向对称轴聚心内爆的物理过程^[1,2]. 它具有能量利用效率高的特点, 在强X射线辐射源、惯性约束聚变等方面有重要应用^[3]. 20世纪90年代以来, 伴随着脉冲功率技术的迅速发展和高功率、大电流驱动器的应用, 以金属丝阵为负载的Z箍缩X射线辐射源技术取得突破. 在美国圣地亚实验室的Z装置上, 负载电流为20 MA时, 获得了功率 (280 ± 40) TW, 能量约2 MJ的X射线辐射^[4], 目前升级后的Z装置正在进行磁化套筒惯性约束聚变相关的分解实验^[5]. 国内以“强光一号”^[6]、“阳”^[7]、PPG-I^[8]等驱动器为平台, 开展了大量Z箍缩物理实验研究^[6-12], 获取了丰富的实验数据, 装置运行稳定性、负载制备以及诊断技术也日趋成熟.

Z箍缩物理的一个重要任务是研究电磁能量从驱动器到负载的传输与转化过程. 实验方面, 通过测量驱动器内部不同位置处的电压和电流时间波形^[13], 获取电磁脉冲的传输信息, 通过测量负载等离子体的动力学图像和X射线功率, 研究电磁能向X射线辐射能的转化过程. 理论和数值模拟方面, 人们从电路分析以及辐射磁流体力学等角度建立了模拟研究工具^[14-27]. 通常, 电路模拟是以静态电感或零维模型^[14-16]计算获得的动态电感作为负载, 能够模拟电压、电流和运动轨迹等物理量, 无法获得辐射功率; 磁流体模拟^[22-27]能够细致描述动力学过程和能量转化过程, 获得辐射功率等物理量, 但对电流波形或电压波形等输入条件的实验数据可靠性要求很高, 依赖于实验中的测点位置和测量方法^[11]. 2011年, 邹文康等^[18]介绍了采用PSpice电路软件研究驱动器与负载强耦合特性的工作, 但是电路和负载模型都比较简化, 未考虑负

* 国家自然科学基金(批准号: 10975022, 11275030, 11105017, 11135007, 11305011)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ding_ning@iapcm.ac.cn

载的动态电阻参数,也不能描述电磁脉冲的压缩、传输以及转化为X射线辐射等细致过程. 此前国外Jennings等^[27]已经报道了复杂电路模型与三维磁流体模型耦合模拟的工作,自恰获得或预测负载电流波形,得到的X射线辐射功率波形能够准确重现实验测量结果. 为了深入理解电磁能量的传输与转化过程,提高Z箍缩负载优化设计能力,有必要研究掌握驱动器与Z箍缩负载耦合的全电路模拟方法.

本文介绍全电路数值模拟程序(full circuit model, FCM)及其主要模型和算法,基于“强光一号”装置^[19-21],给出全电路程序FCM与零维模型以及二维三温辐射磁流体程序(MARED)^[25,26]的耦合模拟结果. 自恰计算了Z箍缩负载的电流、动态电路参数和动力学过程,对比了模拟结果与PSpice软件及实验测量结果,分析了功率和能量从驱动器到负载的传输与转化过程.

2 全电路模型、方程和算法

2.1 驱动器的电路模型

脉冲功率驱动器的工作原理是将能量低速存储高速释放,形成特定波形的电磁脉冲.图1给出

了一类典型驱动器的系统结构,即初级储能系统通过开关控制的传输线(包括中间储能系统、脉冲形成系统和传输系统)对负载放电的基本框架.

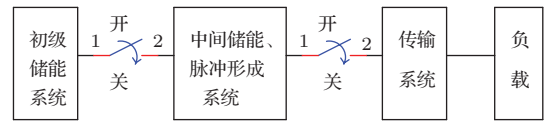


图1 驱动器系统结构示意图

根据驱动器内部电磁脉冲传输的特点,采用实验可测的电压 V 和电流 I 来描述电磁脉冲,把初级储能系统、开关和负载作为集总参数的电路元件,电路参数是电容 C 、电感 L 和电阻 R 等,把传输线作为分布参数的电路元件,电路参数是延迟时间 τ 和阻抗 Z . 系统结构与图1类似的驱动器都可以由这些电路元件串联或并联组合起来,建立全电路模型. 例如,根据文献^[19]提供的驱动器电路模型,结合Z箍缩负载的电路模型,建立描述“强光一号”装置对Z箍缩负载放电过程的全电路模型,如图2所示. 该装置的水介质传输线被两个开关分为三段. 图2中部分电路元件上的箭头表示其电路参数随时间动态变化.

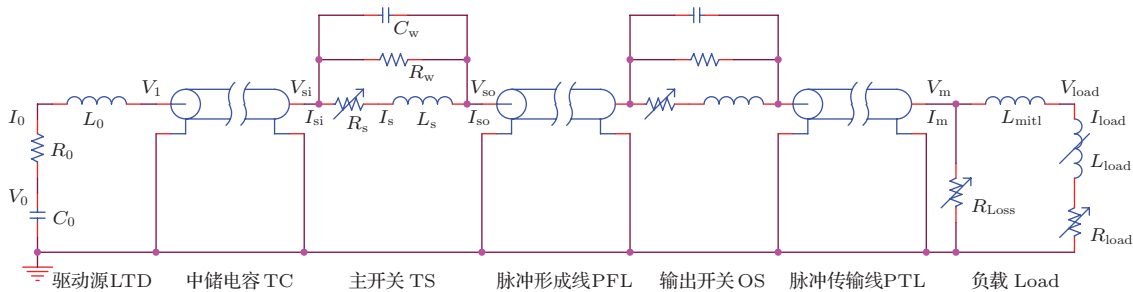


图2 “强光一号”驱动器与Z箍缩负载耦合的全电路模型

2.2 电路方程和算法

初级储能系统的放电过程采用简化电路模型(图2左端部分)描述,其电路方程组为

$$-C_0 \frac{dV_0}{dt} = I_0, \quad (1a)$$

$$V_0 - I_0 R_0 - L_0 \frac{dI_0}{dt} = V_1, \quad (1b)$$

其中 C_0 , R_0 和 L_0 分别表示初级储能系统的等效电容、等效电阻和等效电感; V_0 和 I_0 分别表示初级储能系统的等效储能电压和等效电流; V_1 是初级储能

系统的输出电压.

传输线内部的电压和电流满足电报方程组

$$\frac{\partial V}{\partial z} + rI = -\frac{\partial(LI)}{\partial t}, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} + \frac{V}{R} = -\frac{\partial(CV)}{\partial t}, \quad (2b)$$

其中 $V(z, t)$ 和 $I(z, t)$ 分别是 z 位置处 t 时刻的电压和电流; r , L , R 和 C 分别表示传输线单位长度上的损耗电阻、电感、泄漏电阻和电容. 对于均匀理想传输线,电路参数不随时间和空间变化,损耗和漏电可以忽略. 若传输线被均匀划分为 m 段,则每一段的电感 L_x 和电容 C_x 与延迟时间 τ 和阻抗 Z

之间存在以下依赖关系

$$L_x = Z\tau/m, \quad C_x = \tau/(mZ). \quad (3)$$

对传输线做网格划分并采用向前差分法离散方程(2)的空间变量, 得到常微分方程组

$$V_{x+1} = V_x - \frac{d(L_x I_x)}{dt} - r_x I_x, \quad (4a)$$

$$I_{x+1} = I_x - \frac{d(C_{x+1} V_{x+1})}{dt} - \frac{V_{x+1}}{R_{x+1}}, \quad (4b)$$

其中下标 x 和 $x + 1$ 用于表示空间离散后的节点. 这样的处理实际上是把传输线进一步等效为电感、电容和电阻等集总参数电路元件组成的链式单元, 如图3所示, 节点处的电压和电流满足的方程组(4), 符合基尔霍夫定律. 值得注意的是, 电感和电容组成的链式网络具有低通滤波器的效应, 只有频率小于 $2/\sqrt{L_x C_x} = 2m/\tau$ 的信号才能够无损通过, 为了准确模拟传输线内部的脉冲波形, m 的取值应当有个下限. 经验表明, 对于延迟时间为数十纳秒的传输线, 取 $m \geq \tau/(0.1 \text{ ns})$ 就已足够精确.

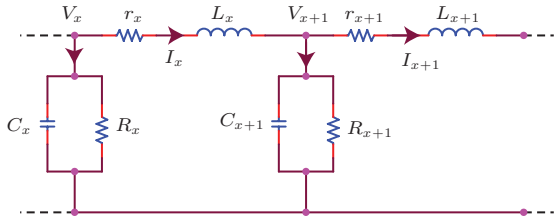


图3 传输线的等效电路单元

开关电路模型(见图2主开关部分)可视为电弧通道与预脉冲通道的并联电路, 电弧通道由电阻 R_s 与电感 L_s 串联, 预脉冲通道由电容 C_w 和漏电阻 R_w 并联. 开关输入端和输出端的电压分别为 V_{si} 和 V_{so} , 电流分别为 I_{si} 和 I_{so} , 通过开关导通电弧的电流为 I_s , 它们满足的电路方程组为

$$V_{si} - V_{so} = R_s I_s + \frac{d(L_s I_s)}{dt}, \quad (5a)$$

$$I_{si} = I_{so} = I_s + \frac{V_{si} - V_{so}}{R_w} + C_w \frac{d(V_{si} - V_{so})}{dt}. \quad (5b)$$

开关的功能通过调节电弧通道的可变电阻实现, 电阻值变化的时机由时间或开关两端的电压控制. 当电阻取值远大于传输线阻抗时, 开关断开, 通过开关电弧通道到达下一级传输线的脉冲强度可忽略;

电阻取值较小时, 电磁脉冲可以从前一级传输线传输至下一级, 即开关处于闭合状态.

通常情况下, 驱动器电路的负载是指连接在传输线末端的部分, 包括绝缘堆、真空区以及丝阵, 而磁流体程序仅限于描述丝阵等离子体, 本文负载也特指丝阵. 图2右端部分采用了可变电阻与丝阵负载支路并联的简化模型^[27]描述真空区的磁绝缘以及漏电效应. 其中 V_M 和 I_M 分别为传输线末端的输出电压和输出电流, L_{mitl} 表示真空区的等效电感, R_{loss} 表示漏电电阻, Z_f 称为流阻抗, L_{load} 和 R_{load} 分别表示负载电感和负载电阻, V_{load} 和 I_{load} 分别表示负载电压和负载电流. 负载电路部分的电压和电流满足如下方程组:

$$V_M = I_{load} R_{load} + \frac{d[(L_{mitl} + L_{load}) I_{load}]}{dt}, \quad (6a)$$

$$I_M = I_{load} + V_M/R_{loss}, \quad (6b)$$

$$R_{loss} = Z_f \sqrt{(I_M + I_{load})/(I_M - I_{load})}. \quad (6c)$$

方程组(1)和(4)–(6)式构成微分/代数混合方程组的初值问题, 除了等效储能电压 V_0 的初始值非零外, 其余电压和电流变量的初值均为0. 本文采用的数值求解办法是逐步代入法, 即在每个时间步, 先将微分方程组的变量代入代数方程组, 解出代数方程组的变量, 然后将这些解出量作为微分方程的已知量求解纯微分方程组, 从而实现循环. 对于纯微分方程组, 采用向后差分的办法离散构造隐格式求解. 编制了包含若干电路元件、采用不同算法的全电路数值模拟程序FCM, 可根据不同的驱动器电路模型选择算法模块和接口程序, 方便与零维程序及一维、二维辐射磁流体程序耦合计算.

全电路模型、方程和算法确定后, 只要给定驱动器各部件的电路参数, 就能模拟获得指定位置的电压和电流波形, 分析电磁能量的传输过程. 一般情况下, 电路参数可以通过实验测量获得, 也可以从结构出发通过电磁场模拟计算获得.

3 驱动器与负载的耦合模拟

3.1 静态电感负载

考虑“强光一号”装置对静态电感负载的放电过程, 采用文献^[19]中提供的电路模型和电路参数. 另外假设充电电压为35 kV, 对应的储能电压初始值为2.1 MV, 两个开关都由时间控制, 闭合时间分别为1400和1650 ns, 水介质传输线末端连接

40 nH的静态电感, 不考虑漏电效应和负载电阻. FCM 程序模拟不同位置处的脉冲波形如图4所示.

由图4可见, 随着放电过程的进行, 储能电压从2.1 MV逐渐减小, 其他位置的电压从0逐渐增大. 中储电容和形成线的电压峰值分别为2.3和2.0 MV, 峰值时刻分别与两个开关的闭合时间相对应. 从中储电容、形成线到水线末端位置, 电压的上升时间(定义为峰值的10%到90%所对应的时间长度)分别为875, 258, 55 ns, 逐级减小. 另外还可以看出, 相同电路模型和参数条件下, FCM程序的模拟结果与PSpice软件的结果符合得很好.

在充电电压和负载参数固定的情况下, 驱动器内部不同位置的电压和电流波形将主要受到开关参数的影响, 特别是电弧通道的等效电路参数每次放电都不尽相同, 且随时间变化, 使得开关的击穿电压有一定的分散性^[19]. 图5通过改变主开关和输出开关的电弧通道的等效电感和等效电阻, 考察开关的电路参数对驱动器输出的影响.

由图5(a)和(b)可见, 在一定范围内改变主开关的电感和电阻, 脉冲形成线的电压上升段、峰值和下降段都有明显改变, 并传输到水线末端, 从而引起输出电流的变化; 由图5(c)和(d)可见, 固定主开关参数, 改变输出开关的电感和电阻时, 脉冲形成线的电压上升段和峰值没有明显变化, 下降段和输出电流波形才有明显改变. 图5(c)中, 输出开关的电感分别为40, 60和80 nH时, 电流峰值分别为2.06, 1.96和1.86 MA, 上升时间分别为68, 74和82 ns; 图5(d)中, 输出开关的电阻分别为0.1, 0.3和0.5 Ω时, 电流峰值分别为1.96, 1.78和1.63 MA, 上升时间分别为74, 73和73 ns. 可见改变输出开关电弧通道的电感则对输出电流的峰值和上升时间都有明显影响, 改变输出开关电弧通道的电阻对输出电流的峰值影响较大, 对上升时间的影响较小. 综合上述结果, 开关电弧通道的等效电感越大, 则输出电流峰值越小, 上升时间越长, 等效电阻越大, 则输出电流峰值越小.

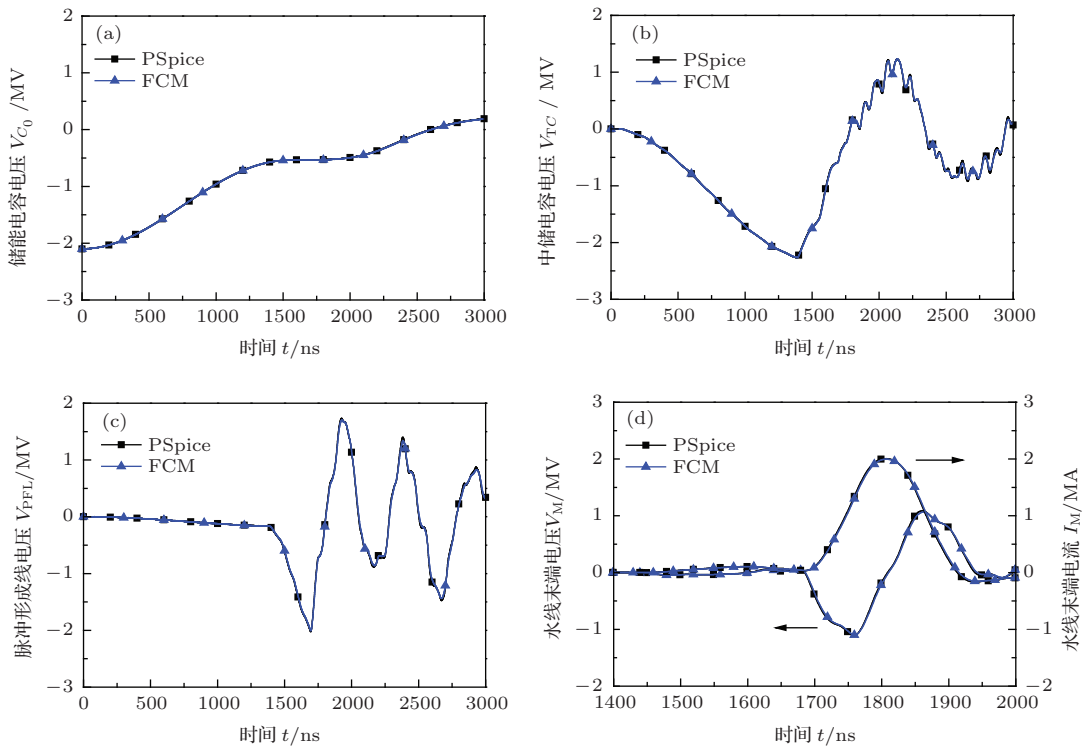


图4 驱动器不同位置处的脉冲波形 (a) 储能系统的等效电压; (b) 中储电容的电压; (c) 脉冲形成线的电压; (d) 脉冲传输线末端的电压和电流

3.2 Z箍缩负载

Z箍缩负载的电路参数是随时间动态变化的, 其影响因素包括几何结构、材料以及动力学过程.

根据磁通量和电感的关系、焦尔热和电阻的关系, 在二维柱坐标系轴对称情况下, 负载电感 L_{load} 和负载电阻 R_{load} 表示为

$$L_{load} = \frac{1}{I_{load}} \int_0^h dz \int_0^{r_0} B(r, z) dr, \quad (7)$$

$$R_{\text{load}} = \frac{2\pi}{I_{\text{load}}^2} \int_0^h dz \int_0^{r(t)} \eta(r, z) j^2(r, z) r dr, \quad (8)$$

这里的 r 和 z 分别是径向和轴向位置坐标, h 是等离子体柱的高度, r_0 是等离子体壳的初始半径, $r(t)$ 是拉格朗日网格描述下等离子体壳的外半径, B , η , j 分别是等离子体磁场、电阻率和电流密度. 电阻率公式见文献 [25], 依赖于等离子体的温度、平均电离度以及反映磁场作用下小尺度动力学过程影响的修正系数. 在一维近似下, 物理量沿轴向均匀分布, (7) 和 (8) 式的积分仅依赖于半径, 则负载电感可以表示成等离子体内部电感和外围电感之和的形式,

其中, 外围电感的表达式为

$$L_{\text{load}}[\text{nH}] = 2h[\text{cm}] \ln \frac{r_0}{r(t)}. \quad (9)$$

采用了零维模型和二维三温辐射磁流体程序 MARED [25,26] 模拟负载的动力学过程及物理量分布. 实验负载是由 42 根 $4.2 \mu\text{m}$ 钨丝组成的初始半径为 0.6 cm 的圆柱型丝阵 [11], 模拟负载的等离子体壳线质量为 $112 \mu\text{g}/\text{cm}$, 初始厚度为 0.1 cm . 驱动器电路与负载模型耦合, 获得的部分特征物理量如图 6—8 所示.

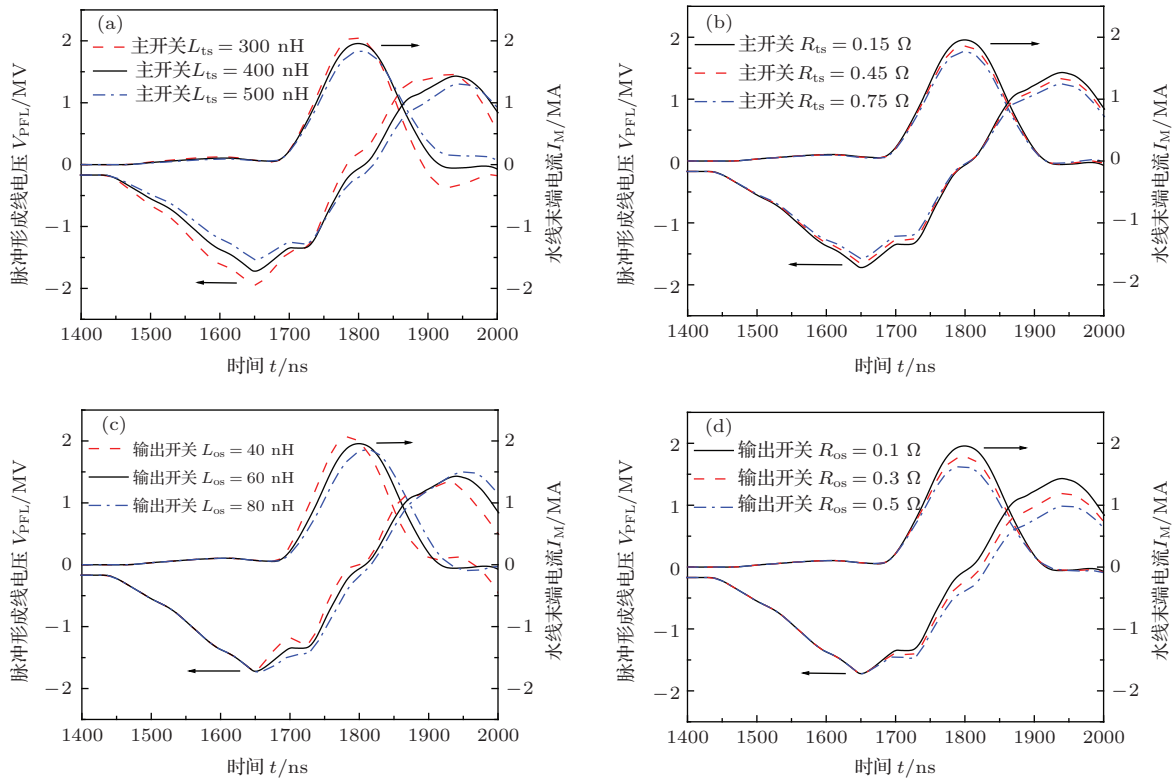


图5 不同开关参数下的脉冲形成线电压和水线末端电流 (a) 改变主开关的等效电感; (b) 改变主开关的等效电阻; (c) 改变输出开关的等效电感; (d) 改变输出开关的等效电阻

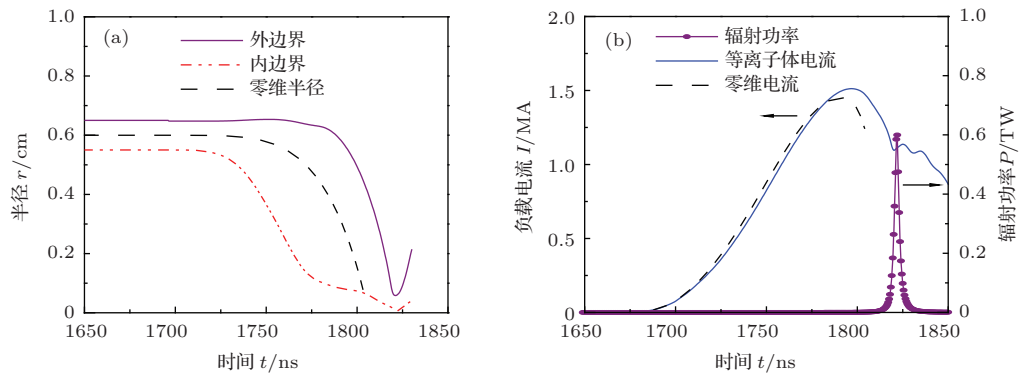


图6 负载内爆轨迹、电流和辐射功率波形 (a) 负载等离子体壳内外边界运动轨迹以及0维运动轨迹; (b) 负载电流和辐射功率波形以及0维电流波形

Z箍缩等离子体向对称轴聚心内爆运动过程中, 等离子体壳的厚度不断变化, 内层等离子体先运动到轴附近位置, 随后减速并与外层等离子体一起滞止、反弹. 零维模型与磁流体模型的模拟结果相比, 滞止时刻提前约 20 ns, 见图 6(a), 负载电流波形的上升沿基本一致, 但峰值时刻和下降沿差别较大, 电流峰值约为 1.5 MA, 见图 6(b). 负载区磁场一边占据等离子体外围(移动后留下的)空间, 一边向等离子体内部扩散, 见图 7(a), (c), 导致负载区磁通量和电感随时间变化. 同时, 负载等离子体的电阻率和电流密度有一定的空间分布, 如图 7(b), (d) 所示, 它们随时间的变化将引起负载电阻随时间的变化.

根据 (7)—(9) 式计算获得的负载动态电路参数如图 8 所示. 在内爆早期, 等离子体壳膨胀以及

磁扩散效应导致负载电感不断增大, 负载电阻经历一段时间的震荡后稳定在 0.03Ω 左右. 随着内爆过程的进行, 负载半径迅速减小, 负载总电感和电阻也迅速增大. 内爆滞止后, 等离子体壳膨胀导致负载电感和电阻减小. 零维模型假设质量和电流集中于一个无厚度的薄壳, 无法得到负载电阻, 得到的电感和磁流体模型也有较大差别, 如图 8(a) 所示.

适当调节开关和漏电阻参数, 全电路模拟能够获得与实验符合较好的结果. 以“强光一号”的 12161 次 Z 箍缩物理实验为例, 驱动器储能电容的充电电压为 35 kV, 两个开关都由电压控制, 主开关击穿电压 2.1 MV, 多针开关的击穿电压 2.3 MV, 中储电容和形成线两个位置的电压波形以及负载的电流波形如图 9 所示.

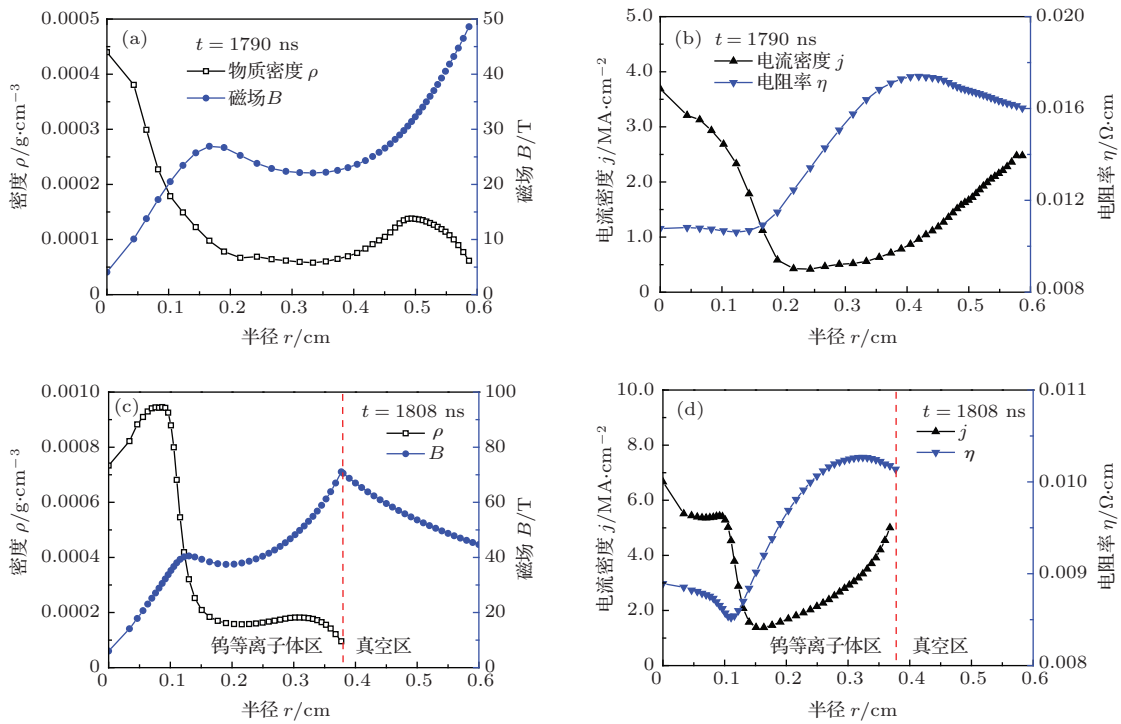


图 7 不同时刻质量密度、磁场、电流密度和电阻率的径向分布, 图中虚线是钨等离子体和外围真空区的分隔线 (a) 1790 ns, (c) 1808 ns 等离子体的密度和负载区磁场, (b) 1790 ns; (d) 1808 ns 等离子体的电流密度和电阻率

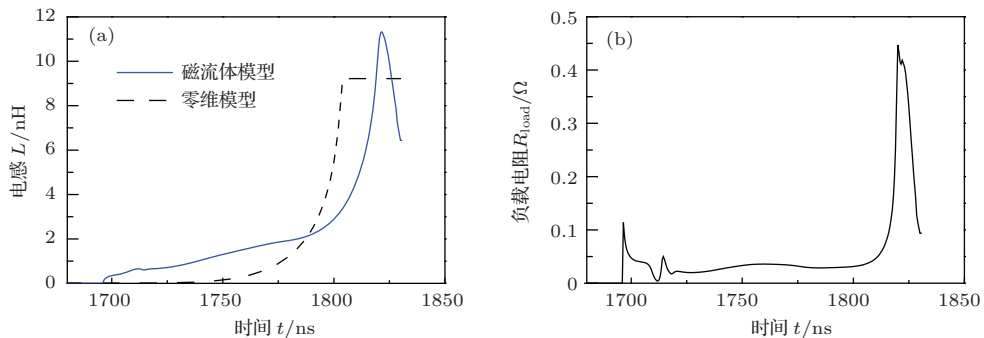


图 8 Z 箍缩负载的动态电路参数 (a) 磁流体负载电感及 0 维电感; (b) 负载电阻

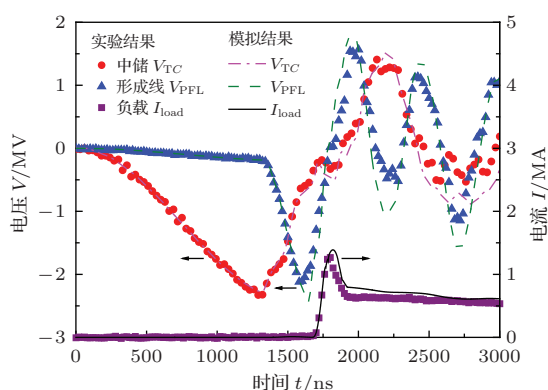


图9 模拟电压、电流波形与实验结果的比较

3.3 电磁脉冲能量的传输与功率放大过程

考虑驱动器与钨丝阵Z箍缩负载的耦合,驱动器储能电容的充电电压为35 kV, 储能205 kJ, 负载线质量112 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 丝阵初始半径为0.6 cm. 驱动器内部不同位置处电磁脉冲功率的时间波形如图10所示. 从中储电容、形成线到水介质传输线输出端, 电功率峰值分别为0.23, 0.80和1.46 TW, 上升时间(10%—90%)分别为550, 160和45 ns, 功率峰值逐渐放大, 宽度逐渐缩短. 将功率波形随时间积分, 得到传输到水介质传输线末端的电磁能量峰值约为82 kJ. 在Z箍缩内爆早期, 负载端的电压和电功率较小, 后期由于动态电感造成负载电压急剧升高, 电功率峰值高达1.28 TW. 钨丝阵辐射功率波形由图6(b)给出, 峰值为0.58 TW, 上升时间约5 ns.

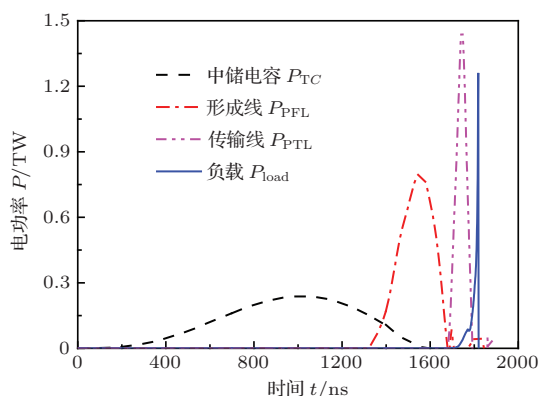


图10 驱动器不同位置处的电功率

4 结 论

脉冲功率驱动器放电时, 与负载构成一个闭合回路, 各组件的电路参数及其变化对输出都有一定的影响, 物理建模和数值模拟需要进行整体考虑.

本文分析了驱动器与负载耦合的全电路模型、参数和算法, 以“强光一号”为例讨论了开关电弧通道的电路参数和Z箍缩负载的动态电路参数的作用和影响, 模拟了驱动器内部电磁脉冲的压缩、传输过程以及电磁能到辐射能的转化过程.

全电路数值模拟程序能够从给定的驱动器储能电压出发计算获得自洽的负载电压和电流波形; 驱动器与Z箍缩负载耦合的数值模拟, 在分析实验数据、研究Z箍缩物理过程等方面起到了重要作用. 本文采用了较为基础的电路模型, 未讨论绝缘堆和真空区的若干非线性物理因素. 负载结构、材料对电路参数的影响规律, 电路参数对输出的影响规律, 负载电压、电流波形与实验数据的进一步比对分析等结果将在后续工作中给出.

感谢中国工程物理研究院“强光一号”联合实验团队以及西北核技术研究所的科研技术人员提供的实验数据支持.

参考文献

- [1] Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K 2000 *Rev. Modern Phys.* **72** 167
- [2] Haines M G 2011 *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 093001
- [3] Matzen M K 1997 *Phys. Plasmas* **4** 1519
- [4] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattenier P L, Chandler G A, Seamen J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883
- [5] McBride R D, Martin M R, Lemke R W, Greenly J B, Jennings C A, Rovang D C, Sinars D B, Cuneo M E, Herrmann, Slutz S A, Nakhleh C, Ryutov D D, Davis J P, Flicher D G, Blue B E, Tomlinson K, Schroen D, Stamm R M, Smith G E, Moore J K, Rogers T J, Robertson G K, Kamm R J, Smith I C, Savage M E, Stygar W A, Rochau G A, Jones M, Lopez M R, Porter J L, Matzen M K 2013 *Phys. Plasmas* **20** 056309
- [6] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lü M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈, 蒯斌, 曾正中, 王文生, 邱孟通, 王亮平, 丛培天, 吕敏 2006 物理学报 **55** 5917]
- [7] Zhou S T, Li J, Huang X B, Cai H C, Zhang S Q, Li J, Duan S C, Zhou R G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 165202 (in Chinese) [周少彤, 李军, 黄显宾, 蔡红春, 张思群, 李晶, 段书超, 周荣国 2012 物理学报 **61** 165202]
- [8] Zhao S, Xue C, Zhu X L, Zhang R, Luo H Y, Zou X B, Wang X X, Ning C, Ding N, Shu X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045205
- [9] Wang L P, Wu J, Guo N, Han J J, Li M, Li Y, Qiu A C 2012 *Plasma Sci. Tech.* **14** 842
- [10] Sheng L, Qiu M T, Hei D W, Qiu A C, Cong P T, Wang L P, Wei F L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055205 (in Chinese) [盛亮, 邱孟通, 黑东炜, 邱爱慈, 丛培天, 王亮平, 魏福利 2011 物理学报 **60** 055205]

- [11] Zhou L, Xue F B, Si F N, Yang J L, Ye F, Xu R K, Hu Q Y, Fu Y C, Jiang S Q, Li L B, Chen J C, Xu Z P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 195207 (in Chinese) [周林, 薛飞彪, 司粉妮, 杨建伦, 叶繁, 徐荣昆, 胡青元, 甫跃成, 蒋树庆, 李林波, 陈进川, 许泽平 2012 物理学报 **61** 195207]
- [12] Jiang S Q, Ning J M, Chen F X, Ye F, Xue F B, Li L B, Yang J L, Chen J C, Zhou L, Qin Y, Li Z H, Xu R K, Xu Z P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 155203 (in Chinese) [蒋树庆, 宁家敏, 陈法新, 叶繁, 薛飞彪, 李林波, 杨建伦, 陈进川, 周林, 秦义, 李正宏, 徐荣昆, 许泽平 2013 物理学报 **62** 155203]
- [13] Aleksandrov V V, Grabovski E V, Gribov A N, Oleinik G M, Samokhin A A, Satorov P V 2008 *Plasma Phys. Rep.* **34** 911
- [14] Xie W P, Wang W D, Deng J J, Ying C T, Ding B N 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 61 (in Chinese) [谢卫平, 王文斗, 邓建军, 应纯同, 丁伯南 2003 强激光与粒子束 **15** 61]
- [15] Xang L P, Qiu A C, Kuai B, Cong P T, Liang T X, Zhang Z, Jia W, Guo N 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 261 (in Chinese) [王亮平, 邱爱慈, 蒯斌, 丛培天, 梁天学, 张众, 贾伟, 郭宁 2004 强激光与粒子束 **16** 261]
- [16] Ding N, Yang Z H, Ning C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [丁宁, 杨震华, 宁成 2004 物理学报 **53** 808]
- [17] Struve K W, Bennett L F, Davis J P, Savage M E, Smith D L, Stygar W A, Chavez T F, Hinshelwood D D, Wagoner T C 2008 *Proceedings of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams* Xi'an, China July 6–11, 2008 p125
- [18] Zou W K, Chen L, Zhou L J, Wang M, Yang L B, Xie W P, Deng J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 115204 (in Chinese) [邹文康, 陈林, 周良骥, 王勳, 杨礼兵, 谢卫平, 邓建军 2011 物理学报 **60** 115204]
- [19] Cong P T, Kuai B, Qiu A C, Wang L P, Wu H Y, Zeng Z Z, Jia W 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1414 (in Chinese) [丛培天, 蒯斌, 邱爱慈, 王亮平, 吴撼宇, 曾正中, 贾伟 2005 强激光与粒子束 **17** 1414]
- [20] Kuai B, Qiu A C, Wang L P, Cong P T, Liang T X, Gai T Y 2006 *Sci. Tech. Engng.* **6** 939 (in Chinese) [蒯斌, 邱爱慈, 王亮平, 丛培天, 梁天学, 盖同阳 2006 科学技术与工程 **6** 939]
- [21] Huang T, Cong P T, Zhang G W, Wang L P, Zhang X J, Hu Y X 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 897 (in Chinese) [黄涛, 丛培天, 张国伟, 王亮平, 张信军, 呼义翔 2010 强激光与粒子束 **22** 897]
- [22] Peterson D L, Bowers R L, Brownell J H, Greene A E, McLenithan K D, Oliphant T A, Roderick N F, Scannapieco A J 1996 *Phys. Plasmas* **3** 368
- [23] Ning C, Yang Z H, Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1650 (in Chinese) [宁成, 杨震华, 丁宁 2003 物理学报 **52** 1650]
- [24] Duan Y Y, Guo Y H, Wang W S, Qiu A C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2654 (in Chinese) [段耀勇, 郭永辉, 王文生, 邱爱慈 2004 物理学报 **53** 2654]
- [25] Ding N, Wu J M, Yang Z H, Fu S W, Ning C, Liu Q, Shu X J, Zhang Y, Dai Z H 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 0212 (in Chinese) [丁宁, 邬吉明, 杨震华, 符尚武, 宁成, 刘全, 束小建, 张扬, 戴自换 2008 强激光与粒子束 **20** 0212]
- [26] Ding N, Wu J M, Dai Z H, Zhang Y, Yin L, Yao Y Z, Sun S K, Ning C, Shu X J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8707 (in Chinese) [丁宁, 邬吉明, 戴自换, 张扬, 尹丽, 姚彦忠, 孙顺凯, 宁成, 束小建 2010 物理学报 **59** 8707]
- [27] Jennings C A, Chittenden J P, Cuneo M E, Stygar W A, Ampleford D J, Waisman E M, Jones M, Savage M E, LeChien K R, Wagoner T C 2010 *IEEE Trans. Plasmas Sci.* **38** 529

Full circuit model for coupling pulsed power driver with Z-pinch load*

Xue Chuang Ding Ning[†] Sun Shun-Kai Xiao De-Long Zhang Yang
Huang Jun Ning Cheng Shu Xiao-Jian

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

(Received 28 September 2013; revised manuscript received 29 January 2014)

Abstract

In order to study the transportation and conversion of the electromagnetic energy from the pulsed power driver to Z-pinch load, a circuit model for the driver is analyzed, and coupled with magneto-hydrodynamics model for the load plasma. Our simulation results are compared with those obtained from circuit software and experimental results based on the “Qiangguang-I” facility. The simulated voltage and current waveform coincide well with the experimental results. Results show that the pulse width decreases and the peak increases as the pulse transmits from the storage capacitors to the pulse transmission line. When the storage capacitors are initially charged at 35 kV, the peak of electric powers at the transfer capacitor, the pulse forming line and the pulse output line are 0.23, 0.80 and 1.46 TW, respectively, and their rise-times (10%–90%) are 550, 160 and 45 ns, respectively. The load current is 1.5 MA and the X-ray radiation power is 0.58 TW.

Keywords: Z-pinch, pulsed power driver, circuit analysis, magneto-hydrodynamics

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 52.30.Cv, 84.70.+p

DOI: [10.7498/aps.63.125207](https://doi.org/10.7498/aps.63.125207)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975022, 11275030, 11105017, 11135007, 11305011).

[†] Corresponding author. E-mail: ding_ning@iapcm.ac.cn