

Z 箍缩驱动器与丝阵负载耦合特性研究*

邹文康[†] 陈 林 周良骥 王 勐 杨礼兵 谢卫平 邓建军

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2010 年 9 月 3 日收到; 2011 年 2 月 19 日收到修改稿)

以丝阵内爆零维模型为基础, 采用 Pspice 模拟行为建模方法, 建立了丝阵内爆动态电感与 Z 箍缩驱动器耦合的全电路模型, 实现驱动器放电过程与丝阵内爆过程的自治求解, 并研究了丝阵参数、电路参数对内爆过程的影响. 结果表明: 丝阵负载与驱动器存在强耦合关系, 丝阵参数、电路参数对丝阵峰值箍缩电流、内爆时间、内爆动能影响很大; 在驱动器参数不变, 内爆时间不超过电路固有放电周期 1/4 的前提下, 峰值箍缩电流、内爆时间、内爆动能随丝阵质量的增加而增大, 内爆时间随丝阵初始半径的增加而增大; 在丝阵参数不变时, 随着驱动器等效电容的增大, 内爆时间减小, 丝阵内爆动能增大, 但驱动器储能转化为内爆动能的效率却先增大后减小. 对于特定的驱动器, 优化的丝阵参数应使内爆过程充分利用驱动器固有放电周期的上升沿, 使丝阵快速收缩的时间起点接近电路固有放电周期的四分之一, 以获得最大的动能效率.

关键词: Z 箍缩驱动器, 零维内爆模型, 模拟行为建模, 耦合特性

PACS: 52.58. Lq, 52.59. Qy, 84.30. Ng

1. 引言

Z 箍缩驱动作为可能实现惯性约束聚变 (inertial confined fusion, ICF) 的一种方式, 数十年来得到了国内外同行广泛而深入的研究^[1-4], Z 箍缩较高效地将电能转化为 X 射线能已经得到实验证实^[5]. 以脉冲功率技术为基础, Z 箍缩驱动的技术路线普遍被认为是实现聚变点火的一条相对经济、可行的技术途径. 目前, 世界上最大的脉冲功率装置 ZR 在约 25 MA 的驱动电流条件下, 获得了超过 2 MJ 的 X 射线辐射能, 峰值功率超过 320 TW^[6]. 根据之前给出的 X 射线辐射能与装置电流的定标率预测 (图 1)^[7], 点火所需电流约为 ZR 的 2—3 倍. 目前普遍认为在优化的负载条件下, 约 60 MA 电流可以实现点火所需的 X 射线辐射条件.

根据 60 MA 这一目标, 美国圣地亚实验室、俄罗斯库尔恰托夫研究院等开展了装置的概念设计, 并通过电路计算对装置规模进行了估计^[8]. 丝阵内爆为动态过程, 计算时, 需要将丝阵作为动态负载进行考虑. 一般情况下, 丝阵内爆可以等效为无限

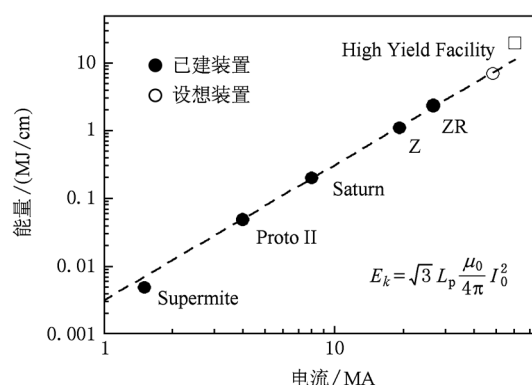


图 1 驱动器电流与 X 射线辐射能的定标率

薄的柱对称等离子体壳在磁压力作用下运动, 其变化规律由零维的内爆模型描述, 从宏观上, 用电路参数描述时, 丝阵可以等效为时变的电感. 丁宁等^[9]基于上述思想, 在假设已知负载电流波形的条件下对丝阵内爆动力学过程进行了计算, 研究了金属丝阵内爆的运动规律, 给出了内爆过程中物理量随丝阵参数变化的规律, 为 Z 箍缩负载的设计提供了参考. 然而由于丝阵电感作为驱动器负载随时间变化, 其变化过程会影响到负载上得到的电流波

* 国家自然科学基金重点项目 (项目号: 50937004) 资助的课题.

[†] E-mail: zouwenkang@yahoo.com.cn

形,并通过磁压力方程影响丝阵收缩的速度,而丝阵收缩的快慢反过来又影响电感随时间的变化,即丝阵负载与驱动器存在强耦合关系,因此用预设的电流波形对内爆过程进行求解,在数学上并不自洽.谢卫平等^[10]曾利用 Pspice^[11]的积分和微分方法,对 Saturn 装置丝阵内爆过程进行了计算,获得了与 ZORK 程序相符的结果,但该计算与 ZORK 的共性问题是输入电压为水线上的实验测量波形,并未实现放电过程与内爆过程的同步求解.此外,计算以程序语言的方式进行,电路拓扑和参数设置不直观,不利于与 Pspice 下常用的图形建模对接.因此,尽管该方法探索成功多年,却未很好地在驱动器与丝阵参数优化设计中得到应用.

本文在 Pspice 平台上,采用模拟行为建模方法(analog behavioral modeling, ABM),用图形建模的方式^[12,13],建立了描述丝阵内爆过程的电路模型,实现了内爆过程与驱动器放电过程的耦合求解,使得到的电流波形与丝阵内爆过程自洽.在此基础上,分别研究了丝阵参数、电路参数对内爆过程的影响.本文的研究内容将为 Z 箍缩驱动器放电过程与丝阵内爆过程的耦合求解提供一种快速、直观的计算方法,使 Z 箍缩驱动器与丝阵负载参数的初设效率得以提高.

2. 丝阵内爆零维模型

Z 箍缩内爆的整体动力学性质,可以用零维模型近似合理计算,其等离子体动力学基本规律已经在许多实验中得到了验证.零维模型假定内爆等离子体一直保持无限薄的柱对称壳体,其径向位置是时间的函数,单位长度的质量保持不变,其运动与在力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 作用下的加速相符合^[14].

在电流驱动丝阵内爆中,丝阵负载电路参数可以等效为一个随半径变化的电感

$$L_{\text{load}}(t) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_i}{r(t)}, \quad (1)$$

其中 l 为丝阵的高度, $r_i, r(t)$ 分别是 0 时刻和 t 时刻的丝阵半径.可以看出,丝阵电感随着丝阵半径的减小而增大.在实际计算过程中,丝阵半径不能无限收缩,而是到一定半径后(通常在压缩比例为 10:1 时),将内爆过程人为截止.

由牛顿定律,丝阵内爆方程为

$$\frac{m d^2 r(t)}{dt^2} = -2\pi r(t) l \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right), \quad (2)$$

其中 m 为丝阵质量,右边括中的项表示磁压力,乘以圆柱形丝阵表面积 $2\pi r(t)l$,等于丝阵所受的力,负号表示力的方向向内.

由 Ampère 定律,驱动电流 I 在半径 r 处产生的磁场为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r(t)}, \quad (3)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 为真空磁导率,将(3)式带入(2)式,可得

$$\frac{d^2 r(t)}{dt^2} = -\frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi m r(t)}. \quad (4)$$

求解(1)–(4)式,可以得到丝阵半径随时间的变化,进而得到内爆过程的动力学特性.但由于电流随时间变化,是负载电感和其他电路参数的函数,且(4)式右端含有 $r(t)$,因此无法通过直接积分获得上述运动方程的解析解.

3. 包括丝阵负载的 Z 箍缩驱动器全电路模型

用电路方式求解丝阵运动方程的思路是通过(1)式,将丝阵等效为一个随时间变化的电感,并使之与丝阵的运动参数联系在一起,通过电路程序来实现.一般而言,脉冲功率系统可以等效为 RLC 电路,但为了体现整个系统各部分的特性,可将整个系统划分为驱动器、传输段和负载三个部分.图 2 表示这样一个系统的简化电路,其中 R, L, C 分别表示脉冲功率驱动器的等效电阻、电感和电容, L_{trans} 表示发生器与负载之间传输段的等效电感, R_{array} 和 L_{array} 分别表示丝阵负载的电阻和电感,对于一定长度的丝阵负载, R_{array} 为常数.

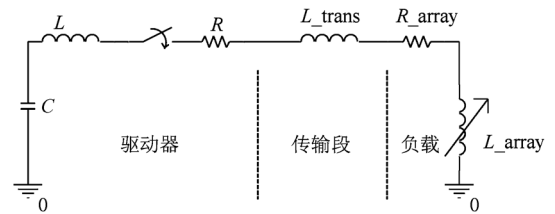


图 2 脉冲发生器驱动丝阵负载简化电路模型

由于丝阵电感 L_{array} 随时间的变化与内爆过程耦合,且与电流成非线性,对于不同的驱动器参数、不同的负载配置, L_{array} 的时间曲线不同,因此在电路程序中,无法直接调用现有的库元件进行计

算,必须进行丝阵电感模型的二次开发. ABM 建模方法是 Pspice 的一种高级仿真方法,它忽略元件和系统的内部参数和电路结构,只使用一些数学表达式、数据表格来从行为级而不是元件级实现对复杂电路和系统的模拟. ABM 支持程序语言和图形界面两种建模方式,二者完全等效,但图形界面下的 ABM 建模更为直观、参数调整更加便捷,容易与常规的电路建模结合.

采用 ABM 进行丝阵内爆建模的方法如图 3 所示. 从主回路取出的电流信号进行函数运算得到 $-\mu_0 I^2 l / 4\pi m$, 该数值乘以上一个时间步计算得到 $1/r(t)$, 得到(4)式右端,即此时此刻丝阵运动的加速度 $d^2 r(t)/dt^2$, 对该数值进行二次积分即到此时丝阵的半径 $r(t)$, 半径进行倒数运算得到当前的 $1/r(t)$, 供下一个时间步求解加速度使用. 由于计算假定丝阵最大收缩比为 10:1, 因此限定丝阵的最小半径为 $r_i/10$. 上述计算过程与电路放电过程耦合进行计算,实现(2)—(4)式运动方程的求解.

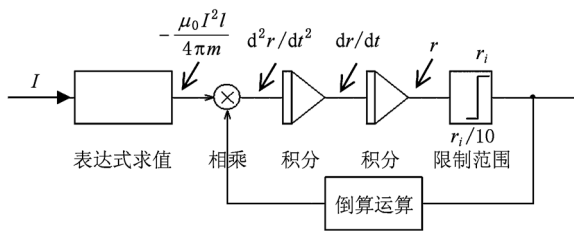


图 3 丝阵内爆过程电路求解示意图

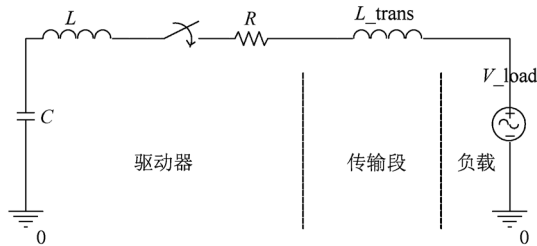


图 4 丝阵内爆过程的计算最终以串联电压源体现在主回路中

由于与电路同步求解,丝阵运动特性最终需要通过电路参数来体现. 为此在求得丝阵半径 $r(t)$ 的基础上,通过(1)式求出 t 时刻的电感 $L_{load}(t)$, 并根据

$$V_{load}(t) = \frac{d(L_{load}I)}{dt} \quad (5)$$

求得丝阵负载的电压降,作为电压源与主回路串联(图 4),从而完成(1)—(4)式的求解.

4. 驱动器参数与丝阵负载的耦合关系

在 Pspice 的单层丝阵模型中,有三个独立变量,丝阵质量 m ,初始半径 r_i 和丝阵高度 l . 对图 5 所示的典型内爆电流波形,特征参量为箍缩峰值电流 I_{max} ,电流上升时间 τ_r ,内爆时间 τ_i . 文献[15]给出丝阵质量的一种预测

$$m = (1.81 \times 10^{-8}) \frac{I_{max}^2 \tau_i^2 l}{r_i^2}. \quad (6)$$

在其他参数已知条件下,可以由(6)式近似初步估计能够驱动的丝阵质量,但从优化的角度讲,最佳的丝阵质量应在初估值附近进行多次迭代才能确定. 因为对不同的丝阵配置,负载能获得的峰值电流和内爆时间会有所不同,而从(6)式可知,峰值电流、内爆时间的变化又将影响丝阵质量的选取. 因此丝阵与电路参数是相互耦合的,驱动器与负载的合理配置应经过多次迭代才能确定,这也是 Z 箍缩实验方案初设的重要内容. 为研究驱动器与丝阵之间的这种耦合关系,以下分别对各参数对内爆过程的影响进行研究,方法是选择某一参数作为变量,而保持其他参数不变,分析丝阵内爆的峰值电流、内爆时间和内爆动能的变化规律.

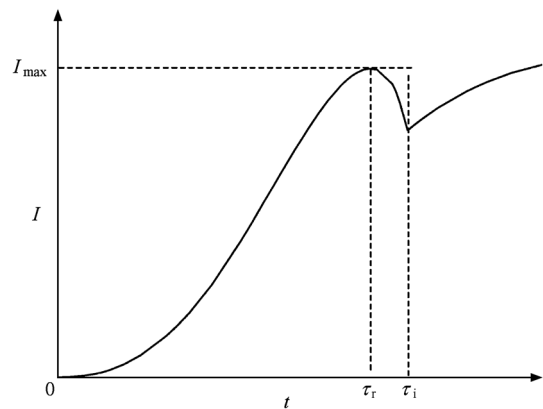


图 5 Z 箍缩丝阵内爆的典型电流波形及参数定义

在研究丝阵参数变化的影响时,选择的电路参数为: $C = 432 \text{ nF}$, $L = 11.1 \text{ nH}$, $R = 0.021 \Omega$, $L_{trans} = 10 \text{ nH}$, $R_{array} = 0.005 \Omega$, 电容初始充电电压 3.8 MV . 这是依据一种基本电路模块^[16],经过串并联得到一个 Z 箍缩概念装置的等效电路参数.

4.1. 丝阵质量的影响

在上述电路参数下,预期负载能获得 10—12

MA 的电流,丝阵内爆时间 100—120 ns,取丝阵初始半径、高度都为 1 cm,则由(6)式可得到的丝阵质量为 1.81—3.75 mg. 考虑定标关系的误差,对丝阵质量 $m = 1$ mg, 2 mg, 4 mg, 8 mg, 16 mg, 32 mg 分别进行计算,并提取负载电流、内爆时间、动能等进行比较,结果如图 6 所示.

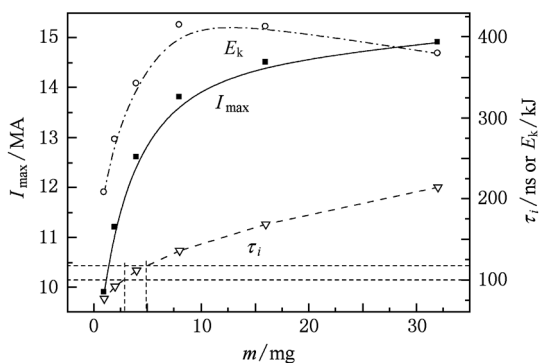


图 6 内爆参量随丝阵质量的变化

可以看出,在驱动器参数不变的情况下,内爆时间随丝阵质量增大而增大,相应的内爆峰值电流随之增大,丝阵从驱动器获得的动能先增大后减小. 原因是,RLC 电路本身具有一定的振荡周期,驱动器放电的快慢与丝阵的内爆过程在时间上有竞争关系. 丝阵质量太小,内爆很快就完成,而驱动器电流还处于上升期,丝阵从驱动器抽取能量很小,装置能量利用效率很低;而丝阵质量太大,内爆过程启动太慢,内爆过程开始时可能已经错过了电流峰值(峰值时刻对应电路振荡周期的 1/4),丝阵同样不能从驱动器获得足够的能量,装置的能量利用效率也不会很高. 计算还表明,内爆过程的前期,丝阵收缩速度很慢,丝阵的快速收缩只发生在内爆结束前很短的时间. 因此,优化的丝阵质量应使内爆电流峰值时刻略早于驱动器放电周期的 1/4,即当驱动器电流接近峰值时,使丝阵恰好进入快速收缩阶段,这样,可以使丝阵能获得较高的动能效率. 根据上述原则,在丝阵初始半径、高度都为 1 cm 时,对应前面给定的电路参数,考虑内爆时间 100—120 ns,取丝阵质量 3—5 mg 比较合理(图 6 中虚线围成的矩形区域). 为此,取 $m = 4$ mg 对丝阵内爆进行求解,得到内爆电流、内爆动能波形如图 7 所示. 其中内爆时间 112 ns,峰值电流 12.6 MA,带入(6)式得到丝阵质量为 3.6 mg,与 $m = 4$ mg 的预设偏差为 10%. 但考虑到(1)式是基于有限的实验结果得到的经验公式,因此可以认为上述计算结果是合理的.

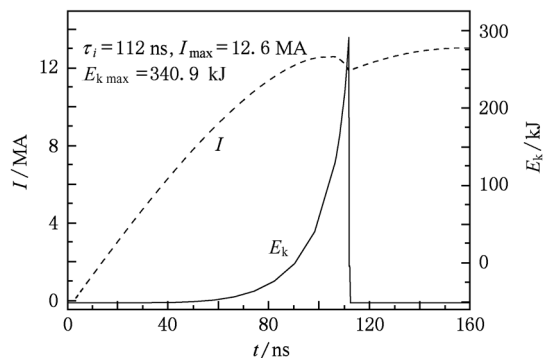


图 7 $r_i = 1$ cm, $l = 1$ cm, $m = 4$ mg 丝阵负载电流、内爆动能波形

4.2. 丝阵初始半径的影响

Z 箍缩负载区的总电感包含静态和动态两部分^[17,18],静态电感是回流罩和初始时刻丝阵之间的电感,动态电感由内爆过程引起,由(1)式描述. 由于驱动器与负载之间过渡段的电感远大于负载区的静态电感,且过渡区电感为近似计算,因此在本文中不单独考虑回流罩与丝阵之间的电感. 丝阵初始半径的大小只是影响到内爆过程总的位移,进而影响内爆时间和峰值电流的大小. 容易想象,在驱动器参数不变的前提下,随着丝阵初始半径的增大,内爆时间将会延长,在内爆时间不超过电路固有放电周期 1/4 的前提下,峰值电流和内爆动能也将随之增大. 图 8 给出了 $m = 4$ mg, $l = 1$ cm,丝阵半径从 0.8 cm 变化到 2 cm 时,丝阵内爆参数的变化趋势.

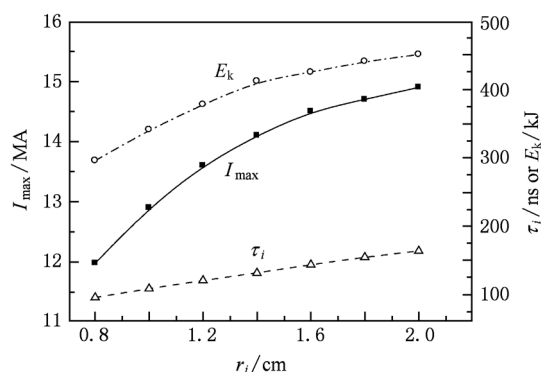


图 8 内爆参量随丝阵半径的变化

4.3. 丝阵高度的影响

由(1)式可知,丝阵动态电感随高度增加而增大,对放电过程将产生影响;同时若丝阵质量保持

不变,高度的增加将使单位长度的质量随之减小,从而对内爆动力学过程产生影响. 在 $m = 4 \text{ mg}$, $r_i = 1 \text{ cm}$ 时,对丝阵高度 $l = 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2 \text{ cm}$ 下内爆过程进行了计算,得到内爆时间和峰值电流的变化趋势如图9所示. 可见丝阵高度增大,内爆时间、峰值电流减小,内爆动能也随着减小. 但事实上,内爆动能随丝阵高度(质量不变时相当于随线质量密度)变化的趋势比较复杂,本算例中的单调变化仅是特例. 文献[19]指出,动能效率正比于内爆最后阶段负载电感相对于系统总电感的变化率,由(4)式可近似认为最大内爆动能正比于内爆

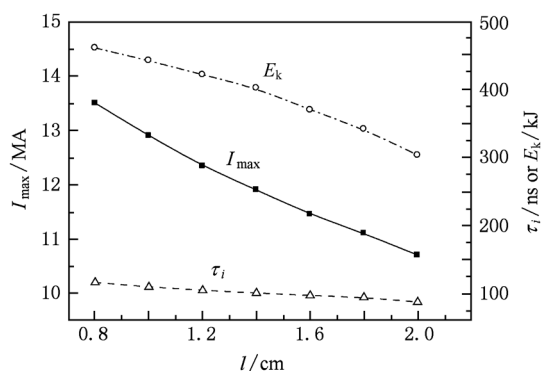
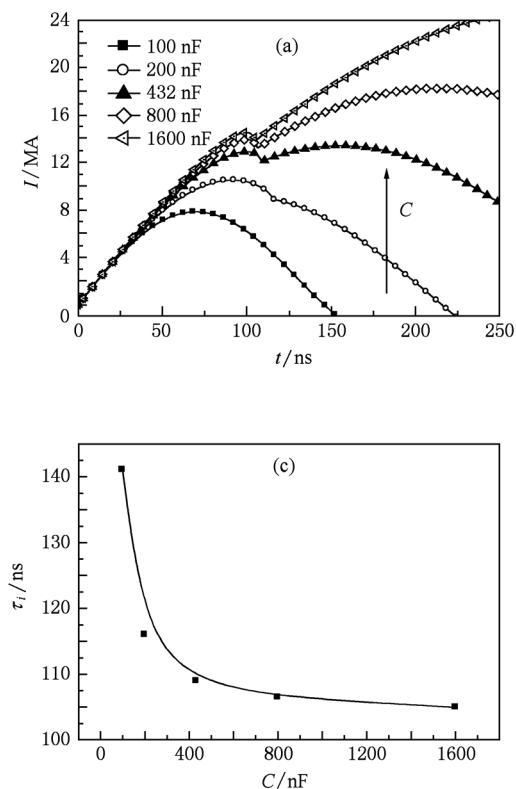


图9 内爆参量随丝阵高度的变化



结束时电流的平方. 文献[9]的计算结果也表明,动能随丝阵线质量密度的变化趋势并不是单调的.

4.4. 电路参数的影响

前面提到优化的参数配置应使内爆电流峰值时刻略早于驱动器放电周期的 $1/4$, 即当驱动器电流接近峰值时,使丝阵恰好进入快速收缩阶段. 那么当驱动器固有放电周期过长或过短时,对内爆过程又有何影响呢? 为此,在丝阵参数保持不变的情况下,改变驱动器的电路参数,研究内爆参量的变化. 根据脉冲功率电路基本原理^[20],驱动器的固有放电周期

$$T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad (7)$$

其中 L, C 分别是电路的总电容和总电感. 优化的内爆电流峰值时间,即电流脉冲近似上升时间

$$\tau_r \sim \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC}. \quad (8)$$

对于前面的计算, $C = 432 \text{ nF}$, $L = 11.1 \text{ nH}$, $\tau_r \sim 109 \text{ ns}$,这与预设的内爆时间 $100\text{--}120 \text{ ns}$ 也是符合的.

保持丝阵参数 $m = 4 \text{ mg}$, $r_i = 1 \text{ cm}$, $l = 1 \text{ cm}$ 及其他电路参数不变,通过改变驱动器电容 C 来对电路

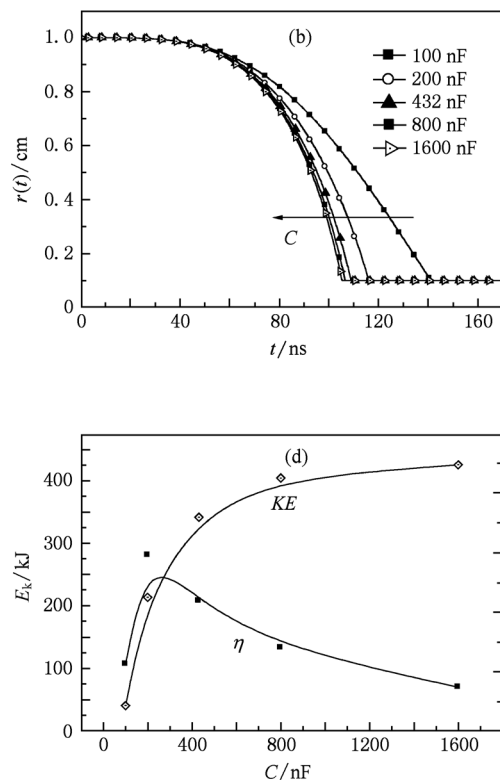
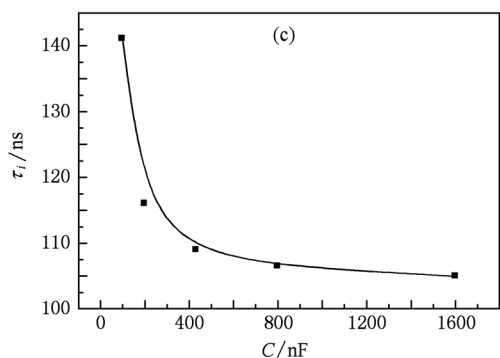
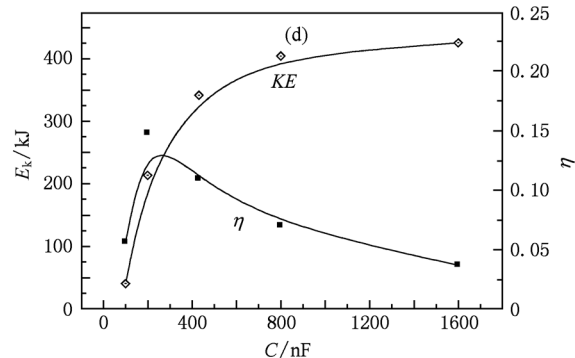


图10 驱动器等效电容对内爆参数的影响

的固有放电周期进行调整,对 $C = 100, 200, 432, 800, 1600$ nF 时丝阵内爆过程分别进行计算,结果如图 10 所示. 其中图 10(a), (b) 分别给出了不同电容下负载电流、丝阵半径随时间的变化,箭头给出了电容增加的方向. 随着电容的增大,内爆终止时刻在固有放电周期更靠前的位置. 在大电容情况下,由于系统储能较大,内爆结束时仍有大量能量未释放,电流仍会继续上升,因此尽管丝阵获得的动能 KE 要高(图 10(d)),但储能转化为动能的效率 η 却在下降. 图 10(d) 也表明,从动能利用效率来看,电容的选择有最优值. 计算结果还表明,随着电容的增大,丝阵半径收缩的速度在加快(图 10(b), (c)),内爆时间在减小,但这种变化的趋势随着电容的增大逐渐变慢.

5. 结 论

本文以丝阵内爆零维模型为基础,采用 Pspice 模拟行为建模方法,建立了丝阵内爆动态电感与 Z

箍缩驱动器耦合的全电路模型,在数学上实现了驱动器放电过程与丝阵内爆过程的自洽求解. 在此基础上研究了丝阵参数、电路参数对内爆过程的影响. 研究表明,在内爆时间不超过电路固有放电周期的 1/4、驱动器参数不变的前提下,内爆时间、峰值电流随丝阵质量增大而增大,丝阵从驱动器获得的动能先增大后减小,随着丝阵初始半径的增大,内爆时间延长,峰值电流和内爆动能随之增大,而内爆动能随丝阵高度的变化相对比较复杂,它与单位长度丝阵的质量关系密切. 在丝阵参数不变时,随着驱动器电容的增大,回路放电固有周期增大,内爆时间减小,内爆终止时刻在固有放电周期更靠前的位置. 尽管丝阵获得的动能在增大,但储能转化为动能的效率却先增大后减小. 本文建立的模拟方法以电路仿真软件 Pspice 为基础,结合了其最常用的图形界面建模方法,为 Z 箍缩驱动器和丝阵的参数初设提供了极大的便利,也为丝阵内爆参数预测提供了新的思路.

- [1] Spielman R B, De Groot J S 2001 *Laser and Particle Beams* **19** 509
- [2] Ren X D, Huang X B, Zhou S T, Zhang S Q, Li J, Yang L B, Li P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7067 (in Chinese) [任晓东、黄显宾、周少彤、张思群、李 晶、杨礼兵、李 平 2009 物理学报 **58** 7067]
- [3] Ye F, Li Z H, Qin Y, Jiang S Q, Xue F B, Yang J L, Xu R K, Jin Y J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075204
- [4] 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、鄢吉明、戴自焕、张 扬、尹 丽、姚彦忠、孙顺凯、宁 成、束小建 2010 物理学报 **59** 8707]
- [5] Sanford T W, Spielman R B, Allshouse G O 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 1086
- [6] Savage M 2010 *Proceeding of 13th International Conferene on Megagauss Field Generation and Related Topics*, 6—10 July Suzhou, China
- [7] Olson C L 2005 *Fusion Power Associates Annual Meeting and Symposium* (Washington, DC)
- [8] Olson C L, Mazarakis M G, Fowler W E, Sharpe R A, Smith D L, Turgeon M C, Langston W L, Pointon T D, Ottinger P F, Schumer J W, Welch D R, Rose D V, Genoni T C, Bruner N L, Thoma C, Barkey M E, Guthrie M, Kammer D C, Kulcinski G L, Kalinin Y G, Kingsep A S, Nedoseev S L, Smirnov V P, Kim A 2007 *SAND2007-0059*
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Pspice is a product of OrCAD by Cadence Design Systems, Inc.
- [12] Pspice A/D schematic version user guide includes Pspice A/D, Pspice A/D Basics, and Pspice Product Version 10.0 June 2003
- [13] Yang H W 2002 *Ph. D. Thesis* (Changsha: National University of Defense Technology) p83—94 (in Chinese) [杨汉武 2002 博士学位论文(长沙:国防科学技术大学)第 83—94 页]
- [14] Liberman M A, De Groot J S, Toor A, Spielman R B (Translated by Sun C W) 1999 *Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas* (Beijing: Defence Industry Press) pp49—55 (in Chinese) [利伯曼等著、孙承伟译 1999 高密度 Z 箍缩等离子体物理学(北京:国防工业出版社)第 49—55 页]
- [15] Stygar W A, Cuneo M E, Headley D I, Ives H C, Leeper R J, Mazarakis M G, Olson C L, Porter J L, Wagoner T C, Woodworth J R 2007 *Phys. Rev. Special Topics—Accelerators and Beams* **10** 030401
- [16] Zhou L J, Deng J J, Chen L, Dai Y M, Wang M, Xie W P, Feng S P, Yang L B 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 465 (in Chinese) [周良骥、邓建军、陈 林、戴英敏、王 勤、谢卫平、丰树平、杨礼兵 2010 强激光与粒子束 **55** 465]

- [17] Ding N, Zhang Y, Liu Q, Xiao D L, Shu X J, Ning C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1083 (in Chinese) [丁宁、张扬、刘全、肖德龙、束小建、宁成 2009 物理学报 **58** 1083]
- [18] Song S Y 2004 *Ph. D. Thesis* (Mianyang: Institute of Fluid Physics) p56 (in Chinese) [宋盛义 2004 博士学位论文(绵阳:流体物理研究所)第 56 页]
- [19] Sanford T W, Humphreys D R, Poukey J W, Marder B M, Halbleib J A, Crow J T, Spielman R B, Mock R C 1994 *SAND94-0694*
- [20] Liu X S 2005 *High Pulsed Power Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) p57—62 (in Chinese) [刘锡三 2005 高功率脉冲技术(北京:国防工业出版社)第 57—62 页]

Coupling characteristics research on Z-pinch driver and wire array load^{*}

Zou Wen-Kang[†] Chen Lin Zhou Liang-Ji Wang Meng Yang Li-Bing Xie Wei-Ping Deng Jian-Jun

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

(Received 3 September 2010; revised manuscript received 19 February 2011)

Abstract

Self-consistent circuit solution of Z-pinch driver discharging and wire array implosion is realized via Pspice analog behavioral modeling (ABM) based on the 0-dimensional implosion model. The influence of wire array and circuit parameters on implosion process is investigated using the method. Results show that wire array as its load is strongly coupled with Z-pinch driver. The maximum pinch current, the implosion time and the maximum kinetic energy (E_k) transferring to wire array are very sensitive to driver and wire array parameters. When the driver does not change and implosion time does not exceed a quarter of oscillation periods, the maximum pinch current, the implosion time and the maximum E_k increase while wire array mass increases, and implosion time decreases as initial wire array radius increases. With keeping wire array unchanged, the implosion time decreases and implosion time increases as capacitance of driver increases, but the E_k efficiency firstly increases then decreases. The optimal array parameters for a given driver should make the implosion fully use the rising edge of current pulse, and make the pinch time close to a quarter of oscillation period, so that the implosion process could obtain maximum E_k efficiency.

Keywords: Z-pinch driver, 0-D implosion model, analog behavioral modeling, coupling characteristics

PACS: 52.58.Lq, 52.59.Qy, 84.30.Ng

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50937004).

[†] E-mail: zouwenkang@yahoo.com.cn