

文章编号: 2095-4980(2018)04-0724-05

脉冲放电回路电感的计算

刘云龙, 尚绍环, 金大志

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 脉冲功率技术广泛用于科学研究、军事、医学及工业等方面。脉冲放电电路为脉冲功率技术的主要研究对象, 以高电压、大电流、高功率为特点。电路电感是脉冲放电电路的一个主要关注点, 计算机仿真技术(CST)软件为快速计算电路电感提供了一种方法。根据导线间的磁场分布推导了导线电感的理论公式, 分析了导线半径及导线间距对电感的影响; 分析了基于脉冲放电电路电流波形迭代求解电路电感方法; 最后利用 CST 建模计算了不同电路的电感。将 CST 计算电感与基于脉冲放电电路电流波形迭代求解的电感做对比, CST 可用于辅助分析脉冲放电电路。

关键词: 脉冲功率; 电感; 仿真; 计算机仿真技术(CST)

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0724

Calculation of inductance of pulse discharge circuit

LIU Yunlong, SHANG Shaohuan, JIN Dazhi

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Pulsed power technology is widely used in scientific research, military, medicine, industry, and so on. Pulsed discharge circuit, as the main research object of pulsed power technology, is characterized by high voltage, high current and high power. Inductance is one of the main concerns of pulsed discharge circuit, and a method is provided by the Computer Simulation Technology(CST) to calculate circuit inductance rapidly. In this paper, theoretical formula of wire inductance is derived based on magnetic field distribution between wires, the influence of the wire radius and the distance between wires on the inductance are analyzed. And then, iterative method of solving circuit inductance with current waveform of pulsed discharge circuit is introduced. Inductance of different circuits is calculated by means of CST finally. Comparing the inductance calculated by iterative method with that by using CST, a conclusion is drawn that CST can be utilized to analyze the pulsed discharge circuit.

Keywords: pulsed power; inductance; simulation; Computer Simulation Technology(CST)

脉冲功率技术是指在较长时间内以较小的功率把能量慢慢输入到较大体积的储能设备中, 然后在极短的时间(ns 至 ms 级)向小体积负载释放, 形成超高脉冲功率输出。脉冲功率技术通过时间、空间压缩与转换, 实现输出功率对输入功率的放大^[1]。脉冲功率技术广泛用于科学研究、军事、医学及工业等方面^[2-8]。脉冲放电电路为脉冲功率技术的主要研究对象, 以高电压、大电流、高功率为特点^[1]。脉冲放电电路可等效为 LRC 电路(原理如图 1 所示)。

已知电路电容 C 、电感 L 和电阻 R , 假定初始电容两端电压为 U_0 , 则电路电流为^[9]:

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: t 代表时间; δ 表征电流的衰减情况, $\delta = \frac{R}{2L}$; ω 表示电流角频率,

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}。$$

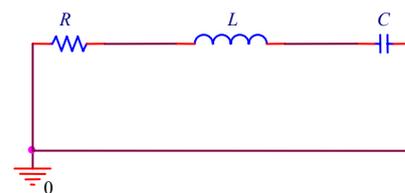


Fig.1 Equivalent circuit of pulsed discharge circuit
图 1 脉冲放电电路的等效电路

收稿日期: 2017-02-15; 修回日期: 2017-04-17

基金项目: 中国工程物理研究院电子工程研究所创新基金资助项目(S20150802)

在电路电容为 10 μF、电压为 1 kV、电感为 400 nH 的情况下，电路电流随电路电阻(以 0.01 Ω 为间距从 0.06 Ω 增加到 0.1 Ω)的变化如图 2 所示；在电路电容为 10 μF、电压为 1 kV、电阻为 0.1 Ω 的情况下，电路电流随电感(以 100 nH 为间距从 200 nH 增加到 600 nH)的变化规律，如图 3 所示。从图中可以看出，随着电阻和电感的增加，电路电流峰值降低、周期增加。所以降低电路电阻和电感有助于提高电路电流，增加脉冲输出功率。由于脉冲放电电路一般是由低电阻导线或者同轴线传输电路中的电容、开关和负载，电路电阻不容易降低，在实际的脉冲放电电路设计中，降低电路电感比降低电路电阻更能有效增加电路电流，这首先就需要快速分析或计算出脉冲放电电路的电感。传统粗略获得电路电感的方法是搭建脉冲电路测量电流波形的周期，利用 $T = 2\pi / \omega \approx 2\pi\sqrt{LC}$ 粗略估算回路电感，或利用式(1)通过迭代方法求解到电路电感(具体分析见下文)。随着计算机计算能力快速提升，仿真软件功能日趋强大，计算机仿真为快速计算电感提供了一种方法。冉汉政等^[10]利用 ANSYS 软件对设计的新型绕组结构电感进行有限元计算，并获得了良好的效果。计算机仿真技术(CST)软件的电磁(Electro-Magnetism, EM)模块能利用有限元法有效求解不同电路布局下电路内部的磁通，从而快速计算出电路的电感。

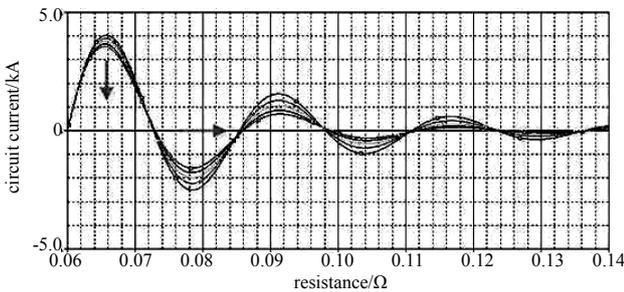


Fig.2 Variation law of circuit current with resistance
图 2 电路电流随电阻增加的变化规律

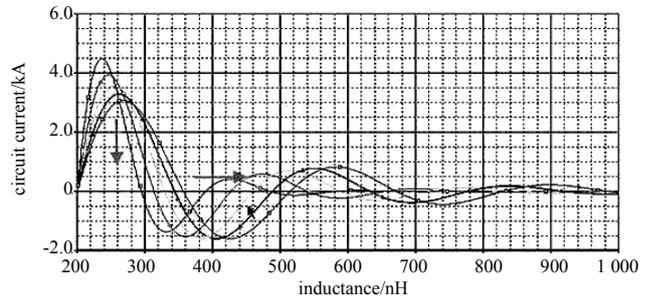


Fig.3 Variation law of circuit current with inductance
图 3 电路电流随电感增加的变化规律

1 导线和同轴线电感的计算

1.1 导线电感的计算

脉冲放电电路常见的能量传输有 2 种：平行导线和同轴线，如图 4 所示。导线的电感由横向磁场产生(图 5 为导线内部和外部的磁场强度)，其中导线内部的磁场产生内电感，导线外部的磁场产生外电感。外电感比内电感大得多(低频下导线内电感约为数十 nH/m)，因此每单位长度电感 L 近似等于外电感^[11]。

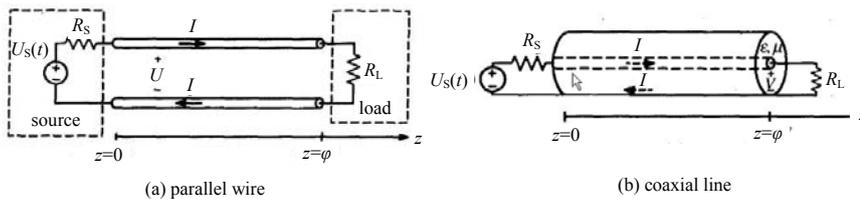


Fig.4 Two types of structures of energy transmission(capacitance and switch are equivalent to voltage source and internal resistance)
图 4 两种类型的能量传输结构(电容和开关等效为电压源和内阻)

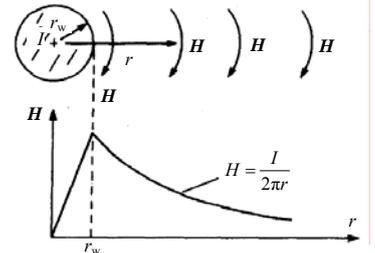


Fig.5 Magnetic field around current-carrying wire
图 5 载流导线周围的磁场

忽略导线的邻近效应(即导线表面电流分布均匀，电流为 I ，当 2 根导线间的间距 s 与导线半径 r_w (此处的导线半径不含导线表面绝缘层的厚度)之间 $s/r_w < 5$ 时，则不能忽略邻近效应^[11])，由安培定律可知导线外部的磁场强度大小 H 满足：

$$\oint H dl = I \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi r} \tag{2}$$

考虑半径为 r_w 、间距为 s 的平行导线，则导线间单位长度的总磁通：

$$\psi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{s - r_w}{r_w}\right) + \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{s - r_w}{r_w}\right) = \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln\left(\frac{s - r_w}{r_w}\right) \approx \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln\left(\frac{s}{r_w}\right) \tag{3}$$

式中 μ_0 为真空磁导率，则单位长度平行导线间的电感：

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{S}{r_w}\right) = 0.4 \ln\left(\frac{S}{r_w}\right) (\mu\text{H/m}) \quad (4)$$

当导线半径为 0.25 mm、间距为 2 mm 时，导线的电感为 832 nH/m，而导线内电感仅为 50 nH/m，可以看出导线的内电感相比外电感可忽略不计。对于平行导线，其电感随导线半径(对应导线规格从 38#到 1#)和导线间距的变化曲线，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，增加导线半径(横截面积)和减小导线间距(导线间的面积)有利于降低导线电感，且在导线间距一定、导线半径较小时，电感对导线半径的变化更敏感。

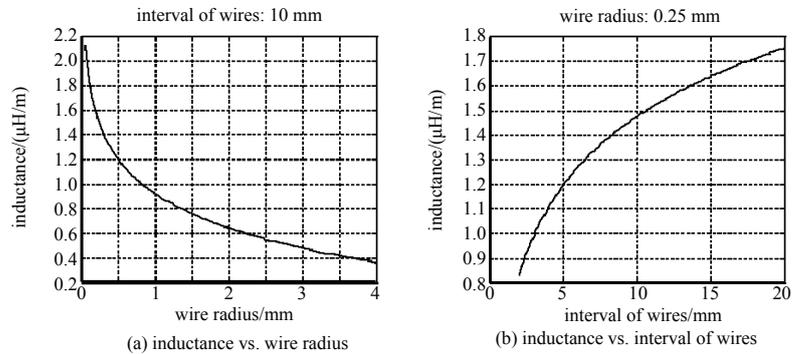


Fig.6 Curves of the inductance of parallel wires with the radius and the interval of wires
图 6 平行导线间电感随导线半径和间距的变化曲线

1.2 同轴线电感的计算

如图 7 所示，同轴线的电感可用类似上面的方法推导。首先根据安培环路定律：

$$\oint H dl = I \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi r} \quad (5)$$

一般来说同轴线内部介质为非磁介质，所以芯线和皮线之间单位长度上的磁通：

$$\Psi = \int B ds = \int_{r=r_w}^{r_s} \mu_0 H dr = \int_{r=r_w}^{r_s} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (6)$$

式中： r_s 为同轴线皮线内径； r_w 为同轴线芯线外径。则同轴线单位长度上的电感：

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) = 0.2 \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) (\mu\text{H/m}) \quad (7)$$

从这里可以看出同轴线和平行导线的电感类似。

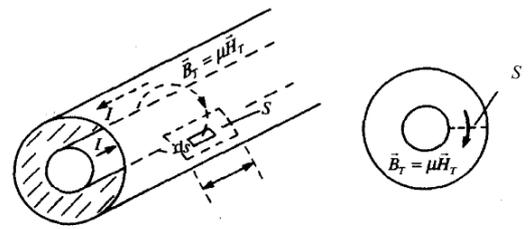


Fig.7 Schematic diagram of the internal magnetic field of coaxial line
图 7 同轴线内部磁场示意图

2 基于脉冲放电电路电流波形计算电路电感

脉冲放电电路等效电路如图 1 所示。电路电流波形为欠阻尼振荡波形。文献[12]根据电路方程求解了放电回路电感、电阻并分析了误差，取得了良好的效果。本文根据电流波形采用迭代方式求解电路电感，已知电路电容两端初始电压及电容容值，具体求解步骤如下：

1) 测量电流波形的周期 T 、第一峰值 I_1 、第二峰值 I_2 ；

2) 利用 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{2\pi}{T}$ (对于放电回路来说，一般有 $\sqrt{\frac{1}{LC}} \gg \frac{R}{2L}$) 计算电路电感初始值 L_0 ；

3) 根据 $\frac{I_1}{I_2} = e^{\delta T/2}$ 及 $\delta = \frac{R}{2L}$ 计算电路电阻初始值 R_0 ；

4) 电路电阻固定，电感 L 在 $(L_0/a, L_0 \times a)$ (a 为大于 1 的常数，数值由具体电流波形决定) 区间内变化，将参数代入式(1)中求解电流波形并定义误差函数 $error = \sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2$ (其中 n 为电流波形的数据长度， \hat{i}_k 为计算的电流曲线上的电流， i_k 为实际电流曲线上的电流)，将电感 L 固定为误差函数取得最小值时的电感；

5) 电路电感固定，电阻 R 在 $(R_0/b, R_0 \times b)$ (b 为大于 1 的常数，数值由具体电流波形决定) 区间内变化，将参数代入式(1)中求解电流波形并定义误差函数 $error = \sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2$ (其中 n 为电流波形的数据长度， \hat{i}_k 为计算的电流曲线上的电流， i_k 为实际电流曲线上的电流)，将电阻固定为误差函数取得最小值时的电阻，且如果这种情况下误差函数满足 $error \leq A$ (A 数值由具体电流波形决定) 则结束求解；反之，回到第 4) 步。

搭建试验电路测量得到电路电流波形，并将通过上面步骤计算得到的电流波形与实测电流波形对比，如图 8 所示。从图 8 中可以看出，计算出来的电流波形与实测电流波形吻合较好，说明计算方法非常有效。表 1 列出了 3 种导线情况下通过回路电流波形计算得到的回路电感(表 1 中电路长度包括脉冲放电电路导线长度、电容长度和开关长度)。

表 1 迭代求解电路电感

Table1 Iterative solution of circuit inductance

	circuit 1	circuit 2	circuit 3	circuit 4	circuit 5	circuit 6
equivalent sectional area of wire/mm ²	0.32	0.32	0.22	0.22	0.34	0.34
length of circuit/cm	53.0	40.0	53.5	40.0	53.5	40.0
calculated inductance/nH	544	384	582	398	552	387

3 利用 CST 分析脉冲放电电路电感

CST 中 EM 模块可有效提取线圈的电感，将表 1 中 6 种电路中电容和开关等效为导线，并在 CST 中建立相应的导线布局(布局图如图 9 所示)，利用 EM 模块中的电感计算得到不同电路下的电路的电感，结果如表 2 所示，CST 计算电感与通过电流波形计算电感的对比如图 10 所示。

从图 10 可以看出利用 CST 计算得到的电感与基于电流波形迭代求解得到的电感随电路的变化趋势一致，但数值上要大 60 nH 左右。这可能是因为实际试验中导线为多芯导线，而在 CST 中建模时将导线建成一根单芯导线且单芯导线半径对应着多芯导线截面积。但由于多芯导线中芯与芯之间有间隙，使得其等效半径比相应的单芯导线大一些。由式(4)中平行导线间的电感公式类推可知导线半径越大，其电感越小。所以利用 CST 计算出电路电感要大一些，但可粗略计算出电路电感，可用于辅助分析脉冲放电电路电感并指导电路布局。

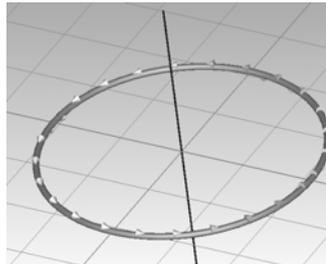


Fig.9 Simplified circuit model of CST
图 9 CST 简化电路模型

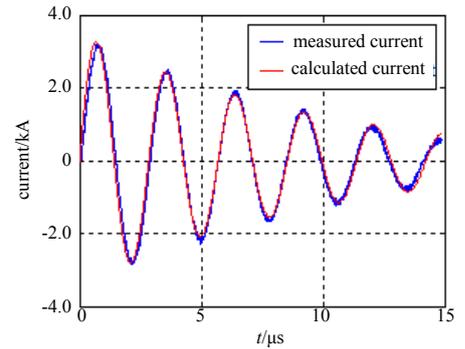


Fig.8 Comparison of measured current waveform and calculated current waveform of pulse discharge circuit

图 8 脉冲放电电路实测电流波形与计算电流波形对比图

表 2 CST 计算电路电感

Table2 Circuit inductance calculated by CST

calculated inductance with CST/nH					
circuit 1	circuit 2	circuit 3	circuit 4	circuit 5	circuit 6
605	453	628	465	607	450

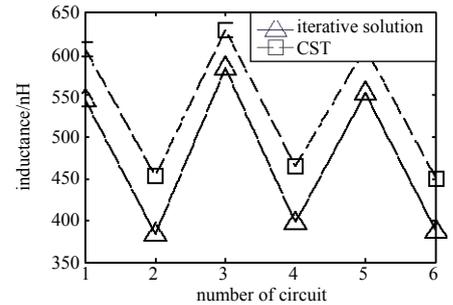


Fig.10 Comparison of calculated inductance by CST and iterative method

图 10 CST 计算电感与迭代计算电感的对比曲线

利用 CST 分析脉冲放电电路电感的优势为不管脉冲放电电路的实际布局多么复杂，都可以通过 CST 粗略计算出电路电感(由于 CST 计算电感时忽略了电路器件给电路电感造成的影响，所以 CST 只能粗略计算电路电感)。但由于 CST 建立导线模型时的局限性，CST 不能计算电路中存在不同线径、不同规格导线时电路的电感，下一步将探索存在不同规格导线时电路电感的计算方法。

4 结论

本文首先根据导线间的磁场分布推导了导线电感的理论公式，分析了导线半径及导线间距对电感的影响，然后分析了基于脉冲放电电路电流迭代求解电路电感方法，最后利用 CST 建模计算了不同电路的电感并将其与基于脉冲放电电路电流迭代求解的电感对比分析。目前由于 CST 建立导线模型时的局限性，CST 不能计算电路中存在不同线径、不同规格导线时电路的电感，下一步将探索存在不同规格导线时电路电感的计算方法。

参考文献：

[1] 曾晗. 大功率两电极气体火花开关的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012. (ZENG Han. Research on high power two-electrode spark gap switch[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2012.)

[2] 任亚东,李世平,颜骥,等. 半导体脉冲功率开关的最新进展[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):771-775. (REN Yadong, LI Shiping, YAN Ji, et al. Recent developments of semiconductor pulsed power switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):771-775.)

- [3] LI Xiaoang,LIU Xuandong,ZENG Fanhui,et al. Study on resistance and energy deposition of spark channel under the oscillatory current pulse[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014,42(9):2259–2265.
- [4] FAIR H D. Electromagnetic launch: a review of U.S. national program[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997,33(1): 502–512.
- [5] ORESHKIN V I,LAVRINOVICH I V. Energy loss in spark gap switches[J]. Physics of Plasmas, 2014,21(4):043513-1–043513-8.
- [6] BELODUBROVSKY R,MIRONOVA T,ERMOLINSKY V,et al. The method of increasing of pulp yield with kraft cooking[C]// 14th IEEE international pulsed power conference. Dallas,Texas,USA:IEEE, 2003:1282–1285.
- [7] GRABOWSKI C,DEGNAN J H,PARKER J V,et al. Parallel triggering and conduction of rail-gap switches in a high-current low-inductance crowbar switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016,44(10):1997–2012.
- [8] 谌怡,夏连胜,王卫,等. 基于光导开关和平板线的固态脉冲功率技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1): 32–36. (SHEN Yi,XIA Liansheng,WANG Wei,et al. Solid-state pulsed power technology based on PCSS and planar lines[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):32–36.)
- [9] 韩旻,邹小兵,张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2010. (HAN Min,ZOU Xiaobing,ZHANG Guixin. Foundation of pulse power technology[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.)
- [10] 冉汉政,曾志斌. 用于 T 型谐振变换器的耦合电感设计与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(2):88–91. (RAN Hanzheng,ZENG Zhibin. Design and simulation of coupled-inductors applied in T-type resonant converter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(2):88–91.)
- [11] PAUL C R. 电磁兼容导论[M]. 2 版. 闻映红,译. 北京:人民邮电出版社, 2007. (PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. 2nd ed. Translated by WEN Yinghong. Beijing:People's Posts and Telecommunication Press, 2007.)
- [12] 杜涛. 脉冲放电电路的仿真[J]. 探测与控制学报, 2004,6(7):87–90. (DU Tao. Simulation analysis of pulse discharge circuit[J]. Journal of Detection & Control, 2004,6(7):87–90.)

作者简介:



刘云龙(1988–), 男, 四川省遂宁市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为开关管研制、电磁兼容.email:whhitlyl@163.com.

尚绍环(1974–), 女, 甘肃省会宁县人, 高级工程师, 主要研究方向为脉冲功率技术及高压新技术.

金大志(1970–), 男, 四川省遂宁市人, 研究员, 主要研究方向为气体开关技术和脉冲功率技术.