

# 脉冲功率源用高耦合度储能电感研究

张超 董健年 张军

(南京理工大学 能源与动力工程学院 南京 210094)

**摘要:** 在电感储能型脉冲功率源中耦合电感是关键。首先从 STRETCH Meat grinder 电路出发, 阐明了高耦合度电感的概念, 然后通过分析影响耦合度的关键因素给出了高耦合度储能电感的模型, 并对耦合电感的电感量和磁场的计算进行了数学推导。为了进一步的了解耦合电感的磁场分布情况, 本文对其进行了有限元仿真, 得到了耦合电感的磁感应强度分布云图和能量分布云图, 考虑到漏磁的存在, 在文章的最后还对耦合电感的漏磁进行了仿真计算。通过本文的研究能够为脉冲功率源用高耦合度储能电感的优化设计提供一定的理论依据。

**关键词:** 脉冲功率源; 耦合电感; 有限元仿真; 磁场

**中图分类号:** TM91    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4099

## Research on high coupling energy storage inductance used for pulse power supply

Zhang Chao Dong Jiannian Zhang Jun

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Coupling inductance is a key factor in inductive storage pulse power supply. Starting from STRETCH Meat grinder circuits, the concept of high coupling inductance is described first in this paper, then high coupling energy storage inductance models are given by analyzing key factors influencing coupling degree, and mathematical derivation is carried out for inductance value and magnetic field calculation of coupling inductance. In order to further understand magnetic field distribution of coupling inductance, finite element simulation is performed against it, and magnetic induction intensity distribution map and energy distribution map of coupling inductance are obtained. In consideration of flux leakage, simulating calculation is conducted for flux leakage of coupling inductance in the end part of this paper. Research work in this paper provides certain theoretical basis for optimization design of the high coupling storage inductance used for pulse power supply.

**Keywords:** pulse power supply; coupling inductor; finite element simulation; magnetic field

## 1 引言

在电磁发射中, 脉冲功率源是核心, 它具有电压高、电流大、功率高、脉冲强的特点, 能够在  $\mu\text{s}$  级时间内产生上百 MJ 的能量来发射弹丸, 大大提高了武器发射的射程和威力<sup>[1]</sup>。如今大力研究的脉冲功率源主要有电感储能型脉冲功率源和电容储能型脉冲功率源, 相比较而言, 电感储能型脉冲功率源因其有更高的储能密度而成为研究的热点<sup>[2]</sup>。美国 IAT (institute for advance technology) 实验室对 meat grinder 基本拓扑进行改进提出了 STRETCH meat grinder 拓扑<sup>[3-5]</sup>, 给出了换流电容电压峰值的表达式。以 2 MJ 炮口动能的电池-电感电磁发射系统为例, 讨论了系统效率和尺寸受电池和电感参数的影响<sup>[6]</sup>, 清华大学于歆杰课题组

研究了 STRETCH meat grinder 三项性能指标的表达式及其受两项系统参数的影响<sup>[7]</sup>。当前国内外对于电感储能型脉冲功率源的研究主要集中在拓扑结构上, 而对其中耦合电感结构和性能的研究相对较少。

## 2 拓扑结构的分析

电感储能脉冲功率源 STRETCH meat grinder 拓扑结构如图 1 所示, 初级电源提供的电压为 6 kV, 电感  $L_1 = 1\ 249\ \mu\text{H}$ , 电感  $L_2 = 321.5\ \mu\text{H}$ , 两电感的耦合系数为 0.974, 放电电阻  $R_2 = 100\ \text{k}\Omega$ , 脉冲电容  $C_1 = 105.2\ \text{mF}$ , 等效负载中电阻  $R_1 = 0.5\ \text{m}\Omega$ , 电感  $L_3 = 1.4\ \mu\text{H}$ 。通过仿真得到电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、负载  $R_1$  以及脉冲电容  $C_1$  的电流波形如图 2 所示。

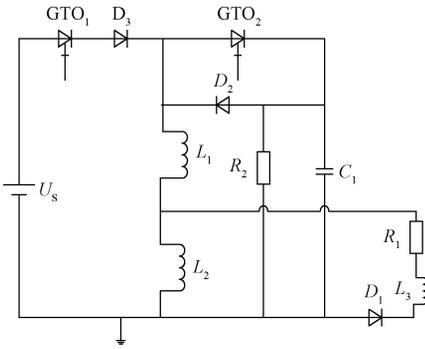


图 1 STRETCH Meat grinder 电路

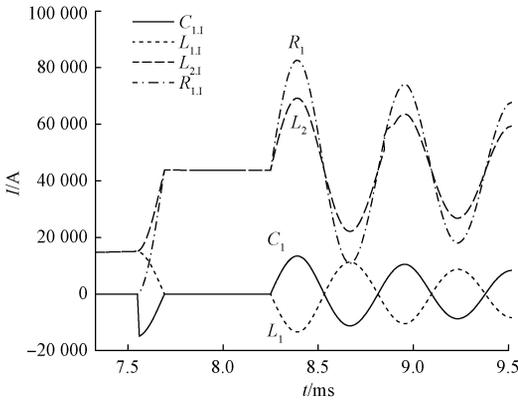


图 2 STRETCH Meat grinder 电流波形

关于此电路的基本原理,在相关文献[4,7]中均有详细的分析,本文不再赘述,此结构的关键是引入了两个电感,借鉴 meat grinder 磁通压缩的原理,利用互感实现了电流的倍增,在设计中,选取  $L_1$  是  $L_2$  的几十倍,这样在 GTO1 断开后在线路  $L_1$ 、 $L_2$  上由于磁链守恒,电感  $L_1$  上的电流减小时,电感  $L_2$  的电流会快速上升,实现将  $L_1$  上的能量大部分传递给  $L_2$ ,正是这种耦合电感的引入,又大大的提高了电感的储能密度和给负载的供能效率。

为了保证拓扑中两电感间能量的高效率传送,就得提高两电感的耦合系数,其中耦合系数可由式(1)表示。

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

从式(1)不难看出,在保证了两电感量的情况下要提高耦合度就得增大互感  $M$ , $M$  的大小与两线圈的匝数、形状、介质的种类及他们间的相对位置有关<sup>[8]</sup>。文献[9]就综合考虑了这几个因数通过两电感线圈的模型推导出了耦合电感间的互感计算公式,

$$M = N_1 N_2 \frac{\mu_0 R r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2 + \cos\alpha \cos\theta_1 \cos\theta_2}{r_{12}} d\theta_1 d\theta_2 \quad (2)$$

式中: $N_1$ 、 $N_2$  为两个电感线圈的匝数, $R$ 、 $r$  为两电感的半径, $\alpha$  为其中一线圈与  $y$  轴的夹角, $r_{12}$  为两电感线圈上电流

元的矢径,显然,当  $\alpha=0$  时尽量减小两电感线圈的矢径就能提高互感,从而增大两电感的耦合系数,根据这种原理使两电感分别由数片如图 4 所示的平面螺旋式电感线圈小单元叠加组成,将两电感根据电感量各分为几组,再将各组依次交互排列,为了绝缘在各层间填充聚碳酸酯,最后封装就得到如图 5 所示的耦合电感。



图 4 耦合电感最小单元



图 5 高耦合度耦合电感

### 3 耦合电感电感量和磁场的计算

#### 3.1 电感量的计算

平面线圈的示意图如图 6 所示<sup>[10]</sup>。

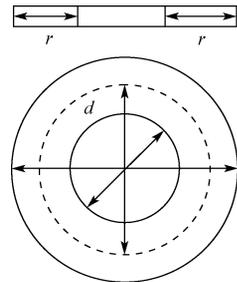


图 6 平面线圈电感示意图

考虑到耦合电感作为耐高温大功率电源用情况<sup>[11]</sup>,根据电感计算手册,电感的计算公式可表示为:

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} \omega^2 d \psi \quad (3)$$

式中: $\mu_0$  为真空中的磁导率, $\omega$  为电感线圈的匝数, $d$  为线圈的平均直径,当  $\rho=r/d$  较小时,可以采用以式(4)求  $\psi$  值:

$$\psi = 4\pi \left[ \left( 1 + \frac{\rho^2}{24} + \frac{11}{2880}\rho \right) \ln \frac{4}{\rho} - \frac{1}{2} + \frac{43}{288}\rho^2 + \frac{1}{150}\rho^4 + \dots \right] \quad (4)$$

当  $\rho = r/d > 0.5$  时,

$$\psi = \frac{(1+\rho)^3}{\rho^2} - (1.7427 + 3.29\gamma^3 \ln \gamma - 2.27\gamma^3 + 0.3702\gamma^5 + 0.0826\gamma^7 + \dots) \quad (5)$$

式中:

$$\gamma = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (6)$$

整个耦合电感的电感量可表示为:

$$L_{\Sigma} = M + L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + \dots \quad (7)$$

式中:  $M$  表示各层线圈的互感的代数和,  $L_1, L_2, \dots$  为各层线圈的自感。

### 3.2 耦合电感磁场的计算

假设耦合电感的每一个小单元均为同轴圆环回路,且沿  $z$  轴均匀对称分布,放电电流在电感截面中均匀分布且瞬时通过每层线圈,这样就可将耦合电感的模型等效为在轴向有一定高度的铜带径向绕制而成,那么在圆柱坐标系  $(\rho, \psi, z)$  中,就可认为径向所包裹的每层线圈是由  $M$  匝细线线圈沿轴向叠加组成,假设细线线圈的半径为  $a$ ,铜带的宽度为  $b_{PM}$ ,通过铜带的电流为  $i_0/m$ ,铜带单位宽度上的细线线圈匝数为  $N(N=M/b_{PM})$ ,线圈的中心坐标为  $(0, 0, h)$ ,在  $z_0$  平面的场点坐标为  $(\rho_0, \psi_0, z_0)$ ,单匝线圈在此平面的矢量磁位为<sup>[12]</sup>:

$$A = \begin{cases} 0, & \rho_0 = 0 \\ A_{\psi} e_{\psi} = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi M} \sqrt{\frac{a}{\rho_0}} f(k) e_{\psi}, & \rho_0 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$f(k) = \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \quad (9)$$

$$k = \sqrt{\frac{4a\alpha}{(\rho_0 + a)^2 + (z_0 - h)^2}}$$

$$E_k = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}} d\alpha$$

式中:  $e_{\psi}$  为圆周向单位向量,  $E_k$  和  $K_k$  分别是  $\alpha$  为模角  $k$  为模数的第一类和第二类全椭圆积分,如果单层铜层的上端面的中心刚好为坐标轴的原点那么就可以由式(8)、(9)得单层铜带单位高度矢量磁位圆周向分量  $A_{\psi}$  为:

$$A_{\psi}(\rho_0, z) = \frac{\mu_0 N i_0 a}{\pi M} \int_0^{\pi/2} (2\sin^2 \alpha - 1) \times \ln \frac{(z_0 + b_{PM}) + \sqrt{\rho_0^2 + a^2 - 2\rho_0 a (2\sin^2 \alpha - 1) + (z_0 + b_{PM})^2}}{z + \sqrt{\rho_0^2 + a^2 - 2\rho_0 a (2\sin^2 \alpha - 1) + z_0^2}} d\alpha \quad (10)$$

柱坐标的旋度为:

$$B = \nabla \times A = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial(\rho A_{\psi})}{\partial z} e_{\rho} + \frac{\partial(\rho A_{\psi})}{\partial \rho} e_z \right] = B_{\rho} e_{\rho} + B_z e_z \quad (11)$$

式中:  $e_z, e_{\rho}$  分别为坐标系中  $z$  向和  $\rho$  向的单位向量。

因此单层铜层的轴向磁感应强度为:

$$B_{\rho} = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi b_{PM}} [g_z(\rho_0, z - z_2) - g_z(\rho_0, z - z_1)] \quad (12)$$

式中:

$$g_z(\rho_0, s) = - \int_0^{\pi} \frac{as(a - \rho_0 \cos \theta) d\theta}{(\rho_0^2 + a^2 - 2\rho_0 a \cos \theta) \sqrt{\rho_0^2 + a^2 - 2\rho_0 a \cos \theta + s^2}} \quad (13)$$

径向磁感应强度为:

$$B_{\rho} = \frac{\mu_0 i_0}{\pi b_{PM}} \sqrt{\frac{a}{\rho_0}} \times \sum_{m=0}^1 \frac{(-1)^m}{k_m} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} k_m^2 \right) K(k_m) - E(k_m) \right] \quad (14)$$

耦合电感的磁感应强度为所有不同半径的单层的铜带各矢量方向磁感应强度之和,可将式(13)的自变量  $s$  用  $z - z_1, z - z_2$  替代并带入到式(12)进行计算,耦合电感的磁感应强度为所有不同半径的单层铜带各矢量方向上磁感应强度之和。

将式(8)中的  $A_{\psi}$  在耦合电感的高度区间  $(z_1, z_2)$  上积分就可得到单层铜带圆周向的矢量磁位分量  $A_h$ 。

$$A_h = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi M} \sqrt{\frac{a}{\rho_0}} \int_{z_1}^{z_2} f(k) dh \quad (15)$$

由于当前对椭圆积分的局限性,为了得到工程计算中较为理想的数值,在式(9)中仅取  $E_k, K_k$  椭圆积分的前3项进行计算,得:

$$E_k = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{1}{4} k^2 - \frac{3}{64} k^4 \right) \quad (16)$$

$$K_k = \frac{\pi}{2} \left( 1 + \frac{1}{4} K^2 + \frac{9}{64} K^4 \right) \quad (17)$$

综上所述,由式(12)~(14)可得耦合电感磁感应强度分量,由式(9)、(15)、(14)和(17)可得耦合电感单层铜带的矢量磁位,将不同半径的铜带的矢量磁位进行求和就可得到耦合电感的矢量磁位。

## 4 耦合电感磁场仿真

### 4.1 仿真模型的建立

为了进一步分析耦合电感中磁场的分布情况,本文还通过仿真,对其进行了有限元分析,仿真的耦合电感由电感  $L_1, L_2$  交互相隔组成,采用的材料为铜片,其中电感  $L_1$  由13片厚度为4 mm(图7中较矮的小矩形)的小单元串联而成,电感  $L_2$  由6片厚度为8 mm(图7中较高的小矩形)的小单元串联而成,加载的激励如图2所示。

### 4.2 仿真结果的分析

通过仿真得到了磁场强度和能量分布云图如图8~9所示。

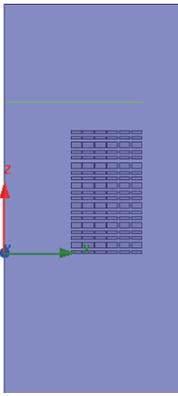


图 7 耦合电感的仿真模型

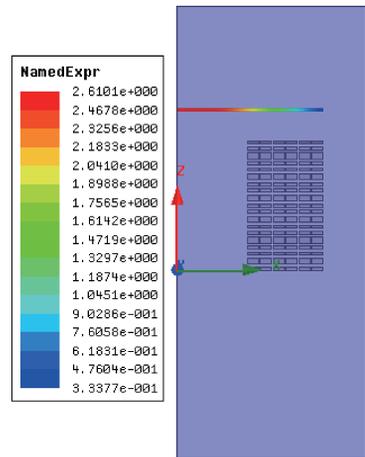


图 10 漏磁磁感应强度

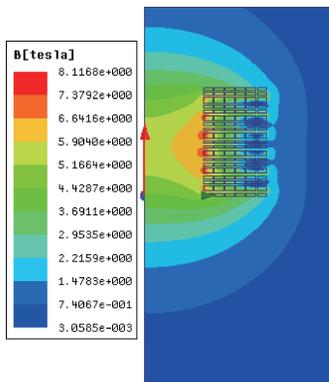


图 8 磁感应强度分布云图

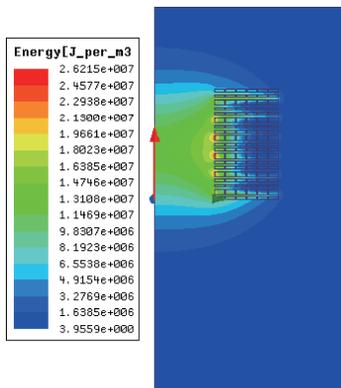


图 9 磁场能量分布云图

从磁感应强度分布云图可以看出,最大磁感应强度主要集中在耦合电感的内侧中部,为 8.116 8 T。从磁场能量分布云图可以看出,其能量密度分布相对较为均匀,最大处为  $2.6215 \times 10^7 \text{ J/m}^3$ ,且主要分布在电感  $L_2$  处,这与实际相符,但从线圈端部的能量密度分布来看,磁场对外存在漏磁。为了分析耦合电感对外的漏磁,本文选取了距离电感端部 4 cm 处直线作为计算路径对漏磁的磁感应强度进行了计算,计算结果如图 10 所示,可以看出,最大漏磁磁感应

强度主要集中在耦合电感的中心轴线上,为 2.61 T。

## 5 结 论

通过 STRETCH Meat grinder 电路阐明了高合度电感的概念,并分析了影响耦合度的关键因素,由此得到了较为理想的耦合电感模型。对得到的耦合电感模型的电感量和磁场的计算进行了数学推导。利用仿真软件对耦合电感的磁场进行了有限元分析,最大磁感应强度为 8.116 8 T,主要集中在耦合电感的内部中侧,最大能量密度为  $2.6215 \times 10^7 \text{ J/m}^3$ ,主要分布在电感  $L_2$  处。最大漏磁出现在耦合电感的中心轴线上为 2.61 T。

## 参 考 文 献

- [1] 俞小华,董健年,王浩,等. 电磁发射用脉冲电抗器端面磁力计算[J]. 弹道学报,2013,25(2):106-110.
- [2] 丁健民,于敬杰,李臻. 电感储能型脉冲电源系统的半解析参数分析[J]. 电工电能新技术,2015,34(7):11-15.
- [3] LINDNER K, LONG J, GIROGI D, et al. A meat grinder circuit for energizing resistive and varying inductive loads(Em Guns)[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1986,22(6):1591-1596.
- [4] SITZMAN A, SURLS D, MALLICK J. Design, construction, and testing of an inductive pulsed-power supply for a small railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(1):270-274.
- [5] DIERKS E, MCNAB I R, MALICK J A, et al. Battery-inductor parametric system analysis for electromagnetic guns [J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2011,39(1):268-274.
- [6] MA SH G, YU X J, LI ZH. Determining key parameters for the STRETCH meat grinder circuit[C]. 17th IEEE International Symposium on

- Electromagnetic Launch Technology, la Jolla, USA, 2014:1-6.
- [7] 初祥祥,于歆杰,刘秀成.三种电感储能型脉冲电源电气性能的比较[J].电工电能新技术,2012,31(3):20-24.
- [8] 王素娇.磁耦合线圈互感系数M的测量[J].郑州铁路职业技术学院学报,2002,14(14):43-44.
- [9] 殷莉.仿真人体环境中RF MEMS电感耦合特性实验研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [10] 苏成.小型化脉冲电感的研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [11] 樊亚坤,林国钧,宗艳波.耐高温大功率开关电源用电感器设计[J].电子测量技术,2011,34(10):72-75.
- [12] TSUKERMAN I A, KONRAD A, LAVERS J D. A method for circuit connections in time-dependent eddy current problems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28 (2): 1299-1302.

### 作者简介

**张超**(通讯作者),1989年出生,在读硕士研究生,研究方向为电力电子及其电力传动。

E-mail:2723387290@qq.com

**董健年**,1959年出生,研究员,主要研究方向为脉冲功率源技术。

E-mail:njustdong801@163.com

**张军**,1969年出生,副研究员,主要研究方向为智能建筑、监测监控、分布式控制系统。

E-mail:zhtell800@163.com

(上接第15页)

- [7] 杜少通,伍小杰,周娟,等.一种采用虚拟磁链模型预测的新型PWM算法[J].中国电机工程学报,2015(3):688-694.
- [8] 张冀,徐科军.矢量控制电动执行器死区补偿新方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):272-281.
- [9] 马鸿雁,孙凯,魏庆,等.PWM逆变器相电流重构研究与误差分析[J].电工技术学报,2011,26(1):108-114.
- [10] 李云辉.永磁同步电机相电流重构技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:21-30.
- [11] 顾义坤,倪风雷,杨大鹏,等.基于母线电流传感器的相电流重构方法[J].电机与控制学报,2009,13(6):811-816.
- [12] 尹忠刚,钟彦儒,刘静.基于AC电压估计和电流重构的PWM整流器研究[J].电力电子技术,2009,43(10):77-79.
- [13] 郑征,景小萍,基于矢量控制的PWM整流器研究[D].郑州:河南理工大学,2010:23-30.
- [14] 王帆.EHPS驱动系统与单电阻采样相电流重构技术的研究[D].杭州:浙江大学,2013:78-84.
- [15] 田冠枝,黄玉平,司宾强.新型PWM波故障保护与诊断电路设计[J].电子测量技术,2015,38(9):125-127.
- [16] 张益齐,徐祯祥,闫丽媛.基于DSP的空间电源变换器的冗余调压设计[J].电子测量技术,2015,38(9):66-68.

### 作者简介

**郑征**,1965年出生,河南理工大学电气工程与自动化学院,工学博士,教授,研究方向为电力电子与电气传动。

E-mail:zhengzh@hpu.edu.cn

**王鹏超**,1989年出生,河南平顶山人,河南理工大学电气工程与自动化学院,工学硕士,研究方向为电力电子与电气传动。

E-mail:752169138@qq.com