

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.04.025

脉冲强磁场装置原理分析及仿真

王锋¹, 米东¹, 徐章遂¹, 曲伟良²

(1. 军械工程学院 电气工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 63981 部队, 湖北 武汉 430311)

摘要: 在脉冲强磁场设计中, 为了更好地提高磁场强度, 首先通过对放电回路及其振荡特性的分析, 根据预计得到的磁场指标, 推导 RLC 放电回路的主要参数, 再将得到的参数带入回路中, 仿真线圈产生的磁场。结果表明, 与设计的磁场指标基本相符, 对脉冲强磁场装置的实施提供了重要的理论依据。

关键词: 脉冲强磁场; RLC; 线圈; 仿真; 放电回路; 振荡

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Analysis and Simulation About Pulse High Magnetic Field Generator

WANG Feng¹, MI Dong¹, XU Zhang-sui¹, QU Wei-liang²

(1. Dept. of Electric Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 63981 Unit of PLA, Wuhan 430311, China)

Abstract: In pulse high magnetic field design, in order to advance the magnetic field intensity, analyze the discharge circuit and its surge character at first. According to the scheming magnetic field index, derivate the main parameters in RLC discharge circuit. Then take the parameters into the circuit and simulate the magnetic field of the loops. The result matches the designed magnetic index. These provide important theory warranty for setting up pulse high magnetic field.

Keywords: High magnetic field; RLC; Loop; Simulate; Discharge circuit; Surge

0 引言

自 19 世纪 20 年代 Ampere 制造出世界上第一块电磁铁以来, 磁场就成为现代科学研究的基本工具。尤其是将强磁场应用于科学研究后, 发现了很多新现象和新效应^[1-2], 磁场的强度也不断提高, 强磁场已经成为许多重要科学研究的工具, 被广泛应用于国防、民生领域, 已经成为各国研究的热点。

脉冲强磁场技术是集磁体设计与制造、强制冷系统和大功率电源等为一体的综合性技术。脉冲磁场的产生就是法拉第电磁感应现象。磁体主要包括导体线圈、绝缘层和加固层几大部分。由于磁感应强度非常大。在导体中产生的应力也特别大, 故采用了特殊的线圈加固技术。在磁场发生时, 向线圈中通入几百千安甚至几千千安的电流, 就可在线圈中心得到几十甚至上百特斯拉的强磁场, 不过通入的电流持续时间非常短, 只有几毫秒甚至几微秒。

在脉冲强磁场设计中, 要得到更高磁场强度, 就会碰到很多的问题, 其中最主要的就是温度和应力, 通电电流、线圈材料的电导率、抗拉强度等。故在既定磁场强度前提下, 需对放电回路的参数推导仿真, 确定回路所需的基本电参数, 再由基本参数确定强磁体的结构、材料及相应的辅助处理方法。

1 原理分析及回路参数仿真

要产生强度较大的磁场, 通常采用通电线圈的方法, 以高压电容作为储能元件对线圈放电, 通过电—磁转化得到高强度的磁场。根据毕奥—萨法尔定律, 线圈中电流的大小直接决定了磁场的强度, 因此, 要想得到预定的磁场强度就必须保证放电回路的电流达到要求^[3-4]。

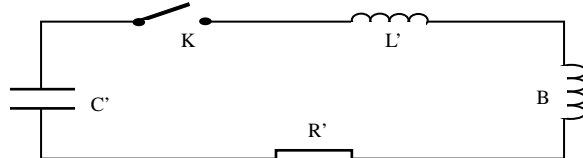


图 1 放电回路等效电路

脉冲磁场的产生实际上就是法拉第电磁感应现象, 脉冲电流通过线圈放电产生脉冲磁场^[5-6]。通常脉冲强磁场发生装置都是采用电容器作为电源, 线圈和电路中的分布电感构成回路的总电感。这样, 一个脉冲强磁场产生装置实等效成一个 RLC 电路, 如图 1。开关 K 合上后回路中的电压关系可表示为:

$$u_L + u_R + u_C = 0 \tag{1}$$

由于磁场的强度直接由放电电流决定, 故在等效的 RLC 回路中就必须研究放电电流 i 的性质。根

收稿日期: 2009-12-20; 修回日期: 2009-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (50475053)

作者简介: 王锋 (1980-), 男, 山西人, 博士研究生, 从事强电磁场技术及其信号处理研究。

据 RLC 电路的原理, 可将式 (1) 表示为关于 i 的二阶微分方程:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0 \quad (2)$$

式 (2) 为齐次微分方程, 方程的通解为:

$$i = e^{\gamma t} \quad (3)$$

γ 必须满足:

$$L \gamma^2 + R \gamma + \frac{1}{C} = 0 \quad (4)$$

$$\gamma = -\alpha \pm \beta$$

$$\text{其中, } \alpha = \frac{R}{2L}, \quad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

当 $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ 时, 脉冲磁场放电回路电流随时间呈阻尼振荡, 此时 $\beta = j\omega$, 为虚数, 则:

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

此时式 (4) 有 2 个复数根:

$$\gamma_1 = -\alpha + j\omega \text{ 和 } \gamma_2 = -\alpha - j\omega$$

这种情况下, 式 (2) 的通解为:

$$i = A e^{(-\alpha + j\omega)t} + B e^{(-\alpha - j\omega)t} = e^{-\alpha t} (A e^{j\omega t} + B e^{-j\omega t})$$

$$\text{设 } K = 2\sqrt{AB}, \quad \varphi = \frac{1}{2j} \ln \frac{A}{B}, \quad A = \frac{K}{2} e^{j\varphi},$$

$$B = \frac{K}{2} e^{-j\varphi} \text{。则:}$$

$$i = \frac{K e^{-\alpha t}}{2} [e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)}] = K e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, 这个解是一个周期振荡衰减的函数, 振荡频率为:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (6)$$

根据对微分方程解的分析, 代入初始条件, 电流的表达式为:

$$i(t) = \frac{U_c}{L\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t \quad (7)$$

其中, U_c 为预知电容 C 上的直流电流。式 (7) 中对 t 求导, 使得 $\frac{di(t)}{dt} = 0$, 求出电流取得最大值对应的时间表达式, 得:

$$t = \frac{\arctg \frac{2L\omega}{R}}{\omega} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7) 得:

$$i_{\max} = \frac{2U_c}{\sqrt{R^2 + 4L^2\omega^2}} e^{-\frac{R \arctg \frac{2L\omega}{R}}{2L\omega}}$$

由毕奥—萨法尔定律, 线圈圆心处磁场表达式:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r} \quad (9)$$

式中 r 为线圈半径。预计得到的磁场峰值指标 B 为确定值, 则此时:

$$i = \frac{2rB}{\mu_0} \quad (10)$$

即:

$$i_{\max} = \frac{2U_c}{\sqrt{R^2 + 4L^2\omega^2}} e^{-\frac{R \arctg \frac{2L\omega}{R}}{2L\omega}} = \frac{2rB}{\mu_0} \quad (11)$$

电流的上升沿宽度为设计指标 T , 可以表示为:

$$T = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (12)$$

回路中的分布电容相对于放电电容可以忽略不计, 则在选定放电电容 C 的情况下, 联立式 (11)、式 (12) 就可以解得 R 、 L 。

2 磁场仿真

由预定的磁场指标 (线圈中心磁场强度、脉冲上升沿宽度等设计指标), 通过推导可以确定放电回路的主要参数, 为实际装置的构建提供依据。同时, 在计算得到回路的各项参数后, 再对放电电流的波形及脉冲磁场进行仿真。通过上述推导, RLC 电路中放电电流的表达式为式 (7), 代入推导求出的 R 、 L 值后, 式 (7) 变成了时间 t 的函数, 可以得到 $i(t)$ 随时间 t 的变化关系。由毕奥—萨法尔定理, 通过线圈的电流与磁场呈线性关系, 根据式 (9), 可得到中心磁场的变化曲线如图 2。

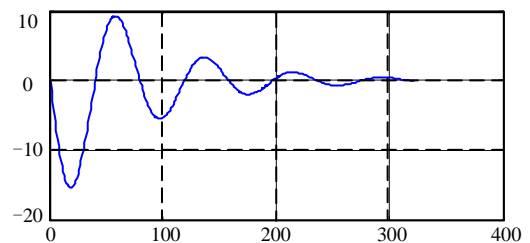


图 2 电流仿真及磁场仿真波形

3 线圈参数分析

为了产生强的磁场, 需要有很大的电流通过线圈, 这会对线圈产生巨大的应力, 要求线圈具有很强的刚性, 在实际的线圈制作中, 采用钢做成具有一定壁厚和长度的厚壁线圈, 确保在通过大电流时线圈不变形, 并且可以多次使用。要研究厚壁线圈, 首先研究具有一定长度的薄壁线圈的磁场情况。

图 3 是一个线圈的示意图, 线圈内、外径分别为 R_1 和 R_2 , 长度为 $2b$, 导线中电流为 I 。

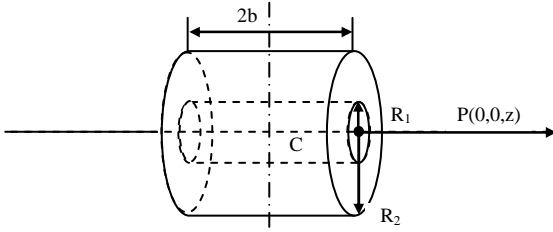


图 3 有限长厚壁线圈

线圈中的电流密度为:

$$j = \frac{I}{2b(R_2 - R_1)} \quad (13)$$

则厚度为 dr 的线圈中流过的电流为:

$$dI = jdr = \frac{Idr}{2b(R_2 - R_1)} \quad (14)$$

根据毕奥—萨伐尔定律, 线圈轴线上的磁场表达式为:

$$B = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15), 则厚度为 dr 的线圈轴线上的磁场表达式为:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4b(R_2 - R_1)} \left(\frac{z+b}{\sqrt{r^2 + (z+b)^2}} - \frac{z-b}{\sqrt{r^2 + (z-b)^2}} \right) dr \quad (16)$$

线圈可看作无穷多个厚度为 dr 的线圈组成, 故将式 (16) 沿径向方向积分, 得线圈在轴线上磁场:

$$\begin{aligned} B(0,0,z) &= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu_0 I}{4b(R_2 - R_1)} \left(\frac{z+b}{\sqrt{r^2 + (z+b)^2}} - \frac{z-b}{\sqrt{r^2 + (z-b)^2}} \right) dr \\ &= \frac{\mu_0 I}{4b(R_2 - R_1)} \left[(z+b) \ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (z+b)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (z+b)^2}} \right) \right. \\ &\quad \left. - (z-b) \ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (z-b)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (z-b)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

在磁体中心处, $z=0$, 如果令:

$$\begin{aligned} \alpha &= R_2 / R_1 & \beta &= b / R_1 \\ F(\alpha, \beta) &= \beta \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

则磁体中心处的磁场可以写成:

$$B(0,0,0) = \mu_0 j R_1 F(\alpha, \beta) \quad (19)$$

$F(\alpha, \beta)$ 是厚壁线圈的零阶磁场系数。从式(19)中可以看出, 一个线圈的零阶磁场系数仅与这个线圈的几何形状有关, 而与尺寸大小无关^[5]。其大小

表征这个线圈产生磁场的能力强弱。在相同的电流密度下, 零阶磁场系数越大, 线圈产生的磁场也越大^[2]。如果假定线圈内电流密度 j 和导线电阻率 ρ 保持恒定, 则线圈单位体积内的功耗为:

$$dW = (jdS)^2 \rho \frac{2\pi r}{dS} = j^2 \rho 2\pi r dS = j^2 \rho dV$$

由此得到整个线圈的功耗为:

$$W = \int dW = j^2 \rho \int dV = 2j^2 \rho R_1^3 \pi \beta (\alpha^2 - 1) \quad (20)$$

由上式求得:

$$j = \sqrt{\frac{1}{2\pi\beta(\alpha^2 - 1)} \left(\frac{W}{\rho R_1^3} \right)} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (19) 得到:

$$B(0,0,0) = \mu_0 \sqrt{\frac{W}{\rho R_1}} G(\alpha, \beta) \quad (22)$$

式中:

$$G(\alpha, \beta) = \frac{1}{5} \beta \sqrt{\frac{2\pi\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right) \quad (23)$$

其中, $G(\alpha, \beta)$ 为线圈的效率系数, 表征这个线圈产生磁场的效率高。它仅与线圈的几何形状有关, 而与尺寸无关。在相同的功耗下, $G(\alpha, \beta)$ 因子越大的线圈产生的磁场强度越大。图 4 是均匀绕组线圈 $G(\alpha, \beta)$ 因子的等值线。由图 4 可以看出: 在值 0.7 线上的 α, β 使 $G(\alpha, \beta)$ 将达到最大值, 这些几何结构的线圈产生的磁场强度最大。要产生给定的磁场强度, 这种线圈消耗的能量最小。

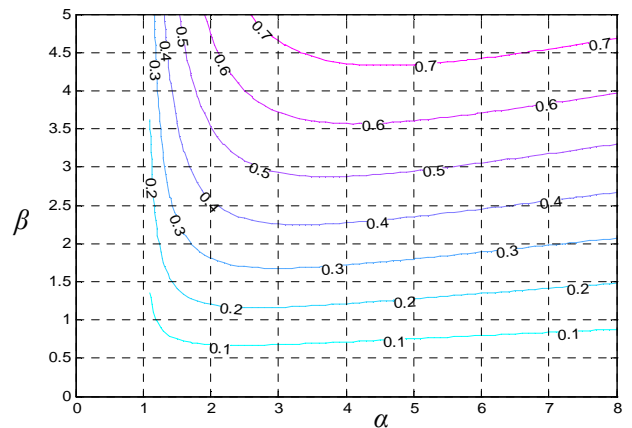


图 4 线圈效率系数等值线

4 结论

脉冲强磁场的产生装置本质是 RLC 放电回路, 但实际中是复杂的系统^[4-5], 通过预计磁场指标, 推导估计系统的主要参数。根据求得的参数对磁场仿

真, 验证磁场的指标。脉冲磁场的设计是对磁场线圈的。回路总电阻和总电感可由式 (11)、式 (12) 确定。在实际的磁场产生装置中, 线圈的电阻和电感可通过测量得到, 总电阻和电感减去线圈电阻和电感, 就得到放电回路应具有电阻和电感。同时, 通过对线圈磁场的仿真, 得到有关线圈效率的线圈形状参数。这些都对脉冲强磁场装置的实施提供了有力的理论基础。

参考文献:

[1] Ritz Herlach, Oboru Miura. High magnetic fields science

and technology[M]. USA: World Scientific Publishing, 2003.
 [2] 彭涛. 脉冲强磁体分析设计的理论与实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 13-26.
 [3] 王锋, 米东, 徐章遂. 基于法拉第电磁感应法的脉冲强磁场测量方法[J]. 高电压技术, 2008, 33(4): 674-677.
 [4] 秦曾衍. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000.
 [5] 韩英杰, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲电压的波形重建[J]. 强激光与粒子束, Vol.16, No.4 Apr, 2004. 514-516.
 [6] Miura N, Kido G, Herlach F, et al High magnetic field science and technology[M]. New York: World scientific Publishing Co Pte Ltd., 2003.
