

磁偶极子电磁场计算及仿真

王 震, 刘美全, 米 东, 徐章遂

(军械工程学院电气工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 在对称线圈上施加强脉冲电流, 在脉冲电流的激励下, 线圈中产生感应脉冲磁场, 从而实现同极性磁场撞击。在撞击过程中, 磁能会以一种波的形式激发出去, 从而产生激磁波。激磁波是一种磁性波, 其能量主要通过磁场的变化进行传递。利用有限元的方法对对称线圈的内部外部分别进行仿真, 讨论并分析了点磁场在空间和时间上的变化。

关键词: 激磁波; 强脉冲磁场; 单匝线圈; 有限元

Electromagnetic field calculation and emulation of magnetic dipole

WANG Zhen, LIU Mei-quan, MI Dong, XU Zhang-sui

(Department of Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: When pulsed electricity is transiting in symmetrical coils, with the power of pulsed electricity, there will be two inductive pulsed magnetic fields and strike together. This magnetic energy explodes in the way of wave, and produces shock magnetic impulse wave (SMIW). Shock magnetic impulse wave (SMIW) is one kind of magnetism wave, its energy transfers mainly by magnetic field transformation. With the finite element this paper simulates the inside and outside magnetic field of symmetrical coils, analyzes the magnetic field transformation in space and time.

Key words: shock magnetic impulse wave; high plus magnetic field; single turn coil; finite element

0 引言

中国人民解放军军械工程学院徐章遂教授在完成国家自然科学基金资助项目(59475088)研究中发现两块磁铁在外力作用下,使其同极性端相撞,磁能会以一种波的形式激发出去,并把这种磁性波命名为激磁波。由于磁铁表面磁场强度较低,可施加的推动力有限,磁极撞击时的速度不可能太高,因此,产生的激磁波强度仍处于一个较低的水平。为此采用电磁式激发方式产生激磁波,在对称线圈上施加强脉冲电流激励来产生强脉冲磁场,从而实现同极性磁场撞击,从而实现磁能的激射。这种方式产生的激磁波强度大大提高。电磁式激发装置采用储能电容器组对单匝线圈放电获得强脉冲磁场,用此方法可产生几十甚至几百特斯拉量级的强脉冲磁场。本研究对两个对称单匝线圈同时施加强脉冲电流激励来产生强脉冲磁场,并对产生的脉冲磁场进行仿真。

1 磁偶极子产生的电磁场分析

磁基本振子就是理想的磁偶极子,如图1所示。任何载流细导线回路L都可看成一个磁偶极子。注意回路L不能翘曲,即回路L应该是某任意平面内的闭合曲线。当L趋于零,就过度到理想磁偶极子。磁基本振子如下图1所示,是一个在 $x-y$ 平面上半径为 a 的细导线小圆环。导线的线径可忽略,导线上电流可用线电流近似。圆环上载有高频时谐电流 $i(t) = J_m \cos(\omega t + \varphi)$,故其相量表示是 $I = J_m e^{j\varphi}$,圆环半径 a 比波长 λ 小得多,即 $a \ll \lambda$,故可假设圆环上任何地方电流的振幅和相位处处相等。

该磁基本振子的偶极矩 \vec{m} 定义为

$$\vec{m} = I \vec{S} = I S \vec{z}_0 \quad (1)$$

式中, I 是复数表示的电流, S 是回路L的有向面积,

收稿日期: 2010-10-08

作者简介: 王震(1982-),男,博士研究生,从事测试计量技术及仪器专业方面的研究工作。

S 的方向与 L 的绕向满足右手螺旋关系。

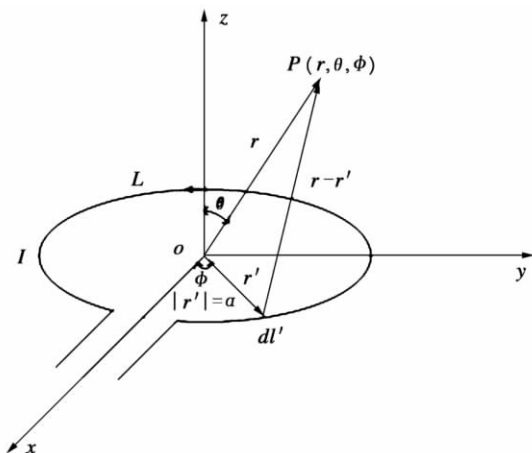


图 1 磁基本振子

因为 S 在 $x-y$ 平面, 且逆时针转, 故 S 的方向就是坐标轴 z 的正方向 \vec{z}_0 。

要求解图 1 所示的磁基本振子 m 辐射的电磁场可以先求出 m 产生的矢量位 A , 然后求磁场强度 H 和电场强度 E 。

根据图 1, 磁基本振子 m 产生的矢量位 A 为

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu I}{4\pi} \int_L \frac{e^{jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d\vec{l}' \quad (2)$$

$$\text{令 } g(r) = \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3)$$

所以式(2)可写成

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu I}{4\pi} \int_L g(|\vec{r}-\vec{r}'|) d\vec{l}' \quad (4)$$

根据矢量分析

$$g(|\vec{r}-\vec{r}'|) = g(r) - \vec{r}' \cdot \nabla g(r) + \dots \text{又因} \int_L d\vec{l}' = 0$$

$$\text{所以 } \vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu I}{4\pi} \int -\vec{r}' \cdot \nabla g(r) d\vec{l}' \quad (5)$$

$$\text{而 } \vec{r}' = a \vec{\rho}_0 = a(\vec{x}_0 \cos \varphi' + \vec{y}_0 \sin \varphi')$$

$$d\vec{l}' = d\vec{r}' = \vec{\varphi}'_0 a d\varphi' = a(-\vec{x}_0 \sin \varphi' + \vec{y}_0 \cos \varphi') d\varphi'$$

$$\nabla g(r) = \vec{r}_0 \left(-jk - \frac{1}{r} \right) g(r)$$

$$-\vec{r}' \cdot \nabla g = \vec{\rho}'_0 \cdot \vec{r}_0 \left(jka + \frac{a}{r} \right) g(r)$$

$$\vec{\rho}'_0 \cdot \vec{r}_0 = \sin \theta \cos(\varphi - \varphi')$$

于是式(5)

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu I a^2}{4\pi} \left(jk + \frac{1}{r} \right) g(r) \sin \theta \int_{-\pi \cos(\varphi - \varphi')}^{\pi(-\vec{x}_0 \sin \varphi' + \vec{y}_0 \cos \varphi')} d\varphi' =$$

$$\frac{\mu I a^2}{4\pi} \left(jk + \frac{1}{r} \right) g(r) \sin \theta \cdot \pi (\sin \vec{x}_0 \sin \varphi + \vec{y}_0 \cos \varphi) = \text{Publishing House. All rights reserved. } \text{http://www.cnki.net} \quad (13)$$

$$\vec{\varphi}_0 \frac{\mu I S}{4\pi} \left(jk + \frac{1}{r} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \quad (6)$$

式中, $S = \pi a^2$ 为环的面积。考虑到关系是 $\vec{z}_0 \times \vec{r}_0 = \vec{\varphi}_0 \sin \theta$, 并利用式(4), 写出 A 的一般表达式为

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1 + jkr}{4\pi} e^{-jkr} \vec{m} \times \vec{r} \quad (7)$$

将式(6)代入式 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$

得到

$$\vec{H} = \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu} = \nabla \times \left[\vec{\varphi}_0 \frac{IS}{4\pi} \left(jk + \frac{1}{r} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \right]$$

$$\text{即 } \vec{H} = -\frac{ISk^2}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \left\{ \vec{r}_0 \left[\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] 2 \cos \theta + \vec{\theta}_0 \left[1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] \sin \theta \right\} \quad (8)$$

因为小电流环环上的电流处处等幅同相, 环本身又构成闭合回路, 不会造成电荷的宏观堆积, 故小电流环产生的标量位 $\Phi = 0$, 这样将式(6)代入式

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla \Phi$$

就可得到电场强度:

$$\vec{E} = \vec{\varphi}_0 \eta \frac{ISk^2}{4\pi} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \quad (9)$$

磁基本振子(载流细导线圆环)可等效为相距 Δl , 两端磁荷分别为 $+q_m$ 和 $-q_m$ 的磁偶极子, 其偶极矩

$$\vec{m} = q_m \Delta \vec{l} = q_m \Delta l \vec{z}_0 = IS \vec{z}_0 \quad (10)$$

由此得到磁基本振子的磁流

$$i_m = \frac{dq_m}{dt} = \frac{S}{\Delta l} \frac{di}{dt} = \frac{S}{\Delta l} \frac{d[J_m \cos(\omega t + \varphi)]}{dt}$$

其对应的磁流复量为

$$I_m = j\omega \frac{S}{\Delta l} I, (I = J_m e^{j\varphi}) \quad (11)$$

如果定义磁偶极子对应的磁流元为 $I_m \Delta l$, 那么它与电流环关系为

$$I_m \Delta l = j\omega SI$$

$$\text{或 } IS = \frac{I_m \Delta l}{j\omega} = \frac{(\mu I_m) \Delta l}{jk\eta}$$

式中 $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ 。将上式代入式(8)(9)得到

$$\vec{H}_r = \vec{r}_0 jk \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (\mu I_m) \Delta l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \left[\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] 2 \cos \theta \quad (12)$$

$$\vec{H}_\theta = \vec{\theta}_0 jk \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (\mu I_m) \Delta l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] \sin \theta$$

$$\vec{E}_\varphi = -\vec{\varphi}_0 jk(\mu I_m) \Delta l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) \sin\theta \quad (14)$$

其中, $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$, ω 为角频率, μ 为相对磁导率, ϵ 为相对介电常数, I 为电流幅值, r 为空间任意一点到磁偶极子中心的距离。

2 两对称线圈间的磁场分布

如图 2 所示, 两线圈距坐标原点为 $h/2$, 当 $r \neq 0$ 时, 一个线圈的磁场各分量为

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\mu_0 I (z-h)}{2\pi r \sqrt{(R+r)^2 + (z-h)^2}} \\ &\quad \left[\frac{R^2 + r^2 + (z-h)^2}{(R+r)^2 + (z-h)^2} Q(k) - K(k) \right] \\ B_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} B_z &= \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{(R+r)^2 + (z-h)^2}} \\ &\quad \left[\frac{3R^2 + r^2 + (z-h)^2}{(R-r)^2 + (z-h)^2} Q(k) - K(k) \right] \end{aligned}$$

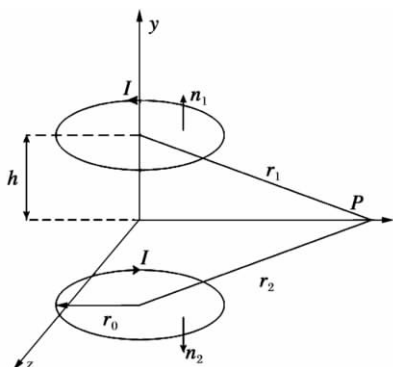


图 2 等效磁偶极子模型

当 $r=0$ 时, $B_\varphi = B_r = 0$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{[a^2 + (z-h)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

根据对称性可以得出另一线圈的磁场分布, 然后根据叠加原理, 可以求得两线圈通入相反方向电流时, 在两线圈间的空间磁场分布。

因为圆环线圈产生的磁场为轴对称磁场, 所以采用二维场来分析, 建模中涉及的参数如下:

圆环半径为 11mm, 两圆环之间的距离为 4mm, 圆环线圈的线径为 0.5mm, 空气的相对磁导率设为 1, 交流线圈相对磁导率也设为 1。

模型边界条件有: 磁通量垂直, 磁通量平行, 周期性对称, 偶对称, 奇对称。

在 2D 交流和瞬态分析中采用磁位方法 (MVP), 磁通量密度 (B) 等于矢量势 (A) 的旋度。

即 $B = \text{Curl}(A)$ 。

对于二维情况, A 只有 Z 方向分量, 在 ANSYS 中表示为 “AZ” 自由度。

模型有二种边界条件描述

Dirichlet 条件 (AZ 约束): 磁通量平行于模型边界。

Neumann 条件 (自然边界条件): 磁通量垂直于模型边界。

加载脉冲电流幅度为 300kA, 波形如图 3 所示的阶跃信号, 采用电流波形如图 4 所示, 仅只考虑一个波头的影响, 具体函数表达式为,

$$I(t) = A \cos \left[\frac{\pi}{\tau} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] [\varepsilon(t) - \varepsilon(t - \tau)]$$

幅值为 $A = 5 \times 10^5 \text{ A}$, 时间常数 $\tau = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

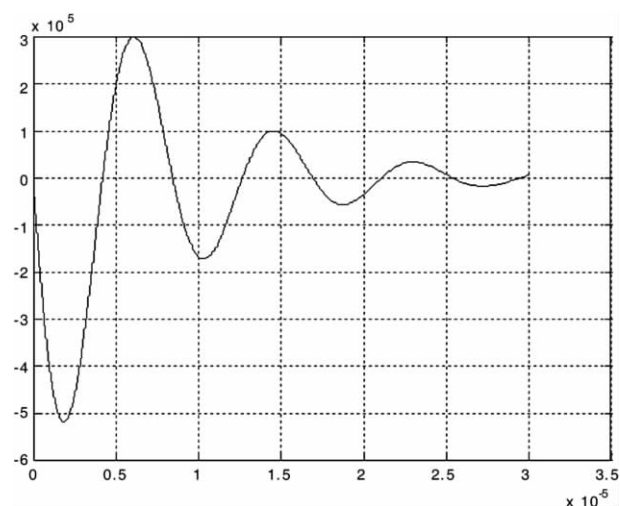


图 3 脉冲电流波形

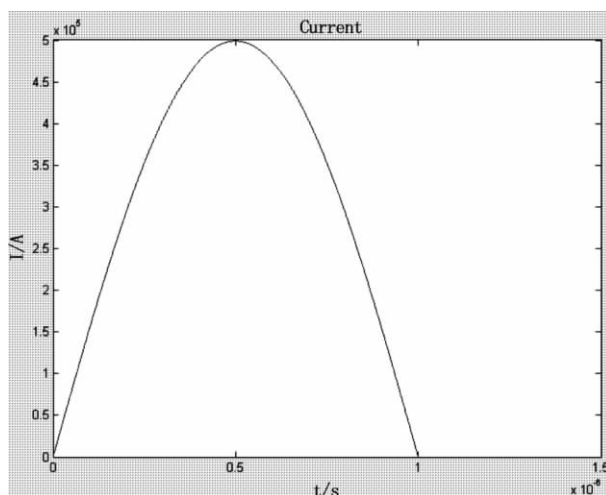


图 4 脉冲电流波头

①当 $t = 1 \mu\text{s}$ 时, 沿 z 轴方向的磁场分布情况, 如图 5 所示。

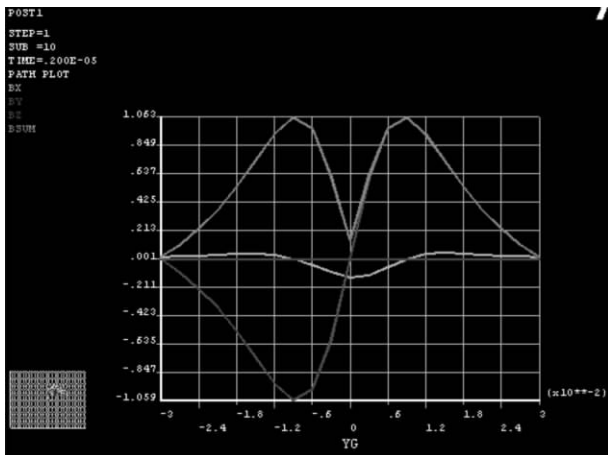


图5 磁场z轴方向分布图

②当 $t = 1\mu\text{s}$ 时,沿 r 轴方向的磁场分布情况,如图6所示。

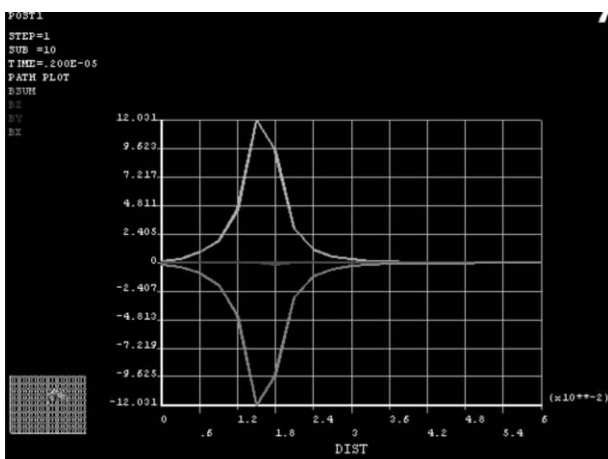


图6 磁场r轴方向分布图

③当 $t = 1\mu\text{s}$ 时,沿 $z = 0.0005\text{m}$ 且与 r 轴平行方向的磁场分布情况,如图7所示。

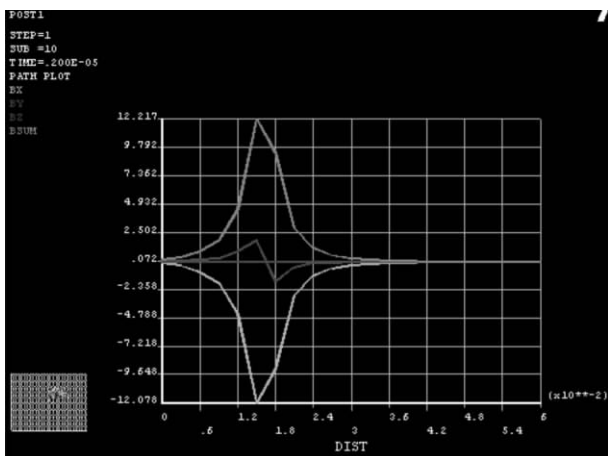


图7 磁场沿r轴平行方向分布图

从以上对比可以看出:两种结果在时间空间上的分布趋势是基本相同的;沿轴线上磁场基本上相等,差别甚微;采用偶极子理论计算结果可以看出越靠近线圈,磁场越大,变化也越激烈,是由于采用偶

极子理论时,对线圈做了理想化处理,在线圈所在点产生奇点,故使场强很大,在 ANSYS 中可以通过改变线径,使线径足够小来模拟奇点情况,当减小线径时线圈附近的磁场明显增大;线圈附近剖分越密,磁场强度的大小也有明显增加。

用 ANSYS 分析结果有一定的可信度。

有磁场计算公式可知,上侧圆环产生的矢量磁位为:

$$A(r, \varphi, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r \sqrt{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \{ [a^2 + r^2 + (z-h)^2] K(k) - [(r+a)^2 + (z-h)^2] E(k) \} e_\varphi$$

$$\text{其中, } k = \sqrt{\frac{4ra}{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \leq 1$$

$K(k)$ 、 $E(k)$ 分别为以 k 为模数的第一类和第二类全椭圆积分。

所以任意点的矢量磁位为:

$$A(r, \varphi, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r \sqrt{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \{ [a^2 + r^2 + (z-h)^2] K(k) - [(r+a)^2 + (z-h)^2] E(k) \} e_\varphi - \frac{\mu_0 I}{2\pi r \sqrt{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \{ [a^2 + r^2 + (z-h)^2] K(k) - [(r+a)^2 + (z-h)^2] E(k) \} e_\varphi$$

又因为在正弦电磁场中,电场 E 、磁场 B 与动态位 φ 、 A 的关系也可用复矢量表示成

$$B = \nabla \times A$$

$$E = -j\omega A - \nabla \varphi = -j\omega A + \frac{\nabla(\nabla A)}{j\omega\mu\epsilon}$$

所以圆环线圈产生的电场可以用以上公式表示为: 又因为圆环线圈产生的场为对称场,且动态位 A 只有 e_φ 分量,所以 $\nabla(\nabla A)$ 。

$$\text{因此 } E = -j\omega A$$

同理根据对称性和叠加原理可得圆环线圈在任意点的电场强度为:

$$E(r, \varphi, z) = -j\omega A(r, \varphi, z) = \frac{j\omega\mu_0 I}{2\pi r} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \{ [a^2 + r^2 + (z-h)^2] K(k) - [(r+a)^2 + (z-h)^2] E(k) \} + \frac{1}{\sqrt{(r+a)^2 + (z-h)^2}} \{ [a^2 + r^2 + (z-h)^2] K(k) - [(r+a)^2 + (z-h)^2] E(k) \} \right\} e_\varphi$$

码的开发、软件测试等,系统了解软件工程中相关理论在实际软件开发中的作用及执行方式。鼓励学生到行业性企业的信息化岗位实习可以帮助学生了解企业在进行信息化改造升级时如何提出需求、配合实施及系统的维护运行,更能帮助学生了解信息化工作在实际现场工作中的作用和重要意义。

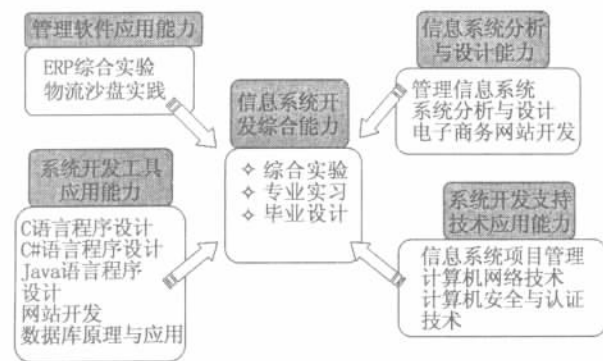


图3 我校实践课程体系

“引进来”主要指要加强兼职教师队伍建设,特别是聘任一批具有丰富信息系统开发与利用的企业工程师,让他们参与实践教学工作。

(4) 加强师资队伍建设

通过培训、政策引导和引进等措施,建设一支既具备扎实的理论知识和较高的教学水平,又具有很强的专业实践能力和丰富的实践经验的专业教师队伍。随着对信管专业认识的不断加深,我校在教师的知识结构逐年有所优化。

注重对青年教师的培养,通过发挥专家教授的传帮带作用,提高青年教师的科研与教学水平;通过选派青年教师到企业挂职锻炼,发挥学校与企业“零距离”合作方式,使教师能够从专业的角度分析和解决企业存在的实际问题,不断提高教师自身理论与实践结合的能力。我院在青年教师个人成长规划中都设置了企业挂职锻炼的要求,从根本上解决青年教师缺少实践经历的问题,增加青年教师理论联系实际的锻炼机会。

3 结束语

人才培养模式是决定人才素质和能力的关键。信息管理专业作为信息化时代的产物,其人才培养模式也要不断创新,包括课程体系建设、学生实践能力培养、教师队伍建设等,都需要从专业使命出发,面向社会发展的长远趋势。这样信管专业才能为各行各业不断培养出大批懂技术、会管理的优秀人才,进而使信管专业作为一个新兴专业逐渐进入一个良性发展轨道。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部高等教育司. 普通高等学校本科专业目录和专业简介[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] 毛华扬, 宋轩. 以就业为导向的信息管理专业人才培养模式研究[J]. 中国管理信息化, 2010, 13(3): 124-126.
- [3] 赵志运. 信息管理专业课程体系设计——基于专业使命的思考[J]. 中国管理信息化, 2010, 13(8): 106-109.

责任编辑: 刘新影

(上接第25页)

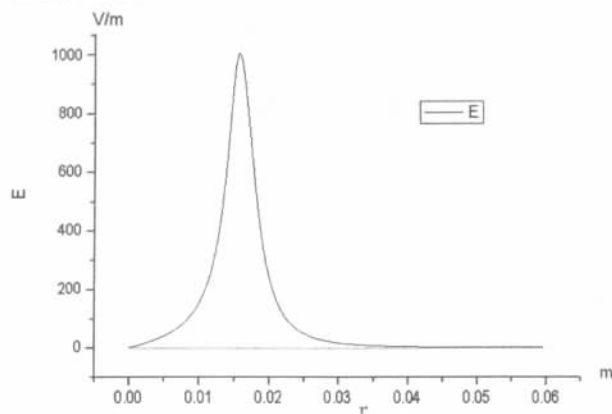


图8 场强变化图

由图8可知,电场随位置变化比较明显,越靠近线圈电场越大;电场随时间变化也比较明显,在上升沿时变化比较快,特别是在拐点处会出现尖峰。空气的击穿场强为3kV/cm,线圈附近空气可能被击穿。

参考文献:

- [1] Ortenberg M, Portugall O, Puhlmann N, et al. The megagauss facility of the HUMBOLDT high magnetic field center in Berlin[J]. Physica B, 1996, 216: 158-160.

- [2] 赵纯, 邹积岩, 何俊佳, 等. 多级重接式电磁发射的电磁分析与有限元仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 78-82.
- [3] 厉天威, 阮江军, 张宇, 等. 基于区域分解法的电磁场并行计算研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 11-14.
- [4] 李维波, 余宏伟. RSD 开关暂态电流测试平台建模与仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 87-90.
- [5] Melville W S. The use of saturable reactors as discharge devices for pulse generators[J]. Proceedings IEE, 1951, 98(3): 185-205.
- [6] Bo Zhang, Zhibin Zhao, Xiang Cui, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method[J]. IEEE. Trans on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.
- [7] 陈洪斌, 孟凡宝, 李爱萍, 等. 基于 SOS 开关的脉冲源研制[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 56-58.
- [8] 周郁明, 余岳辉, 梁琳, 等. 超高速大电流半导体开关实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 447-450.
- [9] 李小鹏, 李立毅, 程树康, 等. 重接式电磁发射技术的现状及应用前景[J]. 微电机, 2002, 35(4): 39-41.

责任编辑: 刘新影