

单级感应线圈炮场路耦合运动 时步有限元分析

关晓存 雷 彬 李治源
(军械工程学院三系 石家庄 050003)

摘要 基于麦克斯韦方程组,提出了一种适用于单级感应线圈炮的场路耦合运动时步分析方法,对于瞬态涡流场与电路耦合问题,应用了Crank-Nicholson法进行求解;对于运动问题,采用运动坐标系的方法进行求解;电磁力采用了节点力法求解;解决了单级感应线圈炮在脉冲供电时场路耦合分析问题,建立了单级感应线圈炮电磁场-电路-运动系统二维耦合模型。应用上述模型对单级感应线圈炮进行分析,计算结果与实验结果相吻合,验证了该模型的正确性。

关键词: 线圈炮 场路耦合 瞬态涡流场 节点力法

中图分类号: TM154

Field Circuit and Movement Coupled Time Stepping Finite Element Analysis on Single-Stage Inductive Coil Gun

Guan Xiaocun Lei Bin Li Zhiyuan

(Ordnance Engineering College Shijiazhuang 050003 China)

Abstract Based on Maxwell equation, a time stepping finite element analysis(FEA) model coupled circuit field and movement used in analyzing single-stage inductive coil gun is presented in this paper, which could solve the problem of impulsing power supply in field-circuit coupled FEA. The transient 2D magnetic field circuit coupling problems are solved by the Crank-Nicholson method, and the problems of motion is handled by the moving coordinates. The force is calculated by nodal force method. The paper sets up the 2D transient electromagnetic field-circuit-moving model of single-stage inductive coil gun. The performance of a single-stage inductive coil gun is analyzed using above model. The calculation result is very close to the measure results, which verifies the model accuracy.

Keywords: Coil gun, field circuit coupling, transient magnetic field, nodal force method

1 引言

感应线圈炮是电磁发射器中的一种,它适宜将质量较大的有效载荷加速到高速,在未来军事领域具有十分广阔的应用前景^[1-2]。在感应线圈炮的研究领域,美国桑地亚国家实验室和美国德克萨斯大学机电中心等研究单位一直处于领先地位。到目前为止,国内外分析和研究感应线圈炮的数值模型主要包括:柱状电流层模型、丝状圆环电流法以及电路方法^[3-5]。但以上模型的观点,对感应线圈炮内的磁

场及涡流场分布研究较少。而基于场的角度建立感应线圈炮机电模型更少。文献[6]提出了利用有限元和边界元耦合的方法建立感应线圈炮二维机电模型,并进行了分析,但没有电路方程,而实际感应线圈炮都是被电压源激励的;文献[7]分析了感应线圈炮中运动效应的影响,并利用运动坐标系去掉了控制方程速度项,使离散矩阵对称性,求解方便,但没有具体考虑电路方程,只给出一个场路耦合象征方程,而且没有把运动学和磁场控制方程耦合求解。

基于以上情况,本文根据单级实心电枢同步感应线圈炮的二维结构模型,基于麦克斯韦方程组建

立了感应线圈炮内部的场控制方程，利用运动坐标系去掉控制方程中速度项，同时将感应线圈炮的馈电电路简化为 RLC 电路，建立了线圈炮外部电路方程，从而得到了基于场路耦合方法的感应线圈炮数学模型；根据所得到的矢量磁位利用节点法计算电枢所得电磁力，并根据电枢运动学方程，结合上面推导的场路耦合方程，建立单级感应线圈炮的机电模型，并进行有限元离散求解。

2 单级同步感应线圈炮的结构模型

单级实心电枢同步感应线圈炮的主要结构组成包括：线圈绕组、电枢、线圈本体和炮管。其 rz 平面上的截面结构图如图 1 所示。其中区域 Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 、 Ω_4 、 Ω_5 分别代表电枢、线圈、炮管、线圈本体和气隙。

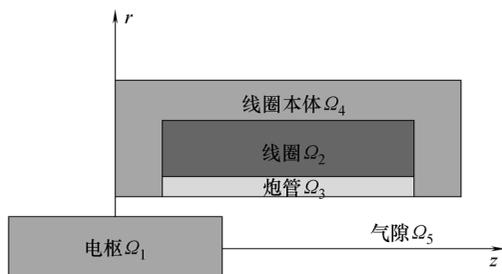


图 1 单级实心电枢同步感应线圈炮结构图
Fig.1 The structure of the single-stage solid armature induction coil-gun

3 单级感应线圈炮场路耦合模型

3.1 单级感应线圈炮的磁场控制方程

为了便于建立单级实心电枢感应线圈炮内磁场及涡流场的控制模型，现假定如下：

(1) 不考虑电枢的横向偏移，假定电枢轴线中心、炮管中心以及驱动线圈中心重合，满足轴对称条件。这主要是因为当电枢中心偏离炮管和驱动线圈中心时，会改变电枢与炮管之间的气隙分布，从而不再满足轴对称条件。

(2) 不考虑电枢在电磁力的作用下而产生形变。

在上述假定条件下，单级实心电枢同步感应线圈炮内磁场及涡流场的控制方程可由麦克斯韦方程导出。并考虑电枢运动效应可推出单级感应线圈炮的二维控制方程^[8]

$$\nabla \times v(\nabla \times A) = -J_s \quad (1)$$

$$\nabla \times v(\nabla \times A) = \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) - \sigma V \times (\nabla \times A) \quad (2)$$

$$\nabla \times v(\nabla \times A) = 0 \quad (3)$$

式中， A 、 V 、 J_s 和 ϕ 分别为矢量磁位、电枢的速度、线圈的源电流和电枢上的标量电位； $\nabla \phi$ 等于零，可以消去； v 和 σ 分别为电枢的磁阻率和电导率。

电枢区域 Ω_1 是涡流区，故控制方程为式 (2)；在线圈区域 Ω_2 为源电流区，故控制方程为式 (1)；对于炮管区域 Ω_3 、线圈本体区域 Ω_4 和气隙区域 Ω_5 ，其控制方程为式 (3)。这样就建立了单级线圈炮的磁场控制方程。

根据模型在轴对称场中可知矢量磁位 A 仅存在 A_ϕ 分量，电枢只在 z 方向上存在速度分量 V_z ， J_s 只存在 ϕ 方向上的分量 $J_{s\phi}$ 。分析并整理式 (1) ~ 式 (3) 合写成一个方程

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[v \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial r} \right] = -J_{s\phi} + \sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial t} - \sigma V_z \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \quad (4)$$

在程序实现时，一般以 rA_ϕ 作为求解变量，式 (4) 可改写为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial r} \right] \\ & = -J_{s\phi} + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial t} - \frac{\sigma}{r} V_z \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， v/r 及 σ/r 可作为材料参数来处理； V_z 为电枢速度矢量 V 在 z 方向上的速度分量； A_ϕ 为矢量 A 在 ϕ 方向上的分量； $J_{s\phi}$ 为驱动线圈中的电流密度在 ϕ 方向上的分量，且有关系 $J_{s\phi} = n_c S_c I_\phi$ ， n_c 为驱动线圈匝数， S_c 为驱动线圈的截面积； I_ϕ 为单匝电流在 ϕ 方向上的分量。因此上述方程还可以写成

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial r} \right] \\ & = -\frac{n_c}{S_c} I_\phi + \frac{\sigma}{r} \left(\frac{\partial rA_\phi}{\partial t} \right) - \frac{\sigma}{r} V_z \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

令 $A^* = rA_\phi$ ，可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (A^*)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v}{r} \frac{\partial (A^*)}{\partial r} \right] \\ & = -\frac{n_c}{S_c} I_\phi + \frac{\sigma}{r} \left(\frac{\partial A^*}{\partial t} \right) - \frac{\sigma}{r} V_z \frac{\partial (A^*)}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 运动坐标系法

在以上对线圈炮磁场控制方程的数学描述中，速度反映在方程的感应项 $\sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 中。这是由于对线圈炮在静止坐标系中描述，这种描述称为 Eulerian 描述，也常称静止坐标系描述。但是假如观察者本身处于运动体上，即在每一处运动区域上用一套与运动区域一同运动的坐标系进行描述，则感应项将不会显式地出现在方程中，这种描述称为 Lagrangian 描述，或称运动坐标系描述^[9-10]。

如图 2 所示以轴对称坐标系为例，其中 R 、 Z 为运动坐标系下的坐标， r 、 z 为静止坐标系下的坐标。

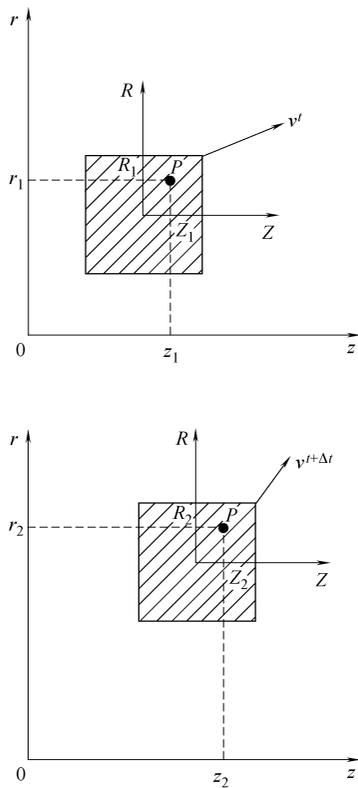


图 2 静止与运动坐标系示意图

Fig.2 The diagrammatic sketch of static and moving coordinates

由于有限元法中对时间的差分近似，使得两种坐标系描述的方程在离散时并不完全等价，设在 $(t, t+\Delta t)$ 时间段内，运动体上某点 P 沿 z 方向由 (z_1, r_1) 运动到 (z_2, r_1) ，当时间离散采取差分格式时，在静止坐标系下有

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_e &= \sigma \frac{\partial \mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t)}{\partial t} - \sigma \mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) \\ &\approx \sigma \frac{\mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(z_2, r_1, t)}{\Delta t} - \\ &\quad \sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

在运动坐标系中有

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_e &= \sigma \frac{\partial \mathbf{A}(Z_1, R_1, t + \Delta t)}{\partial t} \\ &\approx \sigma \frac{\mathbf{A}(Z_1, R_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(Z_1, R_1, t)}{\Delta t} \\ &= \sigma \frac{\mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(z_1, r_1, t + \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \sigma \frac{\mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(z_2, r_1, t)}{\Delta t} - \\ &\quad \sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 \mathbf{J}_e ——电枢感应电流。

可见，时间离散后两种坐标系下涡流表达式的形式不同，在静止坐标系描述下表达式中包含 $\mathbf{V} \times \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t)$ ，即速度与点 (z_2, r_1) 处 \mathbf{B} 的差乘；而在运动坐标系描述下包含 $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ ，即速度与 (z_1, r_1) 到 (z_2, r_1) 之间的平均磁通密度 $\mathbf{B} = -[\mathbf{A}(z_2, r_1, t) - \mathbf{A}(z_1, r_1, t)] / \Delta z$ 的乘积。

显然在静止坐标系描述下，方程组矩阵由于速度项的存在而不对称，但运动坐标系描述下可保证方程组矩阵的对称性。因此，采用固定在网格上的运动坐标系来描述问题自然更加方便。此时，方程中将不显式地出现 $\sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B}$ ，而速度反映在运动体的离散网格在每一时间步的位移中。

在轴对称坐标下利用三角单元进行离散，假设

$$A_i^{*e} = \sum_{j=1}^g N_{ij}^e A_j^{*e}$$

式中 N_{ij}^e ——第 i 个三角单元中第 j 个节点的形函数；

g ——第 i 个单元节点总数。

在运动坐标系中利用加权余量法^[11]建立式 (7) 的空间离散方程，对每个单元取其形函数 N_i^e 为权函数，进行加权积分、离散和整理后得

$$\mathbf{S} \mathbf{A}^* + \mathbf{G} \frac{d\mathbf{A}^*}{dt} = \mathbf{C} \mathbf{I} \quad (10)$$

式中 \mathbf{S} ——总刚度矩阵；

\mathbf{G} ——总质量矩阵；

\mathbf{C} ——总载荷矩阵；

\mathbf{A}^* ——总未知函数矩阵。

为了求解这些系数矩阵，分别给出单元刚度矩阵 \mathbf{S}^e 、单元质量矩阵 \mathbf{G}^e 、单元载荷矩阵 \mathbf{C}^e 的求法

$$S_{ij}^e = \frac{v}{r} \sum_{j=1}^g \int_{S_i^e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial r} \frac{\partial N_j^e}{\partial r} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) ds$$

$$G_{ij}^c = \frac{\sigma}{r} \sum_{j=1}^g \int_{S_i^c} N_i^c N_j^c dS$$

$$C_i^c = \int_{S_i^c} N_i^c dS$$

式中 S_i^c ——第 i 个三角单元的面积;
 N_i^c ——第 i 个三角单元的权函数。

3.3 单级感应线圈炮的等效电路

单级同步感应线圈炮外部馈电电路可以简化为一个 RLC 电路^[12], 其电路图如图 3 所示。

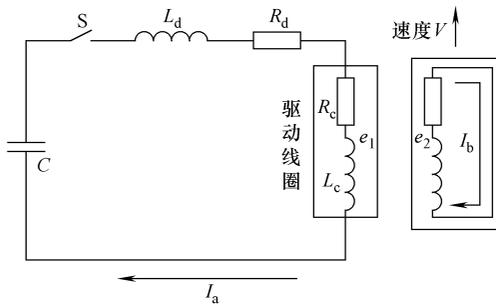


图 3 单级线圈炮简化电路模型

Fig.3 The circuit model of single coil gun

可写出其电路方程为

$$U = e - RI - L \frac{d}{dt} I \quad (11)$$

式中, $U=(U_1 \ 0)^T$, $e=(e_1 \ e_2)^T$, $I=(I_a \ I_b)^T$, $R=\text{diag}(R_c+R_d \ R_b)$, $L=\text{diag}(L_c+L_d \ L_b)$ 。

电磁场方程和连接的电路方程相接口的中间变量是驱动线圈和电枢中的电流及感应电动势。其中, 电流是整个求解系统的独立状态变量, 而感应电动势则是矢量磁位的函数, 是非独立状态变量。因而整个场路方程耦合求解的关键是感应电动势 E 。有限元区的感应电动势可通过与绕组所交链的磁通的变化来求得。若每匝驱动线圈的有效长度为 L_1 , 驱动线圈的匝数为 n_c , 且驱动线圈划分了 M 个单元, 则由此可得驱动线圈的电动势为^[13]

$$e_1 = -\frac{\partial}{\partial t} \frac{n_c L_1}{S_c} \int_{S_c} A^* ds$$

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \frac{n_c L_1}{S_c} \sum_{i=1}^M \left(S_i^c \frac{A_{i1}^* + A_{i2}^* + A_{i3}^* + \dots + A_{ig}^*}{g} \right)$$

$$= -L_1 \sum_{i=1}^M \left[\frac{n_c S_i^c}{g S_c} \quad \frac{n_c S_i^c}{g S_c} \quad \dots \quad \frac{n_c S_i^c}{g S_c} \right] \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} A_{i1}^* \\ A_{i2}^* \\ \vdots \\ A_{ig}^* \end{pmatrix}$$

$$= -L_1 D_1^T \frac{\partial}{\partial t} A^* \quad (12)$$

同理可得电枢的感应电动势

$$e_2 = -\frac{\partial}{\partial t} \frac{n_k L_2}{S_k} \int_{S_k} A^* ds$$

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \frac{n_k L_2}{S_k} \sum_{i=1}^M \left(S_i^e \frac{A_{i1}^* + A_{i2}^* + A_{i3}^* + \dots + A_{ig}^*}{g} \right)$$

$$= -L_2 \sum_{i=1}^M \left[\frac{n_k S_i^e}{g S_k} \quad \frac{n_k S_i^e}{g S_k} \quad \dots \quad \frac{n_k S_i^e}{g S_k} \right] \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} A_{i1}^* \\ A_{i2}^* \\ \vdots \\ A_{ig}^* \end{pmatrix}$$

$$= -L_2 D_2^T \frac{\partial}{\partial t} A^* \quad (13)$$

式中, 电枢的匝数为 n_k ; 单匝有效长度为 L_2 ; 电枢的截面积为 S_k ; 电枢划分的单元总数为 P 。

将式 (13) 和式 (12) 代入式 (11) 得

$$-\begin{pmatrix} L_1 & D_1^T \\ L_2 & D_2^T \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} A^* - RI - L \frac{d}{dt} I = U \quad (14)$$

根据上式假设 $K = \begin{pmatrix} L_1 & D_1^T \\ L_2 & D_2^T \end{pmatrix}$, 因此, 考虑运动的单

级感应线圈炮场路耦合方程为

$$\begin{pmatrix} S & -C \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^* \\ I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G & 0 \\ K & L \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} A^* \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -U \end{pmatrix} \quad (15)$$

由于 Crank-Nicolson^[15]法良好的精度和数值稳定性, 本文采用该时间离散的方法对上式进行时间离散, 离散后并进行整理的方程为

$$\begin{pmatrix} S_{n+1} + \frac{2G_{n+1}}{\Delta t} & -C \\ \frac{2K}{\Delta t} & R - \frac{2L}{\Delta t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^* \\ I \end{pmatrix}_{n+1}$$

$$= \begin{pmatrix} -S_n + \frac{2G_n}{\Delta t} & C \\ \frac{2K}{\Delta t} & -R + \frac{2L}{\Delta t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^* \\ I \end{pmatrix}_n + \begin{pmatrix} 0 \\ -U \end{pmatrix} \quad (16)$$

4 单级感应线圈炮的机电耦合模型

上述对感应线圈炮的磁场进行了分析, 得到场路耦合并考虑运动效应的磁场控制方程, 考虑到电枢的运动方程, 故下面采用节点力法来计算电枢所

受的电磁力。节点力法是根据能量原理，结合麦克斯韦应力张量提出的一种数学表述简单、精度较高，采用 Einstein 惯例的形式，在轴对称坐标下作用在物体上的力密度可表示为

$$f_i = \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} \quad i, k = r, z \quad (17)$$

每个节点电磁力的计算方法如下^[14]。

若在电磁力的作用下，物体产生一个虚位移 δl ，则作用在物体上的功为

$$\delta W = \int f_i \delta l_i ds = \int (\partial_k T_{ik}) \delta l_i ds = - \int T_{ik} \partial_k (\delta l_i) ds \quad (18)$$

将虚位移 δl 用节点形状函数插值，有

$$\delta l_i = \sum_n N_n \delta l_{ni} \quad (19)$$

把式 (19) 代入式 (18) 可写为

$$\delta W = - \int T_{ik} \partial_k \left[\sum_n N_n \delta l_{ni} \right] dv = - \sum_n \left(\int T_{ik} \partial_k N_n dv \right) \delta l_{ni} \quad (20)$$

那么，作用在第 n 个节点上的力为

$$F_{ni} = - \int T_{ik} \partial_k N_n ds \quad (21)$$

矩阵形式为

$$F_n = \begin{pmatrix} F_{nr} \\ F_{nz} \end{pmatrix} = \int \begin{pmatrix} B_{nr} H_{nr} - \frac{1}{2} B_n H_n & B_{nr} H_{nz} \\ B_{nz} H_{nr} & B_{nz} H_{nz} - \frac{1}{2} B_n H_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} N_n ds \quad (22)$$

式中的积分是针对包含第 n 个节点的所有单元进行的，对物体上所有节点受到的力求和，即可求得作用在整个物体上的力。由此可见，节点力法既能计算局部力也能计算整体力。

利用刚才所求得的电磁力写出电枢的运动方程

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt = v_0 + \frac{F_z}{m_p} \Delta t \quad (23)$$

由于每一个时间步中的电枢的位置是未知的，而有限元方程组的系数矩阵与电枢的位置有关，因此建立电磁方程和运动方程的耦合求解的数学模型是很有必要的，本文采用了间接耦合法求解电磁方程与运动系统的耦合方程。具体方法如下：①求出每个时间步下电磁方程中的节点磁位值、驱动线圈

和电枢中电流；②通过节点力法计算该时步电枢的电磁力；③将得到的电磁力代入到运动方程中，求出电枢的速度及位移。

因此求解单级感应线圈炮的炮口初速的流程图如图 4 所示。

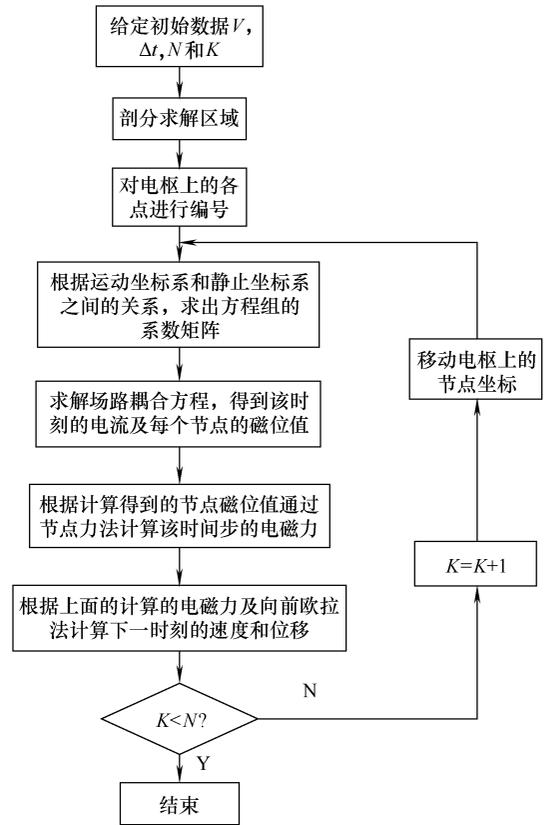


图 4 求解单级感应线圈炮的炮口初速的流程图
Fig.4 Flow chart of the single stage inductive coil gun muzzle velocity

5 仿真与试验结果分析

本文采用激光器形成光路，光纤传输后经单片机测速的方法进行线圈炮的测速。光的传播速度快，决定测速系统反应灵敏，且光信号的传播、接收不受电磁的干扰，能够在线圈炮强电磁的环境下工作，测速精确，能够满足电磁线圈炮的测速要求。

测速电路的原理^[15]并不复杂。当弹丸组件穿过测速区域时，就会挡住光纤传感器的入射光线，通过两路光纤传感器来拾取光信号，再经光电二极管或其他光敏器件转变成电信号。然后将电信号转变成单脉冲信号，并对单脉冲信号进行合成，之后将合成后的信号送至计数器显示出来。计数器上显示的数据并非速度值，而是触发计时间隔 $t_2 - t_1$ 。令两光纤传感器间的距离为 d ，并认为在 d 距离内速度

是匀速的, 则弹丸组件的速度

$$v = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (24)$$

本文利用上述模型的流程图编写程序, 给定初始电压为 4500V, 电容 1000 μ F, 驱动线圈匝数 44, 内径为 60mm, 外径为 120mm, 长度为 44mm, 材料为铜, 电枢质量为 1.134kg, 外径为 58mm, 长度为 20mm, 材料为铝, 对电枢的速度进行求解。

由于上述的测速装置只能测得一个点上的速度, 所以在单级感应线圈炮炮管上选择了 10 个点进行测速, 其布置如图 5 所示。然后利用 Matlab 对此 10 个点上速度进行拟合曲线得出其仿真结果与实验测量的结果进行对比。如图 6 所示, 从图 6 中可以看出仿真结果很好地符合实验测量结果, 验证了模型的正确性。

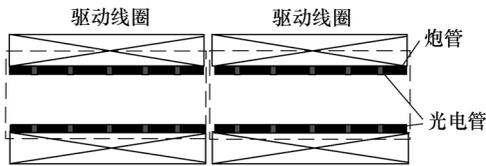


图 5 光电管在炮管上布置示意图

Fig.5 The layout of photocell on the barrel

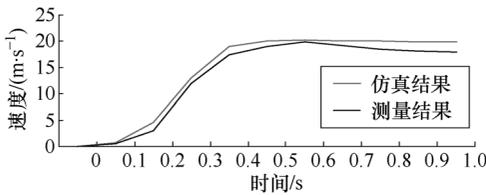


图 6 电枢速度的仿真结果和测量结果对比

Fig.6 Projectile velocity comparison between simulation and measurement

6 结论

本文根据电磁场数值计算的方法, 建立单级感应线圈炮的二维场路及运动耦合的机电模型, 并考虑了外部电路、材料特性、涡流影响及运动等因素。利用有限元的方法, 对上述模型进行离散求解, 为了验证该模型的有效性, 设计了单级线圈炮的装置及测速系统, 并将上述的模型的计算结果和试验测量的结果进行对比, 发现有相同的一致性, 验证了上述模型的准确性, 为下一步建立多级感应线圈炮的仿真系统和整体设计打下了理论基础。

参考文献

[1] Lockner Thomas R, Kaye Ronald J, Turman Bob N.

Coil gun technology, status, applications and future direction at Sandia national laboratories[C]. International Conference on Power System Technology, 2004: 199-121.

[2] Kaye R J, Turman B N, Steven L S. Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology[C]. International Conference on Power System Technology, 2002: 703-707.

[3] He J L, Zabar Z, Levi E, et al. Analysis of induction-type coilgun performance based on cylindrical current sheet model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 379-384.

[4] Andrews J A, Devine J R. Armature design for coaxial induction launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 639-643.

[5] Widner M M. WARP-10: a numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 634-638.

[6] Chang J H, Becker E B, Driga M D. Numerical simulation for induction coil launcher using FE-BE method with hybrid potentials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 501-508.

[7] Jarnieus M, Reyne G, Meunier G. FEM modelling of the magnetic, thermal, electrical and mechanical transient phenomena in linear induction launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(5): 3312-3315.

[8] Lombard P, Meunier G. A general purpose method for electric and magnetic combined problems for 2D, axisymmetric and transient systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 1737-1740.

[9] Muramatsu K, Nakata T, Takahashi N, et al. Comparison of coordinate systems for eddy current analysis in moving conductors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(2): 1186-1189.

[10] 张宇. 运动涡流场数值计算方法研究及电磁场数值分析软件平台的研制[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.

[11] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[12] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

(下转第 150 页)

- electromechanical network models for wireless acoustic-electric feed-throughs[C]. Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, 2005: 362-372.
- [6] Ishiyama T, Kanai Y, Ohwaki J. Impact of a wireless power transmission system using an ultrasonic air transducer for low-power mobile applications[C]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2003, 2: 1368-1371.
- [7] Horowitz S B, Sheplak M, Cattafesta L N, et al. A MEMS acoustic energy harvester[J]. *Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(9): S174-S181.
- [8] Zhu Y, Moheimani S O R. Ultrasonic energy transmission and conversion using a 2-D MEMS resonator[J]. *Electron Device Letters*, 2010, 31(4): 374-376.
- [9] Shinoda S, Tai T, Itoh H, et al. Lead zirconate titanate acoustic energy harvester proposed for microelectromechanical system/IC integrated systems[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(4): 04DL21-04DL21-5.
- [10] 林书玉. 弯曲振动超声换能器的振动特性及辐射声场研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(3): 32-39.
- Lin Shuyu. Vibration and radiation characteristics of air-coupled flexural ultrasonic transducers [J]. *Journal of Shanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2003, 31(3): 32-39.
- [11] Gallego Juarez J A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers[J]. *Physics E: Scientific Instruments*, 1989, 22: 804-816.
- [12] Morse P M. *Vibration and sound*[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Publishers, 1948.
- [13] 何祚镛. 结构振动与声辐射[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.
- [14] 栾桂冬, 张金铎, 王仁凯. 压电换能器和压电换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.
- [15] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 科学出版社, 2004.
- [16] 张频. 弯振圆盘和阶梯板的辐射阻抗及声场研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- [17] 甘云华, 金龙, 王心坚, 等. 超声波电机自激振荡驱动电路的变频控制特性[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(9): 93-97.
- Gan Yunhua, Jin Long, Wang Xinjian, et al. Characteristic of variable frequency control of self-oscillating driving circuit for ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(9): 93-97.
- [18] Basset P, Kaiser A, Legrand B, et al. Complete system for wireless powering and remote control of electrostatic actuators by inductive coupling[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(1): 23-31.
- [19] Shinohara Na, Hashimoto K. Microwave power transmission technologies for SPS[J]. *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 2008, 51(8): 513-518.
- [20] Karalis A, Joannopoulos J D, Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer[J]. *Annals of Physics*, 2008, 32(3): 34-48.
- 作者简介
 邹玉炜 男, 1973年生, 博士研究生, 主要研究方向为无接触电能传输技术, 环境振动能量收集。
 黄学良 男, 1969年生, 博士, 教授, 主要研究方向为无线电能传输, 新型能量转换装置研究, 电磁场数值分析理论及应用研究, 电力电子应用。
- 2008, 28(9): 139-144.
- [15] 张朝伟. 导轨-同步感应线圈混合发射器的基础研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2006.
- 作者简介
 关晓存 男, 1982年生, 博士研究生, 研究方向为电磁发射技术、直线驱动和电磁场数值计算。
 雷 彬 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新概念武器、新概念弹药理论等。

(下转第 143 页)

- [13] 王胜辉. 大型变压器场路耦合瞬态涡流场及螺旋线圈轴向电流效应研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 1999.
- [14] 张洋, 白保东, 谢德馨. 三维瞬态涡流-电路-运动系统耦合问题的新解法[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(9): 139-144.
- Zhang Yang, Bai Baodong, Xie Dexin. New method to solve 3D transient electromagnetic field-circuit-motion coupling problem[J]. *Proceedings of the CSEE*,