

改进电流丝法及其在感应线圈炮 场路结合分析中的应用

刘守豹¹, 阮江军¹, 彭迎², 张亚东¹, 张宇³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 湖北省电力公司, 湖北省 武汉市 430077;
3. 江西省电力公司, 江西省 南昌市 330077)

Improvement of Current Filament Method and Its Application in Field-circuit Analysis of Induction Coil Gun

LIU Shoubao¹, RUAN Jiangjun¹, PENG Ying², ZHANG Yadong¹, ZHANG Yu³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;
2. Hubei Provincial Electric Power Company, Wuhan 430077, Hubei Province, China;
3. Jiangxi Provincial Electric Power Company, Nanchang 330077, Jiangxi Province, China)

ABSTRACT: This paper improved current filament method (CFM) which is commonly used in coil gun's circuit simulation. In the modified CFM, each excitation coil was divided into small sub-coils to improve calculation precision of inductance in equivalent electric network. In order to check the effect of the modification and analyze electromagnetic transient in coil gun launch, the field-circuit method for induction coil gun was introduced. The field model is built based on 3D composite grid method (CGM), CGM uses two sets of mutual independent grids to discretize solution region, the coarse grids discretize the global region and the fine grids discretize the moving part. In every time step, instead of remeshing it is only necessary to change the coordinates of nodes in fine grids. A three-stage coil gun's field-circuit model was built, by comparing the results of field-circuit model before and after the improvement of CFM, the validity of modification is proved.

KEY WORDS: induction coil gun; current filament method; composite grid method; field-circuit; moving conductor eddy current

摘要: 对线圈炮路方法——电流丝法进行了修改, 通过对激励线圈进行分割提高了等效网络中的互感计算精度, 使电流丝法能够更准确地分析线圈炮的性能。为了验证修改后电流丝法的有效性并对线圈炮的电磁暂态进行研究, 将电流丝模型计算得到的激励线圈电流加载到对应的场模型中, 实现对线圈炮的场路结合分析。线圈炮的场模型基于三维组合网格法建立, 组合网格法使用 2 套网格分别离散静止和运动区域, 2 套网格之间没有拓扑约束从而克服了常规有限元法在

处理运动导体涡流场问题时需要重剖分的麻烦。通过电流丝法改进前后场路结合法计算结果的对比可知, 对激励线圈进行分割可以提高场分析和路分析结果的一致性。提出的场路结合法使感应线圈炮的精细化分析成为可能。

关键词: 感应线圈炮; 电流丝法; 组合网格法; 场路结合; 运动导体涡流场

0 引言

感应线圈炮是电磁发射家族中的重要一员, 因可以发射大质量的载荷、电枢和线圈之间没有直接电接触, 设计灵活多样等优点而具有广阔的应用前景^[1-2]。在电磁发射装置的研究中使用数值方法对装置的性能进行预先研究, 对于指导实验、节约设计成本具有重要意义^[3]。

线圈炮的数值仿真模型可以分为 2 类: 电路模型和多物理场模型。路模型使用非常普遍, 因为原理简单、易于编程实现且可以方便地考察线圈炮性能和各参量之间的依赖关系, 大量路仿真软件先后出现, 如 SLINGSHOT^[4-5], WARP-10^[6], AXICOIL^[7] 等。路方法虽然可以独立完成对线圈炮发射过程的仿真, 但是无法对发射过程中的场量进行计算。场方法虽然可以对线圈炮电磁暂态进行模拟, 但是却无法独立实现整个仿真, 因为作为场模型中激励线圈材料属性的脉冲电流无法通过场仿真得到, 所以场方法只能在线圈炮制造完成并通过实验方法提取脉冲电流后进行事后分析, 如文献[8]中使用有限

元软件 MEGA 对单级线圈炮进行的场计算。为此研究者在线圈炮性能的场路结合分析方面进行了有益的探索，如文献[9-10]基于 ANSOFT 软件建立的单级轨道炮场路耦合模型，文献[11]对三级线圈炮性能进行了场路结合分析。

本文介绍了线圈炮路方法——电流丝法 (current filament method, CFM) 的基本原理，针对原方法在激励线圈和电流丝线圈互感计算方面存在的缺陷，提出将激励线圈进行细分以抑制互感计算中因为个体尺寸差异过大引入的误差，从而提高电流丝法计算精度的改进方法。为了对改进后的电流丝法的有效性进行验证，并对线圈炮的发射过程进行电磁暂态分析，使用三维组合网格法 (composite grid method, CGM) 建立了线圈炮的场模型。CGM 使用粗网格离散激励线圈和不包括电枢的背景区域，使用细网格离散电枢，粗细 2 套网格之间不存在几何约束；电枢位置改变后只需改变细网格节点坐标，无需进行网格重构。通过将路仿真得到的激励线圈电流加载到对应的场模型中实现了线圈炮的场路结合计算。将 CFM 修改前后三级线圈炮场路耦合模型仿真结果进行对比，验证了本文对 CFM 所做修改的有效性，实现了使用场路结合法对感应线圈炮电磁性能精确预测的目的。

1 CFM 及其改进

1.1 CFM 的基本原理

CFM 将电枢划分为多个同心圆环，以电阻、自感、互感、电感梯度、电压源等为参数，建立各级线圈的集总电路，形成线圈炮系统的等效电网络方程，通过引入运动控制条件，线圈炮的路仿真归结为非线性变系数常微分方程的初值问题^[12-13]。

在线圈炮发射过程中激励电流是瞬变的，由于趋肤效应的影响，在电枢轴向剖面上感应电流的分布不均匀。若将电枢划分为 m 个同心圆环，则当圆环的轴向截面积足够小时，可以认为感应电流在该截面上均匀分布，即用 m 个“电流丝”环路来等效原电枢。线圈炮的电流丝划分如图 1(a) 所示。

设激励线圈共有 n 级，对应的 CFM 的等效电路图如图 1(b) 所示^[12]。

根据基尔霍夫电压定理，可以将系统的方程用矩阵的形式表示为

$$V = RI + \frac{d}{dt}(LI + MI) \quad (1)$$

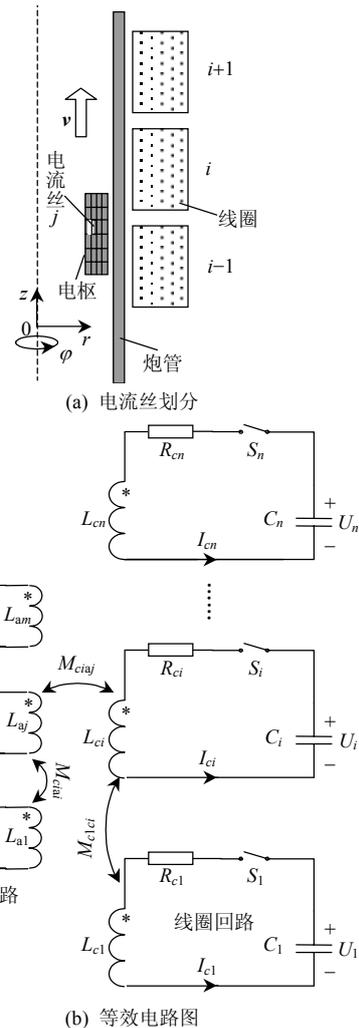


图 1 电流丝模型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of CFM

式中： V 和 I 为含有 $m+n$ 个元素的列向量，分别表示电流丝和激励线圈电路的电压向量和电流向量； R 和 L 为 $m+n$ 阶对角矩阵，分别表示电流丝和激励线圈的电阻和自感； M 为 $m+n$ 阶方阵，其中的每个元素表示 2 个线圈，或者 2 个电流丝，或者线圈与电流丝之间的互感，其中线圈与电流丝之间的互感是电枢位置的函数。

电容器电压和激励电流之间的关系为

$$C \frac{dV_c}{dt} = -I_c \quad (2)$$

式中 C 为 n 阶对角矩阵，表示各电容值； V_c 和 I_c 为包含电容电压和激励线圈电流的 n 阶列向量；式 (2) 右端的负号表示从电容器流出的电流导致电容电压的衰减。易知 V_c 和 I_c 分别为 V 和 I 的子矩阵。

电枢所受到的洛伦兹力可以表示为

$$F = \frac{1}{2} I^T G I \quad (3)$$

式中 $\mathbf{G}=\mathbf{dM}/\mathbf{dz}$, 为互感梯度矩阵。综合式(1)~(3)并引入运动方程, 则线圈炮系统的路模型控制方程为

$$(\mathbf{L} + \mathbf{M})\mathbf{dI}/\mathbf{dt} = \mathbf{V} - \mathbf{RI} - \mathbf{v}_p \mathbf{GI} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}\mathbf{dV}_c/\mathbf{dt} = -\mathbf{I}_c \quad (5)$$

$$M_p \mathbf{d}\mathbf{v}_p/\mathbf{dt} = \sum_{p=1}^m \sum_{c=1}^n I_p I_c \mathbf{dM}_{pc}/\mathbf{dz} \quad (6)$$

$$\mathbf{d}\mathbf{y}/\mathbf{dt} = \mathbf{v}_p \quad (7)$$

式中: M_p 为电枢质量, kg; \mathbf{v}_p 为电枢运动速度, m/s; \mathbf{z} 为电枢位置; m 。CFM 可以最终归结为变系数常微分方程的初值问题。系统控制方程中含有的未知量个数为

$$N = 2n + m + 2 \quad (8)$$

其中包含 m 个电流丝电流, n 个激励线圈电流, n 个电容电压。使用四阶龙格-库塔方法求解式(4)~(7)即可得到所有未知量在每一时间步的值。

1.2 CFM 的改进

在求解式(4)~(7)之前需要计算等式中未知量前面的系数, 其中为了求得互感矩阵 \mathbf{M} 和互感梯度矩阵 \mathbf{G} 需要在电枢的运动轨迹上均匀取若干个点, 依次计算每一个点的互感矩阵 \mathbf{M} 形成互感矩阵序列, 并通过 \mathbf{M} 得到 \mathbf{G} 。在计算过程中根据当前时间步电枢的位置通过插值得到该时间步下的 \mathbf{M} 和 \mathbf{G} 。为了提高计算精度, 计算点不能取得过于稀疏, 导致了电流丝法中大部分时间用于等效网络中电感(尤其是激励线圈和电流丝之间的互感)的提取。尽管研究者使用了解析计算法^[14]、数值积分法^[15-16]及基于有限元软件的方法^[14]对电感梯度和互感梯度进行提取, 但是这些方法要么过于复杂难于编程实现, 要么计算开销大。简单、快捷的途径是通过电感计算手册^[17-18]提供的经验公式直接查表计算。

由于电流丝法中假设电流丝中的感应涡流在电流丝内部均匀分布, 导致了对电枢的剖分不能过于稀疏, 从而造成了激励线圈和电流丝的尺寸差异很大。虽然在 2 个线圈尺寸差异较大的情况下, 电感计算手册可以给出互感计算公式, 但是计算精度比尺寸接近时低。因此出于提高电感计算精度的目的, 本文提出将激励线圈进行剖分, 用子线圈的串联取代整体线圈, 进行电感计算。实施了激励线圈剖分的电流丝模型原理图如图 2 所示。

对于修改了的 CFM, 其控制方程在形式上与式(4)~(7)相同, 但是要对电感和互感系数矩阵 \mathbf{L} 和 \mathbf{M} 中与激励线圈相关的元素进行替换, 即用矩阵或者向量来取代原矩阵中的标量。

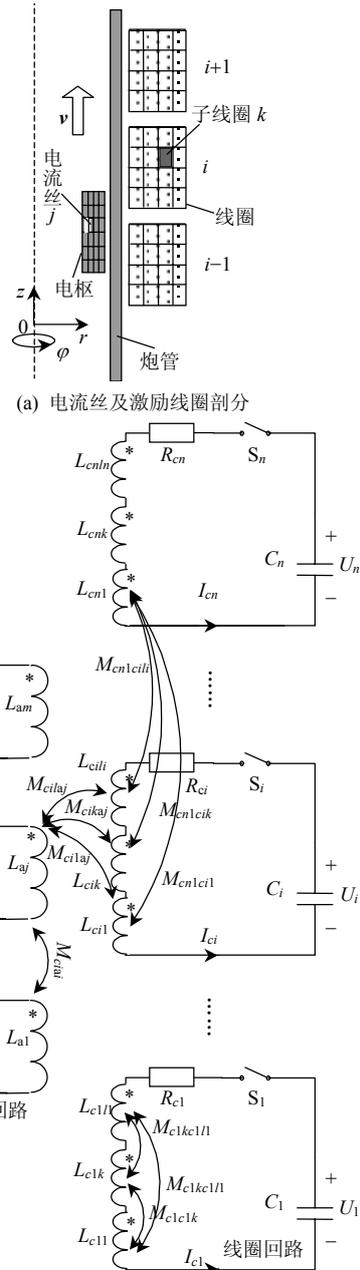


图 2 改进后的电流丝法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of improved CFM

原自感矩阵 \mathbf{L} 中第 i 个线圈的自感 L_{ci} 在修改后的模型中用矩阵形式表示为

$$\mathbf{L}_{ci} = \begin{bmatrix} L_{ci1} & \cdots & M_{ci1c_{il_i}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{c_{il_i}ci1} & \cdots & L_{c_{il_i}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: l_i 表示第 i 个激励线圈包含的子线圈的个数; $L_{c_{il_i}}$ 表示该线圈中第 l_i 个子线圈的自感; $M_{ci1c_{il_i}}$ 表示该线圈中第 1 个子线圈和第 l_i 个子线圈之间的互感。原互感矩阵 \mathbf{M} 中第 i 个线圈和第 n 个线圈之间的互感 M_{cicn} 在修改后的模型中以矩阵形式表示为

$$M_{cicn} = \begin{bmatrix} M_{ci1cn1} \cdots M_{ci1cnl_n} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ M_{cilcn1} \cdots M_{cilcnl_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 M_{cilcnl_n} 表示第 i 个线圈的第 l_i 个子线圈和第 n 个线圈的第 l_n 个子线圈之间的互感。第 i 个线圈和第 j 个电流丝之间的互感 M_{ciaj} 以向量形式表示为

$$M_{ciaj} = [M_{ci1aj} \ M_{ci2aj} \ \cdots \ M_{cilaj}] \quad (11)$$

式中 M_{cilaj} 表示第 i 个线圈中的第 l_i 个子线圈和第 j 个电流丝之间的互感。第 i 个线圈对应的电流由原来的标量 I_{ci} 变为向量式：

$$I_{ci} = [I_{ci1} \ I_{ci2} \ \cdots \ I_{cil}]^T \quad (12)$$

I_{ci} 的维数为线圈的剖分数 l_i ，内部元素大小相等。

在修改后的 CFM 中，电感和互感矩阵的维数有所增加，但是未知量的个数不变。式(12)说明了各个激励线圈对应的电流由原来单个线圈对应的标量变为了由多个子线圈对应的列向量，但是由于向量中元素值相等，所以并没有引入新的未知量。

2 CGM 的基本原理

CGM 由多重网格法发展而来，它使用了粗细 2 套网格：粗网格用于离散静止部分和背景区域，细网格离散运动部分。2 套网格之间没有拓扑约束，在运动部件位置改变之后只需要改变细网格节点的坐标，所有网格形状不变，从而克服了常规有限元方法在处理运动电磁问题时需要反复重剖分的麻烦，特别适合于运动导体涡流场 (moving conductor eddy current, MCEC) 问题的求解。文献 [19] 使用该方法对磁悬浮 TEAM 28 问题进行了计算，文献 [20-21] 使用该方法对单级线圈炮进行了二维和三维场仿真并与实验结果进行了对比。CGM 得到了基准算例的验证是解决 MCEC 问题方便有效的方法。

CGM 对全局区域 Ω_c 使用粗网格剖分，对局部区域 Ω_f 使用细网格剖分，2 个区域的交界面为 $\Gamma = \Omega_c \cap \Omega_f$ ，其求解区域离散如图 3 所示。

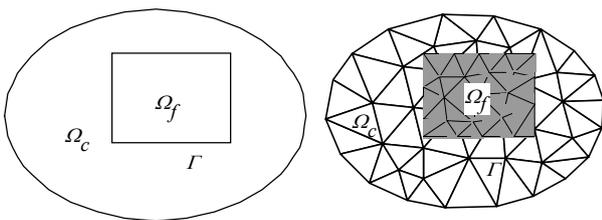


图 3 CGM 区域离散示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solution regions in CGM

CGM 的计算过程如图 4 所示，在瞬态求解的每一时间步中都会经历若干迭代步直到结果收敛。由于 2 套网格分别建立且不存在几何约束，CGM 克服了常规有限元法使用一套网格处理运动问题时所遇到的麻烦。

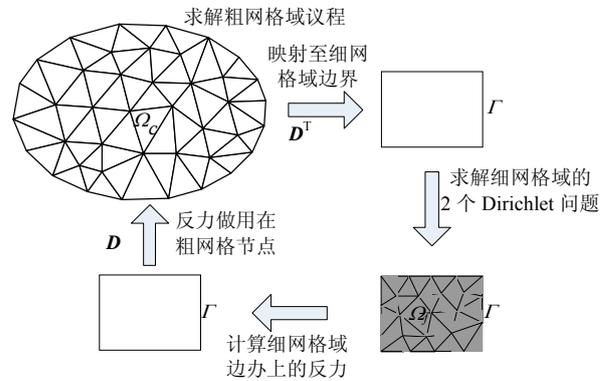


图 4 CGM 的计算步骤

Fig. 4 Calculation procedure of CGM

3 感应线圈炮的场路结合分析

3.1 模型参数及场模型建立

为了验证文中对 CFM 修改的有效性，同时也为了实现感应线圈炮的场路结合分析，本节建立三级同轴感应线圈炮的场路分析模型。激励线圈、电枢和脉冲电容器参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 激励线圈和电枢参数

Tab. 1 Parameters of excitation coils and armature

| 线圈 | | 电枢 | |
|---------|-----|------------|--------------------|
| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
| 内半径/mm | 80 | 内半径/mm | 55 |
| 径向厚度/mm | 50 | 径向厚度/mm | 15 |
| 轴向长度/mm | 107 | 轴向长度/mm | 103 |
| 相邻间隔/mm | 28 | 质量/kg | 1.632 |
| 导线匝数 | 38 | 电导率/(S/m) | 3.54×10^7 |
| — | — | 相对磁导率 | 1 |
| — | — | 初始速率/(m/s) | 0 |

表 2 脉冲电容参数

Tab. 2 Parameters of capacitors

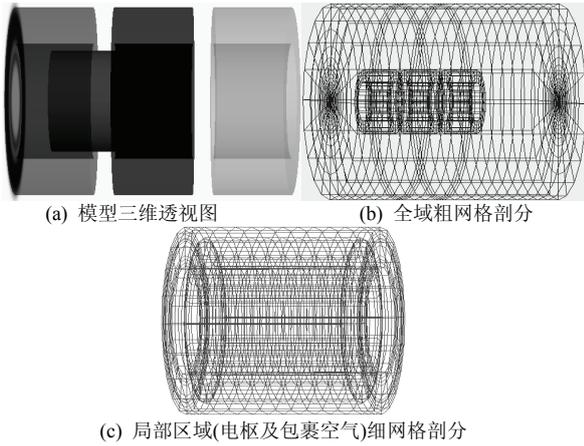
| 电容编号 | 电容/mF | 充电电压/kV |
|------|--------|---------|
| 1 | 20.485 | 4.6 |
| 2 | 5.863 | 9.1 |
| 3 | 2.059 | 14.7 |

场路结合法分析线圈炮的步骤：1) 首先通过路仿真得到激励线圈电流及其他结果；2) 将线圈电流加载在场模型中完成对发射过程的电磁暂态计算，得到各时间步下的磁通和涡流分布。

表 1 对应的线圈炮的三维 CGM 模型及其剖分如图 5 所示。其中激励线圈和背景空气区域用粗网

格剖分,电枢和包裹它的空气(电枢包裹空气的原因可以参考文献[19-20])用细网格剖分。

为了证明修改后 CFM 的有效性,在没有进行实验验证的情况下,用场模型与修改前后的路模型分别结合,对比 2 种场路模型计算结果的差异,若修改后场路分析结果差异减小,即证明对 CFM 的修改是有效的。



(a) 模型三维透视图 (b) 全域粗网格剖分 (c) 局部区域(电枢及包裹空气)细网格剖分

图 5 3 级线圈炮的三维 CGM 模型

3.2 CFM 改进前的分析结果

在修改前的 CFM 中,仅将电枢按照径向 2 份、轴向 5 份的方式均分为 10 个电流丝。这种情况下场路模型的分析结果如图 6 所示。由图 6 可知,在没有对线圈实施剖分处理的情况下,场模型和路模型的结果差异较大,尤其在电枢受力和速度上差异更加明显。

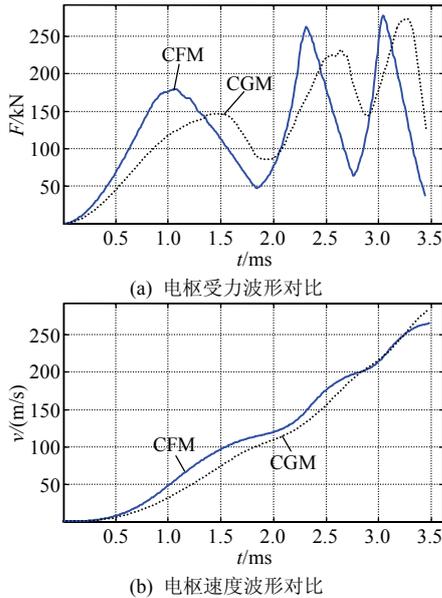


图 6 电流丝法为修改前的场路结合分析结果

Fig. 6 Results comparison of circuit model and field model before modification of CFM

3.3 CFM 改进后的分析结果

保持电枢的剖分与 3.2 节相同,同时对每个激励线圈径向 4 份、轴向 5 份均分为 20 个子线圈,改进后的电流丝模型如图 7 所示。

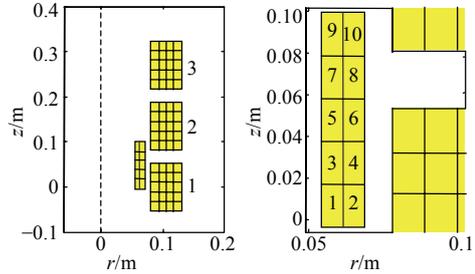


图 7 电流丝模型电枢、线圈剖分及电流丝编号

Fig. 7 Division of excitation coils and serial number of current filaments

经过路仿真得到的激励线圈电流波形和前 4 个电流丝电流波形如图 8 所示。

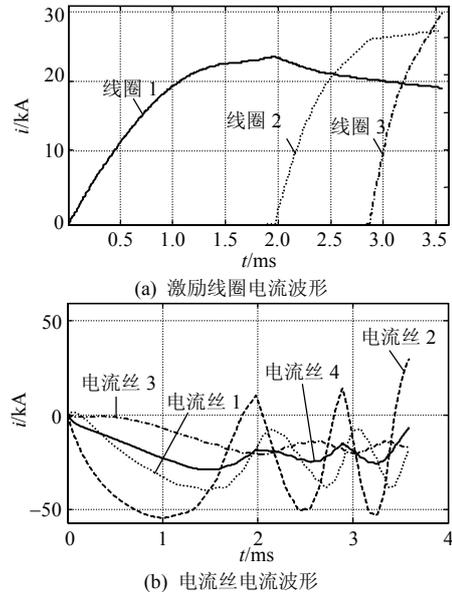


图 8 激励线圈及电流丝电流波形

Fig. 8 Current waveform of excitation coils and current filaments

根据场模型得到不同时刻的磁通密度分布和电枢涡流分布如图 9 和 10 所示。得到修改电流丝法之后的场路结合模型电枢受力和速度曲线如图 11 所示。

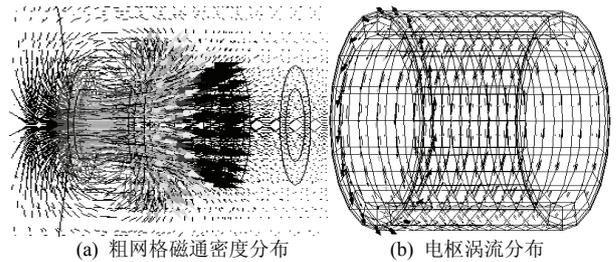
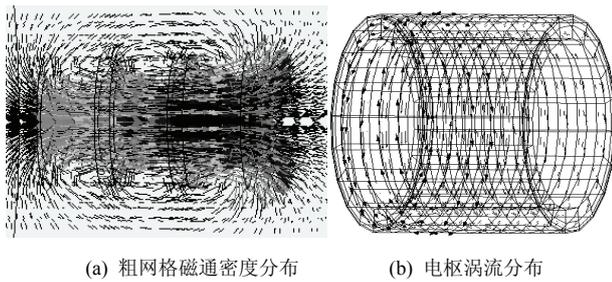


图 9 0.60 ms 时场量分布

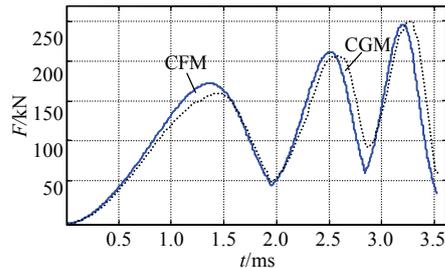
Fig. 9 Field distribution at 0.60 ms



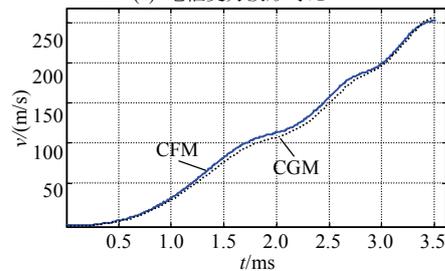
(a) 粗网格磁通密度分布 (b) 电枢涡流分布

图 10 3.30 ms 时场量分布

Fig. 10 Field distribution at 3.30 ms



(a) 电枢受力波形对比



(b) 电枢速度波形对比

图 11 电流丝法为修改后场路结合分析结果

Fig. 11 Results comparison of circuit model and field model after modification of CFM

在发射过程中随着电枢的前移, 各级激励线圈依次导通(如图 8(a)所示), 由此产生磁行波推动电枢运动(如图 9(a)和 10(a)所示)。从路模型所得前 4 个电流丝的电流波形(如图 8(b))和场模型得到的电枢涡流分布(如图 9(b)和图 10(b)), 可以知道, 在线圈炮发射过程中感应涡流主要集中在电枢后端的外壁处。

对比图 6 和图 11 可知在实施了激励线圈剖分的场路模型中, 路仿真结果和场仿真结果的一致性大大提高, 使通过场路结合的方法对线圈炮的性能进行分析的可靠性提高, 从而使线圈炮的精细化分析成为可能。

4 结论

1) 对原有电流丝法中的线圈进行剖分, 用电流丝和子线圈的互感取代原方法中电流丝和各级线圈的互感可以提高基于电流丝法的线圈炮路模型的有效性, 使电流丝模型可以更加准确地预测线

圈炮的性能。

2) 在未建立实验模型的情况下, 使用成熟、有效的数值方法——组合网格法建立多级线圈炮的场模型, 通过场模型对修改前后的电流丝模型的有效性进行验证, 提供了检验电流丝法修改措施有效性的另一途径。

3) 使用场路结合的方法对线圈炮的发射过程和电磁暂态进行模拟, 根据路模型确定线圈炮几何尺寸, 通过场模型对线圈炮进行局部优化, 使线圈炮的精细化设计成为可能。

参考文献

- [1] Wang Ying, Marshall R A, Cheng Shukang. Physics of electric launch[M]. Beijing: Science Press, 2004: 136-150.
- [2] 赵科义, 李治源, 程树康, 等. 同步感应线圈炮内磁场及涡流场的有限元分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 492-495.
Zhao Keyi, Li Zhiyuan, Cheng Shukang, et al. Finite element analysis of magnetic field and eddy field in synchronous induction coil-gun[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 492-495(in Chinese).
- [3] Fair H D. Progress in electromagnetic launch science and technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 42(1): 93-98.
- [4] Shokair I R, Cowan M, Kaye R J, et al. Performance of an induction coil launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 510-515.
- [5] Kaye R J, Cnare E C, Douglas M C G M, et al. Design and performance of sandia's contactless coilgun for 50 mm projectiles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 29(1): 680-685.
- [6] Widner M M. WARP-10: a numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 634-638.
- [7] Andrews J A, Devine J R. Armature design for coaxial induction launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 639-643.
- [8] Leonard P J, Lai H C, Hainsworth G, et al. Analysis of the performance of tubular pulsed coil induction launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 686-690.
- [9] 赵科义, 李治源, 程树康. 单级感应线圈炮工作过程的动态仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1667-1671.
Zhao Keyi, Li Zhiyuan, Cheng Shukan. Dynamic simulation of working process of the single-stage induction coil-gun[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1667-1671 (in Chinese).
- [10] Zhao Keyi, Cheng Shukang, Zhang Ruiping. Influence of driving current's wave on accelerative performance of induction coil launcher[C]//2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, EML, Proceedings. Victoria, BC, Canada: The Institute for Advanced Technology at The University of Texas at Austin, 2008: 221-224.
- [11] Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Huang Daochun. Analysis of inductive coil gun performance based on field coupling circuit method[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 845-849.
- [12] He Jianliang, Levi E, Zabar Z, et al. Concerning the design of capacitively driven induction coil guns[J]. IEEE Transactions on

- Magnetics, 1989, 17(3): 429-438.
- [13] 曹延杰, 刘文彪, 邹本贵, 等. 三级同步感应线圈炮内弹道过程仿真[J]. 弹道学报, 2008, 20(4): 92-95.
Cao Yanjie, Liu Wenbiao, Zou Bengui, et al. Interior ballistics motion simulation of three-stage synchronous inductive coilgun[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(4): 92-95(in Chinese).
- [14] Zhao Keyi, Lei Bin, Li Zhiyuan, et al. Inductance computation consideration of induction coil launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 336-340.
- [15] Babic S, Akyel C, Salon S J. New procedures for calculating the mutual inductance of the system: filamentary circular coil-massive circular solenoid[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1131-1134.
- [16] Conway J T. Inductance calculations for noncoaxial coils using bessel functions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(3): 1023-1034.
- [17] 卡兰塔罗夫, 采伊特林. 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992: 294-339.
К а л а н т а р о в П. Л., Ц е й т л и н Л. А.. Inductance reckoner[M]. Beijing: China Machine Press, 1992: 294-339.
- [18] F. W. Grover, Inductance calculations. New York: Dover Pub, 2004: 150-163.
- [19] 张宇, 阮江军, 刘兵, 等. 组合网格法在电磁-机械耦合问题中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 42-47.
Zhang Yu, Ruan Jiangjun, Liu Bing, et al. Application of composite grid method in the electromagnetic-mechanical coupled problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 42-47(in Chinese).
- [20] Peng Ying, Ruan Jiangjun, Zhang Yu, et al. A composite grid method for moving conductor eddy-current problem[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(7): 3259-3265.
- [21] Zhang Yu, Ruan Jiangjun, Gan Yan, et al. Application of a composite grid method in the analysis of 3-D eddy current field involving movement[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1298-1301.



刘守豹

收稿日期: 2010-04-06。

作者简介:

刘守豹(1983—), 男, 博士研究生, 从事电磁场理论及其数值计算的研究, liushoubao1983@126.com;

阮江军(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电磁场数值计算、高电压绝缘及电磁兼容方面的研究。

(责任编辑 王剑乔)