

增强型电磁驱动装置瞬态磁场分析

张文迪^{1,2}, 王灵^{2,3}, 李涛^{2,3}, 徐蓉^{2,3*}, 徐伟东^{2,3}, 严萍^{1,2,3}

1. 中国科学院大学, 北京 100190
2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190
3. 中国科学院电力电子与电力驱动重点实验室, 北京 100190

摘要 基于 ANSYS 有限元仿真平台的动网格技术, 建立了三维增强型电磁驱动装置有限元模型。结合 440 kA 发射条件下增强型电磁驱动装置附近的磁场分布, 验证了模型的可靠性。结合模型开展仿真, 获得了增强型电磁驱动装置内腔中轴线上磁场的分布规律, 以及电磁驱动装置径向磁场在空间的衰减规律。指出电流峰值时刻, 电枢前端的磁感应强度随着距离增大先增大, 而后趋于不变。在模型中, 可认为电枢前端磁场最大为 2.3~3.3 T。

关键词 增强型电磁驱动装置; ANSYS; 瞬态磁场仿真; 磁场测量

电磁驱动技术是利用电磁力(能)将物体加速至超高速的新型发射方式, 与常规化学推进方式相比, 电磁驱动具有初速高、射程远、精度高等优点^[1-6], 是当今世界研究广泛的一项新概念技术, 在基础研究领域和国防领域具有广阔的应用前景。简单型电磁驱动装置由两条轨道和电枢组成, 其电感梯度小, 为了提高速度不断提高电流幅值会带来轨道烧蚀、电弧烧蚀、绝缘等问题; 而增强型电磁驱动装置轨道数目更多, 其等效电感梯度更大, 在相同出口速度下可降低电流幅值, 从而降低烧蚀与绝缘要求, 也可降低对电源及冷却装置的要求^[7-9]。

在电磁驱动装置发射电枢的过程中, 轨道中通入的脉冲大电流, 电枢轨道滑动电接触时产生的等离子体, 都可以激起空间中变化的磁场。在增强型电磁驱动装置中, 该磁场数值较大, 可能会对智能器件产生干扰, 也可能使得智能器件失灵^[10], 此外, 当多个装置联合发射时, 空间磁场耦合会对电枢初速产生影响。因此, 有必要在实际发射条件下, 对电磁驱动装置的磁场进行分析。

目前, 国内外研究人员对电磁驱动装置的磁场进行的研究内容涉及内腔磁场理论分析、内腔磁场有限元仿真、试验测量等。李湘平等指出一体化电

收稿日期: 2022-01-23; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52173089, 51875546)

作者简介: 张文迪, 硕士研究生, 研究方向为脉冲大电流直线驱动技术, 电子信箱: zhangwend@mail.iee.ac.cn; 徐蓉(通信作者), 副研究员, 研究方向为脉冲大电流直线驱动技术, 电子信箱: xr@mail.iee.ac.cn

引用格式: 张文迪, 王灵, 李涛, 等. 增强型电磁驱动装置瞬态磁场分析[J]. 科技导报, 2022, 40(9): 98-104; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.

2022.09.011

枢中,电枢外壳厚度、趋肤深度、上升电流频率以及材料属性对弹丸中轴线上的磁场有影响,即载荷外壳厚度越薄、趋肤深度越大、电流信号频率越低、弹壳导电性越差,弹丸中轴线磁感应强度越大^[11];李湘平等基于毕奥-萨伐尔定律,解析计算了弹丸中轴线上的磁感应强度,利用磁探针数据积分得到磁场数值,并验证了解析模型的准确性^[12]。李湘平等还指出弹丸运动条件下中轴线上磁感应强度比静止时要小^[13]。汤玲玲等利用 COMSOL Mutiphysics 建模计算了电磁驱动装置的电枢磁场数值,采用的是时谐方法^[14]。殷强等利用电磁感应法测量了静止条件下电磁驱动装置膛内磁场,并与理论值做了比较^[15]。Cao等利用环形探针测量了动态发射条件下简单型装置轨道上方的磁场,得到空间磁场的特征波形,为瞬态环境干扰分析提供了依据^[16]。徐蓉等对三维增强型结构电磁场进行了仿真,计算了电磁场分布及电感梯度,采用的也是时谐分析^[17]。也有一些研究人员对动态发射条件下的磁场进行了数值计算及有限元仿真,但采用的是简单型结构^[18-21]。

研究人员对电磁驱动装置磁场分布做了大量研究,但集中于二维模型及三维简单型结构,较少

研究三维增强型电磁驱动装置的磁场。由于增强型电磁驱动装置结构复杂,理论求解电磁场较为困难,有少量研究人员通过时谐分析得到某一特定频率下的电磁场,但这并不能反映整个电流过程中频率变化的影响。本研究采用瞬态分析方式不仅可以考虑到电流频率变化,进而模拟趋肤效应的变化,还可以通过在电磁控制方程中引入速度项的方法模拟速度趋肤效应的影响,计算步长显著小于其他仿真模型,模型维度也为三维。

本研究建立三维瞬态增强型电磁驱动装置模型,采用高精度霍尔探头测量了增强型电磁驱动装置周围的空间磁场,仿真与试验对比,验证仿真模型的准确性。基于模型,对增强型电磁驱动装置动态发射下的内膛及空间磁场进行研究。

1 模型建立

1.1 理论分析

4轨串联增强型电磁驱动装置示意图如图1所示,主要由内外轨道、电枢、负载以及内外轨连接件组成。脉冲大电流从上内轨流入,下外轨流出。

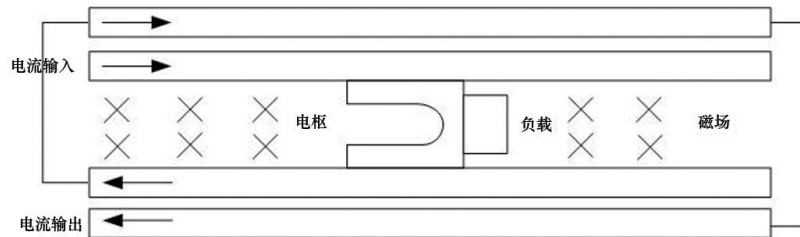


图1 增强型4轨电磁驱动装置

采用 $A-\varphi$ 法计算电磁驱动装置电磁场分布,引入矢量磁位 A 和标量电位 φ ,电磁场控制方程组为^[22]:

$$B = \nabla \times A \quad (1)$$

$$E = -\nabla \varphi - j\omega A \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \times A \right) + \sigma \nabla \varphi = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \sigma \left(v \times \nabla \times A - \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi \right) = 0 \quad (4)$$

式中, E 为电场强度, B 为磁感应密度, σ 为电导率, μ 为磁导率, v 为速度,结合本构方程:

$$J = \sigma(E - v \times B) \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

式中, H 为磁场强度;将本构方程代入控制方程,可求得电流密度 J 和磁感应强度 B 。

在求解空间磁场时,采用毕奥-萨伐尔定律:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{J \times eR}{R^2} dV' \quad (7)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, V' 为体电流源区, eR 为单位

向量, R 为体电流源区到空间位置的距离。

电磁力与速度表达式为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (8)$$

$$\mathbf{v} = \int_0^t \frac{\mathbf{F}_y - \mathbf{f}}{m_1 + m_2} d\tau \quad (9)$$

$$\mathbf{f} = \begin{cases} 2\mu_1 \mathbf{F}_z & v = 0 \\ 2\mu_2 \mathbf{F}_z & v > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, \mathbf{F} 为电枢受到的电磁力, \mathbf{F}_y 为电枢前进方向的电磁力, t 为时间, m_1 为电枢质量, m_2 为负载质量, \mathbf{f} 为摩擦力, τ 为计算步长, μ_1 和 μ_2 分别为静摩擦系数和动摩擦系数, \mathbf{F}_z 为电枢对轨道的压力, 是电磁力垂直轨道方向的分力。

因此, 位移 x 表达式为:

$$\mathbf{x} = \int_0^t \mathbf{v} d\tau \quad (11)$$

1.2 有限元模型

基于 ANSYS 平台建立了三维 4 轨增强型电磁驱动装置的有限元仿真模型, 包含 4 条轨道、C 型电枢、电枢负载以及跨接。

ANSYS 平台动网格的基本原理可描述为, 在第一个时间步长内, 首先根据瞬态电流波形计算一次电磁场分布, 计算对应时刻的频率, 并得到初步的电磁力与加速度; 然后赋予电枢网格以不形变的网格属性, 同时, 利用有限元-边界元方法计算导体网格间的相互作用, 并在电接触区域以边界元网格替代 2 个导体的有限元网格, 在每个时间步长后计算有限元及边界元网格的运动量, 将速度量传递至下一个时间步的电磁场计算方程, 完成一个时间步的计算。在每个时间步后, 都需要重新检测带电导体网格的接触, 识别穿透及分离现象。若时间步长取的足够小, 则可以认为进行了瞬态分析。

仿真中不存在空气域, 空气域的作用被基于毕奥-萨伐尔定律的有限元-边界元的算法所代替, 因此其边界条件得到了简化。

材料属性如表 1 所示, ρ 为密度、 Y 为杨氏模量、 PR 为泊松比、 σ 为电导率。结构仿真步长和电磁仿真步长为 $10 \mu\text{s}$, 电磁矩阵每 5 个时间步更新一次, 求解时允许的误差为 $1 e^{-4}$ 。仿真时长设为 8 ms。

输入电流由 ANSYS 平台的电磁模块提供, 由上内轨截面导入, 下外轨截面导出, 其波形如图 2

表 1 材料属性

	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$Y/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	PR	$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
电枢	2700	6.8×10^{10}	0.30	3.94×10^7
内轨	8900	1.1×10^{11}	0.33	2.90×10^7
外轨	8900	1.1×10^{11}	0.33	4.64×10^7
跨接	8900	1.1×10^{11}	0.33	4.64×10^7
负载	7800	2.0×10^{11}	0.34	9.93×10^6

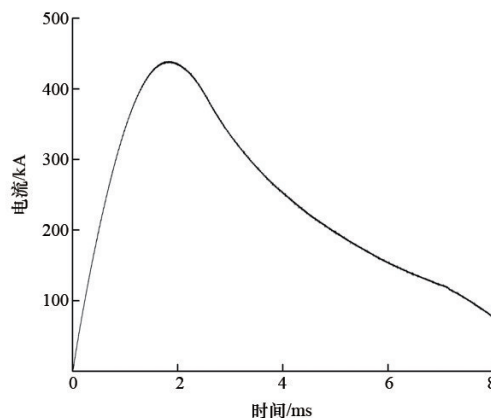


图 2 驱动电流波形

所示, 电流触发时刻为 0, 电流峰值 440 kA, 峰值时刻 1.8 ms。

限制除电枢和负载之外所有网格的自由度, 假定电枢和负载被设置为只能向膛口方向运动。

在 ANSYS 平台中, 设置相应的动网格参数对该仿真模型进行瞬态分析。由于位移电流模与传导电流模的比值等于 10^{-18} 乘以脉冲电流频率, 而脉冲电流频率通常不超过 1000 Hz, 位移电流密度远小于传导电流密度, 因此仿真中可以不考虑位移电流的影响^[23]。

2 结果与分析

2.1 试验验证

2.1.1 试验平台

通过测量实际发射过程中的空间磁场, 并将该磁场与仿真模型磁场进行对比验证模型准确性。导入电流如图 2 所示。试验采用 Rogowski 线圈测量总电流; 采用 3 个高精度霍尔探头测量装置身管附近的磁场。霍尔探头有源区直径 0.15 mm, 精度 0.5%, 量程 $\pm 5 \text{ T}$ 。

装置截面示意如图3所示,上轨电流方向为纸面向里,下轨电流方向为纸面向外。3个霍尔探头安装在某一截面的不同位置,采用支架与装置相固定,且采用海绵缓冲,以减轻装置抖动的影响。测量点1和测量点2距离装置的对称中心约19 cm,磁场方向沿 x 轴水平向右;测量点3距离装置的对称中心约10 cm,磁场方向沿 x 轴水平向左。

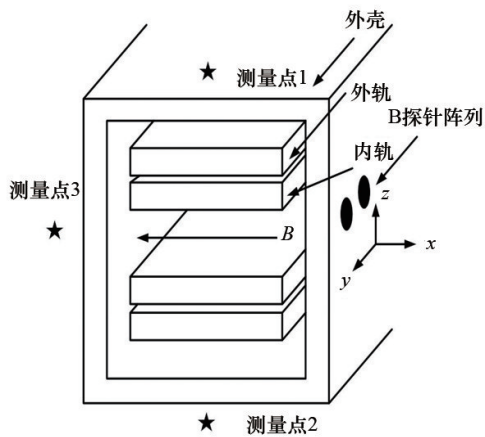


图3 装置截面示意

2.1.2 试验与仿真结果对比

仿真中磁场测量点与实际磁场测量点位置一致(图3)。磁感应强度结果只考虑大小。

测量位置1和2的磁感应强度波形如图4所示。试验中,测量点1的磁场峰值为0.261 T,对应时刻为1.76 ms。测量点2磁场峰值为0.290 T,对应时刻为2.10 ms。6 ms时,测量点1的磁场从0.087 T上升至0.162 T,测量点2的磁场从0.102 T上升至0.148 T。仿真点1和2由于位置上下对称,因此在曲线中完全重合。仿真的磁感应强度峰值时刻为2.05 ms,其峰值为0.256 T。可以发现仿真与测量点2时间相位上较接近,时间相差0.05 ms,幅值相差0.034 T,而与测量点1存在时间差。

测量点3的磁感应强度曲线如图5所示,实测峰值0.450 T,对应时刻2.00 ms。仿真峰值出现在2.04 ms,对应峰值为0.436 T。

6 ms左右电枢运动至测量位置附近,2条曲线同时产生一道向上的尖峰。实测值从0.183 T上升至0.327 T,仿真值从0.189 T上升至0.261 T。

电流峰值时刻为1.80 ms,磁场探头2和3处实

测磁场和仿真磁场的峰值时间为2~2.1 ms,存在0.2~0.3 ms的误差。该误差的存在是由于涡流以及电流分布的变化造成的。

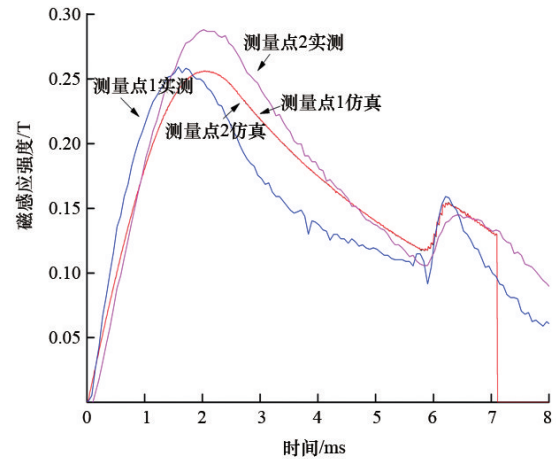


图4 测量点1、2仿真值和测量值

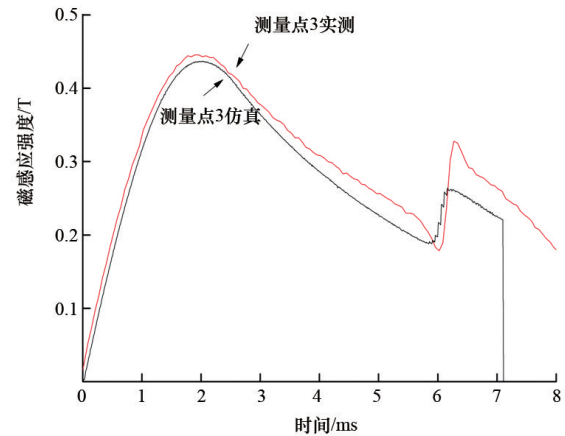


图5 测量点3仿真值和测量值

综上所述,通过对比仿真磁场和实测磁场波形,说明有限元模型有一定的可靠性。

2.1.3 误差分析

观察波形可以发现,磁场测量值和仿真值不仅存在幅值误差,也存在相位误差。同时,电流峰值时刻与磁场峰值时刻也不对应。

磁场幅值差是由于磁场测量误差引起的。针对仿真与试验之间的磁场相位误差进行分析,主要原因如下:第一,霍尔探头的精度为量程的0.5%,当电流接近峰值时,磁场变化小于0.025 T,霍尔探头频率特性不足以精确反映磁场的变化,因此产生时间差;第二,实际测量时,测量点1与测量点2周

围存在大量金属固定部件,这些部件的涡流也会改变测量位置的空间磁场;第三,仿真时电磁方程并不是每个时间步都加以计算,其最小间隔为 $50\ \mu\text{s}$,因此磁场计算可能最大产生 $50\ \mu\text{s}$ 的相位差。

电流与磁场也存在相位差,分析认为,电流达到峰值时,电枢尚未运动至磁场测量点附近,内轨只存在涡流。当电流变化趋缓时,内轨涡流区域收缩,对外部空间的磁场削弱作用减弱,而外轨电流对外提供的磁场变化不大。这反映除测量位置1外,位置2与位置3的磁场峰值时间均滞后于电流峰值时间。此外,随着时间推移,电流频率下降,电流分布更加均匀,测量点磁场将继续上升一段时间,反映为磁场峰时间值略滞后于电流峰值时间^[11]。

2.2 内膛磁场仿真

在该有限元模型的基础上,进一步分析电磁驱动装置的外部空间磁场以及膛内磁场。

从膛尾指向膛口,不同时刻下,内膛中轴线上磁场波形如图6所示。电流峰值附近的 $1.6\sim 2.0\ \text{ms}$ 时间段内,内膛磁场曲线先陡峭上升,再缓慢增加。电枢尾部内膛磁场范围为 $7.4\sim 8.2\ \text{T}$ 。靠近电枢时,内膛磁场受电枢磁场影响而减弱。测量位置穿过电枢时,磁场大幅上升,电枢喉部最大磁场在 $13.0\sim 13.8\ \text{T}$,磁场峰值位置对应于电枢位置。考察点到达电枢前端时,磁场大幅减弱至 $0.23\sim 0.88\ \text{T}$ 。此后,磁场在外轨电流以及涡流影响下缓慢回升,最终稳定于 $3.2\sim 3.3\ \text{T}$ 。电枢前端内膛磁场较电枢后端内膛磁场下降了约 $57\%\sim 60\%$ 。

图7是不同时刻下电枢前端的中轴线上的磁场。以负载表面为原点,归一化位置指实际位置与身管长度的比值。可以发现 $1.6\ \text{ms}$ 以及 $1.8\ \text{ms}$ 的电枢前端磁场最大,磁场分布在 $2.3\sim 3.3\ \text{T}$,且随着距离增加,先急剧增加,后趋于稳定。 $1.6\ \text{ms}$ 磁场比 $1.8\ \text{ms}$ 磁场偏大 1% ,这可能是计算误差引起的。当时间为 $2.6\ \text{ms}$,即电流为 $380\ \text{kA}$ 时,电枢前端磁场在 $1.5\sim 2.5\ \text{T}$,比起电流在 $431\sim 440\ \text{kA}$ 时下降了 $24\%\sim 35\%$ 。

2.3 空间磁场仿真

图8和图9是电流峰值时刻,以电枢喉部中央

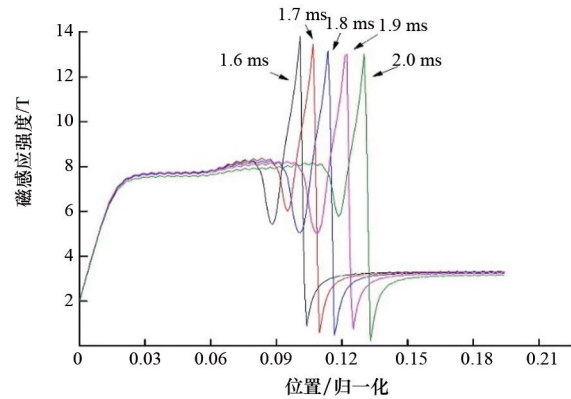


图6 不同时刻膛内中轴线上的磁场

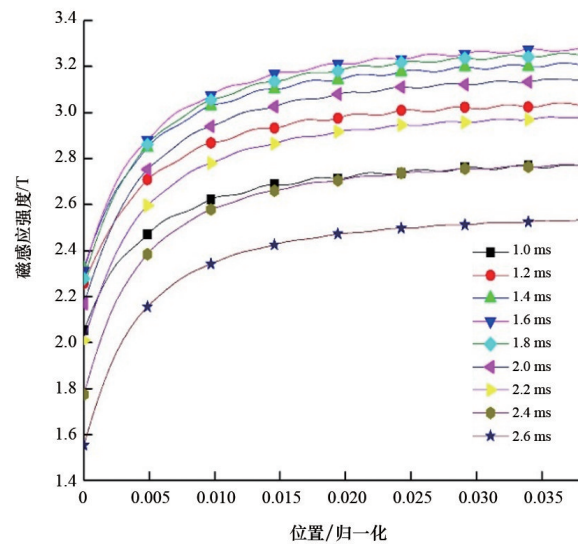


图7 不同时刻电枢前端中轴线磁场分布

为原点径向发散的空间磁场分布。在图3所示的 z 方向,考察点穿过4条轨道以及电枢,形成对称的5个尖峰。由图8可知电枢磁场最大为 $5.2\ \text{T}$,内轨磁场最大 $3.0\ \text{T}$,外轨磁场最大 $1.6\ \text{T}$,空气间隙中磁场较低,其值为 $0.09\ \text{T}$ 。当离开身管中心4倍口径距离时,空间磁场下降为 $0.77\ \text{T}$,8倍口径距离时下降为 $0.19\ \text{T}$,12倍口径距离时下降为 $0.08\ \text{T}$ 。

在图9的 x 轴磁场中,考察点穿过电枢后将直接进入空气域。电枢最大磁场为 $6.4\ \text{T}$,最低为 $5.2\ \text{T}$ 。当离开身管中心4倍口径距离时磁场下降为 $0.7\ \text{T}$,8倍口径距离时为 $0.19\ \text{T}$,12倍口径距离时为 $0.08\ \text{T}$ 。

空间磁场的分析可以为多管联合应用提供数据支撑。

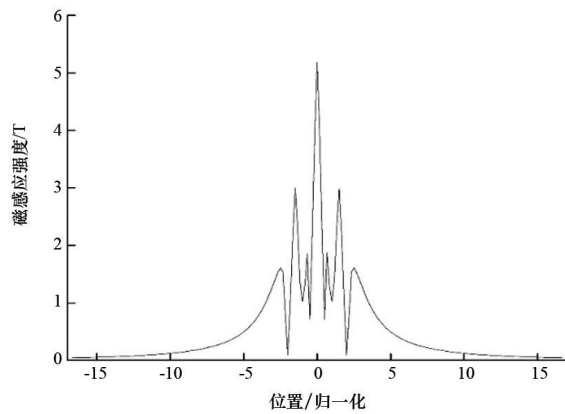


图8 电流峰值时电枢位置z轴磁场分布

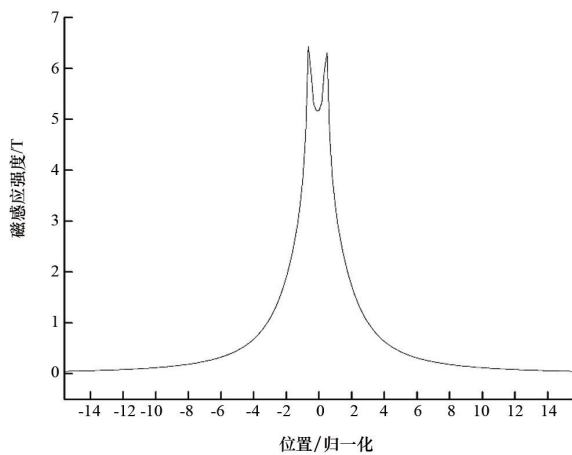


图9 电流峰值时电枢位置x轴磁场分布

3 结论

建立了增强型电磁驱动装置三维瞬态模型,利用高精度霍尔探头测量了增强型电磁驱动装置附近的磁场,与仿真结果进行了对比,验证了模型的可靠性。在此基础上,分析了电枢运动状态下的磁场分布,得出以下结论。

1) 基于ANSYS平台以及动网格技术,建立了三维增强型电磁驱动装置的有限元仿真模型。测量了440 kA电流条件下的空间磁场,并将其与仿真值进行比较,说明仿真模型具有一定的可靠性,可为增强型电磁驱动装置的仿真建模提供参考。

2) 基于仿真模型,分析了增强型电磁驱动装置内膛中轴线上磁场的分布规律,总结了电磁驱动装置径向空间磁场在空间的衰减规律。指出电流

峰值时刻,电枢前端磁场随着距离增大而增大,且磁场增大到一定程度后趋于不变。在该模型中,可认为电枢前端磁场最大为2.3~3.3 T。

本研究的仿真计算与试验测量可为增强型电磁驱动装置的内膛磁场分析以及多管联合应用提供数据支撑。

参考文献(References)

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
- [2] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
- [3] 贺翔, 曹群生. 电磁发射技术研究进展和关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 130-135.
- [4] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 93-95.
- [5] Marshall R A, 王莹. 电磁轨道炮的科学与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [6] Li J, Cao R, Li R. The development of EML technology in China[J]. Plasma Science, IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1029-1033.
- [7] 符尊靖, 徐蓉, 徐伟东, 等. 增强型脉冲大电流直线驱动装置的场路协同仿真[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3716-3723.
- [8] 徐伟东, 刘峰, 袁伟群, 等. 轨道温度对电磁发射性能的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 3013-3019.
- [9] 武晓康, 鲁军勇, 李玉, 等. 电磁发射中导轨温度时空分布规律的实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1982-1987.
- [10] 高成, 刘晓, 石立华, 等. 低频强磁场屏蔽效能的测试方法与测试设备研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2272-2277.
- [11] 李湘平, 李玉, 武晓康. 电磁发射弹丸内膛磁场分布特性的影响因素分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28 (Suppl 1): 79-84.
- [12] 李湘平, 鲁军勇, 李玉, 等. 基于解析法的电磁发射弹丸内膛磁场分布特性分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2205-2211.
- [13] 李湘平, 鲁军勇, 李玉, 等. 电磁发射弹丸膛内磁场分布特性的三维数值分析[J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (8): 34-40.
- [14] 汤铃铃, 李豪杰. 电磁轨道炮膛内磁场环境仿真分析[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 1-5.

- [15] 殷强, 张合, 李豪杰, 等. 静止条件下轨道炮膛内磁场分布特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 180-185.
- [16] Cao R, Li J, Jiao Q, et al. Measure variation of magnetic field waveforms above the rails of rail-gun during the launching period[C]//2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. Beijing: IEEE, 2012: 1-4.
- [17] 徐蓉, 袁伟群, 成文凭, 等. 增强型电磁轨道发射器的电磁场仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1065-1070.
- [18] 林庆华, 栗保明. 电磁轨道炮瞬态磁场测量与数值模拟[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1788-1794.
- [19] 李湘平, 鲁军勇, 谭赛, 等. 基于Fluent二次开发的电磁轨道发射运动磁场仿真[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6364-6371.
- [20] 殷强, 张合, 李豪杰. 动态条件下电磁轨道炮膛内磁场和电场分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(6): 1059-1066.
- [21] 耿轶青, 申泽军, 袁建生. 电磁轨道炮电枢运动产生的磁场特性分析与计算方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2876-2881.
- [22] 楼宇涛. 电磁轨道炮管身涡流的理论和实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [23] 金亮, 巩得鑫. 电磁轨道发射器动态电磁推力特性分析[C]//第十届全国电磁发射技术研讨会. 武汉: 中国电工技术学会, 2021: 212-221.

Analysis of transient magnetic field of augmented electromagnetic driving device

ZHANG Wendi^{1,2}, WANG Jiong^{2,3}, LI Tao^{2,3}, XU Rong^{2,3*}, XU Weidong^{2,3}, YAN Ping^{1,2,3}

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Based on the dynamic grid technology of ANSYS finite element simulation platform, a three-dimensional finite element model of augmented electromagnetic driving device is established. The model's reliability is verified using the spatial magnetic field distribution near the augmented electromagnetic driving device under the 440 kA launch condition. Simulation study with the model is performed and the distribution law of the magnetic field on the central axis of the inner bore of the augmented electromagnetic driving device and the attenuation law of the radial magnetic field of the electromagnetic driving device in space are obtained. It is shown that at the peak of the current, the magnetic induction intensity at the front end of armature first increases and then tends to remain unchanged with the increase of the distance. In the model it is assumed that the maximum magnetic field at the front end of the armature is between 2.3~3.3 T.

Keywords augmented electromagnetic drive; ANSYS; transient magnetic field simulation; magnetic field measurement ●



(责任编辑 傅雪)