

DOI: 10.7652/xjtuxb202002014

电磁发射制导控制器件强磁场特性分析与离线测试方法

张晓, 武文轩, 鲁军勇, 马涛, 李湘平

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 430033, 武汉)

摘要: 针对电磁发射中脉冲强磁场对制导控制器件的破坏性影响且缺乏重复测试手段的问题,在磁场特性分析的基础上,提出了一种离线测试制导控制器件抗磁场能力的方法。基于电磁发射实际工况,分析给出磁感应强度峰值、磁感应强度变化率和持续时间等综合性能要求;基于系统电路分析、磁场计算建模,提出兼顾磁感应强度峰值和磁感应强度变化率、电源规模以及工作空间的磁场发生装置多目标优化设计方法;并利用有限元仿真对所得设计方案进行验证;最终研制出一套孔径 160 mm,磁感应强度峰值 10.2 T、磁感应强度变化率 5 487.5 T/s 并在最大值范围内灵活可调的离线测试装置,实验与仿真结果吻合。该离线测试方法可为电磁发射中制导控制器件在脉冲磁场环境下的保护研究提供灵活高效的测试条件;与原有方式相比,该方法摆脱了发射装置限制,有效降低了成本并提高了测试效率。

关键词: 电磁发射;脉冲强磁场;离线测试;磁场计算

中图分类号: TM836 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0111-08

Analysis of Strong Magnetic Field Characteristics and Off-Line Test Method for Guidance and Control Device of Electromagnetic Launching

ZHANG Xiao, WU Wenxuan, LU Junyong, MA Tao, LI Xiangping

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the destructive influence of pulsed strong magnetic field on the guidance and control device in electromagnetic launching and the lack of repeated testing methods, an off-line testing method for the anti-magnetic field capability of the guidance and control device is proposed based on the analysis of the magnetic field characteristics. Comprehensive performance requirements of such as the magnetic induction intensity peaks, change rate and duration of the guidance and control device are given through analysis according to the actual working conditions of electromagnetic launches. Bases on system circuit analysis and magnetic field calculation modeling, a multi-objective optimization design method is proposed, which takes into account the peak value and change rate of the magnetic induction intensity, the size of power supply and the magnetic field generator in working space. A finite element simulation is conducted to verify the design scheme. An off-line test device is finally obtained, which has a hole diameter of 160 mm, a magnetic induction intensity peak value of 10.2 T, and a change rate of magnetic induction

收稿日期: 2019-07-17。 作者简介: 张晓(1983—),女,副研究员,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877214,51607187,51907203)。

网络出版时间: 2019-10-21 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191021.1601.003.html>

intensity of 5 487.5 T/s, and it is flexibly adjustable within its maximum range. Experimental results agree with simulation results. The proposed off-line test method provides flexible and efficient test conditions for the protection research of guidance and control devices in electromagnetic emission in pulsed magnetic field environment. A comparison with the original method show that the proposed method gets rid of the launcher's limitation, effectively reduces cost and improves test efficiency.

Keywords: electromagnetic launch; pulsed strong magnetic field; off-line testing; magnetic field calculation

电磁发射是继机械能发射和化学能发射之后的一种新概念推进方式,具有广泛的军民通用性^[1],其中导轨式电磁发射利用导轨代替传统的发射管对物体进行超高速发射^[2],用电磁力取代化学燃料,可突破化学能发射的速度极限,具有飞得快(初速 6~7.5 倍声速,8 s 达到视距边界)、飞得远(射程大于 200 km)、射得高(发射高度大于 100 km)、打得准和灵活可控等优越的技术性能,可遂行多种使命任务,将在航空航天等领域带来新一轮变革^[3]。

在电磁发射中,被发射体作为系统的重要组成部分,其制导控制能力是其实用化的关键^[4]。与传统发射技术不同,电磁发射中被发射体在装置内会受到轨道电流^[5-7]所产生的瞬态脉冲强磁场的极端作用,从而导致内部搭载的电子设备受损失效甚至烧毁^[8]。因此,有必要开展膛内发射环境强磁场特性的分析以及模拟技术的研究。

针对电磁发射装置磁场特性的分析以及验证,国内外已有相关报道。2009 年,Riccardo 等基于被发射物静止状态下的导轨短接法研究了膛内电磁场对电子设备的影响^[9]。2016 年,李湘平等提出了一种基于解析法的弹丸内膛磁场分布特性分析方法^[10]。2017 年,美国 GA 公司利用其 3 MJ 电磁轨道发射装置样机,通过动态发射试验对其制导炮弹性能进行了验证^[11]。

脉冲强磁场一直是各国争抢的科学高地^[12-14],针对脉冲磁场的生成技术,国内外已有大量研究。2012 年,美国国家强磁场实验室实现了 100.7 T 的脉冲强磁场。2013 年,我国武汉国家脉冲强磁场科学中心生成了脉宽 10 ms 量级、磁感应强度峰值 90.6 T 以及脉宽 2 s、磁感应强度峰值 35.8 T 的脉冲强磁场^[15-17]。现有脉冲磁场发生装置孔径一般在 10~30 mm^[15],而常用的弹载设备尺寸大大超出这一范围,且没有明确针对磁场变化速率的指标。在医学领域,用于人体治疗和病理研究的磁场装置孔径最大可达数百毫米^[18-19],磁感应强度在毫特量级,

远低于电磁发射工况。2017 年,米彦等提出了一种用于细胞培养液中的高变化率磁场发生器,但磁场强度不足 1 T,脉宽为微秒量级,装置体积微小^[20]。可以看出,现有的各种类型脉冲磁场生成技术均与电磁发射系统的应用需求差距较大。

综上所述,目前电磁发射磁场环境研究多集中在分析与验证,缺少中间测试手段,而脉冲磁场领域尚无直接适用于模拟电磁发射工况的研究。为此,本文基于电磁发射实测电流数据,对电磁发射过程中强磁场特性进行分析研究,得出磁场关键性能指标;依据磁场综合性能要求,提出了脉冲磁场发生装置的多目标优化设计方法,并利用有限元仿真进行验证,最终研制了一套离线测试装置并开展实验。

1 电磁发射制导器件强磁场特性分析

图 1 为电磁轨道发射系统的原理示意图,电枢和搭载物位于发射装置导轨中间,导轨上通过数百万安培的电流。在电枢受到洛伦兹力作用加速前进过程中,搭载物会受到脉冲强磁场作用。该磁场随电枢运动位置和导轨通电时间呈不同的时空分布规律,同时具有高强度、高变化率和宽脉冲特性。

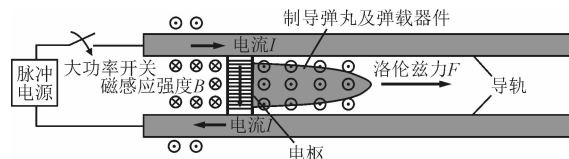


图 1 电磁轨道发射系统原理图

图 2 为实验测得的典型轨道电流波形,电流上升时间为 3.5 ms,电流峰值为 6 MA,波形脉宽为 40 ms,平顶脉宽为 10 ms。

通过实测数据与有限元模型结合的方法,对搭载器件所处环境的磁场分布规律、变化率等特性进行分析。

1.1 磁场时空变化规律

建立大口径发射装置有限元模型^[7,21],其中导

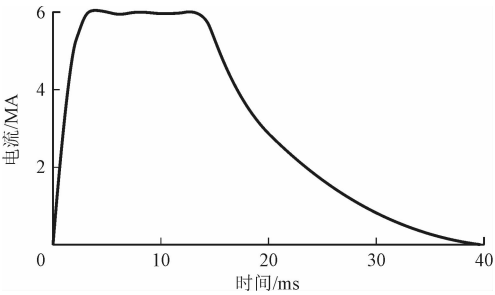


图 2 实测典型轨道放电电流波形

轨间距和导轨宽度均为 100 mm。将图 2 的实测电流波形导入发射装置模型中,仿真得到电流峰值时刻电枢周围磁感应强度的分布,如图 3 所示。膛内磁感应强度最大值为 45 T,位于电枢喉部,从喉部向电枢前端迅速衰减,向电枢尾部缓慢衰减。电枢用于连通上下导轨,并产生向前驱动力;搭载器件安装在电枢前端,该处磁感应强度远低于尾部。

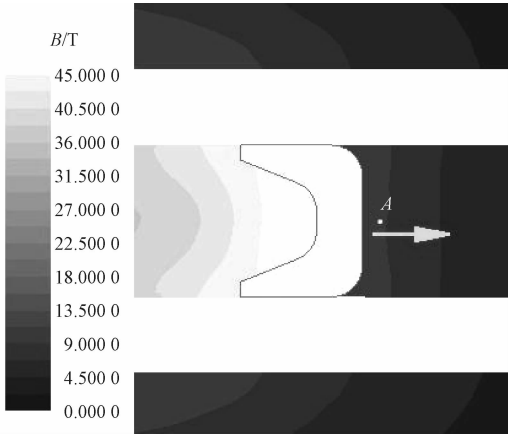
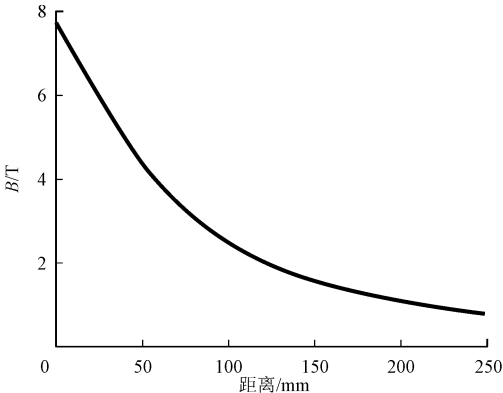
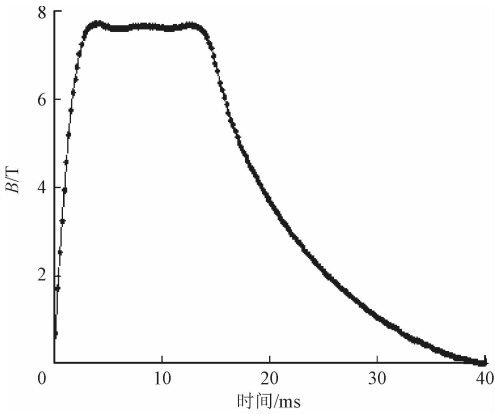


图 3 电枢周围磁感应强度空间分布

以图 3 电枢端面中心前方 10 mm 处点 A(参考点)为原点,箭头所指为正方向,该直线上的磁感应强度分布如图 4a 所示,峰值为 7.69 T,约 60 mm 处磁感应强度降至原点一半。呈锥形结构,前部空间小,尾部空间大,制导控制器件等较大设备主要放置



(a)参考点磁感应强度随距离的变化



(b)参考点磁感应强度随时间的变化

图 4 电枢端面中心磁感应强度随距离和时间的变化

在尾部,需要承受图 4a 中原点附近的强磁场。图 4b 为 A 点的磁感应强度随时间的变化,磁感应强度在电流峰值时刻达到最大值 7.69 T,对应图 4a 的原点附近。

1.2 磁场变化特性

除峰值外,磁场瞬变特性是影响器件性能的一个关键因素。根据图 4b 中磁感应强度可得 A 点磁感应强度变化率,如图 5 所示。

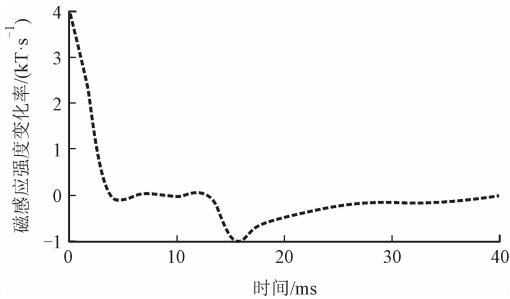


图 5 磁感应强度变化率

由图 5 可见,磁感应强度变化率在开始放电时刻最大,后迅速下降,在电流到达峰值后趋近于 0,在电流下降段先加速降为负数后缓慢抬升至 0。电流上升阶段磁感应强度变化最剧烈,磁感应强度变化率最大为 4 038 T/s。

1.3 磁场模拟与测试装置综合性能要求

根据上述分析,电磁发射制导控制器件膛内所受磁场特性主要包括磁感应强度峰值、磁场脉宽以及磁感应强度变化率;此外,磁场离线测试装置应满足硬件测试的空间要求。

为满足未来一段时间电磁发射技术的发展需求,并考虑装置制造过程中的加工和装配误差,对基于磁场特性理论分析得到的磁场指标(磁感应强度峰值、磁感应强度变化率)设置 30% 裕量,并结合现

有制导控制器件尺寸,将对磁场模拟与测试装置的性能要求总结于表 1。

表 1 磁场模拟与测试装置性能要求

参数	要求
磁感应强度峰值/T	>10
磁感应强度变化率/($\text{T} \cdot \text{s}^{-1}$)	$>5\ 250$
装置内孔直径/mm	160

2 离线测试系统组成与建模

2.1 系统组成

针对电磁发射磁场特性的测试要求,提出图 6 所示的强磁场特性离线测试系统。该系统基于多个电容型脉冲功率单元(CPPM)组成的脉冲功率电源(PPS)工作,对于表 2 所示的宽脉冲电流波形,可通过多组 CPPM 时序控制来实现,进而可将宽脉冲磁场发生问题简化为具有等效峰值和上升率的单脉冲磁场发生问题。基于该原理工作的磁场特性离线测试系统主要由充电装置、脉冲功率电源、磁场发生装置等 3 个部分组成。其中,充电装置实现能量从电网到脉冲功率电源的转换;脉冲功率电源由脉冲储能单元和电能调节装置组成,通过能量调节实现能量从脉冲储能单元到磁场发生装置的转换;控制系统通过信息流实现对全系统能量流的控制。

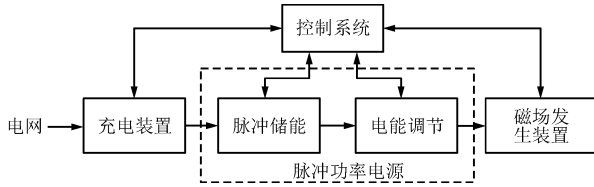


图 6 强磁场特性离线测试系统组成框图

在图 6 所示系统中,充电装置、控制系统和 PPS 已有相关成熟技术,磁场发生装置的设计是实现大孔径、强磁场指标的关键。以下通过建模求解磁场发生装置电感特性,结合电路分析求解电流变化规律,最终得到磁场变化规律解析解。

2.2 磁场发生装置建模

2.2.1 磁场发生装置结构 磁场发生装置采用多排多层空心导体绕制结构,导体截面空心部分通冷却液,实现线圈高效连续工作,具体结构如图 7 所示。其中,内侧线圈半径为 r ,总层数为 N_1 ,总排数为 N_2 ,线圈截面为高 a 、宽 b 的矩形,线圈排间距为 a_1 ,层间距为 b_1 。该装置共由 $N_1 \times N_2$ 匝线圈组成,任意一匝线圈可由其所在层数和排数确定,比如位于第 i 层、第 j 排的线圈可记为 (i, j) 。

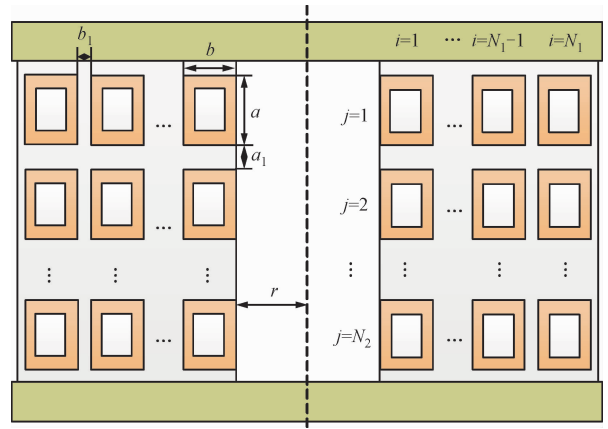


图 7 磁场发生装置剖面结构与尺寸定义

2.2.2 电感计算方法 图 7 所示的磁场发生装置电感 L_f 等于每匝线圈自感和所有线圈之间的互感相叠加。

当忽略导线中心部位电流对电感的影响时,位于 (i, j) 位置、半径为 r_i 的线圈自感可近似计算为^[22]

$$L_{(i,j)} = \mu_0 r_i \left(\ln \frac{8r_i}{a+b} \right) - 0.5 \quad (1)$$

式中: $r_i = (r + 0.5b) + (i-1)(b+b_1)$; μ_0 为真空磁导率。

对于位于 (i_1, j_1) 位置、半径为 r_{i_1} 和位于 (i_2, j_2) 位置、半径为 r_{i_2} 的两个环形线圈,其电流方向一致,二者的互感可近似计算为^[23]

$$M_{(i_1,j_1)(i_2,j_2)} = \mu_0 \sqrt{r_{i_1} r_{i_2}} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K - \frac{2}{k} E \right] \quad (2)$$

式中: K 和 E 是以 k 为自变量的椭圆积分函数;

$$k = \sqrt{\frac{4r_{i_1} r_{i_2}}{(j_1 - j_2)^2 (a + a_1)^2 + (r_{i_1} + r_{i_2})^2}} \quad (3)$$

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}} \quad (4)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \quad (5)$$

整个磁体的总电感为

$$L_f = \sum_{i=1}^{N_1} [N_2 L_{(i,j)}] + \sum_{j_1=1}^{N_2} \sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{j_2=1}^{N_2} \sum_{\substack{i_2=1 \\ (i_1,j_1) \neq (i_2,j_2)}}^{N_1} M_{(i_1,j_1)(i_2,j_2)} \quad (6)$$

2.3 脉冲功率电源建模

强磁场测试系统的脉冲功率电源由多个 CPPM 并联组成,通过分组时序放电控制实现电流的宽脉冲输出。脉冲电源工作电路如图 8 所示,其中 T 为

放电开关。

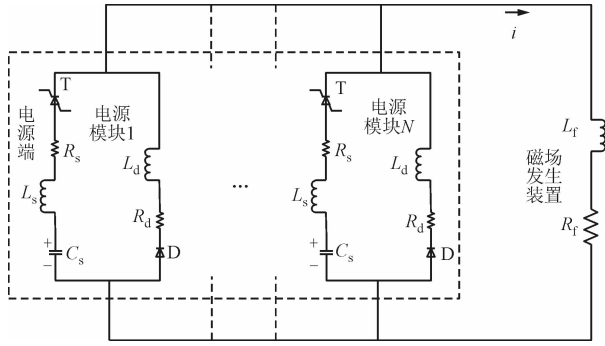


图 8 脉冲电源工作电路

在输出电流到达峰值之前,CPPM 中的二极管 D 均处于截止状态,假设第一组由 n 个 CPPM 并联同时放电,每个 CPPM 的电容为 C_s ,在电流达到峰值前等效电感为 L_s ,并假设磁场发生装置的电感为 L_T ,回路总电阻为 R ,时间为 t ,设置如下参量

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= R/(2L) \\ \omega &= \sqrt{1/(LC) - \sigma^2} \\ \varphi &= \arctan(\omega/\sigma) \\ C &= nC_s \\ L &= L_s/n + L_T \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: σ 为阻尼比; ω 为振荡频率; C 为电源总电容; L 为回路总电感。令电容器初始电压为 U_0 ,则输出电流 $i(t)$ 可表达为^[24]

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) \quad (8)$$

输出电流在时刻 $t_{\max}$ 达到峰值 $I_{\max}$

$$I_{\max} = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\sigma \varphi / \omega} \sin \varphi \quad (9)$$

$$t_{\max} = \frac{\varphi}{\omega} \quad (10)$$

2.4 磁场发生装置中心磁场计算

磁场发生装置线圈采用空心导体,假设电流均匀分布于线材表面,则任意时刻导体截面线电流密度可表示为

$$J = \frac{i(t)}{2(a+b)} \quad (11)$$

基于磁场发生装置剖面,以装置中轴线为 x 轴,中轴线上与第(1,1)匝线圈外侧平齐的点为原点,以排数增长方向为 x 轴正方向,线圈半径增大方向为 y 轴正方向,建立直角坐标系如图 9 所示。

以第 (i, j) 匝线圈电流截面上坐标 (x, y) 、长度为 dl 的电流为微元,沿电流截面矩形边缘为积分路径,由毕奥-萨伐尔定律可得线圈 (i, j) 对中轴线上任意点 $A(x_A, 0)$ 产生的磁感应强度

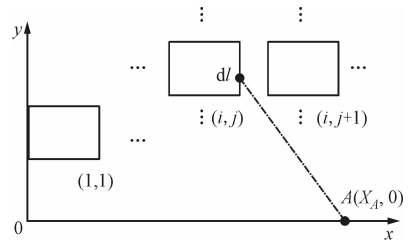


图 9 直角坐标系定义

$$B_{ij} = \oint_{i,j} \frac{\mu_0 J y^2 dl}{2[(x-x_A)^2 + y^2]^{3/2}} \quad (12)$$

对该矩形积分路径,有

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx + dy \quad (13)$$

轴线上某一点 A 处的磁感应强度大小为每个线圈产生的磁感应强度的叠加,可表达为

$$B(t) = \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} B_{ij} \quad (14)$$

3 磁场发生装置优化设计

3.1 优化目标

前文推导得到了脉冲磁场关键性能参数计算方法,其由 CPPM 参数、磁体层数 N_1 、排数 N_2 、线圈截面尺寸、排间距 a_1 、层间距 b_1 等多个变量共同确定。根据发生装置电流承受能力,选用截面 16 mm × 12 mm 的中空导体,根据结构强度和填充空间要求,确定层间距 1 mm、排间距 5 mm,且固定 CPPM 参数。则磁场发生装置的优化目标简化为,确定装置层数 N_1 、排数 N_2 和单次放电 CPPM 个数 n ,使得中心磁场满足表 1 所示要求,同时装置匝数 $N_1 \times N_2$ 最小,CPPM 个数 n 最少。目标可表示为

$$B(t)_{\max} \geq 10 \text{ T} \quad (15)$$

$$[dB(t)/dt]_{\max} \geq 5 \text{ 250 T/s} \quad (16)$$

$$\min(N_1 N_2) \quad (17)$$

$$\min(n) \quad (18)$$

3.2 简化寻优方案

本文优化方向明确,为电源模块数量从小到大、磁体层数 N_1 和排数 N_2 从小到大逐步寻优。基于以上优化方向,可将本文复杂的多目标优化问题简化,寻优计算方案流程如图 10 所示,虚线箭头之间的流程为搜索区域内循环进行。

同一初始条件下,在匝数增加的过程中磁场会呈现先增大后减小的趋势,可行解只在有限范围内出现,可将寻优边界磁感应强度变化趋势作为是否扩大搜索范围的判定条件。在初始设定方阵区域内进行各项参数求解分析, N_1 和 N_2 范围均为 1~

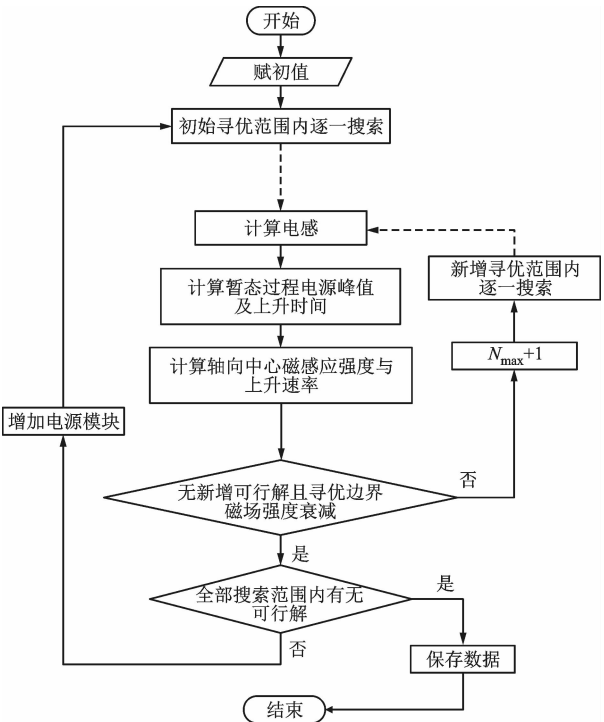


图 10 寻优计算方案流程图

$N_{\max}$, 在区域内有新增可行解, 或区域最大边界 ($N_1 = N_2 = N_{\max}$) 的磁感应强度未随 $N_{\max}$ 增大而衰减时, 将搜索区域边界 $N_{\max}$ 增 1 继续进行寻优运算, 直至不满足扩大搜索区的条件为止。停止扩大搜索区后, 如全部区域内无可行解, 则增加电源模块变更初值重新寻优计算。由于自带可靠的退出循环条件, 不会因某一条件下无可行解而陷入死循环。

3.3 计算结果

将解析模型与寻优计算流程编写程序计算, 最终在等效电容 33 mF 的电源方案下得到了可行解, 可行解及邻近空间解如表 2 所示。

表 2 可行解及其邻近空间解

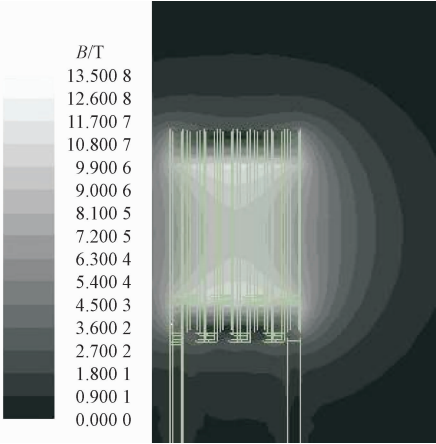
排数	层数	磁感应强度 峰值/T	磁感应强度变化率 峰值/(T · s ⁻¹)
7	3	9.165 9	6 893.6
	4	10.075 6	5 733.0
	5	10.468 6	4 667.1
8	3	9.559 1	6 623.9
	4	10.402 5	5 380.3
	5	10.732 8	4 317.5
9	3	9.830 6	6 325.7
	4	10.611 1	5 043.6
	5	10.888 7	4 003.6

最终选定 8 排 4 层为装置设计方案。回路总电

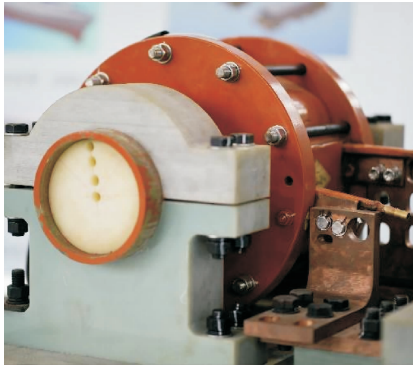
感为 210 μH, 充电电压为 8 000 V 时, 可得脉冲电流峰值为 77.507 kA, 上升时间约 3.56 ms。

4 仿真与实验验证

将解析计算所得电流波形作为激励, 对脉冲磁体进行三维有限元仿真, 可得磁体轴向横截面峰值磁感应强度分布如图 11a 所示。依照现有的脉冲磁场装置结构加固方法^[25], 对设计所得线圈进行加固装配后得到的磁场发生装置实物如图 11b 所示。装置在室温下实测电阻值为 3.86 mΩ, 实测电感值为 156 μH。



(a) 轴向截面峰值磁感应强度分布



(b) 磁场发生装置实物图片

图 11 磁场发生装置实物与仿真结果

利用磁场测试仪在磁体内腔中不同位置进行多次脉冲放电下的磁场测试。以装置中轴线中心为原点, 10 组不同位置点实测数据与解析计算和有限元仿真结果比对如图 12 所示。

由图 12 可知, 实验数据与仿真结果基本吻合。引起误差的原因为: 系统放电参数随每次实验的变化, 实际充电电压的小范围偏差, 磁场测试仪位置误差以及测试仪探针与装置中轴线无法完全重合。

以图 12 中测试点 P 为例, 其磁场实测波形如

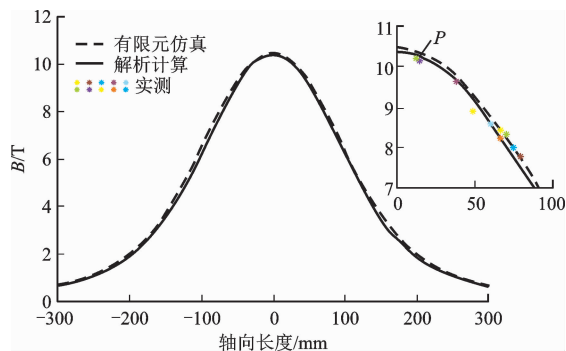


图 12 磁场实测点磁感应强度与计算和仿真结果对比

图 13 所示,峰值磁感应强度为 10.2 T,根据初始 0.2 ms 内的磁感应强度变化情况,近似求得磁感应强度变化率最大值为 5 487.5 T/s。关键参数对比如表 3 所示。

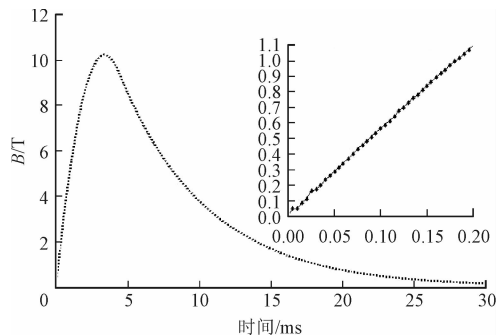


图 13 单脉冲磁场实测波形

表 3 关键参数对比

数据来源	峰值 电流/ kA	峰值 时间/ ms	中心磁感 应强度峰 值/T	磁感应强度 变化率峰值/ (T·s ⁻¹)
解析计算	77.507	3.56	10.402 5	5 380.3
实测	75.61	3.48	10.2	5 487.5
相对误差/%	2.51	2.30	1.99	1.95

通过脉冲电源充电电压 0~8 000 V 的设置,可实现中心磁感应强度 0~10.2 T 和磁感应强度变化率峰值 0~5 487.5 T/s 的任意调节。

5 结 论

本文基于电磁发射实测电流数据,对电磁发射制导控制器件所处磁场环境特性进行了分析,结合硬件测试需求,提出了一种强磁场的离线模拟与测试方法。依据电磁发射磁场综合指标提出了一种简化寻优的大口径高上升率脉冲强磁场发生装置设计方法,仿真和实验检验了磁场计算、电感计算、电路模型分析方法的正确性,验证了系统整体设计方案

的可行性。研制了满足电磁发射制导控制器件离线测试需求的脉冲强磁场发生装置,适用于现在和未来一段时间内电磁发射制导控制器件的磁场适应性测试,也可满足其他各领域中受脉冲磁场影响的电子器件测试需求。

参考文献:

[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): 2-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 2-5.

[2] 王莹,肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 416-419.

[3] 李军,严萍,袁伟群,等. 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.
LI Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun, et al. Electromagnetic gun technology and its development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064.

[4] MORRISON P H. A lesson learned about cannon-launched guided projectiles [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2012, 3(2): 154-157.

[5] 肖铮,陈立学,夏胜国,等. 电磁发射用一体化 C 形电枢的结构设计 [J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1809-1814.
XIAO Zheng, CHEN Lixue, XIA Shengguo, et al. Geometry design of monolithic C-shaped armature for EML system [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1809-1814.

[6] HARRY D F. The science and technology of electric launch [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 37(1): 25-31.

[7] 谭赛,鲁军勇,张晓,等. 电磁轨道发射器动态发射过程的数值模拟 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 43-48.
TAN Sai, LU Junyong, ZHANG Xiao, et al. Numerical simulation of dynamic launching in electromagnetic rail launcher [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 43-48.

[8] 廖桥生,张祥金,李豪杰,等. 轨道炮弹丸所处强磁场环境屏蔽设计与仿真 [J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 67-72.
LIAO Qiaosheng, ZHANG Xiangjin, LI Haojie, et al. Simulation of in-bore high magnetic shielding for rail-gun projectile [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2016, 37(2): 67-72.

[9] RICCARDO C, MARKUS S, BERNARDO T. The use of electronic components in railgun projectiles [J].

- IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 578-583.
- [10] 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.
- LI Xiangping, LU Junyong, LI Yu, et al. Analysis of distribution characteristics of in-bore magnetic field of electromagnetically launched projectile based on analytical method [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12): 2205-2211.
- [11] 美电磁炮试射制导炮弹 [J]. 兵器, 2017, 19(8): 5.
- US electromagnetic gun test firing guided projectile [J]. Arms, 2017, 19(8): 5.
- [12] JIANG Fan, PENG Tao, XIAO Houxiu, et al. Design and test of a flat-top magnetic field system driven by capacitor banks [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(4): 045106.
- [13] FONER S. 68.4-T-long pulse magnet: test of high strength microcomposite Cu/Nb conductor [J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(15): 982-983.
- [14] PROMISLOW J H E, GAST A P. Magnetorheological fluid structure in a pulsed magnetic field [J]. Langmuir, 1996, 12(17): 4095-4102.
- [15] 彭涛, 李亮. 脉冲强磁场技术发展现状与趋势 [J]. 物理, 2016, 45(1): 11-18.
- PENG Tao, LI Liang. The status and future development of pulsed high magnetic fields [J]. Physics, 2016, 45(1): 11-18.
- [16] XIE J F, XIONG Y D, HAN X T, et al. Design and realization of the control and measurement system of the long pulsed high magnetic field facility supplied by battery [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2013, 170(5/6): 569-575.
- [17] KATANO S, MINAKAWA N, HASEBE T, et al. New cryocooler-cooled superconducting magnet: a 13.5 T high-field split-pair coil magnet for neutron scattering [J]. Physica: B Condensed Matter, 2006, 385/386(2): 1300-1302.
- [18] 关志成, 素华峰, 贾志东. 通电空心线圈系统产生的磁场分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2735-2740.
- GUAN Zhicheng, SU Huafeng, JIA Zhidong. Analysis on magnetic field distribution generated by axisymmetric hollow coils systems [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2735-2740.
- [19] 潘伟, 潘卫东, 许静静, 等. 用于糖尿病并发症研究的极低频脉冲磁场设计与实现 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(12): 65-70.
- PAN Wei, PAN Weidong, XU Jingjing, et al. Design and implementation of extremely low frequency pulsed magnetic field for the study of diabetic complications [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12): 65-70.
- [20] 米彦, 芮少琴, 储贻道, 等. 基于阿基米德螺旋线圈的高变化率脉冲磁场发生器 [J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 578-586.
- MI Yan, RUI Shaoqin, CHU Yidao, et al. Pulsed magnetic field generator with high-variation rate based on Archimedes spiral coil [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 578-586.
- [21] 曹昭君, 肖铮. 电磁发射系统 C 形固体电枢的电流密度分布特性及其机理分析 [J]. 电工电能新技术, 2012, 31(2): 23-26.
- CAO Zhaojun, XIAO Zheng. Current density distribution characteristics and mechanism analysis of C-shaped solid armature in electromagnetic launch system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(2): 23-26.
- [22] 卡兰塔罗夫 II Л, 采伊特林 Л А. 电感计算手册 [M]. 陈汤铭, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1992: 212-213.
- [23] 肖后秀, 李亮. 脉冲磁体的电感计算 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 14-18.
- XIAO Houxiu, LI Liang. Inductance calculation for pulsed magnets [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 14-18.
- [24] 王莹. 高功率脉冲电源 [M]. 北京: 原子能出版社, 1991: 9-11.
- [25] 彭涛, 辜承林. 脉冲磁体增强技术发展概述 [J]. 物理, 2002, 31(11): 733-735.
- PENG Tao, GU Chenglin. Development of reinforcement technology for pulsed magnets [J]. Physics, 2002, 31(11): 733-735.

(编辑 亢列梅)