

旋转永磁式机械低频天线的系统设计与验证*

郝振洋¹, 汪禹萱¹, 周强², 李雪¹, 张绮瑶¹, 施伟²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 211106; 2. 国防科技大学第六十三研究所, 江苏南京 210007)

摘要:为实现低频电磁发信系统的小型化和低功耗,面向旋转永磁式机械天线的理论研究和 technical 实践,提出了基于多物理场耦合仿真的系统设计和性能校验方法。设计了包含永磁磁源、高效驱动电机及其控制器在内的旋转永磁式机械天线系统方案。研制了实验样机,并对其系统性能和近区磁场进行了实验测试,验证了相关设计方法和系统方案的可行性与有效性。结果表明,该样机的磁场场强和尺寸等主要指标达到了美国“机械天线”项目在射频穿透技术领域的要求,为旋转永磁式机械天线方案研究和样机设计提供了一种可行思路。

关键词:机械天线;旋转永磁式机械天线;多物理耦合仿真;磁源设计;高速永磁同步电机;控制器

中图分类号:TN822+.1;TN929.3 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2023)01-067-07



与作者互动
听语音
聊科研

System design and verification of rotating-magnet based mechanical low-frequency antenna

HAO Zhenyang¹, WANG Yuxuan¹, ZHOU Qiang², LI Xue¹, ZHANG Qiyao¹, SHI Wei²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. The Sixty-Third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to achieve the miniaturization and low power consumption of the low-frequency electromagnetic transmitter, a system design and performance verification method based on multi-physics coupling simulation was proposed for the theoretical research and technical practice of RMBMA (rotating-magnet based mechanical antennas). A RMBMA system scheme including a permanent magnet source, a high-efficiency drive motor and its controller was designed. By developing an experimental prototype, the system performance and near magnetic field characteristics were tested experimentally, and the feasibility and effectiveness of the proposed design method and system scheme were verified. Results show that the main indexes of the prototype, such as magnetic field intensity and size, meet the requirements of the penetrating radio frequency technical area in the AMEBA (a mechanically based antenna) project of the United States, which provides a feasible idea for the scheme research and prototype design of RMBMA.

Keywords: mechanical antenna; rotating-magnet based mechanical antenna; multi-physics coupling simulation; magnetic source design; high-speed permanent magnet synchronous motor; controller

超低频 (super low frequency, SLF) 和甚低频 (very low frequency, VLF) 电磁波具有传播距离远、海水穿透性好和抗电磁脉冲干扰能力强等特点,因而 SLF、VLF 等低频电磁通信在水下通信等领域的应用潜力巨大^[1-2]。由于其发射天线为电小天线 (electrically small antenna, ESA),存在辐射效率低、体积及发射功率庞大等问题^[3-4],限制了低频电磁通信在相关领域的广泛应用。小尺寸、低功耗的低频电磁通信方案成为近年来国内外研究的热点。

机械天线 (mechanical antenna, MA) 是利用

机械运动的电荷或磁矩直接激励电磁波的一种新型低频电磁发信技术。2016年12月,美国国防部高级研究计划局 (defense advanced research projects agency, DARPA) 提出了 MA 的概念和项目指南^[5],并于2017年8月正式启动了 AMEBA (a mechanically based antenna) 项目。根据不同的辐射材料和机械运动方式,MA 可分为振动驻极式、振动永磁式、旋转驻极式和旋转永磁式等技术体制^[6]。得益于稀土永磁材料和旋转伺服控制技术在军事和民用领域的成熟应用,旋转永磁式 MA (rotating-magnet based MA, RMBMA) 已成为

* 收稿日期:2021-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61971431);国防科技大学科研计划重点资助项目(ZK17-02-05)

作者简介:郝振洋(1981—),男,江苏盐城人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhenyang_hao@nuaa.edu.cn;

周强(通信作者),男,重庆人,副研究员,博士,E-mail:zhouqiang63@nudt.edu.cn

国内外该领域研究的重点方向。如图 1 所示, RMBMA 主要由控制器、驱动电机和旋转磁源构成, 通过对旋转磁源的运动状态进行控制, 直接激励低频电磁波信号并实现信息加载。

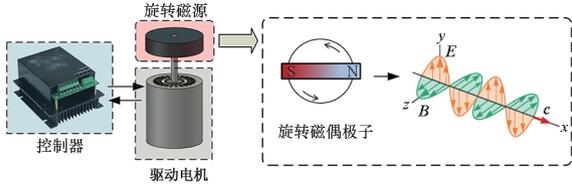


图 1 RMBMA 基本原理及实现形式

Fig. 1 Basic principle and realization form of RMBMA

近年来, 国内外相关高校和研究机构分别对 RMBMA 的辐射机理、电磁场传播特性和实现方案等进行了研究^[6-14]。其中, 文献[7-9]研究了 RMBMA 的远场辐射特性, 提出基于永磁体阵列的技术方案, 论证了该系统可突破 Chu-Harrington 限制。文献[10]提出了一种在永磁体两侧各增加 1 对十字型导磁块的倍频方案, 在相同频率下可降低转速要求, 但会增加永磁体的漏磁, 将降低等效磁矩。文献[11]推导了 RMBMA 在均匀有损介质中产生时变电磁场的表达式, 并对其分布与衰减特性进行了仿真与实验验证。基于安培环路电流理论, 文献[12]推导了旋转永磁体产生电磁场分布的通用解析表达式, 提出了基于旋转永磁体阵列的近场分布特性幅度或相位调控方法。文献[13]提出了一种基于钕铁硼(NdFeB)永磁体和永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的 RMBMA 技术方案及针对频移键控(frequency shift keying, FSK)和最小频移键控(minimum frequency shift keying, MSK)的信息加载方法, 建立了系统分析模型, 并通过实验证明了该方案的可行性。可以看出, 当前关于 RMBMA 的研究主要是针对辐射机理、整体技术方案、信息加载以及原理验证等, 但对 RMBMA 的系统设计方法的研究还较少。

本文提出了一种基于多物理耦合仿真的 RMBMA 系统设计和性能校核方法, 设计了包含旋转磁源、驱动电机及其控制器在内的 RMBMA 系统方案, 研制了 RMBMA 实验样机, 构建了实验测试平台, 并对其系统性能和近区磁场进行了实验测试, 验证了相关设计方法和系统方案的可行性和有效性。

1 RMBMA 的系统设计方法

1.1 RMBMA 的系统架构

如图 1 所示, RMBMA 主要由旋转磁源、驱动

电机及其控制系统等构成^[13]。其中, 旋转磁源由永磁体与非导磁护套构成, 永磁体用于产生所需静态强磁场, 非导磁护套降低永磁体高速旋转时的机械应力。驱动电机产生磁源旋转所需的电磁转矩。根据输入给定及磁源(电子转子)的状态反馈, 结合一定控制策略, 控制器实时改变驱动电机的电压和电流, 从而实时调节驱动电机的输出转矩, 使磁源的旋转状态实时跟踪输入给定, 产生所需发射的电磁信号并实现信息加载。此外, 待发射的码元数据需转换为对磁源旋转状态的输入给定。

1.2 基于多物理场耦合仿真的系统设计

基于多物理场耦合仿真的 RMBMA 系统设计方法如图 2 所示, 主要分为两部分。

1) 根据磁源辐射及旋转驱动要求, 开展永磁材料选型、磁源结构设计与性能校核。由于 MA 应用背景特殊, 需考虑磁场强度、旋转转速及应力、应用环境等方面的因素, 选择适合 MA 应用的高性能稀土永磁材料(钕铁硼、钕钴等)及其加工工艺, 对磁源结构进行优化设计, 对其电磁、应力、损耗、温度等多物理场耦合仿真分析, 通过多次优化迭代, 最终达到辐射性能和结构应力等设计要求。

2) 根据旋转驱动要求, 对驱动电机本体结构进行设计和性能校核。为了应对高速旋转条件下电机本体在输出转矩、振动、温升及应力等方面面临的挑战, 对驱动电机本体结构及其参数进行优化设计, 通过对其电磁、应力、损耗、温度等多物理场耦合仿真分析和性能校核, 经过多次迭代, 最终达到所需的旋转驱动性能、应力及损耗等设计要求。

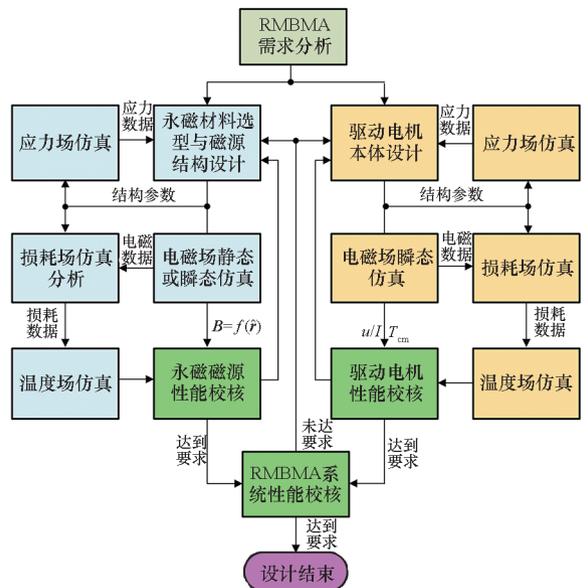


图 2 基于多物理场耦合仿真的系统设计流程

Fig. 2 System design flow based on multi-physics coupling simulation

2 RMBMA 的系统方案设计

2.1 RMBMA 的设计目标

参考 AMEBA 项目的技术指标要求,本文 RMBMA 实验样机的设计目标为:频率范围为 0.1 ~ 1 kHz;磁场强度为 0.1 μT @ 空气 10 m (等效 100 fT@ 空气 1 km);调制速率为 10 Hz/s;最大尺寸为 60 cm;磁源体积为 $\leq 3\ 000\ \text{cm}^3$ 。

2.2 磁源材料选型与结构设计

RMBMA 可等效为一个旋转磁偶极子^[6],其近区磁场分布如式(1)所示,其输出近区磁场与磁源的磁矩 m_0 成正比。考虑旋转驱动的功耗及应力要求,磁源的设计目标为在尽量小的体积内获得足够大的磁矩。

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 m_0}{4\pi r^3} \cos(\omega t) [2(\cos\theta + j\sin\theta\sin\varphi)\hat{\mathbf{r}} + (\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\boldsymbol{\theta}} - j\cos\varphi\hat{\boldsymbol{\varphi}}] \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, m_0 为磁矩, r 为传播距离, ω 为旋转角频率, $\hat{\mathbf{r}}$ 、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 、 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}$ 分别为 r 、 θ 、 φ 方向的单位矢量。

2.2.1 永磁材料及其制备工艺选取

为用较小磁源体积产生所需强磁场,对永磁材料的剩磁 (B_r)、矫顽力 (H_c) 和最大磁能积 (BH_{\max}) 等指标提出了极高要求。稀土永磁体是目前磁性最强的永磁材料之一,可同时实现很高的 B_r 、 H_c 和 BH_{\max} ,非常适合 RMBMA 应用,主要有钐钴 (SmCo) 和 NdFeB 两大类^[15]。其中,SmCo 的热稳定性好,工作温度大于 250 $^{\circ}\text{C}$,最大 B_r 可达 1.1 T,但抗压性能差 (25 ~ 35 MPa),高速下易碎裂;NdFeB 的磁性能和力学性能更优,其 B_r 最高可达 1.4 T,抗拉强度可达 70 ~ 140 MPa,但热稳定性相对较差,工作温度一般要求低于 180 $^{\circ}\text{C}$ 。综合考虑,NdFeB 永磁体更具优势,本文选取 B_r 为 1.15 T、 H_c 为 967 kA/m 的 N40H NdFeB 永磁材料。

按照生产工艺不同,NdFeB 永磁体可分为烧结、黏结和注塑三类^[16]。其中,烧结 NdFeB 永磁体经过气流磨制粉后冶炼而成,拥有极高的磁性能,且机械性能也相当优异,便于切割加工,因此选择烧结 NdFeB 工艺。磁源的充磁方式主要有平行磁化和径向磁化等。基于相同的材料和结构,平行磁化的充磁方式相对径向磁化来说漏磁更小,其等效磁矩更大,磁辐射性能相对更强,因此选用平行磁化工艺。

2.2.2 磁源结构的优化设计

磁源旋转产生的电磁波频率可表示为:

$$f = pn/60 \quad (2)$$

其中, n 为转速, p 为极对数。从式(2)可知, f 一定时,提高 p 可以降低对 n 的要求,但会加速磁场衰减^[6]。因此,在本方案设计采用单极对结构,为满足 1 kHz 的最高工作频率,磁源的最高转速确定为 60 000 r/min。

为减少高速旋转应力,磁源采用圆柱体结构。由式(1),磁源的近区磁场强度与 m_0 成正比,而 m_0 可表示为:

$$m_0 = VB_r/\mu_0 \quad (3)$$

其中, V 为永磁体体积。因此其近区磁场仅与永磁体材料的 B_r 和 V 相关,与磁源的具体几何结构参数无关。因此,结合永磁材料的应力和热稳定性要求,磁源结构的优化设计主要考虑以下几个方面:

①由场强要求及式(1)、式(3)确定永磁体体积;②对永磁体的长径比进行优化,避免过大的直径,以限制脆性磁体上的离心力应力,同时控制轴向长度,以避免弯曲应力带来的振动问题;③限制风阻及介质损耗,确保磁源温度在永磁材料的工作温度以内。磁源圆周表面和端面的风摩擦损耗 P_w 可表示为^[17]:

$$P_w = (k + 0.5) C_f \pi \rho_a \omega^3 (r_2^4 l + r_2^5 - r_1^5) \quad (4)$$

其中: k 为表面粗糙程度系数; ρ_a 为空气密度; r_2 、 r_1 和 l 分别为外半径、内半径和轴向长度; C_f 为摩擦系数,取决于气体速度和特性。

通过如图 2 所示系统设计流程,最终选取磁源外径 $r_2 = 4.1\ \text{cm}$ 、内径 $r_1 = 1.8\ \text{cm}$ 、轴向长度 $l = 11.8\ \text{cm}$,忽略电机转子风阻,根据磁源几何结构尺寸,60 000 r/min 时 P_w 约为 1 031.6 W。基于 Maxwell 有限元仿真软件对磁源性能进行仿真校核,图 3 ~ 5 分别给出了磁源的静态磁场、应力场和温度场仿真分布,其在 10 m 处的磁场场强约为 0.105 μT ,60 000 r/min 下磁源的最大切向、径向应力分别约为 21.4 MPa、55.5 MPa,最高温度约为 101.88 $^{\circ}\text{C}$,均满足设计目标和 NdFeB 材料的应力和工作温度要求。

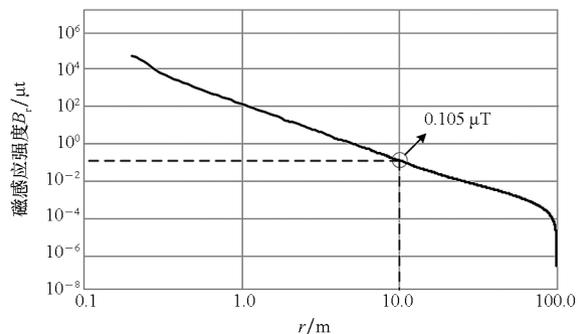
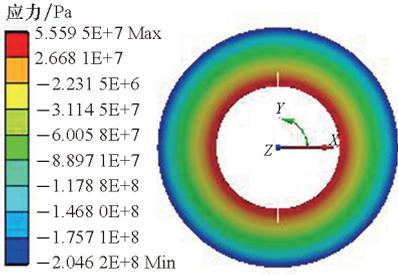


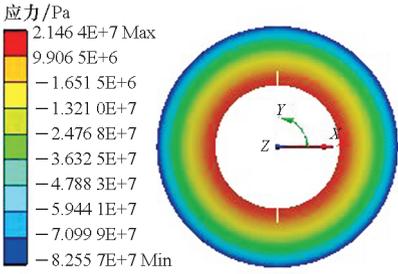
图 3 辐射强度仿真结果

Fig. 3 Radiation intensity simulation results



(a) 径向应力

(a) Radial stress



(b) 切向应力

(b) Tangential stress

图 4 应力场仿真

Fig. 4 Stress simulation

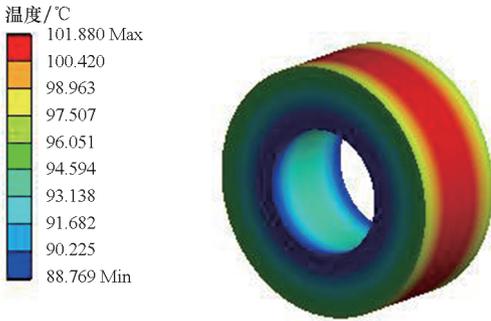


图 5 温度场仿真

Fig. 5 Stress simulation

2.3 高速驱动电机设计及仿真分析

高速领域使用的电机主要有感应电机、永磁电机和开关磁阻电机^[18]。其中,永磁电机因其效率高、功率密度高、结构简单更适用于 RMBMA 系统^[6]。本文采用 PMSM 对磁源进行高效旋转驱动与状态控制^[13]。

2.3.1 PMSM 的额定功率计算

PMSM 的负载主要是磁源和转子与空气摩擦产生的风阻损失和转速动态变化产生的惯性损失。总电功率的解析计算为:

$$P = P_w + J\omega(d\omega/dt) \quad (5)$$

其中, J 为磁源及电机转子的转动惯量,可由下式计算得出:

$$J = m(r_1^2 + r_2^2)/2 \quad (6)$$

其中, m 为磁源质量。烧结 NdFeB 永磁体密度为 $7\,300\text{ kg/m}^3$,根据磁源的体积和内外径参数,可得 $J = 3.68 \times 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。又由于设计目标中的调制速率为 10 Hz/s ,对应转速变化率为 $600\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})/\text{s}$,可得转速动态变化所需最大功率为 $1\,451.2\text{ W}$ 。综合考虑上述功率需求、电机本体及控制器的损耗(铜耗、铁耗等)并保留一定功率余量,从而确定电机在 $60\,000\text{ r/min}$ 时的额定功率为 5 kW 。

2.3.2 PMSM 本体结构设计

基于磁、应力、损耗、温度等多物理场耦合仿真,对 PMSM 本体进行优化设计^[19]。图 6~9 分别给出了额定工况下电机磁场分布、铁耗变化曲线、稳态温度场分布和电磁转矩曲线的仿真图。经仿真校核,额定工况下,该电机总损耗约 121.1 W (铁耗 66.2 W 、绕组铜耗 12.9 W 、转子风摩损耗 42.0 W),最高温升约 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 且在定子绕组处,平均输出转矩 T 约 $0.796\text{ N} \cdot \text{m}$,转矩脉动约 $0.006\text{ N} \cdot \text{m}$,最后由 $P = \omega T$ 可得,额定输出功率约 $5\,001.42\text{ W}$,满足设计要求。

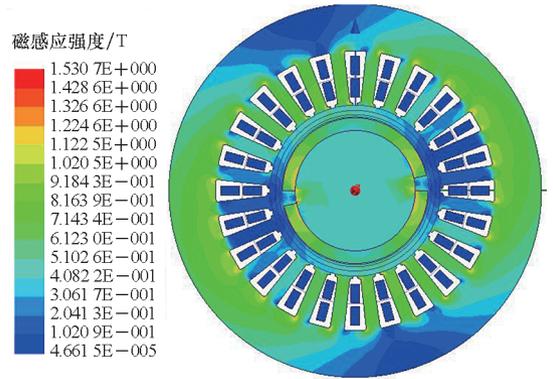


图 6 PMSM 的 2D 电磁场仿真

Fig. 6 2D electromagnetic field simulation of PMSM

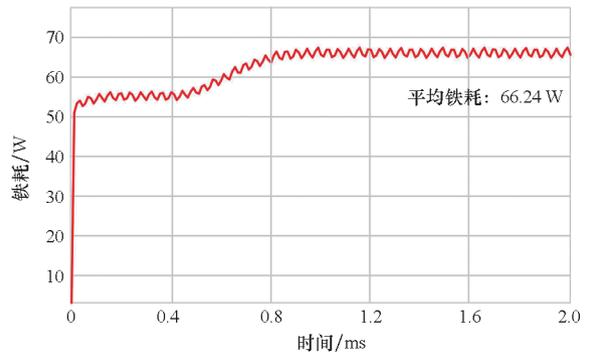


图 7 PMSM 铁耗仿真

Fig. 7 PMSM iron loss simulation

2.4 控制策略选取

对于 FSK、MSK 等恒包络波形,需对磁源进行高精度转速伺服控制,主要有直接转矩控制^[20]和矢量控制^[21]两类控制策略。直接转矩控制实

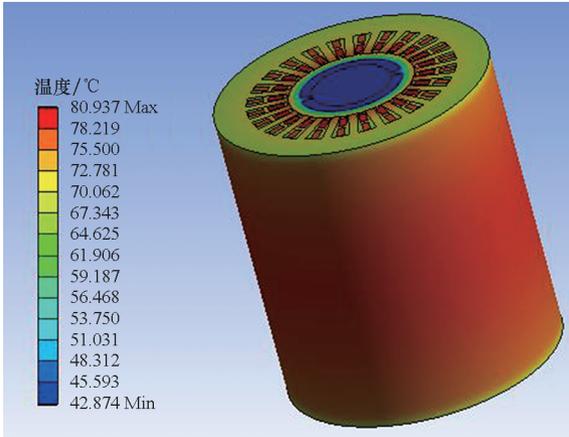


图 8 PMSM 的稳态温度场仿真

Fig. 8 Simulation of temperature field of PMSM

现简单,转矩响应快,动态性能好,但转矩脉动较大,将影响稳速精度和调速范围。矢量控制的控制精度高,调速范围大,抗负载扰动性能较好,更适用于 RMBMA。

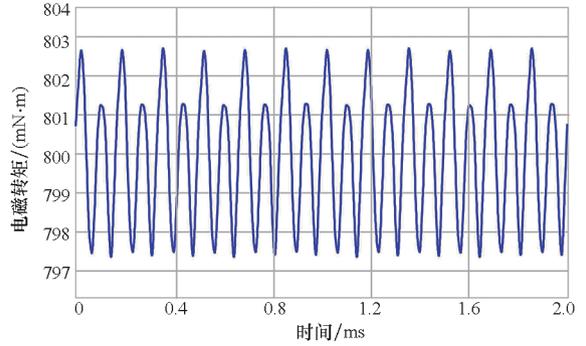


图 9 电磁转矩性能

Fig. 9 Electromagnetic torque performance

PMSM 的矢量控制框图如图 10 所示,信息加载模块产生相应的电机运动状态指令,基于矢量控制策略,通过对 PMSM 实时转速进行控制来调节磁源旋转状态,以此来产生所需调制信号。其中, n^* 为转速控制指令,采用基于转速闭环的 PI 控制,可实现对给定运动状态的快速跟踪,并具有较好的抗负载扰动性能。

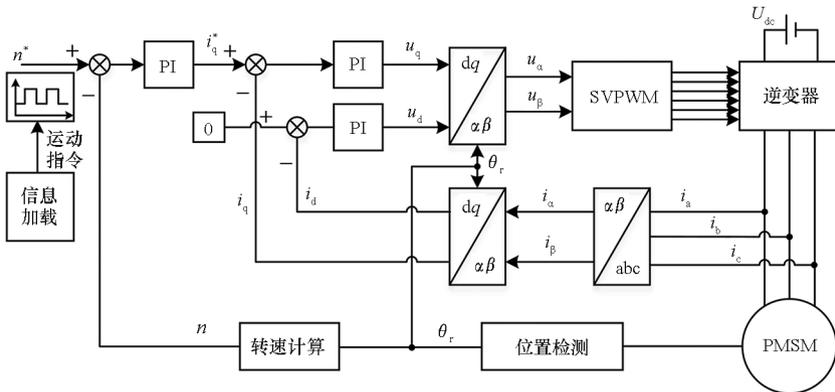


图 10 用于 PMSM 的矢量控制框图

Fig. 10 Vector control of PMSM

3 RMBMA 实验样机研制及实验测试

3.1 实验样机及实验环境

基于上述方案设计,研制的 RMBMA 实验样机与测试环境如图 11 和图 12 所示。辐射单元(含 PMSM)最大尺寸约 0.4 m。测试设备主要包括低频磁性天线(工作频段:1 Hz ~ 3 kHz,灵敏度:3 fT/√Hz@100 Hz)、低噪声信号采集模块(工作频段:0.1 Hz ~ 10 kHz,灵敏度:100 nV/√Hz)和进行频谱分析的上位机。

由于 RMBMA 的近区磁场在磁源旋转平面的径向方向上最强^[13],为测试实验样机的最大辐射能力,如图 13 所示,将低频磁性天线放置于磁源的旋转平面内,且与其旋转轴垂直的水平面上。移动低频磁性天线,使其逐渐远离磁源,测试不同距离 r 处的近场场强。对于采用的低频磁性天

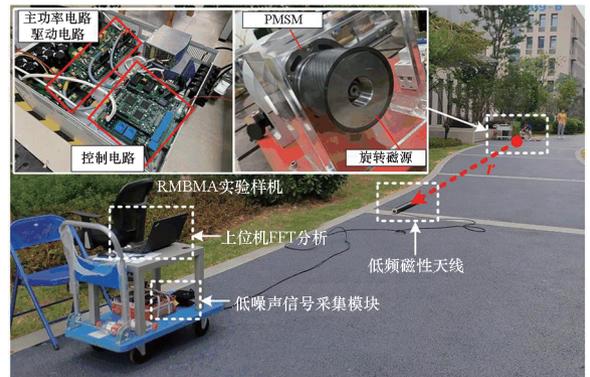


图 11 实验样机及测试环境

Fig. 11 Experimental prototype and test environment

线,所测场强 B (单位:nT) 与其输出电压幅度 U (单位:dBV) 满足 $B = 10^{1+U/20}$ 。为减少电磁干扰,实验测试场地在室外相对开阔地带,且环境噪声(磁源及 PMSM 不旋转时)的磁场场强小于 1 pT。

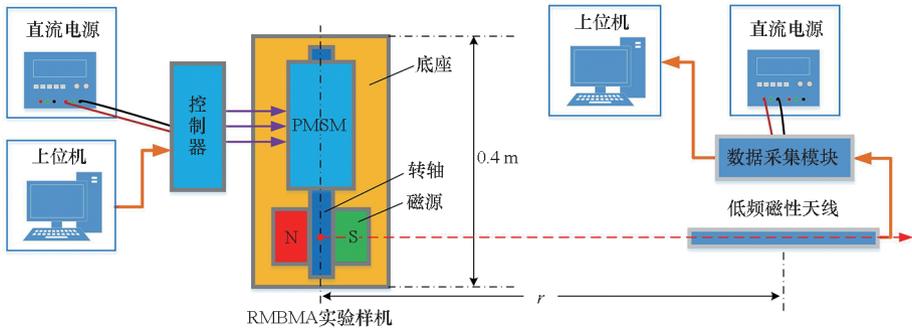


图 12 RMBMA 实验样机及测量天线布局示意图

Fig. 12 Layout of RMBMA principle prototype and measuring antenna

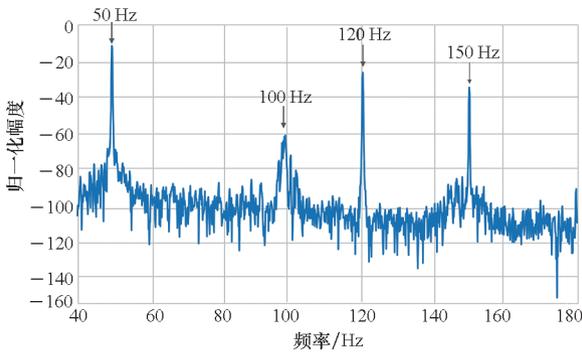


图 13 100 m 处实测信号频谱

Fig. 13 Signal spectrum measured at 100 m

3.2 近区磁场测试

设定 PMSM 转速为 7 200 r/min, 对应发射信号频率为 120 Hz, 距磁源 100 m 处的实测低频天线接收信号频谱如图 13 所示, 其频谱除发射信号频率外, 主要为 50 Hz 工频及其高次谐波。图 14 给出了接收天线距离磁源从 10 m 至 100 m 变化时的磁场场强变化趋势。在 10 m 附近, 由于低频磁天线输出信号饱和, 实测场强偏小, 从 20 m 以后, 其强度随距离的三次方衰减, 最终在 100 m 处测得磁场强度约为 128 pT, 由于实验场地的限制, 虽然没有进行更远距离的测试, 但根据其衰减特性, 等效得到 1 000 m 处的磁场场强约为 128 fT, 可达到设计目标。

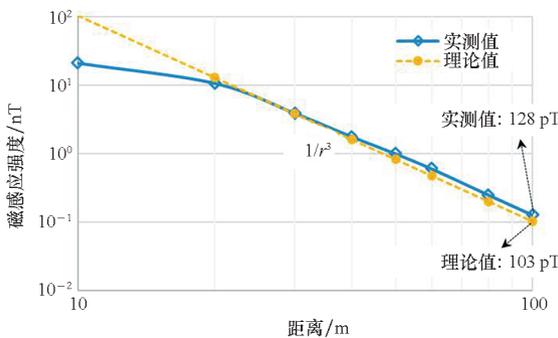


图 14 磁场场强测试

Fig. 14 Magnetic field strength test

3.3 等效辐射能力对比

RMBMA 可等效为环天线, 其静态磁场场强为^[12]:

$$B = \mu_0 IS / [2\pi(x^2 + R^2)^{3/2}] \quad (7)$$

其中, I 为等效电流, S 为电流环面积。在无损介质中, 可通过磁矩 IS 来评估 RMBMA 的辐射能力。表 1 给出了美国 AMEBA 项目和部分文献中 RMBMA 样机的辐射能力对比。通过对比, 本文设计的 RMBMA 实验样机可达到美国 AMEBA 项目射穿穿透技术领域 (TA1) 的场强指标要求, 相较于已有文献成果, 通过优化磁源结构, 增大永磁体体积, 本方案获得了较高等效磁矩, 为 RMBMA 方案研究和样机设计提供了一种可行思路。

表 1 辐射能力对比

Tab. 1 Comparison of radiation capabilities

辐射性能参数	AMEBA 项目指标	本文	文献[9]	文献[10]
实测场强	100 fT	128 pT	75.4 μ T (0.6 A/m)	1 pT
测试距离/m	1 km	100 m	0.6 m	238.2 m
工作频率/Hz	100 ~ 1 000	30 ~ 1 000	30 ~ 300	30 ~ 300
最大尺寸/cm	60	40	10	10
等效磁矩/(A · m ²)	500	640	82	68

4 结论

本文对 RMBMA 的系统设计方法和实现方案进行了研究, 具体总结如下:

1) 提出了基于磁、损耗、热、应力等多物理场耦合仿真的系统设计和性能校验方法, 设计了包含旋转磁源、高效驱动电机及其控制器在内的 RMBMA 系统方案。

2) 研制了 RMBMA 实验样机, 构建了实验测试环境, 在距磁源 10 ~ 100 m (空气) 处对其磁场

场强进行了实验测试,其实测近区磁场按距离的三次方衰减(略大于理论值),验证了所提设计方法和系统方案的可行性和有效性,可为后续研究和工程实践提供设计方法与技术方案支撑。磁源及PMSM的最大尺寸为0.4 m,100 m处实测场强为128 pT,可推算1 000 m处场强为128 fT,满足美国AMEBA项目的尺寸和场强要求。

3)为了进一步提升RMBMA的辐射能力,并实现高效信息加载,仍需进一步在高性能永磁材料、高效旋转驱动、高瞬态响应伺服控制以及磁场增强技术等多个方面开展研究。

参考文献(References)

- [1] 陆建勋. 极低频与超低频无线电技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013.
LU J X. Extremely low frequency and super low frequency radio technologies [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 张巍. 对潜通信技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(6): 13-16, 41.
ZHANG W. Development trend and analysis of submarine communication technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(6): 13-16, 41. (in Chinese)
- [3] BICKFORD J A, DUWEL A E, WEINBERG M S, et al. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2209-2223.
- [4] CHU L J. Physical limitations of omni-directional antennas[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12): 1163-1175.
- [5] 丁宏. DARPA机械天线项目或掀起军事通信革命[J]. 现代军事, 2017(4): 71-73.
DING H. DARPA's mechanical antenna program could revolutionize military communications[J]. Communist, 2017(4): 71-73. (in Chinese)
- [6] 周强, 姚富强, 施伟, 等. 机械式低频天线机理及其关键技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(1): 69-84.
ZHOU Q, YAO F Q, SHI W, et al. Research on mechanism and key technology of mechanical antenna for a low-frequency transmission [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(1): 69-84. (in Chinese)
- [7] PRASAD M N S, HUANG Y K, WANG Y E. Going beyond Chu Harrington limit: ULF radiation with a spinning magnet array [C]//Proceedings of XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2017.
- [8] SELVIN S, PRASAD M N S, HUANG Y K, et al. Spinning magnet antenna for VLF transmitting [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017.
- [9] PRASAD M N S, SELVIN S, TOK R U, et al. Directly modulated spinning magnet arrays for ULF communications [C]//Proceedings of IEEE Radio and Wireless Symposium, 2018.
- [10] BARANI N, SARABANDI K. A frequency multiplier and phase modulation approach for mechanical antennas operating at super low frequency (SLF) band [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019.
- [11] GONG S H, LIU Y, LIU Y. A rotating-magnet based mechanical antenna (RMBMA) for ELF-ULF wireless communication [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2018, 72: 125-133.
- [12] 施伟, 周强, 刘斌. 基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析[J]. 物理学报, 2019, 68(18): 188401.
SHI W, ZHOU Q, LIU B. Performance analysis of spinning magnet as mechanical antenna [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(18): 188401. (in Chinese)
- [13] 周强, 施伟, 刘斌, 等. 旋转永磁式机械天线的研究与实现[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(3): 128-136.
ZHOU Q, SHI W, LIU B, et al. Research and practice of the mechanical antennas based on rotating permanent magnet [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(3): 128-136. (in Chinese)
- [14] 崔勇, 吴明, 宋晓, 等. 小型低频发射天线的研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 171-183.
CUI Y, WU M, SONG X, et al. Research progress of small low-frequency transmitting antenna [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(20): 171-183. (in Chinese)
- [15] 周寿增, 董清飞, 高学绪. 烧结钕铁硼稀土永磁材料与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
ZHOU S Z, DONG Q F, GAO X X. Sintered NdFeB rare earth permanent magnetic materials and technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 杨慧芳. 中国钕铁硼永磁的发展现状及存在的问题[J]. 科技情报开发与经济, 2005(14): 126-127.
YANG H F. The present situation of and existing problems in the development of Chinese permanent-magnet material Nd-Fe-B [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2005(14): 126-127. (in Chinese)
- [17] AGLEN O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator [C]//Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003.
- [18] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机设计与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1-18.
ZHANG F G, DU G H, WANG T Y, et al. Review on development and design of high speed machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 1-18. (in Chinese)
- [19] 赵广泰. 高速永磁同步电机的设计与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
ZHAO G T. Design and analysis of a high speed permanent magnet synchronous machine [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 田淳, 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 7-11.
TIAN C, HU Y W. Study of the scheme and theory of the direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(1): 7-11. (in Chinese)
- [21] 吴峻, 李圣怡, 潘孟春. 一种新型的转矩控制方法——矢量转矩控制[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4): 55-58.
WU J, LI S Y, PAN M C. A novel torque control strategy——vector torque control [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(4): 55-58. (in Chinese)