

## 旋转永磁式机械天线的研究与实现\*

周强,施伟,刘斌,魏志虎,何攀峰,张江  
(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,对基于旋转永磁体的机械天线,即利用永磁体机械旋转直接激励电磁波的新型低频电磁发信技术进行了理论与工程实践。提出基于钕铁硼永磁体和永磁同步电机的旋转永磁式机械天线技术方案及其信息加载方法,构建基于电-机械-电磁能量转换的系统模型,对其辐射效率和辐射功率进行初步分析,研究旋转永磁体在不同无限均匀介质中产生时变磁场的分布与衰减特性,研制了原理样机,并对其近区磁场和2FSK信号的加载特性进行了实验测试,验证了该方案的可行性和有效性。

**关键词:**低频电磁通信;电小天线;机械天线;旋转磁偶极子;钕铁硼永磁体;永磁同步电机

**中图分类号:**TN822+.1; TN929.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)03-128-09

## Research and practice of the mechanical antennas based on rotating permanent magnet

ZHOU Qiang, SHI Wei, LIU Bin, WEI Zhihu, HE Panfeng, ZHANG Jiang

(The Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to realize miniaturization and low power consumption of the LF (low frequency) radio transmitter, a novel LF radio transmitting technology called as RMBMA (rotating-magnet based mechanical antenna), which is based on mechanical rotating of permanent magnet to induce electromagnetic fields, was researched theoretically and practiced in engineering. A technology scheme of RMBMA based on NdFeB magnet and permanent magnet synchronous motor, and an information loading method were presented. With electric-mechanic-electromagnetic energy conversion, a system model of RMBMA was developed to analyze the radiation efficiency and radiation power. Meanwhile, in different infinite uniform medium, the distribution and attenuation characteristics of time-varying magnetic field generated by a rotating permanent magnet were studied. Finally, by developing a prototype, the near magnetic field characteristics and 2FSK signal loading characteristics were experimentally tested, and the feasibility and effectiveness of the proposed scheme were verified.

**Keywords:** low frequency electromagnetic communication; electrically small antenna; mechanical antenna; rotating magnetic dipoles; NdFeB magnet; permanent magnet synchronous motor

极低频 (Extremely-Low Frequency, ELF)、超低频 (Super-Low Frequency, SLF)、特低频 (Ultra-Low Frequency, ULF) 和甚低频 (Very-Low Frequency, VLF) 等低频电磁波具有优异的海水穿透和绕射能力,因而低频电磁通信在对潜指挥、水下和透地通信以及导航、定位等领域具有巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>,也是当前实现对潜战略通信的有效手段<sup>[2]</sup>。

实际应用中,由于天线尺寸远小于波长,现有低频发射天线均为电小天线 (Electrically Small Antenna, ESA),依靠导体中的振荡电流激励电磁波,可等效为一个振荡偶极子。通过定义辐射品质因数  $Q_{\text{rad}}$ ,Chu 等<sup>[3-4]</sup>给出了 ESA 的一个理论

限制,即  $Q_{\text{rad}}$  最小值可表示为:

$$Q_{\text{rad}} = \omega W_{\text{sto}} / P_{\text{rad}} > 1 / (ka)^3 + 1 / (ka) \quad (1)$$

式中,  $\omega$  为谐振角频率,  $W_{\text{sto}}$  为周期平均储能,  $P_{\text{rad}}$  为辐射功率,  $k = \omega/c$  为真空中的波数,  $c$  为光速,  $a$  为包围天线的最小辐射球<sup>[5]</sup>半径。由式(1)可知,当  $ka \ll 1$  时,ESA 的  $Q_{\text{rad}}$  近似与  $(ka)^3$  成反比。这表明:天线尺寸越小,  $Q_{\text{rad}}$  就越大,天线带宽就越窄,在辐射功率一定条件下,天线辐射功率和效率就越低。

由于上述理论限制,ESA 的辐射性能直接受限于天线尺寸,使得现有低频电磁发信系统存在天线体积庞大、设备复杂、辐射效率低、发射功率及能耗大等问题,已成为低频电磁通信在相关领

\* 收稿日期:2018-11-15

基金项目:国家部委基金资助项目(6140518030108);国防科技大学科研计划重点资助项目(ZK17-02-05)

作者简介:周强(1980—),男,重庆人,高级工程师,博士,E-mail:zhouqiang63@nudt.edu.cn

域应用发展的重要瓶颈,因此急需创新低频电磁发射的新理论和新技术。

针对上述瓶颈问题,2016 年 12 月,以替代依靠振荡电流激励的传统 ESA 为目标,美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 首次提出了“机械天线” (Mechanical Antenna, MA) 的概念和项目构想<sup>[6-7]</sup>。如图 1 所示,所谓 MA,即通过特殊材料,如驻极体(在强外场作用下极化并“永久”保持极化状态的电介质)或永磁体(在开路状态下能“永久”保留较高剩磁的磁体)的机械运动直接激励并发射低频电磁波的新型低频电磁发信技术。

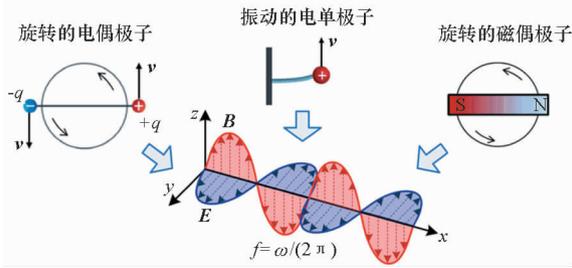


图 1 MA 的主要形式及基本原理

Fig.1 Basic principle and main form of MA

利用高性能驻极体和永磁体,MA 不需消耗能量就可直接产生静态强电场或强磁场,而传统 ESA 需消耗巨大能量才能产生等效电场或磁场<sup>[6]</sup>。由于没有高电抗问题,MA 可省去匹配和调谐网络及其带来的额外损耗。此外,作为机械系统,MA 近场储能不需在天线和匹配网络之间进行谐振转换,没有额外能量转换损耗,有利于进一步提高辐射效率。基于上述优势,MA 有望突破传统 ESA 的理论限制<sup>[8]</sup>。

不同于传统无线电发信机,MA 的信息加载在机械驱动环节实现。结合低损耗和低阻尼的运动激励与控制技术,MA 有望利用很小能量即可直接产生低频电磁波并实现信息加载。因此,MA 不只是一种低频发射天线,还是一种颠覆现有射频发信机架构的全新低频电磁发信系统,有望实现小型化与低功耗,从而显著提高其应用的灵活性和机动性。

2017 年 8 月, DARPA 正式启动 AMEBA (a mechanically based antenna) 项目,拟用 45 个月完成相关技术与验证。鉴于 MA 技术的前沿性和颠覆性,从 2017 年初开始,我国的国防预研计划也发布了相应基金和项目指南,对 MA 的新理论和新技术给予了重点关注。在相关项目的牵引下,国内外多个高校和科研机构分别对 MA 进行

了初步研究和探索<sup>[8-16]</sup>。

得益于稀土永磁材料<sup>[17]</sup>及旋转驱动技术<sup>[18]</sup>在各领域的成熟应用,基于旋转永磁体的 MA 方案成为业界的研究热点。其中,针对 ULF 和 VLF 应用,文献 [8 - 10] 研究了旋转永磁式 MA (Rotating-Magnet Based MA, RMBMA) 的远场辐射特性,提出了基于旋转永磁体阵列并有望突破传统 ESA 物理极限的 RMBMA 技术方案,初步给出了 RMBMA 的 Q 值极限公式。针对 RMBMA 近区磁场按  $1/r^3$  快速衰减问题,文献 [11 - 12] 通过引入有源电磁偏置,提出了一种可增强其输出磁场的技术方案,并进行了实验测试。基于安培电流模型,文献 [13] 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。可以看出,当前 RMBMA 研究主要针对旋转永磁体的辐射特性及其信息加载方法,未涉及旋转驱动与控制特性对 RMBMA 工程实现及其传输性能的影响。

基于钕铁硼 (NdFeB) 永磁体和永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), 本文提出了一种 RMBMA 技术方案,建立了基于电 - 机械 - 电磁能量转换的系统模型,结合对其时变电磁场的分布与衰减特性研究,给出了辐射功率与辐射效率的表达式,提出了针对移频键控 (Frequency Shift Keying, FSK) 的信息加载方法,并对该 RMBMA 技术方案和信息加载方法的可行性和有效性进行了仿真和实验验证。

## 1 RMBMA 技术方案及其系统模型

为实现对永磁体的高效旋转驱动与状态控制,本文提出的 RMBMA 技术方案如图 2 所示,主要由永磁磁源 (永磁体)、旋转伺服系统、信息加载模块及相应输入接口、封装与散热结构等构成。电源接口主要对旋转伺服系统和相应控制模块供

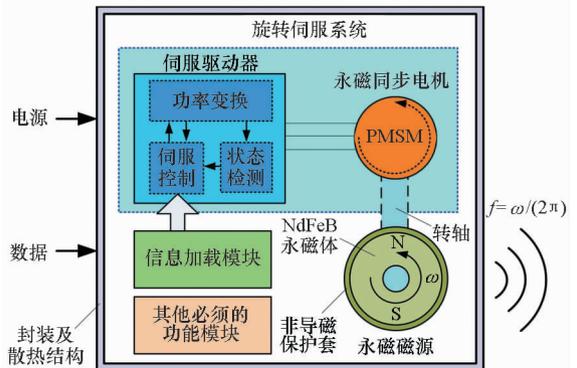


图 2 一种 RMBMA 技术方案示意

Fig.2 Diagram of a technology solution for RMBMA

电。数据接口将码元数据送入信息加载模块,实现调制参数与运动状态控制参数之间的映射转换,产生输入给定信号。

### 1.1 高性能永磁材料与磁源结构

磁源的磁偶极矩正比于永磁体体积  $V$  与永磁材料的剩余磁化强度  $M_r$  [13]。为实现小型化和低功耗,在保证所需磁偶极矩的同时,应尽可能减小磁源体积和重量,以减小其惯性负载和带来的运动损耗。为此,永磁磁源采用 NdFeB 永磁体、转轴和非导磁保护套等构成。

其中, NdFeB 永磁体是目前磁性最强的永磁材料 [19], 其  $M_r$  可达  $10^6$  A/m 以上。为降低旋转阻力, 永磁体采用圆筒形, 可采用如图 3(a) 所示的平行充磁或图 3(b) 所示的海尔贝克 (Halbach) 阵列结构 [20], 后者可减小极间漏磁, 实现与 PMSM 的磁隔离。非导磁保护套可降低永磁体高速或超高速旋转时承受的机械应力。

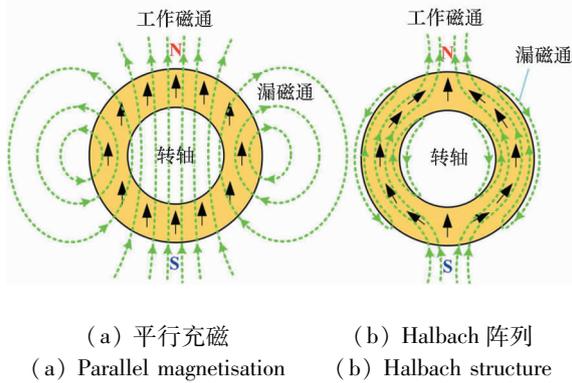


图 3 磁源结构及其磁场分布示意

Fig. 3 Diagram of magnetic source structure and magnetic field distribution

### 1.2 高效旋转驱动与状态控制系统

磁源旋转产生的电磁波频率  $f$  与其转速  $n$  和磁极对数  $N$  成正比, 即  $n = f \times 60 / N$ 。以 1 对磁极为例, 对应 SLF、ULF、VLF 频段,  $n$  需分别达到 1800 ~ 18 000 r/min、18 000 ~ 180 000 r/min 和 180 000 ~ 1 800 000 r/min。针对上述要求, 高速和超高速电机 [21-22] 具有体积小、功率密度高、与负载直接相连、传动效率高等特点, 适用于 RMBMA 的高效旋转驱动。在常用的高速和超高速电机中, PMSM 在效率和功率密度上具有综合优势 [23], 因此本方案采用基于 PMSM 的旋转伺服系统实现对磁源的高效旋转驱动与状态控制。对于 ULF 以上频段, 电机本体应采用无槽结构, 以减小 PMSM 齿槽效应在高速时带来的损耗和振动问题 [24]。

如图 2 所示, 旋转伺服系统由 PMSM 和伺服驱动器构成。伺服驱动器由状态检测、伺服控制和功率变换模块构成。根据输入给定信号和状态检测模块输出的转子状态信息, 结合一定控制策略, 伺服控制模块实时改变功率变换模块的电压和电流, 以实时调节 PMSM 输出转矩, 使磁源旋转状态实时跟踪输入给定, 从而实现所需电磁信号的发射。为提高动态跟随性和抗负载扰动性, 可采用基于自抗扰控制器 [25] 的速度伺服控制策略, 以提高带宽和信噪比。

### 1.3 信息加载模块及其转速控制方法

为提高功率放大器效率, 低频电磁通信主要采用 FSK 和最小移频键控 (Minimum Shift Keying, MSK) 等恒包络调制策略。RMBMA 通过改变磁源的旋转运动状态实现信息加载, 因此需将频率、相位等参数映射为磁源的旋转运动状态, 从而产生旋转伺服系统的输入给定。

为实现对 FSK 和 MSK 的信息加载, 本文提出了基于磁源转速  $n$  控制的信息加载方法, 将频率和相位调制分别映射为对平均转速  $\bar{n}$  和瞬时位置  $p$  的控制。以 2FSK 和 MSK 为例, 图 4 分别基于  $\bar{n}$  控制和  $\bar{n} + p$  控制, 给出了根据码元数据产生相应控制信号的示意图。

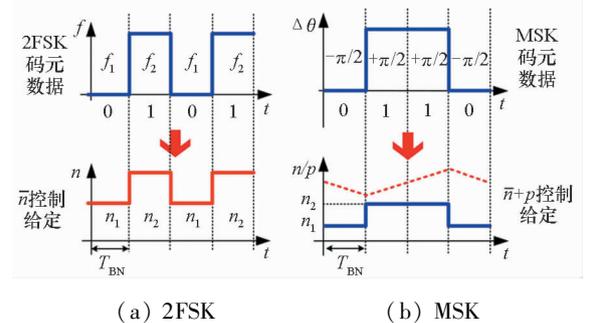


图 4 2FSK 和 MSK 的转速控制信号产生示意

Fig. 4 Schematic diagram of speed control signal generation for 2FSK and MSK

### 1.4 基于能量转换的 RMBMA 系统模型

对于图 2 所示的电—机械—电磁能量耦合系统, 建立其系统模型。如图 5 所示, 旋转伺服系统将输入的电功率  $P_{in}$  转换为驱动 PMSM 转子和磁源机械旋转的电磁转矩  $T_{em}$ , 克服轴承、风阻等带来的摩擦阻尼  $R_{\Omega}$  和转动惯量  $J$  的惯性作用, 其产生的辐射电磁场可等效为 1 个辐射阻尼  $R_{rad}$ , 将部分机械能转换为辐射的电磁能。由此建立旋转磁源的机械运动方程为:

$$T_{em} = Jd\Omega/dt + R_{\Omega}\Omega + R_{rad}\Omega \quad (1)$$

式中,  $\Omega$  为旋转角频率且有  $\Omega = \omega N$ 。

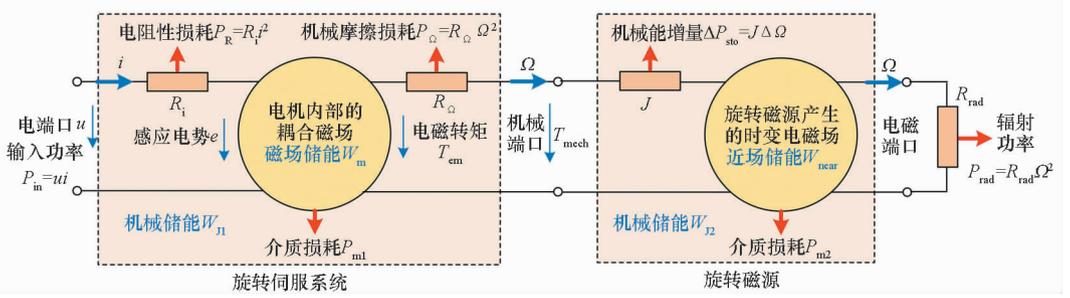


图5 RMBMA 的系统模型及能量转换示意

Fig.5 System model of RMBMA and schematic diagram of energy conversion

进一步由图5可知,PMSM输出机械功率  $P_{mech} = T_{mech}\Omega = P_{in} - P_R - P_{ml} - P_{\Omega} = \Delta P_{sto} + P_{m2} + P_{rad}$ 。其中, $P_{in}$ 为系统输入电功率、 $P_R$ 为系统电阻性损耗(包括电机铜耗、控制器和功率变换器损耗等)、 $P_{ml}$ 为PMSM内部耦合电磁场的介质损耗(包括电机铁芯的涡流和迟滞损耗等)、 $P_{\Omega}$ 为机械摩擦损耗、 $\Delta P_{sto}$ 为磁源旋转的机械能增量、 $P_{m2}$ 为磁源旋转产生时变电磁场的介质损耗、 $P_{rad}$ 为辐射功率。 $W_m$ 和 $W_{J1}$ 分别为PMSM内部磁场储能及其转子轴系的机械储能, $W_{near}$ 和 $W_{J2}$ 分别为旋转磁源产生时变电磁场的近场储能和机械储能。根据上述能量转换特性,可定义RMBMA的辐射效率 $\eta_{rad}$ 为:

$$\eta_{rad} = P_{rad}/P_{in} = P_{rad}/(P_{rad} + P_{loss}) = R_{rad}/(R_{rad} + R_{loss}) \quad (2)$$

式中, $P_{loss} = P_R + P_{ml} + P_{\Omega} + \Delta P_{sto} + P_{m2}$ 为系统总功耗, $R_{loss}$ 为等效的机械和电阻尼。

## 2 旋转磁源的磁场分布与衰减特性

由于当前低频电磁通信基本采用磁接收技术,为分析RMBMA的辐射功率,需研究其产生的时变磁场的分布与衰减特性。

### 2.1 旋转磁源的物理模型

构建如图6所示的旋转磁源物理模型,假设永磁体长度为 $2l$ 且两端磁化异种等量磁荷 $Q_m$ ,

在无限大均匀介质中,围绕其中心 $O$ (即坐标系原点)在 $yz$ 平面旋转,可等效为一个旋转磁偶极子,由 $N=1$ 可得 $\Omega = \omega$ 。由于旋转运动可分解为同平面内2个振动角频率为 $\omega$ 且空间相位相差 $\pi/2$ 的简谐振动<sup>[26]</sup>,其振动幅度为 $l$ ,则磁偶极矩 $m$ 可表示为:

$$m = m_0 [\cos(\omega t)\hat{z} - \sin(\omega t)\hat{y}] \quad (3)$$

式中, $m_0 = Q_m l$ , $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 为 $y$ 、 $z$ 方向单位矢量。

### 2.2 磁场分布与衰减特性

根据辐射电磁理论,磁偶极矩 $m_0$ 在 $z$ 轴围绕原点 $O$ 简谐振动产生的时变磁场分量 $B_M$ 为:

$$B_M = B_0 e^{-j\gamma r} \left\{ 2 \left[ j \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^2 + \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^3 \right] \cos\theta \hat{r} - \left[ \left( \frac{1}{\gamma r} \right) - j \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^2 - \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^3 \right] \sin\theta \hat{\theta} \right\} \quad (4)$$

式中, $B_0 = -\mu_0 \gamma^3 m_0 / (4\pi)$ , $\mu_0$ 为真空中的磁导率, $\gamma$ 为介质中的波数。由旋转运动与2个正交简谐振动之间的转换映射关系可得,磁偶极矩 $m_0$ 在 $yz$ 平面内围绕原点 $O$ 旋转产生的时变磁场分量 $B'_M$ 为:

$$B'_M = B_0 e^{-j\gamma r} \left\{ 2 \left[ j \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^2 + \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^3 \right] (\cos\theta + j\sin\theta\sin\varphi) \hat{r} - \left[ \left( \frac{1}{\gamma r} \right) - j \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^2 - \left( \frac{1}{\gamma r} \right)^3 \right] [(\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\theta} - j\cos\varphi\hat{\varphi}] \right\} \quad (5)$$

其中, $r$ 为传播距离, $\hat{r}$ 、 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\varphi}$ 分别为 $r$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$ 方向的单位矢量。

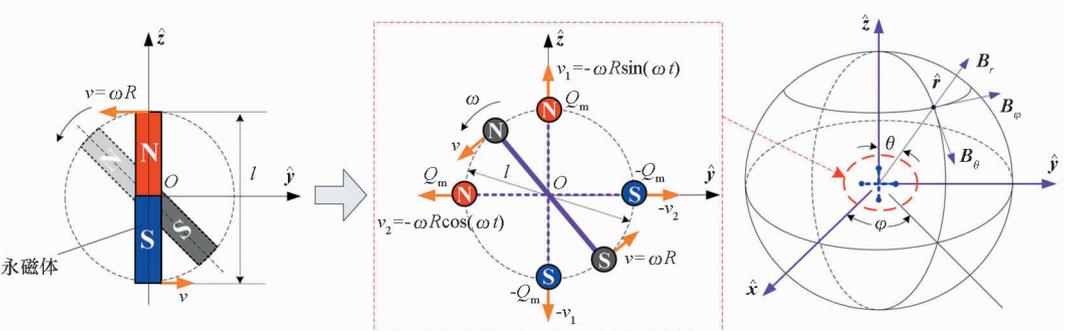


图6 旋转磁源的物理模型

Fig.6 Physical model of rotating magnetic source

2.2.1 近区磁场分布与衰减特性

在近场区,  $\gamma r \ll 1$ , 由式(5)可得, 其近区磁场分量  $B'_{M\_near}$  和电场分量  $E'_{M\_near}$  可表示为:

$$\begin{cases} B'_{M\_near} \approx \frac{\mu_0 m_0}{4\pi r^3} e^{-j\gamma r} [2(\cos\theta + j\sin\theta\sin\varphi)\hat{r} + (\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\theta} - j\cos\varphi\hat{\varphi}] \\ E'_{M\_near} \approx j\frac{\eta_0\omega m_0}{4\pi r^2} e^{-j\gamma r} [(\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\varphi} + j\cos\varphi\hat{\theta}] \end{cases} \quad (6)$$

式中, 波阻抗  $\eta_0 = \mu_0 c$ 。  $B'_{M\_near}$  同时存在  $r$ 、 $\theta$  和  $\varphi$  分量, 其幅值正比于  $m_0$  并随  $r$  的 3 次方衰减, 且与近区电场分量相位相差  $\pi/2$ , 因此该近区场为准恒定场, 不向外辐射能量。

2.2.2 远区磁场分布与衰减特性

在远场区,  $\gamma r \gg 1$ , 由式(5)及辐射电场与磁场的对偶性可得, RMBMA 的远区磁场分量  $B'_{M\_far}$  和电场分量  $E'_{M\_far}$  可表示为:

$$\begin{cases} B'_{M\_far} \approx -\frac{\mu_0\gamma^2 m_0}{4\pi r} e^{-j\gamma r} [(\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\theta} - j\cos\varphi\hat{\varphi}] \\ E'_{M\_far} \approx -\frac{\eta_0\gamma^2 m_0}{4\pi r} e^{-j\gamma r} [(\sin\theta - j\cos\theta\sin\varphi)\hat{\theta} - j\cos\varphi\hat{\varphi}] \end{cases} \quad (7)$$

即  $B'_{M\_far}$  和  $E'_{M\_far}$  均为球面波且同时存在  $\theta$  和  $\varphi$  分量, 其幅值随  $1/r$  衰减且同相位, 此时能量完全辐射。对于无损介质, 由玻印廷矢量  $S$  可得辐射功率  $P_{rad}$  为:

$$P_{rad} = \oint |S| r^2 d\Omega \approx 40k^4 m_0^2 \quad (8)$$

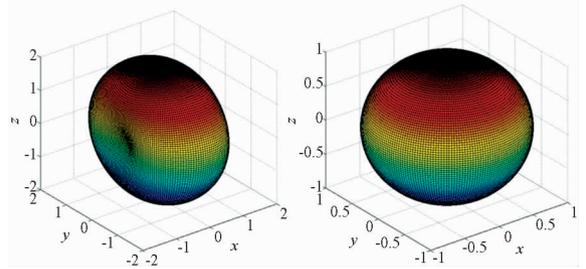
3 仿真分析

3.1 时变磁场的分布特性仿真

图 7(a) 和图 7(b) 分别给出了磁源在  $yz$  平面围绕原点  $O$  旋转时产生归一化时变磁场的近区场和远区场分布特性。其中, 近区磁场的分布类似一个内凹的圆饼, 其最小场强方向为旋转轴方向, 最大场强方向在旋转平面内过原点  $O$  的任意方向, 最大方向近区磁场强度为最小方向的 2 倍; 而远区磁场分布为一个标准的圆球体, 呈全向分布特性。

3.2 时变磁场的衰减特性仿真与分析

图 8 给出了时变磁场在无限大均匀空气和海水中沿  $y$  轴方向衰减特性的仿真对比。其中  $m_0 = M_r V$ , 参考 AMEBA 项目指标<sup>[7]</sup>, 在仿真中, 取  $M_r = 1.1 \times 10^6$  A/m,  $V = 3000$  cm<sup>3</sup>, 则  $m_0 \approx$



(a) 近区磁场 (b) 远区磁场  
(a) Near magnetic field (b) Far magnetic field

图 7 RMBMA 的磁场分布特性

Fig. 7 Distribution characteristic of magnetic field for RMBMA

$3.3 \times 10^3$  A · m<sup>2</sup>; 空气、海水的相对介电常数  $\epsilon_r$  和导电率  $\sigma$  分别为 1、81 和 0 S/m、4 S/m。设定  $n$  为 1800 r/min、9000 r/min、18 000 r/min, 对应发射频率为 30 Hz、150 Hz、300 Hz, 则在空气和海水中的波长分别约为  $10^7$  m、 $2 \times 10^6$  m、 $10^6$  m 和 289 m、129 m、91 m。

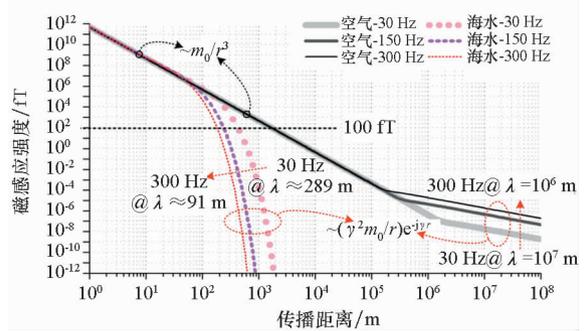


图 8 RMBMA 的磁场衰减特性仿真对比

Fig. 8 Simulated attenuation characteristic of magnetic field for RMBMA

由图 8 可知, 在不同介质中, 随着  $\omega$  和  $r$  的增加, 其近区磁场具有相同衰减速率, 远区磁场则呈现不同的衰减特性。原因分析如下:

近区和远区磁场分别正比于  $(m_0/r^3)e^{-j\gamma r}$  和  $(\gamma^2 m_0/r)e^{-j\gamma r}$ , 对于均匀有损介质,  $\gamma = \beta - j\alpha$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为衰减因子和相移因子, 可表示为:

$$\begin{cases} \alpha^2 = \omega^2 \mu \epsilon (\sqrt{1 + [\sigma/(\omega \epsilon)]^2} - 1)/2 \\ \beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon (\sqrt{1 + [\sigma/(\omega \epsilon)]^2} + 1)/2 \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mu$  和  $\epsilon$  分别为介质的磁导率和介电常数。

对于近区磁场, 由于  $\gamma r \ll 1$ ,  $e^{-j\gamma r} \approx 1$ , 因此近区场强正比于  $m_0/r^3$ , 即衰减速率为  $1/r^3$  且与传播介质无关。对于远区磁场, 由于空气 (近似无损介质) 的  $\sigma = 0$ , 可得  $\alpha = 0, \beta = k = \omega/c, e^{-j\gamma r} = e^{-j\beta r} \approx 1$ , 因此远区场强正比于  $\omega^2 m_0/(c^2 r)$ , 即远区磁场衰减速率为  $1/r$ 。而海水的  $\sigma \neq 0$  且

$[\sigma/(\omega\epsilon)]^2 \gg 1, \alpha^2 \approx \beta^2 \approx \mu\sigma\omega/2$ , 可得:

$$\frac{\gamma^2 m_0}{r} e^{-\gamma r} = \frac{(\alpha^2 + \beta^2) m_0}{r} \frac{e^{-\beta r}}{e^{\alpha r}} \approx \frac{\mu\sigma\omega m_0}{r e^{r\sqrt{\mu\sigma\omega/2}}} \quad (10)$$

即远区场强与  $\omega/e^{\sqrt{\omega}}$  成正比, 又  $\omega \geq 1$  时,  $\omega < e^{\sqrt{\omega}}$ , 因此  $\omega$  越大则远区场强越弱;  $\omega$  一定时, 其远区磁场衰减速率约为  $\mu\sigma e^{-r\sqrt{\mu\sigma\omega/2}}/r$ , 随着  $r$  的增加, 远区磁场急速衰减且  $\alpha$  越大, 衰减越快。

参考 AMEBA 项目指标<sup>[7]</sup>, 以 100 fT 作为接收场强要求, 根据图 8 所示磁场衰减特性, RMBMA 在空气中可实现约 1.6 km 距离内的近场通信, 在海水中则可实现 427 m ~ 180 m (30 Hz ~ 300 Hz) 距离内的近场和远场通信。为扩展通信距离, 一方面需提高磁接收天线的灵敏度; 另一方面需增大  $V$  或  $M_r$ , 即增大  $m_0$ , 但将相应增加旋转驱动功耗和工程实现难度。如要类似现有大功率岸基固定 ELF 和 SLF 台站, 为实现数千千米以上的远场和波导场应用, 则要求 RMBMA 的磁偶极矩增大数个量级, 受限于永磁材料性能, 则要求磁源的体积和重量增大数个量级, 将给机械旋转驱动带来极大挑战。

### 3.3 信息加载的可行性仿真

以 2FSK 为例, 图 9 给出了对磁源进行平均转速  $\bar{n}$  控制的一个仿真示例。仿真中, 设码元时间  $T_{BN}$  为 10 ms, 以  $y$  轴上  $r = 20$  m (空气中) 处  $B_\theta$  的时域波形来反映信息加载效果。令  $n_1 = 60\,000$  r/min ( $f_1 = 1$  kHz)、 $n_2 = 30\,000$  r/min ( $f_2 = 500$  Hz), 如图 9 所示, 改变  $n$  时发射频率对应改变, 验证了实现 FSK 调制的可行性。

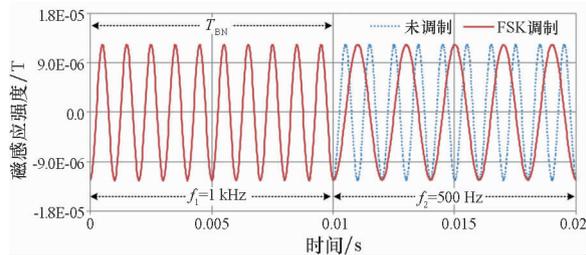


图9 基于平均转速控制的2FSK仿真示例

Fig.9 Simulation of 2FSK with average speed control

## 4 原理样机研制与实验测试

本文研制的 RMBMA 原理样机如图 10 所示。其中, 磁源采用平行充磁的 NdFeB 永磁体, 且有  $N = 1, V \approx 194 \text{ cm}^3, M_r \approx 9.55 \times 10^5 \text{ A/m}$ , PMSM 转速  $n$  为 0 ~ 10 000 r/min, 对应发射频率为 0 ~ 166.7 Hz 且连续可调。为测试近区磁场, 将测试线圈分别沿  $x$  和  $y$  轴放置并改变其与磁源的距离, 利用示波器获取测试线圈在不同方向上的感应电势  $U(U_r, U_\theta, U_\phi)$ , 再根据电磁感应理论得到近区磁场在  $x$  和  $y$  轴上对应磁场分量  $B_r, B_\theta$  和  $B_\phi$  的时域波形。当测试线圈位于  $y$  轴且  $r = 0.2$  m、 $n = 9000$  r/min 时, 图 10 中给出了实测  $U_r$  的时域波形。

图 11 给出了实测  $U_r$  峰峰值随  $n$  的变化趋势。测试线圈的感应电势  $U = 4.44fBN_0S$ , 其中  $B$  为通过线圈的磁场场强,  $N_0$  和  $S$  分别为线圈的匝数和截面积, 并有  $N_0S \approx 0.63 \text{ m}^2$ 。由于  $U_r \propto n$  且  $n = 60f$ , 可知  $B_r$  为与  $n$  无关的恒定值。当  $n = 7200$  r/min 且  $r = 0.6$  m 时, 图 12 (a) 和图 12 (b) 分别给出了实测近区磁场在  $x$  和  $y$  轴方向的衰减特性:  $x$  轴方向,  $B_\theta \approx B_\phi \propto 1/r^3$  且远大于  $B_r$ ;  $y$  轴方向,  $B_r \approx 2B_\theta \propto 1/r^3$  且远大于  $B_\phi$ 。对比式 (8) 可知, 实测近区磁场特性与理论分析基本一致。

采用 2FSK 调制进行信息加载测试, 给定转速为  $n_1 = 3600$  r/min ( $f_1 = 60$  Hz) 和  $n_2 = 4200$  r/min ( $f_2 = 70$  Hz) 且分别持续 5 s 并周期交替。图 13 给出了  $y$  轴上  $r = 0.6$  m 处实测  $U_r$  的频域波形。如图 13 (c) 所示, 其频谱主要包含  $f_1, f_2, 50$  Hz 工频及其高次谐波。由于磁源惯性和 PMSM 的瞬态响应特性影响, 如图 14 所示, 其转速的阶跃响应存在延时振荡过程, 即反映磁源对转速给定的动态跟随特性。对比图 13 (a) 和图 13 (b) 可知, 该瞬态响应特性将引入额外噪声, 并限制传输速率的提升。

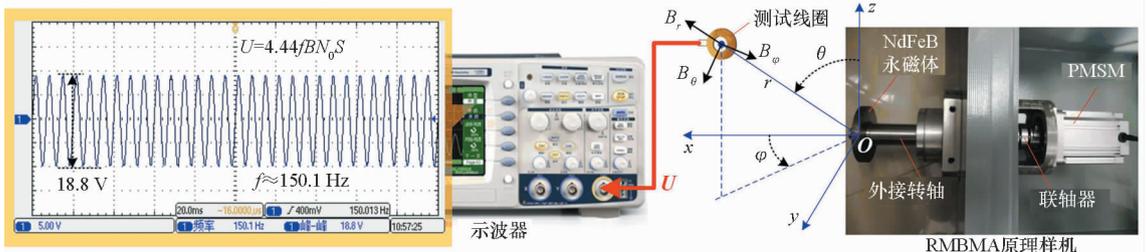


图10 RMBMA 原理样机及测试环境

Fig.10 Prototype of RMBMA and testing environment

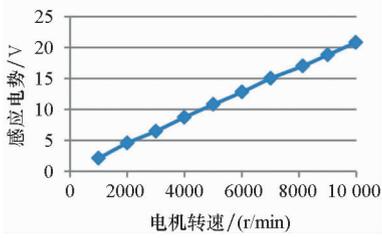


图 11 实测  $U_r$  峰峰值随  $n$  的变化趋势

Fig. 11 Measured peak-to-peak value of  $U_r$  with different  $n$

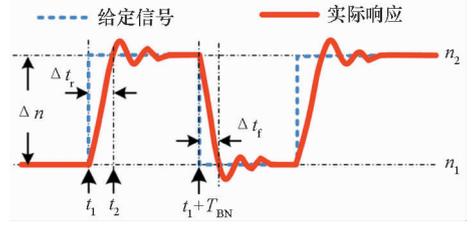


图 14 磁源转速的阶跃响应示意

Fig. 14 Step response for magnet speed

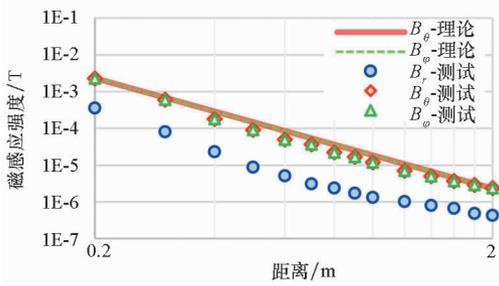
### 5 结论

基于 NdFeB 永磁体和 PMSM 伺服驱动技术,提出了一种 RMBMA 技术方案,通过构建基于电-机械-电磁能量转换的系统模型,分析了旋转磁源在无限大均匀介质中产生时变磁场的分布与衰减特性,对 RMBMA 的辐射功率和辐射效率进行了初步研究,对近区磁场特性进行了测试验证。基于上述理论和仿真分析及实验测试,对其基本特性总结如下:

1) 均匀介质中,RMBMA 近区和远区磁场具有不同磁场分布特性。近区磁场分布近似一个内凹的圆饼,最小方向为旋转轴线方向,最大方向为旋转平面内过原点的任意方向;远区磁场分布为圆球体,呈全向分布特性。

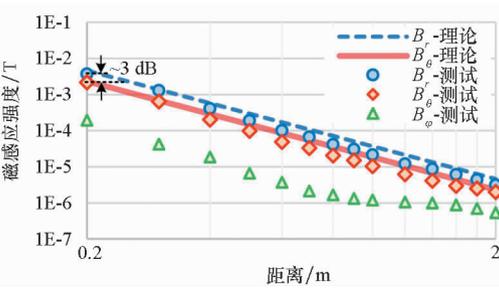
2) 不同介质中,随着  $r$  增加,RMBMA 近区和远场磁场具有不同衰减特性。近区磁场场强正比于  $m_0/r^3$ ,衰减特性与介质无关。远区磁场衰减特性与介质损耗特性紧密相关:对于无损介质,其远区磁场场强正比于  $\omega^2 m_0/r$ ;对于有损介质,其场强正比于  $\mu\sigma\omega m_0 e^{-r\sqrt{\mu\sigma\omega^2}}/r$ 。

3) 基于对磁源转速的实时控制,RMBMA 可实现对 FSK 和 MSK 等调制信号的信息加载,但



(a) x 轴方向

(a) Direction of x axis

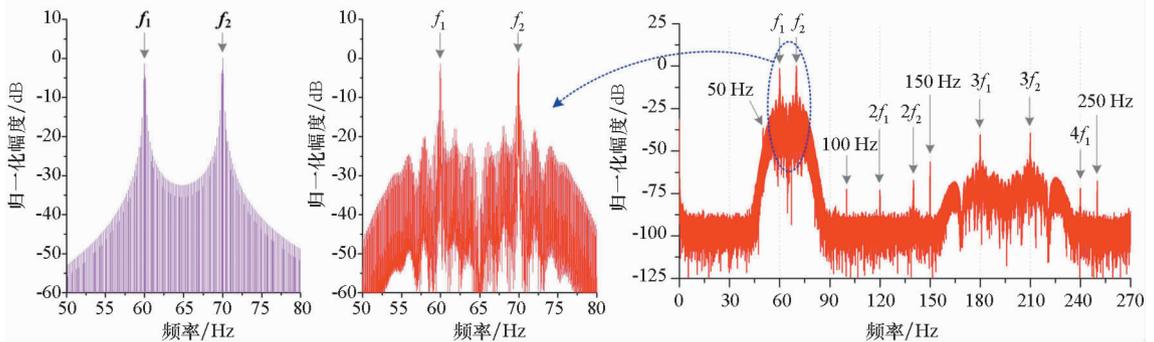


(b) y 轴方向

(b) Direction of y axis

图 12 实测 RMBMA 的近区磁场场强随  $r$  的变化趋势

Fig. 12 Measured magnetic induction intensity of near field for RMBMA with different  $r$



(a) 理想频谱(50 ~ 80 Hz)

(b) 实测频谱(50 ~ 80 Hz)

(c) 实测频谱(DC ~ 270 Hz)

(a) Ideal spectrum(50 ~ 80 Hz)

(b) Measured spectrum(50 ~ 80 Hz)

(c) Measured spectrum(DC ~ 270 Hz)

图 13 理想及实测的 2FSK 信号频谱

Fig. 13 Measured and ideal spectrum for 2FSK signal

转速变化时的瞬态响应特性将影响发射信号质量,并限制传输速率,具体影响机理与控制方法还有待进一步研究。

4) 根据其磁场衰减特性,RMBMA 可应用于数百米距离内的水下或地下通信,如利用  $V = 3000 \text{ cm}^3$ 、 $M_r = 1.1 \times 10^6 \text{ A/m}$  的 NdFeB 永磁体,在 30 Hz ~ 300 Hz 的 SLF 频段和 100 ft 的接收场强条件下,可在海水中实现 427 m ~ 180 m 距离内的近场或远场通信。在一定范围内,通过增大磁源体积,可进一步延长通信距离,但将相应增大驱动功耗。

5) 受限于永磁材料和旋转驱动技术,当前 RMBMA 还难以实现类似现有 ELF 和 SLF 固定台站的远距离应用,但基于小型化和低功耗优势,可将 ELF 和 SLF 通信手段拓展到对体积重量和发射功率有限制的场合,在水下通信和对地、对海探测等领域具有广阔的应用前景。

当前,国内外关于 RMBMA 的研究都还处于起步阶段,特别是 RMBMA 涉及多学科交叉,其磁源与驱动系统存在电磁、热、应力等多物理场强耦合,急需在基础理论、高性能材料、结构设计、驱动控制以及机械工程方面取得创新与突破。

## 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 Jianxun. ELF and SLF 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): 1-3.  
ZHANG Wei. Development trend and analysis of submarine communication technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(6): 1-3. (in Chinese)

[3] Chu L J. Physical limitations of omni-directional antennas[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12): 1163-1175.

[4] Harrington R F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1960, 64: 1-12.

[5] Wheeler H A. The radiansphere around a small antenna[J]. Proceedings of the IRE, 1959, 47(8): 1325-1331.

[6] Microsystems Technology Office. Broad agency announcement; a MEchanically based antenna (AMEBA)[EB/OL]. (2016-12-15) [2018-10-21]. [http://www.grants.gov/grantsws/rest/opportunity/att/download/259390/HR001117S0007\\_Final for Post-ing\\_15 Dec 2016. pdf](http://www.grants.gov/grantsws/rest/opportunity/att/download/259390/HR001117S0007_Final%20for%20Post-ing_15%20Dec%202016.pdf).

[7] 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 Hong. DARPA's mechanical antenna program could

revolutionize military communications[J]. Modern Military, 2017(4): 71-73. (in Chinese)

[8] Prasad M N S, Huang Y K, Wang E. Going beyond Chu harrington limit: ULF radiation with a spinning magnet array[C]// Proceedings of 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2017: 1-3.

[9] Selvin S, Prasad M N S, Huang Y K, et al. Spinning magnet antenna for VLF transmitting [C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017: 1477-1478.

[10] 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 (RWS), 2018: 171-173.

[11] Fawole O C, Tabib-Azar M. Electromechanically-modulated permanent magnet antennas of wireless communication[C]// Proceedings of IEEE Sensors, 2017: 1-3.

[12] Fawole O C, Tabib-Azar M. An electromechanically modulated permanent magnet antenna for wireless communication in Harsh electromagnetic environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 6927-6936.

[13] 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.

[14] 周强, 施伟, 刘斌, 等. 一种基于旋转磁偶极子的机械式低频天线[C]// 对潜通信技术学术交流会议论文集, 2018: 231-235.  
ZHOU Qiang, SHI Wei, LIU Bin, et al. A low frequency mechanical antennas based on rotating magnetic dipoles[C]// Proceedings of Symposium on Submarine Communication Technology, 2018: 231-235. (in Chinese)

[15] James A B, Ronald S M, Paul A W, et al. Low frequency mechanical antennas: electrically short transmitters from mechanically-actuated dielectrics[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017: 1475-1476.

[16] Zheng H, Zhao J B, Xiang B, et al. Parallel plate VLF mechanical antenna[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018: 751-752.

[17] 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: 1-21.  
ZHOU Shouzeng, DONG Qingfei, GAO Xuexu. Sintered NdFeB rare earth permanent magnetic materials and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 1-21. (in Chinese)

[18] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1-18.  
ZHANG Fengge, DU Guanghui, WANG Tianyu, 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] 胡伯平. 稀土永磁材料的现状与发展趋势[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(2): 66 - 77, 80.  
HU Boping. Status and development tendency of rare-earth permanent magnet materials [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2014, 45(2): 66 - 77, 80. (in Chinese)
- [20] 刘恒坤, 张晓, 弥柱. 空心 and Halbach 永磁直线同步电机的牵引力和法向力分析[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 94 - 97.  
LIU Hengkun, ZHANG Xiao, MI Zhu. Analytical computation of normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 94 - 97. (in Chinese)
- [21] Gerada D, Mebarki A, Brown N L, et al. High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2946 - 2959.
- [22] Rahman M A, Chiba A, Fukao T. Super high speed electrical machines—summary [C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004: 1272 - 1275.
- [23] Gieras J F, Wing M, Gieras G F. Permanent magnet motor technology: design and applications [M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [24] 罗宏浩, 周波, 吴峻, 等. 永磁无刷直流直线电机齿槽力补偿控制研究[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 117 - 121.  
LUO Honghao, ZHOU Bo, WU Jun, et al. Study on compensation control of cogging force in PMBLDCLM [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 117 - 121. (in Chinese)
- [25] 陈志翔, 高钦和, 谭立龙, 等. 永磁直线同步电机伺服系统自抗扰反步控制器[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(3): 107 - 112.  
CHEN Zhixiang, GAO Qinhe, TAN Lilong, et al. Active disturbance rejection backstepping controller for permanent magnet linear synchronous motor servo systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(3): 107 - 112. (in Chinese)
- [26] Griffiths D J. Introduction to electrodynamics [M]. 4th ed. Pearson, 2017.