



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112285435 B

(45) 授权公告日 2022.04.22

(21) 申请号 202011181098.7

审查员 王文涛

(22) 申请日 2020.10.29

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112285435 A

(43) 申请公布日 2021.01.29

(73) 专利权人 中国舰船研究设计中心

地址 430064 湖北省武汉市武昌区紫阳路  
268号

(72) 发明人 华成超 黄琛 陈亮 王之立

王文卓

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限

公司 42102

代理人 胡建平

(51) Int. Cl.

G01R 29/08 (2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法

(57) 摘要

本发明提供了一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,包括通过交流磁偶极子阵列等效模拟,实现了在不得知大功率磁场辐射源的物理模型、内部结构的情况下,根据实际设备的简单磁场分布测量结果和计算步骤模拟大功率磁场辐射源的磁场辐射特性的功能。本发明根据实际设备的磁场分布测量结果,利用磁偶极子阵列等效模拟的方法,较为准确的模拟出大功率磁场辐射源的磁场辐射特性,原理简洁明晰,为大功率设备磁场辐射特性的研究提供了便利准确的方法。



1. 一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:包括以下步骤:

S1:根据大功率设备的结构特性确定磁场测试位置;

S2:将多通道矢量磁场采集装置布置在测试位置,并采集磁场数据;

S3:分析不同位置磁场的频谱、幅值特性,确定磁偶极子个数;

S4:限定磁偶极子的位置在某一水平面内移动,并设置磁偶极子阵列系数矩阵条件数最小为优化目标,采用优化算法搜索得到条件数最小的磁偶极子位置;

S5:通过磁偶极子的位置计算磁场大小;

S6:利用磁偶极子阵列模型计算磁偶极子阵列的磁场,对比模型的计算数据与测试数据,若计算数据与测量数据的误差小于等于10%,则表示磁偶极子阵列建模成功;若计算数据与测量数据的误差大于10%,则返回步骤S3,重新选定磁偶极子数量与移动水平面位置,直至满足要求。

2. 根据权利要求1所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S1中,具体步骤为:当大功率设备为轴对称结构时,在不同面上选取3~4个典型位置同时测试;当设备为非对称结构时,根据需要增加测试位置。

3. 根据权利要求1所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S2中,多通道矢量磁场采集装置用于测量所在位置的矢量磁场值,具备多位置矢量磁场数据的采集、量化、频谱分析及存储功能。

4. 根据权利要求1所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S2中,设体积V内的场源对V外的作用效果视为V内的等效源对V外的作用效果;等效源包括均匀磁化的旋转椭球体和磁偶极子等磁源。

5. 根据权利要求1所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S3中,选取20~30个磁偶极子组成偶极子阵列。

6. 根据权利要求1所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S2中,设磁场H中磁偶极子的磁矩为m,m与向量r间的夹角为 $\theta$ ,r的方向由磁偶极子中心指向计算场点,则采集的磁偶极子的标量磁位为:

$$\varphi_m = \frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2} \quad (1);$$

由于

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (2),$$

则磁偶极子产生的磁场强度用球坐标表示为:

$$\mathbf{H} = \frac{m}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \mathbf{r}^0 + \sin \theta \boldsymbol{\theta}^0) \quad (3)。$$

7. 根据权利要求6所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S4中,由于m、r<sup>0</sup>及 $\theta^0$ 在同一平面内,则:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi r^3} (3m \cos \theta \mathbf{r}^0 - \mathbf{m}) = \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{4\pi r^3} - \frac{\mathbf{m}}{4\pi r^3} \quad (4)。$$

8. 根据权利要求7所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,其特征在于:所述的步骤S5中,具体步骤为:设目标区域内有N个磁偶极子,坐标分别为 $(u_i, v_i, w_i)$ ,  $i=1, 2, \dots,$

$N$ ; 设  $M_{u_i}, M_{v_i}, M_{w_i}$  分别为第  $i$  个磁偶极子沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴方向的磁矩分量, 则磁性目标在点  $P_j(x_j, y_j, z_j)$  处所产生的磁场三分量  $H_{x_j}, H_{y_j}, H_{z_j}$  为:

$$H_{x_j} = \sum_{i=1}^N (a_{xji} M_{u_i} + a_{yji} M_{v_i} + a_{zji} M_{w_i}) \quad (5),$$

$$H_{y_j} = \sum_{i=1}^N (b_{xji} M_{u_i} + b_{yji} M_{v_i} + b_{zji} M_{w_i}) \quad (6),$$

$$H_{z_j} = \sum_{i=1}^N (c_{xji} M_{u_i} + c_{yji} M_{v_i} + c_{zji} M_{w_i}) \quad (7)。$$

9. 根据权利要求8所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法, 其特征在于: 所述的步骤S6中, 设区域内  $N$  个磁偶极子阵列产生的磁场强度为  $H$ , 磁偶极子阵列系数矩阵为  $F$ , 则磁偶极子阵列的磁场矩阵方程如下:

$$H = F \cdot M \quad (8)。$$

10. 一种计算机存储介质, 其特征在于: 其内存储有可被计算机处理器执行的计算机程序, 该计算机程序执行如权利要求1至权利要求9中任意一项所述的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法。

## 一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于磁场仿真技术领域,具体涉及一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法。

### 背景技术

[0002] 为了更好地对大功率设备磁场进行研究,首先必须准确地获得这些设备磁场的强度和分布特性。目前,国内外关于磁场源研究的主要手段有实际设备测量、物理模型测量和计算机仿真三种方法。

#### [0003] 1. 实际设备测量

[0004] 采用实际设备测量的方式开展低频杂散磁场研究,必须要有足够的测量点,而且测量面要足够大。目前国内某些低磁实验室可以在测量轨道上开展实际设备磁场测量,但对实际设备的重量、尺寸及工况等都有一些限制。

[0005] 实际设备测量法虽然具有测量数据准确等优点,但是人力、物力与资金耗费大,且必须在设备建造完成后才能进行测量,因此具有一定的滞后性。

#### [0006] 2. 物理模型测量

[0007] 物理模型测量法是一种直接而又客观的设计与验证方法。物理模型测量法的目的是为了能够按照相似理论,对实际设备建造缩小模型并对其进行研究。

[0008] 由于实际设备结构复杂而且形状各异,物理模型是一次性使用的试验模型,每一个模型样件只能试验一次,模拟一次即失去了再利用的价值,所以,物理模型法是一种昂贵的模拟方法。

[0009] 因此,物理模型测量法是一种比较传统的方法,其优点在于比较逼真,模型的分析结果与实际较为接近,但缺点是代价比较昂贵,建造的周期长,加工与试验周期往往难以满足总体进度要求。

[0010] 物理模型测量法在设备静态磁场的研究中应用较多,在需要研究设备工作状态下的磁场时难以实施。

#### [0011] 3. 计算机仿真

[0012] 近年来,随着计算机软硬件技术的飞速发展,计算机仿真技术在设备磁场分析计算方面取得了广泛的应用。

[0013] 与物理模型相比,计算机仿真具有如下优越性:

[0014] (1) 费用低廉。计算机仿真不需要进行实际设备的物理模型制作,也不需试验设备,因此可以节省大量的人力、物力、财力。

[0015] (2) 周期较短。CAD/CAM的具体运用,使模型在设计、开发阶段就可预测其品质和性能,避免不必要的失误并替代部分试验,因此开发周期必然缩短。

[0016] (3) 可重复性。物理模拟过程易受随机因素影响,因此在研究不同系统参数对安全性的影响时,不易得到明确的结果。而仿真依赖于计算机硬件,大多数仿真软件均为参数化设计,可以轻而易举的得到参数改变时的仿真结果。

[0017] (4) 结果信息全面。物理模拟中测得的结果一般都是通过传感器得到的,而传感器的数量与布置是受很多条件限制的,因此结果数据不甚全面。而计算机仿真则不存在以上问题。

[0018] 以上三种方法都存在不同的问题,实际设备测量需要耗费大量的人力、物力,物理模型测量、计算机仿真需要对设备的内部结构进行物理建模。实际上在研究大功率设备磁场分布时,并不关心其内部结构组成,且大功率设备往往结构复杂,建模难度与工作量均较大。

## 发明内容

[0019] 本发明要解决的技术问题是:提供一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,用于在不得知大功率磁场辐射源的物理模型、内部结构的情况下,根据实际设备的磁场分布测量结果,利用简单的测量结果和计算步骤模拟大功率磁场辐射源的磁场辐射特性。

[0020] 本发明为解决上述技术问题所采取的技术方案为:一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,包括以下步骤:

[0021] S1:根据大功率设备的结构特性确定磁场测试位置;

[0022] S2:将多通道矢量磁场采集装置布置在测试位置,并采集磁场数据;

[0023] S3:分析不同位置磁场的频谱、幅值特性,确定磁偶极子个数;

[0024] S4:限定磁偶极子的位置在某一水平面内移动,并设置磁偶极子阵列系数矩阵条件数最小为优化目标,采用优化算法搜索得到条件数最小的磁偶极子位置;

[0025] S5:通过磁偶极子的位置计算磁场大小;

[0026] S6:利用磁偶极子阵列模型计算磁偶极子阵列的磁场,对比模型的计算数据与测试数据,若计算数据与测量数据的误差小于等于10%,则表示磁偶极子阵列建模成功;若计算数据与测量数据的误差大于10%,则返回步骤S3,重新选定磁偶极子数量与移动水平面位置,直至满足要求。

[0027] 按上述方案,所述的步骤S1中,具体步骤为:当大功率设备为轴对称结构时,在不同面上选取3~4个典型位置同时测试;当设备为非对称结构时,根据需要增加测试位置。

[0028] 按上述方案,所述的步骤S2中,多通道矢量磁场采集装置用于测量所在位置的矢量磁场值,具备多位置矢量磁场数据的采集、量化、频谱分析及存储功能。

[0029] 按上述方案,所述的步骤S2中,设体积V内的场源对V外的作用效果视为V内的等效源对V外的作用效果;等效源包括均匀磁化的旋转椭球体和磁偶极子等磁源。

[0030] 按上述方案,所述的步骤S3中,选取20~30个交流偶极子组成偶极子阵列。

[0031] 按上述方案,所述的步骤S2中,设磁场H中磁偶极子的磁矩为m,m与向量r间的夹角为 $\theta$ ,r的方向由磁偶极子中心指向计算场点,则采集的磁偶极子的标量磁位为:

$$[0032] \quad \varphi_m = \frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2} \quad (1);$$

[0033] 由于

$$[0034] \quad \mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (2),$$

[0035] 则磁偶极子产生的磁场强度用球坐标表示为:

$$[0036] \quad \mathbf{H} = \frac{m}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \mathbf{r}^0 + \sin \theta \boldsymbol{\theta}^0) \quad (3)。$$

[0037] 进一步的,所述的步骤S4中,由于 $m$ 、 $r^0$ 及 $\theta^0$ 在同一平面内,则:

$$[0038] \quad \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi r^3} (3m \cos \theta \mathbf{r}^0 - \mathbf{m}) = \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{4\pi r^3} - \frac{\mathbf{m}}{4\pi r^3} \quad (4)。$$

[0039] 进一步的,所述的步骤S5中,具体步骤为:设目标区域内有 $N$ 个磁偶极子,坐标分别为 $(u_i, v_i, w_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ; 设 $M_{u_i}, M_{v_i}, M_{w_i}$ 分别为第 $i$ 个磁偶极子沿 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴方向的磁矩分量,则磁性目标在点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 处所产生的磁场三分量 $H_{x_j}, H_{y_j}, H_{z_j}$ 为:

$$[0040] \quad H_{x_j} = \sum_{i=1}^N (a_{xji} M_{u_i} + a_{yji} M_{v_i} + a_{zji} M_{w_i}) \quad (5),$$

$$[0041] \quad H_{y_j} = \sum_{i=1}^N (b_{xji} M_{u_i} + b_{yji} M_{v_i} + b_{zji} M_{w_i}) \quad (6),$$

$$[0042] \quad H_{z_j} = \sum_{i=1}^N (c_{xji} M_{u_i} + c_{yji} M_{v_i} + c_{zji} M_{w_i}) \quad (7)。$$

[0043] 进一步的,所述的步骤S6中,设区域内 $N$ 个磁偶极子阵列产生的磁场强度为 $H$ ,磁偶极子阵列系数矩阵为 $F$ ,则磁偶极子阵列的磁场矩阵方程如下:

$$[0044] \quad H = F \cdot M \quad (8)。$$

[0045] 一种计算机存储介质,其内存储有可被计算机处理器执行的计算机程序,该计算机程序执行一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法。

[0046] 本发明的有益效果为:

[0047] 1. 本发明的一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法通过交流磁偶极子阵列等效模拟,实现了在不得知大功率磁场辐射源的物理模型、内部结构的情况下,根据实际设备的简单磁场分布测量结果和计算步骤模拟大功率磁场辐射源的磁场辐射特性的功能。

[0048] 2. 本发明提出一种大功率磁场辐射源的等效模拟方法,根据实际设备的磁场分布测量结果,利用磁偶极子阵列等效模拟的方法,较为准确的模拟出大功率磁场辐射源的磁场辐射特性。

[0049] 3. 本发明原理简洁明晰,为大功率设备磁场辐射特性的研究提供了便利准确的方法。

## 附图说明

[0050] 图1是本发明实施例的实际设备测试布置图。

[0051] 图2是本发明实施例的磁偶极子阵列位置搜索示意图。

[0052] 图3是本发明实施例的磁偶极子阵列最终位置图。

[0053] 图4是本发明实施例的磁偶极子阵列模型磁场计算值与建模数据对比图。

[0054] 图5是本发明实施例的磁偶极子阵列模型磁场预测值与实际测试值对比图。

### 具体实施方式

[0055] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0056] 设体积V内的场源对V外的作用效果视为V内的等效源对V外的作用效果;对于磁场H,该等效源包括均匀磁化的旋转椭球体和磁偶极子等磁源;设磁偶极子的磁矩为m,m与向量r间的夹角为 $\theta$ ,r的方向由磁偶极子中心指向计算场点,则磁偶极子的标量磁位为:

$$[0057] \quad \varphi_m = \frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2} \quad (1);$$

[0058] 由于

$$[0059] \quad \mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (2),$$

[0060] 则磁偶极子产生的磁场强度用球坐标表示为:

$$[0061] \quad \mathbf{H} = \frac{m}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \mathbf{r}^0 + \sin \theta \boldsymbol{\theta}^0) \quad (3);$$

[0062] m、 $r^0$ 及 $\theta^0$ 在同一平面内,则:

$$[0063] \quad \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi r^3} (3m \cos \theta \mathbf{r}^0 - \mathbf{m}) = \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{4\pi r^3} - \frac{\mathbf{m}}{4\pi r^3} \quad (4);$$

[0064] 当目标区域内有N个磁偶极子,其坐标分别为 $(u_i, v_i, w_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ;设 $M_{u_i}, M_{v_i}, M_{w_i}$ 分别为第i个磁偶极子沿x轴、y轴、z轴方向的磁矩分量,则磁性目标在点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 处所产生的磁场三分量 $H_{x_j}, H_{y_j}, H_{z_j}$ 为:

$$[0065] \quad H_{x_j} = \sum_{i=1}^N (a_{xji} M_{u_i} + a_{yji} M_{v_i} + a_{zji} M_{w_i}) \quad (5),$$

$$[0066] \quad H_{y_j} = \sum_{i=1}^N (b_{xji} M_{u_i} + b_{yji} M_{v_i} + b_{zji} M_{w_i}) \quad (6),$$

$$[0067] \quad H_{z_j} = \sum_{i=1}^N (c_{xji} M_{u_i} + c_{yji} M_{v_i} + c_{zji} M_{w_i}) \quad (7);$$

[0068] 设区域内N个磁偶极子阵列产生的磁场强度为H,磁偶极子阵列系数矩阵为F,则建立矩阵方程如下:

$$[0069] \quad \mathbf{H} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{M} \quad (8)。$$

[0070] 本发明用磁偶极子阵列所产生的磁场模拟大功率磁场辐射源来简化问题,通过实际设备测试的少量磁场数据建立磁偶极子阵列模型、模拟大功率磁场辐射源,为研究大功率磁场源的辐射特性提供了简单有效的方法。

[0071] (1) 根据大功率设备的结构特性确定磁场测试位置,当大功率设备为轴对称结构时,在不同面上选取3~4个典型位置同时测试;当设备为非对称结构时,根据需要增加测试位置,使用多通道矢量磁场采集装置采集磁场数据。

[0072] (2) 所述磁场采集装置用于测量所在位置处的矢量磁场值,具备多位置矢量磁场数据的采集、量化、频谱分析及存储功能。

[0073] (3) 分析不同位置磁场的频谱、幅值特性,确定磁偶极子个数,一般来说磁偶极子

个数越多,最后得到的等效模型精度越准确,但是过多的磁偶极子会极大的增加搜索计算过程,一般选取20-30个交流偶极子组成偶极子阵列。

[0074] (4)限定这些磁偶极子的位置在某一水平面内移动,并设置磁偶极子阵列系数矩阵条件数最小为优化目标,采用优化算法搜索得到条件数最小的磁偶极子位置。

[0075] (5)得到磁偶极子准确位置后,可以准确推算出它们的磁场大小,计算磁偶极子阵列的磁场,与测量数据进行比较比较,若计算的数据与测量数据误差小于10%,则表示磁偶极子阵列建模成功。若计算的数据与测量数据误差大于10%,则返回第三步,重新选定磁偶极子数量与移动水平面位置,直至达到要求。

[0076] 参见图1,本发明的实施例对一个永磁电机的磁场进行等效模拟:

[0077] S1:根据测量需求布置磁场传感器;本实施例中根据永磁电机的对称性,围绕永磁电机布置四个磁场传感器,设传感器的三个测量方向分别为X、Y、Z;

[0078] S2:采集磁场数据;获取永磁电机的4个位置的磁场数据;

[0079] S3:选取偶极子个数,每个位置取3个正交的磁偶极子;本实施例的偶极子阵列共有24个,限定这些磁偶极子的位置在永磁电机的中心水平面内移动;

[0080] S4:参见图2,设磁偶极子阵列的系数矩阵条件数最小为优化目标,采用遗传算法搜索磁偶极子位置,搜索步数超过60之后,条件数几乎不再减小,则在步数达到99时停止搜索;

[0081] S5:参见图3,得到磁偶极子阵列的最终位置,根据磁偶极子阵列的最终位置计算磁场大小,并与建模采用的测试数据进行对比;参见图4,可见误差可忽略不计;

[0082] S6:利用磁偶极子阵列模型计算该工况下另一个位置的磁场,对比模型计算的数据与测试数据,比较结果如图5所示,模型计算的磁场数据与实际测量数据的误差最大不超过10%,则本次磁场辐射源的等效模拟成功。

[0083] 以上实施例仅用于说明本发明的设计思想和特点,其目的在于使本领域内的技术人员能够了解本发明的内容并据以实施,本发明的保护范围不限于上述实施例。所以,凡依据本发明所揭示的原理、设计思路所作的等同变化或修饰,均在本发明的保护范围之内。



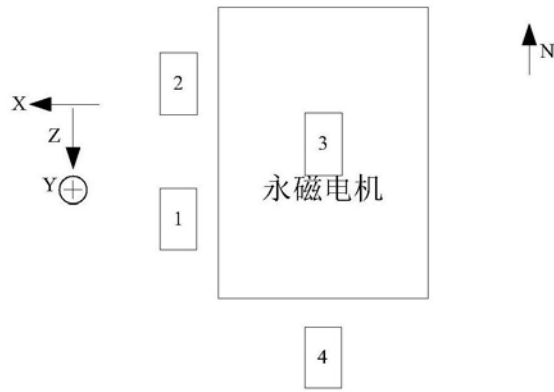


图1

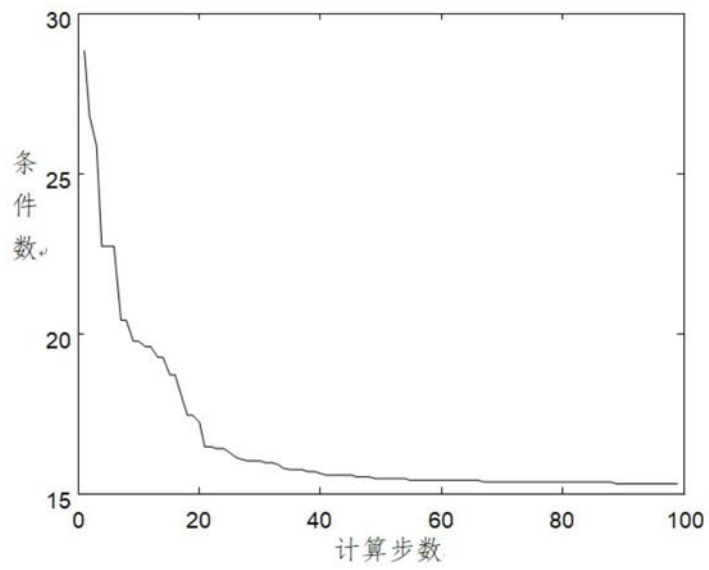


图2

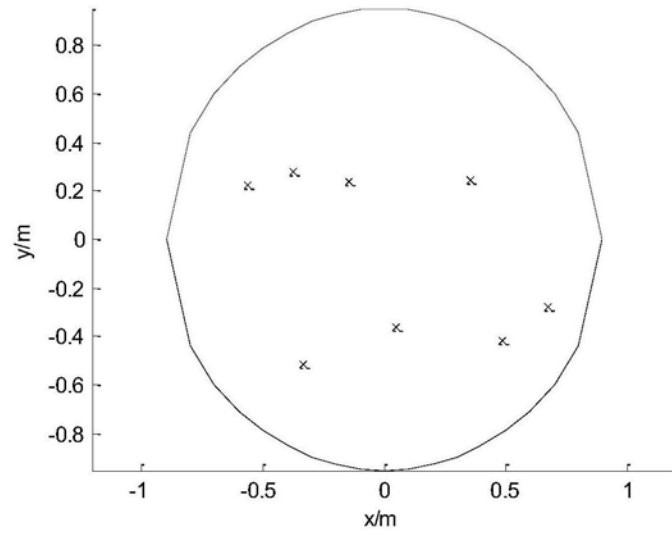


图3

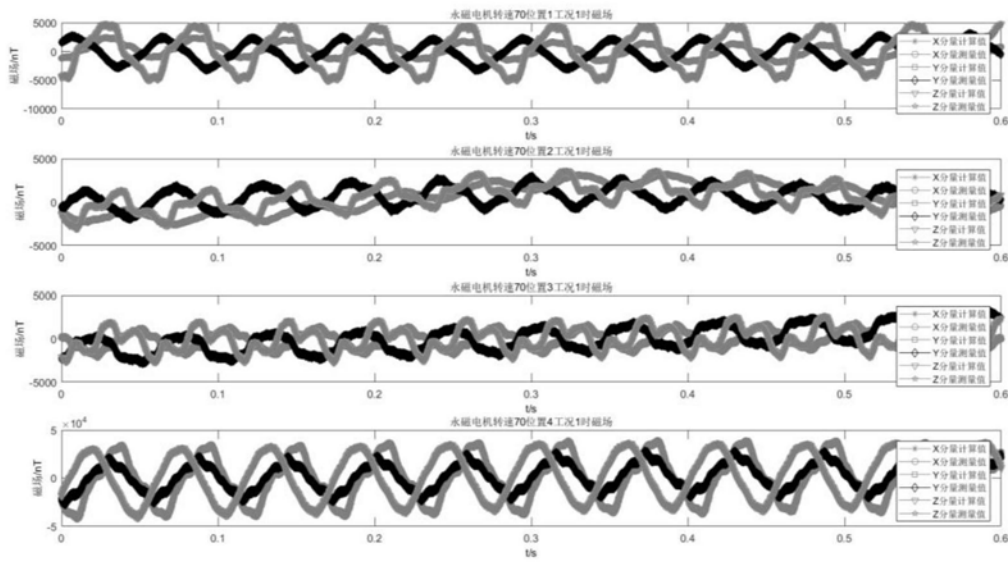


图4

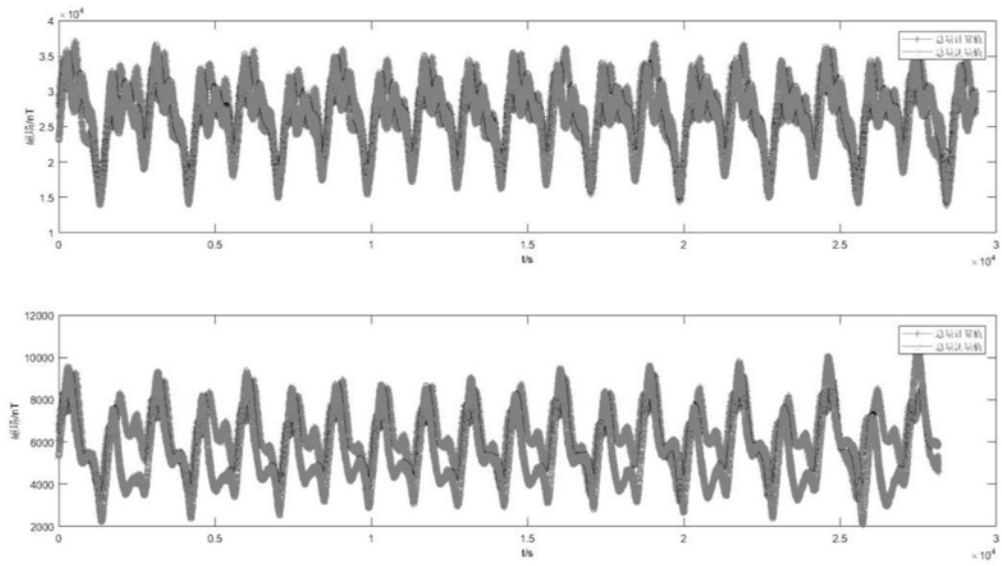


图5