

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G05F 7/00 (2006.01)  
G01R 33/02 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810154946.8

[43] 公开日 2009年4月8日

[11] 公开号 CN 101403934A

[22] 申请日 2008.10.24

[21] 申请号 200810154946.8

[71] 申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市白下区御道街29号

[72] 发明人 郁丰 许蕾 熊智华 冰程月华 杨金显 康国华 冯桂宝 汪旭旦

[74] 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司  
代理人 魏学成

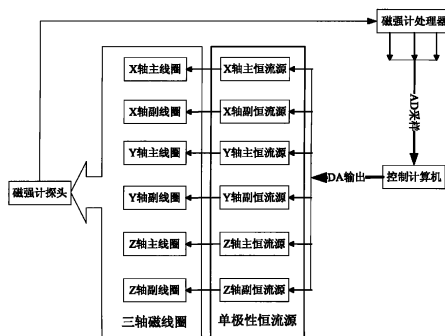
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

## [54] 发明名称

微小卫星用差动式磁模拟器及其控制方法

## [57] 摘要

本发明公布了一种微小卫星用差动式磁模拟器及其控制方法，属磁模拟器及其控制方法。本发明差动式磁模拟器包括控制计算机、磁强计、单极性恒流源和三轴磁线圈，其中磁强计包括磁强计探头和磁强计处理器，单极性恒流源包括 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源，三轴磁线圈包括 X 轴主线圈、X 轴副线圈、Y 轴主线圈、Y 轴副线圈、Z 轴主线圈、Z 轴副线圈。本发明所述控制方法当差动式磁模拟器工作在开环工作方式时，则直接利用目标磁场值和线圈常数矩阵计算出三轴激励电流；当差动式磁模拟器工作在闭环控制方式，可利用磁强计的实时输出对激励电流进行微调。本发明结构简单，检测精度高。



1. 一种微小卫星用差动式磁模拟器，包括控制计算机和磁强计，其中磁强计包括磁强计探头和磁强计处理器，磁强计探头的输出端与磁强计处理器的输入端连接，磁强计处理器的输出端与控制计算机的输入端连接，其特征在于还包括单极性恒流源和三轴磁线圈，其中单极性恒流源包括 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源，三轴磁线圈包括 X 轴主线圈、X 轴副线圈、Y 轴主线圈、Y 轴副线圈、Z 轴主线圈、Z 轴副线圈；控制计算机的输出端分别与 X 轴主恒流源的输入端、X 轴副恒流源的输入端、Y 轴主恒流源的输入端、Y 轴副恒流源的输入端、Z 轴主恒流源的输入端、Z 轴副恒流源的输入端连接；X 轴主恒流源的输出端与 X 轴主线圈的输入端连接，X 轴副恒流源的输出端与 X 轴副线圈的输入端连接，Y 轴主恒流源的输出端与 Y 轴主线圈的输入端连接，Y 轴副恒流源的输出端与 Y 轴副线圈的输入端连接，Z 轴主恒流源的输出端与 Z 轴主线圈的输入端连接，Z 轴副恒流源的输出端与 Z 轴副线圈的输入端连接；磁强计探头放置在三轴磁线圈构成空间的中心区域。

2. 一种基于权利要求 1 所述的微小卫星用差动式磁模拟器的控制方法，其特征在于所述控制方法包括如下步骤：

- a) 初始化三轴磁线圈；
- b) 采用磁强计探头测量三轴磁线圈得到背景磁场；
- c) 采用 X 轴主恒流源给 X 轴主线圈提供激励电流、X 轴副恒流源给 X 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 X 轴主线圈和 X 轴副线圈得到 X 轴线圈激励产生的合成磁场；
- d) 复位 X 轴主线圈和 X 轴副线圈；
- e) 采用 Y 轴主恒流源给 Y 轴主线圈提供激励电流、Y 轴副恒流源给 Y 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈得到 Y 轴线圈激励产生的合成磁场；
- f) 复位 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈；
- g) 采用 Z 轴主恒流源给 Z 轴主线圈提供激励电流、Z 轴副恒流源给 Z 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈得到 Z 轴线圈激励产生的合成磁场；

- h) 复位 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈;
- i) 采用控制计算机采样 X 轴线圈激励产生的合成磁场、Y 轴线圈激励产生的合成磁场、Z 轴线圈激励产生的合成磁场输出线圈常数矩阵;
- j) 根据所述背景磁场、线圈常数矩阵和设定的目标磁场, 通过控制计算机控制所述恒流源输出的激励电流;
- k) 当得到磁场实测值退出检测; 当未得到磁场实测值, 则返回步骤 j。

3. 根据权利要求 2 所述的微小卫星用差动式磁模拟器的控制方法, 其特征在于在所述步骤 j 和步骤 k 之间还包括一个闭环控制方式, 所述闭环控制方式包括如下步骤:

- 1.) 采用将磁强计处理器将磁强计探头输出的磁场实测值与目标磁场值求差得到磁场误差;
- 2.) 当磁场误差超过设定的误差值, 则将磁场误差经过控制计算机得到控制信号分别控制 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源的输出激励电流即分别返回步骤 c、步骤 e 和步骤 g, 并返回步骤 1;
- 3.) 当磁场误差未超过设定的误差值, 则结束闭环控制, 进入步骤 k。

## 微小卫星用差动式磁模拟器及其控制方法

### 技术领域

本发明涉及一种磁模拟器及其控制方法，尤其涉及一种微小卫星用差动式磁模拟器及其控制方法。

### 背景技术

地磁模拟器能为磁测微小卫星提供动态的地磁模拟功能，随着磁强计在控制系统中越来越广泛地应用，地磁模拟器成为了该类控制系统不可缺少的系统测试设备。

目前的地磁模拟器主要由亥姆霍磁线圈系统与双极性高精度电流源组成，能够实现较高精度的地磁模拟器，并且工作区域较大。一些精密的线圈系统将补偿当地地磁的线圈与动态磁场模拟的线圈分开，分别独立供电。但是该产品也有一些缺点，例如价格昂贵，虽然系统本身具有较高的精度，但是比较依赖周围的安装环境。为克服该类地磁模拟器的不足，也有科研人员研制出三个正交的线圈系统或者螺线管，利用磁场与电流的线性关系实现某点的磁场控制，从而模拟出目标磁场，但是仍然需要双极性电流源，增加了电流源的复杂性。

### 发明内容

本发明要解决的技术问题是针对现有技术的缺陷提出一种微小卫星用差动式磁模拟器及其控制方法。

一种微小卫星用差动式磁模拟器，包括控制计算机和磁强计，其中磁强计包括磁强计探头和磁强计处理器，磁强计探头的输出端与磁强计处理器的输入端连接，磁强计处理器的输出端与控制计算机的输入端连接，其特征在于还包括单极性恒流源和三轴磁线圈，其中单极性恒流源包括 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源，三轴磁线圈包括 X 轴主线圈、X 轴副线圈、Y 轴主线圈、Y 轴副线圈、Z 轴主线圈、Z 轴副线圈；控制计算机的输出端分别与 X 轴主恒流源的输入端、X 轴副恒流源的输入端、Y 轴主恒流源的输入端、Y 轴副恒流源的输入端、Z 轴主恒流源的输入端、Z 轴副恒流源的输入端连接；X 轴主恒流源的输出端与 X 轴主线圈的输入端连接，X 轴副恒流源的输出端与 X 轴副线圈的输入端连接，Y 轴主恒流源

的输出端与 Y 轴主线圈的输入端连接，Y 轴副恒流源的输出端与 Y 轴副线圈的输入端连接，Z 轴主恒流源的输出端与 Z 轴主线圈的输入端连接，Z 轴副恒流源的输出端与 Z 轴副线圈的输入端连接；磁强计探头放置在三轴磁线圈构成空间的中心区域。

所述的微小卫星用差动式磁模拟器的控制方法，包括如下步骤：

- a) 初始化三轴磁线圈；
- b) 采用磁强计探头测量三轴磁线圈得到背景磁场；
- c) 采用 X 轴主恒流源给 X 轴主线圈提供激励电流、X 轴副恒流源给 X 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 X 轴主线圈和 X 轴副线圈得到 X 轴线圈激励产生的合成磁场；
- d) 复位 X 轴主线圈和 X 轴副线圈；
- e) 采用 Y 轴主恒流源给 Y 轴主线圈提供激励电流、Y 轴副恒流源给 Y 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈得到 Y 轴线圈激励产生的合成磁场；
- f) 复位 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈；
- g) 采用 Z 轴主恒流源给 Z 轴主线圈提供激励电流、Z 轴副恒流源给 Z 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈得到 Z 轴线圈激励产生的合成磁场；
- h) 复位 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈；
- i) 采用控制计算机采样 X 轴线圈激励产生的合成磁场、Y 轴线圈激励产生的合成磁场、Z 轴线圈激励产生的合成磁场输出线圈常数矩阵；
- j) 根据所述背景磁场、线圈常数矩阵和设定的目标磁场，通过控制计算机控制所述恒流源输出的激励电流；
- k) 当得到磁场实测值退出检测；当未得到磁场实测值，则返回步骤 j。

本发明采用单极性恒流源与差动式线圈，结构简单，受环境影响小，可以自动微调激励电流，具有很高的检测精度。

## 附图说明

- 图 1：本发明整体结构图；
- 图 2：本发明所述三轴磁线圈结构图；
- 图 3：本发明控制方法流程图；
- 图 4：本发明包含闭环控制的控制方法流程图；
- 图 5：本发明差动式线圈合成磁场原理图；

图 6：初始偏置磁场与控制电压实测图；  
图 7：本发明的磁场输出实测图。

### 具体实施方法

如图 1、图 2 所示，一种微小卫星用差动式磁模拟器，包括控制计算机和磁强计，其中磁强计包括磁强计探头和磁强计处理器，磁强计探头的输出端与磁强计处理器的输入端连接，磁强计处理器的输出端与控制计算机的输入端连接，其特征在于还包括单极性恒流源和三轴磁线圈，其中单极性恒流源包括 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源，三轴磁线圈包括 X 轴主线圈、X 轴副线圈、Y 轴主线圈、Y 轴副线圈、Z 轴主线圈、Z 轴副线圈；控制计算机的输出端分别与 X 轴主恒流源的输入端、X 轴副恒流源的输入端、Y 轴主恒流源的输入端、Y 轴副恒流源的输入端、Z 轴主恒流源的输入端、Z 轴副恒流源的输入端连接；X 轴主恒流源的输出端与 X 轴主线圈的输入端连接，X 轴副恒流源的输出端与 X 轴副线圈的输入端连接，Y 轴主恒流源的输出端与 Y 轴主线圈的输入端连接，Y 轴副恒流源的输出端与 Y 轴副线圈的输入端连接，Z 轴主恒流源的输出端与 Z 轴主线圈的输入端连接，Z 轴副恒流源的输出端与 Z 轴副线圈的输入端连接；磁强计探头放置在三轴磁线圈构成空间的中心区域。

三轴磁线圈由三组正交配置的线圈构成。三组线圈构成的包络为一立方体，该立方体中心为线圈系统的工作区域。为产生双向磁场，采用主副双绕组线圈构成，主组和副组线圈通以方向相反，大小不同的电流，从而产生方向与大小均可控的磁场。

为抵消当地地磁，磁场发生的最大强度为 120000nT，有效电流大约为 80mA，所以恒流源的最大输出不小于 160mA。根据匝数，单个线圈的绕线长度为 400m，考虑到匝数较多，为兼顾导线电阻不宜过大以及方便绕线，线径大小应适中，线圈的电阻为 80 欧姆，恒流源需耐受的电压不小于 16V，线圈最大发热功率为 3.2W。

整个三轴磁线圈共有 6 组线圈，需要 6 个压控可调式单极性恒流源，单极性恒流源提供的电流既用于抵消当地磁场，同时能产生需要的动态磁场。6 个恒流源模块的指标完全一致，主要技术如表 1：

表 1、单极性恒流源指标

输入电压	30V
最大功耗	6W
输出电流范围	0~200mA
控制电压范围	0~5V
输出电流精度	0.2mA
温度稳定性	50PPM
最大输出电压	24V

控制计算机采用嵌入式计算机系统，D/A 为 12 位，输出电压范围为 0~5V。由于该差动式微型磁模拟器存在一个自标定的过程，所以在标定过程中需要利用 AD 采集磁强计的输出，A/D 也为 12 位，输入电压范围为-5~5V。控制计算机的核心为软件，含有标定算法、动态磁场发生算法以及地磁模型。

所述磁强计的主要技术指标如表 2：

表 2 磁强计技术指标

量程	-50000~50000nT
全量程精度	优于±0.05%FS
噪声	≤5nT(RMS)
零点漂移(温度不变)	±10nT/24h
轴间正交度	≤90°±0.5°
频响	DC—10Hz
输出	-5~5V

如图 3、图 4 所示，所述的微小卫星用差动式磁模拟器的控制方法，包括如下步骤：

- a) 初始化三轴磁线圈；
- b) 采用磁强计探头测量三轴磁线圈得到背景磁场；
- c) 采用 X 轴主恒流源给 X 轴主线圈提供激励电流、X 轴副恒流源给 X 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 X 轴主线圈和 X 轴副线圈得到 X 轴线圈激励产生的合成磁场；

- d) 复位 X 轴主线圈和 X 轴副线圈；
- e) 采用 Y 轴主恒流源给 Y 轴主线圈提供激励电流、Y 轴副恒流源给 Y 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈得到 Y 轴线圈激励产生的合成磁场；
- f) 复位 Y 轴主线圈和 Y 轴副线圈；
- g) 采用 Z 轴主恒流源给 Z 轴主线圈提供激励电流、Z 轴副恒流源给 Z 轴副线圈提供激励电流，并采用磁强计探头测量 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈得到 Z 轴线圈激励产生的合成磁场；
- h) 复位 Z 轴主线圈和 Z 轴副线圈；
- i) 采用控制计算机采样 X 轴线圈激励产生的合成磁场、Y 轴线圈激励产生的合成磁场、Z 轴线圈激励产生的合成磁场输出线圈常数矩阵；
- j) 根据所述背景磁场、线圈常数矩阵和设定的目标磁场，通过控制计算机控制所述恒流源输出的激励电流；
- k) 当得到磁场实测值退出检测；当未得到磁场实测值，则返回步骤 j。

所述的微小卫星用差动式磁模拟器的控制方法，在所述步骤 j 和步骤 k 之间还包括一个闭环控制方式，所述闭环控制方式包括如下步骤：

- 1.) 采用磁强计处理器将磁强计探头的输出的磁场实测值与目标磁场值求差得到磁场误差；
- 2.) 当磁场误差超过设定的误差值，则将磁场误差经过控制计算机得到控制信号分别控制 X 轴主恒流源、X 轴副恒流源、Y 轴主恒流源、Y 轴副恒流源、Z 轴主恒流源、Z 轴副恒流源的输出激励电流即分别返回步骤 c、步骤 e 和步骤 g，并返回步骤 1；
- 3.) 当磁场误差未超过设定的误差值，则结束闭环控制，进入步骤 k。

微型差动式磁模拟器具有两种工作方式，开环工作方式和闭环工作方式。这两种方式的实现都需要首先完成线圈系统常数的标定，在动态模拟时，当工作在开环工作方式时，则直接利用目标磁场值和线圈常数矩阵计算出三轴激励电流，该方式算法实现简单，但是易受常数矩阵标定精度的影响和周围磁场变化的影响；当系统工作在闭环控制方式，可利用磁强计的实时输出对激励电流进行微调，从而达到一个更高的磁场发生精度。

如图 5 所示，描述了空间某一点某组差动式线圈产生的磁场原理示意图。直线 M 表示 X 轴、Y 轴、Z 轴主线圈随着电流  $I$  的增加产生的磁场强度  $B$ ，直线 S 表示 X 轴、Y 轴、Z 轴副线圈随着电流  $I$  的增加产生的磁场强度，显然两者



符号相反，由于线圈绕制工艺等因素的限制，两条磁场直线的斜率也会有微小差别。将直线 S 按电流横坐标镜像可得到直线 S1，由直线 M 和 S1 可直观地看出，选择不同的偏置电流会导致不同的线圈初始偏置磁场，线圈初始偏置磁场随电流的变化率体现了线圈绕制工艺的水平。

将直线 S1 按偏置电流  $I_b$  进行左右镜像得到直线 S2。S2 的含义就是：X 轴、Y 轴、Z 轴副线圈发生的磁场随 X 轴、Y 轴、Z 轴主线圈电流变化的直线（主组与副组线圈的电流变化总是大小相等，方向相反）。此时直线 M 直接减去 S，可得直线 C，直线 C 描述了差动线圈产生的合成磁场随电流变化的规律。主线圈磁通减少  $\delta I$ ，同时副线圈磁通增大  $\delta I$ ，则会将差动线圈的磁场输出调节为零。差动式微型磁模拟器的研制以分阶段进行，首先利用恒流源与一个轴向的差动式线圈进行联试，测定了系统的初步性能。将磁强计置于距离一组差动式线圈约 18cm 的平台上，并让磁强计正常工作。

如图 6 所示。首先进行的是初始偏置磁场的性能测试，以了解差动式线圈的性能。通过给恒流源模块输入电压控制指令，差动式线圈流过不同的偏置电流，其主要成分是当地地磁，但是随着控制电压的增大，磁强计的输出呈缓慢减小的趋势，这是由于两个线圈不一致带来的，但整个变化不超过 150nT，选定偏置电流后，由线圈不一致带来的线圈初始偏置磁场可由自标定消除。

如图 7 所示。增加主组线圈恒流源的控制电压，并且同步减小副组线圈恒流源的控制电压，线圈的磁场均匀下降。从图中可以直观的看出，线圈系统具有良好的品质，具体的数值参见表 3。

表 3、差动式线圈的磁场变化

差动电压 (V)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4
磁强计输出 (nT)	33800	29711	25674	21623	17561	13498	9410
差动电压 (V)	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	
磁强计输出 (nT)	5347	1284	-2803	-6879	-10929	-15005	

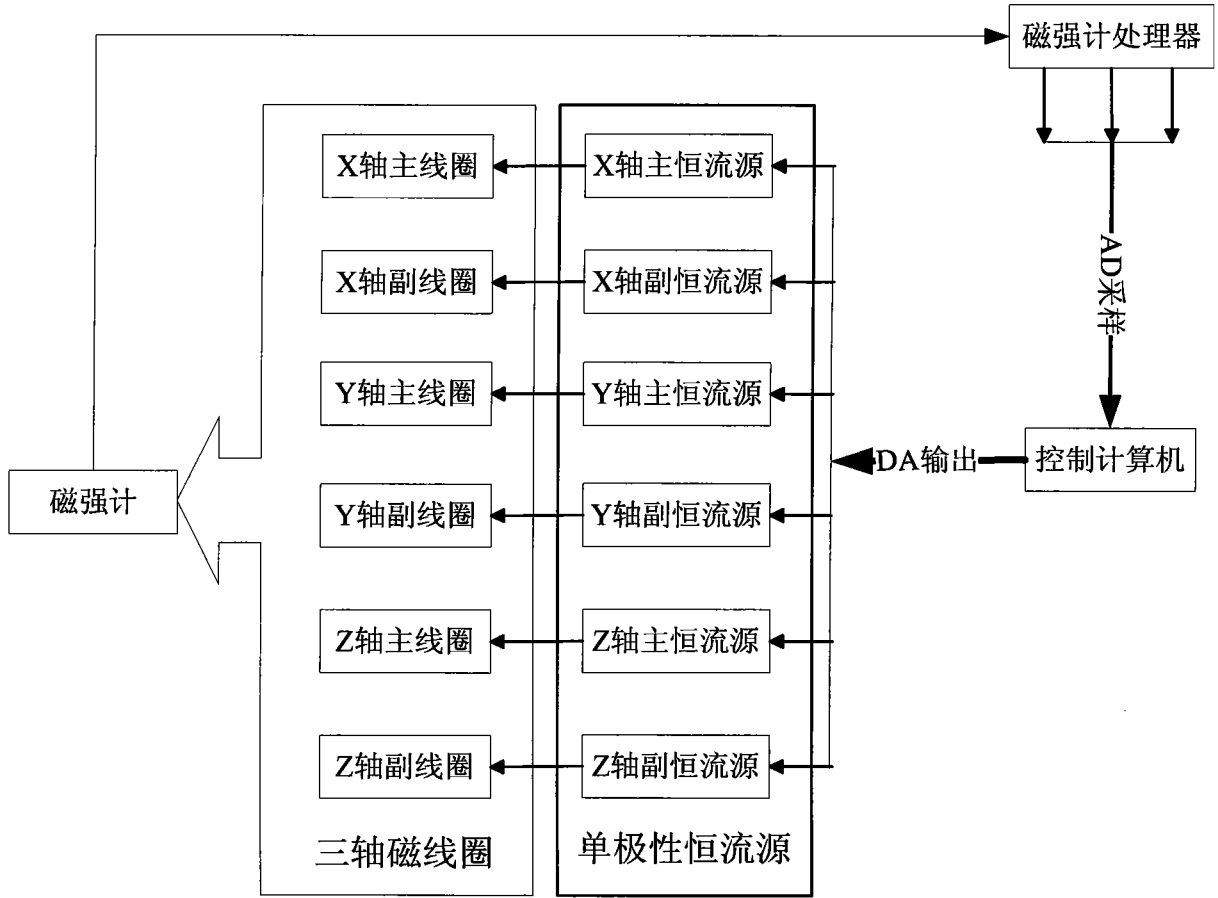


图 1

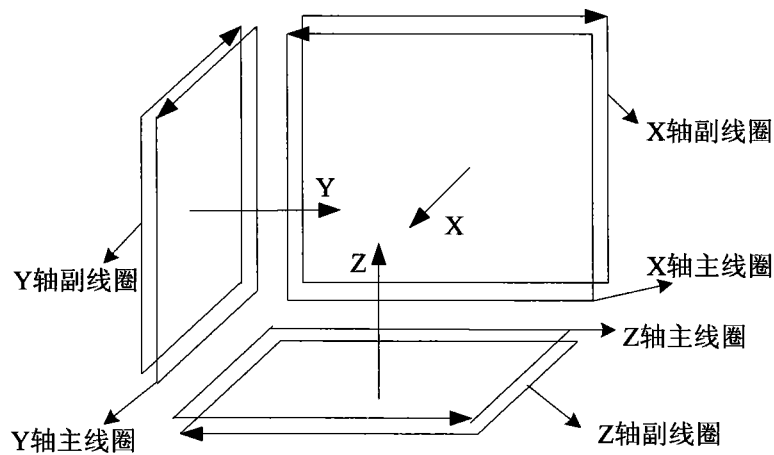


图 2

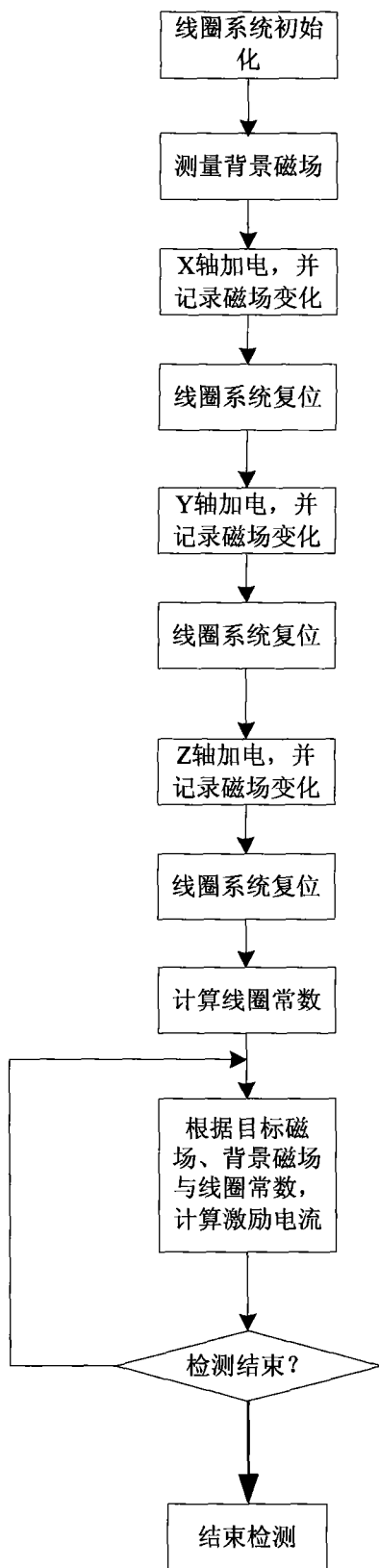


图 3

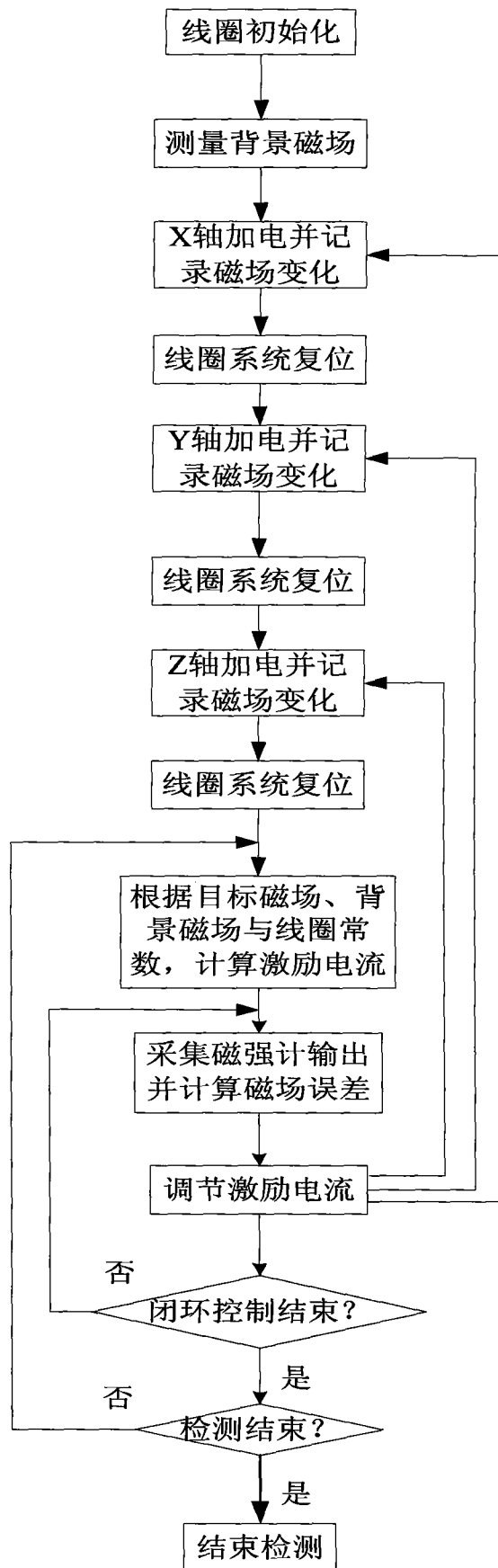


图 4

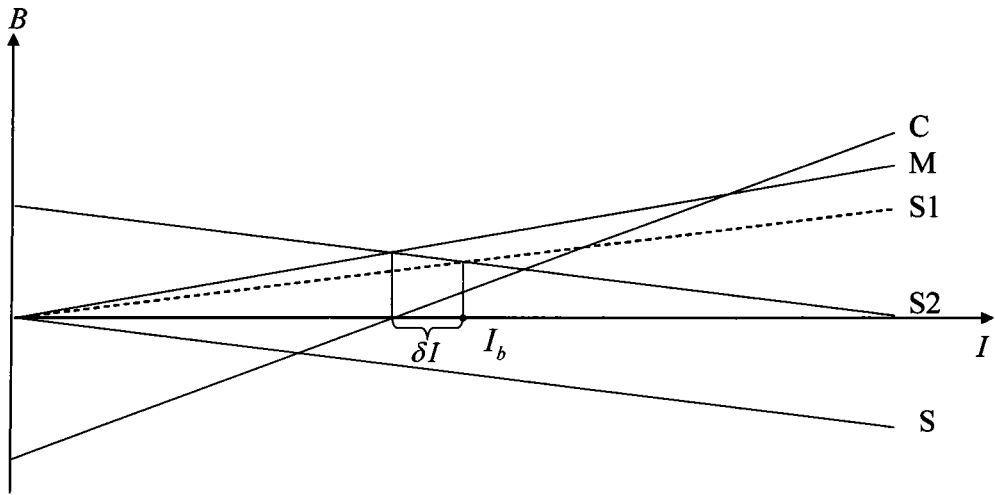


图 5

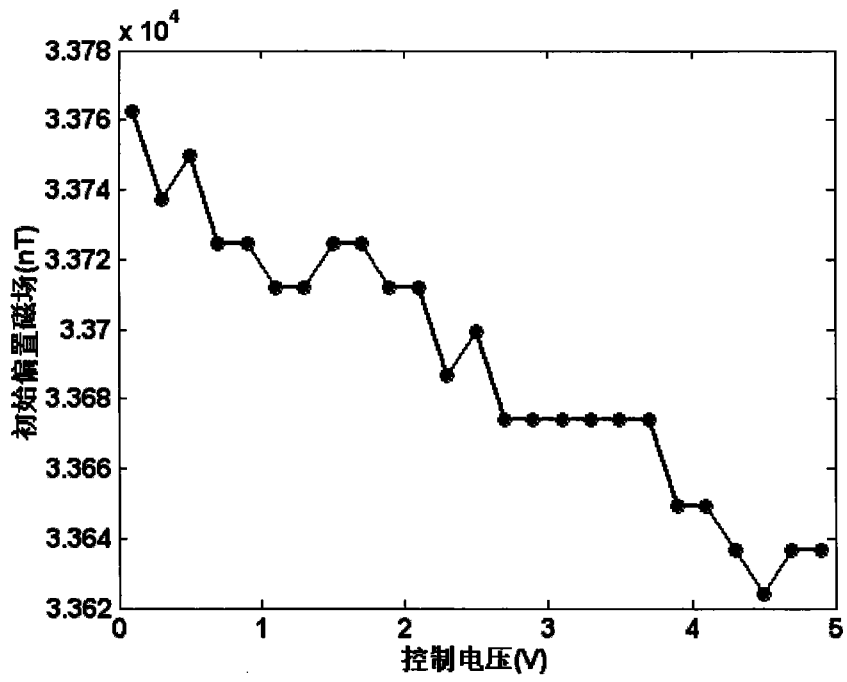


图 6

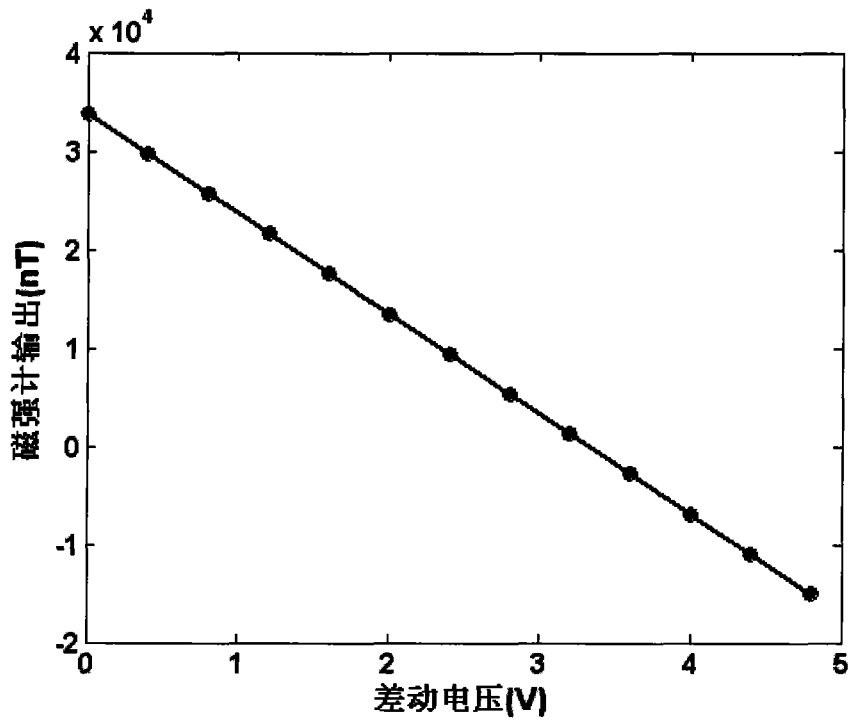


图 7