



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106907393 A

(43)申请公布日 2017. 06. 30

(21)申请号 201710119650.1

(22)申请日 2017.03.02

(71)申请人 常州市翰琪电机有限公司

地址 213101 江苏省常州市武进区横林镇
镇西工业园

申请人 常州工学院

(72)发明人 张建生 钱程 钱韩琪 张燕红
张兵

(74)专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限
公司 32224

代理人 董建林

(51)Int.Cl.

F16C 32/04(2006.01)

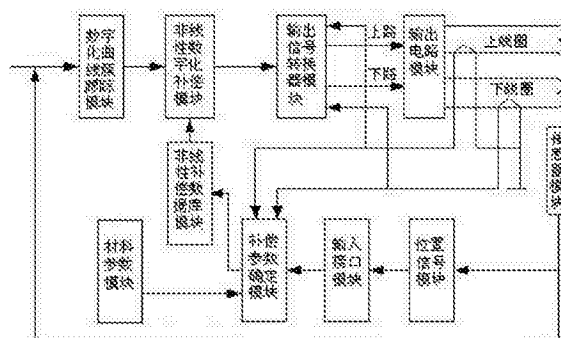
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法及其装置

(57)摘要

本发明涉及一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法及其装置,属于电主轴控制技术领域。包括控制器、非线性功率放大器和外部电路模块;所述非线性功率放大器包括数字化曲线簇跟踪模块、非线性数字化补偿模块、输出信号转换器模块、非线性补偿数据库模块、补偿参数确定模块、材料参数模块、输出电路模块、输入接口模块和位置信号模块;所述外部电路模块包括转轴、差动式电磁线圈和传感器模块;所述控制器采用自适应滑模控制算法,根据涡流传感器检测出的转轴位移信号通过非线性数字化补偿,将系统的非线性因素滤除,使得系统线性化;所述差动式电磁铁是采用上、下两个线圈的差动结构,利用两个线圈中产生的电流进行控制。



1. 一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法,包括控制器和位移信号转换电路、非线性功率放大器和外部电路模块;其特征在于,所述非线性功率放大器包括数字化曲线簇跟踪模块、非线性数字化补偿模块、输出信号转换器模块、输出电路模块、非线性补偿数据库模块、补偿参数确定模块、材料参数模块、输入接口模块和位置信号模块,所述外部电路模块包括转轴、电机定子和用于检测转轴位移的传感器模块,所述电机定子包括差动式电磁线圈,所述差动式电磁线圈包括上线圈和下线圈;所述控制器的输入信号来自位移信号转换电路的输出,所述控制器的输出端连接所述非线性功率放大器的输入端,所述位移信号转换电路的输入端连接所述传感器模块的输出端;

所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端连接所述传感器模块的输出端,所述数字化曲线簇跟踪模块的输出端连接非线性数字化补偿模块的输入端,

所述非线性数字化补偿模块的输出端连接所述输出信号转换器模块的输入端,所述输出信号转换器模块的上路输出端、下路输出端均连接所述输出电路模块的输入端,所述输出电路模块的输出端分别连接所述上线圈、所述下线圈,

所述差动式电磁线圈的反馈信号分别连接所述输出信号转换器模块的输入端和所述补偿参数确定模块的输入端,所述传感器模块的输出端分别连接所述位置信号模块的输入端和所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端,

所述位置信号模块的输出端连接所述输入接口模块的输入端,所述输入接口模块的输出端、所述材料参数模块的输出端分别连接所述补偿参数确定模块的输入端,所述补偿参数确定模块的输出端连接所述非线性补偿数据库模块的输入端,所述非线性补偿数据库模块的输出端连接所述非线性数字化补偿模块的输入端;

所述位置信号模块对所述传感器模块检测的位置信号进行模数转换,然后将位置信号传递给所述输入接口模块,所述输入接口模块将位置信号发送给所述补偿参数确定模块;

所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供材料参数;

所述数字化曲线簇跟踪模块跟踪来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流,所述数字化曲线簇跟踪模块存储电流的动态记忆、数字化B-H曲线簇和转轴的间隙变化值,通过瞬时电流、电流的动态记忆和转轴的间隙变化值确定所述差动式电磁线圈的导磁率在数字化B-H曲线簇中动态工作点的转折处特征和过零点特征,所述数字化曲线簇跟踪模块记忆电流变化量并跟踪外部电路模块中的B-H值与数字化B-H曲线簇之间误差,然后根据材料参数纠正现有的瞬时电流误差;

所述非线性数字化补偿模块根据所述差动式电磁线圈的瞬时电流和所述传感器模块的位移信号建立数据库,依据数字化B-H曲线簇中呈现的非线性规律,通过所述差动式电磁线圈的瞬时电流、材料参数、所述转轴的位置增量变化以及磁力公式与磁性材料的磁导率、电流、线圈匝数等之间的关系进行反向推导差动电磁铁线圈中的瞬时电流补偿量,使得非线性系统等效为线性系统,列出相应的数据查询表;

所述输出信号转换器模块根据来自所述非线性数字化补偿模块的补偿量调节所述差动式电磁线圈的电流值,所述输出信号转换器模块每隔一个周期时间S实时检测来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流、所述转轴的位置变化量;

所述输出电路模块输出经过所述输出信号转换器模块处理后的电流值给外部电路模块;

所述补偿参数确定模块根据所述材料参数模块提供的材料参数、来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流信号和来自所述输入接口模块的位置信号确定补偿参数；

所述外部电路模块用于实现转轴的悬浮；

所述非线性补偿数据库模块根据所述差动式电磁线圈电磁力在数字化B-H曲线呈现的特征得到相应的补偿数据并进行存储，将补偿数据提供给所述非线性数字化补偿模块。

2. 根据权利要求1所述的一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法，其特征在于，所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的所述材料参数包括差动式电磁线圈中铁芯材料的材质、长度和直径；所述周期时间 $S=2\sim 3ns$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法，其特征在于，所述控制器的控制算法采用自适应滑模控制算法，所述控制器型号为DSPTMS320F28335，所述位置信号模块包括DSP高度处理器。

4. 根据权利要求1所述的一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法，其特征在于，所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的材料参数包括材料样本采集的B-H曲线簇，线圈匝数、质量值、差动式电磁线圈中所述上线圈和所述下线圈之间的间隙值、饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力、磁通密度、磁导率；所述差动式电磁线圈的磁芯材质相关参数包括磁芯材料规格、剩磁特征点处的磁感应强度和矫顽磁力特征点处的磁场强度。

5. 根据权利要求1所述的一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法，其特征在于，所述非线性补偿数据库模块的输入信号为与磁感应强度B、磁场强度H相关的参数，述非线性补偿数据库模块的输入信号包括差动式电磁线圈的瞬时电流、差动式电磁线圈的线圈匝数、差动式电磁线圈的半径。

6. 一种智能化磁悬浮电主轴装置，其特征在于，包括控制器、非线性功率放大器、电机定子(5)、若干个径向轴承(3)、若干个保护轴承(1)、若干个推力轴承(4)、转轴(8)、若干个传感器模块和轴壳(9)；

所述控制器分别电连接所述非线性功率放大器、若干个所述传感器模块，所述非线性功率放大器分别电连接所述电机(5)定子、若干个所述径向轴承(3)和若干个所述推力轴承(4)；

所述电机定子(5)、所述若干个径向轴承(3)、若干个所述保护轴承(1)、若干个所述推力轴承(4)、所述转轴(8)、若干个所述传感器模块均位于所述轴壳(9)中；

所述电机定子(5)、若干个所述径向轴承(3)、若干个所述保护轴承(1)和若干个所述推力轴承(4)均分别套设在所述转轴(8)上，所述电机定子(5)、若干个所述径向轴承(3)、若干个所述保护轴承(1)和若干个所述推力轴承(4)均固定连接所述轴壳(9)，所述电机定子(5)、若干个所述径向轴承(3)、若干个所述保护轴承(1)、若干个所述推力轴承(4)与所述转轴(8)均同轴设置；

若干个所述传感器模块包括若干个用于检测所述转轴(8)径向位移的径向传感器和若干个用于检测所述转轴(8)轴向位移的轴向传感器，若干个所述径向传感器竖向固定连接所述轴壳(9)，若干个所述轴向传感器横向固定连接所述轴壳(9)。

7. 根据权利要求6所述的一种智能化磁悬浮电主轴装置，其特征在于，所述转轴(8)为台阶轴，所述转轴(8)包括第一转轴(21)、第二转轴(22)、第三转轴(23)、第四转轴(24)、第五转轴(25)、第六转轴(26)、第七转轴(27)和第八转轴(28)；第一转轴(21)、第二转轴(22)、

第三转轴(23)、第四转轴(24)、第五转轴(25)、第六转轴(26)、第七转轴(27)和第八转轴(28)依次沿直线首位相互固定连接,所述第四转轴(24)直径>所述第三转轴(23)直径>所述第二转轴(22)直径>所述第一转轴(21)直径,所述第四转轴(24)直径>所述第五转轴(25)直径>所述第六转轴(26)直径>所述第七转轴(27)直径>所述第八转轴(28)直径。

8.根据权利要求7所述的一种智能化磁悬浮电主轴装置,其特征在于,包括两个法兰盘、两个径向传感器(2)和一个轴向传感器(10),两个法兰盘包括左法兰盘和右法兰盘,两个径向传感器(2)包括左径向传感器和右径向传感器,所述左法兰盘套设在所述第二转轴(22)上,所述右法兰盘套设在第七转轴(27)上,所述左法兰盘、所述右法兰盘均固定连接所述轴壳(9);所述左径向传感器、所述轴向传感器(10)均固定设置在所述左法兰盘上,所述左径向传感器位于所述第二转轴(22)的上方,所述轴向传感器(10)位于所述第二转轴(22)的下方,所述右径向传感器固定设置在所述右法兰盘上,所述右径向传感器位于所述第七转轴(27)的上方。

9.根据权利要求6所述的一种智能化磁悬浮电主轴装置,其特征在于,包括两个保护轴承(1)、两个径向轴承(3)和两个推力轴承(4),一所述保护轴承(1)套设在所述第一转轴(1)上,另一所述保护轴承(1)套设在第八转轴(28)上,一所述径向轴承(3)套设在所述第三转轴(23)上,另一所述径向轴承(3)套设在所述第七转轴(27)上,两个所述推力轴承(4)均套设在所述第四转轴(24)上。

10.根据权利要求6所述的一种智能化磁悬浮电主轴装置,其特征在于,包括刀具(11),所述刀具(11)可拆卸固定连接所述转轴(8)的左端;包括出水口(6)、入水口(7)和水管(12),所述出水口(6)连通所述水管(12)的上端,所述入水口(7)连通所述水管(12)的下端,所述水管(12)位于所述轴壳(9)中,所述水管(12)缠绕所述轴壳(9)的内壁,所述水管(12)位于所述电机定子(5)的外侧;所述传感器模块为涡流传感器。

一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法及其装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法及其装置,属于电主轴控制技术领域。

背景技术

[0002] 磁悬浮电主轴是利用可控电磁力作用将转子或轴稳定悬浮于空间的一种新型高性能轴承。与传统轴承相比,磁悬浮电主轴具有无接触、无磨损、无摩擦、使用寿命长和维护费用低等优点,可以将磁轴承应用到高温、强腐蚀恶劣环境中,可容许转子达到很高的转速。正因为如此,磁悬浮轴承技术已引起世界各国科学界和工业界的特别关注,并逐步应用到了真空和洁净空间系统、机械制造工具、医疗设备、透平机械、超导磁轴承等领域。

[0003] 磁悬浮系统是一种复杂的强非线性、系统模型不确定系统,其性能如刚度、阻尼及稳定性等的好坏很大程度上取决于所采用控制器的控制算法。并且,它的核心技术以及关键难题就是转子的悬浮控制器的设计问题。在磁悬浮系统的研究中,单自由度磁悬浮系统为典型的磁悬浮系统,其结构简单、易于实现。因此对单自由度磁悬浮系统的研究是研究磁悬浮技术的一种简单而有效的方法,是进行多自由度磁悬浮控制系统技术研究的基础,对非接触式位置传感以及磁悬浮先进控制算法等方面的研究有着重要的意义。

[0004] 对智能型磁悬浮电主轴系统产生的机理进行理论分析,并在技术解决方法上开展研究,可使磁悬浮轴承技术在工业应用方面趋于成熟,为磁悬浮技术的实际应用提供理论和技术依据。另外,磁悬浮轴承具有无机械摩擦、无需润滑等特点,可以极大的改善工作条件和保护自然生态环境,符合机电产品的绿色设计和清洁制造等要求,将会成为本世纪新型机电产品的热点,在产生经济效益的同时,也会产生巨大的社会效益。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是克服现有技术的缺陷,提供一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法及其装置,能够自动跟踪差动式电磁线圈的瞬时电流,并补正顺势电流的误差,使得磁悬浮装置更加稳定。

[0006] 为达到上述目的,本发明提供一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法,包括控制器和位移信号转换电路、非线性功率放大器和外部电路模块;所述非线性功率放大器包括数字化曲线簇跟踪模块、非线性数字化补偿模块、输出信号转换器模块、输出电路模块、非线性补偿数据库模块、补偿参数确定模块、材料参数模块、输入接口模块和位置信号模块,所述外部电路模块包括转轴、电机定子和用于检测转轴位移的传感器模块,所述电机定子包括差动式电磁线圈,所述差动式电磁线圈包括上线圈和下线圈;所述控制器的输入信号来自位移信号转换电路的输出,所述控制器的输出端连接所述非线性功率放大器的输入端,所述位移信号转换电路的输入端连接所述传感器模块的输出端;

[0007] 所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端连接所述传感器模块的输出端,所述数字化曲线簇跟踪模块的输出端连接非线性数字化补偿模块的输入端,

[0008] 所述非线性数字化补偿模块的输出端连接所述输出信号转换器模块的输入端,所述输出信号转换器模块的上路输出端、下路输出端均连接所述输出电路模块的输入端,所述输出电路模块的输出端分别连接所述上线圈、所述下线圈,

[0009] 所述差动式电磁线圈的反馈信号分别连接所述输出信号转换器模块的输入端和所述补偿参数确定模块的输入端,所述传感器模块的输出端分别连接所述位置信号模块的输入端和所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端,

[0010] 所述位置信号模块的输出端连接所述输入接口模块的输入端,所述输入接口模块的输出端、所述材料参数模块的输出端分别连接所述补偿参数确定模块的输入端,所述补偿参数确定模块的输出端连接所述非线性补偿数据库模块的输入端,所述非线性补偿数据库模块的输出端连接所述非线性数字化补偿模块的输入端;

[0011] 所述位置信号模块对所述传感器模块检测的位置信号进行模数转换,然后将位置信号传递给所述输入接口模块,所述输入接口模块将位置信号传送给所述补偿参数确定模块;

[0012] 所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供材料参数;

[0013] 所述数字化曲线簇跟踪模块跟踪来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流,所述数字化曲线簇跟踪模块存储电流的动态记忆、数字化B-H曲线簇和转轴的间隙变化值,通过瞬时电流、电流的动态记忆和转轴的间隙变化值确定所述差动式电磁线圈的导磁率在数字化B-H曲线簇中动态工作点的转折处特征和过零点特征,所述数字化曲线簇跟踪模块记忆电流变化量并跟踪外部电路模块中的B-H值与数字化B-H曲线簇之间误差,然后根据材料参数纠正现有的瞬时电流误差;

[0014] 所述非线性数字化补偿模块根据所述差动式电磁线圈的瞬时电流和所述传感器模块的位移信号建立数据库,依据数字化B-H曲线簇中呈现的非线性规律,通过所述差动式电磁线圈的瞬时电流、材料参数、所述转轴的位置增量变化以及磁力公式与磁性材料的磁导率、电流、线圈匝数等之间的关系进行反向推导差动电磁铁线圈中的瞬时电流补偿量,使得非线性系统等效为线性系统,列出相应的数据查询表;

[0015] 所述输出信号转换器模块根据来自所述非线性数字化补偿模块的补偿量调节所述差动式电磁线圈的电流值,所述输出信号转换器模块每隔一个周期时间S实时检测来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流、所述转轴的位置变化量;

[0016] 所述输出电路模块输出经过所述输出信号转换器模块处理后的电流值给外部电路模块;

[0017] 所述补偿参数确定模块根据所述材料参数模块提供的材料参数、来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流信号和来自所述输入接口模块的位置信号确定补偿参数;

[0018] 所述外部电路模块用于实现转轴的悬浮;

[0019] 所述非线性补偿数据库模块根据所述差动式电磁线圈电磁力在数字化B-H曲线呈现的特征得到相应的补偿数据并进行存储,将补偿数据提供给所述非线性数字化补偿模块。

[0020] 优先地,所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的所述材料参数包括差动式电磁线圈中铁芯材料的材质、长度和直径;所述周期时间 $S=2\sim 3ns$ 。

[0021] 优先地,所述控制器的控制算法采用自适应滑模控制算法,所述控制器型号为

DSPTMS320F28335,所述位置信号模块包括DSP高度处理器。

[0022] 优先地,所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的材料参数包括材料样本采集的B-H曲线簇,线圈匝数、质量值、差动式电磁线圈中所述上线圈和所述下线圈之间的间隙值、饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力、磁通密度、磁导率;所述差动式电磁线圈的磁芯材质相关参数包括磁芯材料规格、剩磁特征点处的磁感应强度和矫顽磁力特征点处的磁场强度。

[0023] 优先地,所述非线性补偿数据库模块的输入信号为与磁感应强度B、磁场强度H相关的参数,述非线性补偿数据库模块的输入信号包括差动式电磁线圈的瞬时电流、差动式电磁线圈的线圈匝数、差动式电磁线圈的半径。

[0024] 一种智能化磁悬浮电主轴装置,包括控制器、非线性功率放大器、电机定子、若干个径向轴承、若干个保护轴承、若干个推力轴承、转轴、若干个位移传感器和轴壳;

[0025] 所述控制器分别电连接所述非线性功率放大器、若干个所述位移传感器,所述非线性功率放大器分别电连接所述电机定子、若干个所述径向轴承和若干个所述推力轴承;

[0026] 所述电机定子、所述若干个径向轴承、若干个所述保护轴承、若干个所述推力轴承、所述转轴、若干个所述位移传感器均位于所述轴壳中;

[0027] 所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承和若干个所述推力轴承均分别套设在所述转轴上,所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承和若干个所述推力轴承均固定连接所述轴壳,所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承、若干个所述推力轴承与所述转轴均同轴设置;

[0028] 若干个所述位移传感器包括若干个用于检测所述转轴径向位移的径向传感器和若干个用于检测所述转轴轴向位移的轴向传感器,若干个所述径向传感器竖向固定连接所述轴壳,若干个所述轴向传感器横向固定连接所述轴壳。

[0029] 优先地,所述转轴为台阶轴,所述转轴包括第一转轴、第二转轴、第三转轴、第四转轴、第五转轴、第六转轴、第七转轴和第八转轴;第一转轴、第二转轴、第三转轴、第四转轴、第五转轴、第六转轴、第七转轴和第八转轴依次沿直线首位相互固定连接,所述第四转轴直径>所述第三转轴直径>所述第二转轴直径>所述第一转轴直径,所述第四转轴直径>所述第五转轴直径>所述第六转轴直径>所述第七转轴直径>所述第八转轴直径。

[0030] 优先地,包括两个法兰盘、两个径向传感器和一个轴向传感器,两个法兰盘包括左法兰盘和右法兰盘,两个径向传感器包括左径向传感器和右径向传感器,所述左法兰盘套设在所述第二转轴上,所述右法兰盘套设在第七转轴上,所述左法兰盘、所述右法兰盘均固定连接所述轴壳;所述左径向传感器、所述轴向传感器均固定设置在所述左法兰盘上,所述左径向传感器位于所述第二转轴的上方,所述轴向传感器位于所述第二转轴的下方,所述右径向传感器固定设置在所述右法兰盘上,所述右径向传感器位于所述第七转轴的上方。

[0031] 优先地,包括两个保护轴承、两个径向轴承和两个推力轴承,一所述保护轴承套设在所述第一转轴上,另一所述保护轴承套设在第八转轴上,一所述径向轴承套设在所述第三转轴上,另一所述径向轴承套设在所述第七转轴上,两个所述推力轴承均套设在所述第四转轴上。

[0032] 优先地,包括刀具,所述刀具可拆卸固定连接所述转轴的左端。

[0033] 优先地,包括出水口、入水口和水管,所述出水口连通所述水管的上端,所述入水

口连通所述水管的下端,所述水管位于所述轴壳中,所述水管缠绕所述轴壳的内壁,所述水管位于所述电机定子的外侧。

[0034] 优先地,所述位移传感器为涡流传感器。

[0035] 本发明所达到的有益效果:

[0036] (1) 本发明解决了主动磁悬浮电主轴运行过程中受到扰动而不稳定的问题,这为主动磁悬浮电主轴的实际应用提供了理论依据;这可将系统的数字控制器做成一个标准化的部件,为实现主动磁悬浮电主轴系统的免调试、大批量生产和应用提供了更好的技术支持;通过自适应滑模控制方法,进一步提高磁悬浮电主轴的抗扰性能及鲁棒性。

[0037] (2) 本发明提供了智能型磁悬浮电主轴系统中对非线性对象进行处理的方法,对控制决策的改善、运算速度的提高、控制性能的增强为扩大稳定域带来一定的帮助。

[0038] (3) 利用非线性曲线簇跟踪补偿方法的非线性功率放大器,进一步地提高了系统的稳定性及动态性能。

附图说明

[0039] 图1是现有技术中主动型磁悬浮系统的原理框图;

[0040] 图2是本发明中智能化磁悬浮电主轴系统的结构图;

[0041] 图3是本发明中轴向电磁铁的结构图;

[0042] 图4是本发明中径向电磁铁的结构图;

[0043] 图5是本发明中非线性功率放大器的原理框图;

[0044] 图6是本发明中外部电路模块的结构图。

[0045] 附图中标记含义,1-保护轴承;2-径向传感器;3-径向轴承;4-推力轴承;5-电机定子;6-出水口;7-入水口;8-转轴;9-轴壳;10-轴向传感器;11-刀具;12-水管;21-第一转轴;22-第二转轴;23-第三转轴;24-第四转轴;25-第五转轴;26-第六转轴;27-第七转轴;28-第八转轴。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0047] 一个典型的主动型磁悬浮电主轴的组成部分及其功能如图1所示。其中包含涡流传感器,用于测出转轴偏离参考点的位置;控制器,通过微处理器将涡流传感器检测的位移变换成控制信号;数字化非线性曲线族跟踪型功率放大器,是在基本非线性功率放大器的基础上,通过不同的瞬时电流值及电流动态记忆,按数字化B-H族规律将控制信号转换成控制电流,使执行磁铁产生磁力从而使转轴维持其悬浮位置不变。一个实际的转轴需要多个磁铁组成,检测传感器也应该是多个。

[0048] 以磁悬浮电主轴为例,系统有4个径向自由度及1个轴向自由度。由控制器通过功率放大器去驱动差动电磁铁线圈的电流,来调整转轴轴的平衡位置。高速运转时一旦转轴位置改变,控制器就会通过调整相应电磁铁中的电流使转轴轴保持在中间位置。主动磁悬浮轴承是一个典型的机电一体化控制系统,其本质是强烈非线性(磁浮力正比于电流的平方、反比于偏移量的平方,电感、磁滞因素等)的,因此其控制问题变得复杂而又富有代表

性。磁悬浮轴承正成为非线性控制领域中一个非常典型的对象。控制方式对磁悬浮轴承来说,如同软件技术在计算机中的地位一样,吸引了大量的注意力和耗费大部分研究工作量。

[0049] 由于磁悬浮控制系统是典型的非线性本质不稳定和参数不确定系统,这些对于提高系统的稳定性和刚度都是不利的。

[0050] 差动电磁铁产生的电磁力如式(1)

$$[0051] \quad \Delta F = F_1 - F_2 = \frac{\mu S_0 N^2}{4} \left[\left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

[0052] 以往的磁悬浮电主轴系统中,往往不考虑铁芯材料的非线性影响,把铁芯的导磁率 μ 当作固定的,本发明中,在基本非线性功放处理中把原来固定的磁导率按照数字化B-H曲线簇上的一根曲线进行补偿。

[0053] 实际上不但铁芯的导磁率 μ 并非常数,因数字化B-H曲线是一个曲线族,当受冲击性负载时,工作点还会突变至曲线族上的其他曲线(如图3),本发明就是通过快响应电流跟踪的办法快速地确定工作点所在的数字化B-H曲线。吸力增量 ΔF 与线圈电流的关系就不符合公式(1),如式(2):

$$[0054] \quad \Delta F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_s S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \frac{\mu_x S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2$$

$$[0055] \quad \Delta F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_s S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \frac{\mu_x S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2$$

[0056]

$$[0057] \quad \Delta F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_s S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \frac{\mu_x S_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2 \quad (2)$$

[0058] 此时的 μ_s 为上线圈铁芯中瞬时导磁率、 μ_x 为下线圈铁芯中瞬时导磁率, ΔF 与式(1)中的 ΔF 相差较大。这就是与早期的非线性功放的区别所在。

[0059] 通过非线性补偿把差动电磁铁的对象等效为线性对象,可以写为:

$$[0060] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Ax_1 + Bu + F \end{cases} \quad (3)$$

[0061] 其中,F为不确定的扰动信号。

[0062] 定义李雅普诺夫函数

$$[0063] \quad V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{F}^2 \quad (4)$$

[0064] 其中, $\tilde{F} = F - \hat{F}$, $\hat{F}$ 为F的估计值,为一个正的常数,那么

[0065]

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= \dot{V}_2 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F} \dot{\tilde{F}} \\
&= z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) + A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) + Bu + F - \ddot{x}_d + c_1 \dot{z}_1) - \frac{1}{\gamma} \tilde{F} \dot{\tilde{F}} \quad (5) \\
&= z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) + A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) + Bu + \hat{F} - \ddot{x}_d + c_1 \dot{z}_1) - \frac{1}{\gamma} \tilde{F}(\dot{\tilde{F}} + \gamma \sigma)
\end{aligned}$$

[0066] 设计自适应控制器为

$$u = B^{-1}(-k_1(z_2 - c_1 z_1) - A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) - \hat{F} + \ddot{x}_d - c_1 \dot{z}_1 - h(\sigma + \beta \operatorname{sgn}(\sigma))) \quad (6)$$

[0068] 设计的自适应控制律为:

$$\dot{\tilde{F}} = -\gamma \sigma \quad (7)$$

[0070] 由公式(4)-(7),可以得到

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - h \sigma^2 - h \beta |\sigma| \\
[0071] \quad &= -z^T Q z - h \beta |\sigma|
\end{aligned}$$

$$[0072] \quad \text{其中: } Q = \begin{bmatrix} c_1 + h k_1^2 & h k_1 - \frac{1}{2} \\ h k_1 - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix}。$$

[0073] 基本非线性功率放大器解决的关键问题铁芯材料非线性是客观存在的,这种非线性一定程度上影响了系统的稳定域,在实际应用时很难抵御较大的扰动,但增加非线性曲线族跟踪后,对抵御较大扰动有明显改进。欲使系统稳定域扩大,要解决的关键问题是:用“数字化非线性功率放大”的办法,使被控对象与驱动器合成一个线性系统,这样主动磁悬浮控制器就相当于在线性系统下工作,对控制决策的改善、运算速度的提高、控制性能的增强、最终为扩大稳定域带来一定的帮助。

[0074] 这一关键问题可以展开为以下三点:①在系统前向通道中,采用非线性功率放大来抵消铁芯非线性影响,使控制器的控制对象等效成为一个线性系统,从而改变了控制决策,形成一个新的控制模型。②用数字化方法解决非线性曲线族的补偿问题。这一算法和技术将会对今后的主动磁悬浮系统设计有一定的参考价值。③解决快响应电流跟踪的办法使之快速地确定工作点所在的数字化B-H曲线的问题。

[0075] 如图2所示,外部电路模块主要包括保护轴承、径向轴承、轴向轴承。保护轴承起到限位保护的作用,采用滚轮或类似结构,分上和两部分成对使用。径向轴承采用成对电磁单元,组成差动工作模式,产生作用于转轴上的电磁力,无任何直接物理接触,如图4所示。如图3所示,轴向轴承采用永磁单元,是悬浮状态磁场力的主要提供者,用来减小电磁单元的支承要求。

[0076] 本发明提供一种智能化磁悬浮电主轴的控制方法,包括控制器和位移信号转换电路、非线性功率放大器和外部电路模块;所述非线性功率放大器包括数字化曲线簇跟踪模块、非线性数字化补偿模块、输出信号转换器模块、输出电路模块、非线性补偿数据库模块、补偿参数确定模块、材料参数模块、输入接口模块和位置信号模块,所述外部电路模块包括

转轴、电机定子和用于检测转轴位移的传感器模块,所述电机定子包括差动式电磁线圈,所述差动式电磁线圈包括上线圈和下线圈;所述控制器的输入信号来自位移信号转换电路的输出,所述控制器的输出端连接所述非线性功率放大器的输入端,所述位移信号转换电路的输入端连接所述传感器模块的输出端;

[0077] 所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端连接所述传感器模块的输出端,所述数字化曲线簇跟踪模块的输出端连接非线性数字化补偿模块的输入端,

[0078] 所述非线性数字化补偿模块的输出端连接所述输出信号转换器模块的输入端,所述输出信号转换器模块的上路输出端、下路输出端均连接所述输出电路模块的输入端,所述输出电路模块的输出端分别连接所述上线圈、所述下线圈,

[0079] 所述差动式电磁线圈的反馈信号分别连接所述输出信号转换器模块的输入端和所述补偿参数确定模块的输入端,所述传感器模块的输出端分别连接所述位置信号模块的输入端和所述数字化曲线簇跟踪模块的输入端,

[0080] 所述位置信号模块的输出端连接所述输入接口模块的输入端,所述输入接口模块的输出端、所述材料参数模块的输出端分别连接所述补偿参数确定模块的输入端,所述补偿参数确定模块的输出端连接所述非线性补偿数据库模块的输入端,所述非线性补偿数据库模块的输出端连接所述非线性数字化补偿模块的输入端;

[0081] 所述位置信号模块对所述传感器模块检测的位置信号进行模数转换,然后将位置信号传递给所述输入接口模块,所述输入接口模块将位置信号传送给所述补偿参数确定模块;

[0082] 所述材料参数模块中材料性能测试结果生成的数据表,所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供材料参数;

[0083] 所述数字化曲线簇跟踪模块跟踪来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流,所述数字化曲线簇跟踪模块存储电流的动态记忆、数字化B-H曲线簇和转轴的间隙变化值,通过瞬时电流、电流的动态记忆和转轴的间隙变化值确定所述差动式电磁线圈的导磁率在数字化B-H曲线簇中动态工作点的转折处特征和过零点特征,所述数字化曲线簇跟踪模块记忆电流变化量并跟踪外部电路模块中的B-H值与数字化B-H曲线簇之间误差,然后根据材料参数纠正现有的瞬时电流误差;

[0084] 所述非线性数字化补偿模块根据所述差动式电磁线圈的瞬时电流和所述传感器模块的位移信号建立数据库,依据数字化B-H曲线簇中呈现的非线性规律,通过所述差动式电磁线圈的瞬时电流、材料参数、所述转轴的位置增量变化以及磁力公式与磁性材料的磁导率、电流、线圈匝数等之间的关系进行反向推导差动电磁铁线圈中的瞬时电流补偿量,使得非线性系统等效为线性系统,列出相应的数据查询表;该数据查询表用于非线性补偿,针对不同的材料有不同的表,表的数据由磁性材料的B-H曲线实验所得。

[0085] 所述输出信号转换器模块根据来自所述非线性数字化补偿模块的补偿量调节所述差动式电磁线圈的电流值,所述输出信号转换器模块每隔一个周期时间S实时检测来自所述差动式电磁线圈的瞬时电流、所述转轴的位置变化量;

[0086] 所述输出电路模块输出经过所述输出信号转换器模块处理后的电流值给外部电路模块;

[0087] 所述补偿参数确定模块根据所述材料参数模块提供的材料参数、来自所述差动式

电磁线圈的瞬时电流信号和来自所述输入接口模块的位置信号确定补偿参数;

[0088] 确定补偿参数过程:根据材料类型从数据查询表中调出相应的B-H曲线族;根据电流和线圈匝数计算磁场强度H;根据磁场强度H历史轨迹找到曲线族中的工作曲线;再根据瞬时电流值和线圈匝数在这条曲线上找到工作点,根据线性化要求,设定新的工作点,在新的工作点上查得新的磁场强度H,然后倒推出新的电流,将电流输出到电磁线圈,即完成补偿。

[0089] 所述外部电路模块用于实现转轴的悬浮;

[0090] 所述非线性补偿数据库模块根据所述差动式电磁线圈电磁力在数字化B-H曲线呈现的特征得到相应的补偿数据并进行存储,将补偿数据提供给所述非线性数字化补偿模块。

[0091] 进一步地,所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的所述材料参数包括差动式电磁线圈中铁芯材料的材质、长度和直径;所述周期时间 $S=2\sim 3ns$ 。

[0092] 进一步地,所述控制器的控制算法采用自适应滑模控制算法,所述控制器型号为DSPTMS320F28335,所述位置信号模块包括DSP高度处理器。

[0093] 进一步地,所述材料参数模块为所述补偿参数确定模块提供的材料参数包括材料样本采集的B-H曲线簇,线圈匝数、质量值、差动式电磁线圈中所述上线圈和所述下线圈之间的间隙值、饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力、磁通密度、磁导率;所述差动式电磁线圈的磁芯材质相关参数包括磁芯材料规格、剩磁特征点处的磁感应强度和矫顽磁力特征点处的磁场强度。

[0094] 进一步地,所述非线性补偿数据库模块的输入信号为与磁感应强度B、磁场强度H相关的参数,述非线性补偿数据库模块的输入信号包括差动式电磁线圈的瞬时电流、差动式电磁线圈的线圈匝数、差动式电磁线圈的半径。

[0095] 一种智能化磁悬浮电主轴装置,包括控制器、非线性功率放大器、电机定子、若干个径向轴承、若干个保护轴承、若干个推力轴承、转轴、若干个位移传感器和轴壳;

[0096] 所述控制器分别电连接所述非线性功率放大器、若干个所述位移传感器,所述非线性功率放大器分别电连接所述电机定子、若干个所述径向轴承和若干个所述推力轴承;

[0097] 所述电机定子、所述若干个径向轴承、若干个所述保护轴承、若干个所述推力轴承、所述转轴、若干个所述位移传感器均位于所述轴壳中;

[0098] 所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承和若干个所述推力轴承均分别套设在所述转轴上,所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承和若干个所述推力轴承均固定连接所述轴壳,所述电机定子、若干个所述径向轴承、若干个所述保护轴承、若干个所述推力轴承与所述转轴均同轴设置;

[0099] 若干个所述位移传感器包括若干个用于检测所述转轴径向位移的径向传感器和若干个用于检测所述转轴轴向位移的轴向传感器,若干个所述径向传感器竖向固定连接所述轴壳,若干个所述轴向传感器横向固定连接所述轴壳。

[0100] 进一步地,所述转轴为台阶轴,所述转轴包括第一转轴、第二转轴、第三转轴、第四转轴、第五转轴、第六转轴、第七转轴和第八转轴;第一转轴、第二转轴、第三转轴、第四转轴、第五转轴、第六转轴、第七转轴和第八转轴依次沿直线首位相互固定连接,所述第四转轴直径>所述第三转轴直径>所述第二转轴直径>所述第一转轴直径,所述第四转轴直径

>所述第五转轴直径>所述第六转轴直径>所述第七转轴直径>所述第八转轴直径。

[0101] 进一步地,包括两个法兰盘、两个径向传感器和一个轴向传感器,两个法兰盘包括左法兰盘和右法兰盘,两个径向传感器包括左径向传感器和右径向传感器,所述左法兰盘套设在所述第二转轴上,所述右法兰盘套设在第七转轴上,所述左法兰盘、所述右法兰盘均固定连接所述轴壳;所述左径向传感器、所述轴向传感器均固定设置在所述左法兰盘上,所述左径向传感器位于所述第二转轴的上方,所述轴向传感器位于所述第二转轴的下方,所述右径向传感器固定设置在所述右法兰盘上,所述右径向传感器位于所述第七转轴的上方。

[0102] 进一步地,包括两个保护轴承、两个径向轴承和两个推力轴承,一所述保护轴承套设在所述第一转轴上,另一所述保护轴承套设在第八转轴上,一所述径向轴承套设在所述第三转轴上,另一所述径向轴承套设在所述第七转轴上,两个所述推力轴承均套设在所述第四转轴上。

[0103] 进一步地,包括刀具,所述刀具可拆卸固定连接所述转轴的左端。

[0104] 进一步地,包括出水口、入水口和水管,所述出水口连通所述水管的上端,所述入水口连通所述水管的下端,所述水管位于所述轴壳中,所述水管缠绕所述轴壳的内壁,所述水管位于所述电机定子的外侧。

[0105] 进一步地,所述位移传感器为涡流传感器。

[0106] 进一步地,所述控制器的控制算法采用自适应滑模控制算法,所述控制器型号为DSPTMS320F28335。

[0107] 所述电机定子5包括差动式电磁线圈,所述差动式电磁线圈包括上线圈和下线圈,所述上线圈和下线圈均固定设置在所述电机定子中。

[0108] 来自差动式电磁线圈的信号分两路,一路直接传递到输出转换器模块的输入接口,另一路向前传递,通过数字化曲线簇跟踪模块、非线性数字化补偿模块、输出信号转换器模块最后进入输出电路模块中,对上、下电磁线圈产生的电流值进行调控。

[0109] 在此过程中,上、下电磁线圈的电流值分两路:一路反馈到输出信号转换器模块中,用于高速高灵敏保护,这种保护是纯硬件式保护,响应时间由输出信号转换器模块的转换时间来定,一般在2-3ns内,保护外部电路模块;另一路与材料参数一同输入到补偿参数确定模块用来为非线性补偿提供计算依据,补偿量将通过输出电流、材料参数、位置增量变化来综合计算得来。

[0110] 数字化非线性功放的补偿原理是根据铁芯材料磁滞特性来补偿线圈电流的增量,其本质是获得实时的磁导率。在以往的非线性功率放大器中,磁导率往往是固定不变的,本发明中的磁导率是变化的,而且需要进行补偿。

[0111] 数字化曲线簇跟踪式非线性功放的结构框图如图5所示,在实际工作时,上线圈与下线圈中通过的电流增量是不等的,电流的大小是根据铁芯工作点的移动来动态调整的,而铁芯工作点的移动是按磁芯材料的瞬时导磁率的变化而变化。

[0112] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以做出若干改进和变形,这些改进和变形也应视为本发明的保护范围。

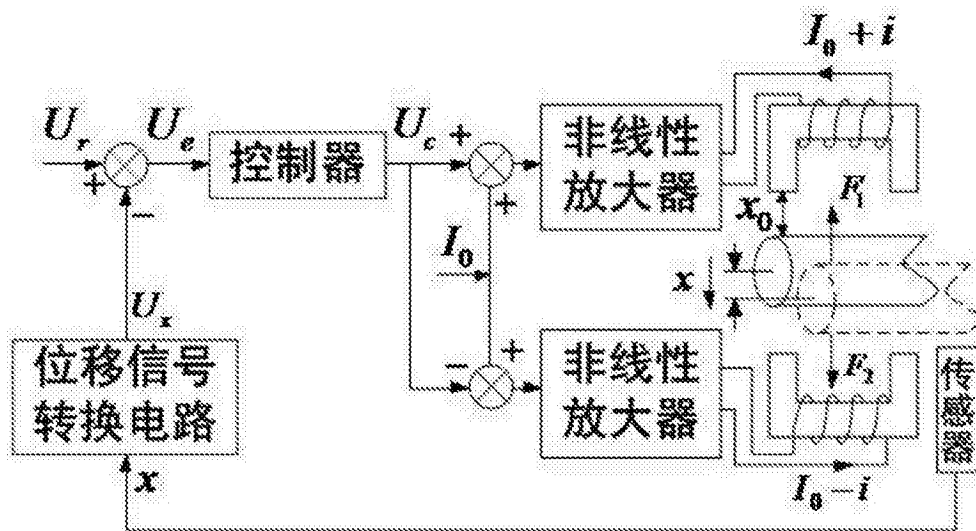


图1

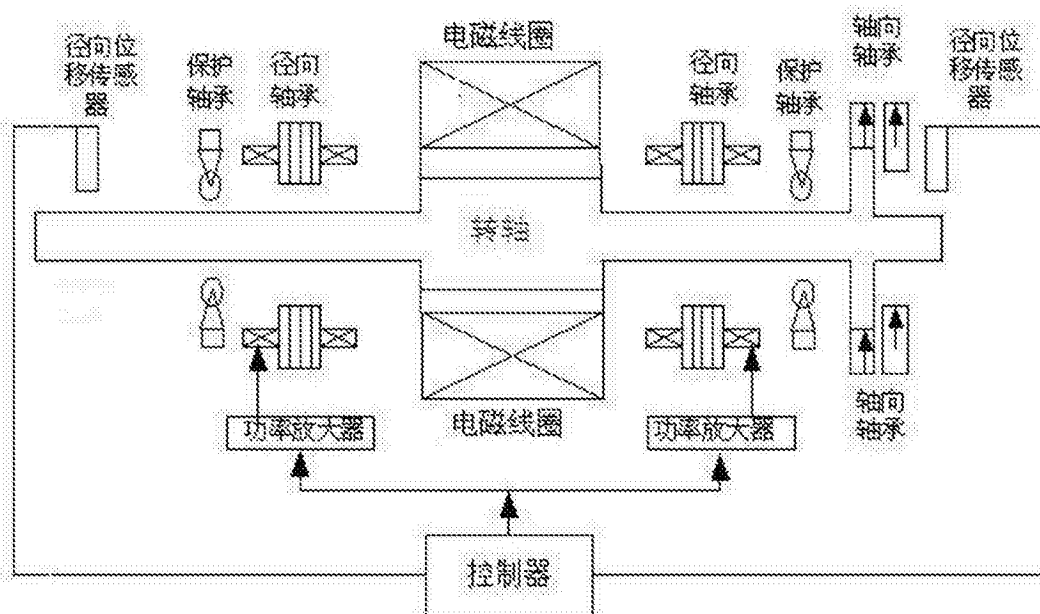


图2

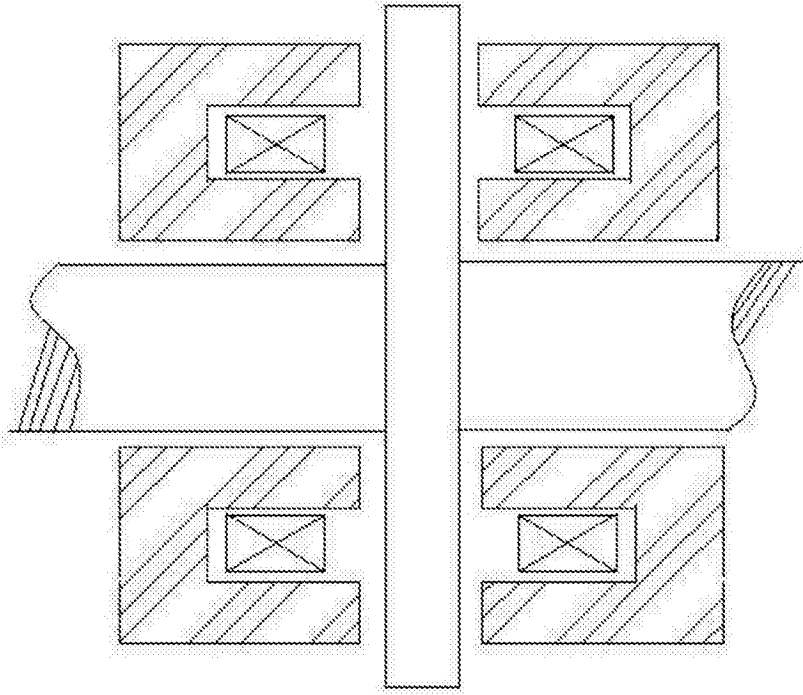


图3

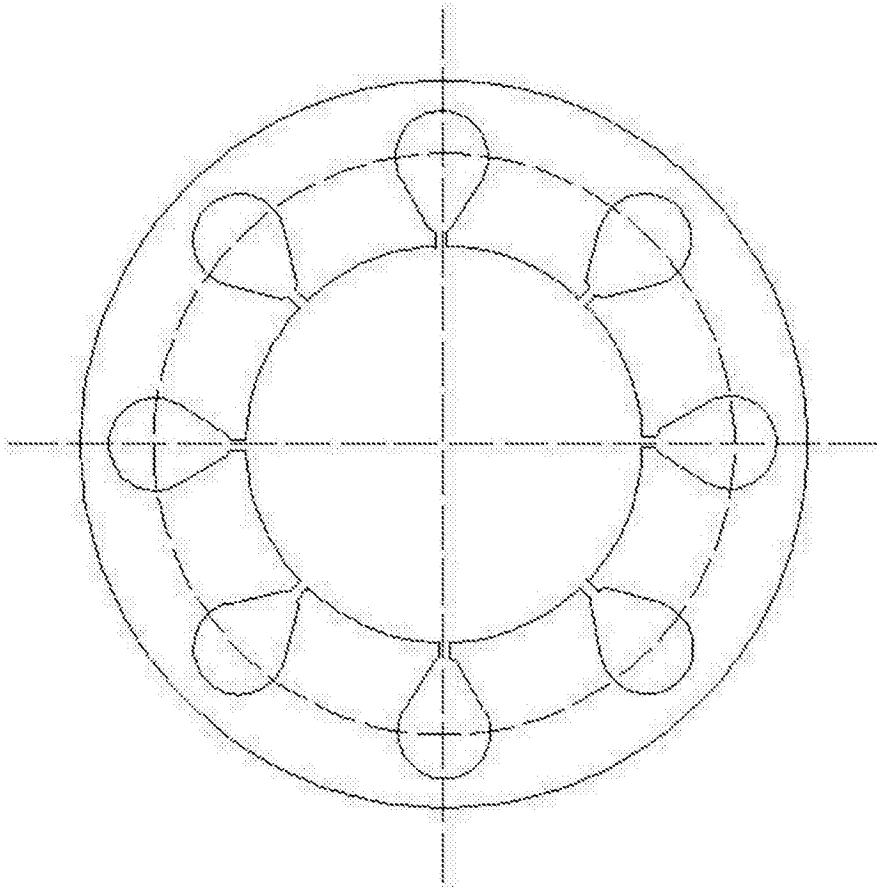


图4

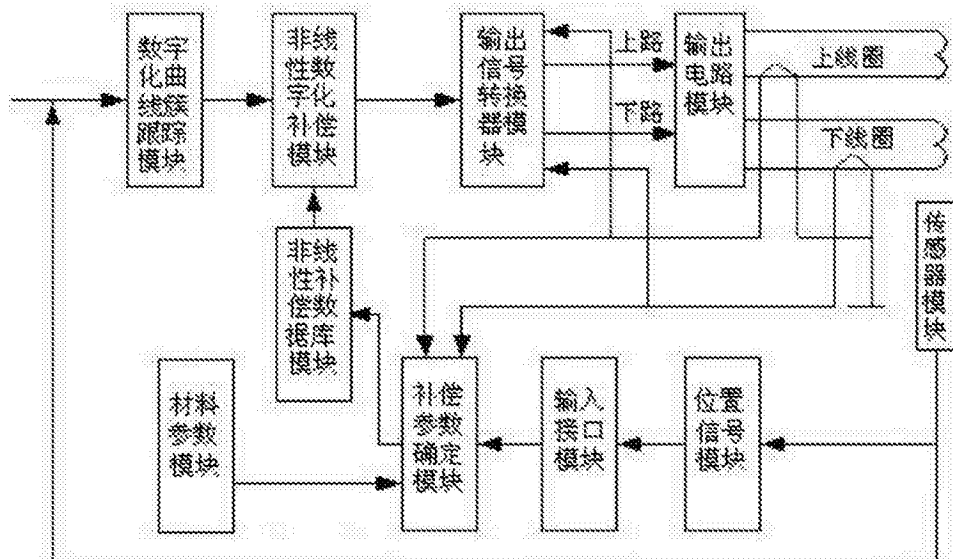


图5

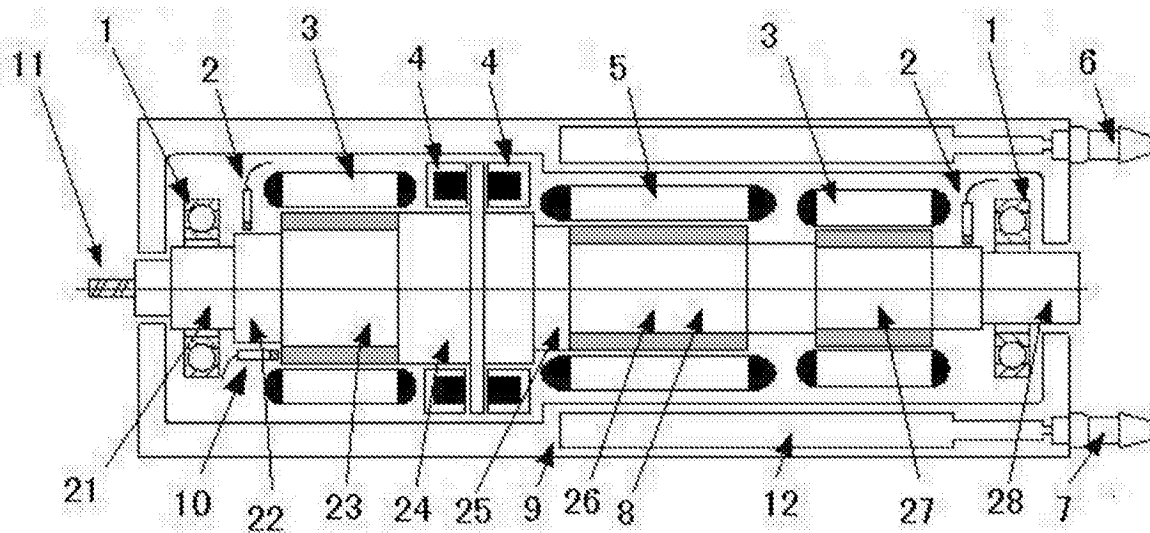


图6