



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103084327 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 05

(21) 申请号 201310030408. 9

CN 101599339 A, 2009. 12. 09,

(22) 申请日 2013. 01. 25

CN 102205308 A, 2011. 10. 05,

(73) 专利权人 西安交通大学

JP 特开 2007-49819 A, 2007. 02. 22,

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

JP 特开 2006-192317 A, 2006. 07. 27,

(72) 发明人 徐华 熊显智 王琳 付玉敏

审查员 王俊德

周夕维

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 蔡和平

(51) Int. Cl.

B06B 1/04 (2006. 01)

(56) 对比文件

JP 特开 2005-91079 A, 2005. 04. 07,

JP 特开 2002-79178 A, 2002. 03. 19,

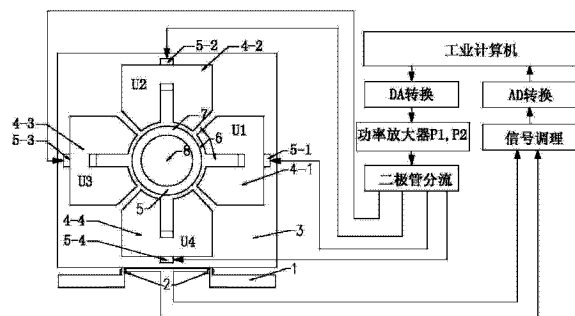
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器及控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种激振力方向可调的低功耗非接触激振器及其控制方法;在每个激振方向上各采用两个独立的 U 型电磁铁,这两个电磁铁对被激振物产生的电磁吸力方向相反;利用二极管的单向导电性将交流电分成两路直流电,用一个功率放大器分时驱动两个 U 型电磁铁的线圈;对线圈电流与电磁吸力进行非线性变换,再使用 PID 控制器控制输入到电磁线圈的电流进而控制电磁激振力,电流的正负决定着电磁激振力的正负,电流的大小决定着激振力的大小。该电磁激振器无需施加偏置磁场与偏置电流,功耗低,可以对被激振物施加正向或反向的激振力,并且激振力幅值大,波形失真度小,可以广泛用于正置式结构高速超高速滑动轴承转子系统油膜动特性系数测试。



1. 一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器,其特征在于:包括第一 U 型电磁铁 (U1)、第三 U 型电磁铁 (U3)、圆柱形衔铁 (7)、不锈钢支架 (3)、不锈钢底座 (1)、第一功率放大器 (P_1)、信号调理电路、AD 转换电路、DA 转换电路和工业计算机;独立的第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 对称设置于圆柱形衔铁 (7) 两侧,圆柱形衔铁 (7) 固定在高速主轴 (8) 上;第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 对高速主轴 (8) 产生的电磁吸力方向相反;第一 U 型电磁铁 (U1) 包括第一电磁铁芯 (4-1) 和缠绕在第一电磁铁芯 (4-1) 上的第一电磁线圈 (5-1);第三 U 型电磁铁 (U3) 包括第三电磁铁芯 (4-3) 和缠绕在第三电磁铁芯 (4-3) 上的第三电磁线圈 (5-3);第一电磁铁芯 (4-1) 和第三电磁铁芯 (4-3) 与圆柱形衔铁 (7) 对应的面为圆柱面,二者之间的气隙为 $400\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$;第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 固定在不锈钢支架 (3) 上;不锈钢支架 (3) 的底部固定在不锈钢底座 (1) 上,不锈钢底座 (1) 上水平对称设有两个半导体应变片 (2);半导体应变片 (2) 经调理电路和 AD 转换电路连接工业计算机;工业计算机通过 DA 转换电路连接第一功率放大器 (P_1);第一功率放大器 (P_1) 的输出连接有相互并联的第一二极管分路和第三二极管分路,第一二极管分路包括相互串联的第一二极管 (D_1) 和第一电磁线圈 (5-1),第三二极管分路包括相互串联的第三二极管 (D_3) 和第三电磁线圈 (5-3);其中第一二极管 (D_1) 和第三二极管 (D_3) 的方向相反。

2. 根据权利要求 1 所述的一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器,其特征在于:所述非接触激振器还包括第二 U 型电磁铁 (U2)、第四 U 型电磁铁 (U4) 和第二功率放大器 (P_2);独立的第二 U 型电磁铁 (U2) 和第四 U 型电磁铁 (U4) 对称设置于圆柱形衔铁 (7) 两侧;第二 U 型电磁铁 (U2) 和第四 U 型电磁铁 (U4) 对高速主轴 (8) 产生的电磁吸力方向相反;第二 U 型电磁铁 (U2) 包括第二电磁铁芯 (4-2) 和缠绕在第二电磁铁芯 (4-2) 上的第二电磁线圈 (5-2);第四 U 型电磁铁 (U4) 包括第四电磁铁芯 (4-4) 和缠绕在第四电磁铁芯 (4-4) 上的第四电磁线圈 (5-4);第二电磁铁芯 (4-2) 和第四电磁铁芯 (4-4) 与圆柱形衔铁 (7) 对应的面为圆柱面,二者之间的气隙为 $400\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$;第二 U 型电磁铁 (U2) 和第四 U 型电磁铁 (U4) 固定在不锈钢支架 (3) 上;工业计算机通过 DA 转换电路连接第二功率放大器 (P_2);第二功率放大器 (P_2) 的输出连接有相互并联的第二二极管分路和第四二极管分路,第二二极管分路包括相互串联的第二二极管 (D_2) 和第二电磁线圈 (5-2),第四二极管分路包括相互串联的第四二极管 (D_4) 和第四电磁线圈 (5-4);其中第二二极管 (D_2) 和第四二极管 (D_4) 的方向相反;第一 U 型电磁铁 (U_1) 和第三 U 型电磁铁 (U_3) 的中心线位于第一方向,第二 U 型电磁铁 (U_2) 和第四 U 型电磁铁 (U_4) 的中心线位于第二方向;第一方向与第二方向的夹角为 90° 。

3. 根据权利要求 2 所述的一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器,其特征在于:不锈钢支架 (3) 包括两块不锈钢板,第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 夹持于两块不锈钢板之间。

4. 根据权利要求 2 所述的一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器,其特征在于:第一电磁线圈 (5-1) 和第三电磁线圈 (5-3) 由若干股细小漆包线 (5-2-2) 并联绕制而成,所述细小漆包线 (5-2-2) 的直径小于 1mm 。

5. 根据权利要求 1 至 4 中任一项所述的一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器的控制方法,其特征在于:第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 通过一个数字 PID 控

制器控制 ;所述数字 PID 控制器既控制电磁力的正负又控制电磁力的大小 ;第一功率放大器 (P_1) 工作,当第一功率放大器 (P_1) 输出电流为正时,第一电磁线圈 (5 - 1) 通电,第一 U 型电磁铁 (U1) 工作 ;当第一功率放大器 (P_1) 输出电流为负时,第三电磁线圈 (5 - 3) 通电,第三 U 型电磁铁 (U3) 工作。

6. 根据权利要求 5 所述的控制方法,其特征在于 :数字 PID 控制器控制第一电磁线圈 (5 - 1) 或第三电磁线圈 (5 - 3) 的电流,进而获得期望的正弦激振力 ;数字 PID 控制器的输入为期望的电磁吸力的平方根,数字 PID 控制器的负反馈为半导体应变片 (2) 测量的电磁吸力的平方根,数字 PID 控制器输出的数字信号经过 DA 转换后为控制电压,控制电压经过第一功率放大器 (P_1) 放大输出电流到第一电磁线圈 (5 - 1) 或第三电磁线圈 (5 - 3)。

7. 根据权利要求 6 所述的控制方法,其特征在于 :若期望电磁力为正,期望电磁力的正平方根作为数字 PID 控制器的输入 ;若期望电磁力为负,期望电磁力的负平方根作为数字 PID 控制器的输入。

8. 根据权利要求 2 至 4 中任一项所述的一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器的控制方法,其特征在于 :第一 U 型电磁铁 (U1) 和第三 U 型电磁铁 (U3) 通过第一数字 PID 控制器控制 ;第二 U 型电磁铁 (U2) 和第四 U 型电磁铁 (U4) 通过第二数字 PID 控制器控制 ;第一数字 PID 控制器控制和第二数字 PID 控制器控制电磁力的正负又控制电磁力的大小 ;第一功率放大器 (P_1) 工作,当第一功率放大器 (P_1) 输出电流为正时,第一电磁线圈 (5 - 1) 通电,第一 U 型电磁铁 (U1) 工作 ;当第一功率放大器 (P_1) 输出电流为负时,第三电磁线圈 (5 - 3) 通电,第三 U 型电磁铁 (U3) 工作 ;第二功率放大器 (P_2) 工作,当第二功率放大器 (P_2) 输出电流为正时,第二电磁线圈 (5 - 2) 通电,第二 U 型电磁铁 (U2) 工作 ;当第二功率放大器 (P_2) 输出电流为负时,第四电磁线圈 (5 - 4) 通电,第四 U 型电磁铁 (U4) 工作。

9. 根据权利要求 8 所述的控制方法,其特征在于 :第一数字 PID 控制器控制第一电磁线圈 (5 - 1) 或第三电磁线圈 (5 - 3) 的电流 ;第二数字 PID 控制器控制第二电磁线圈 (5 - 2) 或第四电磁线圈 (5 - 4) 的电流 ;第一数字 PID 控制器和第二数字 PID 控制器的输入为期望的电磁吸力的平方根,负反馈为半导体应变片 (2) 测量的电磁吸力的平方根 ;第一数字 PID 控制器和第二数字 PID 控制器输出的数字信号经过 DA 转换后为控制电压,第一数字 PID 控制器的输出转换后的控制电压经过第一功率放大器 (P_1) 放大输出电流到第一电磁线圈 (5 - 1) 或第三电磁线圈 (5 - 3) ;第二数字 PID 控制器的输出转换后的控制电压经过第二功率放大器 (P_2) 放大输出电流到第二电磁线圈 (5 - 2) 或第四电磁线圈 (5 - 4)。

10. 根据权利要求 8 所述的控制方法,其特征在于 :一个时刻,第一方向或第二方向上的两个 U 型电磁铁只有一个会对被激振物产生及激振力 ;每个 U 型电磁铁仅有一个电磁线圈。

一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器及控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于激振器领域,具体为一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器及控制方法,适用于正置式结构高速超高速滑动轴承转子系统动特性系数测试。

背景技术

[0002] 人们在对滑动轴承的研究过程中发现,稳定静态工作的滑动轴承,如果受到动载荷作用时会表现出刚度和阻尼特性,这种特性会对整个轴承转子系统的临界转速,不平衡响应和稳定性有着重要影响,对轴承油膜动特性系数的测试一直是研究轴承转子系统一个必不可少的过程。最为常用的滑动轴承动态性能测试方法有:①脉冲激振(锤击)识别法;②不平衡质量法;③动态激振识别法。用力锤去敲击高速高精度旋转轴,力度难以掌握不容易操作,并且由于油膜力具有非线性,这种方法测试的动特性系数离散度较大。不平衡质量法测试动特性系数,每个转速至少需要在三种工况下测试,由于三种工况下位移值要相互运算,所以键相的准确度直接影响到动特性系数测试的结果,尤其是对相位敏感的油膜阻尼系数。动态激振识别法是非常受欢迎的方法。

[0003] 以往研究轴承转子系统时,常常将其设计成倒置式结构,因为这样可以方便地使用电动式激振器对悬置的实验轴承进行动态激振,测试其油膜动特性系数。但随着高速切削技术日益受到关注,对以电主轴驱动的高速滑动轴承转子系统的研究越来越热。高速轴承转子系统要求高的临界转速,结构布局要非常紧凑,往往就只能设计成正置式结构。对于正置式结构轴承转子系统,欲想要采用动态激振法测试轴承的油膜动特性系数,就只能使用非接触激振器(如DJ-20系列电磁激振器)对旋转主轴施加正弦激振力。

[0004] 如果非接触电磁激振器产生的激振力方向可调,一方面可以对主轴施加不同方向的激振力;另一方面是电磁激振力的动态范围就能增加一倍。

[0005] 市场上的主流非接触电磁激振器,若要实现对电磁激振力方向可调,需要在被激振目标(主轴)上安装永磁体,并调节电磁线圈上的电流方向实现。王亮,陈怀海,贺旭东提出一种改变非接触电磁激振器激振力方向的方法,具体为激振器使用两个永磁铁,被激振物置于两个永磁铁之间,利用传统的振动发生器改变两个永磁铁体到被激物到之间的距离,改变施加于被激振目标上的力的方向(永磁式非接触电磁激振器及其激振方法,专利号:2009100264102)。以上两种方法的缺点是永磁体加工性差,安装困难。楼向明等人利用电磁轴承作为激振器对转子进行激振(楼向明.运转状态下转子不平衡识别方法的研究,浙江大学博士学位论文,2001),他们要对激振器施加偏置磁场或偏置电流,激振器功耗大;他们对麦克斯韦电磁吸力公式采用泰勒展开进行局部线性化进而控制电磁吸力,使对大幅值动态激振力进行精确控制变得困难。

[0006] 因此研制一种低功耗,激振力方向可调,动态幅值大,波形失真度小的非接触电磁激振器,对于高速超高速滑动轴承转子系统的油膜动特性系数测试很有意义。

发明内容

[0007] 本发明的目的是解决现有的非接触激振器功耗大,产生的激振力方向不可调,激振力幅值小,波形失真度大的弊端;为高速超高速滑动轴承转子系统中油膜的动特性系数测试提供一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器及控制方法。

[0008] 为了达到以上目的,本发明是采取如下技术方案实现的:

[0009] 一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器,包括第一U型电磁铁、第三U型电磁铁、圆柱形衔铁、不锈钢支架、不锈钢底座、第一功率放大器、信号调理电路、AD转换电路、DA转换电路和工业计算机;独立的第一U型电磁铁和第三U型电磁铁对称设置于圆柱形衔铁两侧,圆柱形衔铁固定在高速主轴上;第一U型电磁铁和第三U型电磁铁对高速主轴产生的电磁吸力方向相反;第一U型电磁铁包括第一电磁铁芯和缠绕在第一电磁铁芯上的第一电磁线圈;第三U型电磁铁包括第三电磁铁芯和缠绕在第三电磁铁芯上的第三电磁线圈;第一电磁铁芯和第三电磁铁芯与圆柱形衔铁对应的面为圆柱面,二者之间的气隙为400um~500um;第一U型电磁铁和第三U型电磁铁固定在不锈钢支架上;不锈钢支架的底部固定在不锈钢底座上,不锈钢底座上水平对称设有两个半导体应变片;半导体应变片经调理电路和AD转换电路连接工业计算机;工业计算机通过DA转换电路连接第一功率放大器;第一功率放大器的输出连接有相互并联的第一二极管分路和第三二极管分路,第一二极管分路包括相互串联的第一二极管和第一电磁线圈,第三二极管分路包括相互串联的第三二极管和第三电磁线圈;其中第一二极管和第三二极管的方向相反。

[0010] 本发明进一步的改进在于:所述非接触激振器还包括第二U型电磁铁、第四U型电磁铁和第二功率放大器;独立的第二U型电磁铁和第四U型电磁铁对称设置于圆柱形衔铁两侧;第二U型电磁铁和第四U型电磁铁对高速主轴产生的电磁吸力方向相反;第二U型电磁铁包括第二电磁铁芯和缠绕在第二电磁铁芯上的第二电磁线圈;第四U型电磁铁包括第四电磁铁芯和缠绕在第四电磁铁芯上的第四电磁线圈;第二电磁铁芯和第四电磁铁芯与圆柱形衔铁对应的面为圆柱面,二者之间的气隙为400um~500um;第二U型电磁铁和第四U型电磁铁固定在不锈钢支架上;工业计算机通过DA转换电路连接第二功率放大器;第二功率放大器的输出连接有相互并联的第二二极管分路和第四二极管分路,第二二极管分路包括相互串联的第二二极管和第二电磁线圈,第四二极管分路包括相互串联的第四二极管和第四电磁线圈;其中第二二极管和第四二极管的方向相反;第一U型电磁铁和第三U型电磁铁的中心线位于第一方向,第二U型电磁铁和第四U型电磁铁的中心线位于第二方向;第一方向与第二方向的夹角为90°。

[0011] 本发明进一步的改进在于:不锈钢支架包括两块不锈钢板,第一U型电磁铁和第三U型电磁铁夹持于两块不锈钢板之间。

[0012] 本发明进一步的改进在于:第一电磁线圈和第三电磁线圈由若干股细小漆包线并联绕制而成,所述细小漆包线的直径小于1mm。

[0013] 一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器的控制方法:第一U型电磁铁和第三U型电磁铁通过一个数字PID控制器控制;所述数字PID控制器既控制电磁力的正负又控制电磁力的大小;第一功率放大器工作,当第一功率放大器输出电流为正时,第一电磁线圈通电,第一U型电磁铁工作;当第一功率放大器输出电流为负时,第三电磁线圈通电,第三电磁铁工作。

[0014] 本发明进一步的改进在于:数字PID控制器控制第一电磁线圈或第三电磁线圈的

电流,进而获得期望的正弦激振力;数字PID控制器的输入为期望的电磁吸力的平方根,数字PID控制器的负反馈为半导体应变片测量的电磁吸力的平方根,数字PID控制器输出的数字信号经过DA转换后为控制电压,控制电压经过第一功率放大器放大输出电流到第一电磁线圈或第三电磁线圈。

[0015] 本发明进一步的改进在于:若期望电磁力为正,期望电磁力的正平方根作为数字PID控制器的输入;若期望电磁力为负,期望电磁力的负平方根作为数字PID控制器的输入。

[0016] 一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器的控制方法:第一U型电磁铁和第三U型电磁铁通过第一数字PID控制器控制;第二U型电磁铁和第四U型电磁铁通过第二数字PID控制器控制;第一数字PID控制器控制和第二数字PID控制器控制控制电磁力的正负又控制电磁力的大小;第一功率放大器工作,当第一功率放大器输出电流为正时,第一电磁线圈通电,第一U型电磁铁工作;当第一功率放大器输出电流为负时,第三电磁线圈通电,第三电磁铁工作;第二功率放大器工作,当第二功率放大器输出电流为正时,第二电磁线圈通电,第二U型电磁铁工作;当第二功率放大器输出电流为负时,第四电磁线圈通电,第四电磁铁工作。

[0017] 本发明进一步的改进在于:第一数字PID控制器控制第一电磁线圈或第三电磁线圈的电流;第二数字PID控制器控制第二电磁线圈或第四电磁线圈的电流;第一数字PID控制器和第二数字PID控制器的输入为期望的电磁吸力的平方根,负反馈为半导体应变片测量的电磁吸力的平方根;第一数字PID控制器和第二数字PID控制器输出的数字信号经过DA转换后为控制电压,第一数字PID控制器的输出转换后的控制电压经过第一功率放大器放大输出电流到第一电磁线圈或第三电磁线圈;第二数字PID控制器的输出转换后的控制电压经过第二功率放大器放大输出电流到第二电磁线圈或第四电磁线圈。

[0018] 本发明进一步的改进在于:一个时刻,第一方向或第二方向上的两个U型电磁铁只有一个会对被激振物产生及激振力;每个U型电磁铁仅有一个电磁线圈。

[0019] 综上所述,该发明具有以下有益效果:

[0020] 相比于现有的非接触激振器,在每个激振方向上,本发明激振器可产生正向或反向的激振力,可产生幅值更大的动态电磁激振力。

[0021] 本发明用多股细小漆包线并联绕在电磁铁芯上,既可以通过大电流又可以减小由于“集肤效应”而造成通高频电流时漆包线电阻增大这一不利影响。

[0022] 利用二极管的单向导电性将每个功率放大器输出的交流电分成两路直流电,每个方向采用一个功率放大器就可分时驱动两个电磁铁;每个U型电磁铁仅有一个电磁线圈,不存在偏置磁场;输入每个U型电磁铁的电流可以为零,不存在电流偏置。既节约功耗,又节约成本,还方便控制。

[0023] 对电磁激振力采用PID反馈控制时,对电流与电磁吸力进行非线性变换,使PID控制的系统变为线性系统,可以实现对大幅值动态激振力的精确控制。

附图说明

[0024] 图1为本发明激振器的机械结构示意图。

[0025] 图2为电磁激振力方向示意图。

- [0026] 图 3 为本发明的电磁线圈绕线示意图。
- [0027] 图 4 为本发明的功率放大器与电磁线圈接线电路(二极管双管斩波电路)图。
- [0028] 图 5 为电磁激振力控制流程图。
- [0029] 图 6 为四个电磁铁做成整体式结构,当一个电磁线圈通电时的磁力线分布图(Ansys 仿真)。
- [0030] 图 7 为四个电磁铁相互独立,一个电磁铁线圈通电时的磁力线分布图(Ansys 仿真)。
- [0031] 图 8 为采用本发明的非接触电磁激振器测高速电主轴滑动轴承油膜动特性示意图。
- [0032] 图 1 至图 8 中的附图标记及符号的含义为:
- [0033] 1、不锈钢底座;2、半导体应变片;3、不锈钢支架;4-1、第一电磁铁芯;4-2、第二电磁铁芯;4-3、第三电磁铁芯;4-4、第四电磁铁芯;5-1、第一电磁线圈;5-2、第二电磁线圈;5-3、第三电磁线圈;5-4、第四电磁线圈;6、气隙;7、圆柱形衔铁;8、高速主轴;9、非接触电磁激振器;10、螺栓;11、主轴壳体;12、滑动轴承;13、电容位移传感器;U1、第一 U 型电磁铁;U2、第二 U 型电磁铁;U3、第三 U 型电磁铁;U4、第四 U 型电磁铁;D₁、第一二极管;D₂、第二二极管;D₃、第三二极管;D₄、第四二极管;P₁、第一功率放大器;P₂、第二功率放大器;
- [0034] I₁、I₂ 功率放大器输出电流(电流如图 4 所示方向为正,否则为负);F_x、水平方向期望电磁力;F_y、竖直方向期望电磁力;A_x、水平方向正弦电磁力的幅值;A_y、竖直方向正弦电磁力的幅值;f_x、水平方向正弦电磁力的频率;f_y、竖直方向正弦电磁力的频率;t、时间变量;F_{xm}、水平方向测量的电磁力;F_{ym}、竖直方向测量的电磁力。

具体实施方式

- [0035] 下面结合公式与附图,对本发明进一步做详细说明。
- [0036] 请参阅图 1 所示,本发明一种低功耗激振力方向可调的非接触激振器 9 的一个实施例为,在水平与竖直方向上各采用两个独立的 U 型电磁铁,同一方向的两个独立的 U 型电磁铁对被激振物产生的电磁吸力方向相反;四个 U 型电磁铁包括第一 U 型电磁铁 U1、第二 U 型电磁铁 U2、第三 U 型电磁铁 U3 和第四 U 型电磁铁 U4。四个 U 型电磁铁共用一个圆柱形衔铁 7;圆柱形衔铁 7 固定在高速主轴 8 上。第一 U 型电磁铁 U1 包括第一电磁铁芯 4-1 和缠绕在第一电磁铁芯 4-1 上的第一电磁线圈 5-1;第二 U 型电磁铁 U2 包括第二电磁铁芯 4-2 和缠绕在第二电磁铁芯 4-2 上的第二电磁线圈 5-2;第三 U 型电磁铁 U3 包括第三电磁铁芯 4-3 和缠绕在第三电磁铁芯 4-3 上的第三电磁线圈 5-3;第四 U 型电磁铁 U4 包括第四电磁铁芯 4-4 和缠绕在第四电磁铁芯 4-4 上的第四电磁线圈 5-4。四个电磁铁芯与圆柱形衔铁 7 对应的面为圆柱面,二者之间的气隙 6 为 400um ~ 500um;四个独立的 U 型电磁铁芯被固定在抗磁性材料不锈钢制成的不锈钢支架 3 上,各个 U 型电磁铁芯之间留有间隙。不锈钢支架 3 包括两块不锈钢板,两块不锈钢板将四个 U 型电磁铁夹于其间;不锈钢支架 3 的底部固定在不锈钢底座 1 上,不锈钢底座上水平对称设有两个半导体应变片 2。
- [0037] 非接触激振器 9 的电气部分包括四个电磁线圈(第一电磁线圈 5-1、第二电磁线圈 5-2、第三电磁线圈 5-3 和第四电磁线圈 5-4)、两个功率放大器(第一功率放大器 P1、第二功率放大器 P2)、用于测量电磁激振力的半导体应变片 2、信号调理电路、DA 转换电路、

AD 转换电路和用于数据采集并对电磁激振力进行控制的工业计算机。DA 转换电路的输入为工业计算机输出的数字信号，DA 转换电路的输出接第一功率放大器 P_1 和第二功率放大器 P_2 (P_1 、 P_2 输入电压，输出电流)。第一功率放大器 P_1 的输出连接有相互并联的第一二极管分路和第三二极管分路，第一二极管分路包括相互串联的第一二极管 D_1 和第一电磁线圈 5-1，第三二极管分路包括相互串联的第三二极管 D_3 和第三电磁线圈 5-3；其中第一二极管 D_1 和第三二极管 D_3 的方向相反。第二功率放大器 P_2 的输出连接有相互并联的第二二极管分路和第四二极管分路，第二二极管分路包括相互串联的第二二极管 D_2 和第二电磁线圈 5-2，第四二极管分路包括相互串联的第四二极管 D_4 和第四电磁线圈 5-4；其中第二二极管 D_2 和第四二极管 D_4 的方向相反。

[0038] 电磁线圈(第一电磁线圈 5-1、第二电磁线圈 5-2、第三电磁线圈 5-3 和第四电磁线圈 5-4)用多股细小漆包线并联替代粗漆包线绕制(如图 3)；利用二极管的单向导电性将交流电分成两路直流电，用两个功率放大器分时驱动四个电磁线圈(如图 4)。当需要产生水平激振力时，第一功率放大器 P_1 工作，当 I_1 为正时，第一电磁线圈 5-1 通电，第一 U 型电磁铁 U1 工作，水平方向电磁吸力为正 ($F_x > 0$)；第三电磁线圈 5-3 通电，第一 U 型电磁铁 U3 工作，水平方向电磁吸力为负 ($F_x < 0$)。竖直方向两个电磁铁工作过程与水平方向类似。

[0039] 本发明激振器采用数字 PID 控制器控制电磁线圈的电流，进而获得期望的正弦激振力(如图 5)。数字 PID 控制器的输入为期望的电磁吸力(水平方向期望电磁力 F_x 、竖直方向期望电磁力 F_y)的平方根，数字 PID 控制器的负反馈为用半导体应变片 2 测量的电磁吸力(水平方向测量的电磁力 F_{xm} 、竖直方向测量的电磁力 F_{ym})的平方根，数字 PID 控制器输出的数字信号 DA 转换后为控制电压，控制电压经过功率放大器放大输出电流到电磁线圈。

[0040] 当电磁铁芯与衔铁的磁阻远小于气隙磁阻时，电磁铁吸力为：

$$[0041] \quad F = \frac{\phi^2}{2K_f^2 \mu_0 S} = \frac{\mu_0 S (NI)^2}{2K_f^2 \sigma^2} \quad (1)$$

[0042] 式中： F 是电磁吸力，N； ϕ 为气隙磁通，Wb； K_f 为露磁系数，由磁路决定； μ_0 为空气磁导系数，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A·m； S 为气隙面积， m^2 ； σ 为气隙厚度，m； N 为电磁线圈匝数； I 为流过电磁线圈的电流；

[0043] 电磁铁的电感为

$$[0044] \quad L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (2)$$

[0045] 式中， L 为电感，H。

[0046] 电磁铁需要功率放大器供电，满足欧姆定律

$$[0047] \quad (j2\pi fL + R)I = U \quad (3)$$

[0048] 式中， j 为虚数单位； f 为电流频率，Hz； R 为线圈电阻， Ω 。

[0049] 当忽略电磁线圈电阻 R 时，由式(1)、(2)、(3)得

$$[0050] \quad fF = \frac{UI}{K_f^2 \pi \delta} \quad (4)$$

[0051] 由于磁场对任何导磁体只产生“吸力”，而不会产生“推力”，当要求水平方向与竖直方向都能产生均值为 0 的激振力时，总共就需要四个电磁铁。如果将这四个电磁铁做成

常见的电磁轴承的整体式结构(陈浩. 北京工业大学硕士学位论文, 2009), 当一个电磁线圈 5 通电时, 磁力线分布如图 6 所示, 基本上只有一个磁极产生有效的电磁吸力, 露磁非常严重。本发明采用四个独立的 U 型电磁铁(第一 U 型电磁铁 U1、第二 U 型电磁铁 U2、第三 U 型电磁铁 U3 和第四 U 型电磁铁 U4), 这四个独立的 U 型电磁铁的电磁铁芯被固定在抗磁性材料不锈钢制成的不锈钢支架 3 上, 各个 U 型电磁铁芯之间留有一定的间隙。如图 7 所示, 每个电磁铁产生的磁通几乎不泄露, 通电电磁铁的两个磁极都会产生有效的电磁吸力。因此, 在相同的功耗与结构尺寸下, 这种四个独立的 U 型铁结构比整体式结构, 有效电磁吸力增大一倍。

[0052] 由式(4)知, 电磁吸力与其频率的乘积与功率放大器的实际功耗成正比, 功率放大器有额定电压 U_{\max} 与额定电流 I_{\max} 。给电磁线圈通入高频电流时, 电磁铁的感抗就会很大, 往往当 $U=U_{\max}$ 时, $I \ll I_{\max}$, 不能充分发挥功率放大器的能力, 故要减小电感, 控制线圈匝数。但要产生一定的电磁力, 又要保证一定的安匝数。故高频电磁铁设计总的原则是线圈匝数尽量少, 通入线圈的电流尽可能的大。通入大电流, 需要较粗的漆包线, 粗漆包线在通入高频电流时, 由于“集肤效应”, 其电阻就会变大, 铜耗就会变大。本发明用多股细小漆包线 5-2-2 (直径小于 1mm) 并联绕在电磁铁芯上(如图 3), 既可以通过大电流, 又可以减小由于“集肤效应”而造成通高频电流时漆包线电阻增大这一不利影响。

[0053] 如果采用四个功率放大器分别控制四个电磁铁, 那么在任何时候, 都有两个功率放大器是不工作的, 而且大功率的放大器也非常昂贵, 因此使用比电磁铁少的功率放大器去驱动所有电磁铁会变得很有意义。功率放大器与电磁线圈采用如图 4 所示的接法。功率放大器 P_1 工作, 当 I_1 为正时, 第一电磁线圈 5-1 通电, 第一 U 型电磁铁 U1 工作, 水平方向电磁吸力为正 ($F_x > 0$); 第三电磁线圈 5-3 通电, 第三 U 型电磁铁 U3 工作, 水平方向电磁吸力为负 ($F_x < 0$)。竖直方向电磁铁工作过程与水平方向类似。

[0054] 一方面, 导磁材料的 B-H 曲线具有非线性, 另一方面, 被激振物(高速主轴 8)会发生振动(电主轴振动一般在 10 μ m 之内), 使电磁铁芯与圆柱形衔铁 7 之间的间隙会时时变化, 如果直接给电磁线圈通正弦交流电, 而不使用控制器对输出到电磁线圈的电流进行控制, 正弦激振力的失真度就会很大。故对流过电磁线圈的电流进行控制是必须的。最简单, 稳定易用的控制器是 PID 控制器, 但由式(1)知, 电磁力与电流是二次方的关系, 如果直接采用 PID 控制, 要产生大范围变化的动态力, 控制效果势必不佳。故本发明对这一非线性系统采取非线性变换, 将其变换成线性系统, 再进行 PID 控制。具体过程如图 5 所示, 数字 PID 控制器的输入为期望电磁吸力(水平方向期望电磁力 F_x 、竖直方向期望电磁力 F_y) 绝对值的平方根, 数字 PID 控制器的负反馈为用半导体应变片 2 测量的电磁吸力(水平方向测量的电磁力 F_{xm} 、竖直方向测量的电磁力 F_{ym}) 绝对值的平方根, 数字 PID 控制器输出的数字量经过 DA 转换后变为控制电压, 控制电压经过功率放大器放大输入电流到电磁线圈, 这样数字 PID 控制器控制的系统就变成了线性系统, 容易实现对大幅值正弦力的精确控制。

[0055] 每个方向上的两个电磁铁使用同一个功率放大器驱动, 一方面节约成本外, 另一方面, 方便对电磁力进行控制。激振器每个方向上有两个电磁铁, 但仅需一个 PID 控制器。结合图 4、图 5, 以产生水平方向电磁力为例具体说明: 若水平方向期望电磁力 F_x 为正, 期望电磁力绝对值的正平方根 $+\sqrt{|F_x|}$ 作为 PID 控制器的输入; 若水平方向期望电磁力 F_x 为负, 期

望电磁力绝对值的负平方根 $-\sqrt{|F_x|}$ 作为PID控制器的输入。PID输出有正有负,经过DA变换后的控制电压有正有负,功率放大器的输出电流有正有负。根据二极管双管斩波电路的作用,功率放大器输出电流的正负决定哪个电磁铁工作,电流的大小决定电磁力的大小。半导体应变片2测量的电磁吸力 F_{xm} 也有正有负,若 F_{xm} 为正, $+\sqrt{|F_{xm}|}$ 作为PID控制器负反馈,否则 $-\sqrt{|F_{xm}|}$ 作为PID控制器负反馈。

[0056] 图8为利用本发明的非接触电磁激振器测试支撑高速电主轴的滑动轴承油膜动特性系数的实例。除了使用半导体应变片2测量激振力大小外,根据测试轴承油膜动特性系数的要求,还需要四个高精度电容位移传感器13测量前后两个滑动轴承12处高速主轴8的振动位移;滑动轴承12支撑在主轴壳体11上。使用一个高性能的工业计算机同时采集振动位移信号与激振力信号,并对电磁激振力进行如图5所示的控制。做油膜动特性测试实验时,先用螺栓10把圆柱形衔铁7固定于高速主轴8上,调整激振器使U型电磁铁芯在轴向对准圆柱形衔铁7,在径向U型电磁铁芯与圆柱形衔铁7具有400~500um的间隙。然后对工业计算机,功率放大器,电磁线圈进行电气连接。对两个PID控制器的参数分别进行整定后,再给定每个方向上期望电磁力的幅值 A_x 、 A_y 及频率 f_x 、 f_y ,电磁激振器便可在水平与竖直方向产生对应的正弦激振力。控制幅值 A_x 、 A_y 及频率 f_x 、 f_y 的值,就可以对高速主轴8进行单频激振,或是复频激振,或者是施加一个静态的电磁力。

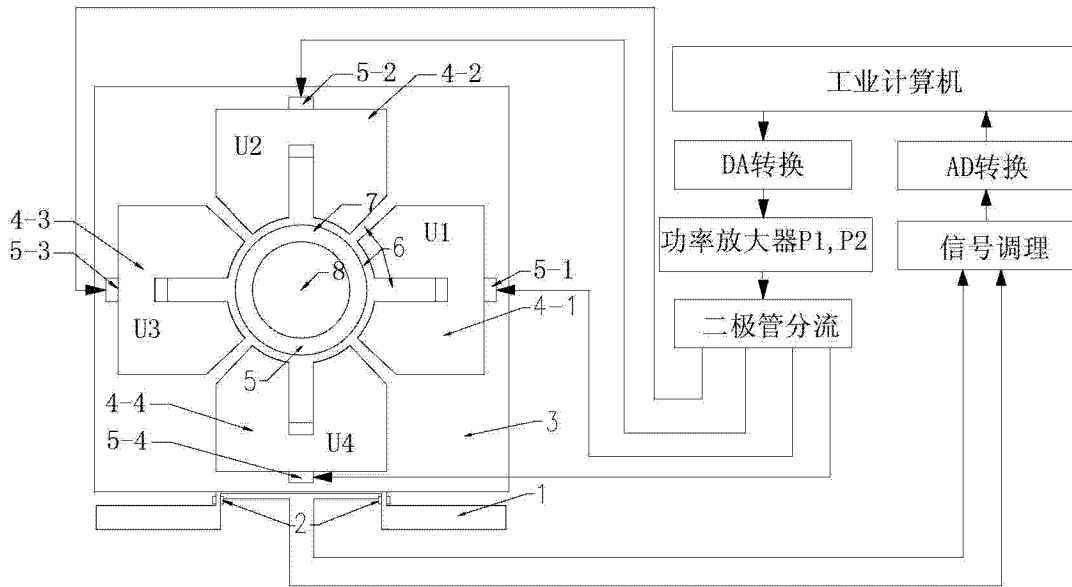


图 1

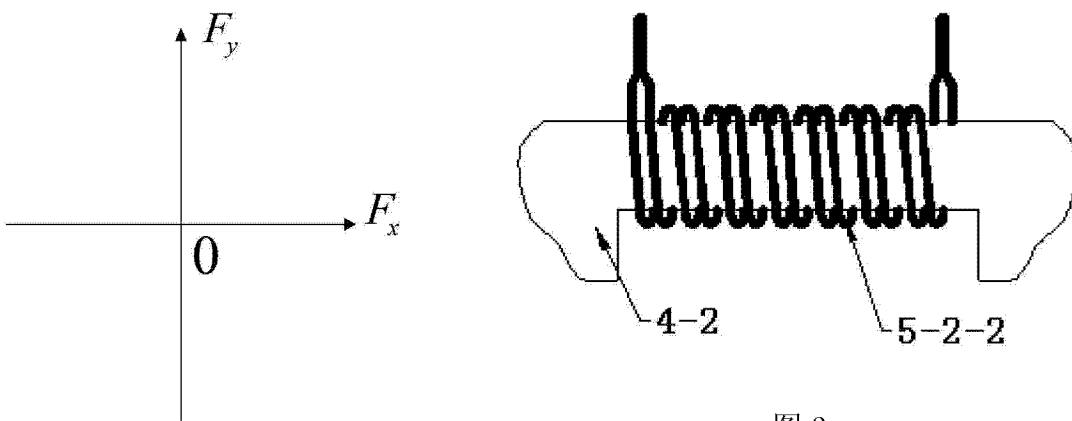


图 3

图 2

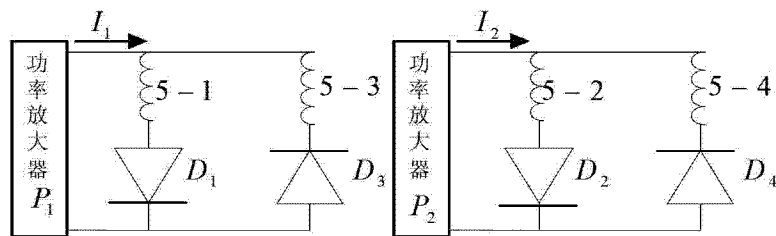


图 4

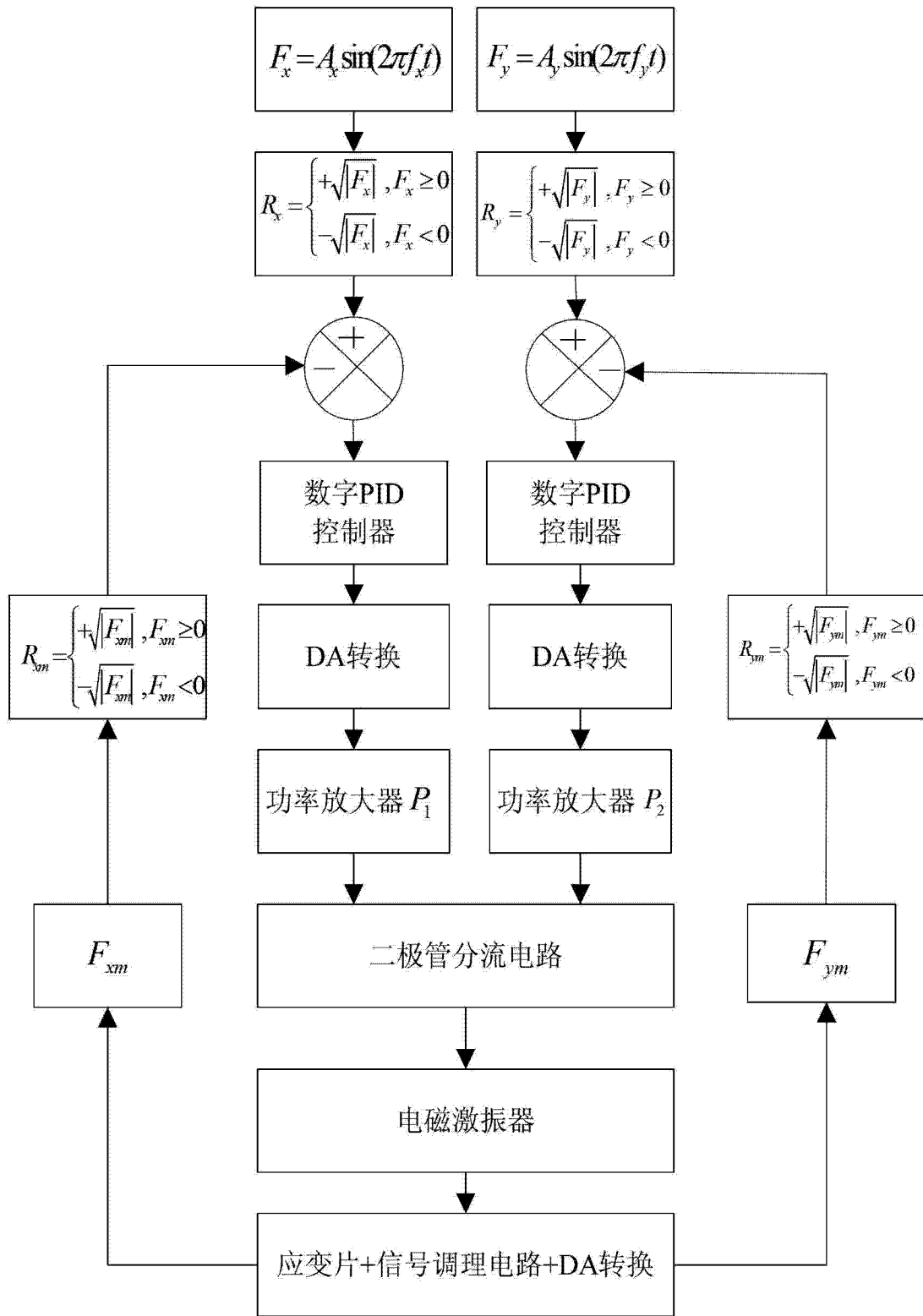


图 5

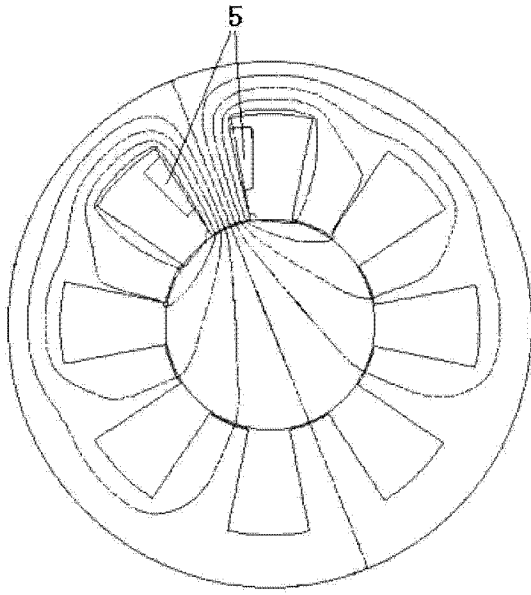


图 6

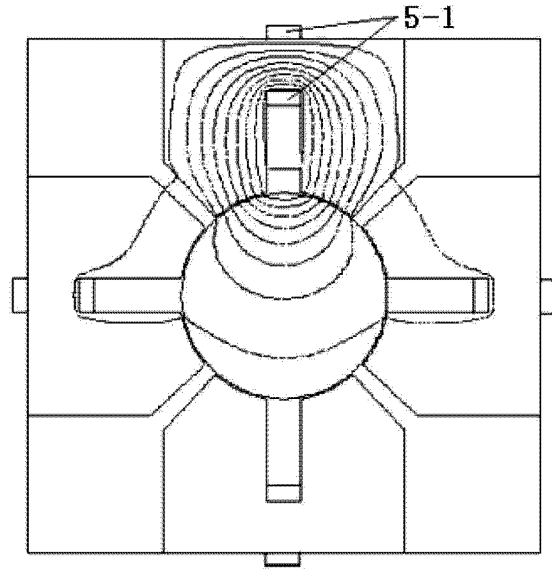


图 7

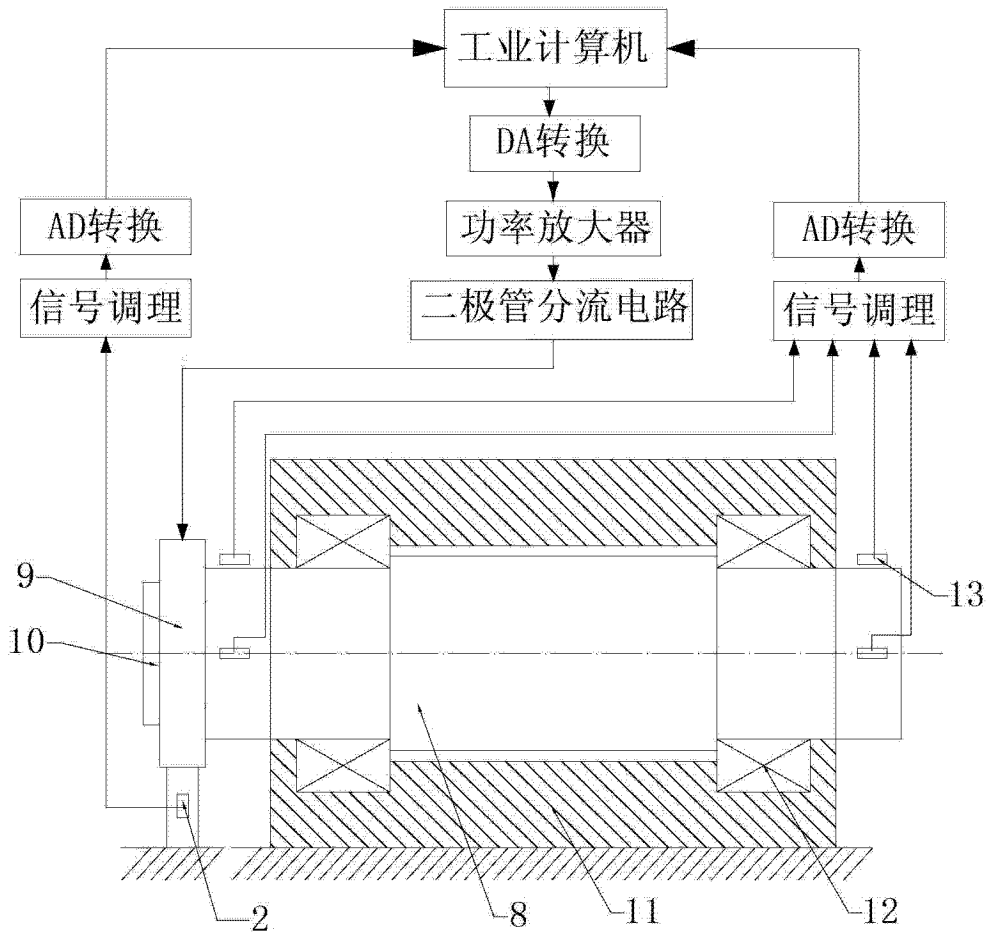


图 8