



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114273934 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 10

(21) 申请号 202111501737.8

(22) 申请日 2021.12.09

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114273934 A

(43) 申请公布日 2022.04.05

(73) 专利权人 南方科技大学
地址 518000 广东省深圳市南山区桃源街
道学苑大道1088号

(72) 发明人 张璧 饶志蒙 罗成伟 吴公平
龙卓 戴其城 成双银 周聪

(74) 专利代理机构 北京易捷胜知识产权代理有
限公司 11613

专利代理师 齐胜杰

(51) Int.Cl.

B23Q 1/70 (2006.01)

B23Q 5/10 (2006.01)

B23Q 11/00 (2006.01)

B23B 19/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104368829 A, 2015.02.25

SU 917930 A1, 1982.04.07

JP H06315242 A, 1994.11.08

US 2003197438 A1, 2003.10.23

DE 102016010734 A1, 2018.03.08

DE 29811571 U1, 1998.10.29

JP 2006316921 A, 2006.11.24

JP 2018019494 A, 2018.02.01

KR 20050033344 A, 2005.04.12

US 2002195894 A1, 2002.12.26

CN 202384967 U, 2012.08.15

CN 214380578 U, 2021.10.08

Kascak P. Bearingless five-axis rotor
levitation with two pole pair separated.
《2009 IEEE Industry Applications Society
Annual Meeting》. 2009, (续)

审查员 黄纯波

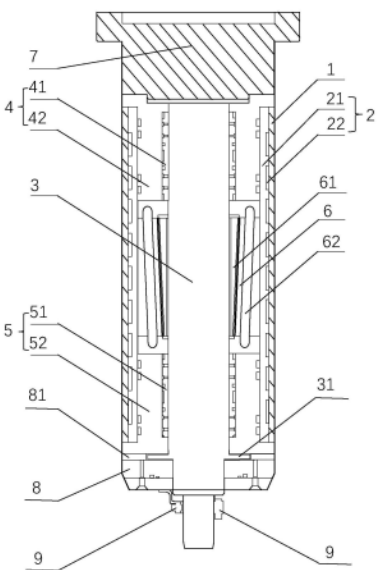
权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54) 发明名称

基于单楔形电机的空气静压电主轴及其控制方法

(57) 摘要

本申请属于机床技术领域,具体涉及一种基于单楔形电机的空气静压电主轴及其控制方法。其中的空气静压电主轴包括:机壳,设置在所述机壳内壁的冷却组件,设置在所述机壳内的主轴本体,套设于所述主轴本体上下两端的径向空气轴承组件和径-轴向复合空气轴承组件,设置于所述主轴本体中部且与所述主轴本体同轴的单楔形电机,所述主轴本体可在所述单楔形电机的驱动下转动,所述单楔形电机包括安装有楔形永磁体磁极的转子和定子铁心为楔形的定子。本申请的电主轴在动态调节电主轴输出功率的同时还能够随动控制轴向磁拉力,用于平衡电主轴轴向冲击载荷,从而有效提高了空气静压电主轴的轴向承载能力,并且具有较高的安全性。



[转续页]

[接上页]

(56) 对比文件

Gabriel Munteanu.Five-axis magnetic suspension with two conical air gap bearingless PM synchronous half-motors.《

International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion》.2012,

1. 一种空气静压电主轴的控制方法,其特征在于,应用于基于单楔形电机的空气静压电主轴的控制器中,所述单楔形电机为永磁同步电机且采用逆变器供电,所述空气静压电主轴包括:

机壳,

设置在所述机壳内壁的冷却组件,

设置在所述机壳内的主轴本体,

分别套设于所述主轴本体上下两端的径向空气轴承组件和径-轴向复合空气轴承组件,

设置于所述主轴本体中部且与所述主轴本体同轴的单楔形电机,所述主轴本体可在所述单楔形电机的驱动下转动,所述单楔形电机包括安装有楔形永磁体磁极的转子和定子铁心为楔形的定子;

该方法包括:

S10、通过轴向位移传感器实时采集电主轴的轴向位移信号,基于所述轴向位移信号得到轴向位移偏差量;

S20、基于当前的目标轴向磁拉力、目标转矩和通过位置传感器实时检测得到的转子位置角,通过查询预先建立的转矩-交直流二维电流表、轴向磁拉力-交直流二维电流表得到交轴电流给定值和直轴电流给定值;

S30、基于实时采集的交轴电流信号计算得到对外输出转矩,计算所述目标转矩和所述对外输出转矩的差值后通过比例积分算法得到交轴电流扰动量;计算预设的零轴向位移偏差量和所述轴向位移偏差量的差值后通过比例积分算法得到直轴电流扰动量;

S40、将所述交轴电流给定值与所述交轴电流扰动量的和作为交轴电流实际给定值,将所述直轴电流给定值与所述直轴电流扰动量的和作为直轴电流实际给定值,通过双闭环矢量控制法,得到所述逆变器的矢量控制信号;

S50、基于所述矢量控制信号控制所述逆变器输出至所述单楔形电机的三相电流。

2. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法,其特征在于,所述转矩-交直流二维电流表和所述轴向磁拉力-交直流二维电流表是通过建立所述单楔形电机的有限元模型仿真得到,或者通过以所述单楔形电机为实验对象,通过电机标定试验获取实验数据后计算得到。

3. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法,其特征在于,所述对外输出转矩的计算方法为:

$$T = \frac{3}{2} n_p \psi_f I_q$$

其中, n_p 为所述单楔形电机的极对数, ψ_f 为所述单楔形电机的转子磁链, I_q 为交轴电流。

4. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法,其特征在于,所述单楔形电机产生轴向磁拉力 F_a ,所述轴向磁拉力方向为由大楔形锥口面指向小楔形锥口面,所述轴向磁拉力的大小为:

$$F_a = \sum_{i=1}^n 1.23 * 106 D_{av} \tan \alpha L_{efi} (B_{\delta i} \beta)^2$$

其中, D_{av} 为所述单楔形电机转子平均直径, α 为楔形永磁体磁极相对于轴向方向的夹角, L_{efi} 为所述楔形永磁体磁极4轴向分成 n 等分之后的有效长度, $B_{\delta i}$ 为所述楔形永磁体磁极5轴向分成 n 等分之后的气隙磁密, β 为气隙波形系数。

5. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法, 其特征在于, 所述主轴本体由芯轴和止推盘组成, 所述芯轴采用钛合金材料制作, 且所述芯轴轴承位的表面通过渗碳以及气体多元共渗的方法进行硬化处理。

6. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法, 其特征在于, 所述定子的楔形定子铁心轴向长度大于所述转子的转子铁心轴向长度, 且二者差值取值范围为1-3mm。

7. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法, 其特征在于, 所述楔形定子铁心的内径与外径之比 ζ 沿着轴向方向线性变化, ζ 的取值范围为0.5-0.7。

8. 根据权利要求1所述的空气静压电主轴的控制方法, 其特征在于, 所述机壳的尾端固定安装有基座, 所述机壳的前端固定安装有密封端盖。

9. 根据权利要求8所述的空气静压电主轴的控制方法, 其特征在于, 在所述密封端盖处设置有用监测主轴轴向位移的电容式位移传感器。

基于单楔形电机的空气静压电主轴及其控制方法

技术领域

[0001] 本申请属于机床技术领域,具体涉及一种基于单楔形电机的空气静压电主轴及其控制方法。

背景技术

[0002] 工业机床的工作性能主要取决于电主轴、进给、控制系统等,其中电主轴是机床的核心部件,它的性能优劣决定了机床加工精度和生产效率。空气静压电主轴采用气浮支撑方式,具有摩擦小、轴承发热低,运动平稳、精度高、寿命长、振动小等诸多优点,广泛的应用在航空、航天、医疗、3C等领域中的超精密制造装备当中。但由于气浮轴承承载小、刚度较低,容易出现气锤振动、涡动等现象,从而导致空气静压电主轴存在抗干扰、抗冲击能力较差等不足;尤其是在平面磨床或者转孔的时候,由于一切不确定因素的存在导致电主轴出现轴向窜动,可能会导致止推轴承的动定子相互摩擦,甚至出现电主轴抱死及烧毁。

[0003] 因此,空气静压轴承的轴向承载力和刚度的提高得到重视。目前最直接提高气膜刚度的方法是提高外界供气气压,但此方法容易引起气泵泄漏,安全性大大降低。此外,还可通过其他方式间接提高气膜刚度,例如通过优化节流孔直径、节流孔数、气膜构型、气膜厚度等核心参数来优化气膜压力分布,但优化效果很有限。

发明内容

[0004] (一)要解决的技术问题

[0005] 鉴于现有技术的上述缺点、不足,本申请提供一种基于单楔形电机的空气静压电主轴及其控制方法。

[0006] (二)技术方案

[0007] 为达到上述目的,本申请采用如下技术方案:

[0008] 第一方面,本申请实施例提供一种基于单楔形电机的空气静压电主轴,包括:

[0009] 机壳,

[0010] 设置在所述机壳内壁的冷却组件,

[0011] 设置在所述机壳内的主轴本体,

[0012] 套设于所述主轴本体上下两端的径向空气轴承组件和径-轴向复合空气轴承组件,

[0013] 设置于所述主轴本体中部且与所述主轴本体同轴的单楔形电机,所述主轴本体可在所述单楔形电机的驱动下转动,所述单楔形电机包括安装有楔形永磁体磁极的转子和定子铁心为楔形的定子。

[0014] 可选地,所述主轴本体由芯轴和止推盘组成,所述芯轴采用钛合金材料制作,且所述芯轴轴承位的表面通过渗碳以及气体多元共渗的方法进行硬化处理。

[0015] 可选地,所述定子的楔形定子铁心轴向长度大于所述转子的转子铁心轴向长度,且二者差值取值范围为1-3mm。

[0016] 可选地,所述楔形定子铁心的内径与外径之比 ζ 沿着轴向方向线性变化, ζ 的取值范围为0.5-0.7。

[0017] 可选地,所述机壳的尾端固定安装有基座,所述机壳的前端固定安装有密封端盖。

[0018] 可选地,在所述密封端盖处设置用于监测主轴轴向位移的电容式位移传感器。

[0019] 第二方面,本申请实施例提供一种空气静压电主轴的控制方法,应用于如上第一方面任意一项所述的基于单楔形电机的空气静压电主轴的控制器中,所述单楔形电机为永磁同步电机且采用逆变器供电,该方法包括:

[0020] S10、通过轴向位移传感器实时采集电主轴的轴向位移信号,基于所述轴向位移信号得到轴向位移偏差量;

[0021] S20、基于当前的目标轴向磁拉力、目标转矩和通过位置传感器实时检测得到的转子位置角,通过查询预先建立的转矩-交直流二维电流表、轴向磁拉力-交直流二维电流表得到交轴电流给定值和直轴电流给定值;

[0022] S30、基于实时采集的交轴电流信号计算得到对外输出转矩,计算所述目标转矩和所述对外输出转矩的差值后通过比例积分算法得到交轴电流扰动量;计算预设的零轴向位移偏差量和所述轴向位移偏差量的差值后通过比例积分算法得到直轴电流扰动量;

[0023] S40、将所述交轴电流给定值与所述交轴电流扰动量的和作为交轴电流实际给定值,将所述直轴电流给定值与所述直轴电流扰动量的和作为直轴电流实际给定值,通过双闭环矢量控制法,得到所述逆变器的矢量控制信号;

[0024] S50、基于所述矢量控制信号控制所述逆变器输出至所述单楔形电机的三相电流。

[0025] 可选地,所述转矩-交直流二维电流表和所述轴向磁拉力-交直流二维电流表是通过建立所述单楔形电机的有限元模型仿真得到,或者通过以所述单楔形电机为实验对象,通过电机标定试验获取实验数据后计算得到。

[0026] 可选地,所述对外输出转矩的计算方法为:

$$[0027] \quad T = \frac{3}{2} n_p \psi_f I_q$$

[0028] 其中, n_p 为所述单楔形电机的极对数, ψ_f 为所述单楔形电机的转子磁链, I_q 为交轴电流。

[0029] 可选地,所述单楔形电机产生轴向磁拉力 F_a ,所述轴向磁拉力方向为由大楔形锥口面指向小楔形锥口面,所述轴向磁拉力的大小为:

$$[0030] \quad F_a = \sum_{i=1}^n 1.23 * 106 D_{av} \tan \alpha L_{efi} (B_{\delta i} \beta)^2$$

[0031] 其中, D_{av} 为所述单楔形电机转子平均直径, α 为楔形永磁体磁极相对于轴向方向的夹角, L_{efi} 为所述楔形永磁体磁极4轴向分成n等分之后的有效长度, $B_{\delta i}$ 为所述楔形永磁体磁极5轴向分成n等分之后的气隙磁密, β 气隙波形系数。

[0032] (三)有益效果

[0033] 本申请的有益效果是:本申请提出了一种基于单楔形电机的空气静压电主轴,包括:机壳,设置在所述机壳内壁的冷却组件,设置在所述机壳内的主轴本体,套设于所述主轴本体上下两端的径向空气轴承组件和径-轴向复合空气轴承组件,设置于所述主轴本体中部且与所述主轴本体同轴的单楔形电机,所述主轴本体可在所述单楔形电机的驱动下转

动,所述单楔形电机包括安装有楔形永磁体磁极的转子和定子铁心为楔形的定子。本申请的电主轴在动态调节电主轴输出功率的同时还能够随动控制轴向磁拉力,用于平衡电主轴轴向冲击载荷,从而有效提高了空气静压电主轴的轴向承载能力,并且具有较高的安全性。

[0034] 进一步地,通过采用钛合金作为芯轴的材料可以减少高速旋转离心力、提高主轴刚度,并且通过渗碳以及气体多元共渗的方法可实现对钛合金芯轴的轴承位的表面硬化处理,从而提高接触面的耐磨性能。

[0035] 第二方面,本申请还提出一种空气静压电主轴的控制方法,应用于上述的基于单楔形电机的空气静压电主轴的控制器中,通过比例积分控制,平衡电主轴轴向冲击载荷,从而有效提高了空气静压电主轴的轴向承载能力。

附图说明

[0036] 本申请借助于以下附图进行描述:

[0037] 图1为本申请一个实施例中的基于单楔形电机的空气静压电主轴结构示意图;

[0038] 图2为图1中的单楔形电机结构的局部放大图;

[0039] 图3为本申请一个实施例中单楔形电机结构示意图;

[0040] 图4为本申请一个实施例中与轴承接触的芯轴表面位置示意图;

[0041] 图5为本申请另一个实施例中的空气静压电主轴的控制方法流程示意图;

[0042] 图6为本申请另一个实施例中的电主轴轴向跳动位移示意图;

[0043] 图7为本申请另一个实施例中空气静压电主轴的控制系统原理框图。

[0044] 附图标记说明:

[0045] 1-机壳,2-冷却组件,21-冷却水道内胆,22-冷却水流道,3-主轴本体,31-止推盘,311-止推盘左端面,312-止推盘右端面,32-芯轴,4-径向空气轴承组件,41-径向空气轴承内胆,42-径向空气轴承外套,5-径-轴向复合空气轴承组件,51-径-轴向复合空气轴承内胆,52-径-轴向复合空气轴承外套,6-单楔形电机,61-转子,611-转子铁心,612-楔形磁钢,613-磁钢护套,62-定子,621-楔形定子铁心,622-定子绕组,63-轴向限位套筒,7-基座,8-密封端盖,81-垫片,9-位移传感器。

具体实施方式

[0046] 为了更好的解释本发明,以便于理解,下面结合附图,通过具体实施方式,对本发明作详细描述。可以理解的是,以下所描述的具体的实施例仅仅用于解释相关发明,而非对该发明的限定。另外还需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合;为了便于描述,附图中仅示出了与发明相关的部分。

[0047] 图1为本申请一个实施例中的基于单楔形电机的空气静压电主轴结构示意图。如图1所示,本实施例的基于单楔形电机的空气静压电主轴包括:

[0048] 机壳1,

[0049] 设置在机壳1内壁的冷却组件2,

[0050] 设置在机壳1内的主轴本体3,

[0051] 套设于主轴本体3上下两端的径向空气轴承组件4和径-轴向复合空气轴承组件5,

[0052] 设置于主轴本体3中部且与主轴本体3同轴的单楔形电机6,主轴本体3可在单楔形

电机6的驱动下转动,单楔形电机6包括安装有楔形永磁体磁极的转子61和定子铁心为楔形的定子62。

[0053] 本实施例的电主轴在动态调节电主轴输出功率的同时还能够随动控制轴向磁拉力,用于平衡电主轴轴向冲击载荷,从而有效提高了空气静压电主轴的轴向承载能力,并且具有较高的安全性。

[0054] 为了更好地理解本发明,以下对本实施例中电主轴的各组成部分进行展开说明。

[0055] 本实施例中,冷却组件2包括冷却水流道22、冷却水道内胆21,径向空气轴承组件4包括径向空气轴承内胆41,径向空气轴承外套42,径-轴向复合空气轴承组件5包括径-轴向复合空气轴承内胆51、径-轴向复合空气轴承外套52。

[0056] 本实施例中,单楔形电机6包括安装有楔形永磁体磁极的转子61和定子铁心为楔形的定子62以及轴向限位套筒63。图2为图1中的单楔形电机6结构的局部放大图,如图2所示,转子61包括转子铁心611、楔形磁钢612、磁钢护套613,定子62包括楔形定子铁心621,定子绕组622。

[0057] 三相或者多相的定子绕组622按照分数槽集中或者分布短距的方式镶嵌在带有开口槽的楔形定子铁心621内部,并通过灌胶的方式将整个三相或者多相的定子绕组622与楔形定子铁心621固定在一起,楔形定子铁心621和定子绕组622形成的整体通过过盈配合的方式安装在电主轴冷却水道内胆的内圈,并通过焊接的方式固定轴向的安装位置。转子铁心611通过过盈配合的方式安装在芯轴32上,同理,楔形磁钢612和磁钢护套613分别通过过盈配合的方式依次安装在转子铁心611和楔形磁钢612上,并通过轴向限位套筒63固定转子铁心611、楔形磁钢612和磁钢护套613在芯轴32轴向方向上的安装位置。

[0058] 通过控制由转子铁心611、楔形磁钢612、磁钢护套613、楔形定子铁心621、定子绕组622组成的楔形永磁电机,可以实现电主轴动态调节输出功率,同时还能够随动调整轴向磁拉力用于抵消电主轴轴向冲击载荷。

[0059] 图3为本申请一个实施例中单楔形电机6结构示意图,图3中, D_i 为楔形定子铁心内径, D_o 为外径, L_s 为楔形定子铁心轴向长度, L_r 为转子铁心轴向长度, α 为楔形磁钢相对于轴向方向的夹角, D_{av} 为单楔形电机转子平均直径。

[0060] 请参阅图4,本实施例中,定子62的楔形定子铁心轴向长度大于转子61的转子铁心轴向长度,且二者差值取值范围为1-3mm,从而可保证芯轴产生轴向窜动的时候楔形磁钢612的轴向两端端部气隙磁密 $B_{\delta i}$ 不会发生突变。

[0061] 举例来说,楔形定子铁心轴向长度 L_s 大于转子铁心轴向长度 L_r 一个长度 ΔL , ΔL 取值为2mm。 ΔL 的表达式为:

$$[0062] \quad \Delta L = L_s - L_r$$

[0063] 请参阅图4,本实施例中,楔形定子铁心621的内径与外径之比 ζ 沿着轴向方向线性变化, ζ 的取值范围为0.5-0.7,可使楔形永磁电机得到较好的输出性能。

[0064] 举例来说,楔形定子铁心621的外径 D_o 大小不会变化,而楔形定子铁心621的内径 D_i 大小线性变化且楔形定子铁心621内径 D_i 与外径 D_o 之比 ζ 沿着轴向方向线性变化, ζ 可以参考如下公式:

$$[0065] \quad \zeta = D_i / D_o$$

[0066] 其中: D_i 是楔形定子铁心不同轴向位置处的内径。

[0067] 为了使得楔形永磁电机得到较好的输出性能, ζ 的取值在0.6之间。

[0068] 本实施例中,主轴本体3由止推盘31和芯轴32组成,芯轴采用钛合金材料制作,且芯轴轴承位的表面通过渗碳以及气体多元共渗的方法进行硬化处理。图4为本申请一个实施例中与轴承接触的芯轴表面位置示意图,请参阅图4,虚线部分为芯轴,芯轴采用钛合金材料,粗实线标识的位置为与轴承接触的芯轴表面位置。

[0069] 采用钛合金作为芯轴的材料可极大地减少主轴部件高速旋转的离心力和惯性力,提高主轴单元的刚度和回转精度,通过渗碳以及气体多元共渗的方法对轴承位的表面硬化处理,可提高钛合金芯轴转子轴承位置的耐磨性能。

[0070] 本实施例中,机壳1的尾端固定安装有基座7,机壳1的前端固定安装有密封端盖8,密封端盖8与径-轴向复合空气轴承组件5间安装有垫片81。

[0071] 本实施例中,在密封端盖8处设置有用于监测主轴轴向位移的位移传感器9。具体地,位移传感器9可以是轴向电容式位移传感器,轴向电容式位移传感器可以通过固定支架安装在密封端盖8处。

[0072] 需要说明的是,上述的位移传感器9仅仅是示例性的说明,并不构成对位移传感器9的具体限定。

[0073] 本申请第二方面提供了一种空气静压电主轴的控制方法,应用于上述第一方面任意一项所述的基于单楔形电机的空气静压电主轴的控制器中,单楔形电机为永磁同步电机且采用逆变器供电。图5为本申请另一个实施例中的空气静压电主轴的控制方法流程示意图;如图5所示,该方法包括:

[0074] S10、通过轴向位移传感器实时采集电主轴的轴向位移信号,基于轴向位移信号得到轴向位移偏差量;

[0075] S20、基于当前的目标轴向磁拉力、目标转矩和通过位置传感器实时检测得到的转子位置角,通过查询预先建立的转矩-交直流二维电流表、轴向磁拉力-交直流二维电流表得到交轴电流给定值和直轴电流给定值;

[0076] S30、基于实时采集的交轴电流信号计算得到对外输出转矩,计算所述目标转矩和所述对外输出转矩的差值后通过比例积分算法得到交轴电流扰动量;计算预设的零轴向位移偏差量和所述轴向位移偏差量的差值后通过比例积分算法得到直轴电流扰动量;

[0077] S40、将交轴电流给定值与交轴电流扰动量的和作为交轴电流实际给定值,将直轴电流给定值与直轴电流扰动量的和作为直轴电流实际给定值,通过双闭环矢量控制法,得到逆变器的矢量控制信号;

[0078] S50、基于矢量控制信号控制逆变器输出至单楔形电机的三相电流。

[0079] 本实施例的空气静压电主轴的控制方法,借助于空气静压高速电主轴工作时产生的轴向磁拉力,抵消电主轴的芯轴承受的轴向载荷与轴向冲击载荷,在动态调节电主轴输出功率的同时还能随动调节由于电主轴运行工况突变所带来的轴向冲击载荷,在不改变空气静压轴承供气压力的情况,大大提高空气静压止推轴承的轴向承载力和轴向抗冲击能力。

[0080] 为了更好地理解本发明,以下对本实施例中各步骤进行展开说明。

[0081] 图6为本申请另一个实施例中的电主轴轴向跳动位移示意图,如图6所示, Z_1 是止推盘左端面311与径-轴向复合空气轴承的轴向间隙, Z_2 是止推盘右端面312与径-轴向复合空气轴承的轴向间隙。标定轴向电容式位移传感器的初始0位置,即止推盘31轴向中心线的

位置,此时 $Z_1=Z_2=0$ 。如果电主轴的运行过程中发生轴向跳动,则通过标定好的轴向电容式位移传感器测量得到轴向跳动位移 ΔZ , ΔZ 计算公式如下。

$$[0082] \quad \Delta Z = Z_1 - Z_2$$

[0083] 本实施例S10中,针对轴向跳动位移,通过轴向电容位移传感器采集电主轴的轴向位移信号。

[0084] 本实施例S20中,转矩-交直流二维电流表和所述轴向磁拉力-交直流二维电流表是通过建立单楔形电机的有限元模型仿真得到,或者通过以单楔形电机为实验对象,通过电机标定试验获取实验数据后计算得到。

[0085] 本实施例S30中,当在三相或者多相定子绕组中通入三相或多相电流激励时,单楔形永磁电机对外输出转矩 T ,同时还会产生一个轴向磁拉力 F_a 。对外输出转矩 T 的计算方法为:

$$[0086] \quad T = \frac{3}{2} n_p \psi_f I_q$$

[0087] 其中, n_p 为单楔形电机的极对数, ψ_f 为单楔形电机的转子磁链, I_q 为交轴电流。

[0088] 单楔形电机产生轴向磁拉力 F_a ,轴向磁拉力方向为由大楔形锥口面指向小楔形锥口面,轴向磁拉力 F_a 的大小为:

$$[0089] \quad F_a = \sum_{i=1}^n 1.23 * 106 D_{av} \tan \alpha L_{efi} (B_{\delta i} \beta)^2$$

[0090] 其中, D_{av} 为单楔形电机转子平均直径, α 为楔形磁钢相对于轴向方向的夹角, L_{efi} 为楔形磁钢轴向分成 n 等分之后的有效长度, $B_{\delta i}$ 为楔形永磁体磁极5轴向分成 n 等分之后的气隙磁密, β 气隙波形系数, β 取值范围为1.1-1.3。

[0091] 本实施例S40中,将交轴电流给定值与交轴电流扰动量的和作为交轴电流实际给定值,将直轴电流给定值与直轴电流扰动量的和作为直轴电流实际给定值,通过电流环与转矩环双闭环控制,输出SVPWM位置控制矢量。

[0092] 以下结合图7对本实施例的方法做进一步的说明。

[0093] 图7为本申请另一个实施例中空气静压电主轴的控制系统原理框图,如图7所示,通过轴向电容位移传感器获取电主轴轴向位移偏差量 ΔZ ;根据楔形永磁电机有限元分析结果或者电机标定试验结果构建转矩 T 与交轴(q 轴)电流 I_q 和直轴(d 轴)电流 I_d 之间的二维数据表;根据楔形永磁电机有限元分析结果或者电机效率标定试验结果构建向磁拉力 F_a 与 d - q 轴电流 I_d 和 I_q 之间的二维数据表。图7中的三维图形是采用Matlab软件分别基于输出扭矩与 I_d 、 I_q 数组表、轴向磁拉力与 I_d 、 I_q 数组表在相应坐标系下生成的图形。电主轴正常运行时,通过所需求的 F_e^* 、 T_e^* 与位置传感器得到的位置角 θ_e 这三个参数离线查表分别得到 d 轴和 q 轴电流给定值 I_{dT} 、 I_{qT} ;基于实时采集的交轴电流信号计算得到对外输出转矩,计算目标转矩和对外输出转矩的差值后通过转矩PI控制器得到 q 轴电流扰动量 ΔI_q^* ;计算预设的零轴向位移偏差量和轴向位移偏差量的差值后通过轴向磁拉力PI控制器得到 d 轴电流扰动量 ΔI_d^* ; I_{qT} 与 q 轴电流扰动量 ΔI_q^* 的和作为总的 q 轴电流给定值 I_q^* ($I_q^* = I_{qT} + \Delta I_q^*$), I_{dT} 与 d 轴电流扰动量 ΔI_d^* 的和作为总的 d 轴电流给定值 I_d^* ($I_d^* = I_{dT} + \Delta I_d^*$), d 轴和 q 轴电流经

双闭环和空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation,SVPWM)后输出逆变器控制信号,最终实现动态调节电主轴的输出扭矩与轴向磁拉力。本实施例采用电流环与扭矩环双闭环控制,由于双闭环控制属于现有技术,因此不再对图中双闭环控制部分展开说明。

[0094] 应当注意的是,在权利要求中,不应将位于括号之间的任何附图标记理解成对权利要求的限制。词语“包含”不排除存在未列在权利要求中的部件或步骤。位于部件之前的词语“一”或“一个”不排除存在多个这样的部件。本发明可以借助于包括有若干不同部件的硬件以及借助于适当编程的计算机来实现。词语第一、第二、第三等的使用,仅是为了表述方便,而不表示任何顺序。可将这些词语理解为部件名称的一部分。

[0095] 此外,需要说明的是,在本说明书的描述中,术语“一个实施例”、“一些实施例”、“实施例”、“示例”、“具体示例”或“一些示例”等的描述,是指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0096] 尽管已描述了本发明的优选实施例,但本领域的技术人员在得知了基本创造性概念后,则可对这些实施例作出另外的变更和修改。所以,权利要求应该解释为包括优选实施例以及落入本发明范围的所有变更和修改。

[0097] 显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种修改和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也应该包含这些修改和变型在内。

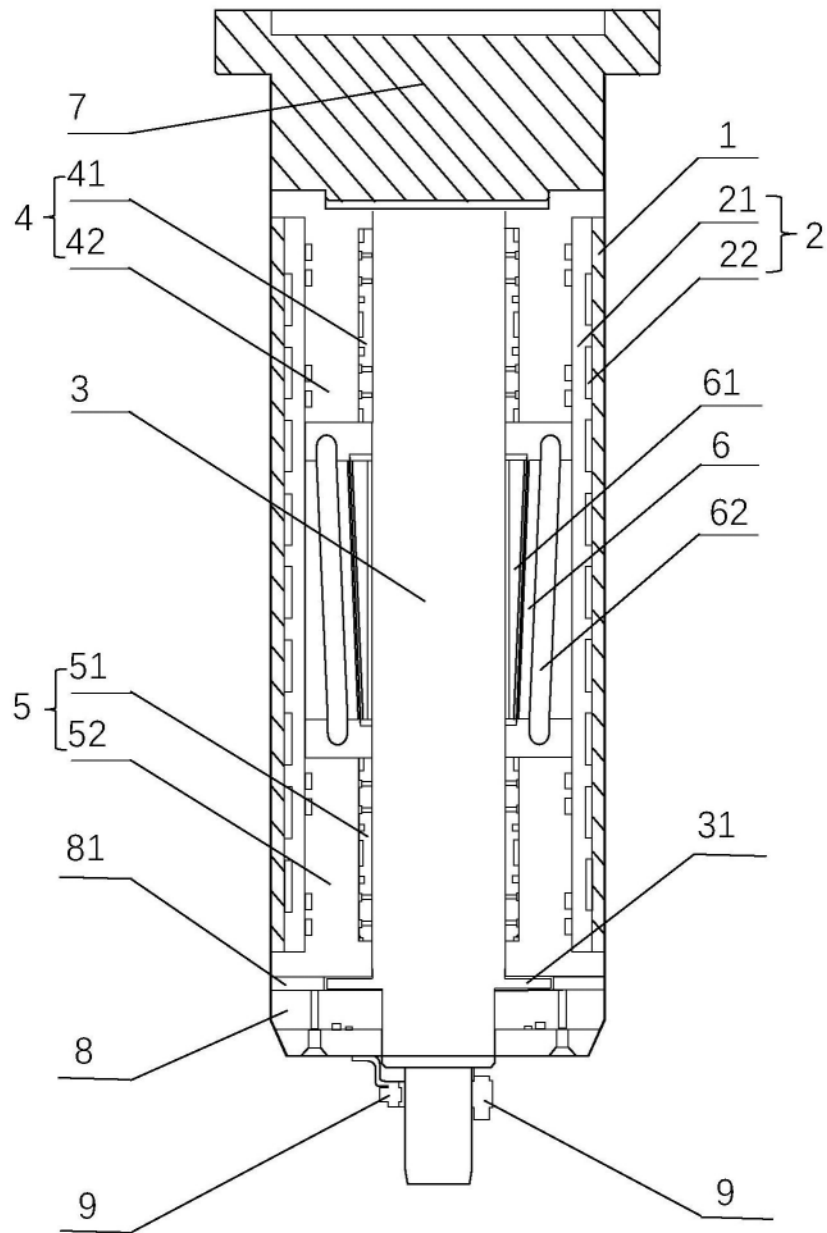


图1

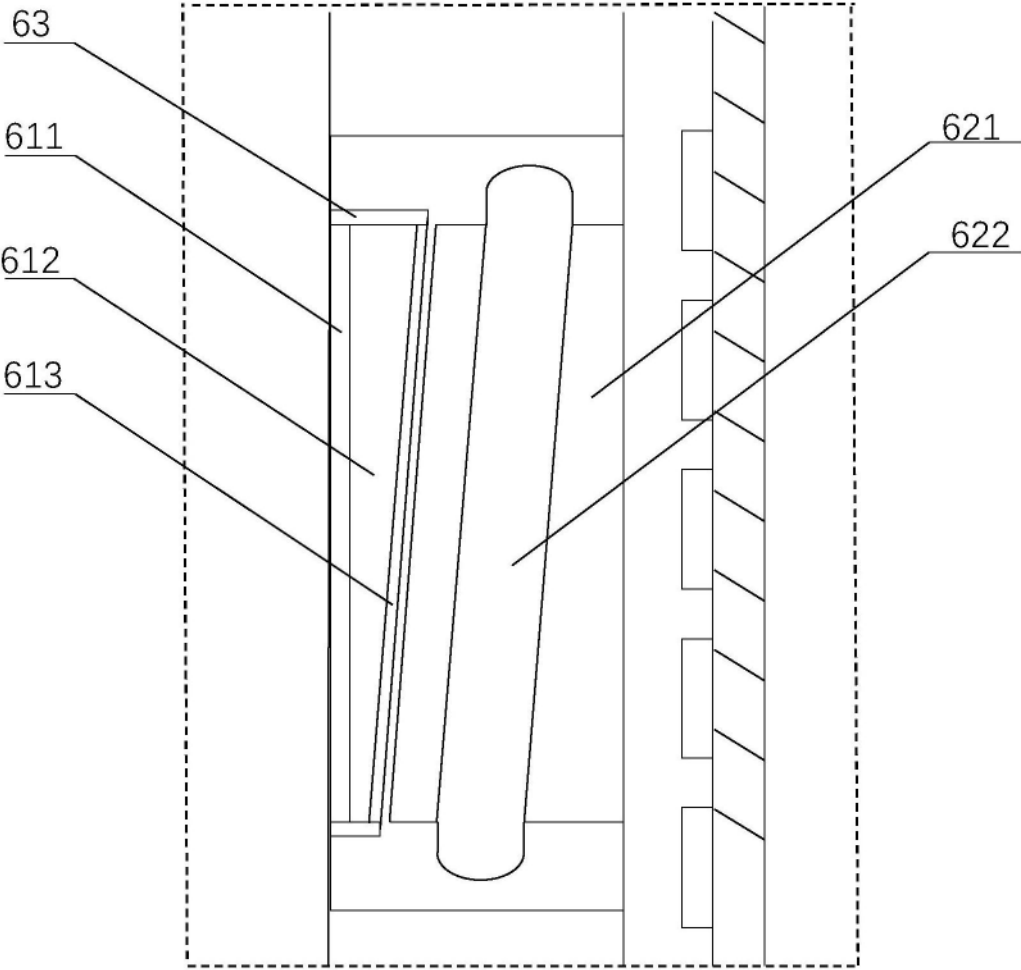


图2

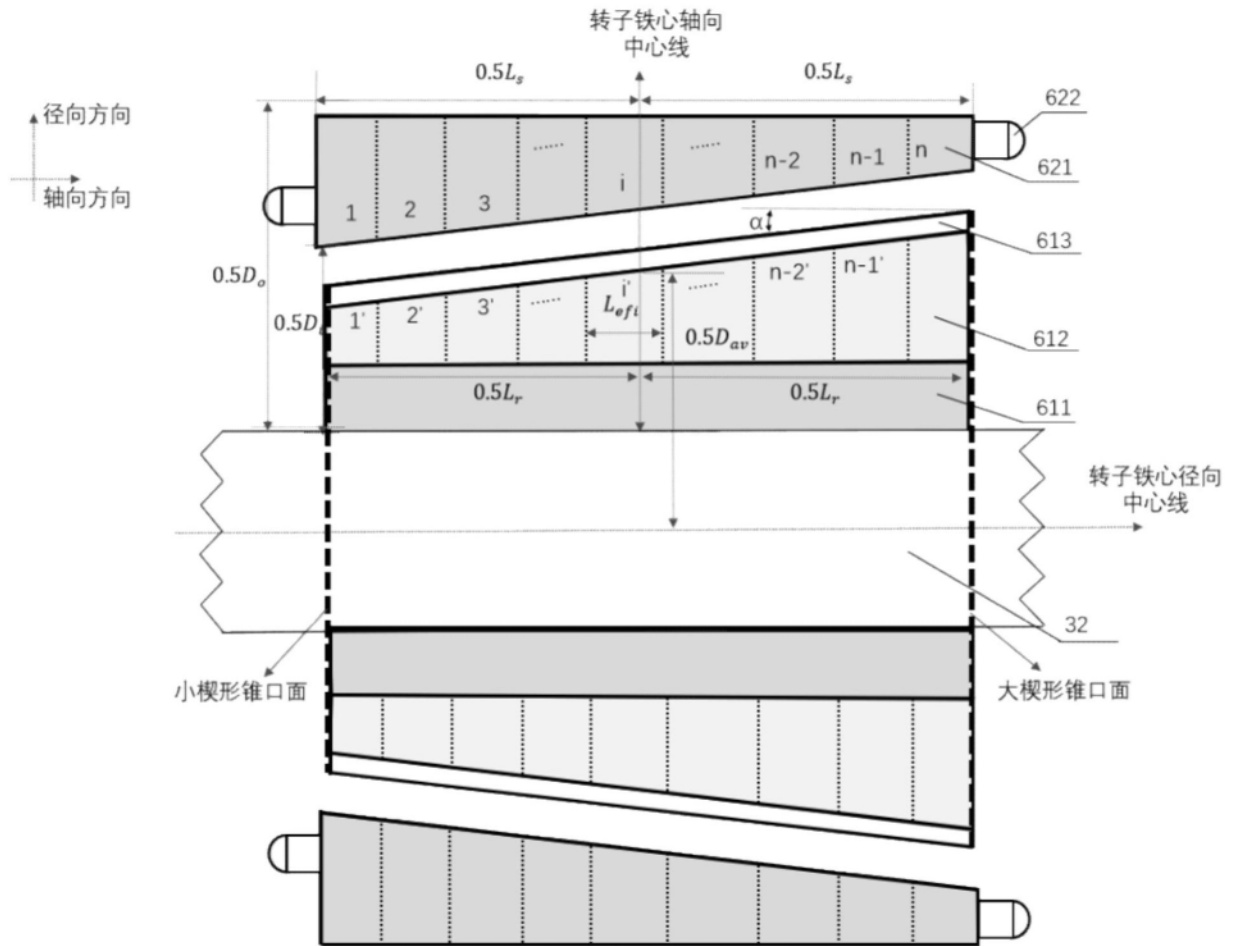


图3

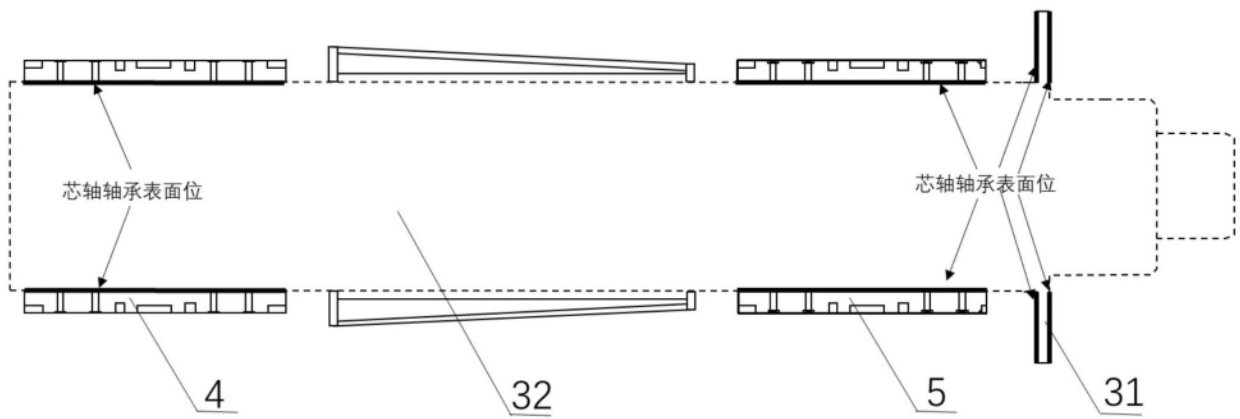


图4

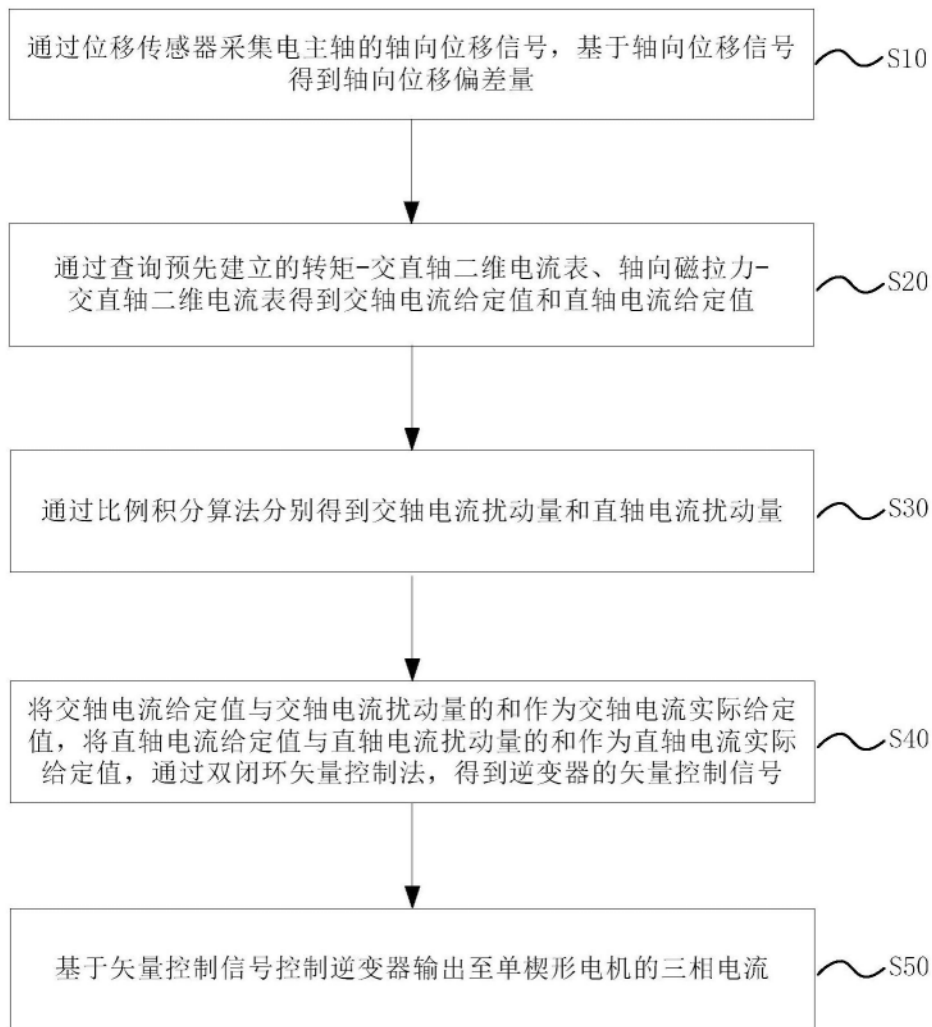


图5

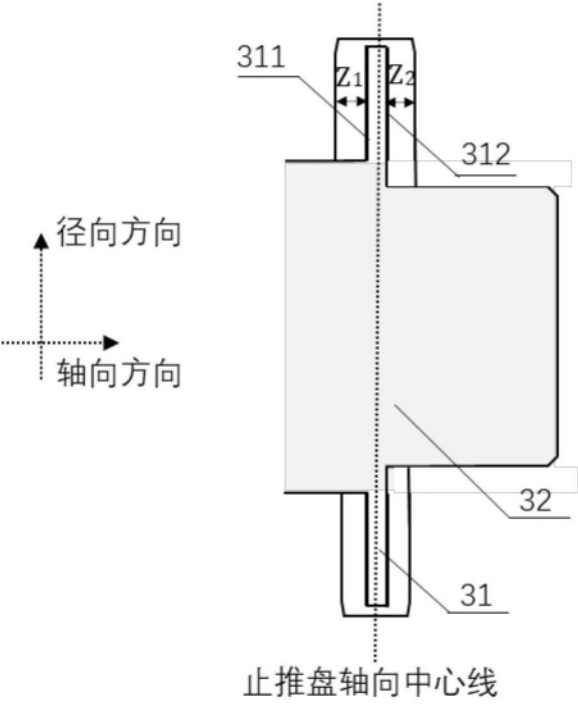


图6

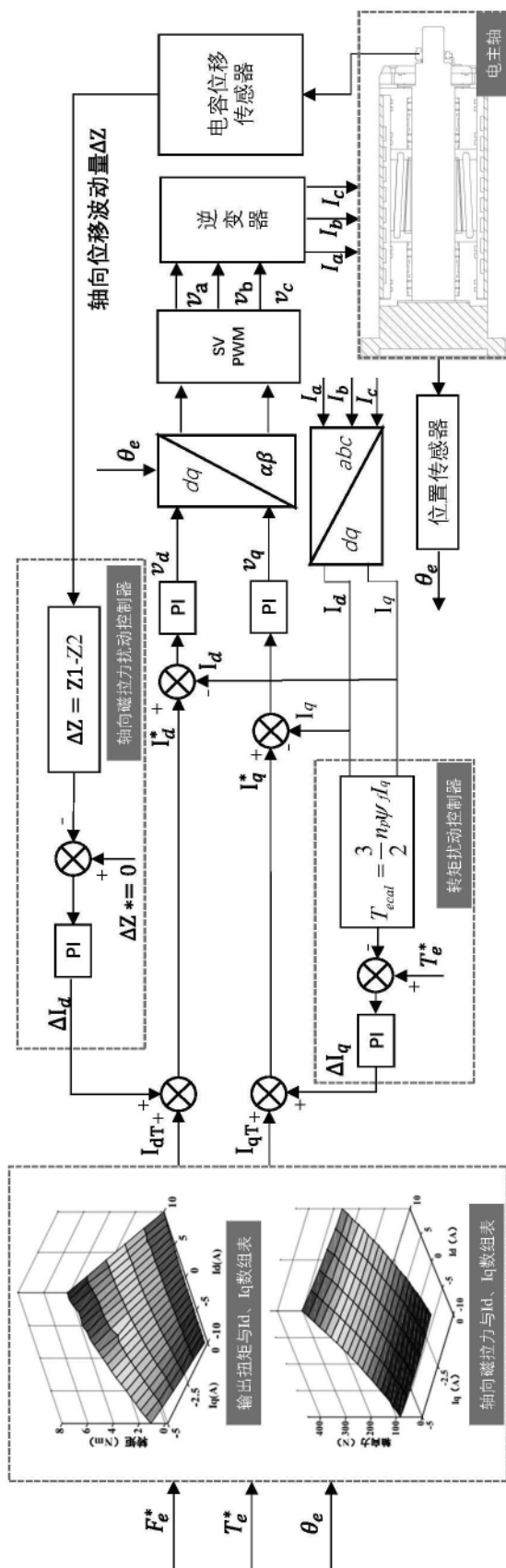


图7