

磁悬浮轴承在高速旋转机械上的应用 及一种混合径向磁悬浮轴承的设计

陈立志

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 着重阐述高速轴承家族的一颗新星—磁悬浮轴承。第一部分讲述磁悬浮轴承的工作原理及其分类,磁悬浮轴承的特点及国内外对这项技术的研究与应用现状,并预测它的发展前景;第二部分结合具体生产实践,提出一种混合径向磁悬浮轴承的设计,对径向被动磁轴承部分进行了定性分析,对其工作稳定性和可靠性进行了理论论证,详细讨论了各种因素对其径向稳定性,轴向稳定性和横轴稳定性的影响,提出了消除这些影响的方法与措施,通过计算机数值分析掌握了磁环几何参数对磁轴承径向刚度的影响,并对磁轴承的径向刚度进行校核,对轴向主动磁轴承部分给出一种完全新型结构和控制方法,具有结构紧凑、控制电路简单、方便实用的特点。本文为混合磁悬浮轴承的设计提供了一定的理论基础,按此设计原理和计算公式,可设计出多种负载能力的径向混合磁悬浮轴承。

关键词: 磁悬浮轴承; 主动; 被动; 混合; 刚度

1 磁悬浮轴承在高速旋转机械上的应用

磁悬浮轴承就是利用电磁力使轴悬浮的滑动轴承,磁悬浮轴承分为主动(active)被动(passive)及混合(mixing)三类,主动磁轴承是指完全用电流产生的磁力作为悬浮力和控制力的磁悬浮轴承,被动磁悬浮轴承是指只用永磁体产生悬浮力,而没有电流产生磁力,为了稳定只好保留一部分固体接触,混合磁悬浮轴承不仅用永磁体产生悬浮力,而且用电流产生的磁力作为控制力使之稳定。

1.1 磁悬浮轴承的工作原理

磁力轴承主要由两部分组成:轴承本身及其电气控制系统,磁力轴承由定子与转子组成,图1所示为向心磁力轴承原理图,定子上安装电磁铁,转轴支承轴颈处装有电磁环。定子电磁铁产生的磁场使转子被支承在要求的平衡位置上,即转

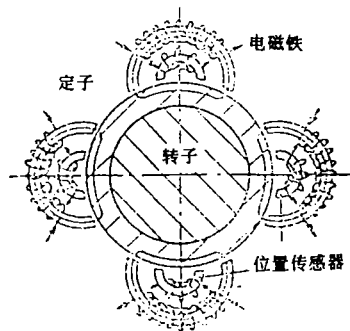


图1 磁力轴承原理图

系统,磁力轴承由定子与转子组成,图1所示为向心磁力轴承原理图,定子上安装电磁铁,转轴支承轴颈处装有电磁环。定子电磁铁产生的磁场使转子被支承在要求的平衡位置上,即转子由于电磁力的平衡作用而悬浮起来,转子与定子无任何接触,气隙约(0.3~1) nm。转子的位置由传感器检测。当转子位置产生偏差时,位置传感器将偏差信号输入电气控制系统,控制定子电磁铁的电流(幅值及相位),转子始终保持在正确的位置上。

磁力轴承电气控制系统方块图如图2所示。位置传感器信号同决定转子规定位置的参考信号,比较,误差信号正比于转子瞬时位置

与其规定位置的偏差、参考信号为零时,转子的规定位置为其中心线。误差信号经信号调节器处理后将指令信号传给功率放大器,由功率放大器控制电磁铁电流,从而控制定子电磁铁产生的磁场和作用于转子的电磁力。

1.2 磁悬浮轴承的特点

由于转子与定子之间不存在机械接触,从而使磁力轴承具有下列优点:

(1) 回转速度高。气隙处的圆周速度可高达 200m/s

(2) 不需润滑和密封装置。

(3) 无振动,无噪声。

(4) 发热很少,功耗低。

(5) 能在真空或腐蚀介质中使用。

(6) 对环境温度不敏感,许用温度范围为 $- (253\sim 450)^\circ\text{C}$

(7) 对轴的加工精度要求低。

(8) 可靠性高。

由于电气控制系统的控制性能,能满足应用上的各种特殊要求,而且有下列优点:

(1) 自动平衡特性。回转部件是绕其自身的惯性主轴回转的,即使回转部件对其支承轴线不平衡,仍可平稳运转,不会产生由于失衡离心力造成的附加载荷,无振动。

(2) 高刚度,刚度是可调节的

(3) 阻尼是可调节的。

(4) 回转精度高

(5) 全部回转特性都可以由位置传感器和电气控制系统的信息获得,因而可对机器的运行状态实行诊断和监控。

1.3 磁悬浮轴承在旋转机械上的应用

(1) 工作转速极高的机械

(2) 工作环境苛刻的机械

(3) 工作稳定性高,无振动,旋转精度高的机械。

1.4 磁悬浮轴承的发展前景

磁悬浮轴承问世初期,由于没有高性能永磁材料,其形式多为主动式磁轴承。1968年钕钴磁钢的研制成功,到最近几年各种新型稀土磁钢开始实现商品化大批量生产,以及现代电

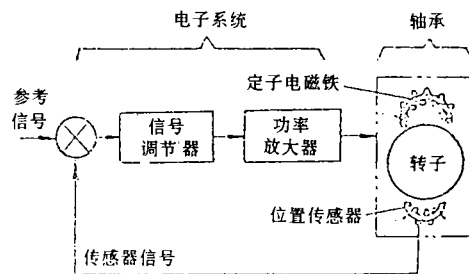


图2 电气控制系统方块图

当, 又具有节能的优点, 成为未来磁悬浮轴承技术的发展方向。

2 一种径向混向磁悬浮轴承的设计

2.1 系统结构及工作原理

1988年外单位委托长春光机所研制 $\phi 1000\text{mm}$ 模拟转台, 该转台用于模拟太阳光线对飞行弹体的影响, 图3是 $\phi 1000\text{mm}$ 转台结构示意图, 其中14是测试弹, 要求弹体的转速达3~8万转/分。

我们决定采用如图4所示磁轴承系统, 该系统由径向被动磁轴承, 轴向主动磁轴承及辅助承三部分组成。径向被动磁轴承由一对相斥排列的高性能磁环组成, 其相互作用力使弹体悬浮, 由于径向磁悬浮系统轴向是不稳定的, 故在轴向用轴向主动磁轴承。控制轴向位移, 它由控制电路、转子、定子组成。

其作用是保持轴系高速运转时的轴向稳定性, 径向稳定性及横轴稳定性, 辅助轴承是一对向心推力轴承, 系统不工作时, 转轴支承在辅助轴承上, 避免径向及轴向磁轴承转子与定子间的固体接触造成损坏。

2.2 径向被动磁轴承的设计

磁轴承的结构见图5, 这种磁轴承是圆环轴向充磁径向排斥型磁轴承, 这种磁轴承由于是轴向充磁, 技术上容易实现国内能够加工, 再加上软磁材料构成磁路, 把轴向磁通导向径向, 可以使径向悬浮力大大增加。

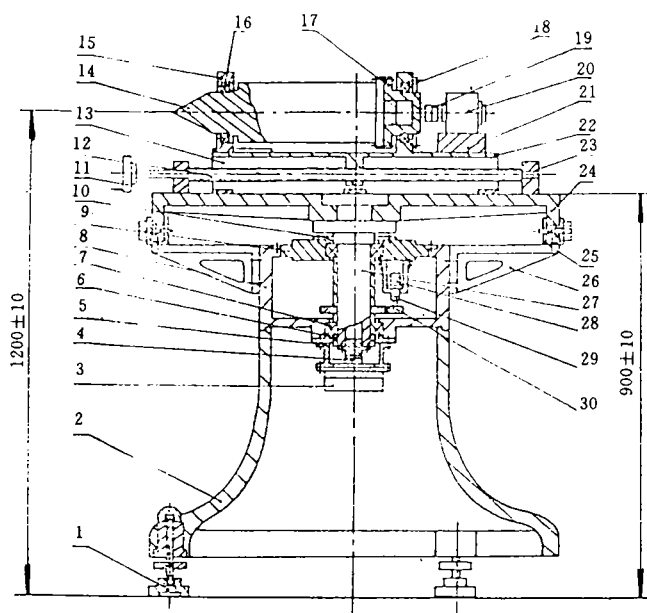


图3 $\phi 1000$ 转台结构示意图

2.2.1 磁性材料的选择

由于磁环是高性能永磁材料, 又考虑到其成本不宜过高, 故选用高矫顽力钕铁硼材料。

2.2.1 磁性材料的选择

由于磁环是高性能永磁材料，又考虑到其成本不宜过高，故选用高矫顽力钕铁硼材料。(XTS-30H)，其剩磁 B_r 为 10.5kG，矫顽力为 H_{CB} 为 9kOe 内禀矫顽力为 12kOe，最大磁能积为 $\neq 26-30$ MGoe。软磁材料选用 330 牌号电工钢片，其饱和磁感强度 $B_s=2T$ ，矫顽力 $H_c=10e$ ，电阻率 $\rho=10^{-5}\Omega \cdot cm$ ，导磁率 $\mu=1000$ 。

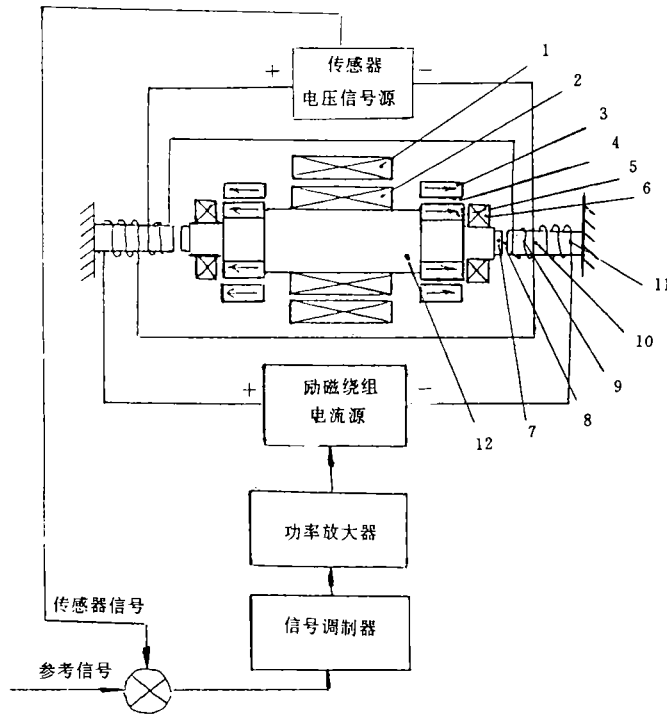


图 4 混合径向磁轴承系统结构示意图

2.2.2 磁轴承气隙的选择

对于直径 $D < 100mm$ 的磁轴承，气隙 e 一般取 $(0.2 \sim 0.8mm)$ ，气隙大小、对磁轴承径向刚度影响很大。气隙大，磁轴承径向刚度小，精度差，但安装，制造容易。气隙小，磁轴承精度高，径向稳定性和横轴稳定性较好，径向刚度大，但制造和安装难度大。

本磁轴承综合考虑了以上因素后，取单边气隙 $e=0.8mm$

2.2.3 磁轴承几何尺寸的确定

以 $\Phi 1000$ 转台为例，再从磁轴承的几何结构考虑，初步选出大小磁环及硅钢片尺寸，表 3 磁环磁性性能参数。

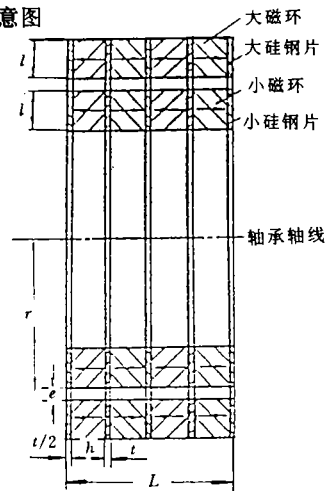


图 5 径向磁轴承结构

	内 径	外 径	径向厚度	轴向长度
内 环	50	62	6	6
外 环	63.6	75.6	6	6

图 2 磁轴承的几何尺寸 (单位 mm)

单边气隙 e	平均半径 r	轴承长度 l
0.8	31.4	26.8

表 3 磁环磁性能参数

磁化强度 (T)	真空磁导率 (H/m)
0.82	$4\pi \times 10$

图 1 和图 2 中各量的单位为毫米

2.2.4 磁轴承几何尺寸对径向刚度的影响

设单磁环轴承刚度为 k_1 则有

$$k_1 = \frac{-M^2}{4\pi\mu_0} s [2F(d) - F(d+h) - F(d-h)] \quad (1)$$

$$F(z) = In \frac{[(2l+e)^2 + z^2][e^2 + z^2]}{[(l+e)^2 + z^2]^2} \quad (2)$$

其中 M —钕铁硼磁环磁化强度, 约 0.82T

S —径向气隙中心周长 $S = 2\pi r$

h —轴承轴向长度

d —内环轴向位移

z —轴向座标

l —内外环径向厚度

e —单边气隙

μ_0 —真空导磁率

把表 1、2、3 中数据代入式 (1)、(2) 式得

$$k_1 = 52.0 \text{ N/mm}$$

这个刚率值表明, 当把内环 (即轴) 相对于外环径向移动一毫米时, 需 52.0 牛顿的力, 单环磁轴承径向刚度 k_1 是磁环轴向厚度 h , 径向厚度 l 气隙 e 、内环轴向位移 d 的函数, 本文用计算机对各参数变量 h, l, e, d 变化时, 径向刚度 k_1 的变化进行了大量的计算, 并把这些数值拟成关系曲线。

2.2.5 磁路设计

钕铁硼磁环两侧贴上硅钢片后, 磁通从硅钢片中集中流向径向, 增大了径向磁通密度, 减少了漏磁, 硅钢片厚度最佳值的计算, 可以根据磁路中磁通相等的原则, 考虑到漏磁, 取漏磁系数 $\xi = 1.8$, 计算公式如下:

$$T_0 = \frac{2 \cdot l \cdot B_{d0} \cdot \eta}{\xi \cdot B} \quad (3)$$

l —径向厚度

B_{d0} —外磁场轴向表面场 0.3T

B —硅钢片中饱和磁感后强度 2T

T_0 —外硅钢片厚度

$$T_s = \frac{2l \cdot B_s \cdot \eta}{\xi \cdot B} \quad (4)$$

T_s —内硅钢片厚度

2.2.6 刚度的较核

径向被动磁轴承由两个径向被动磁轴承组成设磁轴承系统径向刚度为 k_R ，则计算公式如下：

$$k_R = \frac{0.655L \cdot r \cdot M^2}{2\mu_0 e} \times 2 \quad (5)$$

其中： L —磁轴承轴向长度 (m)

r —磁轴承平均半径 (m)

M —钕铁硼磁环磁化强度 (T)

e —单边气隙

μ_0 —真空磁导率 (H/m)

把表 1-2 和表 1-3 中数值代入式 (5) 中，得 $k_R = 368.67\text{N/m} = 37.6\text{kg/mm}$

k_R 值表明，当轴相对于轴承在径向移动 1mm 时需 37.6kg 的力，而本磁轴承转轴重 12kg，所以磁轴承的悬浮力是足够大的，转轴由于重力而产生的偏心是小的。

2.3 轴向主动磁轴承的设计

轴向主动磁轴承结构形式如图 5，机械部分和控制系统部分，机械部分包括磁轴承的转子与定子，转子由一块扁圆柱形永磁材料做成，固定在轴端，定子是一个圆柱形铁芯电磁铁，转子与定子中心线对齐。定子上共有两组绕组，传感器绕组和励磁绕组，这样的磁轴承共一对，分布在轴的两端，共用一个控制电路，控制系统包括参考信号源，信号调制器功率放大器，反馈信号电流源，传感器信号电压源等。

由于磁轴承转子由永磁铁做成，预先在磁轴承气隙中产生一恒定磁场。当转子有轴向偏移时，由于气隙中的磁通发生变化，因而传感器绕组中产生感应电流，由于一对传感器绕组绕向相同且相互连接组成一个回路，因而产生的感应电流是单个绕组感应电流的二倍，这使传感器的灵敏性提高了一倍，感应电流流经传感器信号电压源，转变为电压信号，即传感器信号，传感器信号用来与参考信号源产生的参考信号相比较。参考信号决定转子的规定位置，当转子处于规定位置时，控制系统不工作，只有当转子偏离规定位置时，传感器绕组产生传感器信号，传感器信号与参考信号相比较，产生误差信号，误差信号正比于转子瞬时位置与其规定位置之间的偏差，误差信号经信号调节器处理后将指令信号传给功率放大器，由功率放大器产生电压反馈信号，作用于励磁绕组电流源产生励磁电流，因为一对励磁绕组绕向与传感器绕组相同且相互连接构成一个回路，故励磁电流流经励磁绕组时，在气隙大的一端产生了引力，在气隙小的一端产生斥力，使转子在电磁力的作用下回到规定位置，保证了整个磁轴承系统稳定性。

轴向磁轴承的另一作用是对磁轴承的径向偏移和横轴角位移施加阻尼力，以保证磁轴承系统的径向稳定性和横轴稳定性如图 6 所示为磁轴承气隙磁通分布图，磁力线和这种分布具

有自发抵抗转子与定义间的径向偏移和横轴角偏移的作用。

3 结 论

本论文从以下几方面研究了磁悬浮轴承系统

(1) 说明了磁悬浮轴承的工作原理及分类, 以磁悬浮轴承与滚动轴承, 滑动轴承相比较阐述磁悬浮轴承的特点。

(2) 以具体的实例说明磁悬浮轴承在高速回转机械上的应用, 对国内外磁悬浮轴承应用与研究的现状做了比较详细的说明。

(3) 以磁悬浮轴承发展的历史为依据, 预测磁悬浮轴承的发展趋势。

(4) 以 $\varphi 1000$ 转为例, 设计出一新型径向混和磁悬浮轴承, 给出其工作原理系统结构, 径向被动磁轴承的详细设计过程和轴向主动磁轴承的机械结构和控制系统结构设计, 并详细说明其工作原理, 并对磁轴承系统进行了刚度校核, 该磁轴承转速可达到使用要求。

(5) 通过对单磁环径向被动轴承径向刚度进行计算机数值分析, 掌握了磁环各几何尺寸参数与轴承径向刚度的关系, 并给出曲线, 为研制这种磁轴承系统提供了依据。

(6) 通过对这种磁轴承的径向稳定性, 轴向稳定性, 横轴稳定性的分析, 指出在轴向主动磁轴承的作用下轴在这些方向上完全能够达到稳定平衡。

(7) 校核了径向被动磁轴承的径向荷能力。

(8) 提出一种新型的轴向主动磁轴承结构, 将传感器绕组与励磁绕组放在一个铁芯上, 结构紧凑, 控制电路简单, 并能保证径向被动磁轴承的轴向稳定性, 径向稳定性和横轴稳定性。

本径向混合磁轴承系统在以下几方面具有新颖性的特点。

(1) 本磁轴承系统是一种实用新型混合式径向磁悬浮轴承系统, 体现了磁轴承技术的发展方向。

(2) 本磁轴承系统采用一种简单, 实用的轴向主动磁轴承, 有效的抑制和消除了转轴的不稳定力和振动结构, 比较新颖。

(3) 本磁轴承系统由于径向磁轴承采用高性能钕铁硼稀土永磁材料激磁, 没有电子元件和电磁铁, 轴向磁轴承机械结构和控制结构简单, 实用。故结构紧凑, 体积小, 重量轻, 成本低, 而且径向刚度大, 承载能力强。

(4) 本磁轴承适用于一切主要承担径向负荷的高速旋转机械, 最大转速反受转子材料极限离心力限制。

(5) 本磁轴承系统结构简单, 制造和安装比较容易, 可以商品化批量生产, 推广应用到工业的各个领域。

本论文通过一种新型径向混和磁轴承的设计为混合式磁轴承的设计, 提供了一定的理论基础。按本论文的设计原理和理论计算公式, 可以设计制造出多种几何尺寸及负载能力的径向混合磁轴承系统。这种磁轴承系统为主要承担径向负荷的高速旋转机械中使用一种结构简单, 成本低廉, 性能优越的磁轴承系统提供了参数, 为混合式磁轴承的工业中的应用提供了一点启示, 在高速轴承技术领域增添了一项新的设想, 可以大大提高各个工业领域里一切

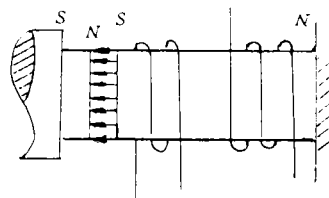


图 6 轴向主动磁轴承气隙磁通分布图

高速旋转设备的转速,从而提高这些设备的技术性能指标,对工业和医疗设备的技术改进具有很大的意义,同时也具有较高的经济效益。因为这种混合径向磁轴承工作时轴与轴承间无固体接触,无摩擦磨损,无需润滑,无需维护保养,寿命很长,可以节省大量的人物力。

Application of Magnetic Floating Bearing in High Speed Rotary Machinery and Design of a Mixing Radial Magnetic Floating Bearing

Chen Lizhi

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun130021)*

Abstract

This paper first tell a story of a dream bearing-magnetic bearings. The content contains principle of operation , advantages, application in modern industry, developmetn and presentsituation. Then give a detaied design procedure of a new type actiue radial magnetic bearing which is radially passive and axially active. By analysing the relation between the dimensions of the permanent magnetized body of the radial passive magnetic bearing and the radial stiffness using computer, the relative curves are given out in the end, this paper theoretically analyses the radial stability, axial stability and cross-axis stability of the magnetic bearingcg system.

Key Words: Magnetic bearing, Passive, Active, Stiffness