

文章编号:1673-9469(2012)03-91-04

磁悬浮轴承悬浮能力及控制系统分析研究

吴晓峰,宋志江,张春艳

(1. 宁波港股份有限公司招投标中心,浙江 宁波 315800;2. 河北工程大学 机电学院,
河北 邯郸 056038;3. 镇海区招宝山街道拆迁事务所,浙江 宁波 315200)

摘要:磁悬浮轴承以无摩擦、高转速、高精度、无需润滑等优点,成为高速或超高速回转机构中轴承发展的方向之一。本文依据电磁感应理论和自动控制原理,自行设计和研制出的五维控制磁悬浮轴承装置及其控制系统,在实验室成功进行了多次长时间悬浮旋转。并在其静态磁悬浮特性和动态磁悬浮特性试验的基础上,重点对磁悬浮轴承的悬浮能力和闭环控制系统进行了分析研究,结果表明,该磁悬浮轴承及其闭环控制系统能成功把9kg重的轴悬浮在空中高速旋转,为实际应用提供了理论基础和实践依据。

关键词:磁悬浮轴承;悬浮能力;控制系统

中图分类号:TH133

文献标识码:A

Analysis on the magnetic bearing suspension capacity and its control system

WU Xiao-feng, SONG Zhi-jiang, ZHANG Chun-yan

(1. Ningbo port Co., LTD Bidding Center, Zhejiang Ningbo 315800, China; 2. College of Mechanical
and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;
3. Zhenhai District Zhaobaoshan Street Demolition Firm, Zhejiang

Abstract: Magnetic Bearing has the advantages of no friction, high-speed, high precision, without lubrication, it becomes one of the bearing directions of the development of high-speed or ultra-high-speed rotary mechanism. According to the electromagnetic induction theory and automatic control theory, this paper designed and developed a five-dimensional control of magnetic bearing device and its control system, and successfully conducted in the laboratory many times as a long time suspended rotating. And on the basis of the static magnetic characteristics and dynamic magnetic performance test, the magnetic bearings suspended and closed-loop control system were analyzed, the results show that the magnetic bearings and its closed-loop control system can successfully 9kg weight shaft suspended in the air as high-speed rotation, the results provide theoretical and practical basis for its practical application.

Key words: magnetic bearing; suspension capacity; control system

磁悬浮轴承是以磁悬浮理论和自动控制理论为基础发展起来的一种新型轴承。目前世界上只有英、法、美等少数国家成功应用到透平机、压缩机、真空泵和超高速离心机等上。在我国,80年代末,清华大学张祖明做了垂直方向单自由度磁悬浮轴承研究,哈尔滨工业大学陈易新对单自由度

磁悬浮轴承的控制系统进行了计算机辅助分析,94年河北煤炭建筑工程学院吴贵生等人,对磁悬浮轴承进行了研制和试验研究。近几年,南京航空航天大学将磁悬浮轴承应用到了航空发动机和钻床主轴上;清华大学将磁悬浮轴承成功应用到了高温气冷堆氦气透平发电机中,其转速高达

15 000 r/min, 功率为 2 500 kW。本文主要针对自行设计和研制的五维控制磁悬浮轴承的悬浮能力和闭环控制系统进行了分析计算研究, 为进一步实际应用垫定了实践基础。磁悬浮轴承具有无摩擦、耗能小、噪声小、寿命长、无污染、转速高、不需要润滑等优点, 特别适用于轻载高速、重载低速、真空、超净等特殊环境中。

1 基本原理

磁悬浮轴承是由上、下、左、右四组电磁铁(定子)和转子组成。在四组电磁铁的对应方向上各设置了位移传感器, 随时检测电磁铁(定子)与转子之间的间隙大小。通过信号反馈, 经过功率放大, 控制流入四组电磁铁线圈中的电流, 使电磁铁产生磁力变化, 从而使转子稳定地悬浮在平衡的位置旋转。

2 悬浮能力的理论分析计算

磁场中某点磁感应强度 B 与该点磁导率 μ 的比值称为该点的磁场强度 H , 即 $H = \frac{B}{\mu}$ 。

根据安培环路定律, 在磁场中的合成磁场强度 H 为沿闭合路径的线积分等于这个闭合路径包围的各传导电流的代数和, 即 $\oint H \cos\theta dL = \sum I$ 。

磁悬浮轴承的模型如图 1 所示。

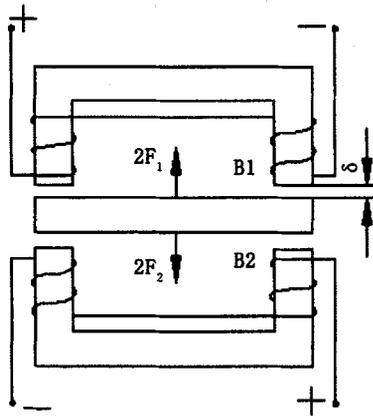


图1 磁悬浮轴承模型

Fig.1 The model of magnetic bearing

设每个磁极上螺旋线圈为 ω 匝, 则 $\sum I = \omega I$ 或 $B = \mu\omega I$ 。

设磁路的磁场强度是均匀的, 并忽略微小量磁漏和磁滞的影响, 由麦克斯韦吸引力公式可得一个磁极的悬浮力为

$$F = F_1 - F_2 = \frac{S}{\mu_0} (B_1^2 - B_2^2)$$

式中 μ_0 - 空气的磁导率; S - 磁极的截面积; B_1 、 B_2 - 分别为上、下磁铁气隙处的磁感应强度。

从上式可见 $B_2 = 0$ 时, 上磁铁有最大悬浮力为

$$F_{\max} = \frac{S}{\mu_0} B_1^2 \tag{1}$$

依据分段均匀安培定律, 对图 1, 气隙、铁芯、衔铁的磁场强度的方向处处都与磁路的循环方向相一致, 即 $\theta = 0$, 因此有

$$\omega I = \oint H dL = H_0 \cdot 2\delta + H_1 L_1 + H_2 L_2 = (2 \frac{\delta}{\mu_0} + \frac{L_1}{\mu_1} + \frac{L_2}{\mu_2}) B_1 \tag{2}$$

式中 μ_0 - 铁芯与衔铁之间的间隙; μ_1 、 μ_2 - 分别为铁芯和衔铁的磁导率; L_1 、 L_2 - 分别为铁芯和衔铁磁路的平均长度; H_0 、 H_1 、 H_2 - 分别为气隙、铁芯、衔铁的磁场强度。

实际上 μ_1 和 μ_2 远大于 μ_0 , 所以可将式(2)中的 $\frac{L_1}{\mu_1}$ 和 $\frac{L_2}{\mu_2}$ 忽略不计, 则 $\omega I = 2 \frac{\delta B_1}{\mu_0}$

$$\text{故 } B_1 = \frac{\mu_0 \omega I}{2\delta} \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)可得磁悬浮轴每个磁极的最大悬浮力为

$$F_{\max} = \frac{\mu_0 S \omega^2 I^2}{4\delta^2} \tag{4}$$

所研制磁悬浮轴承装置结构原理如图 2 所示。

图中 A-A 截面放大图为径向磁悬浮轴承定子的 1/4(即上一组), 其中有 6 个磁极, 每个磁极的方向与垂直方向都有一定夹角。B-B 截面放大图为轴向磁悬浮轴承的定子, 其中有 8 个磁极, 每个磁极的方向都与轴向一致。无论径向磁悬浮轴承, 还是轴向磁悬浮轴承, 它们的每个磁极都可看成是图 1 的推广, 只要考虑到每个磁极截面的投影方向就得出径向磁悬浮轴承和轴向磁悬浮轴承的最大悬浮力。

$$F_{\text{径max}} = \frac{\mu_0 S \omega^2 I^2}{2\delta^2} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) \tag{5}$$

式中 S 、 ω 、 δ 、 I - 径向磁悬浮轴承每个磁极的截面积、线圈匝数、气隙大小和电流强度。

$$F_{\text{径max}} = K \frac{\mu_0 S \omega^2 I^2}{4\delta^2} \tag{6}$$

式中 K - 轴向磁悬浮轴承磁极的个数; S 、 ω 、 δ 、 I - 分别为轴向磁悬浮轴承每个磁极的截面积、线圈匝数、气隙大小和电流强度。

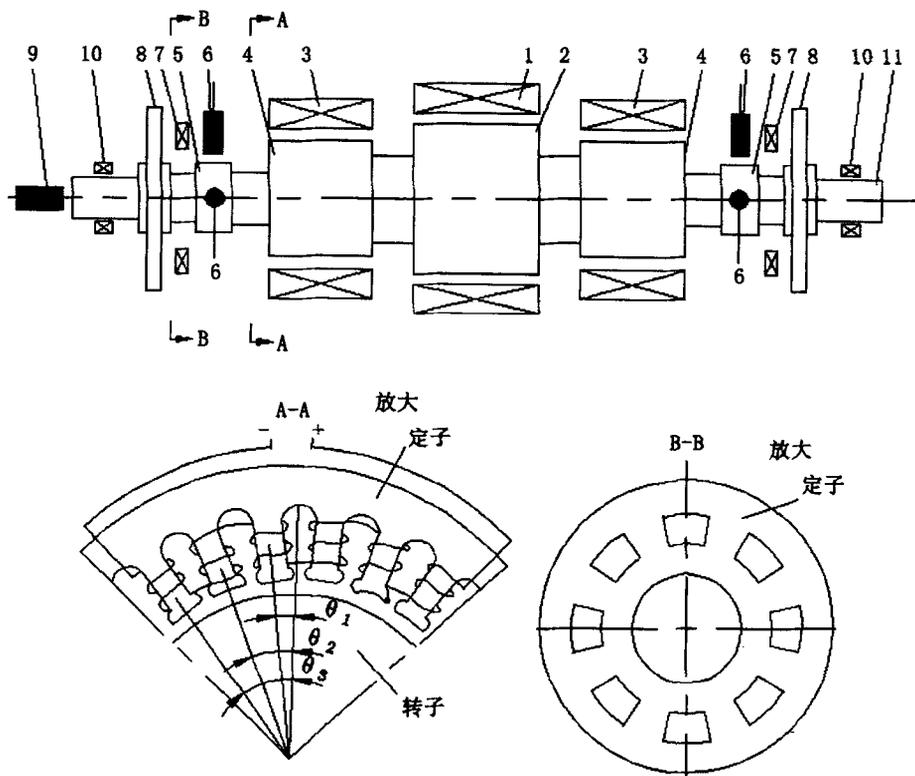


图2 磁悬浮轴承装置的结构原理

Fig.2 The structure theory of magnetic bearing

表1 磁悬浮轴承的结构参数和电流参数

Tab.1 Magnetic bearing structure parameters and current parameters

径向磁悬浮轴承		轴向磁悬浮轴承	
定子上每个磁极截面积	$(3.5 \times 58) \times 10^{-6} \text{m}^2$	定子上每个磁极截面积	$(6 \times 10) \times 10^{-6} \text{m}^2$
定子上每个磁极线圈匝数	80 匝	定子上每个磁极线圈匝数	100 匝
线圈导线中最大电流	1A	线圈导线中最大电流	1A
转子与定子之间的间隙	$0.15 \times 10^{-3} \text{m}$	转子与定子之间的间隙	$0.15 \times 10^{-3} \text{m}$
空气的磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$	空气的磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$
θ_1	7.5°	磁极个数	8 个
θ_2	22.5°		
θ_3	37.5°		

所研制磁悬浮轴承装置中径向磁悬浮轴承和轴向磁悬浮轴承的有关结构参数和电流参数如表 1 所示。

将表 1 中的参数分别代入式(5)和式(6)就可得到所研制磁悬浮轴承装置中每个径向磁悬浮轴承和每个轴向磁悬浮轴承的最大悬浮力。

$$F_{\text{径max}} = \frac{\mu_0 S \omega^2 I^2}{2\delta^2} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) \frac{1}{9.8} = 10 \text{ kg}$$

$$F_{\text{径max}} = K \frac{\mu_0 S \omega^2 I^2}{4\delta^2} \frac{1}{9.8} = 6.8 \text{ kg}$$

3 控制系统

磁悬浮轴承控制系统原理框图如图 3 所示。

磁悬浮轴承系统一般是由定子(电磁铁)、转子、传感器、校正电路和功率放大器五个部分组成,其中定子(电磁铁)和转子是执行部件。

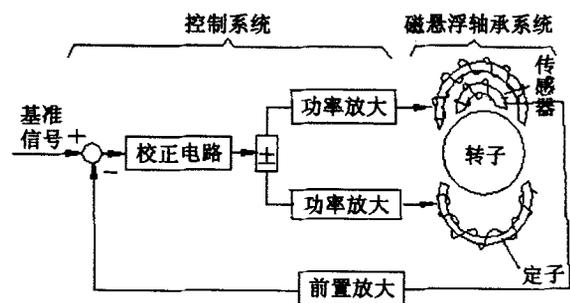


图3 磁悬浮轴承的控制系统

Fig.3 The magnetic bearing control system

当转子受到上、下或左、右扰动时,就会偏离其平衡位置,几乎同时高响应高精度位移传感器就可检测到转子的微小位置变化,并把这一微小位置变化转化成微小电信号反馈到控制器的微处理器,与基准信号相比较,经过校正电路,进入功率放大器将校正处理后的信号转换成控制电流,控制电流在定子磁铁中产生磁力,从而驱动转子返回到原来的平衡位置。因此,不论转子受到向上或向下、向左或向右的扰动,转子都能始终稳定地处于平衡位置状态旋转。

4 结论

1) 无论是径向磁悬浮轴承还是轴向磁悬浮轴承,在选用高磁感应强度材料的基础上,尽量增大线圈匝数、电流强度和磁极的截面积、减小转子与定子(电磁铁)之间的间隙对提高径向磁悬浮轴承和轴向磁悬浮轴承的悬浮能力是有效的。其中增

大线圈匝数和电流强度、减小转子与定子(电磁铁)之间的间隙尤为显著。

2) 控制系统的位移传感器、信号反馈响应速度和功率放大是关键,功率放大可有效提高磁悬浮轴承的悬浮能力。

参考文献:

- [1] 谢元运. 感应磁悬浮理论及应用[M]. 科学技术文献出版社,1984.
- [2] 吴贵生. 五维控制磁悬浮轴承装置的试验研究[J]. 河北煤炭建筑工程学院学报,1996,8(2):43-45.
- [3] 李慧敏. 磁悬浮轴承的研究现状和发展趋势[J]. 轴承,2003(6):43-45.
- [4] 马磊. 薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承系统研究[J]. 制造自动化,2009(1):76-79.
- [5] 邹海丹. 磁悬浮轴承转子位置检测技术[J]. 轴承,2009(4):55-57.

(责任编辑 刘存英)

(上接第87页)

4 结论

1) 3-UPU/UPU 机构的局部刚度矩阵以及全局刚度取决于机构的位姿,对于给定的位姿可求机构局部刚度及全局刚度的变化范围。

2) 3-UPU/UPU 机构的上下表面半径的变化情况影响着局部刚度和全局刚度,因此可以适当增大上下表面半径来获得较高的局部刚度以及全局刚度。

参考文献:

- [1] 吴宇列,吴学忠,李圣怡. 2-DOF 冗余平面并联机构的奇异位形与冗余性研究[J], 机械设计与研究, 2002, 18(2): 3-4.

- [2] 于靖军,毕树生,宗光华. 柔性平行导向机构的静刚度分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 241-244.
- [3] 于靖军,毕树生,宗光华,等. 3自由度柔性微机器人的静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 7-10.
- [4] 于洪健. 基于并联机器人机构的汽车薄板件柔性装配夹具研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] XI F F, ZHANG D, MECHEFSKE C, et al. Global kinetostatic modeling of tripod-based parallel kinematic machine [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(4): 357-377.
- [6] 于淑政,冯继刚,崔国华,等. 3UPS-1S 并联机构的运动学分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2011, 28(3): 97-99.

(责任编辑 马立)