文章编号: 1008-1542(2005) 04-0330-04

抗磁性磁悬浮轴承装置的研究

王桂香, 范　瑜

(北京交通大学 电气 工程学 院, 北京　100044)

摘　要: 对运用 抗磁材料的磁性轴承, 一般通过实验装置来研究其轴承的静态平衡和负载能力及其动态特性。本文所设计研究的实验装置由 1 个1.0105 g 的 NdFeB 柱形永磁转子, NdFeB 偏置磁体和抗磁材料石墨构成, 并对其进行了抗磁轴承负载的有限元计算, 计算结果表明与解析式所计算的结果是一致的。

关键词: 抗磁; 磁悬浮; 轴承; 稳定

中图分类号: U 237; U260. 33^{+} . 2　　文献标识码: A

Study of the equipment of the diamagnetic bearings

WANG Gui-xiang, FAN Yu

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: We apply diamagnetic materials to the magnetic bearings, using experimental apparatus to study the static equilibrium, load-carrying capacity and dynamic characteristics of the bearings . The apparatus consists of a 1. 0105g NdFeB column permanent-magnet rotor, and a NdFeB lift magnet to levitate the rotor and a diamagnetic graphite . We use finite element method and the analytic formula to calculate the bearings-load, and the result is consistent .

Key words: diamagnetic; magnetic levitation; bearings; stabilization

近年来, 抗磁材料在轴承应用方面的研究正在发展[1,2]。抗磁材料的悬浮能力也得到了进一步的研究[3,4], 但是关于运用抗磁材料在磁性轴承方面的旋转负载能力的研究还很少。本文介绍了抗磁轴承的设计和结构, 对其负载能力进行了研究, 并进行了稳定性计算。

1　抗磁性磁悬浮轴承的原理和结构

两块永久磁铁之间可以产生吸力和斥力, 然而不能独立实现稳定磁悬浮(除非在空间的 6 个自由度中有至少 1 个其他约束——这已经在 19 世纪就得到证明, 称为“ Earnshaw 定律”)[5]。但如果在永磁悬浮中引入抗磁性物质, 则就能够使永磁转子在常温下实现稳定悬浮, 且不需要外加机械辅助。

抗磁性物质的磁化率是负值, 在外界磁场的作用下, 会产生轻微的抵制外磁场的作用。把抗磁物质用到永磁悬浮结构中, 对于悬浮的磁体有抗磁稳定的作用, 当悬浮磁体有偏离平衡位置的上下偏移的趋势时, 抗磁物质的抗磁性就会抵制这种趋势, 使之重新平衡, 这就是抗磁轴承稳定悬浮旋转的根本原理。

抗磁轴承设计的问题是考虑偏置磁体和悬浮转子间的平衡问题。如图 1 所示, 偏置磁体和悬浮转子之间的磁力会使转子有向上或者向下的趋势, 虽该趋势可通过转子的重力来平衡, 但转子在辐向还是不稳定。

收稿日期: 2005-06-16; 修回日期: 2005-09-29; 责任编辑: 王士忠
基金项目: 北京市教育厅博士基金资助项目(20030004013)
作者简介: 王桂香(1974-) , 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事抗磁性磁悬浮及电力电子与电力传动方面的研究。
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

通过引入抗磁体, 转子就能够在一定的位置上稳定旋转, 而且引入抗磁体可以代替有源控制系统, 不需要能量的输入。

轴承的结构是由偏置磁体, 悬浮转子和抗磁体组成, 示意图见图 1。偏置磁体和悬浮转子都是 NdFeB 永磁材料, 偏置磁体是 35 mm × 16 mm 的 N38H 盘形体, 剩磁 1.265 T; 悬浮转子是 6 mm × 2.8 mm 的 N35H 柱形体, 质量为 1.010 5 g, 剩磁为 1.235 T。抗磁体是盘形的石墨材料, 取其磁化率为 - 0.000 001 7, 这个数值是取 ansoft 有限元计算中铅的磁化率数值, 和文献[3]中的取值相近。

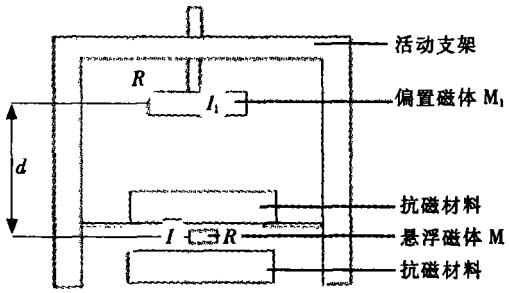


图 1　轴承结构示意图

Fig. 1　Frame of the bearings

偏置磁体的高度可以通过调节螺栓调节, 使得其和悬浮转子之间的磁力能够和转子的重力相平衡。抗磁材料的间隙也是可以调节的, 因为抗磁材料的间隙大小影响转子悬浮旋转的稳定性, 间隙只有在一定的数值范围之内, 转子才能够达到平衡。

悬浮转子在抗磁盘之间的位置不是唯一的, 通过调整抗磁盘之间的距离可以使悬浮转子在不同的位置定悬浮并旋转。通过有限元计算和 matlab 解析计算得知, 抗磁轴承抗磁体能够产生的支撑力小于 0.000 16 N, 这说明抗磁轴承只适合承载比较小的悬浮负载。抗磁盘之间的距离也是有约束的, 只有在一定的距离范围之间, 悬浮转子才能够稳定。下面就本试验进行悬浮力和抗磁盘间距的分析。

2　稳定抗磁模型

磁距为 $\boldsymbol{M}$ 的磁体在磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的磁场中受力:

$$\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{M} \times \nabla)\boldsymbol{B}。$$

将两个磁体等效为两个电流环, 则两个电流环 I 和 I_1 之间的力[3]为

$$F = \mu_0 I I_1 \int_{-1}^{1} J(1 - v\,\mathrm{sgn}(v))\,\mathrm{d}v, \tag{1}$$

其中: $J = \sqrt{1-k^2}\left(\frac{1-0.5k^2}{1-k^2}E(k) - K(k)\right)$, $K = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-k^2\sin^2\theta}}\mathrm{d}\theta$, $E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2\sin^2\theta}\,\mathrm{d}\theta$, $k = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$, $r = \frac{d}{R} + \frac{L}{2R}(1+v)$, d 是磁体之间的距离, R 和 L 是悬浮转子的半径和高度; 悬浮转子的等效电流 $I = \frac{M}{\pi R^2}$[6]; 偏置磁体的等效电流 $I_1 = \frac{M_1}{\pi R_1^2}$。

由式(1)得出的悬浮转子所受到偏置磁体的磁力与距离的关系见图 2, 是一种非线性关系。

抗磁体对悬浮转子产生的力, 运用镜像法, 悬浮转子的等效电流在抗磁盘内的镜像电流[6] $I' = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} = \frac{\chi I}{2}$, 其中 χ 是抗磁材料石墨的磁化率。

悬浮体在两个抗磁体的中间时的磁感应强度 B_{ir}[3] 为

$$B_{ir} = \frac{3\mu_0 \chi M_r}{8\pi r_i^4} = \frac{3\mu_0 \chi M_r}{8\pi D^4},$$

其中: D 是抗磁体的间距; M_r 表示由偏置磁体在两个抗磁体中间距离处产生的磁距。由此产生的磁力:

$$F = 2\pi R B_{ir} = \frac{3M^2 |\chi| \mu_0}{4\pi D^4}。 \tag{2}$$

由式(2)得出的悬浮转子所受的抗磁力与 D 的关系见图 3。

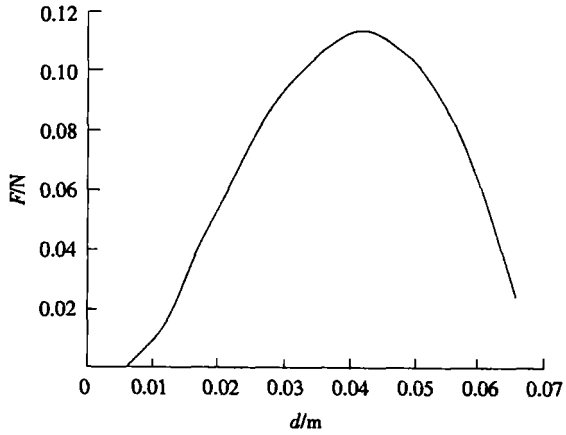


图 2　永磁力和磁体间距关系图

Fig. 2　Relation of the magnetic force and the distance of the magnet

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 4 表示运用有限元的方法计算出的抗磁盘对悬浮转子产生的作用力, 这种方法与用解析式得出的结论(见图 3) 是一致的, 抗磁材料对悬浮转子的作用力比较小, 但其稳定作用不可缺少。

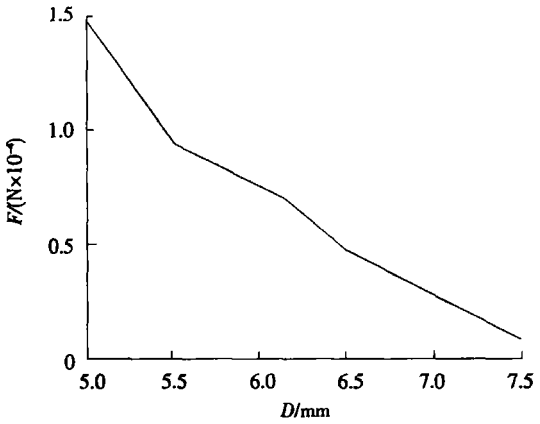


图 3 由抗磁体产生的轴承力和抗磁盘间距关系图

Fig. 3 Relation of the bearing force brought by the diamagnetic materials and the distance of the two diamagnetisms

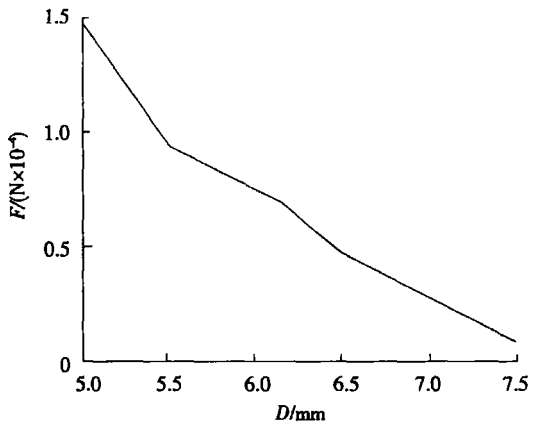


图 4 由抗磁体产生的轴承力和抗磁盘间距关系图

Fig. 4 Relation of the bearing force brought by the diamagnetic materials and the distance of the two diamagnetisms

将式(2) 变换, 带入稳定悬浮条件[3]

$$\frac{1}{2B_0}\left(\frac{mg}{M}\right)^2 < B'' < \frac{2C_z}{M},$$

$$\text{得} \quad \frac{1}{2B_0}\left(\frac{mg}{M}\right)^2 < B'' < \frac{12\mu_0 M\,|\,\chi|}{\pi D^5},$$

$$\text{则} \quad D < \left(\frac{12\mu_0 M\,|\,\chi|}{\pi B''}\right)^{1/5} < \left(\frac{24\mu_0 B_0 M^3\,|\,\chi|}{\pi (mg)^2}\right)^{1/5}。 \tag{3}$$

式(3) 为抗磁体间隙的约束条件, 其中 C_z 是由抗磁材料引入的约束参数, 其大小由抗磁材料的性质确定, m 是悬浮转子的质量, μ_0 是真空中的磁导率, 取 $4\pi \times 10^{-7}$, B_0 是偏置磁体在悬浮转子悬浮高度为 $D/2$ 处的磁感应强度。本试验中的最大稳定间距是 6. 2 mm 。

4 实验与结论

本实验采用 Φ35 mm × 16 mm 的扁园柱形的 NdFe38 钕铁硼材料作为偏置磁体, Φ6 mm × 4. 8 mm 的 NdFe35 材料作为悬浮体, 抗磁体运用的是石墨(石墨是抗磁材料中抗磁性比较强的材料, 但是由于其制作工艺不同, 其磁化率相差很多)。图 5 表示悬浮转子的悬浮状态。抗磁性悬浮是一种完全的无源悬浮, 其悬浮力比较小, 本试验中的悬浮体质量为 1. 010 5 g, 但是悬浮状态相当稳定。

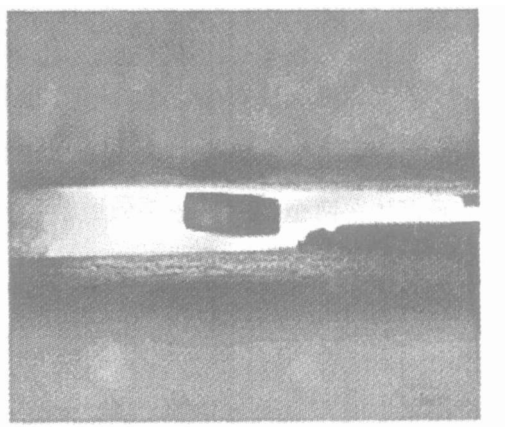


图 5 悬浮转子

Fig. 5 Ievitating magnetic bearing

实验中测得的抗磁体间距和式(3) 所得出的数据一致, 由式(3) 计算得出 D 小于 6. 2 mm, 实验中抗磁体的间距调节为 6 mm, 当间距大于 6. 2 mm 的时候悬浮转子不能够稳定地悬浮旋转。

用 Ansoft 对抗磁性悬浮进行了有限元计算, 分析悬浮体在有抗磁物质的情况下所受到的磁场力, 与解析公式所得的悬浮力相一致。

抗磁轴承最大的优点在于其无源和完全无接触摩擦, 但是其负载能力比较小, 只能用于承载比较小的负

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

载, 随着永磁材料和抗磁材料的进一步研究和强化, 抗磁轴承将能够承载较大的负载。

参考文献:

[1] GEIM A K, SIMON M D, BOAMFA M I, et al. Magnet levitation on your fingertips[J]. Nature, 1999, 400: 323-324.
[2] SIMON M D, GEIM A K. Diamagnetic levitation: Flying frogs and floating magnets[J]. J Appl Phys, 2000, 87: 6 200-6 204.
[3] SIMON M D, HEFLINGER L O, GEIM A K. Diamagnetically stabilized magnet levitation, Amer[J]. J Phys, 2001, 69: 702-713.
[4] BEAUGNON E, TOUMIER R. Levitation of organic materials[J]. Nature, 1991, 339: 470.
[5] EARNSHAW S. On the nature of the molecular forces, which regulate the constitution of the luminiferous ether[J]. Transactions of Cambridge Philosophical Society, 1842, 7: 97-112.
[6] SMYTHE W R. Static and Dynamic Electricity[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. 306.

(上接第 **276** 页)

2.2 方法加标回收率和精密度

准确称取白芍样品 6 份, 分别加入一定量标准品溶液, 3 个添加水平, 每个添加水平 2 份, 混匀自然晾干后, 按"1.2", "1.3" 项操作进行测定, 计算平均回收率及相对标准偏差。结果见表 2。

表 2　回收率

Tab. 2　Recovery

农药种类	回收率/%			平均回收率/%	RSD/%
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ		
七　氯	96.14	99.61	105.2	100.3	4.6
环氧七氯	95.23	98.79	104.8	99.61	4.8
p, *p*′-DDE	94.27	106.5	96.82	99.20	6.5
p, *p*′-DDD	95.60	104.1	97.73	99.14	4.5
o, *p*′-DDT	94.25	99.54	95.01	96.27	3.0
p, *p*′-DDT	93.43	97.20	101.9	97.51	4.4

添加量为Ⅰ: 1.67 ng/g; Ⅱ: 8.33 ng/g; Ⅲ: 16.7 ng/g

2.3 样品的测定

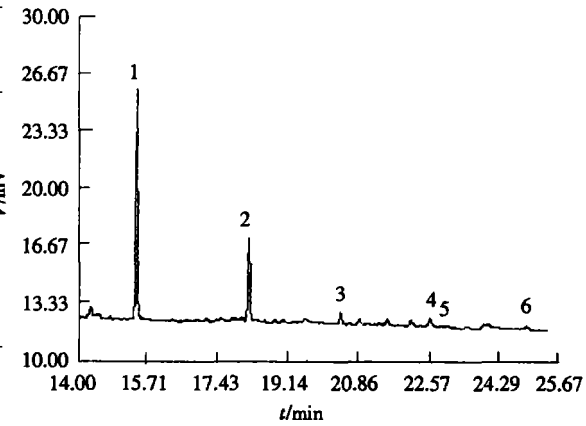
分别准确称取 2 份白芍样品, 按"1.2" 项处理后以"1.3" 项操作进行测定, 以外标法定量, 白芍色谱见图 2, 农药含量结果见表 3 。

表 3　白芍样品中农药的含量(ng/g)

Tab. 3　Determination results of pesticides in paeonia lactiflra pallpall

样品	七氯	环氧七氯	*p*, *p*′-DDE	*p*, *p*′-DDD	*o*, *p*′-DDT	*p*, *p*′-DDT
白芍 1	5.741	0.399 2	2.554	ND	ND	ND
白芍 2	30.99	11.22	9.760	12.85	5.964	8.137

ND 为未检出



1—HEPT; 2—HCE; 3—*p*, *p*′-DDE; 4—*p*, *p*′-DDD; 5—*o*, *p*′-DDT; 6—*p*, *p*′-DDT

图 2　白芍样品色谱图

Fig. 2　Chromatogram of paeonia lactiflra pall

3　结　语

农药残留量是制约中草药质量的重要因素之一, 严重影响着中国中草药产品在国际市场上的影响力, 因此降低中草药农药残留量已成为急需解决的问题。加强对中草药中农药残留量的检测与监督对于降低中草药农药残留量很重要, 本文介绍的方法适用于白芍中有机氯农药残留的测定。

参考文献:

[1] 王会丽, 陈建民, 张曙明. 有机氯农药残留量的气相色谱检测方法研究[J]. 中草药, 1998, 29(6): 381-384.
[2] 王元鸿, 荣　会. 毛细管气相色谱分析人参中有机氯农药残留量[J]. 分析化学, 1994, 22(9): 931-934.
[3] 余建新, 胡小钟, 邵俊杰, 等. 大口径毛细管气相色谱法测定油脂、果蔬中 20 种有机氯农药的残留量[J]. 色谱, 2000, 18(4): 346-349.
[4] 吴建兰, 盛卫强. 毛细管气相色谱分析土壤中有机氯农药[J]. 环境与开发, 1998, 13(3): 48-50.
[5] 张曙明, 田金改, 高天兵, 等. 中药中农药残留量研究状况及安全控制[J]. 分析测试学报, 1999, 18(6): 79-83.
[6] 韩桂茹, 陈太平, 杨建红, 等. 中药中有机氯农药残留量的研究[J]. 中国中药杂志, 1996, 21(10): 591-593.
[7] 张亚莉, 阎　正. 中药中农药残留分析技术进展[J]. 河北工业科技, 2004, 21(5): 56-59.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net