

文章编号: 1000-8055(2003)01-0124-06

实心转子—电磁轴承系统的损耗分析

曹广忠¹ 虞 烈², 谢友柏²

(1 深圳大学 工程技术学院, 广东 深圳 518060;

2 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 当径向电磁轴承中的转子旋转时, 转子中将产生涡流。当转子为非叠片结构时, 所产生的涡流较大, 此涡流将改变电磁轴承气隙回路中的磁场。因此, 作用在转子上的磁场力除磁浮力之外, 还将作用有切向力, 此切向力将产生磁阻尼, 引起能量损耗。本文提出了一实心转子—电磁轴承系统的磁场分布模型, 给出了相应磁浮力和切向力的计算公式, 以实际系统为例, 进行了相应计算和损耗分析, 并在实际系统上进行了实验。结果表明计算与实验较吻合。

关键词: 航空、航天推进系统; 电磁轴承; 转子; 损耗; 涡流; 悬浮力

中图分类号: TH133.3

文献标识码: A

Rotating Loss Analysis for Active Magnetic Bearing with Solid Rotating Rotor

CAO Guang-zhong¹, YU Lie², XIE You-bai²

(1 Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Active magnetic bearing (AMB) is widely applied in many industrial fields. When the rotor becomes larger and larger, it is more difficult to manufacture a laminated rotor. Hence, solid rotor is utilized in the large rotor-AMB system. Eddy currents are caused inside the rotor when a solid rotor rotates in a radial magnetic bearing. The eddy currents change the magnetic field of the radial magnetic bearing and, therefore, the forces on the rotor include not only the levitation force but also the tangential force. The tangential force causes magnetic damping and losses. This paper presents a magnetic field analytical model of magnetic bearing-solid rotor system, and the forces and losses within a practical AMB system are calculated. It is shown that the calculation results are in good agreement with those of experimental study.

Key words: aerospace propulsion; Active Magnetic Bearing (AMB); rotor; loss; eddy current; levitation force

1 引言

电磁轴承简称磁轴承, 它是利用磁场力将转子悬浮于空间, 使转子和定子没有任何接触的一

种新型高性能轴承。在磁轴承研究中对磁场力的研究一直是一个重要的课题。目前磁轴承的设计仍然多采用磁路设计方法, 较少考虑象非线性、涡流、磁滞、边缘效应、漏磁以及频率等许多因素对

收稿日期: 2001-12-15; 修订日期: 2002-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60204013); 广东省自然科学基金资助项目(000845); 深圳市科技局基金资助项目(02)

作者简介: 曹广忠(1968-), 男, 陕西西安人, 深圳大学工程技术学院副教授, 博士后, 主要从事磁悬浮技术、数字仿真及智能控制研究

磁场的影响^[1~3]。Meeker 和 Maslen^[4,5]等尝试了考虑上述某些因素, 提出改进的磁轴承磁路计算方法; Mizuno 和 Higuchi 等^[6]实验测试了磁轴承中的损耗; Ahrens 等人^[8]从理论上考虑了涡流因素后计算了磁场力、损耗等。在上述研究的基础上, 本文以实际工程应用磁轴承为背景, 考察了计入涡流因素后的磁轴承—非叠片转子系统的磁场分布以及相应的磁场力计算, 提出了有工程价值的建议。

为了减小涡流损耗, 大多数磁轴承系统中的转子采用叠片型转子。但是, 由于非叠片即实心转子具有造价低而且材料强度高等优点, 以及在大型磁轴承系统中制做叠片转子困难等原因, 实心转子得到了应用。当径向轴承中的转子是非叠片结构时, 在铁磁性、可导电转子中将产生较大涡流。涡流的产生是由于导体材料中磁场的改变。如

图 1, 当转子在径向轴承中旋转时, 旋转轴表面的任何一部分所经历的外磁场将从 $+B_0$ (N 极) 变到 $-B_0$ (S 极), 而在磁极以外的区域为零, 此交变磁场引起转子中产生涡流。而涡流将改变原磁场。

磁场的分布以傅里叶级数近似, 建立实心转子—径向电磁轴承系统的二维磁场分布模型。以此为基础, 分别导出计算相应力和损耗大小的关系式; 以实际磁轴承为例进行计算和实验, 分析系统的损耗。

2 基本假设

- (1) 径向轴承的所有磁极形状、参数等都是完全相同的, 所有导磁材料各向同性。
- (2) 轴承宽度足够宽以致可忽略两侧效应。
- (3) 为求解 Maxwell 方程, 假设边界条件如下:

悬浮气隙与定子磁极界面的磁感应强度为常量 ($\pm B_0$), 磁极按 $+B_0, +B_0, -B_0, -B_0$ 即 NNSS 方式排列; 电导率和磁导率均为常数; 忽略磁饱和和磁滞效应。

符号如下:

- B —— 磁感应强度/T;
- H —— 磁场强度/(A/m);
- E —— 电场强度/(V/m);
- F_x, F_y —— 力/N;
- J —— 电流密度/(A/m²);
- d —— 穿透深度/m;
- σ —— 电导率/(S/m);
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ —— 真空磁导率/(H/m);
- μ_r —— 转子相对磁导率/(H/m);
- R —— 径向轴承的半径/m;
- U —— 速度/(m/s);

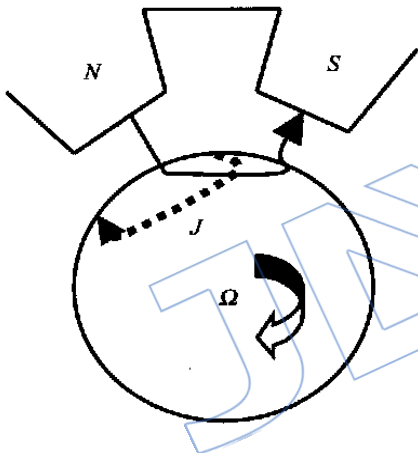


图 1 磁轴承—转子中的涡流
Fig 1 Eddy current in rotor-AMB system

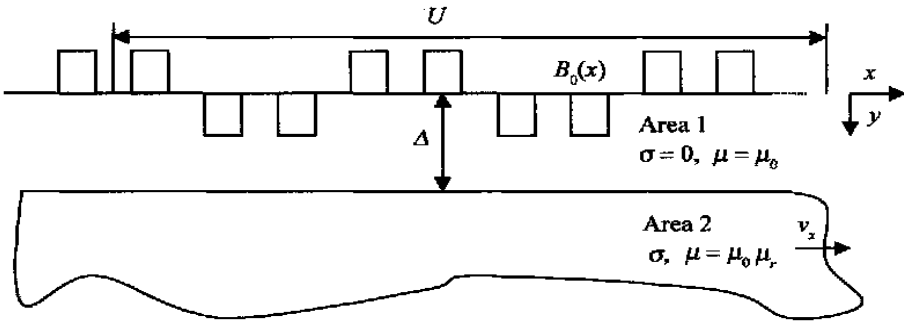


图 2 轴承—转子系统坐标系示意图
Fig 2 Coordinate of rotor-AMB system

b ——径向轴承宽度/m;

Δ ——气隙/m;

Ω ——转速/(r/min); P ——损耗/W;

M ——力矩/(N·m);

U ——转子外表面周长/m;

y ——中间变量。

当磁场穿透转子的深度 d 远小于转子的半径时,可建立如图 2 所示的直角坐标系。穿透深度:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\Omega}} \quad d \ll R \quad (1)$$

这时周向速度 $v_x = \Omega \cdot R$, 其中 $\Omega \neq 0$ 。

因此,转子在径向轴承中的旋转可视为半无限体的导电平板在磁极下的运动。设 n 为正整数,周期为 U ,取 $k_n = 2\pi n/U = n/R$,则磁感应强度 B_0 可以以傅里叶级数近似:

$$\begin{aligned} B_0(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(k_n x) + B_n \sin(k_n x) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n + iB_n}{2} e^{-ik_n x} + \frac{A_n - iB_n}{2} e^{ik_n x} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{ik_n x} + \bar{C} e^{-ik_n x} \end{aligned} \quad (2)$$

3 磁场分布

对于非时变场,由麦克斯韦尔(Maxwell)方程组有:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

辅助方程:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

联立方程(3)~(6)可得:

$$\frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (7)$$

又:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

由式(7)和(8)有:

$$\frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} - \mu\sigma v_x \frac{\partial B_x}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} - \mu\sigma v_x \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

将 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, 写成:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

设方程(9)、(10)之基本解为:

$$B_x = \hat{B}_x(y) e^{ikx} \quad (12)$$

$$B_y = \hat{B}_y(y) e^{ikx} \quad (13)$$

将(12)、(13)代入方程(9)和(10)有:

$$\frac{\partial^2 \hat{B}_x}{\partial y^2} - q^2 \hat{B}_x = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{B}_y}{\partial y^2} - q^2 \hat{B}_y = 0 \quad (15)$$

其中:

$$q = \sqrt{k^2 + ik\sigma\mu v_x}$$

则方程(15)的通解为:

$$\hat{B}_y = a e^{qy} + b e^{-qy} \quad (16)$$

由方程(11)有:

$$\hat{B}_x = -\frac{q}{ik} (a e^{qy} - b e^{-qy}) \quad (17)$$

对于区域 1:

$$\sigma = 0, \quad q = k$$

则:

$$B_{x1} = e^{ikx} (a_1 e^{qy} - b_1 e^{-qy}) \quad (18)$$

$$B_{y1} = e^{ikx} (a_1 e^{qy} + b_1 e^{-qy}) \quad (19)$$

对于区域 2:

$$\because d \ll R, \quad \therefore y \rightarrow \infty \text{ 时}$$

$$\mathbf{B} = 0, \quad a_2 = 0$$

则:

$$B_{x2} = b_2 \frac{q}{ik} e^{ikx} e^{-qy} \quad (20)$$

$$B_{y2} = b_2 e^{ikx} e^{-qy} \quad (21)$$

由边界条件:

$$B_{y1} \Big|_{y=0} = C e^{ikx} \quad (22)$$

其中:

$$B_{y1} \Big|_{y=\Delta} = B_{y2} \Big|_{y=\Delta} \quad (23)$$

$$B_{x1} \Big|_{y=\Delta} = \frac{1}{\mu_r} B_{x2} \Big|_{y=\Delta} \quad (24)$$

可得:

$$a_1 = C \left(1 - \frac{q}{\mu_r k} \right) \frac{e^{-k\Delta}}{2\gamma} \quad (25)$$

$$b_1 = C \left(1 + \frac{q}{\mu_r k} \right) \frac{e^{-k\Delta}}{2\gamma} \quad (26)$$

$$b_2 = C \frac{e^{q\Delta}}{\gamma} \tag{27}$$

其中: $\gamma = \cosh k\Delta + \frac{q}{\mu_r k} \sinh k\Delta$

4 力和损耗

作用在转子表面的磁场力可由M axw ell 应力张量计算^[8]:

$$F_x = - \frac{1}{\mu_0} \int (B_x B_y \, da) \tag{28}$$

$$F_y = - \frac{1}{2\mu_0} \int (B_y^2 - B_x^2) \, da \tag{29}$$

其中: s 为包围导体的任一闭合表面。这里选 s 为 $y = \Delta, x$ 从 0 到 $2\pi, z$ 从 0 到 b_0

$$F_x = \frac{i b l}{\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \overline{C_n}}{\gamma_n \overline{\gamma_n}} \frac{q_n - \overline{q_n}}{\mu_r k_n} \tag{30}$$

$$F_y = \frac{b l}{\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \overline{C_n}}{\gamma_n \overline{\gamma_n}} \frac{q_n \overline{q_n} - \frac{\mu_r^2 k_n^2}{\mu_0^2}}{\mu_r^2 k_n^2} \tag{31}$$

其中: $\overline{C_n}, \overline{q_n}$ 及 $\overline{\gamma_n}$ 分别为 C_n, q_n 及 γ_n 的共轭复数, 下标 n 指磁感应强度的第 n 次谐波。

损耗:

$$P = F_x V_x \tag{32}$$

式中: F_y 为转子径向所受的磁吸力, P 即为涡流引起的损耗。 F_x 即为由涡流引起的切向力, 其方向与转子旋转方向相反, 它将产生制动力矩, 从而对转子的运动产生阻尼, 制动力矩 M 为:

$$M = F_x R \tag{33}$$

5 实例计算

设电磁轴承定子为 36 齿, 对称使用其 32 极, 转子材料为 45# 钢, 工作间隙为 0.30 mm , 转子

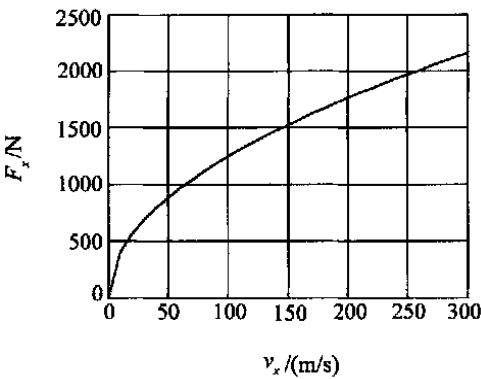


图 3 转子旋转时涡流损耗变化

Fig 3 Tangential force in the rotating rotor

直径 225 mm , 系统静态工作点的磁感应强度为

0.6 T, 磁轴承宽度 170 mm, 根据式 (30), (31) 及 (32) 分别计算其 F_x, F_y 和 P , 结果分别示于图 3、图 4 和图 5, 图 6 为其它参数不变的情况下, 转子采用不同材料时的涡流损耗。

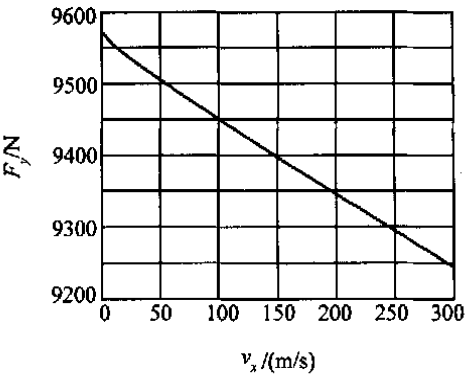


图 4 转子旋转时的磁吸力变化

Fig 4 Levitation force in the rotating rotor

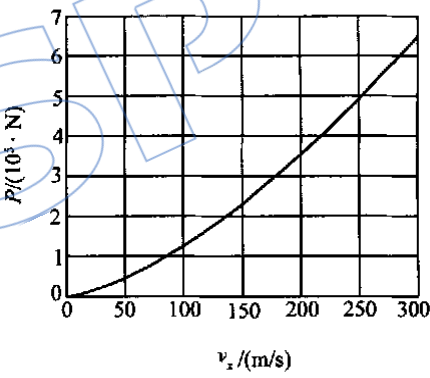


图 5 转子旋转时涡流损耗变化

Fig 5 Loss due to eddy current in the rotating rotor

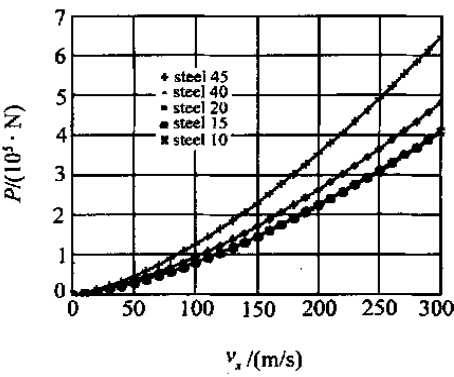


图 6 转子采用不同材料时的涡流损耗

Fig 6 Loss due to eddy current in the rotor with different materials

从图 3、图 4 中不难看出, 当 $\omega_k = 0$, 即静止悬浮时, 作用在转子上的磁场吸力最大, 而切向力为零, 随着转子旋转速度的增加, 磁场吸力减小, 切向力增加。由式(33)可知, 切向力的产生, 必然产生切向制动力矩, 从而引起运动阻尼, 这也就是通常意义上的磁阻尼。在目前电磁轴承的设计中, 主要还是采用磁路的方法以静止工作点为基础的设计, 由于当转子高速旋转时, 磁场吸力明显比静止悬浮时减小, 同时产生了切向制动力矩, 转子的运动状态显著不同于静止悬浮, 可见以静态工作点为基础的设计是不足的, 磁场吸力的减小必引起磁轴承所提供的刚度的减小, 对转子—磁轴承系统的稳定性产生影响。因此磁轴承的设计必须考虑旋转所引起的磁场力变化, 进行设计。

图 5 表明: 随着转子旋转速度的增加, 所引起的涡流损耗增加; 图 6 则说明: 对于采用非叠片结构的转子, 在转速一定时, 转子采用不同材料其涡流损失不同。当材料磁导率较小时, 涡流损失呈剧烈增长的趋势, 相应导致的磁阻尼会迅速增加。因此, 在设计时, 如果是出于减小损失的考虑, 应尽量选择相对磁导率较大, 而电导率较小的材料。

6 实 验

实验是在建立的某导弹转动惯量磁悬浮测试平台的电磁轴承系统^[9]上进行的, 该电磁轴承系统为五自由度控制系统, 其中包括两个径向磁轴承, 一个轴向磁轴承和一根非叠片转子, 转子为立式, 具体结构如图 7 所示。其中转子参数、轴承参数和系统部分参数如上所述。

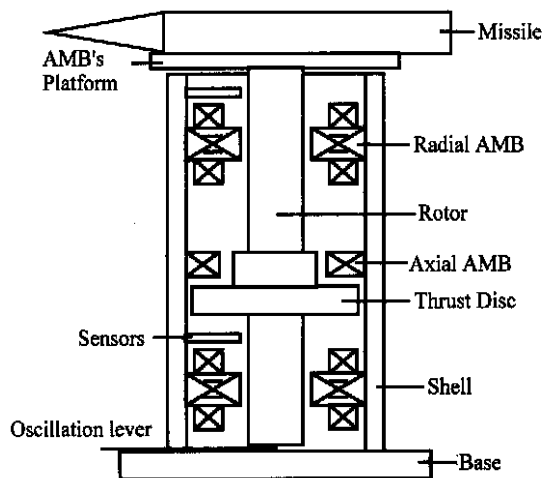


图 7 某电磁轴承系统结构示意图

Fig 7 The structure of the AMB system

由于该导弹转动惯量测试平台的特殊技术要求, 采用磁轴承提供一个稳定的弱阻尼支承系统。图 8 是当转子悬浮起来后, 给其预置一初始摆角, 释放后, 转子的摆角幅度轨迹, 摆角幅度呈明显的衰减, 衰减系数 $\delta = 0.09$ 。文献[6]研究表明, 在低速时, 因空气造成的阻力可忽略不计; 另外由计算可知, 由于存在作用在转子上的切向力, 产生切向制动力矩, 从而引起了旋转阻尼即磁阻尼, 该阻尼将使转子摆角幅度衰减。因此, 实验结果表明, 系统的确存在阻尼, 且导致了转子摆角幅度明显衰减, 说明计算分析与表现吻合。

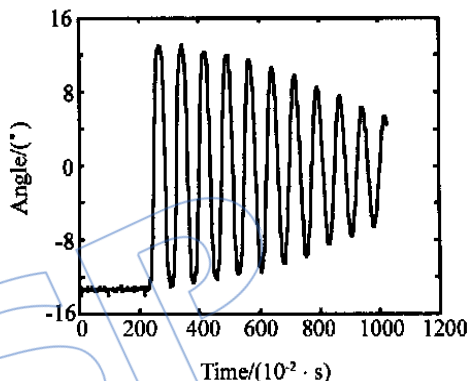


图 8 转子的摆角轨迹(预置角 12°)

Fig 8 Trace of rotor oscillation under initial angle 12°

当摆角一定时, 多次实验测得衰减系数 $\delta = 0.09 \pm 0.002$, 表明系统阻尼具有相当好的一致性。实验中观察到系统运行时系统温度上升, 因故未能对涡流损耗进行测量。

7 结 论

考察了实心转子—电磁轴承系统的磁场分布, 对其磁场力、损耗进行了计算。结果表明: 实心转子旋转引起涡流从而导致制动力矩, 产生磁阻尼; 磁轴承的设计必须考虑旋转引起的磁场力变化; 在电磁轴承系统中, 当采用实心转子结构时, 应尽量选择磁导率较大而电导率较小的材料。本文所建立的实心转子—电磁轴承系统的磁场分布模型及计算方法, 对于实心转子—电磁轴承一类系统中切向阻尼的物理解释及制动力矩计算具有实际的工程意义。

参考文献

- [1] Allaire P E, Kasarda M, Maslen E, et al Eddy Currents, Magnetic Flux and Force in Solid Magnetic Thrust Bear-

ings [R]. ETH Zurich: 4th Int. Symposium on Magnetic Bearings, 1994

[2] Liu S Q, Jiang D C, Yu L. Study on Construction Parameter Design of Magnetic Radial Bearing[R]. Xi'an: Proceedings of the IC- HBRSD '97. 1997.

[3] Jiang D C, Liu S Q, Yu L. Designing for the Constructional Parameters of Active Magnetic Thrust Bearings [R]. Xi'an: Proceedings of the IC- HBRSD '97. 1997.

[4] Meeker D C, Maslen E H, Noh M D. An Augmented Circuit Model for Magnetic Bearings Including Eddy Currents, Fringing, and Leakage[J]. IEEE Transactions on Magnetics 1996, 32(4): 3219- 3227.

[5] Meeker D C, Maslen E H. A Thin Plate Model for Predicting Rotating Losses in Magnetic bearings[R]. Kanazawa, Japan: 5th Int. Symposium on Magnetic Bearings 1996

[6] Mizuno T, Higuchi T. Experimental Measurement of Rotational Losses in Magnetic Bearings[R]. ETH Zurich: 4th Int. Symposium on Magnetic Bearings 1994

[7] Ahrens M, Kucera L. Analytical Calculation of Fields, Forces and Losses of a Radial Magnetic Bearing with a rotating Rotor Considering Eddy Currents[R]. Kanazawa, Japan: 5th. Int. Symposium on Magnetic Bearings 1996

[8] 林为干, 符果行, 邬琳若, 等. 电磁场理论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996

[9] 曹广忠, 张钢, 虞烈, 等. 电磁轴承系统的电气系统研究[J]. 机械科学与技术 1999, 18(2): 207- 209

