



电磁轴承绕组回路容错控制方法

赵文洁, 蒋科坚

(浙江理工大学信息学院, 杭州 310018)

摘要: 以 8 极结构的径向电磁轴承为研究对象, 为了提高多绕组回路运行的整体可靠性, 避免转子因悬浮失控而引发事故, 提出了 8 极径向电磁轴承绕组容错控制方法。首先, 当一个或多个绕组回路发生故障时, 该方法遵循最小功耗的分配策略, 将故障绕组的电磁力分配到其他正常绕组, 维持转子基本的悬浮状态, 为转子安全降速赢得时间, 从而消除或减轻转子在高速悬浮失控造成事故的损失; 其次, 对可以实现容错控制的故障形式进行归类, 每一种故障类型只需求解一个基本电流分配矩阵; 最后, 通过坐标变换矩阵和绕组重映射矩阵实现多绕组回路不同故障形式的容错控制。数值分析结果表明, 该容错方法能有效减少绕组电流的能量消耗, 简化容错控制过程, 提高系统的可靠性。

关键词: 主动电磁轴承; 容错控制; 电流分配矩阵; 坐标变换; 绕组重映射矩阵

中图分类号: TH133

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)03-0187-09

Fault tolerant control method for winding loop of electromagnetic bearings

ZHAO Wenjie, JIANG Kejian

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The radial electromagnetic bearing with eight-pole structure was chosen as the research object. In order to improve the overall reliability of multi-winding loop operation and avoid the accident caused by the suspension out-of-control of the rotor, a fault tolerant control method for radial electromagnetic bearing with eight-pole structure was proposed. Firstly, in the event of a fault in one or more of the winding loops, the method follows the distribution strategy of minimum power dissipation and distributes electromagnetic force of faulty winding to other normal windings to maintain basic suspension state of rotor and gain time for safe speed reduction of rotor so as to eliminate or relieve the loss caused by uncontrolled suspension at a high speed. Secondly, all the failure modes that can achieve fault tolerant control are categorized. Each fault type only needs to solve one basic current distribution matrix. Finally, the fault tolerant control of different fault modes in a multi-winding loop can be achieved through coordinate transformation and winding remapping matrix. Numerical analysis results show that the fault tolerant method can effectively reduce energy consumption of winding current, simplify the fault tolerant control process and improve the system reliability.

Key words: active electromagnetic bearing; fault tolerant control; current distribution matrix; coordinate transformation; winding remapping matrix

收稿日期: 2018-10-14 网络出版日期: 2018-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272288); 浙江省自然科学基金项目(LY18E050017)

作者简介: 赵文洁(1993-), 女, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事电磁轴承容错控制方面的研究。

通信作者: 蒋科坚, E-mail: jkjofozju@163.com

0 引言

主动电磁轴承是一种机电一体化轴承,通过可控的电磁力将转子稳定悬浮在期望位置,以达到类似传统轴承的转子支承效果。它消除了传统轴承存在摩擦的局限性,无需润滑,不发热,适合高速转子;并且在转子运行中,可以实现转子振动的在线主动控制,提高转子运行稳定性。电磁轴承因其性能优势,在转子系统的高端应用领域受到越来越广泛的关注。

最常用的8极结构径向电磁轴承,需要驱动8路绕组控制回路同时工作,只要一路绕组控制回路出现故障,转子悬浮将失控,引起事故。因此,电磁轴承运行的可靠性变得格外受到关注,自然地形成了对电磁轴承系统运行故障容错的研究需求。20世纪90年代,Maslen等^[1]在不考虑磁性材料漏磁和磁通饱和的前提下,提出了电磁轴承广义偏流线性化方法,该方法可以实现电磁力的解耦和线性化,成为研究容错控制问题的理论基础。Schroder等^[2]在偏置电流线性化理论的基础上,采用拉格朗日法求解电流分配矩阵,实现电磁轴承在故障情况下的稳定悬浮。Li等^[3]将原用于径向电磁轴承的偏置电流线性化理论推广到复合结构的电磁轴承中,并且用实验验证了容错算法的有效性。Na等^[4-6]对8极异极分布的径向电磁轴承展开研究,研究表明:在5个绕组控制回路同时故障的情况下仍可以实现容错控制,但故障绕组越多,电磁轴承的刚度和负载能力会随之下降。Jin等^[7]以一种永磁偏置4磁极结构的电磁轴承为研究对象,采用拉格朗日乘法计算电流分配矩阵,任何一个线圈发生故障,剩下的三个线圈会通过电流分配矩阵产生相同的电磁力,实现绕组的容错控制。

国内学者对电磁轴承容错控制的研究起步较晚。吴步洲等^[8-9]以多极独立驱动的径向电磁轴承为模型,提出基于控制器重构的容错方案,该方案考虑了磁路间的耦合,对不同磁极结构的电磁轴承具有普遍适用性。韩辅君等^[10]对一种 homopolar 结构的永磁偏置电磁轴承展开研究,根据力不变原理求得电流分配矩阵。崔东辉等^[11-12]对6极强耦合结构的径向电磁轴承进行仿真,并提出基于坐标变换的容错控制算法。耿青玲等^[13]研究了12磁极弱耦合结构的径向电磁轴承,提出相应的电流重构方法并进行了仿真分析。胡春桃^[14]对执行器故障导致不同磁极失效情况下转子的动态特性进行仿真,研

究结果为电磁力轴承实施可靠性的补偿策略提供依据。Cheng等^[15]提出了具有紧耦合冗余支撑结构的有源径向电磁轴承的容错控制策略,并分析了分流系数对电磁力的影响。程鑫等^[16]以ARM和DSP的双核处理器为架构,在软件上完成双向信息的交互,实现电磁轴承系统在多自由度上的容错控制,并用实验证明了该双核处理器的有效性。胡俊等^[17]以交叉冗余结构的位移传感器为研究对象,使硬件冗余技术与小波分析方法相结合,提出了一种传感器故障识别与判定的方法,并利用Matlab进行仿真,研究结果表明该方法不仅能够快速检测传感器故障,而且为传感器的容错控制提供基础。

为提高电磁轴承多绕组回路运行的整体可靠性,本文以8极径向电磁轴承为研究对象,提出电磁轴承绕组容错控制算法。该算法以最小能耗为目标函数求解电流分配矩阵,使得一个或多个绕组回路故障时,可以将故障绕组的电磁力分配到其他正常绕组,维持转子基本的悬浮状态并保证各绕组回路中电流消耗的能量最少。另外,对所有可以实现容错控制的故障形式进行归类,求出每种故障类型的基本电流分配矩阵,同一类故障的电流分配矩阵可以通过基本电流分配矩阵乘以绕组重映射矩阵和坐标变换矩阵得到,从而减少电流分配矩阵的求解次数、简化容错控制过程。

1 电磁轴承电磁力的一般表达式

8极结构是最常用的径向电磁轴承定子结构设计,通常采用差动驱动方式,电磁轴承8极C型定子结构如图1所示。相邻两个定子极的绕组串联组成一个C型磁极。定子径向平面内的4个C型磁极能产生 x 、 y 轴正反4个坐标方向的电磁力,控制转子悬浮。

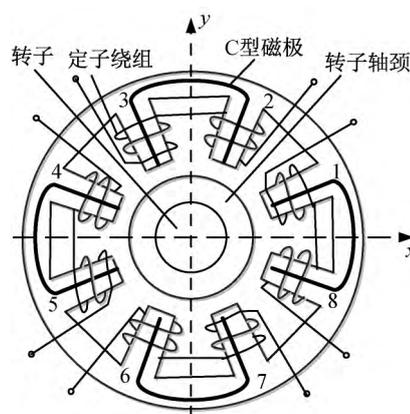


图1 径向电磁轴承8极C型定子结构

根据麦克斯韦电磁力方程,第 $j(j=1,2,\dots,8)$ 个定子极的绕组控制回路产生的电磁力为:

$$F_j = \frac{AN^2\mu_0 I_j^2}{2X_j^2} \quad (1)$$

式中: μ_0 是真空磁导率, A 为磁路有效横截面积, N 为每个定子极的绕组匝数, I_j 为第 j 个绕组回路的电流, X_j 为第 j 个定子与转子间的气隙长度。在传统的结构中,采用差动控制使 4 个 C 型磁极产生 4 个坐标轴方向的电磁力,但是无法实现容错。为了实现一个或多个绕组回路故障的容错控制,需要将每个 C 型磁极拆分成 2 个独立磁极,得到 8 极独立定子结构如图 2 所示。其中: a_1, a_2, \dots, a_8 分别表示磁极 1、磁极 2 到磁极 8 上的绕组。

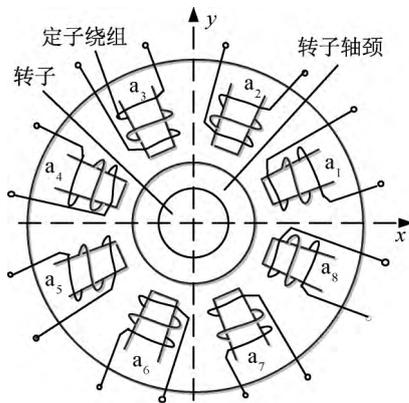


图 2 径向电磁轴承 8 极独立定子结构

每个定子极上是独立的绕组,共形成 8 路独立的绕组控制回路。当一个或几个绕组回路故障时,仍可实现容错控制。8 极径向电磁轴承的每个绕组控制回路通电后会对转子产生不同方向的电磁力,令第 j 个绕组回路产生的电磁力与 x 轴夹角为 θ_j ,各绕组回路电流列向量为 $I = [I_1 I_2 I_3 I_4 I_5 I_6 I_7 I_8]^T$,气隙长度的对角矩阵为 $X = \text{diag}[X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8]^T$ 。故转子在 x 轴和 y 轴方向受到电磁合力为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{AN^2\mu_0}{2} I^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} I \\ F_y = \frac{AN^2\mu_0}{2} I^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} I \\ D_x = \text{diag}(\cos\theta_1, \cos\theta_2, \cos\theta_3, \cos\theta_4, \\ \cos\theta_5, \cos\theta_6, \cos\theta_7, \cos\theta_8) \\ D_y = \text{diag}(\sin\theta_1, \sin\theta_2, \sin\theta_3, \sin\theta_4, \\ \sin\theta_5, \sin\theta_6, \sin\theta_7, \sin\theta_8) \end{cases} \quad (2)$$

当电磁轴承结构固定时, D_x 和 D_y 为常数矩阵。

2 电磁轴承绕组回路容错控制

当一个或几个磁极的电磁力故障时,通过电流分配矩阵重构将故障磁极的电磁力重新分配到其他正常磁极上,从而实现容错运行。

2.1 电流分配矩阵的重构

控制器输出信号用电流控制向量表示为 $I_c = [i_b \ i_x \ i_y]^T$,其中 i_b 为偏置电流, i_x, i_y 分别为 x, y 轴方向的控制电流。引入电流分配矩阵 W ,它将偏置电流 i_b 和控制电流 i_x, i_y 分配为电磁轴承的 8 个独立绕组中的电流,得到一个电流分配方案为:

$$I = WI_c \quad (3)$$

由式(3)可知,电流分配矩阵 W 是一个 8 行 3 列的矩阵。将式(3)代入式(2)中,得到转子在 x 轴和 y 轴方向受到的电磁合力与各磁极电流的关系为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{AN^2\mu_0}{2} I_c^T W^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} WI_c \\ F_y = \frac{AN^2\mu_0}{2} I_c^T W^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} WI_c \end{cases} \quad (4)$$

由分析可知, x 和 y 方向的电磁合力是气隙长度矩阵 X 和控制电流向量 I_c 的函数。若能建立 x, y 轴方向的电磁合力与 x, y 方向控制电流的函数关系如下所示:

$$\begin{cases} F_x = f(i_x) \\ F_y = f(i_y) \end{cases} \quad (5)$$

那么只要确定电磁轴承稳定悬浮时所需要的电磁力,就可以求解控制电流的大小。为了 x, y 轴方向的电磁合力能转换成如式(5)所示的函数,电流分配矩阵 W 必须满足以下条件:

$$\begin{cases} W^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ W^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)中,则转子在 x, y 轴方向受到的电磁合力可以写成如下形式:

$$\begin{cases} F_x = \frac{AN^2\mu_0}{2} [i_b \ i_x \ i_y] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \\ F_y = \frac{AN^2\mu_0}{2} [i_b \ i_x \ i_y] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

化简式(7)得到:

$$\begin{cases} F_x = c_0 \cdot i_x \\ F_y = c_0 \cdot i_y \end{cases} \quad (8)$$

其中 $c_0 = \frac{AN^2\mu_0}{2}i_b$, 当电磁轴承给定且偏置电流恒定时, c_0 为常数。由式(8)分析可知, 当电流分配矩阵 W 满足式(6)时, x 、 y 方向的电磁合力就转换成 x 、 y 方向控制电流的线性函数, 此时控制电流向量可由电磁力确定为:

$$I_c = \begin{bmatrix} i_b \\ \frac{F_x}{c_0} \\ \frac{F_y}{c_0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由将式(9)代入式(3)可知, 经过电流分配矩阵后, 各绕组回路的电流列向量为:

$$I = WI_c = W \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ \frac{F_x}{c_0} \\ \frac{F_y}{c_0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2 最小功耗下电流分配矩阵的求解

根据式(10), 为提供电磁轴承悬浮时所需要的电磁力, 各个绕组回路的电流分配不是唯一的, 即要产生同样的电磁力, 可以有多个 W 满足要求。在不考虑漏磁和磁通饱和的情况下, 本文提出以最小能耗为最优目标, 求解电流分配矩阵。该方法在提供电磁轴承稳定悬浮所需要的电磁力的同时, 保证各绕组回路电流消耗的能量最少。因此采用各绕组回路电流的平方和作为容错最优控制的目标函数, 可表示为:

$$J(W) = I^T I \quad (11)$$

其中 $J(W)$ 为目标函数的瞬时值。因此电流分配矩阵 W 求解问题可以归纳为: 解得一个电流分配矩阵 W , 使式(11)达到最小值, 同时满足式(6)。电流分配矩阵 W 是一个 8 行 3 列的矩阵, 令

$$\begin{cases} W = [W_b \ W_x \ W_y] \\ W_b = [W_{b1} \ W_{b2} \ W_{b3} \ W_{b4} \ W_{b5} \ W_{b6} \ W_{b7} \ W_{b8}]^T \\ W_x = [W_{x1} \ W_{x2} \ W_{x3} \ W_{x4} \ W_{x5} \ W_{x6} \ W_{x7} \ W_{x8}]^T \\ W_y = [W_{y1} \ W_{y2} \ W_{y3} \ W_{y4} \ W_{y5} \ W_{y6} \ W_{y7} \ W_{y8}]^T \end{cases} \quad (12)$$

其中 W_b 、 W_x 、 W_y 都为列向量。将式(12)代入式(6)中得到 18 个等式方程。由于 M_x 、 M_y 是对称矩阵, 所以约束条件就转换成 12 个不同的标量等式方程组。

$$\begin{cases} h_1(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_b = 0 \\ h_2(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_x - Q_5 = 0 \\ h_3(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_y = 0 \\ h_4(W) = W_x^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_x = 0 \\ h_5(W) = W_x^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_y = 0 \\ h_6(W) = W_y^T (X^{-1})^T D_x X^{-1} W_y = 0 \\ h_7(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_b = 0 \\ h_8(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_x = 0 \\ h_9(W) = W_b^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_y - Q_5 = 0 \\ h_{10}(W) = W_x^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_x = 0 \\ h_{11}(W) = W_x^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_y = 0 \\ h_{12}(W) = W_y^T (X^{-1})^T D_y X^{-1} W_y = 0 \end{cases} \quad (13)$$

因此, 电流分配矩阵 W 的最优求解问题转换成了目标函数在 12 个约束条件下的最小值求解问题。在数值分析理论中, 拉格朗日乘数法可以求解此类问题。

拉格朗日乘数法是一种求解变量受一个或多个条件约束下的多元函数极值的方法。通过引入拉格朗日乘数将一个有 n 个变量与 k 个约束条件的最优化问题转换为一个有 $n+k$ 个变量的方程组极值问题, 其变量不受任何约束。再对 $n+k$ 个变量分别求偏微分, 从而找到可以满足约束条件的最优解。具体如下:

引入拉格朗日系数, 构建拉格朗日函数为:

$$L(W) = I^T I + \sum_{j=1}^{12} \lambda_j h_j(W) \quad (14)$$

式中 λ_j 为拉格朗日系数。对拉格朗日函数 $L(W)$ 求 W 矩阵中各变量的偏微分为 0, 即:

$$\begin{cases} f_i = \frac{\partial L(W)}{\partial W_{bi}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \\ f_{8+i} = \frac{\partial L(W)}{\partial W_{xi}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \\ f_{16+i} = \frac{\partial L(W)}{\partial W_{yi}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (15)$$

对拉格朗日函数 $L(W)$ 求拉格朗日系数 λ_j 的偏微分为 0, 即:

$$f_{j+24} = \frac{\partial L(W)}{\partial \lambda_j} = h_j(W) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (16)$$

联立式(15)和式(16)得到非线性代数等式方程组为:

$$F(W, \lambda) = \begin{bmatrix} f_1(W, \lambda) \\ f_2(W, \lambda) \\ \vdots \\ f_{36}(W, \lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用 Matlab 的工具函数可以求解出方程组 (17)。方程组的解就是在最小功耗下的电流分配矩阵,从而实现绕组回路故障时的最优容错控制。

3 故障容错的分类归纳

为了进一步归纳出统一的容错算法,对所有可容错的故障进行分类归纳。把通过旋转能得到相同的故障磁极分布视为同一种故障类型,只需求解 1 个基本电流分配矩阵,同种故障类型的电流分配矩阵可以通过基本电流分配矩阵进行坐标旋转得到。当第 1 个绕组控制回路故障时,建立坐标系 xoy ,图 3 为第 1 个绕组回路故障的模型图。设定其为基本故障模型图,求出对应的基本电流分配矩阵 W_1 。

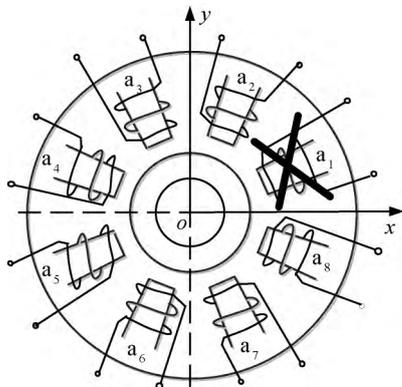


图 3 第 1 个绕组回路的基本故障模型图

电流分配矩阵 W_1 将控制电流向量 I_c 分配到 8 路绕组控制回路中,得到各绕组回路电流的列向量为:

$$I = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6 \ I_7 \ I_8]^T = W_1 \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 $I_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 为绕组 a_j 中的电流。当第 $j (j=1, 2, \dots, 8)$ 个绕组控制回路故障时,基本故障模型图逆时针旋转 θ_j 度会得到第 j 个绕组故障模型图完全相同的故障磁极分布,此时有:

$$\theta_j = \frac{\pi}{4}(j-1) \quad (19)$$

因此,将第 1 个绕组回路故障与第 j 个绕组回路故障归于同一种故障类型,利用同一个电流分配矩阵 W_1 实现容错控制。第 j 个绕组控制回路故障时,对应式(18)此时有:

$$I' = W_1 \cdot \begin{bmatrix} i_{bj} \\ i_{xj} \\ i_{yj} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: i_{xj} 和 i_{yj} 为第 j 个绕组回路故障时的控制电

流, i_{bj} 为此时的偏置电流。根据坐标变换公式有:

$$\begin{bmatrix} i_{bj} \\ i_{xj} \\ i_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_j & \sin\theta_j \\ 0 & -\sin\theta_j & \cos\theta_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (21)$$

令

$$G_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_j & \sin\theta_j \\ 0 & -\sin\theta_j & \cos\theta_j \end{bmatrix} \quad (22)$$

则式(21)可写为:

$$\begin{bmatrix} i_{bj} \\ i_{xj} \\ i_{yj} \end{bmatrix} = G_j \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (23)$$

G_j 为第 j 个绕组回路故障时的坐标变换矩阵。基本故障模型图逆时针旋转 θ_j 度后,由于绕组一一对应关系,此时有:

$$\left\{ \begin{aligned} I &= (E_{87} E_{76} E_{65} E_{54} E_{43} E_{32} E_{21})^{j-1} T_1 \cdot I' \\ T_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (24)$$

其中 T_1 为 8 行 8 列的单位对角矩阵,初等矩阵 E_{ij} 表示单位矩阵的第 i 行和第 j 行交换位置,令

$$T_j = (E_{87} E_{76} E_{65} E_{54} E_{43} E_{32} E_{21})^{j-1} T_1 \quad (25)$$

T_j 为第 j 个绕组控制回路故障时的重映射矩阵,则式(24)可简写为:

$$I = T_j \cdot I' \quad (26)$$

将式(20)和式(23)代入式(26)得到第 j 个绕组回路故障时,经过容错控制后各绕组的电流为:

$$I = T_j W_1 G_j \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (27)$$

由式(27)可知,第 j 个绕组回路故障的电流分配矩阵为:

$$W_j = T_j W_1 G_j \quad (28)$$

由以上分析可知,任何一路绕组控制回路故障对于整个系统而言都是同种类型的故障,其容错控制的原理框图如图 4 所示。由图 4 可知,当电磁轴承出现同种类型的故障时,只需求出每种故

障类型对应的基本电流分配矩阵,再根据坐标变换矩阵和绕组重映射矩阵就可以求出任一绕组回

路故障后的电流分配方案,实现电磁轴承的容错控制。

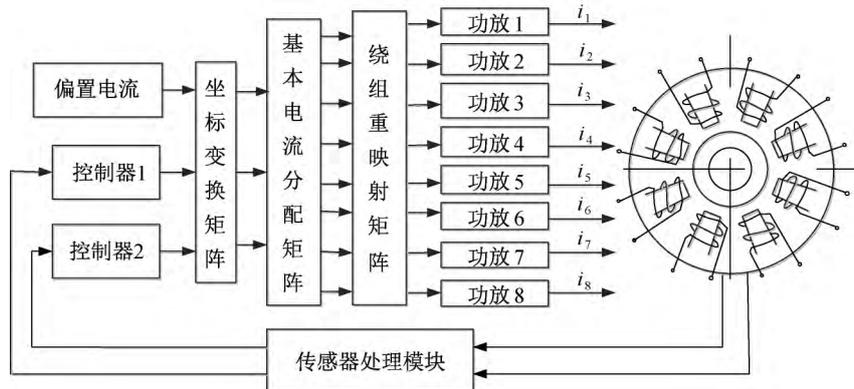


图4 基于坐标变换和绕组重映射矩阵的容错控制原理框图

4 数值验证与分析

4.1 能耗减小验证与分析

为了对传统差动控制和本文提出的可容错控制进行能耗比较,验证经过电流分配矩阵后的可容错控制比传统差动控制的能耗更低,设各绕组回路中的电流为 I_1, I_2, \dots, I_8 ,对于8极独立绕组结构的径向电磁轴承,其电流平方和为:

$$\sum_{i=1}^8 I_i^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + I_8^2 \quad (29)$$

8极C型定子结构的径向电磁轴承采用差动控制时,通常将相邻两个定子极的绕组串联,此时有:

$$\begin{cases} I_1 = I_8 = i_b + i_x \\ I_2 = I_3 = i_b + i_y \\ I_4 = I_5 = i_b - i_x \\ I_6 = I_7 = i_b - i_y \end{cases} \quad (30)$$

差动控制消耗的电流平方和为:

$$\sum_{i=1}^8 I_i^2 = 2(i_b + i_x)^2 + 2(i_b + i_y)^2 + 2(i_b - i_x)^2 + 2(i_b - i_y)^2 \quad (31)$$

当转子在 x 轴方向处于平衡位置且仅有偏置电流提供电磁力,设置偏置电流 $i_b = 2$ A。要在 y 轴正方向分别产生 0、1、2、3、4、5 A 的电磁力,对普通差动结构和本文的可容错结构进行功耗比较。以一套实际的电磁轴承参数作为分析样本进行数值验证,电磁轴承基本参数见表1。

表1 电磁轴承基本参数

参数	数值
气隙 X/mm	0.5
真空磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$
磁路横截面积 A/m^2	2.928×10^{-4}
线圈匝数 $N/\text{匝}$	200
转子质量 m/kg	9.998

为了提供与差动控制相同的电磁力,利用最小功耗的方法,求得 $i_y = 0$ A 时的电流分配矩阵 W_0 为:

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0.7105 & -0.5315 & 0.1579 \\ 0.8657 & -0.2609 & -0.6040 \\ 1.2059 & -0.2710 & 0.8572 \\ 0.9309 & 0.0223 & -0.8342 \\ 0.7871 & 0.1230 & -0.3808 \\ 0.5321 & -0.3013 & -0.1023 \\ 1.3815 & 0.4233 & -0.6587 \\ 0.8221 & -0.3152 & 0.3690 \end{bmatrix},$$

$i_y = 1$ A 时的电流分配矩阵 W_1 为:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1.1553 & -0.0366 & -1.0338 \\ 1.6423 & -0.1794 & -0.8990 \\ 1.5127 & -0.6330 & 0.7288 \\ 1.0234 & 0.5845 & -0.4133 \\ 0.5589 & -0.2084 & -0.3168 \\ 0.8871 & -0.5802 & -0.2206 \\ 0.8845 & 0.0525 & -0.6351 \\ 0.7295 & 0.2691 & 0.3437 \end{bmatrix},$$

$i_y = 2$ A 时的电流分配矩阵 W_2 为:

$$W_2 = \begin{bmatrix} 1.2097 & -1.0081 & -0.2084 \\ 1.5378 & -0.4125 & 1.0833 \\ 1.5023 & -0.2223 & 1.0116 \\ 1.1035 & -0.8616 & -0.2585 \\ 0.8233 & -0.5069 & -0.2950 \\ 0.8220 & -0.3311 & -0.3602 \\ 0.5094 & -0.4128 & -0.0606 \\ 0.6740 & 0.3590 & -0.3323 \end{bmatrix},$$

$i_y = 3 \text{ A}$ 时的电流分配矩阵 W_3 为：

$$W_3 = \begin{bmatrix} 1.2065 & -1.0062 & -0.2001 \\ 1.6387 & -0.4125 & 1.1831 \\ 1.5182 & -0.3145 & 1.2002 \\ 1.2135 & -0.7216 & -0.3229 \\ 0.7989 & -0.5069 & -0.2949 \\ 0.8218 & -0.3299 & -0.3599 \\ 0.3100 & -0.2031 & -0.1010 \\ 0.4739 & -0.2600 & -0.2102 \end{bmatrix},$$

$i_y = 4 \text{ A}$ 时的电流分配矩阵 W_4 为：

$$W_4 = \begin{bmatrix} 1.2925 & -0.0138 & 0.0787 \\ 1.6952 & -0.3369 & 1.0214 \\ 1.6065 & 0.0103 & 1.2733 \\ 2.1302 & -1.1086 & -0.9208 \\ 2.1216 & -0.1461 & -1.8972 \\ 0.3979 & 0.0063 & -0.2677 \\ 0.2659 & -0.0648 & -0.1014 \\ 1.2468 & 0.1114 & -1.0333 \end{bmatrix},$$

$i_y = 5 \text{ A}$ 时的电流分配矩阵 W_5 为：

$$W_5 = \begin{bmatrix} 2.0545 & 1.0025 & -1.0691 \\ 2.0570 & -0.2990 & 1.0797 \\ 1.6634 & -0.4095 & 1.1731 \\ 1.2748 & 0.5820 & -0.3461 \\ 2.5218 & -1.0784 & -1.4796 \\ 2.0612 & 0.6089 & -1.3540 \\ -0.7084 & 0.0810 & 0.6191 \\ 0.6996 & -0.2599 & -0.4217 \end{bmatrix}。$$

由式(29)和式(31)进行计算,差动控制的能耗与可容错控制的能耗对比结果见表2。根据表2的数据,绘制出图5。

表 2 能耗对比

y 轴控制 电流/A	消耗的电流平方和/A ²	
	差动控制	可容错控制
0	32	27
1	36	33
2	48	44
3	66	56
4	88	72
5	114	96

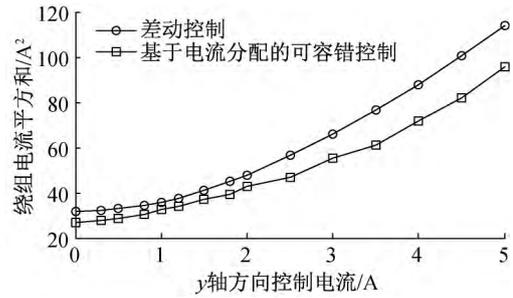


图 5 差动控制与可容错控制的能耗曲线

由图5可知,在提供相同电磁力时,与差动控制相比,在最小功耗目标函数下求得的电流分配矩阵使得电磁轴承的能耗更低。图中,在2 A以下差动控制的线性区内,两条曲线间隔较小。当电流超过2 A,差动控制的电磁力由单边磁极产生,两条曲线的间距明显增大,说明本文提出的可容错结构能耗节省更明显。

4.2 容错控制算例验证与分析

在不考虑漏磁及磁饱和效应的前提下,验证和分析容错前后的电磁力等价关系。只要保证在每个采样周期内,容错前后的电磁力完全相同,也就保证了电磁轴承的悬浮状况不变。

当采用差动控制使电磁轴承稳定悬浮在期望的平衡位置时, $i_b = 2 \text{ A}$, $i_x = 0 \text{ A}$, $i_y = 0.919 \text{ A}$, x 轴方向的电磁合力为0, y 轴电磁合力为正方向99.9786 N。当不考虑磁极间的耦合作用时,各磁极电磁力的分布如图6所示。

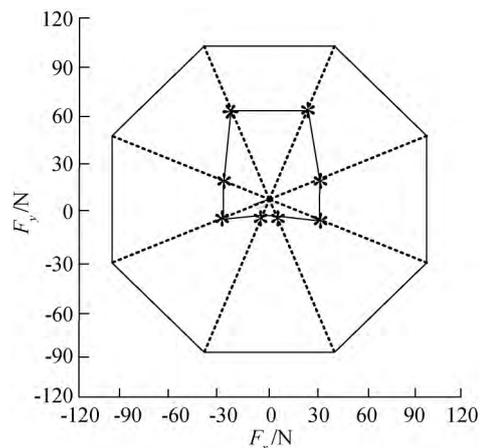


图 6 差动控制的电磁力分布

采用基于电流分配矩阵的可容错控制时,为了提供与差动控制相同的电磁合力,求得此时的电流分配矩阵为 W_a ：

$$W_a = \begin{bmatrix} 0.0221 & -0.1326 & -0.0022 \\ 1.2988 & 0.3621 & 1.0296 \\ 1.2990 & 0.3622 & 1.0297 \\ 0.0221 & 0.0198 & -0.0022 \\ 0.0220 & 0.0198 & -0.0023 \\ 1.1060 & -0.0227 & -2.1349 \\ 1.1061 & -0.0226 & -2.1350 \\ 0.0221 & -0.1322 & -0.0220 \end{bmatrix}。$$

经过电流分配矩阵 W_a 后,各个绕组回路产生的电磁力如图 7 所示。由图 7 可知,经过电流分配矩阵 W_a 后, y 轴正方向的电磁力主要由第 2 个和第 3 个绕组控制回路提供,需要克服 y 轴负方向的电磁力和重力,最终实现 y 轴方向的平衡。此时 x 轴方向的电磁合力也为 0,但与图 6 相比, x 轴正负方向产生的电磁力更小,能耗自然也就更低、更节能。

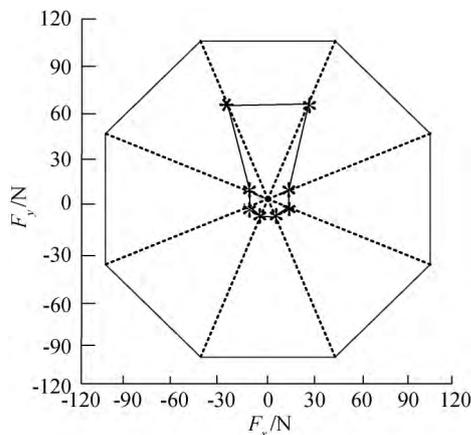


图 7 电流分配矩阵 W_a 重构后的电磁力分布

当电磁轴承绕组控制回路出现故障时,假设故障的是第 3 个磁极上的绕组回路,此时对应的电流分配矩阵为 W_b :

$$W_b = \begin{bmatrix} 1.3037 & 0.0915 & -1.0885 \\ 2.3020 & -0.0637 & -0.8531 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.2843 & -0.5372 & 0.0708 \\ 1.3610 & -0.2303 & -1.0658 \\ 1.1177 & 1.0992 & -0.0178 \\ -0.5015 & 0.2059 & 2.6668 \\ 0.0901 & -0.1033 & 0.4132 \end{bmatrix}。$$

经过电流分配矩阵 W_b 后,各个绕组回路产生的电磁力如图 8 所示。由图 8 可知,此时第 3 个绕组回路提供的电磁力为零, y 轴正方向的电磁力主要由第 2 个绕组回路提供。由图 6—图 8 可知,无论绕组完好或存在故障,经过电流分配矩阵控制后都能在 x 轴和 y 轴方向提供相同的电磁合力,即都

能提供电磁轴承稳定悬浮时所需要的电磁力,保证电磁轴承得悬浮状态不变。

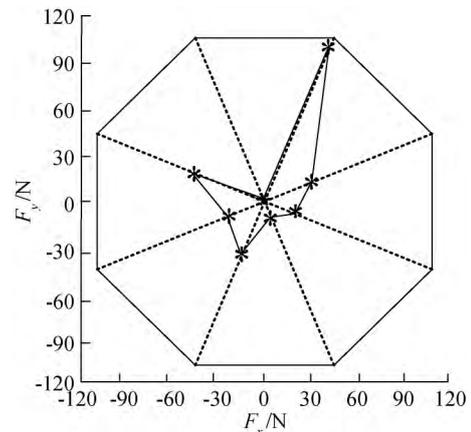


图 8 第 3 个绕组回路故障时的电磁力分布

5 结论

本文提出了以最小功耗产生相同电磁力的容错控制方法。该方法采用电流平方和作为最小功耗的目标函数,在提供相同电磁力的同时,保证各绕组回路电流消耗的能量最少。此外,对电磁轴承故障形式进行归纳总结,同一故障类型的电流分配矩阵可以通过基本电流分配矩阵乘以绕组重映射矩阵和坐标变换矩阵得到,从而减少电流分配矩阵的求解次数,简化控制过程。数值算例的验证结果表明:本文提出的容错控制方法能够在绕组故障时提供电磁轴承稳定悬浮所需要的电磁力,且在提供相同的电磁力时,与传统差动控制相比,该控制结构的能耗更低。

参考文献:

- [1] Maslen E H, Meeker D C. Fault tolerance of magnetic bearings by generalized bias current linearization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31 (3): 2304-2314.
- [2] Schroder P, Chipperfield A J, Felming P J. Fault tolerant control of active magnetic bearings [C]// International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 1998: 573-578.
- [3] Li M H, Palazzolo A B, Kenny A. Fault-tolerant homopolar magnetic bearings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 40(5): 3308-3318.
- [4] Na U J, Palazzolo A B. Optimized realization of fault-tolerant heteropolar magnetic bearings[J]. Vibration & Acoustics, 2000, 122(3): 209-221.
- [5] Na U J. Fault tolerance of homopolar magnetic bearings [J]. Sound & Vibration, 2004, 272(3): 495-511.

- [6] Na U J, Jin S W, Kang H O. Bidirectional homopolar magnetic bearings with fault tolerant capability[C]// Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, IEEE, 2007: 2254-2257.
- [7] Jin S W, Na U J. Design of flux invariant, fault tolerant homopolar magnetic bearings[C]// Proceedings of the International Joint Conference, IEEE, 2007: 3470-3473.
- [8] 吴步洲, 孙岩桦, 王世琥, 等. 径向电磁轴承线圈容错控制研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 157-162.
- [9] 景敏卿, 周健, 吴步洲, 等. 基于电流重新分配的电磁轴承的线圈容错控制[J]. 系统仿真学报, 2005, (s2): 121-124.
- [10] 韩辅君, 房建成. 一种永磁偏置磁轴承容错方法的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 34-40.
- [11] 崔东辉, 徐龙祥. 基于坐标变换的径向主动磁轴承容错控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1420-1425.
- [12] 崔东辉. 高可靠磁悬浮轴承系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 49-58.
- [13] 耿青玲, 张黎. 电流再分配方法在弱耦合径向磁力轴承执行器容错控制中的应用[J]. 机械工程师, 2016(6): 105-108.
- [14] 胡春桃. 执行器故障对磁力轴承性能影响的研究[J]. 现代制造, 2015(18): 160-162.
- [15] Cheng X, Liu H, Song S. Reconfiguration of tightly-coupled redundant supporting structure in active magnetic bearings under the failures of electromagnetic actuators[J]. Journal of the International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2017, 54(3): 421-432.
- [16] 程鑫, 刘晗, 王博, 等. 基于双核处理器的主动磁悬浮轴承容错控制架构[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(2): 72-80.
- [17] 胡俊, 胡业发, 程鑫, 等. 基于小波变换的磁悬浮轴承冗余位移传感器故障诊断方法[J]. 制造业自动化, 2017, 39(4): 79-83.

(责任编辑:康 锋)