

开关磁阻电机转子偏心时的不平衡电磁力建模与分析

Modeling and Analysis of Unbalance Electromagnetic Forces for SRM with Eccentric Rotor

周强 刘闯

南京航空航天大学自动化学院航空电源重点实验室

摘要:开关磁阻电机 (SRM) 结构简单坚固特别适合高速运行。转子动力学设计是高速电机设计中的重要环节,而SRM转子不仅受到机械的离心力而且还存在非线性的磁拉力,两者之间具有高度的耦合。本文基于JMAG-Studio软件,计算了转子偏心时SRM在各种电流、角度和偏心度下的不平衡电磁力,建立了SRM小偏心时不平衡电磁力的分析模型。

关键词:开关磁阻电机 转子动力学 不平衡电磁力 有限元分析 JMAG-Studio

Abstract: Switched reluctance motor (SRM) is suited for high speed applications because of the simple and robust structure. The rotor dynamics design is the important step in designing high speed machine. The rotor system of SRM is a typical nonlinear system which refers to strong coupling with electromagnetism and mechanism. Based on the JMAG-Studio software, the unbalance electromagnetic forces of SRM with eccentric rotor under different currents and eccentricity were calculated in this paper. Finally, the analysis model of unbalance electromagnetic forces of SRM with eccentric rotor is established by the author

Key words: Switched Reluctance Motor Rotor Dynamics Unbalance Electromagnetic Forces Finite Element Analysis JMAG-Studio

1. 引言

转子动力学设计是旋转机械设计中的重要环节,而预计临界转速、计算不平衡响应又是其主要内容。由于机械加工或装配上的误差,旋转机械的转子总是存在偏心,从而在旋转时产生离心力。这种旋转离心力将使旋转机械产生弯曲振动。电机作为机电一体化的设备,电机转子不仅受到机械离心力同时还存在不平衡的电磁拉力,并且它们是紧密耦合的。因此,电机转子振动的来源主要包括转子偏心产生的惯性离心力和不平衡电磁力。当其中的任意一种激励的频率达到转子的固有频率时,转子的振动都会加剧,引起共振,对电机的运行安全带来危害。因此,预测电机的转子动力学特性对于电机的高速可靠运行是非常有必要的^[1]。

开关磁阻电机 (SRM) 特别适合高速运行。但是 SRM 转子偏心时,将会带来不平衡电磁力作用于转子,从而有进一步加剧电机的偏心的趋势。因此,SRM 的不平衡电磁力的计算是一个多变量、强耦

合、非线性的问题，目前可以采用结构、电磁耦合的有限元法来求解，但算法复杂且对于计算资源要求极高。而本文通过建立 SRM 的转子偏心的有限元分析模型，对不同偏心度和各种电流下的不平衡电磁力进行一系列的有限元计算，进而总结 SRM 不平衡电磁力特有的性质，建立了 SRM 小偏心时不平衡电磁力分析模型，避免了复杂的耦合计算，为高速 SRM 转子动力学的进一步研究提供了思路。

2. 转子偏心的 SRM 有限元建模

本文分析的电机为一台 6/2 结构的高速 SRM，电机额定转速 100,000rpm，额定功率 500w，铁心材料采用 35DW250，电机气隙长度为 0.3mm。基于 JMAG-Studio 的 2D 瞬态分析模块，建立该样机转子偏心时的有限元分析模型^[2]（如图 1 所示）。

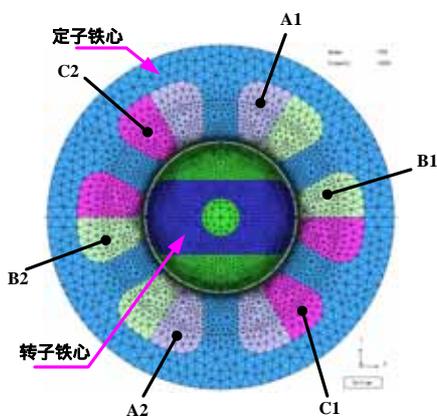


图 1 样机截面图及有限元模型

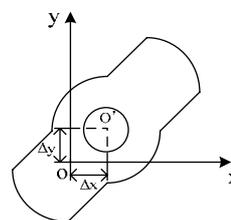


图 2 转子偏心的示意图

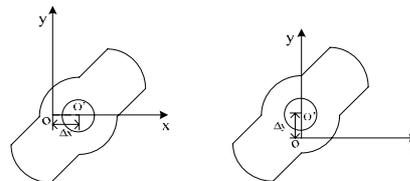


图 3 转子偏心的分解

如图 2 所示，由于机械加工或装配上的误差，电机转子的几何中心 O' 不可能完全在定子的几何中心 O 上。建立有限元模型时，人为的使转子中心 O' 和定子中心 O 相偏离，通过设定一系列的偏心值，来计算不同电流和不同角度下的不平衡电磁力。

3. 不平衡电磁力静态特性

基于 JMAG-Studio 软件，对样机在偏心情况下受到的不平衡电磁力静态特性进行研究，分别分析转子偏心距离、相电流和转子角度等参数对不平衡电磁力的影响。由于电机的对称性，仅需研究转子中心存在一个象限的偏心的情况，其他象限可以根据电机结构的对称性推出。为简化分析，本文仅研究单相通电的情况。假设图 1 中线圈 A1 和 A2 中的电流分别为 i_1 和 i_2 ，将转子的偏心在图 2 所示的坐标系下的 x 方向和 y 方向上进行分解，转子的偏心距离可表示为 $(\Delta x, \Delta y)$ ，转子的角度为 θ ，令 F_x 和 F_y 分别为 x 和 y 方向受到的不平衡电磁力。显然，此时转子上受到不平衡电磁力将有唯一解。为这五个参数的函数。为进一步简化，仅分析该相的两个线圈为串联方式下的不平衡电磁力。此时， i_1 和 i_2 可以用相电流 i 来代替，则不平衡电磁力可表达如下：

$$F_x = F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i), \quad F_y = F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i) \quad (1)$$

3.1 偏心距离的影响

假设转子偏心 $(\Delta x, \Delta y)$ ，将转子的偏心分解为图 3 所示的 $(\Delta x, 0)$ 和 $(0, \Delta y)$ 两种情况，对三种偏心情况进行仿真分别计算不平衡电磁力，考察 $(\Delta x, \Delta y)$ 是否满足 $(\Delta x, 0)$ 和 $(0, \Delta y)$ 的线性叠加关系。图 4、图 5 和图 6 分别为不同偏心距离、不同电流条件下，实际不平衡电磁力和分解为两种情况后分别计算的不平衡电磁力的合力的关系。

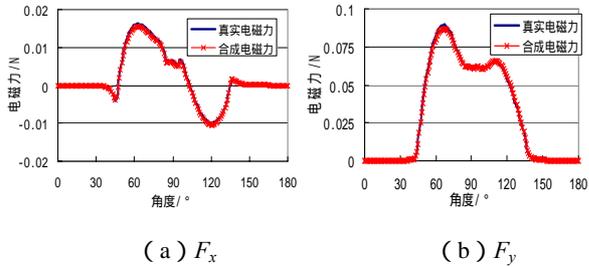


图 4 小偏心，电流 1A 的不平衡电磁力

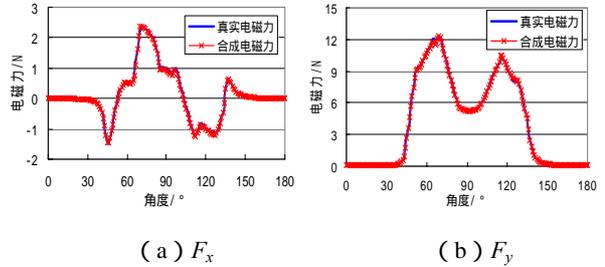


图 5 小偏心，电流 20A 的不平衡电磁力

图 4 和图 5 皆为小偏心时 $(0.05, 0.05)$ 的仿真对比，其中图 4 为相电流较小 (1A)，电机不饱和的仿真对比，图 5 为相电流较大 (20A)，电机饱和的仿真对比，图 6 则为大偏心时 $(0.15, 0.15)$ 的仿真对比。可见在小偏心条件下， $(\Delta x, \Delta y)$ 可由 $(\Delta x, 0)$ 和 $(0, \Delta y)$ 线性叠加得到，即不平衡电磁力可由式 (2) 和式 (3) 表示，但在偏心距离较大时该关系不再成立。(转子偏心单位：mm)

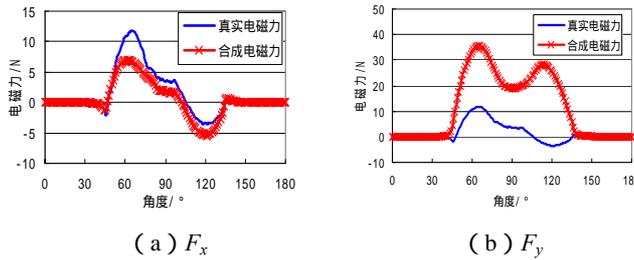


图 6 大偏心，电流 10A 时的不平衡电磁力

$$F_x = F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = F_x(\Delta x, 0, \theta, i) + F_x(0, \Delta y, \theta, i) \quad (2)$$

$$F_y = F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = F_y(\Delta x, 0, \theta, i) + F_y(0, \Delta y, \theta, i) \quad (3)$$

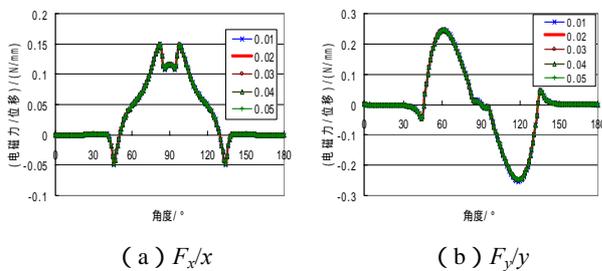


图 7 水平偏心时不平衡电磁力与位移的关系

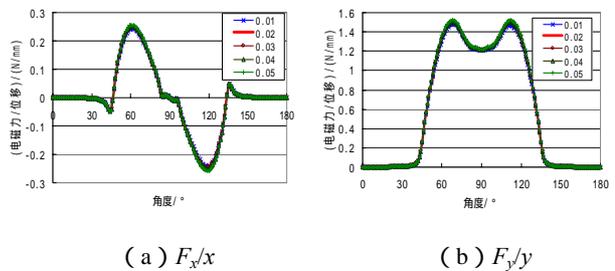


图 8 竖直偏心时不平衡电磁力与位移的关系

图 7 和图 8 的仿真结果分别给出了水平偏心时不平衡磁拉力与位移的关系以及竖直偏心时不平衡磁拉力与位移的关系，从而不难得到如下关系：

$$F_x(\Delta x, 0, \theta, i) = \frac{\Delta x}{x_0} F_x(x_0, 0, \theta, i), \quad F_y(\Delta x, 0, \theta, i) = \frac{\Delta x}{x_0} F_y(x_0, 0, \theta, i) \quad (4)$$

$$F_x(0, \Delta y, \theta, i) = \frac{\Delta y}{y_0} F_x(0, y_0, \theta, i), \quad F_y(0, \Delta y, \theta, i) = \frac{\Delta y}{y_0} F_y(0, y_0, \theta, i) \quad (5)$$

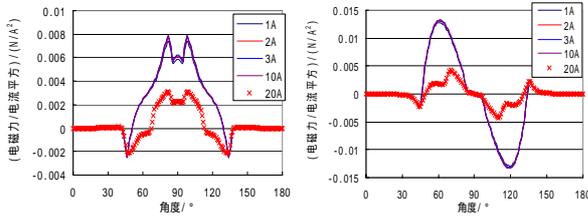
由式 (2) (3) (4) 和 (5) 可得：

$$F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \frac{\Delta x}{x_0} F_x(x_0, 0, \theta, i) + \frac{\Delta y}{y_0} F_x(0, y_0, \theta, i) \quad (6)$$

$$F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \frac{\Delta x}{x_0} F_y(x_0, 0, \theta, i) + \frac{\Delta y}{y_0} F_y(0, y_0, \theta, i) \quad (7)$$

3.2 相电流的影响

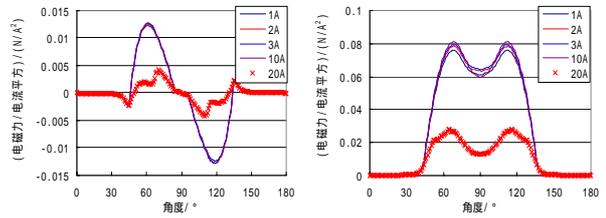
图 9 和图 10 的仿真结果分别显示了水平和竖直偏心时不平衡电磁力 F_x 、 F_y 与相电流 i 的关系。



(a) F_x/i^2

(b) F_y/i^2

图 9 水平偏心时 F_x 、 F_y 与 i 的关系



(a) F_x/i^2

(b) F_y/i^2

图 10 竖直偏心时 F_x 、 F_y 与 i 的关系

从上图中可以看出，小电流时不平衡电磁力与相电流的平方成正比。但大电流时，随着电机的饱和，这个关系将不再存在。为简化分析，不考虑饱和后铁磁材料的非线性，可以得到如下关系：

$$F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \left(\frac{i}{i_0}\right)^2 F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i_0), \quad F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \left(\frac{i}{i_0}\right)^2 F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i_0) \quad (8)$$

由式 (6) (7) 和 (8) 可得：

$$F_x(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \left(\frac{i}{i_0}\right)^2 \left[\frac{\Delta x}{x_0} F'_x(\theta) + \frac{\Delta x}{x_0} F''_x(\theta) \right], \quad F_y(\Delta x, \Delta y, \theta, i) = \left(\frac{i}{i_0}\right)^2 \left[\frac{\Delta x}{x_0} F'_y(\theta) + \frac{\Delta x}{x_0} F''_y(\theta) \right] \quad (9)$$

式中： $F'_x(\theta) = F_x(x_0, 0, \theta, i_0)$ ， $F''_x(\theta) = F_x(0, y_0, \theta, i_0)$ ， $F'_y(\theta) = F_y(x_0, 0, \theta, i_0)$ ， $F''_y(\theta) = F_y(0, y_0, \theta, i_0)$ 。

3.3 转子角度的影响

通过前面的阐述，已经对第一象限的偏心情况进行了一系列的分析。在小偏心条件下，只需要知道两个特征点 $(x_0, 0)$ 和 $(0, y_0)$ 在不同转子角度 θ 的不平衡电磁力即可计算出任意偏心位置在不同转子角度 θ 的不平衡电磁力。但涉及到非线性的磁路计算，很难用解析方式表达，因此本文基于 JMAG-Studio 软件，通过有限元计算获得两个特征点 $(x_0, 0)$ 和 $(0, y_0)$ 的不平衡电磁力。显然，有限元计算时转子角度 θ 是离散的。因此，本文将在离散的角度之间采用样条插值计算来获得任意角度的不平衡电磁力。同时，根据 6/2 结构 SRM 的对称性，可以得到转子在其他象限偏心时受到的不平衡电磁力。因此，基于式 (9) 可建立小偏心下 SRM 的不平衡电磁力分析模型。

4. 不平衡电磁力的动态计算

前面分析的是一相绕组产生的不平衡电磁力，由于电机三相绕组相差 60 度空间角度，在计算过程中引入局部坐标系，通过坐标变换即可得到三相绕组产生的总的不平衡电磁力。如图 11 所示，A 相轴线位置为 A 相局部坐标系的 y_1 轴，顺时针旋转 90° 得到与之对应的 x_1 轴，则 B 相和 C 相所对应的局部坐标系分别落后 A 相 60° 和 120°。可定义 A 相局部坐标系与全局坐标系一致。

在实际运行过程中，转子偏心会将影响电机的磁路，从而对相电流产生一定的影响。图 12 为转子中心在 $(0,0)$ 、 $(0.05,0)$ 和 $(0,0.05)$ 三个点定偏心时的相电流波形，电机转速 100,000rpm，输出功率 500w，开通角均为 21°，关断角均为 60°。可见，三者相电流基本重合，小偏心时转子偏心对电流的影响几乎微乎其微，可以忽略。实际上，真正影响电流的是开通角和关断角。显然，开通角和关断角是与电机的转速、输出功率等实时状态有关。因此，通过有限元仿真得到相电流的实时波形，将计算获得的实时相电流和特征点 $(x_0, 0)$ 和 $(0, y_0)$ 的不平衡电磁力数据带入式 (9)，即可算出实时的不平衡电磁力，图 13 为一具体算例，假设转子的偏心轨迹是一个半径为 0.02mm 的圆，可以看出，SR 电机的不平衡电磁力具有明显的脉冲特性。

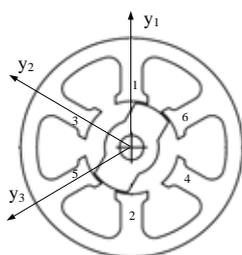


图 11 局部坐标系

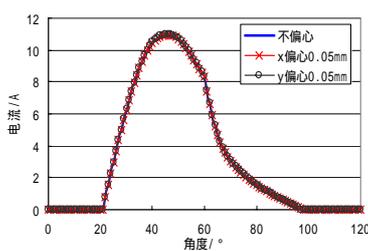


图 12 转子偏心的相电流对比

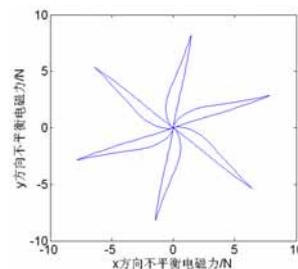


图 13 动态的不平衡电磁力

5. 结论

SRM 的不平衡电磁力具有脉冲性，力的大小决定于偏心度、转子角度和相电流，对 SRM 转子动力学特性影响很大。当偏心度较小，电机未饱和时，它和不平衡电磁力之间具有线性的关系，可以建立 SRM 的不平衡电磁力的数值计算模型，简化高速 SRM 转子动力学特性的耦合分析模型。

6. 参考文献

- [1] Dorrel D G, Thomson W T, Roach S. Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1), pp:24-34.
- [2] 周强, 朱学忠, 刘闯. 基于 JMAG 的开关磁阻电动机场路直接耦合分析[J]. 微电机, 2007, 40(10), pp:1-5.