

开关磁阻电机定子系统磁固耦合解析建模分析

赵为立 张海军 高瑞贞 张京军

(河北工程大学 机电工程学院 河北 邯郸 056038)

摘要: 建立了开关磁阻电机定子系统磁固耦合振动微分方程; 在考虑开关磁阻电机位移场与电磁场相互作用、相互影响的条件下, 利用麦克斯韦张量法和磁路法, 推导出开关磁阻电机定子系统所受径向电磁力; 结合梁函数组合法解得定子系统径向振动位移表达式。以一台 8/6 样机为例, 将所求结果与二维有限元分析结果进行了对比, 验证了所建模型的有效性, 所建模型符合实际开关磁阻电机结构及运行特点。

关键词: 开关磁阻电机; 径向力; 定子系统; 磁固耦合; 振动与噪声

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Analytical modeling and analysis for the stator system of switched reluctance motors considering coupled magnetism and solid dynamic characteristics

ZHAO Wei - li , ZHANG Hai - jun , GAO Rui - zhen , ZHANG Jing - jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering , Hebei University of Engineering , Hebei Handan 056038 , China)

Abstract: This paper investigates the magnetism and solid coupling dynamic equation of the stator system; The main exciting force of the vibration is electromagnetic force in the stator that is calculated using the Maxwell tensor and the magnetic method in consideration of the radial vibration displacements with the magnetic field in air gap coupling of the stator core; By means of the combination method of beam function , the analytic expressions formula of the radial vibration displacements of stator core is derived. The model conforms to the actual switched reluctance motor structure and operation characteristics. This paper provides theory basis of switched reluctance motor for structure optimization design and prediction and control of electromagnetic vibration and noise. With a model of 8/6 switched reluctance motor as an example , this paper verify the correctness of the analytical models comparing its results with the one obtained using the finite element method.

Key words: switched reluctance motor; radial force; stator system; magnetism and solid coupling; vibration and noise

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, 以下简称 SRM) 得到了学术界和工业界的广泛关注, 成为当代电气传动领域的热门课题之一。目前, SRM 的应用领域已涉及高速生产设备驱动、电动汽车、家用电器、航天飞机、机械手直接驱动等, 在传统电机市场几近饱和的情况下, 显示出强大的市场竞争力。

由于 SRM 具有强非线性与饱和特性的步进磁场, 因此, 存在具有周期脉动性的径向力和转

矩, 由此产生振动和噪声, 进而制约了 SRM 的应用和发展, 此问题成为近些年很多学者关注的热点和难点问题^[1-3]。普遍认为引起电磁振动的因素主要有两个: 一是作用在定子上的径向力, 二是 SRM 的转矩脉动。Lawrenson 等^[4] 最早提出了 SRM 的线性磁链模型。夏长亮等^[5] 通过曲线拟合变量参数获得精确的 SRM 磁强度曲线的数学关系式, 提出了一种快速非线性模型。陈琼忠等^[6] 基于 Dymola/Modelica 系统, 解决了 SRM 模型中

子系统的耦合问题,提出了一种改进的快速非线性解析模型。现有的非线性模型主要针对磁路饱和以及转子偏心等问题,没有考虑电机的磁固参数耦合以及耦合关系对电磁力、转矩的影响。邱家俊等^[7-8]的研究结果表明磁固耦合对水轮发电机系统会产生显著影响,因此在研究 SRM 时有必要考虑磁固耦合的影响。对于 SRM 定子系统,定子铁心内电磁场与位移场的相互耦合作用是 SRM 振动的一个重要特点,这也使得定子系统的振动比较复杂。为了更加全面地分析讨论 SRM 定子系统的振动特性,以便更好地指导该电机的设计、制造和运行,本文对 SRM 定子系统的磁固耦合动力特性进行深入的研究。

1 建立定子系统磁固耦合动力学方程

SRM 定子结构主要包括定子铁心和机壳两部分,由于定子铁心与机壳通常是紧密连接的,所以在本文定子系统简化为圆柱薄壳^[9],壳的厚度为 h , R 为圆柱壳的曲率半径,定子系统轴向长度为 L 。

据薄壳理论,对 SRM 定子系统作如下基本假设:

1) 变形前垂直定子中曲面的直线在变形后仍保持为直线,并垂直定子中曲面。

2) 相对其它应力分量,沿定子中曲面垂直方向的应力可忽略不计。

3) 相对壳体微体的移动惯性力,可忽略其转动惯性力矩。

4) 法向挠度沿中曲面法线上各点是不变的。

据上述基本假设,建立定子系统振动的基本微分方程组^[10-11]

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{(1-u)}{2} \frac{\partial^2 u}{R^2 \partial \theta^2} + \frac{(1+u)}{2} \frac{\partial^2 v}{R \partial x \partial \theta} + u \frac{\partial w}{R \partial x} = \\ & \frac{(1-\mu^2)}{Eh} (\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q_x) \\ & \frac{(1+u)}{2} \frac{\partial^2 u}{R \partial x \partial \theta} + \frac{(1-u)}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{R^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w}{R^2 \partial \theta} + \frac{h^2}{12R^2} \\ & \left[\frac{(1-u)}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{R^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial \theta} - \frac{\partial^3 w}{R^2 \partial \theta^3} \right] = \\ & \frac{(1-\mu^2)}{Eh} (\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q_\theta) \\ & \frac{12}{h^2} (\mu \frac{\partial u}{R \partial x} + \frac{\partial v}{R^2 \partial \theta^2} - \frac{1}{R^2} (\frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 v}{R^2 \partial \theta^3})) + \nabla^2 \nabla^2 \omega = \\ & \frac{12(1-\mu^2)}{Eh^3} (q_z - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

2 考虑定子铁心径向振动位移与气隙磁场相互影响时的电磁力

求解电磁力之前,作如下假设^[12]:

1) 转子不产生偏心力。

2) 边缘磁通路径为 1/4 圆形。

3) 忽略定子轭和转子轭的磁阻。

4) 忽略漏磁通。

5) 铁心材料的磁饱和特性仅与其材料属性有关。

6) 不计其它物理场间的相互耦合。

据麦克斯韦应力法,按照图 1 所示的积分路径求取 SRM 定子凸极上的径向电磁力,则定子所受的径向电磁力可表示为

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} [\int_1^2 B_f^2 dl + \int_2^3 B_m^2 dl + \int_3^4 B_f^2 dl + \int_4^5 B_f^2 dl + \int_5^6 B_f^2 dl] = \frac{L}{2\mu_0} [B_f^2 l_{12} + B_m^2 (l_{23} + l_{45}) + B_f^2 l_{56}] \quad (2)$$

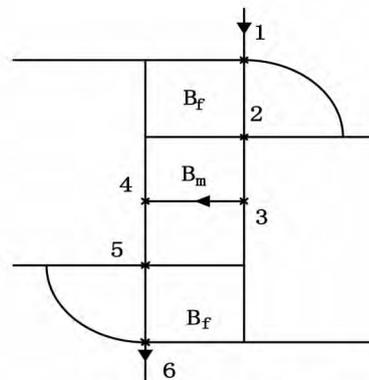


图1 径向力积分路径

Fig.1 Radial force integration path chart

边缘磁密具有近似对称性^[13],运用磁路法解得主气隙磁密 B_m 和边缘磁密 B_f :

$$\begin{aligned} B_m &= \mu_0 \left\{ \frac{B_{sat} a + N_m i_m b \mu}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{B_{sat} a + N_m i_m b \mu}{2\mu} \right)^2 - c [B_{sat} d + \mu N_m i_m]} \right\} \\ B_f &= \mu_0 \left\{ \frac{2\mu d_0 + B_{sat} b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat} b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} \right)^2 - \frac{A_s + (\mu e + B_{sat} e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

把(3)式代入(2)式后可求得当 $\theta \in [0, \beta]$ 时,定子凸极所受到的径向力

$$F_r = \frac{\mu_0 L}{2} \left\{ r \beta_s \left(\frac{B_{sat} a + N_m i_m b \mu}{2\mu} - \right. \right.$$

$$\sqrt{\left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right)^2 - c [B_{sat}d + \mu N_m i_m]} + 2r\beta \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right) \quad (4)$$

当 $\theta \in [\beta, \beta_r - \beta]$ 时, 定子所受到的径向力

$$F_R = \frac{\mu_0 L}{2} \left\{ r(\beta_r - \beta - \theta) \left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right) - \sqrt{\left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right)^2 - c [B_{sat}d + \mu N_m i_m]} + r(\beta_s + 2\beta + 2\theta - \beta_r) \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right) \right\} \quad (5)$$

其中 $a = b(l + l_g) + (\mu_r + 1)l - 4$; $b = (l + l_g) / (l_g l)$; $a_0 = A_s l_f / l - l_f + 2A_f$; $c = N_m i_m / (\mu l_g l)$; $d = (\mu_r + 1)(l - l_g)$; $b_0 = B_{sat} [A_s l_f (\mu_r + 1) + A_f (l - l_f)]$; $c_0 = \Phi_m [\mu N_m i_m + B_{sat} (l - l_f)]$; $d_0 = N_m i_m (a_0 - A_f)$; $e = A_s (N_m i_m)^2 / (l - l_f)$; $e_0 = N_m i_m (\mu_r + 1)$; $\mu = \mu_0 \mu_r$; $A_f = A_{f1} + A_{f2}$; $\beta = \frac{\beta_r - \beta_s}{2}$; μ_0 为空气磁导率; L 为转子叠片长度; r 为定子内径; β_s, β_r 为 SRM 定、转子极弧; B_{sat} 为磁化曲线拟合参数; N_m 为绕组匝数; i_m 为绕组电流; l_g 为定转子极对间气隙长度; l_f 为边缘磁通路径的长度; l 为定子轭到转子轭的距离; φ_m 为定转子极交叠部分气隙和齿极的磁通和; A_s 为磁场线穿过定子的面积; θ 为转子磁极偏离极对中位置的角度; A_{f1}, A_{f2} 为边缘气隙面积。

对定子凸极所受电磁力进行傅里叶级数变换之后, 径向力表达式

$$F_r = \frac{a_0}{2} + \sum (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (6)$$

其中

$$a_0 = A(t_3 - t_2) + \frac{\mu_0 L r}{2} [B(\beta_r - \beta - \omega \frac{t_4^2 - t_3^2}{2}) + C(\beta_s + 2\beta + \omega(t_4^2 - t_3^2) - \beta_r)]$$

$$a_n = A \frac{\sin(n\omega_0 t_3) - \sin(n\omega_0 t_2)}{n\omega_0} + \frac{\mu_0 L r}{2} [B(\beta_r - \beta - \frac{t_4 \sin(n\omega_0 t_4) - t_3 \sin(n\omega_0 t_3)}{n} +$$

$$\frac{\cos(n\omega_0 t_4) - \cos(n\omega_0 t_3)}{n^2 \omega_0} + C(\beta_s + 2\beta + 2 \frac{t_4 \sin(n\omega_0 t_4) - t_3 \sin(n\omega_0 t_3)}{n} + \frac{\cos(n\omega_0 t_4) - \cos(n\omega_0 t_3)}{n^2 \omega_0}) - \beta_r]$$

$$b_n = A \frac{\sin(n\omega_0 t_3) - \sin(n\omega_0 t_2)}{n\omega_0} + \frac{\mu_0 L r}{2}$$

$$[B(\beta_r - \beta - \frac{t_4 \cos(n\omega_0 t_4) - t_3 \cos(n\omega_0 t_3)}{n} - \frac{\cos(n\omega_0 t_4) - \cos(n\omega_0 t_3)}{n^2 \omega_0} + C(\beta_s + 2\beta + 2 \frac{\cos(n\omega_0 t_4) - \cos(n\omega_0 t_3)}{n^2 \omega_0} - \frac{t_4 \sin(n\omega_0 t_4) - t_3 \sin(n\omega_0 t_3)}{n} - \beta_r)]$$

$$A = \frac{\mu_0 L}{2} \left\{ r\beta_s \left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right)^2 - c [B_{sat}d + \mu N_m i_m]} \right) + 2r\beta \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right) \right\}$$

$$B = \left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right)^2 - c [B_{sat}d + \mu N_m i_m]}\right)$$

$$C = \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right)$$

$$B = \left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{B_{sat}a + N_m i_m b \mu}{2\mu}\right)^2 - c [B_{sat}d + \mu N_m i_m]}\right)$$

$$C = \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right)$$

$$C = \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right)$$

$$C = \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right)$$

$$C = \left(\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0} - \sqrt{\left[\frac{2\mu d_0 + B_{sat}b_0 - \Phi_m \mu l_f}{2\mu l_f a_0}\right]^2 - \frac{A_s(\mu e + B_{sat}e_0) - \Phi_m c_0}{\mu l_f a_0}}\right)$$

式中 t_1 - 电流导通时刻; t_2 - 定子与转子刚刚完全重合时刻; t_3 - 电流断开时刻; t_4 - 下次电流导通时刻。

由 SRM 具有对称性, 不同凸极间电磁力交替依次相差时间 $\tau = \frac{\theta_0}{\omega_0}$ 据此可得定子凸极上任一点任意时刻的磁固耦合径向电磁力

$$f_z(x, \theta, t) = \frac{F_r(t + T - n\tau)}{A_s} \quad (7)$$

式中 n - 定子极对数; θ_0 - 导通角; ω_0 - 转子旋转速度; T - 定子凸极上电磁力的交替周期。

3 非线性方程组的求解

微分方程组 (1) 在电磁力 (7) 作用下的解

设为

$$\begin{cases} u(x, \theta, t) = \sum_{i=1} T_i(t) U_i(x, \theta) \\ v(x, \theta, t) = \sum_{i=1} T_i(t) V_i(x, \theta) \\ w(x, \theta, t) = \sum_{i=1} T_i(t) W_i(x, \theta) \end{cases} \quad (8)$$

式中 T_i - 圆柱壳的各阶振型分量; W_i, U_i, V_i - 各个方向上的各阶振型。

3.1 振型的求解

建立 SRM 定子系统的变分方程组^[10]

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 V}{R \partial x \partial \theta} + \frac{\rho h}{K} \omega^2 U = 0 \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 U}{R \partial x \partial \theta} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{R^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \theta^2} + \\ k \left[\frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 V}{R \partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{R^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial \theta} - \frac{\partial^3 W}{R^3 \partial \theta^3} \right] + \frac{\rho h}{K} \omega^2 V = 0 \\ \frac{12}{h^2} \left\{ \mu \frac{\partial U}{R \partial x} + \frac{\partial V}{R^2 \partial \theta} + \frac{W}{R^2} - k \left[\frac{\partial^3 V}{\partial x^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 V}{R^2 \partial \theta^3} \right] \right\} + \\ \nabla^2 \nabla^2 W - \frac{\rho h}{D} \omega^2 W = 0 \end{cases} \quad (9)$$

利用梁函数组合法得到定子系统各阶的固有振型函数

$$\begin{cases} U(x, \theta) = \sum_{m=1}^p A_m \frac{dX_m(x)}{d(x/L)} \cos(n\theta) \\ V(x, \theta) = \sum_{m=1}^p B_m X_m(x) \sin(n\theta) \\ W(x, \theta) = \sum_{m=1}^p C_m X_m(x) \cos(n\theta) \end{cases} \quad (10)$$

参数 A_m, B_m, C_m 和 α_m 由边界条件确定; 当 m, n 值取不同值时, 得到 $W_i, V_i, U_i; X_m$ 为不同边界条件下梁函数的表达式。

3.2 振型分量的求解

定子系统模型的磁固耦合非线性径向振动动力学平衡方程式

$$\ddot{T}_i(t) + 2\mu_i \dot{T}_i(t) + \omega_i^2 T_i = \frac{P_i(t)}{M_i} \quad (11)$$

其中 $P_i = \iint_S q_z W_i R dx d\theta; M_i = \iint_S \rho h W_i R dx d\theta; M_i$ 为定子系统的广义质量; W_i 为上式所求定子系统径向振型函数; $q_z(x, \theta, t) = f_z(x, \theta, t)$ 为定子系统任意点的径向力; ω_i 为定子系统的第 i 阶固有频率; μ_i 为模态阻尼。解方程可得定子系统径向各阶振型分量

$$T_i = e^{at} \cos(\beta t) \left[\int \frac{1}{\cos^2 t} + e^{-(2a+2\mu_i)t} \right]$$

$$\left[\int \frac{P_z(t)}{M_i} e^{(a+2\mu_i)t} \cos(\beta t) dt + c_1 \right] dt + c_2 \quad (12)$$

其中 $a \pm i\beta$ 为方程 $\ddot{T}_i(t) + 2\mu_i \dot{T}_i(t) + \omega_i^2 T_i = 0$ 的复根。

4 模型对比分析

对 8/6 实验室样机的特性采用二维有限元法做仿真分析并与所建立的解析结果进行对比。定、转子铁芯材料均为 DR510-50 硅钢片, 相对磁导率为 7 000。样机参数如表 1 所示。

表 1 样机的结构参数

Tab. 1 Prototype of the structural parameters			
参数	尺寸	参数	尺寸
定子外径 D_s	210 mm	转子轴径 D_i	50 mm
转子外径 D_a	115 mm	定子轭高 h_{cs}	13.72 mm
铁心叠长 L	138 mm	转子轭高 h_{cr}	14.90 mm
气隙 l_g	0.4 mm	定子槽深 d_s	34.6 mm
定子极弧 β_s	0.366 rad	绕组匝数 N_i	117
转子极弧 β_r	0.401 rad	额定功率 P_n	8 kW

图 2 和图 3 分别是电流峰值 I_0 和定子系统阻尼比 η 取不同值时定子系统随位移随时间的变化关系。由图可知, 随着激励电流峰值的不断增大, 振动也不断增强, 而且相邻定子凸极间的相互影响不断增强, 这也加剧了定子振动。阻尼比对定子系统径向振动的影响很大。阻尼比越大, 振幅越小。因而可以通过适当增大定子系统的阻尼比来达到减小振幅的目的。

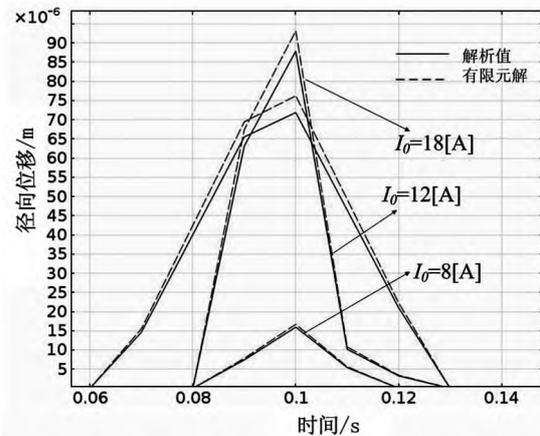


图 2 $I_0=8[A], 12[A], 18[A]$ 时振动位移变化曲线
Fig. 2 Displacement curve when $I_0=4[A], 8[A], 12[A]$

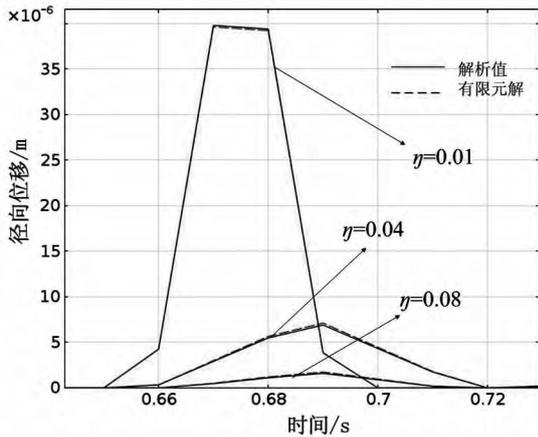


图3 不同阻尼比时振动位移变化曲线

Fig. 3 Displacement curve in different damping

图 4 和图 5 分别是在转速为 120 r/min 和 240 r/min 的情况下振动位移的结果对比。从图中可以看到由于 SRM 电机的凸极结构的特点, 转速越快振动的频率越大。

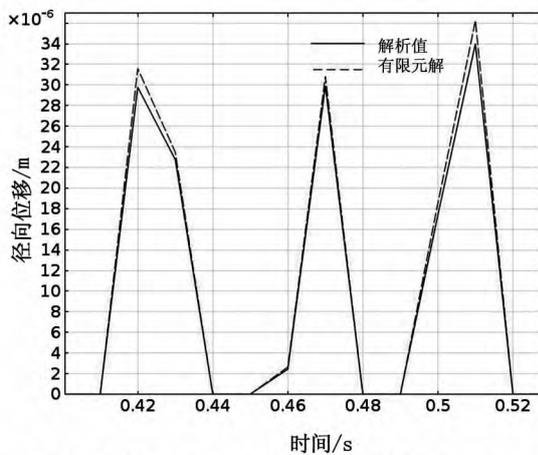


图4 转速为240r/min时振动位移变化曲线

Fig. 4 Displacement curve when r=240r/min

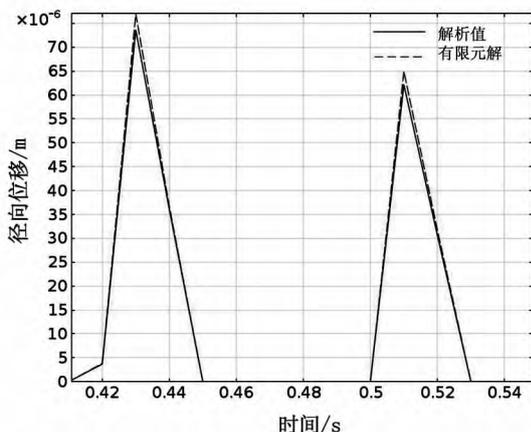


图5 转速为120r/min时振动位移变化曲线

Fig. 5 Displacement curve when r=120r/min

结合以上分析对比可以明显看到本文所建模型计算结果与二维有限元计算结果, 在误差允许范围内, 两者基本趋于吻合, 且与实际电机运行特性相一致, 验证模型的有效性。由于本文只对主气隙磁密采用磁化曲线拟合, 对边缘气隙磁密采用磁通守恒推导求得, 这减少了边缘气隙磁密磁化拟合时的误差, 简化了模型, 有利于模型精度的提高。但 SRM 本身存在高度的非线性和高耦合性, 同时在模型建立的过程中对 SRM 的电磁特性和结构特性采取了一定程度的简化, 这使得结果还存在一定误差, 同时梁函数组合法是一种求解固有频率和振型的近似解法, 这也加大了所求结果的误差。但是通过验证对比可知, 所得结果的误差在误差允许范围内, 符合 SRM 电机结构及运行特点。

4 结论

1) 推导建立 SRM 定子系统所受径向力的解析表达式。

2) 建立 SRM 稳定运行状态下定子系统的磁固耦合振动微分方程, 结合梁函数组合法求得定子系统径向振动位移的解析表达式。

3) 通过二维有限元法验证了所得模型符合实际 SRM 结构和运行特点。阻尼、激磁电流、强迫激励的频率等诸因素对定子系统振动的性质产生很大的影响。阻尼比越大则振动的幅值就越小, 而且会使振动的非线性有所减弱; 增大激励电流时, 振幅会增大, 振动的非线性也会增强; 在额定工况下, 增大强迫激励的频率时, 振动的频率和峰值都会随之改变。因此必要时可以通过适当改变某些参数来改变主共振的特性。

4) 在 SRM 电磁场和结构场双向影响的情况下, 建立了定子系统的径向振动与结构参数和控制参数之间的关系, 为 SRM 结构优化设计、非线性电磁振动和噪声的预测及控制提供了一定的理论参考, 同时有利于提高 SRM 运行性能和扩大其应用领域。

参考文献:

[1] HUSAIN I, HESSIAN S A. Modeling simulation and control of switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (6): 1625 - 1634.
 [2] XUE X D, CHENG K E, HO S L. Optimization and evaluation of torque - sharing functions for torque ripple mini-

- mization in switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9): 2076-2090.
- [3] DIVANDARI M, KABIR M M. Acoustic noise reduction of switched motor drives [J]. Middle-East Journal of Scientific Research 2011, 8(6): 1018-1026.
- [4] LAWRENSON P J, STEPHENSON J M P, BLENKINSOP T et al. Variable-speed reluctance motors [J]. IEE Proceedings: Part B (Electric Power Applications), 1980, 127(4): 253-265.
- [5] XIA C L, XUE M, SHI T N. A new rapid nonlinear simulation method for switched reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 578-586.
- [6] 陈琼忠, 孟光, 莫雨峰, 等. 开关磁阻电机的非线性解析模型及其在航空系统仿真中的应用 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(12): 2041-2046.
- [7] 邱家俊. 电机的机电耦联与磁固耦合非线性振动研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 109-115.
- [8] 杨志安, 李文兰, 邱家俊. 水轮发电机定子磁固耦合电磁激发的分岔与混沌 [J]. 天津大学学报, 2005, 38(11): 986-990.
- [9] 李文兰, 邱家俊, 杨志安. 水轮发电机磁固耦合双重共振 [J]. 应用数学与力学, 2000, 10(10): 1069-1077.
- [10] 屈维德. 机械振动手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [11] 翁智远, 王远功. 弹性薄壳理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
- [12] 邓智泉, 杨钢, 张媛, 等. 一种新型的无轴承开关磁阻电机数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2005(9): 139-146.
- [13] 杨艳, 邓智泉, 曹鑫, 等. 无轴承开关磁阻电机径向电磁力模型 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 377-382.
- (责任编辑 刘存英)

(上接第 49 页)

表 4 方案二水资源配置成果表(万 m³)

Tab. 4 The water allocation results about program two in west Handan City(10⁴m³)

	总需水				方案二配置水量				缺水率			
	涉县	武安市	峰峰	磁县	涉县	武安市	峰峰	磁县	涉县	武安市	峰峰	磁县
25%	11 746.1	19 525.9	9949.6	6 045.0	11 746.2	17 738.1	9 949.6	6 045.0	0.0%	9.2%	0.0%	0.0%
50%	12 422.9	21 327.0	10 231.2	6 773.8	12 422.9	15 135.4	10 231.3	6 773.8	0.0%	29.0%	0.0%	0.0%
75%	13 099.6	23 255.6	10 641.8	7 502.7	13 099.7	14 213.7	10 641.9	7 502.8	0.0%	38.9%	0.0%	0.0%
95%	13 776.4	25 029.5	11 052.5	8 231.5	13 634.0	14 327.6	9 146.1	6 980.0	1.0%	42.8%	17.2%	15.2%

参考文献:

- [1] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展 [J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1177.
- [2] 甘治国, 蒋云钟, 鲁帆, 等. 北京市水资源配置模拟模型研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(1): 91-95.
- [3] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [4] 高太忠, 陆长福, 李克荣, 等. 河北平原生态环境用水量估算 [J]. 河北科技大学学报, 2003, 24(1): 1-5.
- [5] 游进军, 王浩, 甘泓. 水资源系统模拟模型研究进展 [J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 425-429.
- [6] 游进军, 甘泓, 王浩. 基于规则的水资源系统模拟 [J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1043-1056.
- [7] 蒋云钟, 赵红莉, 甘治国. 基于蒸腾蒸发量指标的水资源合理配置方法 [J]. 水利学报, 2008, 39(6): 720-725.
- [8] 于常武, 王宇林. 城市小流域雨水资源利用探讨 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2005, 15(5): 302-308.
- (责任编辑 王利君)