

电动汽车轮毂电机场路耦合特性分析

倪红

(福建船政交通职业学院 汽车运用工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 分析电动汽车轮毂电机特性,给出一种电动汽车轮毂电机场路耦合分析法,将电磁场有限元模型和外部电路直接耦合到一起,场路耦合分析模型充分考虑到外电路中电流谐波的影响,分析结果更符合实际情况。仿真分析了轮毂电机气隙磁密、负载感应电势等特性,轮毂电机空载起动、加载和卸载等工况,并通过样机试验验证,实验测试结果与场路耦合法计算结果能够较好的吻合。

关键词: 永磁同步电机; 有限元; 场路耦合分析; 矢量控制策略; 联合仿真

中图分类号: TM301.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2016)06-0581-06

Field-circuit coupled analysis of in-wheel motor for hybrid electric vehicle

Ni Hong

(Vehicle Application Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A field-circuit coupled analysis method of in-wheel motor for hybrid electric vehicle was presented to analyse the characteristics of hybrid electric vehicle in-wheel motor. A finite element model of electromagnetic field was directly coupled with the external circuit, which takes into account of the influence of the current harmonics in the external circuit. The analysis results were found to be more consistent with the actual situation. The characteristics of air gap flux density and load induced potential of hub motor, and the loading, unloading and de-loading of in-wheel motor were analysed and simulated, which were verified by prototype test. The experimental results were in agreement with the results of field-circuit coupling method.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); finite element; field-circuit coupled analysis; vector control strategy; co-simulation

采用轮毂电机驱动的电动汽车是未来汽车的重要发展方向,电机安装在车轮轮毂内,舍弃传统的离合器、减速器、传动桥等机械传动部件,从而减轻整车质量,节约能源,且驱动更加灵敏^[1-4]。永磁同步电机以其结构简单、高效率、高功率密度、无机械式换向器等优势被广泛用作电动汽车的牵引电机^[5-7]。

传统的电机设计分析方法有解析法和有限元法,解析法将电机简化为一系列数学模型,很难分析电机内部复杂的磁场分布和非线性因素;有限元分析法能分析电机磁路饱和以及铁磁材料非线性的影响,但是往往将外部激励进行理想化处理,不能考虑电流谐波的影响。

为全面分析电机特性,本文给出一种轮毂电机场路耦合分析方法,将电机电磁场有限元模型与外部驱动控制电路耦合到一起,仿真分析了轮毂电机气隙磁密和负载反电势等特性,以及启动过程、加载、卸载等工况,最后通过实验验证。

收稿日期: 2016-09-30
作者简介: 倪红(1969-),女,福建福清人,副教授,硕士,研究方向:汽车技术服务与营销。

1 场路耦合分析模型

轮毂电机场路耦合模型包含电机电磁场有限元模型和外部驱动控制电路,将 Maxwell 的瞬态磁场求解器的分析结果耦合到 Simplorer 的驱动控制电路中,组成一个联合仿真模型,流程如图 1 所示。将每一个时间步长有限元分析结果中的绕组电流、电感矩阵和感应电动势耦合到 Simplorer 的外部驱动控制电路中,并提取诺顿等效电导矩阵和源电流,进行外电路分析。Maxwell 将这些诺顿电路耦合参数转换成循环矩阵并进行有限元求解,最后利用矢量控制算法对电机进行调速控制。

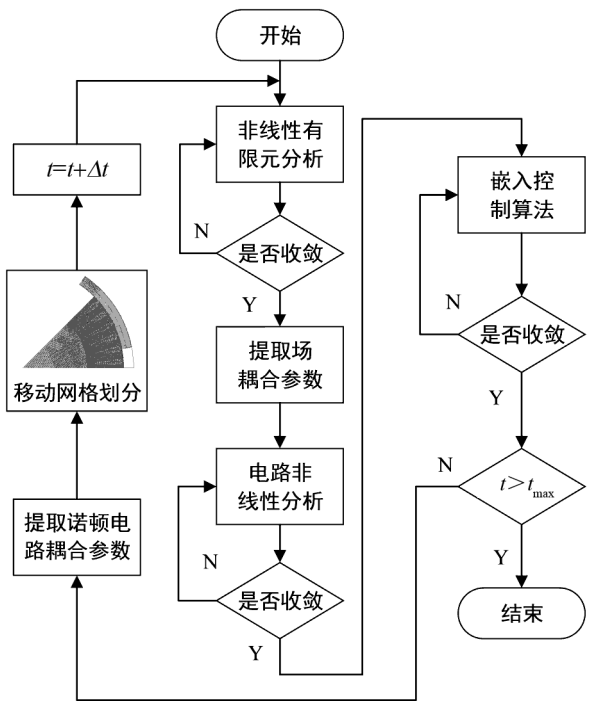


图 1 联合仿真流程

Fig.1 Co-simulation flowchart of in-wheel motor field-circuit coupling model

1.1 电机数学模型

研究的轮毂电机为逆变器供电,转速可以通过改变控制信号的频率来实现,采用时域数学模型来分析电机特性,电压派克方程为:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} R_1 + L_d p & L_q \omega_e & 0 \\ -L_d \omega_e & R_1 + L_q p & 0 \\ 0 & 0 & R_1 + L_0 p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

式中, R_1 为电枢绕组电阻, L_d 、 L_q 和 L_0 分别为 d 轴同步电感、 q 轴同步电感和 0 轴电感, ω_e 是电角速度, p 为微分算子。

端电压、感应电势、电枢绕组电流的坐标变换方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ : \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ : \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ : \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_c \end{bmatrix}$$

其中转换矩阵 C 为:

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - 2\frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta - 2\frac{2}{3}\pi\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

输入电功率为:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T (v_d i_d + v_q i_q + v_0 i_0) dt$$

输出机械功率为:

$$P_2 = P_1 - (P_{fw} + P_{cu} + P_t + P_{Fe})$$

式中, P_{fw} 、 P_{cu} 、 P_t 、 P_{Fe} 分别为风摩损耗、电枢铜损、开关损耗、铁心损耗。

dq 旋转坐标系下电机的电磁转矩和机械运动方程为:

$$T_e = p \varphi_{rm} (i_{q1} + i_{q2})$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega$$

式中, T_e 为电磁转矩, p 为极对数, J 为转动惯量, ω 为机械角速度, T_L 为负载转矩, B 为粘滞系数。

1.2 瞬态电磁场方程

轮毂电机电磁场计算一般采用磁矢位,忽略永磁体涡流损耗,其二维磁场方程可表述为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + J_z = 0$$

式中, A_z 为磁矢位的轴向分量, μ 为介质的磁导率, J_z 为电流密度。

利用加权余量法建立上述方程的空间离散方程,取权函数等于形状函数 $[N]^T$,得到瞬态磁场的离散方程为:

$$[K][A] + [T][\dot{A}] = [C][I] \quad (1)$$

式中, $[K] = \frac{1}{-4\mu A_e} \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix}$ 其中 A_e 为三角形单元的面积,矩阵中元素的具体形式为:

$$\begin{cases} k_{ii} = b_i b_i + c_i c_i, & k_{ij} = k_{ji} = b_i b_j + c_i c_j \\ k_{jj} = b_j b_j + c_j c_j, & k_{jm} = k_{mj} = b_j b_m + c_j c_m \\ k_{mm} = b_m b_m + c_m c_m, & k_{mi} = k_{im} = b_m b_i + c_m c_i \end{cases}$$

$$[T] = \sigma A_e \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & \frac{1}{12} & \frac{1}{12} \\ \frac{1}{12} & \frac{1}{6} & \frac{1}{12} \\ \frac{1}{12} & \frac{1}{12} & \frac{1}{6} \end{bmatrix}$$

$$C = \text{diag} \left(\frac{A_e n}{3aA_b}, \frac{A_e n}{3aA_b}, \frac{A_e n}{3aA_b} \right)$$

其中 a 为定子绕组并联支路数, n 为定子槽中线圈的串联匝数, A_b 为双层绕组中单个绕组的面积。

1.3 电路方程

电动势为绕组铰链的磁链对时间的导数, A 相感应电动势为:

$$e_a = - \frac{d\psi_a}{dt} = - \frac{d}{dt} \left(\frac{2nL_{ef}p}{aA_b} \sum_{j=1}^{j_e} \sum_{e=1}^{i_e} A_e \frac{A_i + A_j + A_m}{3} \right) \quad (2)$$

式中, n 为线圈匝数, a 为定子绕组并联支路数, L_{ef} 为电枢铁心有效长度, j_e 为每极每相槽数, i_e 为单元总数。

式(2)可以简化为:

$$\{E\} = -2pL_{ef} [C]^T \{\dot{A}\} \quad (3)$$

电机 A 相绕组电压平衡方程为:

$$e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} = u_a \quad (4)$$

综合三相感应电势、电压方程,将式(3)代入式(4)可得离散方程:

$$\{U\} = -2pL_{ef} [C]^T \{\dot{A}\} + [R]\{I\} + [L]\{\dot{I}\} \quad (5)$$

式中, $\{U\} = (u_a \ u_b \ u_c)^T$ 为电压向量; $\{I\} = (i_a \ i_b \ i_c)^T$ 为电流向量; $[R] = \text{diag}(R_a \ R_b \ R_c)$ 为相绕组电阻矩阵; $[L] = \text{diag}(L_a \ L_b \ L_c)$ 为相绕组端部漏电感矩阵。

将电磁场方程式(1)和电路方程式(5)联立求解,得到场路耦合离散方程为:

$$\begin{bmatrix} K & -C \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ -2pL_{ef}C^T & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix}$$

2 仿真分析

电机主要技术参数如表 1 所示,二维结构如图 2 所示,定子绕组为双层叠绕组。

表 1 轮毂电机主要参数

Tab.1 Main parameters of in-wheel motor

参数	值	参数	值
额定功率/kW	12.3	极数/槽数	24/27
额定电压/V	350	铁心长度/mm	52
额定转速/(r · min ⁻¹)	600	气隙/mm	0.8
磁钢牌号	N35H	磁钢厚/mm	5
极弧系数	0.8	定子槽满率	0.71

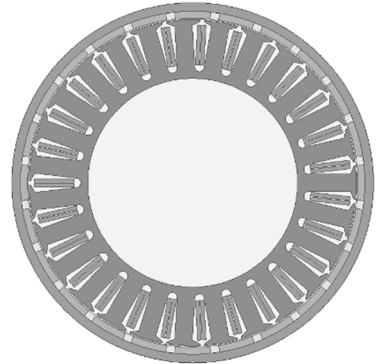


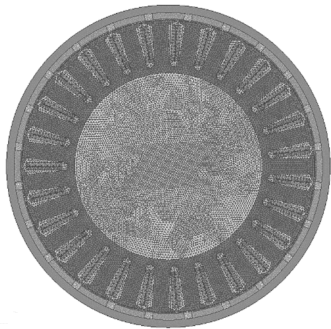
图 2 轮毂电机二维结构图

Fig.2 Schematic of in-wheel motor

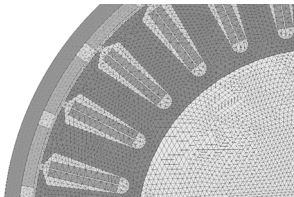
按照电机主要参数,建立轮毂电机二维有限元模型,利用有限元法分析轮毂电机磁场,将连续的电磁场问题转化为有限个离散单元进行计算,对电机进行网格剖分,重点对气隙部分进行详细剖分,图 3 为电机二维有限元剖分图,共有 48 721 个单元。

传统的电机分析通常将外部电路简化为标准正弦电压或电流源,其缺点是不能全面分析外部激励为非标准输入和在不同控制策略时电机的特性。针对传统的磁路法和解析法难以分析电机的动态过程等问题^[8],本文利用 Maxwell 和 Simpler 建立联合轮毂电机有限元模型和外部驱动

控制电路模型,能够使仿真分析更接近实际情况。



(a) 整体剖分图



(b) 局部剖分图

图 3 电机网格剖分图

Fig 3 Mesh section of electric motor

依据永磁同步电机数学模型建立基于转子磁场定向控制策略的系统模型。其中外电路包括直流电源、功率开关模型组成的三相逆变电路。由于实际馈入电动机电枢绕组的电流为三相交流电流,因此,需对三相交流电进行 clark 和 park 变换,实现线性解耦,矢量控制系统采用电流环和速度环构成典型双闭环控制系统^[9-10]。

为了分析轮毂电机性能,必须对其进行瞬态磁场分析,包括电机内部复杂的磁场分布和磁位饱和情况。本文分析了轮毂电机在额定转速空载工况下的瞬态磁场,图 4 给出了 0.06 s 时磁力线分布图,可以看出在轮毂电机内部磁力线整体分布较均匀,定子槽内存在少量漏磁。

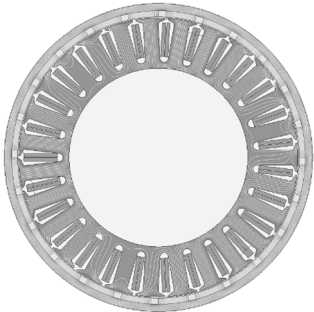


图 4 磁力线分布图

Fig.4 Magnetic coil (field) distribution diagram

图 5 给出了 0.06 s 时磁通密度云图,在轮毂电机轭部、硅钢片靠近永磁体附近处,颜色均比较深,表明磁通密度较高,由于永磁体电磁结构引起的饱和现象。

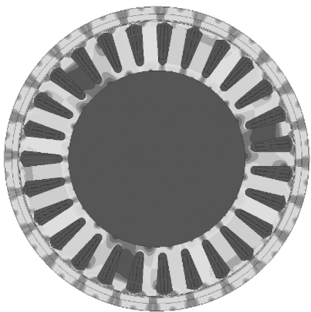


图 5 磁通密度云图

Fig.5 Magnetic flux density

轮毂电机空载反电势如图 6 所示,由于定子转子开槽的影响,空载反电势呈非标准正弦周期性变化。

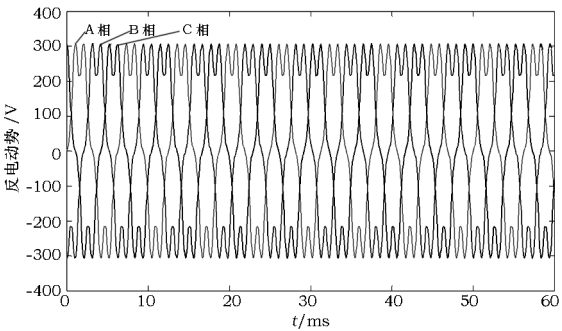


图 6 空载反电势曲线

Fig.6 No-load back-EMF curve

气隙磁场是轮毂电机能量转换的关键场所,所以有必要对其进行分析,利用式(6)和场计算器计算电机定子和转子间的气隙磁场强度:

$$B = B_x \times \cos \theta + B_y \times \sin \theta, \quad (6)$$

式中 B 为径向磁密, B_x 为磁密的 x 轴分量, B_y 为磁密的 y 轴分量。

轮毂电机气隙径向磁密分布如图 7 所示,可以看出,气隙磁密呈现周期性均匀变化,从而可以减少轮毂电机的启动转矩脉动和齿槽转矩,提高电动汽车的驱动性能^[11-12]。

仿真分析轮毂电机空载启动和额定输出功率工况,空载起动过程的相电流和额定负载时的感应电势如图 8 和 9 所示,可以看出相电流和感应电压中包含大量谐波,原因是在变频控制系统中,

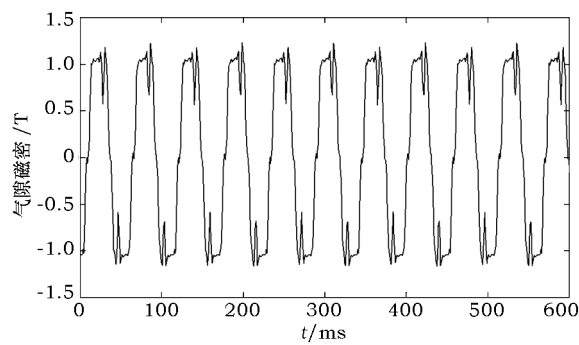


图7 气隙磁密曲线

Fig.7 Air gap flux density curve

轮毂电机由逆变器电源供电,逆变器的输出电压中包含非正弦形式的高次谐波,导致输入电流和感应电势产生畸变^[13]。

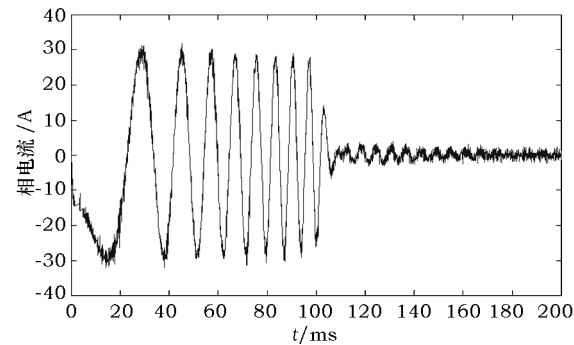


图8 空载起动过程相电流曲线

Fig.8 Phase current curve of no-load starting process

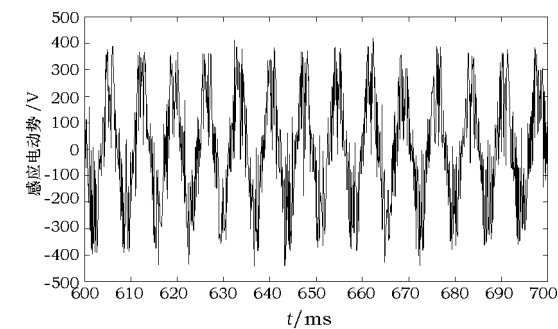


图9 额定负载运行时感应电压曲线

Fig.9 Induction voltage curve under rated load condition

3 实验分析

轮毂电机试验台架如图10所示,主要由轮毂电机、控制系统以及测功系统组成。

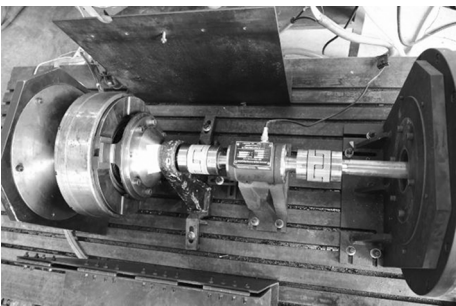


图10 轮毂电机试验台架

Fig.10 The test bench of in-wheel motor

台架试验包括电机空载启动到额定转速600 r/min,图11给出了仿真转速曲线和实测值的对比,仿真数据与实验测试值能够较好的吻合。待转速稳定后,将电机负载加至120 N·m,然后再卸载至80 N·m。电机输出转矩如图12所示,由图12可以看出,仿真曲线和实验曲线趋势相同且能够较好的吻合,证明本文建立的场路耦合仿真模型的正确性,可以缩短电机优化设计周期。

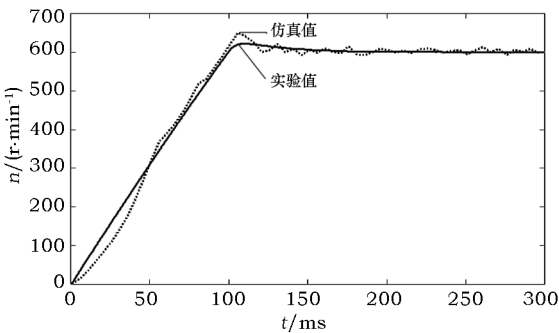


图11 电机转速

Fig.11 Speed of in-wheel motor

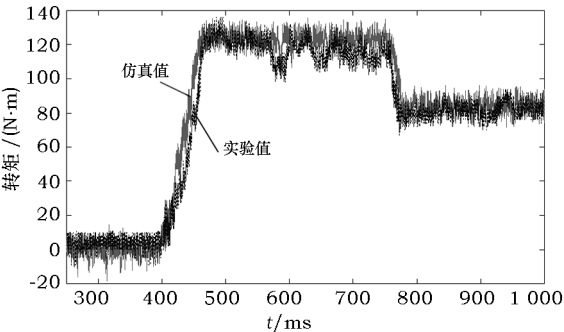


图12 电机电磁转矩

Fig.12 Electromagnetic torque graph of in-wheel motor

4 结论

本文给出一种电动汽车轮毂电机场路耦合分析法,将电机电磁场有限元模型、外部驱动控制电路耦合到一起;分析了轮毂电机的磁场分布、空载反电势、气隙磁密等主要性能参数,并考虑了外电路中高次谐波的影响,更接近实际情况,较传统分

析方法更准确。

联合仿真分析了轮毂电机空载启动、加载、卸载等工况,并通过样机实验验证,结果表明仿真计算结果和实验结果能够较好的吻合,证明本文给出的场路耦合分析方法的正确性。此方法也能够用于分析其他类型的电机。

参考文献:

- [1] 辜承林.电动车轮毂永磁电机实用技术探讨[J].微电机,2008(2):56-59.
- [2] 柴海波,鄢治国,况明伟,等.电动车驱动电机发展现状[J].微特电机,2013(4):52-57.
- [3] 褚文强,辜承林.电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2007(4):1-5.
- [4] 李刚,宗长富.四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2014,34(1):47-52.
- [5] 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等.电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制[J].中国电机工程学报,2013(3):83-91.
- [6] Du Bochao, Cui S, Han S, et al. A simple diagnosis of winding short-circuited fault of pmsm for electric vehicle[C]//2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference,2012,9:88-91.
- [7] Pangaribnan K A, Purwadi A. Performance analysis on Ev mode of the 2012 Toyota hybrid[J]. Procedia Technology,2013,11:1065-1073.
- [8] 李景灿,廖勇.考虑饱和及转子磁场谐波的永磁同步电机模型[J].中国电机工程学报,2011(3):60-66.
- [9] 李耀华,吴俊,郭巧娟,等.永磁同步电机矢量控制的两种实现方法比较[J].微电机,2012(1):25-28.
- [10] 李耀华,刘卫国.永磁同步电机矢量控制与直接转矩控制比较研究[J].电气传动,2010(10):9-12.
- [11] 方程,许海平,薛劭申,等.直驱型多相永磁同步电机定子磁动势与气隙磁密特性分析[J].中国电机工程学报,2013(24):106-113.
- [12] Chen Q, Shu H, Ren K, et al. Electromagnetic analysis and design of in-wheel motor of micro-electric vehicle based on Maxwell[J]. Journal of Central South University,2012,19(8):2152-2157.
- [13] 廖勇,甄帅,刘刃,等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011(21):119-127.

(特约编辑:黄家瑜)