

轴径向气隙混合磁路多边耦合电机轴向励磁绕组的反电势及其位置传感器机理

张千帆, 裴宇龙, 程树康

(哈尔滨工业大学, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

POSITION SENSOR PRINCIPLE AND AXIAL EXCITING COIL EMF OF AXIAL AND RACIAL AIR GAP HYBRID MAGNET CIRCUIT MULTI-COUPLING MOTOR

ZHANG Qian-fan, PEI Yu-long, CHENG Shu-kang

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: An axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor is produced based on hybrid stepping motor. A close loop control is achieved on this kind of motor drives without extra-sensor, besides the increasing of the torque per volume. So the motor can be drove as sensorless switched reluctance motor with bigger torque output. The control of axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor is flexible profited from its novel structure with axial coils which can be used as position sensor at the same time that the air gap flux can be adjusted by them. Based on harmonic analysis and experiment on electro-magnetic force in the axial coil, the rotor position detecting principle of axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor is developed, which is according to the electro-magnetic force of the axial coils. The rotor position detecting and shaping circuits are presented. The analysis and experiment show that the frequency of electro-magnetic force in axial coils is 3 times of that in stator coils when 3 phase stator armatures are powered simultaneity. So the sensorless control on the motor is achieved conveniently.

KEY WORDS: Hybrid magnet circuit multi-coupling motor; Hybrid stepping motor; Electro-magnetic force; Position sensor; Sensorless control; Harmonic analysis

摘要: 无传感器控制是比较理想的电机驱动模式, 是电机及电力传动领域的研究热点之一。该文在混合式步进电动机的基础上提出一种轴径向气隙混合磁路多边耦合电机, 电机在提高单位体积出力的同时, 在不增加传感器的条件下实现

了电机的闭环控制。这种电机的结构特点决定了电机控制的灵活性, 轴向励磁绕组既可以控制轴向磁通, 还可以兼作转子位置传感器。该文结合轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的特点, 在对该种结构电机轴向绕组谐波反电势解析分析和实验研究的基础上, 提出基于轴向补偿励磁线圈同时作为电机位置传感器的思想, 探求了轴向励磁补偿控制绕组的传感器机理, 并给出具体电路, 确认了其实现的可行性。研究表明, 当定子绕组三相同时通有电流的时候, 轴向线圈的反电势频率是定子绕组电势的3倍, 根据这个反电势信号, 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机可以方便的实施无传感器控制。

关键词: 混合磁路多边耦合电机; 混合式步进电动机; 反电势; 位置传感器; 无传感器控制; 谐波分析

1 引言

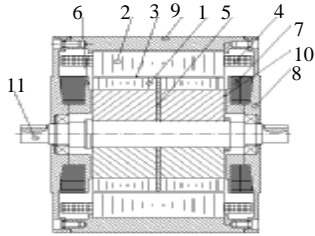
轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机是从永磁感应子式电动机的基础上发展起来的, 因此传统开环控制可以应用在轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机上^[1-4]。在开环控制下, 虽然控制线路简单经济, 控制方法简单, 但由于开环控制没有反馈, 大大降低了电机的性能和运行的平稳性^[5-8]。采用闭环控制, 不仅可以大大改善轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的性能、获得更加平稳的转速, 而且可以显著改善电机的动态品质^[9-12]。目前, 闭环控制采用的传感器大部分以光电码盘为主, 不仅给安装带来困难, 而且成本也比较昂贵^[13]。研究者提出了许多有益的位置传感器的构想, 但与无传感器的控制方法相比较存在不足。

轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的原

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277008).

理结构^[14-15]如图 1 所示, 以电动机的左半段为例, 当线圈通以图示电流时, 轴向励磁补偿控制绕组产生的磁通可以通过端盖、轴向励磁补偿控制绕组铁心、轴向气隙、转子铁心、径向气隙、定子铁心、



注: 1—转子铁心; 2—定子铁心; 3—径向气隙; 4—径向励磁绕组;
5—永磁体; 6—轴向励磁补偿控制绕组铁心; 7—轴向励磁补偿控制绕组; 8—导磁端盖; 9—导磁机壳; 10—轴向气隙; 11 非导磁轴

图 1 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor

机壳形成回路, 在转子转动时穿过轴向线圈的磁链也随之变化, 从而在轴向线圈中也产生感应电势。在实际应用中, 在两侧端盖处相同位置分别布置两套绕组, 其中一套绕组作为励磁补偿控制绕组, 产生轴向磁通; 对另外一套绕组的谐波电势进行提取和处理, 完全可作为位置信号使用, 从而为轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的无传感器的控制提供理论和应用基础。

2 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机轴向线圈谐波反电势的理论分析

以轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机左半段为例, 其磁网络模型^[16]如图 2 所示。

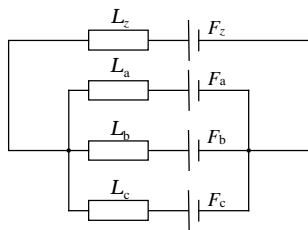


图 2 轴径向气隙混合磁路多边耦合电机轴向线圈局部磁网络模型

Fig. 2 Axial coil partial magnet network model of axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor

为便于分析和计算, 在建立磁网络模型时, 做如下假设:

- (1) 忽略磁路饱和的影响, 认为磁路是线性的。
- (2) 忽略定、转子铁心的磁压降, 只考虑气隙磁导。

(3) 不计磁滞和涡流效应。

(4) 不计定子极间和端部漏磁。

(5) 以增磁运行方式为例, 忽略永磁体对轴向线圈的影响。

该电动机定子为三相六极结构, 由于电动机内部结构的对称性, 可以将状态相同的极合并, 因此图中只画出定子三个大极的磁路。

定子绕组断开, 轴向线圈单独作用下时, 可求得轴向线圈磁通为^[17]

$$F_0 = \frac{F_z}{\frac{1}{L_z} + \frac{1}{L_a + L_b + L_c}} = \frac{F_z \cdot L_z \cdot (L_a + L_b + L_c)}{L_a + L_b + L_c + L_z} \quad (1)$$

当分别 a、b、c 通电时通过轴向线圈的磁通为

$$F_a = \frac{F_a}{\frac{1}{L_a} + \frac{1}{L_z + L_b + L_c}} \cdot \frac{L_z}{L_z + L_b + L_c} = \frac{F_a \cdot L_a \cdot L_z}{L_a + L_b + L_c + L_z} \quad (2)$$

$$F_b = \frac{F_b}{\frac{1}{L_b} + \frac{1}{L_a + L_z + L_c}} \cdot \frac{L_z}{L_a + L_z + L_c} = \frac{F_b \cdot L_b \cdot L_z}{L_a + L_b + L_c + L_z} \quad (3)$$

$$F_c = \frac{F_c}{\frac{1}{L_c} + \frac{1}{L_a + L_b + L_z}} \cdot \frac{L_z}{L_a + L_b + L_z} = \frac{F_c \cdot L_c \cdot L_z}{L_a + L_b + L_c + L_z} \quad (4)$$

只考虑气隙磁导 3 次以下谐波而忽略高次谐波, 则每相气隙磁导可表示为

$$\begin{cases} L_a = 2(L_0 + L_1 \cos q_e + L_2 \cos 2q_e + L_3 \cos 3q_e) \\ L_b = 2[L_0 + L_1 \cos(q_e - 2\pi/3) + L_2 \cos 2(q_e - 2\pi/3) + L_3 \cos 3(q_e - 2\pi/3)] \\ L_c = 2[L_0 + L_1 \cos(q_e + 2\pi/3) + L_2 \cos 2(q_e + 2\pi/3) + L_3 \cos 3(q_e + 2\pi/3)] \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)可得

$$F_0 = \frac{F_z L_z}{L_z + 6(L_0 + L_3 \cos 3q_e)} [6(L_0 + L_3 \cos 3q_e)] = \frac{F_z L_z}{L_z + 6(L_0 + L_3 \cos 3q_e)} [6(L_0 + L_3 \cos 3q_e) + L_z - L_z] = \frac{F_z L_z}{(L_z + 6L_0)(1 + \frac{6L_3 \cos 3q_e}{L_z + 6L_0})} \quad (6)$$

因为 $L_z + 6L_0 \gg 6L_3 \cos 3q_e$ ，所以 $(1 + \frac{6L_3 \cos 3q_e}{L_z + 6L_0})^{-1} \approx$

$$1 - \frac{6L_3 \cos 3q_e}{L_z + 6L_0}$$

于是式(6)可以简化为

$$F_0 \approx F_z L_z - \frac{F_z L_z^2}{L_z + 6L_0} \cdot (1 - \frac{6L_3 \cos 3q_e}{L_z + 6L_0}) \quad (7)$$

将式(5)代入式(2)得

$$F_a = \frac{2F_z L_z}{L_z + 6(L_0 + L_3 \cos 3q_e)} \cdot (L_0 + L_1 \cos q_e + L_2 \cos 2q_e + L_3 \cos 3q_e) \approx \frac{2F_a L_z}{L_z + 6L_0} (1 - \frac{6L_3 \cos 3q_e}{L_z + 6L_0}) \cdot (L_0 + L_1 \cos q_e + L_2 \cos 2q_e + L_3 \cos 3q_e) \quad (8)$$

令 $\frac{3L_3}{(L_z + 6L_0)} = C_1$ ，则

$$F_a = \frac{2F_a L_z}{L_z + 6L_0} \cdot (1 - 2C_1 \cos 3q_e) (L_0 + L_1 \cos q_e + L_2 \cos 2q_e + L_3 \cos 3q_e) = \frac{2F_a L_z}{L_z + 6L_0} (L_0 + L_1 \cos q_e + L_2 \cos 2q_e + L_3 \cos 3q_e - 2C_1 L_0 \cos 3q_e - 2C_1 L_1 \cos 3q_e \cos q_e - 2C_1 L_2 \cos 3q_e \cos 2q_e - 2C_1 L_3 \cos^2 3q_e) = \frac{2F_a L_z}{L_z + 6L_0} [(L_0 - C_1 L_3) + (L_1 - C_1 L_2) \cos q_e + (L_2 - C_1 L_1) \cos 2q_e + (L_3 - 2C_1 L_0) \cos 3q_e - C_1 L_1 \cos 4q_e - C_1 L_2 \cos 5q_e - C_1 L_3 \cos 6q_e] \quad (9)$$

当 a、b、c 相通电时磁势可以表示为

$$\begin{cases} F_a = NI_m \sin wt \\ F_b = NI_m \sin(wt - \frac{2}{3}\pi) \\ F_c = NI_m \sin(wt + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得

$$F_a = \frac{NL_z I_m}{(L_z + 3L_0)} [2(L_0 - C_1 L_3) \sin wt + 2(L_1 - C_1 L_2) \cos wt \cdot \sin wt + 2(L_2 - C_1 L_1) \cdot \cos 2wt \cdot \sin wt + 2(L_3 - 2C_1 L_0) \cos 3wt \cdot \sin wt - 2C_1 L_1 \cos 4wt \cdot \sin wt - 2C_1 L_2 \cos 5wt \cdot \sin wt - 2C_1 L_3 \cos 6wt \cdot \sin wt] = \frac{NL_z I_m}{(L_z + 3L_0)} \cdot [2(L_0 - C_1 L_3) \sin wt + (L_1 - C_1 L_2) \sin 2wt + (L_2 - C_1 L_1) (\sin 3wt - \sin wt) + (L_3 - 2C_1 L_0) \cdot (\sin 4wt - \sin 2wt) - C_1 L_1 (\sin 5wt - \sin 3wt) -$$

$$C_1 L_2 (\sin 6wt - \sin 4wt) - C_1 L_3 (\sin 7wt - \sin 5wt)] = \frac{NL_z I_m}{(L_z + 3L_0)} [(2L_0 - L_2 + C_1 L_1 - 2C_1 L_3) \sin wt + (L_1 - L_3 + 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \sin 2wt + L_2 \sin 3wt + (L_3 - 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \cdot \sin 4wt + (C_1 L_3 - C_1 L_1) \cdot \sin 5wt - C_1 L_2 \sin 6wt - C_1 L_3 \sin 7wt] \quad (11)$$

同理可得

$$F_b = \frac{NL_z I_m}{(L_z + 6L_0)} [(2L_0 - L_2 + C_1 L_1 - 2C_1 L_3) \cdot \sin(wt - \frac{2}{3}\pi) + (L_1 - L_3 + 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \cdot \sin 2(wt - \frac{2}{3}\pi) + L_2 \sin 3(wt - \frac{2}{3}\pi) + (L_3 - 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \sin 4(wt - \frac{2}{3}\pi) + (C_1 L_3 - C_1 L_1) \sin 5(wt - \frac{2}{3}\pi) - C_1 L_2 \sin 6(wt - \frac{2}{3}\pi) - C_1 L_3 \sin 7(wt - \frac{2}{3}\pi)] \quad (12)$$

$$F_c = \frac{NL_z I_m}{(L_z + 6L_0)} [(2L_0 - L_2 + C_1 L_1 - 2C_1 L_3) \cdot \sin(wt + \frac{2}{3}\pi) + (L_1 - L_3 + 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \cdot \sin 2(wt + \frac{2}{3}\pi) + L_2 \sin 3(wt + \frac{2}{3}\pi) + (L_3 - 2C_1 L_0 - C_1 L_2) \sin 4(wt + \frac{2}{3}\pi) + (C_1 L_3 - C_1 L_1) \sin 5(wt + \frac{2}{3}\pi) - C_1 L_2 \sin 6(wt + \frac{2}{3}\pi) - C_1 L_3 \sin 7(wt + \frac{2}{3}\pi)] \quad (13)$$

其中， $C_1 = 3L_3 / (L_z + 6L_0)$ 。

当绕组 a、b、c 三相同步通电时，通过轴向线圈的磁通为

$$F_3 = F_0 + F_a + F_b + F_c \quad (14)$$

由式(7)、(11)~(14)可得

$$F_3 = F_z L_z - \frac{F_z L_z^2}{L_z + 6L_0} + \frac{6L_3}{L_z + 6L_0} \cdot \frac{F_z L_z^2}{L_z + 6L_0} \cdot \cos 3wt + \frac{3NL_z I_m L_2}{(L_z + 6L_0)} \sin 3wt - \frac{9NL_z I_m L_2 L_3}{(L_z + 6L_0)^2} \sin 6wt \quad (15)$$

$$e_3 = -\frac{dF}{dt} = -[-\frac{3 \times 6L_3 F_z w L_z^2}{(L_z + 6L_0)^2} \sin 3wt + \frac{3^2 NL_z I_m L_2 w}{(L_z + 6L_0)} \cos 3wt - \frac{9 \times 6NL_z I_m L_2 L_3 w}{(L_z + 3L_0)^2} \cos 6wt] =$$

$$\frac{18L_3F_zwL_z^2}{(L_z+6L_0)^2}\sin 3\omega t - \frac{9NL_zI_mL_2w}{(L_z+6L_0)}\cos 3\omega t + \frac{54NL_zI_mL_2L_3w}{(L_z+6L_0)^2}\cos 6\omega t \quad (16)$$

从以上的解析表达式可以看出当绕组三相通电时，轴向线圈反电势的主要谐波成分为三次和六次谐波。应用相同的方法可以得到，当电机的定子绕组一相或两相通电时，轴向线圈反电势中的谐波成分比较复杂，其中的主要次谐波由各次谐波前的系数决定，即由电机的结构和参数确定，需要进一步的分析。

现将一台三相六极混合磁路多边耦合电机样机为例，进行轴向线圈反电势的仿真分析，其中参数如下：

定子 a、b、c 三相绕组的磁势分别为

$$\begin{cases} F_a = 16 \times 50 \sin 2\pi \cdot 50 \cdot t \\ F_b = 16 \times 50 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{2}{3}\pi) \\ F_c = 16 \times 50 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

轴向线圈的励磁磁势为： $F_z = 700 \times 2A$

L_z 由电机的尺寸可通过数学计算得到。

L_0 、 L_1 、 L_2 、 L_3 可通过齿层数据库的齿层数据得到三次以下谐波的辐值。

通过 Matlab 仿真可得到该样机的轴向线圈的反电势，图 3 分别给出了定子绕组三相通电时轴向线圈的反电势及其傅立叶分析。

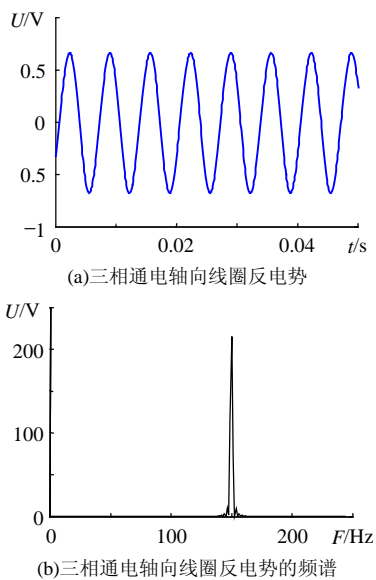


图 3 轴向线圈的反电势及其频谱
Fig. 3 Axial coil EMF signal and frequency component of the signal

从轴向线圈仿真波形及其傅立叶分析可以看出，当定子绕组三相通电时轴向线圈的反电势为 3 次谐波，可将此 3 次谐波反电势作为位置反馈信号，实现位置传感。当一、两相通电时轴向线圈的反电势比较复杂，含有基波、2 次和 3 次谐波，若要实现位置传感，需对波形进行进一步处理。

3 实验研究

构建电机试验台，对轴径向气隙 HBSRM 采用 SPWM 控制，使电机旋转起来以后测量定子绕组电压和轴向线圈的电动势，结果如图 4 所示。图中，波形 A 是 1 相绕组电压的实测波形，波形 B 是轴向线圈电动势的实测波形。

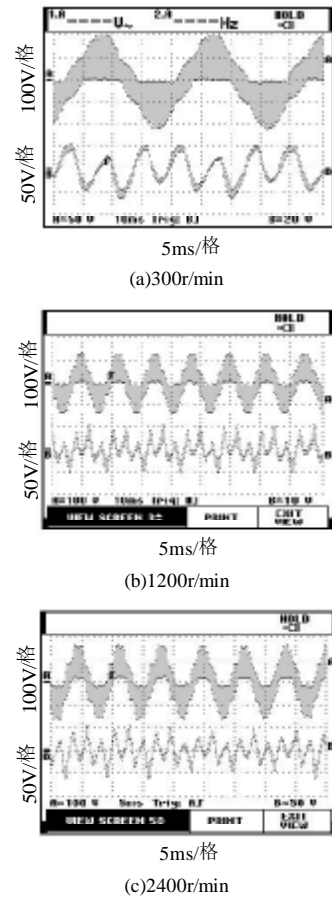


图 4 轴向线圈电势和绕组反电势实测波形
Fig. 4 Measured curves of axial coil and armature EMF

可以看到轴向线圈反电势的频率是定子绕组电势频率的 3 倍，即在定子绕组电势 1 个周期内，轴向线圈反电势波形有 3 个过零点。如果采用过零检测电路，将轴向线圈反电势波形变换成脉冲序列，就形成了电机转子位置传感器。实验电机的极对数为 16，若将信号 10 倍频，则经过处理后的信号相当于 960 脉冲的编码器输出的信号。

图5给出了位置信号处理电路,由比较器LM393构成具有滞回特性的单电源检零电路。电位器VR2将输出电压反馈到比较器同相输入端,出现滞回特性,避免过零比较器在实际工作过程中,当输入电压恰好在零点附近,由于零点温漂的存在,其输出将由多个正负极性的极限电压出现,造成多个假零点。调解VR2的阻值可以改变回差的大小,以解决回差引起的测量精度和零漂引起的不稳定的矛盾。由555定时器构成单稳态触发电路,去除脉冲前沿的抖动。

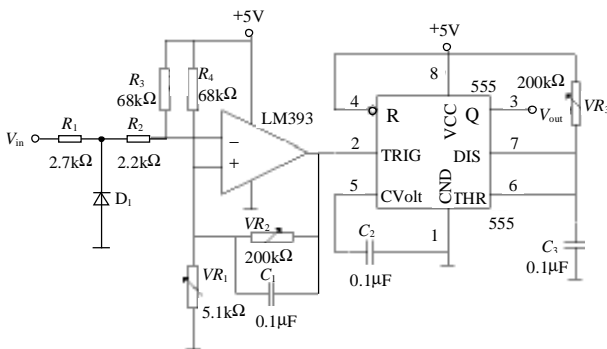


图5 位置信号处理电路图

Fig. 5 Position signal processing circuit

表1给出了由轴向线圈电势测出转速和由转矩转速传感器测出的转速的数据,转矩转速传感器型号为JN388,测速精度为0.05%。

从数据可以看到,由轴向线圈电势测量转速的精度达到了0.1%。

表1 轴向线圈电势测量转速/转矩转速传感器
测量转速数据对比表

Tab. 1 Measured data compare by speed sensor
and by axial coil EMF

转速 1/(r/min)	300	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
转速 2/(r/min)	299.7	899.1	1201.1	1499.4	1798.1	2102.2	2401.9	2697.8	3002.8

注:转速1由JN388测量;转速2由轴向线圈电势测量。

4 结论

(1) 基于电机的等值磁路图,解析了轴向线圈的反电势,指出当定子绕组3相同时通有电流的时候,轴向线圈的反电势频率是定子绕组电势的3倍。

(2) 对轴向线圈反电势进行了仿真研究和频谱分析,验证了理论分析的结论。

(3) 通过试验,验证了理论分析的结论,并设计了相应的位置信号处理电路,为这种电机的无位置传感器控制奠定了基础。

参考文献

- [1] 程树康, 郑萍, 崔淑梅, 等. 混合磁路多边形耦合电机的基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 50-58.
Cheng Shukang, Zheng Ping, Cui Shumei *et al.* Fundamental research on hybrid magnetic circuit multi couple electric machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 50-58.
- [2] Zheng Ping, Cheng Shukang. Mechanism of hybrid-magnetic-circuit multi-couple motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, E-3(3): 66-69.
- [3] Zheng Ping, Li Weili, Cheng Shukang. Iron core length of hybrid-magnetic-circuit multi-couple motor[C]. Shenyang: ICEMS Proceedings of the Fifth International Conference, Shenyang, 2001.
- [4] Zheng Ping, Liu Yong, Wang Tiecheng, Cheng Shukang. Theoretical and experimental research on hybrid-magnetic-circuit multi-couple motor[C]. Seattle, USA: 39th IAS Annual Meeting, 2004.
- [5] 崔淑梅, 宋立伟, 程树康. HB型共永磁体二自由度平面直线电动机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 33-36.
Cui Shumei, Song Liwei, Cheng Shukang. The research on hybrid common permanent magnet two freedom plane liner motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 33-36.
- [6] Zhu Chunbo, Song Liwei, Zheng Ping *et al.* A novel plane linear driving system and its use in robot end-effector[J]. High Technology Letters, 2000, 7(4): 67-69.
- [7] 王宗培, 韩光鲜, 程智. 二相混合式步进电动机的磁化特性(非线性分析基础)[J]. 微电机, 2001, 34(2): 3-11.
Wang Zongpei, Han Guangxian, Cheng Zhi. Magnetization characteristics of 2-phase hybrid stepping motor (base of nonlinear analysis). Micromotor, 2001, 34(2): 3-11.
- [8] 韩光鲜, 王宗培, 程智. 二相混合式步进电动机非线性电感分析. 微电机, 2001, 34(3): 3-6.
Han Guangxian, Wang Zongpei, Cheng Zhi. Nonlinear inductance analysis of 2-phase hybrid stepping motor. Micromotor, 2001, 34(3): 3-6.
- [9] 杨贵杰, 李勇, 陆永平, 等. 永磁感应子式无刷直流电动机的模型及控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 122-127.
Yang Guijie, Li Yong, Lu Yongping *et al.* Model and control of permanent magnet inductor type synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 122-127.
- [10] Chai Feng, Zhu Chunbo, Cheng Shukang. Calculation for electromagnetic torque of double-stator-permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 7(2): 58-61.
- [11] Yang Guijie, Du Chunyang, Lu Yongping *et al.* Model of permanent magnet inductor type synchronous motor[C]. Miami USA: Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003.
- [12] Petar C, Branislav K, Stipe A. Microcomputer implementation of optimal algorithms for closed-loop control of hybrid stepper motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(6): 1319-1325.
- [13] Wale, John D, Charles P. Low-cost sensorless technique for load torque estimation in a hybrid stepping motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(8): 833-841.
- [14] 程树康, 张千帆, 崔淑梅, 等. 一种新型混合磁路多边形耦合直线

- 推进器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 96-99.
- Cheng Shukang, Zhang Qianfan, Cui Shumei *et al.* A novel hybrid-magnetic-circuit multiple-coupling linear electromagnetic thruster [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 96-99.
- [15] 程树康, 寇宝泉, 杨世彦, 等. 串联磁路结构双定子混合式直接驱动电动机的转矩特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 127-132.
- Cheng Shukang, Kou Baoquan, Yang Shiyan *et al.* Torque characteristic of double-stator hybrid direct drive motor with series magnetic circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 127-132
- [16] 程树康, 裴宇龙, 张千帆. 轴径向气隙混合磁路多边耦合电机非线性模型及性能参数的定量研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 121-126.
- Cheng Shukang, Peiyulong, Zhang Qianfan. Nonlinear model and quantitative analysis of performance parameter for the axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 121-126.
- [17] 裴宇龙, 张千帆, 程树康. 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机及其电磁转矩的解析分析[J]. 电网技术, 2005, 29(增刊): 17-23.
- Pei Yulong, Zhang Qianfan, Cheng Shukang. Axial and radial air gap hybrid magnet circuit multi-coupling motor and resolution of motor electromagnetic torque[J]. Power System Technology, 2005, 29(Sup.): 17-23.

收稿日期: 2005-11-10。

作者简介:

张千帆 (1974-), 副教授, 研究方向为电机及其控制。