

## 笼型异步磁力耦合器机械特性与试验

葛研军<sup>1</sup>, 袁 直<sup>1</sup>, 贾 峰<sup>2</sup>, 杨均悦<sup>1</sup>, 周凯凯<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学机械工程学院, 大连 116028; 2. 中车大连机车车辆有限公司, 大连 116022)

**摘 要:** 为有效解决目前机械传动系统中选用电机时功率裕度过大而普遍存在的能源利用效率较低问题, 提出一种基于三相异步电机鼠笼转子的异步磁力耦合器 (squirrel cage asynchronous magnetic coupler, SCAMC)。结合 SCAMC 具体结构特点, 采用标量磁位法及二维场边界条件, 建立气隙磁场数理模型; 在气隙磁通密度中引入时间变量, 推导出感生电流随时间变化的表达式; 基于电流叠加性, 将笼条电流折算到转子表面, 并沿圆周方向对感生电流所形成的洛伦兹力进行积分, 建立了 SCAMC 的电磁转矩模型。基于上述理论及技术基础, 设计并制造出一台 37 kW SCAMC 样机, 并对其机械特性进行理论计算、仿真验证及试验测试。结果表明: 转差率相同时, 所得的仿真及试验数据与理论计算值相比, 误差不超过 5%; SCAMC 与同容量的三相异步电机相比, 线性工作区更宽, 过载能力更强, 但其机械特性偏软, 可有效缓解负载对电机的冲击。该研究可为磁力耦合器在大惯量、难启动及经常性过载机械设备中的应用提供参考。

**关键词:** 机械化; 模型; 试验; 磁力耦合器; 鼠笼转子; 机械特性; 电磁转矩; 标量磁位

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.010

中图分类号: TH132

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0068-07

葛研军, 袁 直, 贾 峰, 杨均悦, 周凯凯. 笼型异步磁力耦合器机械特性与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 68-74. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.010 http://www.tcsae.org

Ge Yanjun, Yuan Zhi, Jia Feng, Yang Junyue, Zhou Kaikai. Mechanical properties and testing for squirrel cage asynchronous magnetic coupler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 68-74. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.010 http://www.tcsae.org

### 0 引 言

磁力机械主要是利用电磁耦合作用实现机电系统中主动轴与从动轴之间的运动和动力传递<sup>[1]</sup>, 因此磁力机械一般也可称之为磁力耦合器。

由于磁力耦合器利用气隙磁场传递动力, 即主动轴与从动轴之间无直接机械接触, 因此具有无磨擦、无磨损、允许较大的对中误差等优点<sup>[2-4]</sup>; 此外, 还具有轻载启动、过载保护、隔离震动等特性, 因此受到国内外学者的广泛关注<sup>[5-7]</sup>。

Nehl 等<sup>[8]</sup>给出了由永磁转子和导体实心转子构成的异步磁力耦合器原型机; Wallace 等<sup>[9]</sup>、Smith 等<sup>[10]</sup>分别应用 Maxwell 应力张量法和层理论模型推导出异步磁力耦合器的电磁转矩计算公式; Lequesne 等<sup>[11]</sup>讨论了由永磁体和实心转子组成的异步磁力耦合器中, 永磁体极数及厚度对不同材料构成的实心转子的转矩特性影响。杨超君等<sup>[12-14]</sup>也对异步磁力耦合器的结构特性、涡流及传动特性等进行了长期深入系统的研究, 指出异步磁力耦合器能够在一定负载工况下高效运行, 且具有很好的传动特性; 江苏大学的孔繁余等<sup>[15]</sup>对基于磁力耦合器的高速磁力泵隔离套的涡流损耗进行了分析, 得出磁力泵隔离套的理想材料。

磁力耦合器一般为盘式、实心套筒式及笼型套筒式。盘式及实心套筒式磁力耦合器运行机理是依靠铜盘或铜套与永磁体之间的电磁感应产生涡流进而产生转矩, 实现主动轴与从动轴之间的动力传动<sup>[16-17]</sup>, 因此涡流损耗大, 集肤效应明显, 导致系统发热大, 同时永磁体盘和铜盘之间存在轴向力, 两盘之间的气隙宽度需进行机械定位, 降低了装置的稳定性, 不适合大功率机电设备传动<sup>[18-19]</sup>。笼型套筒式磁力耦合器中转子机械结构需要重新设计, 与鼠笼转子比其相关性能参数未经大量实践检验, 因此可靠性较差、设计周期长、制造成本高。

为解决上述问题, 本文提出一种基于三相异步电机鼠笼转子的异步磁力耦合器 (squirrel cage asynchronous magnetic coupler, SCAMC)。所提出的 SCAMC 外转子为永磁转子, 起励磁作用; 内转子为标准异步电机的鼠笼转子, 以期磁力耦合器在大惯量、难启动及经常性过载机械设备中的应用提供参考。

### 1 气隙磁通密度模型

气隙磁场是 SCAMC 赖以进行机电能量转换的关键, 只有建立准确的气隙磁场计算模型, 才能从根本上揭示出 SCAMC 的动态机械特性变化规律, 奠定其系列化设计及制造基础<sup>[20-22]</sup>。

目前较为成熟的气隙磁场计算理论及方法主要源于异步电机<sup>[23-24]</sup>及永磁电机<sup>[25-27]</sup>, 所揭示的运行机理分别为三相交流电形成的圆形磁场与鼠笼转子或永磁体之间的相互作用关系, 所述方法不适用于 SCAMC 中永磁体与鼠笼转子间的相互作用关系。为此, 本文首先采用标量磁

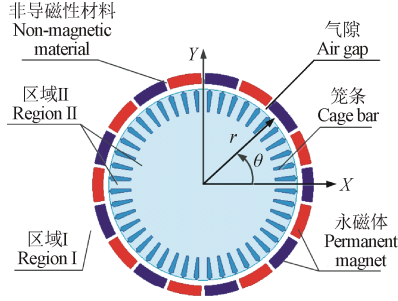
收稿日期: 2015-11-02 修订日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51285092); 辽宁省科技计划项目 (2010220004); 大连市科技计划项目 (2013A16GX109)。

作者简介: 葛研军, 男, 辽宁宽甸人, 教授, 博士, 研究方向为电磁传动及智能控制。大连 大连交通大学机械工程学院, 116024。Email: yjge@djtu.edu.cn

位法并结合二维场边界条件, 建立 SCAMC 的气隙磁场数理模型。

图 1 为 SCAMC 的二维磁场分析模型。图 1 中永磁体为瓦型结构, 充磁方式为平行充磁, 并忽略轭铁对磁路的影响。



注:  $\theta$  为气隙圆周角, rad;  $r$  为气隙磁通密度半径, m。

Note:  $\theta$  represents air gap tangential component of cylindrical coordinates, rad;  $r$  represents air gap radial component of cylindrical coordinates, m.

图 1 异步磁力耦合器二维磁场分析模型

Fig.1 2-D magnetic field analysis model of SCAMC

由于 SCAMC 与磁场调制式永磁齿轮中的永磁体励磁磁场的分布规律相同, 因此由文献[28]及文献[29]可得 SCAMC 中永磁体的气隙磁通密度径向分量及切向分量分别为

$$B_r^{(k)}(r, \theta) = (-1)^{k+1} \mu_0 \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot r^{(-1)^k(i+1)} \cdot U_i^{(k)}(r) \cos(i\theta) (k=1, 2), \quad (1)$$

$$B_\theta^{(k)}(r, \theta) = (-1)^{k+1} \mu_0 \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot r^{(-1)^k(i+1)} \cdot U_i^{(k)}(r) \sin(i\theta) (k=1, 2). \quad (2)$$

式中  $B_r^{(k)}(r, \theta)$  及  $B_\theta^{(k)}(r, \theta)$  分别为永磁体气隙磁通密度的径向及切向分量, T;  $r$  为气隙磁通密度半径, m;  $\theta$  为圆周角, rad;  $\mu_0$  为真空磁导率, N/A<sup>2</sup>;  $k$  和  $i$  均为正整数 (1, 2, 3, ...);  $U_i^{(k)}(r)$  为微分方程通解系数, 具体参见文献[28]。

式 (1) 及式 (2) 仅为 SCAMC 在静止状态下的气隙磁通密度表达式, 反映不出永磁体旋转时气隙磁通密度随电角度的变化规律, 为此将时间变量引入式 (1) 及式 (2) 中。因为仅有气隙磁场的径向分量切割笼条并产生感生电流, 因此可忽略切向气隙磁通密度的影响, 仅分析径向气隙磁通密度即可。

由于气隙磁场基波分量最大, 所以可忽略高阶分量, 将  $i=1$  带入式 (1) 得

$$B_r^{(k)}(r, \theta) = (-1)^{k+1} \mu_0 \cdot r^{2(-1)^k} \cdot U_1^{(k)}(r) \cos(\theta) (k=1, 2). \quad (3)$$

则 SCAMC 稳定运行时气隙磁通密度的动态表达式为

$$B_r^{(k)}(r, \theta) = (-1)^{k+1} \mu_0 \cdot r^{2(-1)^k} \cdot U_1^{(k)}(r) \cos(\omega_z t - \theta) (k=1, 2). \quad (4)$$

式中  $\omega_z$  为永磁转子的电角速度, rad/s;  $t$  为气隙磁通密度波形沿圆周方向的运行时间, s。

由式 (4) 可知, 当  $r$  确定后,  $(-1)^{k+1} \mu_0 r^{2(-1)^k} U_1^{(k)}(r)$  为定值。因此, 可设 SCAMC 气隙磁通密度幅值为

$$B_\delta = (-1)^{k+1} \mu_0 \cdot r^{2(-1)^k} \cdot U_1^{(k)}(r) (k=1, 2). \quad (5)$$

式中  $B_\delta$  为 SCAMC 气隙磁通密度幅值, T。

则式 (4) 可表示为

$$B_r^{(k)}(r, \theta) = B_\delta \cos(\omega_z t - \theta). \quad (6)$$

由式 (6) 及三角函数关系知, 气隙磁通密度的基波径向分量随  $\theta$  的变化呈标准正弦分布。

## 2 感应电流模型

以初始相角  $\theta=0$  的笼条为分析对象, 则由式 (6) 知

$$B_r^{(k)}(r, \theta) = B_\delta \cos \omega_z t.$$

$$f_z = \frac{P \cdot n_z}{60} \quad (7)$$

式中  $f_z$  为永磁转子的旋转频率, Hz;  $P$  为设永磁体极对数;  $n_z$  为转速, rad/s。

设鼠笼转子的旋转速度为  $n_l$ , rad/s; 则永磁转子形成的主磁通以  $(n_z - n_l)$  的相对转速切割笼条, 其在鼠笼转子上感生的电动势及电流的交变频率为

$$f = s \cdot f_z. \quad (8)$$

式中  $f$  为感生电动势及电流的交变频率, Hz;  $s$  为转差率。

则由电磁场理论可得每根笼条上产生的感应电动势为

$$E'_N = -B_\delta \cdot L \cdot r \cdot s \cdot \omega_z \cdot \cos(\theta - \omega_z t). \quad (9)$$

式中  $L$  为笼条长度, m;  $E'_N$  为将永磁外转子及鼠笼内转子等效为相对静止时笼条上的感生电动势, V。

由于鼠笼转子中的笼条被端环短接, 因此端电压为 0。根据基尔霍夫第二定律, 回路中各段电压代数和为 0, 则笼条电压平衡方程式为

$$E'_N - I_N (R_B + j \cdot s \cdot X_2) = 0 \quad (10)$$

即

$$I_N = \frac{E'_N}{R_B + j \cdot s \cdot X_2} = \frac{s \cdot E_N}{R_B + j \cdot s \cdot X_2}. \quad (11)$$

式中  $R_B$  为笼条电阻,  $\Omega$ ;  $j$  为复数函数中的单位向量;  $X_2$  为笼条电抗,  $\Omega$ ;  $I_N$  为笼条感应电流幅值, A。

将式 (9) 中的分子及分母同时除以转差率  $s$ , 则

$$I_N = \frac{E_N}{\frac{R_B}{s} + j \cdot X_2}. \quad (12)$$

$$Z_2 = \sqrt{\left(\frac{R_B}{s}\right)^2 + X_2^2}. \quad (13)$$

式中  $Z_2$  为漏阻抗的有效值,  $\Omega$ 。

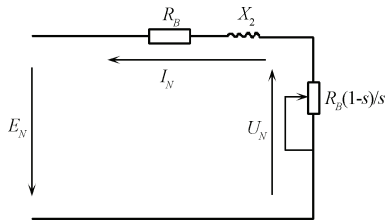
根据上述分析计算即可得出图 2 所示的鼠笼转子等效电路图。结合图 2 并由欧姆定律可得笼条中的瞬态感生电流为

$$i'_N = I_N \cos(\theta - \omega_z \cdot t), \quad (14)$$

式中  $i'_N$  为笼条的瞬态感生电流, A。

由式 (13) 知, 当  $\omega_z t$  一定时, 随着  $\theta$  的变化,  $i' N$

呈正弦变化并交替达到幅值。当  $\theta$  一定时,  $i'N$  对  $\omega_z t$  呈正弦分布关系。



注:  $R_B$  为笼条电阻,  $\Omega$ ;  $X_2$  为笼条电抗,  $\Omega$ ;  $I_N$  为笼条感应电流, A;  $R_B(1-s)/s$  为鼠笼笼条的等效负载电阻值,  $\Omega$ , 其中  $s$  为转差率;  $E_N$  为笼条感应电动势, V;  $U_N$  为等效负载电阻两端的电压, V。

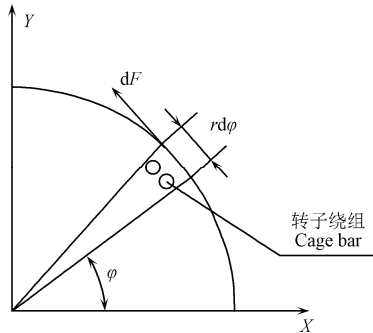
Note:  $R_B$  represents resistance of cage bar,  $\Omega$ ;  $X_2$  represents reactance of cage bar,  $\Omega$ ;  $I_N$  represents induced current of cage bar, A;  $R_B(1-s)/s$  represents equivalent load resistance of cage bar, V;  $E_N$  represents induced electromotive force of cage bar;  $U_N$  represents terminal voltage of equivalent load resistance, V.

图2 鼠笼转子等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of squirrel cage rotor

### 3 电磁转矩模型

将笼条上的电流折算到图3所示的转子表面。



注:  $dF$  为安培力微元, N;  $rd\phi$  为柱坐标切向微元,  $\phi$  为内转子圆周角度, rad。  
Note:  $dF$  represents ampere force element, N;  $rd\phi$  represents cylindrical coordinates tangential element of inner rotor;  $\phi$  represents circumferential angle of inner rotor, rad.

图3 转子表面的折算

Fig.3 Conversion of rotor surface

表面电流密度幅值为

$$\sum_{i=1}^Z i'_N = s \cdot J_r \cdot \cos(\phi - \omega_z t) rd\phi. \quad (15)$$

笼型转子切割磁场产生的安培力为

$$F = \int_0^{2\pi} B_\delta \cdot \cos(\omega_z t - \phi) s \cdot J_r \cdot \cos(\phi - \omega_z t) r \cdot L d\phi. \quad (16)$$

式中  $J_r$  为转子表面电流密度,  $A/m^2$ ;  $rd\phi$  弧度内转子导体的个数为  $Z$ ;  $\phi$  为内转子圆周角度, rad;  $F$  为安培力, N。

将式(16)进行变换得

$$F = \frac{\pi B_\delta \cdot s \cdot J_r \cdot r \cdot L}{2}.$$

转子输出转矩为

$$T = \frac{\pi B_\delta \cdot s \cdot J_r \cdot r^2 \cdot L}{2} \quad (17)$$

式中  $T$  为转子输出转矩, N·m。

对特定的 SCAMC, 其  $B_\delta$ 、 $r$ 、 $L$  均为定值,  $J_r$  虽与  $s$  有关, 但当 SCAMC 稳定运行时,  $s$  变化范围很小, 即  $J_r$

基本不变。因此由式(12)可知,  $T$  与  $s$  近似成线性关系, 说明 SCAMC 具有较为稳定的调速性能。

### 4 所建模型的仿真与试验验证

为进一步验证 SCAMC 稳定运行时, 所建模型的机械特性线性区变化趋势, 以内转子采用标准电机鼠笼转子(Y2-160M2-8), 其他参数如表1所示的 37 kW SCAMC 样机为例进行试验。

表1 笼型异步磁力耦合器尺寸参数(37 kW)

Table 1 Dimension parameter of squirrel cage asynchronous magnetic coupler (37 kW)

名称 Name	数值 Value
永磁转子外径 Outer radius of permanent magnet/mm	113
永磁转子内径 Inner radius of permanent magnet/mm	90
笼型转子外径 Outer radius of cage rotor/mm	89.35
笼型转子内径 Inner radius of cage rotor/mm	30
铁芯长度 Core length/mm	120
气隙宽度 Width of air gap/mm	0.65

#### 4.1 仿真

根据表1所示 SCAMC 试验样机参数, 利用 Ansoft 建立仿真模型。其中, 求解类型设置为动态电磁场分析; 永磁体材料为 NdFe35; 永磁体轭铁材料为 steel\_1010; 鼠笼笼条为 cast\_aluminum\_75C; 鼠笼铁芯为 D23\_50 (叠压系数 0.95); 求解时间设置为 0.3 s; 步长为 0.0001 s; 外转子输入转速为 1 000 r/min。

由于网格剖分直接影响有限元计算结果的正确性, 因此为得到较高的网格剖分质量应采用选择性剖分方法, 即对求解精度要求较高的鼠笼笼条、永磁体及气隙, 其网格剖分应较密 (本文为 30 000); 反之, 对求解精度要求较低的其他部分则应较小 (本文为 10 000), 以缩短系统仿真时间并提高仿真质量。

根据上述设置可得内转子在不同转速及转差率下的转矩值及与其对应的磁场云图。图4为 SCAMC 内转子转速为 946 r/min 稳态运行时的 SCAMC 内部磁通密度云图。

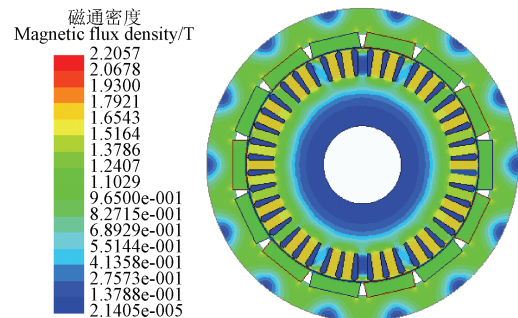


图4 样机磁通密度分布(转子转速为 946 r·min<sup>-1</sup>)

Fig.4 Magnetic flux density distribution of prototype (Rotor speed is 946 r·min<sup>-1</sup>)

表2为不同转速及转差率下的 SCAMC 电磁转矩仿真值。

由图4可知, SCAMC 气隙磁通密度约为 1.0 T, 其最大磁通密度出现在两笼条之间, 约为 1.6 T, 说明在额

定转矩作用下，SCAMC 的气隙磁通密度为饱和状态，转子感生电流所产生的磁场并未影响气隙磁通密度。

另外，由图 4 还可看出，SCAMC 外转子外部及内转子内部的磁通密度非常小（约为  $2.4\times 10^{-5}\text{ T}$ ），说明永磁体轴向工作部分的磁通回路闭合良好，无漏磁产生。

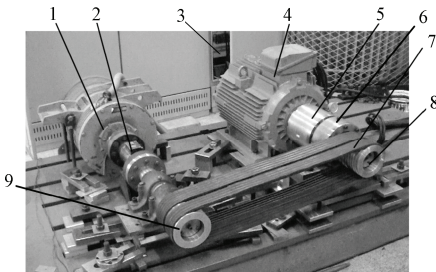
表 2 笼型异步磁力耦合器电磁转矩仿真数据

Table 2 Simulation data of electromagnetic torque squirrel cage asynchronous magnetic coupler

转速 Speed/(r·min <sup>-1</sup> )	转差率 Slip ratio	转矩 Torque/(N·m)
1 000	0	0
992	0.008	44
987	0.013	87.5
982	0.018	112
977	0.023	152
972	0.028	190
966	0.034	232
962	0.038	271
957	0.043	298
954	0.046	321
949	0.051	360
946	0.054	373
940	0.06	405

4.2 试验验证

SCAMC 样机的试验装置如图 5 所示。主要包括：Y2-280-4M 型 55 kW 加载电机 1（大连天元电机股份有限公司，变频范围：1~100 Hz），PTS881 型扭矩传感器 2（北京航宇时代传感器有限公司，量程范围：0~1 000 N·m，精度：0.5%），计算机控制系统 3（大连天运电气有限公司 TY-MTS90A，内置 90 kW 西门子变频器，型号：SINAMICS S120，变频范围：0~600 Hz，精度：0.1%），Y2-250M-6 型 Y2 系列 37 kW 6 极拖动电机（大连达尔马电机有限公司）4，SCAMC 试验样机 5，拖动电机轴承座 6（大连应达实业有限公司：内置双列角接触球轴承，回转精度：1 μm，承载能力：73.5 kN），B 型皮带 7（国标：B 2300 GB/T 11544-1997），拖动电机的 B 型带轮 8（自制，槽型尺寸：B 型槽 GB/T 13575.1-1992），加载电机的 B 型带轮 9（自制，槽型尺寸：B 型槽 GB/T 13575.1-1992）。



1.55 kW 加载电机 2.扭矩传感器 3.计算机控制系统 4.Y2 系列 37 kW 6 极拖动电机 5.样机 6.拖动电机轴承座 7.B 型皮带 8.拖动电机 B 型带轮 9.加载电机 B 型带轮  
1.55 kW load motor 2.Torque sensor 3.Computer control system 4.Three phase asynchronous drag motor of 37kW and 6 poles 5. Prototype 6.Bearing seat of drag motor 7.B type belt 8.B type belt wheel of drag motor 9.B type belt wheel of load motor

图 5 样机试验平台

Fig.5 Prototype experiment platform

图 5 中，拖动电机 4 及加载电机 1 采用交流矢量变频器控制；计算机控制系统 3 由工控机、PLC 及变频器组成，以实现拖动电机 4 及加载电机 1 的手动或自动控制，并可实时显示或打印转矩及转速的测量值；扭矩传感器 2 可对加载电机 1 进行转矩及转速测量：其转矩测量范围为 0~700 N·m，转速为 0~4 000 r/min；拖动电机轴承座 5 内置光电编码器，可读取试验样机 5 的输出转速；拖动电机 B 型带轮 8 的直径与加载电机 B 型带轮 9 的直径相同，可实现 1：1 的转矩及转速传递。

试验时将试验样机 5 的内转子通过键联接安装在拖动电机 4 的输出轴上，使其与拖动电机 4 的转子同步旋转。为方便分析数据，通过计算机控制系统 3 中的变频器控制，使拖动电机 4 的转速恒定为 1 000 r/min；试验样机 5 的永磁外转子通过拖动电机轴承座 6 与拖动电机 B 型带轮 8 联接，并通过 B 型皮带 7 与加载电机 1 相联，可通过拖动电机轴承座 6 中的内置光电编码器读取试验样机 5 的外转子转速。

通过控制加载电机 1 的电流，使其提供 0~525 N·m 的负载转矩，所加载的转矩可通过扭矩传感器 2 读出。由于拖动电机 4 与加载电机 1 的带轮直径相同，其转速及转矩传动比均为 1：1，因此试验样机 5 的输出转矩即为扭矩传感器的显示读数。

首先空载启动拖动电机 4 使其运行平稳，然后再启动加载电机 1，逐步增加加载电机 1 的电流，由扭矩传感器 2 读取所加载的转矩并进行记录。利用拖动电机轴承座 6 内的光电编码器读取每次加载完成后试验样机 5 的外转子转速稳定后的转速值，并根据式（5）计算试验样机 5 的内、外转子转差率，即可得如表 3 所示的 SCAMC 电磁转矩与转差率的对应关系。

表 3 中，加载转矩以 30.5 N·m 步长逐步增加，因拖动电机 4 的额定转矩约为 360 N·m，故可设定加载电机的最大试验转矩为 396 N·m（相当于拖动电机 4 过载 10%）。

表 3 笼型异步磁力耦合器电磁转矩试验数据

Table 3 Experimental data of electromagnetic torque squirrel cage asynchronous magnetic coupler

转速 Speed/(r·min <sup>-1</sup> )	转差率 Slip ratio	转矩 Torque/(N·m)
1 000	0	0
993	0.007	30.5
990	0.01	61
986	0.014	91.5
982	0.018	122
978	0.022	152.5
974	0.026	183
969	0.031	213.5
966	0.034	244
964	0.036	274.5
959	0.041	305
957	0.042	335.5
951	0.048	366
943	0.057	396.5



由表 3 可知:随着加载转矩的逐渐增大,输出转速随之逐渐降低;加载转矩每增大  $30.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,转差率大约增大 0.003,说明转差率与试验样机 5 的输出转矩基本呈线性关系。由表 2、表 3、式 (10) 及式 (12) 即可绘制出图 6 所示的 SCAMC 电磁转矩仿真值、试验值及理论值与转差率的关系曲线。

由图 6 可知:加载转矩依次增大时,试验样机 5 的转矩仿真值、试验值及理论值基本均呈线性变化,且仿真值、试验值与理论曲线非常接近(转差率相同时,误差均小于 5%),验证了本文所建模型的正确性。

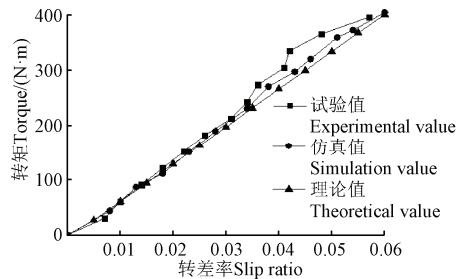


图 6 笼型异步磁力耦合器转矩与转差率关系

Fig.6 Relationship between torque and slip rate of squirrel cage asynchronous magnetic coupler

由表 3 及图 6 知:加载转矩从 0 加载至拖动电机 4 的额定转矩 ( $366 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) 过程中,SCAMC 的转差率变化为 0~4.8%,满足一般机械生产对动力输出转速相对固定要求。但额定负载下拖动电机 4 的最大转差率为 2%,而 SCAMC 的转差率则为 4.8%,约为其 2.5 倍,说明 SCAMC 的机械特性较异步电机偏软。

当加载电机 1 加载至最大试验扭矩  $396 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,SCAMC 的转差率为 5.7%,其相对于额定负载转差率增加了 9%,仍在线性区域内运行,说明 SCAMC 具有较强的过载能力,可有效缓解负载对电机的冲击,即当机电系统出现运行故障时,可有效保护电机及相应电气设备。

## 5 结 论

1) 结合鼠笼转子的异步磁力耦合器 (squirrel cage asynchronous magnetic coupler, SCAMC) 的具体结构特点,设计并制造出一台  $37 \text{ kW}$  SCAMC 样机,并对其机械特性进行测试,结果表明:加载转矩每增大  $30.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,转差率增大 0.003,即 SCAMC 输出转矩与转差率基本呈线性变化。

2) 转差率相同时,SCAMC 的仿真值、试验值与理论值误差均小于 5%,验证了该文所建模型的正确性。

3) 额定负载下  $37 \text{ kW}$  6 极三相异步电机的最大转差率为 2%,而同负载下 SCAMC 的转差率则为 4.8%,说明 SCAMC 的机械特性较异步电机偏软。

4) 加载至最大试验扭矩  $396 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,SCAMC 相对于额定负载的转差率增加了 9%,但仍在线性区域内运行,说明 SCAMC 既具有较强的缓解负载对电机的冲击能力,也具有较大的过载承受能力,可有效解决机械传动系统中选用电机时功率裕度过大问题。

## [参 考 文 献]

- [1] Xie Wenyan, Lin Subin. Analysis and optimization of wireless power transmission magnetic coupling structures[J]. Electrical Engineering, 2014, 15(9): 27—31.
- [2] Chen M, Chau K T, Che L, et al. Design and analysis of a new axial-field magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2015, 153: 23—32.
- [3] Padmanathan P, Bird J Z. A continuously variable magnetic gear[J]. Electric Machines & Drives Conference, 2013 IEEE International, 367—373.
- [4] Chen Mu, Chau K T, Li Wenlong, et al. Design and analysis of a new magnetic gear with multiple gear ratios[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 0501904.
- [5] Hu Chao. Design of magnetic coupler for EVs' wireless charging[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2013, 43:195—205.
- [6] Wallace A, Jouanne A V. Industrial speed control: PM couplings an alternative to VFDs[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(5): 57—63.
- [7] 叶乐志, 李德胜, 焦兵锋. 水冷式永磁涡流制动装置的仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 101—105.  
Ye Lezhi, Li Desheng, Jiao Bingfeng. The simulation and experiment of water-cooled type permanent magnet vortex braking equipment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 101—105. (in Chinese with English abstract)
- [8] Nehl T, Lequesne B. Nonlinear two-dimensional finite element modeling of permanent magnet eddy current couplings and brakes[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5): 3000—3003.
- [9] Wallace A, Jouanne A, Williamson S. Performance prediction and test of adjustable, permanent-magnet, load transmission systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 3: 1648—1655.
- [10] Smith A C, Willsamson H, Benhama N, et al. Magnetic drive couplings[C]// Electrical Machines and Drives, 1999. Ninth International Conference on (Conf. Publ. No. 468). IET, 1999: 232—236.
- [11] Lequesne B, Nehl T W. Eddy-current machines with permanent magnets and solid rotors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 33(5): 1289—1294.
- [12] 杨超君, 周曰华, 王晶晶. 双层实心异步磁力联轴器的涡流和传动特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 55—62.  
Yang Chaojun, Zhou Yuehua, Wang Jingjing. Analysis of the eddy current and transmission characteristics in asynchronous

- magnetic coupling with double-layer solid rotor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 55—62. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨超君, 管春松, 丁磊, 等. 盘式异步磁力联轴器传动特性[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 76—84.  
Yang Chaojun, Guan Chunsong, Ding Lei, et al. Transmission characteristics of axial asynchronous permanent magnet couplings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 76—84. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨超君, 郑武, 李志宝. 可调速异步盘式磁力联轴器的转矩计算及其影响因素分析[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 85—91.  
Yang Chaojun, Zheng Wu, Li Zhibao. Torque calculation of speed-adjustable asynchronous disk type of magnetic coupling and its impact factors analysis[J]. Electric Machines & Control, 2012, 16(1): 85—91. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孔繁余, 张勇, 邵飞, 等. 高速磁力泵隔离套的磁涡流损失[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 61—65.  
Kong Fanyu, Zhang Yong, Shao Fei, et al. Eddy current loss of containment shell of high-speed magnetic driving pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [16] Canova A, Vusini B. Design of axial eddy current couplers[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on 2001, 39(3): 1914—1921.
- [17] Sakamoto H, Harada K, Washimiya S, et al. Large air-gap coupler for inductive charger for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(5): 3526—3528.
- [18] 贾峰. 笼型异步磁力耦合器转矩计算与机械特性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.  
Jia Feng. Study on Torque Calculation and Mechanical Properties for Squirrel Cage Asynchronous Magnetic Coupling[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [19] 周凯凯. 调速型鼠笼转子异步磁力耦合器研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.  
Zhou Kaikai. Research on the Adjustable Speed Asynchronous Magnetic Coupling Based on Squirrel Cage[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [20] Wu Zhongze. Analysis of air-gap field modulation and magnetic gearing effects in switched flux permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(5): 1—12.
- [21] Ibo D, Ahmed H B, Gabisi M, et al. Two-dimensional analytical airgap field model of an inset permanent magnet synchronous machine, taking into account the slotting effect[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(4): 1423—1435.
- [22] Guo Yujing, Lin Heyun, Jin Ping, et al. Analytical modeling of air-gap field distributions in permanent magnet embedded salient pole wind generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(12): 5756—5760.
- [23] Rhodes S, He Xiaowei, Elborai S, et al. Magnetic fluid behavior in uniform DC, AC, and rotating magnetic fields[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(7): 513—519.
- [24] 郭磊磊, 张兴, 杨淑英, 等. 一种改进的异步电机转子磁场定向校正算法[J]. 中国电机工程学报, 2013(24): 127—134.  
Guo Leilei, Zhang Xing, Yang Shuying, et al. A modified rotor flux oriented correction algorithm of induction motors[J]. Proceedings of the Csee, 2013, 33(24): 127—134. (in Chinese with English abstract)
- [25] Ilhan E, Kremers M F J, Motoasca E T, et al. Spatial discretization methods for air gap permeance calculations in double salient traction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2165—2172.
- [26] Rahideh A, Korakianitis T. Analytical magnetic field distribution of slotless brushless PM motors. Part 2: Open-circuit field and torque calculations[J]. Iet Electric Power Applications, 2012, 6(9): 639—651.
- [27] 仇志坚, 李琛, 周晓燕, 等. 表贴式永磁电机转子偏心空载气隙磁场解析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 114—121.  
Qiu Zhijian, Li Chen, Zhou Xiaoyan, et al. Analytical calculation of no-load air-gap magnetic field in surface-mounted permanent magnet motors with rotor eccentricity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 114—121. (in Chinese with English abstract)
- [28] 葛研军, 聂重阳, 辛强. 调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩分析计算[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 153—158.  
Ge Yanjun, Nie Chongyang, Xin Qiang. Analytical calculation of air-gap magnetic field and torque of modulated permanent magnetic gears[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 153—158. (in Chinese with English abstract)
- [29] Ge Yanjun, Nie Chongyang, Xin Qiang. A three dimensional analytical of the air-gap magnetic field and torque of coaxial magnetic gears[J]. Progress in Electromagnetic Research, 2012, 131(2): 391—407.

## Mechanical properties and testing for squirrel cage asynchronous magnetic coupler

Ge Yanjun<sup>1</sup>, Yuan Zhi<sup>1</sup>, Jia Feng<sup>2</sup>, Yang Junyue<sup>1</sup>, Zhou Kaikai<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong university, Dalian 116028, China;

2. CRRC Dalian Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd, Dalian 116022, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the problem of the motor's power margin too adequate to ensure the stable operation of the equipment which widely exists in the current mechanical transmission system, a kind of squirrel cage asynchronous magnetic coupler (SCAMC) is proposed based on the principle of three-phase asynchronous motor. The SCAMC has the advantages of the simplicity of mechanical structure, high reliability in successive operation, simple maintenance, weak skin effect of the squirrel cage rotor and adjustable slip ratio and so on. According to the specific characteristics of the SCAMC structure, the mathematical model of air gap magnetic flux density is established by using the scalar magnetic potential method and two-dimensional field boundary conditions. The air gap magnetic flux density generated by the permanent magnet in SCAMC can be decomposed into radial component and tangential component, and it is only the former one that cuts the cage bar and generates induction current and electromagnetic torque. As a consequence, the effect of tangential air gap flux density can be ignored when studying the operating characteristics of SCAMC; only the radial air gap magnetic flux density needs analysis. The time variable is introduced into the expression of radial air gap flux density, and thus the expression of induced current changing over time is deduced and the transformation rule of induced current with space phase and electrical angle is revealed. Based on the current's superposition characteristics, the current of the cage bar is converted onto the rotor surface and the Lorentz force produced by induced current is integrated along the circumference, and thus the electromagnetic torque model is established. On the base of the above theoretical and technological foundation, a 37 kW SCAMC experimental prototype is designed and produced. After installing the prototype on a 37 kW, 6-pole drive motor, the theoretical calculation, simulation verification and experiment measurement on its mechanical behavior are performed. The results show that the simulation value, experimental value and theoretical value of the electromagnetic torque and the slip ratio of SCAMC are all consistent, and the prototype possesses fine overload characteristics. On condition of identical slip ratio, the error rate between simulation and experimental data and theoretical value is less than 5%. In the process of the load torque increasing from 0 to the rated torque of drive motor (366 N·m), the change of slip ratio of SCAMC is 0-4.8%, which can meet the need of a relative fixed output speed during common machinery producing. However, under the rated load, the maximum slip ratio of the 37 kW, 6-pole drive motor is 2%, while the ratio of SCAMC is 4.8%, about 2.5 times that of the former. That is to say, the mechanical characteristic of SCAMC is softer than the asynchronous motor, which means its impact on the motor can be released when the load is changed. When loaded to the maximum experimental torque, which is corresponding to the drive motor overloading by 10%, the slip ratio of SCAMA is 5.7%, which is increased by 9% compared with that under the rated load, but the operation still falls in the linear area, proving the strong overload capability of SCAMC. The simulation and experimental results verify the validity of the model established in this paper, and provide the theoretical and technological reference for the use of magnetic coupler in machineries with large inertia, difficult starting and frequent overload.

**Keywords:** mechanization; models; experiments; magnetic coupler; squirrel cage rotor; mechanical properties; electromagnetic torque; scalar magnetic potential