

复合磁通型鼠笼结构永磁调速器电磁特性分析与设计

李毅搏*, 朱良广, 姜 达, 张 俊, 张 睿
(南京工程学院 应用技术学院, 江苏 南京 211167)

Electromagnetic Characteristics Analysis and Design of Composite Flux Permanent Magnet Adjustable Speed Drive with Squirrel-Cage Structure

LI Yibo*, ZHU Liangguang, JIANG Da, ZHANG Jun, ZHANG Rui

(School of Applied Technology, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: [Objective] To enhance the torque density of permanent magnet adjustable speed drive (PMASD), this paper proposes a composite flux PMASD with squirrel-cage structure, and conducts its electromagnetic design and electromagnetic characteristic analysis. [Methods] Firstly, a brief introduction to the structure and principle of the proposed PMASD was provided, and the theoretical model of PMASD was established based on the equivalent magnetic circuit method. Secondly, the PMASD simulation model was established based on the finite element method. The influence of key structural parameters such as the pole-arc coefficient, thickness and the pole-pairs of permanent magnets on the air-gap magnetic field, torque and torque ripple of the PMASD were studied. And the influence of the cross-sectional area of L-shaped conductor on the loss and torque characteristics of the PMASD were also analyzed. Finally, the torque characteristic and speed regulation characteristic at different shifting distances of the squirrel-cage rotor were analyzed. [Results] When the pole-arc coefficient was 0.8, the air gap flux density waveform of the PMASD was closer to a sine wave, and the torque ripple was relatively small. As the thickness of the permanent magnet increases, the amplitude of the fundamental wave of the air gap flux density was increased, with the growth rate gradually decreasing. A reasonable combination of permanent magnet thickness and pole-arc coefficient could improve the fundamental wave proportion. As the number of pole-pairs increased, within the low slip speed range, the PMASD torque output capacity was

first enhanced and then decreased. Meanwhile, the slip speed corresponding to the maximum torque showed a trend of first increasing and then decreasing. As the cross-sectional area of the conductor bar increased, the resistance of the conductor bar was reduced, and the copper loss of the squirrel-cage rotor was decreased. With the increased of shifting distances, the torque and copper loss were generally reduced, but the reduction rate was gradually decreased. [Conclusion] The proposed composite flux squirrel-cage structure enhances the torque output capability and torque density of the PMASD, offering excellent speed regulation characteristics and thermal conductivity.

Key words: permanent magnet adjustable speed drive; equivalent magnetic circuit; electromagnetic characteristic; finite element method

摘 要: 【目的】为了提升永磁调速器(PMASD)的转矩密度,本文提出了一种复合磁通型鼠笼结构PMASD,并对其进行了电磁设计与电磁特性分析。【方法】首先,对所提PMASD的结构和原理进行了简要介绍,并基于等效磁路法建立了PMASD理论模型;然后,基于有限元法建立了PMASD仿真模型,研究了永磁体极弧系数、永磁体厚度和极对数等关键结构参数对PMASD气隙磁场、转矩及转矩脉动的影响,并分析了L型导条截面积对PMASD损耗特性与转矩特性的影响;最后,分析了不同鼠笼导体转子平移距离下的转矩特性及调速特性。【结果】极弧系数为0.8时,PMASD气隙磁密波形更接近正弦波,转矩脉动较小;随着永磁体厚度的增加,气隙磁密基波幅值增加,增幅减小;永磁体厚度和极弧系数的合理配合,可以提升基波占比;随着极对数的增加,在低转差速度范围内,PMASD转矩输出能力先增再降,且最高转矩对应的转差速度呈先增再减趋势;随着导条截面积的增加,导条电阻

基金项目: 国家自然科学基金(52107048,52307040)

National Natural Science Foundation of China (52107048, 52307040)

减小,鼠笼转子铜耗降低;随着平移距离的增加,转矩与铜耗整体呈下降趋势,但是下降速率逐渐降低。【结论】所提复合磁通型鼠笼结构提升了 PMASD 的转矩输出能力和转矩密度,具有良好的调速特性和导热能力。

关键词: 永磁调速器;等效磁路;电磁特性;有限元法

0 引言

在全球工业设施应用场景中,以泵与风机系统为主体的负载占比较大。传统方法通常采用节流阀与挡板对这类负载的流量进行调节,存在显著的能效短板^[1-2]。作为一种调速方案,安装在原动机和负载之间的永磁调速器(Permanent Magnet Adjustable Speed Drive, PMASD)已被广泛应用于一些工业领域^[1-3]。基于 PMASD 的调速方案成本低,节省空间,适合解决恶劣环境下的特殊工业应用问题。

PMASD 是一种基于永磁涡流耦合器的永磁传动技术^[4-7]。通常包含永磁转子(Permanent Magnet Rotor, PMR)和导体转子,通过调节两转子相对位置的机械操动机构,实现两转子间轴向位置及耦合磁通量的调整,进而实现变负载情况下的负载转速调节^[1,4-5]。

传统 PMASD 一般为单纯的轴向或径向磁通结构^[8-11]。PMR 中交替分布的永磁体励磁生成交替气隙磁场;导体转子通常由均匀铜层固定于铁心构成,从而能降低气隙磁场强度和输出转矩。而开槽导体转子,通过鼠笼式结构,可以在产生转矩的同时降低两转子间的气隙长度,提升气隙磁场强度和转矩输出能力^[12-14]。大功率径向磁通 PMASD 的外径通常较大,轴向端部未能充分利用,造成空间浪费,转矩密度有较大提升空间。另外,对于径向磁通结构,只有两转子耦合部分存在涡流,随着耦合面积的减小,局部涡流损耗较大,导致局部温升较高,不利于调速器的长期稳定运行。

本文提出了一种轴向-径向磁通相结合的开槽鼠笼导体转子(Squirrel-Cage Rotor, SCR)型 PMASD,其空间利用率更高。SCR 上的电流沿着鼠笼导条形成闭合电流回路,调速过程中未与 PMR 耦合的部分也可以导热,因此散热更均匀。首先,对所提 PMASD 的结构和原理进行了简要介绍;其次,基于等效磁路法建立了 PMASD 理论

模型,得到影响调速器气隙磁场、电流、转矩和功率的关键结构参数。再次,建立了 PMASD 仿真模型,并分析了上述关键结构参数对基本电磁特性和机械特性的影响;最后,归纳了调速器电磁设计的一般规律,总结了调速器在设计过程中存在的问题和设计经验。

1 结构设计与原理

所提复合磁通型鼠笼结构 PMASD 由 PMR 和 L 型截面 SCR 组成,如图 1 所示。为提高转矩密度,设计中采用轴向与径向复合磁通^[15-16],可等效延长 PMR 与 SCR 间电磁耦合的有效长度。在 PMR 上,N 极与 S 极永磁体沿中心轴环形交替布置,形成 PMR 径向部分与轴向部分共同作用的复合磁场。转子铁心采用多层硅钢片冲片叠装而成,其高磁导率特性可有效引导磁通。铜笼采用 L 型截面 SCR 结构,其导条端部通过环形端环连接。

PMR 与原动机连接,L 型截面 SCR 与负载连接,当两转子存在滑差转速时,SCR 的 L 型导条中产生感应电动势。在闭合回路状态下,铜笼中产生电流,根据安培定理,载流导条在 PMR 磁场作用下产生切向力,实现 SCR 转矩传递功能。当调整 SCR 与 PMR 之间轴向位置时,两转子间耦合磁通量改变,从而改变调速器输出转矩。对于泵和风机这类负载,转矩与转速平方呈正比,调速器输出转矩调整后,可以在新的转速和负载转矩点再次稳定,实现调速器的调速功能。本文所提复

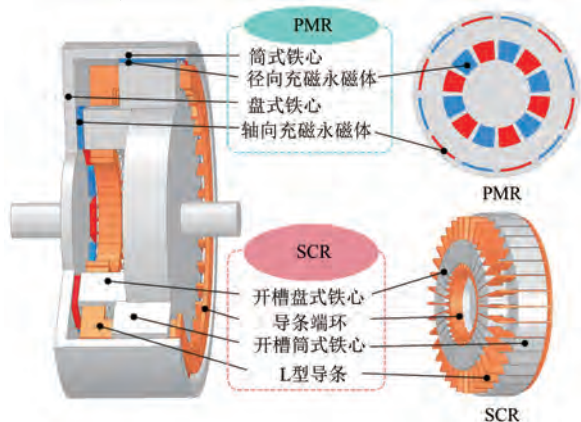


图 1 复合磁通型鼠笼结构 PMASD

Fig. 1 Composite flux PMASD with squirrel-cage structure

合磁通型鼠笼结构 PMASD 提升了转矩密度并避免了传统涡流型 PMASD 局部温升过高的问题。

2 基础理论

2.1 等效磁路

PMASD 的等效磁路模型如图 2 所示^[17-20]。其中,轴向磁路由轴向磁动势 F_{PMa} 驱动,轴向磁通 φ_a 依次通过 PMR 的轴向永磁体磁阻 R_{PMa} 和轴向气隙磁阻 R_{ga} ,从而构成一条封闭的轴向磁通回路;径向磁路由径向磁动势 F_{PMr} 驱动,径向磁通 φ_r 依次通过 PMR 的径向永磁体磁阻 R_{PMr} 和径向气隙磁阻 R_{gr} ,同样形成一条封闭的径向磁通回路。两条路径的等效磁路彼此并联构成复合磁路,可适配不同磁通调控需求。

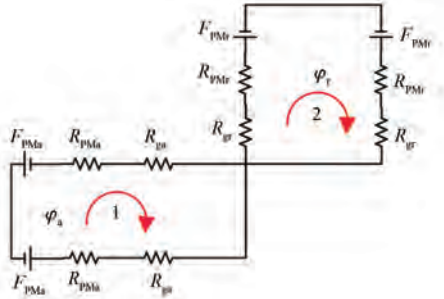


图 2 PMASD 的等效磁路模型

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit model of PMASD

2.2 磁场计算

根据安培环路定理,忽略铁心部分的磁势差,轴向空载气隙磁密 B_{ga} 和径向空载气隙磁密 B_{gr} 可分别表示为

$$\begin{cases} B_{ga}(\theta) = \mu_0 F_{PMa}(\theta) \Lambda_a(\theta) \\ B_{gr}(\theta) = \mu_0 F_{PMr}(\theta) \Lambda_r(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Λ_a 、 Λ_r 分别为轴向、径向气隙磁导; μ_0 为真空磁导率; θ 为气隙圆周方向的角度。

当 PMR 与 SCR 之间存在转速差时,SCR 导条成为载流导体,产生感生电流磁动势。设 PMR 转速为 n_i ,SCR 转速为 n_o ,则两者间转差频率 f_s 为

$$f_s = (n_i - n_o)p/60 \quad (2)$$

式中: p 为极对数。

根据法拉第电磁感应定律,导条感应电动势 E_B 为

$$E_B(\theta) = 2\pi f_s [r_a B_a(\theta) L_a + r_r B_r(\theta) L_r] \quad (3)$$

式中: r_a 、 r_r 分别为槽中心轴向、径向半径; B_a 、 B_r 分别为负载状态下轴向、径向气隙磁密; L_a 、 L_r 分

别为导条的轴向、径向长度。

SCR 的等效电路模型如图 3 所示^[21]。根据图 3,导条电流 I_B 与端环电流 I_r 之间的关系为

$$I_B = 2I_r \sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \quad (4)$$

式中: α_2 为相邻导条间的电角度差。

I_B 的表达式为

$$I_B = E_B / \sqrt{R_{B+R}^2 + X_{B+R}^2} \quad (5)$$

式中: R_{B+R} 为鼠笼等效相电阻; X_{B+R} 为导体转子等效相电抗。

B_a 、 B_r 可表示为

$$\begin{cases} B_a(\theta) = B_{ga}(\theta) + B_{SCRa}(\theta) \\ B_r(\theta) = B_{gr}(\theta) + B_{SCRr}(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: B_{SCRa} 、 B_{SCRr} 分别为导体转子在 SCR 与 PMR 间产生轴向、径向气隙磁密。

负载状态下, Λ_a 、 Λ_r 可表示为

$$\begin{cases} \Lambda_a(\theta) = \frac{1}{l_{ga} + h_{PMa} + \delta_{SCRa}(\theta)} \\ \Lambda_r(\theta) = \frac{1}{l_{gr} + h_{PMr} + \delta_{SCRr}(\theta)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: h_{PMa} 、 h_{PMr} 和 l_{ga} 、 l_{gr} 分别为轴向、径向充磁永磁体厚度和气隙长度; δ_{SCRa} 、 δ_{SCRr} 分别为开槽 SCR 轴向、径向附加等效长度。

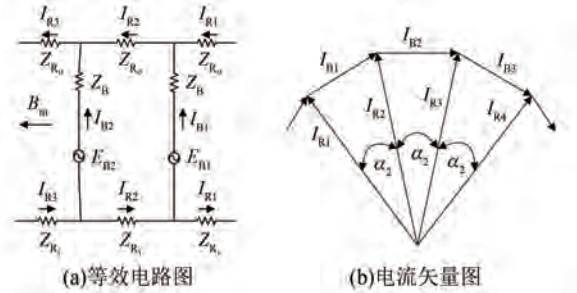


图 3 SCR 等效电路模型

Fig. 3 The equivalent circuit model of SCR

由于 PMR 采用表贴式永磁体安装方式,等效气隙较长,感应磁场较弱。 B_{SCRa} 和 B_{SCRr} 为

$$\begin{cases} B_{SCRa}(\theta) = \mu_0 F_{SCRa}(\theta) \Lambda_a(\theta) \\ B_{SCRr}(\theta) = \mu_0 F_{SCRr}(\theta) \Lambda_r(\theta) \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{SCRa} 、 F_{SCRr} 分别为 SCR 轴向、径向涡流磁动势。

2.3 功率与转矩

稳态情况下,PMASD 输入转矩 T_m 等于输出转矩 T_L 。当转子间存在转速差时,调速器输入功

率 P_{in} 、输出功率 P_{out} 以及转差功率 P_s 可以分别表示为

$$P_{in} = 2\pi n_i T_L / 60 \quad (9)$$

$$P_{out} = 2\pi n_o T_L / 60 \quad (10)$$

$$P_s = P_{in} - P_{out} = 2\pi(n_i - n_o) T_L / 60 \quad (11)$$

由式(11)可得:

$$T_L = \frac{60P_s}{2\pi(n_i - n_o)} \quad (12)$$

2.4 损耗与效率

PMASD 的损耗主要包括铁耗、铜耗和机械损耗^[22]。 P_s 转化为 SCR 铜耗,可表示为

$$P_{Cu_SCR} = N_s I_B^2 R_{B+R} \quad (13)$$

式中: N_s 为 SCR 槽数。

铁耗 p_{Fe} 主要与铁心交链的交变磁场强度 B 和 f_s 相关,可表示为

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} f_s^{1.3} B^2 G \quad (14)$$

式中: C_{Fe} 为铁耗系数; G 为绕线转子铁心质量。

永磁体激励的交变磁通主要通过 SCR 铁心,通过 PMR 铁心的主磁通几乎为恒定磁通;PMR 铁耗由负载状态下 SCR 激励的弱涡流场产生。因此,PMASD 的主要铁耗来自 SCR 铁心,PMR 损耗可忽略。PMASD 的输入功率等于原动机输出功率,分为三部分:铁耗、SCR 铜耗和输出功率。仅考虑铜耗和铁耗时,PMASD 的效率可表示为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Cu_SCR} + P_{Fe}} \times 100\% \quad (15)$$

3 电磁设计与特性分析

基于有限元法,建立 PMASD 仿真模型,PMASD 结构参数如表 1 所示,分析关键结构参数对 PMASD 基本电磁特性的影响^[23-27]。仿真中,轴向与径向永磁体厚度和极弧系数的变化保持同步。

3.1 PMR 设计

为提高转矩密度,PMR 采用轴向-径向复合磁通结构。PMR 的 N 极与 S 极永磁体沿中心轴环形交替布置,分别形成径向与轴向共同作用的复合磁场。PMR 与原动机相连,其转速通常保持恒定。当负载端 SCR 与 PMR 的转速不同时,SCR 导条中将感应出电动势,进而引发电流,产生转矩和转差功率。

3.1.1 极弧系数的影响

轴向永磁体厚度 h_{PMa} 为 5 mm 时,极弧系数 α_p 对气隙磁密的影响如图 4 所示。

表 1 PMASD 结构参数

Tab. 1 PMASD structural parameters

参数名称	参数值
轴向永磁体内半径 r_{PMai}/mm	64
轴向永磁体外半径 r_{PMao}/mm	100
轴向永磁体厚度 h_{PMa}/mm	3~13
径向永磁体内半径 r_{PMri}/mm	141
径向永磁体外半径 r_{PMro}/mm	144~154
径向永磁体轴向长度 l_{PMra}/mm	50
永磁体极对数 p	16
极弧系数 α_p	0.7~1.0
SCR 铁心外半径 r_{SCR}/mm	140
SCR 槽数 N_s	36
额定转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	1 500
额定转矩 $T/(N \cdot m)$	120
L 型导条截面积 S_{char}/mm^2	16~80

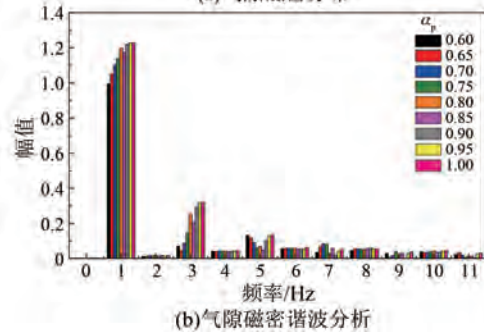
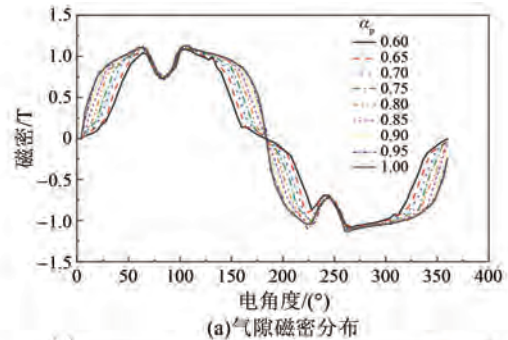


图 4 极弧系数对气隙磁密的影响

Fig. 4 Effect of pole-arc coefficient on air-gap flux density

由图 4(a) 可知,由于 SCR 存在开槽设计,所有曲线在 50° 和 210° 处出现两个局部波峰和两个波谷。随着 α_p 增大,气隙磁密峰值变化不

大,但是波形宽度增加,这意味着每极磁通量增加。由图 4(b)可知,气隙磁密基波幅值在 1.00~1.25 之间。当 α_p 为 0.8 时,3 次、5 次谐波含量相对较低,气隙磁密波形更趋于正弦波,转矩脉动较小。

极弧系数 α_p 为 0.8 时,轴向永磁体厚度 h_{PMa} 对气隙磁密的影响如图 5 所示。

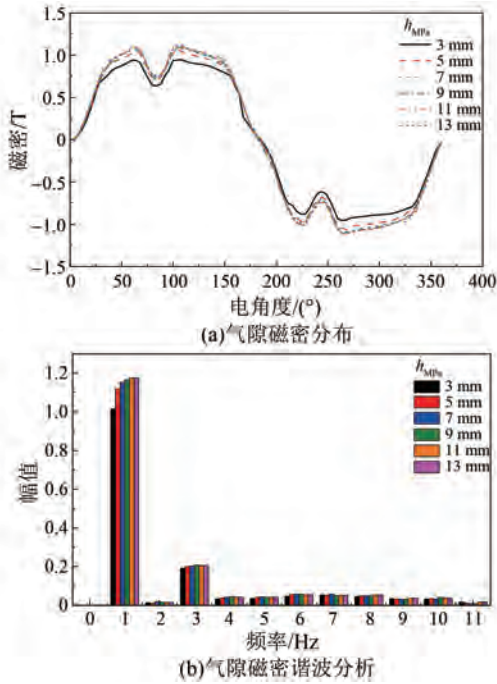


图 5 轴向永磁体厚度对气隙磁密的影响

Fig. 5 Effect of axial permanent magnet thickness on air-gap flux density

由图 5 可知,随着 h_{PMa} 由 3 mm 增大至 13 mm,气隙磁密基波幅值由 1.05 上升至 1.18;3 次谐波幅值为基波幅值的 15%~18%,同样呈现随 h_{PMa} 增加略微上升的趋势;高于 5 次的谐波幅值迅速衰减至 5% 以下,且不同 h_{PMa} 下差异微乎其微。可见, h_{PMa} 主要影响低阶频率分量的幅值大小,对高阶谐波的影响很小。

轴向永磁体厚度 h_{PMa} 为 5 mm 时,极弧系数 α_p 对转矩-转差特性的影响如图 6 所示。

由图 6 可知,不同 α_p 下,随着转差速度的增加,输出转矩均呈先逐步上升达到峰值后缓慢下降的趋势,达到峰值转矩的转差速度为 200 r/min 左右;且转矩上升速度和峰值转矩均随 α_p 增加而增大。

不同 α_p 下,转矩脉动与转差速度的关系如图

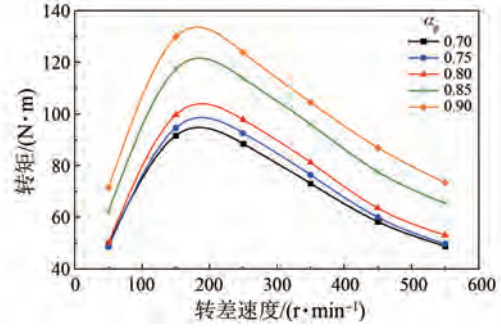


图 6 极弧系数对转矩-转差特性的影响

Fig. 6 Effect of pole-arc coefficient on torque-slip characteristics

7 所示。

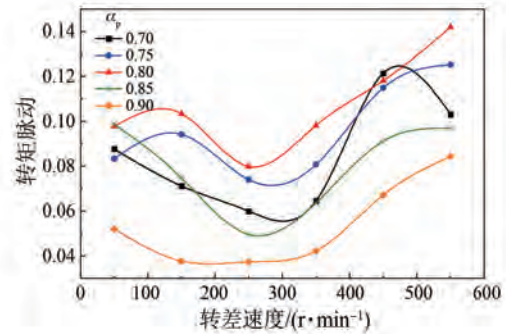


图 7 不同极弧系数下转矩脉动与转差速度的关系

Fig. 7 Relationship between torque ripple and slip speed under different pole-arc coefficients

由图 7 可知, $\alpha_p = 0.7$ 时,随着转差速度的增加,转矩脉动先缓慢下降,随后快速上升,在 450 r/min 时达到峰值后逐步下降。当 $\alpha_p = 0.75$ 、0.8 时,随着转差速度的增加,转矩脉动先缓慢上升随后快速下降,在 250 r/min 时达到最小,之后逐步上升。 $\alpha_p = 0.85$ 时,随着转差速度的增加,转矩脉动先快速下降后逐步上升,在 250 r/min 时达到最小。 $\alpha_p = 0.9$ 时,转动脉动表现出相对平稳的增加趋势,在高转差速度下维持较低的脉动值。结果表明,在较高的 α_p 下,PMASD 的转矩脉动在高转速下相对较低,维持在 10% 以下,满足普通工业需求。

3.1.2 极对数的影响

轴向永磁体厚度 h_{PMa} 为 5 mm,极弧系数 α_p 为 0.8 时,永磁体极对数 p 对转矩-转差特性的影响如图 8 所示。

由图 8 可知,当 $p = 4$ 时,随着转差速度的增加,转矩逐步上升并逐渐趋于平稳。当 $p = 8$ 、10、

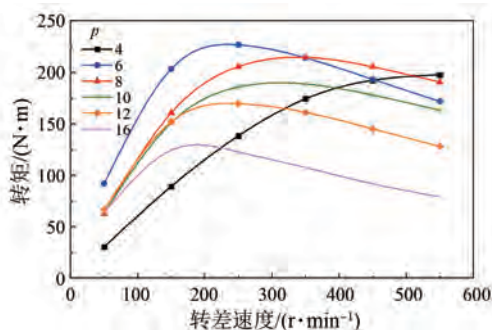


图8 永磁极对数对转矩-转差特性的影响

Fig. 8 Effect of permanent magnet pole-pair number on torque-slip characteristics

12 和 16 时,随着转差速度的增加,转矩先逐步上升达到峰值后逐步下降;且随着极对数的增加,达到峰值转矩的转差速度逐渐降低。当 $p=6$ 时,PMASD 的转矩能力较其他极对数更强。可见,随着极对数的增加,在低转差速度范围内,转矩输出能力先增加再下降,且最高转矩对应的转差速度也呈先增加再减少趋势。

轴向永磁体厚度 h_{PMa} 为 5 mm,极弧系数 α_p 为 0.8 时,不同极对数下,转矩脉动与转差速度的关系如图 9 所示。

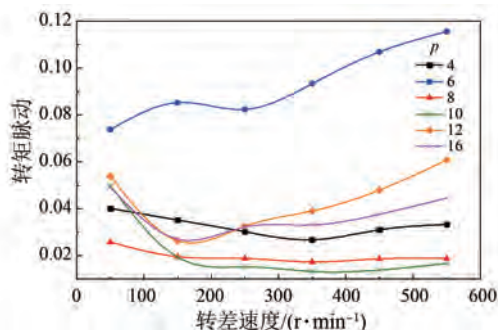


图9 不同极对数下转矩脉动与转差速度的关系

Fig. 9 Relationship between torque ripple and slip speed under different number of pole-pairs

由图 9 可知,当 $p=6$ 时,随着转差速度的增加,转矩脉动逐步上升。当 $p=4, 8$ 时,随着转差速度的增加,转矩脉动呈略微下降趋势。当 $p=10, 12$ 和 16 时,随着转差速度的增加,转矩脉动先快速下降,在 150 r/min 时达到最小,之后逐步上升。 $p=6$ 时,转矩脉动明显较大,其他极对数情况下,转矩脉动维持在 6% 以下,满足普通工业需求。因为 PMASD 槽数为 36 槽,表明该极槽配合会造成转矩脉动过大。

3.2 导体转子设计

导体转子采用典型的鼠笼式结构,由一系列沿径向和轴向布置的 L 型导条和前后端环组成, L 型导条一边紧贴转子铁心的内圆周形成电流通道,另一边向外凸出以增强与端环的连接和机械刚度。L 型导条通过嵌入方式固定于转子槽中,下端与内环焊接连通,上端与外环焊接连通,形成闭合的环流回路,从而保证在转子旋转时感应电流可沿笼条-端环-笼条路径连续流动。转子铁心采用多层硅钢片冲片叠装而成,其高磁导率特性可有效引导磁通。

轴向永磁体厚度 h_{PMa} 为 5 mm,极弧系数 α_p 为 0.8,永磁极对数 p 为 16 时,不同导条截面积 S_{char} 下铜耗与转差速度关系如图 10 所示。

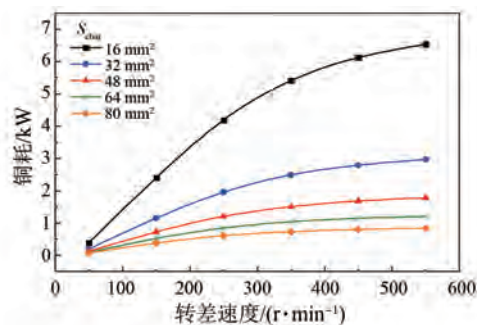


图10 不同导条截面积下铜耗与转差速度关系

Fig. 10 Relationship between copper loss and slip speed under different conductor bar's cross-sectional area

由图 10 可知,当 $S_{\text{char}}=16 \text{ mm}^2$ 时,随着转差速度的增加,铜耗呈显著上升趋势,在转差速度较低时就达到了较高的铜耗值。而当 $S_{\text{char}}=48 \text{ mm}^2, 64 \text{ mm}^2$ 和 80 mm^2 时,随着转差速度的增加,铜耗呈略微上升趋势,铜耗的增长逐渐减缓,并且铜耗曲线的饱和点逐渐向较高转差速度移动。结果表明,截面积较大的导条能够在较高转速下提供更平稳的功率输出,额定输出功率更高。

导条截面积 S_{char} 对转矩-转差特性的影响如图 11 所示。

由图 11 可知,随着转差速度的增加,转矩均呈先快速上升达到峰值后下降的趋势,峰值转矩对应的转差速度约为 200 r/min;且 S_{char} 越小,转矩上升趋势越快,转矩峰值越大。

不同 S_{char} 下,转矩脉动与转差速度关系如图 12 所示。

由图 12 可知,随着转差速度的增加,转矩脉

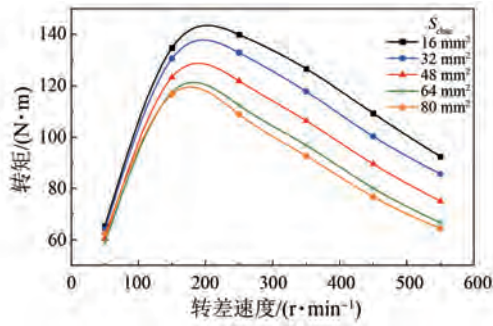


图 11 导条截面积对转矩-转差特性的影响

Fig. 11 Effect of conductor bar's cross-sectional area on torque-slip characteristics

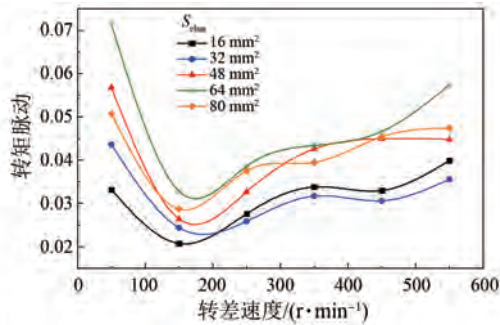


图 12 不同导条截面积下转矩脉动与转差速度关系

Fig. 12 Relationship between torque ripple and slip speed under different conductor bar's cross-sectional area

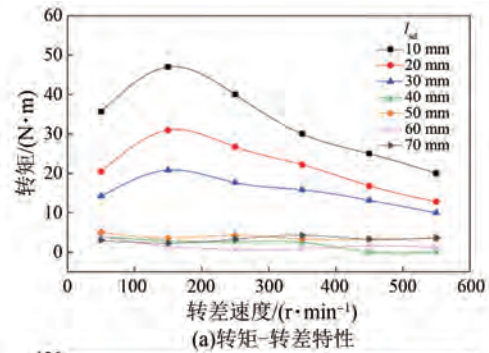
动均呈先快速下降,在 150 r/min 时达到最小,随后缓慢上升趋势。 $S_{\text{cbar}} = 64 \text{ mm}^2$ 、 48 mm^2 的转矩脉动降幅大于 $S_{\text{cbar}} = 80 \text{ mm}^2$ 、 16 mm^2 和 32 mm^2 。

4 调速特性

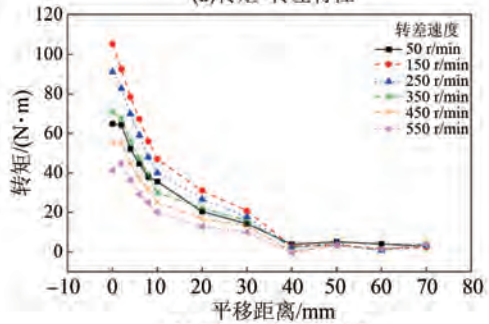
结合 PMASD 的等效磁路模型以及 PMASD 电磁性能分析结果,确定关键结构参数。取 $h_{\text{PMA}} = 5 \text{ mm}$ 、 $\alpha_p = 0.8$ 、 $p = 16$ 。研究该组合参数下,SCR 平移距离 l_{sd} 对 PMASD 调速性能的影响。

不同 l_{sd} 下转矩-转差特性曲线如图 13(a) 所示;不同转差速度下转矩-平移距离特性曲线如图 13(b) 所示。

由图 13(a) 可知,当 $l_{\text{sd}} = 10 \text{ mm}$ 、 20 mm 和 30 mm 时,随着转差速度的增加,转矩先快速上升,在 150 r/min 左右达到峰值,而后缓慢下降。当 l_{sd} 从 40 mm 增加到 70 mm 时,转矩降幅很小,近乎平稳。这是因为 l_{sd} 从 0 增加的初始阶段,轴向磁场起主要作用,气隙对磁场影响敏感度较高。而当径向磁场成为主要作用磁场时, l_{sd} 的变化对



(a) 转矩-转差特性



(b) 转矩-平移距离特性

图 13 转差速度与平移距离对转矩影响

Fig. 13 Effects of slip speed and shifting distance on torque

转矩影响的灵敏度降低,主要取决于 PMR 与 SCR 之间的耦合情况。

不同 l_{sd} 下铜耗-转差特性曲线如图 14(a) 所示;不同转差速度下铜耗-平移距离特性曲线如图 14(b) 所示。

由图 14 可知,不同 l_{sd} 下,随着转差速度的增加,铜耗均呈现逐步上升而后逐渐趋于平稳的趋势。不同转差速度下,随着平移距离的增加,铜耗逐渐下降,当平移距离为 70 mm 时,铜耗接近于 0。结果表明, l_{sd} 为 70 mm 时,PMR 与 SCR 之间没有磁耦合,无转矩传递。

5 结语

本文提出了一种复合磁通型鼠笼结构 PMASD,研究了永磁体极弧系数、永磁体厚度和极对数等关键结构参数对 PMASD 气隙磁场、转矩及铜耗等基本电磁特性的影响,得到如下结论。

(1) 极弧系数为 0.8 时,PMASD 气隙磁密波形接近正弦波,转矩脉动较小。

(2) 随着永磁体厚度的增加,气隙磁密基波幅值增加,且增幅减小。永磁体厚度与极弧系数的合理配合,可以提升基波占比。

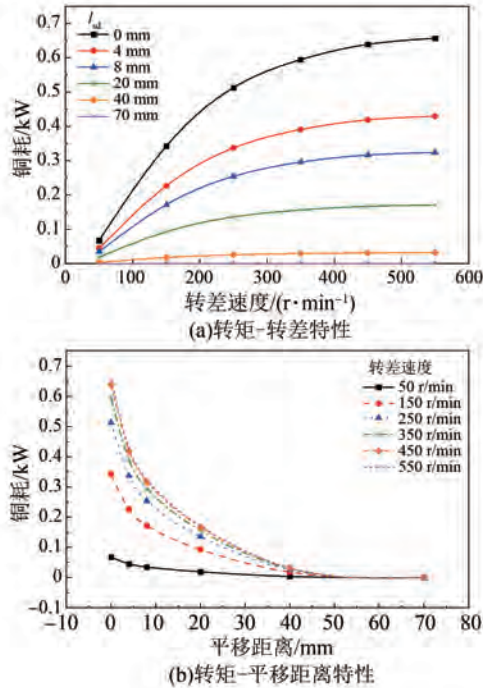


图 14 转差速度与平移距离对铜耗影响

Fig. 14 Effects of slip speed and shifting distance on copper loss

(3)随着极对数的增加,PMASD 的转矩输出能力先增再降;峰值扭矩对应的转差速度逐渐下降。

(4)随着导条截面积的增加,导条电阻减小,SCR 铜耗降低。

(5)随着 SCR 平移距离的增加,不同转差速度下,转矩与铜耗整体下降,但是下降速率逐渐降低。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李毅搏提出了研究构想、设计了技术路线,朱良广进行了有限元建模与仿真,姜达进行了数据处理与绘图分析,张俊进行了文字表述与逻辑结构优化,张睿进行了文稿校核。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Li Yibo proposed the research concept and designed the technical approach. The finite element

modeling and simulation were carried out by Zhu Liangguang. The data processing and graphical analysis were conducted by Jiang Da. The refinement of textual expression and logical structure were carried out by Zhang Jun. The manuscript was reviewed by Zhang Rui. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] Wallace A, Jouanne A V, Jeffryes R, et al. Comparison testing of an adjustable speed-permanent magnet eddy-current coupling [C]//Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Atlanta, 2000.
- [2] 姚杰. 永磁调速技术节能分析[J]. 电气时代, 2021(6): 58-60.
- [3] Lubin T, Rezzoug A. Steady state and transient performance of axial-field eddy current coupling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2287-2296.
- [4] 程刚, 宋东华, 王朝. 套筒式永磁涡流调速器转矩与调速特性分析[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(2): 236-240.
- [5] 程习康, 刘巍, 孙明浩, 等. 永磁涡流耦合器传递转矩计算方法研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(12): 1739-1746.
- [6] 郭超. 动车组制动用永磁涡流缓速器的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- [7] 时统宇. 永磁涡流柔性传动装置的参数敏感度分析[J]. 机械传动, 2020, 44(1): 125-131.
- [8] Shi T Y. Parameter Sensitivity analysis of permanent magnetic eddy-current flexible transmission [J].

- Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(1): 125-131.
- [8] Mohammadi S, Mirsalim M, Vaez-zadeh S, et al. Analytical modeling and analysis of axial-flux interior permanent-magnet couplers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5940-5947.
- [9] Mohammadi S, Mirsalim M, Niazazari M, et al. A new interior permanent-magnet radial-flux eddy-current coupler [C]//The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 2014.
- [10] Mohammadi S, Mirsalim M, Vaez-zadeh S. Nonlinear modeling of eddy-current couplers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 224-231.
- [11] Mohammadi S, Mirsalim M. Double-sided permanent-magnet radial-flux eddy-current couplers three-dimensional analytical modelling, static and transient study, and sensitivity analysis [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(9): 665-679.
- [12] 杨超君, 章友京, 张涛, 等. 调速型鼠笼式异步磁力联轴器的轴向力研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(3): 282-287.
- Yang C J, Zhang Y J, Zhang T, et al. Research of axial force of adjustable speed squirrel-cage asynchronous magnetic coupling [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(3): 282-287.
- [13] 周凯凯, 史岳鹏, 李骞, 等. 永磁式异步磁力耦合器设计及分析[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(3): 184-188.
- Zhou K K, Shi Y P, Li Q, et al. Design and analysis of a permanent magnetic asynchronous coupler [J]. Machine Design & Research, 2022, 38(3): 184-188.
- [14] Zhu Z Q, Wu L J, Xia Z P. An accurate subdomain model for magnetic field computation in slotted surface-mounted permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(4): 1100-1115.
- [15] 王爽, 郭永存, 王鹏斌, 等. 复合式磁力耦合器的设计与试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 115-123.
- Wang S, Guo Y C, Wang P Y, et al. Design and experimental research on hybrid magnetic coupler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 115-123.
- [16] 王爽. 新型复合式磁力耦合器磁力传动理论及实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- Wang S. Theoretical and experimental research on magnetic transmission of the new type composite magnetic coupler [D]. Huai'nan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [17] 王梦瑶, 寇宝泉, 张赫. 基于等效磁路法的盘式异步磁力耦合器研究[C]//第十届全国磁悬浮技术与振动控制学术会议, 哈尔滨, 2022.
- Wang M Y, Kou B Q, Zhang H. Research on disk-type asynchronous magnetic coupler based on the equivalent magnetic circuit method [C]//The 10th National Conference on Superconducting Maglev Technology and Vibration Control, Harbin, 2022.
- [18] 白雪. 基于等效磁路法的轴向磁通永磁调速器的研究与设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- Bai X. Research and design of axial-flux adjustable-speed permanent magnet coupler based on equivalent magnetic circuit method [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [19] 李毅搏. 新型永磁调速器解析建模与电磁特性分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- Li Y B. The research about analytical modeling and electromagnetic characteristic analysis of novel permanent magnet adjustable speed drives [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [20] 刘柯, 曾成碧, 李明贤, 等. 轴向磁通永磁同步电机快速等效磁路分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 14-20.
- Liu K, Zeng C B, Li M X, et al. Fast equivalent magnetic circuit analysis of axial flux permanent magnet synchronous motor [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 14-20.
- [21] 党存禄, 周超英, 张晓英. 异步电机等效电路的简明推导及分析[J]. 微电机, 2011, 44(2): 89-91.
- Dang C L, Zhou C Y, Zhang X Y. Concise inference and analysis of equivalent circuit of asynchronous motor [J]. Micromotors, 2011, 44(2): 89-91.
- [22] Lu M Y, Peyton A, Yin W L. Acceleration of frequency sweeping in eddy-current computation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(7): 1-8.
- [23] 陈华毅, 杨明发. 异步电机三维电磁场及温度场

- 耦合仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(1): 42-47.
- Chen H Y, Yang M F. Coupling simulation analysis of 3D electromagnetic field and thermal field of asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(1): 42-47.
- [24] 蔡黎明, 黄开胜, 黄新庭, 等. 新型航空用永磁电机仿真分析与设计[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 37-41.
- Cai L M, Huang K S, Huang X T, et al. Simulation analysis and design of new kind permanent magnet motor used in aviation aircraft [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(3): 37-41.
- [25] 王建辉, 刘朋鹏, 韦福东. 基于 ANSYS 的永磁同步电机场路结合电磁设计方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 17-24.
- Wang J H, Liu P P, Wei F D. A field-circuit combined electromagnetic design method for permanent magnet synchronous motor based on ANSYS [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(5): 17-24.
- [26] 王鸿鹄, 周洋. 电机电磁场有限元仿真网格生成方法研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 33-38.
- Wang H H, Zhou Y. Research on mesh generation method of finite element simulation of motor electromagnetic field [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 33-38.
- [27] 孙丽兵, 王金玉, 李肖艳. 无轴承永磁同步电机电磁特性仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 69-74+109.
- Sun L B, Wang J Y, Li X Y. Simulation study of electromagnetic characteristics of bearingless permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 69-74+109.

收稿日期:2025-08-09

收到修改稿日期:2025-11-22

作者简介:

李毅搏(1989—),男,博士,副教授,研究方向为永磁调速节能技术,ybli@njit.edu.cn;

* 通信作者:李毅搏(1989—),男,博士,副教授,研究方向为永磁调速节能技术,ybli@njit.edu.cn。