

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209333

基于 RMxpirt 换向偏转角调整 PMDC 性能影响研究^{*}谢振宇¹ 谢佳娜² 刘桂雄¹

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640; 2. 广东汇宝昌精密制造有限公司 揭阳 522000)

摘要: 换向偏转角调整是提升 PMDC 性能可行方式,但其研究比较单一,本文结合 RMxpirt 仿真 PMDC 便捷特点,开展换向偏转角调整对 PMDC 性能影响仿真研究。首先通过研究对象实例参数在 RMxpirt 中建立 PMDC 模型,再基于该模型修改换向偏转角参数获得不同偏转角度下的额定转速、能量转化效率、工作电流、齿槽转矩,归纳换向偏转角对 PMDC 性能影响规律,并通过测试实验验证换向偏转角对转速、工作电流的影响。仿真及测试实验结果表明:换向偏转角可调整 PMDC 转速及工作电流,改进 PMDC 能量转化效率以及降低 PMDC 齿槽转矩,换向偏转角调整方法较于其他优化方法具有应用灵活、性价比高的推广优势。

关键词: 换向偏转角;RMxpirt;PMDC;性能仿真

中图分类号: TM301.4 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 470

Study on the influence of commutation deflection angle adjustment on PMDC performance based on RMxpirt

Xie Zhenyu¹ Xie Jiana² Liu Guixiong¹(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Huibaochang Precision Manufacturing Co., Ltd., Jieyang 522000, China)

Abstract: Commutation deflection angle adjustment is a feasible way to improve PMDC performance, but its research is relatively simple. Combined with the convenient characteristics of RMxpirt simulation PMDC, this paper carries out the simulation research on the impact of commutation deflection angle adjustment on PMDC performance. Firstly, the PMDC model is established in rmxpirt through the example parameters of the research object, and then the commutation deflection angle parameters are modified based on the model to obtain the rated speed, energy conversion efficiency, working current and cogging torque under different deflection angles. The influence law of commutation deflection angle on PMDC performance is summarized, and the influence of commutation deflection angle on speed and working current is verified through test experiments. The simulation and test results show that the commutation deflection angle can adjust PMDC speed and working current, improve PMDC energy conversion efficiency and reduce PMDC cogging torque. Compared with other optimization methods, the commutation deflection angle adjustment method has the advantages of flexible application and high cost performance.

Keywords: commutation deflection angle;RMxpirt;PMDC;performance simulation

0 引言

永磁直流电机(permanent magnet direct current motor, PMDC)具有结构简单、运行可靠、成本低等特点,在 市场应用十分广泛^[1-2]。对其研究理论已经比较成熟,但改进优化不断^[3]。其中,改变电刷偏离几何中性位置的角度 的换向偏转角调整方法已经表明是优化 PMDC 性能的有效 方式,并成为研究热点之一。如文献[4](2010)实验比较

分析换向偏转角对电机基本性能、EMC 干扰影响,表明超 前换向调整的效果优于延迟换向,换向偏转调整可有效抑 制电磁干扰;文献[5](2015)研究一种通过改变电刷偏转角 来扩大电机运行范围方法,一定程度提升运行效率;西北工 业大学黄其(2020)在三台 550-W、9500 rpm 深槽通用电机 优化改进研究中,应用不均匀气隙、电刷偏移、不同匝数线 圈,改善深槽通用电机换向火花^[6]。目前针对换向偏转角 调整的研究主要体现在其对 PMDC 换向、效率等单一性能

收稿日期:2022-03-19

^{*} 基金项目:广东省科技专项资金(sdzx003)项目资助

的影响上,缺少系统理论分析或仿真,实验手段有待提高。RMxpert 是基于磁路分析法电机设计分析软件,具有操作方便、应用简单的特点^[7-9],在电机设计领域得到广泛应用^[10-12]。基于 RMxpert 能够快捷准确输出不同电机仿真结果,本文开展基于 RMxpert 换向偏转角调整 PMDC 性能影响研究,将使换向偏转角调整研究的系统性得到全面提高。

1 RMxpert 换向偏转角调整应用方法

1.1 基于 RMxpert 的 PMDC 建模

首先在 RMxpert 预设置模板中输入电机参数,根据模板、参数对模型, RMxpert 求解器即可完成计算。图 1 为 RMxpert 仿真参数设置框图,主要包含模板选择与基本参数、定子与转子参数、换向结构参数设置等。

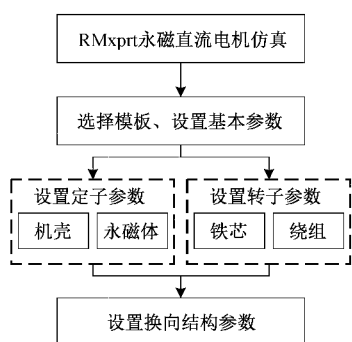


图 1 RMxpert 仿真设置框图

1)选择模板、设置基本参数针对本文研究对象选择 Permanent-Magnet DC Motor 作为仿真模板。表 1 为 RMxpert 模型基本参数实例,表中参数对模板进行实例化,定义磁极数量、电机内部参考损耗(参考损耗为 PMDC 某一转速下内部摩擦、风阻消耗功率)等。

表 1 RMxpert 模型基本参数实例

| 模型基本参数 | 实例数值 |
|--------|------------|
| 电机类型 | PMDC |
| 磁极数目 | 2 |
| 摩擦损失 | 1 W |
| 风阻损失 | 2 W |
| 参考转速 | 33 600 rpm |

2)设置定子参数 PMDC 定子模型包含机壳、永磁体,通过确定机壳、永磁体机械尺寸及材料参数,如极弧系数、磁极中心偏置、永磁体材料类型、永磁体长度、永磁体厚度等,完成 PMDC 定子模型实例化。表 2 为定子模型实例参数,仿真模型计算还需考虑磁性材料非线性退磁特点,对机壳、永磁体材料进一步细化,在软件中输入铁氧体退磁曲线参数数据(剩磁密度 $B_r = 3.75$ kGs,矫顽力 $H_c = 3$ kOe,最大磁能积 $(BH)_{max} = 3.4$ MGOe),拟合出退磁曲线。

表 2 RMxpert 定子模型实例参数

| 定子模型参数设置项目 | 实例数值 |
|------------|-----------|
| 定子外径/mm | 28.5 |
| 定子内径/mm | 18.5 |
| 定子长度/mm | 46.8 |
| 定子叠压系数 | 1 |
| 机壳材料 | DW310_35 |
| 永磁体极弧系数 | 0.75 |
| 磁场中心偏置/mm | 0 |
| 永磁体材料 | 铁氧体(手动输入) |
| 永磁体长度/mm | 27.5 |
| 永磁体厚度/mm | 4.25 |

3)设置转子参数 PMDC 转子模型包含转子金属结构、线圈绕组等,需设置叠压系数、转子极数、转子外径、转子内径、转子长度、转子材料、转子斜槽宽度等转子金属结构尺寸、材料等参数,表 3 为转子结构尺寸实例参数。

表 3 转子结构尺寸实例参数

| 参数项目 | 实例数值 |
|---------|----------|
| 叠压系数 | 0.95 |
| 转子极数 | 3 |
| 开槽类型 | 梯形槽 |
| 转子外径/mm | 17 |
| 转子内径/mm | 2.3 |
| 转子长度/mm | 25.5 |
| 转子材料 | DW310_35 |
| 转子斜槽宽度 | 0 |

针对转子槽,可选择图 2 所示截面图,表 4 为该槽尺寸实例参数,通过表中数据定义槽尺寸。

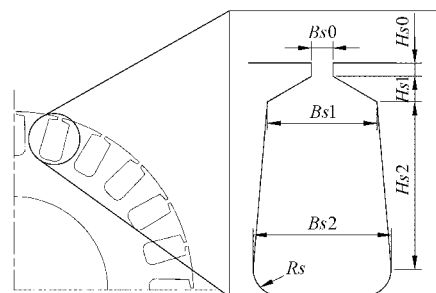


图 2 转子槽型截面示意图

针对线圈绕组,需为绕组与换向器连接方式设置绕组类型,再设置多路数(多路数为单个绕组起、终点间换向片数量)、虚拟槽数、每槽导体数、线圈极距、导线股数、导线缠绕间隙、导线直径等。在绕组末端与换向器连接部位,还需设置末端调整、基础内径、叶圆内径、端隙、槽衬、楔厚度、层间绝缘、有限填充因子等,表 5 为绕组设置实例参数。

表 4 槽尺寸实例参数

| 参数项目 | 实例数值/mm |
|----------|---------|
| H_{s0} | 0.65 |
| H_{s1} | 3.2 |
| H_{s2} | 2.4 |
| B_{s0} | 1.78 |
| B_{s1} | 9 |
| B_{s2} | 2.5 |
| R_s | 0 |

表 5 绕组设置实例参数

| 参数项目 | 实例数值 |
|---------|------|
| 绕线类型 | 叠绕法 |
| 多路数 | 1 |
| 虚拟槽数 | 1 |
| 每槽导体数 | 34 |
| 线圈极距 | 1 |
| 导线股数 | 1 |
| 导线缠绕间隙 | 0.1 |
| 导线直径/mm | 0.55 |
| 末端调整/mm | 1 |
| 基础内径/mm | 0 |
| 叶圆内径/mm | 0 |
| 端隙/mm | 3 |
| 槽衬/mm | 0 |
| 楔厚度/mm | 0.1 |
| 层间绝缘/mm | 0.2 |
| 有限填充因子 | 0.85 |

4) 设置换向结构参数 具体包括换向器(结构类型、外径、长度、换向片间距等)、电刷(宽度、长度、对数、偏转角、压降等),表 6 为换向结构实例参数,这里偏转角就是本文重点研究对象参数换向偏转角。

表 6 换向结构实例参数

| 参数项目 | 实例数值 |
|----------|--------|
| 换向结构类型 | 圆柱型换向器 |
| 外径/mm | 6 |
| 长度/mm | 8 |
| 换向片间距/mm | 0.1 |
| 电刷宽度/mm | 2.5 |
| 电刷长度/mm | 3 |
| 电刷对数 | 1 |
| 电刷偏转角 | 0 |
| 电刷压降/V | 2 |

1.2 换向偏转角调整对 PMDC 性能影响分析

由文献[13],PMDC 在 t 时刻时域数学模型为:

$$\begin{cases} E(t) = K_e \cdot \Phi(t) \cdot \omega(t) & (a) \\ U_T - U_L = E(t) + I_a(t) \cdot R_a(t) + L_a(t) \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} & (b) \\ T_{em}(t) = C_T \cdot \Phi(t) \cdot I_a(t) & (c) \\ T_{out}(t) = T_{out}(t) + J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + p_{ad} \cdot \omega(t) & (d) \end{cases} \quad (1)$$

式(a)中 $E(t)$ 、 K_e 、 $\Phi(t)$ 、 $\omega(t)$ 分别为电机反电动势、电动势常数、每极气隙磁通、转子角速度;式(b)中 U_T 、 U_L 、 $I_a(t)$ 、 $R_a(t)$ 、 $L_a(t)$ 分别为外接电机端电压、一对电刷接触压降、工作电流、电枢回路电阻、电枢回路电感;式(c)中 $T_{em}(t)$ 、 C_T 分别为电机电磁转矩、转矩常数;式(d)中 $T_{out}(t)$ 、 J_m 、 p_{ad} 分别为电机输出转矩、转动惯量、转子旋转摩擦阻力系数。

由式(a)、(b)及(d),可以看出:转子角速度 $\omega(t)$ 受 PMDC 电路特性及机械特性影响,是直接反应电机状态变化指标;工作电流 $I_a(t)$ 与反电动势 $E(t)$ 、电枢回路阻抗有关,也直接影响 PMDC 绕组温升,是评价 PMDC 热平衡重要指标。同时,齿槽转矩 T_p 、能量转化效率 η_p 也分别是影响 PMDC 输出力矩平稳性重要指标^[14-15]和衡量 PMDC 能效关键指标^[16]。

图 3 为换向偏转角 θ_r 示意图,换向偏转角为电刷与永磁体(几何中性位置)相对偏转角度,换向偏转角 θ_r 调整方向与 PMDC 旋转方向相反时为正。

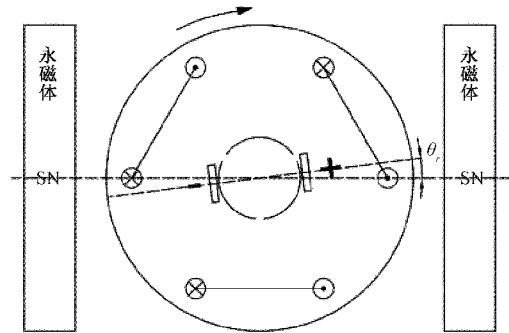


图 3 θ_r 与 v_p 关系曲线

故本文以设置实例参数为基础在 RMxpirt 中构建 3 电极、2 电刷 PMDC 模型,研究换向偏转角 θ_r 变化对 PMDC 的额定转速 v_p 、工作电流 I_p 、齿槽转矩 T_p 、能量转化效率 η_p 等 4 个指标的影响。

2 仿真实验

通过 RMxpirt 仿真计算换向偏转角 θ_r 为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ PMDC,输出 θ_r 与 v_p 、 I_p 、 T_p 、 η_p 关系曲线。

2.1 θ_r 与 PMDC 额定转速 v_p

图 4 为 θ_r 与 v_p 关系曲线,图中可看出改变 θ_r 可提高

或降低 PMDC 额定转速。当换向偏转角 $\theta_r = 0.3^\circ$ 时, PMDC 达到最小额定转速, $v_{p_{\min}} = 35\,978$ rpm。

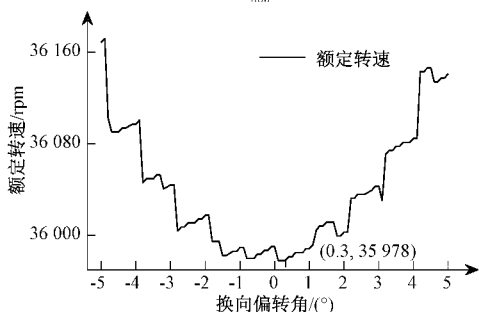


图4 θ_r 与 v_p 关系曲线

2.2 θ_r 与 PMDC 工作电流 I_p

图5为 θ_r 与 I_p 关系曲线,结合图4,可看出改变 θ_r , I_p 、 v_p 变化趋势一致; $\theta_r = 0.3^\circ$ 下PMDC通过工作电流最小, $I_{p_{\min}} = 6.764\,1$ A。

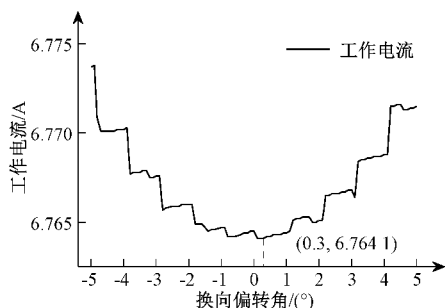


图5 θ_r 与 I_p 关系曲线

2.3 θ_r 与 PMDC 齿槽转矩 T_p

图6为 θ_r 与 T_p 关系曲线,图中齿槽转矩整体上随换向偏转角 θ_r 增大而减小;在局部范围内,换向偏转角调整微小变化,也会大幅提高齿槽转矩。

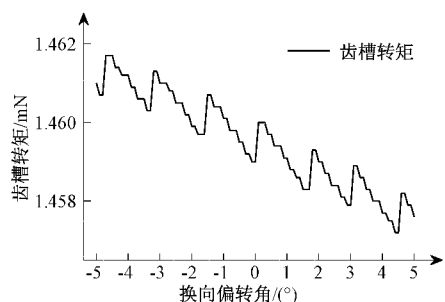


图6 θ_r 与 T_p 关系曲线

2.4 θ_r 与 PMDC 能量转化效率 η_p

图7为 θ_r 与 η_p 关系曲线,图中可有换向偏转角 θ_r 存在,通常会均会一定程度上降低PMDC能量转化效率 η_p ,但在 $\theta_r = 0.3^\circ$,PMDC达到最大 $\eta_{p_{\max}} = 68.56\%$ 。

通过上述仿真实验研究,可发现:

1)在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 偏转角调整范围内,通过改变换向偏转

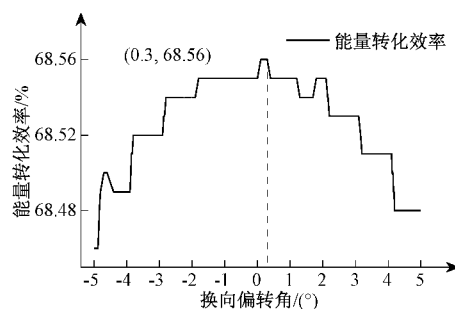


图7 θ_r 与 η_p 关系曲线

角 θ_r 可提高或降低PMDC转速 v_p ,但工作电流也会同步增大,其中在 4.5° 和 -4.9° 位置,取得较大提升幅度,如 $\theta_r = 4.5^\circ, -4.9^\circ$, v_p 可分别提升 0.468% 、 0.539% ,但 I_p 分别增大 0.75% 、 0.99% 。

2)调整换向偏转角 θ_r 可降低PMDC齿槽转矩,在 4.5° 位置降为 $1.475\,2$ Nm,相较于 0° 位置降低 0.12% ;对于PMDC能量转化效率 η_p ,只存在最优换向偏转角调整角度,偏离该角度均会降低 η_p 。

3)若应用换向偏转角调整方法,提高PMDC额定转速,工作电流 I_p 变大,需考PMDC温升影响问题;若应用换向偏转角调整方法降低 T_p ,提高PMDC输出转矩平稳性,需合理调整 θ_r 。

3 测试实验

为验证换向偏转角调整对PMDC性能的影响,通过制造不同调整定位凹槽机壳,改变PMDC换向偏转角,并搭建测试装置平台,测试不同换向偏转角 θ_r 下PMDC转速 v_p 、工作电流 I_p 变化。

3.1 不同调整定位凹槽机壳

图8为不同定位凹槽机壳,其中图8(a)为为产线原有模具生产机壳,具有 $\{-17^\circ, 0^\circ, 17^\circ\}$ 三个调整定位凹槽,图8(b)~(f)为调整模具后生产的实验PMDC机壳,分别具有 $\{-22^\circ, -5^\circ, 12^\circ\}$ 、 $\{-12^\circ, 5^\circ, 22^\circ\}$ 、 $\{-10^\circ, 7^\circ, 24^\circ\}$ 、 $\{-7^\circ, 15^\circ\}$ 、 $\{-3^\circ, 10^\circ\}$ 的换向偏转角 θ_r 调整定位凹槽。

3.2 PMDC 测试装置

图9为PMDC测试装置,上位机控制KPS-3005DU数字式直流稳压电源为实验电机提供 5.8 V电压,并通过USB串口通信同时收集MSO2012B混合信号示波器、探测实验电机端电流波动、UT372激光测速仪检测实验电机转速。

表7为不同 θ_r 下PMDC转速 v_p 、工作电流 I_p 测试结果。当 $\theta_r = 0^\circ$ 时, $\bar{\omega} = 20\,500$ rpm, $I_p = 1.64$ A; $\theta_r = 15^\circ$ 时, $\omega = 23\,280$ rpm, $I_p = 2.26$ A。

图10为换向偏转角 θ_r 与转速 v_p 、工作电流 I_p 关系曲线,由关系曲线可看出,增大 θ_r 可增大转速 v_p 、工作电流 I_p ,在 $\theta_r \in [0, 15]$,转速 v_p 、工作电流 I_p 随 θ_r 变化规律与第2节仿真所得规律一致。

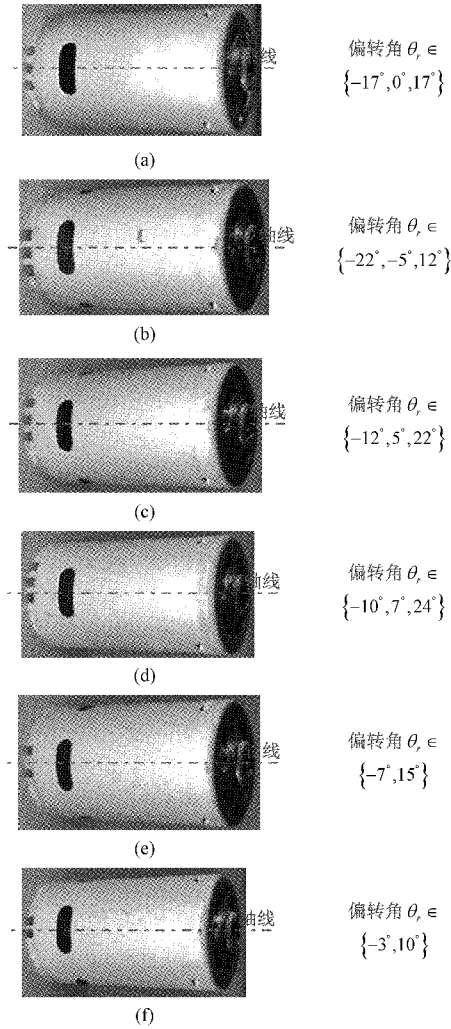


图 8 六款定位凹槽实验 PMDC 机壳

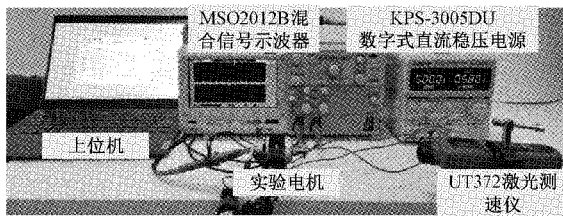


图 9 PMDC 测试装置

表 7 不同 θ_r 下 PMDC 性能测试结果

| 换向偏转角 $\theta_r / (^\circ)$ | 转速 v_p / rpm | 工作电流 I_p / A |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| -7 | 20 000 | 1.50 |
| -3 | 20 200 | 1.58 |
| 0 | 20 500 | 1.64 |
| 5 | 21 460 | 1.85 |
| 7 | 21 810 | 1.93 |
| 10 | 22 140 | 2.07 |
| 15 | 23 280 | 2.26 |

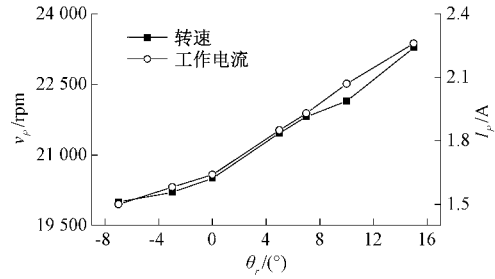


图 10 θ_r 与转速 v_p 、工作电流 I_p 关系曲线

4 结 论

θ_r 改变,对 PMDC 性能提升有正反两面,这需要在实际工作中加以选择,可在一定范围内通过改变 θ_r ,改变 PMDC 某方面性能参数,满足客户需求,以后工作需加强实践应用研究与推广。

RMxpert 为电机平均参数的仿真,而 PMDC 在工作过程中还存在转矩波动、反电动势干扰等指标,下一步可继续研究 θ_r 变化下,这两方面指标的影响。

参 考 文 献

- [1] XIANG X W, CHAI J Y, SUN X D. A novel DC motor based on mechanical-electrical hybrid commutation [J]. Ieee Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1605-1615.
- [2] 朱俊杰, 黄海燕. 无位置传感器无刷直流电机换相误差校正系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 41-49.
- [3] 葛海康, 潘海鹏. 一种割草机无刷直流电机调速系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(10): 1-6.
- [4] 万鹏. 永磁直流电动机换向偏转角对电机 EMC 的影响[J]. 微电机, 2010, 43(11): 18-20.
- [5] TAKURA D, AKATSU K, IEEE. Variable characteristics DC motor by changing brush lead angle to expand the operation range[C]. 9th International Conference on Power Electronics/Energy Conversion Congress and Exposition Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015: 695-700.
- [6] QI H, LING L, CAO J, et al. Design and research of deep slot universal motor for electric power tools [J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20(6): 1604-1615.
- [7] CHAWRASIA S K, CHANDA C K, BANERJEE S. Design and analysis of in-wheel motor for an electric vehicle[C]. 6th IEEE Calcutta Conference (CALCON), 2020: 351-355.
- [8] YANG K, YANG W, WANG F, et al. Analysis of RMxpert in three-phase asynchronous motor in the 2D electromagnetic field [J]. Electronic Science and

- Technology, 2015, 28(10): 158-60, 165.
- [9] MAZUR D. Analysis of the cogging torque and flux density in the gap for a synchronous generator using the FEM method[J]. Pomiar Automatyka Kontrola, 2012, 58(11): 1019-1021.
- [10] DEMIR U, AKUNER M C. Using taguchi method in defining critical rotor pole data of lspmms considering the power factor and efficiency[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2017, 24(2): 347-353.
- [11] SABANCI K. Artificial intelligence based power consumption estimation of two-phase brushless DC motor according to FEA parametric simulation[J]. Measurement, 2020, 155.
- [12] UNLERSEN M F, BALCI S, ASLAN M F, et al. The speed estimation via BiLSTM-based network of a BLDC motor drive for fan applications[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021: 10.
- [13] GHOSH M, GHOSH S, SAHA P K, et al. Semi-analytical dynamic model of permanent-magnet direct current brushed motor considering slotting effect, commutation, and PWM-operated terminal voltage[J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2654-2662.
- [14] 黄金霖, 张国政, 周克良. 新型永磁调磁式磁齿轮的设计与优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 187-195.
- [15] 石松宁, 王大志, 张瑞红, 等. 不等齿宽消弱永磁驱动器齿槽转矩的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 234-240.
- [16] 高国彬, 赵君, 高嵩, 等. 多旋翼无人机无刷电机高功率密度驱动方式研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 108-113.

作者简介

谢振宇, 硕士, 主要研究方向装备信息化与数字化。

E-mail: hale_xie. wh@foxmail. com

谢佳娜, 高级工程师, 主要研究方向为精密永磁电机智能制造。

E-mail: helen_gdjy@163. com

刘桂雄, 教授, 主要研究方向先进传感与仪器研究。

E-mail: megxliu@scut. edu. cn