

本文全文线上首发由  
上海电机系统节能工程技术  
研究中心有限公司

支持

徐翌翔,鲍晓华,朱庆龙.  
潜水电机电磁噪声分析和对比.  
电机与控制应用,2021,48(9):62.

## MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI  
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 [www.seari.com.cn](http://www.seari.com.cn)

# 潜水电机电磁噪声分析和对比<sup>\*</sup>

徐翌翔<sup>1</sup>, 鲍晓华<sup>1,2</sup>, 朱庆龙<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3. 大型潜水电泵及装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 231131)

**摘 要:** 针对传统的潜水感应电机和一种具有更高效率的新型潜水永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM), 利用多物理场耦合有限元仿真, 分析和对比其电磁噪声。在电磁场有限元软件中对电机的气隙磁密和径向电磁力波结果进行二维傅里叶分解, 分析了气隙磁场和径向力波的时空特性。PMASRM 转子磁导作用产生的气隙磁密谐波空间阶次更高, 造成的径向电磁力波阶次更高, 可以降低电磁噪声水平。声学仿真结果验证了上述结论。

**关键词:** 潜水电机; 感应电机; 永磁辅助同步磁阻电机; 电磁噪声

**中图分类号:** TM 352; TM 346 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)09-0062-05

**doi:** 10.12177/emca.2021.080

## Analysis and Comparison of Electromagnetic Noises of Submersible Motors<sup>\*</sup>

XU Yixiang<sup>1</sup>, BAO Xiaohua<sup>1,2</sup>, ZHU Qinglong<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Manufacturing Institute of Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Anhui Province Key Laboratory of Large-Scale Submersible Electric Pump and Accoutrements, Hefei 231131, China)

**Abstract:** The electromagnetic noises of traditional submersible induction motor and a new type of submersible permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM) with higher efficiency are analyzed and compared by using multi-physical-field-coupling finite element analysis. In the electromagnetic field finite element software, the results of air-gap flux density and radial electromagnetic force wave are decomposed by 2D Fourier transform, and the space-time characteristics of air-gap magnetic field and radial force wave are analyzed. The spatial order of air-gap flux density harmonics generated by the rotor PMASRM is higher, and the order of radial electromagnetic force wave is also higher, which can lower the level of electromagnetic noise. The acoustic simulation results verify the conclusion.

**Key words:** submersible motor; induction motor; permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM); electromagnetic noise

收稿日期: 2021-05-07; 收到修改稿日期: 2021-08-04

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977055); 安徽省科技重大专项项目(201903a05020042)

作者简介: 徐翌翔(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电机与特种电机设计。

鲍晓华(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计理论及技术、电机电磁场理论分析和计算、大型电机及高速电机的可靠性技术。(通信作者)

## 0 引言

由于城市防洪排水需要,部分泵站建在城市居民区附近,潜水电机的噪声问题受到了广泛的关注。对于中小型电机,主要噪声种类为电机铁心受到电磁激振力造成的电磁振动产生的电磁噪声<sup>[1]</sup>。电磁激振力中的径向分量即径向电磁力波幅值较大,是造成电磁噪声的主要原因。当径向电磁力波的阶次与电机机械结构的模态振型一致、频率接近时,就可能产生共振现象从而导致极大的电磁噪声。

许多工作从优化气隙磁场、降低径向电磁力波的幅值出发抑制电磁噪声<sup>[2-4]</sup>,或者是改变三维结构,采用斜槽、斜极等方式抵消某一阶次径向电磁力波的作用从而降低电磁噪声<sup>[5-6]</sup>。然而径向电磁力波的大小只是影响电磁噪声的一方面,改变力波的阶次和频率、避免电机机械结构产生共振也是抑制电磁噪声的有效方式。文献[7]分析了感应电机不同槽配合下产生的径向电磁力波阶次,提出了所用的槽配合应当避免产生低阶的径向电磁力波。但是感应电机的槽配合选择有限,过多槽或者过少槽的配合都会严重影响电机的效率。

目前,更高效率的永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM)逐渐广泛应用,具有多层磁障的转子结构可以视为在转子表面等效开槽<sup>[8-9]</sup>,且可采用转子表面开辅助槽的方式<sup>[10]</sup>,使电机等效槽配合的选择更加灵活,降低电机的电磁噪声,并且对电机的效率影响较小。本文针对潜水电泵应用场合,分析了传统的潜水感应电机和具有多层磁障转子结构的高效潜水 PMASRM 的气隙磁场谐波成分,得出 PMASRM 转子可以产生更高空间阶次的径向电磁力波,从而避免低阶径向电磁力波与电机结构产生共振造成较大的电磁噪声。有限元仿真结果表明,潜水 PMASRM 不仅效率更高,并且电磁噪声水平更低。

## 1 径向电磁力波分析

根据 Maxwell 应力张量法,忽略掉影响较小

$$P_{\text{radIM}} = \frac{\sum_{\nu} B_{\nu}^2 [1 + \cos(2\omega_1 t - 2\nu p \theta_{\text{mech}} - 2\varphi_{\nu})]}{4\mu_0} +$$

的气隙磁密切向分量,电机径向电磁力密度大小为

$$P_{\text{rad}} = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} = \frac{[b_{\nu}(\theta, t) + b_{\mu}(\theta, t)]^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: $b$  为气隙磁密的径向分量(以下简称气隙磁密);下标  $\nu$  和  $\mu$  分别为定转子磁密空间阶次; $\mu_0$  为真空磁导率。

径向电磁力波与电机气隙磁密密切相关。忽略饱和的影响,在感应电机中,定子磁动势和磁导在气隙中产生的谐波磁场为

$$b_{\nu\text{IM}} = B_{\nu\text{IM}} \cos(\omega_1 t - \nu \theta_e - \varphi_{\nu}) = B_{\nu\text{IM}} \cos(\omega_1 t - \nu p \theta_{\text{mech}} - \varphi_{\nu}) \quad (2)$$

转子磁动势和磁导在气隙中产生的谐波磁场为

$$b_{\mu\text{IM}} = B_{\mu\text{IM}} \cos(\omega_{\mu} t - \mu \theta_e - \varphi_{\mu}) = B_{\mu\text{IM}} \cos \left\{ \left[ 1 + k_{\mu} \frac{Z_2}{p} (1 - s) \right] \omega_1 t - \mu p \theta_{\text{mech}} - \varphi_{\mu} \right\} \quad (3)$$

式中: $B_{\nu\text{IM}}$  和  $B_{\mu\text{IM}}$  分别为  $\nu$  次和  $\mu$  次谐波磁密幅值; $\omega_1$  和  $\omega_{\mu}$  为定转子谐波电角频率; $\theta_e$  为电角度; $p$  为电机极对数; $\theta_{\text{mech}}$  为机械角度; $\varphi_{\nu}$  和  $\varphi_{\mu}$  分别为定转子对应阶次的磁密初相位; $Z_2$  为转子槽数; $s$  为转差率; $k_{\mu} = \pm 1, \pm 2, \dots$ 。当  $\nu$  和  $\mu$  等于 1 时即为基波磁密。

对于 PMASRM,由于定子铁心和绕组形式与感应电机接近,定子磁动势和磁导在气隙中产生的谐波磁密与感应电机相同,为

$$b_{\nu\text{PMA}} = B_{\nu\text{PMA}} \cos(\omega_1 t - \nu \theta_e - \varphi_{\nu}) = B_{\nu\text{PMA}} \cos(\omega_1 t - \nu p \theta_{\text{mech}} - \varphi_{\nu}) \quad (4)$$

转子磁动势和磁导在气隙中产生的谐波磁场为

$$b_{\mu\text{PMA}} = B_{\mu\text{PMA}} \cos(\mu \omega_1 t - \mu \theta_e - \varphi_{\mu}) = B_{\mu\text{PMA}} \cos(\mu \omega_1 t - \mu p \theta_{\text{mech}} - \varphi_{\mu}) \quad (5)$$

式中: $B_{\nu\text{PMA}}$  和  $B_{\mu\text{PMA}}$  分别为  $\nu$  次和  $\mu$  次谐波磁密幅值。

将式(2)~式(5)代入式(1),得到感应电机和 PMASRM 的径向电磁力波分别为

$$\begin{aligned}
& \frac{\sum_{\mu} B_{\mu}^2 \left\{ 1 + \cos \left[ 2 \left[ 1 + k_{\mu} \frac{Z_2}{p} (1-s) \right] \omega_1 t - 2\mu p \theta_{\text{mech}} - 2\varphi_{\mu} \right\}}{4\mu_0} + \right. \\
& \frac{\sum_{\nu} \sum_{\mu} B_{\nu} B_{\mu} \cos \left\{ \left[ k_{\mu} \frac{Z_2}{p} (1-s) + 2 \right] \omega_1 t - (\mu + \nu) p \theta_{\text{mech}} - (\varphi_{\mu} + \varphi_{\nu}) \right\}}{2\mu_0} + \\
& \frac{\sum_{\nu} \sum_{\mu} B_{\nu} B_{\mu} \cos \left[ k_{\mu} \frac{Z_2}{p} (1-s) \omega_1 t - (\mu - \nu) p \theta_{\text{mech}} - (\varphi_{\mu} - \varphi_{\nu}) \right]}{2\mu_0} \quad (6) \\
P_{\text{radPMA}} = & \frac{\sum_{\nu} B_{\nu}^2 [1 + \cos(2\omega_1 t - 2\nu p \theta_{\text{mech}} - 2\varphi_{\nu})]}{4\mu_0} + \frac{\sum_{\mu} B_{\mu}^2 [1 + \cos(2\mu \omega_1 t - 2\mu p \theta_{\text{mech}} - 2\varphi_{\mu})]}{4\mu_0} + \\
& \frac{\sum_{\nu} \sum_{\mu} B_{\nu} B_{\mu} \cos [(\mu + 1) \omega_1 t - (\mu + \nu) p \theta_{\text{mech}} - (\varphi_{\mu} + \varphi_{\nu})]}{2\mu_0} + \\
& \frac{\sum_{\nu} \sum_{\mu} B_{\nu} B_{\mu} \cos [(\mu - 1) \omega_1 t - (\mu - \nu) p \theta_{\text{mech}} - (\varphi_{\mu} - \varphi_{\nu})]}{2\mu_0} \quad (7)
\end{aligned}$$

由式(6)、式(7),感应电机和 PMASRM 产生的径向电磁力波均可以分为由定转子谐波磁场自身造成和定转子谐波磁场相互作用造成 2 种类型。当  $\nu=1$  时,定子自身造成的径向电磁力波即为主波磁场产生的力波;当  $\nu \neq 1$  时,由定转子磁场谐波自身造成的径向电磁力波幅值较小或者阶次很高,在传统的解析分析中常常忽略<sup>[1]</sup>。定转子谐波磁场相互作用产生的径向电磁力波与定转子谐波磁场的空间阶次和时间频率相关。对于 2 种类型的电机,力波空间阶次均为  $(\mu+\nu)p$  和  $(\mu-\nu)p$  次,尽管频率有所不同,但是对于同种谐波磁场导致的径向电磁力波,频率仍然比较接近。在常用的笼型感应电机中,转子导致的气隙谐波磁密通常为转子齿谐波磁密,阶次  $\mu=k_{\mu}Z_2/p+1$ 。而在 PMASRM 中, $\mu$  的值与磁障的结构有关,成分较为丰富。同样地,2 种电机定子结构相似,定子导致的谐波磁密通常为定子齿谐波磁密,阶次  $\nu=k_{\nu}Z_1/p+1$ ,  $Z_1$  为定子槽数,  $k_{\nu}=\pm 1, \pm 2, \dots$ 。

为了避免造成较大的电磁噪声,应避免产生幅值较大的低阶力波。在感应电机中,理应采用远槽配合使径向电磁力波阶次升高。然而,远槽配合会使电机的杂散损耗增加,使效率大大降低。而在 PMASRM 中,可以通过改变转子结构或增加磁障层数的方式让转子产生的谐波磁场空间阶次上升而不带来严重的后果,避免定转子谐波

磁场相互作用产生较低阶次的径向电磁力波,起到降低电磁噪声的作用。

## 2 电磁场分析模型和结果

本文以 55 kW 的充水式潜水感应电机和具有 4 层、5 层磁障的潜水 PMASRM 为例,采用有限元法分析其气隙磁场和径向电磁力波的时空特性。分析的电机模型如图 1 所示。电机的基本参数如表 1 所示。2 种电机使用相同的定子和绕组方案。

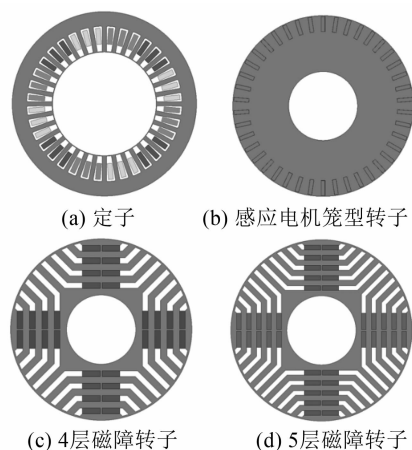


图 1 有限元仿真模型

具有多层磁障结构的转子外圆有增强机械强度的极窄的切向磁肋,常处于高度饱和状态,可认

为具有等效齿槽效应。换言之,转子磁障数越多,等效的开槽数越多,转子谐波磁场的阶次越高。图 2~图 4 分别显示了笼型直槽铜条转子感应电机和 4 层、5 层磁障的 PMASRM 气隙磁密和径向电磁力波的有限元仿真结果的二维傅里叶分解。

表 1 电机基本参数

| 参数名称    | 参数值 | 参数名称    | 参数值 |
|---------|-----|---------|-----|
| 额定电压/V  | 380 | 定子外径/mm | 400 |
| 额定频率/Hz | 50  | 定子内径/mm | 225 |
| 气隙长度/mm | 1   | 转子内径/mm | 85  |
| 接法      | Y   | 铁心长度/mm | 180 |
| 每槽导体数   | 19  | 并联支路数   | 1   |

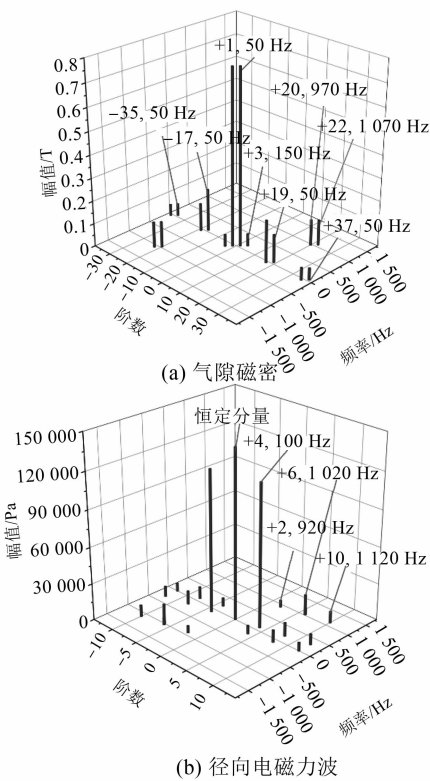


图 2 感应电机二维傅里叶分解结果

从以上结果可以看出,由于 3 种电机具有相同的定子结构和绕组形式,定子谐波磁场的阶次和频率基本一致,但转子谐波磁场的阶次和频率有较大的不同。42 槽 4 极的感应电机笼型转子产生的一阶齿谐波为 20、22 次,4 层磁障 PMASRM 转子产生的谐波磁场阶次为 21、23 次,5 层磁障 PMASRM 转子产生的谐波磁场阶次为

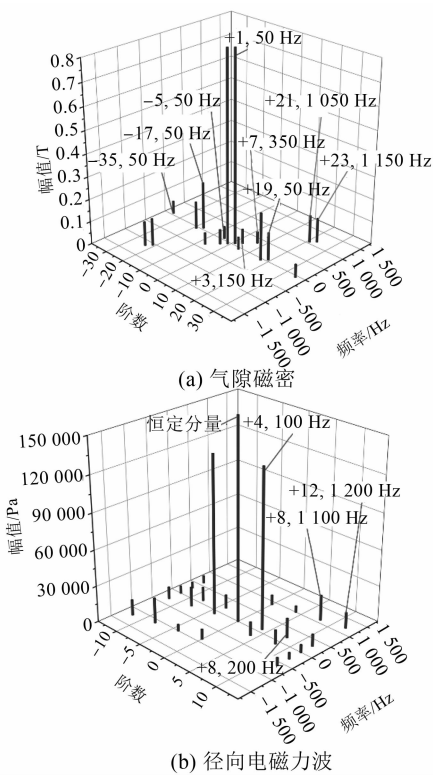


图 3 4 层磁障转子 PMASRM 二维傅里叶分解结果

23、27 次。当磁障层数较多时,PMASRM 由转子产生的谐波磁场空间阶数要高于感应电机,在与定子谐波磁场相互作用时,产生的高频径向电磁力波空间阶次也相对较高。

3 模态和声学仿真结果

阶数较高的径向电磁力波产生的电磁噪声水平较低,因此具有较多层磁障的潜水在与相比潜水感应电机噪声水平可能更低。为了验证结果,在 ANSYS Workbench 中采用多物理场耦合有限元仿真对电磁噪声进行仿真分析。图 5 显示了仿真采用的简化的潜水电机结构模型和声学仿真区域。

对仿真的电机结构模型进行模态分析,主要分析 5 000 Hz 以下人耳较为敏感的频率区域。2 对极电机径向电磁力波主要为偶数阶。电机结构模型主要的偶数阶振型如图 6 所示,在 5 000 Hz 以下的模态振型阶次较低。

选取圆柱形声学区域的最外侧面作为声学频谱分析的测试面,图 7 显示了 3 种结构转子的 A 计权声功率级仿真结果。感应电机各个频率下的

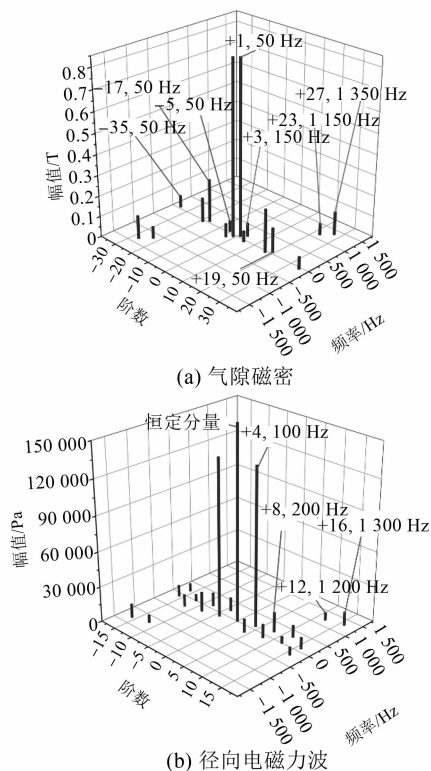


图4 5层磁障转子 PMASRM 二维傅里叶分解结果

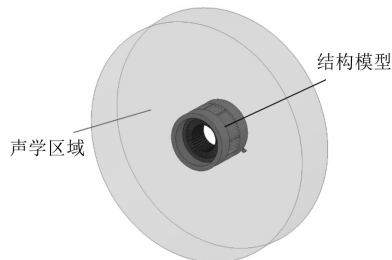


图5 结构模型和声学区域



图6 电机结构模型主要的偶数阶振型

的声功率级普遍高于 PMASRM,在高频下可能产

生共振现象造成极大的电磁噪声。在较多的频率点下,5层磁障比4层磁障 PMASRM 声功率级低,但是在某些频率下可能得到相反的结果。因为从径向电磁力波的角度来看,4层和5层磁障转子的 PMASRM 产生的径向电磁力波均较高,高于 5 000 Hz 以下仿真结构模型的主要模态振型,所以潜在的共振现象会对电机的电磁噪声产生影响。在具体应用中应当考虑实际的结构模型和安装方式,针对性地进行磁障设计。

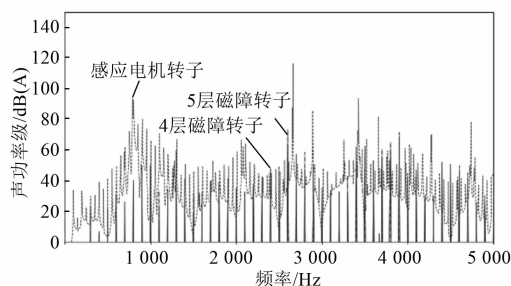


图7 电磁噪声结果频谱

## 4 结 语

本文针对传统的笼型潜水感应电机和具有 4 层、5 层磁障的潜水 PMASRM 分析了气隙磁密和径向电磁力波,认为 PMASRM 转子可以产生更高空间阶次的气隙谐波磁场,从而使径向电磁力波的阶次增加以达到降低电磁噪声的目标,弥补感应电机槽配合选取受限的不足。

多物理场有限元仿真结果表明,PMASRM 的电磁噪声水平更低。将其应用于潜水电机领域,不仅可以发挥出高效率的优势,也符合环境友好型潜水装备的需求。

## 【参考文献】

- [1] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 韩雪岩,李春雷,张新刚,等. 永磁辅助同步磁阻电机振动噪声准解析计算及影响因素分析[J]. 电机与控制学报,2020,24(11): 1.
- [3] 崔康宁,于慎波,窦汝桐,等. 永磁同步电机转矩脉动和振动噪声抑制[J]. 微电机,2020,53(10): 11.
- [4] 唐小春,于冰,许时杰,等. 新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J]. 电机与控制应用,2020,47(1): 91.

(下转第 80 页)

- 学报,2020,40(3): 980.
- [12] 秦楚雄,张连海. 基于 DNN 的低资源语音识别特征提取技术[J]. 自动化学报,2017,43(7): 1208.
- [13] 温江涛,闫常弘,孙洁娣,等. 基于压缩采集与深度学习的轴承故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(1): 171.
- [14] TANG J X, DENG C W, HUANG G B, et al. Compressed-domain ship detection on spaceborne optical image using deep neural network and extreme learning machine [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53 (3): 1174.
- [15] WANG W T, ZHAO J W, ZHOU Y, et al. New optimization design method for a double secondary linear motor based on R-DNN modeling method and MCS optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020,6(3): 98.
- [16] 杨阳,赵吉文,宋俊材,等. 基于深度神经网络模型的无铁心永磁同步直线电机结构优化研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(20): 6085.
- [17] 穆玉康,苏琦,徐兵,等. 直驱式电液伺服阀用线性力马达耐高温优化设计[J]. 北京理工大学学报,2020,40(5): 477.
- [18] 师今卓,白志红,熊光煜. 永磁直线力电机的特性计算[J]. 微特电机,2005(5): 8.
- [19] HELTON J C, DAVIS F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003,81(1): 23.
- [20] KE L, QIU H B, CHEN Z Z, et al. Engineering design based on hammersley sequences sampling method and SVR [J]. Advanced Materials Research, 2012, 544: 206.
- [21] 黄靓,易伟建,汪优. 最优实验设计的改进随机进化算法[J]. 计算机工程与应用,2008(27): 12.
- [22] 范周伟,余雄庆,王朝,等. 基于深度神经网络模型的客机总体主要设计参数敏感性分析[J]. 航空学报,2021,42(4): 378.
- [23] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1026.
- [24] GIRSHICK R. Fast R-CNN [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440.
- [25] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [C]//International Conference on Machine Learning, 2015: 448.

(上接第 66 页)

- [5] 范庆锋,王光晨. 转子不同方式分段斜极对永磁同步电机噪声的影响[J]. 电机与控制应用,2020,47(9): 79.
- [6] WANG C, BAO X, SHENG X, et al. Analysis of vibration and noise for different skewed slot type squirrel-cage induction motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017,53(11): 8206006.
- [7] 陈永校,诸自强. 电机噪声的分析和控制 [M]. 杭州: 浙江大学出版社,1987.
- [8] VAGATI A, CANOVA A. Design refinement of synchronous reluctance motors through finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000,36(4): 1094.
- [9] VAGATI A, PASTORELLI M, FRANCHESCHINI G, et al. Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002,34(4): 758.
- [10] 钱喆,唐光华,王群京,等. 转子结构优化削弱车用永磁同步电机振动噪音[J/OL]. 电机与控制学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.tm.20210415.1100.010.html>.