

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.025

漆包扁线定子精密制造工艺及关键技术研究

孙洪涛,王学超,赵玉亮

(大连豪森瑞德设备制造有限公司,辽宁 大连 116033)

摘要:为解决车用扁线电机定子自动化制造难度大、生产效率和合格率低等难题,为满足日益增长的市场需求,进行车用扁线电机定子组立、绝缘、测试等全流程生产工艺开发,建立兼容性的理论数字化模型来指导智能装备的研制。经过分析,影响扁线定子生产质量的是漆包线材料组织和性能等因素。在考虑应力、应变速率及应变影响的基础上,结合微观演化行为,建立生产技术性能模型。通过在吉利、舜驱等新能源车厂量产应用验证,证明该工艺方法实现了扁线定子高效稳定生产,解决了制约新能源汽车迭代升级的关键因素,加快了国家新能源汽车战略发展和布局。

关键词:新能源车;漆包扁线;精密制造;生产工艺;电机定子

中图分类号:TH16 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0135-05

Research on Precision Manufacturing Process and Key Technology of Enameled Flat Wire Stator

SUN Hongtao, WANG Xuechao, ZHAO Yuliang

(Dalian Haosenread Equipment Manufacture Co., Ltd., Dalian 116033, China)

Abstract: In order to overcome the difficulty of distributed stator automatic manufacturing, improve poor production efficiency and low primary pass rate of automotive flat wire motor, and meet the growing market demand, the whole process of stator assembly, insulation and testing of flat wire motor is developed, a theoretical digital model of compatibility to guide the development of intelligent equipment is established. The research conducted indicates that factors like enameled wire material organization and performance affect the production quality of enameled flat wire. Concerning the stress, strain rate and strain impact, the model of production technology performance is constructed by micro-evolutionary behavior. The mass production application verifications conducted in Geely, Shunqu and other new energy vehicle manufacturers prove that the developed process method realizes the efficient and stable production of flat wire stator, solves the key factors restricting the iterative upgrading of new energy vehicles, and accelerates the development and layout of national new energy vehicle strategy.

Keywords: new energy vehicle; enameled flat wire; precision manufacturing; production technology; stator

0 引言

随着全球新能源汽车市场爆发式增长,中国引领其全球发展,并在某些领域已赶超国外。发展新能源汽车产业是我国实现碳达峰、碳中和目标的有效路径^[1]。为加快中国新能源汽车发展和布局,作为动力系统核心部件的驱动电机,市场和产品迭代需求不断提高,我国在“十四五”规划和2035年远景目标纲要中提出要突破新能源汽车高效驱动电机关键技术,推动汽车产业高端化、智能化和绿色化发展^[2]。依据整车对驱动系统的要求,提高功率密度是驱动电机发展的必然趋势;车用扁线定子以体积小、功率密度高、散热能力强、噪声低等优势逐渐成为市场主流^[3]。

新型漆包扁线技术在绕组生产过程中需要更多精度和技巧,工艺之间关联性高^[4],漆包线贯穿于扁线定子各工序生产制造中,漆包线性能研究是保证整条定子产线高效运转的关键。本文围绕漆包线性能展开,通过分析漆包线在各工序阶段材料组织和性能特性变化,进行成型、焊接、绝缘及测试等关键技术研究,提出一种基于漆包线性能的车用扁线电机定子新型生产制造技术,以提高扁线定子生产的高效稳定性。

1 车用扁线电机定子工艺研究

1.1 生产工艺流程和方法

基于漆包线性能的扁线电机定子新型生产制

基金项目:辽宁省产业技术创新重点攻关项目(JB20231120);大连市科技攻关项目(2021JB12GX031)

第一作者简介:孙洪涛(1990—),男,山东临沂人,高级工程师,博士研究生,研究方向为工业自动化系统、多自由度柔性机电设备、智能制造和模糊感知,sunhongtao17@126.com。

造技术^[5-6],建立扁线绕组定子生产工艺流程如图1所示。首先将漆包线弯折成需要的形状,与铁芯组立一起,其次进行漆包线连接,然后进行绝缘处理^[7],最后进行测试、检测。扁线定子的生产过程最核心的是漆包线的结构成型、焊接、定子绝缘和电性能测试。

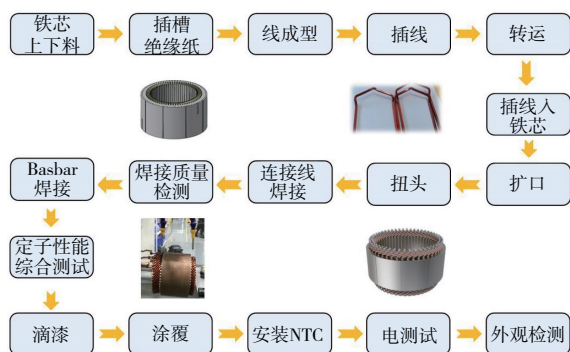


图1 车用扁线电机定子生产工艺流程

1.2 结构成型工艺分析

漆包线结构成型是保证定子产线高效运转的关键,漆包线结构成型工艺如图2所示。

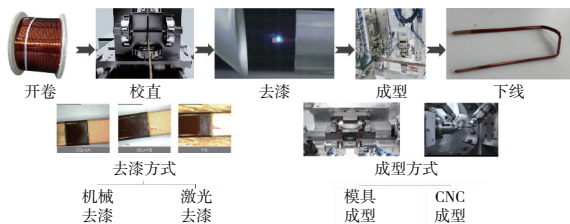


图2 漆包线结构成型工艺

结构成型涉及漆包线的弹塑性形变,成型工艺有两大类:模具冲压成型和程序折弯成型。冲压成型是pin线,完全在模具中定型,成型速度快。折弯成型通过程序控制成型的动作顺序和位置,使铜线逐步弯折成指定形状,柔性好,如图3所示。

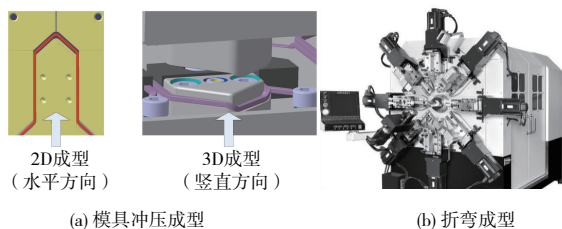


图3 漆包线三维成型方式

1.3 扁线连接工艺分析

车用扁线定子漆包线连接通过焊接实现。漆包线焊接工艺主要有TIG焊和激光焊,TIG焊为一种惰性气体保护电弧焊,激光焊接为深熔焊接,如图4所示。

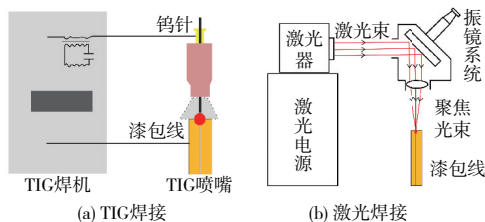


图4 漆包线焊接架构图

漆包线弹性的存在很难保证焊接条件的一致性,如图5所示,焊接前需要进行视觉引导定位^[8]。

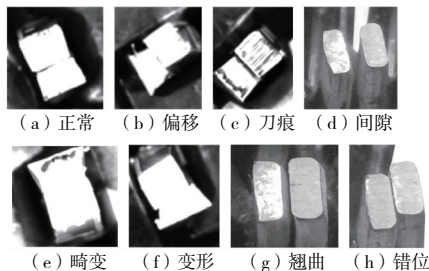


图5 漆包线焊接端面状态图

基于灰度分割法,建立检测模型,如图6所示。

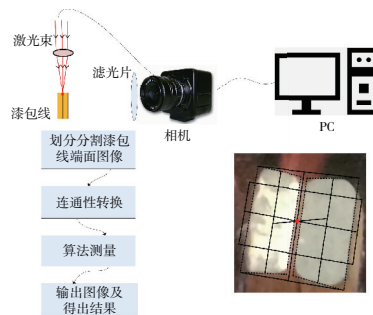


图6 焊前视觉引导架构图

通过训练数据提高了焊接成功率^[9-11]。

2 扁线定子关键生产技术研究

2.1 漆包扁线组立关键技术研究

漆包线成型涉及漆包线非线性弹塑性弯曲变形^[12],变形应力示意图如图7所示,图中 x 沿轴线方向; y 在截面平面内,竖直方向; z 在截面平面内,水平方向(垂直于 y 轴); M 为弯曲方向。

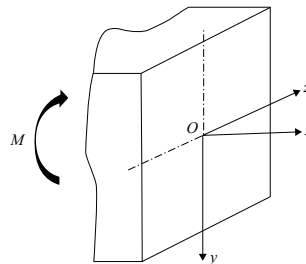


图7 变形应力示意图

简化漆包线弯曲正应力为

$$\sigma = \frac{M}{W_z} \quad (1)$$

式中: M 为截面弯矩; W_z 为抗弯截面系数。

弯曲切应力为

$$\tau = \frac{F \cdot S_z^*}{I_z \cdot b} \quad (2)$$

式中: F 为截面剪力; S_z^* 为 y 点以外的面积对中性轴的静矩; I_z 为整个截面对 z 轴的惯性矩; b 为 y 点处截面宽度。

漆包线三维成型过程中,随着漆包线的折弯,皇冠端部附近应力逐渐集中,两侧支腿受力逐渐增加,成型后,存在一定的回弹量。

为提前释放漆包线成型的应力回弹,分解成型工艺,建立 2D 折弯+3D 成型的组合成型模式。如图 8 所示,先将漆包线折成平面 2D,再送入 3D 模具,进行 3D 成型,部分应力在 2D 折弯时释放,降低漆包线回弹和损伤^[13]。

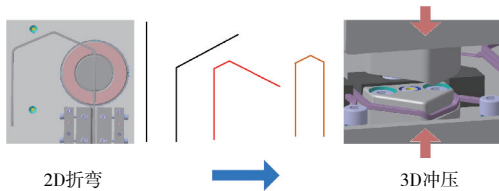


图 8 漆包线三维成型图

漆包线激光焊接采用深熔焊接技术^[14],如图 9 所示,以较高功率密度的激光束照射漆包线待焊接端面,随激光束的运动对漆包线内部进行焊接^[15]。

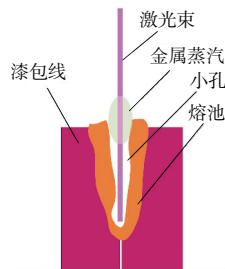


图 9 激光深熔焊接

本文采用移动高斯热源进行试验,在漆包线端面中部沿着“O”形轨迹扫描,热量为

$$Q = q \cdot e^{-3x \frac{(x-0.05)^2 + (y-e \cdot t)^2}{r^2}} \quad (3)$$

式中: q 为热通量密度; x, y 为移动坐标点; r 为光斑半径; v 为光源移动速度; t 为光源移动时间。

设置激光焊接试验工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光焊接试验工艺参数

焊接路径	激光功率/W	焊接速度/(mm/s)	脉冲能量/J	焊接时间/s
“O”形	6 000	400	570.87	0.02

仿真发现,热源在一根铜线端面时,另一根为低温区,随着焊接的进行,热量不断累积,整个过程最大温度 190 ℃ 出现在距离端面 11 mm 处,如图 10 所示,漆包线表面漆膜材料耐受度大于 220 ℃,漆包线端面去漆长度需要大于 11 mm。

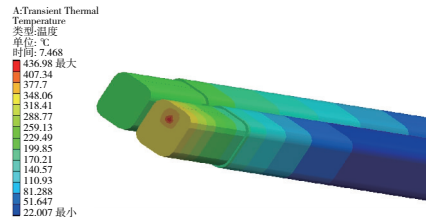


图 10 漆包线激光焊接过程温度变化图

为了优化漆包线焊接工艺,得到更好的焊点,需要对激光焊接光束的摆动路径进行优化,设置“O”形扫描轨迹、“螺旋”形扫描轨迹及“∞”形扫描轨迹焊接路径如图 11 所示。

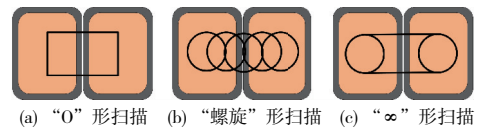


图 11 焊接轨迹图

由图 12 可知,同样焊接参数情况下,“O”形扫描轨迹焊接效果良好,融球饱满;“螺旋”形扫描轨迹焊接能量出现集中,出现炸焊不良现象,严重烧伤绝缘漆膜;“∞”形扫描轨迹焊接能量分散,热量散失快,未达到焊接要求^[16]。

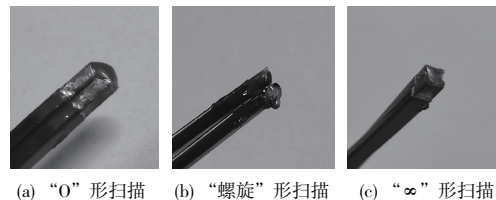


图 12 焊接结果

漆包线焊接选择“O”形扫描轨迹,本文实现了高速焊接并最小化飞溅和气孔的形成,可使漆包线获得最佳焊接性能。

2.2 电热偶合性能及绝缘技术研究

定子绕组绝缘处理需要提高绝缘漆在漆包线间的填充率,是绝缘工艺技术的关键点。图 13 列

出了 YA1142 黏度与温度关系曲线。绝缘漆在某一特定的温度下流动性最好,随着温度的升高,绝缘漆逐渐凝胶固化,适当低的黏度有利于树脂充分渗透进入绕组线圈,填充线圈中空隙。

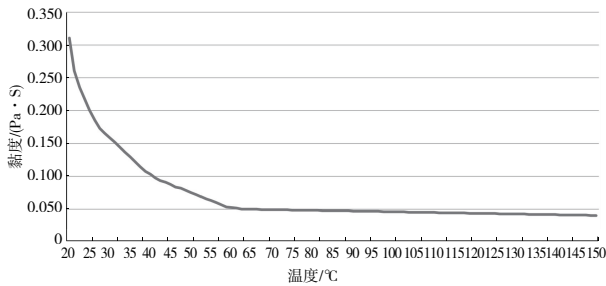


图 13 YA1142 黏度与温度关系曲线

依据绝缘漆特性,本文采用定子三相端子直流通电,热量由绕组线圈向外传导,让定子一直处于精确的温度,金属的电阻随温度的升高而减少,电阻与温度近似地存在着如下关系:

$$R(\tau) = \frac{R_0}{1 + \alpha(T_r - T_0)} \quad (4)$$

式中: R_0 为初始电阻; $R(\tau)$ 为 τ 时刻电阻; α 为电阻率的温度系数; T_r 为 τ 时刻温度; T_0 为初始温度。

对绕组扁线在恒流 75 A、80 A、90 A、100 A 进行 300 s 通电仿真。由图 14 可以看出,不同通电电流热影响区差异明显,通过控制通电电流的大小,可实现快速控制温度变化,减少能量损耗。

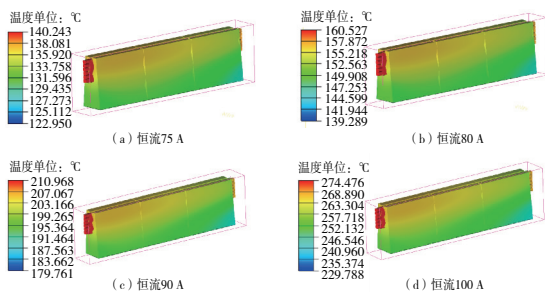


图 14 恒流电热耦合温度图

搭建可编程直流电源试验模型如图 15 所示,基于神经网络 PID 控制系统方法,验证漆包绕组不同通电电流下的温度特性和工艺参数。

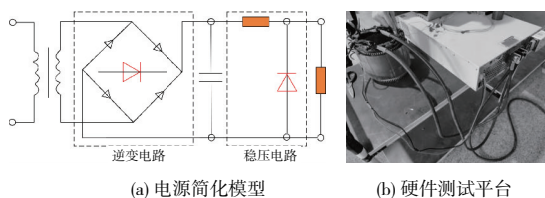


图 15 漆包线电热耦合试验

试验结果表明电加热工艺在漆包线绝缘工艺过程中温升可控,温度精度控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内,在预热、滴浸、凝胶、固化阶段的绕组均可使温度得到有效控制,使加热均匀,提高了绝缘漆渗透力,确保了滴漆和凝胶时定子产品的一致性和稳定性,实现了填充率超 90%。

2.3 定子电性能及测试关键技术研究

车用扁线定子电性能测试平台如图 16 所示,三相线定义为 U/V/W,外壳接地。

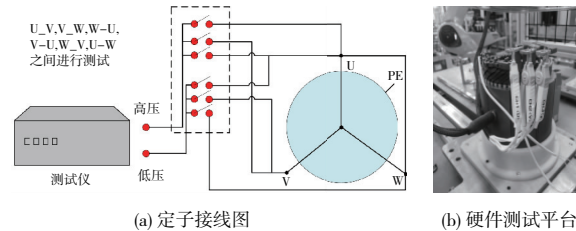


图 16 车用扁线定子电测试试验

扁线绕组多通断气隙放电机制如图 17 所示,由漆包线绝缘漆膜表面局部电场集中引起气体开始放电^[17]。

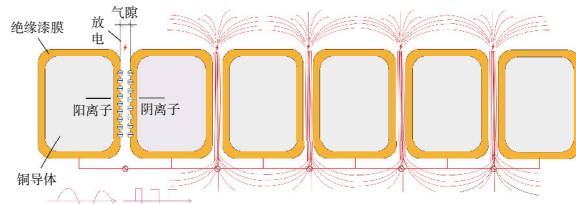


图 17 扁线绕组多通断气隙放电机制

电荷分布对气隙电场的畸变作用,由 Schottky 效应确定,外加电场下注入电流密度 J ^[18]:

$$J = AT^2 e^{\frac{-\varphi}{kT}} e^{\frac{e}{kT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}} \quad (5)$$

式中: A 为理查森常数; T 为绝对温度; k 为玻尔兹曼常数; φ 为注入势垒; e 为元电荷; E 为电场强度。可看出载流子发射电流密度随电场强度增大而增大。

PDIV 主绝缘测试采用正弦电压测试,侧重评价绝缘安全性,PDIV 匝间绝缘测试采用高频脉冲冲击电压测试,侧重评价绝缘耐久性^[19],建立测试系统^[20-21]如图 18 所示。

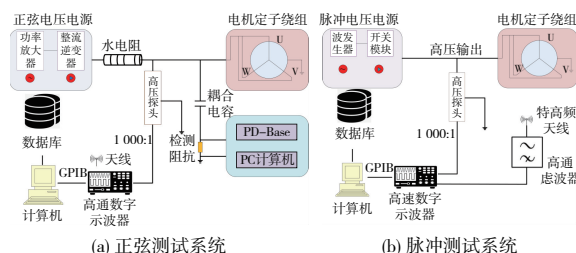


图 18 PDIV 测试系统

PDIV 是绝缘电、热老化的分界线,小于 PDIV 为热老化,大于 PDIV 为电老化。PDIV 测试关键在于失效预测,如图 19 所示。通过输出 PDIV 数据分析,预测车用扁线定子老化风险。

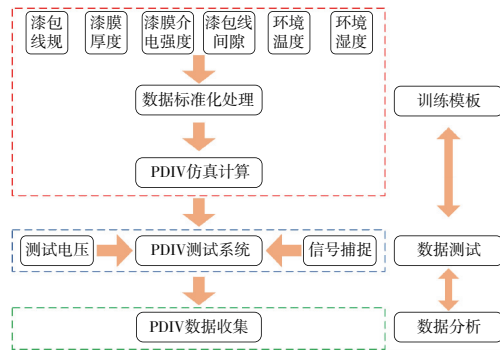


图 19 PDIV 预测流程

3 生产实验结果分析

3.1 实验环境及硬件平台

为了验证本文数字化生产技术模型的可行性和准确性,搭建扁线电机定子全流程生产硬件平台主要包括定子组立、绝缘、测试装置等,其中成型方式为 2D 折弯+3D 成型的组合成型模式,激光器为单模环型,并在吉利、舜驱等新能源车厂量产应用,进一步分析生产结果。

3.2 生产实验结果验证

对硬件平台生产的扁线定子进行测试分析,通过结果得到,定子实时性生产属性电阻、电感、绝缘、耐压、匝间和 PDIV 均满足产品品质,产品质量合格,如表 2 所示,满足实际工程的高实时性的要求。

表 2 实时性生产结果

验证项目	验证标准	试验结果	是否满足要求
电阻/mΩ	15±0.5	15.2	是
交耐/mA	≤15	13.640	是
匝间	面积:5.0	面积:0.1	是
	差积:5.0	差积:1.8	

4 结语

本文阐述了车用扁线电机定子特点和发展需求,依据扁线电机定子制造难题,建立了以漆包线性能为核心变量的车用扁线电机定子生产工艺流程,基于漆包线弹塑性变形的物理特性和应力应

变微观演化行为,构建了漆包线 2D 折弯+3D 成型的组合成型模式,提高了漆包线成型质量。进行了漆包线焊接热力学仿真分析,获得了焊接热影响区的分布状态,优化了焊接工艺参数。给出了直流电加热工艺在扁线电机生产绝缘过程中温升控制可行性,实现了均匀加热,确保了定子产品的一致性和稳定性。在研究测试机制的基础上,提出一种测试系统和预测模型,指导测试工艺开发。从组立、绝缘、测试等方面的关键技术出发,研究了可制造性工艺参数,提高了工艺装备的稳定性。

参考文献:

[1] 孙超,刘波,孙逢春. 新能源汽车节能规划与控制技术研究综述[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(4): 593-616.

[2] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0 [M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2021:52-53.

[3] CAI W, FULTON D, CONGDON C L. Multi - set rectangular copper hairpin windings for electric machines:US6894417[P]. 2005-05-17.

[4] 唐敦兵,张毅. 互联开放式协同制造系统研究进展分析[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):1-5.

[5] 谢颖,何自豪,蔡蔚,等. 车用发卡式绕组永磁同步电机的设计与优化[J]. 电机与控制学报,2021, 25(12):36-45.

[6] 鞠孝伟,张凤阁,程远,等. 车用驱动电机扁线绕组关键问题研究综述[J]. 中国电机工程学报,2024, 44(15):6181-6199.

[7] 马林泉,周成,黄苏融,等. 电动汽车驱动电机用绝缘材料现状与发展趋势[J]. 电器工业,2020(4):52-57.

[8] 葛朝廷,田威,李鹏程,等. 基于视觉检测的自动化精确寻边技术[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4): 181-184.

[9] BAI D X, LI G F, JIANG D, et al. Surface defect detection methods for industrial products with imbalanced samples: a review of progress in the 2020s [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2024, 130:107697.

[10] 季娟娟,王佳,陈亚杰,等.基于改进 YOLOv7 的液压阀块表面微小缺陷检测[J]. 计算机工程,2023, 49(11):302-310.

[11] ZOU Y Q, FAN Y G. An infrared image defect detection method for steel based on regularized YOLO [J]. Sensors,2024,24(5):1674.

[12] 钟小燕,郑跃胜,党斌,等. 直流电场下聚合物空间电荷分布的极性效应[J]. 中国电机工程学报,2016, 36(24):6693-6701,6922.

(下转第 144 页)

- 收稿日期: 2024-08-02

- [13] 魏前龙. 穿过柔性体的板料 U 形折弯工艺研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 84-86, 99.
- [14] NOTARI R, NUZZO S, SAVI F, et al. An asymmetrical additively manufactured hairpin winding for increased efficiency and sustainability[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 9529-9538.
- [15] 黄瑞生, 邹吉鹏, 宫建锋, 等. 激光扫描焊接熔池及等离子体动态行为[J]. 焊接学报, 2020, 41(3): 11-16, 97.
- [16] JIA Z T, WANG M, ZHAO S M. A review of deep learning-based approaches for defect detection in smart manufacturing[J]. Journal of Optics, 2024, 53(2): 1345-1351.
- [17] PAULI F, KILPER M, DRIENDL N, et al. Modeling of the partial discharge process between the winding and the stator of low voltage machines for traction

- applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2310-2318.
- [18] 武岳, 张志锋. 轴向磁通永磁电机扁铜线交流铜耗的混合解析计算及抑制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6609-6618.
- [19] 师洋, 王鹏, 刘新霆, 等. 正弦及双极性脉冲电压下变频电机匝间绝缘 PDIV 对比分析[J]. 绝缘材料, 2022, 55(1): 101-106.
- [20] 范梓远, 王鹏, 于超凡, 等. 重复方波下气压对新能源汽车主绝缘材料电老化特性影响研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4): 60-67.
- [21] 刘蔚, 林熙云, 张市明, 等. 测试方法对 Al/PI 漆包扁线 PDIV 测量结果的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(8): 115-118.

收稿日期:2024-01-02