

电动滚筒用永磁外转子电机水冷系统的设计与分析

马 鑫¹, 郑庆华², 周 挺¹, 韩雪岩¹

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 江西工埠机械有限责任公司, 江西 樟树 331200)

摘 要: 针对皮带运输用永磁外转子电动滚筒电机散热能力弱、转矩密度低、绕组温度高等问题, 设计了一套基于 710 kW 电动滚筒的水冷系统, 该系统通过流固耦合的方法建立三维场求解模型, 并进行求解计算。同时分析了水道构型、水流量、水套外径、壁厚、水道数量、高度等参数对温升的影响。通过仿真分析和温升试验, 验证了所设计的水冷系统有利于提高电动滚筒的散热能力, 为进一步提高电动滚筒的转矩密度提供参考依据。

关键词: 电动滚筒; 外转子; 水冷; 流固耦合; 散热

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0008-06

doi: 10.12177/emca.2023.101

Design and Analysis of Water Cooling System for Permanent Magnet Outer Rotor Motor Used in Electric Drum

MA Xin¹, ZHENG Qinghua², ZHOU Ting¹, HAN Xueyan¹

(1. National Engineering Research Centre for REPM EM, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Jiangxi Gong Bu Machinery Co., Ltd., Zhangshu 331200, China)

Abstract: Aiming at the problems of weak heat dissipation, low torque density and high winding temperature of permanent magnet outer rotor electric drum motor for belt transportation, a water cooling system based on 710 kW electric drum is designed. In the system, a three-dimensional field solution model by fluid-structure coupling method is established, and the solution calculation is performed. The influence of water channel configuration, water flow, outer diameter of water jacket, wall thickness, number of water channel and height on temperature rise is analyzed. By simulation analysis and temperature rise test, it is verified that the designed water cooling system is beneficial to improve the heat dissipation capacity of the electric roller, which provides a reference for further improving the torque density of the electric roller.

Key words: electric drum; outer rotor; water colling; fluid-structure coupling; heat dissipation

0 引 言

随着“双碳”战略政策的不断推进,各个行业的产品也向高效化、轻量化和小型化发展。电动滚筒把永磁外转子电机和滚筒完美地结合在一起,替代原有的电机、减速机、滚筒的传统传动模式,以及后续出现的直驱电机、滚筒的直驱传动模

式。电动滚筒具有结构简单、体积小、效率高、维护成本低的特点。但是,随着产品结构的紧凑性及导热形式的改变,给电机绕组温升带来了更大的压力。传统内转子电机主要的散热面积在机壳外侧,通过机壳散热;电动滚筒的散热面积在转轴内侧,相对内转子电机其散热面积减小。因此,设计一套高效的冷却系统对于永磁电动滚筒的小型

收稿日期: 2023-04-17; 收到修改稿日期: 2023-05-18

作者简介: 马 鑫(1981—),男,硕士,工程师,研究方向为特种电机及其控制。

化和轻量化有着重要意义^[1-3]。

目前永磁电动滚筒的冷却系统主要采用空心轴自然冷却、空心轴风冷以及转轴水冷等方式。空心轴自然冷却效果较差,且电机体积较大;空心轴风冷为追求较大的散热面积增加了轴的内径,导致材料浪费以及轴承成本增加。文献[4]采用自然冷却外转子永磁电机,运用热网络法对其进行了温升计算。文献[5]介绍了外转子永磁电机的电磁设计以及相关热源计算方式并设计了一种分流式水路冷却系统,对其进行仿真计算。文献[6]设计了一台空心轴空冷外转子永磁电机,采用流固耦合进行仿真计算。文献[7]针对 50 kW 轴向永磁电机设计了槽内循环水冷结构,分析了该结构下流速、水压、散热面积对冷却效果的影响。文献[8]在高速内转子永磁电机定子铁心内开设水道,分析了水道数量对电磁参数和温升的影响。

在以上研究成果的基础上,本文提出一种适用于大功率永磁电动滚筒的水冷冷却系统,用于解决大功率电动滚筒温升过高、体积过大、质量过大等问题。首先,建立滚筒温度场的求解模型并进行计算;其次,对比分析三种不同流道构型的散热面积、散热系数、所需水压的不同以及对温升的影响;最后,基于 710 kW 永磁电动滚筒设计一种轴向水冷系统,并分析水冷系统参数对温升的影响,完成温升试验,验证相关设计技术的正确性,对解决电动滚筒过热问题具有重要意义。

1 电动滚筒外转子电机的结构

以 710 kW 永磁电动滚筒为研究对象,提出了一种如图 1 所示的大功率永磁电动滚筒冷却结构。滚筒充当电机的转子,电机定子在滚筒内部。水冷系统就由内、外冷却水套、保持架以及轴护套构成。首先,定子铁心与外水套完美贴合,确保较好的导热效果;其次,保持架承载了定子自身的重力以及工作过程中产生的转矩,提高了整体的机械强度;最后采用轴套减小轴的尺寸,避免材料浪费。电动滚筒的主要设计参数如表 1 所示。

2 电动滚筒外转子永磁电机模型建立

2.1 数学模型

根据能量守恒定律和传热学理论,在直角坐标系的求解域内,三维瞬态热传导及其边界条件

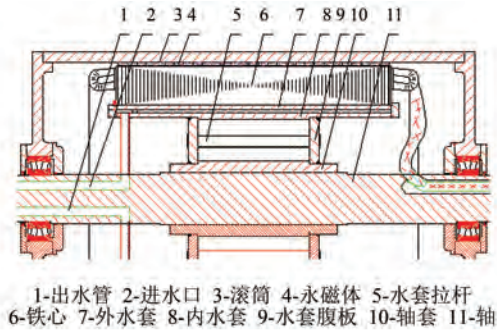


图 1 电动滚筒的总体结构

表 1 电动滚筒参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	710	带速/(m·s ⁻¹)	5
槽数	72	极数	40
额定电压/V	1 140	滚筒直径/mm	1 250
带宽/mm	1 600	筒长/mm	1 800

可表示为^[9-10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ S_1: T = T_0 \\ S_2: k \frac{\partial T}{\partial n} = -q_0 \\ S_3: k \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为物体温度; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的导热系数; q 为热源密度; ρ 为物质密度; c 为物质比热容; T_0 为边界 S_1 上的温度; n 为边界法向量; q_0 为边界面 S_2 的热流密度; k 为导热系数; α 为散热系数; T_c 为周围介质温度。

流体处于稳定流动状态时的三维流体通用控制方程可表示为^[11]

$$\frac{\partial(\rho u \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S \quad (2)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量; φ 为通用变量; Γ 为扩展系数; S 为源项。

2.2 模型建立

基于 Solid Works 软件建立三维电机模型图,为了网格剖分方便,对电机三维模型进行如下简化:

- (1) 将削角后的永磁体简化处理建模,永磁体建成未削角形式;
- (2) 定子槽口位置的槽楔部分简化处理;
- (3) 绕组等效成左、右均匀分布的矩形块,简化后的横截面如图 2 所示;
- (4) 对滚筒和端盖进行了一定的简化处理,如图 3~图 4 所示。

表 2 给出了电动滚筒各部分材料的导热系数。

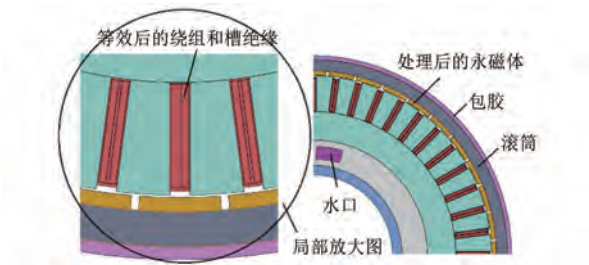


图 2 简化后的横截面图

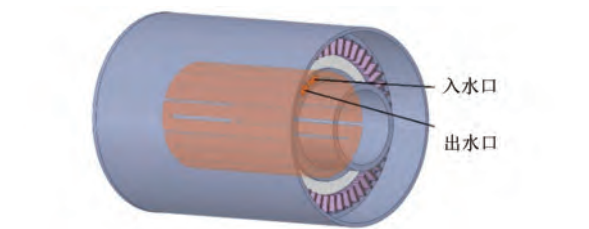


图 3 水冷路径示意图



图 4 定子和转子部分示意图

3 水冷系统的设计与分析

3.1 水冷系统的流道构型

水冷结构采用的流道构型一般分为轴向式、圆周式、螺旋式三种,如图 5 所示。三种流通的参数及温升见表 3。

在水流流速相同的情况下,三种流道构型表明圆周式和轴向式流道的传热接触面积差别不大,略高于螺旋式流道。三种流道构型中轴向式流道的散热系数最高,圆周式流道次之,螺旋式流

道最小。但是,从所需的水压来看,轴向式流道的流阻最大,流路损耗大,相反螺旋式流道的流阻最小。从绕组温升看,轴向式流道略好于圆周式流道,圆周式流道略好于螺旋式流道。

表 2 电机各部分材料的导热系数 W/m/K

材料名称	导热系数		
	x 方向	y 方向	z 方向
定子铁心	39	39	4.43
空气	0.07	0.07	0.07
绕组	385	385	385
绕组绝缘	0.26	0.26	0.26
转子	39	39	39
永磁体	9	9	9
传动带	0.5	0.5	0.5
端盖	39	39	39
包胶	0.25	0.25	0.25

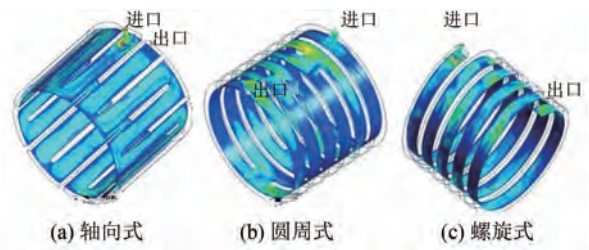


图 5 水冷系统的流道构型

表 3 三种流道的参数及温升

流道构型	圆周式	螺旋式	轴向式
传热接触面积/m ²	5.87	5.50	5.76
散热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	2 878.3	2 736.3	3 101
水压/Pa	3 120	2 434	5 397
绕组平均温升/K	84.6	88.4	75.5

螺旋式流道由于设计简单,制造容易,目前小功率电机一般采用螺旋式流道。但是,对于大功率电机采用轴向式流道应是最好的选择。本文采用的轴向式流道的展开图如图 6 所示,水的流速分布如图 7 所示。

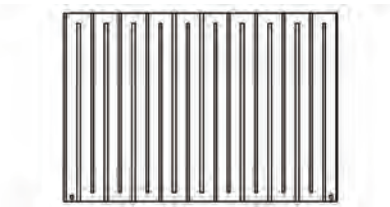


图 6 流道展开图

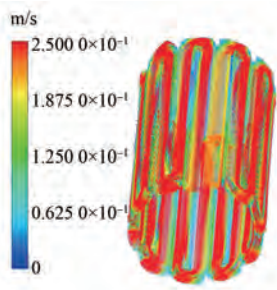


图 7 水的流速分布

3.2 流道外壁直径对温升的影响

流道外壁直径对温升有着至关重要的影响,直径的大小直接决定了整体散热面积的大小。流道外壁直径与温升的关系如图 8 所示,如图 8 可知,流道外壁直径越大散热面积越大,导致滚筒的温升越低。但是,此尺寸受限于电磁参数的设计,若直径越大电磁设计中定子内径就越小,则会占用定子槽内面积,增加电机铜耗,导致热源增加,这反而会导致散热下降。因此,外壁直径在满足电磁参数基础上越大越好。

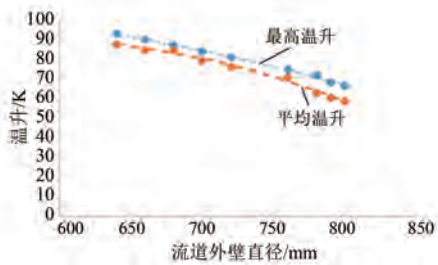


图 8 流道外壁直径与温升的关系

3.3 流道外壁的厚度对温升的影响

水道外壁的厚度决定了热传导的快慢,不同外壁厚度下电机的温升情况如表 4 所示。表 4 计算了相同流道面积、相同流道数下,不同外壁厚度对滚筒温升的影响情况。从计算结果可以看出每增加 10 mm 厚度,温升增加 1 K 左右。因此,外壁厚度对温升的影响可以忽略不计。

表 4 不同外壁厚度下电机的温升 K

水道外壁厚度/mm	最高温升	最低温升	平均温升
10	77.8	55.1	73.1
20	79.1	56.0	74.5
30	80.6	56.9	75.9
40	82.0	57.9	77.3
50	83.5	58.8	78.8

3.4 流道高度对温升的影响

流道个数不变,增加流道高度,流道高度的增加带来流道面积的增加,在考虑流量不变和水压不变的情况下,温升与流道高度的关系如表 5 所示。

表 5 不同流道高度下电机的温升

流道高度/mm	流量不变		水压不变	
	电机温升/K	水压/Pa	电机温升/K	流量/(m ³ ·h ⁻¹)
20	75.7	5 397	84.1	1
40	75.7	739	79.4	1.5
60	75.8	255	77.2	2
80	75.8	123	75.9	2.5
100	75.9	72	74.9	3
120	75.9	46	73.8	4

当流量不变时,滚筒温升几乎没有任何变化,说明流量是决定温升的主要参数。当水压不变时,流道面积增大,流阻变小,流量增加,温升随着流量的增加而降低,但是降低趋势变缓,当流量到达一定数值时,几乎不会影响滚筒的温升。

3.5 流道数量对温升的影响

逐步增加流道的个数,保持其他参数和流量不变,滚筒温升和相应水压的变化趋势如图 9 所示。

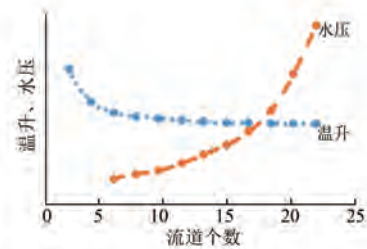


图 9 流道个数对温升和水压的影响

由图 9 可以看出,在流道数量较少时,滚筒的温升较高,但随着水道数量的增加温升迅速降低,当流道数量增加到一定时,滚筒温升基本不发生变化,趋于稳定。但随着水道数量的增加,水压迅速增大,致使流道损耗变大。因此,流道数量在 18~24 个是最优的选择。

3.6 流量对滚筒温升的影响

流量是决定温升大小的一个重要参数,其影响如图 10 所示。图 10 为不同流量下的滚筒温升情况。图 11 为滚筒的温度分布情况。由图 10 和

图 11 可以看出,水流量高于 3.5 m³/h 时,滚筒温升基本控制在 75 K 左右,因此,在不改变其他冷却参数的情况下,水流量达到一定数值后将不会对温升起到影响。

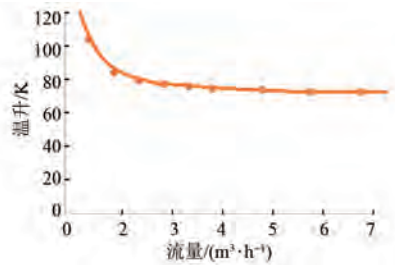


图 10 流量对滚筒温升的影响

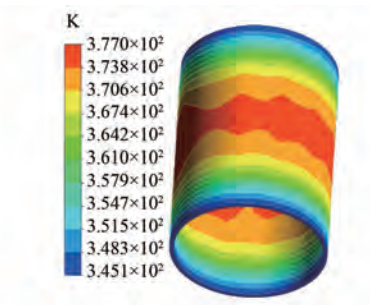


图 11 滚筒温度分布

4 电动滚筒的温度仿真结果

针对上述分析结果,本文采用轴向式流道构型下的水冷结构,其主要参数如表 6 所示。

表 6 电动滚筒的冷却结构参数	
参数名称	参数值
外壁直径/mm	800
外壁厚度/mm	20
流道高度/mm	15
流道个数	20
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2.5
进水压力/Pa	230

图 12 为滚筒轴向与径向温度分布如图,通过图 12 滚筒轴向和径向温度分布可以看出发热严重的地方集中在绕组的端部,温度达到 102 ℃,绕组平均温升在 75.5 K 左右。图 13 为电动滚筒主要部件的温度分布情况。

此外,仿真时考虑滚筒外部的包胶,滚筒的温度分布呈现中间高两边低的趋势,其最高温度

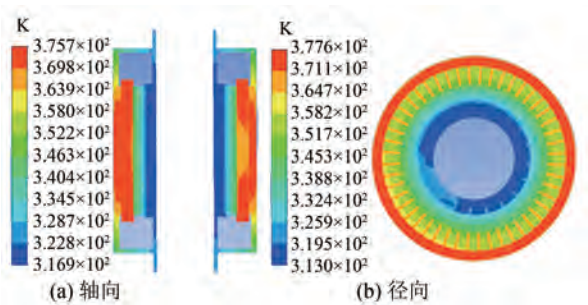


图 12 滚筒轴向与径向温度分布

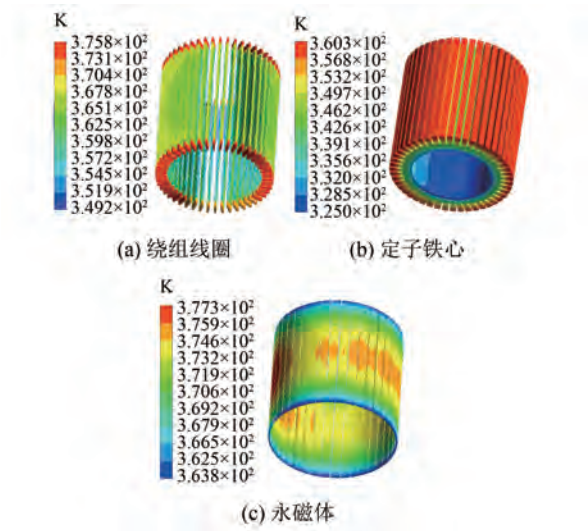


图 13 滚筒主要部件的温度分布

到达 100 ℃ 左右,两端的温度在 70 ℃ 左右。

5 样机与试验

为了验证前文设计分析的准确性,将本文设计的水冷系统应用到 710 kW 的电动滚筒上,样机如图 14 所示。

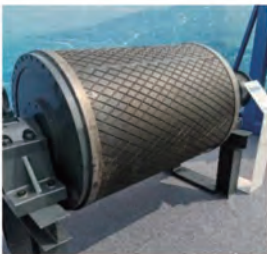


图 14 样机实物图

外转子电动滚筒的转轴固定不动,转矩不能通过转轴输出,而通过滚筒直接输出。因此,传统的试验平台中,没有与其适合连接的负载机。因此,本文搭建了如图 15 的试验平台,将电动滚筒

固定在固定平台上,将钢丝绳的一端与滚筒固定连接,钢丝绳穿过平台顶端的定滑轮后,与另一端的砝码相连接。滚筒的额定转矩为 88 627 N·m,折算到砝码的质量为 14 500 kg,滚筒周期性正反转提降砝码完成温升试验。



图 15 样机温升试验平台

电动滚筒制造时将热电偶(PT100)埋置在绕组端部和绕组中部,试验时保证流量 2.5 m³/h 不变,每隔 10 min 记下各个部位的温度值,直至达到热平衡。

图 16 为仿真计算出电动滚筒整体的温度分布情况图。表 7 记录了温度稳定时滚筒各个部位的温度值以及对应的仿真值。图 17 为试验所记绕组端部温度与绕组端部温度仿真结果的对比。

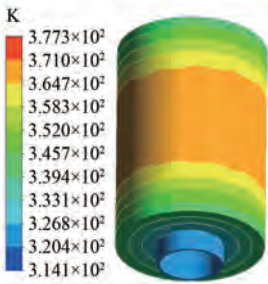


图 16 整机温度分布

表 7 电机试验值与仿真值对比

测量位置	试验值	仿真值
绕组端部/℃	94.2	102
绕组中部/℃	83.5	89
平均温升/K	69.6	75.5
滚筒表面/℃	68.4	72.3
前端盖/℃	41.3	44.3
后端盖/℃	41.3	44.5
出水温度/℃	45	48

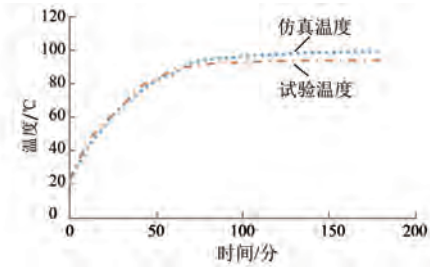


图 17 绕组端部试验温度与仿真温度对比

通过数据可以看出试验值小于仿真值,绕组温度和平均温升的误差在 5%~8%,电机其他部位的温度比较接近,可以满足实际工程的要求。

6 结 语

本文针对皮带运输用永磁外转子电动滚筒散热能力弱、转矩密度低、绕组温升过高等问题,提出了一种外转子电动滚筒冷却系统,并将其应用到 710 kW 的电动滚筒上,通过试验测试,得到以下结论:

- (1) 采用轴向流道构型的新型水冷结构在结构、工艺、冷却效果上适合大功率电动滚筒。
- (2) 通过冷却系统参数对温升的影响可知,水流量和流道数量是影响外转子电动滚动温升的主要参数。为达到高效的冷却系统其流量应控制在 2~3 m³/h,流道个数应控制在 18~25 个。
- (3) 经过对电动滚筒外转子电机模型的简化与求解,并与试验数据对比,可知仿真的计算结果是正确的,误差可以控制在 8% 以内,可以用于工程实践指导。

【参 考 文 献】

[1] 王海亮. 永磁同步电动滚筒在下运式带式输送机中的应用[J]. 煤矿机电,2019,40(4): 106.

[2] 孟全. 大功率永磁直驱电动滚筒带式输送机的应用[J]. 煤矿机电,2020,41(1): 84.

[3] 庞飞. 永磁同步电动滚筒在矿用带式输送机的应用[J]. 能源与节能,2017,6: 20.

[4] 吴家成,张炳义. 皮带输送机用外转子永磁同步电机温度场研究[J]. 防爆电机,2020,55(2): 8.

[5] 王帅. 矿用隔爆型外转子永磁直驱电动机电磁设计及水冷系统分析[J]. 煤炭技术,2023,42(3): 271.

(下转第 27 页)

- 2020, 47(8): 24.
- [4] 邓惟滔. 永磁同步电机系统参数辨识与转矩波动抑制[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [5] 陈景文, 王培瑞, 王红艳, 等. 基于负载转矩观测器的PMSM前馈变补偿策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(8): 47.
- [6] 王兵, 颜伟平, 刘凯, 等. 基于改进型扰动观测器的PMSM抗扰动控制研究[J]. 电工电气, 2021, 2: 1.
- [7] 关欣, 李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益PI控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38.
- [8] 袁雷, 沈建清, 肖飞, 等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 9.
- [9] 郭新华, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于电磁转矩反馈补偿的永磁同步电机新型IP速度控制器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 7.
- [10] 鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 75.
- [11] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems (2nd ed.) [M]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2004.
- [12] 彭熙伟, 高瀚林. 永磁同步电机的改进对角递归神经网络PI控制策略[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 126.
- [13] 王发良. 永磁同步电机双闭环调速系统PI控制器设计[J]. 南方农机, 2022, 53(3): 36.

(上接第13页)

- [6] 王浩潇, 韩雪岩, 马鑫等. 起重机驱动装置冷却结构设计及温升运行特性分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 51.
- [7] 武岳, 张志锋, 平佳齐. 高功率密度轴向磁通永磁电机新型水冷结构设计与温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 2895.
- [8] 兰志勇, 王琳, 徐琛, 等. 高速永磁同步电机温度场及水冷分析[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 81.
- [9] 佟文明, 孙静阳, 吴胜男. 全封闭高速永磁电机转子结构对转子散热的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 91.
- [10] WINTERBORNE D, STANNARD N, SJOBERG L, et al. An air-cooled YASA motor for in-wheel electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6448.
- [11] 王晓远, 周晨. 基于PCB绕组的盘式永磁同步电机温度场分析与冷却方式研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3062.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |