

# 基于粒子群优化算法的永磁电机热网络参数识别\*

师蔚, 阳喜成

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 监测永磁电机的永磁体温度对于保证电机的使用寿命至关重要, 因为过高的温度会产生永磁体不可逆失磁现象。提出了一种基于粒子群优化算法的永磁电机热网络参数识别方法, 实现用热网络监测永磁体的温度。该方法首先建立永磁电机的热网络模型, 利用粒子群优化算法结合电机温升试验所得温度数据对热网络模型的主要热力参数进行识别; 然后利用该热网络模型进行在线温度识别, 识别过程能够快速收敛, 具备良好的辨识精度; 最后, 通过对比仿真识别温度和电机温升试验数据, 验证了该方法的准确性。

**关键词:** 永磁电机; 热网络; 粒子群优化算法; 温度识别

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0102-07

## Thermal Network Temperature Identification of Permanent Magnet Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm\*

SHI Wei, YANG Xicheng

(College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Monitoring the permanent magnet temperature of permanent magnet motors was critical to the life of the motor, because the excessive permanent magnet temperature increased the risk of irreversible demagnetization. A method based on particle swarm optimization (PSO) algorithm for permanent magnet motor thermal network temperature identification was proposed to monitor the temperature of permanent magnets. In this method, the thermal network model of the permanent magnet motor was established, and the PSO algorithm was combined with the temperature data obtained by the motor temperature rise experiment to identify the main thermal parameters of the model. This method was used to identify the temperature on-line, and the identification process could be quickly converged with good accuracy. Finally, the feasibility and accuracy of the method were verified by comparing the temperature of the simulation with the experimental data.

**Key words:** permanent magnet motor; thermal network; particle swarm optimization (PSO) algorithm; temperature identification

## 0 引言

为了避免永磁电机加速热老化或永久损坏, 需要对其温度进行监测。当永磁电机的转子永磁体在弱磁模式下运行时, 过高的永磁体温度会引起不可逆退磁的风险。因此, 在线识别其转子永磁体温度非常必要<sup>[1-3]</sup>。通过接触式埋热传感

器对转子永磁体温度进行检测, 需要解决传感器安装及转子温度传输等难题, 对于中小型永磁电机具有一定难度<sup>[4]</sup>。因此, 基于模型的方法间接得到永磁体的温度成为主要的监测手段。电机模型法<sup>[5-6]</sup>与信号注入法<sup>[7-8]</sup>都是利用电模型参数的热性质间接确定温度。但是这两种方法需要对电机及逆变器进行精确建模, 并需要确定其关键

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB01700)

作者简介: 师蔚(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为永磁电机设计及控制。

阳喜成(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机温度监测。

参数。同时信号注入法虽然通常能够提供较为可靠的温度预测,但其具有侵入性并且在一定程度上干扰了永磁电机的性能。

集总参数热网络法(LPTN)是将电机中的传热过程从热的角度抽象出来,像描述电路一样通过等效电路图来加以描述。但该方法模型中的主要热阻和热容的解析推导需要对永磁电机的几何形状和材料的热性质进行简化和校准<sup>[9-10]</sup>。在精确的温度预测中,即使在较低模型阶数下,也可以将模型与试验数据相匹配,从而实现永磁电机和绕组温度的预测<sup>[11-12]</sup>。

本文采用LPTN法对永磁电机建立浅灰度热模型,利用粒子群优化(PSO)算法结合永磁电机温升试验数据对热网络主要热阻参数进行识别,并将该模型及参数运用于在线永磁体温度识别中。最后,通过电机温升试验数据交叉验证了该方法的可行性和准确性。

## 1 永磁同步电机热网络模型

### 1.1 5节点简化模型

以水冷永磁电机作为研究对象,根据电机的结构尺寸、热流方向、热源分布和温度预测的需要建立5节点热网络模型<sup>[13-15]</sup>。将电机分为定子铁心、定子绕组槽内部分、定子绕组端部、转子永磁体、轴承5个区域模块。所建5节点等效热网络模型如图1所示。

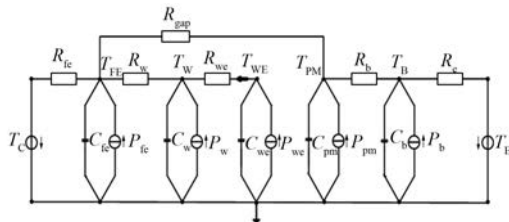


图1 5节点等效热网络模型示意图

图1中,5个节点分别代表模型电机5个划分区域的预测温度。其中, $T_{FE}$ 为定子铁心温度节点, $T_w$ 为定子槽内绕组温度节点, $T_{WE}$ 为定子端部绕组温度节点, $T_{PM}$ 为转子永磁体温度节点, $T_B$ 为轴承温度节点。 $T_C$ 和 $T_E$ 分别为冷却水温度和环境温度。 $R_{fe}$ 、 $R_{wc}$ 、 $R_c$ 为热传导电阻; $R_{gap}$ 、 $R_w$ 、 $R_b$ 为热对流电阻。 $C_{fe}$ 为简化定子铁心热容, $C_w$ 为简化定子槽内绕组热容, $C_{we}$ 为简化定子端部绕组热

容, $C_{pm}$ 为简化转子永磁体热容, $C_b$ 为简化转子轴承热容。永磁电机内部的热源主要为各种损耗,简化为定子铁心损耗 $P_{fe}$ 、定子槽内绕组损耗 $P_w$ 、定子端部绕组损耗 $P_{we}$ 、永磁体涡流损耗 $P_{pm}$ 以及轴承损耗 $P_b$ 。

### 1.2 损耗模型

#### 1.2.1 定子铁心损耗

根据损耗机理可以将铁心损耗分为以下3种:磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗。铁心损耗表达式为

$$P_{fe} = k_h f B^2 + k_c (fB)^2 + k_e (fB)^{1.5} \quad (1)$$

式中: $k_h$ ——磁滞损耗系数;

$k_c$ ——涡流损耗系数;

$k_e$ ——附加损耗系数;

$f$ ——磁通交变频率;

$B$ ——磁通密度幅值。

该部分损耗通过有限元计算结合试验分离获取。

#### 1.2.2 定子绕组损耗

定子绕组损耗是由相电流所产生的损耗,其值随温度变化,可表示为

$$P_{cu} = 3I^2 R_{cu0} (1 + \alpha T) \quad (2)$$

式中: $I$ ——定子绕组相电流;

$R_{cu0}$ ——0℃时铜绕组电阻值;

$\alpha$ ——电阻温度系数;

$T$ ——铜绕组温度值。

定子槽内绕组损耗和定子端部绕组损耗分别可以表示为

$$P_w = 3I^2 R_{cu0槽部} (1 + \alpha T_w) \quad (3)$$

$$P_{we} = 3I^2 R_{cu0端部} (1 + \alpha T_{we}) \quad (4)$$

该部分的损耗可以直接通过计算得出。

#### 1.2.3 转子永磁体涡流损耗

永磁电机中,由于电机齿槽的存在、定子磁势的非正弦分布及定子绕组相电流高次谐波等各种因素的影响,会在气隙磁场中产生空间和时间谐波分量。这些谐波成分会在转子永磁体产生涡流损耗,其表达式为

$$P_{pm} = \int_V \sigma E^2 dV = \int_V J^2 / \sigma dV \quad (5)$$

式中: $V$ ——涡流损耗空间积分区域;

$\sigma$ ——永磁体材料的电导率;

$E$ ——电场强度;

$J$ ——涡流密度。

该部分损耗通过有限元计算结合试验分离获取。

### 1.2.4 轴承损耗

永磁电机轴承因摩擦会产生轴承损耗,其表达式为

$$P_b = 0.105M_R n \quad (6)$$

式中:  $M_R$ ——轴承的总摩擦力矩;

$n$ ——电机转速。

轴承的总摩擦力矩通常分为4个部分:

$$M_R = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (7)$$

式中:  $M_{rr}$ ——滚动摩擦力矩;

$M_{sl}$ ——滑动摩擦力矩;

$M_{seal}$ ——密封件的摩擦力矩;

$M_{drag}$ ——由于拖曳损失、涡流和飞溅等导致的摩擦力矩。

该部分的损耗可以直接通过计算得出。

## 2 热阻参数识别和永磁体温度在线识别

### 2.1 PSO

PSO 首先在给定的解空间中随机初始化粒子群,待优化问题的变量数决定了解空间的维数。每个粒子有了初始位置与初始速度。然后通过迭代寻优。在每一次迭代中,每个粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己在解空间中的空间位置与飞翔速度。第一个极值就是单个粒子本身在迭代过程中找到的最优解粒子。这个粒子叫做个体极值。另一个极值是种群所有粒子在迭代过程中所找到的最优解粒子。这个粒子是全局极值<sup>[16]</sup>。

由  $N$  个粒子组成的群体对  $m$  维空间进行搜索,每个粒子的表达式为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ , 每个粒子对应的速度表示为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ , 每个粒子在搜索时要考虑两个因素,即自己搜索到的历史最优值  $p_i$  和全部粒子搜索到的最优值  $p_g$ , 其中  $p_i$  和  $p_g$  可以表示为

$$p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}) \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gm}) \quad (9)$$

粒子速度和位置更新公式可表示为<sup>[17]</sup>

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 z_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) +$$

$$c_2 z_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + r v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, m; c_1$  为粒子跟踪自己历史最优值的权重系数,  $c_2$  为粒子跟踪群体最优值的权重系数, 统称为“加速因子”, 分别用于调节粒子飞向个体最优值和全局最优值的步长(本文中的  $c_1$  和  $c_2$  均设为 2);  $z_1, z_2$  为  $[0, 1]$  区间内服从均匀分布的随机数;  $r$  为速度约束因子, 通常情况下设为 1;  $\omega$  为惯性权重系数。

### 2.2 基于 PSO 的热阻参数识别

参数识别可以作为系统响应于一个已知输入来获得模型未知参数的优化问题。为了识别参数的准确性,在输入激励信号与实际激励信号一致时,确认模型响应与系统响应相似,基本思想是基于一个被最小化且定义系统响应与模型响应相似的价值函数,来比较系统响应与参数化模型响应。为了对所建热模型热阻进行参数识别,首先需根据该模型相关的热交换过程建立其状态方程,表达式如下:

$$T' = AT + Bu \quad (12)$$

$$T' = \left[ \frac{dT_{FE}}{dt} \quad \frac{dT_W}{dt} \quad \frac{dT_{WE}}{dt} \quad \frac{dT_{PM}}{dt} \quad \frac{dT_B}{dt} \right]^T \quad (13)$$

$$T = [T_{FE} \quad T_W \quad T_{WE} \quad T_{PM} \quad T_B]^T \quad (14)$$

$$u = [i_{s-fe} \quad i_{s-w} \quad i_{s-we} \quad i_{s-pm} \quad i_{s-b} \quad T_C \quad T_E]^T \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{fe}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R'_{fe} C_{fe}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{we}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{pm}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & 0 & \frac{1}{R'_e C_b} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $C_{fe}, C_w, C_{we}, C_{pm}, C_b$ ——系统定值热容;

$T_{FE}, T_W, T_{WE}, T_{PM}, T_B$ ——系统的 5 个温度节点,即热网络模型的输出量;

$i_{s-fe}$ ——定子铁心损耗;

$i_{s-w}$ ——定子槽内绕组损耗;  
 $i_{s-we}$ ——定子端部绕组损耗;  
 $i_{s-pm}$ ——转子永磁体涡流损耗;  
 $i_{s-b}$ ——轴承损耗;

$T_c$ ——电机冷却水道进水口温度;  
 $T_E$ ——电机所处环境的温度。  
 以上均为热网络模型的输入量。

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R'_{fe}} + \frac{1}{R'_{gap}}\right) \frac{1}{C_{fe}} & \frac{1}{R'_w C_{fe}} & 0 & \frac{1}{R'_{gap} C_{fe}} & 0 \\ \frac{1}{R'_w C_w} & -\left(\frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R'_{we}}\right) \frac{1}{C_w} & \frac{1}{R'_{we} C_w} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R'_{we} C_{we}} & -\frac{1}{R'_{we} C_{we}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R'_{gap} C_{pm}} & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{R'_{gap}} + \frac{1}{R'_b}\right) \frac{1}{C_{pm}} & \frac{1}{C_{pm} R'_b} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R'_b C_b} & -\left(\frac{1}{R'_b} + \frac{1}{R'_e}\right) \frac{1}{C_b} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $R'_w$ 、 $R'_{fe}$ 、 $R'_{gap}$ 、 $R'_{we}$ 、 $R'_b$ 、 $R'_e$ ——系统待识别参数。

为了实现 PSO 对待识别参数的识别,当模型电机热网络系统的输入和输出为已知量时,提出了粒子群适应度函数,其表达式为

$$f(p) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\omega_1 \|T_{w0}(i) - T'_{w0}(i)\| + \omega_2 \|T_{pm0}(i) - T'_{pm0}(i)\|] \quad (18)$$

式中： $M$ ——目标函数运行的次数;

$\omega_1$ 、 $\omega_2$ ——加权系数,  $0 < \omega_1, \omega_2 < 1$ , 且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 由于每个目标函数具有同等的重要性,因此此处的  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ ;

$T'_{w0}(i)$ 、 $T'_{pm0}(i)$ ——实际测量输出值。

基于 PSO 的参数识别流程如图 2 所示。由永磁电机温度试验所得的温度数据作为适应度函数的输入,并利用适应度函数计算得到该粒子的适应度,其中 PSO 算法用于不断更新整个粒子群的速度和位置,通过不断循环直达到最大迭代次数或者适应度函数值变化趋近于零,即停止整个 PSO 的运行,并且最终可得一组热阻输出数据。该组输出数据即可认为是该模型系统的真实初始值。

### 2.3 转子永磁体温度在线识别

通过试验数据以及粒子滤波得到的热阻数据能够基本符合永磁电机的实际热阻。将该热网络单元用于在线永磁体温度预测。

具体的在线温度识别过程如图 3 所示。首先将在线采集到的电机电流  $I_d$ 、 $I_q$  和电机转速  $n$  输

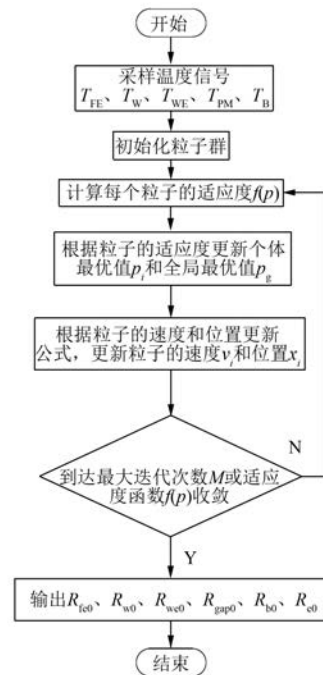


图 2 线下 PSO 热阻参数识别流程示意图

入损耗模型得出各种损耗,输入电机热网络模型,由获得的热阻值及水冷系统温充和环境温度可以预测各节点在线温度,包括关键的永磁体温度。

## 3 试验和仿真结果分析

### 3.1 原模型电机温升试验

为了验证热网络中热阻参数识别的准确性,对 1 台额定功率为 45 kW 的永磁同步电机进行了

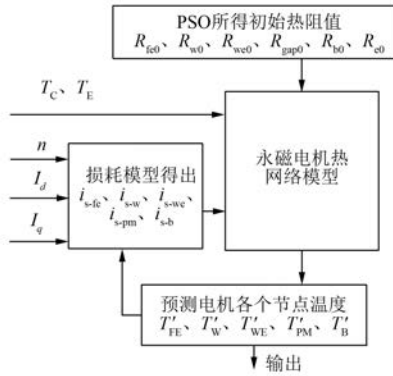


图3 转子永磁体温度在线预测示意图

温升试验。受永磁电机结构及试验条件限制,本次温升试验仅对电机转子永磁体和定子线圈进行了热电偶埋置。温升试验平台如图4所示。

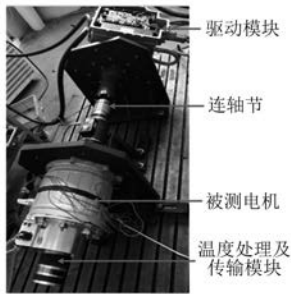


图4 模型电机温升试验平台

### 3.2 热阻参数识别

为了对热网络中的热阻进行参数识别,首先需要设定的 PSO 参数有:群体规模、最大迭代次数、加速度因子和惯性系数。其次需给定系统输入输出数据以及热容值,其中系统的输入数据为电机各部分的损耗值,输出数据由电机温升试验得到,定值热容的数值如表1所示。

热容	参数值	J/K
$C_{fe}$	8 299	
$C_w$	2 670	
$C_{we}$	1 039	
$C_{pm}$	188	
$C_b$	7 243	

为了首先得到一组热阻初始值参数,选择四组输入输出数据一起输入到 PSO 中进行参数识

别。四组数据分别来自模型电机的不同工况和不同转速,分别为 45 kW 和 3 500 r/min、45 kW 和 4 500 r/min、68 kW 和 3 500 r/min 以及 75 kW 和 4 500 r/min。四组输入数据为电机相应部分的损耗值,具体数值如表2所示。

表2 模型电机不同工况及转速下的损耗值

工况/ kW	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	$P_{fe}/$ W	$P_w/$ W	$P_{we}/$ W	$P_{pm}/$ W	$P_b/$ W
45	3 500	595.1	960.7	377.3	24.8	30.8
45	4 500	737.5	492.7	193.6	14.6	39.6
68	3 500	694.2	2 040.7	801.7	77.4	25.6
75	4 500	904.9	1 415.2	556.0	58.1	37.8

PSO 最大迭代次数设为 500,粒子群规模设为 100。图5所示为目标函数的迭代收敛曲线。图6所示为利用 PSO 对热网络热阻参数识别时各个热阻的迭代收敛曲线。由于曲线图 Y 轴采用线性坐标时无法清晰分辨各个热阻所对应的收敛曲线,因此采用对数坐标。从图6可以看出热阻具有良好的收敛性。各个热阻的具体数值如表3所示。

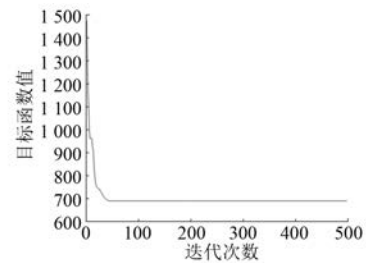


图5 目标函数迭代收敛曲线

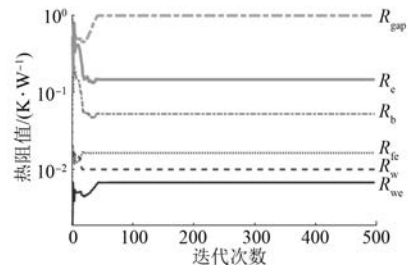


图6 热阻参数迭代收敛曲线

### 3.3 温度识别结果验证

为了验证该方法识别所得转子永磁体温度的准确性及精度,将所得热阻代入温度模型,然后对

表 3 热阻参数识别初始值 K/W

热阻	参数值
$R_{fe0}$	0.016 3
$R_{w0}$	0.010 0
$R_{gap0}$	1.000 0
$R_{we0}$	0.006 7
$R_{l0}$	0.052 0
$R_{e0}$	0.146 1

比温度模型仿真结果与电机温升试验结果。图 7 所示为相同转速不同工况下的转子永磁体仿真温度与试验温度对比。图 8 所示为 45 kW 下不同转速时转子永磁体仿真温度与试验温度对比。可见,转速相同工况不同以及同种工况不同转速两种情况,仿真温度结果和试验温度结果具有良好的一致性,最大误差不超过 2 K,由此证明了该方法用于永磁电机进行温度识别的可行性和精度。

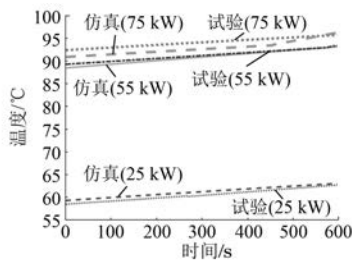


图 7 4 500 r/min 仿真结果与试验结果对比

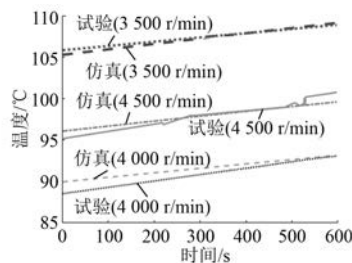


图 8 45 kW 仿真结果与试验结果对比

## 4 结 语

本文利用等效热网络法建立了模型电机的热网络模型,通过 PSO 对热网络中的热阻进行了参数识别,利用该热网络模型实现了电机转子永磁体的在线温度识别。通过对比电机不同工况和不同转速下转子永磁体的热网络仿真温度数据与电机温升试验数据,验证了该方法用于转子永磁体

温度识别的准确性。

## 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 刘朋鹏,张琪,何彪,等.永磁同步电机永磁体分块对涡流损耗的影响分析[J].电机与控制应用,2018,45(6): 56.
- [ 2 ] YAMAZAKI K, FUKUOKA T, KAN A, et al. Investigation of locked rotor test for estimation of magnet PWM carrier eddy current loss in synchronous machines[J].IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(11): 3327.
- [ 3 ] 魏雪环,兰志勇,谢先铭,等.永磁体涡流损耗与永磁同步电机温度场研究[J].电机与控制应用,2015,42(5): 23.
- [ 4 ] KOO M M, CHOI J Y, HONG K Y, et al. Comparative analysis of eddy-current loss in permanent magnet synchronous machine considering PM shape and skew effect using 3-D FEA[J].IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(11): 6301104.
- [ 5 ] 路玲,王淑旺.永磁同步电机全域温度场分析与水道优化设计[J].电机与控制应用,2018,45(5): 52.
- [ 6 ] 胡田,唐任远,李岩,等.永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J].电工技术学报,2013,28(3): 122.
- [ 7 ] GANCHEV M, KRAL C, WOLBANK T. Sensorless rotor temperature estimation of permanent magnet synchronous motor under load conditions [ C ] // IECON,2012: 1999.
- [ 8 ] REIGOSA D D, BRIZ F, GARCÍA P, et al. Magnet temperature estimation in surface PM machines using high-frequency signal injection [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(4): 1468.
- [ 9 ] 陈礼洋,赵文祥,吉敬华.基于等效热网络法的容错永磁电机的温度分析和计算[J].电机与控制应用,2016,43(3): 45.
- [ 10 ] 张建忠,姜永将.基于等效热网络法的定频双转子永磁风力发电机的热分析[J].电工技术学报,2015,30(2): 87.
- [ 11 ] KRAL C, HAUMER A, LEE S B. A practical thermal model for the estimation of permanent magnet and stator winding temperatures[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(1): 455.
- [ 12 ] CAI X H, CHENG M, ZHU S, et al. Thermal modeling of flux-switching permanent-magnet machines considering anisotropic conductivity and thermal contact

- resistance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3355.
- [13] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D, et al. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 871.
- [14] LEE B H, KIM K S, JUNG J W, et al. Temperature estimation of IPMSM using thermal equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 2949.
- [15] 韩雪岩, 张华伟, 贾建国, 等. 基于等效热网络法的轴向磁通永磁电机热分析[J]. 微电机, 2016, 49(4): 6.
- [16] 刘朝华, 李小花, 周少武, 等. 面向永磁同步电机参数辨识的免疫完全学习型粒子群算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 118.
- [17] 曹薇, 罗业才. 基于改进粒子群算法的横动伺服控制系统辨识[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 41.

收稿日期: 2018-10-30

(上接第 75 页)

- [3] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 宫晓, 徐衍亮. 轴向磁场盘式永磁电机等效磁路网络及气隙漏磁的分析计算[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(10): 59.
- [5] 夏加宽, 李文瑞, 何新, 等. 各向异性横向磁通永磁直线电机穿片漏磁分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 518.
- [6] LIU G, DING L, ZHAO W, et al. Nonlinear equivalent magnetic network of a linear permanent magnet vernier machine with end effect consideration [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 54(1): 8100209.
- [7] LI W, CHAU K T, LIU C, et al. Analysis of tooth-tip flux leakage in surface-mounted permanent magnet linear vernier machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3949.
- [8] 杜恂, 程明, 邹国棠. 初级永磁型游标直线电机设计与静态特性分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 22.
- [9] 王蕾, 李光友, 张强. 磁通反向电机的变网络等效磁路模型[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 18.
- [10] 徐衍亮, 吴巧变, 宫晓. 新型盘式横向磁通永磁无刷电机的变网络等效磁路模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 147.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 89 页)

- [6] PELLE J, HARMAND S. Heat transfer measurement in an opened rotor-stator system air-gap [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(3): 165.
- [7] ELGHANAM R I. Experimental and numerical investigation of heat transfer from a heated horizontal cylinder rotating in still air around its axis [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2014, 5(1): 177.
- [8] 张斌. 电动汽车永磁同步驱动电机电磁热设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [9] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Analysis of the endwinding cooling effects in TEFC induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(5): 1214.
- [10] ROMANAZZI P, HOWEY D A. Air-gap convection in a switched reluctance machine [C] // 2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015.
- [11] BOUAFIA M, BERTIN Y, SAULNIER J B. Analyse expérimentale des transferts de chaleur en espace annulaire étroit et rainuré avec cylindre intérieur tournant [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(10): 1279.
- [12] JIH E, CHEN K, ABRAHAM T, et al. Thermal management for the HEV liquid-cooled electric machine [C] // Vehicle Thermal Management Systems Conference & Exposition, 2001: 1713.

收稿日期: 2018-10-16