

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.011

永磁轮毂电机的磁热双向耦合方法研究

陈涛, 闫业翠, 马其华, 张璐璐

(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了准确模拟永磁轮毂电机的温度变化对电机运行性能的影响,课题组提出了一种有限元法与热网络法相结合的磁热双向耦合方法,使用有限元法对电磁场进行仿真,用热网络法对温度场进行仿真,并将电磁场与温度场相耦合,反复循环迭代,直至生成稳定的电磁场及温度场。应用磁热双向耦合法对轮毂电机样机进行分析,并与磁热单向耦合仿真结果进行对比。在电机额定工况下测得电机实际温升,仿真结果与实验结果相近,同时双向耦合的误差率低于单向耦合。课题组提出的方法能较为准确地仿真永磁轮毂电机的温度变化。

关键词:轮毂电机;磁热耦合;有限元法;热网络法

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)05-0057-06

Research on Magneto-Thermal Coupled Methodology of In-Wheel Motor

CHEN Tao, YAN Yecui, MA Qihua, ZHANG Lulu

(School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to accurately simulate the effect of temperature change of permanent magnet in-wheel motor on motor performance, a magneto-thermal mutual coupling method combining finite element method and thermal network method was proposed. The electromagnetic field was simulated by the FEM, the temperature field was simulated by the thermal network method. The electromagnetic field was coupled to the temperature field and iterated repeatedly until the stable electromagnetic field and temperature field were generated. This magneto-thermal two-way coupling method was used to analyze the in-wheel motor prototype and compared with the magneto-thermal one-way coupling simulation results. Under the rated condition of the motor, the actual temperature rise of the motor was measured, the simulation results show similarity to the experimental results. At the same time, two-way coupling error rate is lower than the one-way coupling. The results show that the proposed method can simulate the temperature change of the permanent magnet in-wheel motor accurately.

Keywords: in-wheel motor; magneto-thermal coupling; FEM(finite element method); thermal network method

轮毂电机有着结构简单、控制灵活,其传动系统具有相对简单、高效等优点,故其作为电动汽车的驱动电机有一定优势^[1]。同时永磁轮毂电机的功率密度、转矩密度较高,永磁工作环境恶劣,散热条件不佳,易在运转过程中出现高温现象,可能造成磁体发生不可逆退磁,加速绝缘层的老化以及导致机体尺寸变化等,从而降低永磁轮毂电机的工作效率以及可靠性,影响电机的安全。因此对轮毂电机温升进行精确仿真尤为重要。

永磁轮毂电机的绕组、定子和永磁体等产生的损耗是导致电机发热的主要原因,这些部件既是热源也是传热体,同时温度改变也会影响材料的物理性质,导致损耗的改变。所以单纯地分析电机的电磁场或温度场难以反映轮毂电机实际的工作情况,需要将两者进行耦合分析。

目前电磁场和温度场的耦合方式以单向耦合为主同时也有一些双向耦合的尝试。文献[2]采用了磁热单向耦合对高速永磁无刷直流电机进行仿真,电磁场

收稿日期:2018-05-23;修回日期:2018-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51705306)。

第一作者简介:陈涛(1995),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为轮毂电机设计。E-mail:bychentao@foxmail.com

与温度场分开采用有限元进行计算,将电磁场得到的损耗结果代入到温度场计算,该耦合方式相对简单快速,但是没有考虑到温度场对电磁场的影响;文献[3]提出了一种基于单向耦合的顺序磁热耦合方法,建立了二维有限元模型进行电磁场损耗分析,建立了温度场数学模型对温度场进行仿真,但也忽略了温度场对电磁场的影响;文献[4]采用双向耦合方法对轮毂电机进行了分析,利用三维有限元软件计算电磁场和温度场,再反向计算磁场,循环迭代,直至达到设定的迭代总次数,该方法考虑了电机实际的磁热耦合情况,但三维有限元方法耗时过久,占用计算资源过多。

电磁场和温度场各自的仿真方法影响整个耦合流程实施的可行性以及结果的准确性。目前电机的电磁场计算通常采用有限元法,而对温度场的计算方法目前主要有简化公式法、热网络法以及有限元法^[5],其中公式法由于准确度差使用的较少。文献[6]和文献[7]分别使用热网络法以及有限元法对电机温度场进行了计算,并结合实验对这2种仿真方法的结果进行了比较,结果显示2种仿真方法的精度都较高,且热网络法计算速度较快。综上所述,热网络法与有限元方法计算温度场都比较可靠,而热网络法在计算速度上具有一定优势。

课题组提出了一种有限元法与热网络法相结合的磁热双向耦合方法:电磁场采用有限元方法,温度场采用热网络法。课题组针对电磁场与温度场之间的相互关系,采用双向耦合的方式进行计算。考虑到了电机实际工作时的物理场耦合情况,该方法计算速度相对较快,占用计算机资源较少。最后对样机进行仿真,将单向耦合与双向耦合仿真结果进行对比,通过对电机进行实验分析,验证了双向耦合仿真的优越性。

1 磁热双向耦合分析方法

磁热双向耦合分析方法的流程如图1所示。首先,建立永磁轮毂电机的二维模型,利用有限元仿真计算电机的损耗。计算永磁轮毂电机的传导热阻以及与空气之间的对流热阻,建立电机的热网络模型,将电机损耗代入热网络模型。计算模型中各节点的温度,将所得到的温度施加到对应的电机部件。由于温度对电机永磁体的影响从而导致磁场的改变,进而引起损耗的变化,将新的损耗再次加载到温度场计算中,如此反复迭代,当部件的温度变化小于1%时,视为结果收敛,得到整个永磁电机的温度分布。

1.1 电磁场仿真与损耗计算

电机在运行过程中会产生4个方面的损耗,分别

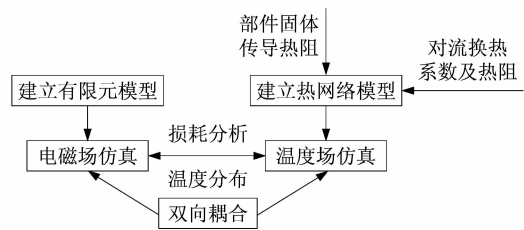


图1 磁热双向耦合分析流程图

Figure 1 Magnetic thermal mutual coupling analysis flow chart

是定子铁耗、绕组铜耗、永磁体涡流损耗以及机械损耗,而这些损耗通过能量转换以发热的形式导致电机温度的上升。

绕组铜耗可以依据焦耳定律求得,电机运行时电路总有三相导通,所以铜耗

$$P_{Cu} = 3I^2 R_0 \quad (1)$$

式中: I 为每相电流; R 为绕组电阻; P_{Cu} 为铜耗。

铁损通常分为3个部分进行计算,即磁滞损耗,经典涡流损耗以及异常涡流损耗,即^[8]

$$P_{Fe} = K_h f B^\tau + K_{eddy} f^2 B^2 + K_{exc} f^{\frac{3}{2}} B^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: P_{Fe} 为铁损; K_h , K_{eddy} , K_{exc} 分别为磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗系数; B 为磁通密度; f 为频率; τ 为磁滞损耗系数。

当电机高速旋转时,永磁体内部会产生感应涡流,产生涡流损耗造成永磁体的温度上升,影响磁体性能。永磁体损耗有

$$P_E = \int_V E \cdot J dV = \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV = \int_V \rho J^2 dV \quad (3)$$

式中: P_E 为永磁体损耗; σ 为永磁体电导率; E 为涡流电场强度; J 为涡流密度; ρ 为永磁体电阻率; V 为永磁体的体积。

机械损耗分为轴承摩擦损耗以及转子风阻损耗。由于转子风阻损耗对电机影响较小,可忽略,故摩擦损耗有

$$P_f = P_{f_0} \frac{n}{n_0} \quad (4)$$

式中: P_f 为摩擦损耗; n 为电机转速; n_0 为额定转速; P_{f_0} 为电机在转速 n_0 时的摩擦损耗。

1.2 温度场热网络仿真

热网络法分析过程与电路分析相似,把研究对象分成各个节点,节点之间设有类似于电阻的热阻,各节点之间热量的传递视为电流,温度类比成电压。轮毂电机中主要存在着传导导热和对流散热2种热量传递

方式。其热阻可以分为部件内部的固体传导热阻以及部件与空气间的对流热阻。传导和对流热阻有:

$$R_c = l / (A \cdot k); \quad (5)$$

$$R_v = 1 / (A \cdot h). \quad (6)$$

式中: l 为节点间的距离; A 为接触面积; k 为热传导系数; R_c 为传导热阻; R_v 为对流散热热阻; h 为对流散热系数。

1) 固体传导热阻

电机内的大部分部件都可以类比成圆柱体, 针对类似于空心圆柱体的热阻 R_{jy} 有:

$$R_{jy} = \frac{\ln(D_{jo}/D_{ji})}{2\pi L_j k_{Fe}}. \quad (7)$$

式中: D_{jo} 为空圆柱体外径; D_{ji} 为空圆柱体内径; k_{Fe} 为铁芯导热系数; L_j 为圆柱体部件轴向长度。

定子齿的热阻 R_{th} 采用以下公式:

$$R_{th} = \int_0^y \frac{1}{k_{Fe} Q_s L_u x_d(y)} dy. \quad (8)$$

式中: L_u 为定子齿轴向长度; Q_s 为定子齿数; $x_d(y)$ 为定子齿宽函数; y 为定子齿高。

电机轴内传热只考虑轴向传热, 轴向传热热阻

$$R_{ts} = \frac{L_{sh}}{\pi r_{sh}^2 k_{sh}}. \quad (9)$$

式中: L_{sh} 为 2 个轴承之间的距离; r_{sh} 为电机轴半径; k_{sh} 为轴的导热系数。

2) 对流散热系数

电机中的对流散热热阻主要存在于气隙间, 外壳与外界流体间和绕组端部。气隙间的对流散热系数有^[9]:

$$h_1 = Nu k / l_g. \quad (10)$$

气隙中的对流可分为层流、涡流以及紊流, 对流类型不同努塞尔数 Nu 的计算方法也不同, 对流类型依据 Taylor 数判断:

$$Ta = Re \sqrt{l_g / R_r}; \quad (11)$$

$$Nu = \begin{cases} 2, & Ta < 41, \\ 0.212 Ta^{0.63} Pr^{0.27}, & 41 < Ta < 100, \\ 0.386 Ta^{0.5} Pr^{0.27}, & Ta > 100. \end{cases} \quad (12)$$

式中: $Ta < 41$ 时为层流, $41 < Ta < 100$ 为涡流, $Ta > 100$ 为紊流; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; R_r 为转子半径; k 为空气导热系数, l_g 为气隙长度。

样机采用风冷冷却, 电机外壳与外界流体的对流散热系数 h_2 为:

$$h_2 = Nu k'_1 / L. \quad (13)$$

其中: $Nu = a (Gr Pr)^b$; (14)

$$Gr = \beta g \Delta T \rho_{air}^2 L^2 / \mu_{air}^2. \quad (15)$$

式中: k'_1 为空气导热系数; L 为电机外壳长度; ρ_{air} 为空气密度; μ_{air} 为空气动力黏度; ΔT 为电机与外界的温度差; β 为空气膨胀系数; a, b 是常量。

电机端部的散热系数:

$$h_3 = k_1 (1 + k_2 V^{k_3}). \quad (16)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为测试得到的电机对流传热常量。

3) 热网络分析模型

利用热网络法对永磁电机计算时, 为方便计算, 需要对模型做一些假设:

① 永磁电机的温度分布沿圆周方向对称, 同时沿圆周方向的冷却条件相同;

② 不考虑绕组的趋肤效应;

③ 假设气隙及内部空气温度相同;

④ 忽略辐射散热的影响。

热网络的构造类似于电网络的形式, 将电机的各部分转化为热阻与节点, 并代入损耗进行计算。图 2 所示为整个电机的热网络。其中轴的部分共有 5 个节点; 2 个端部绕组节点, 转子叠片部分的 1 个节点, 永磁体部分的 2 个节点。绕组部分共有 5 个节点, 定子叠片部分共有 3 个节点, 机壳部分有 5 个节点, 轴承部分有 2 个节点, 端盖部分有 2 个节点。

根据计算到的永磁轮毂电机各部分热阻以及损耗, 根据热网络模型建立热平衡方程:

$$GT = W. \quad (17)$$

式中: G 为热导矩阵; T 为节点温度矩阵; W 为节点损耗矩阵。

1.3 温升对电机损耗的影响

电机材料随温度的升高其物理性质也会改变。绕组铜线的电阻值影响着绕组的铜耗, 铜线的电阻值有:

$$R = \rho L_c / A_c. \quad (18)$$

其中: $\rho = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$; (19)

式中: ρ 为铜的电阻率; ρ_{20} 为铜在 20 °C 时的电阻率, 取 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$; α 为铜电阻的温度系数, 取 $0.00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; L_c 为铜线的长度; A_c 为铜线的截面积。

对于规格尺寸确定的绕组铜线, 其电阻值由电阻率决定, 电阻率在一定温度下随着温度的增大而增大。铜在 100 °C 时电阻率比 20 °C 时提高 31.44%, 可见温度对绕组电阻影响较大。由公式(1)可得电阻上升导致铜损上升。

随着温度的上升, 永磁体的剩磁也会随之减小, 电机铁芯的磁通密度也会相应地降低。永磁体剩磁

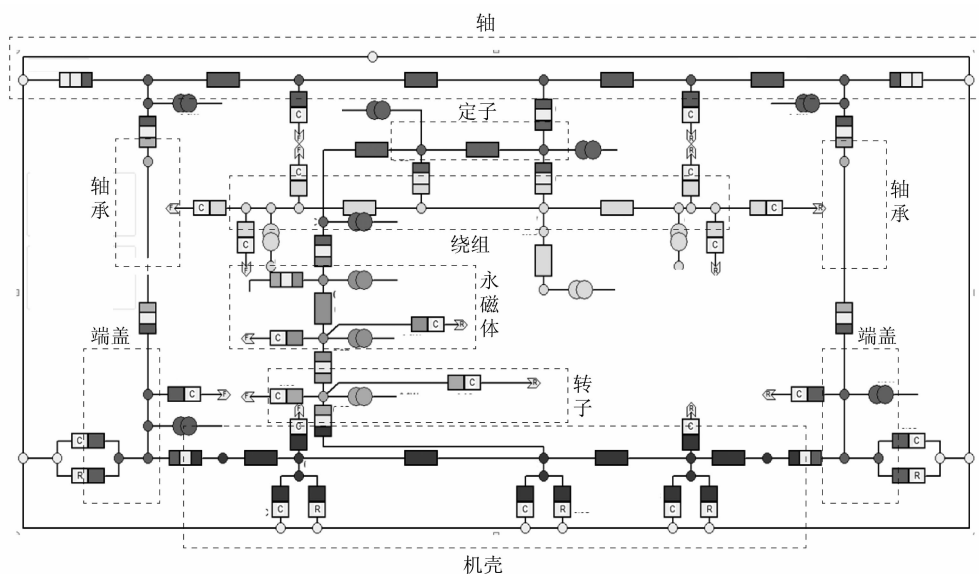


图2 永磁轮毂电机的热网络

Figure 2 Thermal network of in-wheel motor

有^[10-11]:

$$B_r = [1 + (T - 20)\alpha_{B_r}] \left(1 - \frac{I_L}{100}\right) B_{20} \quad (20)$$

式中: α_{B_r} 为磁体的可逆温度系数; I_L 为不可逆损失率; B_{20} 为磁体 20℃时的剩磁密度。

剩磁的下降将会引起铁损以及永磁体涡流损耗的改变。

2 分析实例

为验证磁热双向耦合方法的准确性,对一台轮毂电机样机进行了磁热双向耦合仿真,同时与磁热单向耦合仿真进行比较。

2.1 永磁轮毂电机的参数

轮毂电机样机为永磁无刷直流电机,槽型为梨形槽,主要参数如表1所示。轮毂电机的几何结构与网格划分如图3所示。为更准确仿真气隙处的磁场,对轮毂电机气隙以及齿部槽口附近的网格进行了加密。

表1 样机部分参数

Table 1 Parameters of motor

相数	槽数	极数	定子外径/ mm	定子内径/ mm
3	27	24	298	195
转子外径/ mm	额定转速/ (r · min ⁻¹)	额定电 压/V	额定功 率/kW	气隙/mm
313	550	300	6	1

2.2 样机的电磁场仿真与损耗分布

将样机设定在额定工况下以转速 550 r/min 运行,分别采用磁热双向耦合以及单向耦合的方法对样

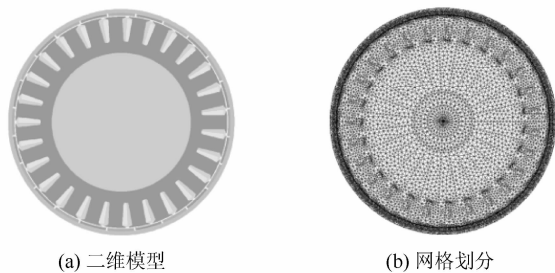


图3 电机二维模型及网格划分

Figure 3 2D model of motor and grid division

机的电磁场进行仿真并计算损耗。2种耦合方法计算所得的永磁轮毂电机各部件的最高磁通密度如表2所示。磁热双向耦合仿真得到的样机的各部件最高磁通密度比单向耦合低,图4所示为样机永磁体分别在2种耦合方式下的磁通密度云图。图中可以看出双向耦合仿真情况下的永磁体整体磁密相对较小,这是因为温升导致了永磁体的磁性能下降,进而导致各部件最高磁通密度的下降。

表2 样机各部件最高磁通密度

Table 2 Maximum magnetic density of each part of the motor

耦合方式	最高磁通密度/T			
	气隙	定子齿部	定子铁心	永磁体
单向耦合	0.839	1.031	0.679	0.844
双向耦合	0.828	1.007	0.662	0.819

由于样机的磁通密度的变化,根据公式(2)可知

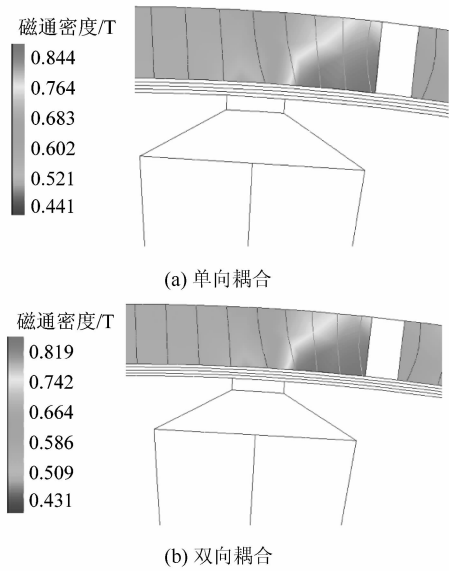


图 4 永磁体磁通密度云图

Figure 4 Permanent magnet magnetic density diagram
随着磁通密度的减小,铁损也会随之降低,同时考虑了温度对导线电阻率的影响,样机的铜损也会上升。而

表 4 样机仿真稳态温度

Table 4 Simulation of steady state temperature of motor								℃
耦合方式	绕组最高 稳态温度	绕组平均 稳态温度	端部绕组平均 稳态温度	永磁体 稳态温度	轴心稳 态温度	转子表面 稳态温度	定子表面 稳态温度	定子轭部 稳态温度
单向耦合	131.480	128.300	128.230	85.132	126.810	85.668	126.590	128.070
双向耦合	143.950	140.240	140.180	90.122	138.100	90.750	137.850	139.550

由于双向耦合的铜损比单向耦合高,双向耦合绕组的稳态温度都高于单向耦合仿真的结果。同时绕组的最高温度也是样机的最高温度,因为铜损是主要的热源,对电机的温度场影响很大,所以铜损上升幅度较大,导致双向耦合温度仿真结果整体较高。

3 试验结果分析

通过实验对比验证 2 种耦合方法的准确性。实验装置如图 5 所示,测温系统由永磁轮毂电机、控制器和温度传感器等构成。温度传感器采用热敏电阻,安装在绕组内测量温度。样机在额定工况下稳定运行后,对电机进行测温,间隔时间为 1 h,电机绕组初始温度通过内部的热敏电阻测得为 50.1℃。将仿真模型设定在额定负载情况下,分别使用磁热单向耦合与磁热双向耦合方法进行仿真,设定时长为 1 h,设定初始温度为 50.1℃,将仿真与实验结果进行对比。表 5 所示为仿真与试验温升的对比,2 种耦合方式计算值与电机实际实验值相差不大,误差在合理范围内,且双向耦合的误差率更低,结果更加精确。

永磁体的涡流损耗与定子齿气隙磁导变化、磁动势谐波以及电机各项参数等因素相关,情况较为复杂,所以永磁体涡流损耗主要利用有限元方法计算求得。2 种耦合方式下,样机的各项损耗如表 3 所示。根据仿真结果,铜损有较大的提升,铁损小幅下降,而磁损变化不大,符合之前的分析。2 种耦合方式求得损耗的不同会导致温度场计算结果的不同。

表 3 样机各项损耗

Table 3 Loss of the motor				
耦合方式	损耗/W			总损耗/W
	铜损	铁损	磁损	
单向耦合	101.90	71.58	15.74	192.20
双向耦合	133.70	68.29	15.95	220.90

2.3 样机温度场计算及对比

利用热网络模型,对样机温度场分别进行单向耦合和双向耦合仿真。双向耦合经过 4 次迭代后,前后温度的变化率为 0.365%。在 2 种耦合方式下,样机各部件的最终稳态温度如表 4 所示。

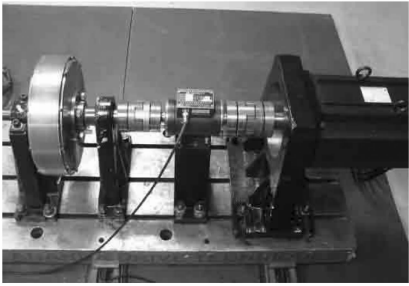


图 5 试验装置

Figure 5 Test device

表 5 计算值与实验值对比

Table 5 Comparison of calculated value and experimental value		
类别	绕组温度/℃	误差率/%
单向耦合	85.3	8.18
双向耦合	86.7	6.67
实验值	92.9	

4 结语

课题组对永磁轮毂电机磁热双向耦合方法进行了研究,并提出一种磁热双向耦合方法。整个耦合过程结合了电磁场有限元仿真以及温度场热网络分析,考虑了永磁轮毂电机磁场温度场相互耦合的实际情况,并与磁热单向耦合仿真结果以及实验测量数据进行对比分析。验证了磁热双向耦合方法的正确性,同时由于采用了热网络法进行温度场仿真,节省了时间,简化了仿真步骤,为电机前期的设计提供了便利,为永磁轮毂电机的结构优化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 褚文强,辜承林. 电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J]. 电机与控制应用,2007,34(4):1-5.
- [2] 陈小军. 高速永磁无刷直流电机磁热耦合分析与效率优化研究[D]. 广州:广东工业大学,2013:52.
- [3] 陈齐平,舒红宇,庄深,等. 微型电动车轮毂电机的磁热耦合分析[J]. 汽车工程,2013,35(7):593-598.
- [4] 张勇. 永磁同步轮毂电机损耗与磁热耦合仿真分析[D]. 西安:长安大学,2017:41.
- [5] 王晓远,高鹏. 等效热网络法和有限元法在轮毂电机温度场计算中的应用[J]. 电工技术学报,2016,31(16):26-33.
- [6] TASSI A, ZANOCCHI G, STATON D. FEM and lumped circuit thermal analysis of external rotor motor [C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris:IEEE,2006:4825-4828.
- [7] CHIN Y K, STATON D A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor [C]//2004 IEEE Africon: 7th Africon Conference in Africa, Gaborone, Botswana:IEEE,2004:1027-1035.
- [8] 孔晓光,王凤翔,邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J]. 电工技术学报,2012,27(9):166-173.
- [9] 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):6-10.
- [10] 孙墨续. 永磁同步电机高温环境下性能及温升特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017:14.
- [11] 宋腾飞,刘慧娟,张千,等. 永磁无刷单相电机场路耦合有限元仿真与实验研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1392-1397.

(上接第56页)

4 结语

笔者提出了一种普适性较强的织物组织识别方案,该方案利用织物水平竖直方向均由组织循环构成,而且相邻纬线间的织物组织循环水平方向存在一定距离的特性,将织物图进行平移错位相减并计算亮度累加值,计算出织物组织的纬纱数、经纱数和飞数,从而得到图像的织组织图。实验表明所提出的方法具有较强的鲁棒性,对多种织物组织均能进行有效识别。但本算法要求输入的图像尺寸较大,而且对输入图像的分辨率有一定要求。

参考文献:

- [1] 张瑞,辛斌杰. 基于图像处理技术的织物组织识别研究现状[J]. 棉纺织技术,2015,43(11):80.
- [2] 吴海虹,张明敏,潘志庚,等. 彩色图像的织物组织自动识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005(8):1710-1716.
- [3] 梅军,张森林,樊臻. 基于 Tamura 纹理特征的织物组织识别算法[J]. 轻工机械,2017,35(4):52-55.
- [4] 梅军. 基于数字图像处理的织物组织识别算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [5] 潘如如,高卫东,刘基宏,等. 机织物组织自动识别技术[J]. 纺织学报,2010,31(6):43-47.
- [6] GUANG C C, LIU S C, YU W H. Woven fabric analysis by image processing: part I identification of weave patterns [J]. Textile research journal,2000,70(6):481-485.
- [7] 黄丽,李晓明. 基于 ORB 特征的图像误匹配剔除方法研究[J]. 机电工程,2017,34(5):552-556.
- [8] 唐旭晟,杨思材,陈丹. 基于 Gabor 滤波器对织造前帘子布疵点检测研究[J]. 机电工程,2017,34(7):802-805.

