

模块化永磁直线游标电机等效磁网络及漏磁分析

陈 瑶, 陈洪伟

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 在模块化永磁直线游标电机的初始设计及优化设计中, 使用有限元方法(FEM)计算漏磁系数时需要耗费大量的建模和计算时间。针对这一问题, 建立该种电机的等效磁网络模型, 在建模期间, 考虑气隙中的边缘效应, 并计算永磁体组与定子齿在不同相对位置时的等效磁导, 得到该种电机在一个周期内不同相对位置时的漏磁磁导和漏磁系数的数学解析表达式。采用 FEM 验证了该数学解析表达式的准确性。研究结果为模块化永磁直线游标电机的设计提供了理论依据。

关键词: 模块化永磁直线游标电机; 漏磁系数; 等效磁网络; 有限元分析

中图分类号: TM 359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0071-05

Equivalent Magnetic Network and Flux Leakage Analysis of Modular Linear Permanent Magnet Vernier Machine

CHEN Yao, CHEN Hongwei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To avoid the huge time consumption in the initial and optimum design of modular linear permanent magnet vernier machine when finite element method (FEM) was used to calculate the flux leakage coefficient, the equivalent magnetic network model was established for the machine. During the modeling, the fringing effect in the air-gap was taken into consideration, the equivalent permeances of the permanent magnet group and the stator teeth at different relative positions were calculated, and the mathematical analytical expressions of magnetic permeability and flux leakage coefficient of the machine at different relative positions in one cycle were obtained. Finally, the FEM method was used to verify the correctness and accuracy of the mathematical analytical expressions. The research results provided a theoretical basis for the design of modular linear permanent magnet vernier machines.

Key words: modular linear permanent magnet vernier machine; flux leakage coefficient; equivalent magnetic network; finite element method (FEM)

0 引 言

直线电机是一种不需要中间转换机构而直接将电功率转化为直线运动机械功率的机电装置。相比于传统的旋转电机加滚珠丝杠等运动转换机构实现直线运动的方案而言, 直线电机不仅可以降低成本、减小系统体积, 还具有效率高、精度高、结构简单等优点^[1]。永磁直线游标电机兼具直线电机和永磁电机的优越性, 具有高推力密度和高效率, 体积小, 重量轻, 又具有经济性等特点, 因此

在轨道交通、无绳电梯、潮汐发电和数控机床等领域均具有优势, 并已得到广泛的应用。模块化永磁直线游标电机将永磁直线游标电机模块化, 提高了电机的容错性以及运行的稳定性。

模块化永磁直线电机的设计与分析可以采用有限元方法(FEM), 但是 FEM 需要较长的建模和计算时间, 不利于电机的初期设计以及优化。在电机设计分析前, 必须先确定该电机的漏磁系数。文献[2-3]采用电磁场方法计算各种电机的漏磁系数, 并将其与电机参数组合成图表形式, 以便查

作者简介: 陈 瑶(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直线永磁游标电机的设计与控制。

陈洪伟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固态配电设计和控制。

用。该查取方式不够方便,且难以满足准确性的要求。求取电机漏磁系数和气隙磁密的另一种方法是等效磁网络法。文献[4]采用该方法计算轴向磁场盘式永磁电机的气隙磁密及漏磁,经过三维电磁场的计算验证,所得漏磁系数的计算表达式具有较高的精确度,可以用于电机的初期设计及优化。文献[5]运用等效磁网络法分析了横向磁通永磁直线电机的漏磁系数,计算结果再次验证了等效磁网络法在电机设计及优化中的可行性。等效磁网络法已被用来分析各种电机的计算模型,但对直线永磁游标电机的研究甚少,尤其是模块化的直线永磁游标电机。本文分析给出模块化直线永磁游标电机的等效磁网络,由此计算出该种电机的漏磁系数,并采用 FEM 法验证了该等效磁网络的精确性及气隙漏磁系数计算的正确性。

1 模块化永磁直线游标电机等效磁网络模型

模块化永磁直线游标电机的结构示意图如图 1 所示。电机由 3 个动子模块和 1 个长定子组成,每两个动子模块之间的间距满足 $(n+1/m)w_{sy}$, $n=0,1,2,3,\dots$,其中, m 为动子模块个数, w_{sy} 为定子齿距。本文中的电机为三相电机,动子模块个数为 3,即 $m=3$,此时,若取 $n=1$,定义一个定子齿距在空间上为 360° 电角度,则电机的 3 个动子单元模块在空间相位上相互差 120° 电角度。电枢绕组绕于动子模块的电枢铁心上,同时,每个动子模块的电枢齿中嵌有 6 组永磁体组,每一组永磁体组均由两个水平充磁的永磁体和一个垂直充磁的永磁体构成。

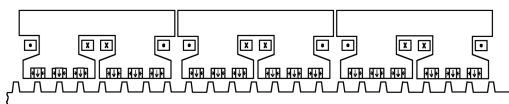


图 1 模块化永磁直线游标电机结构示意图

该电机的永磁磁场路径如图 2 所示。每个动子模块的永磁磁场路径完全一致且动子模块间磁耦合程度低,所以在分析电机等效磁网络模型时,可针对一个动子模块进行研究。图 2 中表示出了永磁体气隙主磁通路径(标注为 1)、永磁体边端漏磁路径(2)、永磁体对定子齿的漏磁路径(3)以及永磁体边缘漏磁路径(4)。图 2 中只示意了左

电枢齿内永磁体的磁场路径,右电枢齿内永磁体组的永磁路径与此类似。

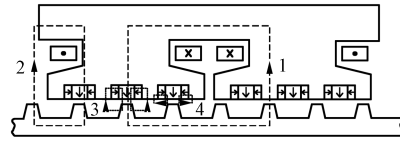


图 2 电机永磁磁场路径示意图

模块化永磁直线游标电机等效磁网络如图 3 所示。图 3 中只示出了动子模块上左电枢齿内的永磁体组构成的等效磁网络模型,右电枢齿内的永磁体组的等效磁网络与上述分析方法一致。图 3 中, G_{PM} 、 G_{PM1} 、 G_{PM2} 分别为垂直充磁的永磁体、水平向右充磁的永磁体以及水平向左充磁的永磁体的磁导, $G_{mm(0-5)}$ 为永磁体边缘漏磁导, $G_{ml(0-5)}$ 为永磁体对定子齿的漏磁磁导, $G_{g(0-3)}$ 为气隙磁导, G_{bd} 为永磁体边端漏磁导, $G_{y(0-1)}$ 、 G_r 、 $G_{i(0-3)}$ 、 $G_{b(0-6)}$ 、 G_x 分别为动子模块的轭部、齿根、极靴梯形部分、极靴矩形部分以及裂齿的磁导。同理,定子结构可以分为定子齿及定子轭部分, $G_{st(0-4)}$ 、 $G_{sy(0-3)}$ 分别为定子齿、定子轭部分的磁导。 G_{rr} 为动子模块右电枢齿内的铁心磁导总和。

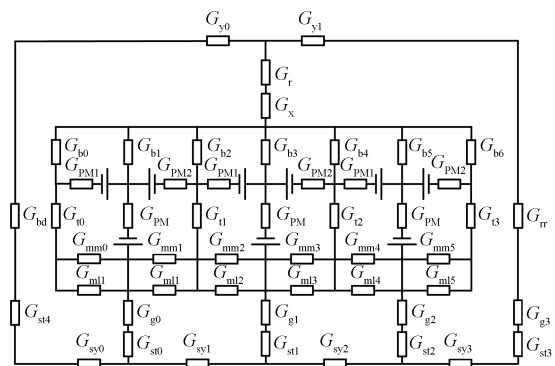


图 3 模块化永磁直线游标电机等效磁网络

图 4、图 5 分别为动子模块电枢齿结构以及定子结构示意图。电枢齿可以分为 5 个部分:动子轭、齿根、极靴、永磁体组以及裂齿。

在模块化永磁直线游标电机中,为了保证电机运行的可靠性,动子模块的轭部和齿根部分一般较厚。为了更好地提高永磁体的利用率,在电机设计时,动子裂齿和定子齿的大小经过优化而不允许饱和,因此,动子模块和定子的铁心部分磁阻较小。为了精简计算模型,节省计算时间,可以

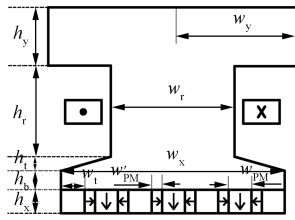


图4 电枢齿结构

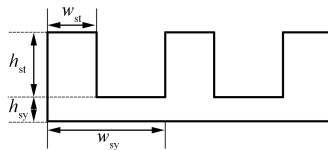


图5 定子结构

将定子和动子模块的铁心磁阻忽略不计。同时，由于磁通具有力图走磁阻最小路径的特点，永磁体的边端漏磁很小，可以忽略不计。图6所示为左电枢齿内单个永磁体组等效磁网络模型。因为每一组永磁体组的等效磁网络模型一致，所以在分析漏磁时针对其中一组进行研究即可。图6中， Φ_m 为永磁体向外磁路提供的总磁通， Φ_g 为气隙主磁通，其中， $G_{g(0-1)}$ 、 $G_{ml(0-1)}$ 、 $G_{mm(0-1)}$ 分别对应图2中1、3、4中的磁导。

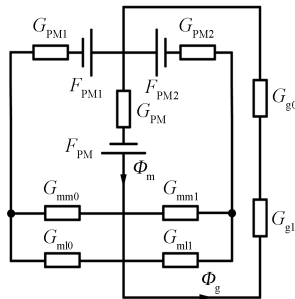


图6 单永磁体组等效磁网络

基于图6的等效磁路网络模型，可以求得模型中气隙主磁通 Φ_g 和永磁体发出的总磁通 Φ_m ：

$$\Phi_g = \frac{A}{B} \left[\frac{G_{PM}(F_{PM} + F_{PM1}) + \frac{F_{PM1}}{B}}{A \cdot G_{PM} + \left(1 + \frac{A}{B} + \frac{A}{C}\right)} \right] - \frac{F_{PM1}}{B} \quad (1)$$

$$\Phi_m = \left(\frac{A}{C} + \frac{A}{B} - 1 \right) \times$$

$$\left[\frac{G_{PM}(F_{PM} + F_{PM1}) + \frac{F_{PM1}}{B}}{A \cdot G_{PM} + \left(1 + \frac{A}{B} + \frac{A}{C}\right)} \right] - \frac{F_{PM1}}{B} \quad (2)$$

其中： $A = \frac{G_{mm0} + G_{PM1}}{G_{mm0}G_{PM1}} - \frac{G_{ml0}}{G_{mm0}(G_{mm0} + G_{ml0})}$ ； $B = \frac{G_{g0} + G_{g1}}{G_{g0}G_{g1}}$ ； $C = \frac{G_{mm1} + G_{PM1}}{G_{mm1}G_{PM1}} - \frac{G_{ml1}}{G_{mm1}(G_{mm1} + G_{ml1})}$ 。

气隙的漏磁系数 σ 为

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_g} \quad (3)$$

2 各部分磁导计算

在模块化永磁直线游标电机运行期间，随着动子模块与定子铁心相对运动，电枢齿内的永磁体组与定子齿的相对位置在不断地变化，磁导的计算模型也随之变化。

如图7所示，分别介绍3种永磁体与定子齿不同相对位置下磁导的计算模型。

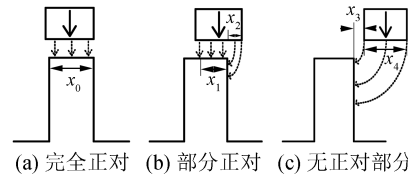


图7 永磁体与定子齿不同相对位置下磁导的计算模型

图7(a)中定子齿与永磁体完全正对，磁导计算公式为

$$G_{eo} = \frac{\mu_0 x_0 L_d}{g} \quad (4)$$

式中： μ_0 ——真空磁导率；

L_d ——电机轴向长度；

g ——动子模块与定子间的距离。

图7(b)中定子齿与永磁体部分正对，磁导计算公式为

$$G_{po} = G_{x1} + G_{x2} = \frac{\mu_0 x_1 L_d}{g} + \mu_0 L_d \int_0^{x_2} \frac{1}{g + \frac{\pi}{2}x} dx = \frac{\mu_0 x_1 L_d}{g} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln\left(1 + \frac{x_2 \pi}{2g}\right) \quad (5)$$

图 7(c) 中定子齿与永磁体无正对部分, 磁导计算公式为

$$G_{no} = \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left(1 + \frac{x_4 \pi}{2g + x_3 \pi} \right) \quad (6)$$

上文介绍了永磁体组与定子齿在不同相对位置下的磁导计算模型。图 8 所示为对上述计算模型的补充, 即当永磁体与定子齿在相对运动的过程中, 永磁体有部分越过两个定子齿间的中线时, 永磁体越过中线的部分产生的磁通几乎不能穿过定子齿 1 构成磁通回路, 而只能穿过定子齿 2 构成磁通回路。

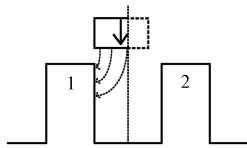


图 8 特殊相对位置磁导计算模型

2.1 永磁体内磁导

由式(1)~式(3)可以看出, 电机的漏磁系数取决于各部分的磁导大小。永磁体自身磁导 G_{PM} 以及磁动势 F_{PM} 可以表示为

$$G_{PM} = \mu_0 \mu_{PM} \frac{w_{PM} l_{PM}}{h_{PM}}$$

$$F_{PM} = \frac{B_r h_{PM}}{\mu_{PM} \mu_0} \quad (7)$$

式中: μ_{PM} ——永磁体的相对磁导率;

h_{PM} 、 w_{PM} 、 l_{PM} ——永磁体的高度、宽度以及轴向长度;

B_r ——永磁体的剩磁。

2.2 边缘漏磁导

由图 2 可以看出, 在动子模块与定子齿相对运动的过程中, 边缘漏磁几乎不受相对位置的影响, 可近似用式(8)表示:

$$G_{mm0} = G_{mm1} \approx 0.26\mu_0 L_d \quad (8)$$

2.3 气隙磁导

随着动子模块与定子齿的相对位置不断变化, 各部分的磁导也不断改变, 因此在对磁导进行求解时需要分类考虑。图 9 所示为左端电枢齿内永磁体组与定子齿的相对位置示意图。图 9(a) 中, 各永磁体组与定子齿正对, 永磁体产生的磁通绝大多数经过气隙到达定子齿并构成主磁通, 此

时, 永磁体的漏磁系数最小; 如图 9(b) 所示, 定子齿与动子上裂齿正对, 永磁体产生的磁通大部分形成边缘漏磁, 因此在该位置永磁体漏磁系数达到最大, 具体如图 10 所示。

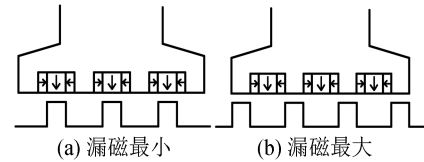


图 9 漏磁最小和最大时的相对位置

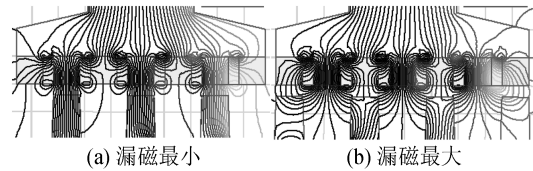


图 10 漏磁最小和最大时的有限元分析

定义图 9(a) 中对应的位置为初始位置, 设定子齿向右运动的距离为 x 。初始位置时 x 的值为零。运动过程中, 在式(4)~式(6)的基础上, 可求得各部分的磁导为

$$G_{g0} = \begin{cases} \frac{\mu_0 L_d (w_{PM} - x)}{g} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi x}{2g} \right], & 0 \leq x \leq 4.5 \text{ mm} \\ \frac{\mu_0 L_d (w_{PM} - x)}{g} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi (w_{PM} - 0.5)}{2g} \right], & 4.5 \text{ mm} \leq x \leq 5 \text{ mm} \\ \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi (w_{PM} - x + 4.5)}{2g + \pi (x - w_{PM})} \right], & 5 \text{ mm} \leq x \leq 7 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

$$G_{g1} = 4G_{g0} \quad (10)$$

2.4 永磁体对定子齿的漏磁导

$$G_{m10} = \begin{cases} G_{g0} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi \left(\frac{w_t - x}{2} \right)}{2g + \pi (w'_{PM} + x)} \right], & 0 \leq x \leq 2.5 \text{ mm} \\ \infty, & 2.5 \text{ mm} \leq x \leq 7 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

$$G_{m11} = \begin{cases} G_{g0} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi \left(\frac{w_l}{2} + x \right)}{2g + \pi (w'_{PM} - x)} \right], & 0 \leq x \leq 2 \text{ mm} \\ G_{g0} + \frac{\mu_0 L_d (x - w'_{PM})}{g} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi \left(\frac{w_l}{2} + w'_{PM} \right)}{2g} \right], & 2 \text{ mm} \leq x \leq 2.5 \text{ mm} \\ G_{g0} + \frac{\mu_0 L_d (x - w'_{PM})}{g} + \frac{2\mu_0 L_d}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi \left(\frac{w_l}{2} + w'_{PM} - x + 2.5 \right)}{2g} \right], & 2.5 \text{ mm} \leq x \leq 7 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

上述为定子模块与定子相对运动时左电枢齿内永磁体组各磁导的计算公式,分类讨论了从漏磁最小时相对位置到漏磁最大时相对位置运动过程中的各种磁导计算情况。将式(7)~式(12)代入式(3)中,即可求得不同相对位置时电机的漏磁系数。右电枢齿内的永磁体组各磁导的计算公式可参照上述模型,分析方法一致。

3 有限元验证

为了验证解析计算结果与有限元仿真结果的一致性,将解析计算值与仿真值进行对比。表1所示为电机各参数值。表2所示为有限元计算结果与解析计算结果的对比。可以看出,解析计算值与有限元仿真值比较吻合,误差相对较小,证明了上述等效磁路网络模型以及漏磁解析式的有效性和正确性。

表1 电机参数 mm

参数名称	参数值
定子裂齿宽度 w_l	5
永磁体厚度 h_{PM}	5
垂直充磁永磁体宽度 w_{PM}	5
定子极距 w_{sy}	14
定子齿上宽 w_{st}	5
定子齿高 h_{st}	8
气隙宽度 g	2
水平充磁永磁体宽度 w'_{PM}	2

表2 解析计算与有限元仿真比较

位移 x/mm	解析计算值	有限元仿真值	误差/%
0	1.476	1.515	2.6
0.8	1.502	1.563	3.9
1.6	1.527	1.578	3.2
2.4	1.563	1.613	3.1
3.5	1.603	1.667	3.8
4.3	1.714	1.786	4.0
5.1	1.787	1.852	3.5
5.9	1.872	1.923	2.7
7.0	1.968	2.015	2.3

图11所示为电机在一个周期内各处相对位置的漏磁系数变化趋势。可以看出,漏磁系数达到最小以及最大时的相对位置与上述分析一致,再次验证了上述理论分析的正确性和等效磁路网络模型的可行性。

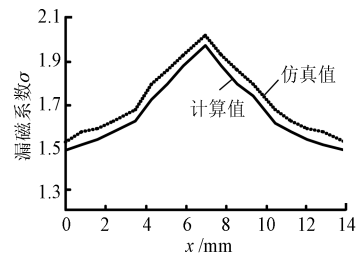


图11 不同相对位置时的漏磁系数

4 结 语

本文结合模块化永磁直线游标电机结构特点分析其磁场分布及漏磁的形成。根据永磁体磁通分布的特点建立了电机的等效磁路模型,给出了各部分漏磁磁导及漏磁系数的解析表达式,采用有限元方法验证了所建立的等效磁路网络模型及漏磁系数计算的正确性,为模块化永磁直线游标电机的设计及优化提供了参考依据。

【参考文献】

[1] 崔霆锐,宗立明,李熙.直线电机地铁车辆牵引系统国产化应用研究[J].电机与控制应用,2018,45(4): 61.
 [2] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2016.

(下转第108页)

- 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] 杜悛, 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