

基于 Halbach 阵列的永磁缓速器结构优化与仿真

何富君,张雨婷,刘凯,王帅
(东北石油大学 机械科学与工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为了进一步减小永磁缓速器的尺寸,提出一款基于 Halbach 阵列的永磁缓速器,永磁铁采用 Halbach 阵列后使缓速器中气隙的磁密强度大,制动力矩增加。建立永磁缓速器优化模型,优化后的径向尺寸明显降低。利用 Maxwell 软件对缓速器进行制动力矩和涡流场的仿真分析,进一步证明了 Halbach 式永磁缓速器优于常规永磁缓速器。将 Maxwell 计算得到的铜耗导入到 ANSYS Workbench 进行磁热耦合联合仿真,结果表明 Halbach 式铜环温度较常规式略有升高,但能保证温度处于合理范围内。

关键词: 永磁缓速器;Halbach 阵列;磁热耦合

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)03-0105-05

Structural Optimization and Simulation of Permanent Magnet Retarder Based on Halbach Array

HE Fujun, ZHANG Yuting, LIU Kai, WANG Shuai

(School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: To further reduce the size of permanent magnet retarder, Halbach array was applied in permanent magnet retarder, by which the magnetic density intensity of air gap in the retarder was enlarged and the braking torque was increased. The optimization model of permanent magnet retarder was established. Maxwell software was used to simulate the braking torque and eddy current field of the retarder, which further proves the superiority of the Halbach permanent magnet retarder over the conventional one. The copper consumption calculated by Maxwell was imported into ANSYS Workbench for magnetic-thermal coupling joint simulation. The results show that the temperature of Halbach copper ring is slightly higher than that of the conventional one, but the temperature can be ensured within a reasonable range.

Keywords: permanent magnet retarder; Halbach array; magnetocaloric coupling

0 引言

永磁缓速器是一种新型缓速装置,非常适用于大中型客货车的缓速应用,相对电磁缓速器具有体积小、质量轻、高效节能等优点^[1-2]。永磁缓速器利用永磁涡流耦合原理把汽车行驶的动能转化为热能,并通过风冷、水冷等方式散发掉,从而实现汽车的制动^[3]。永磁缓速器主体结构剖视图如图 1 所示。

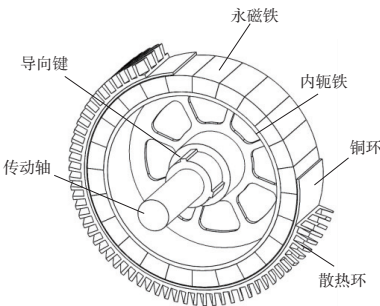


图 1 永磁缓速器局部剖视图

常规永磁缓速器转子鼓中的永磁铁常采用径向充磁方式^[4],如图 2(a)所示。这使转子鼓与外围定子鼓之间气隙内的磁场并非呈理想的波形分布,气隙内磁密较小,进而使制动力矩较小。而 Halbach 阵列是将每块永磁铁的磁极按照一定规律排列组合后,能够把磁能聚集到永磁体单侧^[5],图 2(b)中给出 Halbach 向外聚磁中的一种充磁方式。理想的 Halbach 阵列生成的气隙磁密波形正弦度高、谐波分量小,单侧磁感应强度高,用于缓速器能够提高制动力矩。Halbach 阵列现已应用于永磁电机、永磁齿轮等领域^[6-7],但是在永磁缓速器领域只有少量研究。

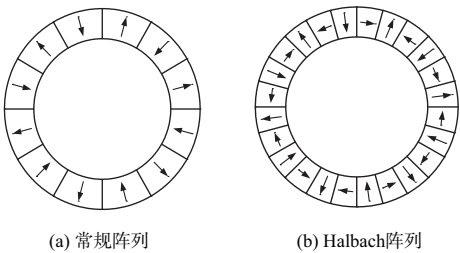


图 2 永磁体磁极排列方式

第一作者简介:何富君(1970—),男,江苏徐州人,博士,研究方向为永磁涡流耦合传动和制动方面理论与应用。

永磁缓速器工作时产生的大量热能会导致缓速器永磁体退磁、制动力矩衰减等问题^[8],然而国内外学者在设计缓速器结构时,常常忽略了温升的影响。因此,本文基于 Halbach 原理设计一种新型永磁缓速结构,开展性能研究及结构优化,并开展了缓速器的热影响研究,以保证缓速器工作于合理的温度区间。

1 Halbach 永磁缓速器结构与工作原理

基于 Halbach 结构的永磁缓速器结构如图 1 所示,主要由永磁铁、内轭铁、铜环、散热环组成。铜环与散热环组成的定子鼓固定在变速器外壳上。转子鼓则由内轭铁与永磁铁组成,跟随变速器轴旋转。新型缓速器中的永磁铁采用 Halbach 结构布置,每块永磁铁尺寸相同,充磁方向如图 2(b) 箭头所示,始终保持永磁体气隙一侧的磁感应强度大于内轭铁一侧。

永磁缓速器的转子鼓可沿导向键轴向滑动,当转子鼓滑动入铜环,两者存在重合区时,大量的磁感线在永磁铁、气隙、铜环中形成闭合回路,如图 3 所示。此时转子鼓带着永磁体旋转,产生旋转的磁场,定子鼓上的铜环产生切割磁场效应,在铜环中产生涡电流,涡电流产生的感生磁场阻碍转子鼓的旋转磁场,从而产生制动效果。缓速器可以通过改变转子鼓进入铜环距离的大小实现永磁缓速器的分级制动。解除制动时,转子鼓只需沿导向键滑出铜环即可。

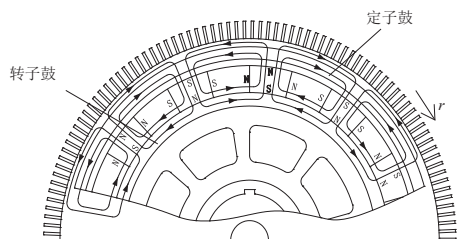


图 3 Halbach 式永磁缓速器局部磁回路

2 Halbach 永磁缓速器结构优化

缓速器的制动特性与磁铁体积、气隙、转子转速等有着密切的联系^[9],而且铜的电导率也随着缓速器温度升高而降低^[10],导致制动力矩随之降低。温度过高还会引起永磁铁的退磁现象。为了综合考虑温度和制动力矩问题,实现更小的缓速器尺寸,对缓速器进行了结构优化研究。

2.1 制动力矩计算

永磁缓速器中的 Halbach 结构相对于常规的永磁缓速器磁路的设计更复杂,在工程应用上常常将三维问题转换成二维问题来简化磁场。永磁缓速器中永磁转子局部磁感线分布如图 4 所示,可以简化为图 5 的二维解析模型,并在图中给出磁感线路径。

在以往的研究中,为简化模型常常忽略气隙中的漏磁 Φ_0 ,计算时会使磁通量 Φ_0 增大,导致后续计算出现误差,因此在采用等效磁路法时引入气隙中漏磁磁阻,忽略其他

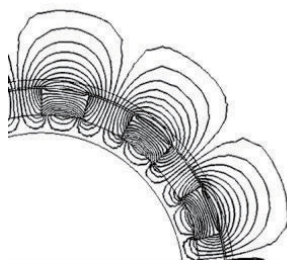


图 4 局部磁感线分布图

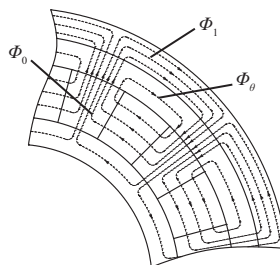


图 5 磁路模型图

漏磁现象不明显的区域,得出的等效磁路图如图 5 所示。其中永磁体可以看作一个恒定磁势 F_m 和一个线性磁阻 R_m 串联组成,其中:

$$F_m = H_c l \quad (1)$$

$$R_m = \oint \frac{dl}{\mu_r \mu_0 S} = \oint \frac{dl}{\mu_0 \mu_r S} \quad (2)$$

式中: H_c 是永磁体矫顽力; l 、 S 分别为永磁体的长度和截面积; μ_r 是永磁体工作状态中的回复系数,为了保证永磁体在高温条件下正常稳定持续工作,回复系数需大于 1.88^[1]。

图 6 给定各回路磁通正方向,根据基尔霍夫第二定律,列出回路方程组(3)如下:

$$\begin{cases} \Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 \\ \Phi_1(R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{air}) - \Phi_2 R_{air} = \\ F_{m1} + F_{m2} + F_{m3} - \Phi_1 R_{air} + \Phi_2(R_{gap1} + R_{gap2} + R_{air} + R_{Cu}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

方程组(3)中的各磁阻可以用公式(4)求出:

$$R_i = \oint \frac{dl_i}{\mu_i S_i} \quad (4)$$

式中: i 分别为 air、gap₁、gap₂、Cu; μ_i 为材料的相对磁导率; l_i 为磁路长度; S_i 为磁路横截面积。

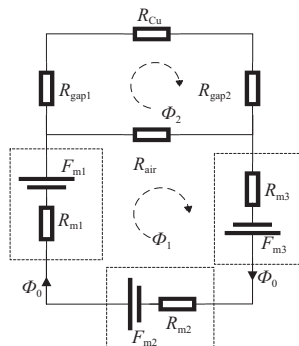


图 6 等效磁路图

永磁缓速器中永磁体形状呈弧形,然而内、外径尺寸相差较小,可近似看作长方体进行计算(图7)。 l_x 、 l_y 分别为永磁体的轴向长度、周向长度, l_z 为永磁体厚度。

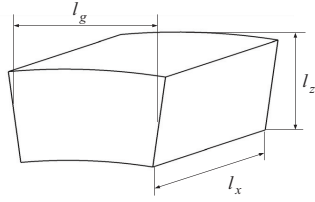


图7 单块永磁体结构

磁铁与铜环之间的间隙通常取值为 1 mm,因此 R_{gap1} 与 R_{gap2} 相等,且磁通穿过永磁体面积 S_m 与间隙横截面积 S_0 基本相等,结合式(1)~式(4)可得

$$B_m = \frac{\Phi_0}{S_m} = \frac{3H_e l_y \mu_0 \mu_r (3 + 7l_y^4)}{(3 + 4l_x^2)(3l_z + 2\mu_0 \mu_r l_y^2) - 2\mu_0 \mu_r l_y^4} \quad (5)$$

定子鼓中的铜环结构如图8(a)所示,将其沿周向以 θ 为角度分割成无数长条, $\lim \theta \rightarrow 0$, 每一条可近似为一个长方体,如图8(b)所示,厚度为 a ,高度为 b ,且 $a \ll b$ 。选取直角坐标系 $Oxyz$,坐标原点位于铜条侧面中心位置,坐标面 yOz 与前端面垂直,其中铜的磁导率为 μ_{Cu} ,电导率为 σ_{Cu} 。

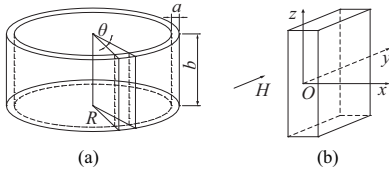


图8 铜环结构

由于铜环较薄,铜条内的感应场强 H 沿 x 轴方向的分量可忽略为 0。设感应磁场强度沿 y 轴方向均匀分布,铜环内的转子鼓旋转时,产生正弦变化的磁场,磁力线沿 y 轴穿出铜条。铜条 xOz 面处的磁场可认为均匀分布,场强为^[11]

$$H = \sqrt{2} H_0 \cos \omega t \cdot e_y \quad (6)$$

且

$$\omega = \frac{2\pi n N_p}{60} \quad (7)$$

式中: ω 是磁场变化的角频率; n 是定子鼓转速; N_p 为磁极对数,为避免磁极对数过多导致单块永磁体尺寸过小,通常选取磁极对数为 6。

铜条中的涡流密度:

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{x}) = \nabla \times \mathbf{H} \quad (8)$$

铜环中涡流损耗 P_e 为:

$$P_e = \int_{V_{\text{Cu}}} \frac{\mathbf{J}_e^2}{\sigma} dV \quad (9)$$

确定结构尺寸时,应选取铜环厚度 a 小于集肤深度

$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_{\text{Cu}} \mu_{\text{Cu}}}}$,当转速为 1000 r/min 时, a 为 3 mm。故铜

环内涡流损耗 P_e 为:

$$P_e = \frac{1}{6} \sigma_{\text{Cu}} (a \omega B_m)^2 V_{\text{Cu}} \quad (10)$$

永磁缓速器制动功率等于涡流损耗功率,通过公式(8)计算出铜环内涡流损耗:

$$T = \frac{P_e}{\omega_n} \quad (11)$$

式中 ω_n 为转子鼓转动角速度,则缓速器制动力矩 T 为:

$$T = \frac{3 \sigma_{\text{Cu}} \omega^2 B_m^2 V_{\text{Cu}}}{2 \omega_n} \quad (12)$$

2.2 铜环温度计算

永磁缓速器定子中的涡流环主要由铜制成,当其切割磁感线并在内侧表面产生涡流时,涡流产生大量的热使涡流环温度在短时间内迅速升高,对铜的电导率有着较大的影响。铜的电导率随温度变化公式为

$$\sigma_{\text{Cu}} = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T_{\text{Cu}} + 273.15)} \quad (13)$$

式中: T_{Cu} 为铜环温度,℃; σ_0 为铜在 0℃ 时的电导率, $\sigma_0 = 60 \text{ MS/m}$; α 为温度变化系数, $\alpha = 3.93 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。

在建立温度学模型时,提出下列合理假设^[10]:

- 1) 缓速器处于稳态运转;
- 2) 铜环的导热系数高,忽略热阻;
- 3) 只考虑通过外表面的对流换热,其中铜环侧面的换热系数为 λ ,端面对流换热系数为 h ;
- 4) 由于气隙中膜层系数和空气导热系数较低,所以假设气隙内无热交换。

根据牛顿冷却定律可得铜环温度计算公式为

$$T_{\text{Cu}} = T_0 + \frac{P_e}{A_1 \lambda + A_2 h} \quad (14)$$

式中: T_0 为室温 20℃; A_1 和 A_2 分别为铜环侧面面积和两个端面面积。

2.3 结构优化

每块永磁体的尺寸大小直接影响了缓速器的制动力矩与转子温度,而且永磁体是缓速器中质量最大的组成构件,因此将单块永磁体的体积作为目标函数 $f(\mathbf{x})$,永磁体的 3 个尺寸 l_x 、 l_y 、 l_z 作为设计变量,则

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [l_x \quad l_y \quad l_z]^T$$

约束条件是铜环温度不超过 250℃;最大制动力矩等于 600 N·m;在转速 1000 r/min 的条件下,满足永磁体最大安装尺寸要求,建立优化方程表达式:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) = V = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \\ \text{s.t.} \quad h(\mathbf{x}) = T - 600 = 0 \\ g_1(\mathbf{x}) = T_{\text{Cu}} - 250 \leq 0 \\ g_2(\mathbf{x}) = x_1 - 100 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{x}) = x_2 - 50 \leq 0 \\ g_4(\mathbf{x}) = -x_3 \leq 0 \end{cases}$$

利用 Matlab 软件进行优化可得 Halbach 式永磁缓速器结构参数如表 1 所示,并与同等制动力矩的常规式永磁缓速器^[10]结构参数进行比较。

表 1 永磁缓速器结构参数 单位:mm

参数	数值	
	Halbach 式	常规式
永磁体轴向长度 l_x	80	60
永磁体周向长度 l_y	30	50
永磁体厚度 l_z	21	8
内轭铁外径 d_1	230	370
铜环内径 d_2	274	410
铜环厚度 a	3	3
缓速器整体外径(不含散热环)	280	416

从表 1 中可以看出,在制动力矩相同的条件下, Halbach 式永磁缓速器整体外径为常规式的 2/3,径向宽度大幅度缩小,而轴向长度与厚度略有增加,总体积约为常规式的 90%。可以看出 Halbach 式永磁缓速器能够实现小型化、轻量化,适合安装在底盘高度空间有限的车辆上。

3 仿真分析

本文通过 Maxwell 软件验证理论计算的准确性,仿真模型的建立和仿真条件的设置参照文献[13]。为方便仿真分析,在保证计算精度的条件下,去掉散热环、转子支撑架。根据表 1 所列参数建立 Halbach 式永磁缓速器模型,另外建立一个同等尺寸的常规式永磁缓速器作为对照组,充磁方向如图 1 所示。永磁缓速器中各部分材料参数如表 2 所示。

表 2 永磁缓速器材料参数

名称	材料	相对磁导率	电导率/(S/mm)
永磁铁	NdFe35	1.099	6.25×10^2
铜环	Copper	0.999	5.8×10^4
内轭铁	Steel_1010	B-H	2.0×10^5
其他	真空	1	0

从制动力矩公式(11)中可以看出,缓速器的制动力矩与定子表面产生的涡流损耗以及转子转速有关。在缓速器尺寸与转速保持不变的情况下,根据公式(10)可知,涡流损耗随着磁感应强度增大而增多,在仿真计算中较难得到铜环中磁感应强度大小,而最能直观测量到的便是气隙磁密的值。气隙磁密值是指永磁缓速器中永磁铁与铜环之间气隙中的磁感应强度值,由于气隙间隔仅为 1 mm,可将气隙磁密值近似等于铜环中磁感应强度值。图 9 为 Halbach 式和常规式永磁缓速器的气隙径向磁密值,其中 Halbach 式气隙磁密最大值可达 0.900 2 T,而常规式仅为 0.498 7 T。

图 10 为两种缓速器随着转子沿轴向滑入铜定子深度的变化而引起的制动力矩变化曲线。从图中可知,制动力矩随着转子与定子重合度的增大,永磁缓速器的制动力矩逐渐增大,直到完全重合时达到最大值,且 Halbach 式永

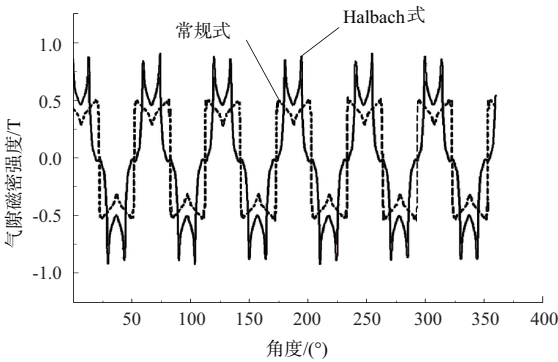


图 9 气隙径向磁密值

磁缓速器制动力矩比常规式多出 115 N·m。

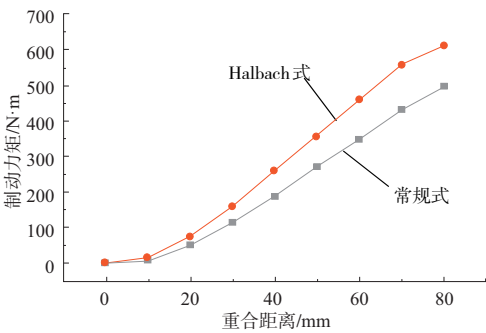


图 10 制动力矩变化曲线

本文采用 Maxwell 和 ANSYS Workbench 联合仿真的方法,将铜定子中的铜耗作为热源,对永磁缓速器中的涡流层进行磁热耦合仿真,分别得到铜耗云图和温度云图,见图 11 和图 12。从图 11 中可以看出 Halbach 式与常规式的最大铜耗都处于涡流中心处和铜环边缘漏磁处,且呈环状向外扩散。Halbach 式铜耗最大值比传统式略低一些,约为 1.9×10^9 W/m²,而仿真得出的涡流密度云图比常规式更密集,平均铜耗值较大。

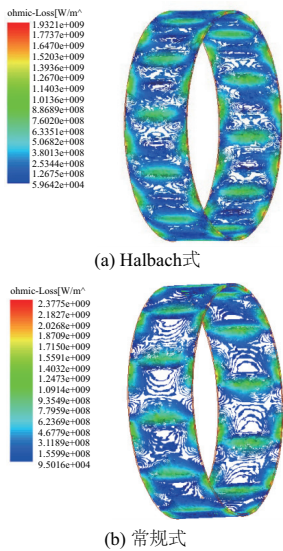


图 11 铜耗云图

图12显示铜耗较高部位的温度较高, Halbach式最高温度可达215℃, 大部分区域温度在172℃左右; Halbach式铜环产生的涡流密度较高, 因此比常规式铜环整体温度稍高一些。在此温度下对铜环的电导率影响较小, 永磁铁也不会产生退磁现象, 整体符合设计要求。

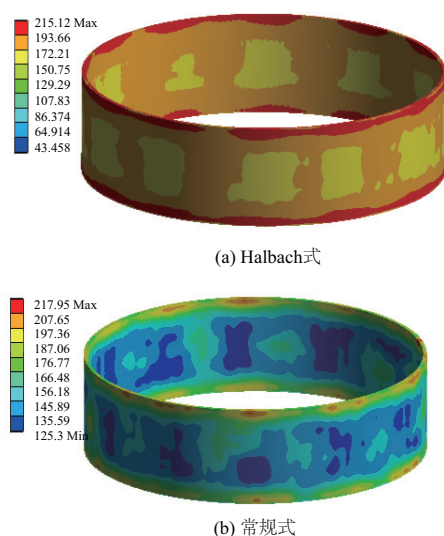


图12 温度云图

4 结语

1) 本文将常规永磁缓速器中的径向充磁磁铁改为Halbach阵列方式。经过优化后得出的新型Halbach式永磁缓速器与常规式相比, 径向尺寸较大程度减小, 体积降低至常规式的90%, 适合安装在底盘高度空间有限的车辆上。

2) 利用Maxwell和ANSYS Workbench对Halbach式和常规式永磁缓速器模型进行联合仿真。经过分析可以得出在同等尺寸条件下, Halbach式气隙磁感应强度更高, 制动力矩更大, 温度能够保证永磁缓速器正常工作。

参考文献:

- [1] 叶乐志. 汽车永磁缓速器设计理论与试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [2] 陈德民, 梁彦涵. 汽车永磁缓速器综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(9): 71-74.
- [3] DENG Z X, NAS I, DAPINO M J. Torque analysis in coaxial magnetic gears considering nonlinear magnetic properties and spatial harmonics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2): 1-11.
- [4] 何富君, 刘凯, 张瑞杰, 等. 汽车永磁无级缓速器的设计与仿真分析[J/OL]. 重庆大学学报: 1-6[2019-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20190917.1043.004.html>.
- [5] 祁长璞, 赵建兴, 郑延延. 一种用于水下推进器的Halbach阵列磁性联轴器设计[J]. 微电机, 2017, 50(8): 80-83.
- [6] 郭保成, 黄允凯, 彭飞, 等. Halbach阵列盘式永磁电机的解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 289-295, 343.
- [7] 肖磊, 张海, 许宝玉. Halbach永磁阵列型轴向调制永磁齿轮[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(9): 1373-1379.
- [8] 叶乐志, 刘玉朋, 李德胜. 车用永磁缓速器磁-热耦合建模与试验研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(1): 103-111.
- [9] FONTCHASTAGNER J, LUBIN T, MEZANI S, et al. Design optimization of an axial-field eddy-current magnetic coupling based on magneto-thermal analytical model[J]. Open Physics, 2018, 16(1): 21-26.
- [10] YE L Z, CAO M G, LIU Y P, et al. Multi-field coupling analysis and demagnetization experiment of permanent magnet retarder for heavy vehicles (MAY 2018)[J]. IEEE Access, 2019, 7: 50734-50745.
- [11] 雷银照. 电磁场[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [12] 何仁, 王晶, 王亮. 分级式永磁缓速器的设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 155-159, 174.
- [13] 何富君, 仲于海, 张瑞杰, 等. 永磁涡流耦合传动特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 23-28.

收稿日期: 2020-03-30