

# 基于响应曲面法的单边盘式发电机优化设计\*

王娜<sup>1</sup>, 唐传胜<sup>2</sup>, 时磊<sup>1</sup>

(1. 河南工业职业技术学院 机电自动化学院, 河南 南阳 473000;

2. 南阳理工学院 机械与汽车工程学院, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 为了拓展单边永磁盘式发电机的应用范围, 对该类发电机进行优化设计。通过分析不同永磁体厚度、气隙、形状对发电机的影响, 对比有无铁心单边结构发电机的性能, 选择适合汽车工况的发电机为研究对象。通过响应曲面法, 建立以永磁体厚度、形状为优化变量, 电压波形畸变率、效率为优化目标的多目标优化方程。结果表明, 不同永磁体厚度与形状对发电机性能具有重要影响, 通过响应曲面优化后的单边永磁发电机效率提高了 0.83%, THD 降低了 16.7%。因此, 所提优化方法对单边盘式发电机永磁体结构的设计具有一定的指导意义。

**关键词:** 盘式发电机; 畸变率; 效率; 响应曲面法

中图分类号: TM 313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0027-06

doi: 10.12177/emca.2020.024

## Optimization Design of Single-Sided Disc Generator Based on Response Surface Method\*

WANG Na<sup>1</sup>, TANG Chuansheng<sup>2</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Automation, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China)

**Abstract:** In order to extend the application range of single-sided permanent magnet disk generator, the optimization design of such generator is investigated. Firstly, the generator suitable for vehicle operating conditions is selected as the research object after analyzing the influence of permanent magnet thickness, air gap and shape on the generator, and comparing the performance of the generator with or without iron core. Then, a multi-objective optimization equation is established with the thickness and shape of permanent magnet as optimization variables, and the voltage waveform distortion rate and efficiency as optimization objectives by response surface method. The results show that thickness and shape of permanent magnet have significant influence on the generator performance. The efficiency of single-sided permanent magnet generator after response surface optimization is improved by 0.83%, and the total harmonic distortion (THD) is reduced by 16.7%. The optimization method has a certain reference value in the design of permanent magnet structure of single-sided disc generator.

**Key words:** disc generator; distortion rate; efficiency; response surface method

收稿日期: 2020-02-22; 收到修改稿日期: 2020-04-03

\* 基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20B470003); 河南省科技攻关项目(202102210298)

作者简介: 王娜(1980—), 女, 硕士, 研究方向为控制理论与控制工程。

唐传胜(1982—), 男, 博士, 研究方向为伺服驱动及控制、机器人控制、非线性系统分析及控制。

时磊(1980—), 男, 硕士, 研究方向为控制理论与控制工程。

## 0 引言

薄盘式轴向磁通永磁发电机是未来高性能永磁发电机的发展方向之一,以其结构紧凑、功率密度高、起动转矩小等优点广泛应用于新能源汽车中<sup>[1-3]</sup>。国内外学者广泛研究了发电机的极槽配合、冷却、控制等<sup>[4-7]</sup>。Aydin 等<sup>[8]</sup>通过偏置磁极来实现轴向磁通永磁发电机齿槽转矩的最小化。Sung 等<sup>[9]</sup>通过注削定子齿来减小转矩脉动。Saavedra 等<sup>[10]</sup>采用三维有限元法研究了退磁故障条件下对磁体成型的影响。

针对发电机结构分析,国内学者<sup>[11]</sup>为提高发电机气隙磁密的正弦性,将发电机永磁体结构设计为正弦性永磁体,通过有限元分析,结果表明虽然其5次与7次谐波明显下降,但是加工工艺要求较高。王晓远等<sup>[12]</sup>通过改变永磁体的充磁方式来提高气隙磁密正弦性,降低了谐波,从而提高发电机的效率,然而其充磁方向比较复杂,增加了成本。根据不同永磁体形状对单边盘式永磁发电机的影响规律,本文基于田口-响应曲面法对永磁体的结构进行优化设计,旨在提高发电机的效率特性,从而改善电能质量。

## 1 薄盘式发电机分类

轴向磁通盘式发电机按照结构与定转子数目可分为:单定子单转子结构、单定子双转子结构、单转子双定子结构、多盘复合结构。单定子单转子永磁发电机结构存在不对称的单边磁拉力使应用场合受限制,若运用在新能源发电机汽车车轮里,则可以完美避开单边磁拉力的受限。有铁心发电机3D有限元模型如图1所示。

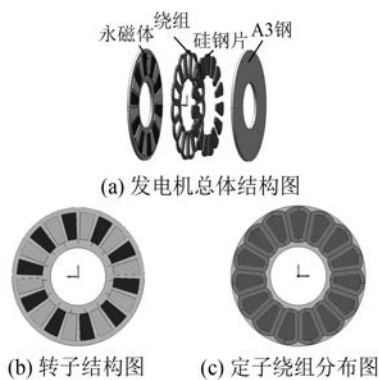


图1 有铁心发电机3D有限元模型

## 2 单边盘式发电机电磁设计

单边线圈经过环氧树脂固定成型,与背铁紧密粘在一起,为发电机的静止部分。有效绕组为径向线圈,其在空间呈径向辐射分布,周向仅用来连接。单边永磁发电机转子盘在电机的拖拽下进行旋转,从而切割闭合绕组,径向有效长度绕组在磁场作用下感应出感应电动势  $e(\theta)$  为

$$e(\theta) = \Omega \int_{D_i/2}^{D_o/2} B_\delta(\theta) r dr = \frac{1}{8} \Omega (D_o^2 - D_i^2) B_\delta(\theta) \quad (1)$$

式中: $\Omega$ 为发电机的机械角速度; $D_o$ 为发电机磁极外径; $D_i$ 为发电机磁极内径; $B_\delta(\theta)$ 为平均半径处的气隙磁密; $r$ 为线圈平均半径。

单根导体的平均电动势  $E_{av}$  为

$$E_{av} = \frac{p}{\pi} \int_0^{\pi/p} e(\theta) d\theta = \frac{1}{8} \Omega (D_o^2 - D_i^2) B_{\delta av} \quad (2)$$

式中: $p$ 为极对数; $B_{\delta av}$ 为一个极距下的气隙磁密的平均值,其与磁密幅值  $B_\delta$  之间的关系为  $B_{\delta av} = \alpha_i B_\delta$ ,  $\alpha_i$  为计算极弧系数。

按照设计准则,若  $m$  为发电机的绕组相数,  $I_a$  为输出相电流,额定转速为  $n$ ,则额定输出功率  $P$  为

$$P = m E I_a = \frac{m}{4} \alpha_i N_1 k_w B_\delta (D_o^2 - D_i^2) \frac{I_a}{a} \quad (3)$$

式中: $E$ 为相电动势; $N_1$ 为匝数; $k_w$ 为定子绕组系数; $a$ 为并联支路数。

发电机效率  $\eta$  为输出功率与输入功率之比,表达式为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (4)$$

式中: $P_{out}$ 为发电机的输出功率; $\Delta P$ 为发电机的功率损耗。

## 3 发电机结构设计

### 3.1 有无铁心发电机的选取

单定子单转子永磁发电机结构分为有铁心发电机与无铁心发电机,其具体结构见图1。本研究设定的发电机额定功率为400W,额定转速为300 r/min,由  $n = 60f/p$  可知,频率  $f = 50$  Hz 时,极对数  $p$  选择10。线圈采用分数槽集中分布绕组方式,

根据极槽配合,此时选择 15 槽可使绕组端部用铜量更加合理化。发电机结构参数如表 1 所示。

表 1 发电机结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率 $P/W$	400	额定转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	300
额定电压 $U_N/V$	28	相数 $m$	3
磁极外径 $D_o/\text{mm}$	240	磁极内径 $D_i/\text{mm}$	140
磁极对数 $p$	10	极弧系数 $\alpha_i$	0.78
绕组厚度 $h_w/\text{mm}$	4.5	线圈总数 $Q$	15

有无铁心单边发电机的唯一区别就是硅钢片的存在,无铁心的由于没有导磁材料硅钢片的存在,导致磁场不能充分利用,导磁性差。本文采用有限元法对单边永磁发电机进行三维有限元建模分析,对提取的空载电压进行谐波分析。通过傅里叶分解得到频率与工频相同的电压为基波电压,频率高于工频的值为高频电压。图 2 和图 3 分别为有无铁心发电机电压幅值与谐波的对比如图。

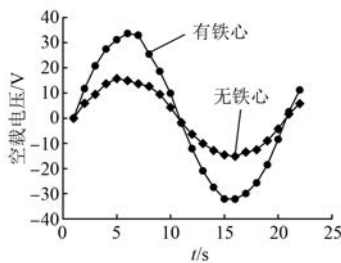


图 2 有无铁心发电机电压对比

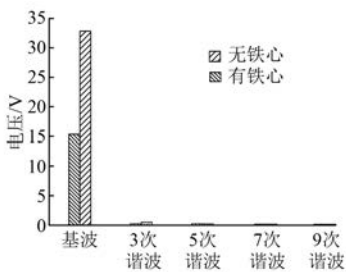


图 3 有无铁心发电机谐波分析对比

通过对比图 2 和图 3 可知,有铁心发电机的空载电压是无铁心的 2.2 倍,有铁心的利用率更高,无铁心发电机的电压波形畸变率为 4.0%,有铁心发电机的电压波形畸变率为 2.4%。从发电量与电能角度分析,有铁心发电机更具优势,故本文的研究对象为有铁心发电机。

### 3.2 有铁心发电机转子影响因素

为了选择最优特性的单边发电机结构,需要针对有铁心发电机结构参数对其性能的影响程度进行分析。负载电压随永磁体厚度变化曲线如图 4 所示。随着永磁体厚度的增加,电压呈上升趋势,但其增长率不同。图 5 为径向气隙磁密分布图,从内径往外径方向提取气隙磁密。由图 5 可知,径向气隙磁密呈正态分布,永磁体内径与外径处的气隙磁密较小,中间气隙磁密增多。气隙磁密影响发电机的性能,永磁体厚度与气隙磁密不呈正比关系。当永磁体厚度为 4.5 mm 时,相对于厚度为 5.0 mm 时的部分径向气隙磁密更强。

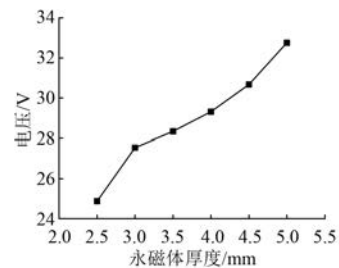


图 4 不同永磁体厚度下的电压

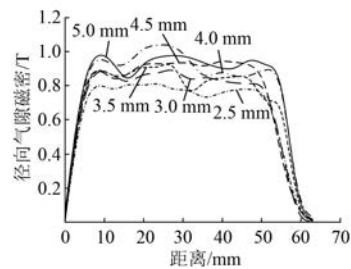


图 5 径向气隙磁密图

气隙的选取对发电机性能具有一定的影响,不同气隙对电压的影响如图 6 所示。由图 6 可知,气隙越小电压越大。当气隙选取过大时会影影响发电机工作磁密,漏磁增加,发电机效率降低。气隙选取过小时,虽然能增加电压值,但是会影响发电机的工作和加工的工艺性。考虑实际加工要求,选取气隙为 1.2 mm。

永磁体的不同形状也将对发电机性能产生影响。将一半永磁体在平均半径处进行旋转,对分析在旋转度数为  $0^\circ \sim 9^\circ$  时,不同的永磁体结构对发电机的电能质量与效率的影响。图 7 为永磁体旋转  $0^\circ$  与旋转  $8^\circ$  的结构示意图。

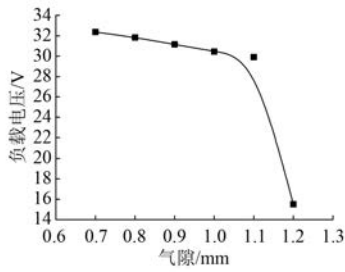


图6 不同气隙对电压的影响

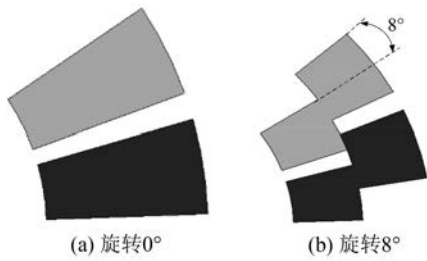


图7 转子永磁体结构示意图

图8为一个周期内,不同永磁体旋转角度下的电压值。当永磁体旋转角度发生改变时,单边永磁发电机的电压值有微小的变化,并遵循:旋转角度越大,电压偏低。为了深入研究单边永磁发电机的性能,对发电机进行谐波分析,其结果如图9和表2所示。

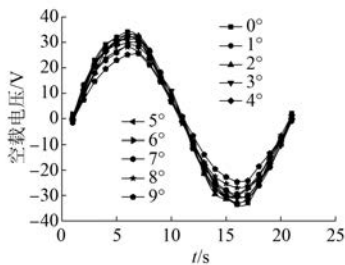


图8 永磁体不同旋转角度下的电压值

由图9与表2可知,永磁体旋转使得基波幅

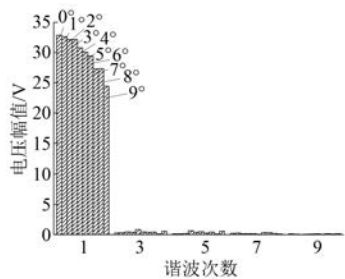


图9 傅里叶分解的谐波分析图

值下降,但在一定程度上改善了电能质量。旋转度数为 $2^\circ$ 与 $3^\circ$ 时基波幅值一致。旋转度数为 $7^\circ$ 和 $8^\circ$ 时基波幅值一致。旋转角度为 $1^\circ$ 时的电压波形畸变率为2%,比改善前提高了16.7%。由此可知,合理的旋转度数可以改善气隙磁密的正弦性。

表2 不同旋转角度对应的 THD

角度/ $^\circ$	THD/%
0	2.40
1	2.00
2	2.58
3	3.00
4	4.22
5	2.68
6	4.10
7	3.71
8	3.78
9	3.98

永磁体不同的旋转角度会对单边永磁发电机的效率产生影响,如图10所示。除了 $1^\circ$ 与 $5^\circ$ 外,在其他永磁体旋转角度下,单边永磁发电机效率均有所提高。由以上分析可知,发电机的永磁体厚度与旋转角度均会对发电机的效率与电能质量产生影响。为了全面分析单边转子对发电机的效率和电能质量的影响以及选取最优发电机参数,对永磁体转子结构进行优化。

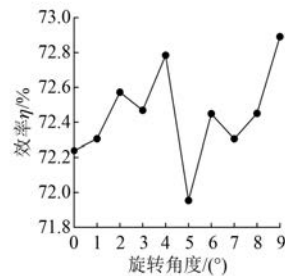


图10 永磁体不同旋转角度的效率

## 4 响应优化

通过分析图4可知,当永磁体厚度为3~4 mm时,能满足设计要求且永磁体利用率高。当永磁体旋转角度在 $1^\circ \sim 3^\circ$ 时,单边永磁发电机的效率高且THD较低。故通过响应曲面法建立以永磁体厚度、旋转角度为变量,永磁发电机效率和电压波形畸变率为优化目标的响应曲面方程。通

过该方法拟合出响应输出与变量响应因子之间的二阶模型,利用图解法、分析法或优化方法找出自变量的设置使响应变量达到最优化。其二变量二次多项式的数学模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

式中:  $y$  为永磁发电机效率与电压波形畸变率;  $\beta$  为待定系数;  $x_1$ 、 $x_2$  分别为永磁体厚度  $A(h)$  和永磁体旋转角度  $B(\theta)$ ;  $\varepsilon$  为拟合误差。

由以上优化分析可知,当永磁体厚度取 3~4 mm 及永磁体旋转角度取  $1^\circ \sim 3^\circ$  时可使 2 个目标达到最优,故其自变量范围为  $3 \text{ mm} \leq A(h) \leq 4 \text{ mm}$ ,  $1^\circ \leq B(\theta) \leq 3^\circ$ 。

对自变量的取值分别编码,采用中心组合设计,可得其试验方案和结果如表 3 所示。通过两自变量 9 组正交试验可得其有限元分析结果,用最小二乘法估算 THD 的数学模型  $y_1$  和效率的数学模型  $y_2$  如下:

$$y_1 = 0.329\ 906 - 0.187\ 689x_1 + 0.030\ 378x_2 - 0.001\ 765x_1^2 - 0.005\ 644x_2^2 + 0.027\ 046x_1x_2 \quad (6)$$

$$y_2 = 0.691\ 828 + 0.009\ 386x_1 + 0.009\ 636x_2 - 0.000\ 778x_1^2 + 0.001\ 274x_2^2 - 0.000\ 310x_1x_2 \quad (7)$$

表 3 试验设计方案及结果

序号	变化量		编码值		THD/%	效率/%
	$A(h)/\text{mm}$	$B(\theta)/(^{\circ})$	X1	X2		
1	4.0	1	1	-1	3.28	72.31
2	3.5	2	0	0	2.58	72.57
3	3.0	1	-1	-1	2.93	72.11
4	3.0	2	-1	0	4.36	72.12
5	3.0	3	-1	1	2.93	72.36
6	4.0	2	1	0	3.45	72.78
7	3.5	1	0	-1	2.00	72.30
8	3.5	3	0	1	3.33	72.47
9	4.0	3	1	1	2.93	72.50

图 11 为响应目标与变量因子的曲面图的等值线图,响应面的斜率反映出变量的交互作用对响应目标的显著影响,斜率越大,交互作用下的变量因子对响应目标影响越大。图 11(a) 为 THD 关于永磁体厚度及旋转角度的曲面图。为了直观分析,图 11(b) 为 THD 关于永磁体厚度及旋转角

度的曲面图,图中颜色最深部分表示 THD 小于 2.5%,即旋转角度在  $1^\circ \sim 1.2^\circ$  之间,永磁体厚度在 3.3~3.7 mm 时 THD 达到最小。图 11(c) 为效率关于永磁体厚度及旋转角度的曲面图。为了便于分析,图 11(d) 为效率关于永磁体厚度及旋转角度的等值线图,当旋转角度在  $1.7^\circ \sim 3^\circ$  之间,永磁体厚度在 3.7~4.0 mm 之间效率可达到最大。通过 minitab 分析,响应优化的整体解为  $(x_1, x_2) = (1^\circ, 3.5 \text{ mm})$ 。

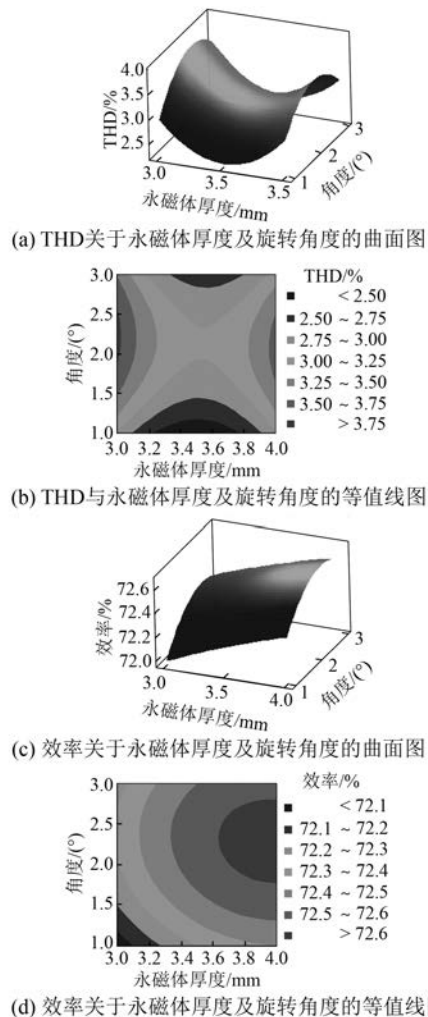


图 11 THD、效率与永磁体厚度及旋转角度的曲面图和等值线图

通过响应曲面法优化永磁体厚度与永磁体旋转角度,找出最优参数下发电机性能,其结果如表 4 所示。由响应优化后的结果可知,当旋转角度为  $1^\circ$ ,永磁体厚度为 3.5 mm 时,发电机效率提高了 0.83%,THD 降低了 16.7%。

表 4 优化前后发电机特性对比

优化前后	效率/%	THD/%
优化前	72.24	2.4
优化后	72.30	2.0

## 5 结 语

本文通过分析单边永磁发电机的适用环境,选取合适的发电机结构,基于电磁理论设计了发电机的基本参数,并对转子部分做了深入分析,研究了转子永磁体厚度与永磁体形状对发电机的影响,得出以下结论:

(1) 有铁心单边永磁发电机比无铁心单边永磁发电机的性能更优越,其效率高、电能质量好。

(2) 单边转子中的永磁体形状与永磁体厚度均对单边永磁发电机性能产生了影响。

(3) 通过响应曲面法对发电机永磁体形状与永磁体厚度进行优化,优化后其发电机效率提高了 0.83%, THD 降低了 16.7%。

### 【参 考 文 献】

[ 1 ] 黄允凯,周涛,董剑宁,等.轴向永磁电机及其研究发展综述[J].中国电机工程学报,2015,35(1): 192.

[ 2 ] LOMBARD N F, KAMPER M J. Analysis and performance of an ironless stator axial flux PM machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1051.

[ 3 ] CHAN T F, LAI L L. An axial-flux permanent magnet synchronous generator for a direct-coupled wind-turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy

Conversion, 2007, 22(1): 86.

[ 4 ] 胡芳,饶志蒙,罗德荣.盘式对转永磁风力发电机设计与分析[J].电机与控制应用,2019,46(4): 115.

[ 5 ] 胡景泰,付显,梁海泉.双三相永磁同步发电机多目标优化设计[J].电机与控制应用,2019,46(6): 77.

[ 6 ] 武广瑗,邓果,何保生.异步电机旋转角度精确控制的研究与实现[J].科学技术与工程,2014,14(5): 40.

[ 7 ] FORNASIERO E, ALBERTI L, BIANCHI N, et al. Considerations on selecting fractional-slot nonoverlapped coil windings [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1316.

[ 8 ] AYDIN M, ZHU Z Q, LIPO T A, et al. Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines; design concepts [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(9): 3614.

[ 9 ] SUNG S J, PARK S J, JANG G H. Cogging torque of brushless DC motors due to the interaction between the uneven magnetization of a permanent magnet and teeth curvature [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(7): 1923.

[ 10 ] SAAVEDRA H, RIBA J, ROMERAL L. Magnet shape influence on the performance of AFPMM with demagnetization [ C ] // IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 10.

[ 11 ] 李毅搏.轴向磁通无铁心永磁同步发电机的设计与特性分析 [ D ]. 焦作: 河南理工大学, 2015.

[ 12 ] 王晓远,赵方,杜静娟,等.基于 Halbach 阵列的多盘式无铁心永磁同步电机设计研究 [ J ]. 微电机, 2007, 40(2): 26.

(上接第 5 页)

[ 3 ] 李昱兵,张德春,陈跃.一种变频电机参数离线辨识方法的研究[J].电机与控制应用,2019,46(1): 64.

[ 4 ] 符荣,窦满峰.电动汽车驱动用内置式永磁同步电机直交轴电感参数计算与实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11): 30.

[ 5 ] 李峰,夏超英.考虑磁路饱和的 IPMSM 电感辨识算法及变参数 MTPA 控制策略[J].电工技术学报,2017,32(11): 136.

[ 6 ] LIU L, CARTES D A. Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors [ J ]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(4): 1015.

[ 7 ] 吴诗宇,史瑞祥,温万昱.基于最小二乘法的新能源汽车永磁同步电机温升的辨识 [ J ]. 微电机, 2018, 51(1): 74.

[ 8 ] LIU K, ZHANG Q, CHEN J, et al. Online multiparameter estimation of nonsalient-pole PM synchronous machines with temperature variation tracking [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1776.

[ 9 ] 肖曦,许青松,王雅婷,等.基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法 [ J ]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 21.

[ 10 ] NGUYEN Q K, PETRICH M, ROTH-STIELOW J. Implementation of the MTPA and MTPV control with online parameter identification for a high speed IPMSM used as traction drive [ C ] // 2014 International Power Electronics Conference ( IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA ), 2014.