

双三相永磁同步发电机多目标优化设计

胡景泰, 付 显, 梁海泉

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘 要: 为实现双三相永磁同步发电机(PMSG)的低固有电压调整率、高发电效率和低成本的特性, 研究了侧重于降低固有电压调整率的多目标优化设计方案。采用解析法建立单元电机磁链模型, 以永磁体磁化方向长度、永磁体所跨弧长和单元电机相绕组匝数为设计变量, 分析上述参数对固有电压调整率、发电效率等评价指标的影响, 并提出了基于权重系数的多目标优化函数。分别用标准遗传算法(SGA)、差分进化算法(DE)和基于以上2种算法的混合遗传算法(HGA)优化设计参数并进行对比。试验结果表明, HGA优化效果与设计目标具有良好的 consistency, 与初始设计参数相比, 优化后的电机输出能力以及稳压能力均有所改善。

关键词: 永磁同步发电机; 双三相; 分数槽集中式绕组; 多目标优化; 优化算法

中图分类号: TM 313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)05-0077-07

Multi-Objective Optimization of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator

HU Jingtai, FU Xian, LIANG Haiquan

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to make dual three-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG) show its characteristics of low inherent voltage regulation, high generating efficiency and low cost, multi-objective optimization design methods were studied considering priority to reduction of inherent voltage regulation. By using analytical method to create flux-linkage model of unit motor, and taking length of magnetization direction, arc length of permanent magnet and turns-in-series per-phase of unit motor as variables, the influences of variables on evaluation indices such as inherent voltage regulation and generator efficiency were analyzed and a multi-objective optimization function with weight coefficients was proposed. Standard genetic algorithm (SGA), differential evolution (DE) and hybrid genetic algorithm (HGA) based on SGA and DE were used to optimize the design parameters, and the optimization results were compared. The results confirmed that HGA optimization results had a good consistency with the design objective, and the output capacity and voltage stabilization of the optimized generator were improved in comparison with the original design.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); dual three-phase; concentrated fractional-slot winding; multi-objective optimization; optimization algorithm

0 引 言

永磁同步发电机(PMSG)具备结构简单、运行可靠、效率高等特点^[1], 逐步被应用于小型内燃机发电机组等场合。双三相PMSG是多相发电机

与PMSG交叉融合的产物, 定子上有2套独立的三相绕组, 可分别通过2个独立的整流器进行供电, 能够同时满足系统两路负载的能耗需求^[2]。当一套三相电源绕组出现故障时, 另一套电源绕组仍可继续工作, 供电方式较灵活。

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(kx0286020173449)

作者简介: 胡景泰(1963—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电机与电器的控制与保护。

付 显(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计与控制。

梁海泉(1983—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为机车电气传动及测控技术。

本文研究的双三相 PMSG 采用外转子、分数槽集中式绕组,在每个定子齿上绕制一个集中线圈,有效减少线圈端部长度和定子槽数的同时,降低了齿槽转矩幅值,易获得正弦性较好的空载电势波形^[3-4],适合应用在车用、船用发动机上作为独立电源使用。由于 PMSG 制成后气隙磁场难以调节,若要将双三相 PMSG 应用于多路负载系统中,在满足各路负载能耗需求的前提下,需考虑降低固有电压调整率的同时,提高发电效率并降低发电机成本。

文献[5]阐述了采用群居昆虫优化算法对内置式永磁同步电机(PMSM)进行优化设计的方案,与传统寻优方法相比,具有收敛速度快、准确度高等特点。文献[6]提出基于粒子间距的微粒群算法,应用在 PMSM 的优化设计上,与传统微粒群算法相比,具有更好的全局寻优能力。文献[7]应用搜索能力强、收敛速度快的多种群遗传算法作为优化方法,获取了无铁心永磁直线同步电机结构尺寸参数的多目标优化解。文献[8]提出将遗传粒子群综合算法优化磁悬浮开关磁阻电机,获得了设计参数的多目标优化组合。以上研究成果均根据各自的研究对象及优化目标,选取相适应的算法进行优化,并取得了较为理想的效果。

本文采用单元电机分析法设计双三相 PMSG。在建立单元电机等效磁路模型的基础上,提出了基于权重系数的多目标优化函数,分别应用标准遗传算法(SGA)、差分进化算法(DE)、混合遗传算法(HGA)对电机结构尺寸进行多目标优化,对比分析优化效果。最后通过电机拖动试验验证了 HGA 在侧重于减小固有电压调整率的多目标优化问题上的有效性。

1 双三相 PMSG 设计参数分析

1.1 单元电机分配组合

对于绕组采用分数槽集中式,可将发电机看作由多个单元电机组成^[9]。将单元电机分配组合,可使发电机具有多路输出。合理设计永磁体尺寸以及绕组参数,两路电源绕组的输出能够满足两路负载的能耗需求。

1.2 双三相 PMSG 电机基本参数

根据文献[4]的单元电机磁动势谐波分析方

法,确定单元电机齿数为 3,极对数为 2。两路输出包含的单元电机个数分别为 4 个和 2 个,如图 1 所示。初步设计计算电机参数,确定电机主要结构尺寸等基本参数,如表 1 所示。

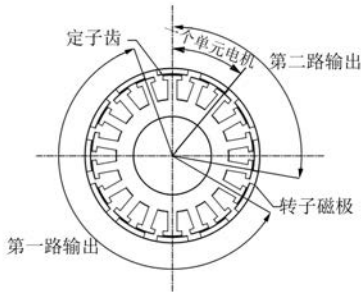


图 1 双三相 PMSG 单元电机分布

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子齿数 z	18	电机相数 m	3
极对数 p	12	定子外径 D_1/mm	145
单元电机定子齿数 z_0	3	定子内径 D_{i1}/mm	70
单元电机极对数 p_0	2	定子轭高 h_j/mm	15.5
额定总输出功率 P/kW	0.3	定子槽深 h_s/mm	22
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500	定子齿宽 t_1/mm	8.8
额定频率 f/Hz	50	电枢长度 L_{ef}/mm	12
气隙长度 g/mm	1	永磁体剩磁 B_r/T	1.15
第一路输出单匝线圈截面积/ mm^2	1.123	第二路输出单匝线圈截面积/ mm^2	0.476

由于对 PMSG 运行性能的要求是多方面的,所以设计参数之间相互制约。考虑电机优化设计的普遍性,保持电机极对数、定子参数、永磁体材料等不变,选取永磁体磁化方向长度(永磁体厚度) h_M 、永磁体所跨弧长(永磁体宽度) b_M 、两路输出单元电机相绕组匝数 N_{s1} 、 N_{s2} 作为电机设计变量,参数间相互独立。根据电机结构尺寸和绕组绕制工艺的约束限制,给出设计变量参数的限制条件,如表 2 所示。

表 2 设计变量变化范围

参数名称	最小值	最大值
h_M/mm	7	12
b_M/mm	14.5	29.5
N_{s1}	40	60
N_{s2}	110	140

1.3 设计变量分析

为了更直观地分析电机设计变量与优化目标间的变化关系,在搭建单元电机磁链模型的基础上,分别给出固有电压调整率、发电机工作效率随单元电机相绕组匝数、永磁体厚度以及永磁体宽度的变化曲面,如图2~图5所示。

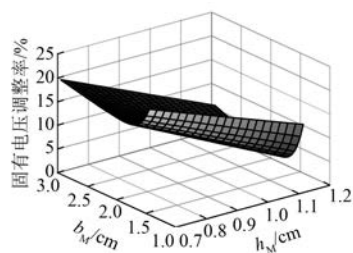


图2 固有电压调整率随永磁体宽度和永磁体厚度变化曲面

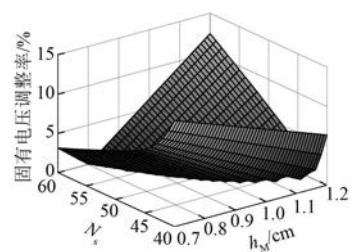


图3 固有电压调整率随永磁体厚度和单元电机相绕组匝数变化曲面

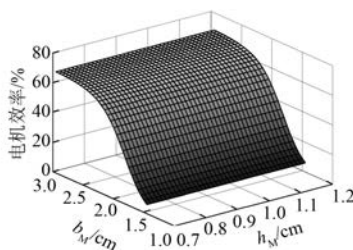


图4 发电机效率随永磁体宽度和厚度变化曲面

由于PMSG制成后难以调节气隙磁场^[10],在设计优化阶段应将固有电压调整率作为评价指标之一。由图2可见,发电机的固有电压调整率在永磁体厚度的设计范围内随 h_M 的增大而减小。相比于永磁体厚度,永磁体宽度对电机固有电压调整率影响不大。由图3可见,在满足电机输出性能要求的前提下,选取合适的单元电机相绕组匝数以及永磁体厚度参数,可以有效降低固有电

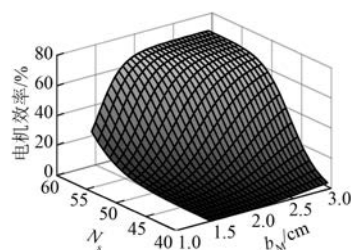


图5 发电机效率随单元电机相绕组匝数和永磁体宽度变化曲面

压调整率。

发电机的工作效率是衡量其发电性能的重要指标。由图4可见,在极弧系数限制的范围内,发电机的工作效率主要受永磁体宽度的影响,随永磁体宽度的增大而增大,并且增大速率有逐渐变缓趋势。由图5可见,存在一个由单元电机相绕组匝数和永磁体厚度组成的参数设计区间使电机效率达到最优,且电机效率随着设计参数的增大逐渐平缓。

1.4 两路输出设计优化过程

双三相PMSM两路电源绕组间相互独立,电气上没有直接连接。在所搭建的单元电机磁链模型的基础上,可对两路输出分别进行优化设计。对第一路输出参数进行优化设计,得到 h_M 、 b_M 、 N_{s1} 优化后的参数。保持优化后的永磁体参数 h_M 、 b_M 不变,根据第二路电源绕组输出需求,优化参数 N_{s2} 。

2 应用SGA、DE和HGA优化设计参数

将单元电机参数的优化问题简化为包含多个优化目标和约束条件的非线性优化问题。约束条件包含电机输出功率需求、结构尺寸参数限制等。分别应用SGA^[11]、DE^[12]和基于以上两种算法的HGA^[13-14]对设计参数进行多目标优化,对比分析优化效果,获取理想的设计参数。以第一路输出为例,优化过程如下。第二路输出参数优化不再详述。

2.1 目标评价函数

将发电机固有电压调整率、发电机效率以及电机的材料成本作为优化目标,确定子目标评价函数:

$$f_i(x) = \begin{cases} \frac{\Delta U(x)}{\Delta U_N}, & i = 1 \\ \frac{1}{[1 + \eta(x)]}, & i = 2 \\ \frac{C(x)}{C_{\max}}, & i = 3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔU ——电压调整率;

η ——电机效率;

C ——电机材料成本。

采用权重系数法体现各性能评价指标的重要性。将权重系数 $\omega_i (i=1,2,3)$ 赋予每个子目标评价函数 $f_i(x) (i=1,2,3)$, ω_i 体现了相应子函数 $f_i(x)$ 在优化问题中的重要程度。通过上述方法,多目标优化问题就简单化为单目标优化问题。所采用的评价函数表达式为

$$u = \sum_{i=1}^n [f_i(x)]^{\omega_i}, i \in N \quad (2)$$

多目标函数的权重系数一方面取决于对发电机性能的需求;另一方面取决于设计参数的变化对于优化目标变化速率的影响。评价函数侧重于减小电机固有电压调整率,选取权重系数为 $\omega_1 = 2.0, \omega_2 = 1.5, \omega_3 = 1.2$, 以目标函数值最小化为优化标准。

2.2 应用 SGA 的多目标优化

遗传算法模拟基因重组与进化过程,通过目标评价函数计算种群中个体的适应度,筛选最优个体。经过选择、交叉、变异等操作得到子代染色体,重复计算个体的适应度,直至获取最优解。进化过程如图 6 所示;SGA 运行 3 次,所得结果如表 3 所示。

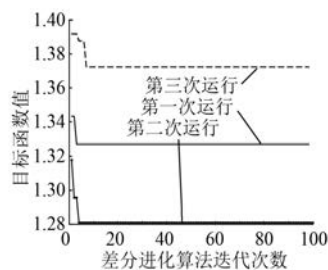


图6 标准遗传算法进化过程图

结果显示,SGA 优化效果不稳定,3 次计算目标函数最终值均不相同,且对应优化后的设计参数也不同。

表3 标准遗传算法试验最优解及对应变量

试验次数	h_M/mm	b_M/mm	N_{sl}	$u_{\min}$
1	7	26.113	48	1.327 1
2	7	26.597	46	1.280 9
3	7	25.145	50	1.372 3

2.3 应用 DE 的多目标优化

差分进化算法通过差分变异算子进行遗传操作,利用随机偏差扰动产生新个体,具有较好的鲁棒性和全局寻优能力^[12]。DE 进化过程如图 7 所示;DE 运行 3 次得到的结果如表 4 所示。3 次运行结果完全一致。相比于 SGA,DE 具有更好的稳定性和优化效果。

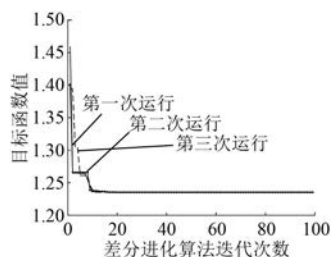


图7 差分进化算法进化过程图

表4 差分进化算法试验最优解及对应变量

试验次数	h_M/mm	b_M/mm	N_{sl}	$u_{\min}$
1	7	29.500	44	1.235 4
2	7	29.500	44	1.235 4
3	7	29.500	44	1.235 4

2.4 应用 HGA 的多目标优化

SGA 收敛性较差,后期容易陷入局部最优解。DE 参与变异、交叉的父代个体没有预先筛选,易造成优良个体的流失。借鉴 SGA 的算法框架以及 DE 的遗传操作,使 HGA 在解空间内具备更好的寻优能力。算法基本优化过程如图 8 所示。

2.4.1 编码方法

采用二进制编码,编码串的长度由所要求精度决定。当设计参数 x 的区间为 $[a, b]$,精度为 δ ,则该二进制串长度 m 可用式(3)计算:

$$2^{m-1} < \frac{b-a}{\delta} < 2^m \quad (3)$$

可用一条染色体来表示一组设计参数的信息,包含 3 个基因序列,分别代表永磁体厚度 h_M 、

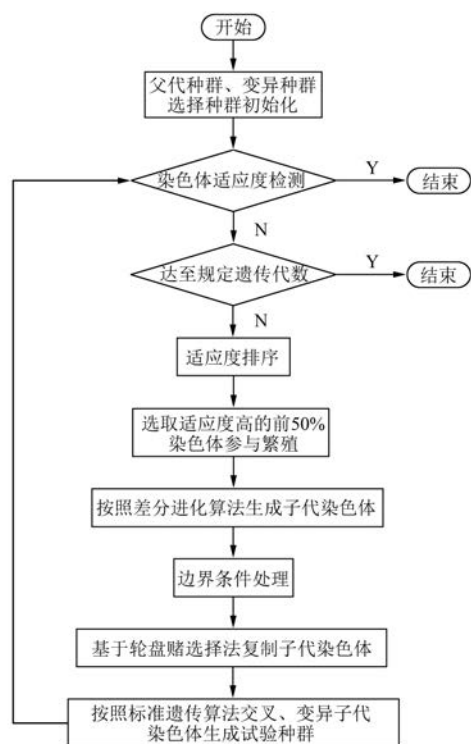


图8 混合遗传算法基本流程

永磁体宽度 b_m 、单元电机单相绕组匝数 N_s ，参数精度分别为 0.25 mm、0.50 mm、1，如图 9 所示。

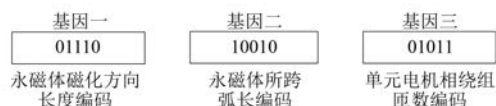


图9 一组设计参数染色体编码构成

2.4.2 解码方法

从二进制串返回一个解码值可用式(4)计算：

$$x = a + \text{decimal} \times \frac{b - a}{2^m - \varepsilon} \quad (4)$$

式中：decimal——变量 x 的十进制位值；

ε ——0~1 之间的随机数，保证生成设计参数点编码的随机性。

将图 9 中的设计参数编码按照式(4)的解码方法可得永磁体厚度、永磁体宽度、单元电机相绕组匝数分别为 9.188 mm、18.719 mm、56。

2.4.3 子代染色体生成

父代染色体适应度的排序过程中，筛选适应度高的前 50% 染色体，按照差分进化方式生成子

代染色体。每一个新的子代染色体向量 $v_{i,G+1}$ 都是由 2 个以上的父代染色体向量 $x_{i,G+1}$ 通过线性组合生成的。将种群中 2 个父代染色体向量之间的加权差加到第三个父代染色体向量上生成子代染色体向量，如式(5)所示：

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (5)$$

式中： $x_{r1,G}$ 、 $x_{r2,G}$ 、 $x_{r3,G}$ ——互不相同的父代染色体向量($r1$ 、 $r2$ 和 $r3$ 互不相同)；

F ——差分变异算子。

2.4.4 边界条件处理

子代染色体的参数值必须保证在规定范围内。采用边界吸收处理，超过边界约束的个体值设置为临近的边界值。

2.4.5 交叉、变异操作

通过“轮盘赌”选择法确定参与繁殖的子代染色体。结合遗传算法中染色体交叉、变异操作，弥补差分进化算法中过于依赖随机数进行染色体交叉操作所存在的不足。

2.4.6 优化结果

混合遗传算法运行 3 次的计算结果如表 5 所示。进化过程如图 10 所示。3 次试验结果均稳定。相比于 DE、HGA 优化后对应设计参数的目标函数值更小，优化效果更好，但收敛速度较慢。

表5 混合遗传算法试验最优解及对应变量

试验次数	h_m/mm	b_m/mm	N_{s1}	$u_{\min}$
1	7	28.870	44	1.203 4
2	7	28.870	44	1.203 4
3	7	28.870	44	1.203 4

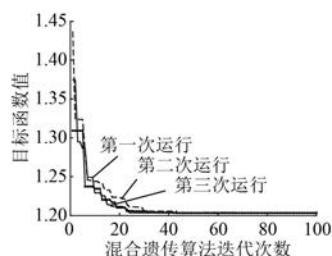


图10 混合遗传算法进化过程图

2.5 优化结果对比

初始设计参数以及不同算法优化后的设计参数所对应的评价指标如表 6 所示。相比于初始设计参数，SGA 具有一定的优化效果，但是后期容易

陷入局部最优解。DE、HGA 优化结果稳定。相比于 SGA、DE,经由 HGA 优化后所得设计参数的固有电压调整率最小。由于电机参数之间相互制约,评价函数侧重于对固有电压调整率的优化,在电机效率以及成本方面,DE、HGA 优化效果较一般。

表 6 不同设计参数优化结果对比

设计参数	评价参数		
	固有电压调整率/%	电机效率/%	成本评价参数值
初始设计参数	9.550 5	56.74	0.588 0
SGA 算法设计参数	8.426 2	73.65	0.330 1
DE 算法设计参数	7.765 2	65.57	0.327 1
HGA 算法设计参数	7.451 3	64.76	0.325 8

3 样机试验验证

两路输出分别进行优化的结果如表 7 所示。

表 7 设计变量的初始值及优化值

参数名称	初始值	优化值
h_M/mm	10	7
b_M/mm	26.94	28.87
N_{s1}	45	44
N_{s2}	118	130

根据表 7 所示的初始设计参数以及 HGA 优化后的设计参数分别研制出电机样机。通过电机拖动试验测试发电机的输出能力并验证优化效果,如图 11 所示。

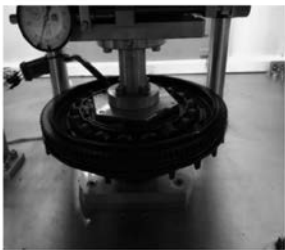


图 11 电机样机拖动试验

分别拖动优化前以及优化后两组发电机样机,将转速稳定在 100~6 000 r/min 范围内的某一转速下,带有整流器的输出端外接电子负载,调节电子负载,使得输出线电压稳定在 12.6 V。分别测试两组样机的第一路电源绕组在稳定电压下

的输出能力,并进行对比。试验结果如图 12 所示。

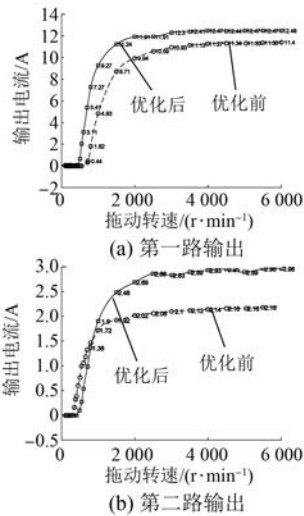


图 12 输出能力对比试验

拖动电机转速达到 3 000 r/min 时,电机磁路趋于饱和。发电机处于满载情况下且输出电压一定时,输出电流的波动情况可反映出电机稳压能力的优劣。第一路电源绕组优化前在 3 000~6 000 r/min 范围内的输出电流平均值为 11.25 A,均方差为 0.154 A;优化后的平均值为 12.43 A,均方差 0.059 A。优化后电机输出能力与稳压能力均有提高。对于第二路电源绕组处于满载情况下,优化前输出电流的平均值为 2.14 A,均方差为 0.027 A;优化后输出电流的平均值为 2.92 A,均方差为 0.044 A。由于电机输出能力需求约束,优化后单元电机相绕组匝数增加,强化了电枢反应对永磁体的去磁作用,导致稳压能力降低。

4 结 语

对于采用分数槽集中式绕组的双三相 PMSG,通过单元电机分析法可有效解决两路输出的设计问题。本文提出以电机的固有电压调整率、发电效率和成本为优化目标,分别采用 SGA、DE 以及 HGA 的多目标优化方法。基于 SGA 和 DE 的 HGA 在优先考虑固有电压调整率最小化的问题方面,优化结果与设计目标具有良好的一致性,然而收敛速度较慢,是后续改进的方向之一。针对非线性、多参数模型,根据优化需求,选取合适的优化算法可获得较为理想的优化效果。

【参考文献】

- [1] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 郭思源,周理兵,齐歌.双三相永磁同步电机电磁性能解析计算[J].电工技术学报,2014,29(5): 17.
- [3] 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.
- [4] 陈益广,潘玉玲,贺鑫.永磁同步电机分数槽集中绕组磁动势[J].电工技术学报,2010,25(10): 30.
- [5] KWON H S, RO J S, JUNG H K. A novel social insect optimization algorithm for the optimal design of an interior permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(12): 8110706.
- [6] LEE J H, KIM J W, SONG J Y, et al. Distance-based intelligent particle swarm optimization for optimal design of permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 7206804.
- [7] 李立毅,唐勇斌,刘家曦,等.多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(15): 69.
- [8] 孙玉坤,张宾宾,袁野.飞轮储能用磁悬浮开关磁阻电机多目标优化设计[J].电机与控制应用,2018,45(10): 53.
- [9] 许实章.交流电机的绕组理论[M].北京:机械工业出版社,1985: 21.
- [10] 郭冰,冷政,杨仲源.永磁电机固有电压调整率降低措施的定量研究[J].电机与控制应用,2012,39(8): 16.
- [11] 张经纬,王雪帆,熊飞,等.基于实验和遗传算法的无刷双馈电机参数估算[J].中国电机工程学报,2008,28(36): 103.
- [12] 包子阳,余继周.智能优化算法及其 MATLAB 实例[M].北京:电子工业出版社,2016.
- [13] 范瑜,金荣洪,耿军平,等.基于差分进化算法和遗传算法的混合优化算法及其在阵列天线方向图综合中的应用[J].电子学报,2004,32(12): 1997.
- [14] 王艾萌,温云.基于混合遗传算法的内置式永磁同步电机的优化设计[J].电机与控制应用,2017,44(3): 59.

收稿日期: 2019-02-17

(上接第 65 页)

验时通过分析电流检测信号和霍尔信号波形,验证了转速闭环的精确控制及负载变化时的稳定性;堵转试验时,通过分析电流检测信号波形,验证了短路保护的可靠性及极限剪切能力。试验表明,控制器的硬件设计合理可靠,控制策略清晰有效,性能满足要求。

【参考文献】

- [1] 孙超英.浅谈无刷直流电机在电动工具中的应用[J].电动工具,2014(5): 1.
- [2] 王开,苏海军,王柳云.基于 ARM 的无传感器无刷电机水泵控制系统研究[J].电机与控制应用,2015,42(7): 39.
- [3] 于秉田,陈小元,陈超,等.基于 UC3843 的无刷电动螺丝刀用开关电源的设计[J].丽水学院学报,2016,38(2): 92.
- [4] 陈超,陈小元,于秉田,等.陀螺感应型无刷电动螺丝刀调速控制研究[J].微特电机,2016,44(1): 59.
- [5] 郭旭,李先峰.单周控制方法在电静液作动器无刷直流电机系统中的应用[J].电机与控制应用,2017,44(5): 32.
- [6] 程启明,杨小龙,高杰,等.基于参数可变 PID 控制器的永磁无刷直流电机转速控制系统[J].电机与控制应用,2017,44(1): 18.

收稿日期: 2019-02-10