

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.014

基于混合粒子群算法的低速大转矩直驱永磁同步电机多目标优化研究

郭 鑫, 张炳义*, 冯桂宏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对潜水电泵用低速大转矩直驱永磁同步电机的优化设计问题,为了同时实现其低齿槽转矩、低转矩脉动和低频损耗,以及气隙磁密波形正弦度的优化,提出了基于混合粒子群算法的内置式永磁同步电机多目标优化有限元设计方法。在建立有限元分析模型的基础上,以永磁体尺寸、永磁体槽槽型尺寸、最小气隙长度、不均匀气隙偏心距为变量,以空载及负载情况下的齿槽转矩、转矩脉动、铁损耗、效率、气隙磁密基波幅值、气隙磁密波形正弦度作为优化目标,提出了基于权重系数的多目标优化函数。研究结果表明:基于混合粒子群优化算法的有限元设计方法具有搜索能力强、收敛速度快的优点,得到的电机设计结果与设计目标具有良好的的一致性,有限元仿真证明了所提方法的有效性和可行性。

关键词:永磁同步电机;混合粒子群算法;多目标优化;有限元分析

中图分类号:TH39;TH38;TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)11-1214-06

Multi-objective optimization of low speed high torque direct drive PMSM based on hybrid particle swarm optimization

GUO Xin, ZHANG Bing-yi, FENG Gui-hong

(School of Electrical Engineering, Shenyang University Of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at optimal designs of low speed, large torque, direct drive permanent magnet synchronous motor (PMSM) with submersible pump, in order to realize the low cogging torque, low torque ripple and low iron loss and the optimization of sine degree of air gap flux density, a multi-objective optimization finite element design method of interior PMSM based on hybrid particle swarm algorithm (HPSO) was proposed. On the basis of establishing the finite element analysis's model, the permanent magnet size, the permanent magnet slot size, the minimum air gap length, the uneven air gap eccentricity were taken as variables, under no-load and load conditions cogging torque, torque ripple, iron loss, efficiency, fundamental amplitude of air gap flux density and air gap flux density sinusoidal as optimization objectives, a multi-objective optimization function based on weight coefficient was proposed. The results show that the method based on hybrid particle swarm optimization algorithm has the advantages of strong searching ability and fast convergence speed, the obtained motor design results are in good agreement with the design goals, finite element simulation prove the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); hybrid particle swarm optimization(HPSO); multi-objective optimization; finite element analysis

0 引言

近年来,潜水电泵向大型化方向发展。潜水电泵

的功率越大意味着泵叶轮直径越大,转速则越来越低。目前所设计的大功率潜水电泵,驱动电机大都采用减速机与三相异步电动机的组合,而异步电机应用于潜

收稿日期:2017-12-11

作者简介:郭鑫(1991-),男,吉林松原人,硕士研究生,主要从事特种电机及其控制方面的研究。E-mail:xin121567395@163.com

通信联系人:张炳义,男,教授,博士生导师。E-mail:zhangby@sut.edu.cn

水电泵驱动电机时具有一些局限性,如负载率低时运行效率低、功率因数低等,同时水泵的轴功率与其转速的立方成正比,且电机选型时会留有较大裕度,导致了异步电机普遍负载率偏低。同时减速机带来的成本高、体积重量大、维修困难、振动噪声等缺点,使得采用永磁同步电机直驱系统替代传统减速机加异步电机的组合具有天然的优势。调速永磁直驱电机在低速范围下具有非常好的转矩输出特性,其结构简单、效率高、过载能力强、可靠性高,不仅可以满足潜水电泵对变频调速节能的需求,而且可以省去减速机,实现直驱。这既可以克服传统异步电机—减速机系统的各类缺陷,又可以在很大程度上提高系统的传动效率与系统运行的可靠性,同时还可降低系统的维护成本,减小整机系统的体积,从而降低了水力扩散损失。因此,对潜水电泵用调速直驱永磁电机的研究在风机泵类系统节能改造及国家节能减排等方面具有十分重要的意义。

永磁同步直驱电机具有诸多优点,但若将其用于潜水电泵中,仍需解决一些问题,如需减小齿槽转矩、纹波转矩、转矩脉动,提高长期低负荷运行状态时的效率等。

遗传算法(genetic algorithm, GA)作为一种智能型随机搜索算法^[1],具有非常强的全局寻优能力,已经广泛应用于电机的优化设计中。相比遗传算法,粒子群算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)具有记忆能力^[2],能够保留局部个体和全部种群的最优信息,局部寻优能力较强,收敛速度快,能提高运行速度。

国内外学者针对永磁电机群体智能型随机搜索算法优化设计方法进行了大量研究。文献[3]采用相对较新的人工蜂群算法对永磁无刷电机进行了设计优化,所得结果与传统遗传算法进行比较,表明人工蜂群算法在电磁和机械参数设计方面具备更强的寻优能力;文献[4]以气隙磁通密度波形畸变率为优化目标,利用谐波模型对永磁平面电机的永磁体阵列的极弧系数进行了优化设计;文献[5]提出了极间隔断 Halbach 型磁钢参数为变量,设计了以获得基波幅值极大值与正弦性畸变率极小值为多目标的混合全局优化算法;文献[6]以气隙磁通密度基波幅值和波形畸变率为优化目标,利用表面响应模型对永磁同步电机的偏心距、极弧系数和磁钢厚度等结构参数进行了多目标优化设计。

因此,本文将结合遗传算法和粒子群算法的优点,形成一种新的混合粒子群算法(hybrid particle swarm optimization algorithm, HPSO),并基于混合粒子群算法提出永磁同步电机多目标优化设计方法,以使电机齿

槽转矩、转矩脉动和气隙磁密波形等各个优化目标之间进行协调和折中,使综合性能达到最优,最后通过有限元仿真分析方法对此予以验证。

1 有限元模型

初始设计是一台 72 槽 12 极,额定功率为 132 kW,额定转速为 500 r/min 的“V”型转子磁路结构的电机。1/12 电机转子相关结构参数的标注如图 1 所示。

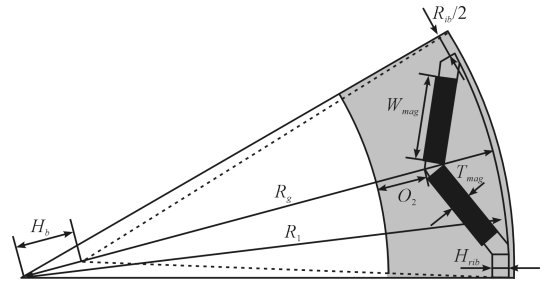


图 1 1/12 转子结构及参数

本文应用有限元软件 Maxwell 的 Matlab 优化器,调用基于 Matlab 编写的混合粒子群算法。笔者对图 1 中的转子外圆最小气隙距原点距离 R_g 、永磁体槽定圆半径 R_1 、磁桥径向长度 H_{rib} 、磁桥宽度 R_{ib} 、永磁体厚度 T_{mag} 、单块永磁体宽度 W_{mag} 、偏心距 H_b 、永磁体槽距轴面距离 O_2 等 8 个转子结构参数进行优化,预先对这些变量进行初步仿真,确定其取值范围及相互之间约束关系。

其取值范围如表 1 所示。

表 1 待优化结构参数取值范围

结构参数	取值范围/mm	结构参数	取值范围/mm
R_g	216 ~ 217	T_{mag}	8.5 ~ 12
R_1	213.7 ~ 214.7	W_{mag}	30 ~ 40
H_{rib}	6 ~ 7	H_b	0 ~ 40
R_{ib}	4 ~ 20	O_2	10 ~ 30

2 混合粒子群算法(HPSO)

标准粒子群算法先初始化一个随机子群,通过逐次迭代搜索最优解,每次更迭过程中粒子通过动态捕获个体历史最优解以及群体全局最优解来更新自己的位置和速度^[7-8]。在 D 维的目标搜索空间中,粒子群由 n 个粒子构成,其第 i 个粒子的 D 维位置矢量为 $\mathbf{x}_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,速度矢量为 $\mathbf{v}_i(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$,该粒子当前搜索到的最优位置为 $p_i(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,整个粒子群的最优位置为 $p_g(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。

其更新公式可表示为:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_g^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (p_i^k - \mathbf{x}_i^k) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + v_i^{k+1} \quad (2)$$

式中:下标*i*—粒子编号;上标*k*—迭代次数; ω —惯性因子,表示粒子对当前速度的继承度; c_1, c_2 —学习因子,表征粒子自我认知以及社会认知的能力; r_1, r_2 — $[0, 1]$ 内均匀分布的随机变量,用来保持群体的多样性。

2.1 惯性权重的自适应调整策略

惯性权重是粒子群算法中较为重要的一个参数,它可以控制算法的探索和开发能力,它决定了对粒子当前速度继承的多少^[9]。采用非线性动态递减惯性权重的策略, ω 能够自适应变化,可以很好地协调前期搜索与后期开发,即:

$$\omega_i = (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \left(\frac{t_i}{t_{\text{max}}} \right)^2 + (\omega_{\text{start}} + \omega_{\text{end}}) \left(\frac{2t_i}{t_{\text{max}}} \right) + \omega_{\text{start}} \quad (3)$$

式中: $\omega_{\text{start}}, \omega_{\text{end}}$ — ω 的最大值和最小值; t_i, t_{max} —当前迭代代数和最大迭代代数。

2.2 遗传操作的实现

粒子群算法与选择算子的结合的实现是在原来的粒子群群体的最优值 p_g 的选取上,根据所有粒子的适应度的大小给每个粒子赋予一个被选中的概率,然后依据概率对这些粒子进行选择,被选中的粒子作为 p_g ,这样就保证粒子群的多样性^[10]。

粒子群算法与杂交算子的结合:算法运行过程中根据适应度的大小,粒子之间可以两两杂交,使得算法可以在算法的运行过程中引入新的粒子^[11]。新个体的位置由下式来计算:

$$\begin{aligned} x_1(t') &= \mathbf{rand} * x_1(t) + (1 - \mathbf{rand}()) * x_2(t) \\ x_2(t') &= \mathbf{rand} * x_2(t) + (1 - \mathbf{rand}()) * x_1(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $x_1(t), x_2(t)$ —代表被选择进行杂交操作的粒子; $\mathbf{rand}()$ —在 $[0, 1]$ 区间取值的随机向量。

后代的速度公式为:

$$\begin{aligned} v_1(t') &= \frac{v_1(t) + v_2(t)}{|v_1(t)| + |v_2(t)|} |v_1(t)| \\ v_2(t') &= \frac{v_1(t) + v_2(t)}{|v_1(t)| + |v_2(t)|} |v_2(t)| \end{aligned} \quad (5)$$

其中,由 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 进行杂交运算产生新的速度并最后取代原速度矢量。总的来说,经过杂交运算不仅使前代的优良信息能够被后代充分继承,而且也极大地提高了群体多样性和收敛速度。

全局最优点 p_g 吸引所有粒子,使粒子聚集,种群的多样性丢失是不可避免的。因此引入变异算子:测试所有粒子与当前最优的距离,当距离小于一定的数值的时候,可以随机选出一定百分比的粒子进行随机初

始化,依照变异概率对粒子的一个或多个维数重新赋初值,让这些粒子重新寻找最优值,使种群达到不断提高多样特性的目的,防止算法因陷入局部僵局而过早出现不成熟收敛。

HPSO 优化算法具体操作方法如下:

- (1) 设定优化参数(种群规模和选择、交叉、变异算子以及惯性权重、迭代次数、学习因子等);
- (2) 初始化种群的初始位置和速度,并计算适应度值;
- (3) 将粒子当前位置作为每个粒子的个体最优值 p_i ,最好的作为全局最优值 p_g ;
- (4) 根据种群个体历史最优位置和种群当前最优位置,更新个体速度和位置,生成新种群;
- (5) 计算粒子更新后的适应度值,根据适应度值排序;
- (6) 将选择、交叉、变异算子应用到粒子群;
- (7) 评估每个粒子的适应度值并排序;
- (8) 寻找粒子群的个体最优 p_i 和 p_g ;
- (9) 如果结果满足迭代停止条件,得到最优解,否则转回步骤(4),继续寻优,直至满足迭代停止条件为止。

3 空 载

本研究对空载情况下的齿槽转矩峰峰值 T_{pkpk} 、感应反电动势基波有效值 V_{pl} 、感应反电动势总谐波畸变率 THD_{pV} 、铁耗 P_{Fe} 等4个目标进行优化,建立起目标函数。其中,对气隙磁密波形的优化通过以反电动势波形做为优化目标,间接优化气隙磁密波形。本研究设置各优化目标的权重系数,得出空载情况下的总成本函数计算公式。

3.1 目标函数的建立

永磁同步电机具有非线性、强耦合的特点。不同于单目标问题,多目标寻优往往难以找到最优解,对其中一个目标的改善往往会降低其他目标,所以本文将多目标函数转化为带权重系数的单目标函数。为了防止误差过大,采用欧氏距离表示各目标计算值与目标值之间的误差,即:

$$\begin{cases} f_1 = (T_{\text{pkpk}} - T_{\text{pkpk}0})^2 \\ f_2 = (V_{\text{pl}} - V_{\text{pl}0})^2 \\ f_3 = (\text{THD}_{\text{pV}} - \text{THD}_{\text{pV}0})^2 \\ f_4 = (P_{\text{Fe}} - P_{\text{Fe}0})^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中,带“0”标的为设计时设定的各目标期望值,无“0”标的为实际有限元计算所得的计算值。

当计算值越趋近于期望值,上式各项的值就越趋于 0。之所以采用目标值期望值而不是目标最大值或最小值的形式来设置目标函数,主要目的为了防止优化过程中某个或某几个目标的指标过高,而导致其他目标指标过低的现象发生,另外应使所有目标保持相同数量级。目标期望值的设置使得各优化目标均能在所预期的合理范围内变化,从而找到更合适的优化方案。

多目标寻优是通过定义成本函数来实现的,通过将各目标加权,按照各优化目标的重要程度赋予各目标函数一个权重系数 w_i (w_i 越大的目标函数越重要) 再将各目标函数与权重系数 w_i 的乘积相加来计算总成本函数,成本函数最小点对应最优点,这样就把多目标问题转化为单目标问题。

总成本函数计算公式如下:

$$cost = - \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n w_i f_i} \quad (7)$$

式中: f_i —第 i 个目标函数表达式; w_i —第 i 个目标的权重系数; n —目标函数的个数。

3.2 优化及结果

优化变量及成本函数均定义好之后,分别设置 HPSO 的 5 个主要参数:粒子群规模为 100,粒子自我认知学习因子为 1.49,粒子社会认知学习因子为 1.49,设 $\omega_{start} = 0.9, \omega_{end} = 0.4$,其他参数保持为默认值。然后运行 Matalab 优化器,得出优化方案。

优化方案参数如表 2 所示。

表 2 初始设计与 HPSO 优化方案的参数对比

参数	初始设计 1	初始设计 2	HPSO 优化
R_g	216.5	216.5	216.55
R_l	214.2	213.95	213.53
H_{Rib}	7	7	6.31
R_{ib}	20	8	6.95
T_{mag}	9.5	10	10.93
W_{mag}	36	38	36.8
H_b	0	25	28.87
O_2	20	20	22.22

优化结果如表 3 所示。

表 3 初始设计与 HPSO 优化方案的结果对比

参数	初始设计 1	初始设计 2	HPSO 优化
$T_{pkpk}/(N \cdot m)$	98.7	15.68	6.7
V_{pi}/V	190.58	190.94	190.22
$THD_{pV}/(\%)$	0.37	0.32	0.23
P_{Fe}/W	603.28	623.62	626.18

初始设计 1 采用的是均匀气隙,初始设计 2 采用的是不均匀气隙。对比初始设计 1 与 2,采用不均匀气隙时增加了 11.1% 的永磁体用量,铁耗 P_{Fe} 增加了 3.4%,但齿槽转矩峰值 T_{pkpk} 减少了 84.1%,感应反

电动势总谐波畸变率 THD_{pV} 减少了 18.9%。可见,采用不均匀气隙后虽然增加了一些永磁体用量,但可以有效地降低了齿槽转矩,优化反电动势波形;但同时也会因齿部磁密增加而导致铁耗有所增加。

初始设计 2 与 HPSO 优化方案齿槽转矩比较如图 2 所示。

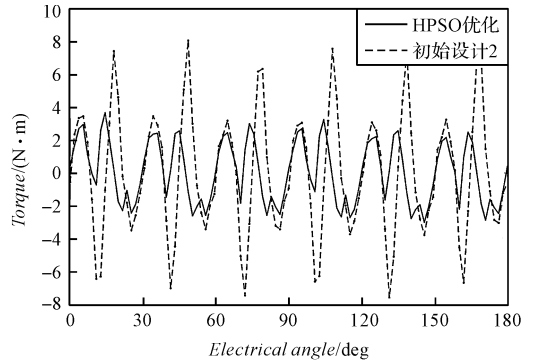


图 2 初始设计 2 与 HPSO 优化齿槽转矩比较

相比于初始方案 2, HPSO 优化方案的齿槽转矩峰值 T_{pkpk} 减少了 57.3%,感应反电动势基波有效值 V_p 减少了 0.4%、感应反电动势总谐波畸变率 THD_{pV} 减少了 28%、但永磁用量增加了 5.8%、铁耗 P_{Fe} 增加了 0.4%。

初始设计 1 与 HPSO 气隙磁密波形比较和谐波分析比较如图(3,4) 所示。

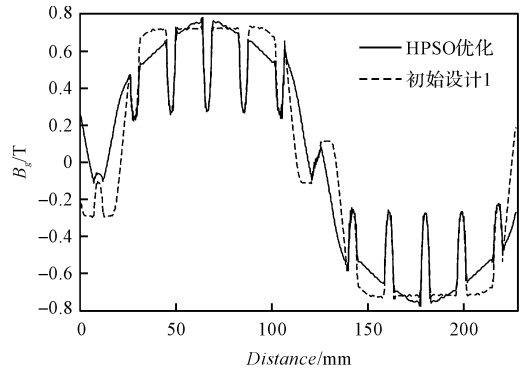


图 3 初始设计 1 与 HPSO 气隙磁密波形比较

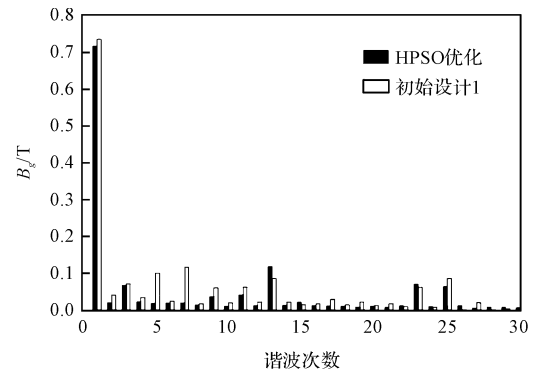


图 4 初始设计 1 与 HPSO 气隙磁密谐波分析比较

图(3,4) 中,而相比与初始方案 1,优化后的气隙磁密基波幅值有所降低,但是 5 次和 7 次谐波得到有效的削弱。本文并未对永磁体用量进行严格的成本控制,

而是进行了性能约束,所以 HPSO 寻优方向是在保证反电动势幅值及控制铁耗的条件下,使齿槽转矩及反电动势波形最优化。

HPSO 多目标优化的收敛过程如图 5 所示。

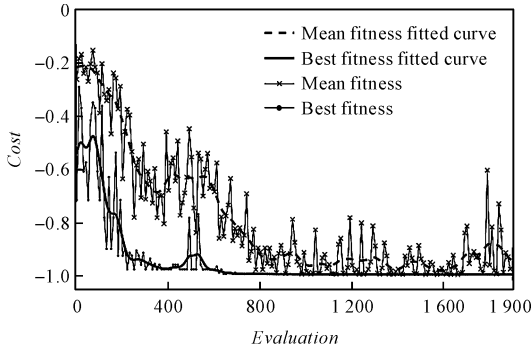


图 5 空载情况 HPSO 多目标优化收敛过程

从图 5 中可以看出:进化后期,平均适应度值比较稳定的贴近最优适应度值,HPSO 可以很快地收敛于多目标成本函数的最优点,得到的优化设计结果与设计目标具有良好的一致性。

4 负 载

本研究对图 1 中的转子外圆最小气隙距原点距离 R_g 、永磁体槽定圆半径 R_1 、磁桥径向长度 H_{Rib} 、磁桥宽度 R_{ib} 、永磁体厚度 T_{mag} 、单块永磁体宽度 W_{mag} 、偏心距 H_b 、永磁体槽距轴面距离 O_2 、铁心长度 L 等 9 个转子结构参数进行优化。

4.1 目标系数的建立

以空载情况的优化结果为初始种群,对负载情况下的转矩脉动系数 K_T 、感应反电动势基波有效值 V_{p1} 、感应反电动势总谐波畸变率 THD_{pV} 、铁耗 P_{Fe} 、效率 η 等 4 个目标进行优化,其中转矩脉动系数 K_T 定义为:

$$K_T = \frac{T_{pk2pk}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (8)$$

建立目标函数,表达式如下:

$$\begin{cases} f_1 = (K_T - K_{T0})^2 \\ f_2 = (T_{avg} - T_{avg0})^2 \\ f_3 = (V_{p1} - V_{p10})^2 \\ f_4 = (THD_{pV} - THD_{pV0})^2 \\ f_5 = (P_{Fe} - P_{Fe0})^2 \\ f_6 = (\eta - \eta_0)^2 \end{cases} \quad (9)$$

设置各优化目标的权重系数,得到负载情况下的总成本函数表达式。

4.2 优化及结果

负载情况下 HPSO 仿真优化后的优化方案参数及优化结果如表 4 所示。

表 4 初始设计与 HPSO 优化方案的参数与结果对比

参数	初始设计 1	初始设计 2	HPSO 优化
R_g	216.5	216.5	216.18
R_1	214.2	213.95	213.38
H_{Rib}	7	7	6.07
R_{ib}	20	8	19.81
T_{mag}	9.5	10	10.36
W_{mag}	36	38	35.04
H_b	0	25	20.07
O_2	20	20	27.48
L	390	395	396.8
$T_{avg}/(kN \cdot m)$	2.28	2.2	2.33
$K_T/\%$	15.4	20.5	4.26
V_{p1}/V	190.8	190.5	190.8
$THD_{pV}/\%$	0.81	1.52	0.47
P_{Fe}/W	899.6	848.1	775.1
$\eta/\%$	97.16	97.14	97.36

对比初始设计 1、2 与 HPSO 优化方案的参数与结果,HPSO 优化后的方案平均转矩相 T_{avg} 对初始设计 1、2 分别增加了 2.2% 和 5.9%;转矩脉动系数 K_T 分别降低了 72.3% 和 79.2%;反电动势总谐波畸变率 THD_{pV} 分别减少了 42% 和 69%;铁耗 P_{Fe} 分别降低了 13.8% 和 8.6%;效率 η 分别增加了 0.2% 和 0.23%。而永磁体用量相对初始设计 1 增加了 8%,相对初始设计 2 减少了 4%。经过优化计算后转矩脉动明显降低,相对于其他参数,转矩脉动系数变化幅度较大,因此在成本函数中具有较大的权重。同时成本函数中未将永磁体用量成本设计为目标函数,而是进行了性能的约束,所以寻优的方向是在保证性能的前提下,使转矩脉动达到最小值。

负载情况 HPSO 多目标优化收敛过程如图 6 所示。

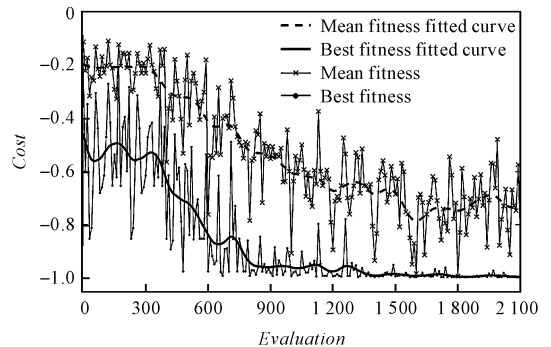


图 6 负载情况 HPSO 多目标优化收敛过程

由图 6 所示的收敛过程可知:因为负载情况的变量和目标函数多,造成收敛过程相对空载情况缓慢,平均适应度值变化波动大。

5 实验及结果分析

根据 HPSO 优化结果制造样机,为了验证优化后的反电动势波形,在未安装蜗壳和叶轮时,本研究采用

异步电机对样机进行拖动试验。

实测的反电动势波形与仿真波形比较如图 7 所示。

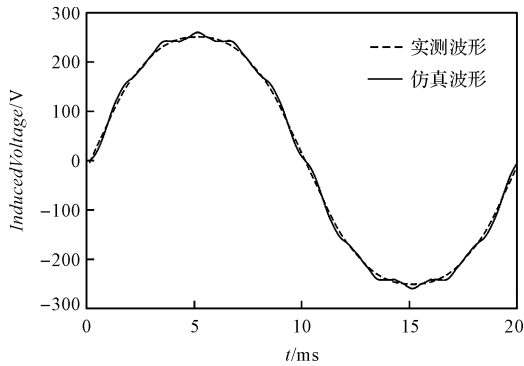


图 7 拖动试验反电动势实测波形与仿真波形比较

图 7 说明:优化后反电动势仿真波形与实测波形基本相符,验证了设计方法的有效性。

本文进行了样机的负载实验,在不同的供电频率下,测取不同转速下的负载特性曲线。控制扬程或流量的变化,记录电机的电压、电流、功率因数及潜水电泵的效率。

将样机测试结果与同型号潜水电泵实验数据进行对比可知,不同运行状态下效率提高 1.1% ~ 7.6%。

6 结束语

本文以齿槽转矩最小、反电动势总谐波畸变率最小、铁耗最小、转矩脉动最小、效率最大等作为空载和负载条件下的优化目标,对潜水电泵用大功率低速大转矩直驱永磁同步电机的转子结构相关参数进行优化,对比了采用均匀气隙和不均匀气隙的两个初始方案与 HPSO 优化后的方案,得出以下结论:

(1) 本文所提的 HPSO 是结合 PSO 和 GA 的一种优化方法,其既能克服 GA 局部寻优能力差、收敛速度慢的缺陷,也能弥补 PSO 的全局搜索能力,避免早熟;

(2) 有限元优化后的方案各方面指标能够很好的符合设计期望值,证明了所提方法的有效性和可行性;

(3) 本文提出的基于有限元的优化方法对实际设计具有一定理论意义和工程实用价值,可以提高设计效率。

由于本文只是重点对转子结构参数进行了性能最优化研究,后续研究工作将增设定子结构参数为变量,以定子齿部磁密及材料成本等作为约束条件,研究权

重系数对优化结果的影响。

参考文献 (References):

- [1] CHEN Wei, GONG Qing wu, WANG Tao, et al. A real parameter genetic algorithm application in parameters identification for synchronous generator [C]. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Phoenix: IEEE, 2009.
- [2] EMARA H M, ELSHAMY W, BAHGAT A. Parameter identification of induction motor using modified particle swarm optimization algorithm [C]. International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge: IEEE, 2008.
- [3] BRAIWISH N Y, ANAYI F J, FAHMY A. Design optimization comparison of BLPM traction motor using bees and genetic algorithms [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville: IEEE, 2015.
- [4] MIN W, ZHANG M, ZHU Y, et al. Analysis and optimization of a new 2-D magnet array for planar motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(5): 1167-1171.
- [5] 范坚坚, 吴建华, 沈磊, 等. 极间隔断 Halbach 型磁钢的永磁同步电机多目标优化设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 53-58.
- [6] 范坚坚, 吴建华, 黎宪林, 等. 永磁同步电动机磁钢的多目标微粒群算法优化 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 173-178.
- [7] 郭亮, 卢琴芬, 叶云岳. 基于粒子群算法的直线振动发电机优化设计 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(4): 442-446.
- [8] 王成刚, 晏芙蓉, 何凡, 等. 永磁同步电机的振动控制分析 [J]. 机械, 2016(11): 1-3, 9.
- [9] 宋俊材, 董菲, 赵吉文, 等. 基于填充粒子群算法的双次级永磁同步直线电机优化设计 [J]. 电气工程学报, 2015, 10(8): 56-61.
- [10] JUANG C F. A hybrid of genetical gorithm and particle swarm optimization for recurrent network design [J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Part B, 2004, 34(2): 997-1006.
- [11] LEE C C, LEE S H, KIM J W, et al. Intelligent memetic algorithm using GA and guided MADS for the optimal design of interior PM synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2011, 47(5): 1230-1233.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

郭鑫, 张炳义, 冯桂宏. 基于混合粒子群算法的低速大转矩直驱永磁同步电机多目标优化研究 [J]. 机电工程, 2018, 35(11): 1214-1219.

GUO Xin, ZHANG Bing-yi, FENG Gui-hong. Multi-objective optimization of low speed high torque direct drive PMSM based on hybrid particle swarm optimization [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(11): 1214-1219.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>