

# 异步起动永磁同步电机的多目标优化设计

杨林国

(安徽职业技术学院,安徽 合肥 230011)

**[摘要]** 异步起动永磁同步电机由于其高效率、高功率因数及良好的起动性能,被广泛应用于大起动转矩场合. 针对油田抽油机场合,设计一台 30 kW 切向转子结构异步起动永磁同步电机,以效率与起动转矩为优化目标,利用响应面法建立隔磁桥尺寸、转子槽尺寸及永磁体尺寸与效率和起动转矩之间的响应模型,利用布谷鸟算法寻求响应模型的最优转子尺寸,得到满足抽油机场合的高效率、高起动转矩的电机转子参数. 建立优化前后的电机有限元分析模型,对比分析优化前后样机的起动性能,仿真结果证明优化方法的精确性与合理性.

**[关键词]** 异步起动,永磁电机,布谷鸟算法,响应面,效率

**[中图分类号]** TP23 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)03-0055-08

## Multi-objective Optimal Design of the Asynchronous Starting Permanent Magnet Synchronous Motor

Yang Linguo

(Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230011, China)

**Abstract:** With high efficiency, high power and good startability, the asynchronous starting permanent magnet synchronous motor is widely used in large starting torque. Aiming at the situation of pumping unit, the thesis designs an asynchronous starting permanent magnet synchronous motor with 30 kW, efficiency and starting torque as the optimization objective. Making use of response surface methodology to establish response model between the sizes of magnetic separation bridge, rotor slot and permanent magnet and efficiency and starting torque, taking advantage of Cuckoo search method to find optimal rotor size of response model. The situation of pumping unit with high efficiency and the parameter of the electric manufacturing of the high starting torque are obtained. The establishment of the motor element analysis model is to compare and analyze the starting function before and after optimization, so the simulation result proves the precision and rationality of the optimization method.

**Key words:** asynchronous starting, permanent-magnet motor, Cuckoo search method, response surface, efficiency

近年来,国家对节能要求越来越高,异步电机逐渐被永磁电机所代替. 而在抽油机、起重机等大起动转矩场合,永磁电机的起动转矩较小,不能满足大起动转矩的要求,异步起动永磁同步电机综合异步电机高起动转矩及永磁电机高效率的优点,成为大起动转矩场合的研究热点<sup>[1-2]</sup>. 与传统异步电机相比,异步起动永磁同步电机具有损耗小、效率高、功率因数高等优点,且其转速的变化不随负载的波动而波动,提高了其运行的稳定性. 其结构相当于普通内置式永磁电机与异步电机的结合,为了解决起动能力差的缺点,在普通内置式永磁电机的内置式永磁体上方加入异步电机的鼠笼导条,以此来增加电机的起动能力. 因此,异步起动永磁同步电机不仅具有感应电机优良的起动能力,且具有永磁电机的高效率与高功率因数<sup>[3-7]</sup>. 鉴于此类优点,异步起动永磁同步电机广泛应用于工业与家用电器,如起重机、抽油机、空调和冰箱的压缩机等. 其良好的带载能力可以直接连接到电网而无需额外的电力电子开关器件<sup>[8]</sup>.

虽然异步起动永磁同步电机综合了永磁电机与异步电机各自的优点,但其也存在起动过程中永磁体的退磁风险、齿槽转矩较大、起动电流较大等问题. 鉴于此,国内外专家学者对其进行了深入的分析,文献[8]在考虑磁路饱和的前提下,分别建立抽油机专用异步起动永磁同步电机和异步电机的有限元分析模

型,分析了异步起动永磁同步电机的优越性,并通过实验,验证了方法的准确性.文献[9]针对异步起动永磁同步电机起动过程中产生的大电流,导致永磁体产生不可逆退磁,利用二维有限元分析方法,分析永磁体最大退磁点出现的规律.文献[10]通过场路结合的方法,对异步起动永磁同步电机的起动性能做了深入分析,并通过实验证明该计算方法的准确性.文献[11]分析异步起动永磁同步电机产生的齿槽转矩对电机的运行影响,提出改变定子齿宽、不等槽口宽配合等方法来减小齿槽转矩的新方法.上述相关文献针对异步起动永磁同步电机存在的退磁、起动性能及齿槽转矩等共性的问题进行了分析,并提出相关的解决方法,对其优化的文献尚不多见.

在电机设计的过程中,为了提高电机的性能,满足运行条件需对其进行优化分析.文献[12]为了提高有限元法的运行效率,利用响应面法构建电机的优化模型,在此基础上,利用粒子群算法进行寻优处理,寻求电机的最优结构参数.文献[13]以减小永磁风力发电机的定位转矩为目标,利用支持向量机的方法,对电机的定转子参数进行寻优计算.文献[14-17]均以齿槽转矩为优化目标,利用粒子群、响应面等优化算法对永磁电机的定子槽、转子永磁体等参数进行优化分析.目前,相关文献对电机优化设计,仅仅是针对单一目标的优化设计,在油田抽油机的场合,为了防止“大马拉小车的现象”,对于异步起动永磁同步电机,效率与起动转矩均是考核的目标,针对单一目标的优化设计会导致电机效率低下、永磁体退磁等一系列风险.因此,需要寻求多目标的优化方法,使得电机总体性能达到要求.

本文为满足油田抽油机的需要,综合异步电机与永磁电机的相关参数,设计一款 30 kW 异步起动永磁同步电机,从提高电机的效率及起动转矩、减小起动电流的优化角度出发,首先利用响应面法建立永磁体宽度( $L$ )、鼠笼条深度( $H$ )及隔磁桥尺寸( $O_2$ )与效率及起动转矩的响应面模型,在此基础上,利用布谷鸟算法(Cuckoo search, CS)对构建的模型进行寻优处理,确定电机的最优转子结构参数.在电磁性能分析的基础上,搭建电机的试验平台,并进行实验分析和验证,为此类电机的多变量多目标优化设计奠定一定的理论基础.

## 1 电机的稳定性分析

为了满足大起动转矩、低起动电流的需要,异步起动永磁同步电机的转子上既存在永磁体,又存在鼠笼条.此类电机的定子结构与普通的永磁电机类似,但在起动的过程中,其转子磁场由永磁磁场与转子鼠笼条共同产生,其转矩产生机理复杂.因此,对电机进行转矩分析时,可将电机分成永磁电机与感应电机,当电机起动时,定子产生的旋转磁场切割鼠笼导条产生起动转矩;而电机进入同步转速后,永磁体产生的磁场与定子旋转磁场共同作用产生电磁转矩,其表示式为<sup>[4]</sup>:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m i_q - (L_q/L_d - 1) L_d i_d]. \quad (1)$$

式中,  $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $D$  轴与  $Q$  轴电流,  $\lambda_m$  为永磁体产生的磁链,  $P$  为磁极数,  $L_q$  与  $L_d$  分别为交直流电感.其中,

$$\begin{cases} L_d = \frac{\psi_0 \cos \alpha - \psi_a}{i_d}, \\ L_q = \frac{\psi_0 \sin \alpha}{i_q}. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知,永磁磁链的大小、交直流电感等参数对电机的电磁转矩产生较大的影响,进而对电机的起动性能产生一定的影响.

异步起动永磁同步电动机的效率为输出功率与输入功率的比值.其中,输出功率与各类损耗之和为输入电功率,损耗主要包括铁芯损耗、定子绕组铜损耗、转子绕组损耗等.可用式(3)表示电机的效率:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \left[ 1 + \frac{1}{\frac{\omega_r}{3I^2 R} (T/I^2)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

式中,  $I$  为线电流,  $T$  为电磁转矩,  $R$  为绕组的电阻,  $\omega_r$  为电机的角速度,  $P_{out}$  为输出功率,  $P_{loss}$  为电机的损耗.由式(3)可知,电机的效率受电机的电磁转矩、定子绕组电流的影响较大.

为了满足油田抽油机起动转矩及效率的要求,设计一款 30 kW 异步起动永磁同步电机,样机初始尺寸如表 1 所示,为了提高绕组因数,减小谐波含量,电机采取 72 槽 8 极的整数槽分布绕组的结构,定子绕组的每极每相槽数为 3,转子槽数为 56 槽。

由式(1)、式(2)可知,选取永磁体的宽度、转子的槽深、隔磁桥的相关尺寸为优化目标,如图 1 所示,永磁体宽度未标出。

表 1 电机的初始尺寸

Table 1 The original size of the motor

参数	数值	参数	数值
额定功率	8	永磁体宽度/mm	42
定子槽数	72	永磁体厚度/mm	12
定子外径/mm	400	叠压系数	0.97
转子外径/mm	283.6	转子外径/mm	85
铁心长度/mm	225	额定电压/V	380

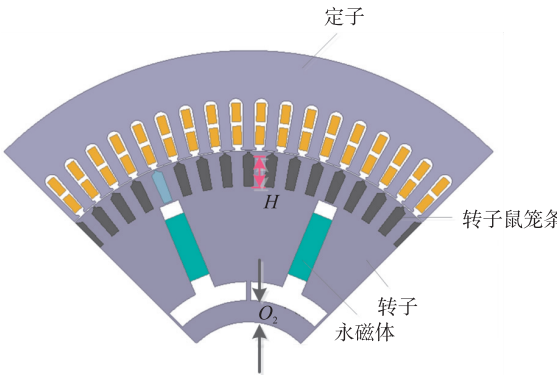


图 1 电机结构参数示意图

Fig. 1 The parameter diagram of the motor structure

2 电机的优化分析

2.1 响应面法概述

响应面法(response surface methodology, RSM)是应用于工程和化工领域的一种常见算法,当目标函数的自变量较少时,利用响应面法可较快的寻出最优解<sup>[14-15]</sup>. 对于抽油机用异步起动永磁同步电机,在保持定转子外径及电机体积不变的前提下,提升电机的效率与起动转矩具有重要的实际意义. 文献[7-8]指出,转子的相关参数对电机的效率与起动性能影响较大,以效率与起动转矩为优化目标,对电机转子结构相关参数进行多变量优化,其运算流程图如图 2 所示。

本文选用  $O_2$ 、 $L$ 、 $H$  为自变量,以异步起动永磁同步电机的效率和起动转矩为响应值. 通过改变自变量的值,来寻求最佳响应面,可表示为:

$$y=f(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_k).$$
 (4)

式中, $y$  表示响应值, $x$  表示自变量, $k$  表示自变量的个数,本文中  $k$  取 3.

根据式(4)可知,自变量与响应值之间不是简单的线性关系,而从异步起动永磁同步电机的本身属性出发,也难以得到其简单的表达式关系,更加难以寻找三者之间的最优组合. 因此,需要选取一近似的相关函数,利用最小二乘法,拟合近似函数,得到精确的二阶响应面模型来代替自变量与响应值之间的真实函数关系. 选取的二阶响应面模型为:

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^k\beta_ix_i+\sum_{i=1}^k\beta_{ii}x_i^2+\sum_{i=1}^k\sum_{j=1}^k\beta_{ij}x_ix_j+\varepsilon.$$
 (5)

式中, $\beta_0$  为回归系数, $\beta_i$  为线性系数, $\beta_{ii}$  为平方项系数, $\beta_{ij}$  为交互项系数, $\varepsilon$  为误差, $k$  为自变量个数, $y$  表示响应值, $x$  表示自变量。

2.2 响应面模型的求取

从响应面法的相关文献综述可知,响应面中通常采取 Box-Behnken 设计和 CCD 设计(中心复合设计)两种拟合曲面方法<sup>[14]</sup>. 本文寻求最优的转子结构,使得异步起动永磁同步电机的效率最高,起动性能最优. 为多目标优化,因此,选用 CCD 设计的方法. 利用

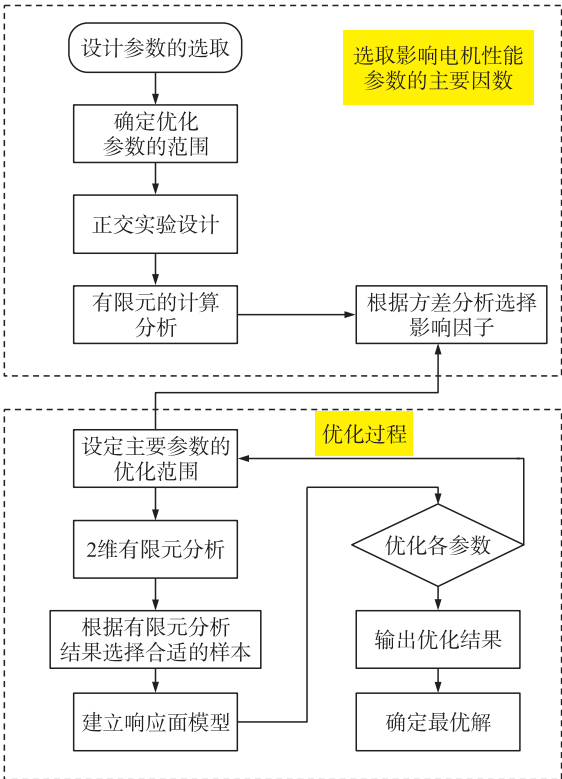


图 2 响应面法实施流程

Fig. 2 The implementation process of the response surface method

Design-Expert 软件,选取合适的转子结构参数范围,得到 16 个优化样本点如表 2 所示. 软件自动生成了 16 个样本点,利用有限元分析软件 Maxwell,建立每个点的二维有限元计算模型,计算每个实验点的起动转矩与效率,将其幅值计为实际的响应值. 隔磁桥与转轴之间的距离(隔磁桥距离) $O_2$ 、永磁体宽度  $L$  以及转子鼠笼条的深度(转子槽深) $H$  的变化量分别取为: $8\text{ mm}\leq O_2\leq 14\text{ mm}$ , $30\text{ mm}\leq L\leq 42\text{ mm}$ , $15\text{ mm}\leq H\leq 20\text{ mm}$ ,其中  $x_1$  为隔磁桥与转轴之间的距离; $x_2$  为永磁体宽度; $x_3$  为转子鼠笼条的深度.

表 2 CCD 设计响应面计算值  
Table 2 CCD Calculated value of designing the response surface

序号	$O_2/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	效率/%	起动转矩/(N·m)
1	11	38	15.5	94.615 2	1 049.740
2	8	34	18	96.008 0	927.491
3	16.05	38	15.5	94.613 7	1 049.800
4	14	34	18	96.020 2	927.538
5	11	38	15.5	94.615 2	1 049.740
6	11	38	17.7	96.001 8	940.907
7	5.95	38	15.5	94.616 5	1 049.690
8	14	42	18	95.924 8	927.503
9	8	34	13	94.892 5	1 200.360
10	8	42	18	95.920 0	927.455
11	14	34	13	94.894 5	1 200.440
12	11	44.73	15.5	95.699 0	1 049.700
13	11	38	11.3	94.851 2	1 322.910
14	14	42	13	94.787 7	1 200.380
15	8	42	13	94.787 3	1 200.310
16	11	31.27	15.5	94.752 4	1 049.780

根据有限元分析软件的计算结果,计算各估计参数的回归系数,得到异步起动永磁同步电机的效率  $\eta$  与起动转矩  $T_{st}$  拟合模型

$$\eta=128.841\ 63+0.008\ 35x_1+0.992\ 1x_2-2.295\ 2x_3-9.375\times10^{-5}x_1x_2+2.43\times10^{-4}x_1x_3+3.575\times10^{-4}x_2x_3-3.727\ 9\times10^{-4}x_1^2+0.013\ 283x_2^2+0.081\ 83x_3^2.$$

(6)

$$T_{st}=2\ 451.487+0.486\ 629x_1+0.886\ 12x_2-128.708x_3-9.375\times10^{-5}x_1x_2-9.166\ 7\times10^{-4}x_1x_3+4.875\times10^{-4}x_2x_3-0.020\ 819x_1^2-0.011\ 821x_2^2+2.388x_3^2.$$

(7)

对已经得到的效率与起动转矩的响应面数学模型进行方差分析,得到的计算结果如表 3 所示. 表中, $P$  代表失拟项,其值越小代表模型越精确, $F$  代表对模型整体的检验系数,对某一个偏回归系数的检验.

由表 3 可知,两模型的  $P$  值均小于 0.001,说明拟合度较好,统计学意义较高. 失拟项的  $P$  值分别为 0.079 3 和 0.082 4,均大于 0.05,说明失拟项不显著,实验误差较小. 两模型的 AdjR-Squared 分别为 0.934 5

和 0.859 3,均大于 0.85,说明响应值与自变量之间线性关系显著,数据规律能被模型较好地反映,同时各因素之间的关系能被此模型充分地表述.

2.3 响应面模型各因素间交互作用分析

图 3 所示为异步起动永磁同步电机的效率与起动转矩响应面模型各个因素之间的交互作用影响. 由图 3(a)可知,当转子槽深为 17 mm 时,永磁宽度对效率影响明显,随着永磁体宽度的增加效率呈先减小后增大的趋势,而随着隔磁桥距离的增加效率基本维持不变. 由图 3(b)可知,永磁体宽度与隔磁桥距离对起动转矩的交互作用较大,随着永磁体宽度的增加,起动转矩呈先增大后减小的趋势. 随着隔磁桥距离的增大,起动转矩呈先增大后减小的趋势.

表 3 响应面法效率与起动转矩分析结果

Table 3 Efficiency of the response surface method and analysis result of starting torque

效率判定系数	数值	转矩判定系数	数值
R-Squared	0.966 7	R-Squared	0.927 0
AdjR-Squared	0.934 5	Adeq Precisor	0.859 3
模型 $P$ 值	<0.001 0	模型 $P$ 值	<0.001 0
失拟项 $P$ 值	0.079 3	失拟项 $P$ 值	0.082 4
$F$ 值	6.400 0	$F$ 值	5.370 0



图 4 所示为异步起动永磁同步电机的转子槽深与永磁体宽度对响应值的影响. 由图 4(a) 可知, 转子槽深对效率影响明显, 随着转子槽深的增加, 效率呈先减小后增大的趋势, 而永磁体宽度对效率的影响较小, 呈缓慢上升的趋势. 图 4(b) 可看出, 转子槽深对起动转矩的影响很大, 随着转子槽深的增大, 电机的起动性能得到明显的提高. 因为随着转子槽深的增加, 转子鼠笼绕组的电阻增大, 与优化前相比相当于串联了电阻, 增加了电机的起动性能.

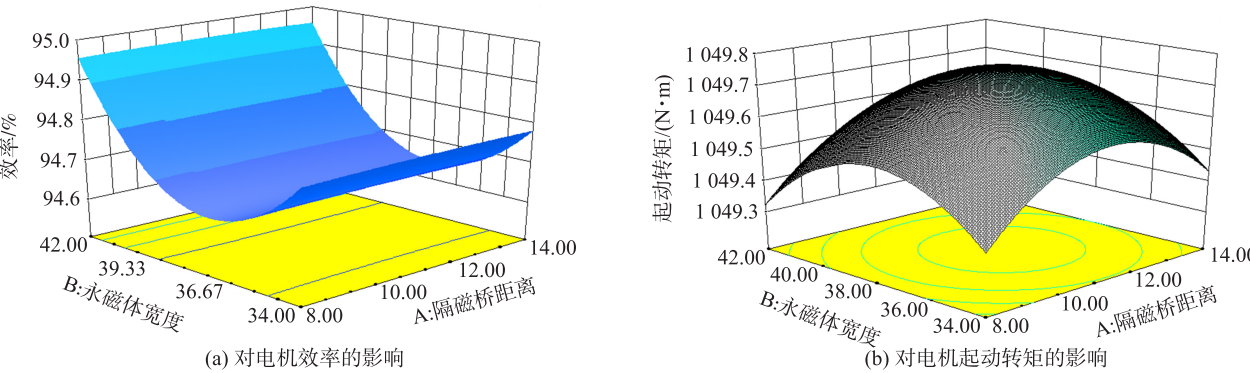


图 3 永磁体宽度与隔磁桥距离对响应值的影响

Fig. 3 Influence of permanent magnet width and the distance of magnetic barrier bridge on response value

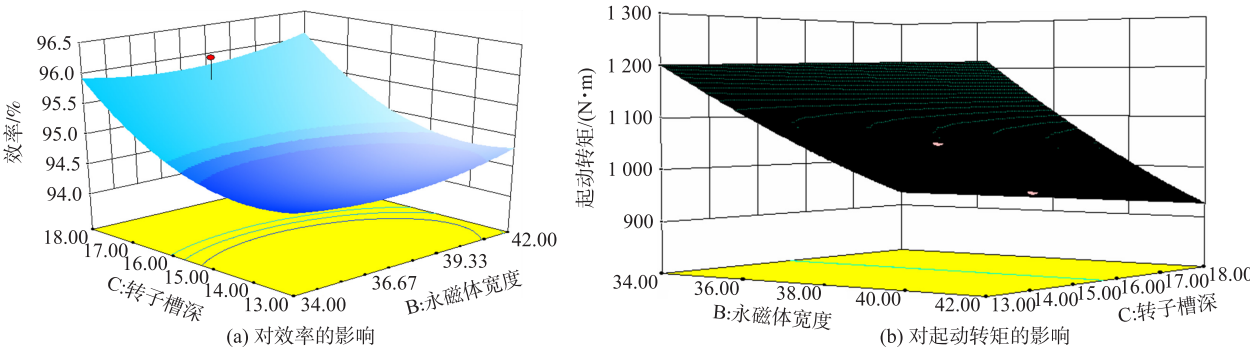


图 4 转子槽深与永磁体宽度对响应值的影响

Fig. 4 Influence of rotor slot depth and permanent magnet width on response value

2.4 CS 算法寻优

响应面模型不能直接得到使得异步起动永磁同步电机效率最高、起动性能最优的  $O_2$ 、 $L$  及  $H$  的值. 基于响应面法的优化模型(式(6)、式(7)), 采用 CS 算法对该拟合模型进行寻优. 目前有遗传算法和粒子群算法等优化算法优化电机参数, 但将 CS 算法应用于电机优化中尚未见报道, 它是以布谷鸟寻窝产卵过程为基础的一种新型工程优化算法, 于 2009 年被首次提出. 文献[16-17]比较了 CS 算法与其它智能算法进行比较研究, 表明 CS 算法具有高效、高成功率等优点.

CS 算法具体的寻优方法如下: (1) 随机生成  $n$  个鸟巢的初始位置为  $Y_i(i=1, 2, 3, 4, 5, \dots)$ , 与此同时设置最大迭代次数、最小误差要求、维数及发现概率  $P_a$ . (2) 计算每个鸟巢的目标函数值的同时保存最优函数值. (3) 记录最优函数值并更新下一鸟巢的位置. (4) 将保存的最优函数值与上代最优函数值相比较, 选出最优的函数值. (5) 将随机数概率与发现概率  $P_a$  进行比较, 若随机概率大于发现概率, 则对鸟巢位置进行改变, 反之不变. (6) 若未达到迭代次数或最小误差的要求则返回步骤(2). (7) 寻求出最优函数值. 因此, 利用 RSM 法构建异步起动永磁同步电机的转子结构参数与效率、起动转矩之间的响应面模型, 利用 CS 算法寻优出最佳的目标函数, 其优化的流程如图 5 所示.

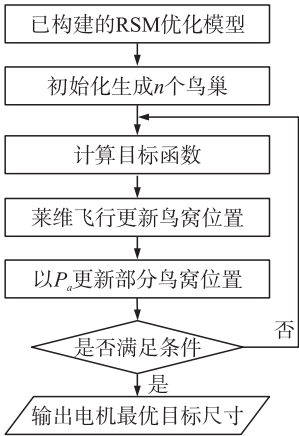


图 5 CS 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of CS calculated method

CS 算法的相关参数设置:CS 算法种群规模为  $N=50$ , 最大迭代次数为 150, 被发现概率为  $P_a=0.2$ , 得到优化后的结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 优化后异步起动永磁同步电机的效率从 94.61% 提高至 96.22%, 效率提高了 1.61%。起动转矩由 926.54 N·m 提高至 1 071.21 N·m, 电机的电磁性能与起动性能均得到提高。

表 4 优化前后参数对比

Table 4 The parameter comparison before and after optimization

参数	优化前	优化后
$O_2/\text{mm}$	10	12.45
$L/\text{mm}$	35	38.34
$H/\text{mm}$	16	17.52
效率/%	94.61	96.22
起动转矩/(N·m)	926.54	1 071.21

### 3 优化结果验证

为了验证响应面模型及优化算法的正确性与有效性, 取优化前后电机的尺寸建立有限元仿真模型进行验证。去优化后隔磁桥距离为 12.45 mm, 永磁体宽度为 38.34 mm, 转子槽深为 16.56 mm, 利用有限元分析软件 Maxwell, 建立优化前后电机的二维有限元分析模型, 对优化前后电机进行有限元分析, 得到相关的电磁特性如图 6 所示。

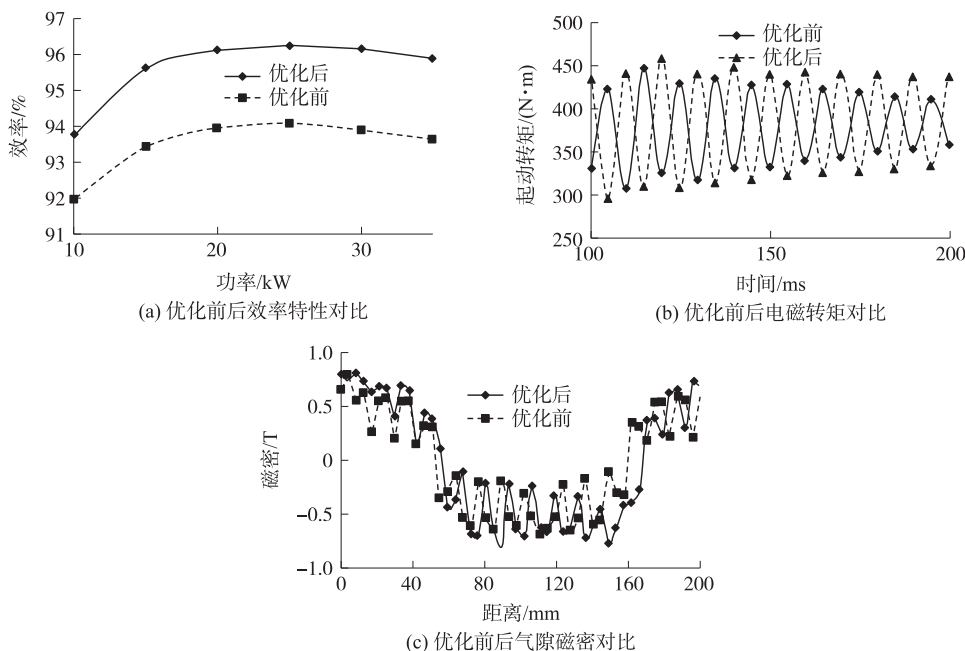


图 6 优化前后电磁性能对比

Fig. 6 The electromagnetic performance comparison before and after optimization

由图 6(a) 可知, 随着负载的增大, 优化前后电机的效率均呈先增大后减小的趋势, 优化后, 异步起动永磁同步电机的最大效率从 94.1% 上升至 96.5%, 其计算的结构与有限元分析的结果基本吻合, 在合理误差范围内。由图 6(b) 可知, 优化后, 异步起动永磁同步电机的电磁转矩由 416 N·m 上升为 448 N·m, 增大的原因为转子槽深的增加以及永磁体宽度的增加。进一步分析可知, 优化前电机的气隙磁密幅值大约为 0.73 T, 优化后气隙磁密幅值大约为 0.8 T, 提高了约 0.07 T, 空载反电势得到一定的提升。

### 4 样机实验结果

基于以上的设计与优化分析, 试制一台 30 kW 抽油机用异步起动永磁同步电机原理样机。其中, 样机定子外径为 400 mm, 转子外径为 279.4 mm, 气隙长度为 1.2 mm。搭建样机的实验平台, 分别对电机进行空载与负载实验, 实验平台如图 7 所示。

实验分空载实验与负载实验两个部分进行。空载实验时, 利用联轴器将样机与直流电机相连, 拖动样机空载运行, 用交流电流表测量三相电流, 电压表测量加到样机的端电压, 利用最小电流法测其空载反电势, 得到的结果如表 5 所示。利用最小电流法测得的样机空载反电势大约为 214 V, 而仿真得到的样机空载反电势大约为 221 V, 误差为 3.2%, 误差在合理范围内。

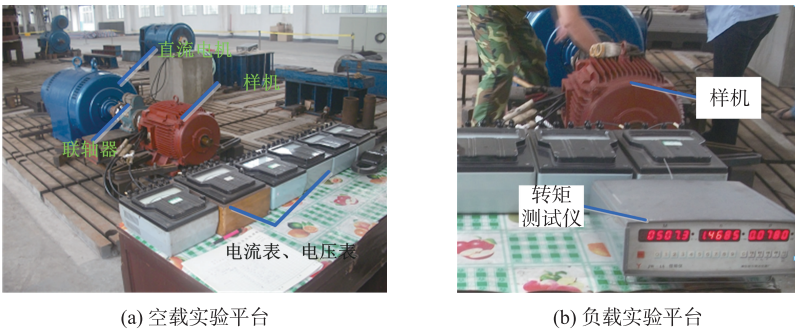


图 7 样机测试平台  
Fig. 7 Test platform of the model motor

负载实验中时,将电机的端电压保持不变保持电机的端电压不变,通过电气控制柜子改变电机的输入功率,得到电流与输出转矩的变化如表 6 所示. 当样机的输入功率达到额定功率 30 kW 左右时,样机输出的额定功率为 384.6 N·m,与仿真结果 381 N·m 基本相符,误差仅仅为 1.2%,表明优化算法与有限元分析结果合理可靠.

表 5 空载试验三相电压电流值

Table 5 No-load test of three-phase voltage and current value				
U/V	420	400	384	380
I/A	22.5	11.3	3.6	4.5
U/V	376	366	360	340
I/A	3.5	2.9	8.2	21.5

表 6 负载实验结果

Table 6 Load test result				
端电压/V	378	378	378	378
电流/A	19.2	34.5	34.3	49.6
转矩/(N·m)	126.5	251.5	251.9	384.6
功率/kW	10.2	19.9	20.1	30.2

5 结语

本文提出一种基于 RSM-CS 的异步起动永磁同步电机的多目标优化设计算法,以转子结构参数为多目标变量,以效率与起动转矩为优化目标函数,对电机进行优化设计分析,得到如下结论:

- (1) 转子参数对异步起动永磁同步电机的效率与起动性能产生较大影响,选择合适的参数可有效的提高电机的效率与起动性能.
- (2) 应用响应面法建立隔磁桥、永磁体宽度及转子槽深与效率和起动转矩之间的响应面模型,应用布谷鸟算法寻求最优的电机结构参数,简化了电机的设计流程.
- (3) 当隔磁桥距离为 12.45 mm,永磁体宽度为 38.34 mm,转子槽深为 17.52 mm 时,电机的效率提高 1.61%,电磁转矩增加 31.8 N·m,起动转矩增加 15.6%.
- (4) RSM 与 CS 相结合的优化方法,为电机的多目标、多变量的优化设计提供了一种新的方法和思路.

[参考文献] (References)

[1] 王秀和,杨玉波,朱常青. 异步起动永磁同步电动机[M]. 北京:机械工业出版社,2009:159-161.  
WANG X H,YANG Y B,ZHU C Q. The asynchronous starting permanent magnet synchronous motor[M]. Beijing:China Machine Press,2009:159-161.(in Chinese)

[2] 卢伟甫,刘明基,罗应立,等. 自起动永磁同步电机的起动过程退磁磁场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(15):53-60.  
LU W F,LIU M J,LUO Y L,et al. Demagnetization field analysis and calculation for line-start permanent magnet synchronous motor during start process[J]. Proceedings of CSEE,2011,31(15):53-60.(in Chinese)

[3] FEI W,LUK P C K,MA J,et al. A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor[J]. IEEE transactions on magnetics,2009,45(10):4724-4727.

[4] 王晨. 抽油机用异步起动永磁同步电机的设计与电磁特性分析[D]. 赣州:江西理工大学,2013.  
WANG C. Analysis of magnet characteristics and design of pumping unit with asynchronous starting permanent magnet synchronous motor[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology,2013.(in Chinese)

- [5] KIM K C, KIM K, KIM H J, et al. Demagnetization analysis of permanent magnets according to rotor types of interior permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE transactions on magnetics, 2009, 45(6): 2799–2802.
- [6] DU Y, CHAU K T, CHENG M, et al. Design and analysis linear stator permanent magnet vernier machines[J]. IEEE transactions on magnetics mag, 2011, 47(10): 4219–4222.
- [7] 王臻卓, 朱成俊, 李长乐, 等. 异步起动永磁同步电机的设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(2): 18–21.  
WANG Z Z, ZHU C J, LI C L, et al. Analysis and design of line-start permanent magnet synchronous motor[J]. Electric machine and control application, 2016, 43(2): 18–21. (in Chinese)
- [8] KANG G H, HUR J, NAM H, et al. Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method[J]. IEEE transactions on magnetics, 2003, 39(3): 1488–1491.
- [9] 唐旭, 王秀和, 李莹, 等. 异步起动永磁同步电机起动过程中永磁体退磁研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 961–970.  
KANG X, WANG X H, LI Y, et al. Analysis of line-start permanent magnet synchronous motor during start process[J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(4): 961–970. (in Chinese)
- [10] 刘秀君, 李伟力, 陈文彪. 三相异步起动永磁同步电动机起动特性[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(3): 37–38.  
LIU X J, LI W L, CHEN W B. Analysis starting characteristics of three-phase line-start permanent magnet synchronous motor[J]. Electric machine and control, 2006, 10(3): 37–38. (in Chinese)
- [11] 唐旭, 王秀和, 田蒙蒙, 等. 基于改变定子齿槽参数的异步起动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 1–8.  
TANG X, WANG X H, TIAN M M, et al. Study of reduction methods of cogging torque in line-start permanent magnet synchronous motor by changing the parameters of stator teeth and slots[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(23): 1–8. (in Chinese)
- [12] 刘慧娟, 傅为农. 一种参数化网格剖分方法及其在电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 125–130.  
LIU H J, FU W N. A parameterized mesh generation and refinement methods for finite element magnetic field computation and its application in optimal design of electric motors[J]. Proceedings of CSEE, 2012, 32(21): 125–130. (in Chinese)
- [13] 杨少平, 何山, 王维庆, 等. 基于 SVM-CS 算法的风力发电机定位力矩优化研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(6): 854–860.  
YANG S P, HE S, WANG W Q, et al. Optimization research of cogging torque in wind driven generator based on SVM-CS algorithm[J]. Renewable energy resources, 2016, 34(6): 854–860. (in Chinese)
- [14] 王莉莉, 陈德运, 于晓洋, 等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器与仪表学报, 2015, 36(3): 515–522.  
WANG L L, CHEN D Y, YU X Y, et al. Sensor optimization design in electrical capacitance tomography system[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2015, 36(3): 515–522. (in Chinese)
- [15] HAO L, LIN M Y, XU D, et al. Cogging torque reduction of axial field flux-switching permanent magnet machine by adding magnetic bridge in stator tooth[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2014, 24(3): 503–506.
- [16] 李煜, 马良. 新型元启发式布谷鸟搜索算法[J]. 系统工程, 2012, 30(8): 64–69.  
LI Y, MA L. A new metaheuristic Cuckoo search algorithm[J]. System engineering, 2012, 30(8): 64–69. (in Chinese)
- [17] 兰少峰, 刘升. 布谷鸟搜索算法研究综述[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(4): 1063–1066.  
LAN S F, LIU S. Overview of research on Cuckoo search algorithm[J]. Computer engineering and design, 2015, 36(14): 1063–1066. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]