

采用 Kriging 模型的开关磁阻电机开通角与关断角寻优方法

毛帅¹, 陶建峰^{1,2}, 余宏淦¹, 刘成良^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 200240, 上海)

摘要: 针对传统密集采样方法获得采用角度位置控制的开关磁阻电机最优开通角与关断角所需实验次数多、耗时长,效率低的问题,提出一种采用 Kriging 模型的最优开通角和关断角实验求取方法来减少实验采样次数,提高寻优效率。首先,通过少量的初始样本点建立开通角和关断角与电机振动加速度之间的预测模型;之后,根据得到的预测模型有针对性地在最优开通角和关断角可能出现的区域进行采样计算;最后,当区域缩小到满足精度要求的大小后,对该区域进行密集采样,从而快速准确发现最优开通角和关断角。实验结果表明,基于 Kriging 预测模型获取相同开关磁阻电机最优开通角和关断角(误差小于1%以内)所需样本数仅为传统的密集采样方法的12.4%,计算时间缩短了62.8%。因此,所提方法能显著提高开关磁阻电机的开通角和关断角寻优实验效率。

关键词: 开关磁阻电机;Kriging 模型;开通角;关断角;角度位置控制

中图分类号: TM352 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010011 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0094-07



OSID 码

An Optimization Method for Turn-on and Turn-off Angles of Switched Reluctance Motors Using Kriging Model

MAO Shuai¹, TAO Jianfeng^{1,2}, YU Honggan¹, LIU Chengliang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An experimental method for turn-on and turn-off angles based on Kriging prediction model is proposed to solve the problem that the traditional intensive sampling method requires many experiments, long time and low efficiency to obtain optimal switching angles of switched reluctance motor controlled by angle position control strategy. First, a model to predict the relationship between the switching angles and the motor vibration is established via a small number of sample points. Then, prediction results from the model are used to the sampling and calculation in the area where the optimal switching angles probably exist. Finally, when the area is reduced to meet an accuracy requirement, intensive sampling is conducted in the area so as to rapidly and exactly obtain the optimal switching angles. Experimental results show that the number of samples used by the proposed method to obtain the optimal switching angle (error is less than 1%) of the same switched reluctance motor is only 12.4% of that of the traditional intensive sampling method, and the time-consumption of calculation reduces by 62.8%.

收稿日期: 2020-04-18。 作者简介: 毛帅(1997—),男,硕士生;陶建峰(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51935007)。

网络出版时间: 2020-07-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200708.1815.006.html>

Therefore, the proposed method significantly improves the optimization efficiency of the switching angles.

Keywords: switched reluctance motor; Kriging model; turn-on angle; turn-off angle; angle position control

随着清洁能源产业和电机技术的发展,电机在工程实践中的应用日益广泛^[1]。开关磁阻电机(SRM)因其结构简单、制造成本低、调速范围广等优点被广泛应用于新能源汽车、高速电梯等领域^[2]。然而,开关磁阻电机的转矩脉动导致的振动与噪声问题,一直成为限制开关磁阻电机发展的瓶颈之一^[3-4]。在采用角度位置控制策略时,由于开关磁阻电机在控制过程中存在控制变量多且具有强耦合作用的特点,使得开关磁阻电机在设定某一输出参数后,存在不同开通角和关断角控制参数的组合均可以实现控制要求,即对同一控制要求存在多组绕组开通角和关断角的组合可以选择,因此存在对最优开通角和关断角组合的寻找问题。同时,应该注意到,由于磁链的饱和特性,使得开关磁阻电机系统具有很强的非线性,难以建立开通角与关断角和电机输出参数间的精准模型^[5]。Sozer 等通过建模和仿真从解析曲线拟合的角度确定最佳效率关断角^[6]。Xu 等基于开关磁阻电机低电感区非线性电感模型,提出了一种优化开通角和关断角的解析方法,从开关磁阻电机的非线性模型和电动力学方程出发,推导出开关磁阻电机的最佳开通角^[7]。Zan 等针对开关磁阻电机严重的非线性特性,采用小波神经网络方法建立了开关磁阻电机的非线性仿真模型,以最大转矩为目标优化了系统的启闭角,以最大输出功率和最优效率为目标优化了系统的功率启闭角,得到了这两种状态下的最佳开通角和关断角^[8]。曲兵妮等采用有限元方法计算了开关磁阻电机的电磁特性,分析了小电感区的非线性特点,建立了电机小电感区内的非线性数学模型,推导了最优开通角的解析式^[9]。朱龙等利用差分进化算法的寻优能力,将其应用到转矩分配函数开通角和关断角在线寻优过程中,直接将转矩脉动作为优化目标来确定最佳开通角和关断角^[10]。但是,通过建模仿真求解结果往往与真实值偏差较大,且只能针对某一特定型号开关磁阻电机,普适性较差。目前在实验阶段,通常采用大量实验密集取样的方法确定最优的开通角与关断角的组合,由于开通角与关断角变化范围大,且需要尽量减小实验步长以提高精度,因此需要进行大量实验,但是其中大量样本点远远偏离最优组合,造成

实验资源与时间的浪费,寻优效率低。本文提出一种通过少量实验数据建立 Kriging 预测模型、预测判断最优组合在可行域中出现的小范围区域、进而在该区域精准地进行实验从而获得开关磁阻电机最优开通角与关断角的寻优方法。

1 开关磁阻电机

1.1 开关磁阻电机结构及工作原理

图 1 为三相 6/4 极开关磁阻电机的典型结构。开关磁阻电机为双凸极结构电机,转子上无绕组,仅由硅钢片叠压制成,定子上绕有集中绕组,径向相对的绕组串联,构成一组。开关磁阻电机的工作原理为磁阻最小原理,即磁通总是要沿着磁阻最小的路径闭合,因此具有一定形状的铁芯在移动到最小磁阻位置时,必然使主轴线与磁场轴线重合,由此产生驱动电机转子旋转的电磁力矩^[11]。

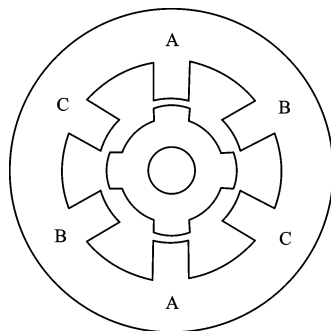


图 1 三相 6/4 极开关磁阻电机典型结构

图 2 为三相 6/4 极开关磁阻电机的工作原理,图中, A、B、C 三相在定子上绕有集中绕组,在 a 位置时刻,如果 B 相通电,则根据磁阻最小原理,距离 B 相最近的转子凸极与 B 相吸紧,逐渐达到两者对齐,到达 b 位置;接着 C 相通电,根据磁阻最小原理,距离 C 相最近的转子凸极与 C 相吸紧,逐渐达

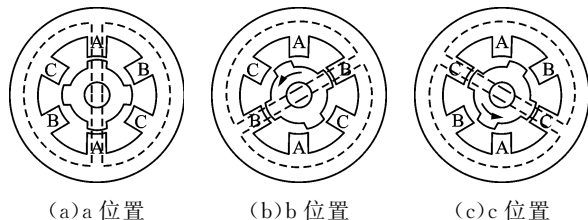


图 2 三相 6/4 极开关磁阻电机工作原理

到两者对齐,到达图 c 位置。因此,如果在某一时刻绕组按照 B—C—A 顺序通电,则转子会以逆时针方向连续旋转,反之,若通电顺序为 C—B—A,则转子会沿着顺时针方向转动。由此可以看出,开关磁阻电机的旋转方向只与通电顺序相关,而与通电电流的方向无关^[12]。

1.2 开关磁阻电机角度位置控制

角度位置控制(APC 控制)是通过改变串联绕组的开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ,从而改变相电流的波形,进而控制输出的电磁转矩和电机转速的控制策略^[13-14]。开关磁阻电机中 I_{max} 、 L_{max} 为最大电流、最大电感, I_{min} 、 L_{min} 为最小电流、最小电感, θ_1 为电感上升位置,则电机在 APC 控制下的电流、电感波形如图 3 所示。

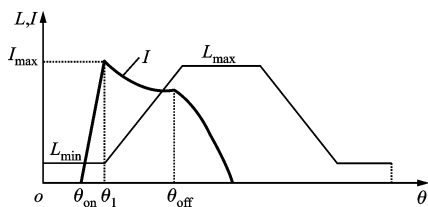


图3 APC控制下的电流、电感波形

通过改变电机各相导通区间的开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 调节各相绕组电流,进而可以控制电机的输出转矩和转速^[15]。由于 APC 控制方式并未对绕组电流进行控制,因此容易造成电机转速波动较大问题,常用于高速阶段。APC 控制方式的优化方式通常包括 3 种方式^[16]:①确定开通角 θ_{on} ,优化关断角 θ_{off} ;②确定关断角 θ_{off} ,优化开通角 θ_{on} ;③同时优化开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 。3 种方式中难度最大的就是同时优化开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ,由于没有准确的控制模型,往往采用数值分析的手段寻找最佳的开通角和关断角组合,本文正是针对此种优化方式提出了新的优化策略。

2 Kriging 模型基本原理

Kriging 模型是一种基于随机统计过程的预测方法。已知 m 组实验观测数据,记自变量组为 $S_m = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$,因变量组 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$,其中 $x_i \in \mathbf{R}^n$, $y_i \in \mathbf{R}$,通过已知的观测数据求出未知点 x 处的 y 值。首先需要将未知点 x 处真实值表达为

$$y(x) = f(x)\beta + z(x) \quad (1)$$

式中: $f(x) \in \mathbf{R}^p$, p 为回归函数中的基函数个数。

基函数一般为多项式形式, $z(x)$ 为随机误差,且 $z(x)$ 服从均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布。基于

Kriging 模型构建预测模型 $\hat{y}(x) = w^T Y$,其中 $w \in \mathbf{R}^m$,通过对其中参数的合理选择求得 y 的最优线性无偏估计 $\hat{y}(x)$ 。两个模型之间的误差可由下式计算

$$\sigma^2(x) = E((\hat{y}(x) - y(x))^2) \quad (2)$$

根据无偏估计的条件有

$$E(\hat{y}(x) - y(x)) = \sum_{i=1}^n w_i E(y_i) - E(y(x)) = 0 \quad (3)$$

根据估计误差方差极小化原则有

$$\min\{E((\hat{y}(x) - y(x))^2) \mid E(\hat{y}(x) - y(x)) = 0\} \quad (4)$$

根据式(2)~(4)可构造 Kriging 模型如下

$$y(x) = \sum_{j=1}^p \beta_j f_j(x) + z(x) \quad (5)$$

式中: $f_j(x)$ 为回归函数的基函数; β_j 为基函数的系数。

根据估计误差方差极小化原则,得到最优线性无偏估计为

$$\hat{y}(x) = r_x^T R^{-1} Y + (f - F^T R^{-1} r_x)^T \cdot (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y \quad (6)$$

由于 $F\beta \approx Y$,可得 β 的最小二乘估计为

$$\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y \quad (7)$$

综合式(2)~(7)可得

$$\hat{y}(x) = f^T \hat{\beta} + r_x R^{-1} (Y - F \hat{\beta}) \quad (8)$$

由此可以得到各预测位置的预测值 $\hat{y}$ ^[17-20]。

3 实验过程

实验选用三相 12/8 极开关磁阻电机,实验装置如图 4 所示,电压、电流信号通过传感器和采集卡实时测量输出结果。作为本实验的测试量的振动信号由安装于电机外壳的加速度传感器通过采集卡实时测量输出。开关磁阻电机在恒速模式下运行,使用 PID 控制器,通过改变开通角与关断角采集不同参数下的电机振动信号,本文的控制系統如图 5 所示。

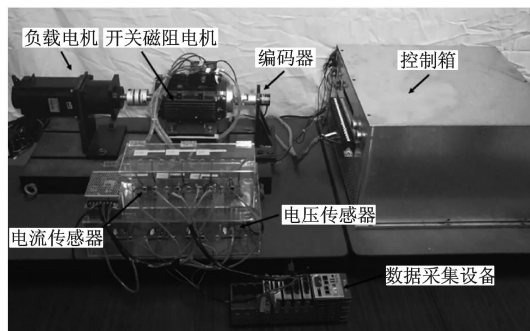


图4 实验装置

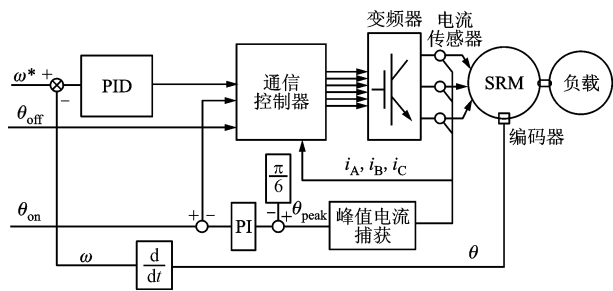


图 5 控制系统

实验在开通角为 $90^{\circ}\sim 162^{\circ}$ 、关断角为 $3^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 的控制空间内进行数据采集,使用 Kriging 模型进行最优开通角和关断角参数的求取,这里采用使振动加速度 a 最小者即为最优开通角和关断角的评价标准。优化算例可以表示为

$$\min -a$$
$$\text{s. t. } 3^{\circ} \leq \theta_{\text{off}} \leq 51^{\circ}; 90^{\circ} \leq \theta_{\text{on}} \leq 162^{\circ} \quad (9)$$

实验首先采集适当数量的初始样本点建立第 1 次预测模型,之后根据第 1 次预测模型的结果确定新增样本点的采样位置,从而建立第 2 次预测模型。每一次新增样本点采样位置的确定都依据上一次预测模型的结果,即依据第 n 次预测模型确定第 $n+1$ 次采样位置,从而建立第 $n+1$ 次预测模型。重复上述过程,直到采样范围缩小到适当大小时,对该范围进行密集采样从而获得较高精度的预测结果。根据 Kriging 预测模型对初始样本点的要求,决定采集 25 个初始样本点,采用均布采点的策略,在开通角为 $90^{\circ}\sim 162^{\circ}$ 范围内以 18° 为步长采点,在关断角为 $3^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 范围内以 12° 为步长采点,共获得 25 个样本点的振动加速度数据,如表 1 所示。将获得的数据作为初始样本点代入,获得第一次预测模型如图 6、图 7 所示。

表 1 初始样本点振动加速度

θ_{off} / $^{\circ}$	$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$				
	$\theta_{\text{on}}=90^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=108^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=126^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=144^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=162^{\circ}$
3	0.195 90	0.246 43	0.163 25	0.387 36	0.077 53
15	0.194 95	0.156 37	0.564 56	0.737 56	0.067 48
27	0.295 98	0.115 48	0.250 42	0.544 90	0.123 22
39	0.690 44	0.279 18	0.752 89	0.673 81	0.234 35
51	0.525 20	0.917 28	0.995 71	0.937 53	0.577 43

图 6 为第 1 次预测模型的三维曲面,其中箭头指向的标记点为当前模型的最小值所在位置。从图 7 可以看出,最小值可能的出现区域有两处,分别为开通角为 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、关断角为 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的范围和开通角为 $155^{\circ}\sim 162^{\circ}$ 、关断角为 $3^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的范围。根

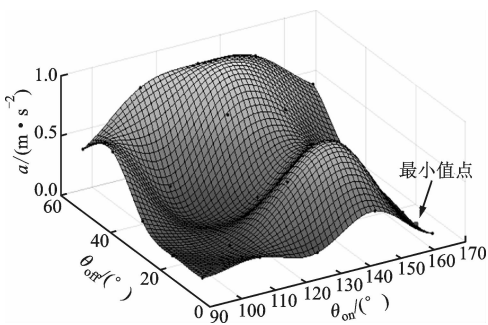


图 6 第 1 次预测模型

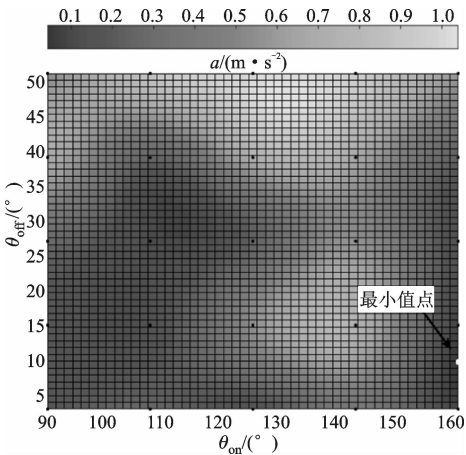


图 7 第 1 次预测模型俯视图

据加点原则,在两处内增加采样点,重新建立预测模型如图 8、图 9 所示。新增采样点数据见表 2。

表 2 新增样本点振动加速度

θ_{off} / $^{\circ}$	$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$				
	$\theta_{\text{on}}=108^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=111^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=114^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=159^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=162^{\circ}$
6				0.102 00	0.121 25
9				0.084 57	0.121 45
12				0.044 52	0.085 89
15				0.116 09	0.067 48
27	0.115 48	0.240 21	0.333 50		
30	0.112 96	0.274 10	0.301 14		
33	0.273 08	0.249 86	0.324 93		

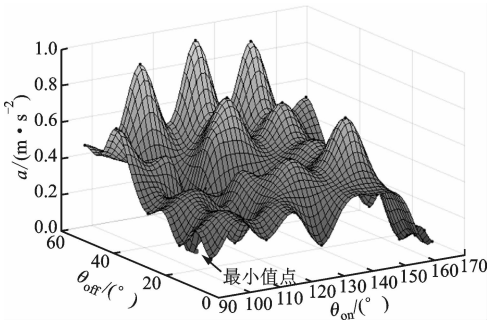


图 8 第 2 次预测模型

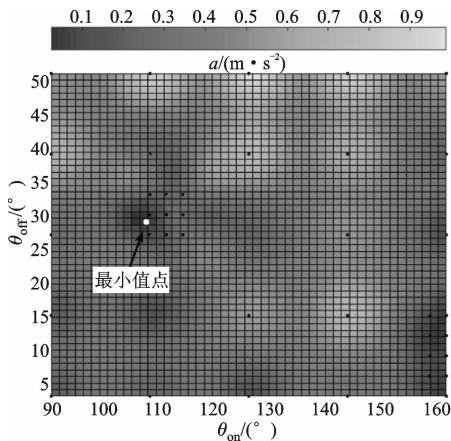


图 9 第 2 次预测模型俯视图

可以看出,在对两处可能出现最小值的区域内补充采样点,重新建立预测模型后,发现最小值出现区域为开通角为 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、关断角为 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的范围。

可以发现前后两次模型结果不一致,第 1 次预测模型将最小值预测在了开通角为 $155^{\circ}\sim 162^{\circ}$ 、关断角为 $3^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的范围,分析认为,这是由于该范围处于取样边界上导致的。当样本数量较少时,模型受极端数值的样本影响较大,且边界点更容易受其附近的样本数据影响,并且由于振动幅值在数值上相对接近,而恰巧此处的预测数值略小于开通角为 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、关断角为 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的范围,因此在第 1 次预测模型中出现偏差。下一步对开通角为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 、关断角为 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的范围进行密集采样,进一步精准预测最小值的出现位置,建立新的预测模型如图 10、图 11 所示,采样数据见表 3。

表 3 密集样本点振动加速度

$\theta_{\text{off}}/(^{\circ})$	$a/(m \cdot s^{-2})$			
	$\theta_{\text{on}}=102^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=105^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=108^{\circ}$	$\theta_{\text{on}}=111^{\circ}$
24	0.170 60	0.069 68	0.173 35	0.162 52
27	0.167 65	0.083 67	0.115 48	0.240 21
30	0.240 61	0.044 23	0.112 96	0.274 10
33	0.353 45	0.173 78	0.273 08	0.249 86
36	0.273 68	0.405 58	0.144 64	0.233 70

建立第 3 次密集采样后的预测模型,如图 12 所示。由图 12 可见,最小值出现在开通角为 105.06° 、关断角为 30.24° 的位置,此结果即预测模型得出的此次试验中的最优开通角和关断角组合,由图 13 可以看出,在此点附近,振动能量均接近最小值,因此得出结论最优开通角和关断角将出现在开通角为 $104^{\circ}\sim 106^{\circ}$ 、关断角为 $29^{\circ}\sim 31^{\circ}$ 范围内。为验证预

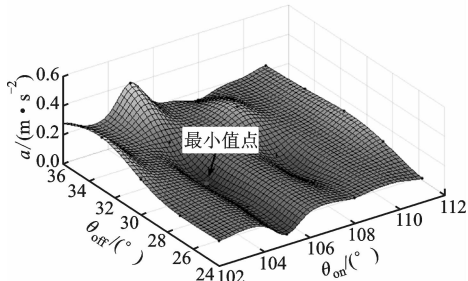


图 10 第 3 次预测模型

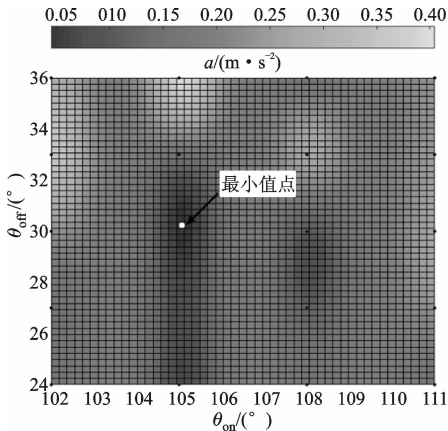


图 11 第 3 次预测模型俯视图

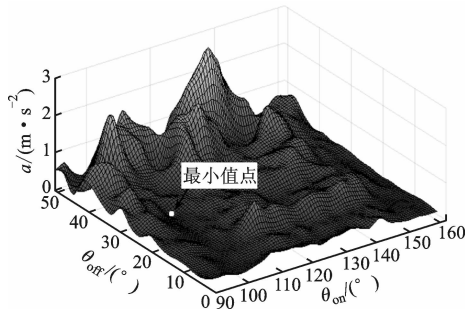


图 12 密集采样预测模型

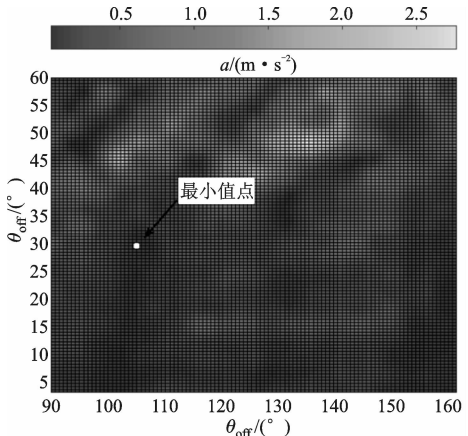


图 13 密集采样预测模型俯视图

测模型的结果准确性,在本实验取值范围内,即在开通角为 $90^{\circ}\sim 162^{\circ}$ 、关断角为 $3^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 的取值空间对

振动幅值进行密集数据采集,决定采集 500 个样本点来寻找最优的开通角和关断角取值。

密集采样与 Kriging 模型实验结果对比如表 4 所示,可见,在密集采样得到的结果中,最优的开通角和关断角参数为开通角 105°、关断角 30°,这与 Kriging 预测模型的预测结果对比,开通角偏差了 0.06%,关断角偏差了 0.80%,因此可以认为该结果验证了本文方法的准确性与高效性。

表 4 2 种方法的实验结果对比

方法	样本 总数	计算时间 /s	θ_{on} /(°)	θ_{off} /(°)
密集采样	500	0.950 911	105	30
Kriging 模型	62	0.354 019	105.06	30.24
偏差			0.06%	0.80%

4 结 论

本文介绍了一种基于 Kriging 预测模型的开关磁阻电机开通角和关断角寻优方法。使用少量的样本点建立开通角和关断角与电机振动之间的预测模型,根据预测结果有针对性地在最优开通角和关断角可能出现的区域进行采样计算,从而能够快速获得最优开通角和关断角。通过实验验证可以得出结论:本方法仅使用 62 个样本点就能成功预测出使该型号电机振动幅值最小的开通角和关断角最优组合,通过与 500 个采样点得出的密集采样结果对比,发现最优开通角和关断角偏差不超过 1%,计算时间缩短了 62.8%,验证了本文方法的准确性与高效性。

参考文献:

[1] 吴红星,嵇恒,倪天,等. 新型开关磁阻电机发展综述 [J]. 微电机, 2011, 44(1): 78-83.
WU Hongxing, JI Heng, NI Tian, et al. Summary of novel switched reluctance motor development [J]. Micromotors, 2011, 44(1): 78-83.

[2] 孙玉坤,袁野,黄永红,等. 磁悬浮开关磁阻电机及其关键技术发展综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 1-8.
SUN Yukun, YUAN Ye, HUANG Yonghong, et al. Development of the bearingless switched reluctance motor and its key technologies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 1-8.

[3] 左曙光,刘明田,胡胜龙. 考虑铁芯磁饱和的开关磁阻电机电感及转矩解析建模 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 118-125.

ZUO Shuguang LIU Mingtian, HU Shenglong. Analytical modeling for inductance and torque of switched reluctance motor considering iron core magnetic saturation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 118-125.

[4] 宋金龙,刘勇智,周政,等. 中低速开关磁阻电机转矩优化策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 83-90.
SONG Jinlong, LIU Yongzhi, ZHOU Zheng, et al. Torque optimization of medium-low speed switched reluctance motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 83-90.

[5] CAO Xin, ZHOU Jingxing, LIU Congyu, et al. Advanced control method for single-winding bearing less switched reluctance motor to reduce torque ripple and radial displacement [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1533-1543.

[6] SOZER Y, TORREY D A. Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(3): 395-401.

[7] XU Y Z, ZHONG R, CHEN L, et al. Analytical method to optimise turn-on angle and turn-off angle for switched reluctance motor drives [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(9): 593-603.

[8] ZAN Xiaoshu, HUO Yingjie, GU J, et al. Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system [C]// IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 864-869.

[9] 曲兵妮,宋世潮,宋建成,等. 考虑小电感区电感变化量的开关磁阻电机开通角和关断角优化方法 [J]. 电机与控制学报, 2019(2): 87-93.
QU Bingni, SONG Shichao, SONG Jiancheng, et al. Switch angle optimization method for switched reluctance motor considering the inductance variation in small inductance period [J]. Electric Machines and Control, 2019(2): 87-93.

[10] 朱龙,吕晓波,徐东杰,等. 基于差分进化算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制 [J]. 电气传动, 2016, 46(10): 17-20.
ZHU Long, LÜ Xiaobo, XU Dongjie, et al. Torque ripple suppression of switched reluctance motor based on differential evolution algorithm [J]. Electric Drive, 2016, 46(10): 17-20.

(下转第 107 页)

- levels for on-site tests of MV and HV-cables with damped AC to detect service endangering defects [C] // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 489-492.
- [18] HE Weisheng, WANG Qinghua, HUANG Chenxi, et al. A cost-effective technique for PD testing of MV cables under combined AC and damped AC voltage [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2018, 33(4): 2039-2040.
- [19] SCHIKARSKI P, GAMLIN M, RICKMANN J, et al. Two years of experience with a mobile resonant test system for testing of installed medium and high voltage power cables [C] // Proceedings of the 1999 11th International Symposium on High Voltage Engineering. Stevenage, UK: IEE, 1999: 236-239.
- [20] JIANG Jun, LUO Dingping, YU Miao, et al. Optical fiber-triggered solid-state switch applied in power cables damped AC voltages test system [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(4): 580-586.
- [21] WILD M, TENBOHLEN S, GULSKI E, et al. Basic aspects of partial discharge on-site testing of long length transmission power cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1077-1087.
- [22] 辛征, 王秀和, 孙树敏, 等. 一种用于高压电力电子开关的新型多路输出隔离供电系统 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 99-105.
- XIN Zheng, WANG Xiuhe, SUN Shumin, et al. A novel multi-output isolation power supply system for high voltage power electronic switch [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 99-105.
- [23] SCHIERIG S, STEINER T, JOCHIM M. HV AC generation based on resonant circuits with variable frequency for testing of electrical power equipment on site [C] // Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008: 684-691.
- [24] WANG Wei, JIANG Da, DONG Wenyan, et al. The effect of charge rate on space charge accumulation in damped alternating current (DAC) testing for power cable [C] // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 864-869.
- [25] 贺彪. 基于 DSP 控制的单相逆变电源的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 37-39.
- (编辑 刘杨)
- (上接第 99 页)
- [11] TAKENO M, CHIBA A, HOSHI N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1327-1334.
- [12] DESAI P C, KRISHNAMURTHY M, SCHOFIELD N, et al. Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: concept to implementation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 57(2): 649-659.
- [13] DING Shuye, LIU Haoran, CHU Jilun, et al. Performance analysis of a switched reluctance motor based on the APC control [J]. Electric Machines and Control, 2012 16(2): 39-43.
- [14] LEI Yu, WANG Jun, GOU Bin, et al. An improved method of angle position control for switched reluctance motor [J]. Power Electronics, 2018, 52(2): 21-24.
- [15] 赵天一. 开关磁阻电机转矩脉动抑制与平滑转速范围提升研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 11-12.
- [16] 陈灵. 基于开通、关断角度优化的开关磁阻电机控制策略研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 14-15.
- [17] CAI Xiwen, QIU Haobo, GAO Liang, et al. A multi-point sampling method based on kriging for global optimization. [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 56(1): 71-88.
- [18] LI Shuai, WANG Yiping, WANG Tao, et al. Optimization of heat exchangers with dimpled surfaces to improve the performance in thermoelectric generators using a kriging model [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(5): 3062-3070.
- [19] 余锐, 周代伟, 竺晓程, 等. 基于自适应 Kriging 代理模型的叶型气动优化设计 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(2): 103-107.
- YU Rui, ZHOU Daiwei, ZHU Xiaochen, et al. Aerodynamic optimization design of airfoils based on adaptive kriging surrogate model [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(2): 103-107.
- [20] 夏斌. 基于 Kriging 模型的开关磁阻电机优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012: 9-13.
- (编辑 刘杨)