

无刷直流外转子电机结构参数优化

Optimal design on a brushless DC external rotor motor

刘志强¹ 舒刚华¹ 杜荣华¹ 杨中华²

LIU Zhi-qiang¹ SHU Gang-hua¹ DU Rong-hua¹ YANG Zhong-hua²

(1. 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙中成汽车零部件有限公司技术部, 湖南 长沙 410114)
(1. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Changsha Zhongcheng Automotive Components Co, Ltd, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:齿槽转矩脉动是影响直流外转子电机输出转矩脉动的主要原因。为抑制齿槽转矩脉动,根据电机的结构参数建立了有限元分析模型,并对齿槽转矩进行仿真;仿真结果与试验获取的齿槽转矩曲线吻合较好,证明了所建模型的正确性。然后,采用 Taguchi 方法,以齿槽转矩峰值和平均输出转矩作为优化目标,以槽口宽度、极弧系数、气隙长度、平行齿宽为控制因子,选取槽口宽度加工误差、气隙长度加工误差、平行齿宽加工误差和永磁体剩磁变化作为噪声因子,对电机进行了优化设计,并利用所建立的有限元分析模型进行性能仿真验证。结果表明:用 Taguchi 方法优化电机设计参数,能够在电机平均输出转矩略有增加的同时,显著降低齿槽转矩。

关键词:优化设计; Taguchi 方法; 齿槽转矩; 直流外转子电机; 有限元分析

Abstract: Cogging torque ripple is the main impact factor of the output torque ripple of electric vehicles driven by wheel hub motors. To suppressing cogging torque ripple, a DC external rotor motor was studied, and a finite element analysis model was established in Ansoft Maxwell according to its structural parameters. The simulation results of cogging torque agreed well with those obtained from experiments, and this showed the analysis model was correct. Then, the main parameters of the hub motor were optimized by using Taguchi method, in which the peak values of cogging torque and average values of output torque were taken as the optimization goals, the slot width, pole arc coefficient, air gap length and parallel tooth width as the control factors, the processing errors of notch width, air gap length and parallel tooth width, and residual magnet-

ism variation as noise factors. The performances of the motor were simulated in the finite element analysis model with optimal structural parameters. The results showed that the cogging torque of the motor was reduced significantly, and the average values of output torque were increased slightly at the same time.

Keywords: optimal design; Taguchi method; cogging torque; DC external rotor motor; finite element analysis

永磁无刷直流外转子电机正获得越来越广泛的应用。电机外转子与驱动系统直接相连,可使结构更加简单、紧凑、高效。然而,永磁无刷直流外转子电机转矩波动大,直接驱动方式对电机提出了更高的要求——输出转矩大,转矩脉动低,调速范围宽^[1],所以需要优化设计以提高其性能指标。抑制齿槽转矩脉动而不降低电机平均输出转矩是永磁直流电机研究的主要内容之一。从电机设计角度出发,其方法通常包括:磁极偏移、斜槽和斜极、不等气隙、优化磁极极弧宽、磁极分段错位、采用分数槽绕组、虚拟样机等方法^[2-6]。传统的方法在分析电机设计中的非线性耦合问题时,往往会出现以下问题:① 全局优化方法计算时间太长,可能得不到全局最优解;② 局部优化方法的优化对象和目标有限,求解多目标优化问题时比较乏力,往往容易忽视噪声因素对电机性能的影响,因此其优化结果与实际产品的性能有着不容忽视的差异。

Taguchi 方法^[7]是依据统计学原理、方法,利用正交试验法来安排试验的一种参数优化设计方法,可以用较少的试验时间和成本获取需要的试验结果。目前,Taguchi 方法已应用于转子系统动力学^[8]、冲压工艺参数^[9]、动力总成悬置^[10]、柔性铰链柔度^[11]等方面,但在电机优化设计方面鲜有报道。

本试验提出采用 Taguchi 方法,在不采取提高工艺水平、改善材料品质的前提下,考虑多目标优化问题,以齿槽转矩峰值最小、平均输出转矩最大为目标,以对齿槽转矩峰值和平均输出转矩影响较大的参数作为控制因子,同时考虑加工误差等噪声因子对优化设计的影响,对无刷直流外转子电机进行优化设计。

基金项目:国家自然科学基金(编号:11572055);交通运输部基础应用研究项目(编号:2013319825090);长沙市科技局项目(编号:K1301006-11)

作者简介:刘志强(1970—),男,长沙理工大学副教授,博士。
E-mail: lzq0228@126.com

收稿日期:2016-09-21

1 电机有限元模型的建立

1.1 齿槽转矩的测量

采用步进电机法测量了一台无刷直流外转子电机的齿槽转矩。通过联轴器将步进电机、转矩传感器、被测电机联接。用步进电机控制器控制脉冲数,使步进电机精准地转过一定角度。由于被测电机的齿槽转矩作用,试图使转子定位在某一个位置,而步进电机转过一个角度后本身存在一个保持转矩,让传感器的一端定位在当前的位置,成为一个固定端。这样外转子电机的齿槽转矩就直接作用在传感器上,从数据采集设备中可以直接获取^[12]。

1.2 有限元分析模型的建立

无刷直流外转子电机的基本结构参数见表1。其定子槽结构见图1,尺寸为: $B_{s0}=2\text{ mm}$, $H_{s0}=1.3\text{ mm}$, $B_{s1}=6.5\text{ mm}$, $B_{s2}=4.9\text{ mm}$, $H_{s2}=16\text{ mm}$ 。

表 1 电机基本参数

Table 1 Parameters of an external rotor motor

参数	值	参数	值
额定功率/kW	3	额定电压/V	72
额定转速/(r·min ⁻¹)	870	—	—
转子外径/mm	303	转子内径/mm	267
定子外径/mm	265	定子内径/mm	202
铁心长度/mm	40	永磁体宽度/mm	15
永磁体厚度/mm	3	极数	56
槽数	63	线径/mm	0.5
每槽导体数	4	并绕根数	45

在 Maxwell 2D 中建立有限元分析模型,调整相应的仿真设置(如漏磁系数、步长、能量误差、网格大小),对比所测量的齿槽转矩曲线,使仿真结果和试验数据能够较好匹配,得到分析模型见图2,仿真结果见图3。

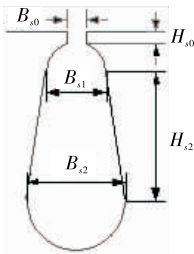


图 1 定子槽结构

Figure 1 Structure of stator slot

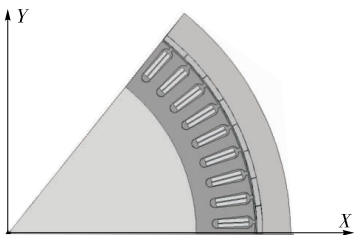


图 2 电机有限元分析模型

Figure 2 Finite element analysis model of the motor

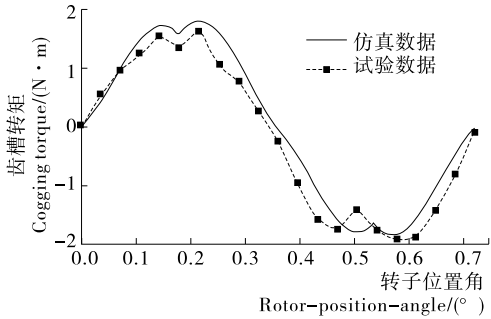


图 3 齿槽转矩仿真曲线和测试曲线对比

Figure 3 Comparison of cogging torque between simulation and test value

2 基于 RMXPRT 的参数化分析

本试验主要对电机的本体结构进行优化设计以抑制转矩脉动,主要是减少齿槽转矩。永磁无刷直流外转子电机的齿槽转矩表达式为^[13]:

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{rm} \sin n z \alpha, \quad (1)$$

式中:

$T_{cog}(\alpha)$ ——齿槽转矩, N·m;

L_a ——电枢铁心轴向长度, mm;

μ_0 ——空气磁导率, H/m;

R_1 ——定子轭外半径, mm;

R_2 ——转子内半径, mm;

z ——定子槽数;

G_n ——与定子槽数、槽口宽度、气隙长度等有关的傅里叶展开式系数;

B_{rm} ——与极弧系数、永磁体剩磁等有关的傅里叶展开式系数;

α ——定转子之间的相对位置角, rad。

利用 RMXPRT 软件对式(1)中的各参数进行分析,确定各参数对电机平均输出转矩和齿槽转矩的影响大小及参数合理取值范围。以永磁体极弧系数为例,首先将极弧系数设为变量 a_{rc} , 取值范围为 0.5~1.0, 步长为 0.01, 以齿槽转矩峰值和平均输出转矩为求解参数, 得到的曲线见图4、5。

由图4、5可知:平均输出转矩随极弧系数的增大而单调增大, 这是因为极弧系数增大后, 永磁体宽度增大, 使气隙磁

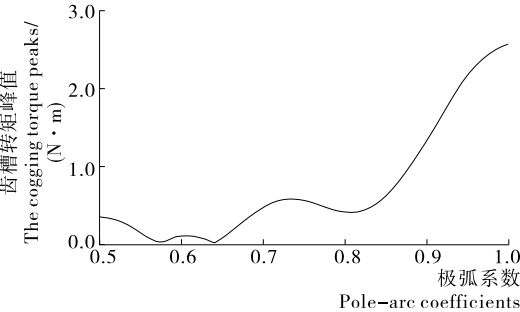


图 4 齿槽转矩峰值随极弧系数的变化曲线

Figure 4 Relationship of peak value of cogging torque with pole-arc coefficient

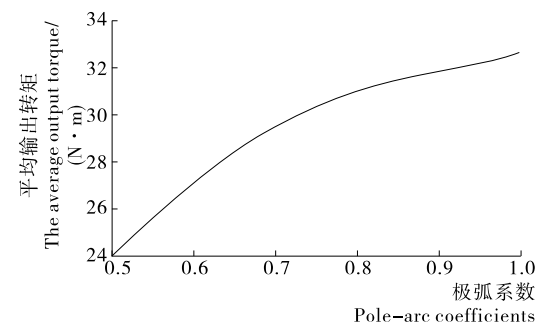


图 5 平均输出转矩随极弧系数的变化曲线
Figure 5 Relationship of average output torque with pole-arc coefficient

通量增大,从而导致输出转矩增加。而齿槽转矩峰值随着极弧系数的增大呈波动变化,最小值出现在极弧系数约为 0.57 和 0.64 处。这说明同时对电机的平均输出转矩和齿槽转矩优化时,需要对极弧系数进行慎重选择。同理可得到其它对电机齿槽转矩和平均输出转矩影响较大的参数及其变化范围,用于 Taguchi 方法的参数水平确定。

3 基于 Taguchi 方法的电机优化设计

3.1 确定控制因子和噪声因子

通过对影响电机齿槽转矩和平均输出转矩的各结构参数进行参数化分析,结合参数变量允许的变化范围,确定槽口宽度 b_s 、永磁体极弧系数 α_p ($\alpha_p = l/\tau$)、气隙长度 δ 、平行齿宽 b_t 作为可控因子,每个因子水准的取值见表 2。

表 2 可控因子取值水平表

Table 2 Value level of the controlled factor				
水平	B_{s0} 槽口 宽度/mm	α_p 永磁体 极弧系数	δ 气隙 长度/mm	B_t 平行 齿宽/mm
1	3.4	0.7	0.4	5.7
2	3.8	0.8	0.5	6.1
3	4.2	0.9	0.6	6.5

考虑到所选的控制因子及加工误差、材料变化等因素,选取的噪声因子为槽口宽度加工误差 ΔB_{s0} 、永磁体剩磁偏差 ΔB_r 、气隙长度加工误差 $\Delta \delta$ 、平行齿宽加工误差 ΔB_t 。各因子的水平值见表 3。对于其它环境因素、材料性能变异等噪声因子不做单独考虑,假设其影响已包含在各参数的取值变化范围内。

表 3 噪声因子取值水平表

Table 3 Value level of the noise factor				
水平	ΔB_{s0} 槽口宽度 加工误差/mm	ΔB_r 剩磁 偏差/T	$\Delta \delta$ 气隙长度加 工误差/mm	ΔB_t 平行齿宽 加工误差/mm
1	-0.02	-0.01	-0.01	-0.04
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.02	0.01	0.01	0.04

3.2 进行正交试验

由表 2、3 可知,控制因子、噪声因子都为 4 因子 3 水平,若改变一个参数进行一次试验并进行有限元分析,则需要进行 6 561 次试验。若根据选取的控制因子及其水平值选取内表,根据选取的噪声因子及水平值选取外表,将内外表组合确定试验方案(表 4),则只要进行 81 次有限元分析,大大降低了优化设计所耗时间。

根据表 4 所示的表头安排试验,用 ansoft 对各种参数组合进行有限元分析,得到电机平均输出转矩 T_a 和齿槽转矩峰值 T_c (见表 5、6)。

3.3 数据分析

先根据平均输出转矩和齿槽转矩峰值的期望特性得到相应的信噪比计算公式,然后运用统计学方法,进行均值分析、方差分析,得到各控制因子对平均输出转矩和齿槽转矩峰值的影响大小。

3.3.1 信噪比分析 信噪比 (sigal-to-noise ratio, SNR) 是 Taguchi 优化方法的重要工具,是评价参数设计优劣的指标。信噪比定义式为:

表 4 正交试验表头设计

Table 4 Orthogonal experiment table

试验 编号	内表 L9				外表 L9								
	B_{s0}	α_p	δ	B_t	$\Delta B_{s0}/\Delta B_\tau/\Delta\delta/\Delta B_t$								
					1111	1222	1333	2123	2231	2312	3132	3213	3321
1	1	1	1	1									
2	1	2	2	2									
3	1	3	3	3									
4	2	1	2	3									
5	2	2	3	1									
6	2	3	1	2									
7	3	1	3	2									
8	3	2	1	3									
9	3	3	2	1									

表 5 T_a 有限元分析值									
Table 5 Results of T_a by finite element analysis									N · m
试验编号	T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	T_{a5}	T_{a6}	T_{a7}	T_{a8}	T_{a9}
1	32.011	32.179	32.345	32.102	32.014	32.355	31.948	32.311	32.184
2	32.781	32.958	33.128	32.924	32.797	33.120	32.769	33.085	32.958
3	33.523	33.670	33.878	33.668	33.558	33.853	33.524	33.820	33.706
4	32.172	32.313	32.452	32.128	32.181	32.570	32.002	32.405	32.437
5	31.139	31.307	31.474	31.288	31.153	31.452	31.139	31.435	31.296
6	32.896	33.096	33.293	33.145	32.928	33.190	32.982	33.243	33.025
7	30.782	30.916	31.047	30.766	30.790	31.141	30.645	31.004	31.026
8	33.910	34.072	34.233	33.970	33.917	34.299	33.816	34.198	34.137
9	31.188	31.382	31.574	31.441	31.213	31.464	31.278	31.532	31.298

表 6 T_c 有限元分析值									
Table 6 Results of T_c by finite element analysis									N · m
试验编号	T_{c1}	T_{c2}	T_{c3}	T_{c4}	T_{c5}	T_{c6}	T_{c7}	T_{c8}	T_{c9}
1	0.815	0.795	0.774	0.802	0.771	0.846	0.778	0.853	0.820
2	0.222	0.206	0.190	0.212	0.193	0.234	0.199	0.240	0.220
3	0.325	0.310	0.295	0.332	0.312	0.355	0.334	0.376	0.357
4	0.714	0.704	0.693	0.696	0.683	0.734	0.675	0.725	0.712
5	0.132	0.120	0.109	0.121	0.108	0.136	0.109	0.138	0.123
6	0.557	0.576	0.593	0.569	0.574	0.560	0.568	0.553	0.559
7	0.489	0.488	0.487	0.476	0.473	0.494	0.462	0.481	0.479
8	0.241	0.252	0.261	0.233	0.241	0.228	0.223	0.208	0.218
9	0.430	0.451	0.472	0.439	0.448	0.424	0.436	0.411	0.421

$$S_{NR} = \frac{\mu^2}{\sigma^2}, \tag{2}$$

式中：
 S_{NR} ——信噪比
 μ ——产品输出特性 y_i 的期望，
 σ^2 ——产品输出特性 y_i 的方差。

电机的平均输出转矩表现为典型的望大特性，而齿槽转矩峰值表现为典型的望小特性。即期望平均输出转矩的均值越大越好，方差越小越好，而齿槽转矩峰值的均值和方差都越小越好。

望小特性的信噪比表达式：
$$S_{NR} = -10\ln\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right), \tag{3}$$

式中：
 n ——同一试验编号下获取的产品某一输出特性的试验数据的个数。

望大特性的信噪比表达式：
$$S_{NR} = -10\ln\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)。 \tag{4}$$

利用式(3)和式(4)分别计算齿槽转矩峰值和平均输出转矩的信噪比，得到的结果见表 7。

3.3.2 均值分析 计算不同可控因子在不同因子水平下的 T_a 与 T_c 信噪比的平均值，结果见表 8。

表 7 平均输出转矩 T_a 和齿槽转矩峰值 T_c 的信噪比

Table 7 Signal-to-noise ratio of T_a and T_c

dB		
试验编号	T_a	T_c
1	69.414	4.301
2	69.897	30.879
3	70.343	21.945
4	69.498	7.013
5	68.871	42.030
6	69.983	11.320
7	68.616	14.634
8	70.563	29.013
9	68.919	16.546

由表 8 可知：控制因子 B_i 对 T_a 的影响最大， α_p 对 T_c 的影响最大。若要以平均输出转矩最大为优化目标，则选取的最佳参数组合为 B_{s01} (3.4 mm)、 α_{p2} (0.8)、 δ_1 (0.4 mm)、 B_{i3} (6.5 mm)；若以齿槽转矩峰值最小为优化目标，则选取的最佳参数组合为 B_{s03} (4.2 mm)、 α_{p2} (0.8)、 δ_3 (0.6)、 B_{i1} (4.7 mm)。

3.3.3 方差分析 方差分析主要通过分析研究不同参数的改变对电机性能参数的贡献大小，来确定控制因子在电机优化设计中所占比重大小。各参数总的方差的计算公式：

表 8 T_a 与 T_c 在不同控制因子及水平下的信噪比平均值
Table 8 Mean value of signal-to-noise ratio of T_a and T_c under different control factors and levels dB

可控因子	因子水平	T_a	T_c
B_{s0}	1	69.885	19.042
	2	69.451	20.121
	3	69.366	20.064
α_p	1	69.176	8.649
	2	69.777	33.974
	3	69.749	16.604
δ	1	69.987	14.878
	2	69.438	18.146
	3	69.276	26.203
B_t	1	69.068	20.959
	2	69.499	18.944
	3	70.134	19.324

$$S_s = 3 \sum_{i=1}^n [m_{xi}(T) - m(T)]^2, \tag{5}$$

式中:

x —— B_{s0} 、 α_p 、 δ 、 B_t 控制因子;

T ——电机的性能指标,指 T_a 或 T_c ;

$m_{xi}(T)$ ——控制因子 x 在第 i 个水平下 T_a 或 T_c 的平均值;

$m(T)$ —— T_a 或 T_c 的平均值。

方差计算结果见表 9。

表 9 各个参数对性能参数的影响

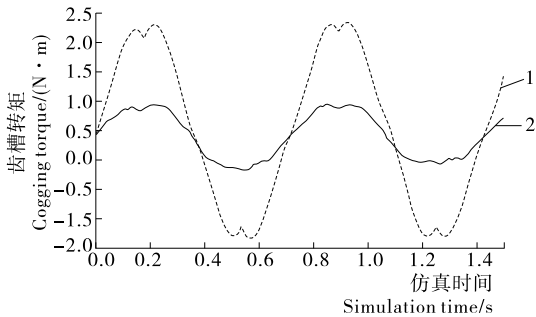
Table 9 Influence of design parameters on performance

可控因子	T_a		T_c	
	S_s	权重/%	S_s	权重/%
B_{s0}	0.465	12.53	2.213	0.18
α_p	0.690	18.58	1 006.330	82.54
δ	0.832	22.40	203.850	16.72
B_t	1.726	46.49	6.876	0.56
总计	3.713	100.00	1 219.269	100.00

由表 9 可知, B_{s0} 、 δ 、 B_t 在 T_a 中所占比重比 T_c 中所占比重重大, α_p 在 T_c 中所占比重比 T_a 中大。因此若同时考虑平均输出转矩和齿槽转矩峰值,则选取的最佳参数组合为 B_{s01} (3.4 mm)、 α_{p2} (0.8)、 δ_1 (0.4 mm)、 B_{t3} (6.5 mm)。

3.3.4 优化结果仿真验证 利用前面建立的 Maxwell 2D 模型,改变相应的设计参数取值,对选取的最佳参数组合进行有限元仿真验证,得到的齿槽转矩曲线和转速稳定后的输出转矩曲线分别见图 6、7。

由图 6 可知,优化后的齿槽转矩峰值约为 0.8 N·m,优化前的齿槽转矩峰值约为 2.3 N·m,通过优化设计大大减小了齿槽转矩的峰值;由图 7 可知,优化前的输出转矩在 23.0~37.5 N·m,优化后的输出转矩在 27.5~36.5 N·m,通过优化设计明显降低了转矩脉动。同时由仿真分析的结果可知,优化前的平均输出转矩约为 33.6 N·m,优化后的平均输出转矩约为 33.8 N·m。



1. 优化前 2. 优化后

图 6 优化前后齿槽转矩波形图

Figure 6 Waveform of cogging torque

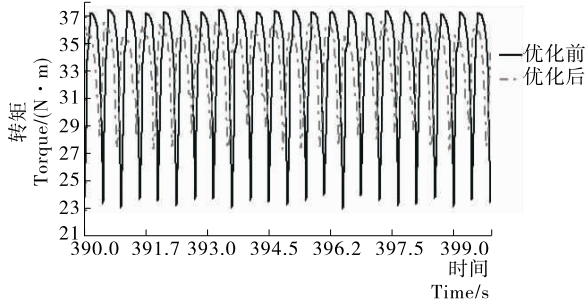


图 7 优化前后输出转矩波形

Figure 7 Waveform of output torque

由上述分析可知,经过 Taguchi 方法优化后的电机,齿槽转矩降低了约 2/3,转矩脉动情况也有明显改善。同时平均输出转矩略有增加,达到了优化设计目的。

4 结论

(1) 建立了无刷直流外转子电机的有限元分析模型,并以试验获取的齿槽转矩曲线加以验证;并对影响电机齿槽转矩和输出转矩的各结构参数进行了敏感性分析,确定了控制因子。

(2) 采用 Taguchi 方法,对电机进行了优化设计。性能仿真结果表明,齿槽转矩显著降低,转矩脉动明显改善,同时平均输出转矩略有增加。研究发现,在不改进加工工艺、使用高性能的材料的前提下,采取各设计参数的优化来实现电机的稳健设计,在电机的多目标局部优化中有重要的工程应用价值。

参考文献

[1] YOSHIMURA M, FUJIMOTO H. Driving torque control method for electric vehicle with in-wheel motors[J]. Electrical Engineering in Japan, 2012, 181(3): 49-58.

[2] METIN A, MEHMET G. Reduction of cogging torque in double-rotor axial-flux permanent-magnet disk motors; a review of cost-effective magnet-skewing techniques with experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5 025-5 034.

[3] WANG Dao-han, WANG Xiu-he, YANG Yu-bo, et al. Optimization of magnetic pole shifting to reduce cogging torque in solid-rotor permanentmagnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(5): 1 228-1 234.

(下转第 228 页)

[26] 陈锋亮, 魏益民, 钟耕. 大豆油高温煎炸质变过程的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(8): 19-22.

[27] 李阳, 钟海燕, 李晓燕, 等. 煎炸用油品质变化及测定方法研究进展[J].食品与机械, 2008, 24(6): 148-151.

[28] 申云刚. 市场上油炸用油快速检测技术的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013: 18-21.

[29] 洗瑞仪, 黄富荣, 黎远鹏, 等. 可见和近红外透射光谱结合区间偏最小二乘法(iPLS)用于橄榄油中掺杂煎炸老油的定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2 462-2 467.

[30] 翁欣欣, 陆峰, 王传现, 等. 近红外光谱-BP神经网络-PLS法用于橄榄油掺杂分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3 283-3 287.

[31] 王传现, 褚庆华, 倪昕路, 等. 近红外光谱法用于橄榄油的快速无损鉴别[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 402-404.

[32] 庄小丽, 相玉红, 强洪, 等. 近红外光谱和化学计量学方法用于橄榄油品质分析与掺杂量检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 933-936.

[33] 张海亮, 吴亚君, 鞠兴荣, 等. 1 种检测橄榄油掺假的新方法——PCR-CE-SSCP 法[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4):

305-308.

[34] 张菊华, 朱向荣, 尚雪波, 等. 近红外光谱结合偏最小二乘法用于油茶籽油中掺杂菜籽油和大豆油的定量分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 334-336.

[35] 温珍才, 孙通, 许朋, 等. 可见/近红外联合变量优选检测油茶籽油掺假[J]. 江苏大学学报, 2015, 36(6): 673-678.

[36] 许朋. 基于近红外光谱技术的山茶油掺假检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015: 1-2.

[37] 孙通, 吴宜青, 李晓珍, 等. 基于近红外光谱和子窗口重排分析的山茶油掺假检测[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630005-1-0630005-8.

[38] 涂斌, 宋志强, 郑晓, 等. 基于激光近红外的稻米油掺伪定性-定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1 539-1 545.

[39] 吴静珠, 刘翠玲, 李慧, 等. 基于近红外光谱的纯花生油掺伪快速鉴别方法研究[J]. 北京工商大学学报, 2011, 29(1): 75-78.

[40] 刘福莉, 陈华才, 姜礼义, 等. 近红外透射光谱聚类分析快速鉴别食用油各类[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(3): 278-282.

[41] 梁丹. 基于近红外光谱技术的食用油品质快速检测方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009: 47.

(上接第 97 页)

[4] CLAUDIO B, FABIO I, EMILIO L, et al. Review of design solutions for internal permanent-magnet machines cogging torque reduction[J]. IEEE Transactions on magnetics, 2012, 48(10): 2 685-2 693.

[5] WOO D K, KIM I W, LIM D K, et al. Cogging torque optimization of axial flux permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2 189-2 192.

[6] 毛文贵, 傅彩明, 谭加才. 基于虚拟样机技术的立式电机结构设计分析[J]. 食品与机械, 2006, 22(4): 67-69.

[7] TAGUCHI G, CHOWDHURY S, WU Yin. Taguchi's quality engineering handbook[M]. New Jersey: John Wiley Publication,

2004: 125-169.

[8] 杨隽, 臧朝平, 刘永泉, 等. 基于 Taguchi 方法的转子系统动力学容差设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1 583-1 590.

[9] 王卫洪. 基于田口方法的冲压工艺参数稳健性设计[J]. 模具制造, 2015(12): 10-16.

[10] 张代胜, 张旭, 王浩, 等. 基于 Taguchi 方法的动力总成悬置系统稳健优化 [J]. 汽车工程, 2014, 36(4): 475-480.

[11] 伍建军, 万良琪, 吴事浪, 等. 基于田口方法的柔性铰链柔度稳健优化设计[J]. 工程设计学报, 2015, 22(3): 224-229.

[12] 冯兆冰, 吴孔圣, 丁云飞, 等. 几种简单的齿槽转矩测量方法[J]. 制造技术与机床, 2012(5): 102-103.

[13] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 80-81.

(上接第 157 页)

[17] 中国国家技术监督局. GB/T 17376—2008 动植物油脂脂肪酸甲酯制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[18] 中国国家技术监督局. GB/T 17377—2008 动植物油脂脂肪酸甲酯的气相色谱分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[19] 赖锡湖, 黄卓, 李坚, 等. 超临界 CO₂萃取茶叶籽油及其成分分析[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 38-40.

[20] 汤鹏, 段海霞, 夏金梅, 等.响应面法优化超临界 CO₂萃取鲍鱼内脏油脂及其脂肪酸种类测定[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 153-159.

[21] 贺绍琴, 张君萍, 阿布力米提·伊力, 等. 莴苣籽油的超临界 CO₂

萃取工艺及其脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2015, 40(1): 1-5.

[22] 王亚琦, 陈奕洪, 黄卫文, 等. 超临界 CO₂萃取崖柏精油的研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 175-178.

[23] 刘光敏, 徐响, 高彦祥. 超临界 CO₂萃取草莓籽油工艺研究及其对脂肪酸组成的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(3): 84-88.

[24] DA PORTO C, DECORTI D, TUBARO F. Fatty acid composition and oxidation stability of hemp (Cannabis sativa L.) seed oil extracted by supercritical carbon dioxide [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 36(1): 401-404.

[25] 程丹, 傅玉颖, 梅子, 等. 响应曲面法优化酵母微胶囊化核桃油工艺[J]. 中国食品学报, 2013, 13(11): 28-34.

(上接第 168 页)

[6] 何俊婷. 金银花多糖提取工艺优化[J]. 应用化工, 2014, 43(4): 692-695.

[7] 赵鹏, 李稳宏, 朱骤海, 等. 响应面法优化金银花多糖超声提取工艺研究[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 151-154.

[8] 廖立敏, 邹宁, 黄茜, 等. 响应面优化超声波提取血橙皮多糖工艺[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11): 212-216, 221.

[9] 薛菁, 吴晓彤, 王颖超, 等. 超声波辅助提取口蘑菌丝体多糖工

艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 172-174.

[10] 周小楠, 董群. 正交试验优化酶法提取金银花多糖工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 119-122.

[11] 赵玉红, 林洋, 张立钢, 等. 黑木耳多糖高剪切分散乳化法与酶法提取的比较研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 181-186.

[12] 陈晓光, 韦藤幼, 彭梦微, 等. 内部沸腾法提取香菇多糖的工艺优化[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 31-34.

[13] 赵启铎, 舒乐新, 马琳, 等. 硫酸-苯酚法测定槐甘菌质多糖的含量[J]. 宜春学院学报, 2011, 33(8): 74-76.