永磁同步电动机的分层多目标优化研究

王聪，王铁

沈阳理工大学汽车与交通学院　辽宁沈阳　110159

摘要：为保证电动机运行过程中有更大的输出转矩、更小的转矩脉动及齿槽转矩，以输出转矩、转矩脉动及齿槽转矩为优化目标，以电动机的8个基本参数为优化对象，研究了一种基于灵敏度分析的分层多目标优化方法，针对灵敏度指数高的参数采用BBD设计配合进化算法进行多目标优化，其余变量采用DOE法配合进化算法进行优化。仿真结果表明：基于此优化方法，齿槽转矩和转矩脉动得到大幅削弱，验证了该永磁同步电动机优化方案的合理性。

关键词：永磁同步电动机；有限元；灵敏度分析；多目标优化

永磁同步电动机以永磁体作为励磁材料，由于其具有效率高、功率密度高的优点，具有广阔的应用前景[1]。但电动机在定子齿和转子磁极的相互作用下会产生齿槽转矩，引起转矩波动，不仅会降低系统控制精度，还会带来振动和噪声[2]。杨金歌等[3]采用定子齿上开设辅助槽使齿槽转矩减少了37.2%。高锋阳等[4]采用中心部分分段的永磁体结构降低了转矩脉动。黄厚佳等[5]验证了单磁极加长对降低齿槽转矩的有效性。探索结构参数对齿槽转矩的影响时，与优化算法进行结合能够揭示结构参数变化对齿槽转矩的影响，有助于寻找最优方案，王晓远等[6]将进化策略引进到永磁同步电动机永磁体结构的优化设计中，齿槽转矩减小了81.7%，电磁平均转矩增大了5.3%。

本文以电动机的平均输出转矩、齿槽转矩和转矩脉动为优化目标，利用敏感度分析对电动机基本参数进行分层后，针对显著优化变量利用进化算法配合BBD法进行第一层优化，普通优化变量则采用进化算法配合DOE法进行第二层优化，经过两层优化得到了最佳方案。

IPMSM的结构

本文对一台12极18槽的内置式永磁同步电动机进行研究。基于有限元法，IPMSM的初始方案仿真得到平均输出转矩为119.90N·m，转矩脉动为17.86%，齿槽转矩为1.72N·m。其电磁模型如图1所示。

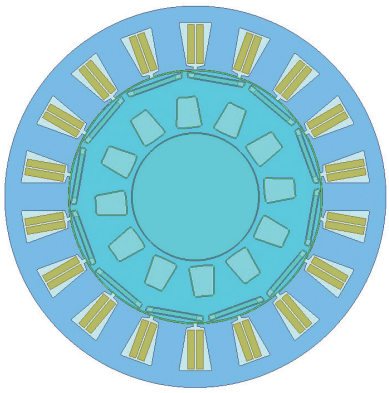


图1 IPMSM模型

优化目标及变量的确定

1.优化目标

本文主要研究电动机平均输出转矩T_{avg}、转矩脉动T_{rip}及齿槽转矩T_{cog}，因此对电动机多目标优化的优化函数表示为：[$max\,(T_{avg})$，$min\,(T_{rip})$，$min\,(T_{cog})$]。

2.优化变量

为保证电动机在运行过程中有更大的平均输出转矩、更小的转矩脉动及齿槽转矩，选择优化的变量及取值范围见表1。

表1 优化变量初值及取值范围

参数	参数初值	取值范围
槽口高度H_{s0}/mm	2	1.5～2.5
槽肩高度H_{s1}/mm	1	0.5～1.5
槽深H_{s2}/mm	33	30～35
槽宽B_{s0}/mm	3	2.5～4.5
穿过两个相邻极厚度B_{ri}/mm	1.5	1～2.5
相邻磁障端部宽度R_{ib}/mm	5	3～5.5
永磁体宽度MagW/mm	35	34～40
每相激励初始相角aaa/°	0	0～180

3.灵敏度分析

优化参数较多，直接计算会大大增加计算时间，降低计算效率。因此采用灵敏度分析对优化参数进行分层，实现电动机的分层优化。优化参数对优化目标的单一和综合灵敏度指数见表2。

表2 单一和综合灵敏度指数

参数	H_{avg}（x_i）	H_{rip}（x_i）	H_{cog}（x_i）	G（x_i）
H_{s0}	0.034	0.356	0.032	0.141
H_{s1}	-0.112	0.023	-0.249	0.128
H_{s2}	0.021	0.136	0.116	0.091
B_{s0}	0.173	0.022	0.742	0.312
B_{ri}	-0.013	-0.345	-0.190	0.183
R_{ib}	-0.007	0.371	0.072	0.150
MagW	0.075	-0.410	0.740	0.408
aaa	-0.972	0.001	-0.126	0.366

电动机的多目标分层优化

为减小计算复杂度，根据综合灵敏度指数G（x_i）将所有优化变量分为两层，其中G（x_i）≥0.3为第一层，采用响应面法的BBD设计和EA配合的优化方法进行优化。0＜G（x_i）＜0.3为第二层，采用试验设计DOE与EA配合的优化方法进行优化。多目标分层优化流程如图2所示。

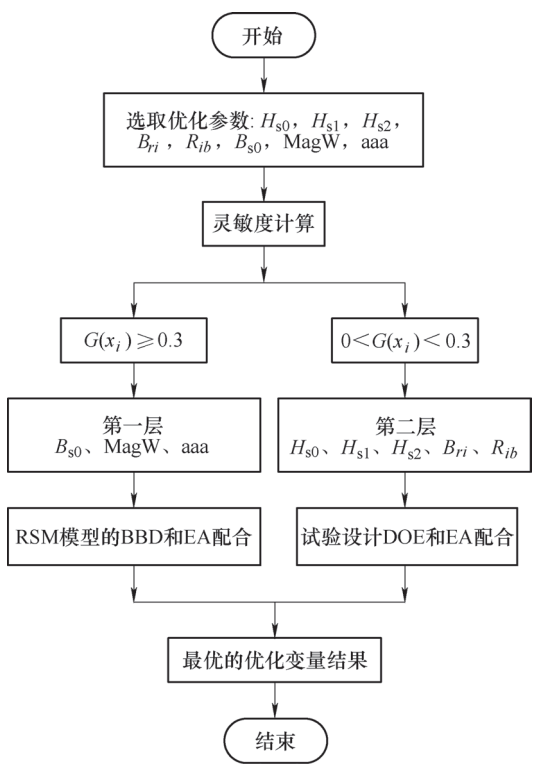


图2 多目标分层优化流程

1.基于BBD和EA的第一层优化

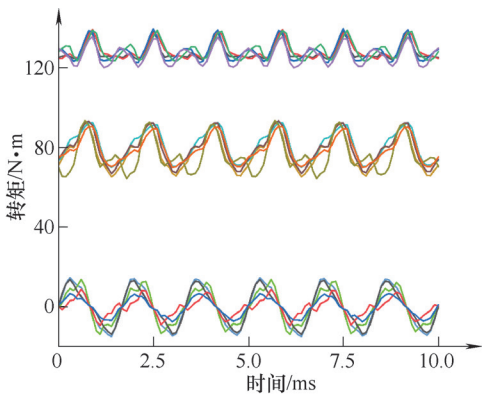
第一层有3个参数，每个参数设计水平包含三个水

平，试验设计表见表3。

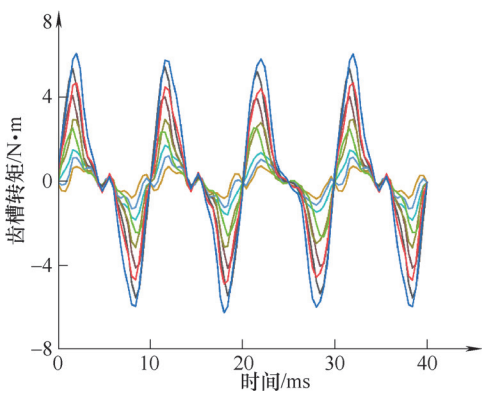
表3　第一层参数的水平设计表

参数水平	符号	x_1/B_{s0}	x_2/MagW	x_3/aaa
水平1	-1	2.5mm	34mm	30°
水平2	0	3.5mm	37mm	60°
水平3	1	4.5mm	40mm	90°

15次BBD试验的仿真结果如图3所示。



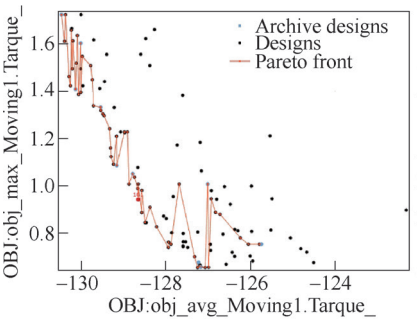
a）输出转矩曲线



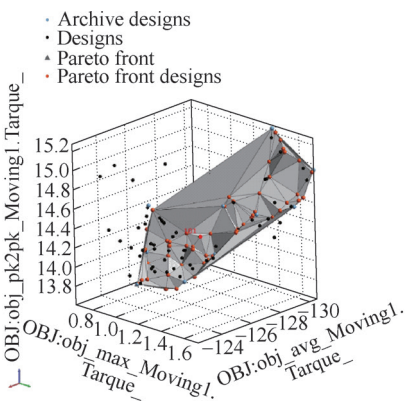
b）齿槽转矩曲线

图3　BBD试验仿真结果

通过对比定位第13组数据即B_{s0}=2.5mm、MagW=34mm、aaa=30°相对理想，可在此基础上大大缩小优化参数的设定范围。进一步通过EA算法寻找参数的更优解。设定算法族群数和族群代数分别为40和50，母系选择方式为pareto，个数为20，交叉点为4个，交叉方式为Multipoint，变异方式为Self adaptive。得到的2D及3D散点图如图4所示，综合考虑选择第101个pareto front点作为优化参数的最优解，其值为B_{s0}=2.691 12mm、MagW=34.255 7mm、aaa=30.125°，



a）2D散点图



b）3D散点图

图4　EA算法得到的2D及3D散点图

该情况下T_{avg}=128.66N·m、T_{rip}=10.93%、T_{cog}=0.94N·m。

2.基于DOE和EA的第二层优化

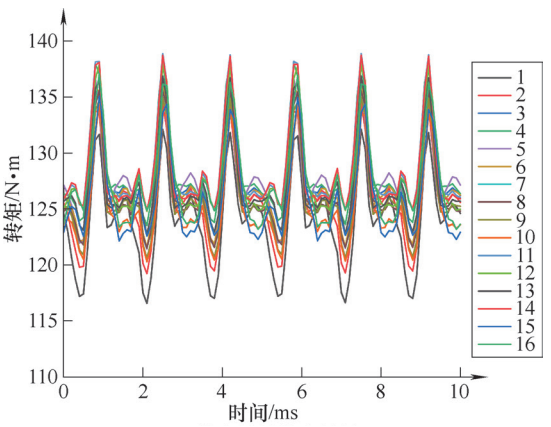
在此基础上进行第二层优化，优化参数包含5个因子和4个水平，因此DOE正交试验被设计用来采集样本点，优化参数的水平见表4，基于16组试验得到的仿真结果如图5所示。

根据正交试验仿真结果，设定小的优化参数范围，利用EA算法进一步优化，得到的仿真结果如图6所示的2D及3D散点图，最优点的平行坐标系如图7所示。

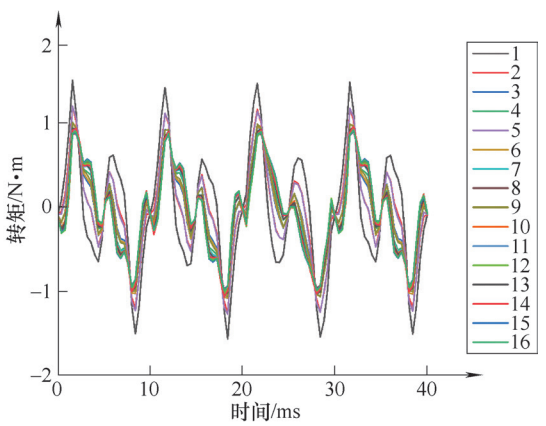
经过分析优化参数取值为：H_{s0}=1.764 75mm、

表4　优化参数水平表　　（单位：mm）

	H_{s0}	H_{s1}	H_{s2}	B_{ri}
水平1	1.5	0.5	32	1.5
水平2	1.75	0.75	32.5	1.75
水平3	2	1	33	2
水平4	2.25	1.25	33.5	2.25



a）输出转矩仿真结果



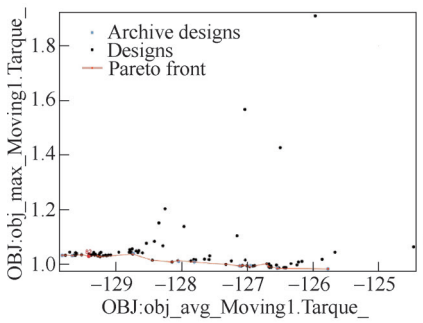
b）齿槽转矩仿真结果

图5　DOE试验仿真结果

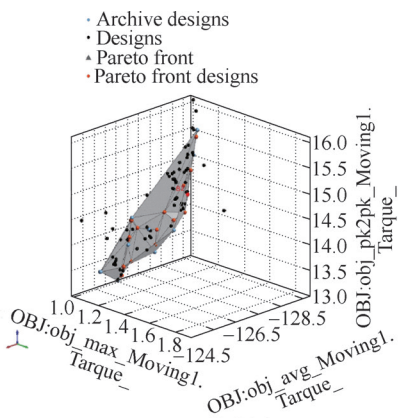
R_{ib}=5.456 26mm、H_{s2}=32.324 4mm、B_{ri}=1.497 28mm、H_{s1}=1.453 89mm。最终优化结果为：T_{avg}=129.32N·m、T_{rip}=10.69%、T_{cog}=0.93N·m。

原模型（ORI）、基于BBD和EA的第一次优化后模型（BBDEA）、基于DOE和EA的第二次优化后模型（DOEEA）的优化参数见表5。三个模型的优化结果对比见表6。

如图8所示，经过两层优化对比发现，电动机在原模型的基础上输出转矩提升7.9%，转矩脉动降低了45.9%，齿槽转矩降低45.9%，验证了优化方法的有效性，提升了电动机的性能。



a）2D散点



b）3D散点

图6　EA算法进一步优化仿真结果

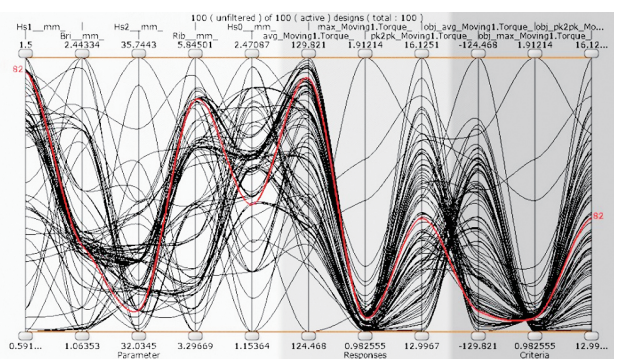


图7　最优点的平行坐标系

表5　优化前后三个模型参数

参数	ORI	BBDEA	DOEEA
B_{s0}/mm	3	2.69112	2.691 12
MagW/mm	35	34.2557	34.255 7
aaa/°	0	30.125	30.125
H_{s0}/mm	2	2	1.764 75
H_{s1}/mm	1	1	1.453 89
H_{s2}/mm	33	33	32.324 4
B_{ri}/mm	1.5	1.5	1.497 28
R_{ib}/mm	5	5	5.456 26

表6　优化前后三个模型的结果对比

模型	T_{avg}/N·m	T_{rip}/%	T_{cog}/N·m
ORI	119.90	21.42	1.72
BBDEA	128.66	14.07	0.94
DOEEA	129.32	13.83	0.93

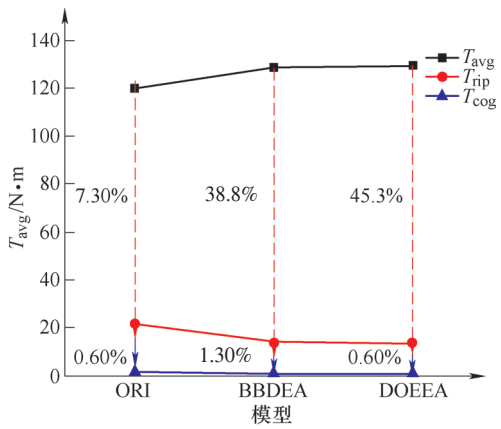


图8　优化前后的对比曲线

结语

本文以12极18槽IPMSM为研究对象，针对所选对电动机性能影响较大的8个参数，基于灵敏度分析法根据综合灵敏度指数进行分层，敏感度较高的三个参数采取BBD结合EA的优化方法进行第一层优化。相较原方案，输出转矩提高7.3%，转矩脉动降低38.8%，齿槽转矩降低45.3%，电动机性能得到提高，再此基础上采取DOE结合EA的优化方法进行第二层优化，最终两层优化后相较原方案输出转矩提升7.9%，转矩脉动降低了40.1%，齿槽转矩降低45.9%，所提优化方法对于提高电动机性能有效。

参考文献：

[1] 李能. 永磁同步电动机矢量控制系统的建模与仿真研究[J]. 机械工程师，2017（2）：46-48.

[2] 宋金龙. 抑制表贴式永磁同步电动机转矩脉动的优化设计[D].成都电子科技大学，2017.

[3] 杨金歌，邓兆祥，周忆，等. 车用永磁轮毂电动机解析建模与齿槽转矩削弱[J]. 西安交通大学学报，2018，52（1）：84-91，114.

[4] 高锋阳，李明明，齐晓东，等. 中心部分分段Halbach永磁同步轮毂电动机解析计算与优化设计[J]. 西安交通大学学报，2022，56（2）：171-183.

[5] 黄厚佳，李全峰，徐余法，等. 单磁极加长降低表贴式永磁电动机齿槽转矩[J]. 电动机与控制应用，2018，45（12）：55-59，92.

[6] 王晓远，高鹏. 基于进化策略的轮毂电动机永磁体结构优化设计[J]. 中国电动机工程学报，2015，35（4）：979-984.

汽车工艺师 2024年 第3期 广告目次 Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
金粉商城	8000	封二
《汽车工艺师》杂志订阅	0001	封三
公益广告	8000	封底
公益广告	8000	1
中国机床工具工业协会	5198	2