

# 基于田口迭代法的高速永磁同步电机电磁优化设计\*

邱马顺 华青松<sup>†</sup>

(北京师范大学核科学与技术学院, 100875, 北京)

**摘要** 为优化高速永磁同步电机在额定工况下运行的性能, 本文以电机的额定转矩、转矩脉动、定子铁芯损耗和磁密幅值作为待优化性能, 采用改进的田口迭代优化算法研究定子外径、气隙长度、磁钢外径、轴向长度和定子槽深对上述性能的影响. 通过建立正交试验矩阵, 利用 ANSYS 电磁仿真软件仿真计算出各参数组合下的电机性能, 在确保反电动势线电压和额定转矩性能在限制范围内, 优先选择定子铁芯损耗最低和磁密幅值最小的参数组合. 仿真计算显示, 用改进的田口法迭代优化后的性能较原始相比, 均有较大的提升. 其中, 额定转矩性能降低了 5.2%, 转矩脉动减小 49.3%, 定子铁芯损耗降低了 35.5%, 磁密幅值降低了 13.1%, 电机整体性能得到优化. 同时与传统全参数正交优化方法相比, 该设计减少了仿真的次数, 提高了优化设计效率, 具有一定的实用性.

**关键词** 永磁同步电机; 优化; 田口法; 迭代

**中图分类号** TM302; TM351

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022122

## 0 引言

永磁同步电机因其噪声小、体积小、质量轻、功率密度高<sup>[1]</sup>等优点, 在工业领域中应用广泛. 如应用在需要静音性良好的核潜艇, 用于驱动核反应堆容器内控制棒的永磁同步电机<sup>[2]</sup>、轻型电动汽车的驱动电动机<sup>[3]</sup>, 以及核工业用叉车和柴油车的电动涡轮增压器<sup>[4]</sup>等. 但高速永磁同步电机也因其损耗密度过高而导致内部温升较高<sup>[5]</sup>, 过高的温升容易使电机老化, 且永磁体在过高温度的时候会发生不可逆的退磁现象<sup>[6]</sup>, 严重影响电机寿命. 同时, 高速永磁同步电机因其结构和材料的特殊性, 较常规电机而言, 转子受到的离心力较大, 这对转子动力学的性能也提出了较高的要求, 因此希望永磁同步电机在工作时的转矩脉动峰值尽可能小.

针对以上设计需求, 在对高速永磁同步电机进行设计时, 需进行优化设计来降低永磁同步电机损耗, 同时降低电机在高速运行状态下的转矩脉动峰峰值, 进而改善电机带来的高频振动和噪声.

目前对于永磁同步电机的优化设计方法, 主要有遗传算法、神经网络法和田口法等. Jing 等<sup>[7]</sup>采用遗传算法对双定子单转子型永磁体同步电机进行优化, 其输出转矩提高了 4.36%, 转矩脉动减小了 5.12%, 改

善了该类型电机转矩脉动大且反电动势谐波含量丰富的缺点; Mohammadi 等<sup>[8]</sup>利用神经网络建立了电机的非参数模型, 优化永磁电机非导磁部分、实现对电机的局部尺寸进行优化, 以改善电机性能. 但是该算法下, 电机的建模泛化能力较差.

刘鉴等<sup>[9]</sup>在传统田口正交试验设计的基础上, 通过模糊推理把多种待优化目标转换为一个待优化目标, 进而得到电机的最佳参考组合; Gope 等<sup>[10]</sup>采用 L16 正交阵列的田口法, 优化了永磁体同步电机中永磁体的尺寸及其位置参数, 表明了田口法在优化电机的线电流、负载转矩和效率等性能上具有一定的优势; Cui 等<sup>[11]</sup>以定子内径、气隙长度、永磁体剩磁和磁体尺寸公差为待优化参数, 引入田口设计方法, 为潜艇用永磁体同步电机进行优化设计, 并通过样机进行了测试, 成功地提升了电机最大效率并降低了齿槽转矩, 增强了电机的鲁棒性. 田口法属于局部优化算法, 虽然无法像遗传算法一样考虑较多的优化目标, 优化精度不如遗传算法等全局优化法, 但其操作步骤简单, 收敛速度快, 在实际工业电机中具有很好的实用性. 因此本文提出一种改进的田口迭代法, 即在传统田口法的基础上进行迭代, 同时在每次迭代计算前, 不再考虑上一轮迭代中影响权重较小的参数, 以此改善其优化精度并提升计算效率.

\* 国家重点研发计划资助项目(2020YFB2104500); 广东省科技厅重点研发计划资助项目(2019B090909002)

<sup>†</sup> 通信作者: 华青松(1975—), 男, 教授. 研究方向: 洁净能源材料和装备技术、射线束技术. E-mail: 11112019039@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-29

## 1 永磁同步电机原始参数及性能

**1.1 永磁同步电机原理和结构** 常见的表贴式永磁同步电机二维基本结构见图 1, 其主要是由永磁体、转子、定子铁芯和定子绕组等组成. 由电磁感应定律可知, 当在定子绕组中通入相位差互为  $120^\circ$  的三相交流电时, 气隙中会产生一个恒定转速的旋转磁场, 此磁场与永磁体的励磁磁场相互作用, 从而产生拖动转子转动的电磁转矩. 起初, 永磁体的励磁磁场与定子旋转磁场转速不同, 会产生交变转矩, 当转子加速到速度接近旋转磁场的转速时, 定子与转子相互作用产生的电磁转矩将转子牵入与定子的同步旋转状态中.

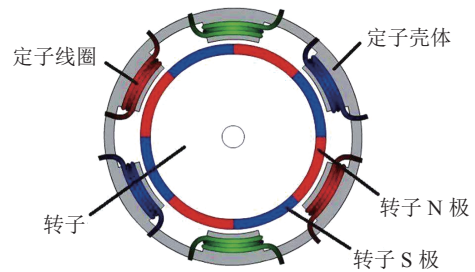


图 1 表贴式永磁同步电机基本结构示意图

由于本文研究的是高速永磁同步电机, 对转子的结构强度要求高, 故转子采用整体式结构, 其结构强度高, 电机径向长度更小<sup>[12]</sup>, 且方便工业上加工制作. 而普通表贴式结构由于内部有转轴, 其尺寸更大, 且结构强度不如整体式结构. 二者结构示意图如图 2.

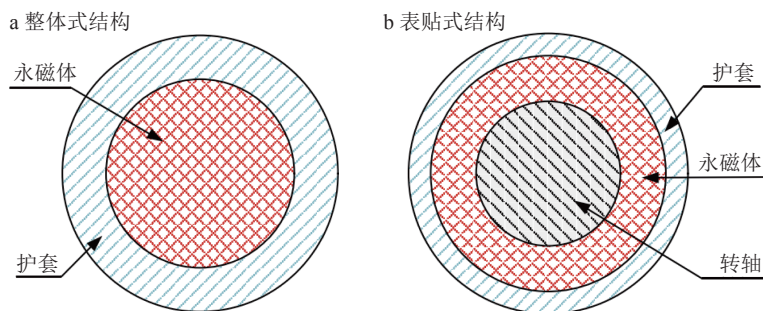


图 2 整体式转子结构和表贴式转子结构示意图

**1.2 电机设计指标** 本文设计了一台高速永磁同步电机, 其额定电压为 200 V, 额定功率为 6 kW, 额定转速为  $110\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 定子最大磁密为 1.4 T. 根据邱瑞林<sup>[13]</sup>对高速永磁同步电机的电磁设计, 建立初始的电磁设计方案, 部分数据见表 1.

表 1 电机原始方案参数

参数	数值	参数	数值
极数	2	跨距	10
槽数	24	定子内径/mm	25
轴向长度/mm	50	定子外径/mm	59
磁钢内径/mm	18	气隙长度/mm	3
护套厚度/mm	2	槽开口宽度/mm	1.2

计算额定转矩的转矩式为

$$M = \frac{9\,550 \times P}{n}, \quad (1)$$

式中:  $M$  为电磁转矩, 单位  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $P$  为额定功率, 单位 kW;  $n$  为转速, 单位  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ .

故额定转矩为  $0.520\text{ N}\cdot\text{m}$ , 由于仿真与实际工艺有些许偏差, 因此按照经验保留 3% 左右的裕度, 即最后的仿真结果取值范围为  $0.520\sim 0.535\text{ N}\cdot\text{m}$ .

利用电磁有限元仿真软件 ANSYS Electronics Desktop, 根据电机电磁设计的结构参数, 用 Rmxprt 模块生成 Maxwell 二维仿真模型, 设置适当的边界条件、激励源条件、有限元剖分网格、磁场仿真约束条件, 完成电磁场有限元仿真.

通过仿真计算的电机转矩波形见图 3-a, 此方案下的电机, 其额定电磁转矩为  $0.561\text{ N}\cdot\text{m}$ , 电机要求的额定转矩为  $0.520\sim 0.535\text{ N}\cdot\text{m}$ , 此方案下的转矩略大, 后续将对其进行优化. 而转矩脉动峰峰值为  $1.54\text{ mN}\cdot\text{m}$ , 不到额定转矩的 3%, 故转矩波动在合理区间内, 同时由图 3-a 可以直观看出, 电机额定转矩较稳, 在图上近似一条直线, 转矩波动较轻. 电机稳定状态下定子铁耗见图 3-b, 约为  $188.1\text{ W}$ , 涡流损耗约为  $0.43\text{ W}$ . 电机在额定工作点的感应电动势线电压的最大值见图 3-c, 约为  $180\text{ V}$ , 小于直流母线电压  $200\text{ V}$ , 符合要求. 图 3-d 磁场线分布云图显示, 电机磁场呈二极对称式分布, 且分布均匀, 符合永磁同步电机磁场线分布情况. 通过磁密云图可以看出, 电机定子轭部磁密幅值为  $1.53\text{ T}$ , 高于硅钢片材料的饱和点  $1.40\text{ T}$ , 在定子齿部存在部分饱和区域, 因此后续还要针对初步设计的方案进行优化, 尽可能让定子磁密最大值远离硅钢片的饱和点, 同时其他性能也更加完善.

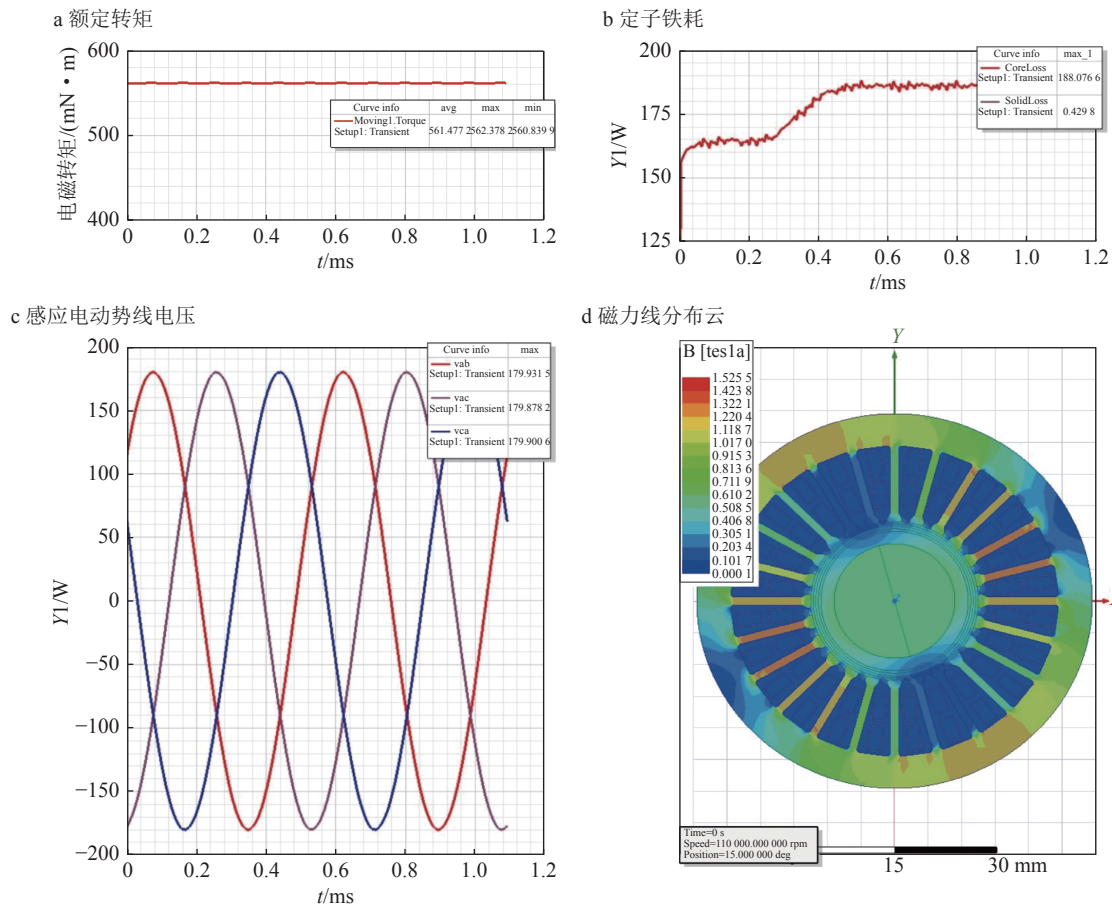


图 3 初始电磁方案有限元仿真结果示意

## 2 基于田口法的电机优化研究

**2.1 田口法简介** 田口法采用正交化试验的方法, 选取待优化参数和其水平数, 设计正交试验表, 随后按照正交试验表进行计算仿真, 将结果中不同因子的仿真结果分离出来, 经过数据处理, 得到不同因子对优化参数的作用程度, 选取并验证最优的参数水平组合。

**2.2 传统田口法设计** 田口法的设计主要包括待优化参数的选择、正交试验、分离试验和最优参数组的选取<sup>[14]</sup>。

**2.2.1 选取优化参数及水平** 本文对额定转矩、反电势幅值、铁芯损耗和磁密幅值进行优化, 使电机额定转矩值和反电势幅值在合适范围内, 且运行更加平稳。将定子外径、气隙长度、磁钢厚度、轴向长度和定子槽深作为优化变量, 并在电机原始参数附近选择适当的试验水平值, 建立正交试验矩阵。

优化变量及其水平数值如表 2 所示。

**2.2.2 正交试验及分离试验结果** 在进行正交试验和分离实验后, 各分离参数下的试验结果如图 4 所示。

随后分析在某一性能下, 各个优化参数对此性能的影响权重, 即分析某一优化参数下的方差与全部优

表 2 优化变量及其水平数值 mm

优化变量	定子外径	气隙	磁钢外径	轴向长度	槽深
水平1	55	2.6	15	46	8
水平2	57	2.8	16	48	9
水平3	59	3.0	17	50	10
水平4	61	3.2	18	52	11
水平5	63	3.4	19	54	12

化参数方差之和的比值。各参数对试验结果的影响比例如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 轴向长度对待优化性能的影响较其他参数均较小, 这是因为电机长度增加, 为达到所要求的电压, 绕组匝数需适当减少, 定子铁芯上的磁密幅值将会因匝数减少而减小, 从而抵消因轴向长度增加造成的影响。同时也说明轴向长度的取值已取得合适的范围内, 因此在后文进行改进式田口法时不把其作为待优化变量。在当前所选择的仿真试验水平下, 根据各个参数对每个性能的影响权重, 得出优化组合为定子外径 61 mm、气隙长度 2.6 mm、磁钢外径 17 mm、轴向长度 50 mm、槽深 9 mm。

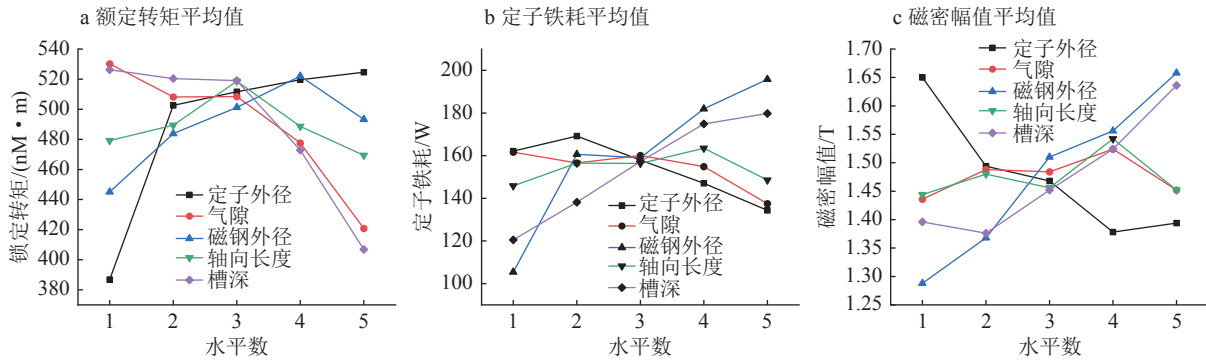


图 4 各参数在不同水平数下的平均值

表 3 各参数对试验结果的影响比例 %

参数	额定转矩占比	定子铁耗占比	磁密幅值占比
定子外径	37.66	8.53	24.66
气隙长度	20.39	4.29	2.46
磁钢外径	9.08	56.51	46.18
轴向长度	3.83	2.26	3.14
槽深 $H_s2$	29.04	28.41	23.56

优化前后电机性能仿真结果如表 4 所示。

表 4 优化前后电机性能对比

优化期	额定转矩/ (N·m)	转矩脉动峰 峰值/(mN·m)	定子铁芯 损耗/W	磁密 幅值/T
优化前	0.561	1.540	188.1	1.53
优化后	0.534	0.818	125.7	1.35

由表 4 可以看出, 优化后的仿真结果与优化前相比, 额定转矩降低了 4.8%, 定子铁芯损耗降低了 33.2%, 最大磁密降低了 11.8%, 且已经不在定子硅钢片材料饱和区域, 说明上述性能在田口法优化下均有提升。虽然减小气隙长度, 会增加气隙磁密幅值, 但因为增加定子外径, 使得定子齿部宽度增加, 从而有效地减少了气隙磁密幅值, 抵消了气隙长度减小造成的影响。转矩脉动峰峰值降低了 46.9%, 但其在优化前和优化后均已达到较理想状态, 均不足额定转矩的 3%, 故之后的优化为了提高工作效率, 暂不考虑对这一性能进行优化, 只分析最后优化参数组合下的转矩脉动峰峰值是否满足需求。

**2.3 改进式田口法迭代设计** 传统田口法虽然操作简便、效率高, 但存在其优化效果受参数水平数的取值影响这一问题。虽然所选取的每个参数都会对该性能产生影响, 但是不同参数对该性能的影响比例不同。若选择某个影响水平较低的参数进行优化, 则会增加试验计算周期。因此, 本文提出一种改进的田口法迭代设计方法。首先根据传统的田口法计算出各

个参数对各个性能的影响权重, 从而得出初代的优化参数组合与权重因素最低的参数。若其影响权重过低, 则表明其取值已经在合适的范围内, 则下一次田口法将摒弃掉此权重最低的参数, 将其设为固定值, 再在此基础上重新选取参数组合, 将该参数组合作为下次田口法优化的初始条件, 并继续缩小水平数的间隔, 进行反复迭代, 直至相邻 2 次优化性能之差小于误差范围, 或优化结果中某项性能已停止优化, 则迭代结束。

**2.3.1 优化参数水平** 经过初代田口法优化后, 此次田口法的待优化参数组合及其水平数值见表 5。

表 5 优化变量及其水平数值 mm

优化变量	定子外径	气隙	磁钢外径	槽深
水平1	59	2.4	16.0	8.0
水平2	60	2.5	16.5	8.5
水平3	61	2.6	17.0	9.0
水平4	62	2.7	17.5	9.5

**2.3.2 正交试验** 根据所选待优化变量和其需要试验的水平值, 设计正交试验表。要求正交表可以对多因素水平进行优化, 达到均匀统一的目的, 从而减少试验次数, 提高试验效率。

正交表通常可以表示为  $L_s(A^k)$ , 其中:  $L$  表示正交表;  $s$  表示试验次数;  $A$  表示水平数量;  $k$  表示优化因子个数<sup>[15]</sup>。

根据表 6 设定的参数水平数设计此次田口法优化的正交试验表, 并使用 ANSYS 软件进行电磁仿真, 试验结果如表 6 所示。

**2.3.3 分离试验结果** 田口法主要用来分析不同电机参数对电机某项性能的影响权重, 各参数在不同水平数的电机性能结果如图 5 所示。

第 2 次田口法各参数对测试性能影响权重如表 7 所示。

由表 7 可知, 定子外径的取值对上述性能影响权

表 6 正交试验表及待优化性能

试验序号	定子外径/mm	气隙/mm	磁钢外径/mm	槽深/mm	额定转矩/(N·m)	反电势/V	定子铁耗/W	磁密幅值/T
1	59	2.4	16.0	8.0	0.498	160.2	99.0	1.42
2	59	2.5	16.5	8.5	0.516	165.8	115.0	1.33
3	59	2.6	17.0	9.0	0.534	171.2	134.6	1.34
4	59	2.7	17.5	9.5	0.551	176.5	158.6	1.33
5	60	2.4	16.5	9.0	0.518	166.6	119.2	1.32
6	60	2.5	17.0	9.5	0.536	172.0	138.9	1.34
7	60	2.6	17.5	8.0	0.554	177.3	125.3	1.5
8	60	2.7	16.0	8.5	0.492	158.3	100.8	1.32
9	61	2.4	17.0	8.0	0.539	172.5	112.6	1.47
10	61	2.5	17.5	8.5	0.556	178.0	129.6	1.39
11	61	2.6	16.0	9.0	0.494	159.0	104.6	1.25
12	61	2.7	16.5	9.5	0.511	164.5	121.1	1.31
13	62	2.4	17.5	9.0	0.558	178.8	134.0	1.39
14	62	2.5	16.0	9.5	0.496	160.0	108.4	1.27
15	62	2.6	16.5	8.0	0.514	165.0	99.8	1.44
16	62	2.7	17.0	8.5	0.532	170.5	114.6	1.31

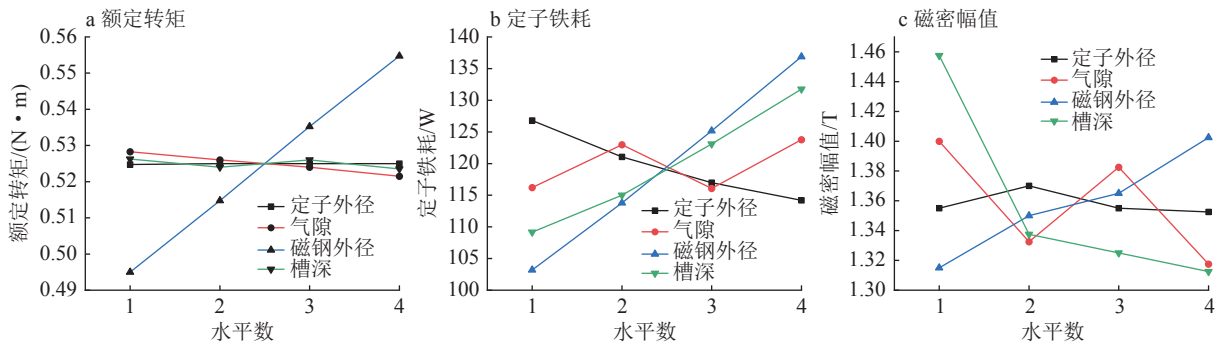


图 5 各参数在不同水平数下的平均值

表 7 各参数对各性能影响权重 %

参数	额定转矩占比	定子铁耗占比	磁密幅值占比
定子外径	<0.01	8.44	0.86
气隙长度	1.22	4.95	20.90
磁钢外径	98.49	59.40	17.70
槽深	0.29	27.21	60.53

重均较小,若还需进行迭代,则下次迭代时,可以不考虑将定子外径设为待优化参数;气隙长度主要对磁密幅值影响较大,因此选取气隙长度最优值时,主要考虑磁密幅值最小时所对应的气隙长度值;磁钢外径对以上性能影响均较大,因此需要对每个性能综合考虑;在选择槽深最优参数时,着重考虑在磁密幅值和定子铁芯损耗性能较好情况下的槽深值.综上所述,最后选择的优化组合为定子外径 62 mm、气隙长度 2.7 mm、磁钢外径 17 mm、槽深 9 mm.

2.4 优化结果对比 表 8 为原始电机设计、第 1 次田

口法优化设计、第 2 次田口法迭代设计获得的 3 种电机结构参数,以及电机额定转矩、转矩脉动峰峰值、定子铁芯损耗和磁密幅值的对比结果.图 6 显示第 2 次田口法下电机性能.

通过计算得到第 2 次田口法与第 1 次相比,额定

表 8 3 次电机参数组合性能对比

	原始方案	第1次田口法	第2次田口法迭代
定子外径/mm	59	61	62
气隙长度/mm	3.0	2.6	2.7
磁钢外径/mm	17	17	17
轴向长度/mm	50	50	50
槽深/mm	10	9	9
额定转矩/(N·m)	0.561	0.534	0.532
转矩脉动峰峰值/(mN·m)	1.54	0.8175	0.7809
定子铁芯损耗/W	188.1	125.7	121.3
磁密幅值/T	1.53	1.35	1.33

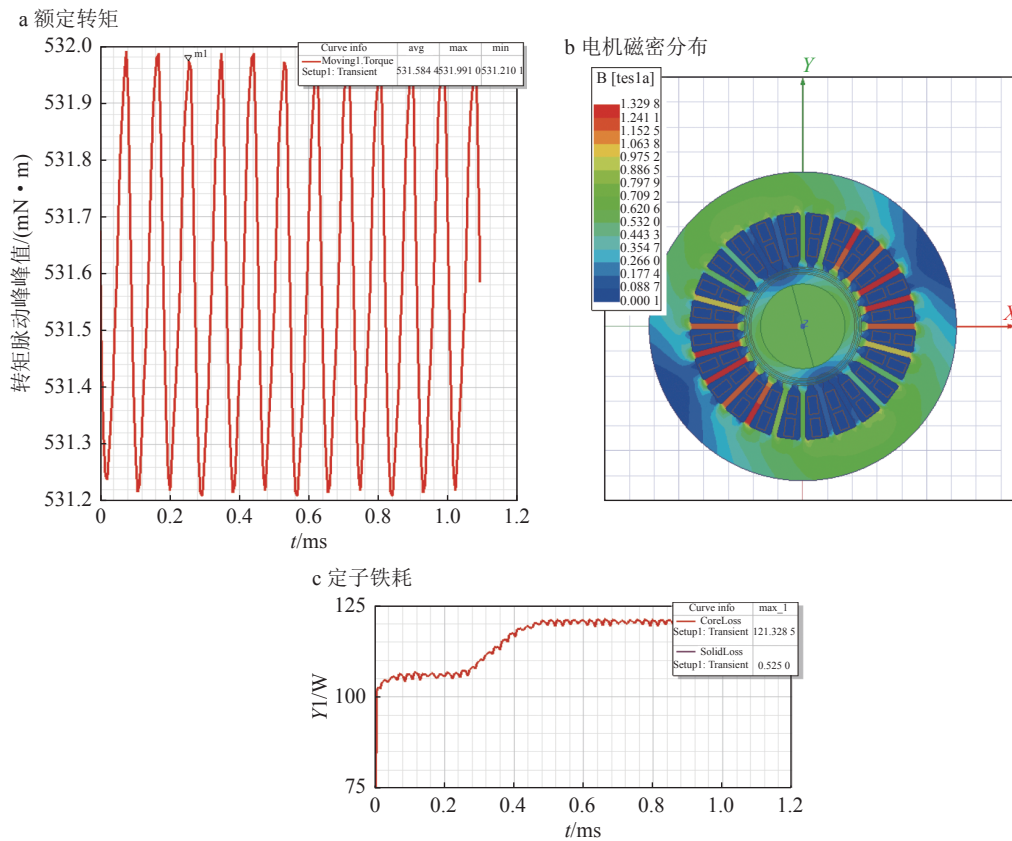


图 6 第 2 次田口法迭代下电机性能

转矩优化前后误差为 0.4%，定子铁芯损耗前后误差为 3.5%，定子磁密幅值前后误差为 1.5%，以上性能前后优化结果都比较接近，各项电机性能优化前后误差均 < 4%，即认为田口法迭代优化已完成，最终获得的最优参数组合为定子外径 62 mm、气隙长度 2.7 mm、磁钢外径 17 mm、槽深 9 mm。

同时田口法迭代后优化的性能与原始相比，均有较大的提升。其中，额定转矩降低了 5.2%，使较高的转矩降低到目标范围内；转矩脉动减小 49.3%，有效地降低了电机运行时的振动；定子铁芯损耗降低了 35.5%，提高了电机运行效率，延长了电机使用寿命；磁密幅值降低了 13.1%，使定子齿部和轭部的磁密分布也在正常范围之内。电机整体性能得到优化(图 6)。

### 3 结论

本文在电机设计理论和电磁学理论的基础上，先设计出一个大致的永磁同步电机，为了降低转矩脉动峰值、定子铁芯损耗和磁密幅值，改善电机性能，在传统田口法的基础上对田口法进行改进，以此来对电机的结构进行优化设计，最后得出最优的定子外径、气隙长度、磁钢外径、轴向长度、槽深的参数组合。优化后的仿真计算结果表明，额定转矩降低了 5.2%、转矩脉动峰值减小了 49.3%、定子铁芯损耗降低了

35.5%、磁密幅值降低了 13.1%，电机整体性能得到优化。验证了此改进后田口法在永磁同步电机优化设计中的实用性。较传统的全局优化算法相比，仿真次数显著减少，提高了优化效率；较传统的田口法相比，提高了优化精度。故该研究在实际电机设计的工程领域中具有指导意义。

### 4 参考文献

- [1] 彭海涛, 何志伟, 余海阔. 电动汽车用永磁同步电机的发展分析[J]. 微电机, 2010, 43(6): 78
- [2] IIDA H, IMAYOSHI S, MORIMOTO K, et al. Long-term stability of Sm/sub 2/Co/sub 17 /-type magnets for control rod drive mechanism (CRDM) in a nuclear reactor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3653
- [3] FODOREAN D, SARRAZIN M M, MARTIŞ C S, et al. Electromagnetic and structural analysis for a surface-mounted PMSM used for light-EV[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2892
- [4] HONG D K, JEONG Y H, WOO B C, et al. Electric-mechanical performance analysis of high speed motor for electric turbo charger[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018, 57: 125
- [5] 张洪亮. 永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 2
- [6] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D].

- 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 1
- [7] JING L B, TANG W Z, LIU W, et al. A double-stator single-rotor magnetic field modulated motor with HTS bulks[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(6): 1
- [8] MOHAMMADI M H, RAHMAN T, SILVA R, et al. A computationally efficient algorithm for rotor design optimization of synchronous reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3): 1
- [9] 刘鉴, 诸德宏. 基于模糊推理田口法的IPMSM多目标优化设计[J]. 微电机, 2021, 54(6): 38
- [10] GOPE D, GOEL S K. Design optimization of permanent magnet synchronous motor using Taguchi method and experimental validation[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2021, 22(1): 9
- [11] CUI J G, XIAO W S, ZOU W Q, et al. Design optimisation of submersible permanent magnet synchronous motor by combined DOE and Taguchi approach[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(6): 1060
- [12] 于子江. 空压机用高速永磁同步电机设计与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 11
- [13] 邱瑞林. 永磁同步电机电磁设计及优化研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020: 7
- [14] LEE B H, JUNG J W. Robust design for reducing cogging torque in surface-mounted permanent magnet synchronous motor considering tolerances of sub-components[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(3): 448
- [15] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 64

## Electromagnetically optimized design for high-speed permanent magnet synchronous motor by Taguchi iteration

QIU Mashun HUA Qingsong

( College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Aim to optimize performance by high-speed permanent magnet synchronous motor under rated operating conditions, rated torque, torque ripple, stator core loss, and magnetic density amplitude are taken as performance parameters to be optimized. Improved Taguchi iterative optimization algorithm was used to study influence of stator outer diameter, air gap length, magnet outer diameter, axial length and stator slot depth. An orthogonal test matrix was established, ANSYS electromagnetic simulation software was used to simulate and calculate motor performance. To ensure that back EMF line voltage and rated torque performance were within limit, parameter combination with lowest stator core loss and smallest magnetic density amplitude was preferred. Simulations confirmed that performance after iterative optimization by improved Taguchi method was greatly improved. Rated torque performance was reduced by 5.2%. Torque ripple was reduced by 49.3%. Stator core loss was reduced by 35.5%. Magnetic density amplitude was reduced by 13.1%. The overall motor performance was optimized. Compared with traditional full-level orthogonal optimization, this current design reduced total number of simulations, improved optimization efficiency, and showed confirmed practicability.

**Keywords** permanent magnet synchronous motor; optimization; Taguchi method; iteration

【责任编辑: 刘先勤】