

多目标约束下电机电磁性能综合优化设计方法研究

黄浩钦 鲁蓉 周娟

成都华川电装有限责任公司, 四川 成都 610100

[摘要]针对内置式 V 型永磁同步电机多目标、多约束优化问题, 提出一种融合试验设计、Kriging 代理模型、约束非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 与容差分析的综合优化设计方法。以一台 5kW、8 极 36 槽电机为对象, 选取永磁体厚度、宽度、V 型夹角、气隙长度和定子槽口宽度为设计变量, 以最大化平均电磁转矩和最小化转矩脉动系数为优化目标, 同时施加效率、电流密度、退磁、气隙磁密谐波畸变率和齿槽转矩等 5 项约束。利用最优拉丁超立方采样生成 40 个有限元样本, 构建决定系数 $R^2 > 0.96$ 的高精度 Kriging 模型, 采用约束支配策略的 NSGA-II 搜索 Pareto 前沿, 通过最小距离法确定折中方案, 并开展全局敏感度分析与蒙特卡洛容差评估。

[关键词]永磁同步电机; 多目标优化; Kriging 模型; 有限元分析; 容差设计

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20208

中图分类号: TM301.4

文献标识码: A

Research on the Comprehensive Optimization Design Method of Motor Electromagnetic Performance under Multi-objective Constraints

HUANG Haoqin, LU Rong, ZHOU Juan

Chengdu Huachuan Electric Parts Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610100, China

Abstract: A comprehensive optimization design method is proposed for multi-objective and multi constraint optimization problems of built-in V-shaped permanent magnet synchronous motors, which integrates experimental design, Kriging surrogate model, constrained non dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), and tolerance analysis. Taking a 5 kW, 8-pole 36 slot motor as the object, the thickness, width, V-shaped angle, air gap length, and stator slot width of the permanent magnet are selected as design variables. The optimization objectives are to maximize the average electromagnetic torque and minimize the torque ripple coefficient, while applying 5 constraints including efficiency, current density, demagnetization, air gap magnetic density harmonic distortion rate, and cogging torque. Using the optimal Latin hypercube sampling to generate 40 finite element samples, a high-precision Kriging model with a coefficient of determination $R^2 > 0.96$ is constructed. The constrained dominated NSGA-II strategy is used to search for the Pareto front, and a compromise solution is determined through the minimum distance method. Global sensitivity analysis and Monte Carlo capacitance difference evaluation are conducted.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; multi objective optimization; Kriging model; finite element analysis; tolerance design

引言

内置式 V 型永磁同步电机由于具有高的聚磁效应和高的功率密度, 在驱动领域得到了广泛的应用, 但是它的平均转矩和转矩脉动往往互相制约, 而且需要同时满足效率、温升、退磁和谐波等各种约束条件, 属于典型的多目标约束优化问题。直接用有限元模型做优化计算代价太高, 代理模型辅助的进化策略给求解提供了一条高效的途径。Kriging 模型由于可以精确地逼近非线性电磁响应, 在电机优化中已经被使用; 带有约束处理能力的 NSGA-II 算法可以有效地搜索可行域内的 Pareto 前沿。工艺偏差、材

料分散性都会影响性能的稳定性的, 把容差设计加入到优化流程中有着重要的工程意义。但是将试验设计、代理模型、约束多目标优化、容差评估等有机地结合起来的整个过程方法还需要进一步的研究。

1 电机结构参数与设计变量

研究对象为额定功率为 5kW、额定转速为 1500r/min 的 8 极 36 槽内置式 V 型永磁同步电机。定子外径 210mm, 铁心长 100mm, 绕组为双层短距分布, 永磁体用 N38UH 牌号的钕铁硼。该电机的 V 型永磁体结构可以提高聚磁效应, 但是磁路是非线性的, 结构参数对气隙磁场波形、

交直流电感和转矩特性的影响比较复杂。

确定设计变量时,需选择对优化目标和约束敏感且能够在制造中独立控制的参数。经初步筛选,选定的变量及取值范围如下:永磁体厚 h_m 为 3.0mm~6.0mm;永磁体宽度 w_m 为 20mm 至 30mm;V 型永磁体两段夹角 θ 为 100° 至 130° ;气隙长度 δ 为 0.6mm~1.2mm;定子槽口宽度 b_{s0} 为 2.0mm~4.0mm。以上五个变量构成了设计向量 $x = [h_m, w_m, \theta, \delta, b_{s0}]^T$ 。保持定子冲片外径、内径、槽形主体尺寸、铁心长度以及绕组匝数和线径不变,以限定优化空间在电磁主回路范围内^[1]。由于槽口宽度影响气隙磁导谐波,进而影响转矩脉动和铁耗,但不会改变槽满率,因此将其纳入变量是合理的。永磁体夹角 θ 改变会同时影响磁通聚集程度和极弧系数,引入该变量后可拓宽转矩与脉动的折中空间。

2 多目标优化模型建立

2.1 优化目标的定义与表达

优化围绕额定工作点展开,直流母线电压 540V,采用最大转矩电流比控制,定子电流有效值设定为 20A,转速 1500r/min。两个优化目标定义为:最大化平均电磁转矩 T_{avg} ,最小化转矩脉动系数 T_{rip} 。平均电磁转矩由有限元计算的一个电周期内瞬时转矩经算术平均得到。转矩脉动系数 T_{rip} 定义为瞬时转矩峰值与平均转矩之比,即:

$$T_{rip} = \frac{\max(T) - \min(T)}{T_{avg}}$$

式中: $\max(T)$ 和 $\min(T)$ 分别为稳态电周期内转矩的最大值和最小值。 T_{rip} 越低表示转矩输出越平稳,有利于抑制振动噪声。两目标存在固有冲突:增大磁体用量和气隙磁密可提升 T_{avg} ,但往往会加剧气隙磁场谐波畸变,使 T_{rip} 恶化。因此优化目标需要获取二者间的非劣解集。

2.2 约束条件的梳理与数学描述

为使优化解满足温升、退磁、供电品质和可制造性等多方面限制,梳理如下约束。约束一,额定效率 η 不低于 94%。效率计算包含铜耗、定子铁耗和永磁体涡流损耗,铁耗基于改进 Steinmetz 方程在有限元后处理中求解,铜耗由相电阻和电流计算。约束二,定子电密 J_{rms} 不超过 5.5A/mm²,对应有有效值电流下槽内导体电流密度。该值兼顾了散热与绝缘等级^[2]。约束三,永磁体最低工作点磁密 B_{min} 需高于退磁拐点磁密 0.15T。在最大去磁电流条件下进行有限元校核,记录永磁体内部各单元磁密的最小值,确保不出现不可逆退磁。约束四,气隙径向磁密谐波畸变率 THD_B 不高于 25%。 THD_B 定义为气隙磁密谐波分量有效值平方和扣除基波分量后开方除以基波幅值。限制此值可

间接控制转矩脉动和铁耗谐波。约束五,齿槽转矩峰值 T_{cog} 小于 0.4N·m。该约束防止空载定位力矩过大。此外,定子齿部和轭部最大磁密分别限制在 1.6T 和 1.5T 以内,但不作为主要约束列出,在样本计算时若超出则标记为不可行解。以上约束构成了设计的可行域D。若任一约束不满足,该设计点即被判为不可行。

3 综合优化设计方法

3.1 试验设计与有限元样本生成

建立代理模型之前,在设计空间中应该有策略地采样,使变量的响应得到充分激发。使用最优的拉丁超立方方法,在五维标准化设计空间里随机抽取了 40 个初始样本点,该方法可以明显提高投影的均匀性,防止出现某一个维集中分布的情况。样本点的坐标用线性变换得到各个变量实际物理区间的值。

每个样本点进行二维瞬态有限元电磁场计算。模型采用半周期对称边界,网格在气隙区域局部细化,单元总数约 2.8 万个。每个工作点计算三个电周期,待稳态后截取最后一个周期的转矩和磁密数据进行后处理。全部样本计算在一台 32 核工作站上完成,单次计算时间约 12 分钟。样本集合包括输入变量和输出响应 T_{avg} 、 T_{rip} 、效率、电密、 B_{min} 、 THD_B 和 T_{cog} 等。

3.2 代理模型构建及精度校核

选择 Kriging 模型作为代理模型。Kriging 模型由回归多项式和随机过程叠加而成,其随机相关函数可有效捕获电磁响应的多峰和非线性特征。针对 T_{avg} 和 T_{rip} 分别构建两个独立 Kriging 模型。相关函数选用高斯型,回归基函数采用二次多项式。通过极大似然估计确定相关参数 θ 。

采用留一交叉验证法检验模型精度。将 40 个样本点逐一剔除,用剩余 39 个点重建模型并预测被剔除点的响应,最后计算决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE。 T_{avg} 模型 R^2 为 0.983, RMSE 占响应均值的 1.9%; T_{rip} 模型 R^2 为 0.967, RMSE 占比为 2.8%,表明模型具有良好预测能力。为进一步验证,额外生成 8 个随机测试点进行有限元计算,预测值与仿真值偏差均在 4%以内,代理模型可替代有限元用于后续优化。

3.3 多目标算法设置与求解流程

选用带约束支配策略的 NSGA-II 算法执行多目标搜索。约束处理采用约束支配原则:当两个解相比较时,若一个为可行解而另一个为不可行解,则可行解占优;若均为不可行解,则约束违反程度小的占优;若均为可行解,则由 Pareto 支配关系判定。该机制避免可行解被不可行解淹没,可高效探索可行域边界。

算法参数设置如下：种群规模 100，最大代数 200，交叉概率 0.9，变异概率 0.2，交叉分布指数 20，变异分布指数 15。变量离散化步长： h_m 和 δ 步长 0.05mm， w_m 和 b_{s0} 步长 0.1mm， θ 步长 1° 。每一代进化过程中，子代个体通过代理模型快速评估 T_{avg} 和 T_{rip} 以及各项约束的代理预测值。效率、电密、 B_{min} 、 THD_B 和齿槽转矩等同样建立相应的 Kriging 代理模型用于约束判断，仅当所有约束代理模型给出的预估值满足条件时，才标识为可行解。最终代保留的非支配解构成近似的 Pareto 前沿。由于代理模型存在些许误差，对前沿上典型的 10 个代表性个体再次进行全有限元校验，若出现约束越限则微调修正，确保最终解真实可行。

3.4 约束满足下的权衡决策

Pareto 前沿给出一组互有优劣的可行解，实际工程中需从中挑选唯一方案。采用最小距离法进行客观决策：先将前沿上的 T_{avg} 和 T_{rip} 目标值归一化，分别除以各自前沿极值，再计算每个解到理想点的欧氏距离，该理想点对应归一化后的最大转矩和最小脉动。选择距离最小的点作为折中设计。此外，可赋予不同权重以满足特定工况偏好，若拖动类负载对平稳性要求更高，可在归一化时对 T_{rip} 目标施加更大权重系数。本例选取无偏好的最小距离解作为最终优化方案。

4 方法应用与效果分析

4.1 有限元仿真模型与实验对标

在施加优化前，需确认有限元模型的准确性。首先依据初始设计方案制作样机，初始参数为 h_m 等于 4.0mm， w_m 等于 24mm， θ 等于 120° ， δ 等于 0.8mm， b_{s0} 等于 2.5mm。在测功机台架上进行额定工况加载试验，反电动势、输出转矩和效率等关键数据与仿真结果对比如下：线反电动势有效值实验值为 192.3V，仿真值为 195.1V，偏差 1.5%；

平均输出转矩实验值 31.4N m，仿真值 32.1N m，偏差 2.2%；额定效率实验值 93.8%，仿真值 94.1%，偏差 0.3%。机械损耗已从实测中扣除。以上误差在工程许可范围内，说明材料属性设置、边界条件和损耗计算模型基本准确，可作为优化基线。

4.2 优化前后电磁性能对比

采用上述方法得到折中优化解： h_m 等于 5.2mm， w_m 等于 22.8mm， θ 等于 114° ， δ 等于 0.72mm， b_{s0} 等于 3.0mm。对优化前后的有限元模型在同一额定工况下计算。优化后平均转矩由 32.1N m 提升至 33.6N m，增幅 4.7%；转矩脉动系数 T_{rip} 从 7.8%下降至 5.7%，降幅 26.3%。齿槽转矩峰值从 0.51N m 降至 0.33N m，满足小于 0.4N m 的约束。效率计算值为 94.3%，超出 94%的下限要求。电流密度 J_{rms} 为 5.1 A/mm²，低于约束上限^[3]。最低磁密点磁密为 0.22T，未出现退磁风险。气隙磁密 THD_B 由初始的 27.2%降为 22.8%。转矩脉动显著降低的原因在于合理匹配了磁钢宽度、夹角与槽口宽度，使气隙磁密的 5 次和 7 次谐波幅值得到抑制。转矩的提升则得益于磁体加厚和气隙适度减小，增强了气隙磁通而铁心未进入深度饱和。表 1 整理关键性能对比。

表 1 优化前后关键电磁性能对比

性能指标	符号	单位	初始设计	优化设计	变化
平均电磁转矩	T_{avg}	N m	32.1	33.6	↑ 4.7%
转矩脉动系数	T_{rip}	%	7.8	5.7	↓ 26.3%
齿槽转矩峰值	T_{cog}	N m	0.51	0.33	↓ 35.3%
额定效率	η	%	94.1	94.3	↑ 0.2%
电流密度（有效值）	J_{rms}	A/mm	（据估算）	5.1	-
最低磁密点磁密	B_{min}	T	-	0.22	-
气隙磁密谐波畸变率	THD_B	%	27.2	22.8	↓ 16.2%

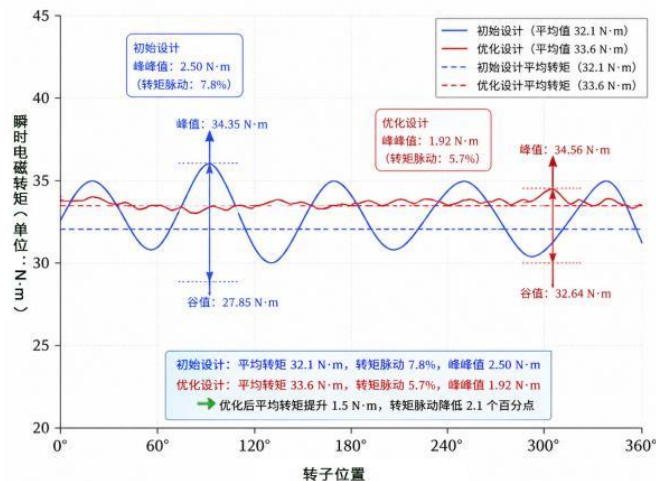


图 1 为优化前后额定点的稳态转矩波形对比

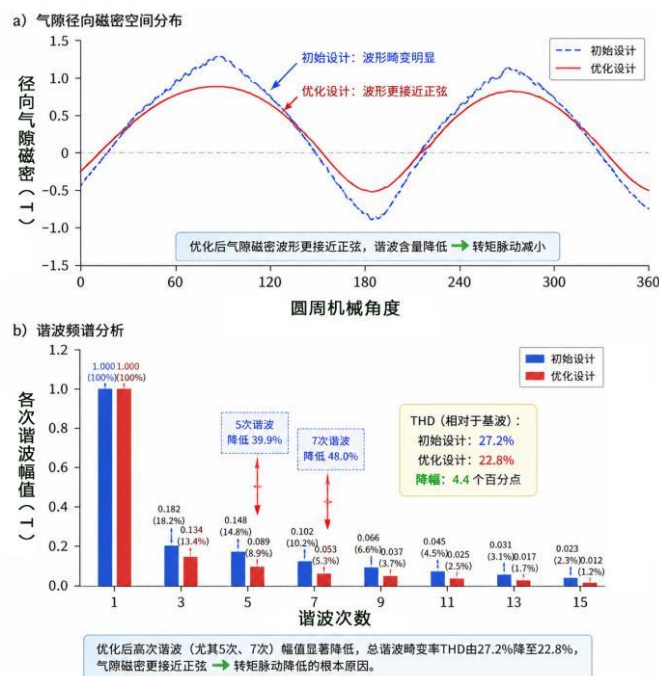


图2 给出气隙径向磁密及其谐波谱

优化后的转矩波形波峰波谷差明显减小,气隙磁密中主要的特征谐波含量也都有所降低。

4.3 设计参数敏感度分析

为揭示各变量对性能的贡献,基于 Kriging 代理模型实施基于方差的全局敏感度分析。通过蒙特卡洛采样估计一阶敏感度指数 S_i 和全效应指数 S_{Ti} 。输入变量在各自区间内服从均匀分布,采样规模 10000 次。

对于平均转矩 T_{avg} ,永磁体厚度 h_m 的一阶敏感度指数为 0.41,气隙长度 δ 为 0.29,二者累计贡献 70%的方差。永磁体宽度 w_m 为 0.12,夹角 θ 为 0.09,槽口宽度 b_{s0} 小于 0.05。这表明控制转矩的主因子是磁动势源强度与主磁阻。对于转矩脉动系数 T_{rip} ,气隙长度 δ 的全效应指数最高,达 0.38,其后是槽口宽度 b_{s0} 的全效应 0.26,永磁体厚度 h_m 的全效应为 0.17,宽度 w_m 和夹角 θ 分别贡献 0.10 和 0.08。由此可见,脉动对气隙磁导谐波极为敏感,减小气隙虽能提高转矩,但极间漏磁和磁导谐波变化会使脉动约束趋紧,这解释了目标间的冲突本质。敏感度分析明确指出了后续制造中应重点控制的尺寸:永磁体厚度和气隙长度。

4.4 工艺与材料偏差影响评估

制造环节中永磁体剩磁 B_r 会有批次差异,充磁方向角、磁钢外形尺寸以及气隙装配尺寸均存在公差。为评价优化方案对这些分散性的鲁棒性,采用蒙特卡洛模拟进行偏差传递分析。

设定偏差模型:永磁体剩磁 B_r 服从正态分布,均值为 1.20T,标准差 0.012T,对应约 $\pm 3\%$ 的散布;永磁体厚度 h_m 、宽度 w_m 和气隙长度 δ 的加工尺寸偏差服从正态分布,均值为标称值,标准差取 0.017mm,相当于 $\pm 0.05\text{mm}$ 公差范围;槽口宽度 b_{s0} 标准差取 0.033mm^[4];V 型夹角 θ 偏差标准差取 0.33°。各偏差源相互独立。随机抽取 500 组输入组合,每组输入用代理模型快速计算 T_{avg} 和 T_{rip} ,并检查约束。结果表明,在 500 个样本中, T_{avg} 的均值 33.5N m,标准差 0.21N m,过程能力指数 C_{pk} 等于 1.52。 T_{rip} 的均值 5.8%,标准差 0.18%, C_{pk} 为 1.41。所有样本的效率、电密和退磁约束均满足,极少数样本齿槽转矩略超 0.4N m,概率约为 0.8%。可认为优化方案具有充分的工程稳健性。若需进一步提升,可将气隙尺寸公差收严至 $\pm 0.03\text{mm}$,则 T_{rip} 的 C_{pk} 值可上升至 1.67。该方法可为生产公差分配提供定量依据。

5 结束语

将试验设计、Kriging 代理模型、带约束支配的 NSGA-II 算法、敏感度和容差分析结合起来,形成一套可以操作的多目标约束下电机电磁性能综合优化的方法。以一台 5kW 内置式 V 型永磁同步电机作为应用对象,给出变量选取、模型建立、求解流程和工程决策的每一步具体实现过程,具有较强的实用价值。优化后的平均转矩提高 4.7%,转矩脉动降低 26.3%,各项电磁、热约束全部满足,

并且优化解在给定的制造偏差下具有较好的稳健性。全局敏感度表明永磁体厚度、气隙长度这两个因素对电机性能影响大,可以为电机的结构设计和工艺控制提供方向。本方法可以用于其他类型的电机综合优化,但是代理模型在大变量空间下的精度保持以及多物理场耦合约束的高效处理还需要进一步的研究。之后可以利用降维策略、自适应采样等方法来提高优化效率,把振动噪声、温升加入多物理约束体系中,得到更完整的工程优化工具。

[参考文献]

[1]刘达斌,阳辉,王晨,等.复合调磁型永磁电机运行原理与

电磁特性研究[J].中国电机工程学报,2026,7(13):12.

[2]林新明,叶建海,涂斌,等.强电磁干扰环境下永磁同步电机参数自动辨识算法[J].电子制作,2026,34(8):51-54.

[3]徐淑芬,高峰阳,岳文瀚,等.内置 UV 型混合永磁同步电机电磁振动抑制[J].振动、测试与诊断,2026,1(11):11.

[4]严新,刘鑫博.面向高转速伺服系统的无刷直流电机磁路-热路联合设计[J].微特电机,2026,54(6):25-30.

作者简介:黄浩钦(1988—),男,汉族,四川大竹县人,工程师,硕士研究生,江苏大学流体机械及工程专业毕业,研究方向为电机电磁及振动噪声设计优化。