

以效率为目标的异步电机槽型优化研究

周霞 逯代兴^{通讯作者}

上海应用技术大学, 上海, 201418;

摘要: 三相异步电机因其结构简单、可靠性高、适应性强、成本较低、弱磁易控制等优点被广泛应用于工业领域。电机优化可以提高电机性能、效率和可靠性, 从而实现更低的能源消耗。结合有限元法, 分别通过 Python 与 Ansys Maxwell 软件来建立初始三相异步电机模型并进行仿真, 借助 GA 遗传算法, 以降低损耗为优化目标, 定子、转子槽形参数为变量, 同时优化定子、转子槽形尺寸, 将 Python 与 Ansys Maxwell 中优化前后的电机模型进行对比, 结果表明, 槽型优化后的电机能量损耗降低了 26%, 电机效率性能得到提升, 验证了基于遗传算法的感应电机槽型优化设计方法的有效性。

关键词: Python; Ansys Maxwell; 三相感应电机; 遗传算法; 槽型优化设计

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.028

引言

三相异步电机由于其结构简单、成本低廉、维护方便等优点, 广泛应用于民生、商业和工业等领域。然而, 由于损耗较大和效率相对较低, 限制了异步电机在更广泛应用中的潜力。通过优化电机提高电机性能、效率和可靠性, 从而实现更低的能源消耗, 因此, 感应电机的设计优化对可持续发展具有重要意义。

提升电机的效率关键在于降低电机运行过程中的各种损耗, 定转子槽形的选择和槽形参数的设计与电机的效率性能高度相关, 通过电机槽型优化来实现电机效率性能优化, 降低损耗, 也是近年来重点的研究方向。吴电宁等人^[1]在三相异步电机中, 采用有限元方法, 分析了定子槽口宽度及槽深等参数对空载励磁电流的作用。文献^[2]针对感应电机, 分析了槽口深度对损耗的作用机理, 进一步比较分析了槽配合对转子损耗的影响。文献^[3]通过选择主要的定转子槽参数为设计变量, 对异步电机进行多目标优化, 提高了基速和最大输出功率。上述研究均表明结构参数优化对提升电机效率的重要性, 但对电机参数与电机效率关系的系统性优化分析仍待深入。

综上所述, 通过合理优化定子槽形和转子槽形的主要尺寸, 可以降低电机运行过程中的损耗, 改善感应电动机的起动性能和效率, 但同时存在优化设计周期较长, 优化效率不高的问题。为改善电机性能、提升电机效率, 本研究基于等效电路分析, 结合电机电磁-结构耦合机理, 通过 Python 与 Ansys Maxwell 软件模拟仿真, 并

通过遗传算法以降低损耗为目标对电机定、转子槽形参数进行优化, 通过对仿真结果进行分析与对比, 证明了异步电机优化设计的合理性和有效性, 同时有效缩短设计周期, 提高优化效率。

1 三相异步电机损耗模型

电机效率是评估电机性能优劣的关键指标之一。可以通过降低电机损耗从而提高电机的效率。电机的铁芯损耗和铜损耗在电机总损耗中占 80% 以上, 所以本文主要针对这两种主要损耗进行分析。

通过 Steinmetz 方程计算, 将铁损分解为两个部分: 磁滞损耗 (与频率呈线性关系) 和涡流损耗 (与频率的平方成正比), 方程的系数必须与每种材料的实验损失数据拟合。

$$P_i = P_h + P_e = k_h f^{\alpha} B^{\alpha\beta} + k_e f^2 B^2 \quad (1)$$

P_i —损耗密度; P_h —磁滞损耗; P_e —涡流损耗; k_h —从铁芯损耗数据回归的磁滞损耗系数; k_e —从铁芯损耗数据回归的涡流损耗系数; f —是磁通密度的频率; B —是磁通量密度的振幅 (即峰值)。

铜损耗是电机运行时电流经过定子绕组或转子导条产生的能量损耗。相比传统的铜耗计算方法, 利用有限元法对电机进行建模分析, 可以充分考虑异步电机运行时高次谐波导致的附加损耗, 可实时计算绕组和导条中的电流。 $P_{cu1} = \frac{1}{T} \sum_{\xi} \int_0^T r_s (i_{\xi A}^2 + i_{\xi B}^2 + i_{\xi C}^2) dt \quad (2)$

P_{cu1} —为定子铜耗; r_s —为每项绕组电阻; $i_{\xi A}$ 、 $i_{\xi B}$ 、 $i_{\xi C}$ —分别是 A、B、C 三相的各次谐波电流; ξ —为谐波次数, $\xi = 2k + 1 (k = 0, 1, 2, \dots)$ 。

同理, 转子导条中除了产生高频谐波电流外, 高频

电流会导致在鼠笼导条中形成集肤效应,从而导致导条的电流分布不均。因此,在有限元法中,利用积分的方法计算转子铜耗,其计算公式为:

$$P_{cu2} = \sum_{\Delta} \sum_{\xi} \frac{1}{\sigma} L_{ef} S_{\Delta} J_{\Delta \xi}^2 \#(3)$$

P_{cu2} —指转子铜耗; σ —为转子导条电导率; $J_{\Delta \xi}$ —是导条各单元内各次电流密度值; S_{Δ} —指剖分后导条各单元面积。

2 优化模型

本文优化对象为 36 槽 2 极 30KW 的三相笼型转子异步电机,选取电机中的定子槽和转子槽作为研究对象,二者槽形尺寸标注类似,其中定子槽形为梨形槽,转子槽形为开口槽。本文以定子槽主要参数 (H_0 、 H_1 、 H_2 、 R_1 、 W_0 、 W_1 、 W_2) 和转子槽主要参数 (H_0 、 H_1 、 H_2 、 R_1 、 W_0 、 W_1 、 W_2) 作为优化变量,以电机总损耗作为优化目标,建立优化模型。电机效率是衡量电机输出性能的主要指标,因此在优化中必须保证电机最大效率;同时,考虑到工艺条件和结构干涉,各个槽型参数的优化范围也须加以约束。因此,建立的降低损耗的优化模型为:

$$F(X) = \min_k [P_{total}] = \min_k [P_{cu} + P_{Fe}] \#(4)$$

P_{total} 为能量损耗值; K 定子槽、转子槽主要参数变量。

在建立三相异步电机的优化模型后,再基于优化算法对优化模型进行求解,目前,多种智能优化算法在工程与科学研究中得到了广泛应用,其中包括遗传算法、爬山算法、粒子群算法等。遗传算法^[4]模拟了生物在自然选择过程中的寻找最优值。如果进化迭代次数未达到设置的最大迭代数,则继续进化;如果进化迭代次数等于最大迭代次数,则完成目标寻优过程。

python 中基于遗传算法的电机优化流程如图 1 所示。基于 Python 语言编写适用于绝大部分电机本体设计及优化的程序,该程序主要包括两个部分:Python 中建立好的电机模型的导入和有限元仿真,电机参数的读取;电机损耗计算和电机优化算法。通过遗传算法对电机结构单目标优化设计模型进行优化求解,得到电机优化后的最佳槽型设计参数。

3 分析与结果

电机优化前后的定子槽、转子槽参数变化如表 2.1 所列,电机优化前后的槽形变化如下图 1 所示,其中(a)

为优化前后定子槽型变化图;(b)为优化前后转子槽型变化图。

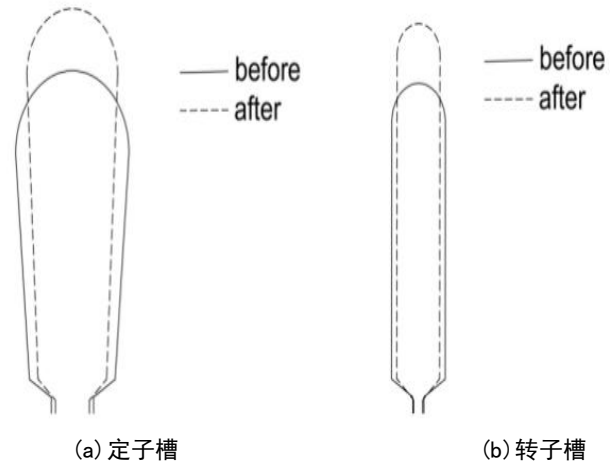


图 1 电机优化前后的槽型变化

电机优化前后损耗曲线图如图 2 所示,对比结果可知,当取电机稳定运行的最后一个周期 175~200ms 时,电机的平均总损耗由优化前的 2.46kw 降低到 1.82kw,能量损耗显著降低了 26%。可见电机参数优化设计后,达到了设计目的。

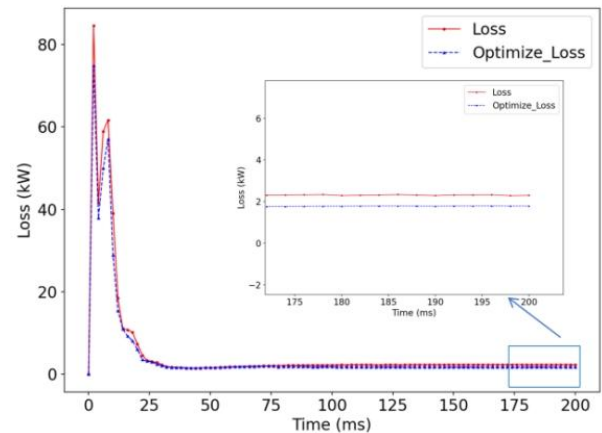


图 2 电机优化前后损耗曲线图

为了验证优化后的结果是否满足要求,利用 Ansys Maxwell 软件对优化后的 2D 有限元模型进行瞬态分析。

电机从启动到趋于稳定状态下磁力线的分布情况变化如图 3、图 4 所示。电机启动后,磁力线由转子的临近齿根慢慢向齿内部扩散,转子齿部的磁力线密度慢慢减小,轭部的磁力线密度增大;随着电机趋于稳定,磁通穿过齿槽进入了转子轭部,并在转子内部均匀分布。由此可以看出优化后的异步电机磁力线分布合理,符合电机的实际运行状态。

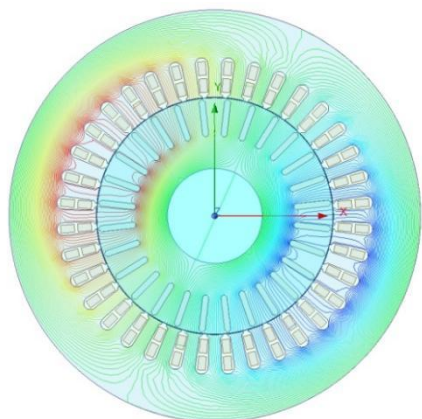


图 a 启动时

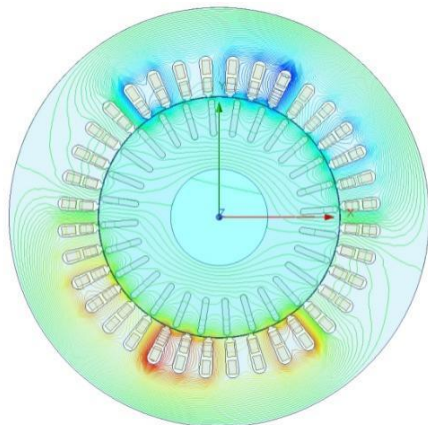


图 b 稳定时

图 3 磁力线的分布情况

4 结论

在本研究中,成功建立了三相异步电机的损耗模型,综合考虑了电机定子槽型和转子槽型等关键参数。通过利用 Python 和 Ansys Maxwell 软件建立的二维有限元模型,不仅验证了模型的准确性,还在此基础上进行了深入的优化研究。通过面向效率的优化策略,分析了电

机损耗的分布规律,并采取了遗传算法对电机的定子和转子槽型参数进行了优化。优化结果显示,电机的能量损耗显著降低了 26%,从而有效提升了电机的效率性能。

本研究不仅证实了所提方法的有效性,可为其他类型电机的优化设计提供参考。还将遗传算法与传统有限元法结合,成功解决了 ANSYS Maxwell 软件在电机优化过程中灵活性不足的问题,显著提高了优化过程的效率和精度。

参考文献

- [1] 吴电宁, 杨仲源. 基于有限元法的电机空载励磁电流影响因素分析[J]. 电机技术, 2015(5): 19.
- [2] 李祥成, 王迎春, 黄新宇等. 转子槽口深度和槽配合对异步电机转子损耗的影响[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 78.
- [3] 李聪波, 黄明利, 李伟等. 基于电磁-结构耦合的异步电机外特性优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 74.
- [4] Li W, Li C, Wang N, et al. Energy saving design optimization of CNC machine tool feed system: a data-model hybrid driven approach[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 19(4): 3809-3820.

作者简介: 周霞(1999.09—), 女, 白族, 云南大理人, 研究生, 研究方向: 电机优化设计,
逯代兴(1982.06—), 男, 汉族, 黑龙江阿城人, 博士, 副教授, 研究方向: 动力传动系统工业软件开发