DOI: 10.3901/JME.2020.20.106

开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法^{*}

陈吉清^{1,2} 冼浩岚^{1,2} 兰凤崇^{1,2} 梁乔丹^{1,2}

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640;

2. 华南理工大学广东省汽车工程重点实验室 广州 510640)

摘要: 开关磁阻电机具有结构简单、成本低和调速范围广等优势,但其双凸极结构和控制器的开关特性,导致存在转矩脉动现象,使得抑制转矩脉动成为焦点问题。首先从开关磁阻电机的结构和运行机理出发,针对线性解析方法难以分析转矩特征的问题,建立电机有限元模型求解出转矩特征并进行样机验证试验。分析样机结构参数对转矩脉动的影响,针对结构参数耦合问题,选择 NSGA-II 算法在参数优化平台上对样机结构参数进行多目标寻优,在保证优化后样机的转矩脉动系数和平均转矩均优于初始电机的条件下,最终获得样机最优优化结果。结果表明,不同结构参数对电机转矩的影响有较大的差异,对结构参数的优化能有效地抑制转矩脉动,该参数优化方法可以为开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制提供参考。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩脉动抑制; 结构参数化; 有限元分析; 多目标优化

中图分类号: TH39

Structural Torque Ripple Suppression Method of Switched Reluctance Motor

CHEN Jiqing^{1,2} XIAN Haolan^{1,2} LAN Fengchong^{1,2} LIANG Qiaodan^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640;

2. Guangdong Provincial Automobile Engineering Key Laboratory,

South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Switched reluctance motor has the advantages of simple structure, low cost and wide range of speed regulation, but its double salient pole structure and the switching characteristics of the controller lead to the existence of torque ripple phenomenon, which makes the suppression of torque ripple become a focus problem. Firstly, starting from the structure and operation mechanism of switched reluctance motor, aiming at the problem that the linear analytical method is difficult to analyze the torque characteristics, the finite element model of the motor is established to solve the torque characteristics and the prototype experiment is carried out to verify. The influence of the prototype structure parameters of torque ripple is analyzed, according to structural parameters of the coupling problem, the NSGA-II algorithm is selected in parameter optimization platform for multi-objective optimization of prototype structure parameters, under the condition that the torque ripple coefficient and average torque of the optimized prototype are better than that of the original motor, the optimization result of the prototype is finally obtained. The results show that the influence of different structural parameters on the torque of the motor is quite different, and the optimization of structural parameters can effectively suppress the torque ripple. This parameter optimization method can provide reference for structural torque ripple suppression of switched reluctance motors.

Key words: switched reluctance motor; torque ripple suppression; structural parameterization; finite element analysis; multi-objective optimization

0 前言

开关磁阻电机具有调速范围宽广、控制灵活、转子结构简单、成本低、运行可靠性高等优势,使

其成为电动汽车驱动电机选择之一^[1-2]。但开关磁阻电机的双凸极结构和控制器开关特性导致其运行过程中会有较大的振动与转矩脉动,这阻碍了开关磁阻电机在电动汽车领域进一步发展^[3-4]。如能有效地抑制转矩脉动,将会推动开关磁阻电机在电动汽车上的应用^[5]。

转矩脉动抑制是开关磁阻电机的研究热点,许

^{*} 国家重点研发计划(2018YFB0104100)、广东省科技计划(2015B10137002)和广东省自然科学基金(2018A030313727)资助项目。20191129 收到初稿,20200811 收到修改稿

多学者对此进行深入研究。现阶段, 抑制转矩脉动的途径主要有两种^[6]。第一种是在电机的运行阶段, 通过优良的控制方法来优化电机的输出转矩。其中, 蔡辉等^[7]提出一种基于线性转矩分配函数策略下的无差拍电流预测方法, 提高电流跟踪特性, 减小因电流跟踪能力弱引起的转矩脉动。宋金龙等^[8]提出了以转速、转矩和电流为控制量的模糊滑模多重闭环控制策略, 在电机换相时对同时导通的两相绕组进行转矩分配, 由分配的转矩求得给定的绕组电流进行电流闭环控制, 从而达到对电机换相和单相导通时转矩脉动的有效抑制。MIR 等^[9]将自适应控制策略引入开关磁阻电机控制系统, 提出了一种模糊自适应控制策略, 将转子位置作为输入量, 通过计算转子位置角的隶属度函数使各绕组在最优区间导通, 实时改变随机选取的模糊参数初始值以实现精确的瞬时转矩控制, 能使输出转矩在最大电磁转矩区域产生, 降低了绕组电流幅值和转矩脉动。虽然开关磁阻电机可以通过精度高、运行性能好的控制策略来抑制开关磁阻电机的转矩脉动, 但是复杂的控制策略会导致控制器成本上升, 并且转矩脉动与电机本身结构有很大的关系, 抑制转矩脉动的另一种有效途径是电机结构优化改进。吴建华等^[10]建立转矩非线性模型, 分析了转子结构参数对转矩脉动程度的影响, 为结构优化奠定了理论基础。李洁等^[11]使用有限元分析方法, 分别对电机的动态和静态特性进行了仿真和参数化分析对比, 分析过程和仿真结果可以为开关磁阻电机的本体设计、性能校核分析、控制策略优化等研究提供可靠依据。ZHANG 等^[12]采用克里格模型和遗传算法对开关磁阻电机气隙相关设计参数进行优化求解, 对比了优化前后的电机转矩波形, 结果表明该方法对转矩脉动有一定抑制作用。

开关磁阻电机是一个多结构参数耦合的整体, 但是通常关于电机结构参数对转矩脉动抑制的研究只针对某个结构参数进行最优化, 单结构参数最优化结果对于多结构参数耦合的电机不一定是最优的, 甚至有可能导致电机性能下降; 或使用近似模型对电机基本结构参数进行寻优, 该方法优化求解效率较高, 但优化效果受到近似模型精度的影响。因此, 从电机的结构出发, 选取一台典型的三相开关磁阻电机作为样机建立有限元模型并进行试验验证其准确性, 分析样机结构参数对转矩波形、转矩脉动程度的影响。在集成优化工具上选择 NSGA-II 算法, 对电机结构参数进行多目标寻优, 以期得到电机最佳的结构参数, 使转矩脉动抑制效果达到最佳。

1 开关磁阻电机的结构和转矩特征

1.1 开关磁阻电机结构及转矩机理模型

开关磁阻电机绕组设置在定子凸极, 转子凸极上无永磁体和绕组。某四相 8/6 极开关磁阻电机原理如图 1 所示, A、B、C、D 分别为电机四相绕组(图中仅表示 A 相, 剩余绕组连接方式与其相同), 此时 C 相转子凸极 2-2' 与定子凸极 C-C' 完全对齐, 该位置为磁阻最小位置, 如果对 C 相通电励磁, 由于定、转子已经处于对齐位置, 故磁力线完全与定、转子轴线位置平行, 则切向电磁力不会作用于转子上, 不会发生转动; 如果此时对 D 相通电励磁, 此时定子凸极 D-D' 与转子凸极 3-3' 处于非磁阻最小位置, 所以磁力线不完全与定、转子轴线平行, 产生作用于转子凸极的电磁力, 转子凸极在电磁力的作用下向定、转子凸极完全重叠位置, 即 3-3' 与 D-D' 轴线对齐位置旋转。因此, 如果依 D'-A-B-C 顺序对四相绕组通电励磁, 电机将以与励磁顺序的反方向旋转; 反之, 如果依 B-A-D'-C' 顺序对绕组通电励磁, 转子凸极将反方向旋转, 即逆时针旋转。所以开关磁阻电机的旋转方向仅与绕组导通次序有关, 与绕组电流方向无关。

图 1 开关磁阻电机原理图

在开关磁阻电机的运行过程中, 绕组相电感与转子位置角有关, 由于转子位置角的变化令定、转子凸极之间周期性接近和离开, 绕组相电感不断周期性变化(图 2), 因此电机转矩也会发生周期性改变。

图 2 绕组电感 L 与转子位置角 θ 的关系

理想情况下单相电感呈线性变化。设 L 、 θ 和 τ_r 分别为相电感、转子位置角和相电感变化周期, 定子凸极与转子凹槽轴线对齐时为磁阻最大位置, 该时刻 $\theta=0$, 对应的电感为最小值 $L_{\min}$ 。定、转子凸极开始重叠时 $\theta=\theta_2$, 相电感 L 开始增长; 当转子到达 $\theta=\theta_3$ 时, 定、转子凸极重合, 相电感 L 最大, 即为 $L_{\max}$; 转子位置在 θ_3 和 θ_4 之间时, 相电感一直处于最大值 $L_{\max}$, 这是因为定、转子凸极重合区域不变, $\theta=\theta_a$ 为定、转子凸极轴线对齐时刻; $\theta=\theta_4$ 时刻后, 定、转子凸极重合区域减小, 相电感 L 开始下降。

可得开关磁阻电机绕组电感 L 与转子位置角 θ 的函数关系为

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\ L_{\min} + K(\theta - \theta_2) & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & \theta_4 \leq \theta < \theta_5 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_3 - \theta_2}$ 。

磁场磁共能 W' 对转子位置角 θ 的偏导数可以求得开关磁阻电机电磁转矩, 磁共能的大小取决于绕组电流 i 、转子位置角 θ 和绕组磁链 Ψ , 电磁转矩表达式为

$$T_e(i, \theta) = \frac{\partial W'(i_a, i_b, \dots, i_m; \theta)}{\partial \theta} \quad (2)$$

由于开关磁阻电机绕组导通期间相电流不是理想的“平顶波”, 即绕组导通期间相电流会因控制参数变化而发生变化。假设绕组导通期间相电流 i 不随时间变化, 即保持理想的“平顶波”, 但“平顶波”的高低可以发生变化, 将式(2)简化为

$$T_e = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

当绕组导通期间相电流 i 不随时间变化时, 磁共能

$$W' = \int_0^i \Psi(i, \theta) di = \frac{1}{2} Li \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得电磁转矩

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (5)$$

将绕组电感表达式代入式(5)可得

$$T_e = \begin{cases} 0 & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\ \frac{1}{2} Ki^2 & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\ 0 & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \\ -\frac{1}{2} Ki^2 & \theta_4 \leq \theta < \theta_5 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可见, 电磁转矩与绕组导通时电流的平

方成正比; 绕组电感增加的区域会产生正的电磁转矩; 若电感降低区域绕组中仍有励磁电流, 则会出现负的转矩; 电磁转矩的值亦受绕组电流的开通角和关断角影响。

由式(5)和(6)可知, 电磁转矩 T_e 与相电流 i 的平方、绕组电感 L 和转子位置角 θ 相关。由电磁学知识可知, 电感与磁导率、绕组横截面积、绕组匝数等物理量有关, 所以定转子凸极的大小、宽度和两者之间的气隙等结构参数均会影响电感的大小, 从而导致转矩的变化。因此, 电机的结构参数对输出转矩有重要影响, 分析结构参数对转矩的影响以及对其进行优化具有重要意义。

1.2 开关磁阻电机转矩特征模拟

开关磁阻电机结构参数相互耦合导致电磁特性复杂, 磁场具有强非线性, 线性解析方法难以获得其转矩特征。有限元法可以将各结构特征进行网格精细化, 以获得结构特征精确的模型, 从而对电机非线性磁路进行仿真。特别是其非线性受到多结构与多参数的影响, 每个参数细节都对转矩脉动与相电流有不同程度的影响。以一台 1.5 kW、三相 12/8 极开关磁阻电机作为样机, 利用 Ansoft Maxwell 软件建立样机模型, 基本结构参数值如表 1 所示, 部分结构参数如图 3 所示。

表 1 样机基本参数

名称	数值
定子外径 D_s /mm	130
转子外径 D_r /mm	78
气隙 g /mm	0.3
定、转子铁心长度 l_g /mm	120
绕组匝数 N_{ph}	40
定子极弧系数 E_s	0.5
转子极弧系数 E_r	0.5
铁心材料	DW465
定子轭高 h_{cs} /mm	5.5
转子轭高 h_{cr} /mm	6

图 3 部分结构参数示意图

在 RMxpri 模块中设置电机定子、转子等基本结构参数, 将获得的几何模型导入到 Maxwell2D 模块, 电机模型如图 4 所示。在转子外圆与定子内圆增加狄里克莱边界条件, 设置两者边界为理想绝缘边界; 将转子外圆所包围的区域定义为运动部件; 利用基于单元边长的内部网格划分定子绕组; 利用基于单元边长内部剖分和表层制定剖分相结合划分定子、转子铁心, 在表层利用较精细的网格划分。

图 4 样机模型

在 Maxwell 2D 瞬态场求解器中对样机在不同转速下的运行状态进行仿真, 计算其电流及转矩的变化规律。为更清楚了解转矩脉动情况, 以额定转速 1 500 r/min 为例, 设定求解时间为 4 ms, 时间步长设置为 0.01 ms, 得到样机单相绕组电流波形和输出转矩曲线分别如图 5、6 所示。

图 5 样机单相绕组电流波形

图 6 额定转速下样机输出转矩波形

在电角度变化的过程中, 绕组的开通和关断不

断交替, 其相电流也相应地呈周期性变化(图 5)。电角度为 10° 时绕组导通, 相电流开始上升, 电角度达到 110° 时相电流的值最大, 绕组关断, 电流随之下降。续流二极管开始产生续流电流给电源, 绕组电流在电角度为 200° 时降为 0。

同时, 由于电机的双凸极结构以及电机控制方面等原因, 电机在额定转速转矩脉动较大, 在换相区域具有显著的转矩下降, 如图 6 中区域 1 所示。在非换相区间, 即绕组导通期间, 由于绕组电流不是理想的“平顶波”, 导致在定、转子重合区域亦存在转矩脉动, 如图 6 中区域 2 所示。

1.3 开关磁阻电机转矩特征试验

试验平台由以下设备组成(图 7): 试验样机及控制器、功率分析仪(致远 PA500H)、转矩传感器(HBM T40B)、示波器(安捷伦 DSOX3024T)和温度传感器(PT100)等。分别测量试验样机在 600 r/min 和 1 000 r/min 下稳定运行时的相电流和输出转矩波形。

图 7 试验平台

对电机在 0.571 kW 负载下以 600 r/min 和在 1.015 kW 负载下以 1 000 r/min 运行时的仿真和试验数据进行对比, 可知在低转速低负载下电机为角度位置控制(图 8a); 在较大负载下则为电流斩波控制(图 9a)。两种工况下电机的相电流波形、转矩波形与仿真数据吻合较好, 波形基本一致。由于试验中采用的转矩传感器额定转矩量程较大(50 N·m ~ 10 kN·m), 采样频率为 10 kHz, 而仿真模型步长为 0.01 ms, 因此导致输出转矩波形仿真值与试验值在

转矩较低区域产生误差。经计算,在 1 000 r/min 转速下试验电流平均值误差为 5.34%,转矩平均值误差为 8.93%;在 600 r/min 转速下试验电流平均值误差为 5.45%,转矩平均值误差为 9.89%。误差均小于 10%,验证了样机仿真模型的准确性。

图8 600 r/min 转速下运行试验与仿真结果对比

图9 1 000 r/min 转速下运行试验与仿真结果对比

2 结构参数对转矩脉动的影响

2.1 评价指标

电机结构对开关磁阻电机脉动程度具有重要影

响。在电机设计初期,选用合适的结构参数对转矩脉动抑制有积极意义。以样机为例,使用控制变量法,通过已验证的有限元模型研究定子外径 D_s 、转子外径 D_r 、铁心长度 l_a 、绕组匝数 N_{ph} 、定子极弧系数 E_s 、转子极弧系数 E_r 、定子轭高 h_{cs} 和转子轭高 h_{cr} 对转矩脉动的影响(以额定转速 1 500 r/min 为例)。为了量化转矩脉动,引入转矩脉动系数

$$k_t = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{av}} \quad (7)$$

式中, $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 和 T_{av} 分别为最大、最小及平均电磁转矩。转矩脉动系数越小,说明转矩脉动抑制效果越好。为了衡量结构参数改变对平均转矩的影响程度,引入影响系数

$$f = \left| \frac{\Delta T_{av}}{\Delta K} \right| \quad (8)$$

式中, ΔT_{av} 为平均转矩的变化量, ΔK 为结构参数的变化量。影响系数 f 越大,说明该参数的变化对平均转矩影响越大。

2.2 定、转子外径对转矩脉动的影响

在定、转子初始参数附近分别以 5 mm 为步长计算电机输出转矩。定子外径对电磁转矩的影响主要在于非换相区域,即电磁转矩输出峰值区域,在该区域内输出转矩随着定子外径的增大而升高,在电磁转矩上升及下降区域变化较小(图 10)。

图10 不同定子外径下的电机转矩波形

随着电机定子外径的增大,电机平均转矩有所增大并且转矩脉动系数显著降低(图 11)。所以一定范围内选取较大的定子外径对提高电机的平均转矩和降低转矩脉动具有积极意义。但过大定子外径会降低电机的效率,原因是定子槽空间扩大,电机槽满率下降,电机散热受阻,所以在电机设计时会限制定、转子外径的比值,合理选择最大的定子外径效果更佳。定子外径增量较小的时候,平均转矩的相对变化较大,定子外径改变量越大对平均转矩的影响越小,即平均转矩变化不明显(图 12)。

图 11 定子外径与转矩脉动系数和平均转矩的关系

图 12 定子外径增量与影响系数的关系

令气隙宽度不变,在初始转子外径附近以 2 mm 为步长分别计算电机输出转矩。转子外径集中影响非换相区域的转矩脉动,该区域输出转矩随转子外径升高而增加,对输出转矩上升及下降区间的电磁转矩影响较小(图 13)。

图 13 不同转子外径下的电机转矩波形

由开关磁阻电机的静态矩角特性可知,输出转矩随转子外径的增大而提高,但转矩脉动也随之提高。随着转子外径的增大转矩脉动系数整体逐渐上升,输出转矩随转子外径增大也逐渐增大(图 14),但是转子外径过大会使得电机平均输出转矩下降,电机性能下降。

图 14 转子外径与转矩脉动系数和平均转矩的关系

转子外径改变量对平均转矩的变化影响规律不明显,除去变化较小的部分,总体看转子外径变化越大,对平均转矩影响越小(图 15)。若要获得较好的平均转矩,需要适当选择转子外径。铁心长度 L 与转子外径 D_r 的比值称为电机的细长比

$$\lambda = \frac{L}{D_r} \quad (9)$$

图 15 转子外径增量与影响系数的关系

在定子外径和铁心长度不变的情况下,增加转子外径会减小电机细长比,提高绕组长度中电枢绕组端部所占比例,材料及加工成本增大;绕组端部磁场增强,磁化曲线的计算仿真难度增大;定子极身变小,令绕组截面积下降;增大了电机的转动惯量,对电机的启动不利。所以在设计阶段应当综合考虑定、转子尺寸及绕组截面等因素,选择合适的转子尺寸。

2.3 铁心长度对转矩脉动的影响

保持定、转子基本结构参数不变,在初始铁心长度附近以 5 mm 为步长分别计算输出转矩波形。铁心长度在转矩上升区域对电磁转矩影响较小,在转矩峰值及下降区间电磁转矩随铁心长度增加而增大(图 16)。

图 16 不同铁心长度下的电机转矩波形

铁心长度的增大使转矩脉动程度加剧,而铁心长度过小也会使转矩脉动系数增大(图 17)。铁心长度较小时,绕组线圈较小,电机换相时的切向磁通较小,转矩脉动程度增大;随着铁心长度的增加,切向磁通与径向磁通逐渐合理分布,转矩脉动程度降低;随着铁心长度的继续增大,由于绕组线圈变

大而匝数不变导致总磁通和磁链变大,切向磁通与径向磁通分布不均,虽然输出转矩有所提高,但同时转矩的变化量也相应增加,即转矩脉动程度提高。因此在铁心长度变化范围内,转矩脉动系数呈非线性变化。与定、转子外径的影响相似,输出转矩随铁心长度的增大而增大。铁心长度增量越大,对平均转矩的影响越大,近乎线性增长(图 18),可以通过增大铁心长度来提高平均转矩。铁心长度的增加不改变电机槽满率,但铁心较长会令绕组线圈和铁心的制造材料增加,成本上升;较长的铁心提高了电机的细长比,削弱了绕组端部磁场的大小,仿真计算的精确度有所提高;同时电机转动惯量减小,对启动与调速具有积极意义。

图 17 铁心长度与转矩脉动系数和平均转矩的关系

图 18 铁心长度增量与影响系数的关系

2.4 绕组匝数对转矩脉动的影响

在定、转子结构参数不变的情况下,在匝数初始参数附近以5匝为步长分别计算输出转矩波形。绕组匝数增大,输出转矩在最大值区域显著减小,转矩最小值变化较小。在绕组匝数较小的情况下,输出转矩峰值较大,换相时转矩下降较显著;绕组匝数较大时转矩幅值明显下降,平均输出转矩降低(图 19)。

转矩脉动系数整体变化趋势不明显(图 20)。绕组匝数较小,各绕组之间相互作用小,电机平均转矩较大,但匝数小导致切向磁通和磁链减少,不利于电机换相,转矩脉动变大,因此转矩脉动系数较大;绕组匝数较大时,各绕组之间的磁通相互干涉,

转矩脉动程度变高,因此在一定范围内转矩脉动系数非线性变化,所以合理的绕组匝数可以使切向磁通和磁链增加且互不干涉,从而抑制转矩脉动,对提高电机的性能具有积极意义。由图 20 可知,在绕组匝数在 40 左右转矩脉动程度最低。因绕组电流峰值随匝数增大而减小,电机平均输出转矩随绕组匝数增大有较明显的减小。匝数增量较小时,对平均转矩影响较大,即匝数改变较小时,平均转矩相对改变较大,随着匝数增量的增大,对平均转矩的影响越来越小(图 21)。

图 19 不同绕组匝数下的电机转矩波形

图 20 绕组匝数与转矩脉动系数和平均转矩的关系

图 21 匝数增量与影响系数的关系

绕组匝数取值较大能有效降低绕组电流峰值(图 22),从而降低功率器件的伏安容量,但电机的输出性能会受到影响。因此在电机设计初期应综合考虑功率器件容量、绕组成本、电机性能等因素选择合适的绕组匝数。

图 22 绕组电流幅值与绕组匝数的关系

2.5 定、转子极弧系数对转矩脉动的影响

引入定、转子极弧系数 E_s 、 E_r 分别为

$$E_s = \frac{\beta_s}{\tau_s} \quad (10)$$

$$E_r = \frac{\beta_r}{\tau_r} \quad (11)$$

式中, β_s 、 β_r 分别为定、转子极弧长, τ_s 、 τ_r 分别为定、转子极距。

在转子极弧 $E_r=0.5$ 的情况下, 计算不同定子极弧系数下电机输出转矩(图 23)。不同定子极弧系数下电机输出转矩在转矩上升和下降区间变化不明显, 但在转矩输出峰值区域随定子极弧系数的增大而显著下降。定子极弧系数的增大令相电流幅值降低, 因此输出转矩明显减小。同理, 在定子极弧系数 $E_s=0.5$ 的情况下, 计算不同转子极弧系数下电机输出转矩(图 24)。与定子极弧系数类似, 电磁转矩在其峰值区域随转子极弧系数增大而明显减小, 但在转矩上升和下降区域变化较小, 输出转矩下降的原因同上。

图 23 不同定子极弧系数下的电机转矩波形

图 24 不同转子极弧系数下的电机转矩波形

在一定的转子极弧系数下, 平均输出转矩随定子极弧系数的增大而减小; 在一定的定子极弧系数下, 平均输出转矩随转子极弧系数的增大而减小(图 25)。在一定的转子极弧系数下, 定子极弧系数增量较小对平均转矩影响较大, 增量越大则对平均转矩的影响越小(图 26a); 在一定的定子极弧系数下, 转子极弧系数增量较小对平均转矩影响较大, 随着转子极弧系数增量的增大, 在一定范围内存在最佳增量(图 26b)。在一定的转子极弧系数下, 电流幅值随定子极弧系数增大而减小; 在一定的定子极弧系数下, 电流幅值随转子极弧系数增大而减小(图 27)。综合图 25 和图 27 可得, 定、转子极弧系数的增大会使相电流幅值下降, 从而使电机输出转矩减小。

图 25 不同定、转子极弧系数下的平均电磁转矩

(a) 定子极弧系数增量与影响系数的关系

(b) 转子极弧系数增量与影响系数的关系曲线

图 26 定、转子极弧系数增量与影响系数的关系

图27 不同定、转子极弧系数下的相电流幅值

在一定的转子极弧系数下($E_r < 0.54$), 较大的定子极弧系数可以使转矩脉动系数减小; 当转子极弧系数较大时($E_r = 0.54 \sim 0.58$), 随着定子极弧系数的增大会加剧转矩脉动程度(图28)。定、转子极弧系数的大小会改变电机的电感重叠区域和电流幅值, 从而导致电机的最大转矩、电流、平均输出转矩及转矩脉动程度受到不同程度的影响, 因此应综合考虑以上因素, 选择合适的定、转子极弧系数, 使电机起动性能更好和转矩脉动更低。

图28 不同定、转子极弧系数下的转矩脉动系数

2.6 定、转子轭高对转矩脉动的影响

保持定子外径不变, 计算不同定子轭高下的电机输出转矩, 转矩波形(图29)。定子轭高变化对转矩上升区间转矩影响较小, 在转矩输出峰值区间较小的定子轭高会使转矩下降, 定子轭高变化对换相期间的转矩波形影响较小。

图29 不同定子轭高下的电机转矩波形

电机转矩脉动系数随定子轭高的增大而减小, 但是定子轭高过大会令转矩脉动系数增大, 电机平均输出转矩随定子轭高的增大而增大(图30)。定子轭高增量越大, 对平均转矩的影响越小, 即定子轭高变化越大, 平均转矩的相对变化反而越小(图31)。综上, 最大输出转矩随定子轭高的增大而提高, 但过大的定子轭高提高效果不明显; 增大定子轭高可以抑制电机转矩脉动, 提高定子铁心的固有频率, 减少共振, 但过大定子轭高可能会使转矩脉动程度加剧。

图30 定子轭高与转矩脉动系数和平均转矩的关系

图31 定子轭高与影响系数的关系

在转子内、外径参数不变的情况下, 计算不同转子轭高下的电机输出转矩, 不同转子轭高下的电机转矩波形几乎一致, 说明转子轭高对电机输出转矩影响较小。因此转矩脉动系数、最大输出转矩和平均转矩受转子轭高的影响较小。

3 电机结构参数优化

3.1 优化流程

电机结构参数优化是一个多参数耦合、多目标、多约束的非线性优化问题, 各结构参数对转矩脉动的影响程度不同且相互影响, 因此对开关磁阻电机结构参数进行优化, 寻找合适的结构参数, 从而抑制转矩脉动。

3.1.1 设计变量与取值范围

从结构参数对转矩脉动的影响分析中选取对开

关磁阻电机转矩脉动影响较大的参数作为优化设计变量, 同时考虑绕组大小、制造成本等因素确定各个结构参数的取值范围(表 2)。

表 2 优化设计变量及取值范围

设计变量	取值范围
定子外径 D_s/mm	[120, 145]
转子外径 D_r/mm	[64, 82]
绕组匝数 N_{ph}	[30, 50]
定子极弧系数 E_s	[0.44, 0.58]
转子极弧系数 E_r	[0.42, 0.54]
定子轭高 h_{cs}/mm	[4, 7.5]
铁心长度 l_a/mm	[110, 130]

3.1.2 优化目标与约束条件

抑制转矩脉动是开关磁阻电机研究领域的重要方向^[13], 但转矩脉动程度的降低会导致平均电磁转矩减小。平均输出转矩作为电机的重要性能指标, 在优化过程中应给予考虑, 因此选取转矩脉动系数 k_t 和平均转矩 T_{av} 作为优化目标函数

$$F(x) = [\min(k_t), \max(T_{av})] \quad (12)$$

优化目标为转矩脉动系数 k_t 最小化和平均电磁转矩 T_{av} 最大化。

在进行设计变量本身的约束的同时, 还应考虑电机的性能参数, 需要约束转矩脉动系数 k_t 和平均转矩 T_{av} , 以确保优化后的各项性能都优于初始电机性能, 即

$$\begin{cases} k_t \leq k_{t_0} \\ T_{av} \geq T_{av_0} \end{cases} \quad (13)$$

式中, k_{t_0} 和 T_{av_0} 分别为电机初始转矩脉动系数和初始平均电磁转矩。

3.1.3 优化算法

NSGA-II 算法全局寻优能力较好, 能够保持各个优化目标的独立性, 具有如下优点: ① 采用快速非支配排序方法, 算法的复杂度下降; ② 根据拥挤度对个体进行排序, 代替了需要指定的共享参数 σ_{share} ; ③ 引进精英策略, 防止优良个体丢失, 有利于保留优良的个体。因此选择 NSGA-II 作为优化算法对开关磁阻电机结构参数进行优化。

3.2 集成优化平台

Isight-Ansoft Maxwell 集成优化平台通过 Isight 与 Ansoft Maxwell 的数据交互实现自动求解。

在 Isight 软件的 optimization 组件选择 NSGA-II 算法, 设置种群数量为 12, 遗传代数 20, 交叉

变异率为 0.9。根据电机结构参数优化模型设置优化变量、约束、目标函数等, 最终 Isight-Ansoft Maxwell 集成优化平台及系统框架(图 32)。

图 32 Isight-Ansoft Maxwell 集成优化平台和系统框架

在优化过程中 Isight 会自动调用 Ansoft Maxwell 进行模型修改、输出转矩计算、结果数据处理和设计变量迭代等, 为保证调用 Ansoft Maxwell 时有限元模型的网格在迭代过程能够满足计算精度的要求, 在 Maxwell 2D 中的 Mesh Operations 取消单元数量限制并设置基于单元边长划分的单元边长最大为 1 mm, 最小为 0.1 mm。限于篇幅, 优化求解中部分电机基本结构参数的设计变量迭代过程(图 33); 转矩脉动系数和平均电磁转矩的迭代优化过程(图 34), 可知电机基本结构参数和目标函数均趋于收敛。

(a) 定子外径优化迭代过程

(b) 转子外径优化迭代过程

图33 部分设计变量优化迭代过程

图34 目标函数优化迭代过程

经过 241 次迭代计算, 得到 38 个最优解的 Pareto 解集(图 35), 其中转矩脉动系数 k_t 和平均转矩 T_{av} 总体呈正相关, 说明转动脉动程度随平均转矩的减小而降低。

图35 最优解集

3.3 基于模糊集合理论优选结果

为了从 Pareto 最优解集中寻找最终的优化结果, 避免人为主观因素的影响, 在最优解集的基础上, 利用一种基于模糊集合理论的机制在 Pareto 最优解集中获取最优折衷解^[14]。定义从属函数

$$y_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq x_i^{\min} \\ \frac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} & x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ 0 & x_i \geq x_i^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, x_i 、 $x_i^{\max}$ 和 $x_i^{\min}$ 分别是第 i 个优化目标的当前取值、最大值和最小值, 针对解集中每一非劣解 k , 定义归一化隶属函数

$$f^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} y_i^k}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_{obj}} y_i^j} \quad (15)$$

式中, M 为最优解集个数, N_{obj} 为优化目标个数。 f^k 值越大, 说明该解的综合性能最好, 38 个最优解的 f^k 值(图 36)。

图36 38个最优解的 f^k 值

由图 36 可知, 第 38 个个体具有最大的归一隶属函数值, 第 38 个个体对应的电机结构参数见表 3, 对优化结果对应的结构参数进行建模, 电机模型对比如图 37 所示。定、转子极弧系数和铁心长度与优化前相比基本不变, 优化后的转子外径增大, 定子外径减小。

表3 优化前后设计变量对比

变量名称	初始值	优化后	取值
定子外径 D_s/mm	130	121.974	122
转子外径 D_r/mm	78	81.862	82
绕组匝数 N_{ph}	40	36	36
定子极弧系数 E_s	0.5	0.547	0.55
转子极弧系数 E_r	0.5	0.508	0.51
定子轭高 h_{cs}/mm	5.5	7.305	7.3
铁心长度 l_a/mm	120	119.928	120

图 37 优化前后电机结构对比

3.3 优化前后电机性能对比

分别对参数优化前后较低转速(1 000 r/min)、额定转速(1 500 r/min)以及较高转速(2 000 r/min)下电机运行过程中的绕组电流波形和转矩波形进行分析和对比。

结构参数优化前后电机不同转速下的单相绕组电流波形(图 38), 在保持开通角及关断角不变的情况下, 1 000 r/min 的相电流幅值下降较大, 其中优化前为 62.27 A, 优化后为 38.48 A, 减少了 38.2%。1 500 r/min 下的绕组电流幅值在导通时有所下降, 有利于降低开关器件的伏安容量。在 2 000 r/min 下, 相电流导通时的电流由原来的先增后减变为优化后的近似“平顶波”, 有利于减小在绕组导通期间的转矩脉动, 同时相电流幅值由原来的 6.27 A 减小到优化后的 5.34 A, 减小了 14.83 %。

图 38 优化前后不同转速下的单相绕组电流波形

在较低转速(1 000 r/min)下电机初始结构与优化后转矩波形如图 39a 所示, 优化后电机的峰值转矩有所下降, 电机换相区域的转矩跌落有所减小, 电机转矩脉动系数由优化前 1.448 减小到优化后的 1.336, 减小了 7.73%。

图 39 优化前后不同转速下的转矩波形

电机在额定转速(1 500 r/min)下优化前后转矩波形如图 39b 所示, 优化后换相区域的转矩跌落有所改善。额定转速下转矩脉动系数由 0.94 下降至

0.84, 下降了 10.64%。在较高转速(2 000 r/min)下优化前后转矩波形如图 39c 所示, 优化后的输出转矩在绕组导通区域转矩脉动幅度大幅下降, 非导通区域的转矩跌落得到改善, 转矩脉动系数由优化前的 1.256 减小至优化后的 0.824, 降低了 34.39%, 转矩脉动抑制效果显著。

电机在不同转速下的输出转矩频域如图 40 所示。可见, 开关磁阻电机的结构优化对低转速下的中低频率谐波的削弱效果不明显; 结构优化对高转速下的高低频率谐波削弱效果较好。综合频域与时域的结果可知, 电机转速越高, 转矩脉动抑制效果越强。因此, 对于高转速开关磁阻电机, 可从结构优化方向考虑对转矩脉动进行抑制。

(a) 优化前后转矩频域对比 (1 000 r/min)

(b) 优化前后转矩频域对比 (1 500 r/min)

(c) 优化前后转矩频域对比 (2 000 r/min)

图 40 不同转速下的输出转矩频域对比

4 结论

针对开关磁阻电机转矩脉动明显和多结构参数耦合的问题, 分析电机结构参数对转矩脉动的影响,

然后利用 NSGA-II 算法在集成优化平台上对结构参数进行多参数、多目标优化, 主要结论如下。

(1) 利用样机的运行试验验证样机有限元模型准确性, 为电机非线性模拟提供参考。

(2) 结构参数对电机转矩脉动程度的影响规律如下: 电机定、转子外径和定子轭高主要影响非换相期间的转矩; 铁心长度、绕组匝数和定、转子极弧系数对换相和非换相期间的转矩均有影响; 在一定范围内, 转矩脉动随定子外径和定子轭高的增大而减小, 随转子外径的增大而增大, 随定、转子极弧系数、绕组匝数、铁心长度变化的规律不明显, 转子轭高变化对转矩脉动几乎没有影响。

(3) 在结构参数集成优化平台中使用 NSGA-II 算法进行多目标寻优, 结果表明电机在较低转速、额定转速、较高转速下的转矩脉动分别降低了 7.73%、10.64%、34.39%, 结构优化对高转速下的转矩脉动具有较强的抑制效果。证明了优化方法的有效性, 对电机结构优化以及设计具有参考价值。如果在结构优化基础上配合良好的电机控制策略, 转矩脉动抑制效果将更好。

参 考 文 献

- [1] ZHU Yueying, WANG Dafang, ZHAO Guifan, et al. Research progress of switched reluctance motor drive system[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2009: 784-789.
- [2] SIADATAN A, FATAHI N, SEDAGHAT M. Optimum designed multilayer switched reluctance motors for use in electric vehicles to increase efficiency[C]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2018: 304-308.
- [3] 郭晓颖, 苏建中, 马志国, 等. 电动汽车高效率开关磁阻电机系统设计[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(4): 14-16, 27.
GUO Xiaoying, SU Jianzhong, MA Zhiguo, et al. Design of high efficiency switched reluctance motor drive system for electric vehicles[J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(4): 14-16, 27.
- [4] 史秀梅, 郑寿森, 祁新梅, 等. 电动汽车用开关磁阻电机有限元分析及仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1374-1377, 1391.
SHI Xiumei, ZHENG Shousen, QI Xinmei, et al. Research on finite element analysis and dynamical simulation of switched reluctance motor for EV[J].

- Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1374-1377, 1391.
- [5] 李哲, 郑玲, 杨威, 等. 开关磁阻电机转矩脉动及结构优化设计研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(6): 11-21.
LI Zhe, ZHENG Ling, YANG Wei, et al. Research on torque ripple and structure optimization of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(6): 11-21.
- [6] LI G, OJEDA J, HLIQUI S, et al. Modification in rotor pole geometry of mutually coupled switched reluctance machine for torque ripple mitigating[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 48(6): 2025-2034.
- [7] 蔡辉, 王辉, 李孟秋, 等. 基于预测电流控制算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4899-4909.
CAI Hui, WANG Hui, LI Mengqiu, et al. Torque ripple suppression strategy of switched reluctance motor based on predictive current control algorithm[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(16): 4899-4909.
- [8] 宋金龙, 刘勇智, 周政, 等. 中低速开关磁阻电机转矩优化策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 83-90.
SONG Jinlong, LIU Yongzhi, ZHOU Zheng, et al. Torque optimization of medium-low speed switched reluctance motors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 83-90.
- [9] MIR S, ELBULUK M, HUSAIN I. Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 461-468.
- [10] 吴建华, 詹琼华, 林金铭. 开关磁阻电机结构参数对转矩波动的影响[J]. 电工技术杂志, 1993(2): 3-5.
WU Jianhua, ZHAN Qionghua, LIN Jinming. Influence of structural parameters of switched reluctance motor on torque fluctuation[J]. Electric Engineering, 1993(2): 3-5.
- [11] 李洁, 孙鹤旭, 董砚, 等. 开关磁阻电机静态特性和动态特性的有限元仿真分析[J]. 河北工业大学学报, 2009, 38(5): 65-70.
LI Jie, SUN Hexu, DONG Yan, et al. Finite element simulation analysis of switched reluctance motor's static characteristic and dynamic characteristic[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2009, 38(5): 65-70.
- [12] ZHANG Y, XIA B, XIE D, et al. Optimum design of switched reluctance motor to minimize torque ripple using ordinary Kriging model and genetic algorithm[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2011: 1-4.
- [13] 吴红星, 嵇恒, 倪天, 等. 新型开关磁阻电机发展综[J]. 微电机, 2011, 44(1): 78-83.
WU Hongxing, JI Heng, NI Tian, et al. Summary of novel switched reluctance motor development[J]. Micromotors, 2011, 44(1): 78-83.
- [14] ABIDO M A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 315-329.

作者简介: 陈吉清, 女, 1966 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代汽车设计方法。

E-mail: chjq@scut.edu.cn

兰凤崇(通信作者), 男, 1959 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车结构与安全理论及相关技术。

E-mail: fclan@scut.edu.cn