

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.019

两相 4/2 极高速开关磁阻电机多阶气隙优化

郑翌成, 吴建华

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统两相 4/2 极高速开关磁阻电机运行过程中转矩死区和大转矩波动这一问题, 对传统开关磁阻电机数学模型中影响转矩死区和转矩波动的因素进行了研究, 提出了一种基于两相 4/2 极开关磁阻电机的多阶阶梯式气隙设计的优化方案。利用 Matlab 拟合生成了气隙长度与气隙电感大小关系曲线, 得到了不同阶数开关磁阻电机模型下阶梯式气隙各阶气隙长度的最优解, 采用 Maxwell 2D 静态和动态仿真计算, 计算了静态转矩波动系数、静态合成平均转矩和动态转矩波动系数等参量, 分析比较了不同阶数的阶梯式气隙开关磁阻电机模型的电机运行情况。研究结果表明: 采用多阶气隙极弧优化设计方法可以有效改善传统两相 4/2 极开关磁阻电机的运行情况, 消除了转矩死区, 降低了转矩波动, 提高了运行质量。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩波动; 极弧优化; 多阶阶梯式气隙

中图分类号: TM35

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2019)08-0867-06

Optimal design of multi-stepped air gap based on two phase 4/2 poles high speed switched reluctance motor

ZHENG Yi-cheng, WU Jian-hua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of torque dead zone and large torque fluctuation during the operation of traditional two-phase 4/2 pole high-speed switched reluctance motor, it was analyzed that mathematical model of traditional switched reluctance motor and found that the impact factors of torque dead zone and torque fluctuation. And an optimization scheme of multi-step stepped air gap design was proposed. According to the relationship between pole arc diameter and air gap inductance which was obtained by Matlab fitting, the optimal solution of the pole arc diameters of the stepped air gap was found. Finally, the motor operation of the stepped air gap switched reluctance motor model with different orders were compared and analyzed by using Maxwell 2D simulation. The results indicate that the optimal design of polar arc by multi-stepped air gap can effectively improve the operation of the traditional two-phase 4/2-pole switched reluctance motor and improve the operation quality.

Key words: switched reluctance motor; torque fluctuation; optimal design of polar arc; multi-stepped air gap

0 引言

目前, 在实际生产生活中, 低相数、少定转子极数的开关磁阻电机广泛应用于电动工具、榨汁机、吸尘器、风机、水泵等单向高速运行场合。由于定转子极数少, 转矩脉动和转矩死区的问题也更加凸显, 如何有效解决转矩死区、减小转矩脉动值得深入讨论。

BARNES M^[1]提出了“不对称气隙”设计, 其本质

可认为是采用蜗牛式转子造成不对称气隙, 通过调整转子极的不对称角度, 从而避免了原始两相电机出现转矩死区的情况; LEE Ji-young^[2]在采用蜗牛式转子的基础上, 进一步对定子形状进行了调整, 通过控制定子极弧宽度、定子两段极弧的宽度比例、定子极弧上缺口, 提高了电机整体效率。

本文将通过对传统两相 4/2 极开关磁阻电机数学模型进行分析, 提出多阶阶梯式气隙设计的优化方案。

1 两相 4/2 极开关磁阻电机

两相 4/2 极开关磁阻电机均匀气隙模型如图 1 所示。

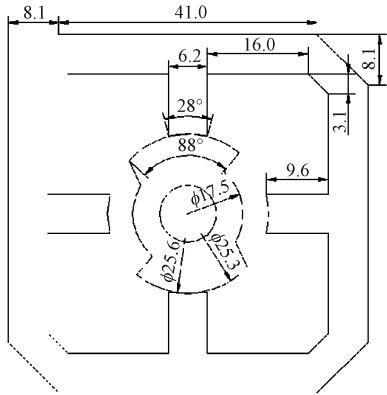


图 1 两相 4/2 极开关磁阻电机均匀气隙模型

由图 1 可得:该类电机定子有两对定子极,转子有一对转子极。这种构造方式的两相电机在完全对齐位置(定子极与转子极磁极中心线对齐)和完全不对齐位置(定子极与转子槽中心线对齐)都不具备自启动能力。

由于 4/2 极开关磁阻电机控制策略难以较好地解决传统两相 4/2 极开关磁阻电机的一系列问题,大量研究主要针对电机结构本身进行不同方向的优化尝试。其中针对转子采用阶梯式气隙的设计方法^[3],通过构造不均匀气隙确保即使启动点在完全对齐和完全不对齐位置时依然能够保证电机正常启动。但是对于如何系统性构造合适的不均匀阶梯气隙并没有太多相关的讨论,大多是通过大量的尝试获得较为理想的定转子半径和气隙宽度。

2 多阶气隙优化设计

2.1 影响输出转矩的因素

由于开关磁阻电机内部复杂的电磁关系和运行特性,为了避免繁琐的数学理论推导,通常采用该线性模型对电机进行简化分析。

线性模型中,电机绕组相电感随转子位置角的关系曲线如图 2 所示。

图 2 中,坐标原点为位置角参考点,定义为转子凹槽中心与定子磁极轴线重合的位置,该位置相电感为最小值。

电感与转子位置角关系可用函数表示为^[5]:

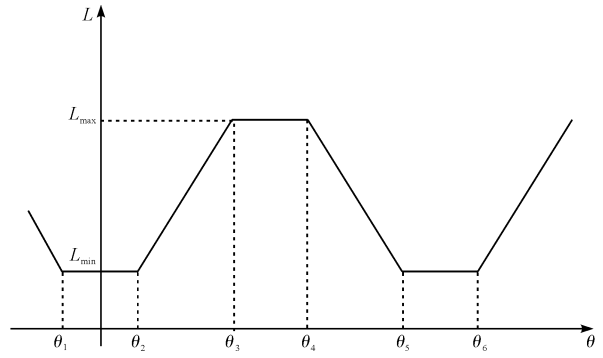


图 2 相电感与转子位置角的关系曲线

θ_3 —一定子和转子磁极完全重合的起点,即定子、转子前极边重合位置; θ_4 —定子、转子后极边重合位置; θ_1, θ_5 —转子后极边与定子前极边重合的位置; θ_2 —转子前极边与定子后极边重合的位置

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

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_3 - \theta_2} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\beta_s} \quad (2)$$

式中: β_s —一定子磁极极弧。

对于两相 4/2 极开关磁阻电机的电磁转矩,根据机电关系方程式,有:

$$T_e(i, \theta) = \frac{\partial W'_2(i_1, i_2; \theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

在线性模型中,根据线性假设,可对方程进行简化:

$$T_e(i, \theta) = \left. \frac{\partial W'_2(i_1, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i = \text{const}} \quad (4)$$

$$W_m = W'_m = \frac{1}{2} i \psi = \frac{1}{2} L i^2 \quad (5)$$

故:

$$T_e = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (6)$$

将其代入电感表达式,可得:

$$T_e = \begin{cases} 0 & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) \\ \frac{1}{2} K i^2 & (\theta_2 \leq \theta < \theta_3) \\ 0 & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) \\ -\frac{1}{2} K i^2 & (\theta_4 \leq \theta < \theta_5) \end{cases} \quad (7)$$

在不考虑电流变化的情况下,电磁转矩与电感变化率成正比。同时,对于电磁转矩积分可得:

$$\int T_e = \frac{i^2}{2} \Delta L \quad (8)$$

当电流保持不变时,电磁转矩对位置角的积分与电感最大值和电感最小值的差值成正比,即在任一时刻,转矩曲线与转子位置轴形成的面积只与最大电感和最小电感的差值成正比。

2.2 电感变化率优化设计——多阶阶梯气隙

基于2.1节的结论,可以得到推论:电磁转矩变化情况与电感变化率的变化情况一致,即为了减小转矩波动,需要在电感上升区间保持任一时刻电感变化率不变。而在线性模型中,电感与转子位置角关系为线性函数。当对电感上升区间采用 n 阶阶梯气隙设计时,可根据式(1)推得电感变化率与转子位置角的关系,即:

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = \begin{cases} 0 & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) & \text{第0阶气隙} \\ K_1 & (\theta_2 \leq \theta < \theta_3) & \text{第1阶气隙} \\ K_2 & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) & \text{第2阶气隙} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n-2} & (\theta_{n-1} \leq \theta < \theta_n) & \text{第 } n-2 \text{ 阶气隙} \\ K_{n-1} & (\theta_n \leq \theta < \theta_{n+1}) & \text{第 } n-1 \text{ 阶气隙} \\ 0 & (\theta_{n+1} \leq \theta < \theta_{n+2}) & \text{第 } n \text{ 阶气隙} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $K_1, K_2, \dots, K_{n-2}, K_{n-1}$ —第1阶阶梯气隙至第 $n-1$ 阶阶梯气隙的电感变化率。

为了尽可能减小转矩波动,各阶气隙电感变化率需满足:

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_{n-2} = K_{n-1} \quad (10)$$

为了便于理解和阐述,多阶阶梯气隙展开图如图3所示。

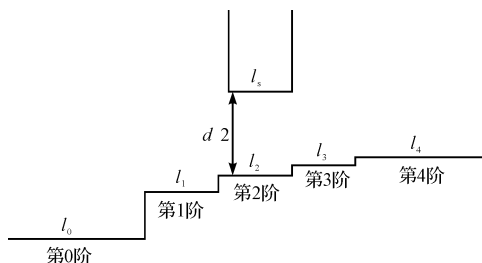


图3 多阶阶梯气隙展开图(以四阶气隙为例)

l_0, l_1, l_2, l_3, l_4 —转子极不同直径的弧度; l_s —定子极的弧度; δ_2 —第2阶阶梯气隙长度

为了便于说明,此处改换观察坐标系,采用转子极固定不动,定子极向右平移的方式类比电机转动时的气隙变化情况。

根据式(9),再结合图2可以明显看到:电感发生变化主要是由于定转子间气隙长度发生改变。为了满足式(10),对于4阶阶梯气隙还需要满足以下条件:

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 \quad (11)$$

$$L_1 - L_0 = L_2 - L_1 = L_3 - L_2 = L_4 - L_3 \quad (12)$$

式中: L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 —相应阶阶梯气隙的电感值。

四阶阶梯气隙展开图如图4所示。

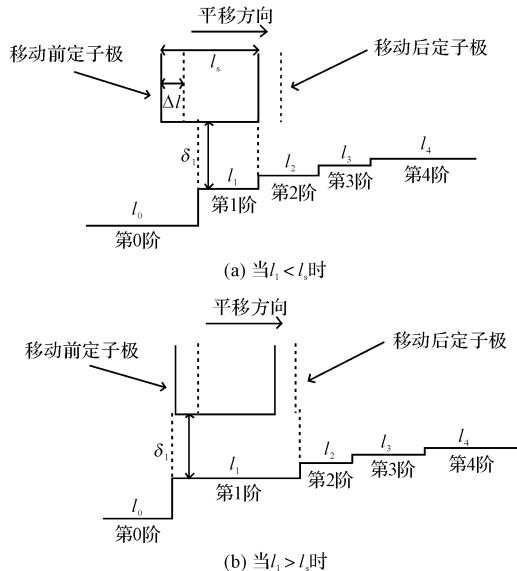


图4 四阶阶梯气隙展开图

对式(11)证明如下:

(1) 图4(a)中:假设 $l_1 < l_s$,则当定子极从第1阶气隙后极边与第2阶气隙前极边重合处平移 Δl 时,定子极对应的气隙由第0阶和第1阶阶梯气隙构成转变为第0阶、第1阶和第2阶阶梯气隙构成,电感变化量由第1阶与第0阶阶梯气隙的电感差值转变为第2阶与第0阶阶梯气隙的电感差值,而第2阶阶梯气隙对应的转子半径大于第1阶阶梯气隙对应的转子半径,即第2阶阶梯气隙电感大于第1阶阶梯气隙电感,因而无法满足式(10),其他阶阶梯气隙证明同理可得;

(2) 图4(b)中:假设 $l_1 > l_s$,则当定子极平移使定子极前后极边均进入第1阶阶梯气隙时,电感变化量由第1阶与第0阶阶梯气隙的差值转变为0,因而无法满足式(10),其他阶阶梯气隙证明同理可得。

故为了满足式(10),对于 n 阶阶梯气隙需要满足条件:

$$l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_{n-2} = l_{n-1} = l_s \quad (13)$$

同时,还要满足相邻阶阶梯气隙电感差值相等,即:

$$L_1 - L_0 = L_2 - L_1 = L_3 - L_2 = \dots = L_n - L_{n-1} \quad (14)$$

3 电感优化筛选

3.1 最小电感 $L_{\min}$ 和最大电感 $L_{\max}$ 优化设计

根据定义,最大电感 $L_{\max}$ 是指转子磁极轴线与定

子磁极轴线相重合的电感值;最小电感 $L_{\min}$ 是指转子槽中心线与定子磁极轴线相重合的电感值。

四阶阶梯气隙下最小电感和最大电感位置如图 5 所示。

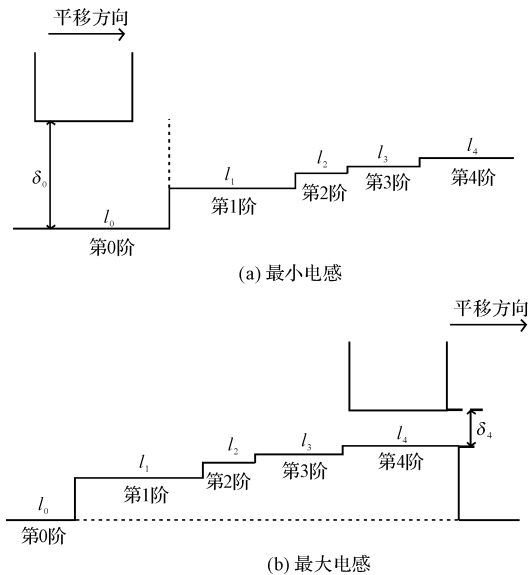


图 5 四阶阶梯气隙下最小电感和最大电感位置图

在四阶阶梯气隙的线性模型中,电感最大值位于气隙最小处,即对应转子极弧半径最大处。在机械结构上,为了避免转子与定子运行中发生碰撞,转子最大极弧半径一般略小于定子极弧半径,一般设计中半径差值大于等于 0.15 mm,转子半径最大极弧度数略大于定子极弧度数;电感最小值位于气隙最大处,即对应转子极弧半径最小处。在保证最小电感不变的情况下,可通过缩小最小电感区间以获得更大的电感变化区间,从而获得更宽的有效转矩区间。

3.2 气隙长度的选取

两相 4/2 极高速开关磁阻电机优化前后保持不变的相关参量如表 1 所示。

表 1 优化前后保持不变的相关参数

参数	参数
定子极极弧 / (°)	28
定子极极弧直径 / mm	25.6
转子极极弧最大直径 / mm	25.3
转子槽直径 / mm	17.5

为了满足式(14) 相邻阶阶梯气隙电感差值相等的条件,调整图 1 均匀气隙模型中的转子极弧直径,通过 Maxwell 2D 仿真可获得相应阶梯气隙电感值,再通过 Matlab 拟合生成关系曲线。

最大电感与气隙长度关系曲线如图 6 所示。

由于定子极弧不做调整,固定为 28°,在保证一定

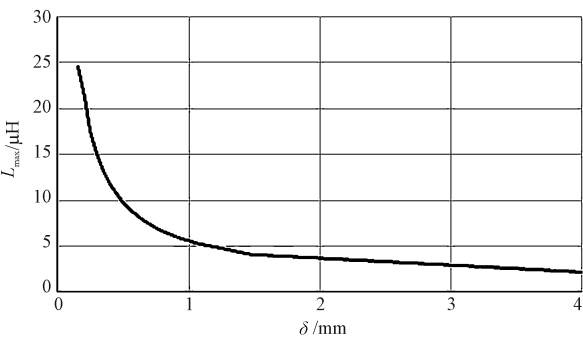


图 6 最大电感与气隙长度关系曲线

最小电感区间的同时须满足式(13),故设计转子阶数分别为 2 阶、3 阶、4 阶。图 6 中,曲线分别选取 3 等分点、4 等分点、5 等分点,即为不同阶数下对应的气隙长度。

由于对电感的讨论的前提是基于理想的线性电感模型,笔者结合考虑磁通边缘效应和磁路非线性条件进行后期补偿,尤其是最小电感会随着槽宽减小而非线性增大,需要根据实际仿真得到的最小电感重新修正模型。

不同阶数阶梯气隙转子直径修正后相关参数如表 2 所示。

表 2 不同阶数阶梯气隙转子相关参数

参数	参数
二阶阶梯气隙转子极弧 / (°)	112
二阶阶梯气隙转子直径 / mm	25.02
三阶阶梯气隙转子极弧 / (°)	109
三阶阶梯气隙转子直径 / mm	24.77、25.16
四阶阶梯气隙转子极弧 / (°)	106
四阶阶梯气隙转子直径 / mm	24.50、25.00、25.18

4 多阶阶梯气隙电机模型仿真

4.1 静态仿真

为了定量分析静态转矩波动情况,定义静态转矩波动系数如下:

$$\rho_t = \frac{T_{tmax} - T_{tmin}}{T_{tav}} \tag{15}$$

式中: ρ_t —静态转矩波动系数; T_{tmax} —静态仿真最大输出转矩; T_{tmin} —静态仿真最小输出转矩; T_{tav} —静态仿真平均输出转矩。

由此可见,静态转矩波动系数越大,静态转矩波动越大。

通过 Maxwell 2D 静态仿真所获得的恒稳电流下,不同模型两相合成的静态输出转矩与转子位置角关系曲线,如图 7 所示。

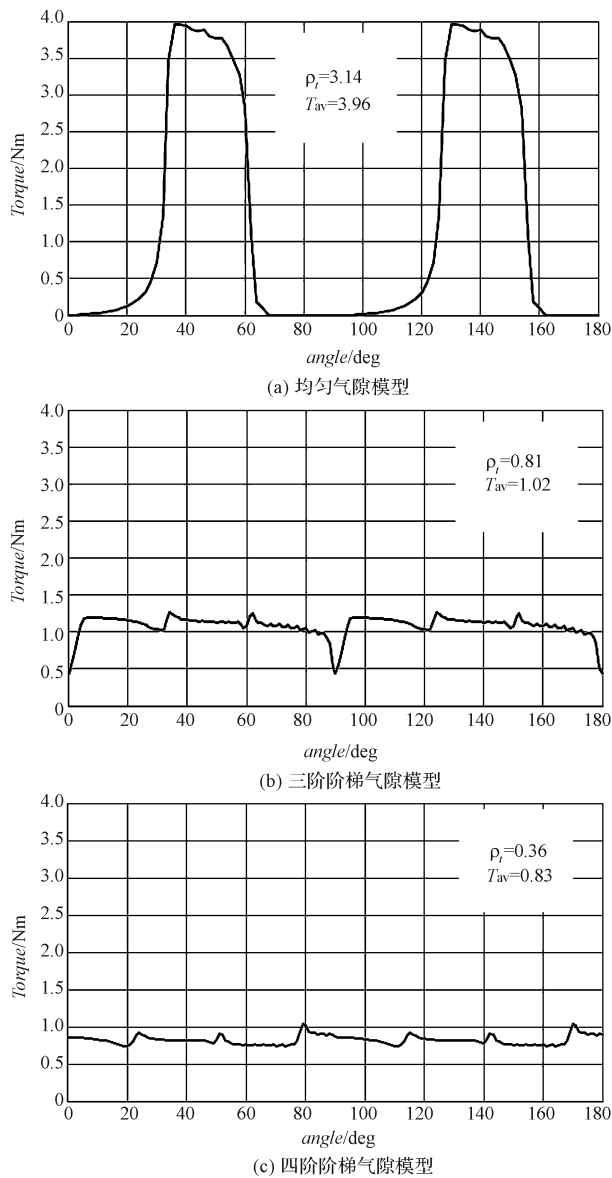


图7 静态仿真下输出转矩与转子位置角的关系曲线

由图7可以得到:均匀气隙模型存在转矩死区,三阶和四阶阶梯气隙模型无转矩死区,保证任一转子位置均能正常起动;随着气隙的设计阶数增大,平均输出转矩不断减小,故根据静态仿真结果,应选择三阶阶梯气隙模型,一方面无转矩死区且静态转矩波动较小,另一方面平均输出转矩高于四阶阶梯气隙模型。

4.2 动态仿真

基于不同阶数阶梯气隙模型的静态仿真结果,为使仿真更加贴近实际,本文进一步通过 Maxwell 2D 动态仿真,采用相同参数的 APC 控制策略,获取动态仿真下不同电机模型输出转矩情况。

为了定量分析动态转矩波动,定义动态转矩波动系数如下:

$$\rho_s = \frac{T_{smax} - T_{smin}}{T_{sav}} \quad (16)$$

式中: ρ_s —动态转矩波动系数; T_{smax} —动态仿真最大输出转矩; T_{smin} —动态仿真最小输出转矩; T_{sav} —动态仿真平均输出转矩。

由此可见,动态转矩波动系数越大,动态转矩波动越大。

动态仿真所获得的不同模型的输出转矩随时间变化曲线如图8所示。

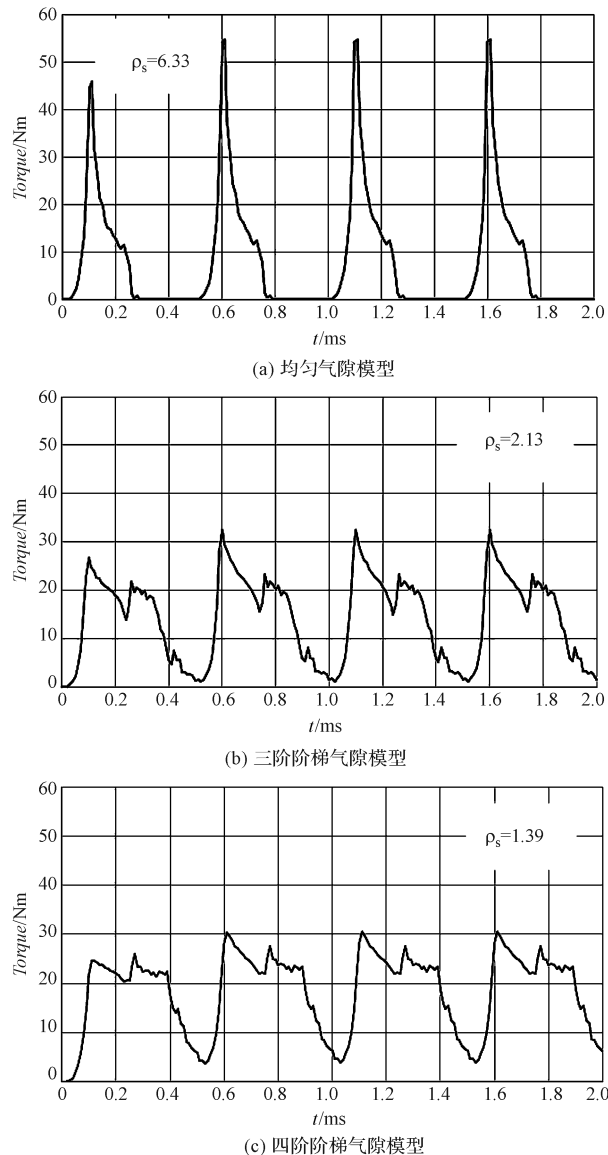


图8 动态仿真下转矩随时间变化曲线

由图8可以得到:随着阶数升高,模型的最大输出转矩不断降低,转矩波动不断减小;三阶和四阶阶梯气隙设计均能满足低转矩波动和无转矩死区的要求。在面对风机性负载时,可以采用三阶阶梯气隙设计,只需满足低起动转矩的需求,制造工艺也更为简单;面对一般负载时,可以采用四阶阶梯气隙设计,以满足低转矩波动的需求。

5 结束语

为解决传统两相 4/2 极高速开关磁阻电机运行过程中转矩死区和大转矩波动这一问题,本文提出了多阶阶梯气隙优化方法,在保持定子极不变的情况下,对转子极进行了优化,完成了理论研究和仿真,并得到以下结果:

(1)提出的极弧优化方法,可以适用于不同弧度定转子极的 4/2 极开关磁阻电机设计优化;

(2)该极弧优化方法只对转子极弧形状进行一定的调整,不影响制造工艺和成本。

但是该极弧优化方法没有考虑到实际运行中电机电流的变化情况,下一步研究中将结合电流变化,进一步优化电感设计,以期获得更好的结果。

参考文献 (References):

- [1] BARNES M, MICHAELIDERS A M, POLLOCK C. The design and performance of a self-starting 2-phase switched reluctance drive[C]. International Conference on Power Electronics & Variable Speed Drives, Nottingham: IET, 1996.
- [2] LEE J Y, LEE G H, LEE J J, et al. An improved 2-phase snail-cam type fan motor design[C]. International Conference on Electrical Machines & Systems, Beijing: IEEE, 2003.
- [3] 丁伟东. 两相 4/2 极高速开关磁阻电机设计及其噪声振动的抑制[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2014.
- [4] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [5] 吴红星, 嵇恒, 倪天, 等. 新型开关磁阻电机发展综述[J]. 微电机, 2011, 44(1): 78-83.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

郑翌成, 吴建华. 两相 4/2 极高速开关磁阻电机多阶气隙设计优化[J]. 机电工程, 2019, 36(8): 867-872.

ZHENG Yi-cheng, WU Jian-hua. Optimal design of multi-stepped air gap based on two phase 4/2 poles high speed switched reluctance motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(8): 867-872.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 866 页)

优化;同时,考虑到本文采用的 MLP 分类算法对光照变化鲁棒性和复杂工件适应性的不足,后续研究将采用深度学习相关的物体检测算法来扩大应用场景范围,以达到更好的效果。

参考文献 (References):

- [1] ASADA M, TANAKA T, HOSODA K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual servoing[C]. Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Intelligent Systems, Taipei: IEEE, 1999.
- [2] 彭泽林. 机器人堆叠目标识别与定位抓取系统研究[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院, 2018.
- [3] 田石祥. 冲裁上料机器人设计与视觉伺服系统的研究[D]. 上海:东华大学机械工程学院, 2011.
- [4] 李鹏飞, 朱鹏飞, 张蕾, 等. 基于 HALCON 和 VC++ 的双目机器人织物抓取系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2016, 31(6): 772-777.
- [5] 江士雄, 曹丹华, 吴裕斌, 等. 面向机器人抓取的双目视觉系统标定与目标位姿估计算法[J]. 仪表技术与传感器,

2016(11): 110-113.

- [6] MVTec Software GmbH. Solution_guide_ii_d_classification[M]. München: MVTec Software GmbH, 2008.
- [7] 田春林, 陈李博, 马国庆, 等. 基于 Halcon 的工业机器人手眼标定方法研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(3): 16-18.
- [8] 于春和, 祁乐阳. 基于 HALCON 的双目摄像机标定[J]. 电子设计工程, 2017, 25(19): 190-193.
- [9] 叶卉, 张为民, 张欢, 等. 机器人智能抓取系统视觉模块的研究与开发[J]. 组合机床与自动化技术, 2016(12): 1-5.
- [10] 祝世平, 李政. 基于改进梯度和自适应窗口的立体匹配算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 1-9.
- [11] 周龙, 徐贵力, 李开宇. 基于 Census 变换和改进自适应窗口的立体匹配算法[J]. 航空学报, 2012, 33(5): 886-892.
- [12] 门宇博, 马宇, 张国印. 非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 60-65.

[编辑:周昱晨]