

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.013

一种改进的四相开关磁阻电机 直接转矩控制策略研究*

桑徐阳, 颜钢锋*, 王远东, 时侠圣
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对开关磁阻电机转矩脉动大、启动时转子震荡的问题,将改进磁链估算模型和 PWM 技术应用到开关磁阻电机的直接转矩控制策略中。对四相开关磁阻电机的直接转矩控制策略进行了研究,设计了合适的磁链模型和开关表,分析了电机启动时转子震荡的原因,设计了参考转速变化的磁链估算模型;将 PWM 技术和直接转矩控制策略结合起来,提出了通过占空比调节控制周期内等效电压的大小,进而控制转矩改变量大小的方法;在 Matlab/Simulink 平台上,对优化前后电机的启动性能和转矩脉动抑制效果进行了仿真分析。研究结果表明:加入改进磁链估算模型后,有效解决了启动时转子震荡的问题,提高了启动转矩;引入 PWM 的开关磁阻电机直接转矩控制策略具有更好的转矩脉动抑制效果。

关键词:开关磁阻电机;直接转矩控制;启动优化;脉宽调制

中图分类号:TM352;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0060-06

Improved direct torque control strategy of four-phase switched reluctance motor

SANG Xu-yang, YAN Gang-feng, WANG Yuan-dong, SHI Xia-sheng
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem of large torque ripple and rotor vibration, a direct torque control strategy of four-phase switched reluctance motor was proposed, which was based on PWM and the improved flux model. The improved flux model and switching table, combined with the characteristics of four-phase switched reluctance motor, was designed to realize the direct torque control strategy of four-phase switched reluctance motor, which solves the problem of rotor turbulence when motor start. The PWM module was introduced into the direct torque control strategy to regulate the torque more subtly, by changing the equivalent voltage. The starting performance and torque ripple suppression effect of motor before and after optimization were simulated and compared, under Matlab/Simulink environment. The results indicate that the problem of rotor vibration during start-up is solved effectively meanwhile the starting torque is improved after applying the improved flux model, and direct torque control strategy of switched reluctance motor with PWM has better torque ripple control effect.

Key words: switched reluctance motor(SRM); direct torque control(DTC); startup optimization; pulse width modulation(PWM)

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)因其具有的优越性能,在变速驱动领域潜力应用很大^[1]。但是,SRM 特有的双凸

极结构、开关形式的供电电源,以及经常运行在磁饱和的工作状态,使得其难以抑制转矩脉动和噪声,制约了其推广。因此,设计合理的控制策略来抑制 SRM 的转矩脉动很关键^[2]。

收稿日期:2018-06-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904900)

作者简介:桑徐阳(1992-),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事开关磁阻电机驱动控制方面的研究。E-mail:1479372555@qq.com

通信联系人:颜钢锋,男,教授,博士生导师。E-mail:ygf@zju.edu.cn

目前,直接转矩控制被广泛应用于 SRM 的转矩脉动抑制^[3-4]。但是传统的 DTC 开关频率不固定,且基本电压矢量的大小固定,只能根据运行状态来确定增加还是减少转矩,不能对转矩增加或减少的程度进行控制。因此,通过实现更加细致的转矩控制,能够进一步减小转矩脉动。

本研究将设计实现四相 SRM 的 DTC 控制策略仿真,并且引入脉宽调制,使得 DTC 的开关频率固定,通过改变一个控制周期内电压矢量作用时间的长短来调节电压矢量的幅值大小,进而改变转矩变化量的大小。

1 传统 DTC

1.1 DTC 原理

根据 SRM 的转矩分析^[5-6],可以得到 SRM 的瞬时转矩表达式:

$$T = i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \approx i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

式中: T —瞬时转矩; i —相电流; ψ —磁链; W_f —磁场能。

因为 SRM 高度磁饱和,等式第二项可以忽略。由式(1)看出:SRM 的瞬时转矩 T 的值与电流以及磁链的变化率成正比关系,在电流不变的情况下,若要改变瞬时转矩的大小只要使磁链加速或减速。

SRM 的相电压可以表示为:

$$U = Ri + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

对其做进一步变化,可得

$$U = Ri + \frac{\partial \psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

式中: θ —是磁链的角度。

由此可得电流变化率的表达式:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - Ri - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \omega}{L} \quad (4)$$

式中: L —相电感; ω —角速度。

由此可见:电流变化率相对于磁链的速度变化有一个一阶的延迟,分析瞬时转矩的变化时可以认为电流不变。

定子绕组的电阻很小,在忽略绕组电阻的情况下可以将绕组电压表示为:

$$U = \frac{d\psi}{dt} \quad (5)$$

两边同时乘上 dt ,并且积分,可得:

$$\psi = \psi_0 + \int_0^t U dt \quad (6)$$

通常从 ψ_0 为 0 开始,因此在极小的时间 Δt 内可以

得到:

$$\Delta \psi = U \cdot \Delta t \quad (7)$$

所以:

$$\psi_{i+1} = \psi_i + U \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中: ψ_i —当前时刻磁链矢量; ψ_{i+1} —下一时刻磁链矢量。

磁链的变化受到施加电压矢量的影响:当电压矢量与磁链夹角为锐角时,磁链的幅值增加,为钝角时减少;当电压矢量在磁链旋转方向有分量时, $\partial \psi / \partial \theta$ 增加,瞬时转矩增加,反之,瞬时转矩减小。

1.2 四相 DTC

本研究中的功率模块采用经典的不对称半桥式拓扑结构^[7]。根据每相上两个开关管的不同情况,可以将每一相分为 3 个不同的状态:当上、下管同时导通时,绕组上的电压为正的母线电压,此时的状态记为“1”;当只有上管或下管导通时,通过二极管续流,绕组上的电压接近 0,此时的状态记为“0”;当上、下两管同时关断时绕组向电源回馈,绕组上的电压为负的母线电压,此时的状态记为“-1”。

每相有 3 个电压状态,四相 SRM 共有 81 个电压状态,选取其中 8 个电压矢量作为 DTC 的基本电压矢量,如图 1 所示。

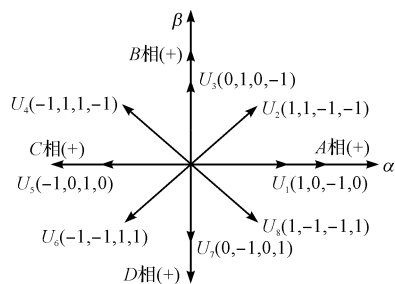


图1 四相 SRM 空间电压矢量

将空间分为 8 个区域: $N = N_1, \dots, N_8$, 每个区域跨度为 $\pi/4$, 其中, 8 个基本电压矢量均位于各自区域的中间位置。

四相 SRM 的 DTC 系统由 SRM 模块、开关表、磁链估算、转矩估算等模块组成,如图 2 所示。

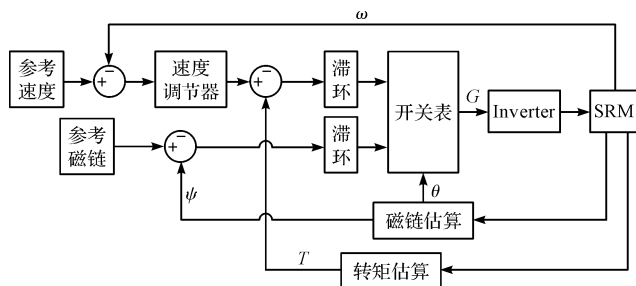


图2 四相 SRM 的 DTC 系统图

转矩滞环的工作方式是:在给定转矩与实际反馈转矩的误差大于滞环上限时给开关表模块一个转矩增加信号,当两者误差低于滞环下限时给开关表模块一个转矩减小信号。SRM 的 DTC 策略正是通过转矩滞环,将转矩脉动限制在一个较小的范围内。磁链滞环的作用是维持磁链的幅值恒定。磁链估算的作用是计算出定子磁链的幅值和角度,分别用于磁链反馈和电压矢量选取。转矩估算模块计算实际转矩并用于转矩反馈。开关表模块接收转矩和磁链的增减信号以及磁链的角度信息,确定此时应该选取的基本电压矢量,选取规则如表 1。

表 1 电压矢量选择表

状态	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8
$\psi_s = 0$ $T_o = 0$	U_6	U_7	U_8	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
$\psi_s = 0$ $T_o = 1$	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_1	U_2	U_3
$\psi_s = 1$ $T_o = 0$	U_8	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
$\psi_s = 1$ $T_o = 1$	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_1

$N_1, \dots, N_8$ —磁链位置区间; Ψ_s —磁链信号; T_o —转矩信号; $\Psi_s=0$ 时磁链幅值减小; $\Psi_s=1$ 时磁链幅值增加; $T_o=0$ 时转矩减小; $T_o=1$ 时转矩增加

SRM 的 DTC 系统工作时,根据磁链所处的位置区间以及磁链信号和转矩信号的状态,选取表 1 中对应的电压矢量。

2 改进 DTC

2.1 启动优化

在电机启动时,各相的电流波动比较大,从而磁链变化也很大,在这种情况下磁链估算模块计算出的角度与实际角度误差很大,使得启动时,区域判断不准确。为了解决启动时转子震荡的问题,本文在 SRM 的 DTC 系统中设计并加入了一个启动优化模块。

启动优化模块有两个作用:(1)通过监测实际转速的变化,在转速低于一定值时,不考虑磁链幅值的变化,只选取使转矩增长更大的电压矢量;(2)观测磁链以及转速的值,当磁链变化比较大,转速低于一定值,且转速增长率不高时,认为磁链的位置仍在启动前所在的区域,在磁链转到下个区域之前,磁链模型恢复准

确性后,再采用磁链模型的区域判断。

2.2 引入 PWM

传统 SRM 的 DTC 只能控制转矩的增加或减小,容易产生过调。解决过调节引起的转矩脉动有很多方法,包括:(1)增加功率拓扑的电平数^[8],引入更多的基本电压矢量,提供更多的转矩调整选择;(2)变磁链调节^[9],通过调节磁链的幅值来提供适当的转矩。本文采用结合 PWM 的方法,通过调节电压矢量的作用时间来控制转矩调整的强度。

在系统中引进 PWM,通过调节占空比 α 来调节基本电压矢量的作用时间,基本电压矢量作用时间越长,对转矩的改变量就越大,即:

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T_s}$$
(9)

式中: T_s —PWM 的调制周期; T_{on} —调制周期中电压矢量的作用时间。

引进 PWM 模块后的 SRM 系统如图 3 所示。

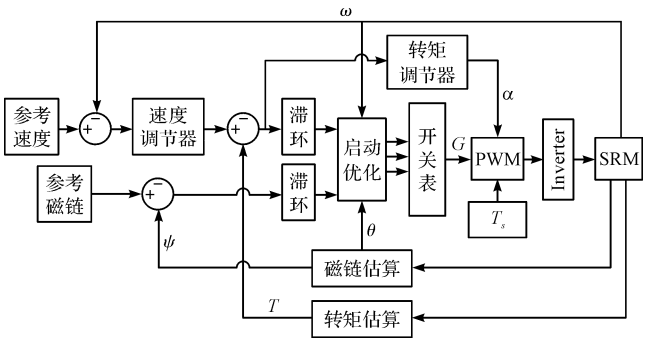


图 3 引入 PWM 的 DTC 系统图

当 PWM 的调制频率过高时,会使得开关管的损耗增加,本研究中采用 10 kHz 的调制频率。参考转矩 T_{ref} 以及实际转矩 T 的误差 ΔT 的绝对值通过一个转矩调节器,输出限幅在 0 ~ 1,即为 α ;当误差为正时,需要增加转矩,而且误差越大, α 越大,电压矢量作用时间越长;当误差为负时,需要降低转矩,且误差越小, α 越大,电压矢量作用时间越长,即:

$$U_r = \alpha \cdot U_d$$
(10)

式中: U_r —等效作用电压; U_d —当前区域选择作用的基本矢量。

通过 PI 调节器调节 α 的大小,就可以调节等效作用电压的大小,从而实现对磁链以及转矩的精细控制。

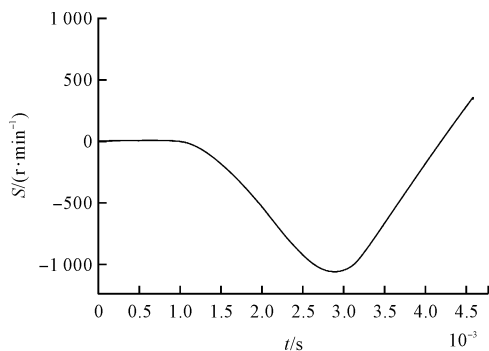
3 仿真分析

本研究利用 Matlab/Simulink 模块对 SRM 的控制模型进行建模。其中,SRM 选择一台 5.5 kW 四相 8/6 极

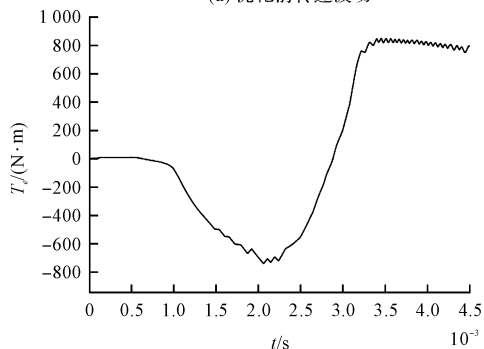
的电机,电机参数:定子电阻 $R_s = 0.01 \Omega$,转动惯量 $J = 0.0082 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,转轴处的摩擦系数 $F = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$,对称电感 23.6 mH ,不对称电感 0.67 mH ,最大磁链 0.5 Wb 。

3.1 启动优化仿真

在启动时,转子会在初始位置附近震荡,出现转速 S 为负的情况,这是因为区间判断不准,导致开关表选取了错误的电压矢量,从而使转矩 T_e 出现负,如图4所示。



(a) 优化前转速波动



(b) 优化前转矩波动

图4 无优化模块启动时转速与转矩波动

启动时的转子震荡降低了 SRM 的启动能力,也在启动时引入较大转矩脉动。

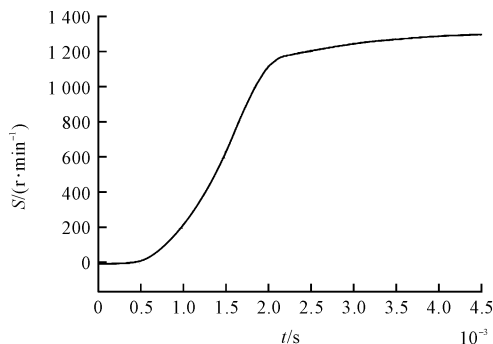
应用启动优化之后,克服了启动瞬间磁链变化剧烈导致区间判断不准的问题,启动性能改善,如图5所示。

转矩和转速不再出现为负的情况,而且提供的启动转矩也更大。

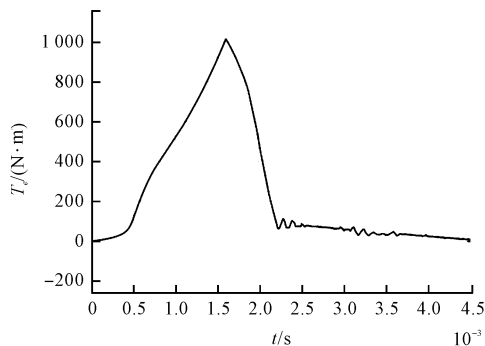
3.2 PWM 优化仿真

首先,研究空载情况下的效果,对未引入 PWM 模块的 DTC 系统进行参数调节,包括速度调节器的参数以及滞环宽度,使系统的转矩脉动达到最小,即达到传统 DTC 系统调节的极限,如图6所示。

在滞环为 $-0.02 \sim 0.02$,速度调节器的 $P=0.2$ 以及 $I=100$ 时,系统达到最优,大部分转矩在 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 上



(a) 优化后转速波动



(b) 优化后转矩波动

图5 优化后启动时转速与转矩

下波动,波动范围在 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间,每隔一段时间会出现比较大的转矩波动。

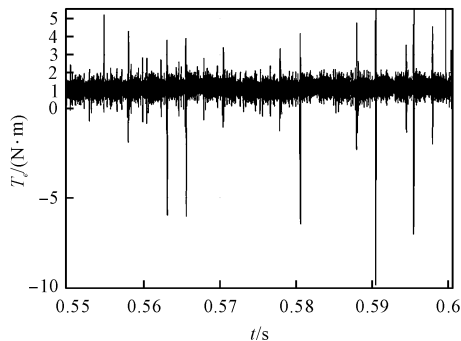


图6 传统 DTC 空载的转矩波动

保持滞环和速度调节器的参数不变,在加入 PWM 模块后,继续对系统进行调节,当转矩调节器 $P = 0.0035$ 且 $I = 10.8$ 时,使转矩进一步得到优化,如图7所示。

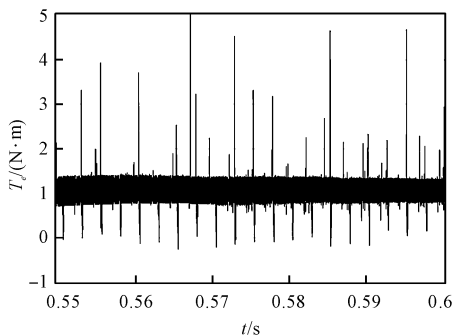
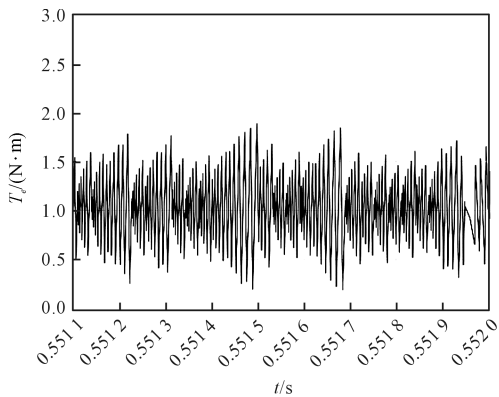


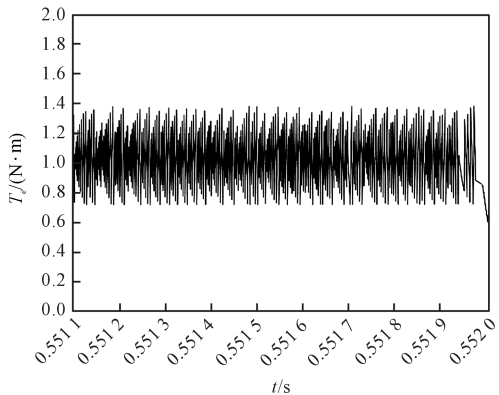
图7 引入 PWM 后 DTC 空载的转矩波动

在引入 PWM 模块后,转矩波动得到进一步抑制,大部分转矩的范围在 $0.5\text{ N}\cdot\text{m} \sim 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,且间隔出现的大的转矩脉动,也得到了很大程度的抑制。对比图(6,7)可以看出:空载时,引入 PWM 模块的 DTC 系统优化效果明显。

将优化前后的转矩波动放大分析,如图 8 所示。



(a) 传统DTC空载的转矩波动放大



(b) 引入PWM后DTC空载的转矩波动放大

图 8 转矩波动放大

可以看出:在引入 PWM 模块后,转矩调整的频率更大,在同一时间内转矩被调整的次数变多,转矩因此更加平稳。

在带 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载的情况下,对比转矩脉动的抑制效果,如图(9,10)所示。

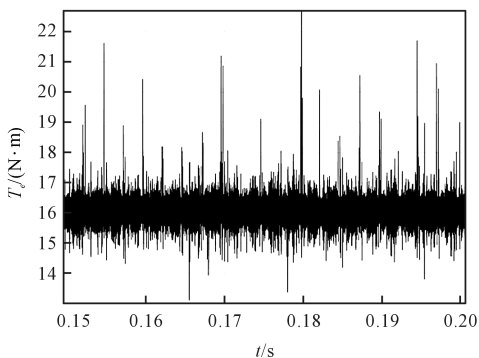


图 9 传统 DTC 负载时转矩波动

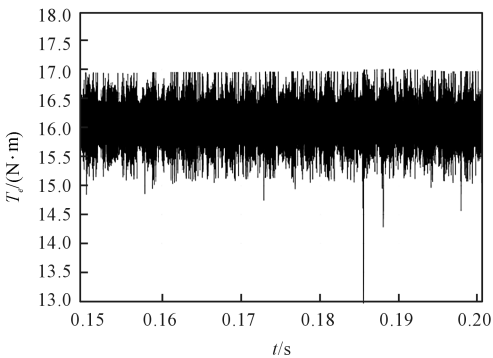


图 10 引入 PWM 模块后 DTC 负载时的转矩波动

传统 DTC 系统的转矩脉动在 $15\text{ N}\cdot\text{m} \sim 17\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,偶尔会出现比较大的转矩脉动。在引入了 PWM 模块后,转矩调节器 $P=0.0054$ 且 $I=15.4465$ 时,转矩脉动的范围在 $15.2\text{ N}\cdot\text{m} \sim 16.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,而且间隔出现的大转矩脉动得到了抑制。

4 结束语

本研究提出了一种基于 PWM 的 SRM 的 DTC 系统,利用 Matlab/Simulink 模块建立了四相 SRM 的 DTC 仿真模型,设计添加启动优化模块;在传统 DTC 系统中引入 PWM 模块,通过占空比的调节,使转矩的调节更加细化。

仿真分析表明:四相 SRM 采用 DTC 策略,能够有效的控制转矩脉动在一定范围内,经过启动模块优化后,SRM 的启动性能得到一定提升,在引入 PWM 模块后,SRM 的转矩脉动得到更好的抑制。

参考文献 (References) :

[1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社,2014.

[2] 朱 龙,吕晓波,徐东杰,等. 基于差分进化算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电气传动,2016,46(10):17-20.

[3] 王卫东,张奕黄,陈忠松,等. 开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 机械研究与应用,2008,21(1):125-128.

[4] 王勉华,梁媛媛,宋景哲,等. 直接转矩控制在开关磁阻电机中的应用与研究[J]. 电机与控制应用,2008,35(2):25-28.

[5] 漆汉宏,张婷婷,李珍国,等. 基于 DTC 的开关磁阻电机转矩脉动最小化研究[J]. 电工技术学报,2007,2(7):136-140.

[6] SAHOO S K, PANDA S K, XU J X. Iterative learning control based direct instantaneous torque control of switched reluctance motors [C]. **Proceeding of 3st Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Singapore:

IEEE, 2004.

[7] 王勉华. 四相开关磁阻电机直接转矩控制方法研究[J]. 电气传动,2011,41(4):8-11.

[8] 程 勇,林 辉. 五电平拓扑下开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J]. 电机与控制学报,2011,15(4):18-22.

[9] 黄向慧,张石岩. 一种改进的四相开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 可再生能源,2014,32(8):1124-1128.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

桑徐阳,颜钢锋,王远东,等. 一种改进的四相开关磁阻电机直接转矩控制策略研究[J]. 机电工程,2019,36(1):60-65.

SANG Xu-yang, YAN Gang-feng, WANG Yuan-dong, et al. Improved direct torque control strategy of four-phase switched reluctance motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(1):60-65.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第 35 页)

4 结束语

本文分析了电解加工微小孔时误差产生的原因,进一步总结出电解加工时工作圈长度与径向间隙和孔内电解液体积之间的函数关系;

通过对电解加工得到的微小孔几何特征进行研究,本文提出了一种基于 Matlab 数字图像处理的检测技术,用于检测孔的圆度、锥度、粗糙度等几何特征,该方法错检率、漏检率低、检测时间短。

参考文献 (References):

[1] 陈 辉,王玉魁,王振龙. 微小孔的电解加工工艺研究[J]. 电加工与模具,2010(6):17-20,31.

[2] 何 斌,马天宇,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.

[3] 刘志刚,鲍加贞,汤时虎. 基于 VC 的最小二乘拟合圆在 LAMOST 中的应用[J]. 现代制造工程,2008(1):94-96.

[4] 邢 俊. 微小孔电火花-电解复合加工中工作液浓度对工具电极损耗的影响[C]. 第 16 届全国特种加工学术会议,北京:中国机械工程学会特种加工分会,2015.

[5] 徐 斌,盛文娟,张秀珍. 电解加工异形深孔技术[J]. 金属加工:冷加工,2012(17):69-72.

[6] 樊 勇. 基于高斯噪声的图像去噪算法研究[D]. 南充:西南石油大学,2014.

[7] LIU Yuan-yuan ,CHEN Zhi-qiang ,ZHAO Zi-ran ,et al. Imaging algorithms for cosmic ray muon radiography detection of nuclear materials[J]. Tsinghua Science & Technology,2009,14(3):313-312.

[8] 袁春兰,熊宗龙,周雪花,等. 基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J]. 激光与红外,2009,39(1):85-87.

[9] 郭紫贵,凡进军. 基于图像处理的微小孔光学特征识别技术研究[J]. 工具技术,2010,44(9):102-105.

[10] 李伯奎. 三维粗糙度参数算术平均偏差与均方根偏差的规律研究[J]. 工具技术,2008(9):107-110.

[11] 赵松柏,湛海云,陈普春,等. 基于 MATLAB 的不规则面积图像测量[J]. 自动化技术与应用,2012,31(9):14-16.

[12] 骆腾斌,陈 硕,赵紫阳,等. 基于机器视觉算法的轴承套端面缺陷检测研究[J]. 机电工程,2018,35(2):148-152.

[编辑:李 辉]