

直驱式电动台钻用开关磁阻电机高效控制^{*}

朱孟美¹, 周广旭¹, 宋宁冉¹, 慕永云¹, 高佳¹, 马建辉¹, 马宏伟², 刘义军²

- [1. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院自动化研究所 山东省汽车电子技术重点实验室,
山东 济南 250014;
2. 文登奥文机电有限公司, 山东 威海 264400]

摘 要: 直驱式电动台钻用效率较高的开关磁阻电机(SRM)替换单相感应电机,将钻头直接固定到电机转子的输出端,省去传统台钻的皮带、塔轮等机械传动装置,实现直接驱动。为了实现直驱式电动台钻全转速范围内的无极调速功能,提出起动阶段采用电流斩波控制(CCC)提供大扭矩;低速阶段采用基于正余弦电流分配的方法抑制低速转矩脉动;中高速阶段采用电压斩波控制(CVC)+角度控制(APC)的变角度电压斩波组合控制方式对转速进行调节。从而实现了不同控制模式间的平滑切换的控制策略。试验结果表明:所提出的全转速范围的控制策略效率高、调速性能好,可有效提高电动台钻的性能。

关键词: 开关磁阻电机; 电动台钻; 调速系统; 高效控制

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)10-0051-07

High Efficiency Control of Switched Reluctance Motor for Direct Drive Electric Bench Drill^{*}

ZHU Mengmei¹, ZHOU Guangxu¹, SONG Ningran¹, MU Yongyun¹, GAO Jia¹, MA Jianhui¹,
MA Hongwei², LIU Yijun²

- [1. Institute of Automation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Key Laboratory of Automotive Electronic Technology, Jinan 250014, China;
2. Wendeng Allwin Motors Co., Ltd., Weihai 264400, China]

Abstract: Single-phase induction motor was replaced by high-efficiency switched reluctance motor (SRM) in direct-drive electric bench drill. The drill bit was directly fixed to the output end of the motor rotor. The belt, tower wheel and other mechanical transmission devices of traditional bench drill were omitted, and the direct drive was achieved. In order to realize the stepless speed regulation of the direct drive type electric bench drill in the full speed range, the control strategies were proposed as follows: in the starting phase, chopped current control (CCC) was used to provide high torque; in the low speed phase, a method based on sine and cosine current distribution was proposed to suppress low speed torque ripple; in the middle and high speed stage, the variable angle voltage chopping combination control method of chopped voltage control (CVC) + angle position control (APC) was used to adjust the speed and achieve smooth switching between different control modes. The experimental results showed that the proposed full speed range control strategy had high efficiency and good speed regulation performance, which could effectively improve the performance of the electric bench drill.

Key words: switched reluctance motor (SRM); electric bench drill; speed control system; efficient control

^{*} 基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE038);山东省科学院地产学研协同创新基金项目(2018CXY-7)

作者简介: 朱孟美(1987—),女,硕士,助理研究员,研究方向为开关磁阻电机及其控制。

周广旭(1978—),男,博士,副研究员,研究方向为开关磁阻电机及其控制、永磁同步电机及其控制、电机优化设计。

宋宁冉(1990—),女,博士,研究方向为直线电机及其控制。

0 引言

随着电动工具的发展和普及,研究和开发高效率、高可靠性、低成本的电动工具驱动电机系统变得越来越重要。电动工具用驱动电机种类较多,针对电机运行原理、结构及驱动系统的不同,在功率密度、电机效率、成本、机械强度、散热性等方面的性能也存在差异^[1]。目前,电动工具主要使用3种电机:单相串激电机、异步电机和永磁同步电机。其中:单相串激电机可交直流两用,一方面具有低速大扭矩、过载能力强等特点;另一方面由于使用换向器,电刷和滑环的存在降低了可靠性,所以具有使用场合受限、寿命短、维修成本高、功率受限、转速不能过高等缺点^[2]。异步电机具有结构简单、运行可靠、维修方便、价格便宜、惯性小、响应速度快等优点,但直接起动电流大,且对电网的影响和工作机械的冲击力均很大^[3]。永磁无刷电机的性能优于变频调速异步电动机,但稀土价格昂贵,造成稀土永磁电机本体的成本较高;同时,过高的温升会使永磁体发生不可逆退磁,限制电机出力,减小电机输出功率^[4-5]。

相对而言,开关磁阻电机(SRM)是一种双凸极电机,定转子均是硅钢片叠压而成的凸极;定子上缠绕集中绕组,转子上无绕组。SRM结构简单、成本低、坚固耐用,可以承受高温升和高转速^[6];在宽广的转速范围内,能够以较高的效率运行,是一种高效电机;起动转矩大,可以频繁起停及正反转变换;各相独立工作,功率电路简单,避免了直通短路现象。因此,SRM可靠性高。

本文研究的直驱式电动台钻,用效率较高的SRM替换单相感应电机,将钻头直接固定在电机转子的输出端,省去传统台钻皮带、塔轮等机械传动装置,实现了直接驱动的方式。SRM虽然具有诸多优点,但存在低速转矩脉动大的问题。为了实现全转速范围内电动台钻的无极调速及高效运行^[7],本文设计了相应的控制策略,并实现了不同控制模式间的平滑切换。经试验验证,该控制策略效率高、调速性能好,可有效提高电动台钻的性能。

1 SRM 控制系统

SRM 控制系统主要包括 SRM、电源模块、控制器、功率变换器、电流检测及电机转子位置检测

模块^[8]。SRM 控制系统结构原理图如图 1 所示。

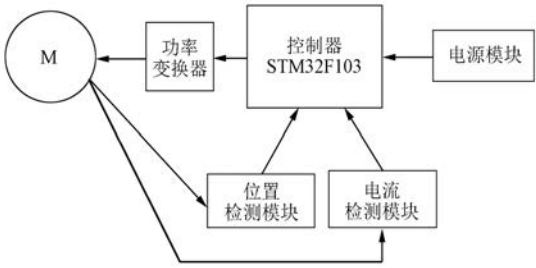


图 1 SRM 控制系统结构原理图

1.1 SRM

基于现有 12 英寸(1 英寸 ≈ 2.54 cm)台钻驱动应用,在分析 SRM 结构原理的基础上,得出直驱电机在 1 000~4 200 r/min 范围内均能够输出约 250 W 的功率。考虑到设计裕度及用户需求,确定三相 6/4 极 SRM 电磁设计方案。SRM 参数如表 1 所示。

表 1 SRM 参数

参数名称	参数值
供电电压/V	单相 AC 220
额定功率/W	345
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 771
定子铁心外径/mm	139
转子铁心内径/mm	20
电机气隙长度/mm	0.35
定子铁心长度/mm	<55

确定电机额定功率为 345 W,额定转速为 1 771 r/min。考虑到电机直驱的转轴强度问题,确定电机转子内径为 20 mm;由于要求电机最高转速较高,且低速时具有大转矩,电机的气隙不能过小,确定气隙长度为 0.35 mm,同时为了限制电机的轴向长度而确定电机的铁心长度小于 55 mm。三相 6/4 极 SRM 横截面如图 2 所示。

定子为 6 极凸极结构,每个凸极上有 1 个集中绕组线圈,6 个线圈组成 A、B、C 三相绕组;转子为 4 极凸极结构,既没有永磁体,也没有线圈。

1.2 电源模块

电源模块采用 LNK306 芯片将整流后的主回路 310 V 电压变为 12 V,输出电流小于 360 mA,再经过两级电压转换芯片,将 12 V 电源转换为 5 V 电源,5 V 电源转换为 3.3 V 电源,为控制系

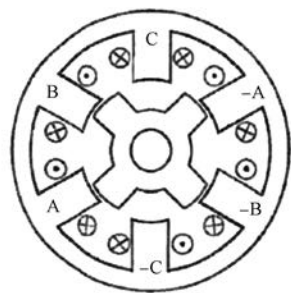


图2 三相 6/4 极 SRM 横截面

统提供 12、5、3.3 V 电源。电源系统电路如图 3、图 4 所示。

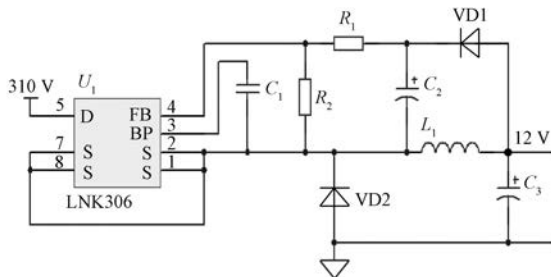


图3 12 V 电源电路

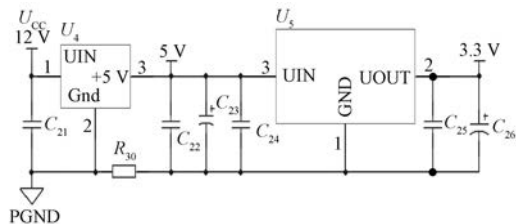


图4 5、3.3 V 电源电路

1.3 控制器

控制器是整个电机控制系统的核心部分,是 SRD 的指挥中枢,控制器性能的好坏决定了电机运行的性能^[9]。控制器负责外部转速指令及起停指令的处理、位置信号捕获、转速计算、相电流检测、故障检测及保护,以及与上位机通信等工作,通过对上述信息的综合处理,输出三相脉宽调制 (PWM) 驱动信号,最终实现对电机运行状态的控制。控制器一般由单片机或 DSP 芯片以及外围接口电路组成。该系统选用 ST 公司的 STM32 系列 STM32F103C8T6 作为主控芯片,72 MHz 主频,10 位 ADC,1 个高级定时器,3 个通用定时器,USART, SPI 和 I2C, LQFP48 封装,完全满足控制系统性能的要求。

1.4 功率变换器

功率变换器包括驱动电路及功率电路两部分。因系统供电为单相 220 V 交流电,经整流后电压为 310 V,选用耐高压的 IGBT 作为功率模块。控制器主回路采用经典的不对称半桥结构,如图 5 所示,控制方式简单而且电压利用率高。系统额定功率为 345 W,考虑到 SRM APC 控制过程中的电流尖峰及电机的过载能力,开关功率管采用 600 V/15 A 的 IGBT (15 A 为 100 ℃ 时的开通电流),二极管采用 100 ℃ 标称为 8 A 的管子。

控制器输出的 PWM 信号驱动能力有限,不能直接驱动功率模块,需要经过专门的驱动芯片对 IGBT 进行驱动。系统中选用 IR 公司的 IR2101S,双通道、栅极驱动、高压高速功率驱动器。该器件采用高度集成的电平转换技术,简化

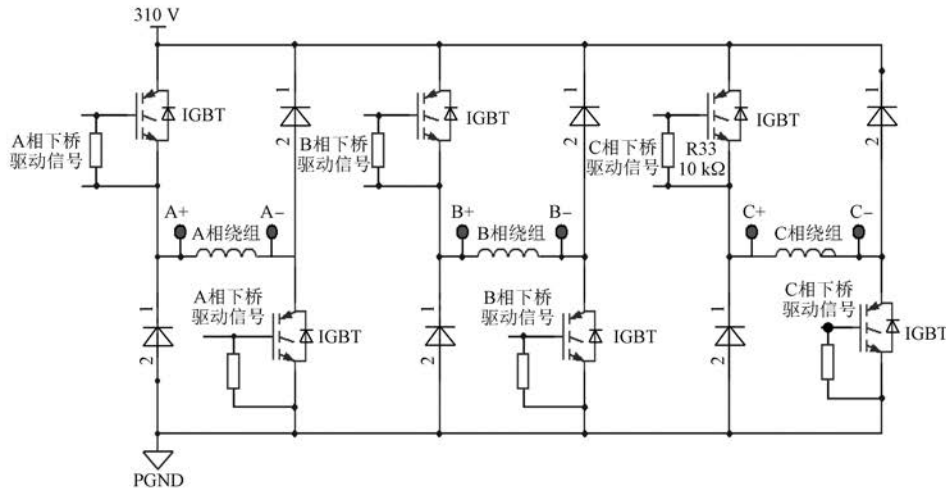


图5 三相不对称半桥结构

了逻辑电路对功率器件的控制要求,同时提高了驱动电路的可靠性。

1.5 电流检测

控制系统需提供电流信息用于采取相应的保护措施以防止过电流。为了降低检测电机相电流的成本,在逆变器下桥臂分别串联 3 个采样电阻,通过其电压信息来得到电机定子三相电流的采样方案,可以省去电机定子侧的 3 个电流传感器。

1.6 位置检测

为了确定 SRM 转子的位置,进而确定各相绕组的开通与关断位置,确保电机在运行过程中的正确换向,需要硬件电路提供位置信号。本文采用霍尔元件+磁环的结构,磁环与电机转子同轴安装,3 个霍尔元件相差 120°,安装在定子后端。

2 SRM 控制策略

目前,SRM 主要控制方式有 3 种:电流斩波控制、角度控制和电压斩波控制。SRM 转速运行范围宽,结合不同的实际应用要求及上述控制方式的特点,可选用其中几种控制方式的组合,使 SRM 调速系统达到规定的运行转速,同时保持较高的效率。

2.1 电流斩波起动控制

SRM 为三相电机,具备自起动能力。当电机起动时,由于此时电机旋转电动势较小,使得电流上升速度很快,可能会发生过电流或较大电流尖峰。为了保护电机自身机械机构及功率开关器件的使用寿命,采用电流斩波控制来限制电流峰值。

具体控制过程如下:当相电流达到最大值 $I_{\max}$ 时,关断功率开关的下桥臂,电流通过下桥的二极管进行续流;当电流衰减至 $I_{\min}$ 时,重新开通下桥臂。电流的上下限滞环设置过大,会导致相电流波动过大,电机转矩脉动严重,不利于电机的平稳运行;电流上下限设置过小,则会导致功率管开关频率过高,导致功率管发热等问题,因此应合理设置电流的上下限。在最大电感出现之前必须将绕组关断,以免电流延续到负转矩区。

2.2 低速双闭环控制

电压控制通过调节相绕组电压的平均值,进而间接地限制和调节相电流,因此既能用于高速调速系统,又能用于低速调速系统^[10]。该控制方法抗负载扰动的动态响应快,缺点是低速运行时

转矩脉动较大,原因在于输出转矩的波动。换相阶段最为严重。本文拟采用转速电流双闭环实现对电机的低速控制。采用按照正余弦电流切换的方法实现换相,对各相绕组同时进行控制,尽量保证合成转矩在不同转子位置时维持恒定值。因为 SRM 是感性负载,所以通电绕组中的电流不可能垂直上升和下降,通电绕组输出的瞬时转矩也不可能是矩形。因此 SRM 在换相期间,将相电流增加和减小的曲线设计为正余弦曲线,如图 6 所示。电磁转矩 $T_e = 0.5K[(I\cos\theta)^2 + (I\sin\theta)^2] = 0.5KI^2$, $K = dL/d\theta$, θ 为转子位置角, L 为对应 θ 的该相绕组电感,可以保证无论是在单相通电还是换相期间两相通电的情况下,电机均能输出恒定电磁转矩,以降低电机运行的脉动,实现低速运行平稳。

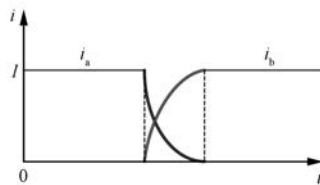


图 6 电流正余弦曲线

2.3 中高速变角度电压斩波组合控制

随着转速继续上升,反电动势增大,电流受到限制,上升较慢。当达到最大值后,因电感的增加,电流反而下降。为了提高电机的输出能力,通过改变开通角和关断角来调整相电流的波形及与电感波形的相对位置。开通角通过转速环的输出调节,关断角根据转速调节。本文采用变角度电压斩波组合控制方式,结合了 2 种控制方式的优势,增强了抗负载扰动能力,同时精确控制转速。与单一的开通关断角控制或电压斩波控制相比,变角度电压斩波组合控制方式既通过调整开通关断角改变相电流波形,又利用电压斩波调整电流变化率,使电机以最快的速度跟踪给定,并能对负载变化及时作出响应,维持系统稳定运行。

综上所述,控制系统根据电机实际转速确定各阶段的控制策略,实现全转速范围内的无级调速。为了避免控制方式在转速临界来回切换,引起系统振荡等问题,升速切换和降速切换点间留有一定的差值,前者略高于后者。系统控制策略框图如图 7 所示。

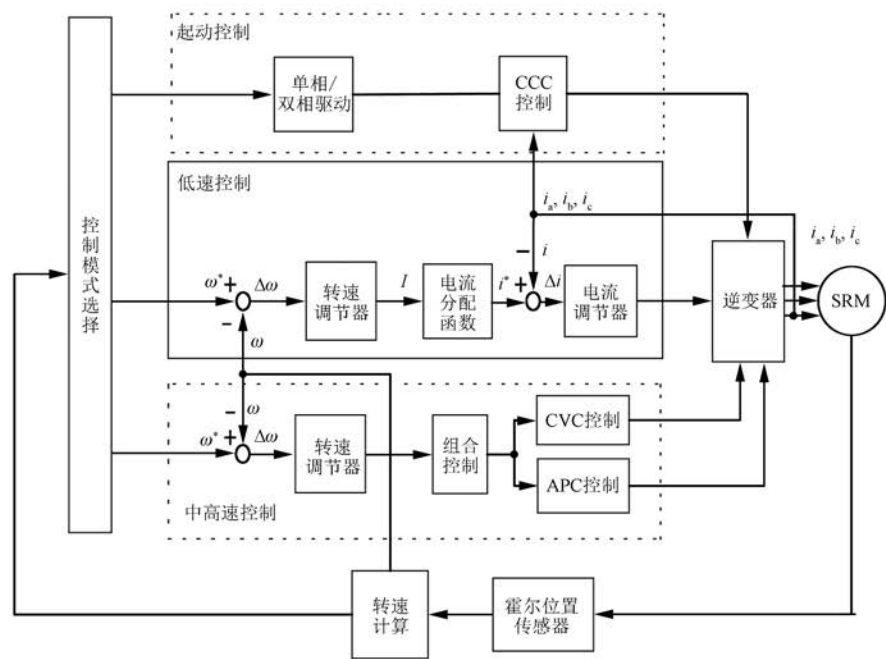


图 7 系统控制策略框图

3 软件设计

根据控制策略,SRM 调速控制系统软件设计结构如图 8 所示,采用模块化编程编写电机控制程序^[11]。

电机控制程序主要分为初始化程序、主程序和中断程序 3 部分^[12]。其中:初始化程序主要完成 CPU 外设及全局变量的初始化;主程序主要完成根据转速确定控制策略、按键输入、转速显示和故障检测;中断程序包括 AD 采样中断、定时器中

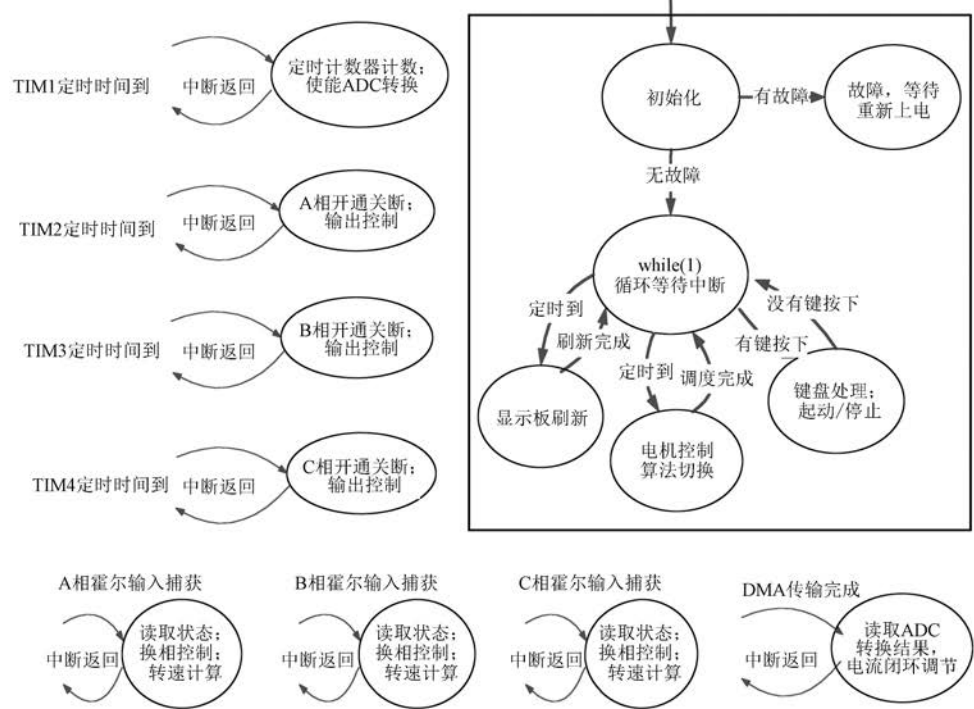


图 8 SRM 调速控制系统软件设计结构图

断和外部输入捕获中断。AD 采样中断由定时器 1 使能 ADC 采样 DMA 模式, 传输完成后触发 DMA 中断, 该中断实现对相电流和调速电位器电压信号的 AD 采样、模数转换及存储功能; 定时器中断有 3 个, 分别负责三相绕组的开通角、关断角定时; 外部输入捕获中断由外部输入信号的跳边沿触发, 该中断完成霍尔信号的读取、相应阶段的电机控制算法实现及转速计算。

4 样机与试验

根据上述 SRM 控制系统的研究与设计方案, 以 STM32F103RBT6 为核心, 研制直驱式电动台钻用 SRM 控制器样机如图 9 所示。直驱式电动台钻实物图如图 10 所示。

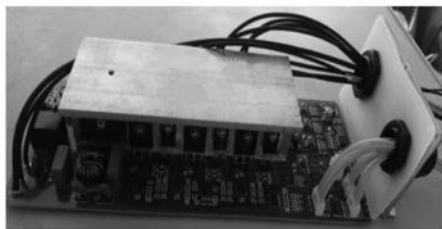


图 9 直驱式电动台钻用 SRM 控制器样机



图 10 直驱式电动台钻实物图

基于该硬件平台的电流测试曲线如图 11 所示。图 11(a) 为电机起动阶段的电流波形, 可以看出三相导通电流的上限基本在一条直线上、下限也基本在一条直线上, 分别对应 CCC 斩波控制中的电流上下限; 图 11(b) 为电机低速运行下的电流波形, 换相阶段的电流波形基本符合按照正弦增加、余弦减小的设定; 图 11(c) 为电机高速运行下的电流波形, 采用变角度电压斩波组合控制, 电流较为平滑。

为了测试控制系统样机的性能, 在不同转速下

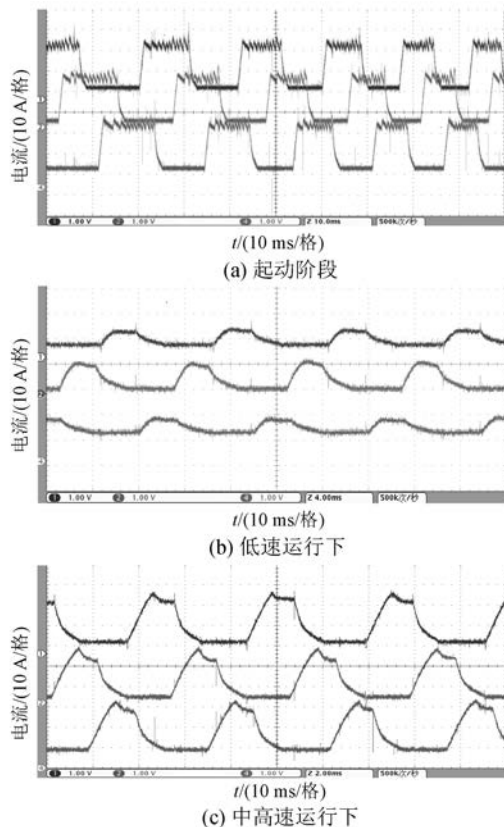


图 11 不同转速下的三相电流波形

进行加载试验, 测试电机输出功率及效率, 在 500、1 500、2 500 r/min 3 个转速下进行试验。不同转速下的负载试验曲线如图 12 所示。由图 12(a) 可以看出, 电机在 500 r/min 低速运行时, 效率较低, 最大值为 61%, 且随着输出功率增大, 效率有所下降。图 12(b) 中, 电机运行在 1 500 r/min, 输出功率从 150 W 至 400 W, 效率一直较高, 最高可达 78%。图 12(c) 中, 电机运行在 2 500 r/min, 输出功率超过 200 W 以后, 比 1 500 r/min 转速下的效率有所降低, 但仍在 70% 以上。通过不同转速下的加载试验可知, 系统效率较高, 转速稳定, 满足电动台钻对控制系统的性能要求。

5 结 语

为了实现直驱式电动台钻全转速范围内的无极调速功能, 本文研究了电机控制系统的构成及不同转速下的电机控制策略。起动阶段采用电流斩波控制提供大扭矩; 低速阶段提出基于正余弦电流分配方法抑制低速转矩脉动的双闭环控制策略; 中高速阶段采用电压斩波控制+角度控制相

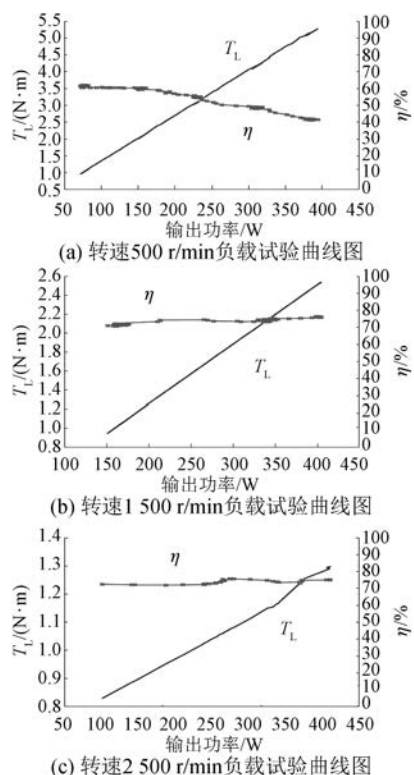


图 12 不同转速下的负载试验曲线图

结合的变角度斩波控制方式对转速进行调节,并通过模块化设计方法实现软件编程。基于 STM32F103RBT6 芯片搭建控制系统进行试验验证,在不同转速条件下测试样机的运行效率等参数,验证了样机系统良好的负载特性。通过实际钻孔试验证明了电机的钻孔性能符合设计要求,并且转速平稳、振动噪声低,可以替代感应电机进行直驱应用。

【参考文献】

- [1] 徐进.电动工具用三相开关磁阻电机及其驱动控制系统的研究[D].济南:山东大学,2018.
- [2] 朱金宝,高建平,刘丽坤.电动工具用高速开关磁阻电机设计与性能分析[J].新型工业化,2016,6(5): 55.
- [3] 闫朝阳,张微,顾和荣,等.双向开关高频变换型三相异步电机软起动器[J].电力电子技术,2009,43(12): 52.
- [4] 郑宁.新型开关磁阻电机及其在电动工具上的应用[J].电动工具,2011(6): 9.
- [5] 张磊,林明耀,李鑫.新型轴向磁场磁通切换型永磁电机外围漏磁有限元处理方法[J].微特电机,2010,38(1): 9.
- [6] 朱曰莹,赵桂范,杨娜.电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化[J].电工技术学报,2014,29(11): 88.
- [7] 成亚萍.智能台钻的智能控制[J].湘潭大学自然科学学报,1997,19(4): 87.
- [8] 李明辉,徐少辉.电动车用开关磁阻电机驱动系统[J].电机与控制应用,2016,43(2): 49.
- [9] 臧平宇,张广明,梅磊.轴向磁通开关磁阻电机的电流斩波控制研究[J].电源技术,2016,40(4): 889.
- [10] 江小军.开关磁阻电机调速系统研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [11] 冯一鹏.开关磁阻电机双闭环控制系统设计[J].化学工程与装备,2008(6): 47.
- [12] 石小波.电动车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究及实现[D].长沙:湖南大学,2008.

收稿日期: 2019-06-05

(上接第 50 页)

- [13] TSOTOLIDIS S, SAFACAS A N. Deployment of an adaptable sensorless commutation technique on BLDC motor drives exploiting zero sequence voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 877.
- [14] PARK J, HWANG S, KIM J. Sensorless control of brushless DC motors with torque constant estimation for home appliances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 677.
- [15] CUI C, LIU G, WANG K, et al. Sensorless drive for

high-speed brushless DC motor based on the virtual neutral voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3275.

- [16] 杨成顺,葛乐,杜九江.计及等效电阻的无刷直流电机换相转矩脉动的分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2016,44(23): 115.
- [17] 夏加宽,韩行一,王成元.非理想反电动势的无刷直流电机的转矩脉动抑制策略研究[J].电气技术,2009(9): 14.

收稿日期: 2019-07-04