

文章编号: 1671-251X(2024)12-0093-11

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024060040

煤矿带式输送机开关磁阻电动机半直驱系统 DITC 控制策略

刘鹏¹, 张磊², 鲍久圣², 陈华新¹, 魏春基², 马传明², 王雷², 王小龙²

(1. 平顶山天安煤业股份有限公司, 河南 平顶山 467099;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 平顶山天安煤业九矿有限责任公司井下带式输送机采用异步电动机+液力耦合器+减速装置的驱动系统, 存在传动效率低、传动链长、调速性能差等问题。对该驱动系统进行改造, 设计了一种带式输送机 2×400 kW 开关磁阻电动机半直驱(SRSD)系统。采用 BP 神经网络预测开关磁阻电动机(SRM)磁链和转矩, 基于预测值建立了高精度 SRM 非线性模型。结合 SRM 在换相区的转矩变化规律与 PWM 控制思想, 提出了一种改进型直接瞬时转矩控制(DITC)策略, 以转矩误差作为输入量, 在转矩误差阈值内对相电流进行 PWM 控制。针对带式输送机空载和变负载运行工况进行仿真, 结果表明改进型 DITC 策略较传统 DITC 策略可显著降低 SRM 转矩脉动, 最大降幅达 39.1%, 提高了带式输送机 SRSD 系统运行稳定性。基于 SRM 关键结构参数与改进型 DITC 策略试制了带式输送机 SRSD 系统, 并在煤矿井下进行了工业性试验, 结果表明 SRSD 系统可实现带式输送机满载平稳启动, 动态特性良好, 且耗电量较原驱动系统减少了 24%。

关键词: 带式输送机; 开关磁阻电动机; 半直驱系统; 直接瞬时转矩控制; 电动机转矩脉动抑制

中图分类号: TD67 文献标志码: A

DITC control strategy for semi-direct drive system with switched reluctance motor in
coal mine belt conveyor

LIU Peng¹, ZHANG Lei², BAO Jiusheng², CHEN Huaxin¹, WEI Chunji², MA Chuanming²,
WANG Lei², WANG Xiaolong²

(1. Pingdingshan Tian'an Coal Industry Co., Ltd., Pingdingshan 467099, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The underground belt conveyor at Pingdingshan Tian'an Coal Mining No. 9 Co., Ltd. uses a drive system consisting of an asynchronous motor, hydraulic coupling, and reduction gears. This system exhibits issues such as low transmission efficiency, lengthy transmission chain, and poor speed regulation performance. To address these limitations, the drive system was retrofitted with a 2×400 kW switched reluctance motor semi-direct drive(SRSD) system utilizing a switched reluctance motor(SRM) for the belt conveyor. A BP neural network was used to predict the flux linkage and torque of the SRM, and a highly accurate SRM nonlinear model was developed based on the predictions. By combining the torque variation patterns of the SRM in the commutation zone and the PWM control principles, an improved direct instantaneous torque control(DITC) strategy was proposed. Torque error was used as the input, and PWM control was applied to phase currents within the torque

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-12-18; 责任编辑: 李明。

基金项目: 平顶山天安煤业股份有限公司重点科研项目资助(2023120045); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介: 刘鹏(1989—), 男, 河南平顶山人, 工程师, 主要从事煤矿机电运输系统大型设备管理及煤矿智能化技术应用工作,

E-mail: 444769779@qq.com。通信作者: 鲍久圣(1979—), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士, 主要从事矿山运输及其智能化技术研究工作, E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn。

引用格式: 刘鹏, 张磊, 鲍久圣, 等. 煤矿带式输送机开关磁阻电动机半直驱系统 DITC 控制策略[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 93-102, 127.

LIU Peng, ZHANG Lei, BAO Jiusheng, et al. DITC control strategy for semi-direct drive system with switched reluctance motor in coal mine belt conveyor[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 93-102, 127.



扫码移动阅读

error threshold in this strategy. Simulations under no-load and variable load conditions of the belt conveyor were conducted. The results showed that the improved DITC strategy significantly reduced the torque ripple of SRM compared to the traditional DITC strategy, with a maximum reduction of 39.1%, thereby improving the operational stability of the SRSD system for the belt conveyor. Based on the key structural parameters of the SRM and the improved DITC strategy, the SRSD system for belt conveyors was developed and tested in an underground coal mine. The results showed that the SRSD system enabled smooth full-load startup, demonstrated excellent dynamic performance, and reduced power consumption by 24% compared to the original drive system.

Key words: belt conveyor; switched reluctance motor; semi-direct drive system; direct instantaneous torque control; motor torque ripple suppression

0 引言

带式输送机是煤矿主煤流运输系统关键装备之一,主要承担井下工作面巷道、盘区与胶带大巷、地面煤仓长距离转运等运输任务^[1-2],在整个矿山运输系统中占据重要地位^[3]。驱动系统作为带式输送机的动力源,其驱动性能直接影响整机运输效率,进而制约煤矿开采效率与成本^[4]。

目前我国矿用带式输送机驱动系统主要采用异步电动机驱动与永磁电动机直驱两类。传统异步电动机驱动系统以异步电动机为动力源,采用三相异步电动机+软启动装置+减速装置的组成结构,存在传动效率低、耗电量与维护成本高等问题^[5],无法满足带式输送机长运距、高带速与重载运输需求,且异步电动机的高耗电量有悖于绿色矿山建设与国家双碳战略目标^[6]。永磁电动机^[7-8]具有低转速、大转矩的优异特性,主要缘于内部稀土永磁体结构,而煤矿井下带式输送机多电动机永磁直驱系统装机功率高达数百千瓦甚至上千千瓦,在制作过程中需要消耗大量永磁体材料,成本高,且稀土资源作为我国不可再生的重要战略资源,不能无限制使用。此外,永磁体在煤矿井下高温、大电流、化学腐蚀与剧烈机械振动等极端工况下,存在退磁风险^[9],影响煤矿安全生产。

开关磁阻电动机(Switch Reluctance Motor, SRM)是继传统异步电动机与永磁电动机之后的新一代产品,被认为是电气传动系统发展过程中的里程碑。国家发改委、科技部、国家环保总局联合发布的《国家鼓励发展的资源节约综合利用和环境保护技术》第 65 号公告明确将 SRM 列为国家鼓励发展的唯一电动机,目前已在龙门刨床、抽油机、纺织机、电动汽车等高速运行设备中成熟应用^[10-11]。

SRM 在结构上采用双凸极结构,转子无永磁体与励磁绕组,仅凭借磁阻最小原理,通过改变各相通电顺序与通电时间,即可完成电动机调速与换向功能^[12]。与传统异步电动机、永磁电动机相比,SRM 具有结构可靠性高、故障率低、制造成本低、容错性

能高等优势,特别是在电动机发生缺相故障时,其余两相可继续控制电动机运行^[12],十分适合在煤矿井下恶劣环境中应用。

目前学者对煤矿井下运输装备 SRM 系统进行了探索性研究。鲍久圣等^[13]设计了 SRM 半直驱带式输送机。李瑞金^[14]基于 ARM 与 DSP 核心控制板设计了矿用 30 kW SRM 蓄电池电机车控制系统。田玉丽等^[15]提出了将平煤集团六矿矸石运输绞车上采用的交流绕线异步电动机更换为 95 kW 全数字 SRM 驱动系统,有效提升矸石运输效率近 30%。但 SRM 在低速运行工况下会出现输出转矩周期性波动的转矩脉动现象,影响大功率驱动系统的整机稳定性,限制了其在带式输送机与刮板输送机等大功率重载矿山运输装备上的应用。因此,改善 SRM 转矩脉动,提高其运行稳定性与可靠性,是矿山运输装备实现大功率 SRM 驱动技术应用亟需解决的关键问题。

抑制 SRM 转矩脉动通常可通过电动机本体结构设计与控制策略设计来实现^[16]。在结构设计方面:陈吉清等^[17]基于遗传算法对 SRM 参数进行多目标寻优,将 SRM 在较低转速(1 000 r/min)、额定转速(1 500 r/min)、较高转速(2 000 r/min)下的转矩脉动分别降低了 7.73%, 10.64%, 34.39%,在低转速下转矩脉动削弱效果不明显;黄朝志等^[18]设计了一种永磁辅助式外转子 SRM,增加永磁转矩以弥补下降的部分磁阻转矩,使转矩脉动降低了 19.3%。在控制策略设计方面,目前最常用的是角度位置控制、电压斩波控制、电流斩波控制^[19-20],但在转速低于 1 000 r/min 场景下对转矩脉动的抑制效果不明显^[21]。

直接瞬时转矩控制(Direct Instantaneous Torque Control, DITC)是将电磁转矩作为控制对象,在预先设定的导通角内,根据检测转矩和目标转矩的偏差控制相开关通断^[22-23]。S. K. Singh 等^[24]基于 DITC 策略设计了一种滞环控制器,通过改变相位的开关状态来保证 SRM 转矩始终在滞环带内,在稳态工况下转矩可维持在 50 N·m 小范围内波动。韩国强等^[25]针对用于 SRM 的 DITC 存在的转矩波动大、动态调

整时间长等问题,提出了一种基于改进滑模控制的 DITC 策略,增加了状态变量滑模面和滑模趋近律,在额定转速 1 000 r/min、负载转矩 0.5 N·m 工况下,转矩脉动降低了 40%。可见, DITC 具有较好的 SRM 转矩脉动抑制效果。

本文针对平顶山天安煤业九矿有限责任公司井下机巷带式输送机驱动系统进行改造,提出一种开关磁阻电动机半直驱(Switched Reluctance Motor Semi-direct Drive, SRSD)系统,基于 BP 神经网络建立了 SRM 非线性模型,结合 PWM 控制方法设计了 SRSD 系统的改进型 DITC 策略,通过仿真与井下工业性试验验证了所提方法的有效性。

1 带式输送机 SRSD 系统结构参数设计

研究对象为 DSJ 可伸缩带式输送机,参数见表 1。

表 1 改造前带式输送机主要参数

Table 1 Main parameters of belt conveyor before renovation

参数	值	参数	值
运输距离/m	500	运量/(t·h ⁻¹)	500
带宽/m	1	电动机功率/kW	400
带速/(m·s ⁻¹)	4	驱动滚筒直径/mm	1 250

带式输送机驱动系统采用异步电动机+液力耦合器+减速装置的传动链,存在传动效率低、传动链长、调速性能差等问题。对此,在不改变带式输送机机架、驱动滚筒等机械部件结构尺寸的基础上,提出一种带式输送机 SRSD 系统,其结构如图 1 所示。该系统将 SRM 与行星齿轮减速装置内置于一个箱体,充分利用 SRM 高可靠性与优良的启动特性,并通过内置式行星齿轮减速装置实现减速增扭,满足带式输送机低转速、大转矩运行需求,同时可减小驱动系统体积,进而缩短传动链长度^[26],以适应带式输送机安装空间需求。

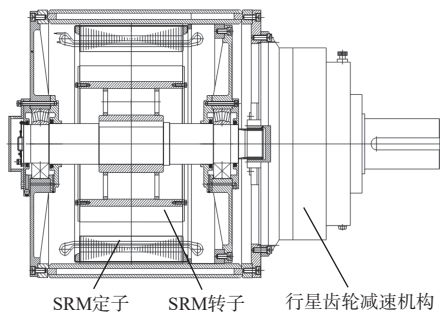


图 1 SRSD 系统结构^[13]

Fig. 1 Structure of switched reluctance motor semi-direct drive (SRSD) system^[13]

计算带式输送机驱动系统功率^[27]与行星齿轮减速机构传动比^[28],得到 SRSD 系统关键参数,见表 2。

表 2 SRSD 系统关键参数

Table 2 Key parameters of SRSD system

参数	值	参数	值
装机功率/kW	400	太阳轮齿数	21
额定电压/V	1 140	行星轮齿数	42
额定转速/(r·min ⁻¹)	60	内齿圈齿数	105
减速机构传动比	5		

将 2 套 400 kW SRSD 系统分别安装在带式输送机驱动滚筒 1 与驱动滚筒 2 上,如图 2 所示,即可完成带式输送机驱动系统改造。

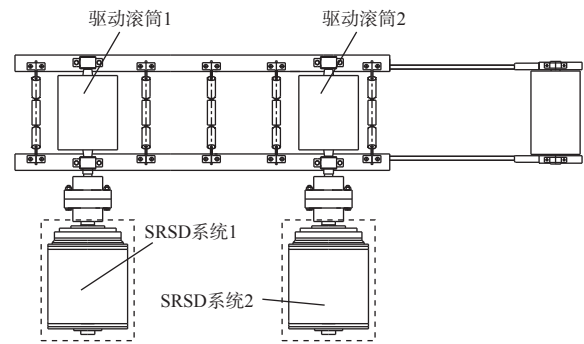


图 2 带式输送机 SRSD 系统安装

Fig. 2 SRSD system layout in belt conveyor

2 SRSD 系统 SRM 非线性模型建立

因 SRM 具有双凸极特性,表现出非线性和高饱和特性,导致传统建模方法精度差,影响带式输送机运行的稳定性,而精确的 SRM 非线性模型是实施 DITC 策略的基础,因此,采用 Maxwell 电磁学仿真软件与 BP 神经网络相结合的方式,建立 400 kW 级 SRSD 系统 SRM 非线性模型。

2.1 SRM 数学模型

SRM 运行原理在端口形式上与其他电动机相同,为二端口装置,即 1 对电端口和 1 对机械端口。忽略磁滞、涡流、互感等次要因素,三相 SRM 系统模型如图 3 所示。其中 u_A, u_B, u_C 为三相电压; i_A, i_B, i_C 为三相电流; R_A, R_B, R_C 为三相电阻; $\psi_A(i_A, \theta), \psi_B(i_B, \theta), \psi_C(i_C, \theta)$ 为三相磁链; θ 为三相电角度; t 为时间; D 为黏性系数; J 为转动惯量; T_L, T_e 分别为负载转矩和三相电磁转矩。

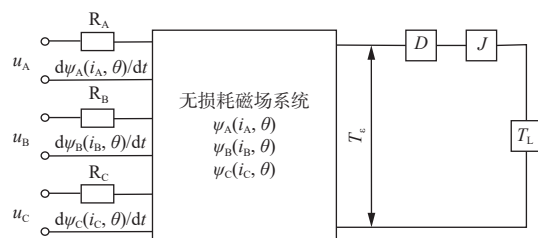


图 3 三相 SRM 系统模型

Fig. 3 Model of three-phase switch reluctance motor (SRM) system

SRM 第 $n(n=A, B, C)$ 相电压平衡方程和磁链方程^[12]可表示为

$$u_n = R_n i_n + \frac{d\psi_n(i_n, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$\psi_n(i_n, \theta) = L_n(i_n, \theta) i_n \quad (2)$$

式中 $L_n(i_n, \theta)$ 为电感。

将式(2)代入式(1), 可得

$$u_n = R_n i_n + \left(L_n(i_n, \theta) + i_n \frac{\partial L_n(i_n, \theta)}{\partial i_n} \right) \frac{di_n}{dt} + i_n \frac{\partial L_n(i_n, \theta)}{\partial \theta} \omega = R_n i_n + e_i + e_m \quad (3)$$

式中: ω 为机械角速度; e_i, e_m 分别为感生电动势和动生电动势。

SRM 转动机械平衡方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_L \quad (4)$$

式中 B 为阻尼系数。

根据虚位移原理, SRM 在任意运行电角度的电磁转矩可表示为

$$T_e = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \Big|_{i_n=c_1} = - \frac{\partial W}{\partial \theta} \Big|_{\psi_n(i_n, \theta)=c_2} \quad (5)$$

式中: W' 为绕组磁共能; W 为磁能; c_1, c_2 为常数。

由于 SRM 具有较强的非线性, 其磁能和磁共能的积分难以计算, 所以实际中往往计算其在 1 个转子角周期内的平均转矩 T_a , 即^[12]

$$T_a = \frac{3N_r}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{N_r}} T_n(i_n, \theta) d\theta = \frac{3N_r}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{N_r}} \int_0^{i_n} \frac{\partial L_n(i_n, \theta)}{\partial \theta} \xi d\xi d\theta \quad (6)$$

式中: N_r 为转子极数; $T_n(i_n, \theta)$ 为 n 相转矩; ξ 为相电流中间变量。

尽管式(6)在形式上能够得出 SRM 平均转矩, 但仅采用电动机磁链和电流难以得出转矩精确值。

2.2 SRM 非线性模型

搭建 SRM 电磁学有限元模型, 并以电流 i_A 为参数化仿真的边界条件, 得到不同 i_A 下的 SRM 磁链与转矩非线性输出特性曲线。将仿真值作为训练集导入 BP 神经网络, 预测得到更细致、可覆盖整个 SRM 工作范围的三维非线性输出特性曲面, 进而得到 SRM 非线性模型。

2.2.1 SRM 电磁学关键参数设计

为搭建 SRM 非线性模型, 在 SRSD 系统结构(图 1)基础上, 进一步设计电磁学关键参数, 见表 3。

基于表 3 数据, 采用 Maxwell 电磁学有限元仿真软件中的 RMxprt 模块搭建 Synchronous Machine 模型, 对 SRM 电磁特性进行分析。设置 12/8 SRM 的定子极距角与转子极距角分别为 $30^\circ, 45^\circ$, 转子周期角为 45° 。由于 SRM 每相均为独立绕组, 为简化

表 3 SRM 设计参数

Table 3 Design parameters of SRM

参数	值	参数	值
电压/V	1 140	定子内外径/mm	581, 943
转速/(r·min ⁻¹)	300	转子内外径/mm	200, 580
槽极数	12/8	定子轭厚/mm	50
气隙/mm	1	转子轭厚/mm	60
电动机长度/mm	1 056		

SRM 模型, 取 A 相为分析目标, 设置定子凸极与转子凹极对齐为转子初始位置, 如图 4 所示, 其中阴影部分为 A 相绕组。对 SRM 结构进行网格划分, 如图 5 所示, 设置表面偏差为 0.77 mm。

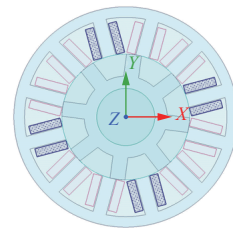


图 4 SRM 初始位置

Fig. 4 SRM initial position

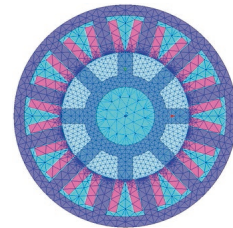


图 5 SRM 网格划分

Fig. 5 SRM grid division

对电动机进行 1 个电周期(40 ms)逆时针旋转的电磁仿真, 得到 SRM 磁感应强度云图, 如图 6 所示。可看出 SRM 定转子旋转接近端部时出现由磁阻效应导致的局部磁饱和现象, 其他部位的磁感应强度较小, 符合电动机设计规程。

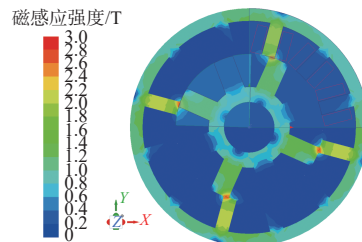


图 6 SRM 磁感应强度云图

Fig. 6 SRM magnetic induction intensity cloud map

基于 Maxwell 软件搭建 SRM 模型, 对相电流 i_A 进行参数化仿真。设置 i_A 区间为 $0 \sim 1\ 000$ A, 转子转动单位为 $1^\circ/s$, 仿真时间为 45 s。为减小计算量, i_A 取值间隔 20 A。由于磁链曲线关于 22.5° 呈轴对称分布, 转矩曲线关于 22.5° 呈中心对称分布, 所以

可利用仿真参数绘制区间为 $0 \sim 22.5^\circ$ 的磁链、转矩输出特性曲线, 部分结果如图 7 所示。

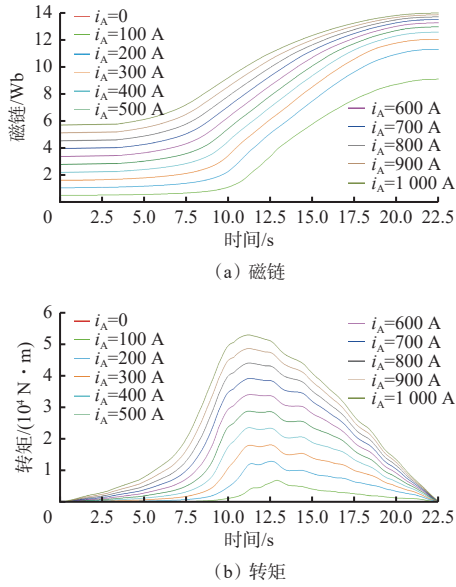


图 7 SRM 二维输出特性曲线

Fig. 7 SRM two-dimensional output characteristic curves

2.2.2 基于 BP 神经网络的 SRM 非线性模型建立

受仿真条件限制, 通过 Maxwell 软件求解方式无法得到 $0 \sim 1000 \text{ A}$ 范围内更小电流间隔情况下的磁链、转矩数据, 为此采用 BP 神经网络预测数据, 进而建立完整的 SRM 非线性模型^[28]。采用 Matlab 自建库中 BP 神经网络工具箱来新建脚本文件, 并编写程序完成以下步骤。

1) 将仿真得到的磁链与转矩特性参数划分为训练集和测试集, 其中训练集包含 11 526 组数据, 测试集包含 452 组数据。

2) 对训练集和测试集数据进行归一化处理。

3) 建立 BP 神经网络, 其包含 4 个 16 单元的隐藏层, 每个隐藏层使用 Tan-sigmoid 型传递函数。

4) 设置最大迭代次数为 50 000, 误差阈值为 10^{-8} , 学习率为 0.001。

5) 训练 BP 神经网络并测试。

6) 进行反归一化, 并计算误差。

磁链和转矩参数训练结果误差的均方根分别为 0.001 498 3 Wb, 8.289 6 N·m。

为了更加直观地验证 BP 神经网络预测的正确性和有效性, 将 $i_A=870 \text{ A}$ 时 BP 神经网络的预测值和仿真值进行对比, 如图 8 所示。可看出磁链和转矩预测值与仿真值曲线近乎重合, 证明预测值跟随性好。此外, BP 神经网络预测值与仿真值相差很小, 满足预测需求。

为定量分析 BP 神经网络预测的准确性, 随机选择 4 组角度和电流数据, 采用 BP 神经网络预测得到相应的磁链和转矩, 结果见表 4、表 5。可看出与

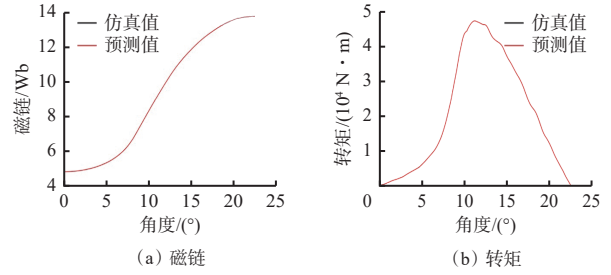


图 8 BP 神经网络预测值与实际值对比

Fig. 8 Comparison between prediction values of BP neural network and the actual ones

Maxwell 仿真值相比, 磁链和转矩预测值绝对误差最大值分别为 0.11 Wb 和 36.7 N·m, 相对误差最大值分别为 1.76% 和 0.14%, 4 组数据的平均相对误差小于 1%, 满足预测精度要求。

表 4 磁链预测定量分析

Table 4 Quantitative analysis of magnetic flux prediction

序号	角度/ $^\circ$	电流/A	仿真值/Wb	预测值/Wb	绝对误差/Wb	相对误差/%
1	9.8	551	5.68	5.780	0.100	1.76
2	16.7	763	12.23	12.340	0.110	0.90
3	20.3	975	13.76	13.770	0.010	0.07
4	11.5	339	5.496	5.591	0.095	1.73

表 5 转矩预测定量分析

Table 5 Quantitative analysis of torque prediction

序号	角度/ $^\circ$	电流/A	仿真值/(N·m)	预测值/(N·m)	绝对误差/(N·m)	相对误差/%
1	9.8	551	25 319.45	25 356.15	36.70	0.140
2	16.7	763	27 041.73	27 047.69	5.96	0.020
3	20.3	975	11 171.84	11 171.40	0.44	0.004
4	11.5	339	19 978.39	19 969.10	9.29	0.047

根据 BP 神经网络预测值, 绘制磁链-电流-电角度和转矩-电流-电角度特性曲面, 如图 9 所示。

与图 7 相比, 图 9 中输出特性曲面变化平滑, 对应关系明确, 无突变曲线和凹凸点, 可覆盖 SRM 的输入电流与输出磁链、转矩特性点, 曲面变化规律与仿真结果一致。

基于图 9, 采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建 SRM 非线性模型(图 10)代替传统的 SRM 线性数学模型, 用于 SRSD 系统改进型 DITC 策略建模。

3 SRSD 系统改进型 DITC 策略设计

为提高 SRSD 系统响应的快速性, 降低换相区转矩脉动, 基于高精度 SRM 非线性模型, 通过简化功率变换模块工作状态、优化换相区导通角与关断角、利用 PWM 转矩误差控制方式, 提出一种改进型 DITC 策略。

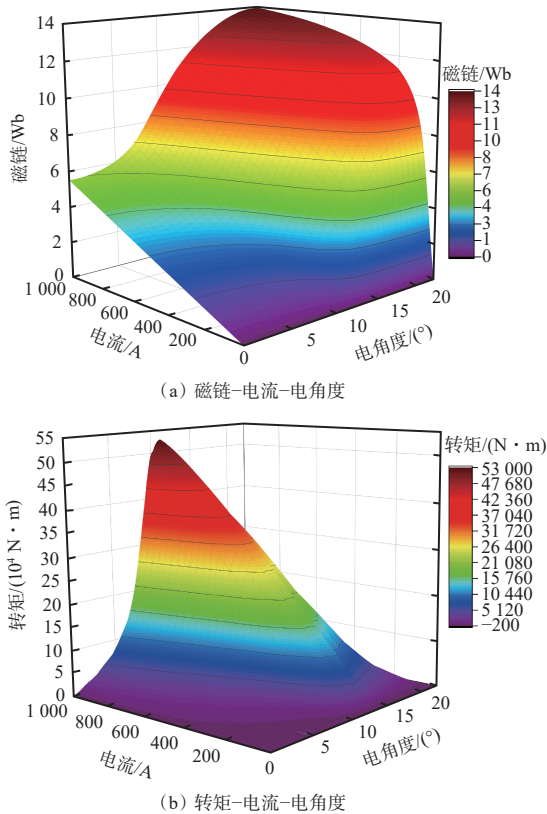


图 9 SRM 三维输出特性曲面

Fig. 9 Three dimensional output characteristic surface of SRM

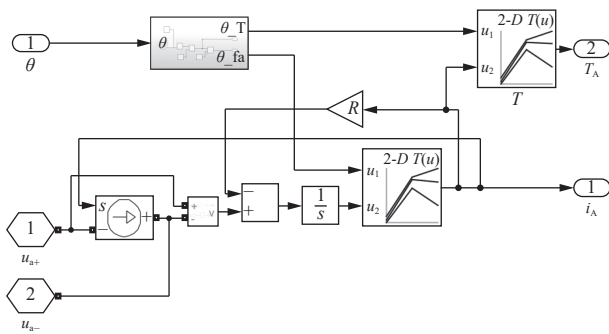


图 10 SRM 非线性模型

Fig. 10 Nonlinear SRM model

3.1 DITC 策略原理

传统 SRM DITC 主要由转速 PI 控制器、滞环控制器、开关表模块、功率变换模块、SRM 模块、转矩/转速传感器组成,如图 11 所示。转矩/转速传感器实时检测转速和转矩信息。转速 PI 控制器根据转速实时值 v 与目标值 v^* 的差值计算参考转矩。滞环控制器根据转矩实时值 T_e 与目标值 T^* 的差值输出开关信号。开关表模块根据 SRM 转子位置决定 A, B, C 相通断。功率变换模块输出电压标志位至 SRM。

3.2 改进型 DITC 策略

3.2.1 功率变换模块工作状态与换相区角度优化

传统 DITC 的功率变换模块存在增磁、续流和退磁 3 种状态,对应标志位 1, 0, -1, 三相 SRM 状态有

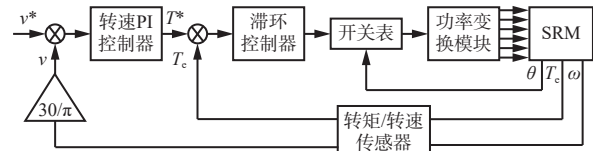


图 11 SRM DITC 策略原理

Fig. 11 Direct instantaneous torque control(DITC) strategy principle for SRM

27(3³)种,使得在开关表设计和选择上存在冗余。SRM 运行时输出转矩和参考转速在一定时间内的变换趋势较稳定,续流状态实际存在时间短,导致开关管频繁进入、跳出状态 0,增加了功率变换模块开关管的动作频率,降低了该模块的使用寿命。

为简化功率变换模块状态,将该模块设置为增磁和退磁 2 种状态,对应标志位 1, -1, 三相 SRM 状态有 9(3²)种。当 SRM 输出转矩小于负载转矩时,导通对应相,使该相电流增大进行增磁;当 SRM 输出转矩大于负载转矩时,关断对应相,使该相电流减小进行退磁。

SRM 运行在换相区时,其转矩与导通角、关断角相关,如图 12 所示。以 A 相至 B 相换相过程为例,若换相前后所需的转矩 T 恒为 $2T_{Aq}$ (T_{Aq} 为 A 相转矩 T_A 在 q 点处的值), B 相分别在 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 处导通,则在 θ_0 处产生的转矩分别为 T_{Bp}, T_{Bq}, T_{Br} , A 相在 θ_0 处产生的转矩为 T_{Aq} , $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 在 θ_0 处的合成转矩分别为 $T_{Bp}+T_{Aq} > T, T_{Bq}+T_{Aq}=T, T_{Br}+T_{Aq} < T$ 。当合成转矩不足以提供所需的负载转矩时,SRM 会产生转矩脉动。而当导通角减小角度过大时,会使各相导通区间变大,导致换相区存在三相全导通状态,使转子凸极受到负转矩的影响。

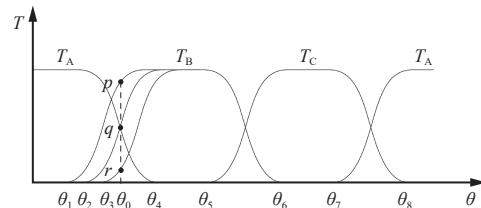


图 12 换向区不同导通角时 SRM 转矩

Fig. 12 SRM torque under different conduction angles in commutation zone

取 A 相定子凸极与转子凸极完全对齐时的角度作为 B 相导通角,设置初始导通角为 30°,仿真模拟 A 相至 B 相换相过程中,不同导通角减小幅度下 B, C 相转矩,结果如图 13 所示。可看出随着导通角减小, B 相转矩呈线性增大趋势,导通角减小 12°时 B 相转矩达 32 670 N·m,之后趋于平稳; C 相转矩随着导通角减小先减小后增大,初期减小速率较小,在导通角减小 6°后转矩减小速率变大,在导通角减小 10°后逐渐增大,并在导通角减小 14°后趋于平稳。

综合分析仿真结果,取导通角减少幅度为 6° ,即导通角为 24° 。

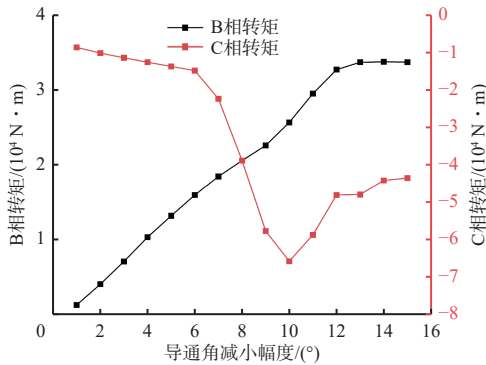


图 13 不同导通角减小幅度下 B、C 相转矩

Fig. 13 B-phase and C-phase torques under different reduction amplitudes of conduction angles

在换相区,若关断角太小,会导致 SRM 输出转矩不足以提供负载转矩;若关断角过大,会导致退磁不及时,使关断相产生负转矩,此时电动机导通相不仅要提供负载转矩,还要输出部分转矩以抵消关断相产生的负转矩,增大 SRM 能耗和转矩脉动,影响 SRM 工作性能。因此,选择合适的关断角对 SRM 运行稳定性至关重要。设置初始关断角为 45° ,仿真得到不同关断角减小幅度下 A 相的转矩和转矩脉动,如图 14 所示。

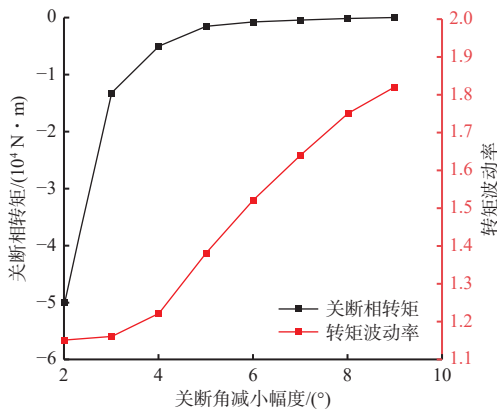


图 14 不同关断角减小幅度下 A 相转矩和转矩脉动

Fig. 14 A-phase torque and torque ripple under different reduction amplitudes of turn off angle

从图 14 可看出,随着关断角减小,关断相转矩逐渐减小,使得电动机转矩损失减小,有利于提高电动机能效比,但电动机转矩波动率逐渐增大,不利于电动机平稳运行。结合换相区 B、C 相转矩表现及关断角对 SRM 性能的影响,取关断角减小幅度为 5° ,即关断角为 40° 。

3.2.2 PWM 转矩误差控制

在功率变换模块的工作方式由 27 种简化为 9 种后,为使 SRM 转矩变化更加连续,将传统的滞环控制改进为 PWM 控制。设置转矩误差为 ΔT ,当

$\Delta T < 0$ 时,SRM 输出转矩大于负载转矩,令功率变换模块输出为 0,对导通相进行退磁;当 $\Delta T \geq T_{lim}$ (T_{lim} 为转矩误差阈值)时,SRM 输出转矩小于负载转矩,令功率变换模块输出为 1,持续为导通相增磁;当 $0 \leq \Delta T < T_{lim}$ 时,SRM 输出转矩小于负载转矩,根据 ΔT 占 T_{lim} 的比例,可决定功率变换模块在单位周期内输出占空比。

4 改进型 DITC 策略仿真

为验证改进型 DITC 策略在带式输送机 SRSD 系统中的应用效果,针对带式输送机井下实际负载运行工况,开展空载启动与变负载运行工况下的仿真实验。

4.1 改进型 DITC 策略建模

在 Matlab/Simulink 中搭建 SRM 改进型 DITC 仿真模型,如图 15 所示。该模型包括 SRM 本体模块、功率变换模块、转矩判断模块、转速 PI 控制模块。SRM 本体模块采用图 10 中的 SRM 非线性模型,相关参数见表 3,其可通过查表方式将实时输入的 SRM 电角度信号输出为磁链与转矩信号,供转矩判断模块使用。考虑 SRSD 系统内行星齿轮减速机构传动比为 5,为简化仿真过程,设置 SRM 目标转速为 300 r/min。

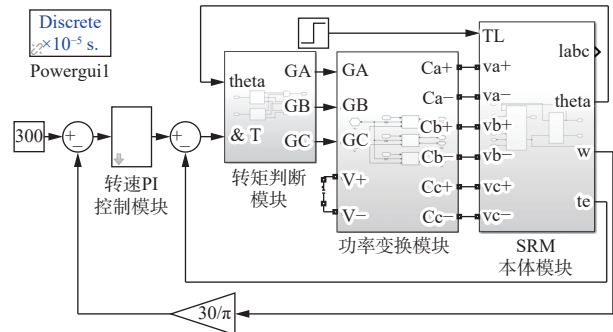


图 15 SRM 改进型 DITC 仿真模型

Fig. 15 Simulation model of improved DITC for SRM

4.2 空载启动工况仿真

设置 SRM 负载转矩为 500 N·m,仿真时间为 25 s。仿真结果如图 16 所示。

从图 16(a)可看出,采用传统 DITC 策略时,SRM 最大转速为 313.1 r/min,超调量为 4.4%,误差带为 1% 的调节时间为 3.5 s;采用改进型 DITC 策略时,SRM 最大转速为 310.8 r/min,超调量为 3.6%,误差带为 1% 的调节时间为 3 s,超调量和调节时间较传统 DITC 策略分别减少了 0.8% 和 14.3%。从图 16(b)可看出,在稳定运行阶段,采用传统 DITC 策略时转矩为 167.2~881.5 N·m,采用改进型 DITC 策略时转矩为 336.8~856.4 N·m,波动范围较传统 DITC 策略明显减小。

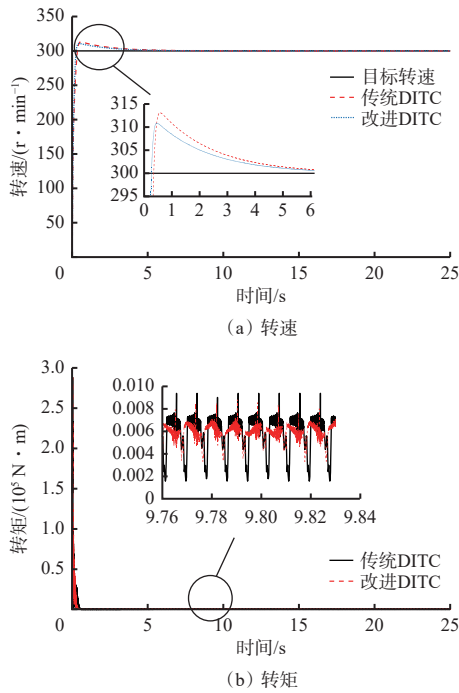


图 16 带式输送机空载运行工况下改进型 DITC 策略仿真结果

Fig. 16 Simulation results of improved DITC strategy for belt conveyor under no-load operation conditions

4.3 变负载运行工况仿真

煤矿井下带式输送机会在轻载、重载变化工况下运行。针对该工况,设置仿真时间为 25 s, 0~10 s 负载转矩为 2 000 N·m, 10~20 s 负载转矩为 8 000 N·m, 20~25 s 负载转矩为 5 000 N·m。仿真结果如图 17 所示。

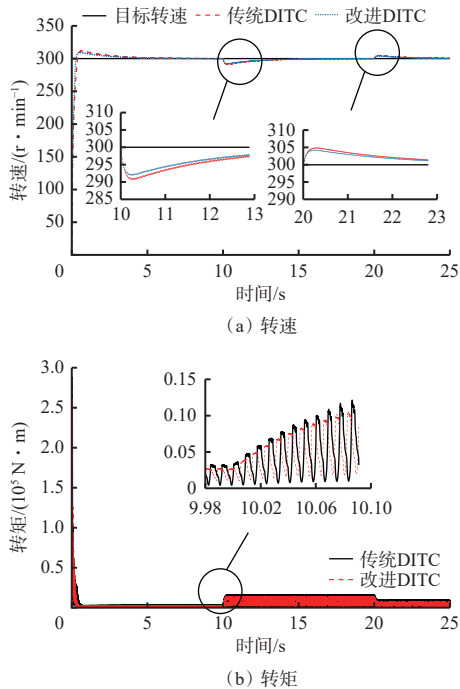


图 17 带式输送机变负载运行工况下改进型 DITC 策略仿真结果

Fig. 17 Simulation results of improved DITC strategy for belt conveyor under variable load operation conditions

从图 17(a)可看出, 10 s 负载突增情况下, 采用传统 DITC 和改进型 DITC 策略时 SRM 转速分别降至 290.7、292.5 r/min, 误差带为 1% 的调节时间分别为 2.7、2.1 s; 20 s 负载减小情况下, 采用传统 DITC 和改进型 DITC 策略时 SRM 转速分别增至 304.9、304.3 r/min, 误差带为 1% 的调节时间分别为 1.4、0.9 s。采用改进型 DITC 策略时 SRM 动态响应特性明显优于传统 DITC 策略。

从图 17(b)可看出, 在 3 种负载下, 采用改进型 DITC 策略时的 SRM 转矩脉动较采用传统 DITC 策略时小, 经计算分别减小 39.1%、18.7%、28.9%, 验证了在负载突增或突减情况下, 改进型 DITC 策略可有效提高带式输送机的运行稳定性。

从转矩脉动抑制效果看, 改进型 DITC 策略优于文献 [17] 提出的结构设计优化方法, 与文献 [25] 提出的改进滑模控制策略接近, 但文献 [25] 仅施加了 0.5~1.5 N·m 负载转矩, 无法满足带式输送机应用需求。

5 工业性试验

基于 SRSD 系统结构参数与改进型 DITC 策略设计, 试制了 SRSD 系统, 如图 18 所示。该系统可通过联轴器与带式输送机驱动滚简直连, 并配备矿用低压隔爆型变频器, 变频器内置 DITC 策略。2 套 SRSD 系统之间采用主从控制方式实现协同控制。



图 18 SRSD 系统实物

Fig. 18 SRSD system

在研究的煤矿井下带式输送机上进行工业性试验。考虑 SRM 额定转速为 300 r/min, 行星齿轮减速机构传动比为 5, 设定系统额定转速为 60 r/min, 启动时间为 30 s。采集带式输送机满载启动工况下, 2 套 SRSD 系统的实时输出转速, 选取其中的关键点绘制曲线, 如图 19 所示。

从图 19 可看出, 带式输送机负载转矩过大, 为克服带式输送机的启动惯性, 在满载启动瞬间 SRSD 系统转速出现明显波动, 峰值转速达 70 r/min, 但存在时间极短, 不影响带式输送机安全运行; 带式

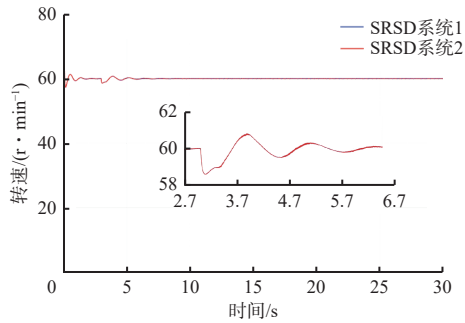


图 19 带式输送机满载启动工况下 SRSD 系统转速曲线

Fig. 19 Speed curve of SRSD system under full load starting condition of belt conveyor

输送机启动后, SRSD 系统转速波动逐渐减小, 25 s 左右达到额定转速 60 r/min; 在启动过程中, 2 套 SRSD 系统的转速基本保持一致。可见, SRSD 系统具有良好的动态响应特性, 满足煤矿井下带式输送机重载启动需求。

经统计, 采用异步电动机+液力偶合器+减速装置的驱动系统时, 带式输送机月耗电量约为 1×10^5 kW·h; 采用 SRSD 系统后, 月耗电量约为 7.6×10^4 kW·h, 较之前降低了 24%, 表明 SRSD 系统极具经济效益, 可实现煤矿井下煤炭运输环节的节能降碳。

6 结论

1) 以平顶山天安煤业九矿有限责任公司井下带式输送机异步电动机驱动系统为改造对象, 研制了一种 2×400 kW SRSD 系统。该系统以 SRM 作为动力源, 通过内置式行星齿轮减速机构进一步实现减速增扭, 不仅简化了传动链, 还减小了驱动系统定子体积与制造成本。

2) 针对 SRM 双凸极结构造成的非线性与磁路高饱和性导致建模不准确问题, 采用 BP 神经网络得到了完整的磁链、转矩三维输出特性曲面, 以此为数据基础, 建立了 SRM 非线性模型。经仿真验证, BP 神经网络预测精度达 98.24% 以上, 提高了 SRM 建模的精确性。

3) 针对传统 DITC 策略存在的模型精度差、换相不连续、结构冗余等问题, 提出了一种改进型 DITC 策略。仿真结果表明, 改进型 DITC 策略较传统 DITC 策略可显著降低 SRM 转矩脉动, 在变负载工况下最大降幅达 39.1%, 提高了带式输送机 SRSD 系统的运行稳定性与转矩脉动抑制效果。

4) 在煤矿井下进行 SRSD 系统工业性试验, 结果表明, 带式输送机可在满载工况下平稳启动, 动态特性良好, 且耗电量较原驱动系统减少了 24%, 实现了运输环节的节能降碳。

参考文献(References):

- [1] 韩文娟. 智能煤流调速系统的适用性分析[J]. 煤矿机械, 2022, 43(11): 129-131.
HAN Wenjuan. Analysis on applicability of intelligent coal flow speed regulation system[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(11): 129-131.
- [2] 李剑. 顺槽带式输送机用张紧绞车设计与安全制动器热-力耦合特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
LI Jian. Study on design and thermal-mechanical coupling characteristics of safety brake of take-up winch of belt conveyor used in face crossheading[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [3] 白应光, 丁震, 刘洋, 等. 煤矿带式输送机智能化关键技术浅析[J]. 工矿自动化, 2023, 49(增刊 2): 27-29, 51.
BAI Yingguang, DING Zhen, LIU Yang, et al. Analysis on the key technologies of intelligent belt conveyor in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(S2): 27-29, 51.
- [4] WANG Li, LI Haoxin, HUANG Jingkai, et al. Research on and design of an electric drive automatic control system for mine belt conveyors[J]. Processes, 2023, 11(6): DOI: 10.3390/PR11061762.
- [5] 蒋卫良, 郗存根, 宋兴元, 等. 煤矿带式输送机关键技术发展现状与展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 98-104.
JIANG Weiliang, XI Cungen, SONG Xingyuan, et al. Development status and prospect of key technology of coal mine belt conveyor[J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1): 98-104.
- [6] MEESALA R E K, UDUMULA R R, NIZAMI T K, et al. Development of enhanced direct torque control for surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive operation[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(11): 1814-1827.
- [7] 张磊, 鲍久圣, 葛世荣, 等. 永磁驱动技术及其在矿山装备领域的应用现状[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 275-284.
ZHANG Lei, BAO Jiusheng, GE Shirong, et al. Permanent magnet driving technology and its application status in the field of mining equipment[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 275-284.
- [8] 郑祝平. 矿用永磁滚筒关键技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
ZHENG Zhuping. Research on key technology of mining permanent magnet roller[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [9] 邓才明. 带式输送机永磁直驱电滚筒失磁分析及故障检测研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
DENG Caiming. Research on demagnetization analysis and fault detection of permanent magnet electric roller of

- belt conveyor[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [10] SESHADRI A, LENIN N C. Review based on losses, torque ripple, vibration and noise in switched reluctance motor[J]. *IET Electric Power Applications*, 2020, 14(8): 1311-1326.
- [11] 韩朋, 边敦新, 熊立新, 等. 抽油机用盘式开关磁阻电机的电磁优化设计[J]. *石油机械*, 2022, 50(7): 115-123.
- HAN Peng, BIAN Dunxin, XIONG Lixin, et al. Electromagnetic optimization design of disc-type switched reluctance motor for pumping unit[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(7): 115-123.
- [12] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- WU Hongxing. Theory and control technology of switched reluctance motor system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [13] 鲍久圣, 张小牛, 王雷, 等. 一种全开关磁阻电机水冷半直驱式带式输送机: CN2024104401283[P]. 2024-04-12.
- BAO Jiusheng, ZHANG Xiaoniu, WANG Lei, et al. A fully SRM water-cooled semi-direct drive belt conveyor: CN2024104401315[P]. 2024-04-12.
- [14] 李瑞金. 矿用开关磁阻电机车控制系统设计[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(9): 22-25.
- LI Ruijin. Design of control system of mine-used switched reluctance electric locomotive[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(9): 22-25.
- [15] 田玉丽, 刘东晓. 平煤集团六矿矸石山绞车电控系统的改造[J]. *煤矿机械*, 2010, 31(3): 172-173.
- TIAN Yuli, LIU Dongxiao. Pingdingshan Coal Mine Group No.6 mine waste dump winch electric control system transformation[J]. *Coal Mine Machinery*, 2010, 31(3): 172-173.
- [16] 李亦滔. 开关磁阻电机转矩脉动抑制综述[J]. *电机技术*, 2019(6): 53-58.
- LI Yitao. Review on torque ripple suppression of the switched reluctance motor[J]. *Electrical Machinery Technology*, 2019(6): 53-58.
- [17] 陈吉清, 洗浩岚, 兰凤崇, 等. 开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 106-119.
- CHEN Jiqing, XIAN Haolan, LAN Fengchong, et al. Structural torque ripple suppression method of switched reluctance motor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 106-119.
- [18] 黄朝志, 段锦锋, 曹文盛. 新型分段定子开关磁阻电机转矩增强和径向力减小的分析研究[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(7): 1035-1043.
- HUANG Chaozhi, DUAN Jinfeng, CAO Wensheng. Research on torque enhancement and radial force reduction of novel switched reluctance motor with segmental stators[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(7): 1035-1043.
- [19] 姚璋, 陈树明. 开关磁阻电机发展及转矩脉动抑制策略研究[J]. *科技创新导报*, 2019, 16(4): 121-124.
- YAO Zhang, CHEN Shuming. Development of switched reluctance motor and research on torque ripple suppression strategy[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(4): 121-124.
- [20] 邹洪建. 车载开关磁阻电机智能化调速控制策略的研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- ZOU Hongjian. Research on intelligent speed control strategy of on-board switched reluctance motor[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [21] CHENG He, GE Xudong, WANG Lunjun, et al. Four-quadrant sensorless operation of switched reluctance machine over the wide speed range[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2020, 48(2): 224-240.
- [22] 李大威, 王勉华, 刘春元. 开关磁阻电机的直接瞬时转矩控制系统设计与仿真[J]. *电机与控制应用*, 2011, 38(2): 11-14.
- LI Dawei, WANG Mianhua, LIU Chunyuan. Direct instantaneous torque control system design and simulation of switched reluctance motor[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2011, 38(2): 11-14.
- [23] 程勇, 曹晓晓, 张怡龙. 开关磁阻电机滞环-脉宽调制直接瞬时转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(8): 74-82.
- CHENG Yong, CAO Xiaoxiao, ZHANG Yilong. Hysteresis-PWM direct instantaneous torque control of switched reluctance motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(8): 74-82.
- [24] SINGH S K, TRIPATHI R K. Minimization of torque ripples in SRM drive using DITC for electrical vehicle application[C]. Students Conference on Engineering and Systems, Allahabad, 2013. DOI: 10.1109/SCES.2013.6547569.
- [25] 韩国强, 陆哲, 吴孟霖, 等. 基于改进滑模控制策略的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(22): 5740-5755.
- HAN Guoqiang, LU Zhe, WU Menglin, et al. Direct instantaneous torque control method for switched reluctance motor based on an improved sliding mode control strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(22): 5740-5755.

- [9] 杨环宇,王军,吴祥,等.一种坐标通道注意力深度学习网络的军用飞机识别方法[J].兵工学报,2024,45(7):2128-2143.
YANG Huanyu, WANG Jun, WU Xiang, et al. A method for military aircraft recognition using a coordinate attention-based deep learning network[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(7): 2128-2143.
- [10] 郭盼盼,张文斌,崔奔,等.基于增强深度卷积神经网络的滚动轴承多工况故障诊断方法[J/OL].振动工程学报:1-14[2024-06-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20230830.1129.002.html>.
GUO Panpan, ZHANG Wenbin, CUI Ben, et al. Fault diagnosis method of rolling bearing under multiple working conditions based on enhanced deep convolutional neural network[J/OL]. Journal of Vibration Engineering:1-14[2024-06-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20230830.1129.002.html>.
- [11] SEGU M, TONIONI A, TOMBARI F. Batch normalization embeddings for deep domain generalization[J]. Pattern Recognition, 2023, 135. DOI: [10.1016/j.patcog.2022.109115](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109115).
- [12] IOFFE S, SZEGEDY C, IOFFE S, et al. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]. 32nd International Conference on Machine Learning, Lille, 2015: 448-456.
- [13] LI Yufei, XIN Yufei, LI Xinni, et al. Omni-dimensional dynamic convolution feature coordinate attention network for pneumonia classification[J]. Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art, 2024, 7(1): 17-29.
- [14] XU Wei, WAN Yi. ELA: efficient local attention for deep convolutional neural networks[EB/OL]. [2024-06-25]. <https://arxiv.org/abs/2403.01123v1>.
- [15] MOCA V V, BÂRZAN H, NAGY-DĂBĂCAN A, et al. Time-frequency super-resolution with superlets[J]. Nature Communications, 2021, 12(1). DOI: [10.1038/s41467-020-20539-9](https://doi.org/10.1038/s41467-020-20539-9).
- [16] 曾志超,徐玥,王景玉,等.基于SOE-YOLO轻量化的水面目标检测算法[J].图学学报,2024,45(4):736-744.
ZENG Zhichao, XU Yue, WANG Jingyu, et al. A water surface target detection algorithm based on SOE-YOLO lightweight network[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(4): 736-744.
- [17] 段洁利,于世伟,解明坤,等.基于一维轻量化CNN的山地索道轴承故障诊断[J].农业工程学报,2023,39(14):70-79.
DUAN Jieli, YU Shiwei, XIE Mingkun, et al. Fault diagnosis of mountain ropeway bearings based on one-dimensional lightweight CNN[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14): 70-79.
- [18] SMITH W A, RANDALL R B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: a benchmark study[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64: 100-131.
- [19] LESSMEIER C, KIMOTHO J K, ZIMMER D, et al. Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: a benchmark data set for data-driven classification[C]. PHM Society European Conference, Bilbao, 2016. DOI: [10.36001/phme.2016.v3i1.1577](https://doi.org/10.36001/phme.2016.v3i1.1577).
- [20] 窦桂东,白艺硕,王均利,等.基于深度学习的矿井滚动轴承故障诊断方法[J].工矿自动化,2024,50(1):96-103,154.
DOU Guidong, BAI Yishuo, WANG Junli, et al. A fault diagnosis method for mine rolling bearings based on deep learning[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 96-103, 154.
- [21] LIU Chunyang, BAN Yuxuan, LI Hongyu, et al. Accurate recognition method for rolling bearing failure of mine hoist in strong noise environment[J]. Machines, 2023, 11(6). DOI: [10.3390/machines11060632](https://doi.org/10.3390/machines11060632).

(上接第102页)

- [26] 葛世荣.刮板输送机技术发展历程(三)——驱动与智能控制技术[J].中国煤炭,2024,50(4):1-12.
GE Shirong. The development history of scraper conveyor technology (part three): intelligent drive and control technology[J]. China Coal, 2024, 50(4): 1-12.
- [27] 葛世荣,鲍久圣,曹国华.采矿运输技术与装备[M].北京:煤炭工业出版社,2015.
GE Shirong, BAO Jiusheng, CAO Guohua. Transportation and hoisting technology and equipments in mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2015.
- [28] 秦大同,谢里阳.现代机械设计手册——机械传动设计[M].北京:化学工业出版社,2013.
QIN Datong, XIE Liyang. Handbook of modern mechanical design-mechanical transmission design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [29] 阴妍.盘式制动器摩擦故障融合诊断与智能预报方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
YIN Yan. Research on fusion diagnosis and intelligent prediction method of friction fault of disc brake[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.