

新型国产大功率变频器及并联技术 在二十辊轧机的应用

史东升¹,王涛¹,邱书明^{2,3},王文广^{2,3},王玉博^{2,3}

(1.凌源钢铁集团有限责任公司,辽宁 朝阳 122500;

2.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;

3.天津天传电气传动有限公司,天津 300301)

摘要:针对二十辊可逆冷轧机生产线,介绍了天津电气科学研究院TAC1系列高性能大功率变频产品的应用。整体传动系统采用AIC有源整流单元和逆变器组成公共直流母线形式的多传动系统,首先介绍了系统的装置选型、变压器容量的计算,然后描述了装置并联的高速光纤通信并联方式,以及系统的PROFINET通信网络。通过上位机IBA分析软件记录的装置实时参数曲线,反映了逆变器运行时的转速和转矩精度;使用功率分析仪测量的电网数据对电网侧功率因数进行了分析;同时为了避免装置超温故障导致系统无须停机造成断带,导致废品率提高,系统可对环境温度和装置温度实时预报警,实现了张力可控停机,减少断带几率。该系统在保证系统稳定运行的同时,提高了系统的控制精度,同时减小了能源的消耗。

关键词:大功率;并联;有源整流电源;高速光线通信

中图分类号:TM921 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24715

Application of a New Domestic High Power Inverter Parallel Technology on 20-high Mill

SHI Dongsheng¹, WANG Tao¹, QIU Shuming^{2,3}, WANG Wenguang^{2,3}, WANG Yubo^{2,3}

(1. *Lingyuan Iron and Steel Group Co., Ltd., Chaoyang 122500, Liaoning, China;*

2. *Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China;*

3. *Tianjin Tianchuan Electric Drive Co., Ltd., Tianjin 300301, China*)

Abstract: Application of TAC1 series high performance high power inverter products of Tianjin Electric Research Institute on 20-high reversible mill was introduced. The common DC bus multi drive system consists of active infeed converter and inverter. Firstly, the device selection of the system and the calculation of transformer capacity were introduced, then the parallel connection mode of high-speed optical fiber communication of parallel inverter was described, and PROFINET communication network of the system. The real-time parameter curve recorded by the software was analyzed by the upper computer IBA, and reflected the speed and torque accuracy on inverter during operation; the system used the power data measured by the power analyzer to analyze the power factor of the grid side; in order to avoid the overtemperature fault of the device, the system does not need to shut down and cause belt break, which increases the rejection rate, the system can make real-time warning of the ambient temperature and the device temperature, realizing the tension controllable shutdown and reducing the chance of broken tape. The system not only ensures the stable operation of the system, but also improves the control accuracy of the system and reduces the energy consumption.

Key words: high power; parallel; active infeed converter; high speed light communication

随着国内二十辊可逆冷轧机的普及,轧机传动设备也在不断升级。早期的直流电机以及配套的直传动设备因其能耗大、维护成本高逐渐

被淘汰。交流电机和变频传动系统以其能耗低、调速范围较大、精度高^[1]、维护成本低等优点,已经成为主流配置。轧机主传动要求变频传动系

基金项目:天津天传电气传动有限公司科研开发项目(CD2021KY001)

作者简介:史东升(1974—),男,本科,工程师,主要研究方向为机械电子工程,Email:sdongs@163.com

通讯作者:邱书明(1982—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化,Email:20191120@qq.com

统精度较高,具备矢量控制模式。以前经常采用进口品牌的高性能变频器来驱动主传动电机,例如西门子、ABB等。然而,随着近年成本压力的不断上升,以及国产变频器产品技术越来越成熟,国产化交流变频系统已成为流行趋势。当前,很多冷轧和热轧系统已经应用了大功率、高性能的国产变频器。传动设备国产化不仅能降低轧机电控系统的成本,而且能给用户带来更丰富的使用体验。本文介绍了一种新型国产大功率多并联变频传动系统在二十辊可逆轧机上的应用。

该变频传动系统采用天津电气科学研究院有限公司自主研发的新型TAC1系列有源整流和逆变器,组成公共直流母线形式的多传动系统,作为二十辊轧机主传动电机的驱动,应用于某钢厂。该轧机主传动系统包括两个主电机,左、右卷取电机和开卷电机,后文将详细列出。

TAC1系列低压变频传动产品具有高性能、高精度、矢量控制模式、能够自动优化和学习电机参数等特点。多年来,已应用于多个轧钢现场。其调速性能和稳态速度精度能够满足二十辊轧机的要求,并且能够实现功率因数的自动调整,不必增加无功动态补偿,降低了投资成本。

1 传动系统介绍

某钢厂的1450 mm二十辊可逆轧机的布置图如图1所示。该轧机可轧多种类型和宽度的碳钢板带。其轧机机组主要由卷取机、测厚仪、夹送辊、板型辊和轧机机架组成^[2],以及配套的变速箱和传动轴等。图中阴影部分的辊系是轧机传动辊。轧机最高线速度为12 m/s,全部采用交流异步电机驱动,电机功率大且免维护,调速范围广,不用机械换档设备,整体运行工作效率较高。

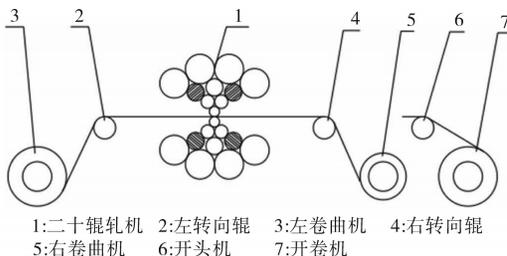


图1 二十辊轧机简图

Fig.1 20-high mill diagram

1.1 轧机主传动电机数据

主传动部分电机参数如表1所示。

表1 电机参数表

名称	数量	单机功率/ kW	额定电压/ V	额定频率/ Hz	额定电流/A
主轧机	2	1 800	560/690 /690	21.6/26.6 /71.5	2 100/1 715 /1 755
卷取机	2	2 500	570/690 /690	16.4/19.6 /62.1	2 888/2 430 /2 368
开卷机	1	400	570/690 /690	15.4/18.6 /50.8	530/460 /430

轧机主电机使用2台1 800 kW的交流异步电机,做同轴串联驱动。电机最高转速1 415 r/min,最大电流为2 100 A。左、右卷取机各使用1台2 500 kW的交流异步电机,最高转速1 232 r/min,最大电流为2 888 A。开卷机使用1台400 kW的交流电机。最高转速1 000 r/min。最大电流为530 A。以上电机都使用码盘来实现速度反馈。

1.2 传动系统配置

根据轧机的配置,以及现场情况,本次选用了天津电气院TAC1系列低压变频传动产品,通过多并联的形式,实现大功率公共直流母线的多传动系统,系统框图如图2所示。该系统既能满足轧机的调速性能,又能通过能量回馈而节省电能。而且AIC有源整流单元的应用,还可以满足电网功率因数为1,同时降低了电网侧的谐波。

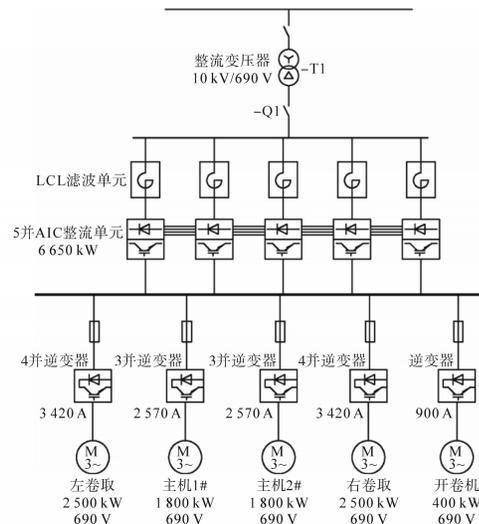


图2 系统框图

Fig.2 System block diagram

1.2.1 逆变器功率选型

该现场选用TAC1系列的I2C3型逆变器来控制主电机,该型号逆变器具有高性能矢量控制功能、功率单元模块化等优点。单功率模块额定电压为690 V,额定输出电流900 A,最多可实现6并联,组成大功率逆变装置。根据主传动电机表确定了选型方案,逆变器选型表如表2所示。

表2 逆变器选型表

Tab.2 Table of inverter selection

名称	电机电流/ A	装置型号	装置电流/ A	并联 数量
主轧机	2 100	TAC1-2 570A-I2C3	2 570	3
卷取机	2 888	TAC1-3 420A-I2C3	3 420	4
开卷机	530	TAC1-900A-I2C3	900	1

逆变器外形以及现场并联安装成柜的方式,如图3所示。可见装置外形紧凑,可以较为密集的排布,节省了柜内空间。



图3 逆变器安装图

Fig.3 Diagram of inverter installation

1.2.2 整流电源选型配置

二十辊可逆轧机的左、右卷取机,在同时工作时,其中一台会处于开卷状态,运行时向电网发电,因此在计算AIC整流装置的容量时会考虑此部分的能量回馈。该轧机在第一道次工作时,开卷机与左卷取同时工作。由于第一道次速度很低,最大功率受卷取电机功率限制,左卷取与开卷机的运行功率折算到AIC整流装置所需的容量可以忽略不计。

最终选型为TAC1系列D型AIC有源整流单元5并联。包括1个整流主站(型号为TAC1-1M4-A2D-M)和4个整流从站(型号为TAC1-1M4-A2D-S)。额定进线电压690 V,单个模块功率为1 400 kW,并联后总功率为6 650 kW。根据经验计算,实际负荷约为5 000 kW,在1台出现故障切除后,仍能满足生产要求。

1.2.3 整流变压器选型

根据AIC有源整流单元具有自动调节进线电网侧功率因数为1的特点,相比其他形式的整流单元系统,在整流变压器的容量选择上,可以有所降低。

变压器的容量根据负荷计算来进行选择,根据如下有功、无功以及视在功率的计算公式,得出了该轧机主传动的总负荷。详见表3。

有功功率为

$$P_{js} = K_x P \quad (1)$$

无功功率为

$$Q_{js} = P_{js} \tan \varphi \quad (2)$$

视在功率为

$$S_{js} = \sqrt{P_{js}^2 + Q_{js}^2} \quad (3)$$

式中: K_x 为换算系数; $\tan \varphi$ 为功率因数角的正切值。

表3 主传动负荷计算表

Tab.3 Load calculation table of main drives

装机容量/ kW	有功功率/ kW	无功功率	功率因数	视在功率/ kV·A
9 000	6 100	0	1	6 100

根据计算结果,并留出一定的余量,最终选择整流变压器的容量为6 700 kV·A,变比为10 kV/690 V。可以看出由于功率因数为1,无功功率为0,因此降低了总的视在功率。

2 系统功能实现

2.1 传动装置与自动化系统的通信

TAC1系列整流单元和逆变器的主站控制板可以附加PN通信板,其型号为:TSC1-ID08-A。再通过外部网线的连接,组成总线型网络,实现传动装置与自动化主站PLC的PROFINET网络通信。连接示意图如图4所示。PLC主站将控制命令和转速给定、转矩给定等值,通过PROFINET网络发送到各个传动装置,传动装置再将电机实际转速、转矩限幅、输出电流等参数实时反馈到PLC主站。

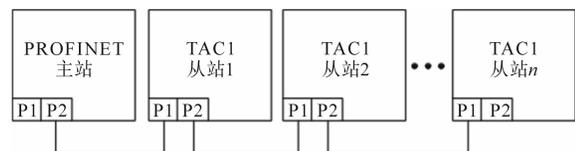


图4 PROFINET网络连接示意图

Fig.4 Network connection diagram of PROFINET

轧机系统除了PLC主站控制外,还通过PN网络将传动装置在运行中的关键参数,实时传递给上位机。再通过IBA软件,将采集的整流进线电流、进线电压、逆变器温度、环境温度等数据实时记录,并形成时间轴的曲线。从而实现轧机在运行时的数据监控,以方便在出现故障时,查找原因。

2.2 装置的并联方式

TAC1整流单元和逆变器的功率模块并联是

通过高速光纤通信来实现的,主控板和从控板之间采用光纤接口的以太网通信作为物理层,实现主从之间的信息交互,通信速率可达百兆^[3]。光纤通过串联方式连接每个功率单元,如图5所示。该串联方式两个站之间的通信时延约为120 ns。为了确保所有装置触发脉冲的同步一致性,站1~站4对收到的触发信号进行了不等的延时处理,确保了IGBT收到的触发脉冲时间上的相同。

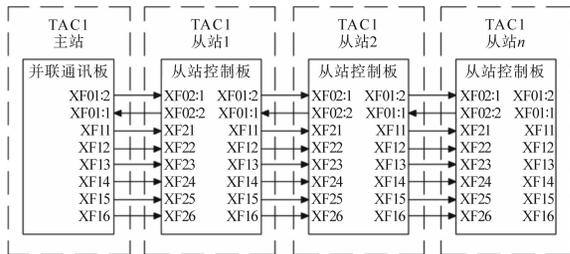


图5 并联光纤连接图

Fig.5 Diagram of parallel optical fiber connection

从站控制板只与主站控制板进行光纤通信,没有人机界面。所有参数和控制模式的设置以及其他对外通信等,都通过主站来实现。并联应用时,需要在主站人机界面中设置并联从站的个数和使能参数,才能正常运行。

当系统多个模块并联使用时,如果有一个功率模块发生故障,为了不影响现场生产,可以通过设置并联使能参数,屏蔽该故障模块,使其他模块继续运行。

为了使逆变器的均流效果达到最佳,在每个逆变功率模块的输出端需要加均流输出电抗器。其压降可以在0.7%~2%之间,同时保证电抗器和电缆的一致性,该现场实际均流系数可达0.97。

2.3 卷取电机的转矩控制

二十辊冷轧系统在启动和加速的过程中,随着卷径的变化使卷取机卷筒转速随卷径变化,为保证恒定的张力,必须根据卷筒连同钢卷自身转动惯量进行惯性力矩补偿^[4]。同样,在低转速小转矩的情况下,也需要转矩补偿。

TAC1 逆变器设有附加转矩补偿的功能参数,如图6所示。

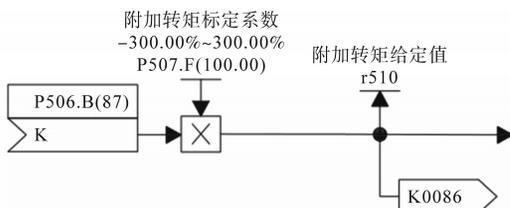


图6 转矩补偿功能图

Fig.6 Diagram of torque compensation

自动化通过测量转动惯量,计算出应该补偿的转矩值,在轧机启动和加速时,给卷取逆变器发送转矩补偿给定值,可以无需通过转速调节器对电机的转矩进行直接控制,提高了张力控制的跟随性,降低了加减速过程中的波动。

3 系统关键点分析

3.1 有源整流电源功率因数

为了验证AIC有源整流单元在实际工作中的功率因数,以及对电网的影响,我们使用了功率分析仪在装置运行过程中对电网侧的各个参数进行了测量。通过采集单台整流单元的进线交流电压和相电流,自动计算出功率因数等数据,结果如图7所示。

	Element1	Element2	Element3	Σ A(3P4W)
Voltage	600Vrms	600Vrms	600Vrms	
Current	1Vrms	1Vrms	1Vrms	
U [V]	375.650	356.105	376.973	369.576
I [A]	0.62224k	0.58631k	0.62288k	0.61048k
P [W]	0.23352M	206.567k	234.277k	0.67437M
S [VA]	0.23377M	208.789k	234.809k	0.67737M
Q [var]	0.01073M	-30.380k	-15.803k	-0.03545M
λ [-]	0.99895	0.98936	0.99773	0.99557
ϕ [°]	2.632	351.634	356.141	5.395
fU [Hz]	50.033	50.033	50.034	
fI [Hz]	50.031	50.034	50.033	

图7 功率分析仪测量结果

Fig.7 Results of power analyzer measurement

由图7中可以看出,此时三相电网平均相电压为369.576 V,换算成线电压为640 V。可以看出整流变压器的输出电压随着电流的增大而略有降低。图7中显示单台整流单元的平均交流进线电流*I*为610 A,5并联后的总进线电流则为3 050 A。有功功率为674.37 kW,视在功率为677.37 kV·A。总功率因数 λ 为0.995 57,接近于1。可以看出该型号有源整流单元最大限度地降低了电网的无功功率,使交流电流和相电压的过零点位置几乎重合。

3.2 主电机的稳速精度

轧机运行时的主电机转速给定值和码盘反馈的实际转速值,都实时传送给上位机,并通过IBA软件记录时间曲线。采样时间间隔为10 ms,实时性较高。在稳速轧制时的速度曲线如图8所示。此时转速给定值为-65.85%,码盘反馈的速度实际值波动范围在-65.75%~-65.95%之间,计算得出稳速精度为0.15%^[5],说明了TAC1系列逆变器在矢量控制模式下运行的转速精度能够满足二十辊冷轧要求。钢带在轧制的过程中运行平稳。

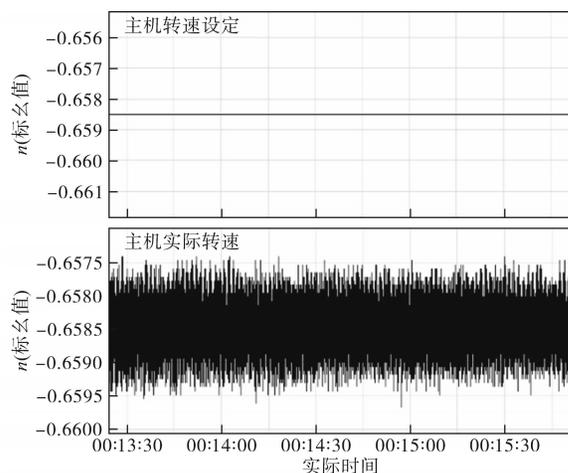


图8 主机速度曲线图

Fig.8 Diagram of main engine speed curve

3.3 卷取机的转矩精度

在上位机的IBA曲线中还监控了左右卷取电机的电磁转矩和卷径等参数。以右卷取为例,转矩设定值、实际转矩值和卷径的曲线如图9所示。为了保证钢带的恒张力,随着卷径的减小,转矩设定值和实际值也随之减小。过程中转矩实际值相比设定值的波动范围小于2%,钢带在轧制过程中板形良好。说明TAC1系列逆变器的转矩精度也满足要求。

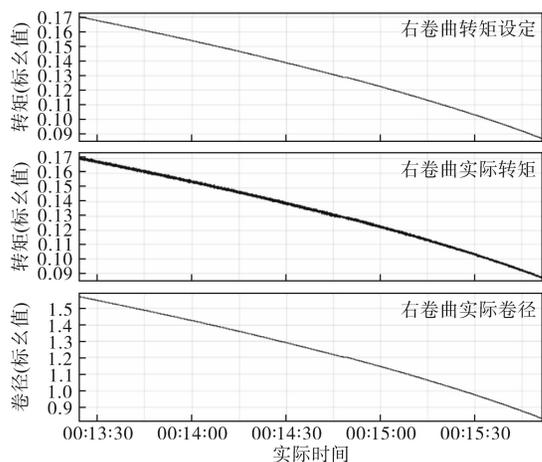


图9 转矩曲线图

Fig.9 Diagram of torque curve

3.4 系统的过温保护设置

由于全控型电力电子器件IGBT处于较高的开关频率下工作,通态及开关总损耗比晶闸管直流整流装置要大很多,因此交流传动系统相对于同等功率的直流传动系统,运行时装置的发热量要大。

TAC1系列逆变器设有多个热敏电阻型温度监测点,包括装置进风口的温度、散热器温度以及每相IGBT的壳温。在各类装置中温度点都会

有报警阈值,而且可以通过操作面板观察显示。在轧机高速运行时,如果出现装置过热且未在故障停机前预报给上级自动化系统,直接封锁系统,很容易造成断带。为了避免这种情况,该轧机在自动化系统上对装置的内部和外部温度都进行了监控,并做了以下设置。

1)进风口温度报警处理:逆变器进风口温度超过50℃时会报故障。因此自动化主站设置当装置进风口温度(环境温度)超过48℃时,轧机自动停机,避免断带。

2)散热器温度处理:传动装置散热器温度超过83℃时会报故障。因此自动化主站设置当散热器温度超过75℃时,轧机低速运行。

4 结论

本文从系统设计、方案选型、关键点分析着手,介绍了天津电气院TAC1系列新型低压传动产品在二十辊可逆轧机上的应用。该轧机调试完成后,运行平稳,轧制钢带板形平整,综上,可以初步得出以下结论:

1)TAC1系列AIC有源整流单元的应用可以有效控制电网侧的功率因数为1。同时,降低了整流变压器的额定容量。而且,不需要外加动态无功补偿装置,节省了传动系统的设备投资成本。

2)通过高速光纤通信实现功率模块并联的形式组成的大功率交流传动系统,被证明是一种可靠的技术方案。能够有效降低设备投资成本,同时方便维护。

3)国产TAC1系列逆变器在矢量控制模式下的转速精度和转矩精度,能够满足二十辊可逆冷轧的工艺要求,并且具有多种保护功能。为高精度可逆冷轧机传动领域,提供了国产变频器方案。

参考文献

- [1] 刘玲.交流变频调速技术的优势与应用[J].电气开关,2010(1):61-63.
LIU Ling.Superiority and application of AC frequency control technique of motor speed[J].Electric Switchgear,2010(1):61-63.
- [2] 唐振光,燕顺,黄培.森吉米尔20辊轧机薄带轧制工艺研究[J].中国新技术新产品,2020(18):78-79.
TANG Zhenguang,YAN Shun,HUANG Pei.Study on thin strip rolling process of sendzimir 20 high mill[J].New Technology & New Products of China,2020(18):78-79.
- [3] 金书辉,张策,王欢,等.一种交流传动大功率并联逆变器的

(下转第96页)

反映出本文控制方法在控制器参数较少的情况下,仍然能够表现出较强的鲁棒性能与较高的轨迹跟踪精度。今后,将本文方法作为控制方法基础,应用于SSMR机器人路径规划等其他方面的研究。

参考文献

[1] 李新海,徐宝军,肖星,等.变电站挂轨机器人智能巡检系统技术研究[J].电气传动,2021,51(19):43-49.
LI Xinhai, XU Baojun, XIAO Xing, et al. Research on key technologies of intelligent inspection system for track-hanging robot in substation[J]. Electric Drive, 2021, 51(19):43-49.

[2] WEN Shuhuan, LIU Xin, ZHANG Hong, et al. Dense point cloud map construction based on stereo VINS for mobile vehicles[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178(10):328-344.

[3] 欧阳森,张真.基于树莓派的预防性轻型除冰机器人行走控制系统设计[J].电气传动,2021,51(8):71-76.
OUYANG Sen, ZHANG Zhen. Design of preventive light deicing robot walking control system based on raspberry pie[J]. Electric Drive, 2021, 51(8):71-76.

[4] HAN Yuxing, CHENG Yi, XU Guowei. Trajectory tracking control of AGV based on sliding mode control with the improved reaching law[J]. IEEE Access, 2019, 1(7):20748-20755.

[5] 彭继慎,仇文超,李军锋,等.农业轮式移动机器人反演自适应滑模轨迹跟踪控制[J].计算机应用与软件,2019,36(11):86-90.
PENG Jishen, CHOU Wenchao, LI Junfeng, et al. Inversion adaptive sliding model path tracking control of agricultural wheeled mobile robot[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(11):86-90.

[6] YANG Zhengfu, WANG Caiwang, YAN Ming. An optimization design of adaptive cruise control system based on MPC and ADRC[J]. Actuators, 2021, 10(6):110-113.

[7] 赵娜,吕成兴.基于反步法的SCARA机器人轨迹跟踪控制[J].山东科学,2021,34(3):119-124.
ZHAO Na, LÜ Chengxing. Trajectory tracking control of SCARA robot via backstepping approach[J]. Shandong Science, 2021, 34(3):119-124.

[8] 马东,董力元,王立玲,等.移动机器人RBF神经网络自适应

设计[J].电气传动,2022,52(5):8-13.
JIN Shuhui, ZHANG Ce, WANG Huan, et al. Design of a high power AC drive parallel inverter[J]. Electric Drive, 2022, 52(5):8-13.

[4] 天津电气科学研究院有限公司.电气传动自动化技术手册[M].第三版.北京:机械工业出版社,2011:557-558.
Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd.. Electrical transmission automation technical manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011:557-558.

PD跟踪控制[J].控制工程,2020,27(12):292-298.

MA Dong, DONG Liyuan, WANG Liling, et al. RBF neural network adaptive PD tracking control of mobile robot[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(12):292-298.

[9] 姜俊豪,陈刚.驾驶机器人转向操纵的动态模型预测控制方法[J].上海交通大学学报,2021,1(2):1-10.
JIANG Junhao, CHEN Gang. Dynamic model predictive control method for steering control of driving[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 1(2):1-10.

[10] WANG Shuai, ZHAI Junyong. A trajectory tracking method for wheeled mobile robots based on disturbance observer[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 18(4):2165-2169.

[11] IOSSAQUI J G, CAMINO J F, ZAMPIERI D E. A nonlinear control design for tracked robots with longitudinal slip-science direct[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1):593-597.

[12] YE H, WANG S. Trajectory tracking control for nonholonomic wheeled mobile robots with external disturbances and parameter uncertainties[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 12(7):315-322.

[13] LI Shu, DING Liang, GAO Chen, et al. Adaptive neural network tracking control-based reinforcement learning for wheeled mobile robots with skidding and slipping[J]. Neurocomputing, 2017, 28(29):120-128.

[14] LOW C B, WANG Danwei. GPS-based path following control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(2):340-347.

[15] WANG Tianmiao, WU Yao, LIANG Janghong, et al. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor[J]. Sensors, 2015, 15(5):681-702.

[16] HAN Jinqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.

[17] 刘金锴.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2016.
LIU Jinkun. Xian jin PID kong zhi MATLAB fang zhen[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.

收稿日期:2022-03-21

修改稿日期:2022-04-08

(上接第89页)

[5] 马小亮.高性能变频调速及其典型控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010:1-2.
MA Xiaoliang. High performance frequency control technology and its typical control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2010:1-2.

收稿日期:2022-10-25

修改稿日期:2022-11-20