

悬吊物防摆控制装置的设计*

薛绍凡 秦刚 陈忠孝 荣梦杰 冯利

(西安工业大学 电子信息工程学院 西安 710021)

摘要: 针对悬吊运输装置的摆动问题,以桥式起重机作为研究对象,设计一款悬吊物防摆控制装置。采用拉格朗日方程建立桥式起重机吊重摆动的数学模型,通过姿态传感器采集吊物实时摆动的信息,建立电机控制方案。根据系统功能要求,以MC9S12XS128芯片为核心,完成了系统硬件电路的设计,然后结合Kalman滤波、互补滤波等算法进行计算机软件编程。最终采用角度反馈的闭环控制方式,通过变频器驱动小车运行实现悬吊物的防摆控制。通过实验表明,设计的悬吊防摆控制装置具有良好的控制性能,使得小车电机停止运行后,可以快速消除摆动,适应性较强,实现了悬吊物运输装置安全、高效运行。

关键词: 悬吊物;防摆控制;MC9S12XS128;反馈

中图分类号: TN9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research and design of anti-swing control system for suspension

Xue Shaofan Qin Gang Chen Zhongxiao Rong Mengjie Feng Li

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In view of the swing of the suspension transportation device, the bridge crane is taken as the research object. The mathematical model of crane load swing is established by using Lagrange equation, and the control scheme of the motor is established by using the attitude sensor to collect the real-time swing information of the crane. According to the function requirements of the system, the hardware circuit of the system is designed with the MC9S12XS128 chip as the core, and then the computer software is programmed with Kalman filter and complementary filtering algorithm. Finally, the closed-loop control method of angle feedback is adopted to realize the anti swing control of the suspension by the drive of the frequency converter. The experimental results show that the design of the suspension anti swing control device has good control performance, so that the motor can be removed quickly after the motor stops running. The utility model has the advantages of strong adaptability, high safety and high efficiency.

Keywords: suspender; anti swing control; MC9S12XS128; feedback

0 引言

随着社会现代化进程的不断推进,悬吊运输装置应用越来越广泛,如救生艇的吊放装置、直升机吊挂运送物资、客运架空索道、工农业生产等领域中均有重要的应用。然而,在实际生产生活中由于多种因素(如:悬吊结构中吊车的加速及减速、风力、起停车等)的影响,悬吊结构始终伴随着吊重物的摆动现象,使生产效率大大降低,对作业人员的人身安全也构成威胁,严重时甚至引发事故^[1]。

本文以桥式起重机作为研究对象,在三维空间建立动力学模型^[2],通过对现有机结构进行改装,运用姿态传感器检测吊重物摆动角度,参考最优化理论^[3]并结合现场操作经验的桥式起重机闭环防摆控制算法,从而解算出电机

控制量,以此实现吊重物的准确对位和消除摇摆。

1 悬吊物摆动的三维动力学模型

起重机在运行过程中,由于小车和吊重之间是柔性钢丝绳联接以及吊重物存在惯性,在小车或者大车进行启停、加减速的运动时,排除风力以及外界环境因素的干扰,可以将悬吊物的摆动看做两种运动情况:1)当大车或小车单轴运动(不存在联动)的情况下,摆动可以看做在其运行平面内做单摆运动;2)当大车和小车同时运动时,悬吊物的摆动可以看做以吊重物体的悬挂点为中心,以钢丝绳长为半径做求冠面运动。通过实验可以发现,第一种运动方式是第二种运动方式的复合,如图1所示。

由此,系统拟采取建立吊物摆动的三维数学模型,运用

收稿日期:2017-03

* 基金项目:陕西省科技厅项目(2014K05-06)资助

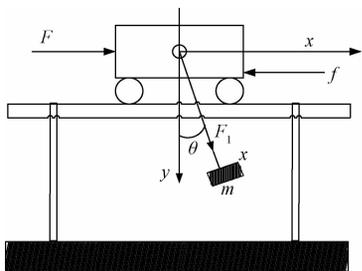


图 1 起重机防摆力学简化模型

动力学、最优化理论与方法,采用速度闭环控制方式,通过最优化方法采集吊重的角度,将采集到的角度信息解算出控制量输出到变频器间接控制交流电机,通过控制电机加减速控制吊运过程中的摆动以及静止状态下的外界扰动造成的摆动。以此实现悬吊物的防摆控制。

由起重机的悬吊结构建其三维空间模型^[4],通过建立动力学方程进行分析吊重摆角的规律。如图 2 所示,建立起重机系统的三维空间模型,根据此模型来分析悬吊物的防摆运动。防摆实际上就是控制吊重相对于小车中心垂直线 h 的偏摆幅度。通过控制大车或者小车的运动,使得摆角(即钢绳 l 和中心垂线 h 的夹角)在短时间内衰减到 0 或者摆动幅度在一定范围内。如果超过预设范围,应在最短时间内控制电机运动来将摆幅控制在 0 或者规定范围内。

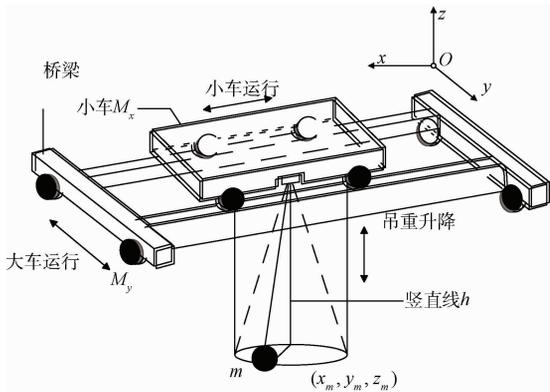


图 2 桥式起重机吊重系统模型

首先建立桥式起重机的平面简化模型,设小车质量为 M ,载荷质量为 m ,小车受到外力 F ,沿绳索方向的拉力以此为 x 轴的正方向, f 为滑动摩擦力,垂直向下为 y 轴正方向,建立直角坐标系。设绳长为 l ,摆角为 θ ,角速度为 θ' ,角加速度为 θ'' ,水平位移为 x ,水平速度为 x' ,水平加速度为 x'' ,摩擦系数为 μ 。则小车和载荷的坐标分量为:

$$\begin{cases} x_M = x \\ y_M = 0 \\ x_m = x + l\sin\theta \\ y_m = l\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

小车和载重的速度分量为:

$$\begin{cases} \dot{x}_M = \dot{x} \\ \dot{y}_M = 0 \\ \dot{x}_m = \dot{x} + \dot{l}\sin\theta + l\dot{\theta}\cos\theta \\ \dot{y}_m = \dot{l}\cos\theta - \dot{l}\theta\sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

系统动能为:

$$T = \frac{1}{2}(Mv_M^2 + mv_m^2) = \frac{1}{2}m(\dot{l}^2 + l^2\dot{\theta}^2 + 2\dot{x}\dot{l}\sin\theta + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta) \quad (3)$$

设初始位置绳长为 h ,载物初始位置为零势能点,则系统势能为:

$$H = mg(h - l\cos\theta) \quad (4)$$

拉格朗日算子为:

$$L = T - H = \frac{1}{2}(M + m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{l}^2 + l^2\dot{\theta}^2 + 2\dot{x}\dot{l}\sin\theta + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta) - mg(h - l\cos\theta) \quad (5)$$

由此得到悬吊物摆动的动力学方程,根据式(5)知其为一个复杂非线性系统^[5]。通过对桥式起重机模型进行分析控制,防摆分为静止状态下的防摆和运动状态下的防摆。

1)在静止状态下,当外界干扰(如风等)导致吊物摆动,摆动的同时,姿态传感器会采集到吊重物体的角度信息,同时编码器记录此时电机的脉冲数(以此为回复位置),通过微处理器解算后输出控制量给两个方向的电机进行转动,产生加速度以抵消干扰的加速度。摆动停止后(即相对角度为 0 时),通过存储模块调取记录的脉冲数,输出控制量给电机,使其匀速回复到摆动前的位置。

2)在运动状态过程中,当采集到的角度大于预设值时,输出控制量给两个方向的电机,通过加减速来抵消扰动,使吊物在吊运过程中保持垂直,稳定吊运到指定位置。

2 悬吊物防摆控制装置的整体方案设计

根据数学建模及分析防摆控制原理^[6],在悬吊物防摆控制装置中,根据实际需求建立吊物摆动模型,并利用微处理器进行实时解算吊物姿态信息,最终得到控制量实现电机的防摆控制。如图 3 为系统总体控制原理结构图,悬吊物姿态检测模块以三轴陀螺仪和三轴加速度计构成,并经由角度互补融合算法解算得到吊物摆角和角速度等数据,

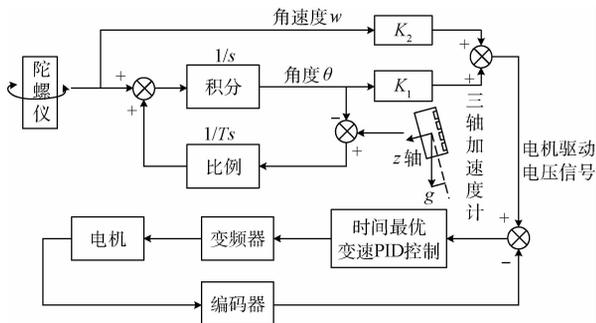


图 3 系统总体控制原理结构

之后再由加权计算后得到电机控制量,最后通过变频器控制电机的运行状态,使小车保持与吊物相对静止,从而实现消摆控制。

3 悬吊物防摆控制装置的结构设计

悬吊物防摆控制系统可实现实时摆角检测、运行状态监控、悬吊物防摆等功能。系统结构示意图如图4所示。

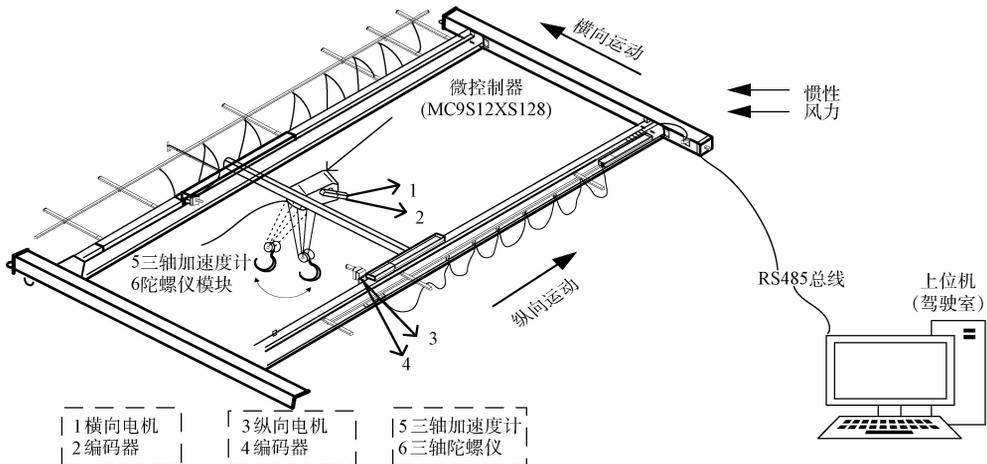


图4 系统结构示意图

3)通过设计良好的人机交互界面,负责吊装作业时的启停控制、参数配置、运行状态监测等工作;

4)根据实验室条件与实际现场情况的差异,在实验室搭建系统结构模型进行防摆控制系统研究的同时,提出该方案在实际工程应用中的不同之处及相关的研究措施(如受限于工作距离的通信方式、基于模型规模的电机型号选择等)。

4 悬吊物防摆控制装置的硬件设计

悬吊物防摆控制装置由主控制板以及检测主板所构成。系统硬件结构框图如图5所示。

系统采用飞思卡尔半导体公司的16位微处理器MC9S12XS128作为核心控制芯片,设计最小系统模块;外围电路包括路径检测模块,角度检测模块,电机驱动模块;电源模块为系统提供动力支持^[7]。经过陀螺仪、三轴加速度计以及电子罗盘等构成的传感器模块对偏摆信息进行采集,得到准确、具体的偏摆信息,经由检测到的数据对吊物的摆幅构建三维图像,运用MATLAB进行仿真,通过解算得到吊物摆动时的合力方向,从而由微处理器对采集的信息进行数据处理后,输出控制信号,控制变频器工作进而控制交流电机,对摆幅修正,实现吊物的防摆。

系统采用两块主控板,每块主控板都有着最小的系统板,因为在设计硬件原理时考虑到横向(小车)电机驱动的控制、纵向(大车)电机驱动电路的控制、限位开关的控制都属于开关量控制的;角度的采集、角速度的采集、加

1)通过在吊具上安装的三轴陀螺仪和三轴加速度计传感器采集吊物的摆动信息,检测吊物状态、运行状态、监测行程保护开关状态,并将以上状态在上位机中显示出来;

2)由编码器采集电机的运行速度,通过主控电路计算和控制电机运行,控制其加减速运行,以抵消吊物摆动惯性,实现吊物防摆;

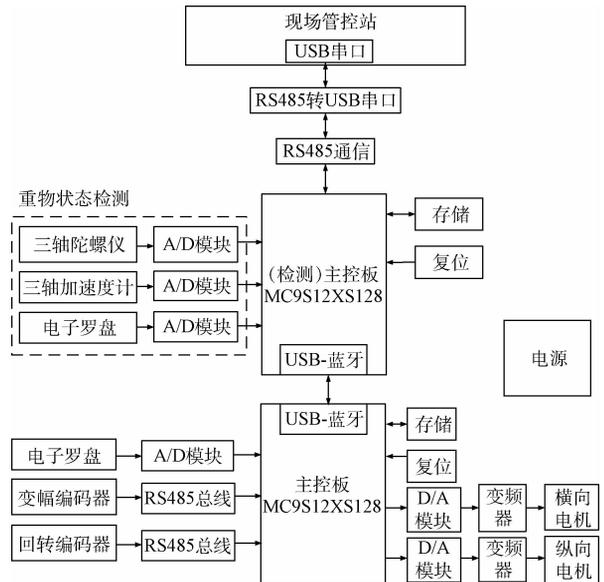


图5 系统总体硬件结构框图

速度的采集、地磁的采集都是数字量输入;同时每块主控板都应该有数据的存储模块、电源模块。因此在本防摆控制系统中用到的2块主控板具有很多相同的模块设计,这大大减轻了项目研究的工作量。

4.1 电源模块的硬件设计

本设计采用家用电源AC220V作为微型电动葫芦和变频器的供电电压,在系统设计中,电源电压分为直流

+12 V、+5 V 和 +3.3 V 三种。首先通过 LM317 把 DC 24 V 转为 DC 9 V, 然后再通过 LM2940T-5 转 DC 5 V 作为 MC9S12XS128 主控及外围器件的供电电压, 其中利用 AMS1117 把 DC 5 V 转为 DC 3.3 V 作为 HMC5983L 电子罗盘、陀螺仪传感器, 加速度的供电电压。+12 V 为系统进来的主电源, 通过滤波等处理, 进而给编码器、RS485 通信模块、按键及显示供电。

4.2 三相电机驱动电路的硬件设计

变频调速在驱动系统已经逐渐成为主流, 变频调速实质是改变电机的供电电源频率实现调速的, 变频器的设计即利用了这一原理来实现对交流电机速度的控制。由于实际使用的是单相交流电机, 实验室的供电电压为 220 V, 故在选择变频器时, 需根据实验室条件和单相电机特点 (220 V, 1.5 kW) 进行选择, 最终选择单相 220 V 电压输入单相 220 V 电压输出、功率 1.5 kW 的单相变频器。设计通过变频器根据微控制器的输出信号精确控制横向电机及纵向电机的运行, 实现悬吊吊物的防摆控制。

4.3 数据采集模块的硬件设计

数据采集部分的设计主要是龙丘九轴传感器模块和倾角传感器电路的设计。

本模块包括: FXAS21002C (数字 3 轴陀螺仪 IIC/SPI 传感器) 和 FXOS8700 (三轴数字加速度和三轴数字地磁传感器)。数字陀螺仪和加速度, 用一个 I²C 接口就可以数据通信。

本模块供电电压 3.3 V, 具有以下特性: 无需调零点、波动极小; 波形近似直线; 融合后波形光滑无杂波; 动态可选择全量程范围较广; 在 40~+85 °C 温度范围都可工作; 角速率分辨率为 0.062 5 dps/LSB; 输出数据频率 (ODR) 范围: 12.5~800 Hz。且经过融合后, 可以得到准确的角度信息。由于其集成性好、数字输出无需数模转换、波形光滑等优点, 故此选此模块。

4.4 RS485 通信接口电路

通信模块作为系统下位机和上位机的数据传输的通道, 本系统的上位机还承担着多个控制板协同工作的任务, 故通信模块对系统实现自动检测是至关重要的, 上位机通过通信模块实现整个系统的自动检测以及一些重要配置参数的修改与发送。

本系统通讯电路采用 RS485 模块, 芯片为 SN65LBC184, 是一种 8 管脚的收发器。在实验室调试时通过 RS485 通讯电路与 PC 相连, 是实际安装中各个数据采集板之间的通信方式。

5 悬吊物防摆控制装置的软件设计

系统的软件实现是整研究中至关重要的一部分, 要实现吊物消摆的有效控制, 算法研究过程中要做好吊物偏摆数据的采集处理、偏摆信息的解算和电机控制算法的研究 3 个方面的工作。3 个部分软件程序互相配合, 共同实现

吊物防摆控制的功能。

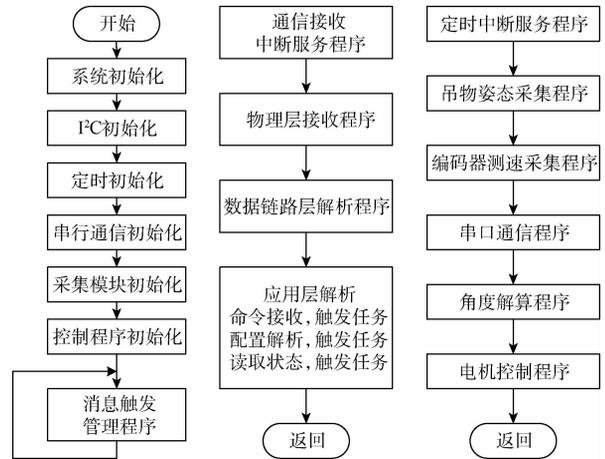


图 6 系统总体软件流程

5.1 悬吊物防摆控制软件算法的设计

姿态的解算有达方法^[8], 本文采用欧拉角方法^[9]。其角度结算原理框图如图 7 所示。

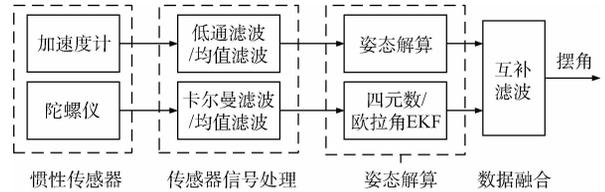


图 7 角度解算原理框图

当吊物静止于平衡位置时, 通过三轴磁阻传感器测得大地磁场在 X 与 Y 两个方向上的分量便可计算出当前吊物的偏航角度, 即起重臂的径直方向:

$$A = \arctan(Y/X) \quad (6)$$

但当吊重系统启动运行时, 此时臂架的振动将会对航向数据的准确性造成很大影响, 且误差的大小取决于当时的振动特性, 并呈现出一定的随机性。为消减误差获得较为精确的航向角度, 在航向角解算的同时采用三轴加速度计来补偿振动造成的数据偏差。转换计算式如下:

$$X_r = X \cos \alpha + Y \sin \alpha \sin \beta - Z \cos \beta - Z \cos \beta \sin \quad (7)$$

$$Y_r = Y \cos \beta + Z \sin \beta \quad (8)$$

式中: X_r 和 Y_r 为要转换到水平位置的值; α 为俯仰角, 指吊物由前向后的角度变化; β 为翻滚角, 指吊物由左向右的角度变化。

根据式(6)~(8)可知, 不管是传感器角度解算还是姿态坐标计算, Z 轴数据都是必不可少的。为获得吊物的摆动状态, 角度解算过程必须持续进行, 各轴的数据也必须实时更新。传感器模块必须将采集数据不断传送给电路板上的微处理器, 通过以欧拉角表示姿态描述方法和角度互补融合技术进行运动姿态解算, 最后获得实时的零漂移三维姿态方位数据^[10]。

6 实验分析

通过 MATLAB 仿真,当重物初始摆角为 0.1 rad 时,小车从原点运动到 0.5 m 时,各状态量的仿真结果如图 8 所示。

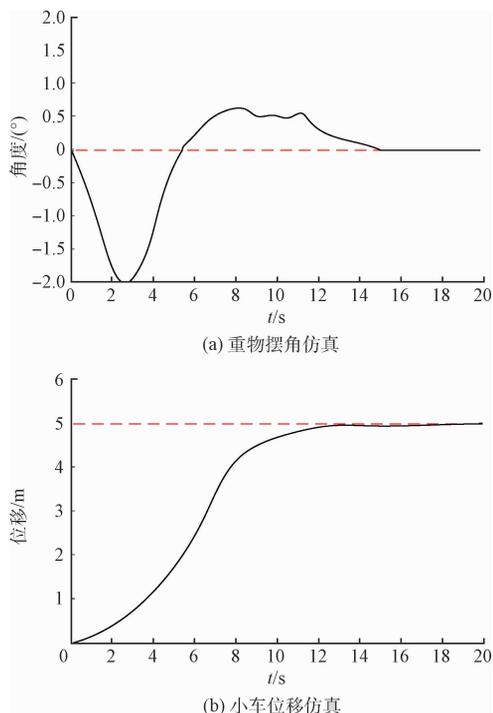


图 8 悬吊物防摆控制系统仿真结果

通过仿真可以看出,该系统具有良好的动态性能指标,当摆角为 0.1 rad 时,5 s 就可以消除起重机实验装置的摆动。

实验中,为了实现算法研究,搭建了小型控制模型。当设定大小车运动为以后,大小车可以在较短时间到达预定位置,并有效消除运动中产生的摆动。实验结果如表 1 所示,以小车运动为例,取 20 次实验结果的平均值。

表 1 实验数据

小车位移/mm	位移误差/mm	调节时间/s	角度误差/rad
100	±2.20	3.7	±0.01
300	±4.30	4.8	±0.02
500	±6.30	5.6	±0.01

7 结 论

吊物摆动情况复杂,不确定因素干扰多,本文设计的悬吊物防摆控制装置,经过调试、优化参数配置,性能与市场存在的控制系装置相比,更加稳定可靠,运用欧拉角解算控制算法,稳定时间明显缩短、响应速度变快、对应抗干扰能力得以提升。硬件设计规范合理,抗电磁干扰,独立性

较好;软件编写方面,从硬件出发,将软件细分为若干模块,各个模块相互独立,便于调试,它们之间采用消息触发的方式相关联,功能稳定,具有一定应用价值和推广意义。

参考文献

- [1] 杨立秋,宋立忠. 基于模糊控制的船用起重机消摆控制[J]. 船电技术,2010(5):26-29.
- [2] 胡艳丽. 基于模糊 PID 的桥式起重机防摆控制研究[D]. 焦作:河南理工大学,2010.
- [3] 梁晨,高崇仁,谷海涛,等. 桥式起重机车轮非圆化对运行同步性的影响[J]. 太原科技大学学报,2013(4):292-295.
- [4] NEUPERT J, ARNOLD E, SCHNEIDER K, et al. Tracking and anti-sway control for boom cranes[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(1):31-44.
- [5] 马海峰. 基于远程虚拟监控的数控起重机控制系统开发[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [6] 史良伟,李虹,王占军. 基于模糊自适应 PID 控制的桥式起重机定位防摆研究[J]. 机械工程与自动化,2014(5):170-172.
- [7] 陈海滨,王国珩,侯宏录, et al. Novel periodic dielectric ring waveguide and design of compact dual wavelength demultiplexer [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7):28-32.
- [8] 杜文正,谢政,童国林,等. 智能门式起重机路径跟踪运动控制研究[J]. 化工自动化及仪表,2013(9):1079-1083.
- [9] 崔志恒,栗三一. 存在始误差的三维桥式起重机位置迭代控制[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):1042-1049.
- [10] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [11] 杜明玮. 桥门式起重机模拟培训系统设计 with 实现[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [12] 林仕立,宋文吉,冯自平,等. 地铁混合储能系统及其功率动态分配控制方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(12):2829-2835.
- [13] 刘少军,张思雨. 城市照明控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(7):63-66.
- [14] 周奇才,曾礼,赵炯,等. 大型起重机自动控制与智能管理系统[J]. 制造业自动化,2013(11):80-83.
- [15] 王雨婷,陈志梅,邵雪卷. 基于无源性的塔机模糊神经网络防摆控制[J]. 太原科技大学学报,2015(2):87-92.

作者简介

薛绍凡,1992 年出生,硕士研究生,助理工程师,研究方向为嵌入式开发与计算机控制系统。

E-mail:332364646@qq.com