

# 水冷壁磨损检测机器人控制系统的设计与研究

李 静, 邢 扬, 俞竹青

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213100)

**摘要:** 为了有效提高石化行业对锅炉水冷壁厚的检测效率, 设计了一种磁吸附履带式爬壁机器人, 并在此载体上采用分级控制系统共同实现高空检测; 首先, 下位机使用 ARM Cortex-M3 为内核的 32 位微控制器, 并采用模糊 PID 控制方法实现对锅炉水冷壁磨损检测机器人的姿态进行控制, 完成直线路径跟随动作; 除此之外, 还配备超声波无损检测技术、图像采集器以及位移传感器等, 来实现锅炉水冷壁磨损检测机器人最终管壁实时图像视频以及检测数据的采集; 其次, 基于 Visual Studio 2010 平台创建人机交互界面, 实现与下位机的数据传输以及后续检测数据处理; 最后, 实验仿真证明该分级控制系统运动稳定可靠, 上下位机能实时通讯, 提高了爬壁机器人的工作速度和处理能力, 有效提高检测效率, 具有较高的智能化水平。

**关键词:** 爬壁机器人; 控制系统; 人机交互界面

## Design and Study of Water Wall Wear Detection Robot Control System

Li Jing, Xing Yang, Yu Zhuqing

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213100, China)

**Abstract:** In order to effectively improve the detection efficiency of the boiler water wall thickness in the petrochemical industry, this system designs magnetic adsorption wall-climbing robot as the carrier, by adopting the combination of upper and lower machine control method to realize high altitude detection. Firstly, the lower computer uses the ARM Cortex-M3 as the core of the 32-bit micro-controller, and the fuzzy PID control method is adopted to realize the control of the position of boiler water wall wear inspection robot, complete the straight path to follow the action. In addition, it is equipped with ultrasonic nondestructive testing technology, image acquisition and displacement sensor, etc., to achieve the boiler water wall wear detection robot final wall real-time image video and test data collection. Secondly, based on Visual Studio 2010 platform to create human-computer interaction interface, with the lower computer to achieve data transmission and subsequent detection data processing. Finally, the experimental simulation shows that the hierarchical control system is stable and reliable, and the upper and lower computer can communicate in real time, which improves the working speed and processing ability of the climbing wall robot, and improves the detection efficiency, and has a high level of intelligence.

**Keywords:** wall-climbing robot; control system; human-computer interaction interface

## 0 引言

锅炉是化工行业中最常见的热力设备, 而水冷壁管是炉壁上重要的结构件, 一般锅炉中有 40%~50% 甚至更多的热量是由水冷壁管所吸收<sup>[1-2]</sup>。由于流化床锅炉水冷壁管所处环境极其恶劣, 易因腐蚀、磨损而老化, 甚至爆裂, 严重影响生产的安全, 因此必须定期进行检测。传统水冷壁管的磨损检测都是人工进行检测, 这种检测费时费力, 效率低, 危险系数高。随着石化工业的迅速发展, 研制一种能自主爬壁并代替人工进行磨损检测的机器人势在必行。

随着科技的迅速发展, 很多专家学者对爬壁机器人进行了大量的研究, 国外现有的爬壁机器人, 如西班牙的 R. Lal Tummala 等人设计的一种低功耗微型双足爬壁机器人、韩国的 Hwang Kim 等人研制的履带式吸盘机器人、日本的 Inoue. K 等人研制的名叫 The asterisk robot 的攀爬网状壁面的仿生爬壁机器人; 国内爬壁机器人技术研究也在逐渐展开, 如哈

尔滨工业大学机器人研究所研制的多功能履带式罐壁喷涂检测磁吸附爬壁机器人、大连海事大学的衣正尧开发的一种履带式永磁真空混合吸附的爬壁机器人<sup>[3]</sup>。这些爬壁机器人都各有特点, 但大多处在研发阶段, 且由于结构复杂, 成本较高, 仍未实际用于工业生产中。

本文针对锅炉水冷壁管壁磨损检测需要, 设计了一种上下位机相结合控制的爬壁检测机器人, 来实现智能机器人代替人工操作, 对流化床锅炉水冷壁进行磨损检测和数据分析, 使其能适应现代工业的需求。

## 1 爬壁检测机器人机械结构

为了实现锅炉水冷壁的磨损检测, 本文设计的爬壁机器人具备 3 个基本功能, 即吸附、运动和无损检测。爬壁机器人的吸附方式可以采用真空负压吸附、磁吸附、推力吸附和粘剂吸附等<sup>[4]</sup>。本设计中的爬壁机器人在钢制流化床锅炉水冷壁面运动, 相比于其它吸附方式, 永磁吸附的吸附力大, 带负载能力强, 且系统意外断电不会影响吸附能力; 而履带式爬壁机器人结构简单、控制方便、运动速度较快, 优点较为明显, 应用最广泛<sup>[5-6]</sup>; 在众多无损检测方法中, 超声波检测适用范围广, 速度快, 精度高, 设备轻便易携带, 在工业检测中应用也十分广泛。

综合流化床锅炉水冷壁的磨损检测的需求和生产工作环境, 本设计采用履带式永磁吸附爬壁机器人, 并配以超声波

收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-04-17。

基金项目: 科技部中小企业技术创新基金项目(14C26213201195)。

作者简介: 李 静(1989-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事机电一体化方向的研究。

俞竹青(1962-), 男, 江苏常州人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事机电一体化与机器人技术方向的研究。

测厚仪来实现智能无损检测。

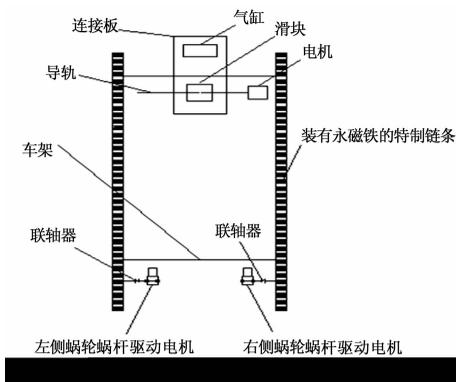


图 1 爬壁机器人结构简图

本设计的爬壁机器人系统结构如图 1 所示, 爬壁机器人本体左右侧各有前后两个带轮, 分别与装有永磁体块的履带啮合, 构成运动部件。爬壁机器人采用后驱动方式, 后面两个主驱动轮分别由一台直流无刷电机通过蜗轮蜗杆驱动, 在前侧装有超声波无损检测和图像采集组件, 该组件通过直流小电机和滑块带动测探头在平移导轨往复移动, 找到合适的探测点再控制气动部分来进行管壁厚度测量和采集。

为实现对流化床水冷壁磨损进行自动化检测, 爬壁机器人控制系统是关键所在。本文根据爬壁机器人所要达到的检测要求, 着重介绍其控制系统。

### 2 控制系统组成

流化床锅炉水冷壁磨损检测机器人控制系统为上下两层体系结构, 由 STM32 单片机、电机驱动电路、传感器数据接收电路、人机交互界面等组成。下位机系统以 STM32 单片机为核心, 协调各部分电路工作; 上位机采用 PC 为主控计算机, 用于参数初始化, 任务规划和状态监控, 两者通过 RS232 通讯, 控制系统如图 2 所示。该系统从功能上可分为运动控制单元、超声检测单元和通讯单元 3 部分。

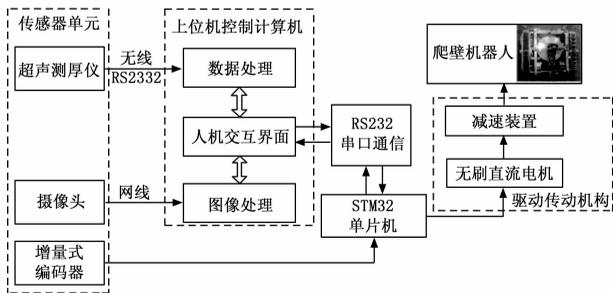


图 2 磨损检测机器人控制系统框图

### 3 下位机控制

流化床锅炉水冷壁磨损检测机器人吸附在水冷壁上, 首先需要达到自动移动的功能, 实现爬壁机器人的前进、后退和变向, 并到达待测位置停止, 以便进行超声波无损检测。针对本控制系统所需实现的功能, 以及 STM32 系列单片机集成度高, 处理速度快, 功耗低, 抗干扰能力强等特点<sup>[7]</sup>。此次设计的主控芯片采用 STM32 系列中时钟频率达 72 MHz 的 STM32F103RCT6 微控制器。

运动控制的主要是对电机驱动的控制, 本设计中的后驱动电机和横移电机都是采用直流无刷电机, 通过两个 IR2103 半桥驱动器组成典型的 H 桥电机驱动电路。机器人能够沿给定的直线行驶, 是机器人完成其他任务的前提, 所以本设计在机器人开始启动时, 首先完成机器人的路径跟随, 在机器人左侧前后对称安装两个超声测距传感器, 实时监测小车距离相邻管道的距离, 根据目前测定的位置与给定路线的偏差, 利用模糊控制算法迅速做出相应的对策, 进而调节左右两驱动轮的车速, 通过两轮的车速差不断对机器人转角进行调整, 达到对位姿的修正, 最后使机器人在给定路线上移动。图 3 是机器人路径跟踪原理图。

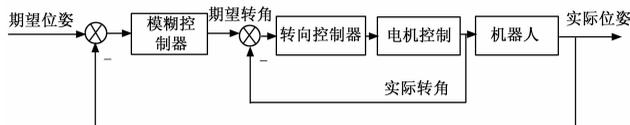


图 3 机器人路径跟踪原理图

本研究对象的运动学模型是两轮差速驱动的自主导航爬壁机器人, 通常假设质心与形心重合, 其在二维全局坐标系 XOY 下的位姿可以用  $p = [x \ y \ \theta]^T$  来表示, 同时参考位姿可以表示为  $p_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ , 爬壁机器人的运动状态由线速度  $v$  和角速度  $\omega$  来决定, 表示为  $q = [v \ \omega]^T, q_r = [v_r \ \omega_r]^T$  表示参考速度, 根据文献 [8] 可知差速驱动机器人的运动学方程如下:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q \quad (1)$$

由非完整约束方程, 可知:

$$\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta = 0 \quad (2)$$

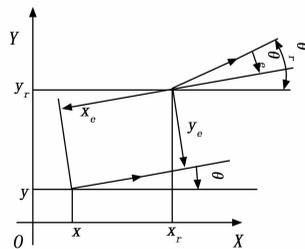


图 4 机器人位姿误差示意图

根据图 4, 可得其位姿误差为:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (p_r - p) \quad (3)$$

经推导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= (\dot{x}_r - \dot{x})\cos\theta - (x_r - x)\sin\dot{\theta} + (\dot{y}_r - \dot{y})\sin\theta + \\ & (y_r - y)\cos\dot{\theta} = \dot{x}_r\cos\theta - \dot{x}\cos\theta + \dot{y}_r\sin\theta - \\ & [-(x_r - x)\sin\theta + (y_r - y)\cos\theta]\dot{\theta} = \\ & \dot{x}_r\cos\theta - v\cos^2\theta + \dot{y}_r\sin\theta - v\sin^2\theta + y_r\dot{\theta} = \\ & \dot{x}_r\cos(\theta_r - \theta_e) + \dot{y}_r\sin(\theta_r - \theta_e) - v + y_r\omega = \\ & \dot{x}_r[\cos\theta_r\cos\theta_e - \sin\theta_r\sin\theta_e] + \dot{y}_r[\sin\theta_r\cos\theta_e + \cos\theta_r\sin\theta_e] - \\ & v + y_r\omega = v_r\cos\theta_e - v + y_r\omega \end{aligned}$$

同理可以计算推导出如下微分方程:

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据上述推演得到的运动学方程，将自主导航爬壁机器人跟踪问题转化为设计输入控制量  $q = [v \ \omega]^T$ ，使闭环系统姿态误差  $p_e$  能全局一致有界，并且当  $t \rightarrow \infty$ ，系统在任意的初始跟踪误差下有  $\lim_{t \rightarrow \infty} [|x_e(t)| + |y_e(t)| + |\theta_e(t)|] = 0$ 。

而线速度  $v$  和角速度  $\omega$  与两驱动轮速度的关系公式如下：

$$v = \frac{(v_R + v_L)}{2} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{(v_R - v_L)}{L} \quad (6)$$

式 (5) 中  $L$  是两后驱动轮间的距离。

综上，调节左右两驱动轮的速度，就可以改变控制输入量，继而改变姿态误差达到预期路径，使机器人按规定直线路径运动。

机器人后驱动电机自带增量式编码器，通过下位单片机上的 26LS32 芯片接收编码器的差分信号，并从串口实时显示编码器计数值，本设计中选用的是 1 000 线的增量式编码器，且单片机中定时器对编码器的计数方式采用四细分，可通过公式 (7) 计算爬壁机器人左右驱动轮的移动速度。

$$v = \frac{2\pi r \times \Delta r}{(4\ 000 \times \Delta t)} \quad (7)$$

式 (7) 中， $\Delta r$  为编码器在  $\Delta t$  内计数值的差值； $r$  为机器人后轮半径。

本设计中采用模糊 PID 控制器作为导航控制器，将机器人相对于追踪路径的横向偏差和角度偏差作为模糊控制器的输入变量。在爬壁机器人运动过程中，系统不断检测机器人的横向偏差和角度偏差，量化到对应论域，根据设定的模糊推理规则，这样就可以由变化的横向偏差和角度偏差自整定得到模糊 PID 控制器 3 个参数  $K_p$ ， $K_i$ ， $K_d$ 。从而达到对机器人姿态的控制。

一般离散型 PID 的规律可描述为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (8)$$

其中： $u(k)$  是控制器的输出， $e(k)$  是实际测量值与设定值的偏差。

为验证本设计的模糊 PID 控制方案相对于传统的 PID 控制器具有优越性，通过 Matlab/Simulink 建立爬壁机器人速度控制仿真模型，如图 5 所示。

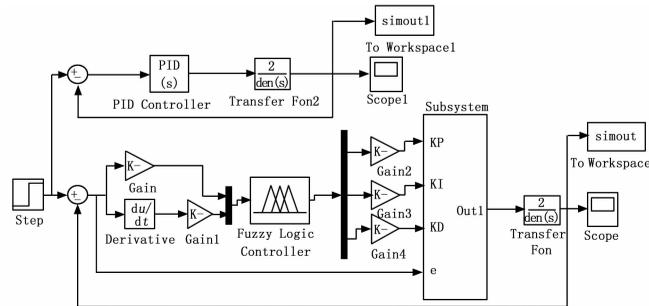


图 5 Simulink 仿真控制模型

爬壁机器人转速的偏差  $|e|$  以及转速偏差率  $|e_c|$  作为模糊控制器的输入变量，PID 三个参数调整值作为模糊控制

器的输出变量，图 6 为模糊 PID 控制系统框图。

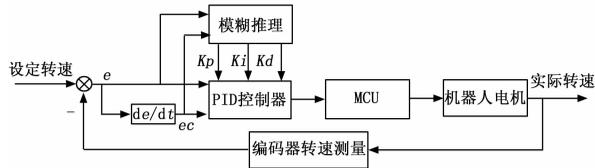


图 6 模糊 PID 控制系统框图

下面建立隶属函数，将输入及输出变量的模糊集统一定义为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ，该集合中元素分别代表 {负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}。两个输入变量的论域均取为  $[-6, 6]$ ，3 个输出变量的论域取为  $[-3, 3]$ 。采用模糊推理控制器的核心就是通过参数自整定原则和近似推理建立相应的模糊控制规则<sup>[9]</sup>，模糊控制规则如表 1，表 2，表 3 所示。

表 1  $K_p$  模糊控制规则

$K_p$		$e$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e_c$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
	Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $K_i$  模糊控制规则

$K_i$		$e$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e_c$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
	NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
	PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

表 3  $K_d$  模糊控制规则

$K_d$		$e$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e_c$	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
	NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
	Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
	PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据建立的模糊控制规则，对爬壁机器人的速度进行仿真。给控制系统加一个阶跃信号，并将模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器进行比较，观测系统的响应输出曲线如图 7 所示。从图 7 仿真结果中可以看出，相对于传统 PID 算法，模糊 PID 算法的调节时间短，几乎没有振荡，且超调量小，接

近于零, 稳态误差小于 1r/s。因此可以得出模糊 PID 控制器相对于传统的 PID 控制器有较好的适应性和鲁棒性, 提高了系统的工作速度。

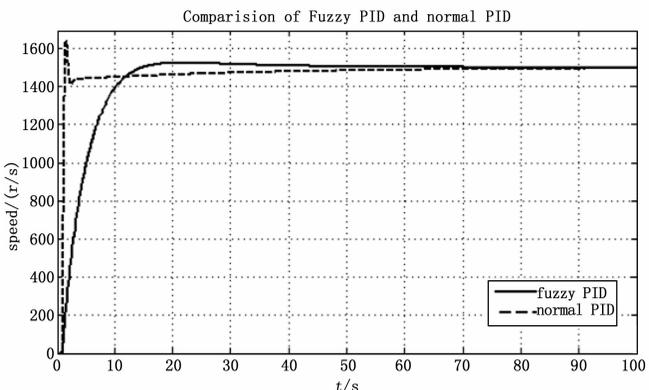


图 7 模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器比较

### 4 上位机控制

分级控制系统是实现上下位机实时通讯共同实现对检测机器人的控制。系统程序主要包含主程序、电机转动子程序、编码器距离检测子程序、探测子程序和上位机接收数据子程序。主程序主要作用是对硬件初始化和对子程序的调用控制, 主程序的流程图如图 8 所示。硬件初始化后, 单片机控制电机模块以及超声测距传感器进行实时监测调整, 使机器人沿指定轨道运动, 编码器实时监测机器人运动的位移, 当达到一定位置时, 观察摄像头图像移动横移电机, 到达待测点进行管壁厚度探测, 再通过串口传输数据到上位机保存。

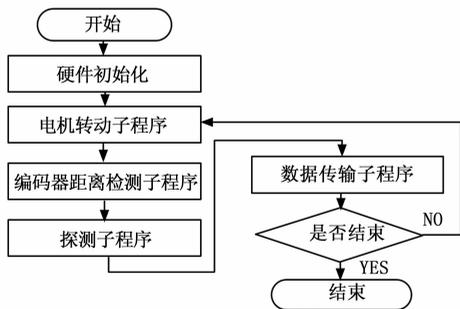


图 8 主程序流程图

为了更直观的使上下位机进行无障碍交流, 本设计基于 VS2010 平台使用 MSComm 控件建立串口通讯, 因为 MSComm 控件建立串口通讯较为方便, 同时它是微软基于组件模型 (COM) 开发的, 因此稳定性和运行效率很好<sup>[10]</sup>。图 9 是本控制系统基于 MFC 设计的一套友好的人机交互界面, 该界面简单明了, 可以使工业生产者快速上手, 只要在 PC 与单片机之间建立相同的波特率、数据位和停止位, 通过 RS232 通讯协议标准就可以实现上位机对单片机各电路的控制。同时上位机也可以通过 RS232 通讯协议标准与超声测厚仪之间实现数据传输。

上位机通过串口对超声测厚仪测量数据进行实时采集, 同时基于 VS2010 平台编写代码, 对采集的数据进行实时计算、判断并显示在人机交互界面上, 有利于操作者对测量结果进行快速分析并做出相应的对策。实验数据如图 9 所示, 上位机把下位机测得的连续 10 个管壁厚度实时显示在界面

上, 并自动做出计算判断, 根据判断, 操作者只需在机房对爬壁检测机器人进行远程操控, 以获得正确的结果, 并且把所有数据保存到文件夹中, 以便日后汇总检查。



图 9 磨损检测机器人的人机交互界面

选用 USB 接口的 CCD 摄像头将图像数据传输到上位机, 操作者可随时了解机器人运行路况以及管壁是否有明显裂痕等, 犹如亲临现场, 使该控制系统更加人性化。

### 5 总结

本设计的锅炉水冷壁磨损检测爬壁机器人的分级控制系统上位机操作方便, 人们不用亲临现场就可以控制机器人运动并进行实时数据采集处理, 还可以高效的处理庞大的数据并实时得出结论以便采取相应对策, 具有较高的智能化水平; 系统下位机采用模糊 PID 控制算法对机器人位姿进行控制, 并通过仿真实验验证该控制算法比传统的 PID 控制算法更加优化, 大大提高了工作效率。综上所述, 该控制系统采用集成度高的 STM32F103RCT6 单片机, 精度灵敏的超声测厚仪, 且结合了稳定的串口通讯和友好的人机交互界面, 完全能够胜任枯燥危险的锅炉水冷壁磨损检测工作, 具有较大的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 孙连启. 循环流化床锅炉水冷壁的磨损形式和寿命评估 [J]. 中国特种设备安全, 2014, 30 (8): 37-41.
- [2] 宋小春, 康宜华, 武新军. 水冷壁管漏磁/超声无损检测机器人设计 [J]. NDT 无损检测, 2005, 27 (1): 17-20.
- [3] 闫久江, 赵西振, 左 干, 等. 爬壁机器人研究现状与技术应用分析 [J]. 机械研究与应用. 2015, 28 (3): 52-54.
- [4] 付宜利, 李志海. 爬壁机器人的研究进展 [J]. 机械设计, 2008, 25 (4): 1-4.
- [5] 陈剑斌, 田联房, 王孝洪. 基于 ARM 的自主移动机器人控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2011 (6): 160-162.
- [6] 田兰图, 杨向东, 赵建东, 等. 油罐检测爬壁机器人结构与控制系统设计 [J]. 机械人, 2004, 26 (5): 385-390.
- [7] 陈志旺, 等. STM32 嵌入式微控制器快速上手 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [8] 张 营, 鲁守银. 基于模糊控制算法的变电站巡检机器人路径规划 [J]. 制造业自动化, 2015, 37 (6): 53-55.
- [9] 侯伟龙. 基于模糊 PID 的助行机器人调速系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (1): 54-60.
- [10] 朱桂凤, 田 莺, 田 宇, 等. 基于 MSComm 的串口通讯及 PLC 系统监控软件开发 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27 (6): 1101-1104.