

基于模糊 PID 的豆粉喷雾干燥塔监控系统设计

Design of monitoring system for soybean powder spray drying tower based on fuzzy PID

侯 强¹ 徐 颖² 田思庆²

HOU Qiang¹ XU Ying² TIAN Si-qing²

(1. 佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007;

2. 佳木斯大学信息电子技术学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

(1. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi, Heilongjiang 154007, China;

2. College of Information and Electronics Technology, Jiamusi University, Jiamusi, Heilongjiang 154007, China)

摘要:针对喷雾干燥大滞后、强耦合的非线性特点,设计了一套基于模糊 PID 的豆粉喷雾干燥塔监控系统。根据工艺要求对喷雾干燥塔采取了串级模糊控制方案,主回路采用模糊 PID 控制,副回路采用 PI 控制;上、下位机监控采用组态王和西门子 S7-300 系列 PLC。仿真试验表明,串级模糊 PID 控制与常规 PID 控制相比具有响应速度快、超调量小和鲁棒性强等优点。

关键词:喷雾干燥塔;串级控制;模糊 PID;监控

Abstract: Based on the characteristics of large delay and strong coupling in spray drying, a monitoring system of spray drying tower for soybean flour based on fuzzy PID is designed. According to the technological requirements, a cascade fuzzy control scheme is adopted for spray drying tower. The main circuit adopts fuzzy PID control, and the secondary loop adopts PI control. The upper and lower computer monitoring adopts Kingview and SIEMENS S7-300 series PLC. The simulation results show that the cascade fuzzy PID control has the advantages of fast speed, small overshoot and strong robustness compared with the conventional PID control.

Keywords: spray drying tower; cascade control; fuzzy PID; monitor

豆粉具有去除过剩胆固醇、防止血管硬化等作用。在其加工工艺中若喷雾干燥含水量控制精度不高,容易出现挂壁、分层等现象,影响豆粉冲调品质。目前中国很多公司的喷雾干燥控制技术与设备相对落后,很少有比较完善的上位机系统对下位机实时控制,且下位机控制器兼容性、抗震冲击等性能较差;同时没有先进的控制

算法实施控制,物料干燥品质不佳。

在喷雾干燥工艺中,传统的系统一般采用单回路 PID 控制。苏和等^[1]利用数字 PID 算法对喷雾干燥系统进行控制,但是缺乏对控制对象特性变化的适应能力。针对 PID 算法的控制缺陷,颜文旭等^[2]提出了基于模糊逻辑控制的喷雾干燥控制方法,有效地解决了滞后带来的控制振荡现象;任小洪等^[3]采用西门子 PLC 中自校正模糊控制模块建立了一套喷雾干燥塔计算机控制系统。但是喷雾干燥是一个多参数温度控制过程,上述模糊控制方法使用简单的单回路控制,不同回路间的参数相互独立,针对干扰和非线性特性无法满足控制要求。

为确保豆粉喷雾干燥系统能够实现远程控制且拥有良好的动静态性能,研究拟根据模糊规则和串级控制方案对 PID 参数进行调节,并利用西门子 S7-300 PLC 对喷雾干燥设备进行控制,通过上位机对喷雾过程的参数进行实时监测,以期克服传统单回路模糊 PID 控制方法的不足。

1 豆粉喷雾干燥塔控制系统总体设计

1.1 干燥工艺流程

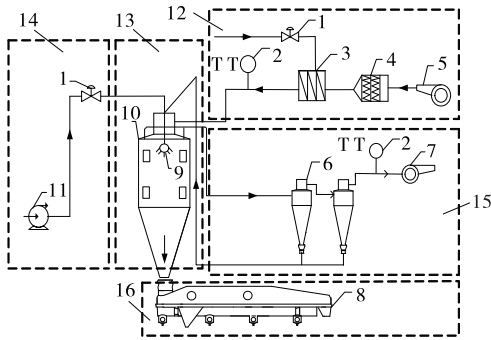
喷雾干燥工艺流程示意图如图 1 所示。喷雾干燥作为豆粉生产工艺重要的一个环节,按照工艺流程,该系统由热风区、干燥区、料浆供应区、细粉回收区和二次干燥及冷却区等几个主要部分组成^[4]。在豆粉喷雾干燥塔工艺流程中,研磨好的液态豆粉料浆首先进入料浆暂存罐,在高压泵的作用下经压力喷枪雾化后喷入干燥塔;新鲜空气进入空气过滤器除杂,在进风机的作用下通过空气加热器进行加热;加热后的空气与同时进入塔内的雾化料浆进行充分的热质交换,在短短数秒内干燥成粉末状态的颗粒豆粉,干燥后的颗粒落入塔底的锥形部分,在振荡器的作用下将料浆送入流化床进行二次干燥及冷却;残余的粉末随经过热质交换的热风经塔内上排风口通过

作者简介:侯强,男,佳木斯大学在读硕士研究生。

通信作者:田思庆(1965—),男,佳木斯大学教授,硕士。

E-mail: tian_siqing@126.com

收稿日期:2019-08-15



1. 调节阀 2. 温度传感器 3. 空气加热器 4. 空气过滤器 5. 进风机 6. 旋风分离器 7. 排风机 8. 流化床 9. 压力喷枪 10. 喷雾干燥塔 11. 高压泵 12. 热风区 13. 干燥区 14. 料将供应区 15. 细粉回收区 16. 二次干燥及冷却区

图 1 喷雾干燥工艺流程示意图

Figure 1 Schematic diagram of spray drying process

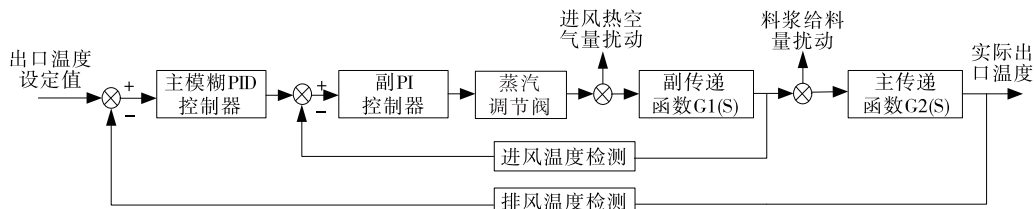


图 2 串级模糊 PID 控制原理图

Figure 2 Control schematic diagram of cascade fuzzy PID

采用工业以太网和 PROFIBUS-DP 网络进行通信,实现豆粉干燥生产的分散控制和集中化管理。豆粉喷雾干燥塔控制系统硬件设备分为 3 层,其硬件结构如图 3 所示。第一层为现场执行层,主要包括温度、压力传感器及电机、阀门执行器等现场 I/O 设备,用来完成各工艺流程区的检测和控制任务;第二层为西门子 S7-300 系列 PLC 构建的控制层,该层可按照设计好的控制策略对豆粉喷雾干燥各生产过程进行实时控制;第三层为远程监控与管理层,利用工业控制计算机构建工程师站和操作员站,远程用户可实时监测整个工艺流程参数和各硬件设备的工作状态,确保豆粉喷雾干燥工艺平稳有序进行^[9-10]。

根据豆粉喷雾干燥工艺特点及其控制要求,选用西门子 S7-300 系列可编程控制器 CPU 315-2 PN/DP、PS 307 电源模块、以太网 CP 343-1IT 通信模块以及 I/O 模块等构成冗余式下位机控制站。在 I/O 模块中,选用型号为 SM331 的模拟量输入模块,拥有 8×14 bits 的 AI 点数,用来接收豆粉喷雾干燥系统的温度、压力和频率等现场模拟输入信号值,然后将其转换成为 CPU 处理的数字信号;选用型号为 SM322 的模拟量输出模块,拥有 8×14 bits 的 AO 点数,将控制器数字信号转换为呈比例的电压和电流值,用来控制系统变频器、电动调节阀、电机等执行机构;选用型号为 SM321 的数字量输入模块,DI 点数为 32,用来接收从选择开关、阀门开关和启动开关等

旋风分离器分离,并进入塔内进行二次复聚,热风则在排风机的作用下排出^[5-7]。

1.2 控制系统分析

为使系统能够快速响应输入变化,减小超调量,提高系统的控制精度,设计了基于模糊 PID 控制的串级控制系统如图 2 所示。塔内排风温度为主被控制量,进风温度为副被控制量,主控制器采用模糊 PID 控制器,副控制器采用 PI 控制器;通过温度传感器不断检测进风口和排风口温度,检测值与温度设定值比较后将偏差值反馈给主、副控制器,通过调节蒸汽调节阀的开度,增加或减少蒸汽量以保证出风口温度值^[8]。

2 豆粉喷雾干燥塔控制系统硬件设计

由于豆粉喷雾干燥工艺较为复杂、参数较多,计算机控制系统采取集散式控制方式,利用 PLC 作为控制中心,

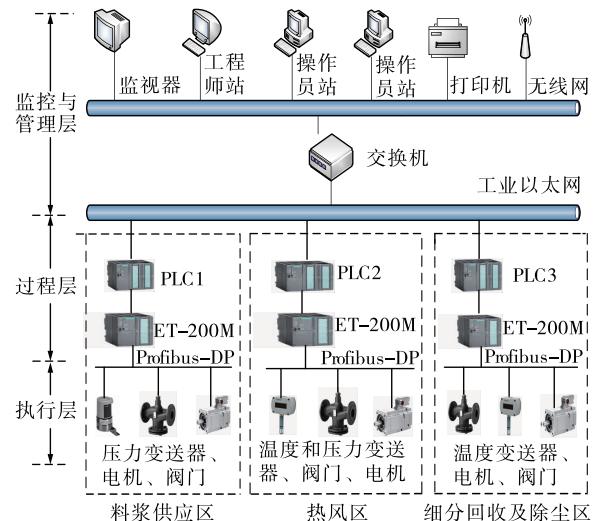


图 3 喷雾干燥塔控制系统硬件结构图

Figure 3 Hardware structure of spray drying tower control system

传输的数字量输入信号;选用型号为 SM322 的数字量输出模块,DI 点数为 32,用来控制系统行程开关、接触器和电磁阀等数字量输出设备^[11-12]。

PLC 选用 PROFIBUS-DP 总线与现场设备进行通信,各控制子站通过工业以太网与中央控制室的上位机完成数据通信工作。

3 基于模糊 PID 控制系统设计与仿真

3.1 模糊 PID 控制器设计

串级控制系统中,主控制器采用的是模糊 PID 控制器。模糊 PID 控制器采用二维输入和三维输出,控制器的输入为豆粉喷雾干燥塔出口温度给定值与实际测量值的误差 e 及其变化率 ec ,输出为 PID 3 个参数 K_P 、 K_i 、 K_d 。其模糊子集定义为[NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB],分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。根据专家^[13]经验,该控制系统误差 e 的论域取值为 $[-0.52, 0.52]$,误差变化率 ec 的论域取值为 $[-0.45, 0.45]$, K_P 的论域取值为 $[-0.6, 0.6]$, K_i 的论域取值为 $[-0.3, 0.3]$, K_d 的论域取值为 $[-3, 3]$ 。

根据相关领域内专家学者^[14-15]的研究分析,对 K_P 、 K_i 、 K_d 3 个参数建立模糊控制规则,模糊 PID 控制器输入输出隶属函数均选取三角形函数,模糊推理方法选择 Mamdani min-max 法,模糊判决选择重心法,则 K_P 、 K_i 、 K_d 在论域上的输出曲面如图 4~6 所示。

3.2 控制系统 Matlab 仿真

综合考虑豆粉喷雾干燥塔工艺要求以及非线性、大滞后的系统属性,可以将豆粉喷雾干燥塔看作是一阶大滞后控制系统^[16],其传递函数 $G(s)$ 的表达式为:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}, \quad (1)$$

式中:

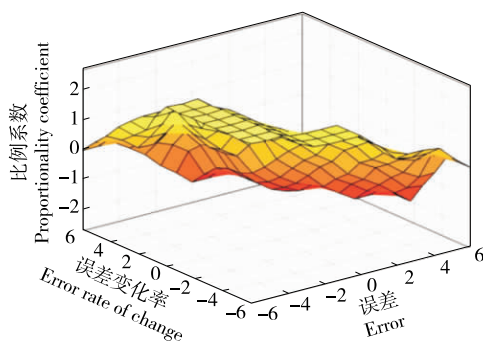


图 4 K_P 的输出曲面

Figure 4 The output surface of K_P

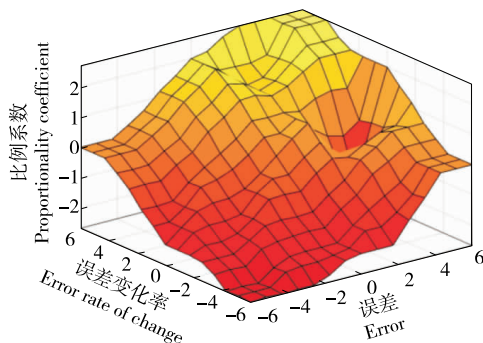


图 5 K_i 的输出曲面

Figure 5 The output surface of K_i

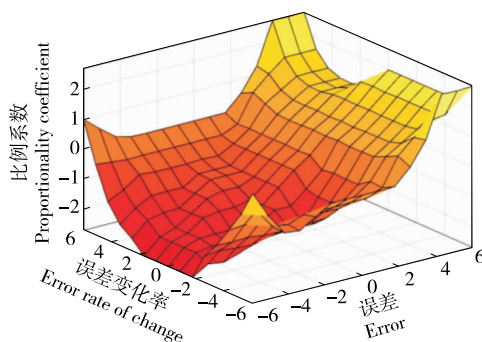


图 6 K_d 的输出曲面

Figure 6 The output surface of K_d

$G(s)$ —— 传递函数;

K —— 放大系数;

T —— 时间常数, s;

τ —— 延迟时间, s。

取 $K = 8.35$, $T = 265$, $\tau = 75$,在 simulink 仿真环境下对系统传递函数进行仿真分析,采用 Z-N 整定法,整定出副回路 PI 调节器的参数为 $K_{P1} = 2.16$, $K_{i1} = 1.23$;采用模糊算法整定主回路 PID 调节器的参数分别为 $K_{P2} = 3.12$, $K_{i2} = 0.45$, $K_{d2} = 0.32$ 。将主副回路的调节器参数添加到 simulink 仿真模型中,得到常规 PID 控制、模糊 PID 控制在目标温度为 82°C 时降温 and 升温控制曲线分别如图 7、8 所示^[17-18]。

由于豆粉喷雾干燥的扰动主要来自于进风口热空气量供给的扰动,为了验证控制系统的抗干扰能力,在仿真模型中 500 s 时加入一个幅值为 0.5,干扰时间为 10 s 的干扰方波^[19],由图 9 可知,模糊 PID 控制策略优于常规 PID 控制。

4 监控系统设计

为了实现对豆粉喷雾干燥塔整个生产线的实时监控,设计了基于组态王软件的监控系统^[20],系统在线监控界面如图 10 所示。当现场设备正常运转时,主界面中的

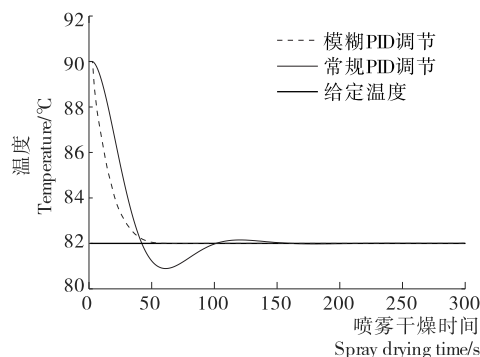


图 7 目标温度为 82°C 的降温仿真控制曲线

Figure 7 Simulation control curve of temperature reduction with target temperature of 82°C

模拟设备会呈现出相应的模拟动画效果。操作者通过点击各相应设备则可以切换到各设备工艺的子界面组态,能快速掌握并远程操控各工艺生产状态,实现对系统集中控制和分散管理。

在豆粉喷雾干燥塔控制系统实际运行调试过程中,为了能根据工艺要求随时更改参数和手动、自动控制方式等^[21],设计了系统参数设置界面,工作人员可以通过在上位机中建立的参数设置画面对下位机实施控制,参数

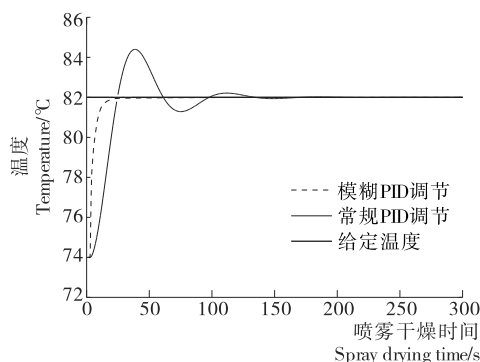


图 8 目标温度为 82 °C 的升温仿真控制曲线

Figure 8 Simulation control curve of temperature rise with target temperature of 82 °C

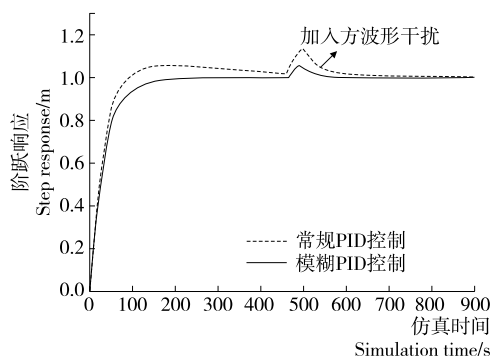


图 9 加入方波干扰后的控制效果曲线图

Figure 9 Curve chart of control effect after adding square wave interference

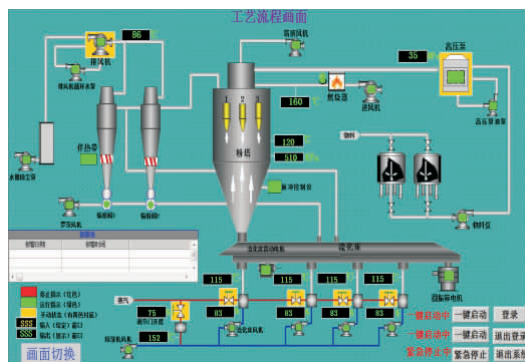


图 10 系统在线监控画面

Figure 10 On-line monitoring screen of the system

设置画面如图 11 所示。

为了实现对各生产工艺数据的分析,该系统将 PLC 采集到的各设备生产数据以图表的形式显示在同一张图表中,使操作人员能够直观地了解各控制区实时的工作状态趋势,操作人员可以通过参数的调整,使各设备处于最佳的工作状态^[22]。生产历史趋势曲线界面如图 12 所示。

为了统计在豆粉喷雾干燥生产工艺中各个设备的温度、压力和液位等生产参数,设计了生产报表系统组态界面,如图 13 所示。管理员用户能够根据生产需求定义变



图 11 系统参数设置界面

Figure 11 Parameter setting interface of the system

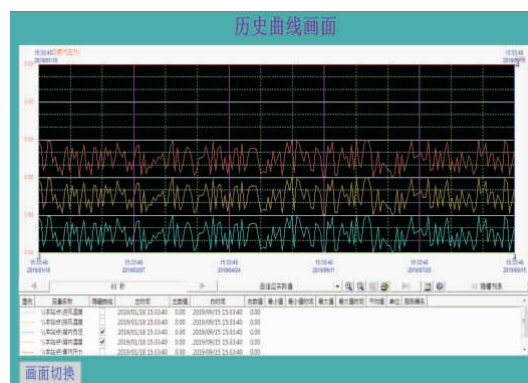


图 12 生产历史趋势曲线界面

Figure 12 The interface of production history trend curve



图 13 生产报表查询界面

Figure 13 The interface of production report query

量,以及相应的参数。来访者可以通过组态界面中的生产报表直观了解生产的运行情况^[23]。

5 结论

针对豆粉喷雾干燥塔系统具有非线性、大滞后等特点,设计了基于模糊 PID 算法的串级控制方案,经过系统仿真,与单回路模糊控制方案比较,具有主副回路间参数相互协调、响应速度快、控制精度高和抗干扰强等优点。虽然串级模糊 PID 控制系统的动、静态性能较好,但量化因子以及修正系数的计算通常是结合专家和工作人员的工作经验来进行的,具有一定的主观性,下一步的研究可以利用遗传算法优化模糊控制器量化因子和修正系数,使得控制器能实时跟踪系统的变化,以保证系统具有较高的自适应性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 苏和. 数字 PID 控制在乳粉干燥自动化系统中的开发与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2006(12): 124-126.
- [2] 颜文旭, 沈锦飞. 基于 PLC 的模糊逻辑控制在喷雾干燥中的应用[J]. 电气传动, 2004(2): 52-56.
- [3] 任小洪, 涂源钊. 喷雾干燥塔计算机控制系统[J]. 微计算机信息, 2003(6): 14-15.
- [4] 邓益平, 张雷. 苏打粉喷雾干燥工艺的模拟与优化[J]. 化学工业与工程, 2019, 36(4): 62-69.
- [5] 郭小龙. 微生物油脂微胶囊高压喷雾干燥工程设计[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017: 41-49.
- [6] 冯颜. 麦芽糊精喷雾干燥塔控制系统的研究与设计[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2014: 6-9.
- [7] 祝维靖. 锅炉主蒸汽温度多级智能控制系统方法改进研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 7-14.
- [8] 刘玉田. 西门子 S7-300PLC 在喷雾干燥塔中的应用[J]. 煤炭与化工, 2014, 36(5): 130-132.

- [9] 马壮. 基于 S7-300PLC 的高温梭式窑温度控制系统设计[J]. 机床与液压, 2017, 45(6): 109-113.
- [10] 赵群, 樊石, 朱明清, 等. 乳制品低温干燥塔过程控制及算法研究[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(7): 113-116.
- [11] 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 56-64.
- [12] 王君. 基于模糊控制策略的温室远程智能控制系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 45-60.
- [13] 陈哲盼, 焦嵩鸣. 大滞后系统的专家-模糊 PID 控制器设计[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 386-389.
- [14] 邓益平, 张雷. 碳酸氢钠喷雾干燥过程的仿真研究[J]. 现代化工, 2019, 39(6): 210-214.
- [15] 李宇华, 高彬彬, 姜波, 等. 基于 S7-300PLC 的番茄酱蒸发浓缩过程中的液位控制系统设计[J]. 食品工业, 2015, 36(10): 252-255.
- [16] 覃美烘. 基于模糊内模-PID 的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 166-171.
- [17] 管丰年. 喷雾干燥塔模糊控制算法研究[J]. 潍坊学院学报, 2014, 14(6): 45-49.
- [18] 骆东松, 孙冠琼. 基于模糊控制的真空退火炉温度控制系统[J]. 控制工程, 2019, 26(4): 625-630.
- [19] 潘玉成, 林高飞, 陈小利, 等. 基于模糊专家控制的茶叶炒制温度控制系统[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 79-84.
- [20] 高彬彬, 李宇华, 高丙朋, 等. 基于 S7-300PLC 和组态软件的分布式温度控制系统[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(4): 96-98, 116.
- [21] 周晓, 朱艳林, 王艳艳. 基于组态王的配电网监测系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(5): 1 731-1 733.
- [22] 丰会萍, 胡亚南, 闫琛钰, 等. 基于 TIA Portal 的多功能茶叶包装机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 85-88.
- [23] 肖剑兰. 基于 PLC 和组态软件的自动线上料监控系统设计[J]. 机电工程技术, 2018, 47(7): 84-86, 194.

(上接第 51 页)

参考文献

- [1] CUCCHIARA R, GRANA C, PICCARDI M, et al. Improving shadow suppression in moving object detection with HSV color information[C]// Proceedings of 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. [S.l.]: IEEE, 2001: 334-339.
- [2] 刘艳丽, 石俊, 张严辞. 一种单幅室外图像的阴影去除算法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 168-175.
- [3] SUN Bang-yu, LI Shu-tao. Moving cast shadow detection of vehicle using combined color models[C]// 2010 Chinese Conference on Pattern Recognition (CCPR). [S.l.]: IEEE, 2010: 1-5.
- [4] QU Liang-qiong, TIAN Jian-dong, HAN Zhi, et al. Pixel-wise orthogonal decomposition for color illumination invariant and shadow-free image[J]. Optics Express, 2015,

23(3): 2 220-2 239.

- [5] 刘义红. 一种改进的 K-means 聚类自然图像分割算法设计与实现[J]. 淮南师范学院学报, 2018, 20(2): 125-130.
- [6] 焦竹青. HSV 变换和同态滤波的彩色图像光照补偿[J]. 计算机工程与应用, 2006, 46(30): 142-144.
- [7] 张亚飞, 谢明鸿. 基于 HSI 和局部同态滤波的彩色图像增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2013(12): 35-56.
- [8] 许子杰, 任光亮. 基于马氏距离的相位噪声抑制算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2017(4): 47-62.
- [9] MARTINS A, DUARTE A, DANTAS J, et al. A new clustering separation measure based on negentropy[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2015, 26(1): 28-45.
- [10] 李金涛, 艾萍, 岳兆新, 等. 基于 K-means 聚类算法的改进[J]. 国外电子测量技术, 2017(6): 30-47.