

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.006

基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统

陈思宁

(江苏爱涛文化产业有限公司, 南京 210000)

摘要: 为解决展示墙照明效果不佳导致观看者视觉体验感下降的问题, 设计基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统。对展示墙智能化照明控制系统、POS 优化模糊自适应 PID 算法、PSO 算法优化参数 PID 初始值等进行论述, 并进行验证。结果表明: 该系统设计简单, 功能全面, 能更好展示展示墙中内容, 大幅提升观看者的视觉体验感。

关键词: 视觉舒适度; 展示墙; 智能化; 照明控制; 系统设计; 模糊自适应 PID

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Intelligent Lighting Control System of Display Wall Based on Visual Comfort

Chen Sining

(Jiangsu Aitao Cultural Industry Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Lighting Control System of Display Wall Based on Visual Comfort Abstract: In order to solve the problem that the poor lighting effect of display wall leads to the decline of viewers' visual experience, an intelligent lighting control system for display wall based on visual comfort is designed. The display wall intelligent lighting control system, POS optimization fuzzy adaptive PID algorithm, PSO algorithm optimization parameters PID initial value are discussed and verified. The results show that the system is simple in design and comprehensive in function, which can better display the contents of the display wall and greatly enhance the visual experience of viewers.

Keywords: visual comfort; display wall; intelligent; lighting control; system design; fuzzy adaptive PID

0 引言

展示墙作为新媒体广告主要展示形式, 被广泛应用在博物馆、图书馆、会议中心、学校、公司等场所中^[1-3]。通过公司展示墙可以了解该公司发展历程和重要事件, 提升企业员工的企业认知, 促进企业文化建设的步伐^[4]。展示墙智能化照明直接影响展示墙展示效果, 通过合理地控制照明可提升展示墙观看人员的观看体验感^[5]; 因此, 研究展示墙智能化照明控制系统具有重要研究意义。目前, 相关学者已经开始对展示墙智能化照明控制系统进行研究, 李卓等^[6]研究 LoRa 物联网的照明控制系统, 利用部署多个传感器采集环境光线, 经物联网传输采集数据到控制器, 由控制器实现展示墙智能化照明控制; 但是该系统需要部署多个传感器, 设计成本较高, 其经济适用性较差。蒋涵元等^[7]研究 VPLC 的工业智能照明控制系统, 该系统包括识别层、控制层和调光层等, 通过识别层检测展示墙周围光线情况, 控制层负责发布控制指令, 调光层在接收控制照明指令实施展示墙照明灯光亮度调节; 但是该系统未考虑视觉舒适度, 调节后展示墙照明灯光光

线过于亮, 导致应用效果较差。

眼睛是视觉采集主要器官, 每天接收海量数据, 视觉舒适度直接反映照明对人眼的影响情况, 营造舒适的视觉环境可提升人眼视觉幸福感^[8]。视觉舒适度设计展示墙智能化照明控制系统, 合理控制展示墙智能化照明, 提升展示墙智能化照明控制能力。笔者对展示墙智能化照明控制系统、POS 优化模糊自适应 PID 算法、PSO 算法优化参数 PID 初始值等进行论述, 同时进行了验证。验证结果表明, 它能提高观看者视觉舒适度, 更好展示展示墙中内容, 观看者的视觉体验感得到大幅度提升。

1 展示墙智能化照明控制系统

1.1 系统总体架构

为了提升展示墙智能化照明控制能力, 设计基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统, 系统总体架构, 如图 1 所示。按照模块划分整个系统, 基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统主要由数据采集模块、照明模块和数据传输等模块构成。电源模块为各模块提供能源支持, 数据采集模块通过照度传感器采集展示墙周围照度数据并通过

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-08-19

第一作者: 陈思宁(1972—), 女, 江苏人。

摄像头采集观看人员图像，将采集数据传输至数据处理和控制模块，在该模块对采集图像数据实施处理后，利用上位机软件整合相关数据计算工作，采用 POS 优化模糊自适应 PID 算法求出最优 PID 控制参数，利用 STM 控制器输出最优视觉舒适度展示墙智能化照明控制策略指令，通过数据传输模块将照明控制指令发送照明模块，照明模块接收照明亮度控制指令后，按照控制指令利用 LED 驱动器调节展示墙 LED 照明灯亮度，实现展示墙智能化照明自适应控制，提高展示墙观看者的视觉舒适度。

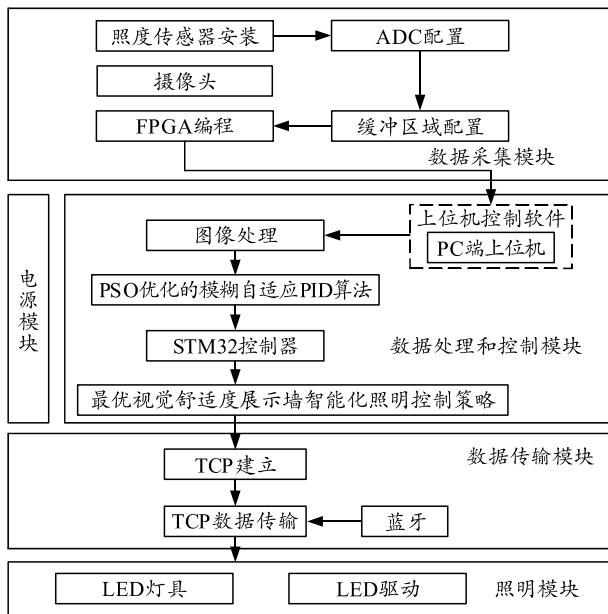


图 1 系统总体架构

1.2 数据采集模块设计

在数据采集模块中照度传感器作为该模块的核心硬件，其具体结构如图 2 所示。

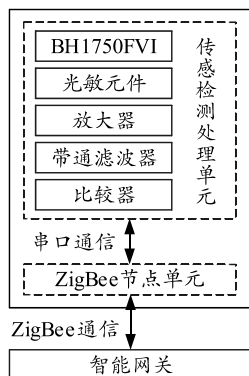


图 2 照度传感器结构

数据采集模块 FPGA 工作流程，如图 3 所示。连接 FPGA 引脚和 AD9280 引脚^[9-10]，配置 ADC 数据分辨率和设置输入电压区间，将采集数据储存在 FIFO 缓冲区域，驱动 AD9280 数模转换器启动照度

传感器采集数据^[11]。

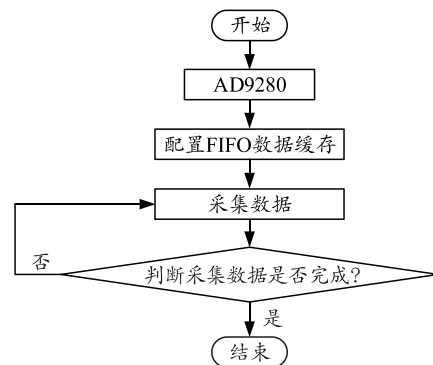


图 3 数据采集模块 FPGA 工作流程

1.3 数据处理和控制模块设计

1.3.1 控制器设计

STM32 作为数据处理和控制模块主要核心硬件，其结构如图 4 所示。

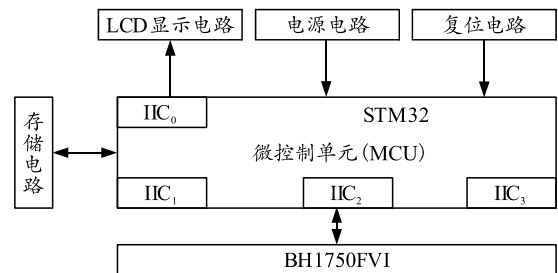


图 4 数据处理和控制模块硬件

由上图可知，数据处理和控制模块硬件主要包括 LCD 显示电路、电源电路和 STM32 等硬件。其中，选用内核 32 位的主频 75 MHz 的 STM32 芯片，该芯片具有运算效率高的优点^[12]，被广泛应用在数据处理中，提高数据处理能力。STM32 芯片包括微控单元和多个 IIC，通过不同通道 IIC 时序串口控制 BH175FV1，采集照度数据。

1.3.2 POS 优化模糊自适应 PID 算法

通过摄像头采集观看人员图像^[13]，经人眼检测算法检测出人眼，分割人眼区域实施数据处理后，由上位机负责计算瞳孔直径相对变化量。瞳孔直径相对变化量求解公式如下：

$$\text{瞳孔直径相对变化量} = \frac{\text{瞳孔直径}_{(第i+1帧)} - \text{瞳孔直径}_{(第i帧)}}{\text{虹膜直径}_{(第i帧)}} \quad (1)$$

在控制模块中^[14]，将瞳孔直径相对变化量作为控制器输入，采用 POS 优化模糊自适应 PID 算法求出最优 PID 控制参数，利用 STM 控制器输出最优

视觉舒适度展示墙智能化照明控制策略命令，控制照明模块调节展示墙照明灯光。

PID 控制利用实际值与计划值偏差实现控制，将控制器输出用 $\eta(\kappa)$ 描述，积分系数用 K_i 描述，PID 控制规律公式如下：

$$\eta(\kappa) = K_i \sum_{i=1}^{\infty} e(i) + K_p e(\kappa) + K_d [e(\kappa) - e(\kappa - 1)]。 \quad (2)$$

式中： K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； $e(\kappa)$ 为控制器输入； K_d 为微分系数。

当系统发生波动时，采用模糊自适应 PID 控制算法修正 PID 参数，完成视觉舒适度的展示墙智能化照明稳定控制。控制器输入为 e_c 、 e 分别表示偏差变化率、偏差，依据模糊规则^[15]，采用该规则计算出 PID 参数模糊值，依据模糊值计算出修正量，具体过程如下：

1) 构建隶属度函数。

控制器输出为 PID 系数(K_p 、 K_i 、 K_d)，输入为照明系统照度 e_c 、 e 的计划实际值，通过模糊化求出模糊子集 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。论域设置在 $[-6, 6]$ ，求出输出和输入隶属度函数。

2) 模糊规则如下：

① 若 $e_c * e = 0$ 同时 $|e|$ 存在时，表示系统有稳态误差，需要通过调节 ΔK_p 去除稳态误差，保障系统平稳。

② 若 $|e|$ 较大时，需降低系统误差和提升响应速度，需要通过增加 ΔK_p 同时降低 ΔK_d 实现照明调节。

③ 若 $e_c * e > 0$ 时，此时系统中存在误差增大的情况。如果 e 比较小时，需要通过降低 ΔK_p 、 ΔK_d ，降低响应速度保障系统稳定；如果 e 比较大时，提升 ΔK_p 、 ΔK_d 调节照明系统。

按照上述规则，通过模糊分析，自适应修正展示墙智能化照明控制系统中的 PID 参数(K_p 、 K_i 、 K_d)，其修正表达式为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_p &= \Delta K_p + K_{p_0} \\ \Delta K_i &= \Delta K_i + K_{i_0} \\ \Delta K_d &= \Delta K_d + K_{d_0} \end{aligned} \right\}。 \quad (3)$$

式中： ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为 PID 参数修正量； K_{p_0} 、 K_{i_0} 、 K_{d_0} 为 PID 参数初始值。

针对初始条件差的问题，通过粒子群算法优化 PID 参数修正，快速实现 PID 参数整定。基于 PSO 的模糊控制器结构如图 5 所示。

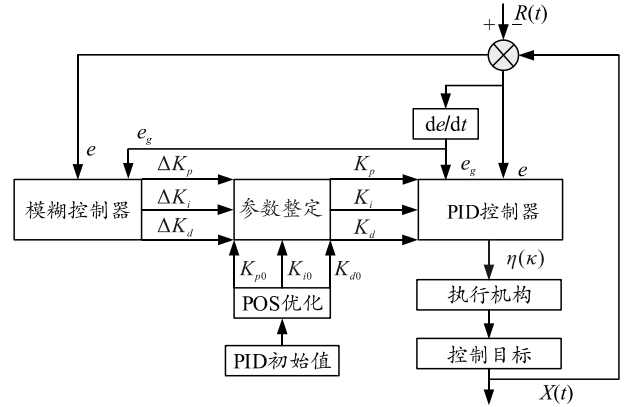


图 5 基于 PSO 的模糊控制器结构

由上图可知，当已知 PID 初始值时，采用 PSO 算法优化参数 PID 初始值，通过模糊控制器得出参数修正量，将优化参数 PID 初始值和参数修正量相加得出最优 PSO 参数，完成控制器参数整定。

2 采用 PSO 算法优化参数 PID 初始值

PSO 算法中适应度函数选取，时间乘绝对误差积分准则 (integral of time multiplied by the absolute value of error criterion, ITAE)，其具体表达式如下：

$$ITAE: H = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt。 \quad (4)$$

式中： $e(t)$ 为误差值； t 为总时间。

PSO 算法中选取 0.1 的最小适应值，种群维数和数量分别为 14、4，最大迭代数量是 200 次。PSO 优化 PID 参数的流程，如图 6 所示。

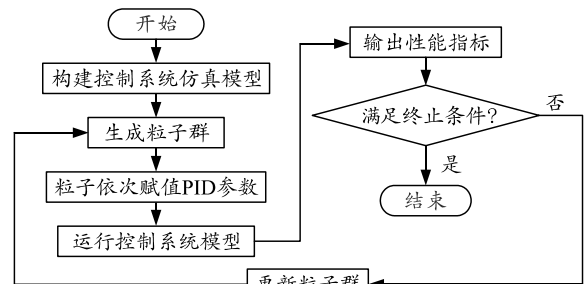


图 6 PSO 优化 PID 参数的流程

由上图可知，PSO 优化 PID 参数的过程：

- 1) 构建控制系统仿真模型；
- 2) 为了求出参数性能指标，需要将粒子对应赋值至 PID 参数，启动仿真模型可求出指标；
- 3) 按照适应度作为评价指标，判断所求指标能否满足终止条件。最后求出适应度函数和 PID 最优参数 $H=1.076$ 、 $K_p=0.252$ 、 $K_i=0.032$ 、 $K_d=0.047$ 。

通过整定后 PID 参数，求出最优视觉舒适度的展示墙智能化照明控制方案，实现展示墙智能化照明控制。

3 实验分析

为了检验系统的实际应用效果，将其应用在某历史展览馆的展示墙中。该历史展览馆总面积 16 500 m²，包括 3 个展厅，共有展示墙 1 260 块，主要展现我党发展历程，最多容纳 8 000 人，展馆采用 VR 全景技术，通过全景展示形式，多场景展示给观看者。在不同环境光源和展示墙照明亮度环境下，测试系统相关性能。

视觉舒适度主观评价标准，如表 1 所示。

表 1 视觉舒适度主观评价标准

等级	评分	视觉舒适度情况
1	1~25	测试者出现严重不舒适情况
2	26~50	测试者出现眼花情况
3	51~75	测试者明显出现不舒适情况
4	76~100	测试者没有不舒适情况

瞳孔直径作为视觉舒适度客观评价指标，随着瞳孔直径变小，视觉舒适度会随之升高。

系统中控制硬件 STM32 的外设资源，如表 2 所示。

表 2 STM32 的外设资源

资源名称	数量	资源名称	数量
通用 IO 口	62	串口	6
SPI	4	USB	4
定时器	3	I2C	8

通信模块蓝牙的主要参数，如表 3 所示。

表 3 通信模块蓝牙参数

名称	取值	名称	取值
参考距离/m	100	通信电平/V	3.5
工作频率/G	6	电流/A	10
接收灵敏度/dBm	-90	电压/V	2.0~3.8
传输速率/Mbps	3		

观测者需要站在展示墙前面，在展示墙照明调光为 100%时，得出观测者在 0 环境光源(A 组关灯)与 10%环境光源(B 组开灯)下的视觉舒适度测评结果，如图 7 所示。

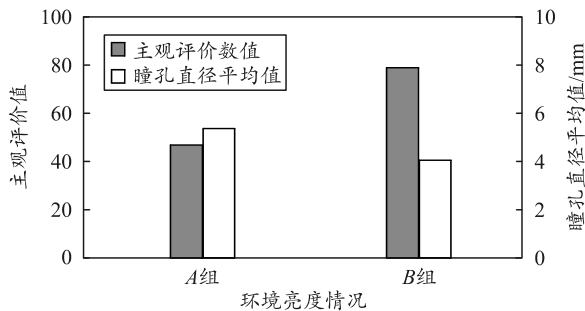


图 7 不同环境亮度下视觉舒适度结果

分析上图可知：B 组主观评价价值高于 A 组主观评价价值，同时瞳孔直径低于 A 组瞳孔直径。在 10%

光源(B 组开灯)时，视觉舒适度比较高，在 0 光源(A 组关灯)，展示墙调光为 100%，观看者的视觉舒适度变低。

在 80%环境光源条件下，展示墙照明调光为 100%(C 组)、展示墙调光为 65%(D 组)得出观测者视觉舒适度测评结果，如图 8 所示。

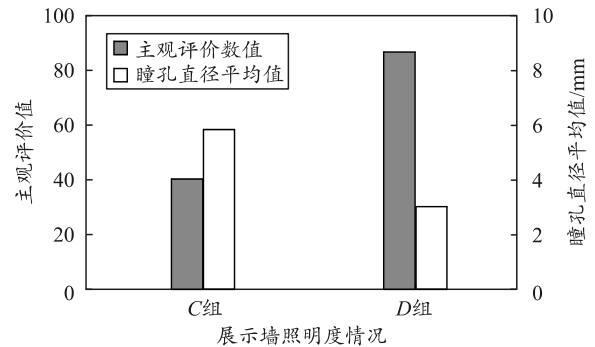
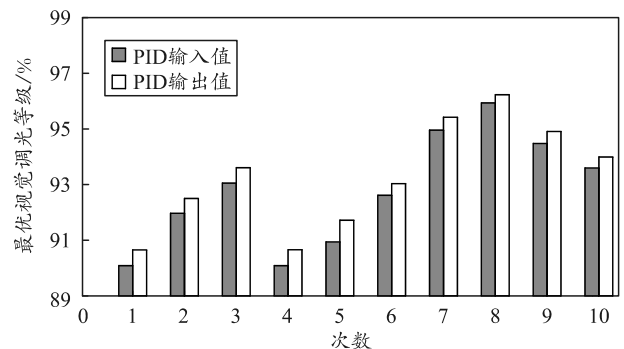


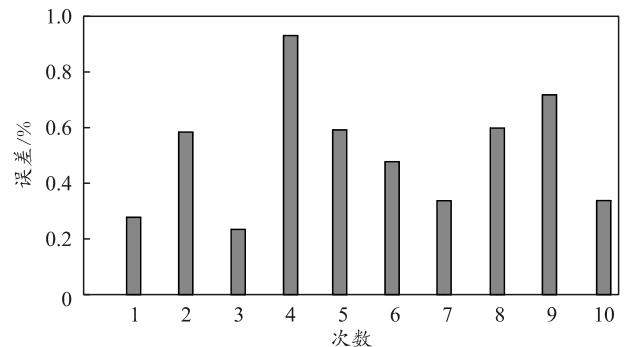
图 8 不同展示墙照明亮度下视觉舒适度结果

分析上图可知：在相同环境光源条件，展示墙调光为 65%(D 组)的主观评价价值高于 C 组主观评价价值，同时瞳孔直径低于 C 组瞳孔直径。由此表明，展示墙照明调光为 65%优于展示墙照明调光为 100%，较低的展示墙照明亮度会提升观看者视觉舒适度。

为验证系统控制精度，测试系统在展示墙照明控制中某时刻下展示墙智能化照明控制测试结果，如图 9 所示。



(a) PID 输入与 PID 输出值



(b) 相对误差

图 9 系统展示墙智能化照明控制测试结果

分析上图可知：系统采用 POS 优化模糊自适应 PID 算法得出展示墙智能化照明控制的 PID 输出值和输入相对误差较小，在第 4 次测试时，相对误差最高是 0.982%，同时 10 次测试的平均相对误差为 0.525%，说明系统可有效控制展示墙照明，其控制精度较高，提升视觉舒适度，同时实现智能控制展示墙照明。

系统调光界面如图 10 所示。

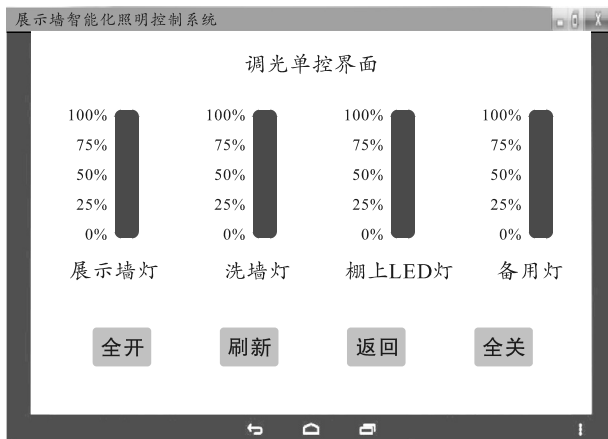


图 10 本文中系统的调光控制界面

由上图可知：系统的调光控制界面设计比较简单，其功能比较全面，通过系统智能化调节该历史展览馆的全部灯光，可提高观看者视觉舒适度，更好展示展示墙中内容，历史展览馆观看者的视觉体验感得到大幅度提升。

4 结束语

因展示墙照明效果不佳会直接影响观看者视觉体验感，因此设计基于视觉舒适度的展示墙智能化照明控制系统，提高展示墙智能化照明控制精度。实验结果表明：该系统能够在不同光线条件下，完成展示墙智能化照明控制，且应用效果较好。该系统的调光控制界面设计简单，功能比较全面，通过该系统智能化调节该历史展览馆的全部灯光，提高观看者视觉舒适度，更好展示展示墙中内容。

参考文献：

[1] 胡莹. 图标设计要素对视觉注意和舒适度的影响研究[J]. 包装工程, 2021, 42(6): 232-238.

- [2] 高淑芝, 李天池. 基于单片机的教室照明智能控制系统设计[J]. 控制工程, 2020, 27(11): 2010-2015.
- [3] 李柯, 刘珊中, 韩鹏娜. 基于安全方程的智能前照灯控制系统设计[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(2): 120-125.
- [4] 张军朝, 薛帅, 侯瑞, 等. 基于 LED 光色动态可调的隧道照明控制系统研究[J]. 电子器件, 2021, 44(1): 242-249.
- [5] 王智德, 袁景玉, 刘晓健, 等. 基于 Kinect 体感动作识别的室内照明自主控制系统[J]. 现代电子技术, 2021, 44(14): 143-146.
- [6] 李卓, 曹校勇, 李弘博, 等. 基于 LoRa 物联网的公路隧道按需照明控制系统[J]. 公路, 2022, 67(5): 298-302.
- [7] 蒋涵元, 宋万军, 白龙, 等. 基于 VPLC 的工业智能照明控制系统的设计和开发[J]. 控制工程, 2022, 29(10): 1916-1920.
- [8] 李准, 耿龙海, 郭永刚. 基于物联网的“两光源互补”隧道照明智能控制系统设计[J]. 公路, 2020, 65(7): 326-330.
- [9] ROMERO R W, BALTAZAR R, VALADEZ J, et al. A novel model for optimization of Intelligent Multi-User Visual Comfort System based on soft-computing algorithms[J]. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2021, 13(2): 1-22.
- [10] 周华安, 郑瑶, 何湘桂. 城市道路照明自适应节能控制算法与监控系统[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(8): 19-26.
- [11] ROMERO A L, MARÍN C A, JIMÉNEZ B J A. ZigBee & Wi-Fi interconnectivity model for controlling an intelligent LED lighting system using IoT[J]. Inge CUC, 2021, 17(1): 146-155.
- [12] MUTUA P W, MBUTHIA M. Intelligent Multi-coloured Lighting System Design with Fuzzy Logic Controller[J]. APTIKOM Journal on Computer Science and Information Technologies, 2020, 1(3): 128-140.
- [13] DORU A, KOYMAT N, CVELEK Z. Fuzzy-Logic Controller for Energy Saving in A Smart LED Lighting System Regarding Lighting Comfort and Sunlight in Commercial Buildings[J]. Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi, 2021, 13(1): 22-31.
- [14] 薛培, 官剑, 邵春伟, 等. 基于 FPGA 的 SRIO 多通道控制系统设计与实现[J]. 电子技术应用, 2023, 49(1): 107-113.
- [15] 胡聪娟, 徐琴. 基于智能视觉的电机自动控制仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12): 188-192.