

基于双模糊控制的智能窗帘电机速控锁光算法^①



张 雨, 胡笑钊, 徐如梦, 范子祎, 赵 亮, 惠 洋

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

通讯作者: 胡笑钊, E-mail: huxc@chd.edu.cn

摘 要: 本文针对智能窗帘控制系统在实际使用过程中的抗干扰性和鲁棒性要求, 在传统 PID 调节的基础上, 设计了一种用于智能窗帘系统自动锁光的双模糊控制算法, 通过对直流电机输入电压和输出转速的双重模糊控制, 系统能够依据室内光照强度自动、稳定、快速的控制窗帘开合, 进而完成室内光照强度的精准调节, 实现智能窗帘系统的锁光控制. 通过 Matlab 中的 Simulink 和模糊控制器模块建立该系统的数学模型, 以验证双模糊控制算法的可行性. 实验结果表明, 该算法可依据区域光照条件的改变实时调整电机的转速与转向, 具有调节时间短、灵敏度高、精确度高等特点, 能够完成通过窗帘调节室内光照强度的最佳控制.

关键词: 模糊控制; PID 调节; 电机精准调速; 智能窗帘; Simulink 仿真

引用格式: 张雨, 胡笑钊, 徐如梦, 范子祎, 赵亮, 惠洋. 基于双模糊控制的智能窗帘电机速控锁光算法. 计算机系统应用, 2020, 29(12): 210-215. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7676.html>

Double Fuzzy Control Algorithm for Automatic Light Locking of Intelligent Curtain by Motor Speed Control

ZHANG Yu, HU Xiao-Chuan, XU Ru-Meng, FAN Zi-Yi, ZHAO Liang, HUI Yang

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In this study, a double fuzzy control algorithm for automatic light locking of intelligent curtain system is designed on the basis of traditional PID regulation, aiming at the requirements of anti-interference and robustness of intelligent curtain control system in practical use. Using the double fuzzy control to the input voltage and output speed of the DC motor, the system can automatically, steadily, and quickly control the curtain opening and closing according to the indoor light intensity, and then complete the accurate adjustment of indoor light intensity, and realize the light locking function of the intelligent curtain system. The mathematical model of the system was established by Simulink and fuzzy controller module in MATLAB to verify the feasibility of the double fuzzy control algorithm. The experimental results show that the algorithm can adjust the speed and steer the motor in real time according to the change of regional light conditions, and it has the characteristics of short adjustment time, high sensitivity, and high precision, and can achieve the optimal control of adjusting the indoor light intensity through curtains.

Key words: fuzzy control; PID adjustment; precise control of motor speed; intelligent curtain; Simulink simulation

在智能技术不断发展创新的今天, 智能家居受到了广泛关注和使用的, 智能窗帘作为智能家居中必不可少的部分, 极大影响着室内生活环境和居家生活品

质^[1-3]. 除解放双手、感应开合外, 各种各样的拓展功能如防盗报警、远程控制等, 在很大程度上满足了人们对极致生活的追求, 成为了居家生活不可或缺的好帮手.

① 基金项目: 国家自然科学基金 (11705014); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2019JQ-687)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11705014); Fundamental Research Program of Natural Science of Shaanxi Province (2019JQ-687)

收稿时间: 2020-04-07; 修改时间: 2020-04-28; 采用时间: 2020-05-10; csa 在线出版时间: 2020-11-30

目前市场上生产的智能窗帘在使用中仍存在较大弊端,其反应、调节、控制的时间跨度较大,整体的控制效果受天气等自然因素影响,窗帘系统的抗干扰能力和稳定性也较差^[4-8].因此,找到一种更加智能化、自动化、灵敏化,同时具有较强鲁棒性的方式来控制家用窗帘已经成为大势所趋.

基于此,本文提出一种能够实时检测室内光照强度,并依据人体最适宜的环境标准自动调节被控窗帘开合程度的新型智能锁光窗帘控制算法,将模糊控制算法与模糊自适应控制算法相结合并应用到锁光系统中^[9-13],使其具有可实时调节窗帘位置、保证室内采光充足、调节速率快、自动控制等优点,极具市场价值.

1 整体控制方案

本文设计的智能锁光窗帘控制系统使用的主控芯片为STC32F1,外接有电机运动控制、电机驱动、智能检测、液晶显示4个主要模块,其整体功能框图如图1所示.

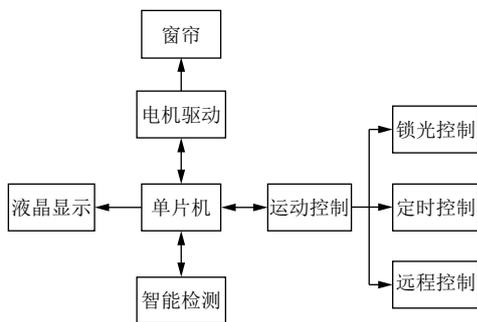


图1 整体功能框图

图1中,电机运控模块共有3种基础控制方式,分别为定时控制,锁光控制和远程控制.其中,定时控制可根据定时打开或关闭窗帘,锁光控制可自动将室内光强锁定在最优状态,远程控制可利用手机软件远程控制窗帘开闭.本文将基于双模糊控制的锁光控制方式的优化算法进行详细阐述.

2 光控系统模型构建

假定室内宜居光照强度为 φ_0 ,阳光通过窗户无遮挡射入室内的面积为 S (S 可表征窗帘的开合程度),光照传感器在采集频率 f 下得到 t 时刻室内光强为 $\varphi(t)$,光照强度的必要调整值为 $e_\varphi(t)$,光照强度必要调整值的变化率为 $ec_\varphi(t)$,直流电机在 t 时刻的输入电压为 $u(t)$,对

应的转速为 $n(t)$.容易得到 $e_\varphi(t)$ 和 $ec_\varphi(t)$ 的表达式如式(1)所示.

$$\begin{cases} e_\varphi(t) = \varphi_0 - \varphi(t) \\ ec_\varphi(t) = e_\varphi(t) - e_\varphi(t-1) \end{cases} \quad (1)$$

改变直流电机的输入电压,电机转速会随之产生规律性变化,故选择调节 $u(t)$ 的方式来控制系统.以 $e_\varphi(t)$ 和 $ec_\varphi(t)$ 为输入、 $u(t)$ 为输出建立双输入单输出的模糊控制器FC,最终得到的输出曲线即为 $u(t)$ 的变化方式.不同的输入电压可使直流电机产生不同的转速,并通过加入PID控制的方式,使电机转速迅速达到理想转速.

而当 $u(t)$ 具有时变性、不确定性和非线性特性时,若要求 $n(t)$ 迅速到达当前电压 $u(t_x)$ 对应的转速 $n(t_x)$,普通的PID控制往往难以调节的十分精准,故将其替换为模糊自适应PID控制器F,从而在最短时间内令 $n(t) = n(t_x)$.

图2为光控系统模型的执行机构.可以看出,通过改变 $u(t)$ 智能调节 $n(t)$,进而改变 S 的大小;通过改变 S 对 $\varphi(t)$ 进行必要的调整,同时使 $e_\varphi(t)$ 趋零.当 $e_\varphi(t) = 0$ 时(即 $\varphi(t) = \varphi_0$ 时), $S = S_{best}$, $u(t) = 0$, $n(t) = 0$,室内光强达人体最宜居状态.

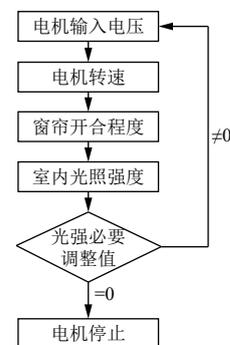


图2 模型的执行机构

3 设计模糊控制器

图3所示为模糊控制系统的工作机理.在模糊控制系统中,传感器将采集到的物理量转换为连续的电信号,由A/D转换器将这种电信号变为精确的数字量,同时与给定值进行比较,得到偏差 e 输入到模糊控制器中.偏差 e 经模糊化处理为模糊集合 E ,根据既定规则对集合 E 进行模糊推理可得模糊控制量 U ,解模糊后得精确输出 u .用D/A转换器将输出 u 转换为模拟

量, 并通过相应的执行机构作用于被控对象, 使其准确地、快速地达到期望状态。

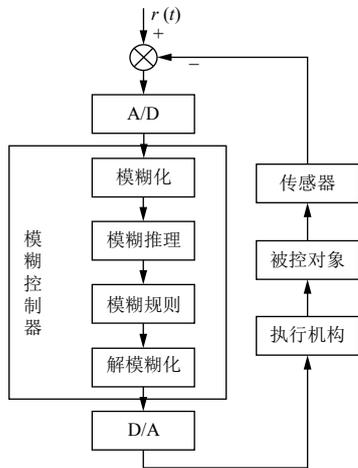


图3 模糊控制流程

3.1 模糊控制器 FC

设定室内最宜居光强为200 lx, 室内可达到的最大光强值为400 lx, 最小值为0, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \varphi_0 = 200 \text{ lx} \\ \varphi_{\max}(t) = 400 \text{ lx} \\ \varphi_{\min}(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 则有:

$$\begin{cases} e_{\varphi}(t) \in [-200, 200] \\ ec_{\varphi}(t) \in [-400, 400] \end{cases} \quad (3)$$

将 $e_{\varphi}(t)$ 模糊化为 Ex , 取论域为 $[-200, 200]$; 将 $ec_{\varphi}(t)$ 模糊化为 Ec_x , 取论域为 $[-400, 400]$. 两个输入均设定3个语言值P、O、N.

直流电机的电枢电压计算公式为:

$$U = C_e \phi n + I_a R_a + 2 \Delta U_s \quad (4)$$

式中, ΔU_s 为电刷压降, I_a 为电枢电流, R_a 为电枢绕组电阻, C_e 为电机常数, ϕ 为电机气隙磁通. 由式(4)可知, $u(t)$ 与 $n(t)$ 呈线性关系. 若电机正转可打开窗帘, 则当 $e_{\varphi}(t) > 0$ 时, 可令 $u(t) > 0$, 趋使 $n(t) > 0$, 达到电机正转、 S 增大的目的; 同理, 当 $e_{\varphi}(t) < 0$ 时, 可令 $u(t) < 0$, 趋使 $n(t) < 0$, 电机反转.

将 $u(t)$ 模糊化为 U 作为控制器的输出, 论域为 $[-15, 15]$, 设定3个语言值P、O、N. 模糊控制器FC的输入输出关系设置如图4, 解模糊的算法采用Mamdani推理法^[14,15].

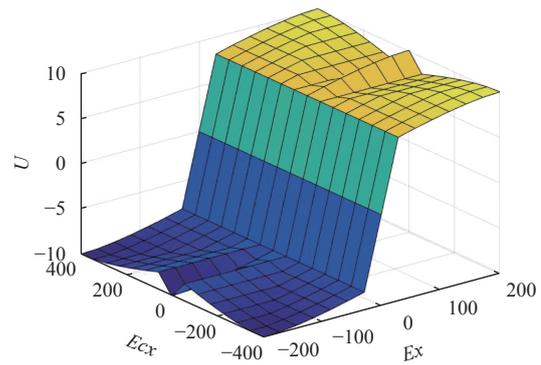
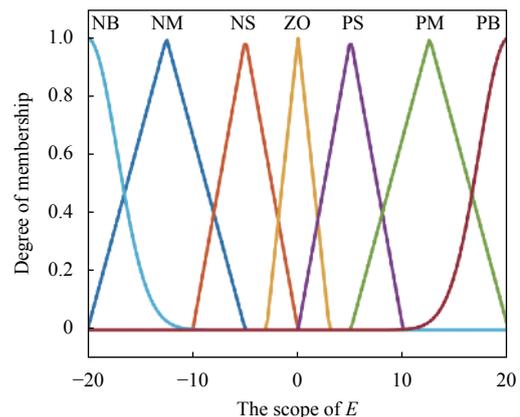


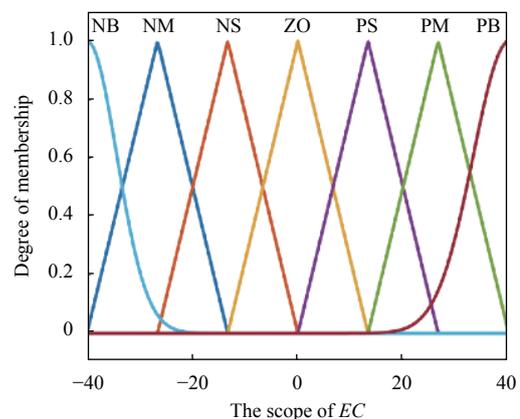
图4 控制器FC输入输出关系

3.2 模糊PID控制器 F

将 $n(t)$ 对应的反馈电压 $u_{\alpha}(t)$ 与输入电压 $u(t)$ 的差值 e 及差值变化率 ec 模糊化为 E 、 EC 作为控制器的输入. 论域为 $[-20, 20]$ 和 $[-40, 40]$, 模糊化后的子集 E 、 $EC = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 图5为 E 、 EC 的隶属函数曲线.



(a) E 隶属函数曲线



(b) EC 隶属函数曲线

图5 E、EC 隶属函数曲线

输出为PID控制器3个参量 K_p 、 K_i 、 K_d 必要变化的模糊量 K_p 、 K_i 、 K_d , 且 K_p 、 K_i 、 $K_d = \{NB, NM,$

NS, ZO, PS, PM, PB}, 设置论域为 [-3, 3]、[-1, 1]、[-0.05, 0.05]. 其隶属函数选择为三角函数.

在建立模糊规则时需要考虑, E 变大时向减小 E 的方向调节, E 变小时保持系统稳定. 如在系统调节初期, 当实际值比标定值小很多且仍在不停的以远离标定值的方式变小的情况下, 为将实际值拉回, 必须大幅增加 K_p 以加快调节, 大幅减小 K_i 以使系统获得较快的动态响应, 同时适当增大 K_d 减少不必要的超调量. 上述描述可用模糊条件语句表示为 if $E=NB$ and $EC=NB$ then $K_p=PB$ and $K_i=NB$ and $K_d=PS$. 表 1~表 3 为控制器 F 具体的 49 条模糊规则.

表 1 K_p 模糊控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 模糊控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	PB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 模糊控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	ZO	PM	PM	PM	PS	PS	PB

4 搭建算法框架

模糊控制器 FC、F 设计完成后, 将其与软件算法结合, 得到锁光控制方式的优化算法. 系统在接收到用户的设置信号或到达智能调整时间时, 将自动运行模糊算法进行控制系统中参数的自调整, 实现对室内光

照强度的调节.

如图 6, 将模糊规则表、输入输出论域与隶属函数写入 STM32 核心控制芯片的存储器中, 保证控制器在参数整定时可直接对模糊规则表进行寻址确定输出.

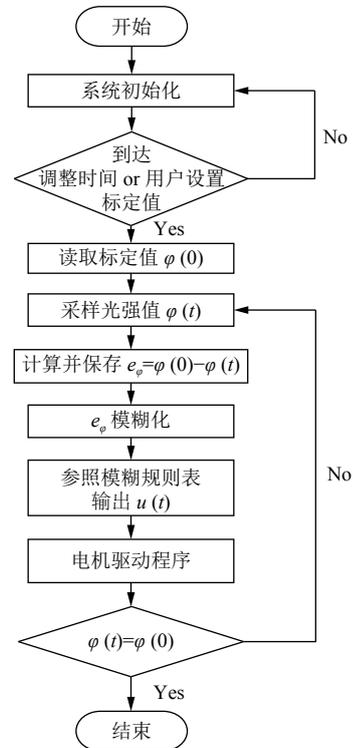


图 6 压控阶段算法

按照设定的采样频率 f , 传感器将定时对其控制区域的光强进行采样, 经 IIC 总线传输至单片机得到当前光强值 $\varphi(t)$, 单片机计算 $\varphi(t)$ 与标定值 φ_0 的差值并将其作为控制器 FC 的输入, 进而得到电压值 $u(t)$ 的必要变化.

系统采集 $u_\alpha(t)$ 与 $u(t)$ 对比产生差值并作为控制器 F 的输入, 进而确定 PID 控制 3 个参量的必要变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 并对单片机输出的 PWM 脉冲信号即时调整, 直到 $u_\alpha(t) = u(t)$, 完成窗帘的自适应锁光调整, 如图 7 所示.

5 Simulink 仿真分析

直流电机的电压平衡方程为:

$$U - E = RI + L \frac{dI}{dt} = R \left(I + T_l \frac{dI}{dt} \right) \quad (5)$$

式中, $E = C_e n$ 为电动机在额定励磁下产生的反电势. 在零初始条件下, 对式 (5) 进行拉普拉斯变换, 可得如

下表达式:

$$\frac{I(s)}{U(s)-E(s)} = \frac{1/R}{T_L s + 1} \quad (6)$$

直流电机的转矩平衡方程为:

$$\begin{cases} T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \\ T_e = C_m I, T_L = C_m I_L \end{cases} \quad (7)$$

式中, T_e 为额定励磁下的电磁转矩, T_L 是包括电机空载转矩在内的负载转矩, I_L 为负载电流, GD^2 为飞轮惯量, $C_m = 30\% C_e$. 整理式(7)并求其零状态下的拉氏变换, 可得到:

$$\frac{E(s)}{I(s) - I_L(s)} = \frac{R}{T_m s} \quad (8)$$

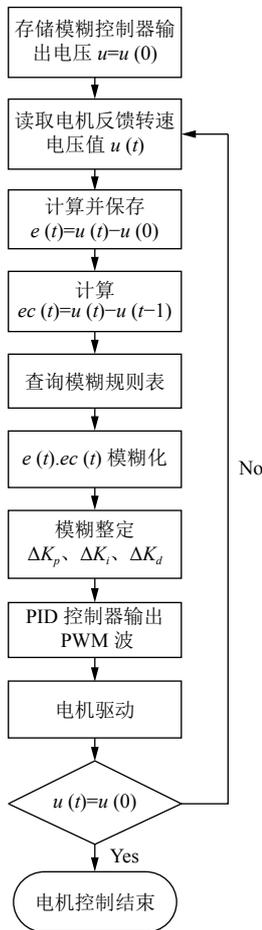


图7 速控阶段算法

选定直流电机的参数如表4所示^[16-21]. 表4中 U_N 为额定电压, I_N 为额定电流, n_N 为额定转速, C_e 为反电动势系数, R_a 为电枢回路总电阻, T_l 为电枢电路电磁时间常数, T_m 为电力拖动系统时间常数, α 为转速反

馈系数根据式(6)、式(8)及表4各项参数可建立直流电机的 Simulink 模型如图8所示. 在该模型的基础上搭建整个光控系统的模型并进行双模糊控制算法的仿真测试.

表4 直流电机参数

参数	U_N	I_N	n_N	C_e	R_a	T_l	T_m	α
值	400 V	52.2 A	2610 r/m	0.1459	0.368 Ω	0.0144 s	0.18 s	0.00383

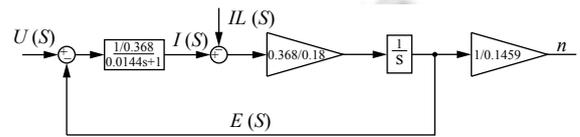


图8 直流电机仿真模型

图9为使用 Simulink 中的 Signal Builder 模拟传感器采集到的数据. 预设光强标定值 $\varphi_0 = 20$ lx, 传感器实时采集当前光强 $\varphi(t)$ 的变化情况如图9所示, 计算出 $e_\varphi(t)$ 和 $ec_\varphi(t)$ 并模糊化作为模糊控制器 FC 的输入, 输出曲线如图10所示.

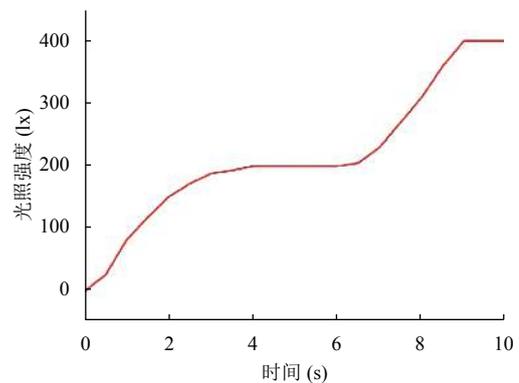


图9 传感器数据曲线

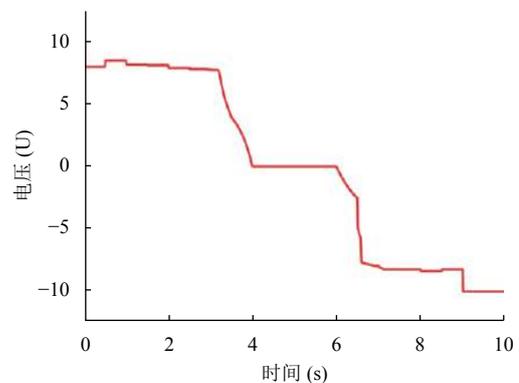


图10 $u(t)$ 变化曲线

对比图 9、图 10 可得, $|e_{\varphi}(t)|$ 越大, 对应的 $|u(t)|$ 越大; 而当 $|e_{\varphi}(t)| = 0$ 时, $|u(t)| = 0$ 。因此, 该控制器可根据区域光强变化精准调节直流电机输入电压。

以图 10 所示曲线控制电机变速, 分别使用 PID 控制器与模糊 PID 控制器 F 控制图 8 中的电机模型, 得到 $n(t)$ 的变化情况为图 11、图 12。

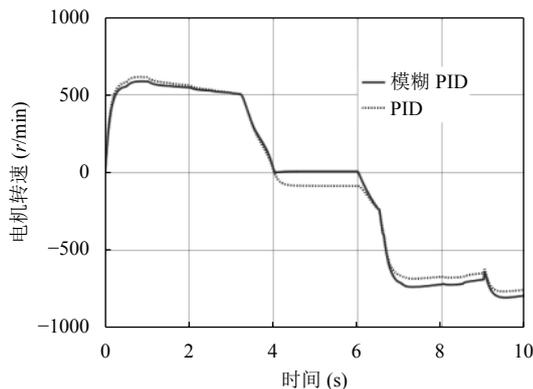


图 11 $n(t)$ 变化曲线 (空载)

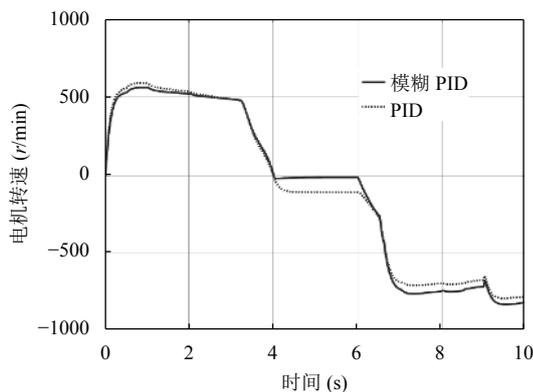


图 12 $n(t)$ 变化曲线 (带载)

可以看到, 用普通 PID 的方式调节 $n(t)$ 会产生明显的偏差, 使 $e_{\varphi}(t)$ 趋零的调整时间过长, 而使用模糊 PID 控制器则更加快速、准确。

6 结论

本文设计并实现了一种应用于智能窗帘锁光控制的双模糊控制算法, 该算法能在当前光照强度及其偏差值不断变化的情况下, 实时对锁光系统的参数进行调整, 并得到准确的系统反馈值, 及时修正调整过程中的偏差, 保证了控制过程的快速与准确, 具有很好的应用前景和市场价格。

参考文献

- 1 吴彦群. 智能窗帘悄然兴起. 致富时代, 2010, (4): 57.
- 2 曹显阳, 郭权龙, 杨其金, 等. 自动窗帘控制系统设计. 科技创新与应用, 2020, (6): 112–113.
- 3 Wong A, Tay Z, Ng J, *et al.* Designing smart homes for families in singapore-integrating smart home technology into daily living of elderly. Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics. Beijing, China. 2009. 1–2.
- 4 周敬. 基于单片机的窗帘智能控制系统设计. 天津科技, 2010, 37(2): 58–60.
- 5 刘丹, 李钦晓, 费心越. 家居环境感光窗帘智能控制与调节系统. 仪器仪表用户, 2014, (1): 54–58.
- 6 周宁, 郑颖. 基于单片机的温控光控智能窗帘设计探讨. 南方农机, 2019, 50(4): 144.
- 7 郝海燕, 董胜豪. 基于单片机的智能窗帘系统设计. 科技风, 2020, (9): 10.
- 8 韦发清, 杨永源, 赵芝杰, 等. 基于 ESP8266WiFi 模块的智能窗帘设计与实现. 电子世界, 2020, (1): 135–136.
- 9 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011. 288.
- 10 宋伟, 李武君. 模糊 PID 控制系统设计及 MATLAB 仿真. 云南化工, 2019, (9): 156–157.
- 11 刘光星, 贺刚, 张毅. 模糊 PID 控制在电机调速系统中的应用. 电子测试, 2019, (2): 21–23.
- 12 赵雨境, 孙建达. 基于模糊 PID 的窗帘自动控制系统设计. 闽江学院学报, 2018, 39(2): 40–47.
- 13 张卫钢, 马红艳, 邱瑞, 等. 模糊 PID 控制算法在窗帘控制中的应用. 计算机系统应用, 2014, 23(11): 155–159.
- 14 姚松, 蒋念平. 基于模糊控制理论的 PID 控制器的仿真研究. 计算机系统应用, 2011, 20(10): 125–128.
- 15 苏兴华. 基于模糊控制理论的 PID 控制器设计. 中国管理信息化, 2019, 22(3): 136–139.
- 16 宋绍楼, 丁永峰, 范永锋. 三相异步电机的模糊自适应 PID 控制系统. 计算机系统应用, 2012, 21(7): 120–123.
- 17 Somwanshi D, Bunde M, Kumar G, *et al.* Comparison of fuzzy-PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW. Procedia Computer Science, 2019, 152: 252–260. [doi: 10.1016/j.procs.2019.05.019]
- 18 张琪, 雷良育, 刘国辉, 等. 基于 MATLAB 的直流电机特性测试. 邵阳学院学报 (自然科学版), 2019, 16(3): 47–50.
- 19 杨晓玫, 彭程, 吴高峰, 等. 基于 Matlab 的无刷直流电机控制算法建模与仿真. 系统仿真技术, 2019, 15(2): 120–125.
- 20 高斌, 惠力. 直流电机转速测量与平稳性分析. 中国科技信息, 2019, (6): 62–64.
- 21 张国栋, 祁瑞敏. 无刷直流电机模糊 PID 控制系统设计与仿真. 煤矿机械, 2018, 39(1): 13–15.