

消毒机器人直流电机转速模糊 PID 控制研究

王 栋, 张 军, 齐 潘, 邹看看

安徽理工大学 人工智能学院, 安徽 淮南 232001

摘 要:目的 针对传统 PID(Proportional-Integral-Derivative)控制的消毒机器人, 在环境变化或有负载干扰情况下, 存在直流电机转速精准度不足的问题, 提出一种模糊 PID 控制方法, 旨在提高消毒机器人电机响应速度和电机转速精准度。方法 基于消毒机器人模型, 根据运动学原理求解其电机参数, 确定直流电机模型; 根据直流电机模型采用基尔霍夫定律计算出电机的传递函数, 利用 MATLAB/Simulink 搭建传统 PID 控制系统, 通过仿真得到转速结果将其与电机额定转速相比以验证传递函数的正确性, 同时运用模糊控制理论结合电机传递函数搭建模糊 PID 控制系统; 在 MATLAB/Simulink 中将传统 PID 控制系统与模糊 PID 控制系统对电机转速控制的影响进行对比仿真实验。结果 实验结果显示: 当消毒机器人电机有负载干扰时, 模糊 PID 控制系统相比传统 PID 控制系统在电机响应速度上提高了 3 s, 在电机精准度方面提高了 8%; 消毒机器人模糊 PID 控制系统能够有效提高电机响应速度, 提升电机转速精准度。结论 在复杂情况下, 模糊 PID 控制系统能够有效提高直流电机响应速度和电机转速精准度, 模糊控制方法对电机转速的研究提供了参考, 为消毒机器人电机控制研究提供了思路, 在消毒机器人电机控制领域具有广泛的应用前景。

关键词:消毒机器人; 直流电机; 传递函数; PID; 模糊 PID 控制

中图分类号:TP242; TM33; TP273.4 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0006.002

Research on Fuzzy PID Control of DC Motor Speed in Disinfection Robots

WANG Dong, ZHANG Jun, QI Pan, ZOU Kankan

School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

Abstract: **Objective** In disinfection robots employing traditional PID (proportional-integral-derivative) control, the accuracy of DC motor speed is often insufficient when the environment changes or there is load interference. To address this issue, a fuzzy PID control approach is proposed to enhance the response speed and accuracy of the motor speed in disinfection robots. **Methods** Starting from the disinfection robot model, the parameters of the robot's motor are derived based on kinematic principles, thereby establishing the DC motor model. Using Kirchhoff's law, the transfer function of the motor is calculated according to the DC motor model. A traditional PID control system is constructed in MATLAB/Simulink, and the motor speed is simulated. The correctness of the transfer function is verified by comparing the simulated speed with the rated speed of the motor. Meanwhile, a fuzzy PID control system is developed by integrating fuzzy control theory with the motor transfer function. A comparative simulation is conducted in MATLAB/Simulink to evaluate the effects of the traditional PID and fuzzy PID control systems on motor speed control. **Results** Experimental results indicate that under load interference, the response speed of the motor in the fuzzy PID control system is 3 s quicker than that in the traditional PID control system, and the motor speed accuracy is improved by 8%. The fuzzy PID control system in

收稿日期:2023-11-30 修回日期:2024-01-16 文章编号:1672-058X(2025)06-0009-08

基金项目:安徽理工大学研究生创新基金(2023CX2187);国家自然科学基金资助项目(51175005)。

作者简介:王栋(1996—)男,辽宁大连人,硕士研究生,从事消毒服务机器人研究。

通信作者:张军(1963—)男,福建漳州人,博士,教授,硕士生导师,从事康复机器人研究。Email:zhj63@163.com。

引用格式:王栋,张军,齐潘,等. 消毒机器人直流电机转速模糊 PID 控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(6): 9-16.

WANG Dong, ZHANG Jun, QI Pan, et al. Research on fuzzy PID control of DC motor speed in disinfection robots[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 9-16.

disinfection robots can effectively boost the motor's response speed and enhance its speed accuracy. **Conclusion** In complex scenarios, the fuzzy PID control system can significantly improve the response speed and accuracy of DC motors. The fuzzy control method serves as a valuable reference for motor speed research and provides insights for the development of motor control in disinfection robots. It holds great promise for wide-ranging applications in the field of disinfection robot motor control.

Keywords: disinfection robot; DC motor; transfer function; PID; fuzzy PID control

1 引言

随着科学技术的飞速发展,消毒机器人开始越来越多地被应用。设计一种可以自主消毒的机器人具有重要的研究价值和市场前景^[1]。消毒机器人是一种可以自动进行消毒的智能机器人,它可以根据使用者的要求,在学校、医院、商场等公共区域自主巡视^[2-3],并且使用喷雾等手段对空气和物体表面进行消毒,以起到保护身体健康的作用。消毒机器人的研究对于提高卫生安全、工作效率,减少人工风险,实现智能化管理以及推动机器人技术发展具有重要意义,对于保护人类健康和提升生活质量有着积极的影响。其中,直流电机是消毒机器人运动控制的关键组件之一。

Ziegler^[4]提出一种最古老和最简单的整定 PID 控制器方法,然而,这种调整方法建立时间过长,每个增益必须进行频繁调整。Cohen 等^[5]提出一种方法,该方法也可用于选择比例增益(K_p)、积分增益(K_I)和微分增益(K_D)的值,但其使用范围有限,只能用于死期滞后的某些类型设备。这两种方法的主要缺点是所有计算的增益都是常数,不能在线重构。Sánchez-López 等^[6]提出一种忆阻器 PID 控制设计,该方法缺点在于:当有负载变化时,电压信号是不稳定的,必须针对每个特定问题进行调整。PID 控制器的最佳性能是有限的,而且还需要有效和高效的在线调整机制。为了减少频繁的参数调整,降低负载对控制器的影响,可以通过模糊控制的方法实现。

传统电机控制主要是 PID 控制,但是当电机受负荷扰动影响以及环境变化时,电机转速控制精度降低^[7]。传统 PID 控制算法将被控对象的给定值 r 与被控对象的实测值之间的误差 e 作为控制器的输入量,经过比例、积分、微分运算后得到系统控制量 u ^[8-10]。模糊 PID 控制算法是通过模糊控制的模糊推理对 PID 参数值进行实时自整定,调节 PID 参数,以达到良好的控制效果^[11-12]。文中仿真实验基于消毒机器人模型搭建,根据消毒机器人电机的传递函数,在 MATLAB/Simulink 中建立传统 PID 控制系统和模糊 PID 控制系统,将两种控制系统进行仿真实验对比。实验表明:模

糊 PID 控制系统相比于传统 PID 控制系统,电机响应速度更快,稳定性和鲁棒性更好。

2 电机选择与传递函数设计

2.1 电机选择

文中研究的直流电机模糊 PID 控制是基于消毒机器人电机,消毒机器人模型如图 1 所示。该消毒机器人可应用于商场、学校、医院等室内场所。

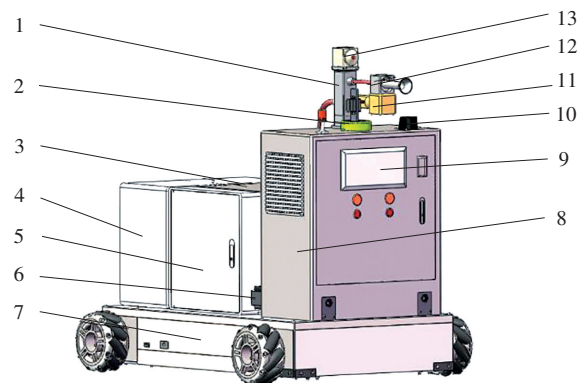


图 1 消毒机器人模型

Fig. 1 Disinfection robot model

1—消毒液抽水器; 2—消毒喷雾器旋转基台; 3—消毒液箱体; 4—大型医药物品储存箱; 5—小型医药物品储存箱; 6—直流线性滑轨; 7—移动底盘; 8—控制箱; 9—机器人屏幕; 10—雷达; 11—消毒喷雾器上下摇臂; 12—消毒喷雾器; 13—摄像头。

根据该消毒机器人的承载要求、制造成本等原因,其采用的电机为直流有刷电机。直流有刷电机相比于其他类型的电机(如无刷电机),具有以下几个优点:

(1) 较高的启动扭矩。有刷电机可以在较低的电流下提供较高的启动扭矩,这使得它们非常适合需要快速启动和加速的应用,如电动工具和机器人等^[13]。

(2) 调速性能好。有刷电机的转速可以通过调节电流或改变电枢电阻来调节。

(3) 成本较低。相对于无刷电机,有刷电机通常具有更简单的结构和较低的制造成本,这使得有刷电机在一些低成本、大批量生产的应用中更加经济实惠。

(4) 兼容性强。有刷电机可以使用直流电源供

电,而直流电源在生活中非常常见。此外,有刷电机也可以通过电源逆变器转换为交流电源供电,从而提高其应用的灵活性。

根据消毒机器人的工作环境和实际需求,设消毒机器人自身重量不大于 40 kg,负载不大于 80 kg,移动速度为 0.8 m/s,机器人工作场所为室内。机器人所受的滚动摩擦力如下:

$$f=\mu_k \cdot m \cdot g=0.25 \times 120 \times 10=300 \text{ (N)} \quad (1)$$

式(1)中, f 为滚动摩擦力, μ_k 为地面滚动摩擦系数, m 为质量。

在实际运动中,机器人所需要的牵引力 $F>f=300 \text{ N}$,所以驱动全向轮移动平台需要的最小功率如下:

$$P=\frac{F \cdot V}{\eta_1 \cdot \eta_2}=\frac{300 \times 0.8}{0.95 \times 0.85}=297.213 \text{ 6 (W)} \quad (2)$$

式(2)中, η_1 (行驶损失)为机器人移动平台的行驶效率,一般可由行驶效率经验公式 $\eta_1=(0.95 \sim 0.003) V$ 得出(V 为车速,单位为 km/h),将 $V=0.8 \text{ m/s}(2.88 \text{ km/h})$ 代入可得 $\eta_1=0.941 \text{ 36}$; η_2 (机械损失)为变速箱传动效率,取值为 0.85。

根据消毒机器人的整机重量,确定麦克纳姆轮直径为 152 mm。麦克纳姆轮是一种全方位移动的轮式结构,主要由主体轮毂和一组在轮毂上均匀分布的回转辊子组成,轮毂轴线与辊子轴线一般呈 45° [14-15],单个驱动轮需要的驱动力矩 M ,如式(3)所示:

$$M=F_1 \cdot \frac{D_k}{2} \cdot 10^{-3}=\frac{250}{4} \times \frac{152}{2} \times 10^{-3}=4.75 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (3)$$

需要电机输出转矩,如式(4)所示:

$$M_m=\frac{M}{i \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}=0.18 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (4)$$

式(4)中, η_3 (电动机损失)为电机效率,一般取 0.93。

根据麦克纳姆轮直径可以确定电机转速,如式(5)所示:

$$n=\frac{1\,000\,vi}{120\pi r}=3\,621 \text{ (r/min)} \quad (5)$$

式(5)中, n 为电机转速,单位 r/min; v 为移动平台的行驶速度,单位 km/h(若单位为 m/s,则 $n=\frac{60vi}{2\pi r}$); i 为减速器传动比; r 为驱动轮半径,单位 m。

2.2 电机参数确定

根据上述消毒机器人移动平台所需功率的计算结果,结合实际生活中的直流电机参数,确定直流电机的额定参数。电机具体额定参数如表 1 所示。

表 1 电机额定参数

Table 1 Motor rating parameters

额定电压 /V	额定转矩 /N · m	额定转速 /(r · min ⁻¹)	额定功率 /W	额定电流 /A
24	0.32	6 000	100	5.2

由表 1 可得出单个直流电机产生的驱动力矩,如式(6)所示:

$$M'=M_m \cdot i_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3=8.65 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (6)$$

式(6)中, i_1 为选型二级电机减速器的传动比。

根据式(6)可知,单个直流电机产生的驱动力矩为 8.65 N · m,单个驱动轮所需的驱动力矩为 4.75 N · m。因此直流电机可应用于该消毒机器人。

2.3 直流电机传递函数

直流电机是一种将直流电能转换为机械能的设备,其工作原理基于洛伦兹力和电流相互作用的规律。

直流电机由电刷、换向器、电枢绕组、主磁极构成[16-17]。当电流通过电枢线圈时,电枢线圈所带的电流会产生一个磁场。根据洛伦兹力的原理,当电枢线圈中的电流与永磁体或励磁线圈的磁场相互作用时,会产生力矩,使电枢开始旋转。为了保持旋转方向的一致性,需要使用电刷和换向器。当电枢线圈中的电流方向与磁场相适应时,电流会通过电刷和导线的连接,继续流动到电枢线圈中。然后,通过不断变换电刷与电枢线圈之间的接触,使电枢线圈中的电流方向改变,从而保持运动的连续性。

这种不断变换电流方向的过程通过交换器件(如电刷)来实现,因此直流电机也称为有刷电机。

电机模型分为电流、转矩及转速等模块[18]。直流电机等效电路图如图 2 所示:主要由一个电压发生器(U)与一个电感(L)和一个电阻(R)串联来表示,而电感(L)和电阻(R)与一个感应电压(e)串联,感应电压是由电线圈的旋转通过永磁体的固定磁通线产生的,这个电压叫做电动势。

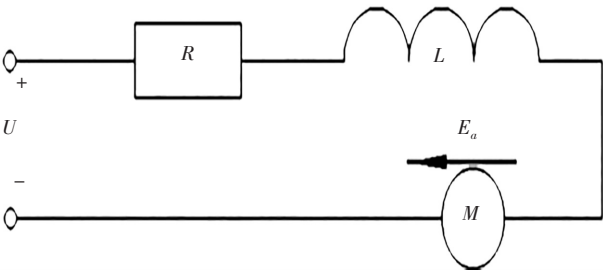


图 2 直流电机等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of DC motor

根据基尔霍夫电压定律,即沿着闭合回路所有元件两端电势差(电压)的代数和等于零。电动机电压平衡方程式如式(7)所示:

$$U = E_a + iR + L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

电枢电动势为电动势常数与电动机主磁通量和电机转速的乘积,如式(8)所示:

$$E_a = C_e \Phi n \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, C_e 为电动势常数; Φ 为电动机主磁通量,为常量,由电动机参数确定; n 为电机转速(r/min)。

电动机转动方程如式(9)所示:

$$T_e - T_L = J \frac{dw}{dt} \quad (9)$$

式(9)中, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, w 为电机角速度。

电磁转矩等于电机转矩常数与磁通量和电流的乘积,如式(10)所示:

$$T_e = C_t \Phi i \quad (10)$$

式(10)中, C_t 为转矩常数, $C_t = 9.55 C_e$ 。拉普拉斯变换可以将电路中的时域信号转换为复频域信号,利用拉普拉斯变换的性质,可以将电路中的微分方程或积分方程转换为代数方程。

式(7)一式(10)通过拉普拉斯变换可得:

$$\begin{aligned} U(s) &= E_a(s) + i(s)(R + sL) \\ E_a(s) &= C_e \Phi n(s) \\ T_e(s) - T_L(s) &= sJw(s) \\ T_e(s) &= C_t \Phi i(s) \end{aligned} \quad (11)$$

根据式(11),作直流电机系统框图如图3所示。

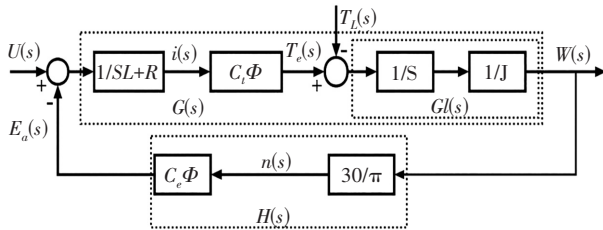


图3 直流电机系统框图

Fig. 3 Block diagram of DC motor system

根据该直流电机系统框图,可得传递函数如式(12)所示:

$$\frac{W(s)}{U(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} - \frac{W(s)}{T_L(s)} = \frac{G_1(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (12)$$

由式(12)可得 $W(s)$ 与 $G(s)$ 之间的传递函数,如式(13)所示:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} U(s) - \frac{G_1(s)}{1 + G(s)H(s)} T_L(s) \\ W(s) &= \frac{C_t \Phi / J}{Ls^2 + Rs + 30C_t C_e \Phi^2 / J / \pi} U(s) - \frac{(Ls + R) / J}{Ls^2 + Rs + 30C_t C_e \Phi^2 / J / \pi} T_L(s) \end{aligned} \quad (13)$$

因为在直流电机中电感 L 远小于电阻 R ,电感 L 值与电机频率有关,频率越高, L 越大,该电机工作频率为 50 Hz,属于低频。为了简便后续仿真,设 $L=0$,可得式(14):

$$W(s) = \frac{C_t \Phi / J}{Rs + 30C_t C_e \Phi^2 / J / \pi} U(s) - \frac{(Ls + R) / J}{Rs + 30C_t C_e \Phi^2 / J / \pi} T_L(s) \quad (14)$$

查询该消毒机器人电机相关资料如表2所示。

表2 电机参数

Table 2 Motor parameters

参 数	参数值
电机额定电阻/ Ω	5.76
电机电动势常数 C_e	0.188 48
电动机主磁通量为常量 Φ	1
电机转矩常数 C_t	1.8
电机惯量 J	0.001

根据表2确定该消毒机器人的电机传递函数,如式(15)所示:

$$\begin{aligned} G_u(s) &= \frac{1.8}{5.76s + 3.2414} \\ G_T(s) &= \frac{5.76}{5.76s + 3.2414} \end{aligned} \quad (15)$$

3 仿真模型与控制系统设计

3.1 直流电机控制系统仿真模型

为了验证该电机传递函数的正确性,基于直流电机的主要工作原理及数学模型,利用 MATLAB/Simulink 工具进行电机控制系统仿真^[19]。观察仿真电机转速是否符合电机额定转速,根据直流电机框图3,搭建直流电机子系统,如图4所示。

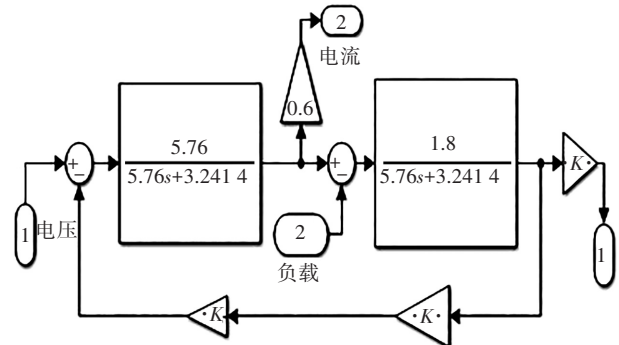


图4 直流电机

Fig. 4 DC motor

系统仿真模型如图5所示。该系统模型由传统PID控制,PID控制器的功能主要是调节适当的比例增益(K_p)、积分增益(K_i)和微分增益(K_d),以达到最佳的控制性能^[20]。在直流电机系统仿真模型中,调整

PID 控制器步骤如下:

- (1) 将 K_I 和 K_D 值设置为零,先设置 K_P 值,观察仿真结果与额定数值曲线差距。
- (2) 根据第一次 K_P 值结果,缩小或者增大第二次 K_P 值。
- (3) 当环路输出振荡,增加 K_I 值,观察系统对持续

误差的抑制效果,直到在该过程无任何偏移。

- (4) 如果需要,增加 K_D 。增加 K_D 太多将导致过度响应和过冲。

通过仿真,确定 PID 控制器过程中, $K_P = 7, K_I = 0.7$ 。电源模块设定值为 24 V,电桥数量为 3,限幅模块上限为 10,下限-10,阶跃模块为 24。

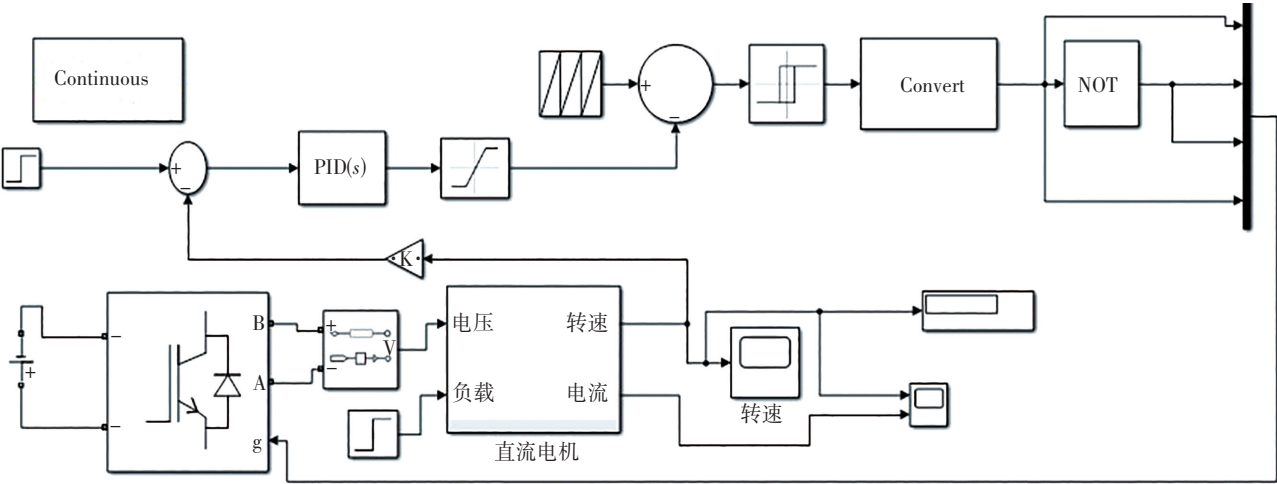


图 5 直流电机系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of DC motor system

仿真结果如图 6 所示。仿真结果中的转速与电机额定转速接近,因此该电机的传递函数成立。

际问题确定待控制变量和其对应的输出域以及模糊化程度。

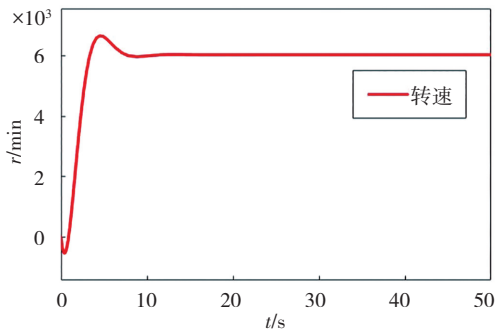


图 6 传统 PID 控制仿真结果

Fig. 6 Simulation results of traditional PID control

3.2 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制器是一种能够对系统稳态误差实行抑制,从而达到最佳控制效果的控制器^[21]。它将模糊逻辑的模糊处理能力与 PID 控制器的优秀调节性能相结合,可以在控制系统中应对复杂的、非线性的、模糊的控制对象。

模糊逻辑的优点是允许用一般术语表达复杂过程,而无需使用复杂的模型^[22]。模糊逻辑系统的主要优点是使用模糊的 if/then 规则。这些规则嵌入了专家知识,可以使用语言术语来表达模糊变量之间的关系。模糊 PID 控制的主要步骤如下:

- (1) 确定模糊化变量和输入输出域。需要根据实

- (2) 设计模糊规则库。模糊规则库是模糊 PID 控制的核心,它由一系列模糊规则组成,每个规则定义了根据输入变量决定输出变量应该采取的操作。这些规则可以基于经验或专家知识进行设计,也可以通过学习算法进行自动构建。

- (3) 进行模糊推理。模糊推理是根据模糊规则库将模糊输入转化为模糊输出的过程。它通过将输入变量与模糊规则库中的规则进行匹配,计算出模糊输出的值。

- (4) 解模糊化。解模糊化是将模糊输出转化为实际控制量的过程。通常使用的解模糊方法有重心法、最大可能法等。解模糊化过程将模糊输出映射到具体的输出值,以实现对系统的控制^[23]。

- (5) PID 调节。在模糊 PID 控制中,经常会将 PID 控制器作为整个系统的一部分来进一步调节输出控制量。PID 调节器可以根据具体情况选择不同的调节策略。

- (6) 重复以上步骤。模糊 PID 控制是一个迭代的过程,需要根据实际反馈信息进行调整和优化。通过不断地更新模糊规则库和调节 PID 参数,逐渐提高控制系统的性能。

3.3 模糊 PID 控制系统的构建

模糊 PID 控制器是直流电机转速模糊控制系统最

重要的部分,也是文中的中心设计^[24]。利用 MATLAB 中的 Fuzzy controller 进行研究,文中采用双输入双输出设计,设计步骤如下:

步骤 1 启动 MATLAB 后,在主窗口中输入 Fuzzy, 打开模糊控制器编辑器。

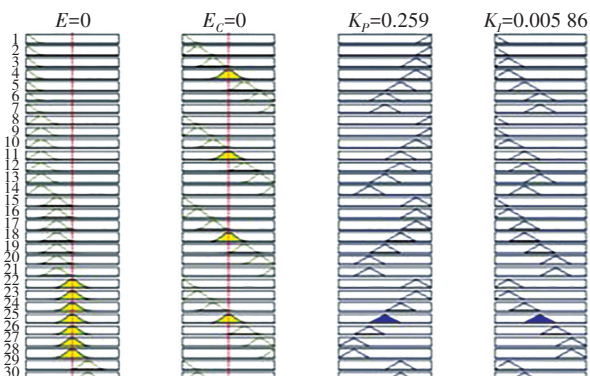
步骤 2 增加一个输入量和一个输出量。输入量分别命名为 E 、 E_c , E 代表速度参考点与额定电机速度误差, E_c 代表速度误差的变化(速度误差的导数)。输出量分别命名为 K_p 、 K_i , E 的论域为 $[-6, 6]$, E_c 的论域为 $[-6, 6]$, K_p 的论域为 $[-6, 6]$, K_i 的论域为 $[-6, 6]$ 。它们的状态分别是 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$, 即 $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ 。输入量采用高斯型隶属度函数, 输出量采用三角形隶属度函数, 所有的隶属函数都具有非对称形式。调整函数值集中在原点附近, 目的是为了在稳定状态下获得更高的精度。

步骤 3 查询模糊控制表 ΔK_p 、 ΔK_i 。

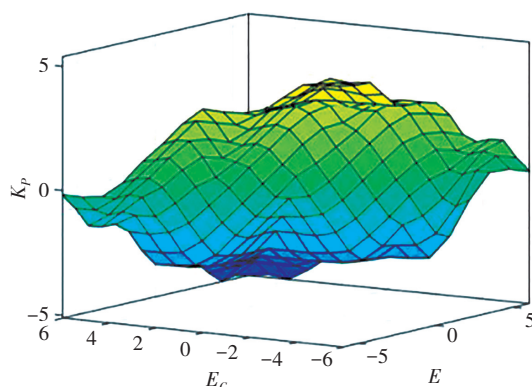
步骤 4 编写模糊语句。根据模糊控制表 ΔK_p 、 ΔK_i , 可得 49 条模糊语句, 有 49 个规则用于 PID 控制器每个参数的自动整定。采用的模糊语句格式为 (If... and... then), 如图 7(a) 所示; 根据模糊语句可得模糊推理过程, 如图 7(b) 所示; 根据模糊语句可得 E 、 E_c 与 K_p 的变化关系; E 、 E_c 与 K_i 的变化关系分别如图 7(c)、图 7(d) 所示。

1.If (E is NB) and (E_c is NB) then (K_p is PB)(K_i is NB)(1)
2.If (E is NB) and (E_c is NM) then (K_p is PB)(K_i is NB)(1)
3.If (E is NB) and (E_c is NS) then (K_p is PM)(K_i is NM)(1)
4.If (E is NB) and (E_c is Z) then (K_p is PM)(K_i is NM)(1)
5.If (E is NB) and (E_c is PS) then (K_p is PS)(K_i is NS)(1)
6.If (E is NB) and (E_c is PM) then (K_p is Z)(K_i is Z)(1)
7.If (E is NB) and (E_c is PB) then (K_p is Z)(K_i is Z)(1)
8.If (E is NM) and (E_c is NB) then (K_p is PB)(K_i is NB)(1)
9.If (E is NM) and (E_c is NM) then (K_p is PB)(K_i is NB)(1)
10.If (E is NM) and (E_c is NS) then (K_p is PM)(K_i is NM)(1)
11.If (E is NM) and (E_c is Z) then (K_p is PS)(K_i is NS)(1)
12.If (E is NM) and (E_c is PS) then (K_p is PS)(K_i is NS)(1)
13.If (E is NM) and (E_c is PM) then (K_p is Z)(K_i is Z)(1)
14.If (E is NM) and (E_c is PB) then (K_p is NS)(K_i is NS)(1)
15.If (E is NS) and (E_c is NB) then (K_p is PM)(K_i is NB)(1)

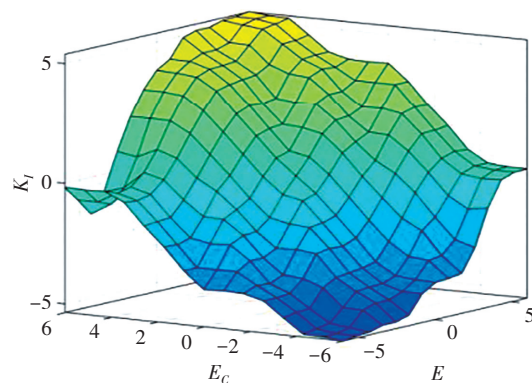
(a) 模糊语句



(b) 模糊推理



(c) K_p 与误差 E 、误差变化率 E_c 间的关系



(d) K_i 与误差 E 、误差变化率 E_c 间的关系

图 7 各输出变量与误差 E 、误差变化率 E_c 间的变化关系

Fig. 7 Changes of each output variable with error

E and error change rate E_c

3.4 Simulink 模糊控制模型的建立

在执行模糊 PID 控制与传统 PID 控制对比之前, 先确定电机的额定转速、传递函数。根据电机传递函数搭建模糊 PID 控制系统。搭建的模糊 PID 控制如图 8 所示, 搭建步骤如下:

步骤 1 在 Simulink 中加入 Fuzzy Logic control 模块, 在该模块输入模糊规则。

步骤 2 采用双输入双输出设计, 所以 Fuzzy Logic control 模块要引入两个输出和两个输入。

步骤 3 为了便于仿真, 将模糊 PID 控制器封装成一个子系统。

步骤 4 根据电机传递函数构建模糊 PID 控制系统。

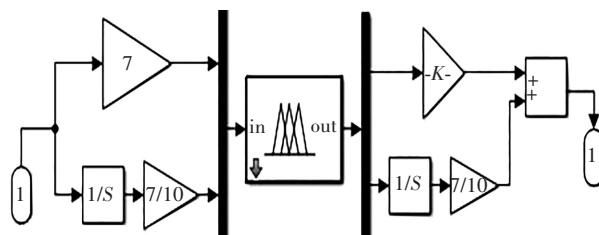


图 8 模糊 PID 控制器

Fig. 8 Fuzzy PID controller

基于 MATLAB/Simulink 搭建模糊 PID 控制和传统

PID 控制程序,如图 9 所示。对电机模糊 PID 控制与传统 PID 控制进行对比,根据控制电机的转速精度来判断哪一种控制更适合电机。控制条件如下:采用相同的电机传递函数,阶跃模块数值设置相同,目标值设

置为 6 000,增加相同负载为 24(电机控制器内的最大干扰源是直流电源模块,因为电源线为 24 V,故设负载值为 24),传统 PID 控制程序中死区模块设置为 $[-10, 10]$,饱和模块设置为 $[-5, 5]$ 。

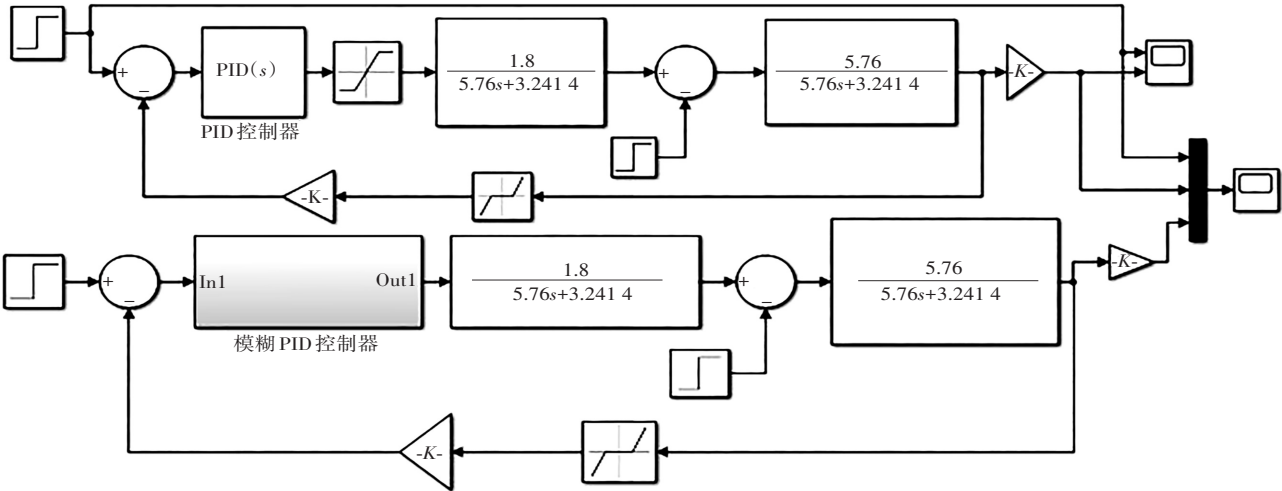


图 9 模糊 PID 控制和传统 PID 控制

Fig. 9 Fuzzy PID control and traditional PID control

结果如图 10 所示。黑色线代表电机额定转速,蓝色线代表模糊 PID 控制,棕色线代表传统 PID 控制。模糊 PID 控制系统相比于传统 PID 控制系统,能快速到达电机额定转速。经过计算,在有负载干扰情况下,模糊 PID 控制到达电机运行额定速度为 6s,传统 PID 控制需要 13s,在精度度方面,模糊 PID 控制为 98%,传统 PID 控制为 90%。

更理想的控制结果。但是电机模糊控制具有参数调节难度大,运算量大,参数过多的缺点。模糊 PID 控制需要对多个参数调节,需要专业的知识和经验,需要通过模糊化、规则库匹配、模糊推理等多个步骤得到控制变量,需要高性能的计算机平台支持。此外,参数过多会影响系统的可靠性和稳定性。因此,在未来的研究中,将针对电机模糊控制的缺点进行优化设计。

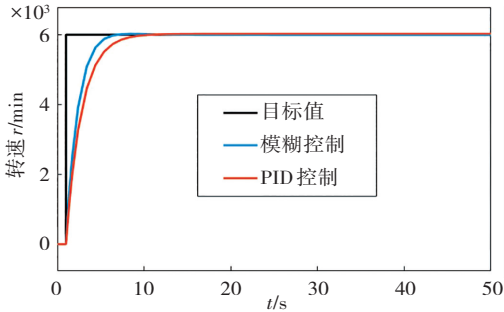


图 10 模糊 PID 控制和传统 PID 控制对比结果

Fig. 10 Comparison results of fuzzy PID control and traditional PID control

4 结论与展望

根据机器人电机的额定参数,求得电机的传递函数;根据所求电机的传递函数,基于 MATLAB/Simulink 搭建模糊 PID 控制和传统 PID 控制。其中根据规则设计模糊控制器,有 49 个规则用于 PID 控制器每个参数的自动整定,使系统具有基本的鲁棒性。仿真结果表明:在有负载干扰的情况下,模糊 PID 控制相比于传统 PID 控制,响应速度更快,精度度更高。因此用模糊 PID 控制代替传统 PID 控制,对消毒机器人电机能达到

参考文献(References):

[1] 姜豪杰. 移动消毒机器人的路径规划与自主导航研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2022.
JIANG Hao-jie. Research on path planning and autonomous navigation of mobile disinfection robot[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Electric Machinery, 2022.

[2] 李晓露. 基于改进 Theta * 算法的移动机器人全局路径规划[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
LI Xiao-lu. Global path planning of mobile robot based on improved theta * algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[3] 李晓露, 熊禾根, 陶永, 等. 基于改进 A * 算法的移动机器人全局最优路径规划[J]. 高技术通讯, 2021, 31(3): 306-314.
LI Xiao-lu, XIONG He-gen, TAO Yong, et al. Global optimal path planning for mobile robots based on improved A * algorithm[J]. Chinese High Technology Letters, 2021, 31(3): 306-314.

[4] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. Journal of Fluids Engineering, 1942, 64(8): 759-765.

- [5] COHEN G H, COON G A. Theoretical consideration of retarded control[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1953, 75(5): 827-834.
- [6] SÁNCHEZ-LÓPEZ C, CARBAJAL-GÓMEZ V H, CARRASCO-AGUILAR M A, et al. PID controller design based on memductor[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2019, 101: 9-14.
- [7] 杨昕红, 刘长文. 基于 MATLAB 的直流无刷电机模糊 PID 控制设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(11): 105-108.
YANG Xin-hong, LIU Chang-wen. Fuzzy PID control design of brushless DC motor based on MATLAB [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(11): 105-108.
- [8] 陈孝伟, 韩璞, 张悦. 一种变比例自适应 PID 控制方法的研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(6): 278-281.
CHEN Xiao-wei, HAN Pu, ZHANG Yue. A control method of variable proportion adaptive PID[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(6): 278-281.
- [9] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. *自动化技术与应用*, 2011, 30(11): 21-25.
YANG Shi-yong, XU Guo-lin. Comparison and composite of fuzzy control and PID control[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2011, 30(11): 21-25.
- [10] AKBARI-HASANJANI R, JAVADI S, SABBAGHI-NADOOSHAN R. DC motor speed control by self-tuning fuzzy PID algorithm[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2015, 37(2): 164-176.
- [11] 郭文韬, 单树清, 刘二林, 等. 无刷直流电机模糊 PID 控制及建模仿真[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(9): 14-18.
GUO Wen-tao, SHAN Shu-qing, LIU Er-lin, et al. Fuzzy PID control and modeling simulation of brushless DC motor [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(9): 14-18.
- [12] 罗小丽, 范桂林. 无刷直流电机模糊 PI 控制系统建模与仿真[J]. *系统仿真技术*, 2019, 15(2): 137-141.
LUO Xiao-li, FAN Gui-lin. Modeling and simulation of BLDCM fuzzy-PI control system[J]. *System Simulation Technology*, 2019, 15(2): 137-141.
- [13] 黄婷, 石宇涛. 移动机器人底盘结构与控制系统设计与实现[J]. *现代信息科技*, 2022, 6(21): 132-136, 140.
HUANG Ting, SHI Yu-tao. Design and implementation of chassis structure and control system of mobile robot [J]. *Modern Information Technology*, 2022, 6(21): 132-136, 140.
- [14] 谭柱. 全向移动机器人控制系统的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
TAN Zhu. Research on omnidirectional mobile robot control system[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [15] 鲁鹏, 付强, 杨艳, 等. 基于 MBD 的直流减速电机控制器设计[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(10): 20-24.
LU Peng, FU Qiang, YANG Yan, et al. Design of DC motor controller based on MBD[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(10): 20-24.
- [16] 胡传志, 沈建华, 彭晓晶. 基于限幅增量式 PID 的直流电动机转速控制系统[J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(5): 24-27.
HU Chuan-zhi, SHEN Jian-hua, PENG Xiao-jing. DC motor speed control system based on step-limiting incremental PID[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2017, 36(5): 24-27.
- [17] 周建华, 刘亚云, 林立, 等. 直流电机模糊控制系统硬件在环仿真研究[J]. *电子制作*, 2020(15): 85-86, 78.
ZHOU Jian-hua, LIU Ya-yun, LIN Li, et al. Research on hardware-in-the-loop simulation of DC motor fuzzy control system[J]. *Practical Electronics*, 2020(15): 85-86, 78.
- [18] PHU N D, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A new fuzzy PID control system based on fuzzy PID controller and fuzzy control process [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2020, 22(7): 2163-2187.
- [19] KRLEŽA D, FERTALJ K. Graph matching using hierarchical fuzzy graph neural networks[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 25(4): 892-904.
- [20] 马珂, 何培彬. 基于模糊 PID 融合的特种起重机伸缩臂自动控制[J]. *机械与电子*, 2023, 41(11): 63-67.
MA Ke, HE Pei-bin. Automatic control of telescopic boom of special crane based on fuzzy PID fusion [J]. *Machinery & Electronics*, 2023, 41(11): 63-67.
- [21] 张宇慧, 丁德锐, 董晓光. 基于滑模观测器与模糊 PID 的 PMSM 无位置传感器控制系统[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(5): 6-12.
ZHANG Yu-hui, DING De-rui, DONG Xiao-guang. Permanent magnet synchronous motor sensorless control system based on sliding mode observer and fuzzy PID [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(5): 6-12.
- [22] 孙婷. 基于模糊 PID 的双容水箱液位控制系统设计[J]. *科学技术创新*, 2023(25): 62-65.
SUN Ting. Design of liquid level control system of double tank based on fuzzy PID [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2023(25): 62-65.
- [23] 赵政宏, 乔栋, 董志民, 等. 基于模糊 PID 的直流电机控制系统设计与仿真[J]. *无线互联科技*, 2023, 20(16): 37-42.
ZHAO Zheng-hong, QIAO Dong, DONG Zhi-min, et al. Design and simulation of DC motor control system based on fuzzy PID [J]. *Wireless Internet Technology*, 2023, 20(16): 37-42.
- [24] 蔚东晓, 贾霞彦. 模糊控制的现状与发展[J]. *自动化与仪器仪表*, 2006(6): 4-7.
WEI Dong-xiao, JIA Xia-an. Present situation and development of fuzzy control [J]. *Automation & Instrumentation*, 2006(6): 4-7.

责任编辑:李翠薇