

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1202

基于蛭螂算法的无刷直流电机速度控制仿真研究

胡杰¹, 陈再宏², 胡燕海^{1*}, 刘广清², 张伟杰²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波戴维医疗器械股份有限公司, 浙江 宁波 315712)

摘要: 为提高无创呼吸机用无刷直流电机的控制性能, 改善无创呼吸机压力输出控制精度, 设计了一种基于蛭螂算法优化的模糊 PID 控制器用于无刷直流电机调速系统. 首先对无刷直流电机进行数学建模, 再利用 Simulink 设计无刷直流电机双闭环转速控制系统仿真模型, 并模拟实际工况对系统模型进行仿真实验. 结果显示, 当设定调速系统超调量为 0.4%, 调节时间为 0.011 s, 加入负载后的转速波动为 $4.0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 经过 0.002 s 振荡后系统趋于稳定. 仿真结果说明所设计的控制器动态和静态性能优异, 显著提高了无刷直流电机控制性能, 改善了无创呼吸机压力输出控制精度, 可以满足无创呼吸机对稳定、可控气流源的需求.

关键词: 无创呼吸机; 无刷直流电机; 蛭螂算法; 模糊 PID

中图分类号: TM301.2; TN06

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0073-07

随着 2019 年新型冠状病毒感染(COVID-19)的全球暴发, 呼吸机作为重要的辅助呼吸设备, 在治疗肺炎感染病例、抗击疫情等方面都发挥了至关重要的作用^[1-2]. 此外, 对患有阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征(Obstructive Sleep Apnea Hypopnea Syndrome, OSAHS)、呼吸衰竭等慢性呼吸疾病^[3-4]的患者而言, 使用无创呼吸机正压通气对其进行治疗也最为合适^[5-6]. 现今, 世界上主流无创呼吸机都采用了无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, BLDCM)作为压力源, 其主要通过控制无刷直流电机的转速来达到控制呼吸机压力的目的.

目前无刷直流电机控制存在系统关键控制公式计算过程繁琐, 实际运用困难等问题^[7]; 模糊控制器模糊化控制参数后的控制精度低, 控制对象稳态误差较大^[8-9]; 利用智能算法优化 PID 控制器后, 控制效果虽得到显著提升, 但不能实时根据运行情况动态调整控制参数, 系统适应性较差, 缺乏对复杂工况的处理能力^[10]. 因此亟须设计一个响应速度快、超调量小、几乎无稳态误差、控制精度高的无刷直流电机的转速控制系统.

针对上述研究中的问题, 本文通过蛭螂算法寻优模糊 PID 控制器中的输入比例因子、输出量化因子以及 PID 初值, 以提高无创呼吸机中无刷直流电机转速系统的控制精度, 使无刷直流电机响应时间快, 超调量小, 几乎无稳态误差, 让患者得到更舒适的治疗体验.

1 无刷直流电机建模

无刷直流电机跟普通电机不同, 其定子为绕组线圈, 转子为永磁材料. 本文研究的是在工业中最常用定子接线为三相星形、二二导通通电方式的无刷直流电机, 在建立数学模型前, 作如下基本假设^[11]: (1)电机磁路不饱和; (2)不考虑换向过程、负载变化和齿槽效应对磁场的影响; (3)气隙磁场为方波, 即磁感应强度按梯形分布; (4)电机定子电流、转子磁场以及电机三相绕组对称; (5)不计摩擦影响.

1.1 电压方程

由上述假设可推导出 BLDCM 的电压方程、电磁转矩方程及其运动方程. 在 BLDCM 的星型连接

收稿日期: 2023-12-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市重点研发计划项目(2023Z169).

第一作者: 胡杰, 硕士研究生, 主要研究方向: 机电一体化. E-mail: hujieprivate@163.com

*通信作者: 胡燕海, 教授, 主要研究方向: 机电产品开发, 生产计划与控制. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

方式下, 可得无刷直流电机的电压平衡方程:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: U_a 、 U_b 、 U_c 为定子相电压; R 为定子相电阻; I_a 、 I_b 、 I_c 为定子相电流; L_a 、 L_b 、 L_c 为定子相电感; L_{ab} 、 L_{ac} 、 L_{ba} 、 L_{bc} 、 L_{ca} 、 L_{cb} 为定子相互感; E_a 、 E_b 、 E_c 为定子相反电动势。

由电机原理可知, 可分别令定子相电感和定子相互感的数值为常数 L 和 M 。

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2 转矩方程

BLDCM 中电磁转矩与磁通量和通电电流大小成正比例关系, 故转矩方程为:

$$T_E = \frac{E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c}{\omega}, \quad (3)$$

式中: T_E 为电磁转矩; ω 为电机转子角速度。

由式(3)得到如图 1 所示的等效电路图。

BLDCM 的运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_E - T_L - B\omega, \quad (4)$$

式中: J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数。

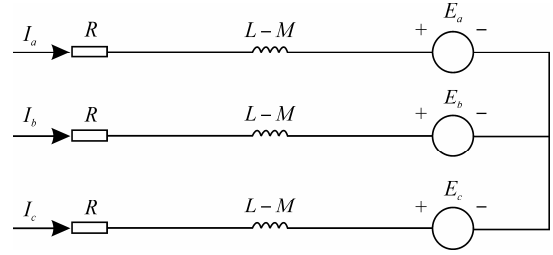


图 1 无刷直流电机等效电路图

2 BLDCM 双闭环调速系统原理

本文选用目前直流电机生产、生活和科学研究中应用最为广泛的电流内环控制、转速外环控制的 BLDCM 双闭环调速系统, 其优异的启停性、正反转顺滑性等特性深受研究者青睐。BLDCM 双闭环调速系统结构如图 2 所示。其中, 常规 PID 作为电流内环控制器^[12], 本文首次将经蛭螂算法优化后的模糊 PID 控制器作为转速外环控制器。转速环输出值为三相输入电流的给定值, 与实际输出电流值作差一起输入电流环。经过电流环 PID 控制器调节后的输出值用来控制脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号的占空比, 再传递给驱动模块, 三相全桥逆变器通过识别驱动模块信号将调控后的电源电压加到 BLDCM 三相绕组, 从而达到调速目的。

3 模糊 PID 控制器原理

将模糊推理的设想应用在传统 PID 中, 便形成了应用范围广泛的模糊 PID 控制器。本文使用二维三输出的模糊 PID 控制器, 其系统结构如图 3 所示。首先将系统实际输出转速给定值中的偏差 e 和偏

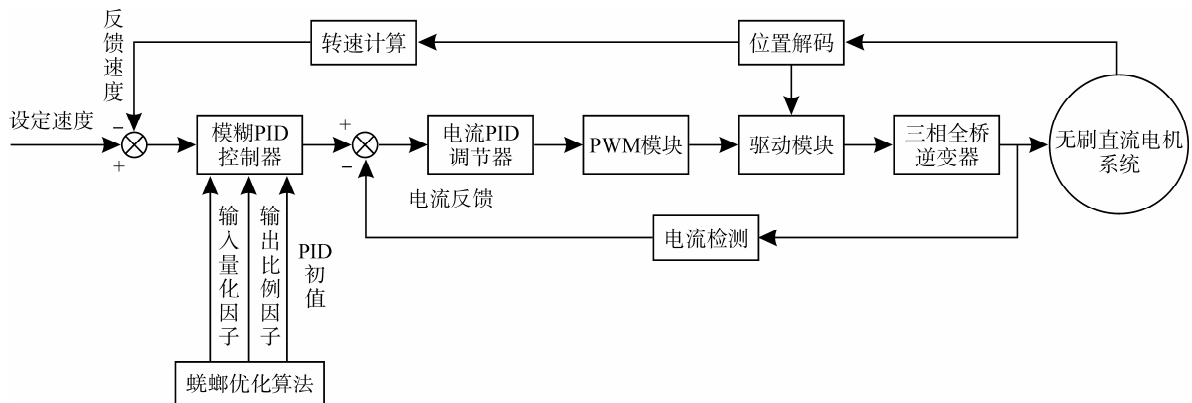


图 2 双闭环无刷直流电机转速控制系统结构

差变化率 e_c 分别由输入量化因子 K_1 、 K_2 进行相应模糊化操作, 再将模糊后数值输入到模糊控制器中; 模糊控制器根据模糊化后输入值所对应的隶属度函数进行查表, 得到模糊量输出, 再经过解模糊操作和输出比例因子 K_3 、 K_4 、 K_5 调整后, 输出 3 个 PID 参数校正值—— ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 最后将得到的 3 个修正值分别对传统 PID 控制器中 K_p 、 K_i 、 K_d 参数进行在线校正^[13]。

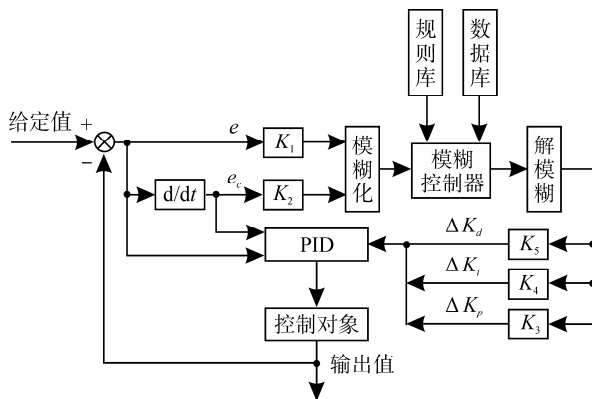


图 3 模糊 PID 控制系统结构图

将上述模糊控制器输出的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 经如下处理后用于 PID 控制器参数更新。

$$\begin{cases} K_p = K_{p,0} + \Delta K_p, \\ K_i = K_{i,0} + \Delta K_i, \\ K_d = K_{d,0} + \Delta K_d, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K_{p,0}$ 、 $K_{i,0}$ 、 $K_{d,0}$ 为 PID 控制器参数的系统给定初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为 PID 控制器参数的在线校正值。

为使模糊控制器能在实际工程中运用, 需将模糊控制器的输入和输出值离散化, 而离散量的多少影响着模糊控制器的求解精度。通常当离散量分为 7 个等级时, 此时的模糊控制分辨率较高,

模糊输出较为顺滑, 一般都能满足控制要求^[14], 因此本文将输入和输出离散量分为 7 个等级。输入量论域设置为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的输出论域分别设置为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ 、 $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ 、 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 所有输入和输出量的模糊子集均为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 上述子集代表着负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。当 BLDCM 转速误差 $|e|$ 较大时, 模糊控制器应该以消除此误差为首要任务; 当 $|e|$ 较小时, 为防超调量过大, 应以系统的稳定性为主^[15]。基于这些原则, 得到如图 4 所示 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 在不同偏差和偏差变化率下的模糊控制器规则。

4 蜣螂算法及其应用

蜣螂算法(Dung Beetle Optimizer, DBO)是一种新颖的群智能优化算法, 于 2022 年底提出, 主要是受到自然环境下蜣螂生活中滚球运送食物、跳舞寻找方向、特定区域觅食、偷窃其他粪球和自身繁殖行为的启发, 该算法具有寻优能力强, 收敛速度快的特点^[16]。

算法计算步骤解读如下。

(1)蜣螂利用天体信息导航, 推动球状粪便运送回家, 此过程中若遇到意外迷失方向, 蜣螂会通过粪球上跳舞来重新获取方向, 滚球和跳舞位置更新算式如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x,$$

$$\Delta x = |x_i(t) - X_w|, \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan \theta |x_i(t) - x_i(t-1)|, \quad (7)$$

式中: $x_i(t)$ 代表第 t 次迭代中第 i 个蜣螂的位置; k 为偏转系数; α 为自然系数, -1 或 1 ; X_w 代表全局最

$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB/ZO/PS	NB/ZO/NS	NB/ZO/NB	NM/ZO/NB	NS/ZO/NB	NS/ZO/NM	ZO/ZO/PS
	NM	NB/NM/PS	NB/NM/NS	NM/NS/NB	NS/NS/NM	NS/NS/NM	ZO/ZO/NS	PS/ZO/ZO
	NS	NM/NB/ZO	NM/NM/NS	NM/NS/NM	NS/NS/NM	ZO/ZO/NS	PS/PS/NS	PS/PS/ZO
	ZO	NM/NB/ZO	NM/NM/NS	NS/NS/NS	ZO/ZO/NS	PS/PS/NS	PM/PM/NS	PM/PB/ZO
	PS	NS/NS/ZO	NS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	PS/PS/ZO	PS/PS/ZO	PM/PM/ZO	PM/PB/ZO
	PM	NS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	PS/PS/PS	PM/PS/PS	NM/PS/PS	PM/PM/PS	PB/PM/PB
	PB	ZO/ZO/PB	PS/ZO/PM	PM/ZO/PM	PM/ZO/PM	PM/ZO/PS	PM/ZO/PS	PB/ZO/PB

图 4 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊控制器规则

差位置; θ 为偏转角, 取值范围为 $[0, \pi]$.

(2) 模拟雌性蜣螂寻找安全地方产卵并隐藏, 此时的边界选择策略可定义为:

$$\begin{aligned} L_b^* &= \max(X^* \times (1 - R), L_b), \\ U_b^* &= \min(X^* \times (1 + R), U_b), \end{aligned} \quad (8)$$

式中: X^* 为当前最佳位置; U_b^* 和 L_b^* 表示产卵区域的上限、下限; U_b 、 L_b 表示优化问题的上界、下界; $R = 1 - t / T_{\max}$, $T_{\max}$ 为最大迭代次数.

(3) 每只雌性蜣螂在每次迭代中只产一个卵, 在迭代过程中, 含卵粪球(卵球)位置的动态变化位置更新定义算式如下:

$$\begin{aligned} B_i(t+1) &= X^* + b_1 \times (B_i(t) - L_b^*) + \\ &\quad b_2 \times (B_i(t) - U_b^*), \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $B_i(t)$ 表示第 t 次迭代中第 i 个卵球的位置; b_1 和 b_2 为 $1 \times D$ 的随机量, D 是优化问题的维度.

(4) 当卵成长为小蜣螂时, 通过建立最优觅食区域引导小蜣螂觅食. 最优觅食区域和小蜣螂的位置定义算式如下:

$$\begin{aligned} L_b' &= \max(X_b \times (1 - R), L_b), \\ U_b' &= \min(X_b \times (1 + R), U_b), \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - L_b') + \\ &\quad C_2 \times (x_i(t) - U_b'), \end{aligned} \quad (10)$$

式中: X_b 为全局最佳位置; U_b' 和 L_b' 分别为最优觅食区域的上限、下限; $x_i(t)$ 表示第 t 次迭代中第 i 只小蜣螂位置; C_1 为服从正态分布的随机数; $C_2 \in (0, 1)$, 是一个随机数.

(5) 蜣螂还会从别处偷窃粪球, 具有偷盗行为的蜣螂位置更新算式如下(假定 X_b 是争夺食物的最佳地点):

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= X_b + S \times g \times \\ &\quad (|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X_b|), \end{aligned} \quad (12)$$

式中: g 是服从均值为 0、方差为 1 的正态分布随机向量; S 为常数.

4.1 蜣螂算法优化模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器的性能主要由模糊控制器的输入量化因子 K_1 、 K_2 和输出比例因子 K_3 、 K_4 、 K_5 以及 PID 控制器中初始值 $K_{p,0}$ 、 $K_{i,0}$ 、 $K_{d,0}$ 决定^[17]. 通常模糊控制器中的输入量化因子和输出比例因子由专家经验值来进行选择调整, 并且在实际应用

时易受当时环境变化和控制系统误差的影响, 导致控制系统调节精度不高. 而且由于参数一经确定不可更改, 所以也不能在线调整^[18].

为进一步提高 BLDCM 调速系统的控制精度、响应速度和抗干扰性等特性, 本文根据蜣螂算法的寻优特性对模糊 PID 控制器中的量化因子、比例因子和 PID 控制器初始值进行优化, 从而提高整个控制系统的整体性能.

4.2 确定适应度函数

蜣螂算法调整模糊 PID 控制器参数实质是优化问题, 即根据设定目标去寻找全局最优模糊 PID 控制器参数. 为判断模糊控制器不同参数的优劣程度, 需要提前确定系统评价准则. 目前, 被广泛运用的系统评价准则有 IAE、ISE、ITSE 和 ITAE 等^[19]. ITAE(Integral of Time-weighted Absolute Error)准则具有系统动态响应超调量小, 调节速度快, 可良好地选择控制参数等优点, 能够比较全面地反映控制系统的动态响应情况, 因此本文选择 ITAE 准则作为此次 DBO 算法对控制器寻优的适应度函数.

基于 ITAE 的适应度函数(J)公式为:

$$J = \int_0^\infty t |e(t)| dt, \quad (13)$$

式中: t 为系统仿真时间; s ; $e(t)$ 为系统误差.

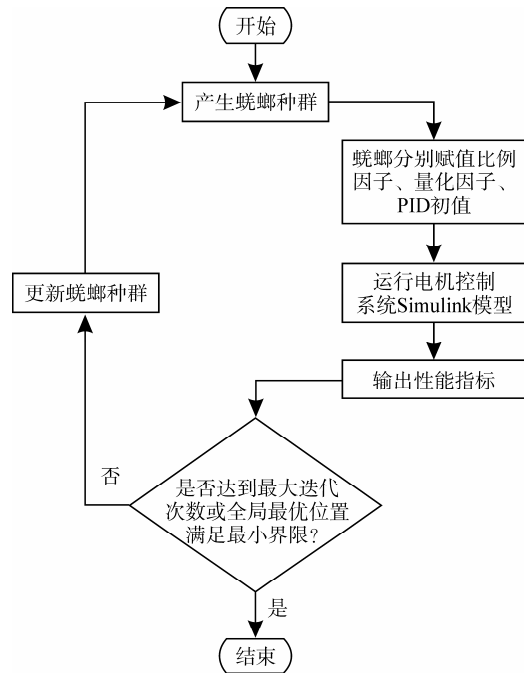


图5 蜣螂算法优化模糊 PID 控制器参数流程

通过蛭螂算法优化模糊 PID 控制器参数的流程如图 5 所示。

5 BLDCM 转速控制系统仿真

为了验证蛭螂优化模糊 PID 控制器的可行性及优势, 在 Simulink 软件中搭建 BLDCM 转速控制系统模型进行仿真, 其中无刷直流电机模块参数设置见表 1。

表 1 无刷直流电机模块仿真参数表

类别	数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
定子相电阻/Ω	2.875
定子相电感/H	0.008 5
电压常数/(V·(r·min ⁻¹) ⁻¹)	0.175
转矩常数/(N·m)	1.4
转动惯量/(kg·m ²)	0.000 8
阻力因子	0.001
极对数/对	4

根据上述 BLDCM 的数学模型和转速、电流双闭环控制系统原理, 在 Simulink 中建立如图 6 所示基于蛭螂优化模糊 PID 的无刷直流电机控制系统仿真图。图中包含蛭螂算法模块、模糊 PID 控制器模块、无刷直流电机模块以及电流环 PID 控制器模

块等。

模糊控制器模块如图 7 所示。模块中包含蛭螂算法优化后的输入量化因子 K_1 、 K_2 , 输出比例因子 K_3 、 K_4 、 K_5 以及 PID 初值 $K_{p,0}$ 、 $K_{i,0}$ 、 $K_{d,0}$, 此模块是转速外环的核心控制器。通过使用蛭螂优化后的模糊控制器模块对设定转速和实际输出转速的偏差和偏差变化率进行一系列模糊控制操作后, 得到的输出量作为电流内环的三相输入电流, 与实际测量的三相电流值一起作为电流内环的输入值。模糊控制器模块的控制精度决定着整个无刷直流电机转速控制系统的控制精度, 是无刷直流电机速度仿真系统中的最重要的环节。

5.1 仿真实验

为了验证蛭螂算法优化模糊 PID 控制器在 BLDCM 转速控制方面的优越性, 本文在 Simulink 建立仿真模型基础上进行了相关测试。由于无创呼吸机对成人和儿童需要有不同的打开气道压力, 同时无创呼吸机在工作一段时间后呼吸气路可能存在阻力的情况, 因此不仅要求 BLDCM 能实现变速运行, 而且在施加负载后也同样要具备一定的抗负载干扰能力。

基于上述对无创呼吸机中 BLDCM 的要求, 本文仿真实验方案设计如下: 给定初始转速为 600

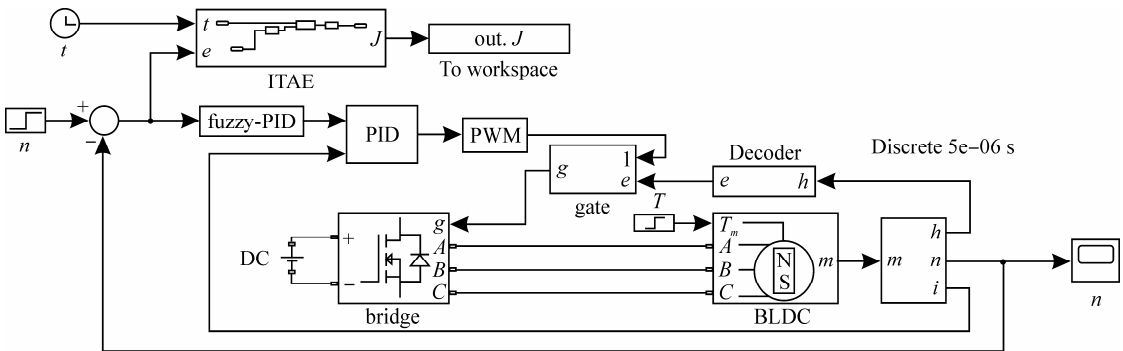


图 6 基于蛭螂优化模糊 PID 的无刷直流电机控制系统仿真

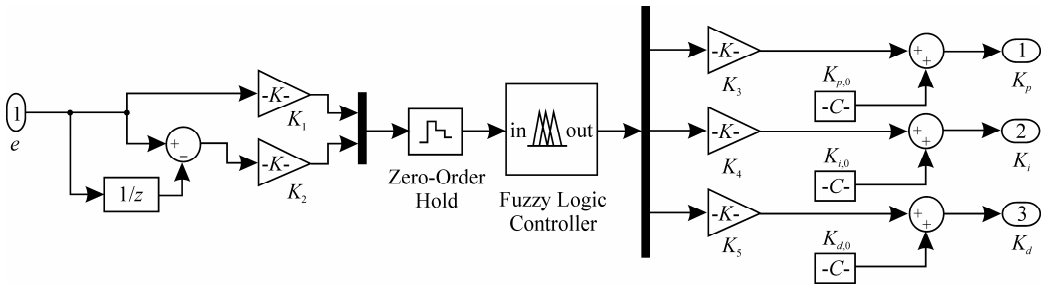


图 7 模糊控制器模块

$\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 并保持运转 0.2 s, 然后设置输入转速突升至 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 在系统运转至 0.3 s 时, 加入外界负载, 观察 BLDCM 转速仿真曲线变化情况. 实验分别使用蜚螂优化模糊 PID(DBO FUZZY PID)、模糊 PID(FUZZY PID)、PID 作为 BLDCM 控制器, 三类控制器在本仿真实验中的输出转速变化曲线如图 8 所示. 为使三类控制器在 BLDCM 转速控制中的控制性能对比更加直观, 本文根据图 8 的三类控制器输出转速变化曲线, 测量得到多种控制器控制性能数据(表 2).

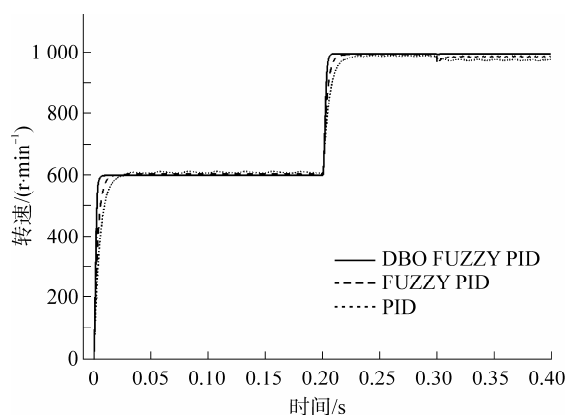


图 8 三类控制器下无刷直流电机输出转速变化曲线仿真

表 2 多种控制器性能对比

控制类型	第 1 次超调量/%	调节时间/s	加负载后波动/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	加负载后调节时间/s
①	5.3	0.033	30.6	0.150
②	2.6	0.020	16.6	0.086
③	0.4	0.011	4.0	0.002

注: ①PID 控制; ②模糊 PID 控制; ③蜚螂优化模糊 PID 控制.

5.2 结果分析

结合图 8 和表 2 可以看出, 在本文搭建的仿真控制系统中, 蜚螂算法优化模糊 PID 控制器响应速度比模糊 PID 控制器和 PID 控制器更快, 对输入变化感知更加迅速. 经蜚螂算法优化后的模糊 PID 控制器的系统超调量为 0.4%, 优于传统 PID 和模糊 PID 控制器的 5.3% 和 2.6%; 同时蜚螂算法优化后 0.011s 的调节时间也优于其他两类控制器; 当系统给定输入转速由 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 变化至 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 蜚螂算法优化的模糊 PID 控制器相比于其他两类同样拥有更快的响应速度, 更小的稳态误差; 加入外界负载后, 蜚螂优化模糊 PID 控制器的转速波动为 $4.0\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 仅为模糊 PID 控制器和 PID 控制器

转速波动的 13% 和 24%, 其调节时间为 0.002 s, 大幅领先于其他两类控制器, 表明本文所设计控制器拥有更好的抗干扰能力.

综上所述, 在本文搭建的仿真系统中, 蜚螂算法优化的模糊 PID 控制器与 PID 控制器和模糊 PID 控制器相比, 拥有更好的动态性能和鲁棒性能.

6 总结

本文针对无创呼吸机气源采用的 BLDCM 转速控制器响应速度较慢、抗干扰能力差等问题, 通过将新颖的群智能优化算法——蜚螂算法运用于模糊 PID 控制器参数的寻优过程, 随后将该优化后的模糊 PID 控制器作为 BLDCM 控制系统的控制器, 利用基于 Simulink 软件设计的 BLDCM 转速双闭环仿真控制模型进行了一系列模拟呼吸机实际使用工况的实验. 由仿真实验结果可知, 使用蜚螂算法优化模糊 PID 作为无刷直流电机转速环控制器, 进一步提升了控制系统的响应速度, 增强了系统的鲁棒性, 实现了对无创呼吸机中无刷直流电机的高精度控制.

参考文献:

- [1] 鲜于云艳, 张智霞, 张美芳, 等. 新型冠状病毒肺炎患者机械通气护理管理专家共识[J]. 中华护理杂志, 2020, 55(8):1179.
- [2] 李永胜. 新型冠状病毒肺炎重症患者的呼吸支持策略[J]. 内科急危重杂志, 2020, 26(3):184-187.
- [3] XU T T, YOU D M, CHEN X. Non-surgical treatment of obstructive sleep apnea syndrome[J]. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2018, 275(2):335-346.
- [4] CARPAGNANO G E, SABATO R, LACEDONIA D, et al. New non invasive ventilator strategy applied to COPD patients in acute ventilator failure[J]. Pulmonary Pharmacology & Therapeutics, 2017, 46:64-68.
- [5] 张森. 基于分数阶 PID 控制器的家用无创呼吸机的研制[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [6] 焦杨, 邓科, 陈执昌, 等. 无创呼吸机风机驱动电路系统设计[J]. 中国医疗器械杂志, 2021, 45(4):398-400, 405.
- [7] 王颖. 无位置传感器永磁同步电机滑膜变结构控制[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.
- [8] 顾祖成, 耿小江, 王永娟, 等. 模糊自适应 PID 控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造

- 工程, 2020, 49(1):39-41.
- [9] 陈龙, 李益华. 基于模糊自适应分数阶 PID 的医用无刷直流电机控制研究[J]. 电气传动自动化, 2019, 41(3): 1-6.
- [10] 田双文, 刘雪松, 刘佳, 等. 基于无刷直流电机控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5):132-138.
- [11] 许宇栋. 无刷直流电机控制系统研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- [12] 时培成, 陈晨, 夏仙阳, 等. 改进天牛须算法的无刷直流电机控制研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(6):898-904.
- [13] 纪亚芳, 张志刚. 基于模糊 PID 的双容水箱液位控制系统设计[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2019, 33(2):37-40.
- [14] 于振中, 周枫. 粒子群优化模糊 PID 的电动负载模拟器研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10):16-21.
- [15] 黎君, 阎世梁. 一级倒立摆模糊 PID 控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4):50-52.
- [16] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7):7305-7336.
- [17] 蒋文强. 基于智能控制算法的 BLDCM 调速系统研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [18] 霍延军. 基于量子粒子群算法的 PID 参数自整定方法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(10):194-197.

Simulation study on speed control of brushless DC motor based on dung beetle algorithm

HU Jie¹, CHEN Zaihong², HU Yanhai¹, LIU Guangqing², ZHANG Weijie²

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo David Medical Device Co., Ltd., Ningbo 315712, China)

Abstract: In order to improve the control performance of brushless DC motor for non-invasive ventilator, as well as to improve the control precision of its pressure output, a fuzzy PID controller based on dung beetle optimization algorithm was developed to solve the problem of low precision of traditional PID control. Firstly, mathematical modeling of brushless DC motor was carried out, and Simulink was used to design the simulation model of the brushless DC motor's double closed-loop control system, with which the control system was simulated on its actual working conditions. The simulation results show that the overshoot of the speed control system using the proposed method is 0.4%, the adjustment time is 0.011 s, the speed fluctuation is $4.0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ after adding the load, and it tends to be stable after 0.002 s of oscillation. The results demonstrate that the controller designed in this paper has excellent dynamic and static performance, improves the control performance of brushless DC motor significantly, improves the pressure output control accuracy of non-invasive ventilator, and meets the need of non-invasive ventilator for a stable and controllable air source.

Key words: noninvasive ventilator; brushless DC motor; dung beetle optimize algorithm; fuzzy PID

(责任编辑 章践立)