

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212049

基于算法优化的生物打印机电机调速方法研究*

姚冠洲 郝润芳 管傲群 康日晖 杨琨 褚凯

(太原理工大学信息与计算机学院 太原 030024)

摘要: 随着3D打印技术的发展,其应用领域扩展至临床医学范畴,基于3D生物技术已经实现了对皮肤组织、细胞支架等组织器官的增材打印。3D生物打印机一般由永磁同步电机作为其移动平台驱动电机。为提高控制精度,传统方法通常采用遗传粒子群优化模糊规则等多重算法整定PI参数来控制电机,但机械地叠加算法使得算法复杂度增加,严重影响电机的控制效果。因此,本文采用分数阶PI控制代替传统PI控制,利用粒子群算法优化分数阶PI中增益、分数阶次数和模型参考自适应算法中的自适应机制,最终获取最优解。通过Simulink仿真表明,相比于传统PI控制和遗传粒子群优化模糊PI控制等方法,粒子群优化分数阶PI在电机响应速度方面分别提高了10.6%和5.6%,稳定性方面分别提高了81.3%和60%,适用于控制精度较高的3D生物打印机移动平台。

关键词: 3D生物打印机;永磁同步电机;分数阶PI控制;Simulink仿真

中图分类号: TP273-.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on bioprinter motor speed regulation method based on algorithmic optimisation

Yao Guanzhou Hao Runfang Jian Aoqun Kang Rihui Yang Kun Zhuo Kai

(College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: With the development of 3D printing technology, its application areas have been extended to clinical medicine, and 3D biotechnology-based additive printing of skin tissue, cellular scaffolds and other tissues and organs has been realized. 3D bioprinter generally use permanent magnet synchronous motors as their mobile platform drive motors. Traditional methods usually use multiple algorithms such as genetic particle swarm optimization fuzzy rules to adjust PI parameters to achieve control. However, the mechanical superposition algorithm increases the complexity of the algorithm and seriously affects the performance of the motor control effect. Therefore, this paper adopts fractional-order PI control instead of traditional PI control, and uses particle swarm optimization to optimize the gain, the number of fractional orders and the adaptive mechanism in the model reference adaptive system in fractional-order PI to finally obtain the optimal solution. Simulink simulation shows that compared with traditional PI control and methods such as genetic particle swarm optimized fuzzy PI control, the particle swarm optimized fractional order PI improves the motor response speed by 10.6% and 5.6%, and the stability by 81.3% and 60%, respectively, and is suitable for 3D bioprinter mobile platform with high control accuracy.

Keywords: 3D bioprinter; permanent magnet synchronous motor; fractional order PI control; Simulink simulation

0 引言

随着3D打印技术的不断发展,在生物医学、工业制备等领域取得广泛应用。尤其对于烧伤治疗、皮肤移植等临床医学问题上,3D生物打印机能够实现了对皮肤组织、细胞支架的增材打印^[1]。3D生物打印机^[2]的打印材料为细胞等活性生物材料,因此对于打印精度提出更高的要求。

3D生物打印机一般由永磁同步电机作为其移动平台驱动电机。永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)是一种以永磁体提供励磁,结构简单的电机装置。为实现对永磁同步电机的控制,德国研究者^[3]首先提出了矢量控制(field oriented control, FOC)方法,即在直轴电流控制器、交轴电流控制器和转速控制器中引入比例积分控制器(proportion integration, PI)来完成对电流矢

收稿日期:2022-11-12

* 基金项目:山西省重点研发计划(202102030201012)、中央引导地方科技发展项目(YDZJSX2021C003)资助

量的控制,进而达到对电机的速度控制。

3D 生物打印机的打印过程中永磁同步电机的工作状态是非线性时变的,因此对其电机转速控制方法提出了更高的要求。为达到更精确的电机速度控制,文献[4]提出了一种基于模糊 PI 控制策略的永磁电机控制方法,该方法有效提高了电机的响应速度,但实际运用中模糊 PI 存在无法在线整定的问题;因此,文献[5]提出了遗传算法优化的模糊 PI 控制方法,使得优化后的电机转速曲线上升时间与传统 PI 控制相比缩短了 0.003 s,有效提高电机的响应速度和抗干扰能力,但所采用的算法复杂度较高;文献[6]提出使用差分进化算法对小规模神经网络进行优化迭代,寻找符合电机特性的神经网络参数,提高比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制器的控制精度和动态调节功能;文献[7]提出采用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)在线优化速度和 PI 电流控制器增益,来提高系统的鲁棒性和动态特性;文献[8]提出采用基于神经网络递归最小二乘解的 PID 增益初始化训练算法,在线更新控制器增益,使优化后控制器的积分误差与传统控制器相比降低了 5.3%,进而实现电机伺服驱动器的精确位置控制;文献[9]提出采用混沌分子动理论优化算法(chaos kinetic molecular theory optimization algorithm, CKMTOA)优化 PID 控制器对速度环进行调节,并在解的邻域内进行混沌搜索以避免局部最小,电机转速达到稳态的时间由 0.008 2 s 缩短至 0.005 9 s,进而实现对电机的精确控制;文献[10]提出采用状态反馈控制器用于永磁同步电机的速度控制,并借助人工蜂群算法对其系数进行在线自适应,优化后的电机转速超调量降低为 0.74%,提高了电机的控制性能;文献[11]提出将粒子群优化 PID、模糊粒子群算法和遗传粒子群算法 3 种优化技术相结合,优化电机控制参数,提高对电机速度的控制特性。

上述方法均通过迭代多种算法优化调节 PID 参数,使得算法复杂度不断增加,进而导致 PID 参数的整定速度过慢,影响电机的控制效果。因此,本文在传统矢量控制的基础上,采用粒子群算法优化分数阶比例积分(fractional order proportion integration, FOPI)控制器,提高系统的可控性,减小了算法的复杂度;通过 MRAS 算法对电机转速的估计,并基于 Simulink 仿真环境验证了三相永磁同步电机的控制特性。

本文内容安排如下:通过分析三相永磁同步电机的数学模型,搭建电机的矢量控制模型;将模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)算法引入电机模型,对电机转速进行无传感器测量调整;并采用粒子群算法优化 FOPI 控制器的参数,优化电机模型,从而调整电机转速;最后通过 Simulink 搭建仿真实验平台,验证上述电机调速方法对电机转速的控制性能,同时对本文算法的有效性在无刷直流电机上进行扩展验证。

1 三相永磁同步电机控制模型

1.1 三相永磁同步电机的数学模型

三相永磁同步电机在实际工作中,不可避免的受到工作环境的影响,使得电机的电阻和电感产生变化;因此,为简化电机模型的分析过程,做出如下假设^[12]:

- 1) 电机绕组的电阻值和电感值恒定;
- 2) 忽略定子齿槽的影响;
- 3) 电机定子绕组呈三相对称分布,绕组轴线相差 120° 电角度。

三相永磁同步电机在自然坐标系下的电压方程可简化为式(1):

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, u_A, u_B, u_C 为三相定子电压瞬时值, i_A, i_B, i_C 为三相定子电流瞬时值, ψ_A, ψ_B, ψ_C 为三相定子磁链瞬时值, r 为定子的相电阻。

为减小数学模型分析的复杂程度,本文采用坐标变换理论,将其变换到同步旋转坐标系下,并使之具有类似直流电机的数学模型的形式,可以得到在同步旋转坐标系下的定子电压平衡方程为式(2):

$$\begin{cases} u_d = ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \\ u_q = ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_d, u_q 为 dq 轴等效电压, i_d, i_q 为 dq 轴等效电流, ψ_d 为定子磁链直轴分量, ψ_q 为定子磁链交轴分量, ω 为电气角速度。

根据等幅值变换原则,三相永磁同步电机的电磁转矩方程为式(3):

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3)$$

其中, T_e 为电磁转矩, n_p 为极对数, L_d 为直轴电感, L_q 为交轴电感, ψ_f 为转子磁链。

三相永磁同步电机的机械运动方程为式(4):

$$T_e - T_L = B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

其中, T_L 为电机负载, ω_m 为电机的机械角速度, B 为阻尼系数, J 为转动惯量。

为使得电流环 PI 调节参数方便,对三相永磁同步电机的交叉耦合电动势进行前馈解耦,得到三相永磁同步电机的 dq 轴电流方程为式(5):

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{ri_d}{L_d} + \frac{\omega}{L_d} L_q + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{ri_q}{L_q} + \frac{\omega}{L_q} (L_d i_d + \psi_f) + \frac{u_q}{L_q} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 三相永磁同步电机矢量控制模型

三相永磁同步电机矢量控制模型,主要包括电机转速控制模块、电流控制模块和电平空间矢量调制模块^[13]。电机转速控制模块用于实现电机的调速控制,进而提高系统的电机速度跟踪和稳定性;电流控制模块用于使电机电流快速接近给定值,并且实现对电网电压波动的抑制,进一步实现电机的快速响应;电平空间矢量调制模块(space vector pulse width modulation, SVPWM)用于根据空间电压矢量,实现脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号的生成;

三相永磁同步电机矢量控制模型的工作原理如图 1 所示,其工作原理描述如下:

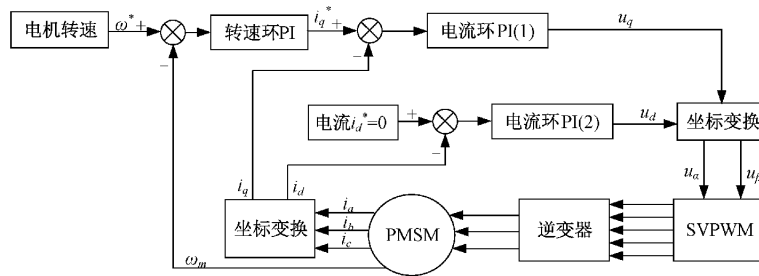


图 1 三相永磁同步电机矢量控制模型

2 模型参考自适应算法

传统电机驱动控制中,采用霍尔传感器等传感器对电机的转速进行测量;但在测量过程中,传感器易受到电磁干扰影响导致较大测量误差,并且传感器的设计增大了电机的驱动成本;因此,在本系统中为消除电压传感器的测量误差,通过对永磁同步电机的转速进行估计,以实现较好的鲁棒性和更准确的电机速度估计。

模型参考自适应^[14]算法模型如图 2 所示,算法将三相永磁同步电机作为电压参考模型,计算出的定子电流与电机转速无关;而电流可调模型计算出的定子电流与电机的估计转速、位置相关;通过自适应机制模型,将电机的估计转速调整为实际转速。

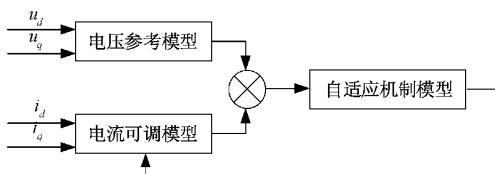


图 2 模型参考自适应算法模型

本系统采用无传感器设计,所以电压参考模型输入的 u_d 和 u_q ,通过电压重建模型获得;电压重建模型通过脉冲调制周期(T_a 、 T_b 、 T_c)和直流电源 U_{dc} ,计算模型的重构电压,如式(6)~(8)所示。

$$v_a = \frac{U_{dc}}{3} F(2T_a - T_b - T_c) \quad (6)$$

电机初始转速 ω^* 和电机反馈转速 ω_m 向电机转速控制模块传输,电机转速控制模块输出交轴电流初始值 i_q^* ;

交轴电流初始值 i_q^* 和电机交轴电流实际值 i_q 向电流控制模块的电流环 PI(1) 传输,电流控制模块的电流环 PI(1) 输出交轴电压初始值 u_q ;

直轴电流初始值 i_d^* 和电机直轴电流实际值 i_d 向电流控制模块的电流环 PI(2) 传输,电流控制模块的电流环 PI(2) 输出直轴电压初始值 u_d ;

交轴电压初始值 u_q 和直轴电压初始值 u_d 经过反 PARK 变换后向电平空间矢量调制模块传输,电平空间矢量调制模块产生 PWM 信号,经过逆变器,实现了对三相永磁同步电机三相控制电压的输出。

$$v_b = \frac{U_{dc}}{3} F(-T_a + 2T_b - T_c) \quad (7)$$

$$v_c = \frac{U_{dc}}{3} F(-T_a - T_b + 2T_c) \quad (8)$$

其中, v_a 、 v_b 、 v_c 为重构电压, F 为逆变器开关频率。

再通过 PARK 变换,将重构电压转换为 v_d 和 v_q ,如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ -\sin\gamma & -\sin(\gamma - 2\pi/3) & -\sin(\gamma + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

电压参考模型为式(10):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_q}{L_d} & -\frac{r}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{v_q}{L_q} - \omega_r \frac{\psi_f}{L_q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, i_d 、 i_q 为 dq 轴等效电流, L_d 为直轴电感, L_q 为交轴电感, ω_r 为电机转速, ψ_f 为转子磁链。

$$\text{令 } i'_d = i_d + \frac{\lambda_m}{L_d}, i'_q = i_q, v'_d = v_d + \frac{r}{L_d} \psi_f, v'_q = v_q;$$

电流可调模型为式(11):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L_d} & \omega_e \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_e \frac{L_q}{L_d} & -\frac{r}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v'_d}{L_d} \\ \frac{v'_q}{L_q} - \omega_e \frac{\psi_f}{L_q} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, i'_d, i'_q 为 i_d, i_q 的电流估计值, ω_e 为电机的估计转速。

通过自适应机制模型对电压参考模型和电流可调模型之间的误差进行分析, 调整优化电流可调模型, 实现电流可调模型跟踪电压参考模型; 自适应机制模型采用 PI 控制器实现, 因此电机的估计转速为式(12):

$$\omega_e = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left[\frac{L_q}{L_d} i_d i'_q - \frac{L_d}{L_q} i_q i'_d - \frac{\psi_f}{L_q} (i_q - i'_q) + i_d i_q \left(\frac{L_d}{L_q} - \frac{L_q}{L_d} \right) \right] + \omega_e(0) \quad (12)$$

其中, K_p, K_i 分别为比例、积分系数, $\omega_e(0)$ 为初始值。

3 分数阶 PI $^\lambda$ 控制

3.1 分数阶 PI $^\lambda$ 控制器

传统比例积分控制器^[15]为整数阶算法, 结构简单, 易于实现, 在传统电机控制中较为广泛应用。但是 3D 生物打印机的打印过程中永磁同步电机的工作状态是非线性时变的, 为保证 3D 生物打印机的打印精度和更精确的控制效果, 将分数理论引入到 PI 控制中, 提出了分数阶 PI $^\lambda$ 控制, 增加了可调参数 λ , 实现比整数阶 PI 控制器更佳的控制效果。

在设计分数阶 PI $^\lambda$ 控制器时, 优先确定分数阶的积分, 本文根据 Grunwald-Letnikov 理论^[16]设计分数阶积分; Grunwald-Letnikov 理论定义分数阶积分为式(13):

$${}_0 D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \left| h^{-\alpha} \sum_{k=0}^{\infty} \omega_k^\alpha f(t - kh) \right| \quad (13)$$

其中, $\alpha > 0$, 权系数为 $\omega_k^\alpha = \frac{(-1)^k \Gamma(\alpha + 1)}{k! \Gamma(\alpha - k + 1)}$ 。取其有限项分析, 近似表示分数阶积分为式(14):

$${}_0 D_t^\alpha f(t) = h^{-\alpha} \sum_{k=0}^{\infty} \omega_k^\alpha f(t - kh), t = nh \quad (14)$$

在 z 域内研究分数阶系统, 对上式进行 z 域变换为式(15):

$$Z[{}_0 D_t^\alpha f(t)] \approx \left| T^{-\alpha} \sum_{k=0}^{\infty} \omega_k^\alpha z^{-k} \right| F(z) \quad (15)$$

式中: T 为采样周期。

整数阶 PI 控制器方程为式(16):

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

将积分项引用到分数域, 得到分数阶 PI $^\lambda$ 控制器方程为式(17):

$$y(t) = K_p e(t) + K_i s^{-\lambda} e(t) \quad (17)$$

对分数阶 PI $^\lambda$ 控制器方程进行 z 域变换为式(18):

$$Y(z) \approx K_p E(z) + K_i T^\alpha \sum_{k=0}^n \omega_k^\alpha z^{-k} E(z) \quad (18)$$

基于上述公式分析, 分数阶积分控制器相比于传统比例控制器计算精度更高, 并且在采样周期 T 降低和 n 增大的情况下, 分数阶积分控制器的阶次直接影响积分控制效果。

分数阶积分器的阶次可在实数范围内选择, 使得分数阶 PI $^\lambda$ 控制器具有更好的鲁棒性和灵活性。分数阶 PI $^\lambda$ 控制器为式(19), 分数阶 PI $^\lambda$ 控制器原理如图 3 所示。

$$PI^\lambda = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (19)$$

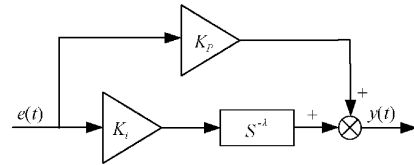


图 3 分数阶 PI $^\lambda$ 控制器原理

3.2 分数阶 PI $^\lambda$ 控制器应用于转速环、电流环和 MRAS

传统技术中, 三相永磁同步电机模型中转速 PI 控制器、 d 轴电流 PI 控制器、 q 轴电流 PI 控制器以及 MRAS 算法中自适应机制模型采用的 PI 控制模型均采用的整数阶 PI 控制器; 本系统分别替换为分数阶 PI $^\lambda$ 控制器, 如图 4 所示, 从而实现系统对被控对象更佳的控制效果。

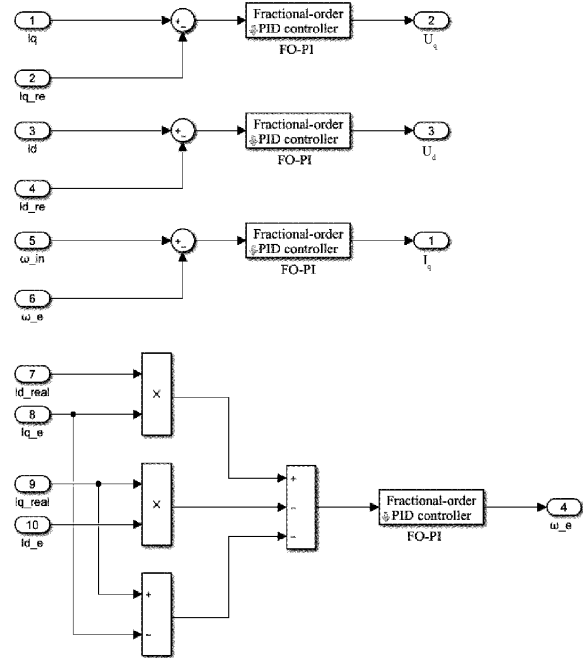


图 4 基于 Simulink 分数阶 PI $^\lambda$ 控制器仿真模型

4 算法优化 PI

4.1 粒子群算法

粒子群算法^[17]是一种群体智能算法, 通过模拟鸟群随

机捕食提出的优化算法。算法的核心思想是:不同粒子之间相互交流,在空间中搜寻最优解,粒子的移动轨迹和移动速度就是个体的搜寻过程。

假设数量为 N 的种群在 M 维空间运动,第 i 个粒子的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM})$,速度为 $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iM})$;初始化粒子,在粒子的搜寻过程中获取粒子的最优值 $P_{bi} = (p_{bi1}, p_{bi2}, \dots, p_{biM})$;整个空间的最优值为 $G_{bi} = (g_{bi1}, g_{bi2}, \dots, g_{biM})$ 。根据粒子的最优值和空间的最优值,通过式(20)来调整粒子的位置和速度^[18]:

$$v_{im}^{k+1} = \alpha \times v_{im}^k + c_1 \times r_1 \times (p_{bim} - x_{id}^k) + c_2 \times r_2 \times (g_{bim} - x_{id}^k) \quad (20)$$

其中, v_{im}^{k+1} 表示第 i 个粒子在第 $k+1$ 次迭代时的运动速度在第 m 维上的分量, α 为惯性权重, v_{im}^k 表示第 i 个粒子在第 k 次迭代时的运动速度在第 m 维上的分量, k 为迭代次数, c_1, c_2 为学习因子, r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, p_{bim} 表示粒子的最优值 P_{bi} 在第 m 维上的分量, g_{bim} 表示粒子的最优值 G_{bi} 在第 m 维上的分量。

4.2 粒子群算法优化 PI

三相永磁同步电机的启动过程是一个非线性的动态过程,为了提高电机的响应速度,通过粒子群算法进行迭代优化,快速调节控制参数。粒子群优化流程如图 5 所示。

通过 MATLAB 软件实现粒子群算法,并通过 main 文件中的 sim 函数实现对通过 Simulink 软件搭建的三相永磁同步电机仿真模型的 PI 参数的调整。粒子群的维数为 9,将粒子群的值依次赋值给转速环 FOPF 中的 $K_{p1}, K_{i1}, \lambda_1$, 电流环 FOPF(1)中的 $K_{p2}, K_{i2}, \lambda_2$ 以及电流环 FOPF(2)中的 $K_{p3}, K_{i3}, \lambda_3$,运行仿真模型,获取其适应度值返回 main 文件,以确定是否符合终止条件,如果符合将粒子群的值作为最优解输出;如果不符合将继续更新粒子群,直到符合终止条件或达到最大迭代次数。粒子群算法优化 FOPF 如图 6 所示。

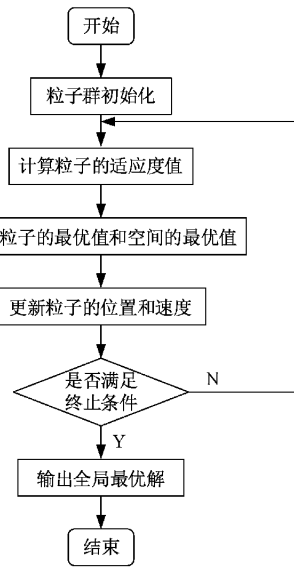


图 5 粒子群优化流程

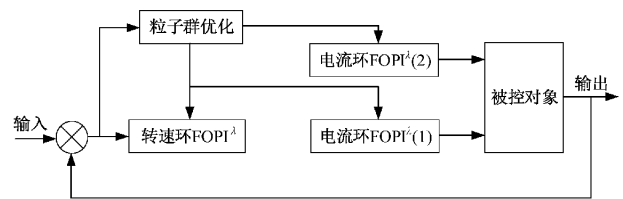


图 6 粒子群算法优化 FOPF 结构图

5 仿真实验

5.1 三相永磁同步电机仿真模型的建立

本文基于 Simulink 建立了三相永磁同步电机仿真模型;模型主要包括:转速环 PI 模块、电流环 PI 模块、SVPWM 模块、坐标变换模块、MRAS 模块和三相永磁同步电机模块。系统仿真模型如图 7 所示。

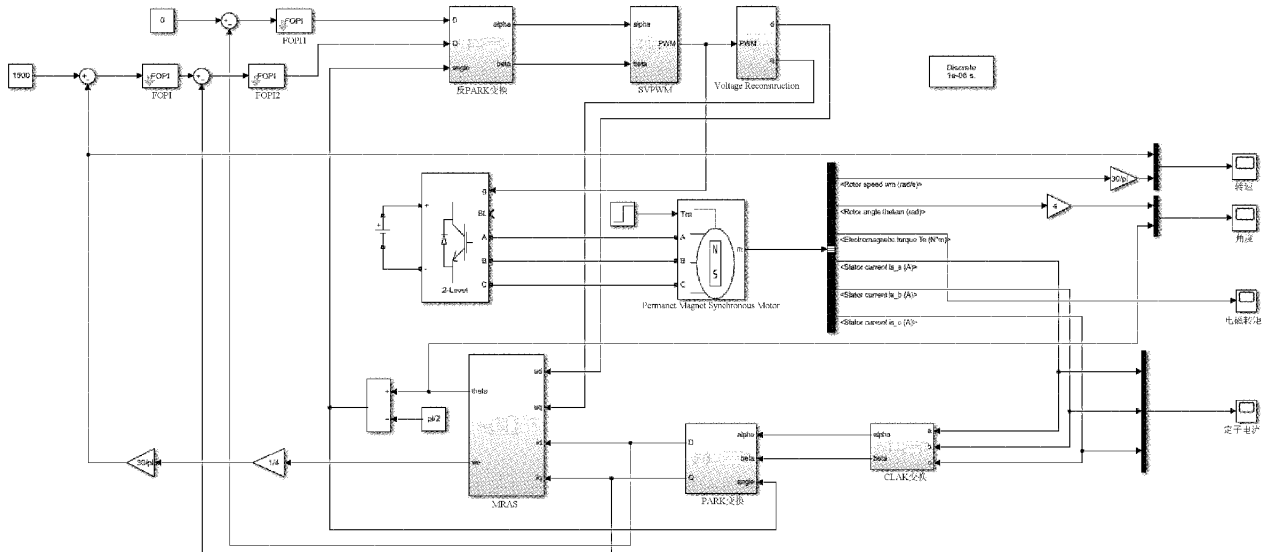


图 7 基于 Simulink 系统仿真模型

5.2 仿真结果分析

三相永磁同步电机的电机模型参数设置,如表 1 所示。

表 1 电机模型参数

电机模型参数	额定值
直流母线电压	560 V
电阻值	0.11 Ω
极对数	4
阻尼系数	0.000 202 4 Nm·s
转速	3 000 r/min
电感值	0.000 835 H
磁链值	0.111 9 Wb
转动惯量	0.001 6 kg·m ²

粒子群算法初始参数设置,如表 2 所示。

表 2 粒子群算法初始参数

参数	数值
维数	9
加速常数	2
最小适应值	0.1
PI 参数范围	[0,500]
惯性因子	0.6
粒子群规模	50
最大迭代次数	50
λ 参数范围	[0,1]

仿真时间设置为 0.5 s,电机初始转速设置为 1 500 r/min,负载转矩初始设置为 0 Nm,0.2 s 时负载转矩设置为 10 Nm。

基于 Simulink 平台搭建的三相永磁同步电机模型,采用遗传粒子群模糊优化 PI 的方法调整电机转速,遗传粒子群模糊优化算法在经过 32 次迭代后,PI 参数曲线和目标函数曲线趋于平稳。最终,算法优化后的 PI 参数为: $K_{p1}=0.652 1$ 、 $K_{i1}=425.489 1$; $K_{p2}=2.826 0$ 、 $K_{i2}=191.375 3$; $K_{p3}=4.347 8$ 、 $K_{i3}=452.318 1$ 。遗传粒子群模糊优化 PI 目标函数曲线如图 8 所示。

基于 Simulink 平台搭建的三相永磁同步电机模型采用粒子群优化 FOPI 的方法调整电机转速,该算法在经过 39 次迭代后,PI 参数曲线和目标函数曲线趋于平稳。最终,算法优化后的 PI 参数为: $K_{p1}=0.288 1$ 、 $K_{i1}=273.449 5$ 、 $\lambda_1=0.852 9$; $K_{p2}=4.246 2$ 、 $K_{i2}=284.886 5$ 、 $\lambda_2=0.842 8$; $K_{p3}=5.135 5$ 、 $K_{i3}=13.823 4$ 、 $\lambda_3=0.870 6$ 。粒子群优化 FOPI 目标函数曲线如图 9 所示。

将传统 PI 控制参数、遗传粒子群模糊优化 PI 的控制参数和粒子群优化 FOPI 控制参数分别作为三相永磁同步

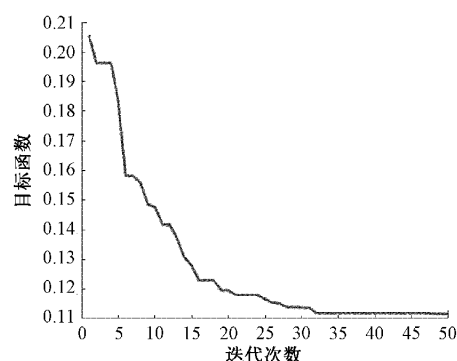


图 8 遗传粒子群模糊优化 PI 目标函数曲线

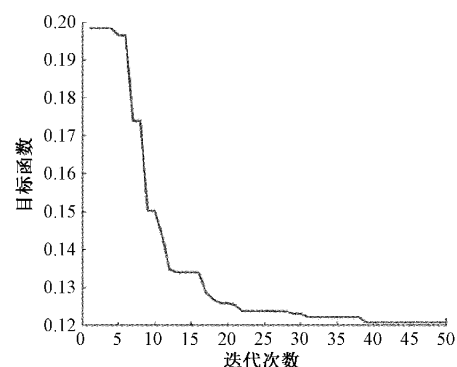


图 9 粒子群优化 FOPI 目标函数曲线

电机的控制参数,基于 Simulink 模型输出传统 PI 控制、遗传粒子群模糊优化 PI 控制和粒子群优化 FOPI 控制的电机转速曲线。如图 10 所示。

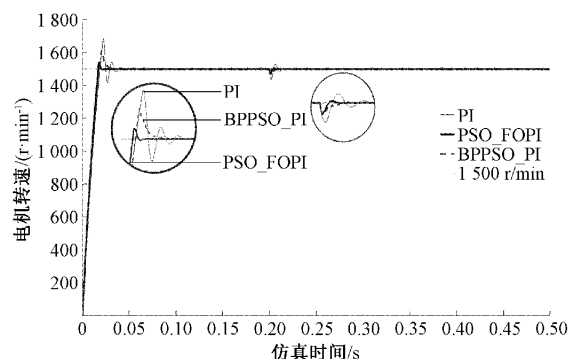


图 10 PI 控制、遗传粒子群模糊优化 PI 控制和粒子群优化 FOPI 控制电机转速曲线

遗传粒子群模糊优化 PI 控制的电磁转矩曲线如图 11 所示。粒子群优化 FOPI 控制的电磁转矩曲线如图 12 所示。

从 MATLAB 中输出算法优化后的 PI 控制参数,并根据图 10~12 获取电机转速曲线相关参数。具体如表 3 所示。

从表 3 中可以看出粒子群优化后的 FOPI 控制电机超调量为 2.6%,相比于遗传粒子群模糊优化后的 PI 控制电机超调量 7.5%和传统 PI 控制电机超调量 11.8%,分别降

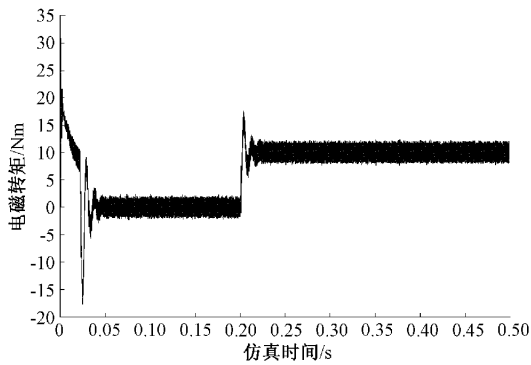


图 11 遗传粒子群模糊优化 PI 控制电磁转矩曲线

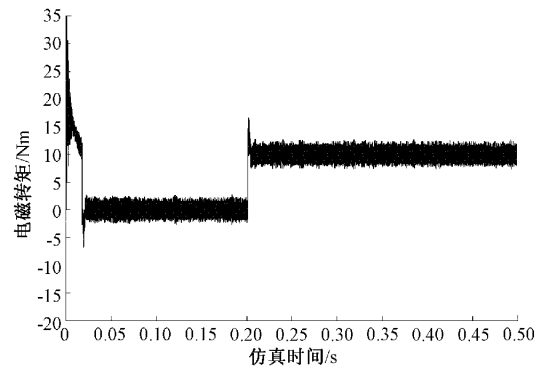


图 12 粒子群优化 FOPI 控制电磁转矩曲线

表 3 PI 参数和各性能指标

性能指标	PI	遗传粒子群模糊优化 PI	粒子群优化 FOPI		
PI 参数	$K_{p1}=0.15$	$K_{p1}=0.652\ 1$	$K_{p1}=0.288\ 1$	$K_{i1}=273.449\ 5$	$\lambda_1=0.852\ 9$
	$K_{i1}=50$	$K_{i1}=425.489\ 1$			
	$K_{p2}=4$	$K_{p2}=2.826\ 0$			
	$K_{i2}=60$	$K_{i2}=191.375\ 3$			
	$K_{p3}=4$	$K_{p3}=4.347\ 8$			
	$K_{i3}=60$	$K_{i3}=452.318\ 1$			
超调量/%	11.8	7.5	2.6		
上升时间/s	0.019	0.018	0.017		
调节时间/s	0.032	0.015	0.006		

低了 4.9% 和 9.2%；粒子群优化后的 FOPI 控制电机转速曲线上升时间为 0.017 s，相比于遗传粒子群模糊优化后的 PI 控制电机上升时间 0.018 s 和传统 PI 控制电机上升时间 0.019 s，分别提高了 5.6% 和 10.6%；粒子群优化后的 FOPI 控制电机转速曲线调节时间为 0.006 s，相比于遗传粒子群模糊优化后的 PI 控制电机调节时间 0.015 s 和传统 PI 控制电机调节时间 0.032 s，分别提高了 60% 和 81.3%；通过上述数据对比，粒子群优化后的 FOPI 参数在控制电机的超调量、电机上升时间、电机转速曲线调节时间等参数上有明显改进。

5.3 算法应用研究

为研究本文提出算法普适性及扩展性，本节针对无刷直流电机^[19] (brushless direct current motor, BLDCM) 的控制系统引入上述优化方法，并进行仿真验证。无刷直流电机的仿真模型如图 13 所示。

无刷直流电机的电机模型参数设置如表 4 所示。

基于无刷直流电机的矢量控制仿真模型，引入粒子群算法，并将仿真模型中 PI 控制器替换为分数阶控制器，通过粒子群算法优化 PI 参数。

将传统 PI 控制参数和粒子群算法优化 FOPI 控制参

数分别作为无刷直流电机的控制参数，基于 Simulink 模型输出传统 PI 控制和粒子群优化 FOPI 控制的电机转速曲线。如图 14 所示。

根据图 14 获取 BLDCM 电机转速曲线相关参数。具体如表 5 所示。

根据上述仿真结果可知，通过粒子群算法优化 FOPI 控制超调量为 3.19%，相比传统 PI 控制电机超调量 4.86%，降低了 1.67%；粒子群优化后的 FOPI 控制电机转速曲线调节时间为 0.010 4 s，相比传统 PI 控制电机调节时间 0.284 s，缩短了 0.273 6 s；从而得出粒子群算法优化 FOPI 控制的 BLDCM 在电机转速调节、超调量控制等方面有明显改进，验证了本文提出的粒子群算法优化分数阶 PI 控制器能够应用于其他类型的电机控制，进而得出该优化方法在电机控制领域具有一定的普适性。

综上，由上述仿真结果可以看出粒子群算法优化后的电机控制参数，对三相永磁电机的控制能够实现较快的响应速度，并能有效降低超调量，而且在加入负载时，调节时间更短，从而验证了算法能够明显提升电机的控制性能。此外，将优化算法引入到无刷直流电机的矢量控制中，同样能够明显改善电机的控制效果。

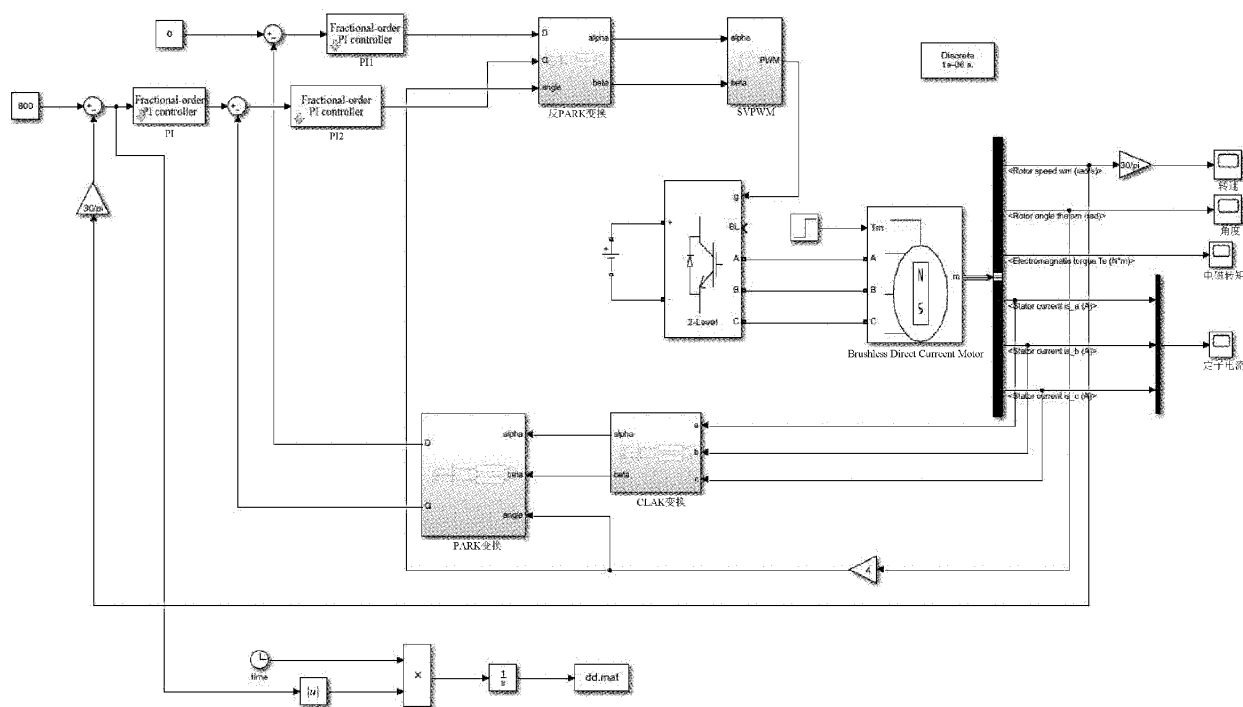


图 13 基于 Simulink 的无刷直流电机仿真模型

表 4 BLDCM 模型参数

电机模型参数	额定值
供电电压	220 V
电阻值	2.875 Ω
极对数	4
粘滞摩擦系数	0.001 Nm·s/rad
转速	1 200 r/min
电感值	0.008 5 H
转动惯量	0.008 kg·m ²

表 5 无刷直流电机控制系统 PI 参数和各性能指标

性能指标	PI	粒子群优化 FOPI
PI 参数	K_{p1}	$K_{p1} = 5.9129$
	K_{p2}	$K_{p2} = 0.9988$
	K_{p3}	$K_{p3} = 2.4137$
	K_{i1}	$K_{i1} = 23.8103$
	K_{i2}	$K_{i2} = 0.1384$
	K_{i3}	$K_{i3} = 0.0031$
	λ_1	$\lambda_1 = 0.9991$
	λ_2	$\lambda_2 = 0.0025$
	λ_3	$\lambda_3 = 0.9717$
超调量	4.86%	3.19%
上升时间/s	0.011	0.011
调节时间/s	0.284	0.0104

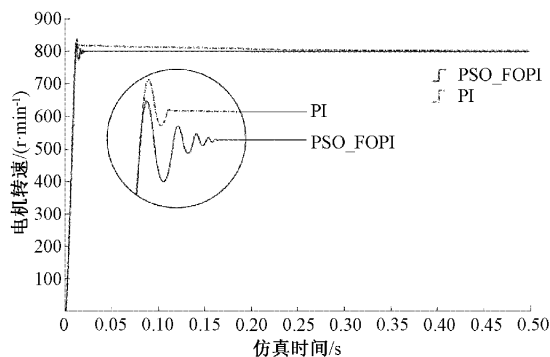


图 14 PI 控制和粒子群优化 FOPI 控制 BLDCM 转速曲线

6 结 论

本文对 3D 生物打印机的三相永磁同步电机 PI 控制的参数整定进行了改进。通过引入 MRAS 算法对电机的转速和位置进行估计,优化反馈信号的准确性;并采用 FOPI 对电机控制,相比于遗传粒子群模糊优化 PI 等复杂控制算法,能够实现更灵活更精确的控制效果;通过粒子群算法对 FOPI 参数进行整定寻优,提高系统的响应速度。并通过 Simulink 对系统进行了仿真实验,粒子群优化后的 FOPI 控制电机超调量为 2.6%,相比遗传粒子群模糊优化 PI 控制电机降低了 4.9%;并且粒子群优化后的 FOPI 控

制电机上升时间为 0.017 s、调节时间为 0.015 s,相比遗传粒子群模糊优化 PI 控制电机分别提高了 5.6%、60%,从而验证了本文采用的方法具有更佳的控制效果和较高的控制精度,可实现较高的打印精度和打印效率。此外,通过本文提出的粒子群算法优化分数阶 PI 控制器,研究人员可根据需求修改特定参数设置,以应用于其他类型的电机系统控制。

参考文献

- [1] VIJAYAVENKATARAMAN S, YAN W C, LU W F, et al. 3D bioprinting of tissues and organs for regenerative medicine [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2018, 132: 296-332.
- [2] 范德增. 3D 生物打印技术的发展与展望[J]. *新材料产业*, 2017(11): 13-18.
- [3] 莫理莉. 基于滑模变结构的表面式永磁同步电机速度与位置控制[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [4] 李芳, 王毓顺, 张家瑞. 基于模糊 PI 控制的永磁同步电机的建模与仿真[J]. *工业控制计算机*, 2013, 26(8): 73-74.
- [5] 许仙明, 吴静进, 吴敏, 等. 永磁同步电机改进模糊 PI 控制研究[J]. *微特电机*, 2019, 47(7): 68-71.
- [6] 闫浩安, 李建冬. 基于改进神经网络 PID 的永磁同步电机控制研究[J]. *现代防御技术*, 2021, 49(4): 43-48.
- [7] SONG Z, YANG H. Hardware detection and parameter tuning method for speed control system of PMSM[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/322/7/072046.
- [8] KUMAR V, GAUR P, MITTAL A P. ANN based self tuned PID like adaptive controller design for high performance PMSM position control [J]. *Expert Systems With Applications*, 2014, 41(17): 7995-8002.
- [9] YI L, ZHANG C, WANG G. Research of self-tuning PID for PMSM vector control based on improved KMTOA [J]. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2017, 9(3): 60-67.
- [10] SZCZEPANSKI R, TARCZEWSKI T, GRZESIAK L M. Adaptive state feedback speed controller for PMSM based on Artificial Bee Colony algorithm[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2019, DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105644.
- [11] GHOULEMALLAH B, SEBTI B, ABDESSELEM C, et al. Genetic algorithm and particle swarm optimization tuned fuzzy PID controller on direct torque control of dual star induction motor[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(7): 1886-1896.
- [12] 解文成, 胡霞, 徐聪. PMSM 矢量控制系统的研究[J]. *电子世界*, 2020(12): 58-59.
- [13] JACOB J, CHITRA A. Field oriented control of space vector modulated multilevel inverter fed PMSM drive[J]. *Energy Procedia*, 2017, 117: 966-973.
- [14] 周宇, 陈永军. 基于 MRAS 的永磁同步电机改进滑模速度控制设计[J]. *微电机*, 2021, 54(10): 74-78, 89.
- [15] 翟同林, 王建立, 孟浩然, 等. 基于模糊 PID 控制的望远镜伺服控制系统[J]. *电子测量技术*, 2012, 35(3): 11-15.
- [16] KRZYSZTOF O, MACIEJ R, JAKUB Z. The frequency and real-time properties of the microcontroller implementation of fractional-order PID controller [J]. *Electronics*, 2021, DOI: 10.3390/electronics10050524.
- [17] NAZELAN A M, OSMAN M K, SAMAT A A, et al. PSO-based PI controller for speed sensorless control of PMSM[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1019(1), DOI: 10.1088/1742-6596/1019/1/012027.
- [18] 时红军. 基于多样性反馈的粒子群聚类算法[J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(2): 24-26.
- [19] 王新, 候风艳. 基于改进的 PSO-BP 神经网络的无刷直流电机控制[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(2): 10-14.

作者简介

姚冠洲, 硕士研究生, 主要研究方向为 3D 打印算法控制。

E-mail: yaoguanzhou0561@link.tyut.edu.cn

郝润芳, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能与控制。

菅傲群, 博士, 教授, 主要研究方向为控制系统建模与仿真。

康日晖, 博士, 主要研究方向为 3D 生物打印算法控制。

杨琨(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为传感器与智能机器人。

禚凯, 博士, 讲师, 主要研究方向为 3D 打印系统控制。