

基于 PSO-PID 的电动位移装置伺服电机控制系统

赵 静¹, 张 彬¹, 孙嘉瞳¹, 尚建华^{1*}, 唐顺兴², 王 杨²

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620;

2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201801)

摘 要: 为了提高光学相位补偿器 SBC-IR 的控制精度, 解决传统 PID 算法在自动控制过程中响应速度较慢、精度低等问题, 更好地实现 PID 参数的智能整定与位置最优控制, 采用粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 优化光学相位补偿器电动位移装置的直流伺服位置控制系统, 实现三环比例、积分和微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 位置控制系统参数的自动寻优。首先, 搭建电动位移装置的三环直流伺服控制系统模型, 包括位置环、速度环和电流环; 然后, 采用 PSO 算法对位置环的 PID 参数进行寻优, 得到 k_p 、 k_i 、 k_d 三个参数的最优值, 并对 PSO 算法优化直流伺服位置系统的控制效果与传统 PID 控制算法的控制效果进行对比。实验结果表明: 采用 PSO 算法优化的电动位移装置三环伺服位置系统具有较好的控制性能, 可以实现位置的高性能追踪, 响应速度更快, 并能在一定程度上提升电动位移装置的位移精度。

关键词: 电动位移装置; 控制精度; 直流伺服位置系统; 三环 PID; 粒子群算法

中图分类号: TP273+2

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2023)11-0009-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2023.11.002

Servo Position Control System of Motorized Translation Stage Based on PSO-PID

ZHAO Jing¹, ZHANG Bin¹, SUN Jia-tong¹, SHANG Jian-hua^{1*},
TANG Shun-xing², WANG Yang²

(1. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201801, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of the servo position system of optical phase compensator SBC-IR, improve the response speed and accuracy of the traditional PID algorithm during the control process, and realize the intelligent tuning of PID parameters and optimal position control, the particle swarm optimization (PSO) was used to optimize the DC servo position control system of the motorized translation stage of optical phase compensator. In this way, the three-loop PID position system parameters were optimized automatically. Firstly, the three-loop DC servo control system model of the motorized translation stage was built including the position loop, the speed loop and the current loop. Secondly, the PSO was used to optimize the PID parameters of the position loop, the optimal values of k_p , k_i and k_d were obtained. Besides, the DC servo position system performance of the PSO algorithm and the traditional PID algorithm are compared. The experimental results show that the three-ring servo position system of the motorized translation stage optimized by the PSO algorithm is able to improve the control performance including the high-performance tracking of the position, the fast response speed and the displacement accuracy of the motorized translation stage.

Key words: motorized translation stage; control accuracy; DC servo positioning system; three-loop PID; particle swarm optimization

0 引 言

制造业的快速发展离不开机械加工精度, 加工精度的提高与测量技术的发展水平密切相关^[1]。在众多测量仪器和设备中, 电动位移装置主要用于驱动各种

高精度自动检测设备工作。实际测量应用中, 自动检测设备搭载在电动位移平台上, 通过控制位移平台的前进或后退进而带动自动检测设备进行测量等工作。例如, 借助电动位移装置驱动光学相位补偿器 SBC-

收稿日期: 2022-12-28

修回日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(52173219)

作者简介: 赵 静(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气传动及智能控制; 通讯作者: 尚建华(1983-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为现代电子技术与系统、激光雷达信号探测及处理、激光遥感和材料无损检测等。

IR, 可实现对干涉光路相位差的自动补偿。因此, 电动位移装置控制系统的控制精度、响应速度、抗干扰能力等性能直接决定着自动检测设备工作性能的准确性和可靠性。

该文搭建的电动位移装置是由直流伺服电机系统控制, 用以代替传统千分尺驱动相位补偿器 SBC-IR 进而实现光路相位的自动补偿。该系统具有控制简单、运动精度高的特点^[2], 其中直流伺服系统的控制精度是准确实现相位补偿的关键因素, 而传统 PID 直流伺服系统的控制精度低且 PID 参数是通过人工经验调节得到的, 并不是最优参数^[3]。因此, 传统 PID 直流伺服系统无法达到控制参数的最优化。针对上述问题, 该文首先搭建了电动位移装置三环直流伺服 PID 控制系统的模型, 然后采用 PSO 算法优化位置环的

PID 控制参数, 最终完成 PID 控制参数的智能整定, 将优化后的参数代入。实验结果表明, 通过智能算法与直流伺服位置 PID 控制系统的有效结合, 不仅有效解决了电动位移装置直流伺服系统控制精度低的问题, 而且实现了电动位移装置对位置环 PID 参数的自动寻优, 进一步提高了电动位移装置的位移精度、动态性能和响应速度, 并验证了直流伺服电机驱动相位补偿器实现光路相位自动补偿的可行性。

1 电动位移装置直流伺服系统结构

该文研究的电动位移装置直流伺服系统是以直流无刷电机为控制对象的三环直流伺服系统, 由位置环、速度环和电流环组成, 该三环直流伺服系统的结构框图如图 1 所示。

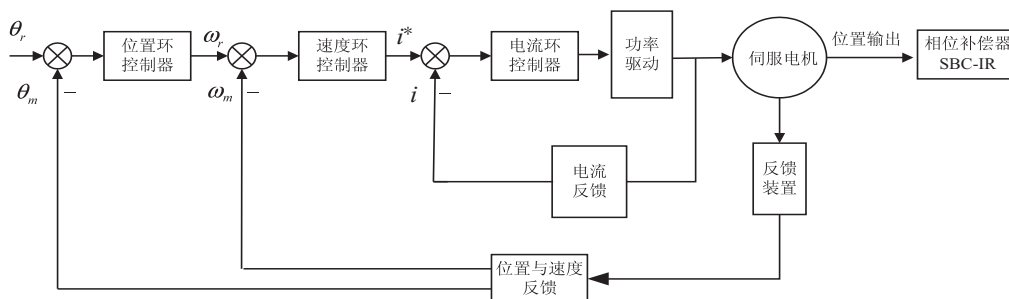


图 1 三环直流伺服系统结构框图

图 1 中, 基于电动位移装置三环直流伺服系统从内到外依次为电流环、速度环和位置环。当给位置环输入目标位置量 θ_r 后, 与光电编码器反馈的位置实际量 θ_m 做差得到位置误差值, 该误差量首先经位置环作用, 然后输出速度量 ω_r 到速度环, 再经速度环调节后的输出量 i^* 输入到电流环, 最后, 电流环的输出量经功率放大后驱动伺服电机运转到目标位置^[4-5], 进而驱动相位补偿器实现光路的相位补偿。对于电动位移装置直流伺服控制系统而言, 整个伺服系统由直流伺服电动机、功率驱动器、控制器和传感器四大部分组成, 其中位置环的输入量直接决定着电机的转动角度 (位移装置的移动位移量), 而高精度的位置反馈控制元件和速度反馈元件通常由光电编码器构成, 该文也采用编码器作为反馈装置, 将位置信号反馈回输入^[6]。

2 电动位移装置直流伺服系统模型

为了建立电动位移装置无刷直流电机的数学模型, 首先从直流电机的工作原理出发分析其转矩特性。建立数学模型时, 不考虑齿槽效应的影响, 并且假定电机的气隙磁通恒定不变, 忽略温度效应和磁路饱和, 忽略涡流和磁滞损耗^[7]。

直流电机的工作原理如图 2 所示, 其中,

E ——电机电枢产生的感应电动势;

C_e ——感应反电动势系数 ($V \cdot s / \text{rad}$);

U_0 ——电枢电压 (V);

R_Σ ——电枢电阻 (Ω);

L_Σ ——电枢电感 (H);

i_d ——电枢电流 (A);

ω ——转动角速度 (rad/s);

T_e ——电机电磁转矩 ($N \cdot m$);

C_T ——电机的转矩系数 ($\text{kg} \cdot \text{m/A}$);

T_L ——负载转矩 ($N \cdot m$);

B ——电机的粘性阻尼系数 ($N \cdot m \cdot s / \text{rad}$);

T_j ——惯性转矩 ($N \cdot m$)。

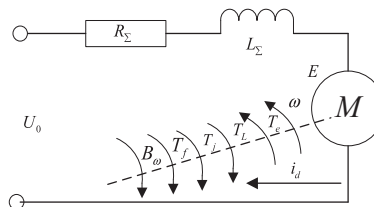


图 2 直流电机工作原理

感应电动势 E 、电磁转矩 T_e 、电机转动产生的惯性转矩 T_j 如式(1)所示^[8]。

$$\begin{cases} E = C_e \omega \\ T_e = C_T i_d \\ T_j = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

电机转动时,受摩擦阻尼转矩 T_f 和粘滞阻尼转矩 $B\omega$ 的影响,根据转矩平衡关系可得电机电磁转矩 T_e 为:

$$T_e = T_f + T_L + T_j + B\omega \quad (2)$$

其中,负载转矩 T_L 在拉普拉斯变换后可作为扰动量。并且,由基尔霍夫电压定律可得式(3)。

$$i_d R_\Sigma + E + L \Sigma \frac{di_d}{dt} = U_0 \quad (3)$$

联立式(1)至式(3)可得式(4)。

$$\begin{cases} E = C_e \omega \\ T_e = C_T i_d \\ T_j = J \frac{d\omega}{dt} \\ T_e = T_f + T_L + T_j + B\omega \\ i_d R_\Sigma + E + L \Sigma \frac{di_d}{dt} = U_0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)做拉普拉斯变换并联合化简,可得无刷直流电机的传递函数,如式(5)所示。

$$\begin{cases} C_T i_d(s) = T_f(s) + T_L(s) + Js\omega(s) + B\omega(s) \\ (i_d(s)R_\Sigma + C_e\omega(s) + sL\Sigma i_d(s) = U_0(s) \end{cases} \quad (5)$$

3 粒子群优化算法

3.1 粒子群优化算法基本理论

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出的^[9],属于群智能优化算法中典型的一种^[10],通过模拟鸟群的捕食过程,利用简单的速度—位置公式实现整个空间的寻优操作^[11],通过个体与群体粒子的搜索迭代寻优逐渐找到最优解^[12]。粒子群优化为一种随机搜索算法,尤其适用于动态环境或者多目标优化,更能发挥自身优势^[13]。假设目标群体的搜索空间为 D 维,种群规模为 N ,第 i 个粒子的坐标、速度和历史最佳位置分别为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$ 、 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})^T$ 和 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{id})^T$,整个种群的最佳位置为 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd})^T$ 。Shi Y 和 Eerhart^[14]引入了惯性权重系数 w 加快粒子的求解速度,当在整个种群中搜索得到两个最佳位置时,粒子将依据式(6)和式(7)更新自身的速度和位置^[15]。

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{id}^k - X_{id}^k) \quad (6)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq d \leq D \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_{id} = v_{\max}, & \text{if } v_{id} > v_{\max} \\ v_{id} = -v_{\max}, & \text{if } v_{id} < -v_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, w 表示惯性权重, k 表示当前的迭代次数, v_{id} 表示粒子速度且 $v_{id} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, v_{\max} 为常数, c_1 和 c_2 表示学习因子,也称加速常数, r_1 和 r_2 是分布在 $(0, 1)$

范围的随机数。假设每个粒子的初速度为 0,则第 j ($1 \leq j \leq m$) 个粒子的下一次迭代速度 $v^{(j)}$ 如式(9)所示, $v^{(j)}$ 由自身惯性因子、自身最优因子和社会因子三部分组成。

$$v^{(j)} = w \cdot v_0 + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (P^{(j)} - X^{(j)}) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (P_g - X^{(j)}) \quad (9)$$

其中, rand 是 $(0, 1)$ 间的随机数, v_0 为粒子的前一次速度, $P^{(j)}$ 为第 j 个因子自适应度最高的位置, P_g 为种群中自适应度最高的位置。

对于第 j 个粒子,第 $k+1$ 次迭代的位置 $X_{k+1}^{(j)}$ 与第 k 次迭代的位置 $X_k^{(j)}$ 和速度 $v_k^{(j+1)}$ 之间的关系为:

$$X_{k+1}^{(j)} = X_k^{(j)} + v_k^{(j+1)} \cdot dt \quad (10)$$

其中, dt 为仿真间隔。

若前 k 次迭代得到的第 j 个粒子的位置为 $P_k^{(j)}$ 、种群中自适应度最高的位置为 $P_g^{(k)}$,第 $k+1$ 次迭代后的第 j 个粒子位置为 $P_{k+1}^{(j)}$ 、适应度最高的粒子位置为 $P_g^{(k+1)}$,则最终的种群自适应度最高位置 P_g 和历史最优解 $P^{(j)}$ 为:

$$P_g = \begin{cases} P_g^{(k)}, & F(P_g^{(k)}) > F(P_g^{(k+1)}) \\ P_g^{(k+1)}, & F(P_g^{(k)}) < F(P_g^{(k+1)}) \end{cases} \quad (11)$$

$$P^{(j)} = \begin{cases} P_k^{(j)}, & F(P_k^{(j)}) > F(P_{k+1}^{(j)}) \\ P_{k+1}^{(j)}, & F(P_k^{(j)}) < F(P_{k+1}^{(j)}) \end{cases} \quad (12)$$

3.2 粒子群算法优化流程

采用 PSO 算法优化直流伺服系统位置环 PID 控制器参数的流程如图 3 所示。

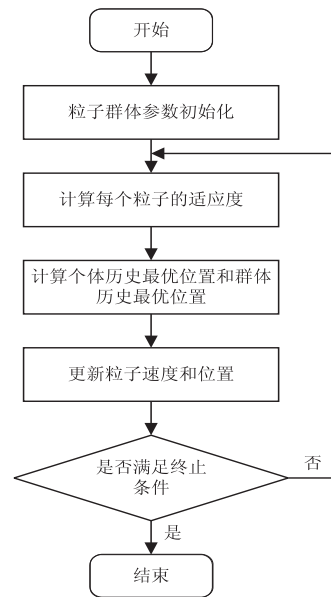


图 3 PSO 算法优化 PID 控制器参数流程

首先,初始化粒子群,确定参数维度 N 、惯性系数 c_1 、 c_2 、 w 及种群规模 m 、迭代次数 n 、局部因子作用半

径 R 。然后,根据公式计算每个粒子的速度、自适应度 $F_{k+1}^{(j)}$ 、 $P^{(j)}$ 、 P_G 和 $P_L^{(j)}$,并依次赋值给控制器运行系统模型。当输出性能指标满足控制要求或达到最大迭代次数时,输出最优结果及迭代次数;否则,更新粒子群的信息,重新计算每个粒子的适应度,重复执行上面步骤,直到完成优化^[3,16]。

4 系统仿真

为了判断直流电机系统控制电动位移装置前进或后退的性能,搭建直流电机控制系统仿真模型进行验证,仿真模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 直流电机控制系统仿真模型参数

参数	数值
转动惯量 J_s	0.000 000 007 2 kg·m ²
粘滞阻尼系数 B	0
电阻 R	33 Ω
电感 L_q	0.6e-3H

4.1 基于传统 PID 算法的电动位移装置三环位置控制系统性能仿真

在 Simulink 中,基于传统 PID 算法搭建电动位移装置的三环位置控制系统仿真模型,同时给定目标位置的输入量,得到控制系统的位置响应曲线,如图 4 所示。

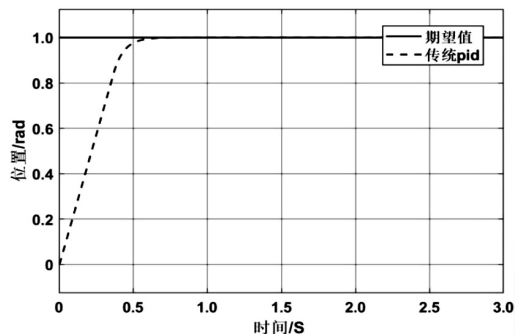


图 4 基于传统 PID 算法的电动位移装置三环位置控制系统位置响应曲线

通过图 4 的位置响应曲线可知,基于传统 PID 算法的电动位移装置三环位置控制系统的启动响应速度较慢,达到目标位置的时间约为 0.6 s 左右。因此,基于传统 PID 算法控制电动位移装置的三环位置在响应速度、动态范围等性能方面需进一步优化。

4.2 PSO 算法优化传统三环位置 PID 控制系统仿真

在 PID 控制中,参数整定是控制器系统设计的核心内容,直接影响控制器性能^[17]。粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法无需过多的参数调整,具有控制过程简单、优化速度快等诸多优点^[18-19]。因此,针对光路相位自适应补偿的需求,相位补偿器 SBC-IR 的位置控制由直流伺服电机和 PSO 优化算法驱动控制。借助 PSO 算法对位置环的 PID

控制器参数进行优化,进而得到最优参数 k_p 、 k_i 、 k_d ,提高三环位置控制系统的控制精度和动态性能,获得相应的光学相位补偿量。依据图 3 所示的 PSO 算法优化直流伺服系统位置环 PID 控制器的流程,设定参数如表 2 所示。

表 2 PSO 算法优化直流伺服系统位置环 PID 控制器的参数设定

参数	数值
种群规模	5
最大迭代次数	10
种群最大值倍数	10
种群最小值倍数	0.1
X_{\max}	300、100、100
X_{\min}	100、1、1

代入上述参数进行仿真,分别得到优化后的三环位置 PID 控制系统的评价函数随迭代次数的变化关系以及位置环 PID 控制器三环位置参数的变化情况,如图 5 和图 6 所示。

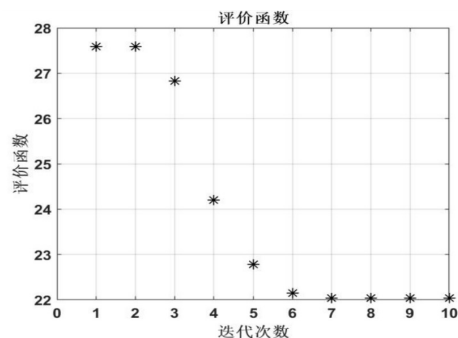


图 5 评价函数随迭代次数的变化关系

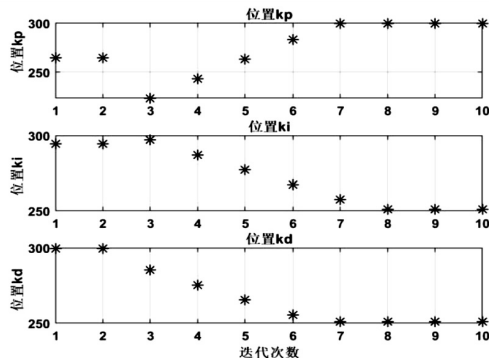


图 6 位置环 PID 控制器三环位置参数随迭代次数的变化规律

由图 5 可知,当迭代到第 5 次,评价函数的变化明显减小;到第 8 次迭代以后,评价函数不再发生变化。在位置参数控制性能方面,由图 6 可知,位置环的三个控制参数 k_p 、 k_i 和 k_d 分别在迭代第 8 次、第 10 次和第 5 次时达到稳定;综合分析可知,最终的 k_p 、 k_i 和 k_d 的优化结果为 300、1 和 1。最后,将上述优化参数结果代入电动位移装置的三环位置 PID 控制系统,最终得到的位置响应曲线如图 7 所示。

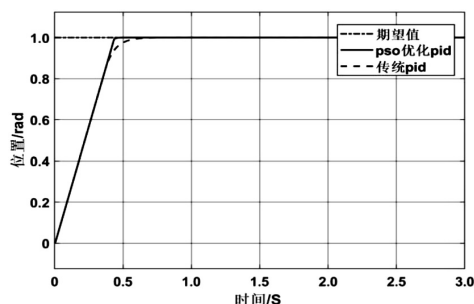


图 7 PSO 算法优化位置环参数前后的系统位置输出响应情况

较传统 PID 控制算法而言,采用 PSO 算法优化后的电动位移装置三环直流伺服位置系统能够在一定范围内快速找到最优值,响应速度更快,能迅速达到所设定的参数值^[20]。从图 7 可知,传统 PID 控制的稳态误差约为 0.003 rad,而经过 PSO 算法优化后的稳态误差小于 0.001 rad,且位置环 PID 参数动态寻优可以在 0.4 s 内达到稳定状态并能避免陷入局部最优,因此控制精度优于三环传统 PID 位置控制系统。

另外,当在直流伺服仿真模型中加入扰动时,利用 PSO 算法优化可以得到系统此时的 k_p 、 k_i 、 k_d 参数最优值以及位置输出响应曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在系统加入扰动后,位置响应曲线可以在 0.5 s 内达到稳定状态,且响应速度和动态性能也优于传统 PID 位置控制系统的性能。

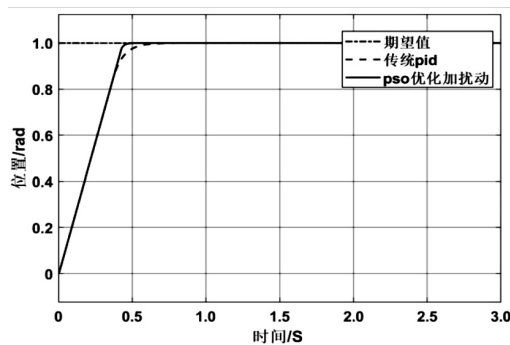


图 8 加入扰动后系统的位置输出响应曲线

5 结束语

从光路相位自适应补偿的实际应用需求出发,针对光学相位补偿器 SBC-IR 电动位移装置的位置控制需求,采用直流伺服电机取代千分尺驱动相位补偿器,并基于 PSO 算法优化了位移装置的三环直流伺服位置控制系统。文章在分析三环直流伺服电机系统的结构组成和 PSO 粒子群算法原理的基础上,通过搭建直流伺服电机的仿真模型,完成了 MATLAB 仿真的 PSO 算法对 PID 控制器参数优化的程序编写,并通过 M 文件调用模型中的原理框图实现 PID 位置环参数的优化。研究表明,相较传统的 PID 算法,优化后的电动位移台三环位置控制系统在动态响应、控制精度等

性能方面均有明显提升,优化后的响应速度和稳态误差能够满足光学相位补偿器的实际应用需求。

参考文献:

- [1] 陈 岚. 高精度大尺寸轴类零件直径检测专用千分尺研制 [D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [2] 王国林,殷 旻. 基于光栅尺反馈的高精度步进电机位移台系统开发 [J]. 太原理工大学学报,2015,46(5):587-591.
- [3] 周冬冬,陈明霞,赵金迪. 基于混合粒子群算法优化橡胶挤出机 Smith-模糊 PID 温度控制系统 [J]. 机床与液压,2022,50(16):125-130.
- [4] 张爱军,程时兵,朱军伟,等. 基于 DSP+CPLD 的无刷直流电机三环控制设计 [J]. 电力电子技术,2012,46(11):106-108.
- [5] 刘超丛. 油田测井用无刷直流电机位置跟踪控制系统研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [6] 郑向周. 基于永磁无刷直流电机的数控传动伺服系统建模与仿真研究 [D]. 太原:太原理工大学,2010.
- [7] 姜 彬. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机控制系统 [J]. 电脑编程技巧与维护,2015(15):19-20.
- [8] 张玉良. 单轴转台旋转位置精确控制设备研制 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 4th IEEE international conference on neural networks. Perth:IEEE,1995:1942-1948.
- [10] 张继荣,张 天. 基于改进粒子群算法的 PID 控制参数优化 [J]. 计算机工程与设计,2020,41(4):1035-1040.
- [11] 杨 晓,王国柱. 基于 PID 控制理论的改进粒子群优化算法 [J]. 控制工程,2019,26(8):1497-1502.
- [12] YAN J, HU T S, HUANG CH C H, et al. An improved particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation,2007(27):1232-1247.
- [13] 王立志. 面向实际工程问题的粒子群优化算法应用技术的研究 [D]. 沈阳:东北大学,2009.
- [14] SHI Y, EERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//IEEE international conference on evolutionary computation. Anchorage:IEEE,1998:69-73.
- [15] 郁 磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [16] 张庆科. 粒子群优化算法及差分进化算法研究 [D]. 济南:山东大学,2017.
- [17] 于 彦,江先亮. 自适应权重混合粒子群算法在 PID 整定中的应用 [J]. 无线通信技术,2022,31(1):15-19.
- [18] GAING Z L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2014,19(2):384-391.
- [19] 杨 智,陈 颖. 改进粒子群算法及其在 PID 整定中的应用 [J]. 控制工程,2016,23(2):161-166.
- [20] 陈 军,李玉榕. 基于 S7-300 PLC 的单片机 PID 控制器设计与实现 [J]. 电气技术,2017,18(8):6-11.