

# 一阶时滞系统的 Ziegler Nichols PSO-PID 控制

刘源<sup>1</sup> 刘磊<sup>1,2</sup> 张少逸<sup>1</sup>

LIU Yuan LIU Lei ZHANG Shaoyi

## 摘要

一阶时滞系统广泛存在于智能制造、电力和化工等领域,是工业过程中的典型环节之一。研究表明,比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制能够使得一阶时滞系统按照期望的性能指标运行。然而, PID 控制器的参数或者需要通过一定的经验测试确定,或者通过群体智能优化算法迭代优化得到。两种参数获得方法长期以来都是独立运行的。对此,针对一阶时滞系统提出了一种基于 Ziegler Nichols 的 PSO-PID 控制方法。通过 Ziegler Nichols 原则获得 PID 控制参数的初始值,以此初始值为参考初始化的 PSO-PID 控制方法中的粒子群。仿真结果表明,基于 Ziegler Nichols 的 PSO-PID 控制在超调量和调节时间方面显著优于 PSO-PID 控制,为一阶时滞系统的 PSO-PID 控制中粒子群初始值的选择提供了一种可行的途径。

## 关键词

一阶时滞系统; Ziegler Nichols; PSO; PID

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.013

## 0 引言

比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制由于其结构简单、易于实现、适应性好和鲁棒性强等优点,长期以来,在工业过程中得到了广泛使用<sup>[1-2]</sup>。据统计,现有的工业工程的控制回路中 90% 以上仍具有 PID 结构。

与此同时,对于 PID 控制方法的理论研究也一直同步进行着,例如神经网络 PID、模糊 PID、自适应 PID、分数阶 PID,以及使用群体智能优化算法对 PID 控制器参数进行优化的控制方法等<sup>[3-10]</sup>。其中,基于群体智能优化(particle swarm optimization, PSO)算法的 PID 控制由于设计简单,一直以来受到了学术界和工程界的青睐<sup>[11-14]</sup>。为了书写方便,将基于群体智能优化算法的 PID 控制简称为 PSO-PID 控制。

然而,上述 PSO-PID 控制方法本质上都是集中在 PID 控制器参数寻优方面的改进,忽略了通过将控制系统模型与控制算法融合来提升系统的稳态误差、峰值时间、超调量、调节时间等性能。一阶时滞系统广泛存在于智能制造、电力、化工等领域,对于一阶时滞系统的研究具有重要意义<sup>[15]</sup>。研究表明, Ziegler Nichols 方法中的响应曲线法能够根据一阶时滞系统的瞬态响应曲线来初步确定 PID 控制器参数<sup>[16]</sup>。

综上所述,针对一阶时滞系统,本文提出了一种基于

Ziegler Nichols 的 PSO-PID 控制方法,并将此方法称为 ZN PSO-PID 控制。ZN PSO-PID 控制首先通过 Ziegler Nichols 方法确定了 PID 控制器的初始参数;其次,初始参数为 PSO 算法初始粒子群的选择提供了有效的参考。仿真结果也同样表明,对于一阶时滞系统,本文提出的 ZN PSO-PID 控制方法虽然在上升时间和峰值时间上与 PSO-PID 控制方法接近,但在超调量和调节时间方面显著优于传统的 PSO-PID 控制方法。

## 1 控制器设计

考虑一阶延迟过程为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (1)$$

式中:  $K$  为比例系数,  $T$  为惯性时间,  $L$  为延迟时间,  $e^{(\cdot)}$  表示以自然数  $e$  为底的指数函数。

传统的 PID 控制是如图 1 所示的负反馈控制。

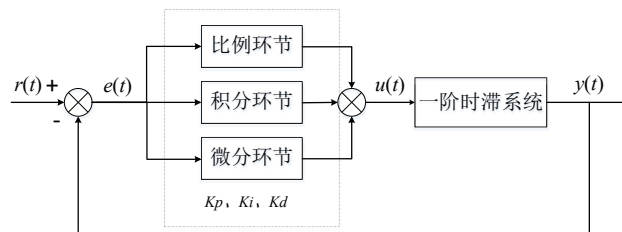


图 1 PID 控制系统结构框图

其中,  $r(t)$  为参考输入;  $y(t)$  为系统输出;  $e(t)$  为参考输入和系统输出比较产生的偏差,即  $e(t) = r(t) - y(t)$ ;  $u(t)$  为通

1. 陕西工业职业技术学院 陕西咸阳 712000

2. 陕西高校青年创新团队 陕西咸阳 712000

[基金项目] 陕西工业职业技术学院科研基金资助项目 (2023YKYB-017; BSJ2022-04)

过比例环节、积分环节和微分环节构成的控制律，其表达式为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中： $K_p$  为比例系数； $K_i$  为积分时间常数； $K_d$  为微分时间常数，也是 PID 控制  $u(t)$  的待确定控制参数。

### 1.1 PSO-PID 控制

PID 控制的原理是通过整定控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ，使系统具有良好的动态性能和稳态性能。传统 PID 控制参数的调节需要根据工程经验手动调节参数，直到获得期望的系统性能。然而，由于工程经验等原因，手动调节的时间成本高，且一致性不好，一类基于群体智能优化算法的控制参数整定方法应运而生，PSO-PID 控制即是其中具有代表性的一例。

令粒子  $x = (K_p, K_i, K_d)$ ，则 PSO-PID 控制中  $x$  的状态可通过式 (3) 进行更新：

$$\begin{aligned} v_j^{k+1} &= v_j^k + c_1 r_1 (p_j - x_j^k) + c_2 r_2 (p_g - x_j^k) \\ x_j^{k+1} &= x_j^k + v_j^{k+1}, j = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $N$  为粒子数量， $v_j = (v_{j1}, v_{j2}, v_{j3})$  为第  $j$  个粒子的速度向量， $x_j$  为第  $j$  个粒子的位置向量， $p_j$  为个体最优位置， $p_g$  为全局最优位置， $r_1$  和  $r_2$  为均匀分布在  $(0,1)$  之间的随机数， $c_1$  和  $c_2$  为学习因子。

PSO-PID 即是通过 PSO 中的每个粒子，在三维搜索空间中根据个体最优和全局最优来调整粒子位置和速度，从而寻找控制器参数，即粒子  $x_j$ ，使系统性能指标最优。

### 1.2 Ziegler Nichols 法

Ziegler Nichols 方法通过对系统式 (1) 施加阶跃信号，可以根据系统响应确定参数  $K$ 、 $T$  和  $L$ ，整定结果如表 1 所示。

表 1 Ziegler-Nichols 法整定参数

比例度 $\delta/\%$	积分时间 $T_i$	微分时间 $T_d$
$0.85kL/T$	$2L$	$0.5L$

其中，式 (2) 中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  和表 1 中  $\delta$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  的对应关系为：

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{1}{\delta} \\ K_i &= \frac{K_p}{T_i} \\ K_d &= K_p T_d \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.3 ZN PSO-PID 控制

基于上述分析，本文提出的针对一阶时滞系统的 ZN PSO-PID 算法步骤如下。

步骤 1：初始化粒子数量  $N$ ，学习因子  $c_1$ 、 $c_2$ ，随机数  $r_1$ 、 $r_2$  和算法收敛精度  $\zeta$ 。

步骤 2：使用 Ziegler Nichols 法整定参数  $\delta$ 、 $T_i$  和  $T_d$ 。

步骤 3：根据式 (4) 计算 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ 。

步骤 4：根据  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  初始化粒子  $x_j$  和  $v_j$ ， $j = 1, 2, \dots, N$ ，并令  $k = 0$ 。

步骤 5：计算每个粒子的性能指标  $J$ 。

步骤 6：如果性能指标  $J$  满足算法收敛精度  $\zeta$ ，则对应的  $x_j^k$  即为 PID 控制参数，即：

$$u(t) = K_{pj} e(t) + K_{ij} \int e(t) dt + K_{dj} \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

算法终止；否则，继续下一步。

步骤 7：更新个体最优粒子  $p_j$ ， $j = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 8：更新全局最优粒子  $p_g$ 。

步骤 9：根据式 (3) 更新  $v_j$  和  $x_j$ ， $j = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 10：令  $k := k + 1$ ，返回步骤 5。

## 2 仿真分析

考虑典型工业过程中的一阶延迟过程如下：

$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s} \quad (6)$$

性能指标为  $J = \int |e(t)| dt$ ，其中  $e(t) = r(t) - y(t)$ ， $r$  为参考输入， $y$  为系统输出。

本文的目的是求得控制律式 (2) 中的参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ，使得性能指标  $J$  最小。

为了验证本文方法的有效性，使用了 PSO-PID 控制作为本文方法的对比实验。实验参数设置为  $r$  为阶跃输入，粒子群数量  $N$  为 20，学习因子  $c_1$  和  $c_2$  分别为 2.8 和 1.3，算法收敛精度  $\zeta$  为 0.001，粒子  $x_j \in [0, 10]$ ，粒子速度  $v_j \in [-0.001, 0.001]$ 。通过 ZN PSO-PID 控制方法中的步骤 4 和步骤 5，可以得到 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别为 2.353、2.353 和 0.588。

根据 ZN PSO-PID 控制算法，仿真结果如图 2、图 3 和图 4 所示。其中，图 2 为 PSO-PID 控制和本文提出的 ZN PSO-PID 控制的系统阶跃响应曲线，图 3 为 PSO-PID 控制和 ZN PSO-PID 控制的适应度函数收敛曲线，图 4 为 PSO-PID 控制和 ZN PSO-PID 控制对应的参数收敛曲线。

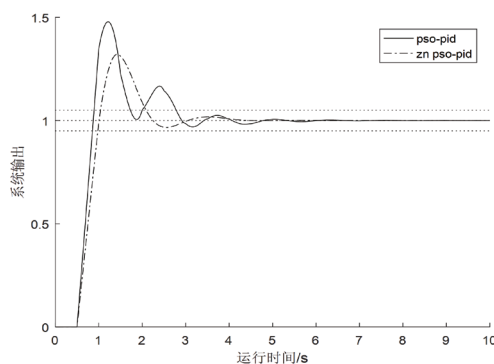


图 2 PSO-PID 和 ZN PSO-PID 的阶跃响应

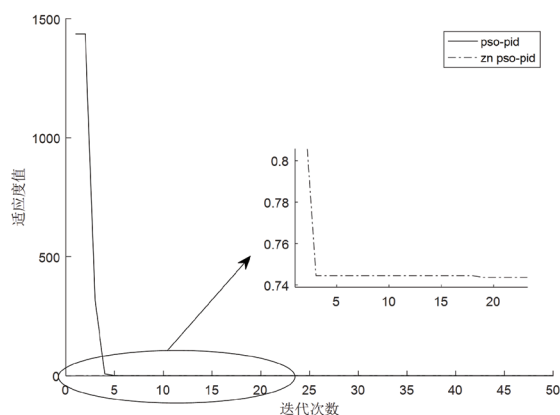


图3 PSO-PID 和 ZN PSO-PID 适应度函数收敛曲线

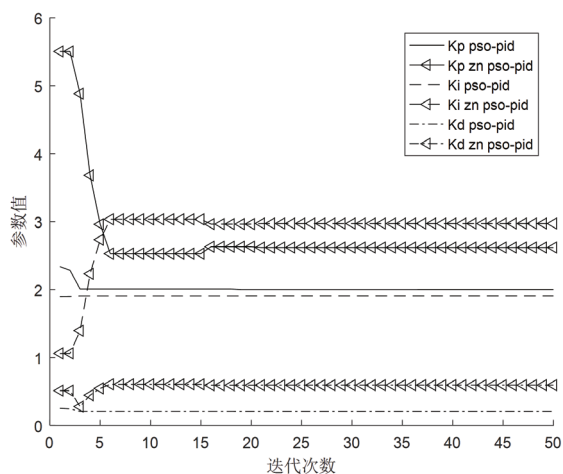


图4 PSO-PID 和 ZN PSO-PID 的参数收敛曲线

在图2中,黑色实线和点划线分别表示传统 PSO-PID 和 ZN PSO-PID 的阶跃响应曲线。本文定义稳态值误差带范围为 0.05, 为了方便观察超调量, 图中的 3 条虚线画出了稳态值和稳态值误差范围, 稳态值为 1, 稳态误差下限和上限分别为 0.95 和 1.05。从图2可以看出, ZN PSO-PID 控制的阶跃响应在上升时间和超调时间上和 PSO-PID 控制较为接近, 而在超调量和调节时间方面, ZN PSO-PID 相较于 PSO-PID 下降了约 30% 和缩短了约 0.7 s。

为了能够在同一坐标系下对比 ZN PSO-PID 控制和 PSO-PID 的适应度值, 在图3中, 对 ZN PSO-PID 控制的适应度值进行了局部放大, 局部放大图如图3中箭头所指向的小图。从图3中可以看出, ZN PSO-PID 控制的适应度函数值和收敛速度显著优于 PSO-PID 控制。相应的, 图4中的控制参数收敛曲线同样印证了这一结论。在图4中, 直线、虚线和点划线分别代表控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的值。其中, 线型中带有三角形符号的为 ZN PSO-PID 控制的参数收敛曲线, 不带三角形符号的为 PSO-PID 控制的参数收敛曲线。这是因为 ZN PSO-PID 中粒子群的初始值以 Ziegler Nichols 方法作为参考, 缩短了粒子寻优时间。

### 3 结论

针对 PSO-PID 控制中 PSO 的样本初始值难以确定的问题, 本文针对一阶延迟系统提出了一种基本 Ziegler Nichols 的 PSO-PID 控制方法, 简称为 ZN PSO-PID。ZN PSO-PID 控制使用 Ziegler Nichols 原则确定了 PID 控制器中比例、积分和微分环节参数的初始值, 并以此初始值作为参考值生成了 PSO 算法中的初始粒子群, 提高了 PSO 算法的收敛速度。研究结果表明, 本文提出的 ZN PSO-PID 控制方法对于一阶时滞系统的阶跃响应在上升时间和峰值时间上和传统的 PSO-PID 相差较小, 而在超调量和峰值时间方面 ZN PSO-PID 明显优于 PSO-PID 控制。

### 参考文献:

- [1] 李浩, 朱才朝, 樊志鑫, 等. 基于二阶滑膜 -PID 控制的风力发电机最大功率跟踪策略研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 306-314.
- [2] 姚钢, 李华荣, 周荔丹, 等. MP-MMC 驱动六相永磁同步风力发电机分数阶 PID 控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 93-107.
- [3] WANG Q, XI H, DENG F, et al. Design and analysis of genetic algorithm and BP neural network based PID control for boost converter applied in renewable power generations [J]. IET renewable power generation, 2022(7): 1336-1344.
- [4] 李翔, 侯忠生. 基于 PID 参数整定的无模型自适应控制器参数整定方法 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1737-1745.
- [5] LI W, ZHANG K, ZHANG C P, et al. A fuzzy enhanced adaptive PID control algorithm for quadrotor aircraft [J]. International journal of modelling, identification and control, 2023, 43(1): 26-35.
- [6] CHOWDHURY M A, AL-WAHAIBI S S S, LU Q G. Entropy-maximizing TD3-based reinforcement learning for adaptive PID control of dynamical systems [J]. Computers and chemical engineering, 2023, 178: 108398.
- [7] 吴敏, 王晓璐, 姜玉东, 等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2358-2365.
- [8] LYU X, LIN Z. PID control of planar nonlinear uncertain systems in the presence of actuator saturation [J]. IEEE/CAA journal of automatica sinica, 2022, 9(1): 90-98.
- [9] 朱敏, 臧昭宇, 胥子豪, 等. 气动调节阀最优分数阶 PID 控制器设计 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 267-274.

# 基于 YOLOv8n 的轻量化卷烟种类目标检测方法研究

韩雨芯<sup>1</sup>  
HAN Yuxin

## 摘 要

由于单纯依靠人工检测卷烟售卖情况存在着库存管理成本高、数据更新慢和监控效率低下的问题,为了实现卷烟在烟草店售卖情况的自动化检测,有效减少烟草行业零售终端操作不规范的现象,提出一种基于 YOLOv8n 模型的卷烟种类检测算法。首先,使用 PConv 卷积方式在主干网络进行有效特征提取,在模型获取全局上下文信息的同时有效地减少模型的参数量和计算量。然后,采用加权双向特征金字塔网络 BiFPN 的特征融合思想,使模型能够有效融合不同尺度的特征图的同时保证模型的检测精确率。最后,基于自建烟草数据集进行实验,所提出算法的模型参数量是原来的 20.16%,FLOPs 降至 8.4 GB,精确率提高了 3%。实验结果表明,所提出的算法有效地减少了模型在进行目标检测时的响应时间,实现了轻量化且精确率较高的卷烟种类的目标检测方法。

## 关键词

YOLOv8n; 卷烟种类; PConv; BiFPN; 轻量化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.014

## 0 引言

随着中国经济的不断发展,卷烟消费情况也在经历着巨大的变革。人们对卷烟的购买动机逐渐由攀比和炫耀转变为更加理性和健康的考量,这也导致了每年新增吸烟人口数量逐渐减少<sup>[1]</sup>。在这种背景下,有效的投放策略可以帮助公司提高市场运营效率,降低成本,提高行业竞争力。因此,烟草公司需要更加注重产品规划,以确保投放的烟草品牌能够

更好地满足市场需求。

零售终端是烟草产业链中的关键一环,它直接影响着烟草产品的销售和市场表现。通过推进卷烟方面的目标检测,可以有效确保烟草专卖店销售的产品质量、规格和标准。然而,当前零售终端存在物资管理不规范、信息共享不畅难以实时了解物资使用,以及一线人员存在违规操作拆借行为而影响库存账实符合等情况,并且传统的识别方法主要依赖于人工检测和记录销售情况,这种方式效率低、成本高、准确性较低<sup>[2]</sup>。这些现实问题都会造成烟草公司

1. 贵州财经大学信息学院 贵州贵阳 550025

[10] 符占元, 专祥涛. 基于神经网络和遗传算法的 PID 参数自整定算法 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2023, 56(3): 379-386.

[11] 杨旭红, 陈阳, 方剑峰, 等. 基于改进 PSO-PID 控制器的核电站汽轮机转速控制 [J]. 控制工程, 2022, 29(12): 2177-2183.

[12] 刘尚波, 丹泽升, 廉保旺, 等. 干涉式闭环光纤陀螺仪的 PSO-PID 控制优化方法 [J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 250-261.

[13] LONG Z, JIANG Z, WANG C, et al. A novel approach to control of piezo-transducer in microelectronics packaging: PSO-PID and editing trajectory optimization [J]. IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology, 2020, 10(5): 795-805.

[14] 李欢欢, 刘辉, 盖江涛, 等. 基于粒子群优化算法 PID 参数优化的双电机耦合驱动履带车辆转向控制 [J]. 兵工学报, 2024, 45(3): 916-924.

[15] 曾喆昭, 刘文珏. 一阶时滞系统的智慧 PI 控制 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1322-1328.

[16] 金鑫, 谭文, 李志军, 等. 典型工业过程鲁棒 PID 控制器的整定 [J]. 控制理论与应用, 2005(6): 947-953.

## 【作者简介】

刘源 (1990—), 女, 陕西西安人, 硕士, 助教, 研究方向: 系统工程。

(收稿日期: 2024-05-20)