

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.12.026

# 基于不完全微分的模糊自适应 PID 算法 速度优化控制系统设计<sup>①</sup>

熊中刚<sup>1</sup>, 刘小雍<sup>2</sup>, 贺娟<sup>3</sup>,  
邹江<sup>3</sup>, 许宁<sup>3</sup>, 李青<sup>2</sup>

1. 桂林航天工业学院 机械工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 遵义师范学院 工学院, 贵州 遵义 563002;  
3. 遵义师范学院 物理与电子科学学院, 贵州 遵义 563002

**摘要:** 为提高平地机行走作业速度的控制性能, 协调解决外界干扰信号对系统造成的影响以及行走作业速度精度滞后和不稳定性问题, 将一阶惯性环节加入模糊自适应 PID 控制器的微分环节中, 采用单片机作为行走作业速度的控制中心, 提出了基于不完全微分的模糊自适应 PID 算法速度优化控制系统. 最后通过 Matlab 的 Simulink 仿真软件, 分别将不带 PID 控制、PID 控制和不完全微分模糊自适应 PID 控制 3 种方式用于对人为给定速度干扰信号的控制仿真测试, 验证了不完全微分模糊自适应 PID 算法的有效性和可靠性.

**关键词:** 平地机; 速度优化控制; 不完全微分; PID 算法; 模糊自适应

**中图分类号:** TP273<sup>+</sup>.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)12-0173-06

目前机械化平地对我国农业的大面积生产种植至关重要, 而平地机是此过程中最重要的机械化工具, 农业生产上改良的平地机拥有易换置的多种作业装置, 是一种典型的土地平整和整形作业中以铲刀为主的施工机械<sup>[1-3]</sup>.

平地机的作业效率和质量取决于作业过程中的速度, 然而速度受到很多因素限制, 速度过快会使喂入的较大土块无法达到平整要求, 甚至发生机械故障, 太慢作业效率太低, 造成没必要的能源浪费<sup>[4-5]</sup>, 可见, 对行走速度进行控制是非常必要的. 但控制作业速度具有一定的滞后性, 特别对于地形起伏较大的丘陵地带, 对平地机的自适应速度稳定性提出了更高要求<sup>[6-8]</sup>.

传统 PID 控制在时变系统和多变量系统中适应性和协调性无法满足系统要求, 鲁棒性也不够强<sup>[9]</sup>. 为此, 本文研究了基于不完全微分的模糊自适应 PID 算法速度优化控制系统, 对平地机行走作业速度稳定性进行了人为给定干扰信号的测试控制, 通过仿真对比分析了系统速度稳定控制的效果, 结果显示不完全微分模糊自适应 PID 算法响应时间短, 响应速度较快, 具有更高更好的自适应能力和鲁棒性能, 且可快速达到稳定状态, 能够满足设计的要求<sup>[10]</sup>.

① 收稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11464052, 51765014, 51275060); 贵州省教育厅青年基金项目(黔教合 KY 字[2016]254, [2017]254 号); 贵州省科技厅项目(黔科合 LH 字[2016]7003 号, [2016]7001 号, [2015]7008 号, [2015]7012 号).

作者简介: 熊中刚(1986-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事机械自动化控制、自动检测方面的研究.

## 1 系统总体组成及其工作原理

本文主要是系统针对平地机作业效率和质量问题,自行根据检测参数实现速度优化调控.控制系统组成框图如图 1 所示,主要包括电源模块、发动机转速部分、档位比例电磁阀模块、调速执行机构、行走系统、行进速度检测模块、信号调理模块、耕地平整度信号检测模块和中央控制器.

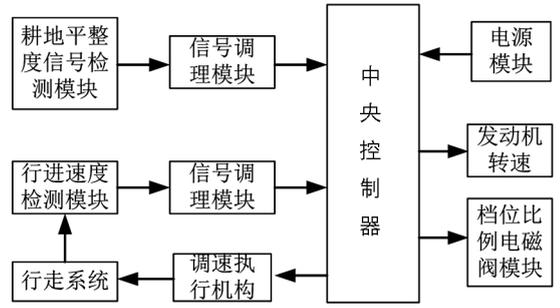


图 1 系统组成框图

为完成速度优化控制动作,系统利用 PID 调节器对平地机速度进行调节.首先根据喂入土块大小,实时检测发动机转速,经由模糊算法比较后输出相应控制参数,然后利用不完全微分自适应 PID 算法通过闭环反馈调节方式实现速度优化配置.

## 2 控制器设计

系统设计中不完全微分 PID 控制器是在常规 PID 控制器中串联一阶惯性环节于微分环节的输出端,如图 2 所示,该惯性环节对 PID 控制中的微分信号滤波,可消除高频干扰.

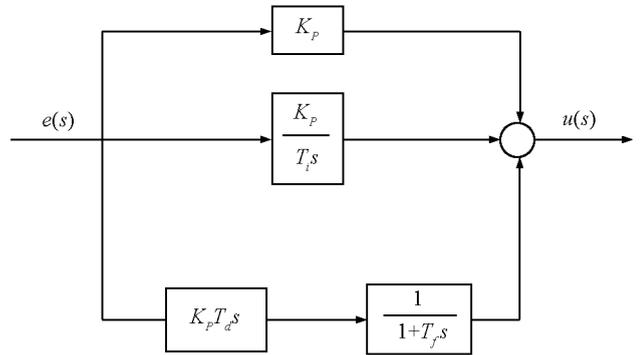


图 2 不完全微分 PID 算法结构图

### 2.1 传统 PID 控制系统的建立

传统 PID 作为经典控制器一般是以线性控制器为主,根据输入设定值和实际输出信号差值来构成偏差  $e$ ,其偏差计算公式为  $e_t = r_{\text{int}}(t) - y_{\text{out}}(t)$ ,通过实时监测误差和误差变化率采用  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  调节输出量,其基本的结构原理如图 3 所示.

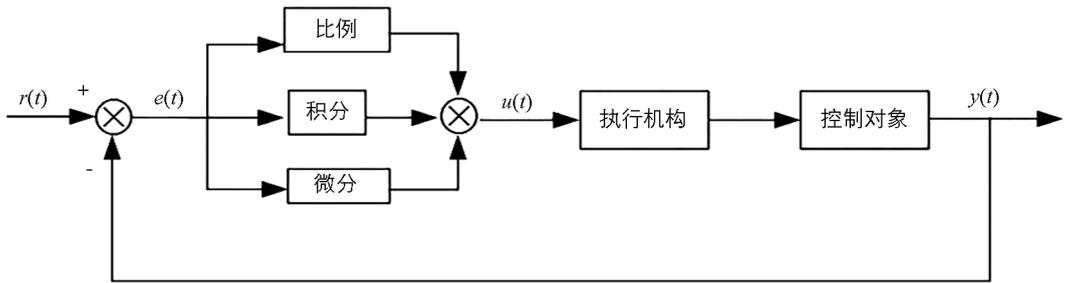


图 3 传统 PID 控制器原理框图

传统 PID 控制器的控制规律为<sup>[11]</sup>

$$u(t) = K_P \left( e_t + \frac{1}{T_I} \int_0^T e_t dt + \frac{T_D de_t}{dt} \right) \quad (1)$$

经由化简得其传递函数为

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2)$$

然而在系统的微型处理器中,需要对上述设计数字化处理.设系统采样时若干  $kT$  时刻点的标志时间为  $t$ ,并在设计中应用矩形法数字积分代替模拟积分,同时以一阶后向差分近似代替微分可得如下式子.

$$\left\{ \begin{array}{l} t = kT (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e_i dt \approx T \sum_{j=0}^k e_{jT} = T \sum_{j=0}^k e_j \\ \frac{de_i}{dt} \approx \frac{e_{kT} - e_{(k-1)T}}{T} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \end{array} \right. \quad (3)$$

通过式子(3)可以得到离散 PID 算法表达式为

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p(e(k)) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T}(e(k) - e(k-1)) = \\ &K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j)T + K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$K_I = \frac{K_p}{T_i} \quad K_D = K_p T_d$$

采样周期设为  $T$ , 采样序列设为  $k$ , 分别将第  $k$  次偏差量设为  $e(k)$ , 第  $k-1$  次的偏差量设为  $e(k-1)$ .

## 2.2 不完全微分的模糊自适应 PID 算法控制器的设计

传统 PID 控制应用于系统中时, 需要解决的主要问题是限制微分增益, 同时平滑处理系统信号, 消除高频噪声影响. 而不完全微分 PID 算法是仿效模拟式控制系统中纯微分无法实现的采用带惯性环节的实际微分器. 不完全微分 PID 算法传递函数为

$$\begin{aligned} U(s) &= \left( K_p + \frac{K_p/T_i}{S} + \frac{K_p T_D s}{1 + T_f s} \right) E(s) = \\ &U_p(s) + U_I(s) + U_D(s) \end{aligned} \quad (5)$$

将上式离散得:

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \quad (6)$$

其中  $u_p(k)$  和  $u_i(k)$  没有变化, 仅  $u_d(k)$  发生改变:

$$U_D(s) = \frac{K_p T_D s}{1 + T_f s} E(s) \quad (7)$$

$$T_f \frac{du_D(t)}{dt} + u_D(t) = K_p T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

以差分近似代替微分, 离散化为

$$u_D(k) + T_f \frac{u_D(k) - u_D(k-1)}{T} = K_p T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (9)$$

整理得:

$$u_D(k) = \frac{T_f}{T + T_f} u_D(k-1) + K_p T_D \frac{1}{T + T_f} [e(k) - e(k-1)] \quad (10)$$

令

$$\alpha = \frac{T_f}{T + T_f} \quad 1 - \alpha = \frac{T}{T + T_f} (\alpha < 1, 1 - \alpha < 1)$$

所以

$$u_D(k) = \alpha u_D(k-1) + \frac{K_p T_D}{T} (1 - \alpha) [e(k) - e(k-1)] \quad (11)$$

由上式可知,不完全微分项  $u_D(k)$  多了一项  $\alpha u_D(k-1)$ , 原微分系数由  $k_D$  降至  $k_D(1-\alpha)$ , 如此每循环控制一次, 微分系数就成比例地减少, 这样就降低了微分环节对系统的影响, 降低了微分环节对输入变化的敏感性。

本文所设计不完全微分的模糊自适应控制以输入发动机的转速标定信号和检测的发动机实际转速之间的差值作为输入变量误差  $e$ , 同时以发动机转速差的变化率  $ec$  作为参数自适应 PID 控制器的输入量. 为实现模糊自适应控制, 输入变量  $e$ 、 $ec$  和输出变量  $u(k)$  作为模糊语言变量时, 将转速升高定为正值, 降低为负值, 并根据专家经验设定  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  模糊控制规则如表 1 所示。

表 1  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的模糊控制规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZR	ZR
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZR	ZR
NS	NB	NM	NS	NS	ZR	PS	PS
ZR	NM	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZR	PS	PS	PM	PB
PM	ZR	ZR	PS	PS	PM	PB	NB
PB	ZR	ZR	PS	PM	PM	PB	PB

本文根据设计需求定义模糊自适应 PID 控制器的输入  $e$  和  $ec$ 、输出  $k_P$ 、 $k_I$ 、 $k_D$  论域范围都为  $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

根据系统要求, 可得输入输出变量各模糊子集的隶属度函数如图 4。

### 3 仿真设计及测试

#### 3.1 测速标定

速度标定实验中, 在保持油门恒定的情况下, 利用档位比例电磁阀去控制平地机速度的变化, 读取档位比例电磁阀反馈的 AD 值, 从而得出档位比例电磁阀 AD 值与平地机作业行走速度关系. 根据测量数据, 利用 EXCEL 多元线性回归建立档位比例电磁阀行程(以 AD 值表现出来)与平地机速度值的对应关系如图 5 所示。

依据此曲线拟合公式设定档位比例电磁阀行程, 从而控制平地机的行驶速度。

#### 3.2 仿真测试

为了测试不完全微分 PID 算法对速度优化控制的有效性和可靠性, 本文利用 Matlab 的 Simulink 仿真环境, 针对不带 PID 控制、PID 控制和不完

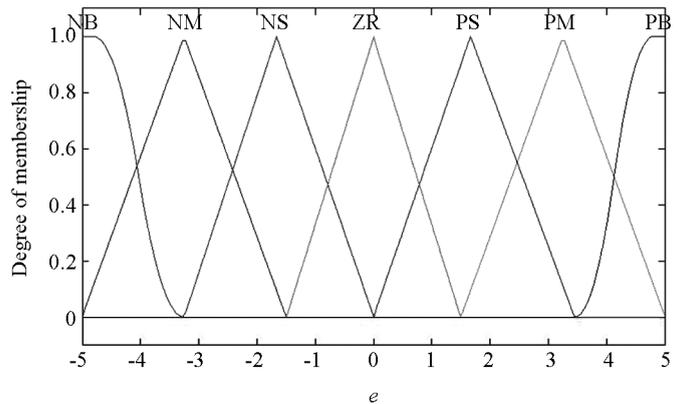


图 4 输入量  $e$ 、 $ec$  的隶属度函数图

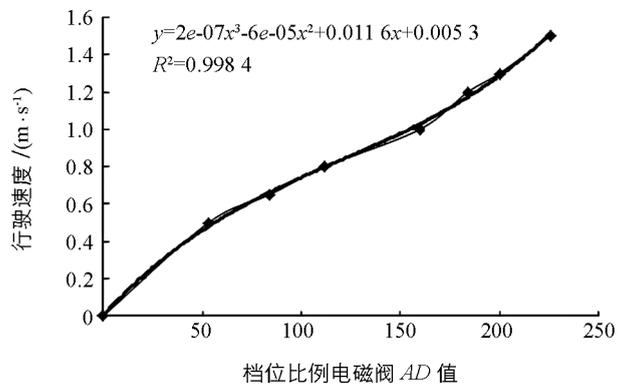


图 5 AD 值与平地机速度标定结果

全微分模糊自适应 PID 控制 3 种控制方式分别进行仿真测试比较, 所设计的仿真框图如图 6 所示。

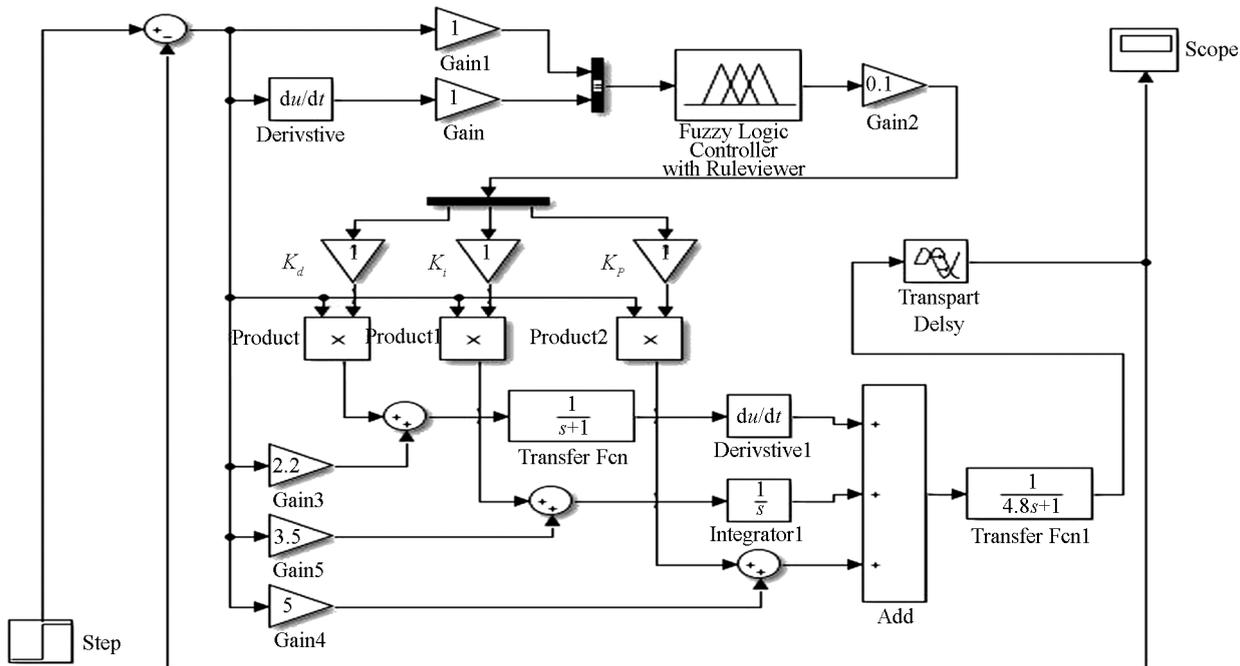


图 6 基于不完全微分的 PID 算法控制系统仿真图

系统仿真测试时通过采集平地机作业行走速度, 使用 MatLab 软件对系统的响应进行绘图, 采用阶跃输入信号对作业行走速度控制系统进行仿真得到如图 7 所示的仿真测试对比曲线。

图 7 表示 3 种不同的控制方式下仿真对比情况, 由于实际仿真时同样的比例放大系数条件下, 不带 PID 控制方式远大于其他两种控制方式达到状态稳定需要的时间, 为更清楚对比 3 种情况, 故通过将不带 PID 控制状态比例放大系统放大 10 倍, 仿真测试出不带 PID 控制方式下系统存在无法消除的静差, 且调节时间长达 1.2 s, 同等参数条件长达 8 s, 最主要达不到系统控制需求。然而常规 PID 控制能够达到系统控制需求, 却存在较大超调量缺点, 同时需要的稳定时间也较长, 图中约 0.26 s。本文设计的不完全微分模糊自适应 PID 控制算法超调量比较小、控制稳定性好、所需要调整时间比较短 (约为 0.03 s)、响应速度快、转速误差控制在有效精度范围内, 动态控制性能很好。

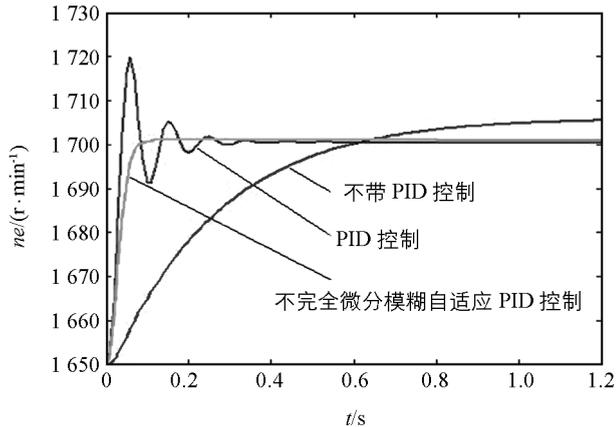


图 7 仿真测试对比曲线图

### 4 结 论

本文以平地机作为研究载体, 通过在传统的 PID 算法上引入不完全微分算法, 提出了基于不完全微分的模糊自适应 PID 算法的速度优化控制方案, 同时为验证算法的可靠性和有效性, 以喂入不同大小土块作为干扰信号, 进行了参数的反复在线自适应仿真测试, 有效克服了传统 PID 算法的不足, 降低了微分环节对速度和突变敏感性变化给系统带来的动荡, 可以尽快消除偏差, 提高了响应速度, 有效防止超调过大而产生振荡, 保证了平地机作业行走速度的优化控制效果。

## 参考文献:

- [1] 李林升, 丁 鹏, 钟 成. 不完全微分与微分先行的农业机器人巡航 PID 控制算法 [J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 45-49.
- [2] 刘国平, 齐大伟, 夏五星, 等. 电液比例阀不完全微分 PID 控制算法设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013(8): 105-107.
- [3] 田红鹏, 范振可. 四旋翼飞行器不完全微分 PID 控制算法研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(12): 58-614, 179.
- [4] 邓 君, 王 菲, 张长志, 等. 基于模糊层次分析法的荆江航道整治水下抛石施工风险评估 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 183-188.
- [5] 林瑞全, 杨富文, 邱公伟. 一类不完全微分 PID 控制的实现方法 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 31-34.
- [6] 陈 波. 基于免疫遗传算法的炼钢最优炉次计划研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 30-37.
- [7] ZHANG L, SONG Q H. Design of Smart Car Servo System Based on Camera [J]. Manufacturing Science and Technology, 2011, 383: 5923-5927.
- [8] YE M J, HU C H. Design of Electromagnetic Smart Car System [J]. Mechanical and Electronics Engineering III, 2011, 130: 343-346.
- [9] 余天明, 郑 磊, 李 颂. 电控机械式自动变速器离合器灰色预测 PID 控制技术 [J]. 农业机械化学报, 2011, 42(8): 1-6.
- [10] 颜新鹏, 王 炯. 基于模糊 PID 控制的空气弹簧振动特性研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(9): 63-67.
- [11] 冯 江, 林升峰, 王鹏宇, 等. 基于自适应模糊 PID 控制的猪舍温湿度控制系统研究 [J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(2): 73-86.

## Design of a Speed Optimization Control System Based on Incomplete Differentiation Fuzzy Adaptive PID Algorithm

XIONG Zhong-gang<sup>1</sup>, LIU Xiao-yong<sup>2</sup>, HE Juan<sup>3</sup>,  
ZOU Jiang<sup>3</sup>, XU Ning<sup>3</sup>, LI Qing<sup>2</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Department of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563002, China;

3. Department of Physics and Electronic Science, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563002, China

**Abstract:** In order to improve the control performance of the walking speed of the grader, overcome the influence of external interference signals on the system, and solve the problems of precision lag and instability of the walking speed, the first-order inertial link was added, in this study, into the differential link of the fuzzy adaptive PID controller, the single chip computer was used as the control center of walking speed, and a speed optimization control system based on incomplete differentiation fuzzy adaptive PID algorithm was designed. Finally, by using Matlab's Simulink simulation software, three methods (non-PID control, PID control and incomplete differential fuzzy adaptive PID control) were respectively applied to the control simulation test of the artificial speed disturbance signal, which verified the effectiveness and reliability of the incomplete differential fuzzy adaptive PID algorithm.

**Key words:** grader; speed optimization control; incomplete differential; PID algorithm; fuzzy adaptive control