

# 无人驾驶运矿车车速控制算法研究

霍光, 刘秀梅, 范洋洋

(内蒙古包头钢铁(集团)有限责任公司 内蒙古 包头 014080)

**摘要:** 针对电动轮矿车的速度控制系统存在大滞后、非线性度高、建模困难等问题, 提出一种基于模糊控制的速度控制算法。综合考虑速度的跟随性能和控制量的平顺性, 并对期望车速、道路坡度、油门踏板控制量等进行平顺化。所提出的算法应用于无人驾驶的电动轮矿车。通过实车无人驾驶测试表明, 所提出的算法能够有效的对无人驾驶电动轮矿车的车速进行控制。

**关键词:** 无人驾驶; 电动轮矿车; 车速控制; 模糊控制; 平顺化

## Research on Speed Control Algorithm of Unmanned Electric Mine Truck Authors

(Organization)

**Abstract:** There are many problems for the speed control system of electric mine truck, such as large lag, high nonlinearity, modeling difficulties and so on. So a speed control algorithm based on fuzzy control is proposed. The algorithm considers both the speed following performance and the smoothness of the control, and the desired speed, the road slope, the control of accelerator pedal are smoothed. The algorithm is applied to the unmanned electric mine truck. The real truck tests show that: the proposed algorithm can effectively control the speed of the unmanned electric mine truck.

**Key words:** unmanned driving; electric mine truck; speed control; fuzzy control; smoothness

### 1 引言

我国矿产资源丰富, 已经发现矿产 173 种<sup>[1]</sup>。矿产资源的开采包括露天开采和盲矿、深部矿体的地下开采等方式。其中, 露天矿是把覆盖在矿体上部及其周围的浮土和围岩剥去, 把废石运到排土场, 从敞露的矿体上直接采掘矿石的方法<sup>[2]</sup>。露天矿运输的基本任务, 主要是将露天采场采出的矿石运送到选矿厂或贮矿场, 将岩石运送到排土场。

目前, 露天矿存在工作环境恶劣、招工难、人员管理困难、安全性低等问题。推动智慧矿山建设是解决以上问题的有效方法。智慧矿山是在数字矿山和感知矿山的基础上, 进一步应用云计算、大数据、人工智能等先进技术发展而来的以透彻感知、深度互联和智能应用为主要特征的矿山信息化建设新阶段<sup>[3]</sup>。

矿卡运输过程的无人驾驶功能是智慧矿山的重要组成部分, 电动轮矿卡则是露天矿的重要运输车型。电动轮矿卡与常规货车的传动系统存在重大差异, 导致在无人驾驶应用中, 对车速的控制比较困难。本文主要对电动轮矿车的车速控制进行研究, 提出了一种算法, 用来解决无人驾驶应用中电动轮矿车的车速控制问题。

### 2 无人驾驶电动轮矿车车速控制介绍

电动轮矿车的传动系统与常规货车的传动系统不同, 如图 1 所示, 电动轮矿车的传动系统由发动机、发电机、电控系统、电动机、减速器、车轮构成。与常规货车的传动系统相比, 电动轮矿车的传动系统中没有变速箱, 取而代之的是发电机、电控系统和电动机。这种设计的优点除了取消了变速箱, 还使传动系统变成

柔性传动，减少对发动机的冲击，另外还可以利用电动机进行电制动，减少机械制动的发热量。

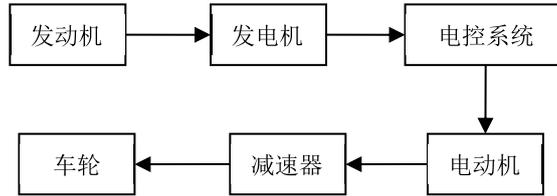


图1 电动轮矿卡传动系统

电动轮矿卡传动系统的结构决定了其传动系统存在大滞后、高度非线性、建模困难等问题。在无人驾驶应用中，电动轮矿卡的车速控制尤为重要。传统的以车速跟随误差为唯一控制目标的算法，会造成控制信号调节频繁、发动机冒黑烟、车速无法稳定等问题。这些问题会导致发动机、发电机和电动机的工作条件恶劣，对其造成不良影响，并最终影响矿卡的使用寿命。

### 3 速度控制算法设计

#### 3.1 电动轮矿卡速度控制简介

在无人驾驶应用中，为了实现矿卡的驱动和制动控制，对矿卡进行了改造，在无人驾驶控制器中设计了电压输出电路来模拟原车上油门踏板和电制动踏板的电压信号输出，通过改变电压输出电路的电压信号来模拟驾驶员对油门踏板和电制动踏板的操作。

电动轮矿卡的运行环境（路面基本为土路或砂石路，路面不平且存在比较大的坡度）以及矿卡本身的特性共同决定了矿卡车速控制的速度控制误差与控制量的平顺性两个指标是相互矛盾的。要想达到比较小的速度控制误差，则油门和电制动就会存在反复调节的现象；要想使控制量平顺，则必然会造成一定的速度控制误差。

本文提出的速度控制算法采用模糊控制器来兼顾速度控制误差和控制量的平顺性。并对期望车速、道路坡度、油门踏板和电制动踏板的控制量等进行平顺化。以期达到良好的控制效果。

#### 3.2 控制算法设计

矿卡速度控制算法的流程图如图2所示。

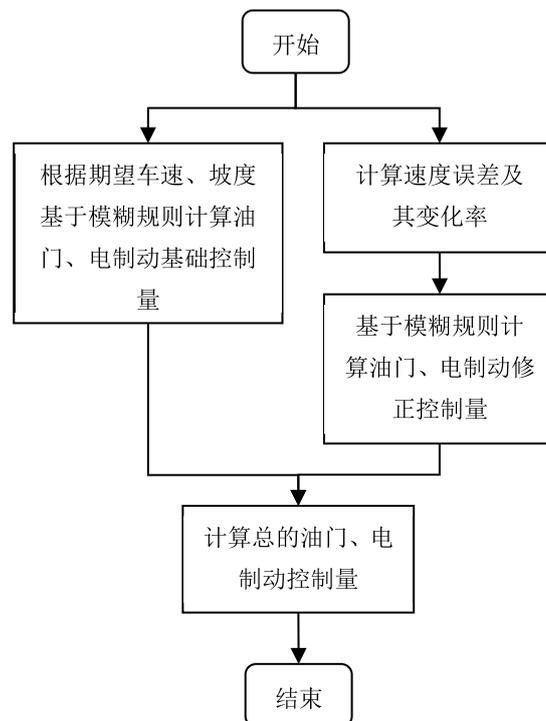


图2 矿卡速度控制流程图

### 3.2.1 基础控制量计算

基础控制量计算模块是一个模糊控制器<sup>[4]</sup>，控制器的输入为期望车速  $v_d$  和路面坡度  $s$ ，输出为油门踏板开度的控制量  $\eta_a$  和制动踏板开度的控制量  $\eta_b$ 。对于电动轮矿卡，在行驶过程中，制动基本通过电制动来实现，所以制动踏板的控制量为电制动踏板的控制量。

在该模糊控制器中，输入量  $v_d$  的模糊集论域为 $[0, 30]$ ，坡度  $s$  的模糊集论域为 $[-0.15, 0.15]$ ， $\eta_a$  和  $\eta_b$  的模糊集论域都为 $[0, 1]$ 。 $v_d$ 、 $\eta_a$  和  $\eta_b$  的模糊子集为 $\{ZE, PS, PM, PB, PVB\}$ ， $s$  的模糊子集为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ 。模糊控制的隶属函数采用三角形函数， $v_d$ 、 $s$ 、 $\eta_a$  和  $\eta_b$  的隶属函数如图 3~图 5 所示。

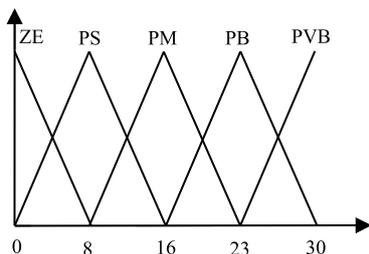


图 3  $v_d$  隶属函数

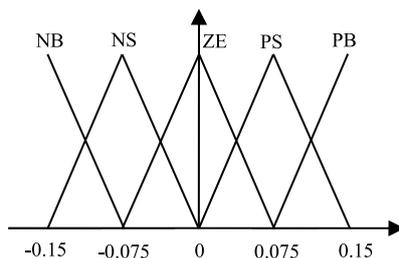


图 4  $s$  隶属函数

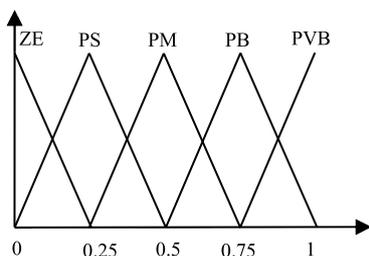


图 5  $\eta_a$  和  $\eta_b$  隶属函数

$\eta_a$  的模糊控制规则如表 1 所示， $\eta_b$  的模糊控制规则如表 2 所示。

模糊控制规则是模糊控制的核心，是根据经验和大量人工实验获得的<sup>[5]</sup>。

表 1  $\eta_a$  模糊控制规则

$\eta_a$		$v_d$				
		ZE	PS	PM	PB	PVB
s	NB	ZE	ZE	ZE	ZE	PS
	NS	ZE	ZE	PS	PM	PB
	ZE	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PS	ZE	PM	PB	PB	PVB
	PB	ZE	PM	PB	PVB	PVB

表 2  $\eta_b$  模糊控制规则

$\eta_b$		$v_d$				
		ZE	PS	PM	PB	PVB
s	NB	PB	PVB	PB	PS	ZE
	NS	PB	PM	ZE	ZE	ZE
	ZE	PB	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	PB	ZE	ZE	ZE	ZE
	PB	PB	ZE	ZE	ZE	ZE

3.2.2 修正控制量计算

基础控制量可以使矿卡在平路和上下坡路面上保持稳定的车速,但会存在速度控制误差,在某些工况下,误差会比较大。为了消除速度控制误差,在基础控制量上加入了修正控制量。修正控制量也是采用模糊控制计算的,模糊控制器的输入为速度控制误差 $e$ 和速度误差的变化率 $\dot{e}$ ,其中 $e=v_d-v$ , $v$ 为实际车速。 $\dot{e}$ 为 $e$ 对时间的导数。模糊控制器的输出为油门踏板和电制动踏板的修正控制量 $\Delta\eta_a$ 和 $\Delta\eta_b$ 。

在该模糊控制器中, $e$ 和 $\dot{e}$ 的模糊集论域为 $[-8, 8]$ , $\Delta\eta_a$ 和 $\Delta\eta_b$ 的模糊集论域为 $[0, 0.8]$ 。 $e$ 和 $\dot{e}$ 的模糊子集为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ , $\Delta\eta_a$ 和 $\Delta\eta_b$ 的模糊子集为 $\{ZE, PS, PM, PB, PVB\}$ 。模糊控制的隶属函数采用三角形函数, $e$ 和 $\dot{e}$ 的隶属函数如图 6 所示, $\Delta\eta_a$ 和 $\Delta\eta_b$ 的隶属函数如图 7 所示。

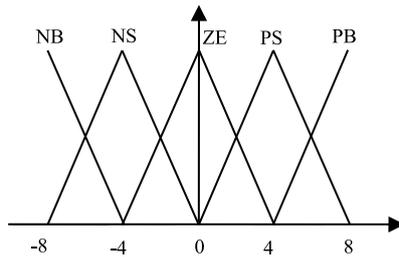


图 6  $e$ 和 $\dot{e}$ 隶属函数

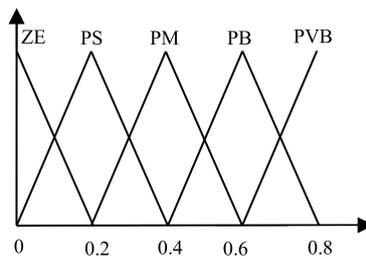


图 7  $\Delta\eta_a$ 和 $\Delta\eta_b$ 隶属函数

$\Delta\eta_a$ 的模糊控制规则如表 3 所示, $\Delta\eta_b$ 的模糊控制规则如表 4 所示。

表 3  $\Delta\eta_a$ 模糊控制规则

$\Delta\eta_a$		$e$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\dot{e}$	NB	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	NS	ZE	ZE	ZE	ZE	PS
	ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PM
	PS	ZE	ZE	PS	PM	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB

表 4  $\Delta\eta_b$  模糊控制规则

$\Delta\eta_b$	$e$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PVB	PB	PM	PS	ZE
NS	PB	PM	PS	ZE	ZE
ZE	PM	PS	ZE	ZE	ZE
PS	PS	ZE	ZE	ZE	ZE
PB	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE

### 3.2.3 总的控制量计算

油门踏板和电制动踏板总的控制量按式(1)进行计算。

$$\begin{cases} \eta_{as} = \eta_a + \Delta\eta_a \\ \eta_{bs} = \eta_b + \Delta\eta_b \end{cases} \quad (1)$$

由于基础控制量和修正控制量都是采用模糊控制算法计算得到，可能会出现油门和电制动控制量都大于 0 的情况，针对这种情况，对控制量进行如式(2)所示的处理，其中  $\eta_{af}$  和  $\eta_{bf}$  为油门踏板和电制动踏板的最终控制量， $\varepsilon$  为载荷系数，空载时  $\varepsilon$  为 1；满载时， $\varepsilon$  取为大于 1 的正数。

式(2)可以保证油门和电制动不会同时起作用，另外当控制量比较小时不对执行机构进行控制，防止控制量在油门和电制动之间来回跳变。

$$\begin{cases} \eta_{af} = 0, \eta_{bf} = \varepsilon \cdot \eta_{bs} & (if(\eta_{bs} > \eta_{bh})) \\ \eta_{af} = \varepsilon \cdot \eta_{as}, \eta_{bf} = 0 & (else\ if(\eta_{as} > \eta_{ah})) \\ \eta_{af} = 0, \eta_{bf} = 0 & (else) \end{cases} \quad (2)$$

### 3.3 控制量的平顺化

为了使控制算法能够达到良好效果对期望车速、道路坡度、油门踏板和电制动踏板控制量等进行了平顺化。

在不同的路段，由于道路的路面条件和道路曲率的影响，期望车速不同，对期望车速的变化处采用斜坡过渡，以避免期望车速的突变，进而导致控制量的突变，如图 8 所示。

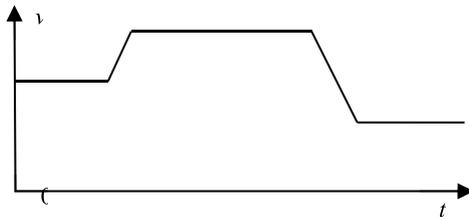


图 8 期望车速的斜坡过渡

道路坡度通过路径文件中的路径点的高度信息计算得到，由于矿区道路一般为土路或砂石路，路面不平，所以通过路径文件中采集的高度信息计算的坡度会有比较大的波动，会造成基础控制量的计算出现比较大的波动。如图 9 所示，原始数据存在比较大的波动，虚线为处理后的数据，由图中可见在数据的最后一段，原始数据波动比较大，处理之后的数据直接是一条直线，将波动消除。处理后的数据直接写入到路径文件用于车辆的速度控制。

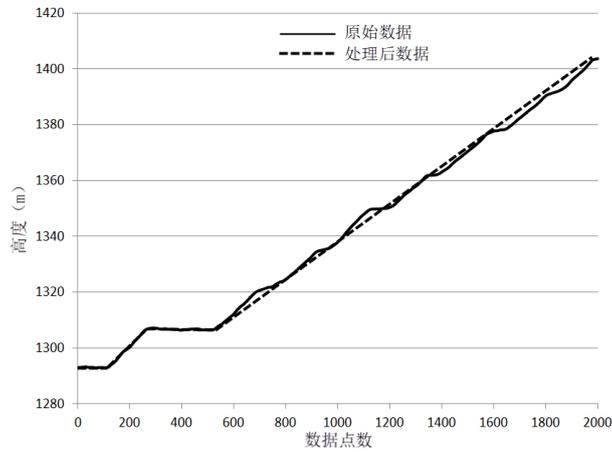


图9 道路高度信息平顺化

油门踏板和电制动踏板控制量的平顺化与期望速度的平顺化类似，也是采用斜坡过渡的方式。

## 4 实车验证

对如图 10 所示的电动轮矿卡进行了线控化改造，并进行无人驾驶实验，对上述的控制算法进行验证。在矿区运输作业过程中，满载上坡和空载下坡是典型的工作场景。主要针对这两种工作场景进行验证。



图 10 无人驾驶电动轮矿卡

满载上坡工况的测试结果如图 11~图 13 所示，从图中可以看出，油门踏板的调节比较平顺，不存在高频的反复调节。由于是满载上坡工况，油门基本达到 100% 的开度，电制动踏板开度全程为 0。速度的跟随符合算法预期的效果。

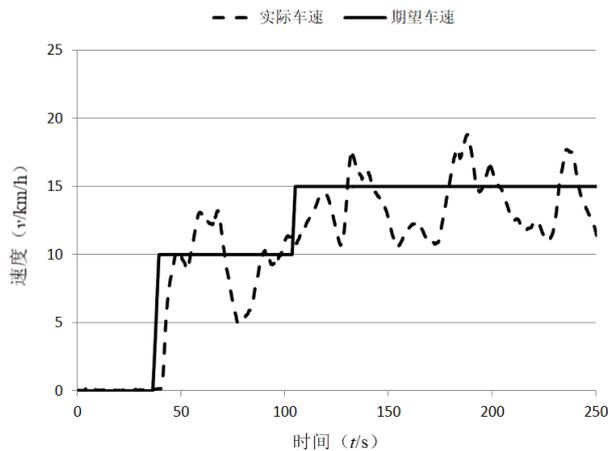


图 11 满载工况车速

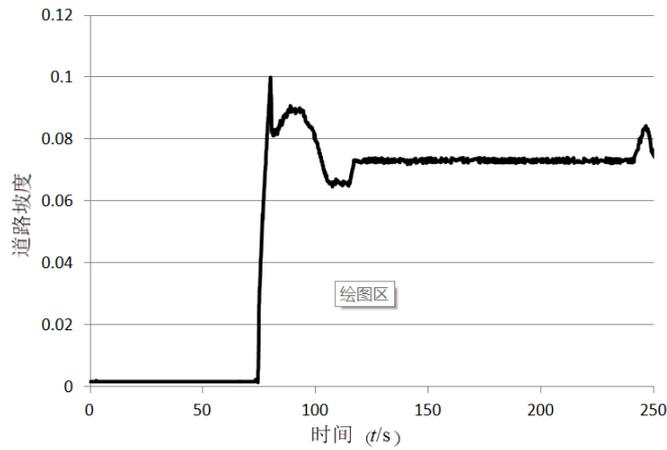


图 12 满载工况道路坡度

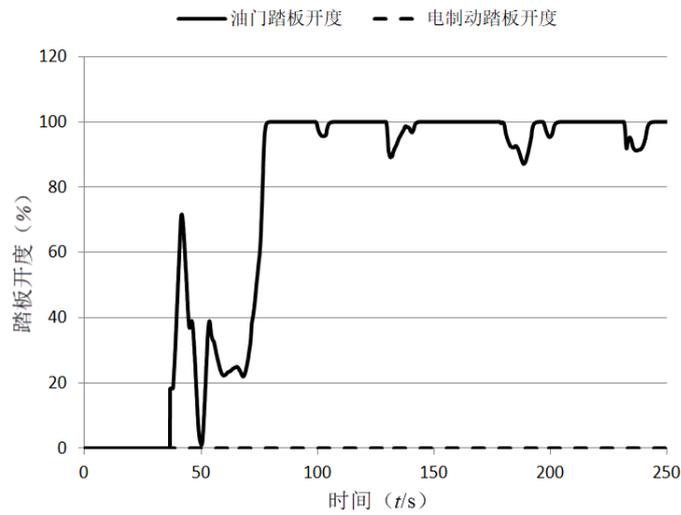


图 13 满载工况油门和电制动踏板开度

空载下坡工况的测试结果如图 14~图 16 所示，从图中可以看出，整个过程主要是电制动踏板在工作，只有起步阶段和中间坡度比较小的一段油门踏板起作用，油门踏板和电制动踏板的调节平顺，整体速度跟随效果也比较好。

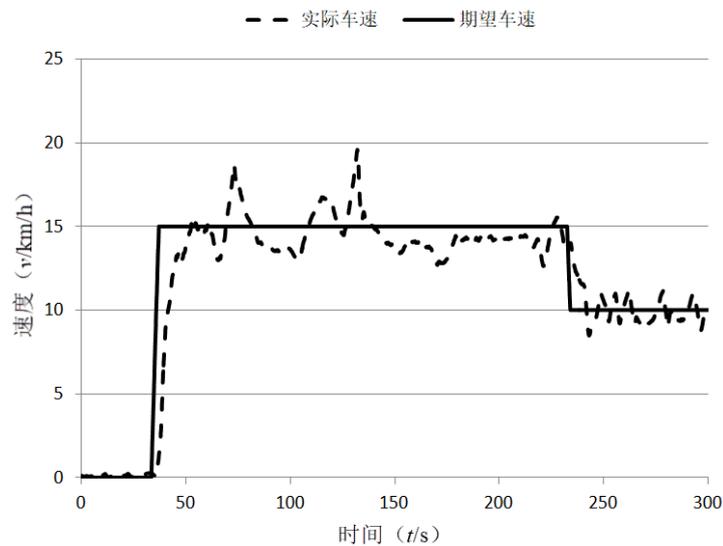


图 14 空载工况车速

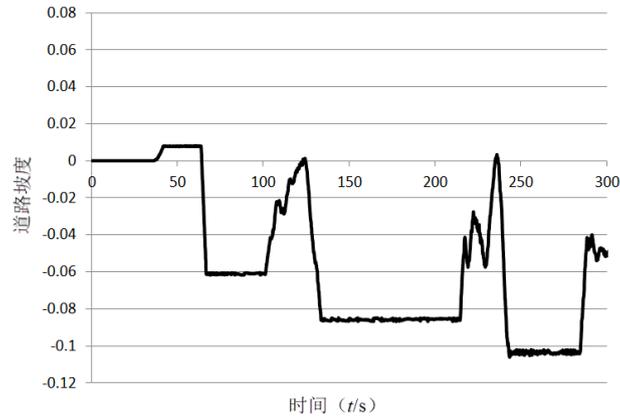


图 15 空载工况道路坡度

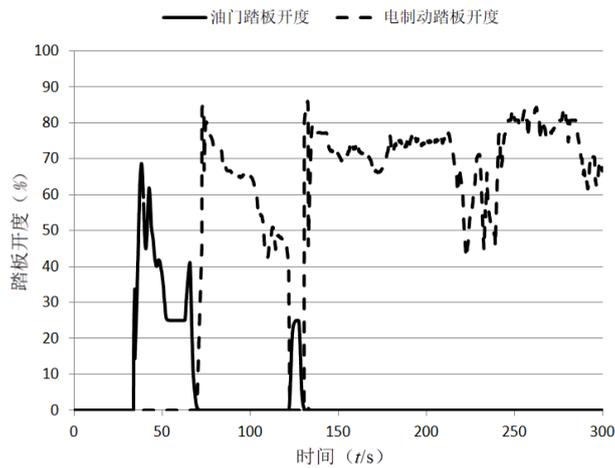


图 16 空载工况油门和电制动踏板开度

## 5 结论

针对无人驾驶应用中，电动轮矿卡的速度控制系统存在大滞后、非线性度高、建模困难等问题，设计了基于模糊控制的速度控制算法，经过实车实验验证了算法的有效性。采用所述算法，矿卡的油门踏板和电制动踏板调节平顺，发动机和电动机的工作状态良好，车速跟随性能也能满足无人驾驶的要求。

### 参考文献

- [1] 凌月明等. 2018 中国矿产资源报告[M]. 地质出版社, 2018
- [2] 常春, 周德培, 王泳嘉,等. 露天矿开采深度对边坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3):248-252.
- [3] 谭章禄, 吴琦. 智慧矿山理论与关键技术探析[J]. 中国煤炭, 2019, 30-40.
- [4] 刘向杰, 周孝信, 柴天佑. 模糊控制研究的现状与新发展[J]. 信息与控制, 1999, 28(4):283-292.
- [5] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1):166-172.