

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

# 用于汽车耐久性试验的驾驶 机器人模糊控制仿真

姜 浩, 岳继光, 胡龙达

( 同济大学 电子与信息工程学院 上海 201804 )

**摘 要:** 介绍一种用于汽车耐久性试验驾驶机器人模糊控制方法。驾驶机器人由交流伺服电机、控制器、滚珠丝杠以及机械定位装置组成。阐述了模糊控制的原理、模糊 PID 控制器的设计规则和设计过程。在 MATLAB 环境仿真模拟机器人位置伺服系统, 表明了模糊 PID 控制器的有效性。

**关键词:** 汽车耐久性试验; 驾驶机器人; 模糊控制

## Fuzzy Control Strategy Study of Servo System in Robotic Driver

JIANG Hao, YUE Jiguang, HU Longda

( College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China )

**Abstract:** This paper introduces a fuzzy control method in robot driver for vehicle endurance tests. The robotic driver is made of AC ( Alternating Current ) motors, a controller, ball-screws, position locaters and so on. The fuzzy control theory, design principles and process of fuzzy controllers is introduced. At last, the simulation of the robotic driver servo system is carried out in MATLAB. The simulation result shows Fuzzy controller's excellent performance.

**Key words:** vehicle endurance test; robotic driver; fuzzy control

## 1 引 言

汽车耐久性试验是按照国家标准规定的工况车速在转鼓试验平台连续行驶 8 万 km 的测试过程; 可以检测汽车性能、零部件寿命、尾气是否达标等。一次完整试验周期长达三四个月, 需要几个驾驶员轮流操纵试验车辆。由于驾驶环境和人为因素, 驾驶员跟踪工况曲线跟踪精度低, 可重复性差。为克服这些缺点, 德国大众汽车集团、奥迪汽车等汽车厂在 20 世纪 80

年代末开发了第一台车排放试验用驾驶机器人<sup>[1]</sup>。实现了准确循环跟踪工况曲线, 减少了人为因素影响和试验费用, 缩短了测试时间, 提高了试验效率。

驾驶机器人由上位机、控制器、通信模块、伺服系统、信号采集系统组成<sup>[2]</sup>。伺服系统由交流伺服电机、滚珠丝杠、驱动器、控制器组成。由于在工作过程中, 负载变化快、工作时间长, 系统模型会发生变化, 单一不变的 PID 控制参数鲁棒性差<sup>[3]</sup>。本文提出一种模糊控制策略补偿系统模型变化的方法, 可以获得较好的实验结果。

## 2 模糊控制理论简述

模糊控制系统是以模糊集合化、模糊语言以及模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制系统。模糊控制是一种非线性控制;属于智能控制的范畴<sup>[4]</sup>,主要由模糊化接口、知识库、模糊推理机和接模糊接口四部分组成(如图1所示),各部分作用如下:

(1) 模糊接口:将输入的精确量转化成模糊量。

(2) 知识库:包含了具体应用领域的知识和要求的控制目标,通常由数据库和模糊控制规则库两部分组成。

(3) 模糊推理:控制器的核心,具有模拟人的基于模糊概念的推理能力。

(4) 解模糊接口:将推理得到的模糊量转换为用于实际控制的清晰量。

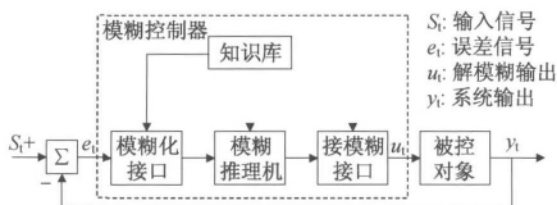


图1 模糊控制器的基本结构

Fig.1 Fuzzy controller's basic structure

## 3 驾驶机器人模糊 PID 控制器设计

### 3.1 确定模糊控制器的类型

在驾驶机器人中,要对机器人机械腿位置连续控制,要求位置控制精度高、响应快、超调小、稳定性好,所以采用连续论域、PID型、结论为数值的二维模糊控制器。

### 3.2 确定输入输出变量的论域

二维模糊控制器的输入为误差  $E$  和误差的变化  $E_c$ ,输出变量为比例增益  $K_p$ 、积分增益  $K_i$  和微分增益  $K_d$ 。在输入变量模糊化处理和输出变量解模糊化处理之前要确定各个变量

的基本论域和控制器输入范围。根据驾驶机器人的具体参数如油门踏板行程 0.3 m、电机最大速度 3 m/s、PID 控制器的比例增益为 9、积分增益为 0.02、微分增益为 0.2 等得出了模糊控制器输入输出论域及线性映射规则表,如表 1 所示。

表 1 模糊控制器输入输出论域变化规则

Tab.1 Rules for fuzzy controller input and output domain changes

	基本论域 $x$	控制器输入输出范围 $y$	线性映射关系
误差 $E$	$[-0.3, 0.3]$	$[-3, 3]$	$y = 10x$
误差变化 $E_c$	$[-3, 3]$	$[-3, 3]$	$y = x$
比例增益 $K_p$	$[9, 11]$	$[-3, 3]$	$y = 3x - 30$
积分增益 $K_i$	$[0.015, 0.025]$	$[-3, 3]$	$y = 600x - 12$
微分增益 $K_d$	$[0.15, 0.25]$	$[-3, 3]$	$y = 60x - 12$

### 3.3 确定控制器输入输出变量的隶属度函数

模糊集的个数一般选为 3、5、7 个,个数越多,模糊控制器的灵敏性越好。但是模糊规则的数目会成平方增长,这会带来巨大的工作量<sup>[5]</sup>。本文模糊控制器用于对连续量离散化的模糊子集有 7 个,如正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZO)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)。

模糊控制器的两个输入变量和三个输出变量的模糊子集的隶属度函数相同,如图 2 所示,其中 NB、PB 这两个模糊子集的隶属度函数为钟形隶属度函数, NM、NS、ZO、PS、PM 这五个模糊子集的隶属度函数为三角形隶属度函数。

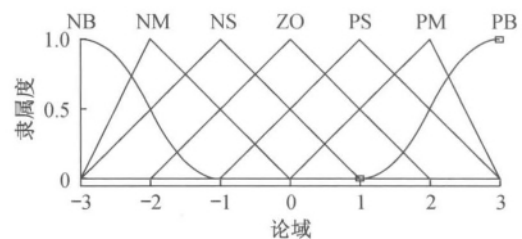


图 2 输入变量  $E, E_c$  的隶属度函数

Fig.2 Membership function of input variables  $E$  and  $E_c$

根据隶属度函数确定论域中的离散化元素或语言值所对应的模糊集合如表 2 所示。

表2 离散化域上七挡对应的模糊子集隶属度值

Tab.2 Fuzzy subset membership values corresponding for seven files on the discretized domain

元素	挡次						
	负大 (NB)	负中 (NM)	负小 (NS)	零 (ZO)	正小 (PS)	正中 (PM)	正大 (PS)
	隶属度						
-3	1.0	0	0	0	0	0	0
-2	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0
-1	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0
1	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
2	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5
3	0	0	0	0	0	0	1.0

## 3.4 设计模糊推理规则集

模糊推理采用常用的二维结构 Mamdani 推理算法,控制规则为“若  $E$  且  $E_c$  则  $K_p$  且  $K_i$  且  $K_d$ ”,即“if  $E$  and  $E_c$  then  $K_p$  and  $K_i$  and  $K_d$ ”。

建立模糊规则有两种方法,经验归纳法和合成推理法。前者是根据人类的控制经验和直觉推理,经过整理、归纳和提炼后构成模糊规则系统的方法;后者是根据已有的输入输出数据对,通过模糊推理合成,求取被控系统的模糊控制规则。本文确定了如表3所示的模糊控制规则。规则库由三个子规则库组成,每个子规则库相互独立,每个子规则库由双输入、单输出规则构建,共49条模糊规则<sup>[6]</sup>。

表3 模糊控制规则

Tab.3 Fuzzy control rules

$E$	$K_p$							$K_i$							$K_d$						
	$E_c$							$E_c$							$E_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

## 3.5 模糊判决及制定查询表

模糊推理合成的结果是一个模糊量,还需要通过解模糊化才能转换成可用于直接控制的精确量。本文采用算法简单、实时性好的最大隶属

度法(MOM)<sup>[7]</sup>,得出了控制查询表(如表4所示),其中  $E_p$  表示位置误差(单位:m);  $v$  表示误差变化速度(单位:m/s);  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为PID控制器的量纲为1的参数。

表4 控制查询表

Tab.4 Table for control query

$E_p$	$K_p$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
	$v$						
-0.3	11.00	11.00	10.66	10.66	10.34	10.00	10.00
-0.2	11.00	11.00	10.66	10.34	10.34	10.00	9.66
-0.1	10.66	10.66	10.66	10.34	10.00	9.66	9.66
0	10.66	10.66	10.34	10.00	9.66	9.34	9.34
0.1	10.34	10.34	10.00	9.66	9.66	9.34	9.34
0.2	10.34	10.00	9.66	9.34	9.34	9.34	9.00
0.3	10.00	10.00	9.34	9.34	9.34	9.00	9.00

续表 4

$E_p$	$K_i$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-0.3	0.015 0	0.015 0	0.016 7	0.016 7	0.018 3	0.020 0	0.020 0
-0.2	0.015 0	0.015 0	0.016 7	0.018 3	0.018 3	0.020 0	0.018 3
-0.1	0.015 0	0.016 7	0.018 3	0.018 3	0.020 0	0.021 7	0.021 7
0	0.016 7	0.016 7	0.018 3	0.020 0	0.021 7	0.023 3	0.023 3
0.1	0.016 7	0.018 3	0.020 0	0.021 7	0.021 7	0.023 3	0.023 3
0.2	0.020 0	0.020 0	0.021 7	0.021 7	0.023 3	0.025 0	0.025 0
0.3	0.020 0	0.020 0	0.021 7	0.023 3	0.023 3	0.025 0	0.025 0

$E_p$	$K_i$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-0.3	0.217	0.217	0.150	0.150	0.150	0.167	0.200
-0.2	0.217	0.217	0.150	0.167	0.167	0.183	0.200
-0.1	0.200	0.183	0.167	0.167	0.183	0.183	0.200
0	0.200	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.200
0.1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
0.2	0.250	0.183	0.217	0.217	0.217	0.217	0.250
0.3	0.250	0.233	0.233	0.233	0.217	0.217	0.250

### 4 系统建模与仿真

本文以交流伺服电机作为被控对象,位置传递函数为:

$$T(s) = \frac{21\ 000}{s^3 + 135.8s^2 + 4\ 296.6s}$$

利用 MATLAB 中 Simulink 的工具箱搭建系

统仿真框图(图 3)。输入为幅值 1、起跳时间 0 s 的阶跃信号,仿真时间为 0.3 s,常规 PID 和模糊 PID 的响应如图 4 所示。

从图 4 的波形可以看出模糊 PID 控制器比传统 PID 控制器对阶跃信号的响应快、超调小、稳态时间短,系统输出具体性能参数如表 5 所示。可以清晰看出并确定模糊控制器的控制器的控制效果优于常规 PID 控制器的控制效果。

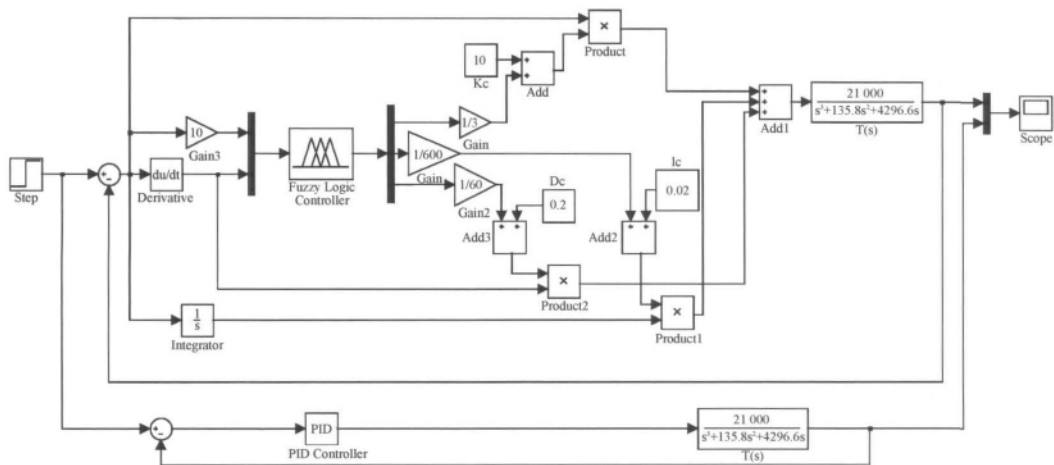


图 3 Simulink 仿真框图

Fig. 3 Simulation block diagram in Simulink

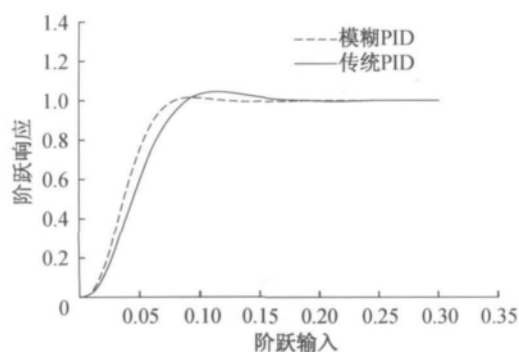


图4 模糊PID与常规PID输出波形对比

Fig. 4 Output waves comparison between fuzzy PID and traditional PID

表5 两种PID控制器阶跃响应性能对比

Tab. 5 Step response performance comparison of the two PID controllers

	模糊PID控制器	传统PID控制器
上升时间/ms	78	89
超调量/%	1.6	4.3
稳态时间/ms	73	146

## 5 结论

本文设计了驾驶机器人模糊PID控制器,给出了其输入输出变量隶属度函数、模糊推理规则和解模糊化方法以及系统响应速度、稳态时间等性能,验证了驾驶机器人模糊PID控制器的有效性。

### 参考文献:

- [1] Wolfgang Thiel, Stefan Gröf, Günter Hohenberg, et al. Investigations on robot drivers for vehicle exhaust emission measurements in comparison to the driving strategies of human drivers [R]. [s. l.]: SAE Paper, 1998, 982642.
- [2] Akinobu Moriyama, Isao Murase, Akira Shimozono, et al. A robotic driver on roller dynamometer with vehicle performance self learning algorithm [R]. [s. l.]: SAE Paper, 1991, 910036.
- [3] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业

出版社, 2005.

CHU Jing. Fuzzy control theory and system theory [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.

- [4] 赵学强. 电机的模糊优化设计和电机系统的模糊控制[D]. 上海交通大学, 1995.

ZHAO Xueqiang. Motor fuzzy optimization design and fuzzy control of the motor system [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1995.

- [5] 董海荣, 高冰, 宁滨, 等. 基于模糊PID软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 794-796, 800.

DONG Hairong, GAO Bing, NING Bin, et al. Automatic train operation system speed braking control based on fuzzy PID soft switching control [J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 794-796, 800.

- [6] 陆华才, 徐月同, 杨伟民, 等. 永磁直线同步电机进给系统模糊PID控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 59-63.

LU Huacai, XU Yuetong, YANG Weimin, et al. Permanent magnet linear motors feeding system fuzzy PID control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 59-63.

- [7] 王述彦, 师宇, 冯忠绪, 等. 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.

WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu, et al. Control method research based on fuzzy PID controller [J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(1): 166-172.



姜浩 男(1988-), 吉林松原市人, 硕士生, 主要研究方向为机器人、伺服电机控制等。



岳继光 男(1961-), 河北唐山市人, 教授, 博士, 主要研究方向为过程控制与计算机控制。