

列车自动驾驶调速系统自适应模糊控制*

董海荣¹ 高冰² 宁滨¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044) (2. 中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300)

摘要 列车自动驾驶(ATO)系统停车前采取一级调速制动, 本文采用自适应模糊控制对 ATO 系统的速度进行控制. 利用变论域收缩因子优化模糊控制器的量化因子, 模糊推理实现比例因子的自调整. 通过仿真表明, 该算法能够有效改善速度控制的快速性与精度, 提高乘客舒适性与运行效率, 从而完成定位停车任务.

关键词 列车自动驾驶(ATO)系统, 调速制动, 变论域收缩因子

引言

随着城市人口密度的增大, 建设高效率的城市轨道交通系统已经成为解决日益严重的城市交通问题的趋势. 列车自动驾驶(ATO, Automatic Train Operation)系统作为列车自动控制系统最重要的子系统, 无人驾驶的情况下根据线路状况以及外界信号自动选择合理的运行方式和运行轨迹来完成行车任务. ATO 系统最主要的功能就是调速运行, 只有在精确调速的基础上才能更好的完成定位停车任务, 只有在保证乘客舒适性前提下加快速度调整, 才能提高列车运行效率. 由此可见, ATO 调速系统性能的好坏直接影响着轨道交通系统的发展.

在 ATO 系统中运用不同的控制算法, 其控制效果是不同的. 六十年代初, 将经典控制理论如 PID 引入运用到 ATO 当中, 利用 PID 控制的稳态误差实现 ATO 系统速度的准确调整, 但是 PID 控制也存在着响应速度慢的缺点, 并且由于加速度不易控制, 不能很好地满足调速舒适性要求. 80 年代, 随着智能控制算法的兴起, 开始利用模糊逻辑控制^[2], 专家控制以及神经网络控制等智能控制算法来控制 ATO 系统的牵引与制动. 模糊控制与专家控制主要都是模拟专家实际经验, 虽然满足了舒适性以及快速性的要求, 但其控制精度不能从本质上改观, 神经网络也存在着稳定性和学习速度较慢的问题.

本文基于模糊控制算法在 ATO 系统中控制精度不足的问题, 对 ATO 系统的调速制动提出了自

适应模糊控制算法, 通过量化因子和比例因子的联合在线调整, 提高了系统的控制精度, 在保证舒适性的前提下加快响应速度, 增强了模糊控制算法在 ATO 系统全程调速中的自适应能力.

1 ATO 系统运行控制及模型

列车在调速制动阶段基本上是由 ATO 系统在列车自动防护(ATP, Automatic Train Protection)系统的监督下来完成的, ATO 系统将实际车速调整到 ATP 系统提供的限制速度下某一值, 一旦车速超过了目标速度, ATP 系统将完成紧急制动^[5]. 由于过多的分级制动会占用大量的路段, 影响运输效率, 列车制动模式也由过去的多级调速的阶梯状制动模式发展到一级调速制动模式, 即在制动停车前采取一次速度调整, 之后按照既定的制动曲线进行制动停车^[5]. 这种调速模式既保证了列车的定位停车, 同时也有利于提高列车的运输效率^[6], 列车的调速制动模式如图 1 所示.

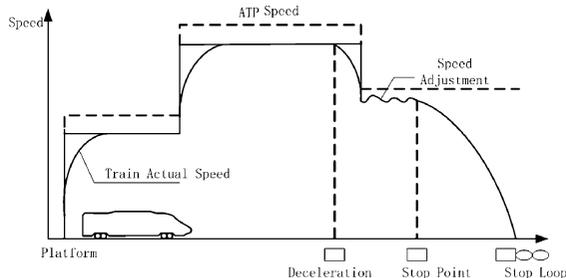


图 1 ATO 系统运行

Fig. 1 The operation of ATO system

就电力机车而言, 机车采用的是恒流准恒速控

制,列车手柄级位对应着相应的电压级位,也就是说通过改变手柄级位来调整列车的速度。

在设计电力机车速度调节系统时,被控制对象不仅要包括直接受控制的牵引电动机,同时还应将牵引电动机驱动了整个列车考虑在内。此时整流电压为输入量,列车速度则是输出量。以他激电动机为例分析列车的调速情况^[7],牵引电动机电枢回路如图2所示

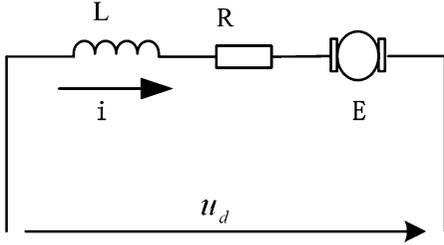


图2 调速系统电枢回路

Fig. 2 The circuit of speed adjustment system

电压平衡方程为:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u_d - E = u_d - C_v \phi v \quad (1)$$

L 与 R 分别为电枢回路内总的电感与总电阻。

忽略列车启动加速的阻力时,根据列车加速度与电力机车牵引力之关系以及列车每台牵引电机发挥的牵引力与电流之间的关系:

$$F_s = m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

$$F = C_F \phi i \quad (3)$$

其中 F_s 为机车牵引力; m 为列车质量; $1 + \gamma$ 为列车质量换算系数; C_F 为电机牵引力常数; ϕ 为磁通量。由(2)和(3)式,电流微分为:

$$\frac{di}{dt} = \frac{M d^2 v}{C'_F dt^2} \quad (4)$$

式中 M 为列车折算到每台牵引电动机的换算质量;常数 $C'_F = C_F \phi$ 。

将(4)带入电压平衡方程整理后得到:

$$\frac{v}{u_d} = \frac{1}{T_M T_i s^2 + T_M s + 1} \quad (5)$$

其中

$$C'_v = C_v \phi, T_M = \frac{RM}{C'_F C'_v}, T_i = \frac{L}{R}$$

经过对调速系统的分析,得出列车可用一个二阶传递函数来描述,其中,参数的选取可以结合相关试验数据。

2 ATO 系统自适应模糊控制算法

通常,自适应模糊控制算法通常包括两类:一是模糊规则的在线自调整算法;二是变论域的模糊控制算法。

变论域方法的实现可以通过调整量化因子来改变目标量相对于模糊论域的程度^[8],从而更多的激活其所属的模糊规则,间接实现了在线的规则调整。本文通过引入论域的收缩因子函数^[9],对量化因子进行了在线自调整,利用模糊规则配合量化因子的调整对比例因子进行推理判断,实现了 ATO 系统调速的自适应模糊控制。

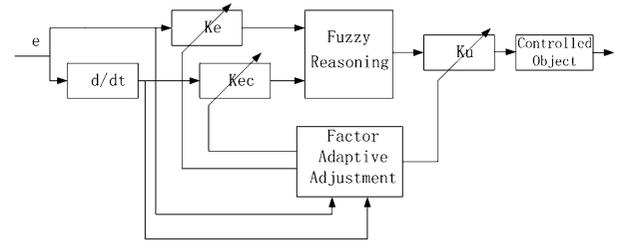


图3 自适应模糊系统结构图

Fig. 3 Adaptive fuzzy control structure

2.1 ATO 系统模糊控制

本文采用二维的模糊控制系统,模糊推理输入为误差 e 以及误差变化率 e_c ,其论域分别为 E 和 E_c ,系统输出的控制量为列车控制手柄级位 C ,论域由 U 表示,输入与输出均选用均匀分布的三角形隶属度函数。模糊推理规则如表1所示。

表1 模糊推理规则表

Table 1 Fuzzy rule table

E_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

2.2 模糊系统量化因子的在线调整

根据 $K_e * e = E$,量化因子 K_e 可将实际误差信号映射到模糊推理中的输入论域 E 当中,然后由模糊规则去推理判断输出。正是由于量化因子的存在,使得模糊推理系统在小误差的时候,不能激活

模糊规则或者很少的模糊规则,导致系统调节出现死区,影响了控制精度.为了解决这个问题,本文对量化因子 K_e 和 K_{ec} 进行在线调整.

当 K_e 增大时,控制精度提高,论域被缩小,对于误差信号,被激活的模糊规则也就相应增加,响应速度加快,如果过大,会导致系统产生超调现象,甚至不稳定. K_e 减小时,系统快速性降低,调节惰性变大,降低控制精度.当 K_{ec} 增大时,系统变化抑制能力增强, K_{ec} 过大时,则调节时间变长,过小时,则上升速率增大导致超调甚至不稳.

由上可知量化因子 K_e 的调整按照当误差很大时,减小 K_e , 保证其进入论域范围并被识别为大误差,当误差很小时,适当增大 K_e , 提高分辨率,增加可利用的模糊规则.与此同时,为了不破坏 ATO 系统调速控制的舒适性,应使 K_e 调整连续.

因此,当 e 大于规定论域 E 时,根据 $K_e * e = E$, 输出 $K_e = E/e$.

当 e 小等于规定论域时,则利用变论域模糊控制算法中运用的伸缩因子:

$$\alpha(x) = 1 - m \exp(-kx^2) \quad (6)$$

式中, $\alpha(x)$ 在 $0 \sim 1$ 之间变化, k, m 为常系数, k 在一定程度上反映论域伸缩的灵敏度, k 值越大,伸缩越快,反之伸缩越慢. m 为 $0 \sim 1$ 之间的常数.按照伸缩调整后的论域 E' 和模糊系统设定的论域 E 之间的关系:

$$E' = \alpha(x) \cdot E \quad (7)$$

按照论域伸缩与量化因子伸缩的反比关系可推得:

$$K_e = E/E' = 1/\alpha(e) \quad (8)$$

对于 K_{ec} 的调整,误差变化率 e_c 即系统调节的加速度(ATO 系统加速度).按照 ATO 系统调速舒适性的加速度上限值,确定最小的 K_{ec} ,

$$K_{ec} = E_c/a_{\max} \quad (9)$$

a_{\max} 为 ATO 系统最大加速度上限.当误差减小,甚至出现超调时,适当增加 K_{ec} 值.

2.3 模糊系统比例因子的在线调整

比例因子 K_u 将论域中推理输出控制量转化为实际控制量的系数,它决定系统控制量的大小^[10], K_u 增大时,系统放大倍数增加,响应速度加快,当 K_u 过大时,会产生超调乃至振荡,以至快速性变差.

结合量化因子的调整,对 K_u 进行设计:当 $e * e_c \leq 0$,且误差超出论域时, K_u 尽可能大些,保证响

应速度,而小于论域时,为了避免超调,逐渐减小 K_u ,当 $e * e_c \geq 0$ 时,为了快速收敛,增大 K_u 使系统快速收敛.

因此,引入更新因子 γ ,使控制器实际输出, $U_{\text{实际}} = (\gamma \cdot K_u) \cdot U_{\text{论域}}, \gamma \in (0, 1]$. 利用模糊推理建立 γ 的模糊规则, γ 分为 5 个语言变量,其模糊子集为[很小,小,中,大,很大],分别由符号[VS, S, M, B, VB],隶属度函数采用对称、均匀分布的三角形隶属度函数.模糊规则如表 2 所示

表 2 γ 的模糊规则表

Table 2 fuzzy rule of γ

E_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	VB	VB	B	M	M	M	B
NM	VB	VB	B	M	M	B	B
NS	VB	B	B	S	M	B	VB
ZO	VB	B	M	VS	M	B	VB
PS	VB	B	M	M	B	B	VB
PM	B	B	M	M	B	VB	VB
PB	B	M	M	M	B	VB	VB

3 系统仿真

本文在 MATLAB7.1 下,用 SIMULINK 和模糊逻辑工具箱建立系统并进行仿真研究,仿真对象是根据实验数据建立的二阶数学模型^[11]:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{0.07128}{s^2 + 0.4356s + 0.0324}$$

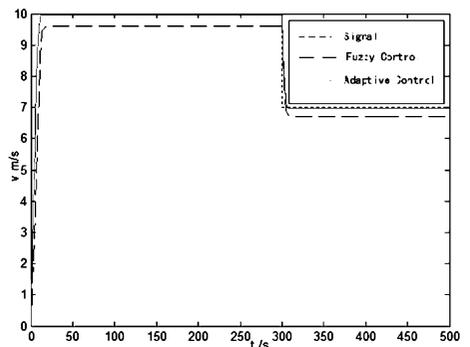


图 4 调速控制仿真

Fig. 4 speed adjustment from 10m/s to 7m/s

规定的误差 e 的输入论域 E 为 3,伸缩因子中 m 取 0.75, k 取 2, K_{ec} 的选取则根据误差分辨率的规定论域 E_c 为 6,所以根据 ATO 系统的加速度不大于 1.52 米/秒方(保证乘客舒适性的加速度上限值), K_{ec} 的最小取值为 4,当误差小时,或出现超调

时增加为5. 以10米/秒~7米/秒之间的调速运行为例进行控制系统相关数据的仿真如图4所示.

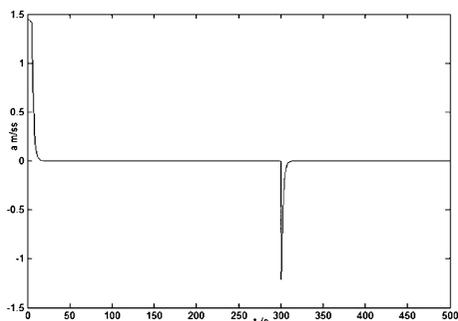


图5 自适应模糊控制的加速度

Fig. 5 Acceleration of speed adjustment

从图4和图5中可以看出自适应模糊控制的ATO系统调速在快速性和准确性上都得到了明显的改善,并且加速度被限制在1.5米/秒方之内.图6为10米/秒目标调速时量化因子与比例因子的调整情况,符合之前的分析,克服了模糊控制精度不足的问题,同时,增强了系统的自适应能力.

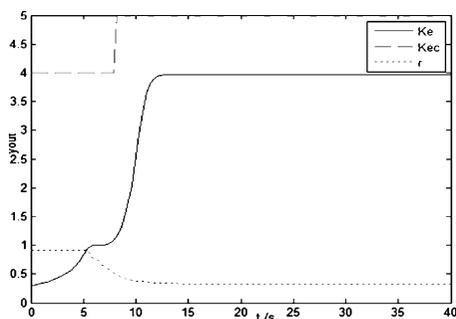


图6 量化因子和比例因子的调整

Fig. 6 Adjustment of Quantization and Scale factors

4 结论

仿真结果证明,通过对模糊系统的量化因子以及比例因子的自调整,不仅改善了系统控制的精度与快速性,而且有效提高了ATO系统运行效率与乘客舒适性,从而更好的完成定位停车任务.

参 考 文 献

- 唐涛,黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述. 铁道学报, 2003, 25(2): 98~102 (Tang T, Huang L. A survey of control algorithm for automatic train operation. *Railway Journal*, 2003, 25(2): 98~102 (in Chinese))
- Yasunobu S. Application of predictive fuzzy control to auto-

- matic train operation controller. *Proc. of IECON'84*, 1984: 657~662
- Hiroyasu O, Seiji Y, Shin-ichi S. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control. *Artificial Intelligence for Industrial Applications. IEEE AI'88, Proceeding of the International Workshop*, 1998: 485~489
- Satoshi S, Naoki I, Tsunekazu E. Application of fuzzy neural network control to automatic train operation and tuning of control rule. *Fuzzy Systems, Proceedings of 1995 IEEE International Conference*, 1995, 4: 1741~1746
- 刘贺文,赵海东,贾利民. 列车运行自动控制(ATO)算法的研究. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 38~43 (Liu Hewen, Zhao H, Jia L. A study on the control algorithm for automatic train operation. *China Railway System*, 2005, 17(3): 557~580 (in Chinese))
- Seiji Y, Shoji M, Hirokazu I. A fuzzy control for train automatic stop control. *Trans. of the Society Instrument and Control Engineers*, 2002, E-2(1): 1~8
- 杜庆莹. 电力机车自动调节系统的分析与计算. 西南交通大学学报. 1977, 2(1): 111~118 (Du Q. Design and calculation of locomotive automatic adjusting system. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1977, 2(1): 111~118 (in Chinese))
- 梁燕华,金鸿章,李东松. 基于修正因子模糊PID控制在升力鳍系统中的应用. 控制与决策, 2008, 23(10): 1139~1144 (Liang Y, Jin H, Li D. Application of fuzzy PID controller based on adjustment factors in lift fin stabilizers. *Control and Decision*, 2008, 23(10): 1139~1144 (in Chinese))
- Li H. Variable universe adaptive fuzzy controller. *Science in China(E)*, 1999, 29(1): 136~145
- Mudi R K, Pal N R. A robust self-tuning scheme for PI and PD-type fuzzy controllers. *IEEE Transaction on Fuzzy System*, 1999, 7(1): 2~16
- 王洪坡,尹力明,余龙华. 用PLC采集运行数据辨识列车运动模型. 计算机测量与控制. 2003, 11(3): 230~235 (Wang H, Yin L, She L. Picking running data by using PLC to Identify the Kinetic model of the train. *Computer Measurement & Control*, 2003, 11(3): 230~233 (in Chinese))
- 师五喜,霍伟,吴宏鑫. 柔性关节微操作机器人自适应模糊预测控制. 动力学与控制学报, 2003, 1(1): 84~89 (Shi W X, Huo W, Wu H X. Adaptive fuzzy predictive control of a micromanipulator with flexible joints. *Journal of Dynamics and Control*, 2003, 1(1): 84~89)

ADAPTIVE FUZZY CONTROL FOR SPEED ADJUSTMENT OF AUTOMATIC TRAIN OPERATION SYSTEMS *

Dong Hairong¹ Gao Bing² Ning Bin¹

(1. *School of Electronics and Information Engineering Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(2. *Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

Abstract Speed control algorithm of adaptive fuzzy was proposed based on one-level speed adjustment braking of Automatic Train Operation system. The shrinkage factor of variable universe was used to optimize the quantization factor of fuzzy controller, and the scale factor was adjusted by fuzzy reasoning. It is proved that the adaptive fuzzy control algorithm can improve speed control performance, passenger comfort, operation efficiency and location parking through simulation.

Key words Automatic Train Operation (ATO), speed adjustment braking, shrinkage factor of variable universe