

文章编号: 1001-0920(2010)05-0794-03

基于模糊PID软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动

董海荣^a, 高冰^a, 宁滨^b, 张严心^a

(北京交通大学 a. 电子信息工程学院, b. 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要: 基于对列车自动驾驶(ATO)系统算法的分析, 首先针对ATO系统停车阶段采取的一级调速制动过程, 利用模糊PID软切换控制算法对ATO系统进行研究; 然后利用模糊规则实现模糊控制与PID控制之间的切换; 最后通过对系统的仿真表明, 该算法不仅能够实现ATO系统调速控制的平滑过渡, 而且使列车能够平稳运行, 节约能源, 同时提高了乘坐的舒适性和停车精度。

关键词: 列车自动驾驶; 调速制动; 模糊PID软切换; 舒适性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fuzzy-PID soft switching speed control of automatic train operation system

DONG Hai-rong^a, GAO Bing^a, NING Bin^b, ZHANG Yan-xin^a

(a. School of Electronics and Information Engineering, b. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. Correspondent: NING Bin, E-mail: bning@bjtu.edu.cn)

Abstract: Control algorithms of automatic train operation (ATO) system are studied in this paper. The characteristics of the train traction and the single phase of speed adjustment during the train braking are introduced. A fuzzy-PID soft switching control algorithm is then proposed to the ATO system, where fuzzy rules are used to realize the switching between fuzzy and PID controllers. Simulation results show that, the speed control algorithm is efficiency, which improves many functions during the operation of train, such as efficiency, punctuality, energy-economizing, stop precision, riding comfort and so on.

Key words: Automatic train operation (ATO); Speed adjustment; Fuzzy-PID soft switch; Riding comfort

1 引言

大城市人口密度的逐渐增大以及城市交通问题的日趋严峻, 迫切需要建设高效率的城市轨道交通系统, 列车自动驾驶(ATO)系统作为列车自动控制系统中最重要的子系统是必不可少的。ATO系统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。目前, ATO系统已能代替司机进行自动驾驶, 形成了“人机联控, 机控优先”的有人照管ATO系统, 而全程无人驾驶也是ATO系统的发展方向^[1]。ATO系统最主要的功能是调速运行, 只有在精确调速的基础上才能更好地完成定位停车任务; 在保证乘客舒适性前提下加快速度调整, 才能提高列车的运行效率。ATO系统利用车载固化信息和地面信息实现对列车牵引、制动的控制, 使列车经常处于最佳运行状态, 不仅能提高乘客的舒适度和列车的

准点率, 还能节约能源。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。

ATO系统运用不同的控制算法, 其控制效果有所不同^[1]。20世纪60年代初, 研究者利用PID的稳态误差实现ATO系统速度的准确调整, 但是PID控制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的要求。到了80年代, 随着智能控制算法的兴起, 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也开始运用到ATO系统的牵引与制动。根据模拟专家的实际经验, 有效地满足了舒适性要求, 但其控制精度却不能从本质上得到改善。从90年代开始, 混合型复合控制算法成为ATO系统的研究热点, 利用多种控制算法, 通过各自优势互补来提高ATO系统的性能指标^[3]。

收稿日期: 2009-06-08; 修回日期: 2009-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60870013, 60736047, 60834001).

作者简介: 董海荣(1974—), 女, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 从事复杂控制系统的稳定性和鲁棒性、智能交通系统等研究; 宁滨(1959—), 男, 山西稷山人, 教授, 博士生导师, 从事智能交通系统、基于通信的列车控制技术等研究。

从目前看, 复合控制算法将是ATO系统未来重点研究的方向. 本文考虑PID控制算法和模糊控制算法在ATO系统中的优缺点, 基于模糊推理, 采用模糊PID软切换控制算法对ATO系统的调速制动进行研究. 通过对系统的仿真表明, 该算法能够实现ATO系统调速控制的平滑过渡.

2 ATO 调速制动过程和列车运行模型

列车停车制动阶段由ATO系统在列车自动防护(ATP)系统的监督下完成. 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^[4]. 由于过多的分级制动会大量地占用路段, 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. 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. 列车的调速制动模式如图1所示.

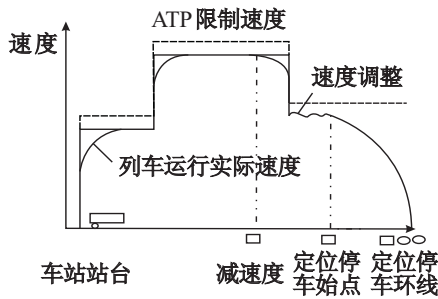


图1 ATO 运行图

车辆牵引电机通常采用斩波无级调压供电, 机车采用恒流准恒速控制. 列车手柄级位对应于相应的电压级位, 即通过改变手柄级位来调整列车的速度. 被控制对象不仅包括直接受控制的牵引电动机, 同时还考虑了牵引电动机驱动了整个列车. 整流电压 u_d 为输入量, 列车速度 v 为输出量. 下面以他激电动机为例分析列车的调速牵引情况^[5]. 电压平衡方程为

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

其中: L 与 R 分别为电枢回路内总的电感与总电阻; u_d 为整流电压; L 为电枢回路内总电感; R 为电枢回路中总电阻; C_v 为电机电势常数; φ_v 为电机主磁通.

忽略列车启动加速的阻力时, 列车加速度与电力机车牵引力之间的关系为

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

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.

电力机车上每台牵引电动机的牵引力为

$$F = C_F \varphi i. \quad (3)$$

M 为列车折算到每台牵引电动机的换算质量, 即

$$M = \frac{m(1 + \gamma)}{N}, \quad (4)$$

其中 N 为机车牵引电机台数. 于是

$$i = \frac{M}{C_F \varphi} \frac{dv}{dt}. \quad (5)$$

由于他激电动机的磁通量在自动调速过程中维持不变, 令常数 $C'_F = C_F \varphi$, 对电流微分, 得

$$\frac{di}{dt} = \frac{M}{C'_F} \frac{d^2v}{dt^2}. \quad (6)$$

代入电压平衡方程式, 经整理后得到二阶列车模型

$$\frac{v}{u_d} = \frac{1/C'_v}{T_M T_i s^2 + T_M s + 1}. \quad (7)$$

其中: $C'_v = C_v \varphi$, $T_M = \frac{RM}{C'_F C'_v}$, $T_i = \frac{L}{R}$.

3 模糊PID软切换控制算法

为提高ATO系统调速控制的快速性和准确性, 将模糊PID软切换控制算法引入ATO系统. PID控制算法具有良好的控制精度, 但系统响应的快速性和稳定性却不能同时兼顾. 模糊控制算法具有较好的鲁棒性和控制的快速性, 但由于量化因子的存在而无法识别小误差, 其控制精度不高^[6]. 考虑到ATO系统调速舒适性的要求, 采取基于模糊规则的切换方式, 利用模糊推理完成两种控制器输出强度的切换. 如图2所示^[8].

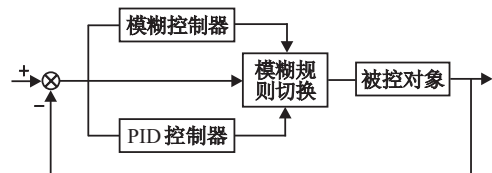


图2 基于模糊规则软切换控制结构图

模糊推理的输入分别为误差和误差变化率, 模糊切换规则形式如下:

- If $|e|$ is S, and $|\dot{e}|$ is S,
then U_{PID} is B, and U_{FUZZY} is S;
- If $|e|$ is S, and $|\dot{e}|$ is B,
then U_{PID} is S, and U_{FUZZY} is B;
- If $|e|$ is B, and $|\dot{e}|$ is S,
then U_{PID} is S, and U_{FUZZY} is B;
- If $|e|$ is B, and $|\dot{e}|$ is B,
then U_{PID} is S, and U_{FUZZY} is B.

其中: $|e|$ 为误差绝对值, $|\dot{e}|$ 为误差变化率绝对值, $|e|$ 和 $|\dot{e}|$ 都选用两个语言变量 S 和 B 分别表示误差小和大; U_{PID} 和 U_{FUZZY} 分别代表PID控制器和模糊控制器的输出; X 和 Y 是 $|e|$ 和 $|\dot{e}|$ 的模糊切换规则的隶属度函数, 如图3所示.

令 ω_{PID} 和 ω_{FUZZY} 分别表示PID控制器和模糊控制器的控制强度系数, 即

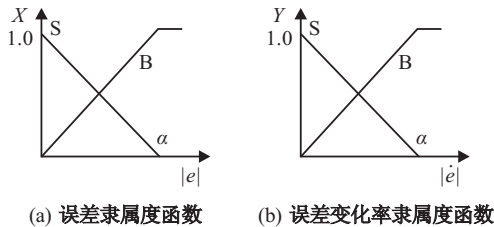


图 3 隶属度函数

$$\omega_{\text{PID}} = \min \{X[e(k)], Y[\dot{e}(k)]\},$$

$$\omega_{\text{FUZZY}} = 1 - \omega_{\text{PID}}.$$

两个控制器的混合输出采用加权平均法运算, 即

$$U = \frac{\omega_{\text{PID}}U_{\text{PID}} + \omega_{\text{FUZZY}}U_{\text{FUZZY}}}{\omega_{\text{PID}} + \omega_{\text{FUZZY}}} = \frac{\omega_{\text{PID}}U_{\text{PID}} + \omega_{\text{FUZZY}}U_{\text{FUZZY}}}{\omega_{\text{PID}}U_{\text{PID}} + \omega_{\text{FUZZY}}U_{\text{FUZZY}}}.$$

系统暂态响应时, 由于误差和误差变化率较大, 模糊控制器起主要作用; 当响应接近稳态时, 误差和误差变化率变小, PID 控制器起主要作用。

4 系统仿真

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^[9]

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

其中输入论域均为 $[-3, +3]$. $P=9$, $I=0.25$, $D=10$, $\alpha=2$, $\beta=3$.

图 4 给出了 ATO 系统速度从 10 m/s 调速到 6 m/s 的过程. 可以看出, 软切换控制的 ATO 系统调速兼顾了 PID 控制算法的准确性及模糊控制算法的快速性。

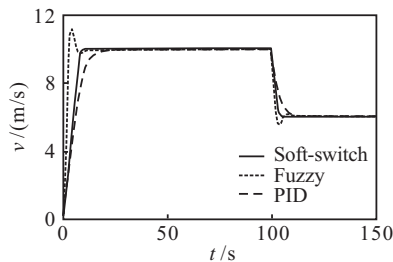


图 4 3 种控制方法的仿真比较

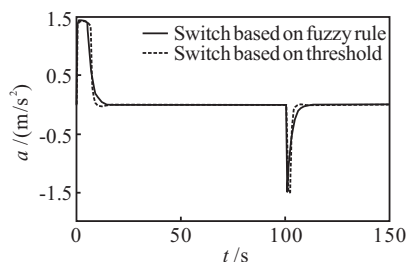


图 5 两种切换控制方法下的加速度对比

图 5 是软切换控制算法与基于阈值切换控制算法^[10]下的 ATO 系统加速度对比. 在 ATO 系统加速度不大于 1.52 m/s^2 (保证乘客舒适性的加速度上限值^[11]), 并且保证同样的响应性能情况下, 软切换控制

的加速度变化相比基于阈值的切换控制更加缓和, 更能满足乘客的舒适性要求。

5 结 论

本文利用模糊控制算法与 PID 控制算法的各自优点, 对 ATO 系统调速制动所用的模糊 PID 软切换控制算法进行了研究. 仿真表明, 该算法能够提高 ATO 系统控制的快速性, 使列车不仅能够平稳运行, 而且提高了乘坐的舒适性, 同时降低了能耗, 增加了停车精度。

参考文献(References)

- [1] 唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 98-102.
(Tang T, Huang L J. A survey of control algorithm for automatic train operation[J]. Railway J, 2003, 25(2): 98-102.)
- [2] Hiroyasu Oshima, Seiji Yasunobu, Shin-ichi Sekino. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control[C]. Artificial Intelligence for Industrial Applications Proc of the Int Workshop. Cochín: IEEE Press, 1988: 485-489.
- [3] Satoshi Sekine, Naoki Imasaki, Tsunekazu Endo. Application of fuzzy neural network control to automatic train operation and tuning of control rule[C]. The 4th IEEE Int Conf on Fuzzy Systems. Piscataway: IEEE Publish, 1995: 1741-1746.
- [4] 刘贺文, 赵海东, 贾利民. 列车运行自动控制(ATO)算法[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 38-43.
(Liu H W, Zhao H D, Jia L M. A study on the control algorithm for automatic train operation[J]. China Academy of Railway Sciences, 2005, 17(3): 38-43.)
- [5] 王书林, 赵茜. 电力牵引控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 178-192.
(Wang S L, Zhao X. Electric traction control system[M]. Beijing: China Electric Press, 2005: 178-192.)
- [6] Li H X. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control[J]. IEEE Trans on SMC, 1997, 27(5): 884-889.
- [7] Sun S Q, Cong C, Wang J H. Study on time-delay system with fuzzy soft-switch control based on smith predictor[C]. Chinese Control and Decision Conf. Yantai, 2008: 2678-2681.
- [8] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 615-618.
(Liu H B, Li S Y, Chai T Y. Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 615-618.)

(下转第 800 页)