

文章编号: 1005-8451 (2011) 08-0007-03

一种舒适且高精度的列车停车控制器的设计

张兆中, 邹春海, 张强, 陈德旺

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要: 舒适度和停车精度是列车自动驾驶系统 (ATO) 的重要性能指标。本文首先根据现场经验建立 ATO 的性能指标评价函数。在此基础上, 设计出一种舒适并且高停车精度的列车自动停车控制器。仿真结果表明: 与传统的 PID 控制器相比, 本文设计的控制器的舒适度更好, 停车精度更高。

关键词: 列车自动驾驶; 停车精度; 舒适度; 停车控制器;

中图分类号: U260: TP273 **文献标识码:** A

Design of train stopping controller with high comfortableness and precision

ZHANG Zhao-zhong, GAO Chun-hai, ZHANG Qiang, CHEN De-wang

(State Key Laboratory of Rail Traffic Control Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The stopping precision and comfortableness were important performance indices of ATO System. First of all, the paper established the evaluation function for performance index by practical experience of ATO stopping field. On this basis, this thesis designed a kind of stopping controller with property of comfort and high stopping precision. Simulation results showed that: compared with traditional PID controller, the designed controller was with much more comfortableness and stopping precision.

Key words: Automatic Train Operation (ATO); stopping precision; comfortableness; stopping controller

以往地铁的列车自动驾驶技术主要采用传统的 PID 的控制方式。PID 是一种线性调节器, 它将设定值与输出值的偏差按比例, 积分和微分进行控制。这种控制方法要事先设定出距离—速度曲线, 即目标速度曲线^[1]。它的缺点是运行的全程只根据速度的误差量来决定对列车的控制量, 没有考虑运行过程中 ATO 的性能指标。

本文将介绍 ATO 的各性能指标, 并设计各性能指标的评价函数, 通过评价函数来量化列车运行的性能, 设计基于性能指标的ATO控制器, 并与传统的 PID 控制器进行对比, 分析列车运行的性能指标, 衡量控制器的可用性。

1 ATO 的性能指标与列车模型

1.1 ATO 的性能指标

列车自动驾驶的性能指标主要从安全性、能耗、准点程度、舒适度、停车精度 5 个方面考虑。由于本文中的控制器主要针对性能指标中的舒适

性和停车精度指标进行设计, 并且仿真环境只包含定点停车的部分, 所以本文只考虑舒适性的评价指标和停车精度。

(1) 舒适度: 主要是针对旅客列车, 要求正常情况下加减速时避免造成大的冲动, 影响乘客的乘车感受。列车的乘车舒适性的评价函数可以用加速度的绝对值及其变化率的绝对值来确定。这里取加速度最大值 $1.2 \sim 1.4 \text{ m/s}^2$, 加速度变化率最大值为 1 m/s^3 。设加速度为 a , 加速度的变化率为 j 。则评价函数为:

$$S4=0.5 \cdot s(a)+0.5 \cdot s(j)$$

$$s(a)=\begin{cases} 1 & 0 \leq |a| \leq 0.5 \\ 12/7-|a|/0.7 & 0.5 \leq |a| \leq 1.2 \\ 0 & |a| \geq 1.2 \end{cases}$$

$$s(j)=\begin{cases} 1 & 0 \leq |j| \leq 0.4 \\ 1/0.6-|j|/0.6 & 0.4 \leq |j| \leq 1 \\ 0 & |j| \geq 1 \end{cases}$$

(2) 停车精度: 要求列车的实际停车位置和规定的停车点的误差在可允许的范围内。我们可以记录停车时候的具体位置点和规定的停车点的误差来记录停车精度。如果停车精度在 30 cm 之内符合要求, 如果在 30 cm 以外需要考虑改进算

收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60634010, 60476073); 轨道交通控制与安全自主课题 (2008RCSZZ001), (2009RCSZT004)。

作者简介: 张兆中, 在读硕士研究生; 邹春海, 副教授。

法, 提高停车精度。设停车误差为 Δs , 则停车精度的评价指标为:

$$S5 = \begin{cases} 1 & \Delta s < 10 \\ -0.05 \cdot \Delta s + 1.5 & 10 \leq -\Delta s \leq 30 \\ 0 & \Delta s \geq 30 \end{cases}$$

1.2 列车模型介绍

本文所建的列车模型是根据分析现场测试数据得到列车的性能特性参数, 同时综合考虑列车的牵引制动特性而提出的。此模型可配置延时系数和时间常数, 并且可加入对列车的输入以及各种扰动。列车动力学模型框图如图 1

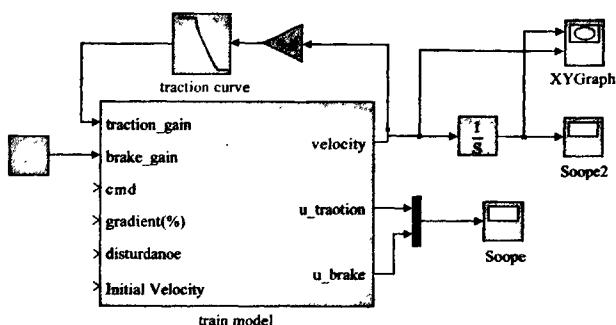


图 1 列车动力学模型框图

其中 traction_gain 为列车的牵引增益, 它和当前速度有关。brake_gain 为制动增益, 因为列车本身对制动有校正, 所以可以近似认为在列车制动的时候是线性的。cmd 为列车的档位输入。disturbance 为列车的干扰输入。initial Velocity 为列车的初速度。velocity 为列车当前的速度, u_traction 为列车的牵引输出, u_brake 为列车的制动输出。

2 控制器的设计

主要用 SIMULINK 来设计舒适高精度的控制器。为了满足舒适性, 要在速度控制器的输出加上加速度绝对值的限幅和冲击率绝对值的限幅。为了满足停车精度, 要在列车定点停车阶段启用定点停车阶段的控制器, 实现方法有 2 种: (1) 采用内外环的控制器控制模式。(2) 采用并列的 PID 控制模式, 一个控制速度, 一个控制距离。本文采用的是内外环的控制器控制模式。在内环, 采用 PID 控制器跟踪目标速度。在外环, 采用模糊控制器为了跟踪距离去纠正目标速度。控制器设计框图如图 2。

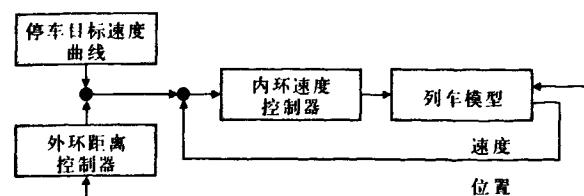


图 2 控制器设计框图

内环的速度控制器为 PID 控制器, 控制参数为 $kp = 0.6, ki = 0.2, kd = 0.5$ 。为了提高舒适性, PID 输出加上了 $-0.05 \sim -0.8$ 的幅度限制。冲击率加入了 $-0.7 \sim 0.7$ 的限制。外环的距离控制器, 采用单输入单输出的 Mamdani 型模糊控制器。输入为距离的误差, 输出为对目标速度的纠正。隶属度函数选用高斯型。模糊规则如下:

- (1) 如果距离的误差为负, 则减小目标速度。
- (2) 如果距离的误差为零, 则保持目标速度。
- (3) 如果距离的误差为正, 则增大目标速度。

同时还需确定输入和输出的范围。通过仿真分析, 输入的范围定为 $-1.5 \sim 1.5$ 。输出的范围定为 $-1 \sim 1$ 。量化因子 $k1$ 和比例因子 $k2$ 暂定为 1。

3 仿真结果

仿真环境为列车从 20 m/s 的初速度进入定点停车阶段开始, 目标加速度为 0.5 m/s^2 , 采用一次制动, 中途不得缓解, 使车平稳安全的停下来。采用内外环的控制器控制列车舒适, 高精度的停车仿真结果如图 3、图 4。

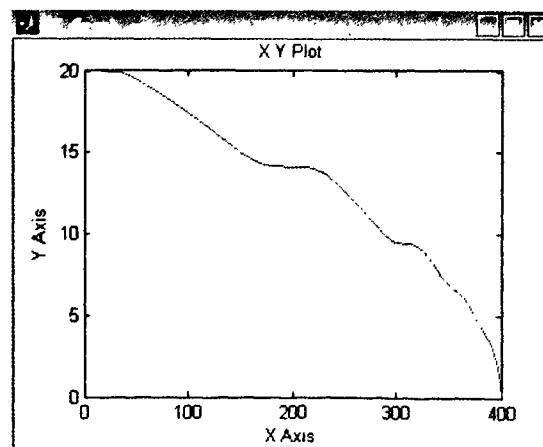


图 3 实际停车过程的速度 - 距离曲线

此次仿真停车精度达到了 9.4 cm。舒适性评价函数的值为 66.45。实现了高精度高舒适度的停

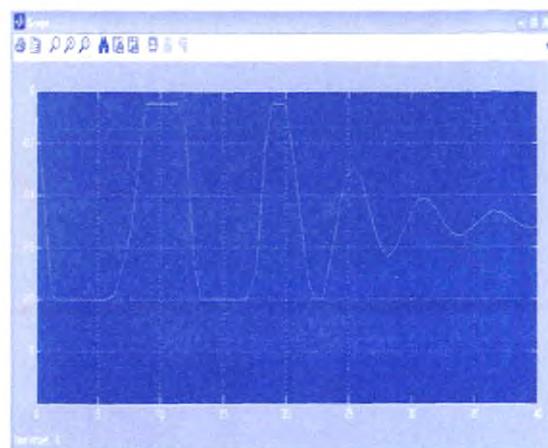


图4 列车实际的档位变化

车。但是本次仿真的停车精度满足要求，而控制器是否能针对不同的初始条件，均能保证符合要求的停车精度，需要继续探讨。

首先把仿真环境设为一个范围，在仿真环境的范围内做多次仿真进行分析对比。将仿真的初速度分别设为19 m/s、20 m/s和21 m/s。目标加速度设为0.5 m/s²、0.55 m/s²、0.6 m/s²、0.65 m/s²、0.7 m/s²。进行仿真控制，发现如果不修改比例因子和量化因子，仿真结果比较差。通过对实际仿真数据的分析，对比例因子和量化因子进行线性拟合，拟合的结果为 $k_1 = -2.1429a^2 + 0.1071a + 1.5357$ $k_2 = -5a^2 + 3.1643a + 0.8686$ 。进行仿真分析，得到的结果如表1。

通过上表可以看出，经过对量化因子和比例因子的线性拟合，通过输入的目标加速度来确定量化因子和比例因子，针对不同的初始条件，控制效果都很好，停车误差均在30 cm之内，并且大部分都在10 cm范围之内。

(上接P7)

2000对数据进行管理，易于安装使用。

4 结束语

本系统通过导入京秦线轨道测试数据，完成轨道电路测试数据的数据操作、管理、数据图形回放、轨道状态评估等功能。所得到的统计分析结果，能够为铁路电务部门跟踪设备故障、评估设备状态、制定维修计划提供科学依据。

表1 控制器针对不同初始条件的停车精度

初速度 m/s	加速度 m/s ²	停车误差 cm	初速度 m/s	加速度 m/s ²	停车误差 cm
19	0.5	9	20	0.65	1
19	0.55	6	20	0.7	1
19	0.6	2	21	0.5	16
19	0.65	4	21	0.55	5
19	0.7	1	21	0.6	6
20	0.5	17	21	0.65	8
20	0.55	2	21	0.7	4
20	0.6	5			

4 结束语

本文首先介绍了ATO的性能指标，并建立了ATO性能指标的评价函数。分析了传统PID控制器在跟踪目标速度曲线的过程中没有考虑ATO的性能指标，只是一个速度跟踪的过程。本文在考虑了舒适性和停车精度的基础上设计列车停车控制器，在定点停车阶段采用内外环的控制器，此控制器在跟踪目标曲线的过程中时刻考虑ATO的舒适性和停车精度的性能指标。最后通过仿真对比，证明这个控制器的控制效果比传统的PID控制器的效果好。论文还研究了针对不同初始条件控制器的适应性，通过对仿真数据进行分析，得到了模糊控制器中比例因子、量化因子与输入加速度的关系，大大的减少了停车误差。

参考文献：

- [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 (4): 1-5.
- [2] 黄良骥, 唐涛. 地铁列车自动驾驶系统分析与设计[J]. 北京交通大学学报, 2002 (6): 1-4.

责任编辑 方圆

参考文献：

- [1] 赵会兵. 高速铁路轨道电路数字仿真系统的研究[J]. 北京: 北方交通大学学报, 1999, 23 (5): 4-17.
- [2] 李彦华. 电务试验车信号测试系统[J]. 北京: 铁路计算机应用, 2006, 15 (12): 12-14.
- [3] 刘宝生. 基于虚拟仪器技术的铁路信号试验车自动测试系统研究[D]. 北京: 北京交通大学硕士论文, 2006.

责任编辑 方圆