

6-2-2020

Research and Simulation on Control Algorithm for Multi-objective Optimization of Urban Rail Train

Jianjun Meng

1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ;2. Mechatronics T & R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ;3. Engineering Technology Center for Informatization of Logistics & Transport Equipment, Lanzhou 730070, China;

Minggao Pei

1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ;

Wu Fu

1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ;

Tengzhou Wei

1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research and Simulation on Control Algorithm for Multi-objective Optimization of Urban Rail Train

Abstract

Abstract: According to the characteristics of urban rail train running multiple objective, the multi-objective operation model for urban rail train was established with the energy consumption, punctuality, accurate parking and comfort level as the optimization indexes. Genetic algorithms was used to optimize running multi-objective model of urban rail train, and according to train traction calculation and computer simulation, the train running target curve was obtained. The fuzzy control and PID control algorithm were applied to urban rail train system to establish adaptive fuzzy PID controller and PID control in order to track the target curve. Simulation results show that adaptive fuzzy PID control compared with PID control, the former can better make the train follow the target curve operation, so as to ensure train safety, smooth, punctual operation, at the same time also to ensure the accuracy of a train stopping.

Keywords

genetic algorithms, multi-target, traction calculation, target curve, fuzzy PID

Authors

Jianjun Meng, Minggao Pei, Wu Fu, Tengzhou Wei, and Hao Shuai

Recommended Citation

Meng Jianjun, Pei Minggao, Wu Fu, Wei Tengzhou, Hao Shuai. Research and Simulation on Control Algorithm for Multi-objective Optimization of Urban Rail Train[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 581-588.

城轨列车多目标优化控制算法研究与仿真

孟建军^{1,2,3}, 裴明高¹, 武福¹, 韦腾舟¹, 郝帅¹(1. 兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学机电技术研究所, 兰州 730070;
3. 甘肃省物流及运输装备信息化工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘要: 针对城轨列车运行多目标的特点, 以能耗、准时性、精确停车以及舒适度为指标建立城轨列车运行多目标模型, 利用遗传算法对其进行优化, 根据列车牵引计算以及计算机仿真得到列车运行目标曲线。将模糊控制和PID控制算法应用到城轨列车运行系统中, 建立自适应模糊PID控制器和PID控制器, 对目标曲线进行跟踪。仿真结果表明自适应模糊PID控制与PID控制相比, 其能更好的使列车跟随目标曲线, 从而保证列车安全、平稳、准时地运行, 确保列车进站停车的精确性。

关键词: 遗传算法; 多目标; 牵引计算; 目标曲线; 模糊PID

中图分类号: U239.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)03-0581-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703016

Research and Simulation on Control Algorithm for Multi-objective Optimization of Urban Rail Train

Meng Jianjun^{1,2,3}, Pei Minggao¹, Wu Fu¹, Wei Tengzhou¹, Hao Shuai¹(1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Mechatronics T & R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Engineering Technology Center for Informatization of Logistics & Transport Equipment, Lanzhou 730070, China)

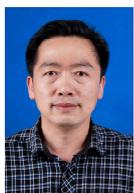
Abstract: According to the characteristics of urban rail train running multiple objective, the multi-objective operation model for urban rail train was established with the energy consumption, punctuality, accurate parking and comfort level as the optimization indexes. Genetic algorithms was used to optimize running multi-objective model of urban rail train, and according to train traction calculation and computer simulation, the train running target curve was obtained. The fuzzy control and PID control algorithm were applied to urban rail train system to establish adaptive fuzzy PID controller and PID control in order to track the target curve. Simulation results show that adaptive fuzzy PID control compared with PID control, the former can better make the train follow the target curve operation, so as to ensure train safety, smooth, punctual operation, at the same time also to ensure the accuracy of a train stopping.

Keywords: genetic algorithms; multi-target; traction calculation; target curve; fuzzy PID

引言

城轨列车自动运行(ATO)系统是列车运行速度

控制的核心, 列车运行的控制是一个需要同时满足安全、节能、准时、精确停车和舒适度多个目标的复杂的控制问题。列车运行过程的优化就是在列车的运行策略中寻找最优控制策略, 在保证列车安全、节能、正点、运行过程舒适的同时, 能耗和运行时间达到铁路运营部门和乘客都可以接受的程度^[1]。目前对于 ATO 控制策略的研究考虑的指标不全, 不能反映列车运行过程多目标的特点。主要



收稿日期: 2015-05-29 修回日期: 2015-08-11;
基金项目: 国家自然科学基金(61563027), 兰州交通大学优秀科研团队资助计划(201604);
作者简介: 孟建军(1966-), 男, 河南淮阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为轨道交通装备检测与监控技术等。

<http://www.china-simulation.com>

是以能耗最小为目标,安全性与时间为约束的单目标优化研究,每次列车运行过程中只能得到其中的一个解^[2]。文献[3]将列车运行控制转换为以能耗为目标的最优化问题,以列车动能作为独立的状态变量,用极大值原理得到列车耗能最小的最佳控制策略;对于多目标求解问题,目前主要采用多目标遗传算法,并且该算法已经成功应用到了许多复杂的问题中^[4-5],文献[6]建立了列车运行过程的多目标模型,以改进遗传算法进行优化,得到了较好结果。

本文采用遗传算法对城轨列车的运行过程进行优化,寻找最优控制策略,使列车在满足节能、准时、停车精度等指标的同时,能使列车根据自身的运行环境,实时地调整列车的运行控制策略,控制列车运行。

1 城轨列车运行过程多目标模型

城轨列车在线路上运行时,列车驾驶员可以根据列车的实际运行速度、时间以及停车距离,选择适当的操纵方式对列车进行控制,前提条件是在保证列车安全、准时、准确停车的情况下,减少能耗。

由列车牵引计算规程^[7]可知列车的运动动力学方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \\ v \frac{dv}{dx} = f(u, v) - w(x, v) - b(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

公式满足: $t(0) = 0$, $t(X) = T$, $v(0) = v(X) = 0$, $v(x) < V$ 。

其中: x 为车辆在线路上的位置,为独立变量; X 为线路全长; t 为车辆的实际运行时间; T 为车辆在线路上的规定运行时间; v 为车辆实际运行速度; V 为车辆在线路上允许的最高运行速度。 $u \in \{-1, 0, 1\} = U$, u 为车辆输入控制序列,其中,“1”表示牵引,“0”表示惰性,“-1”表示制动。 $f(u, v)$ 表示牵引力,由车辆牵引特性曲线和输入控制序列确定, $w(x, v)$ 表示车辆运行附加阻力,由车辆运行速度和车辆的运行位置确定, $b(u, v)$ 表示车辆制动力,由车辆制动特性、输入控制序列和运行速度确定。

城轨列车 ATO 系统是一个复杂的非线性系统,该系统存在多个输入、输出变量,以城轨列车运行时的能耗、精确停车、准时性和舒适性等性能指标为目标,同时以列车动力学方程作为约束,建立多目标模型,并对列车的能量消耗模型、舒适性模型、停车精度模型和准时性模型分别进行描述^[8]。

1.1 能量消耗模型

列车的能耗表示为列车在整个行车过程中克服阻力做功所消耗的能量。因此,列车每个时刻做功消耗能量对时间的积分可表示列车能耗:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} \mu(t) dt \quad (2)$$

其中: P 为列车能耗; t_1 , t_2 为列车在这段时间内的起始时间和结束时间; $\mu(t)$ 为列车在每个时刻的能量消耗函数。

对城轨列车控制系统进一步分析,可以得到列车的能耗函数为:

$$E = \frac{\int Fv dt}{\xi_M} + At + \xi_B \int Bv dt \quad (3)$$

式中: F 为列车行驶的牵引力; B 为列车行驶的制动力; v 为列车行驶的速度; A 为列车的辅助功率; t 为列车站间运行时间; ξ_M 为牵引电能转换为机械能的乘积因子; ξ_B 为制动机械能转换为电能的乘积因子。因为主要考虑列车的行车过程,可简化为:

$$K_N = \sum_{i=1}^n ma_{i-1} (S_i - S_{i-1}) \quad (4)$$

式中: K_N 为列车能量消耗指标; a_i 为第 i 个工况的加速度; S_i 为第 i 个工况的位移。

1.2 舒适度模型

舒适度反映着乘客的乘车质量,通常以用单位时间里加速度差的累加和表示。所以列车运行舒适度模型为:

$$K_S = \sum_{i=1}^n |a_i - a_{i-1}| \quad (5)$$

式中: K_S 为舒适度衡量指标; a_i 为工况点的加速度。 K_S 越小,列车舒适度越好,因此,在列车自动运行速度曲线优化中应该保证舒适度衡量指标

K_S 越小越好。

1.3 停车精度模型

精确停车指标模型就是列车在整个运行过程中走行的距离与列车从运行起点到停车点之间的距离差, 停车点的停车误差应在 ± 25 cm 范围内^[9], 精确停车模型可表示为:

$$K_J = |S_Z - S'| \quad (6)$$

式中: K_J 为停车精度误差衡量指标; S_Z 为列车的实际行驶距离; S' 为两个车站间的距离。

1.4 准时性模型

准时性模型可以表示为列车的运行时间与给定时间之差, 即列车准时性模型为:

$$K_Z = \sum_{i=1}^n T_i - T \quad (7)$$

列车运行时间就是将关键工况点的运行时间加起来, 结合上式, 列车准时性模型可以表示为:

$$K_Z = \sum_{i=1}^4 \left[\left(\sqrt{2a_i(s_i - s_{i-1}) + v_{i-1}^2} - v_{i-1} \right) / a_i \right] - T \quad (8)$$

对于准时性指标, T 为列车在两站间规定的运行时间, 列车的实际运行时间与规定的时间误差 $\leq 5\%$ ^[8]。

综上所述, 以节能、精确停车、准时和舒适性等为目标的多目标优化问题模型为:

$$\min \{K_N, K_S, K_J, K_Z\}$$

式中: \min 表示取函数的最小值, 即各个子目标函数都尽可能的取最小值。

对于多目标优化问题的求解, 本文采用加权和方法将其聚合为单目标优化问题, 并通过遗传算法进行求解。

$$f = w_1 K_N + w_2 K_S + w_3 K_J + w_4 K_Z$$

其中: w_1, w_2, w_3 和 w_4 为权重系数, 满足 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ 。则多目标问题转换为下式所示的单目标优化问题:

$$\min \{f\} \quad (9)$$

s.t. 式(1)

$$t(0) = 0, t(X) = T, v(0) = v(X) = 0, v(x) < V。$$

2 城轨列车运行过程遗传算法

列车的自动运行过程是一个多目标优化问题, 目前, 遗传算法已经被广泛应用于交通运输领域以及多目标优化问题^[10]。它是一种启发式随机搜索方法, 它具有独特的算法形式和运行机理, 在处理复杂多目标优化问题中有着很显著的优势^[11]。

2.1 遗传算法计算的基本步骤

首先设定种群大小、变异及交叉概率, 确定编码方式, 并根据初始条件进行种群初始化。其次, 计算群体中各个个体的适应度, 检查是否达到终止条件, 若没有, 将选择算子作用于群体, 根据个体适应度, 选择出一些优良的个体遗传到下一代。否则输出进化后的最优个体, 结束。最后, 根据交叉概率和变异算子, 对个体进行交叉及变异运算, 得到下一代种群个体。将新生成个体组成新一代种群, 继续进行适应度计算, 重新开始。

遗传算法的流程如图 1 所示。

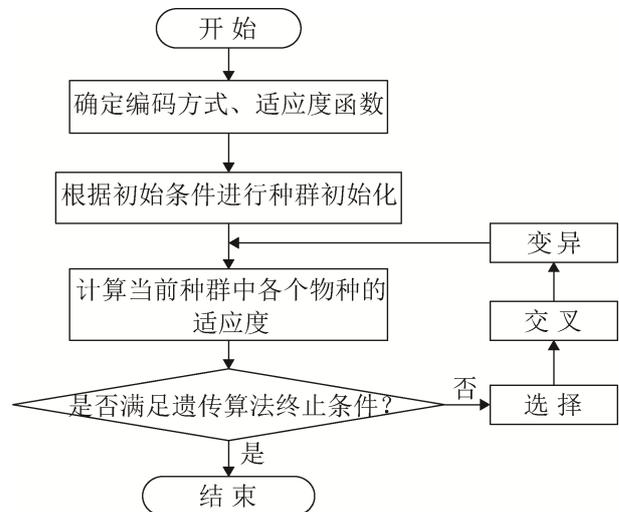


图 1 遗传算法流程图

Fig. 1 Flow chart of genetic algorithm

2.2 编码

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题, 本文在遗传算法编码时, 采用二进制编码对列车的工况信息进行编码。

2.3 初始种群的生成

群体规模大小的选择很重要，群体规模太大，会使适应度评估次数增加，计算量会很大，效率很低^[12]。在本文中，选择种群的大小为 50 个染色体来完成种群的初始化过程。

2.4 适应度的计算

在遗传算法中用适应度来度量群体中各个个体在优化计算中能达到或接近于或有助于找到最优解的优良程度。城轨列车运行过程的仿真优化是一个多目标优化问题，本文对于列车运行过程的优化适应度函数，主要从能耗、舒适度和停车精度等方面来进行考虑。总体适应度函数如下：

$$f_Z = w_1 K_N + w_2 K_S + w_3 K_J + w_4 K_Z \quad (10)$$

式中： w_i 表示各个适应度指标的权重。

将各个指标代入式中，可得：

$$f_Z = w_1 \sum_{i=1}^n m a_{i-1} (S_i - S_{i-1}) + w_2 \sum_{i=1}^n |a_i - a_{i-1}| + w_3 |S_Z - S^*| + w_4 \left(\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\sqrt{2a_i (s_i - s_{i-1}) + v_{i-1}^2 - v_i}}{a_i} \right] - T_4 \right) \quad (11)$$

式中： S_i 和 a_i 指第 i 个工况的位置和加速度，当得到 S_i 和 a_i 后，可以通过下式求得 v_i 和 t_i ：

$$v_i = \sqrt{2a_i (s_i - s_{i-1}) + v_{i-1}^2} \quad (12)$$

$$t_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{a_i} \quad (13)$$

适应度函数是遗传算法中的一个重要的方面，有助于算法在计算中的收敛，因此，在本文中，适应度应越大越好，故适应度函数为：

$$F = \frac{1}{f_Z} \quad (14)$$

3 实例仿真

3.1 列车运行控制策略分析

列车在线路上运行时，由于线路的复杂性，当使用不同的运行控制策略时，得到的结果也是不同

的，因此，需要在不同的控制策略中寻找一种最优的控制策略，使列车按该控制策略运行，以达到满意的结果。

列车在各相位之间进行转换时，出于安全性及设备条件限制，需要满足如下原则：起始相位必须是牵引，最终相位必须是制动；牵引相位和制动相位间必须存在惰行相位；牵引相位与制动相位之间不可以直接进行转换，需要在中间加入惰行相位进行过渡。当列车进入某个运行相位时，需要将这一状态保持一段时间，以保证运行的平稳性^[13]。各相位之间的转换关系如图 2 所示。

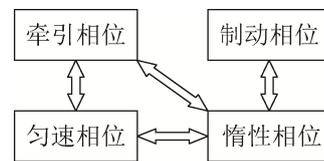


图 2 各相位转换关系

Fig. 2 The conversion relationship between each phase

根据以上分析，以及由于城轨线路站间距离（一般不超过 3 km）的限制，因此，本文在计算时采用牵引-匀速-惰行-制动的控制策略。

3.2 列车运行环境的数据处理

列车自动运行速度曲线的优化就必须有列车的运行环境和列车的自身属性作为一个基本的实验环境，本文选取城轨列车 A 型车。列车基本参数及线路基本属性如表 1 和表 2 所示^[14]。

A 型车牵引力、基本阻力及制动力计算公式分别如下：

(1) A 型车牵引力计算公式：

$$F = \begin{cases} 320 - 0.4779v & (0 < v < 40 \text{ km/h}) \\ \frac{7400}{v} & (40 \text{ km/h} < v < 90 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (15)$$

(2) A 型车基本阻力计算公式：

$$W = 2.7551 + 0.014v + 0.00075v^2 \quad (16)$$

(3) A 型车制动力计算公式：

$$B = 301.32 \frac{17v_t + 100}{60v_t + 100} + 0.972(110 - v_0) \quad (17)$$

表 1 列车基本参数

Tab. 1 Train elementary parameters

参数名称	参数特性
车重 (t)	332
最高运行速度/(km/h)	80
编组方案	4 动 2 拖
平均启动加速度 (m/s^2)	$(0 \sim 35 \text{ km/h}) \geq 1.0$
平均加速度 (m/s^2)	$(0 \sim 80 \text{ km/h}) \geq 0.6$
平均制动常用减速度 (m/s^2)	$(80 \sim 0 \text{ km/h}) \geq 1.0$
回转质量系数 (γ)	0.06

表 2 线路基本属性

Tab. 2 Train line elementary attributes

站间限速/(km/h)	80
站内限速/(km/h)	65
0~500 m 坡道	-5
500~1 000 m 坡道	10

选取列车运行加速度时, 由表 1 所示数据进行选取。使用本文所制定的控制策略, 在速度曲线的计算过程中所取加速度值分别为 1.0 m/s^2 , 0 , 0.033 m/s^2 , -1.1 m/s^2 。

3.3 列车自动运行优化曲线的生成

为了验证遗传算法对于优化列车运行速度的可行性, 本文采用 Matlab 进行计算机仿真, 验证列车自动运行速度曲线。根据前面介绍的线路数据和列车自身属性的数据以及常用的遗传算法的参数的取值范围, 在调整权重的时候, 需要根据自身数量级和对于控制效果的影响程度进行调整。因此, 本文对 w_1 , w_2 , w_3 , w_4 分别取 0.1, 0.2, 0.4, 0.3。

本文在计算时, 选取某城轨列车线路上运行距离为 1 000 m 的一个站进行仿真计算, 列车在该段线路上运行规定时间为 70 s。使用遗传算法进行计算时, 种群大小为 50, 最大种群代数为 200, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.02。在 Matlab 环境下, 根据已经得到的牵引-匀速-惰性-制动控制策略运行, 得到控制序列相应的运行距离为: 262.37-169.15-369.69-198.97。

当城轨列车以该控制策略运行时, 列车能够充分利用车站间距离进行运行。匀速阶段在列车实际运行中时为惰性或制动与牵引的转换, 但由于本文

所计算站间距离较短, 速度变化很小, 因此, 在这里近似看成直线运行。

最后, 得到列车的距离-速度曲线和控制策略图以及时间-速度图分别如图 3~5 所示。

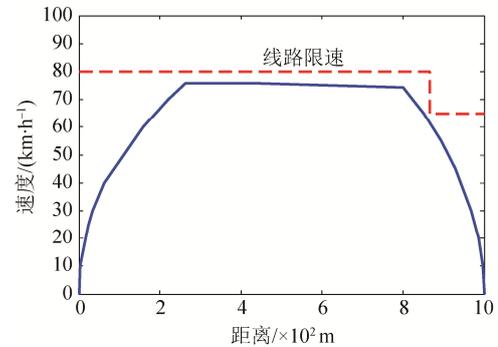


图 3 距离-速度曲线

Fig. 3 Distance-velocity curve

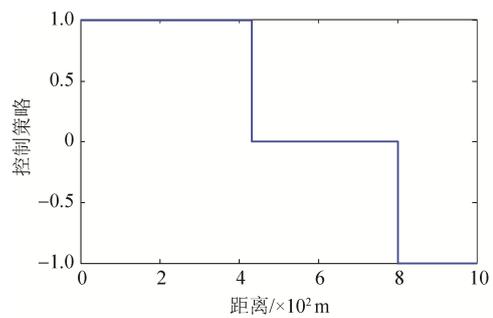


图 4 控制策略

Fig. 4 The control strategy

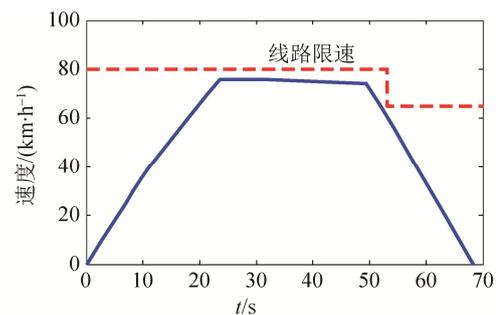


图 5 时间-速度曲线

Fig. 5 Time-velocity curve

通过对目标曲线的仿真优化, 仿真结果见表 3。

表 3 列车自动运行优化仿真结果

Tab. 3 Simulation results of automatic train operation

仿真指标	停车精度指标	能耗指标	准时性指标	停车位置
仿真数据	0.18	44.786	1.13	1 000.18

由表 3 可以看出, 列车运行时间为 68.87 s, 运行时间误差为 1.13, 小于规定的 5%。列车在优化之前, 大部分时间是以“牵引-惰性”的控制策略接近最高速度运行, 此时能耗比较大, 为 76.134 KJ, 而优化后, 能耗比较小, 此时能耗为 44.786 KJ; 列车实际运行距离为 1 000.18 m, 而规定的列车停车精度小于 ± 25 cm, 因此, 停车误差小于规定的 ± 25 cm; 列车最高运行速度为 75.89 km/h, 没有超过 80 km/h 的线路限速, 列车进站速度小于站内限速。

因此, 通过该控制策略能够使列车充分利用区间进行运行, 使用遗传算法对城轨列车运行过程优化后, 可使列车在运行过程中达到最优或者次优, 满足列车准时、精确停车、舒适和节能等要求, 能够获得满意的结果。若希望列车运行时间能够短点, 可以通过改变权重系数来实现。比如, 要使列车运行时间和能耗减小, 则需要使 w_1 增大, w_4 减小。

3.4 城轨列车速度控制器的设计

自适应模糊 PID 控制原理简单、使用方便、适用性好, 具有很强的鲁棒性, 在使用过程中把人的经验形式化、模式化, 转换为控制策略, 对非线性、滞后的被控对象具有良好的控制效果。因此, 为了验证控制器对目标曲线的跟踪效果, 本文采用自适应模糊 PID 速度控制器对已求解速度曲线进行仿真跟踪。

自适应模糊 PID 主要由 PID 调节器和模糊推理器两部分组成, 它将 PID 控制与模糊控制的优点有机的结合在了一起。在仿真运行时, 模糊推理器以偏差 e 和偏差变化率 ec 为输入, 并以 PID 控制器的三个参数比例 K_p 、积分 K_I 和微分 K_D 为输出, 通过模糊推理器实现对参数 K_p 、 K_I 、 K_D 的在线调整, 以满足不同时刻偏差 e 和偏差变化 ec 对 PID 参数自整定的要求, 从而使被控对象具有良好的动态和静态性能^[15]。其原理框图如图 6 所示。

在模糊控制器中, 为了使输入和输出的清晰量相匹配, 在模糊化之前设有“量化因子”模块, 在反

模糊化模块之后设有“比例因子”模块。一般把清晰值从物理论域上变换(映射)到模糊论域上的变换系数, 叫量化因子。这一变换在模糊控制中的作用, 是使输入信号的取值范围放大或缩小, 以适应设定的模糊论域要求。而比例因子则是指由模糊论域到物理论域的变化系数^[16]。

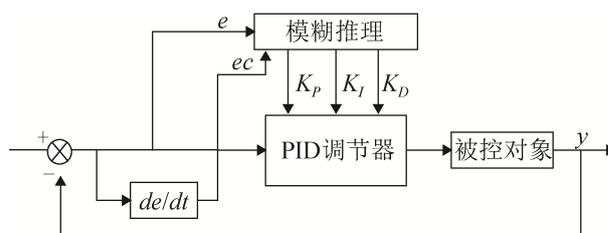


图 6 自适应模糊 PID 控制器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of self-adapting fuzzy PID controller

根据自适应模糊 PID 控制器的原理, 本文所设计的模糊控制器包括两个输入和三个输出。该控制器在工作时, 以系统误差 e 和误差变化率 ec 作为输入, 以 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 作为输出。定义 e 和 ec 在模糊集上论域的范围, 其论域范围均为 $\{-13, 13\}$, 其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$, 其中的元素分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。输出量 K_p 、 K_I 、 K_D 中, K_p 的论域范围为 $\{-0.05, 0.05\}$, K_I 和 K_D 的论域范围均为 $\{-0.002, 0.002\}$, K_p 、 K_I 和 K_D 的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。其隶属度函数均为三角形。

自适应模糊 PID 控制器的 simulink 模型如图 7 所示。

3.5 速度控制器仿真与结果分析

本文是对列车在一个区间内进出站的过程进行仿真, 该仿真是以 matlab/simulink 为平台进行的, 在进行仿真时, 列车对目标曲线跟随的好坏直接反映了算法的可行性。因此, 本文通过速度控制器对目标曲线进行跟踪仿真, 并与 PID 控制进行对比, 得到列车距离-速度曲线、时间-速度曲线以及加速度变化率的对比结果分别如图 8~10 所示。

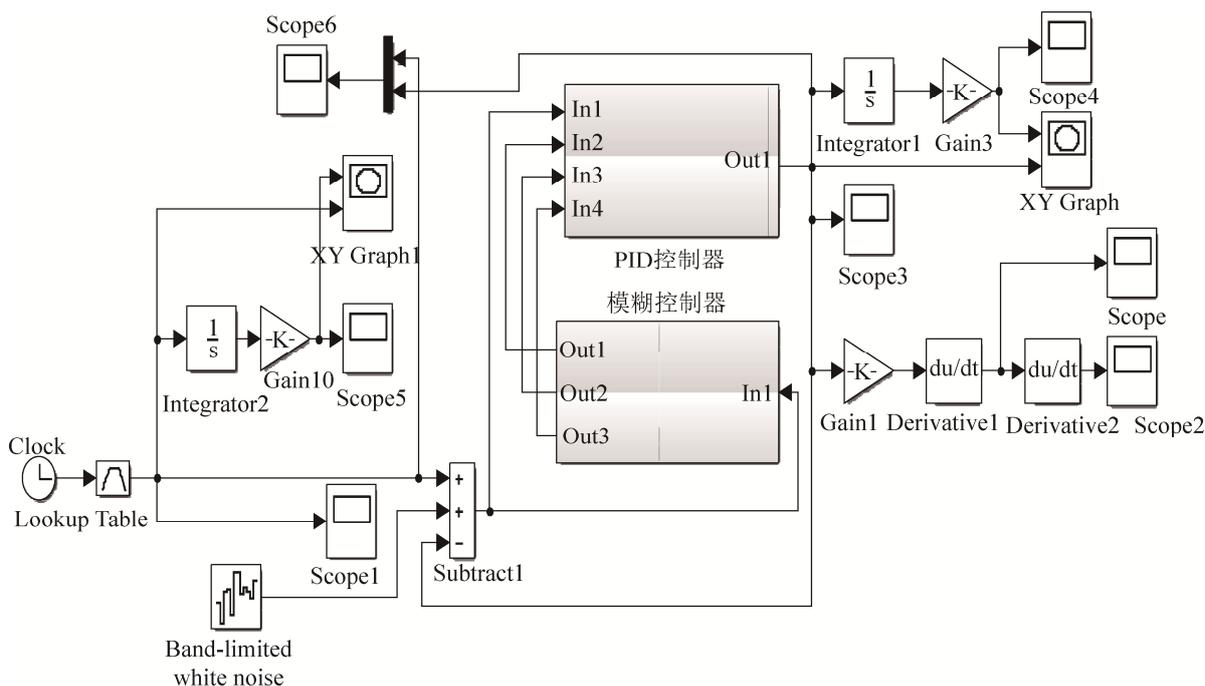


图 7 自适应模糊 PID 控制器模型
Fig. 7 Self-adapting fuzzy PID controller model

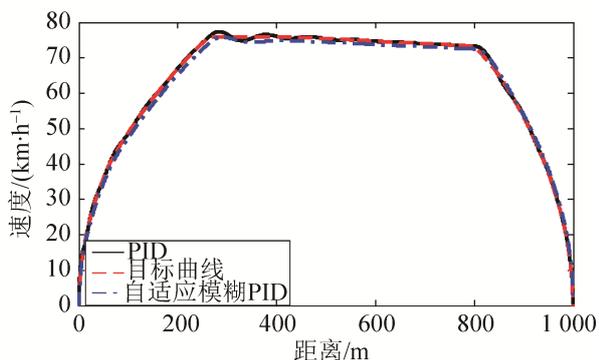


图 8 距离-速度曲线
Fig. 8 Distance-velocity curve

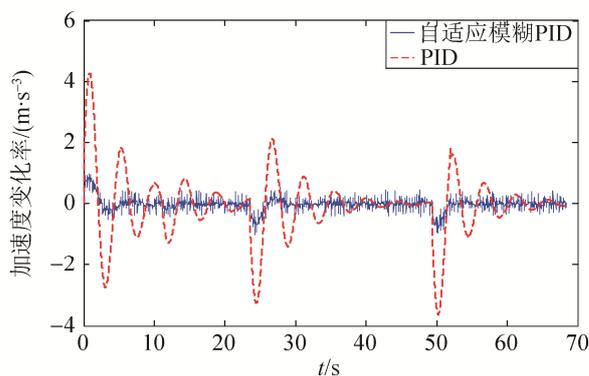


图 10 加速度变化率
Fig. 10 The change rate of acceleration

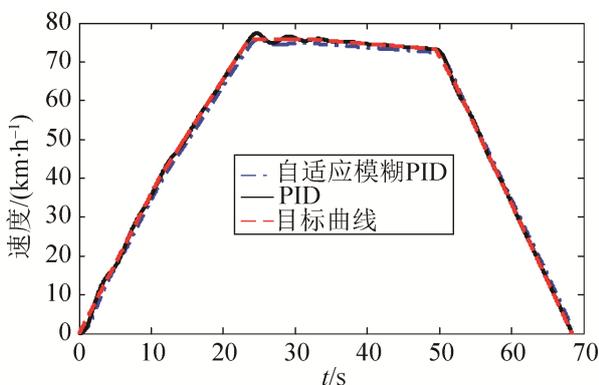


图 9 时间-速度曲线
Fig. 9 Time-velocity curve

由图 8 和图 9 可以看出, 自适应模糊 PID 控制在对列车目标曲线的跟随过程中没有出现比较大的起伏, 而且列车跟随曲线与目标曲线基本重合在一起, 说明列车对目标曲线的跟随性比较好; 而对于 PID 控制, 在对目标曲线的跟随过程中, 出现了比较明显的起伏, 说明使用 PID 控制时, 列车对目标曲线的跟随性不理想, 说明自适应模糊 PID 控制的跟随性比 PID 控制更好, 能够更好的使列车在运行过程中按照规定的时间运行和规定的位置停车, 从而保证了列车运行的准时性和安全

性；同时，从加速度变化率曲线图中可以看出，在 PID 控制中，列车运行时的加速度变化率比较大，而采用自适应模糊 PID 控制时，列车的加速度变化率相对比较小，因而说明与 PID 控制相比较，自适应模糊 PID 控制对控制参数的调整能力有了明显的提高，使系统的适应能力和鲁棒性得到了改善，更能使列车在线路上平稳行驶，确保列车运行的舒适性。

4 结论

城轨列车的运行过程是一个复杂的多目标优化问题，由多目标优化理论可知，传统的以单一指标为目标的优化模型获得的最优解只是多目标优化问题若干个弱有效解中的一个解，而采用多目标优化方法增加了求解问题的灵活性。本文通过建立城轨列车的多目标优化模型，并采用遗传算法对列车运行过程进行优化，优化后的结果表明列车的准时、精确停车、舒适和节能等多个性能要求都得到了满足。

本文在生成列车运行目标曲线的基础上，将自适应模糊 PID 控制应用于城轨列车控制系统中，对目标曲线进行跟踪，并与 PID 控制进行比较。由仿真结果可以看出，自适应模糊 PID 控制比 PID 控制可以更好的处理速度控制器跟随目标曲线的问题，使得列车平稳、安全的运行，并具有较好的鲁棒性。

参考文献：

[1] 余进, 何正友, 钱清泉. 基于微粒群算法的多目标列车运行过程优化 [J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 70-75. (Yu Jin, He Zhengyou, Qian Qingquan. Multi-objective Train Operation Optimization Based on Particle Swarm Algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (S0258-2724), 2010, 45(1): 70-75.)

[2] 陈德旺. 城轨列车智能驾驶的优化模型及算法 [M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2014: 116-117. (Chen Dewang. Optimization Models and Algorithms for Intelligent Train Operation of Urban Rail Transit [M]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University Press, 2014: 116-117.)

[3] Eugene Khmel'nitsky. On an Optimal Control Problem of Train Operation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2000, 45(7): 1257-1266.

[4] Chebbi O, Chaouachi J. An elitist multi-objective genetic algorithm for minimizing vehicle numbers and energy consumption in the context of Personal Rapid Transit [C]// Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2014 International Conference on. USA: IEEE, 2014: 270-274.

[5] Garcia-Najera A, Bullinaria J A. An improved multi-objective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with time windows [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2011, 38(1): 287-300.

[6] 石红国, 彭其渊, 郭寒英. MRT 列车运行模拟模型的多目标改进遗传算法 [J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(5): 658-662. (Shi Hongguo, Peng Qiyuan, Guo Hanying. Improved Multi-objective GA for MRT Train Operation Simulation Model [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (S0258-2724), 2006, 41(5): 658-662.)

[7] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 20-28. (Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for Calculation of Train Traction [M]. Beijing, China: China Railway Publishing House, 1999: 20-28.)

[8] 许立. 基于遗传算法的 ATO 速度曲线优化 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013. (Xu Li. Optimization of ATO Speed Curve Based on Genetic Algorithm [D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2013.)

[9] 耿晨歌, 赵睿昕. 基于遗传算法的地铁列车自动驾驶控制算法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 37(6): 1193-1197. (Geng Chengge, Zhao Ruixin. Research on the GA-based ATO Control Algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology (S2095-3844), 2013, 37(6): 1193-1197.)

[10] 李瑞敏, 陆化普. 基于遗传算法的交通信号控制多目标优化 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(3): 85-88. (Li Ruimin, Lu Huapu. Traffic signal control multi-object optimization based on genetic algorithm [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition) (S1671-8879), 2009, 29(3): 85-88.)

[11] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 3-10. (Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu. MATLAB genetic algorithm toolbox and Application [M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2014: 3-10.)

(下转第 594 页)

<http://www.china-simulation.com>