

文章编号:1671-1637(2014)01-0112-07

基于安全车距实时标定的列车间隔动态控制

潘 登, 郑应平

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:分析了列车间隔与其跟驰行为的关系,利用 Petri 网形式化建模工具描述了当高速列车跟驰稳态被破坏时,列车间隔的动态控制。面向 CTCS-4 级列车运行控制系统,运用数值分析方法建立了全速域范围内最小安全车距随后车当前速度变化的拟合函数,并运用该拟合函数进行列车跟驰行为质量评估,进而构建了基于跟驰行为评估的列车间隔动态控制模型,并对该模型进行了仿真验证。仿真结果表明:列车跟驰系统从速度为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、列车间隔为 $5\,849.18 \text{ m}$ 的安全、高效跟驰稳态运行到速度为 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的跟驰稳态期间,列车间隔的动态控制能够通过后车的行为调整得到实现,且当速度为 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的跟驰稳态实现时,列车间隔仅比安全车距大 358.00 m ,说明新的安全、高效跟驰稳态已经建立;当前车紧急停车时,后车在控制律的作用下采取因应措施,安全、高效、平稳地减速运行,直至完全停车。仿真结果验证了控制方法的有效性和可行性,能够实现列车安全、高效跟驰运行。

关键词:列车间隔控制;安全车距;列车行为调整;跟驰稳态;形式化描述;拟合函数

中图分类号:U260.138 **文献标志码:**A

Dynamic control of train interval based on real-time calibration of safe headway

PAN Deng, ZHENG Ying-ping

(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The relationship between train interval and its following behavior was analyzed. When the steady-following state of high-speed train was broken, the dynamic control of train interval was described by using the formal modeling tool of Petri nets. For the CTCS-4 level train control system, a fitting function of the minimum safe headway changing with the current velocity of following train within the full-range velocity field was constructed by using numerical analysis method, and the constructed fitting function was used for the behavioral quality evaluation of following train. The dynamic control model of train interval was established based on the evaluation of train following behavior, and the model was simulated and verified. Simulation result indicates that during the period of train following system operating from a safe and efficient steady-following state with a velocity of $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and a train interval of $5\,849.18 \text{ m}$ to another steady-following state with a velocity of $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the dynamic control of train interval is accomplished well by the behavioral adjustment of following train, and the train interval is only 358.00 m longer than the safe headway when a new steady-following state is realized at the velocity of $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, which means that a new safe and efficient steady-

收稿日期:2013-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(61174183)

作者简介:潘 登(1969-),男,安徽怀远人,同济大学讲师,工学博士,从事高速列车运行控制研究。

following state is established. When the preceding train stops abruptly in emergency, under the action of control law, the following train takes a corresponding measure to reduce its own velocity for movement in safety, efficiency and smoothness until it stops completely. The simulation results verify the effectiveness and feasibility of control method for safe and efficient train following operation. 1 tab, 6 figs, 17 refs.

Key words: train interval control; safe headway; train behavior adjustment; steady-following state; formal description; fitting function

Author resume: PAN Deng(1969-), male, lecturer, PhD, +86-21-69589241, pandengreal@sina.com.

0 引言

高速列车跟驰运行控制的重点在于通过行为调整实现列车间隔的动态控制,达到安全、高效的行车目的。高速列车追踪运行过程中会根据路况、前车运行状态以及相关动态信息或列车运行控制命令进行自身行为的调整,不同跟驰速度条件下列车的制动距离不同,相应的安全车距,即列车间隔标准也会发生变化。如何根据这种动态变化,以安全、高效行车为目标,调整列车追踪运行的具体行为,从而达到间隔动态优化的目的,无疑将有助于提高列车运行控制的质量,并深入挖掘线路的运输潜能,进一步提升铁路的运输效率。

当前铁路领域非常重视列车跟驰运行及其控制的研究,但主要基于固定闭塞系统和准移动闭塞系统,世界范围内还鲜有移动闭塞系统应用于铁路的报道,列车间隔的动态控制研究还相对较少,其中不少研究是针对城市轨道交通。Fu 等运用元胞自动机对列车跟驰运行进行建模、仿真,来寻求列车追踪运行的规律性^[1];潘登等对列车间隔计算进行了深入的讨论,给出了可行的计算方法^[2-3];上官伟等给出了速度为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上高速列车制动模式曲线的计算方法^[4];路飞等针对地铁列车追踪运行给出了紧急制动情况下的速度-距离曲线,进而探讨了如何在移动闭塞系统下降低列车追踪最小允许间隔等问题^[5]。跟驰运行过程中,前后列车的速度与距离一般发生着动态的变化,不可能永远按照恒定的列车间隔运行,也不可能一成不变地遵循某一速度条件下的一次连续制动曲线,必须审时度势,随时根据状况对自身行为进行调整,使得列车行为与列车间隔的变化趋于科学,从而实现列车的安全、高效运行。相比较而言,公路交通领域研究车辆跟驰运行控制的历史更为悠久,涌现出 GM(General Motors)跟驰模型^[6]、安全距离模型^[7-8]、优化速度模型(Optimal

Velocity Model, OVM)^[9]等。在此基础上,Zhao 等提出了基于全速差和全加速度差的跟驰模型^[10],在消除前车与后车之间的速度差和加速度差方面取得较好效果,为后续研究开启了一个新的途径,但未对跟驰效率作更深入的探讨;Peng 等引入相关系数建立了一种新的最优速度差(Optimal Velocity Difference, OVD)模型^[11],对建立车辆跟驰稳态有较大帮助,但安全、高效跟驰稳态与跟驰稳态不同,前者不仅要求前车与后车的速度差为 0,而且强调安全车距对实际车距的约束作用,此外相关系数的动态确定缺乏可行、有效的一般性解决办法。上述方法为铁路高速列车追踪运行控制的研究提供了值得借鉴的思路。由于铁路部门对安全行车高度重视,同时运能长期紧张的局面也决定了研究与运输生产绝不能忽视行车效率问题,故本文围绕“列车安全、高效跟驰运行”这一目的,首先对高速列车跟驰运行过程中全速域范围内的动态安全车距进行实时标定,并实时评估高速列车跟驰行为质量,然后将评估结果作为列车行为调整的依据,进而探讨安全、高效跟驰稳态条件下列车行为调整时列车间隔的动态控制问题,以期对未来 CTCS-4 级列车运行控制系统的研究进行有益的探索和尝试。

1 安全车距与计算

1.1 安全车距的定义

安全车距即安全跟驰车距,又称列车间隔标准,定义为正常情况下为保证列车安全、高效跟驰运行的标准车距,是高速列车跟驰运行过程中行为调整的重要依据,并随着跟驰形势的变化而变化。

1.2 安全车距的计算

安全车距的计算分绝对制动(Absolute Braking)与相对制动(Relative Braking)2 种方式^[12]。绝对制动方式参考前车当前车尾位置,计算后车在正常或紧急情况下应该采取的目标距离-速度连续制动

曲线,根据该曲线计算高速列车安全、高效跟驰运行的列车间隔。相对制动方式则还需要考虑前车的运行速度和控制策略,目标距离-速度连续制动曲线和列车间隔的计算相比较而言更为复杂。图 1 描述了标准列车间隔时间 T 和列车间隔标准 S 的计算方法。标准列车间隔时间 T 一般用于指导高速铁路的行车组织,表示为

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (1)$$

式中: T_1 为列车无线闭塞中心(Radio Block Center, RBC)注册时限^[7-8],为 40 s; T_2 为通信折算时间^[13],为 12 s; T_3 为列车制动停车时间; T_4 为间距计算与控制误差时间; T_5 为列车运行自身车长距离 S_5 的时间, S_5 取典型值 400 m。

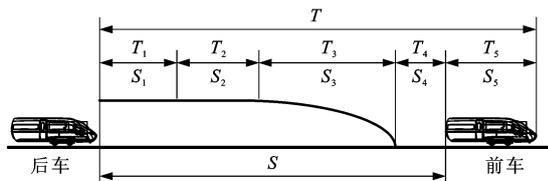


图 1 高速列车跟驰运行间隔

Fig. 1 Following operation interval of high-speed train

列车间隔标准 S 为列车运行控制的重要基础数据之一,表示为

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (2)$$

式中: S_1 为列车 RBC 注册时限内运行距离; S_2 为通信折算时间内列车行驶距离; S_3 为列车制动距离,与列车性能、当前运行速度及列车运行控制策略存在密切关系; S_4 为间距计算与控制误差距离,取 200 m。

列车运行速度越大,制动距离越远,因此,基于安全考虑,其遵循的列车间隔标准 S 也相应越大,而前车与后车之间的实际间距 s 比 S 略大才会更安全,同时也为行车组织在干扰情况下恢复按图运行提供时空裕量。

2 列车间隔的动态控制

对于列车间隔控制来说,安全性的提高必然伴随着行车效率的下降。制定安全车距的基本原则和目标是作为规范列车跟驰运行的基础数据之一,确保列车在安全行车前提下尽可能地提高行车效率。安全车距往往随着前后列车的行为变化而变化,兼顾安全性和线路运能的充分利用 2 个方面,实际跟驰车距,简称实际车距,应以动态安全车距为依据,不宜过小,也不宜过大。本文将安全、高效跟驰稳态作为初始跟驰状态,进而研究列车间隔的动态控制问题。

2.1 列车间隔与列车行为的关系

从列车运用、维护和旅客、货物对列车的行为期望来说,高速列车不宜频繁加速或减速,行为调整也不可能永远持续下去,故高速列车追踪运行通常情况下宜保持合理的间隔匀速追踪运行。高速列车追踪运行过程中的行为调整,可以视作干扰情况下动态恢复合理间隔匀速追踪运行的一种行为控制举措。

由于不同跟驰形势(由速度、实际车距等要素确定)的追踪运行,其安全车距有所不同,其行为调整也异常复杂:一方面它不同于经典控制理论中的跟踪控制,因为从速度较低的跟驰状态过渡到速度较高的跟驰状态,由于列车制动距离随速度的增加而增大,从安全角度考虑,行为调整须以前后列车更加疏远为目的,似乎与跟踪控制背道而驰;另一方面,它与军事对抗领域微分对策研究的追逃理论也有所不同,除了前述的疏远现象不能反映追者捕获逃者的行为之外,当从速度较高的跟驰状态过渡到速度较低的跟驰状态,由于该速度下列车制动距离的减小,从提高跟驰效率出发,前后列车需要更靠近,似乎又与逃者的行为不相吻合。

图 2 运用 Petri 网描述了列车间隔与列车行为的关系,其中 v_1 、 v_2 分别为前车与后车的速度,变迁 1、2 分别为触发列车进入暂态 1、2 的 2 个事件。跟驰运行过程中后车的启动加速阶段为暂态 1,此时后车的速度不大于前车的速度,即 $v_2 \leq v_1$,跟驰车距不小于安全车距,即 $s \geq S$ 。后车行为调整结束即进入稳定的匀速跟驰运行状态。在后车跟随前车归于静止状态的过程中,一般前车先行减速导致列车间隔变小,故 $v_2 \geq v_1, s \leq S$ 。假设高速列车正处于稳定的跟驰运行状态,令其为跟驰运行稳态 1,则不论前车与后车行为怎样调整,新的跟驰状态均可归结为暂态 1 和暂态 2 两种情况之一,暂态 1 时,安全性提高而跟驰效率降低,暂态 2 时,安全性降低而跟驰效率提高。就行车组织和列车运行控制而言,无论

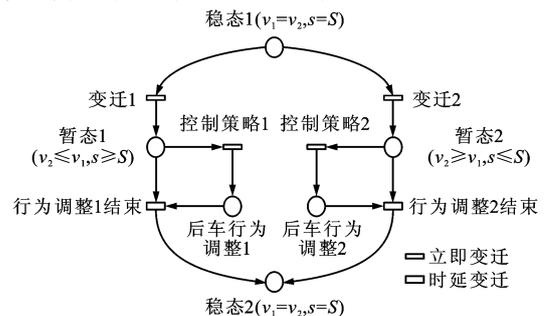


图 2 高速列车跟驰车距的动态控制

Fig. 2 Dynamic control of high-speed train following distance

前车行为发生怎样相对的变化,后车必须基于安全第一的原则,在自身当前速度条件下,保证与前车的实际间距 s 始终不小于 S ,显然,这是一个复杂的动态行为调整过程。

2.2 安全车距的动态标定

为不影响研究思想的表达,同时不失一般性,本文以紧急情况下采取绝对制动方式确定车距标准。后车在不同速度条件下的紧急制动距离限值与允许的最小安全车距 S_{\min} 见表 1。

表 1 紧急制动距离限值和最小安全车距
Tab. 1 Limits of emergency braking distances and minimum safety headways

制动初速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	紧急制动距离限值/m	最小安全车距/m
0.000 0	0	0.00
30.555 6	800	2 438.89
33.333 3	800	2 583.33
38.888 9	1 100	3 172.22
44.444 4	1 400	3 761.11
50.000 0	1 800	4 450.00
55.555 6	2 000	4 938.89
69.444 4	3 150	6 811.11
83.333 3	3 700	8 083.33
97.222 2	6 500	11 605.56
105.555 6	8 500	14 038.89

表 1 所示移动闭塞系统不同速度条件下列车之间应保持的列车最小安全车距 S_{\min} ,是根据紧急制动距离限值^[14-16]和式(2)计算得到的。进一步可得 S_{\min} 与后车速度 v_2 的拟合函数为

$$S_{\min} = 0.810\ 26v_2^2 + 48.722\ 08v_2 + 281.595\ 58 \quad (3)$$

图 3 为列车最小安全车距 S_{\min} 随后车速度 v_2 变化的拟合曲线。由于 S_{\min} 为后车采取紧急制动时应与前车保持的最小安全车距,高速列车稳态跟驰运行的安全车距 S 必须不小于 S_{\min} 。假设安全车距为

$$S = kS_{\min} \quad (4)$$

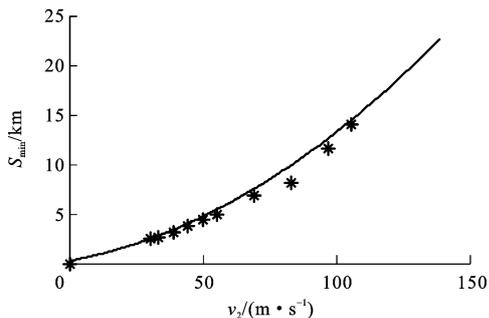


图 3 S_{\min} 与 v_2 关系拟合曲线
Fig. 3 Fitting curve of relationship between S_{\min} and v_2

式中: k 为计算系数, $k \geq 1$ 。

列车追踪运行控制遵循安全第一的原则,后车的行为调整必须保证自身当前速度条件下与前车保持合理的间隔安全运行,即满足 $s \geq S$ 。

2.3 列车追踪运行控制模型

利用式(3)确定的拟合函数,讨论列车追踪运行的控制问题。高速列车追踪运行控制结构见图 4。图 4 中: a_1, a_2 分别为前车与后车的加速度; F_1, F_2 分别为前车与后车的牵引合力; m_1, m_2 分别为前车与后车的牵引质量; v_{10}, v_{20} 分别为前车与后车的初始速度; s_{10}, s_{20} 分别为前车与后车变速运行前的初始位置; s_1, s_2 分别为前车与后车当前位置。

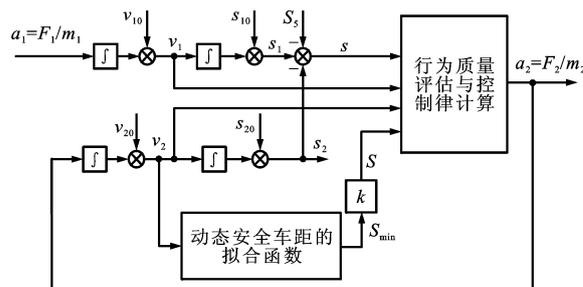


图 4 高速列车跟驰运行控制

Fig. 4 Following operation control of high-speed train

由图 4 可以看出,无论前车还是后车,其行为调整都必须通过单位合力(即加速度)来实现,而且后车的行为调整充分体现了跟驰的特点,即无论前车的运行状态是否变化,即使后车根据路况及其动态信息或列控命令主动进行的行为调整,也必须依据前车与后车当前的运行状态以及前后列车之间的车距,以安全、高效行车为目的,进行自身行为的调整。

2.4 控制策略

控制策略的实施步骤如下。

Step 1:列车间距检测,判断后车在当前速度 v_2 条件下与前车的间距是否满足安全性需求, $s > S$ 时转 Step 2, $s = S$ 时转 Step 3, $s < S$ 时转 Step 4。

Step 2:此时 $s > S$,说明稳态跟驰运行发生了变化。后车加速运行,以缩短车距,从而更充分地利用线路运能。行为调整的初速度为后车的当前速度 v_2 ,末速度为前车的当前速度 v_1 ;行为调整过程中持续对跟驰运行的安全性和高效性进行检测,转 Step 1,根据当前速度,对车距的动态安全性作出判断。

Step 3:此时 $s = S$,则后车不作行为调整,转 Step 1。

Step 4:此时 $s < S$,后车以当前速度 v_2 立即减速停车,并且以当前列车实际车距 s 为当前时刻至

停车时的行驶距离;减速停车过程中持续对跟驰运行的安全性进行检测,即转 Step 1,根据自身当前速度,判断车距是否满足安全性需求,根据新的情况进行行为调整。

2.5 列车行为调整的控制律

列车最小安全车距 S_{\min} 的时间导数可以表示为

$$\frac{dS_{\min}}{dt} = \frac{dS_{\min} dv_2}{dv_2 dt} = \frac{a_2 dS_{\min}}{dv_2} \quad (5)$$

式中: t 为列车运行时间。

列车车距 S 与实际车距 s 应以 S_{\min} 为确定依据,满足式(6)才符合安全性要求

$$S_{\min} \leq S \leq s \quad (6)$$

$$s = s_1 - s_2 - S_5$$

另一方面,由于后车以自身当前速度 v_2 为初速度,前车的当前速度 v_1 为末速度,加速或减速运行, dt 时间内式(7)成立

$$-|v_1 - v_2| \leq \frac{dS_{\min}}{dt} \leq |v_1 - v_2| \quad (7)$$

联立式(5)、(7),可得

$$-\frac{|v_1 - v_2|}{dS_{\min}/dv_2} \leq a_2 \leq \frac{|v_1 - v_2|}{dS_{\min}/dv_2} \quad (8)$$

考虑到行为调整的快速性,取 a_2 为

$$a_2 = \frac{v_1 - v_2}{dS_{\min}/dv_2} \quad (9)$$

式(9)即为后车行为调整的控制律,见图4。因为加速度亦称为单位合力,后车根据自身牵引重量、运行阻力等因素,即可计算得到相应的牵引力,从而达到调整自身行为的目的。显然, $v_1 > v_2$ 时,后车跟随前车加速运行; $v_1 = v_2$ 时,后车跟随前车匀速运行; $v_1 < v_2$ 时,后车跟随前车减速运行。可见,式(9)对列车恢复稳态追踪运行具有一般的适应性。

3 仿真结果分析

假设前后车以速度 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 5849.18 m 的列车间隔匀速跟驰运行,前车首先加速运行,加速度为 $0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,至速度为 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,前车匀速运行 180 s ,然后,以加速度为 $-1.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 减速运行至停车。初始时刻的稳态跟驰情况见图5。

前车的行为描述见图6(a)中的虚线所示。图6(a)中的实线和图6(b)~(e)则描述了运用新的速度差控制方法后,后车的行为调整与列车间隔控制情况,其中取 k 为1。图6(a)、(b)、(c)描述了具有跟驰关系的前车与后车的行为调整过程,以及行为调整过程中的列车间隔变化情况;图6(d)描述了后车行为

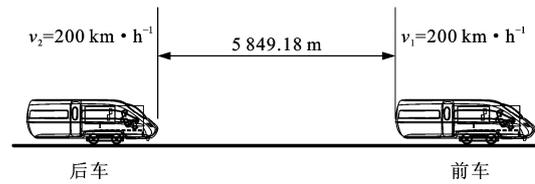


图5 初始时刻的跟驰稳态

Fig. 5 Steady-following state at initial time

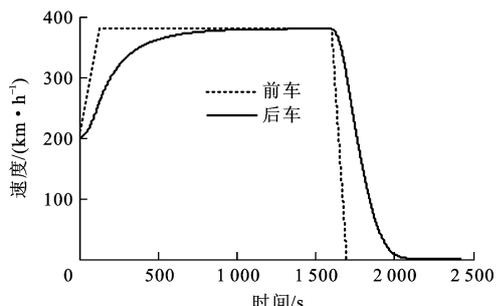
调整的控制律时变特性;图6(e)为后车行为调整过程中的冲动值,即加速度的时变导数,它与加速度共同作为行为调整平稳(舒适)性的评价指标,根据机械振动与冲击评价国际化标准 ISO2631 和文献[17]可知,后车行为调整符合平稳性需求,即加速度绝对值小于 $0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,冲动值小于 $2.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$ 。

列车跟驰系统在实施控制作用下的行为过程描述如下:前车在初始时刻加速运行,打破了原有的安全跟驰稳态,后车根据新的速度差控制方法调整自身行为,直至 1300 s 时形成新的跟驰稳态,即前后列车重新以相同的速度 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (图6(a))和固定间隔 $1.4803 \times 10^4 \text{ m}$ 继续运行,此时安全间隔为 $1.4445 \times 10^4 \text{ m}$ (图6(b)),二者之差仅为 358.00 m (图6(c))。当前车紧急制动停车时,后车同样需要作适应性行为调整。从图6可以看出,整个停车过程中,安全车距始终略大于实际车距,且后车减速较前车缓慢,当前后车均停止后,实际车距为 628.40 m ,仅比安全车距 281.60 m 大 346.80 m 。

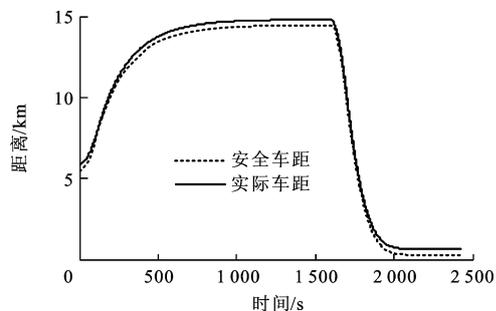
从图6(a)、(b)可以看出,前车行为变化过程中后车在速度上做出的适应性变化和为调整对实际车距、安全车距的影响情况的全貌。图6(b)、(c)对实际车距与安全车距进行比较分析,可以评估列车跟驰行为的安全性和效率,即评价后车在跟驰运行过程中是否具有通过自身行为调整实现实际车距对动态安全车距实时跟踪的能力。结合图6(a)、(d)可以看出,当跟驰稳态形成或前后车均归于静止状态时,前车速度逐渐趋近于后车速度,加速度逐渐趋于0,且实际车距逐渐趋于稳定并略大于安全车距,较好地实现了速度、加速度及实际车距的同步控制。在列车行为调整过程中还存在变速运行的平稳(舒适)性问题,从图6(d)所示的后车加速度-时间曲线和图6(e)所示的后车冲动值-时间曲线可以看出,这个问题也得到了较好的解决。可以说,在后车行为调整的全过程中,其安全性、高效性和平稳(舒适)性得到了较好的兼顾。

4 结 语

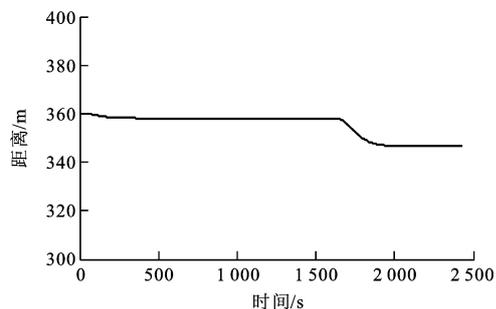
高速列车追踪运行过程中的行为调整,属于复



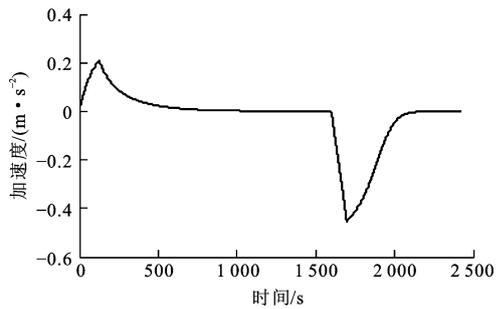
(a) 列车的速度-时间曲线



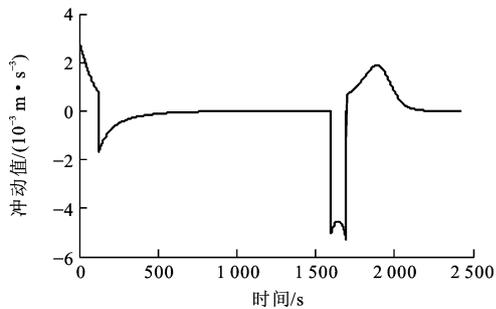
(b) 安全车距与实际车距的时变特性曲线



(c) 安全车距与实际车距差值的时变特性曲线



(d) 后车的加速度-时间曲线



(e) 后车的冲动值-时间曲线

图 6 后车的行为调整与列车间隔控制

Fig. 6 Behavior adjustment of following train and train interval control

杂系统非线性控制问题。本文对高速列车追踪运行控制进行了初步的探索和尝试,提出了初始安全、高效跟驰稳态条件下基于安全跟驰车距动态标定的列车间隔动态控制方法。文中最小列车间隔的拟合函数是基于绝对制动模式,根据文献[14-16]给出的紧急制动距离限值经过数值分析计算而得。在相对制动模式下,列车制动距离还与前车的性能、运行速度及所采取控制策略(可用单位合力,即加速度来描述)等因素密切相关,不同的速度或不同的控制策略,列车的制动距离和跟驰运行应保持的间距标准也有所不同。特别是基于 CBTC 列控技术的移动闭塞系统,车-车之间可以进行包括列车性能参数、列车运行状态和控制策略在内的信息交流,建立相应的策略库,加强不同策略下追踪运行控制的研究,对进一步提高安全行车条件下的列车跟驰效率或增强列车行为调整的平稳(舒适)性大有助益。建议行业部门和相关协会根据列车性能,优先确定不同速度条件下列车采取不同制动策略的制动距离(不仅仅紧急制动距离),不仅为学术界更全面、深入研究高速列车追踪运行控制问题创造更好的条件,更有助于规范和引领机车、车辆行业的发展。

参考文献:

References:

[1] FU Yin-ping, GAO Zi-you, LI Ke-ping. Modeling study for tracking operation of subway trains based on cellular automata[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(4): 89-95.

[2] 潘 登,郑应平. 铁路移动闭塞系统列车追踪运行的安全间隔[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(9):1220-1225. PAN Deng, ZHENG Ying-ping. Safe following operation distance between two trains under railway moving automatic block system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(9): 1220-1225. (in Chinese)

[3] 陈荣武,诸昌铃,刘 莉. CBTC 系统列车追踪间隔计算及优化[J]. 西南交通大学学报,2011,46(4):579-585. CHEN Rong-wu, ZHU Chang-qian, LIU Li. Calculation and optimization of train headway in CBTC system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(4): 579-585. (in Chinese)

[4] 上官伟,蔡伯根,王晶晶,等. 时速 250 km 以上高速列车制动模式曲线算法[J]. 交通运输工程学报,2011,11(3):41-46,54. SHANGGUAN Wei, CAI Bai-gen, WANG Jing-jing, et al. Braking mode curve arithmetic of high-speed train above 250 km · h⁻¹[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 41-46, 54. (in Chinese)

[5] 路 飞,宋沐民,李晓磊. 基于移动闭塞原理的地铁列车追踪运行控制研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(8):1944-1947,1950.

- LU Fei, SONG Mu-min, LI Xiao-lei. Research on subway train following control system under moving block system[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(8): 1944-1947, 1950. (in Chinese)
- [6] CHANDLER R E, HERMAN R, MONTROLL E W. Traffic dynamics; studies in car following[J]. Operations Research, 1958, 6(2): 165-184.
- [7] KOMETANI E, SASAKI T. Dynamic behaviour of traffic with a non-linear spacing-speed relationship[C]//Elsevier. Proceedings of the Theory of Traffic Flow. New York: Elsevier, 1959: 105-119.
- [8] GIPPS P G. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [9] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation [J]. Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(2): 1035-1042.
- [10] ZHAO Xiao-mei, GAO Zi-you. A new car-following model: full velocity and acceleration difference model[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2005, 47(1): 145-150.
- [11] PENG Guang-han, CAI Xin-hua, LIU Chang-qing, et al. Optimal velocity difference model for a car-following theory[J]. Physics Letter A, 2011, 375(45): 3973-3977.
- [12] 谢肇桐. 移动闭塞系统[J]. 铁道通信信号, 1996, 32(2): 35-36.
- XIE Zhao-tong. Moving block system[J]. Railway Signalling and Communication, 1996, 32(2): 35-36. (in Chinese)
- [13] ZIMMERMANN A, HOMMEL G. A train control system case study in model-based real time system design[C]//IEEE. Proceedings of the 17th International Symposium on Parallel and Distributed Processing. Nice: IEEE, 2003: 118-130.
- [14] 张建柏, 彭辉水, 倪大成, 等. 高速列车制动技术综述[J]. 机电传动, 2011(4): 1-4.
- ZHANG Jian-bai, PENG Hui-shui, NI Da-cheng, et al. Overviewing braking technology of the high-speed trains[J]. Electric Drive for Locomotives, 2011(4): 1-4. (in Chinese)
- [15] 黄问盈, 杨宁清, 黄 民. 我国铁道列车紧急制动距离限值标准的探讨[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(5): 84-90.
- HUANG Wen-ying, YANG Ning-qing, HUANG Min. Standard of railway train emergency braking distance limit in China[J]. China Railway Science, 2003, 24(5): 84-90. (in Chinese)
- [16] 黄问盈, 张中央. 铁道列车制动限速[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 91-95.
- HUANG Wen-ying, ZHANG Zhong-yang. Speed limits of railway train braking[J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 91-95. (in Chinese)
- [17] MARTINEZ J J, CANUDAS-DE-WIT C. A safe longitudinal control for adaptive cruise control and stop-and-go scenarios[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(2): 246-258.

《中国公路学报》2014 年征订通知

《中国公路学报》是由中国公路学会主办, 长安大学承办的权威性学术刊物, 自 2007 年起被 Ei 核心库收录, 是中国公路交通行业唯一入选 Ei 核心库的期刊; 主要刊载道路工程、桥梁与隧道工程、交通工程、汽车与汽车运用工程、工程机械、物流、经济与管理等领域的学术论文及应用技术论文, 并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等; 主要读者对象为公路交通领域的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。

为了缩短论文发表时滞, 使公路交通行业创新性学术成果更多、更快地得以发表, 自 2014 年起, 《中国公路学报》已由双月刊变更为月刊, 页码由原每期 192 页变更为 128 页, 每期定价 30.00 元, 全年共 360.00 元, 国内邮发代号: 52-194, 国外发行代号: M7917。欢迎订阅!

《中国公路学报》网络在线投稿/审稿系统已正式开通, 欢迎广大读者踊跃投稿!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学杂志社

邮 编: 710064

联系人: 马 勇

电 话: (029) 82334387

网 址: <http://zgglxb.chd.edu.cn>

邮 箱: zgglxb@chd.edu.cn