

基于 Wiedemann 模型的有轨电车运行过程仿真

唐 婕

(西南交通大学信息科学与技术学院, 611756, 成都//助教)

摘 要 以 Wiedemann 模型为基础, 提出并建立了一种基于生理-心理类模型的有轨电车运行仿真模型, 并对模型进行校正和实际验证。该模型主要针对现代有轨电车司机驾驶行为和有轨电车牵引制动特性进行研究和分析。实际验证结果表明, 该模型能有效地模拟有轨电车的运行过程。

关键词 有轨电车; 运行仿真; Wiedemann 模型

中图分类号 U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.030

Simulation of Tram Operation Process Based on Wiedemann Model

TANG Jie

Abstract On the basis of Wiedemann model, a tram operation simulation model is proposed and built based on physiological-psychological type model, and the model is corrected and practically verified. The model mainly focuses on the research and analysis of the driving behavior of modern tram drivers and the traction and braking characteristics of trams. Practical verification results show that the model can effectively simulate the operation process of trams.

Key words tram; operation simulation; Wiedemann model

Author's address Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

有轨电车在线路建设之初, 需要通过仿真有轨电车运行情况来计算其正线通过能力、折返能力及出入库能力。我国现代有轨电车主要采用司机目视瞭望和司机手动操作的方式控制电车运行。为有效模拟现代有轨电车的实际运行过程, 本文基于 Wiedemann 模型, 根据有轨电车驾驶员的生理反应和心理反应分析其驾驶行为, 以此来仿真有轨电车的运行过程。

1 有轨电车运行仿真模型的类型

社会车辆运行模型主要有跟驰模型和换道模型。有轨电车具有轨道交通的特性, 无法在运行过程中换道超车, 而其追踪模式与社会车辆相似, 因此有轨电车运行模型只考虑其跟驰特性。

1.1 社会车辆跟驰模型

社会车辆跟驰模型主要用于模拟分析驾驶员在受外界因素影响时控制车辆运行的微观行驶数据。其主要分为: 刺激-反应类模型、安全距离模型、人工智能模型和生理-心理类模型。

1.2 有轨电车运行仿真模型的选用

有轨电车在实际运营过程中出现跟驰的情况较少, 大多为追踪前方信号机或站台等固定停车点的情况。因此, 有轨电车不适用研究拥堵情况的刺激-反应类模型和安全距离类模型。

生理-心理类模型更贴近实际的驾驶员控车过程, 也更能描述日常生活中所见的司机驾驶行为。故本文在典型生理-心理类模型——Wiedemann 模型的基础上研究并建立有轨电车运行仿真模型。

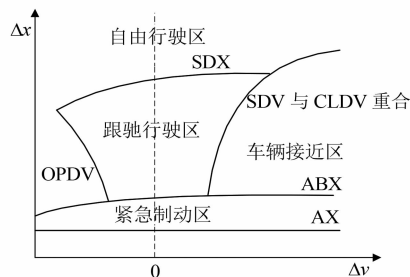
2 有轨电车运行仿真模型建立

2.1 Wiedemann 模型

Wiedemann 模型根据前后跟驰车辆的相对速度和相对距离的不同, 将车辆运行状态划分为紧急制动区、跟驰行驶区、车辆接近区及自由行驶区^[4]。

2.2 有轨电车运行仿真模型建立

当驾驶员在控制有轨电车追踪前行有轨电车时, 有轨电车运行仿真模型按 Wiedemann 模型也分为 4 个驾驶员感知区域: 紧急制动区、跟驰行驶区、车辆接近区和自由行驶区, 如图 1 所示。图 1 中,



注: Δv 为有轨电车驾驶员感知本车与前车的速度差, Δx 为有轨电车驾驶员感知本车与前车的距离感。

图 1 有轨电车运行状态感知区域划分

Fig. 1 Division of tram operation status perception domain

AX 为水平直线,表示列车在静止时所期望的停车间隔距离;ABX 曲线为列车在低速运行时的最小期望跟车运行距离曲线;SDX 曲线为最大跟车运行距离曲线;SDV 曲线为驾驶员意识到正在接近一辆低速运行列车的临界曲线;CLDV 曲线则表示当跟车运行距离较小,驾驶员意识到车间距在减少时的临界曲线,默认 CLDV 与 SDV 曲线重叠;OPDV 曲线表示驾驶员注意到前后车之间的距离随时间而增加的临界曲线^[5]。

当有轨电车的运行前方为路口信号机、道岔信号机和车站等固定限制点时,有轨电车驾驶员等效于追踪一列速度为 0 且长度为 0 的列车,此时有轨电车驾驶员模型主要划分紧急制动区、列车接近区及自由行驶区,如图 2 所示。此时 SDX、ABX 及 AX 曲线重合。

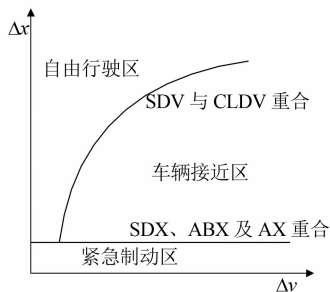


图 2 追踪前方为红灯或车站时模型感知域划分

Fig. 2 Model perception domain division when tracking a red light or a station ahead

当有轨电车处于不同的行驶感知区域时,其运行状态不同。由于有轨电车牵引制动特性与社会车辆有所区别,因此在不同感知区域中,需要结合牵引制动特性、驾驶员反应、冒进情况及物理动力学特性等为不同区域的子计算模型进行建模。

2.2.1 自由行驶区

当有轨电车处于在自由行驶状态区时,司机感知目视前方没有限制点或离限制点距离较远,可根据区间限速、列车的牵引-制动特性和舒适度等约束条件来控制电车运行。自由行驶区子模型计算步骤如下:

步骤一:在线路限速条件下,根据司机冒险程度,司机控制有轨电车追踪期望最大运行速度。不同类别司机的冒险程度不同。根据线路限速和当前速度来计算列车最大运行加速度,以便列车运行至司机期望的最大速度,有轨电车在自由行驶区的最大加速度为:

$$a_{\text{Max}_t} = (\alpha v_{\text{PSR}} - v) \quad (1)$$

式中:

a_{Max_t} ——列车运行时间为 t 后的列车允许最大加速度;

α ——司机冒险系数,是指司机能追踪线路限速的最大比值,即司机期望的最大速度与线路限速的比值(α 取值越大表示司机越冒进);

v_{PSR} ——列车所在区段的限制速度;

v ——当前列车速度。

步骤二:根据下一区段的限速条件和当前行驶速度计算提前减速区。当下一区段的线路限速小于当前区段的限速,且下一区段限速的起始位置与列车当前位置的距离差小于提前减速距离时,司机有必要提前减速,以避免因减速不及时导致的有轨电车超速情况。故需计算提前减速后的最大加速度。将式(1)中的 v_{PSR} 替换成下一区段的列车限速 $v_{\text{next_PSR}}$,则提前减速距离 S 为:

$$S = \frac{(\alpha v_{\text{next_PSR}})^2 - v^2}{2a_{\text{default}}} \quad (2)$$

式中:

a_{default} ——默认减速度。

步骤三:考虑有轨电车运行的牵引特性和制动特性。该特性限制有轨电车在 v 下能达到的最大加速度或最小减速度,列车运行过程中最大加速度应控制在列车牵引-制动特性曲线范围内。

步骤四:考虑舒适度约束条件,要求电车运行平稳。司机控制电车达到上述步骤所得的最大加速度时应保障乘客的舒适度^[6]。

$$a_t = a + kt \quad (3)$$

式中:

t ——列车运行时间常数,表示列车运行的固定时间;

a_t ——本次列车运行 t 后列车的加速度;

a ——本次列车当前的运行加速度;

k ——冲击率,是指加速度相对于时间的变化率; k 值越小,旅客的舒适度越高;当 k 小于一定值的时候,加速度变化对人体舒适度的影响很小,可以认为 k 为一个恒定值。

2.2.2 列车接近区

当有轨电车进入接近行驶状态时,司机感知接近前方限制点,于是司机期望将车速从高于前车车速降为低于前车车速。参考 Wiedemann 模型,列车接近区子模型为:

$$a_t = \frac{1}{2} \frac{\Delta v^2}{S_{ABX} - (\Delta x - L_{n-1})} + a_f \quad (4)$$

式中:

S_{ABX} ——列车在低速运行时的最小期望跟车运行距离;

Δv ——当前列车与前车的速度差;

Δx ——当前列车与前车的距离;

L ——前车的车长;

a_f ——前车的运行加速度。

当前方追踪目标为信号机或者车站时,驾驶员采用的加速度为:

$$a_t = \frac{1}{2} \frac{v^2}{S_{ABX} - \Delta x_1} \quad (5)$$

式中:

Δx_1 ——后车车头到限制点的距离。

2.2.3 跟驰行驶区

当有轨电车进入跟驰行驶状态时,司机反应到当前位置与前车距离较近,期望与前车在安全间隔距离下保持相同的行驶状态。以此为目标,则有:

$$\Delta x = S_{\text{safe}} + S_{ABX} \quad (6)$$

$$S_{\text{safe}} = \frac{v_f^2 - v_0^2}{2a_t} \quad (7)$$

$$v_0 = v + a(t_1 + t_2) + a_L t_3 \quad (8)$$

式中:

S_{safe} ——当前列车与前车的安全间隔距离;

v_f ——前车的速度;

v_0 ——司机反应后的列车初速度;

a ——本次列车当前的运行加速度;

a_t ——本次列车运行 t 后的加速度;

t_1 ——司机反应时间;

t_2 ——司机操作时间;

a_L ——本次列车当前的线路阻力加速度;

t_3 ——施加牵引制动所需时间^[7]。

将式(7)和(8)代入式(6),得到:

$$a_t = \frac{v_f^2 - [v + a(t_1 + t_2) + a_L t_3]^2}{2(\Delta x - S_{ABX})} \quad (9)$$

2.2.4 紧急制动区

当有轨电车进入紧急制动状态时,司机感知本车与前方限制点非常接近,需要控制车辆安全停车以防止冒进信号或发生碰撞。

司机控制电车追踪前车时,其追踪目标为距离前车尾部一定安全距离的停车点,有:

$$\Delta x = S_{\text{safe}} \quad (10)$$

$$S_{\text{safe}} = \frac{-v_0^2}{2a_t} \quad (11)$$

将式(11)和式(8)代入式(10),得到:

$$a_t = \frac{-[v + a(t_1 + t_2) + a_L t_3]^2}{2\Delta x} \quad (12)$$

当追踪前方限制点为信号机或者车站等固定干扰点时,司机的反应时间和操作时间很小,可忽略不计,则:

$$a_t = \frac{-v^2}{2\Delta x} \quad (13)$$

3 模型参数校正及仿真结果验证

对有轨电车驾驶员模型进行仿真程序设计,得到有轨电车运行仿真系统结构如图3所示。

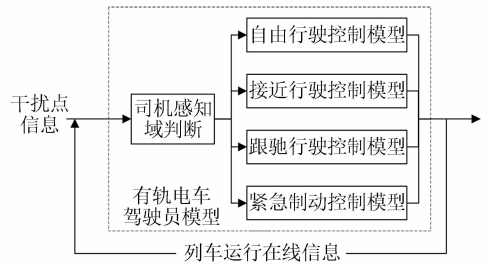


图3 有轨电车运行仿真系统结构

Fig.3 Schematic diagram of tram operation simulation system

3.1 模型参数校正

Wiedemann 模型原本是描述社会交通车辆运行过程的模型。为使模型更贴合有轨电车的运行场景,需要对 Wiedemann 模型进行参数校正。

模型参数可利用有轨电车在行驶过程中受牵引制动能力、舒适度和严格的速度限制等限制条件的约束来进行校正。约束条件可表示为:

$$\begin{cases} v_n \geq 0 \\ v_{\max_n} - v_n \geq 0 \\ |a_n - a_{n-1}| \leq k_n \\ a_{\text{braking}_n} \leq a_n \leq a_{\text{motoring}_n} \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式中:

v_n ——列车在运行了 n 个 t 时的速度;

v_{\max_n} ——列车啊运行了 n 个 t 时的最大允许运行速度;

a_n ——列车在运行了 n 个 t 时的加速度;

a_{n-1} ——列车运行了 $(n-1)$ 个 t 时的加速度;

k_n ——列车在运行了 n 个 t 时的冲击率;

a_{braking_n} ——有轨电车的允许制动加速度;

a_{motoring_n} ——有轨电车的允许牵引加速度。

由于自由行驶区子模型是根据约束条件建立的,所以有轨电车需要校正的感知区域为车辆接近区和紧急制动区,即与 ABX 和 AX 曲线相邻的区域,故需要校正的参数主要为与 S_{AX} (列车在静止时所期望的停车间隔距离) 相关的加法因子和乘法因子。校正过程如下:

1) 获取多组深圳龙华新区现代有轨电车线(以下简为“龙华线”)大布头站到河东站区间的运行数据,并对每组数据的运行时间进行正态分布拟合。拟合得出,实际运行时间的期望值为 65.468 8 s,置信度为 99.9% 的置信区间为[62.460 5,68.477]。

2) 将与 S_{AX} 相关的加法因子和乘法因子数值代入至仿真程序生成运行结果。检测该结果是否满足式(14)的约束条件,且其区间运行时间是否在实际运行时间的置信区间范围内,同时对比仿真与实际的运行曲线是否相符。若满足以上条件则表明模型参数校正完成,否则继续代入其他数值进行仿真检测。通过反复代入检测得出,当与 S_{AX} 相关的加法因子为 $3.6v_n+10$,乘法因子为 1.25 时,模型满足约束条件,且当 $\alpha=0.8$ 时驾驶员在不同反应时间下生成的仿真运行时间基本落在的置信区间范围内。具体仿真结果如表 2 所示。

表 1 龙华线大布头站—河东站 $\alpha=0.8$ 时仿真结果
Tab.1 Simulation results of Longhua Line Dabutou station to Hedong station when $\alpha=0.8$

司机反应时间/s	有轨电车仿真运行时间/s
0.1	64.691 2
0.2	64.663 1
0.3	64.622 5
0.4	65.627 0
0.5	65.513 1
0.6	64.134 6
0.7	65.754 1
0.8	66.969 4
0.9	67.437 3
1.0	66.899 8

仿真列车运行曲线与现场运行曲线对比如图 4 所示。

由图 4 可见,仿真运行时间符合实际情况,仿真所得的站间运行总时长为 65.627 s。在站间 7 482.32 m 处,有轨电车运行速度为 14.944 3 m/s,行驶状态由自由行驶区进入接近行驶区;在 7 655.39 m 处电车速度为 2.042 07 m/s,电车行驶状态进入紧急制动区,并准备到站停车。

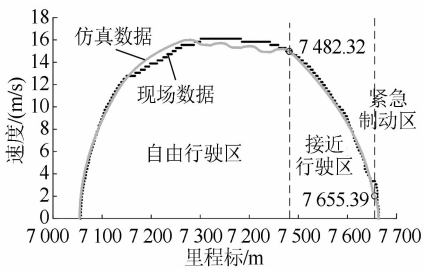


图 4 龙华线大布头站—河东站仿真与现场数据对比
Fig.4 Comparison of simulation and field data of Longhua Line Dabutou station to Hedong station

3.2 仿真结果验证

验证线路选定龙华线河西站至观城站线路。利用校正后的模型仿真计算河西站至观城站的有轨电车速度-距离图,仿真结果与实际运行结果对比如图 5 所示。

由图 5 可见,仿真结果基本符合现场实际运行情况,证明本模型经校正后可用于其他线路的有轨电车运行仿真。

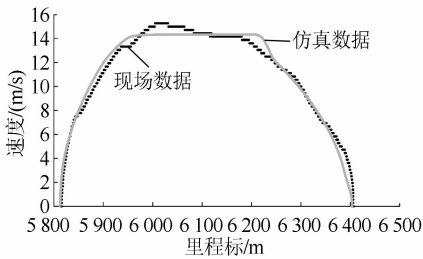


图 5 龙华线河西站—观城站仿真与现场数据对比
Fig.5 Comparison of simulation and field data of Longhua Line Dabutou station to Hedong station

4 结语

基于 Wiedemann 模型,应用龙华线数据进行仿真。仿真结果表明:本文所提出的有轨电车运行仿真模型能有效地模拟有轨电车的运行过程。在有轨电车项目投标阶段,使用针对有轨电车司机驾驶行为和有轨电车牵引制动特性的模型能为分析有轨电车的通过能力及评价有轨电车信号系统运营能力提供依据。

参考文献

[1] 张志勇,荣建,任福田. 跟车模型研究综述[J]. 公路交通科技,2004(8):10.
ZHANG Zhiyong, RONG Jian, REN Futian. Review of car-following model research[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004(8):108.

- [2] 杨达,蒲云,杨飞,等. 基于最优间距的车辆跟驰模型及其特性[J]. 西南交通大学学报,2012(5):888.
YANG Da, PU Yun, YANG Fei, et al. Car-following model based on optimal distance and its characteristics analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012(5):888.
- [3] 秦丽辉,田国旺,蒋天思. 车辆跟驰模型研究综述[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2007(3):10.
QIN Lihui, TIAN Guowang, JIANG Tiansi. Overview of research on car-following models[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Sciences Edition),2007(3):10.
- [4] LAUFER J. Freeway capacity, saturation flow and the car following behavioural algorithm of the VISSIM microsimulation software[C]//ETM Group. Australasian Transport Research Forum(ATRF), 30th, 2007, Melbourne, Victoria, Australia, Vol 30. Melbourne: The ATRF Pro, 2007.
- [5] 岑志强. 面向城市道路交通排放测算的 VISSIM 仿真模型优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
CEN Zhiqiang. Optimization on VISSIM simulation model for the evaluation of traffic emissions on urban roads[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.
- [6] 张兆中,邵春海,张强,等. 一种舒适且高精度的列车停车控制器的设计[J]. 铁路计算机应用,2011(8):7.
ZHANG Zhaozhong, GAO Chunhai, ZHANG Qiang, et al. De-

sign of train stopping controller with high comfortableness and precision[J]. Railway Computer Application,2011(8):7.

- [7] 罗森. 城市有轨电车车载运行控制系统的仿真与研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
LUO Miao. Simulation and research on the on-board operation control system of city tram[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2015.
- [8] 徐茂峻. 储能式有轨电车自动驾驶算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
XU Maojun. Study on algorithm of automatic train operation for energy storage tram[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.
- [9] 冷勇林,陈德旺,阴佳腾. 基于数据驱动的列车智能驾驶算法研究[J]. 铁路计算机应用,2013(10):1.
LENG Yonglin, CHEN Dewang, YIN Jiateng. Study on intelligent train operation (ITO) algorithm based on data-driven[J]. Railway Computer Application,2013(10):1.
- [10] 巴锦涛. 现代有轨电车模拟驾驶系统的研究与实现[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
BA Jintao. Research and implementation of modern tram driving simulation system[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2015.

(收稿日期:2019-12-06)

(上接第148页)

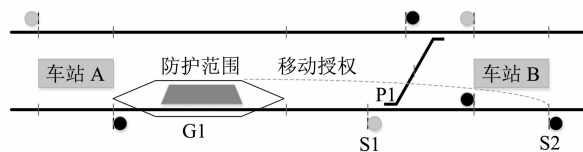


图5 无定位列车防护原则

Fig. 5 Principles of no-positioning train protection

以上条件满足后,列车可以用远程辅助驾驶模式自动低速行车;在列车读取轨旁信标后,便可获得具体位置,此时列车可自动升级为全自动运行模式运行。

3 结语

全自动无人驾驶系统虽具有高度的自动化、智能化、效率高等诸多优点,但在故障情况下实现快速恢复正常,面临较大挑战。而远程控制技术的应用,可以有效解决这一难题。本文基于全自动运行系统的故障,从车辆设备远程复位、信号设备远程复位及列车远程辅助驾驶三方面,对全自动无人驾驶的远程控制方案进行研究。

参考文献

- [1] 陈绍文. 影响城市轨道交通全自动运行的技术要点[J]. 城市轨道交通研究,2019(增刊2):43.
CHEN Shaowen. Key technological points affecting urban rail transit FAO System[J]. Urban Mass Transit,2019(S2):43.
- [2] 上海市交通运输行业协会. 城市轨道交通全自动运行运营场景规范:T/SHJX 0018—2020[S/OL]. (2020-12-30) [2021-10-17]. https://mp.weixin.qq.com/s/MjXF_0GBLkdsx3hFRknxPw.
Shanghai Transportation Trade Association. Urban rail transit-Fully automatic operation-Operational scenarios specification T/SHJX 0018—2020[S/OL]. (2020-12-30) [2021-10-17]. https://mp.weixin.qq.com/s/MjXF_0GBLkdsx3hFRknxPw.
- [3] 陈绍文,汪小勇,梁宇,等. 一种全自动运行系统中远程限制驾驶模式实现方法:CN109969232A[P]. 2019-07-05.
CHEN Shaowen, WANG Xiaoyong, LIANG Yu, et al. Method for realizing remote restricted driving mode in fully automatic operation system: CN109969232A[P]. 2019-07-05.

(收稿日期:2021-04-12)