

基于智能路钮的超高速公路虚拟轨道系统研究

何永明^{1,2}, 裴玉龙^{*1}, 冉 斌^{2, 3a, 3b}

(1. 东北林业大学 交通学院, 哈尔滨 150040; 2. 威斯康星大学麦迪逊分校 土木工程学院, 威斯康辛, 麦迪逊 57306, 美国; 3. 东南大学 a. 交通学院, b. 东南大学—威斯康星大学智能网联交通联合研究院, 南京 211189)

摘要: 为提高超高速公路行驶安全性, 使用结构分析和数学模型的方法研究基于智能路钮的高速公路虚拟轨道系统。该系统由路面子系统、车载子系统和服务中心子系统组成。安装车载系统的车辆接近写入路钮时激活虚拟轨道系统, 阅读器读取标签路钮的位置坐标和该处道路线形信息, 同时数据处理模块读取线形参数并处理得到道路切线与车身角度, 读取前轮偏角、车辆速度和相邻两个标签路钮之间的距离, 利用计算模型得到车辆在相邻两个标签路钮之间行驶时方向盘的转动角速度, 并将控制参数发送给转向电机。研究结果表明, 当超高速公路设计车速分别为 140, 160, 180 km/h 时, 只要保证路钮间的距离分别小于 1.33, 1.50, 1.69 m, 就可保证车辆偏离中心线的距离小于 0.5 m。因此, 基于智能路钮的虚拟轨道系统可将车辆限制在虚拟轨道内行驶, 保证超高速公路的安全性。

关键词: 公路运输; 超高速公路; 智能路钮; 虚拟轨道; 交通安全

Superhighway Virtual Track System Based on Intelligent Road Button

HE Yong-ming^{1, 2}, PEI Yu-long¹, RAN Bin^{2, 3a, 3b}

(1. School of Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Civil Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 57306, USA; 3a. School of Transportation, 3b. Southeast University-University of Wisconsin Intelligent Network Transportation Joint Research Institute, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: This paper focuses on the virtual track system of superhighway and uses intelligent knobs to improve the safety through structural analysis and mathematical modeling. The virtual track system consists of the subsystems of roadway, vehicle, and service center. When the vehicle that equipped with onboard system get close to the defined road button, the virtual track system will be activated. The coordinates and road alignment of the relevant road buttons will be extracted by the reader. The data processing module reads the linear parameters and obtains the tangent angle of roadway and the angle of the vehicle body. Using the front wheel angle, vehicle speed and the distance between the adjacent two button labels, the system can calculate vehicle steering wheel rotation velocity between the adjacent two road buttons and send the control parameters to the steering motor of the vehicle. The study results show that when the design speeds of superhighway are 140 km/h, 160 km/h, and 180 km/h, the distances between the road buttons are less than 1.33 m, 1.50 m, and 1.50 m, the distance of the vehicle off from the centerline would be less than 0.5 m. The virtual track system based on intelligent road knobs could keep vehicles traveling on the virtual track and improve the safety of superhighways.

Keywords: highway transportation; superhighway; intelligent button; virtual orbit; traffic safety

收稿日期: 2019-10-06

修回日期: 2019-12-05

录用日期: 2019-12-18

基金项目: 黑龙江省自然科学基金/ Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China(LH2019E004); 国家自然科学基金/ National Natural Science Foundation of China(71771047).

作者简介: 何永明(1979-), 男, 湖北广水人, 副教授, 博士。

*通信作者: peiyulong@nefu.edu.cn

0 引言

欧洲的法国等21个国家高速公路最高限速为130 km/h,美国德克萨斯州高速公路最高限速为137 km/h(85 mile/h),意大利高速公路最高限速为140 km/h,德国部分高速公路甚至不设限速.我国1951年版《公路工程设计准则(草案)》,首次规定我国公路最高设计车速为120 km/h,并沿用至今.自2016年何永明^[1]提出“超高速公路”的概念至2018年我国首条超高速公路“杭绍甬”开工建设仅用了2年时间.2019年3月,设置自动驾驶专用车道的“京雄”超高速公路也获得立项,超高速公路的发展速度远远超过预期.

近年来我国高速铁路发展迅速.高速列车之所以能够高速、安全地行驶,是因为有铁轨的约束.为了保证设计车速超过120 km/h的“超高速公路”运行安全,用基于智能路钮技术的虚拟轨道,将汽车限制在由智能路钮形成的虚拟轨道内行驶.理论计算分析结果表明,当信号传输延时小于100 ms时,可以保证汽车在180 km/h行驶时不脱轨.目前,中国移动4G延时在60~90 ms,联通和电信4G的测速延时大多在20~40 ms;而随着5G网络的推广,延时将降至1 ms以内,故可以充分保证基于智能路钮的超高速公路虚拟轨道系统安全运行.

1 超高速公路概述

1.1 超高速公路提出的背景

我国公路和铁路等基础设施建设的速度和质量举世瞩目.截至2018年底,我国高速公路总里程已突破14万km,连续8年世界第一;高速铁路通车里程达到2.9万km,超过全球高铁总里程的60%.

铁路无论是通车里程还是运营速度都实现了跨越式的突破.我国公路总里程和高速公路总里程也在不断刷新历史记录,但公路最高设计车速却从未提高,锁定为120 km/h,68年未变,甚至没有高速公路提速的相关研究^[1].

我国高速铁路的发展为超高速公路的建设提供了宝贵经验,国外超过120 km/h高速公路的安全运营为我国超高速公路的安全运营树立了信心^[2].何永明^[1]提出了“超高速公路”的设想,即设计车速高于120 km/h的高速公路.超高速公路不同于普通高速公路,为了保证超高速公路的运行安全,超高速公路路面更加平整,路线更加平顺,设施更加完备^[3].

1.2 超高速公路等级划分

何永明^[1]首次提出超高速公路概念的同时,也提出了超高速公路的技术等级和对应的最高设计车速.考虑到安全性和经济性问题的,经过多轮专家论证后,超高速公路技术等级和最高设计车速如表1所示.

在划分超高速公路等级的同时,也提出了各级超高速公路服务对象、建设方式和预计实施年限.各级超高速公路比较如表2所示.

以上各级超高速公路服务对象、建设方式和预计实施年限只是首次提出超高速公路概念时的初步设想,实际发展会有较大出入.例如,超一级高速公路计划实施年限为15年,但是从超高速公路概念的提出到第1条超高速公路开工建设仅用了2年时间.随着我国高速公路建设由高速度向高质量的转变和自动驾驶技术的快速发展,各级超高速公路建设都将很快提上日程.

表1 论证后高速公路等级划分^[1]

Table 1 Classification of highway after argument

高速公路等级	超高速公路									普通高速公路		
	超三级			超二级			超一级					
设计速度/(km/h)	180	160	140	160	140	120	140	120	100	120	100	80

表2 各级超高速公路比较^[3]

Table 2 Comparison of superhighways of different grades

超高速公路	服务对象	建设方式	计划实施年限/年
超一级	普通客货混行	既有高速提速改造	15
超二级	乘用车专用	参照铁路动车线路新建	30
超三级	自动驾驶汽车专用	参照高速铁路线路新建	40~50

2 虚拟轨道系统结构组成

2.1 虚拟轨道系统总体结构

基于智能路钮的高速公路虚拟轨道系统由路面子系统、车载子系统和服务中心子系统组成.路面子系统由写入路钮、标签路钮组成;车载子系统

由阅读器、显示器、前轮偏角检测器、数据处理模块和转向电机组成;服务中心子系统由服务器和手持终端组成;此外,各子系统还包括电源和连接线路^[4].智能路钮系统阅读器和标签路钮通过特高频(902~928 MHz)RFID射频识别技术进行通信^[5].各组成部分如图1所示.

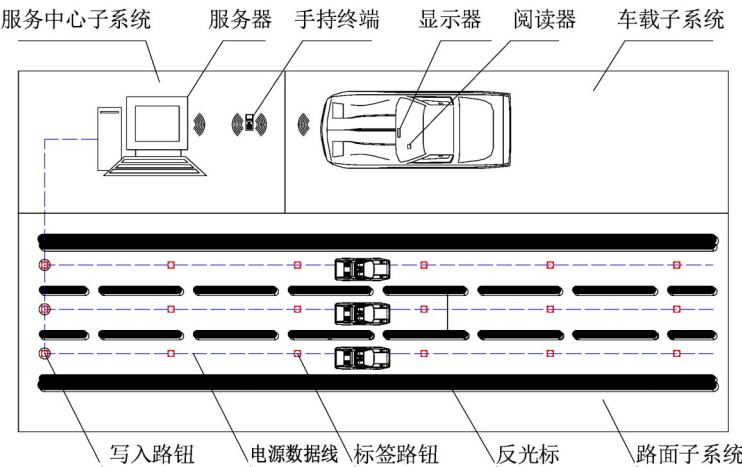


图1 虚拟轨道系统结构组成图

Fig. 1 Structure composition diagram of virtual orbit system

2.2 路面子系统结构组成

路面子系统由写入路钮和标签路钮及其接线组成.路面子系统在路面铺设施工时被埋入路面结构层,顶部与路面平齐,可避免车辆碾压时出现颠簸.写入路钮和标签路钮埋设位置位于汽车行驶在车道正中心时驾驶员的正下方,汽车行驶在车道正中央时,发光路钮形成的视线诱导线条位于驾驶员的正前方.写入路钮安装在需要良好视线诱导的道路起点或车道入口处,写入路钮除具有传统发光路钮所具备的发光结构外,还具备写入接口和存储空间,可通过手持终端或者服务中心子系统的服务器写入路钮位置和所在路段道路平、纵、横线形参数.标签路钮与写入路钮通过导线相连,标签路钮除具有传统发光路钮所具备的发光结构外,还具备射频发射结构.路面子系统结构组成如图2(a)所示,路面子系统、写入路钮和标签路钮的结构及安装如图2所示.

2.3 车载子系统结构组成

车载子系统由阅读器、显示器、前轮偏角检测器、数据处理模块和转向电机组成^[4].组成车载子系统的阅读器安装在车辆底部,驾驶员正下方,当车辆在车道正中央行驶时,阅读器位于标签路钮

的正上方,此时阅读器与标签路钮距离最近,为车辆最小离地间隙.

组成车载子系统的显示器与车载导航系统兼容,车载导航系统地图采用道路设计时的平、纵、横参数.车载子系统显示器能够将标签路钮读取的坐标信息代替GPS坐标信息,从而能够更精确、快速地实现定位,并且显示在标签路钮读取的平、纵、横参数绘制的地图上.车载子系统的转向电机可与车辆本身电动助力转向系统电机共用.车载子系统结构组成和安装如图1和图2所示.

2.4 服务中心子系统结构组成

服务中心子系统,由服务器和手持终端组成.服务中心子系统服务器管理多条设有智能路钮的道路和众多的车载子系统.服务中心子系统具有路面子系统信息写入和车载子系统地图生成的功能.服务中心子系统服务器可通过导线与路面子系统连接,从而实现标签路钮位置信息和道路线形信息的写入,也可用手持终端实现较偏远地区无有线连接的路面子系统信息的写入.车载子系统通过服务中心子系统手持终端完成车载子系统地图的生成.服务中心子系统结构组成如图1所示.

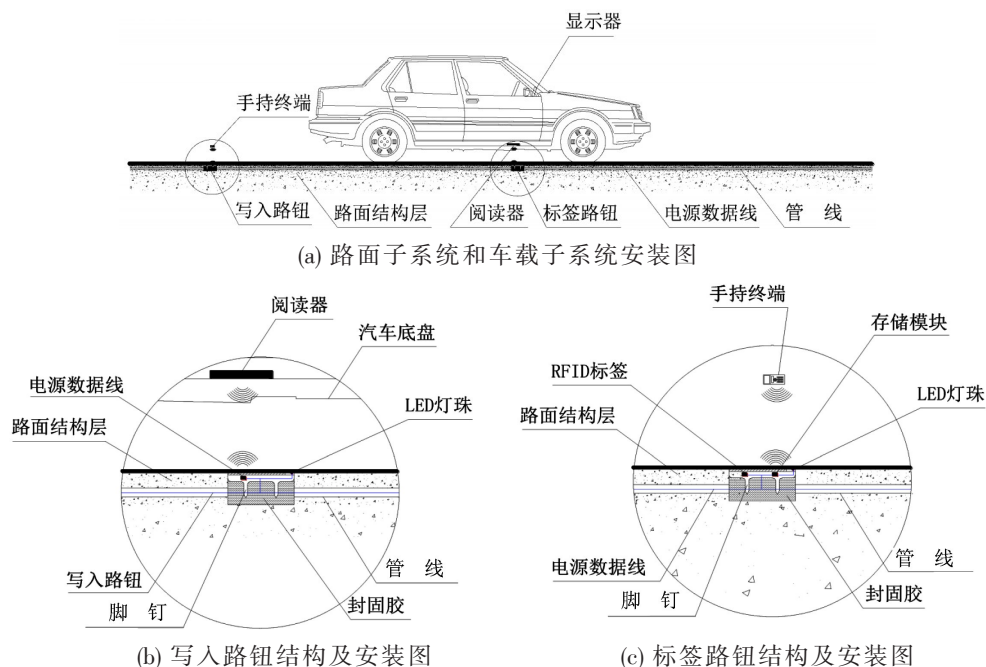


图2 路面子系统和车载子系统安装图

Fig. 2 Installation diagram of pavement subsystem and subsystem

3 虚拟轨道系统工作原理

3.1 路面子系统工作原理

车辆驶过标签路钮位置时,能够通过4G、5G网络或者RFID准确读取写入路钮内存储的道路平、纵、横线形参数,同时读取标签路钮的位置参数,即车辆所在的准确位置^[6].与GPS定位系统和手机基站定位相比,智能路钮系统定位精确度高,延误时间短,实时性强.

3.2 车载子系统工作原理

数据处理模块可以读取车辆电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)中驶过第 $n-1$ 个标签路钮时的速度 V_{n-1} ,单位为km/h,数据处理模块

还可将阅读器读取的道路线形参数进行处理,得到各点切线方程.在第 $n-1$ 个标签路钮处,道路切线与车身角度为 α_{n-1} ,单位为rad.前轮偏角与车身夹角如图3所示.当 $\alpha_{n-1} < 0$ 时,切线在车身左侧,车辆将左转;当 $\alpha_{n-1} = 0$ 时,切线与车身平行,车辆将直行;当 $\alpha_{n-1} > 0$ 时,切线在车身右侧,车辆将右转.

当车辆驶过第 $n-1$ 个标签路钮时,前轮偏角检测器检测得到前轮偏角为 β_{n-1} ,单位为rad.车身中心线与车道中心线切线夹角 β 如图4所示.当 $\beta_{n-1} < 0$ 时,车辆沿曲线行驶,向左转弯;当 $\beta_{n-1} = 0$ 时,车辆沿直线行驶;当 $\beta_{n-1} > 0$ 时,车辆沿曲线行驶,向右转弯.

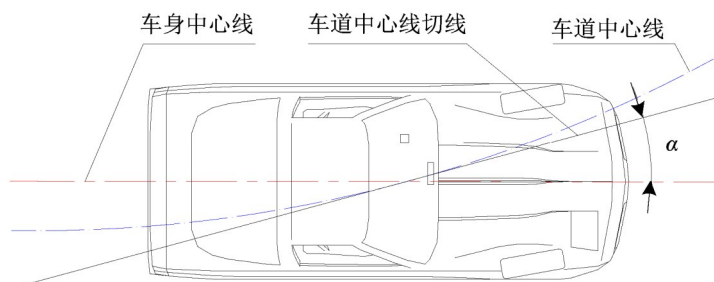


图3 前轮偏角与车身夹角

Fig. 3 Front wheel angle and body included angle

汽车在行驶过程中,汽车前轮偏角应与道路切线平行,即 $\theta_n = \alpha_n - \beta_n = 0$.当车辆驶过第 $n-1$ 个

标签路钮时,若 $\theta_{n-1} = \alpha_{n-1} - \beta_{n-1} \neq 0$,则需要转动前轮,使车辆经过第 n 个标签路钮时 $\theta_n = \alpha_n - \beta_n = 0$,

则转动角度 $\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1} = (\alpha_n - \beta_n) - (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1}) = \beta_{n-1} - \alpha_{n-1}$. 当 $\Delta\theta < 0$ 时, 需逆时针转动方向盘; 当

$\Delta\theta = 0$ 时, 保持方向盘角度; 当 $\Delta\theta > 0$ 时, 需顺时针转动方向盘.

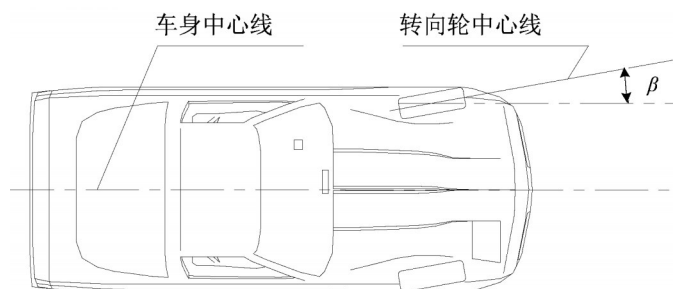


图4 车身中心线与车道中心线切线夹角 β

Fig. 4 Angle beta of tangent line between car body center line and lane center line

若某辆车前轮偏角 β 由 0 变到 $\beta_{\max}$, 方向盘转动角度为 $\gamma_{\max}$, 则方向盘转角与前轮偏角的传动比 $I = \gamma_{\max} / \beta_{\max}$; 方向盘转动的角速度 ω (单位为 rad/s) 与车辆在两个标签之间行驶的时间 t (单位为 s) 和所需转动角度有关, 即

$$\omega = \frac{I\Delta\theta}{t} \quad (1)$$

而 t 由两个标签之间长度 L_n (单位为 m, 可由阅读器读取) 和车辆行驶速度 V (单位为 km/h) 决定, $t = L_n / 3.6V$ (1 m/s = 3.6 km/h).

分别代入得到

$$\omega = \frac{I\Delta\theta}{t} = \frac{3.6V\Delta\theta\gamma_{\max}}{L_n\beta_{\max}} = \frac{3.6V(\beta_{n-1} - \alpha_{n-1})\gamma_{\max}}{L_n\beta_{\max}} \quad (2)$$

因此, 车辆在不同线形道路上行驶时, 方向盘的转动角速度 ω 都可确定, 数据处理模块控制转向电机转动方向盘, 使车辆沿标签路钮形成的虚拟轨道行驶.

3.3 服务中心子系统工作原理

服务中心子系统, 由服务器和手持终端组成. 服务中心子系统服务器管理多条设有智能路钮的道路和众多的车载子系统. 服务中心子系统具有路面子系统信息写入和车载子系统地图生成的功能. 服务中心子系统服务器可通过导线与路面子系统连接, 从而实现标签路钮位置信息和道路线形信息的写入, 也可用手持终端实现较偏远地区无有线连接的路面子系统信息的写入. 车载子系统通过服务中心子系统手持终端完成车载子系统地图的生成.

4 计算验证

4.1 基本假设

为了验证车辆在虚拟轨道上脱轨临界条件需做出以下假设:

(1) 车辆左转弯和右转弯情形相同, 因此仅验证车辆右转弯脱轨临界条件. 假设汽车先沿直线行驶, 然后右转经过缓和曲线进入圆曲线, 最后经过缓和曲线驶入直线, 完成一次完整的转弯过程.

(2) 由于缓和曲线的长度与圆曲线半径有关, 因此假设圆曲线半径为 R , 缓和曲线最大转向角 $\beta = 0.5$ rad, 由 $\beta = \frac{l_s}{2R}$ 计算得到缓和曲线长度 $l_s = R$.

(3) 车辆沿虚拟轨道中心线行驶, 一般认为偏离中心线超过 0.5 m 才会影响自身安全和其他车辆行驶. 故假设当车身偏离轨道中心线超过 0.5 m, 达到脱轨临界值.

(4) 每两个标签之间的距离相同, 为 L_n , 且 $L_n < R$.

(5) 方向盘在缓和曲线的起点开始匀速转动, 在圆曲线的起点方向盘停止转动, 前轮偏角与圆曲线相切.

(6) 方向盘传动比为 20, 即方向盘转动 360° 会导致车轮转向 18° , 驾驶员从容转动方向盘的角速度 ω 为 $\beta V / l_s = \beta V / R$.

4.2 验证过程

为了详细说明转弯时虚拟轨道的工作过程, 将计算步骤阐述如下:

(1) 由假设车辆将右转, 前方道路切线在车身

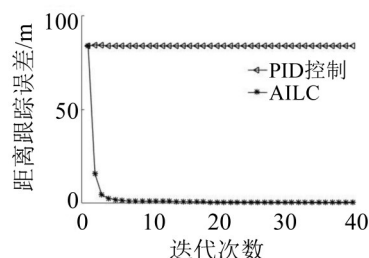


图8 两种算法的距离跟踪误差对比图

Fig. 8 Comparison of distance tracking error profile

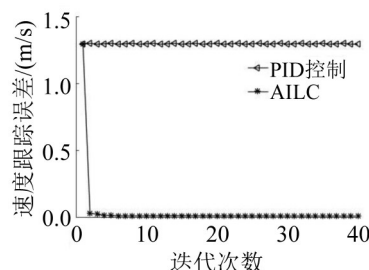


图9 两种算法的速度跟踪误差对比图

Fig. 9 Comparison of speed tracking error profiles

5 结论

本文以高速列车自动驾驶系统作为研究对象,考虑其受到外部扰动、系统受限的情况,设计自适应迭代学习控制律和参数更新律,通过迭代域的学习和时间域的反馈共同作用输出系统的控制输入,并基于Lyapunov函数构造复合能量函数,证明了所提算法的收敛性和稳定性.仿真结果表明,本文提出的自适应迭代学习控制算法对列车期望曲线的跟踪具有较快的收敛速度和较高的跟踪精度,具有鲁棒性强、稳定性高、实现方便等优势,有较好的工程应用参考意义.

参考文献:

- [1] NING B, TANG T, GAO Z Y, et al. Intelligent railway systems in China[J]. IEEE Intelligent Systems, 2006, 21(5): 80–83.
- [2] WANG Y, HOU Z S, LI X Y. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory[C]. IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, Beijing, 2008: 1766–1770.
- [3] HOU Z, WANG Y, YIN C, et al. Terminal iterative learning control based station stop control of a train[J]. International Journal of Control, 2011, 84(7): 1263–1274.
- [4] SUN H Q, HOU Z S, TANG T. An iterative learning approach for train trajectory tracking control[C]. The 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011, 44(1): 14916–14921.
- [5] JI H H, HOU Z S, ZHANG R K. Adaptive iterative learning control for high-speed trains with unknown speed delays and input saturations[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 260–273.
- [6] SONG Q, SONG Y D. Generalized PI control design for a class of unknown nonaffine systems with sensor and actuator faults [J]. Systems & Control Letters, 2014(64): 86–95.
- [7] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 469–514.
- [8] YU Q X, HOU Z S, XU J X. D-type ILC based dynamic modeling and norm optimal ILC for high-speed trains [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2017, 26(2): 652–663.
- [9] SUN M, GE S S. Adaptive repetitive control for a class of nonlinearly parametrized systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(10): 1684–1688.

上接第60页

- [4] 何永明,裴玉龙. 基于智能路钮的高速公路虚拟轨道系统[P]. 国家知识产权局:CN105867392B, 2019-04-16. [HE Y M, PEI Y L. Virtual track system of expressway based on intelligent road knob[P]. Heilongjiang Province: CN105867392B, 2019-04-16.]
- [5] 李四辉,蔡伯根,上官伟,等. 车路协同系统仿真信息多分辨率交互方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 50–57. [LI S H, CAI B G, SHANGUAN W, et al. Multi-resolution interactive method for simulation

information of vehicle-road collaborative system[J]. Traffic and Transportation System Engineering and Information, 2014, 14(6): 50–57.]

- [6] 孙帮成,王文军. 基于全轮差动转向的虚拟轨道汽车列车设计[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 67–74. [SUN B H, WANG W J. Design of virtual railway vehicle based on all wheel differentials steering [J]. Journal of Beijing Jiaotong University(Natural Science), 2018, 42(6): 67–74.]