DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.015　　文章编号：1000-128X(2023)02-0131-05

基于非线性补偿的轨道交通列车自定位方法研究

韩芝星
（山西职业技术学院 电气自动化工程系，山西 太原 030006）

摘　要：列车精准定位对列车运营安全有着十分重要的意义。在某些国外地铁项目中，受限于技术体系的成熟度和设计成本，常规的GPS定位和CBTC定位技术无法满足项目对列车定位的需要，文章为此提出一种基于非线性补偿的轨道交通列车自定位方法。该方法能够在不增加新设备（如GPS、CBTC等）的情况下，仅依赖于车载既有设备实现列车位置的精确定位。所提出的方法系统组成简单、成本低、精度高、可靠性高（不受环境影响），具备推广意义。具体思路为：首先利用神经网络建立列车瞬时速度的补偿模型，通过补偿模型提升列车瞬时速度的精度；然后根据补偿后的列车实时运行速度与列车运行时间作积分累积得到列车实时的运行距离，再根据列车的固定运营线路图，计算得到列车距下一站的距离，实现定位。试验证明，补偿后的定位精度小于0.2 m，较补偿前提高了3~4倍。

关键词：轨道交通；列车定位；神经网络；非线性补偿
中图分类号：U2；U228.1　　**文献标识码：**A

Nonlinear compensation-based self-positioning method for rail transit train

HAN Zhixing

(Department of Electrical Engineering and Automation, Shanxi Polytechnic College, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Accurate positioning of trains is of great importance to the safety of train operation. In some foreign subway projects, limited by the maturity of technical system and control of design cost, conventional GPS and CBTC positioning technologies cannot meet the demand of train positioning in the projects. Therefore, a nonlinear compensation based self-positioning method for rail transit trains is proposed. This method can achieve precise positioning of trains solely relying on existing onboard equipment without adding new equipment such as GPS, CBTC, etc. The proposed method features simple composition, low cost, high accuracy, and high reliability (free from environmental affection), which is worth further promotion. Firstly, the specific process used neural networks to establish a compensation model for the instantaneous speed of trains and improve the accuracy of train instantaneous speed through the compensation model, and then the real-time running distance of the train was obtained by integrating the compensated real-time speed and operating time of the train. Afterwards, the distance of the train to the next station was calculated based on the fixed train operation diagram, thus to realize positioning. The experimental results show that after compensation the positioning accuracy is less than 0.2 m, upgraded by 3-4 times of the accuracy before compensation.

Keywords: rail transit; train positioning; neural network; nonlinear compensation

0　引言

为保障列车运行安全，在列车行驶的过程中，列车控制系统会根据行驶的线路条件对列车实施不同速度等级的限速。实施限速的位置和限速目标与线路上的弯道、桥梁、隧道等相关。因此，列车行驶的实时位置，对列车控制系统而言非常重要。

基金项目：2022年度山西省高等学校科技创新项目（2022L692）
通信作者：韩芝星（1987—），女，硕士，讲师，从事智能仪表与自动化装置研究；E-mail: hanzhixing0721@163.com
引用格式：韩芝星. 基于非线性补偿的轨道交通列车自定位方法研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 131-135.
Citation：HAN Zhixing. Nonlinear compensation-based self-positioning method for rail transit train[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 131-135.

在实际应用中，通常使用全球定位系统（GPS）或基于通信的列车控制系统（CBTC）实现高精度的列车定位[1]。GPS 系统精确定位的关键在于对卫星和接收机之间距离的准确计算，计算公式为：距离=速度×时间。电磁波在真空中传播速度很快，但是大气不是真空状态，信号会受到电离层和对流层的重重干扰，云层、高层建筑、树木、隧道等都会对信号传输产生影响，导致计算产生误差、位置信息更新不及时和无法定位等问题[2]。

CBTC 系统分为以地面为中心和以车为中心两种，以车为中心的 CBTC 比以地面为中心的 CBTC 性能更优、设备更少、成本更低，但是对通信系统的性能和可靠性依赖更高，设备故障后很难提供准确的定位信息继续维持列车的安全运行。CBTC 作为一种信号系统，首要任务是保障列车安全，具备自动列车控制系统（ATC）、列车自动保护装置（ATP）、自动列车监督系统（ATS）等功能，系统庞大、复杂、成本高，还需要在轨道上每隔一段距离设置地面应答器，以辅助实现定位功能[3-4]。

随着运输需求的快速增长和系统自主化、智能化需求的不断提高，未来列车定位技术的发展趋势必然是利用新型技术提高列车运输效率、尽量减少对地面轨旁设备的依赖，降低地面设备维护成本。新一代列控系统提出将去除如应答器、轨道电路等轨旁设备，这些都对列车高精度定位提出了更加严峻的挑战[5-7]。GPS 定位对于高速行驶的列车而言，实时性和精确度均不能满足要求；CBTC 定位成本高，且在无 ATC、ATP、ATS 等功能需求的情况下，需要采用除 GPS 和 CBTC 定位方法以外的其他可行性方案。为此，本文提出一种列车自定位方法。该方法是利用列车实时运行速度（即瞬时速度）与列车运行时间作积分累积得到列车实时的运行距离，再根据列车的固定运营线路图，计算得到列车和下一站的距离，实现列车定位。另外，在实际运用中发现，列车在运行时的速度通常由牵引控制系统或者制动控制系统提供，但受采样频率、通信周期、运行轨迹等因素影响，以该速度计算列车运行距离时存在一定的误差。误差的不断累积对列车的运行位置定位将造成严重的偏差。为此，本文提出一种基于非线性补偿的运行列车位置自定位方法，主要思路是利用神经网络搭建“速度–距离”的非线性关系模型，并利用列车运行速度和运行距离的历史数据对模型进行学习，得到通过列车运行的瞬时速度计算列车运行距离的非线性补偿关系，该方法克服了采样频率、执行周期、运行轨迹和异常天气等因素的影响，以实现列车实时位置的精准定位。

1 基于神经网络的非线性补偿方案

本文提出一种基于神经网络的非线性补偿方法，其思路是利用神经网络模型学习列车实际运行速度与运行距离之间的非线性关系，以补偿通过列车瞬时速度计算列车运行距离的误差。方案具体包括离线和在线两个部分，总体架构如图 1 所示。在离线部分，首先利用 BP（Back-Propagation）神经网络建立非线性补偿模型，然后采集列车实时运行速度和运行距离信息，对模型进行训练、验证。在在线部分，首先将列车的瞬时速度输入所训练的模型，计算出列车从某一站点出发后的实时运行距离，然后根据列车运营线路信息得到当前列车距离下一站点的剩余距离。当剩余距离变为 0 后，表示列车到达下一站点，提示列车将停车进行上下客操作。

2 BP 神经网络非线性补偿算法

2.1 BP 神经网络建模

BP 神经网络是目前研究最为成熟、应用最为广泛的人工神经网络之一，广泛用于模式识别、系统辨识、自动控制等领域[8]。BP 神经网络能够在缺乏了解目标系统建模先验知识的情况下，仍然具有很好的模型学习和映射能力，并且三层 BP 神经网络被证明具有逼近

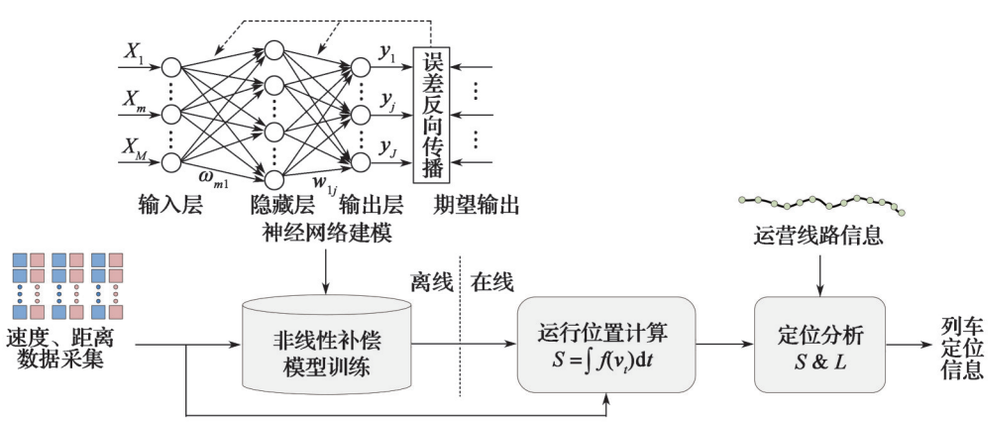


图 1 基于神经网络的非线性补偿方法架构

Fig. 1 Architecture of nonlinear compensation method based on neural network

任意连续函数的能力[9]。

BP 神经网络属于多层前向神经网络，同层神经元节点无信息交互，不同层之间根据连接权重传递信息。BP 神经网络通过多层结构设计和误差反向传播计算使得其能够更准确地反映输入和输出之间的映射关系（即列车实时运行速度与运行距离之间的非线性关系）。三层 BP 神经模型如图 2 所示。设三层 BP 神经网络输入层和输出层的神经元个数均为 N，隐藏层神经元个数为 K，$v=(v_1,v_2,\cdots,v_N)$ 与 $l=(l_1,l_2,\cdots,l_N)$ 分别表示从牵引或制动控制系统采集到的列车运行速度以及运行距离数据集合，N 表示采集数据的总数；运行距离 l 与运行速度 v 的非线性函数模型为 F。采用三层 BP 神经网络对非线性函数模型 F 进行学习。

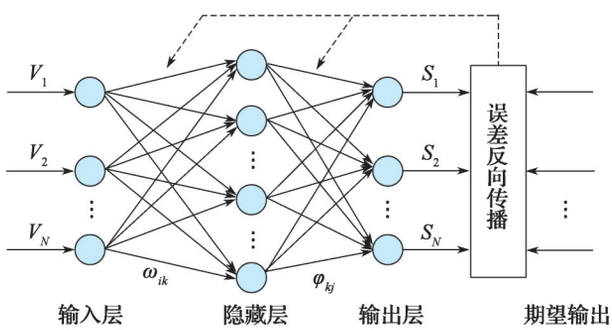


图 2　三层 BP 神经网络模型

Fig. 2　Model of three-layer BP neural network

三层 BP 神经网络模型可表示为：

$$y_i=f_1\left(\sum_{i=1}^{N}\omega_{ik}v_i-\theta_k\right),\quad k=1,2,\cdots,K \tag{1}$$

$$s_j=f_2\left(\sum_{k=1}^{K}\varphi_{kj}y_k-\vartheta_j\right),\quad j=1,2,\cdots,N \tag{2}$$

式中：f_1 为输入层到隐藏层的函数模型；f_2 为隐藏层到输出层的函数模型，具体见式(3)。

$$\boldsymbol{F}=f_2(f_1) \tag{3}$$

s_j 表示神经网络的输出；ω_{ik} 表示输入层第 i 个神经元到隐藏层第 k 个神经元的权值；φ_{kj} 表示隐藏层第 k 个神经元到输出层第 j 个神经元的权值，θ_k 和 ϑ_j 分别表示隐藏层第 k 个神经元和输出层第 j 个神经元的阈值。对应第 i 个样本数据的神经网络学习误差函数 E 为

$$E=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}\left(s_j-l_j\right)^2 \tag{4}$$

BP 神经网络通过将误差 $\boldsymbol{E}$ 反向传播到输出层和隐藏层进行权值修正，经反复迭代运算，使误差达到要求后停止训练。

2.2　非线性补偿

在离线状态下，从牵引或制动控制系统采集到列车运行速度以及运行距离数据，并定义训练误差容忍度 σ。当式(4)的训练误差小于其规定的容忍程度（$E\leqslant\sigma$），BP 神经网络的训练即可终止。常见的权值更新算法包括标准梯度下降法、拟牛顿法、共轭梯度法等[10]。

在实际运用中，由于系统中存在一些干扰因素，使得采集到相邻数据间的变化率较小，例如传感器精度、列车运行时的系统抖动等[11-13]，因此需要进一步对采集的速度信号进行间隔提取，以减少相近时间间隔速度因干扰变化引起神经网络过拟合等问题。

研究采用的提取规则可表示为：

$$\left|v_{i+1}-v_i\right|\geqslant\delta \tag{5}$$

式中：$\delta>\max\{\xi,\zeta\}$，ξ,ζ 分别表示传感器精度和列车运行时的系统抖动。

然后在在线状态下实时计算列车运行距离。基于学习到的速度非线性补偿模型，对牵引或制动控制系统提供的实时速度进行补偿；然后对补偿后的实时速度 v_t 做时间积分，得到列车的累计运行距离 L_T：

$$L_T=\sum_{t=1}^{T}F\left(v_t\right) \tag{6}$$

式中：T 为总运行时间。

结合列车的运行轨迹，通过计算列车的运行距离实现对列车运行位置的精准定位。例如，设 O_1 为运行轨迹的第一个终点距离起点的距离，则当 $L_T=O_1$ 时表示列车已到达第一个终点。

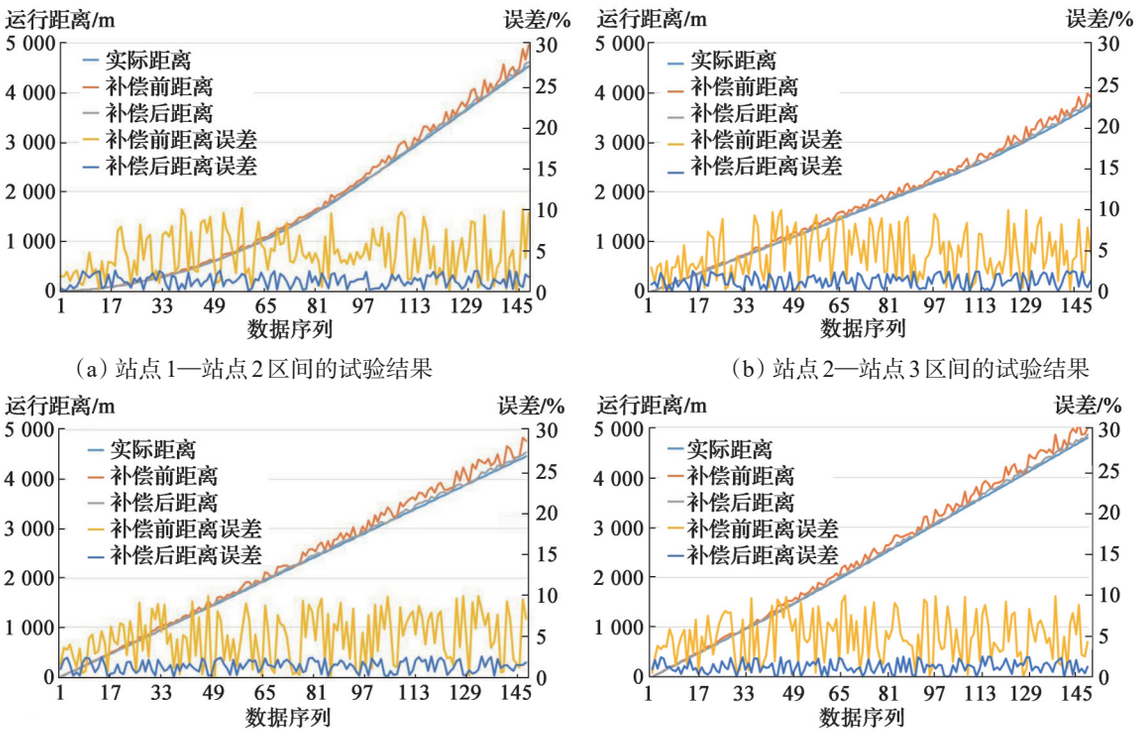
3　试验验证

3.1　补偿模型验证

为验证所提出方法的有效性，收集实际现场列车运行的速度和距离数据，并将其分成模型训练数据和模型验证数据。通过模型训练数据对模型进行训练，然后通过模型验证数据对模型的准确性进行校验。具体验证过程及试验结果如下：

①在列车运行线路上选取 4 个站点区间进行分段单独验证，试验中每个站点区间采集大约 5 000 组数据，选取其中 70% 作为训练数据，剩余的 30% 作为验证数据，试验结果如图 3 所示，其中横坐标表示数据序列，左纵坐标表示列车运行距离，右纵坐标表示误差值。从图 3 可看出，利用本文提出算法计算出的模型能够较好地反映列车在各站点间的运行情况，经非线性补偿后的列车运行定位误差小于 3%，而未经补偿的列车运行定位误差最大超过了 10%。

②利用上述采集的数据对 4 个站点区间进行统一训练、验证，仍然选取整个数据的 70% 作为训练数据，剩余的 30% 作为验证数据。将统一训练模型与单独训练模型进行对比分析，站点 1—站点 5 区间的试验结果如图 4 所示，其中横坐标表示数据序列，纵坐标表示误差值。从图 4 可看出，站点 1—站点 2 区间单独训练的模型对本站点区间的补偿效果较好，其误差值小于 3%；但该数值不能完全反映列车在其他区间的运行特



（a）站点 1—站点 2 区间的试验结果　（b）站点 2—站点 3 区间的试验结果

（c）站点 3—站点 4 区间的试验结果　（d）站点 4—站点 5 区间的试验结果

图 3　各站点区间单独验证的试验结果

Fig. 3　Testing results on independent verification of each station interval

征，其中站点 3—站点 4 模型验证结果最大误差超过了 15%；而由所有站点区间的数据训练出的模型则能够较好地反映列车在各个区间的运行特征，误差同样小于 3%。因此采用本文所述的非线性补偿方案，模型训练应尽可能地覆盖列车整段运营路线上的工况数据，从而使得补偿效果最佳。

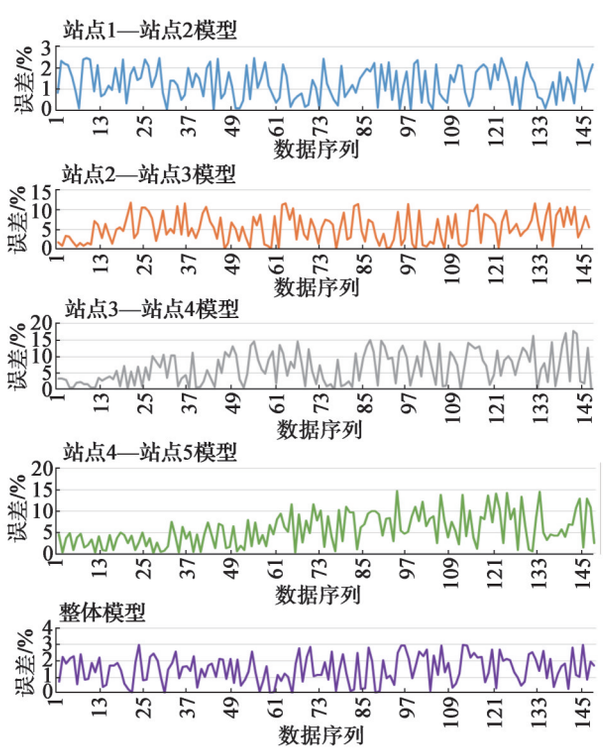


图 4　不同训练模型的验证结果对比

Fig. 4　Comparison of the verification results between different trained models

3.2　不同方案对比验证

对不同定位方案的对比分析如表 1 所示。在实际应用中，按照本文提出方法设计的列车瞬时速度补偿模型，在既有的车载中央控制单元上就可以实现，不需要增加额外设备；而 GPS 定位系统需要在车上安装 GPS 信号接收机，并建立接收机与中央控制单元的通信路径[14]；CBTC 定位则需要增加车载控制设备和地面应答器、计轴设备、信号机等其他设备[15]。综合而言，本文提出的方法具有系统组成简单、成本低、便于维护等优势。

表 1　不同定位方案的对比分析

Table 1　Comparison analysis of different positioning methods

项点	GPS 定位	CBTC 定位	本文方法定位
正常线路	精度为 2.5 m	精度为 0.3 m	精度为 0.2 m
隧道工况	无法定位	精度为 0.3 m	精度为 0.2 m
是否受环境影响	是	否	否

在定位精度方面，非线性补偿定位精度高达 0.2 m，且不受环境影响。民用 GPS 系统定位精度为 10 m，研究用 GPS 系统定位精度 2.5 m，易受对流层、平流层以及地点周边的建筑、树木等环境影响。CBTC 系统定位精度为 0.3 m，不受环境影响。综合考虑，非线性补偿定位具有精度高、不受环境影响的优势。

4　结语

列车的定位功能是列车的核心控制功能之一，其精度和可靠性涉及到行车安全。受限于某些应用场所无法采用高精度GPS定位或CBTC系统定位技术，同时由于列车牵引、制动系统提供的实时速度进行定位时存在精度低等问题，本文提出一种基于非线性补偿的列车自定位方法。该方法能够在不增加新设备（如GPS、CBTC等）的情况下，仅依赖于车载既有的设备实现列车位置的精确定位，并通过实测试验结果证明其能够满足列车定位需求。

通过系统组成、定位精度、受环境影响情况的对比分析得出，非线性补偿定位方法较传统GPS定位和CBTC系统定位方法具有系统组成简单、成本低、精度高、可靠性高（不受环境影响）等特点。因此，对于装载了CBTC系统的列车，依然可以采用本方案，进一步提升定位精度。但本文所提出方法与传统GPS定位方法或CBTC系统定位方法如何进行融合，还需进一步研究。考虑到定位对列车运行安全的重要性，在成本允许的前提下，后续将进一步研究多种定位方法互相校准和冗余，以提升定位控制的精准性、保障列车的可用性。

参考文献：

[1] 张珊, 李辉, 唐海周. “当前”模型自适应卡尔曼滤波在有轨电车定位中的应用[J]. 机车电传动, 2020(2): 129-133.
ZHANG Shan, LI Hui, TANG Haizhou. The application of self-adaption Kalman filtering algorithm based on the current statistic model in the tram’s GPS positioning[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 129-133.

[2] 江帆, 王雨, 李鹏, 等. 一种基于GPS速度的机车自动轮径校正方法[J]. 机车电传动, 2019(2): 144-147.
JIANG Fan, WANG Yu, LI Peng, et al. A method of locomotive automatic wheel diameter correction based on GPS speed[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2): 144-147.

[3] 王强. LKJ-15型列车运行监控系统辅助测速定位技术[J]. 机车电传动, 2019(1): 126-128.
WANG Qiang. Application of auxiliary speed measurement and positioning technology for LKJ-15 train operation monitoring system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 126-128.

[4] 张俊峰, 李飞. 基于WebGIS的神华机车实时状态远程监测系统[J]. 机车电传动, 2019(1): 117-120.
ZHANG Junfeng, LI Fei. Remote real-time status monitoring system for Shenhua locomotive based on WebGIS[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 117-120.

[5] 刘菊香. 列车卫星定位故障影响分析与检测方法研究[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(3): 1-6.
LIU Juxiang. Impact analysis of GNSS-based train location fault and study on its detection[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(3): 1-6.

[6] 邓浩江. 一种基于概率统计的列车定位算法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(4): 28-31.
DENG Haojiang. Train positioning algorithm based on probability statistics[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 28-31.

[7] 罗淼, 党建武, 郝占军, 等. 基于卷积神经网络的列车位置指纹定位算法研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(1): 42-50.
LUO Miao, DANG Jianwu, HAO Zhanjun, et al. Study of train location fingerprint positioning algorithm based on convolutional neural network[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(1): 42-50.

[8] 周政. BP神经网络的发展现状综述[J]. 山西电子技术, 2008(2): 90-92.
ZHOU Zheng. Survey of current progress in BP neural network[J]. Shanxi Electronic Technology, 2008(2): 90-92.

[9] YANG Sibo, TING T O, MAN K L, et al. Investigation of neural networks for function approximation[J]. Procedia Computer Science, 2013, 17: 586-594.

[10] PANG Zhonghua, LIU Guoping. Design and implementation of secure networked predictive control systems under deception attacks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1334-1342.

[11] YANG Jun, ZHOU Chunjie, YANG Shuanghua, et al. Anomaly detection based on zone partition for security protection of industrial cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4257-4267.

[12] 李常贤, 赵焱, 张彤, 等. 列车网络控制系统时延特性研究[J]. 中国铁路, 2018(1): 49-53.
LI Changxian, ZHAO Yan, ZHANG Tong, et al. Study on time delay characteristics of train network control system [J]. China Railway, 2018(1): 49-53.

[13] 乔红刚, 李习桥, 刘玉林. 运营动车组发生车体抖动问题的研究[J]. 铁道车辆, 2017, 55(7): 38-40.
QIAO Honggang, LI Xiqiao, LIU Yulin. Research on shaking of carbodies of multiple units in operation[J]. Rolling Stock, 2017, 55(7): 38-40.

[14] 陶汉卿, 蔡煊, 吴昕慧. 基于GPS和里程计的列车定位方法[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 144-149.
TAO Hanqing, CAI Xuan, WU Xinhui. Train positioning method based on GPS and ODO[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 144-149.

[15] 吴雪, 李莹, 高磊. 高速列车内装系统基准定位控制技术[J]. 机车车辆工艺, 2013(5): 23-24.
WU Xue, LI Ying, GAO Lei. Reference positioning control technology for high-speed train interior decoration system [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2013(5): 23-24.

收稿日期：2021-05-30
修回日期：2023-01-16