文章编号：1003-1421(2026)04-0097-09
引用格式：宋宗莹，张普，段宏海，等.基于列车动力学响应的群组列车跟随距离实时获取改进方法研究[J].铁道运输与经济，2026，48(4)：97-105.
SONG Zongying，ZHANG Pu，DUAN Honghai，et al. Improved Method for Real-Time Acquisition of Following Distance of Group Trains Based on Train Dynamic Responses[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：97-105.

基于列车动力学响应的群组列车跟随距离实时获取改进方法研究

宋宗莹[1]，张　普[2]，段宏海[3]，张庆铼[2]，徐化雨[3]，朱胜阳[2]

(1.中国神华能源股份有限公司 煤炭运输部，北京　100011；2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都　611756；3.国家能源投资集团有限责任公司 煤炭运输部，北京　100011)

摘　要：列车群组运行技术可有效缓解重载铁路运力短缺问题，实时获取列车跟随距离是实现该技术的关键前提之一。为此，提出一种基于列车动力学响应的群组列车跟随距离实时获取改进方法，可以根据群组内相邻列车动力学响应的相关性获取列车时距。为提高该方法的鲁棒性，设计了一套自适应修正策略以应对列车实际运营环境中的干扰因素。分别使用仿真数据和实际线路数据对方法进行了仿真验证，仿真结果表明，该方法在采用仿真数据和现场实测数据时计算得到的列车跟随距离均可达到较高的精度，同时设计的改进策略使得该方法具备极高的计算效率和优秀的抗干扰能力，可满足群组运行列车跟随距离获取的实时性要求，为发展重载列车群组运行技术提供参考。

关键词：列车跟随距离获取；重载群组列车；动力学响应；相关性分析；自适应策略
中图分类号：U296　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250227002

Improved Method for Real-Time Acquisition of Following Distance of Group Trains Based on Train Dynamic Responses

SONG Zongying[1]，ZHANG Pu[2]，DUAN Honghai[3]，ZHANG Qinglai[2]，XU Huayu[3]，ZHU Shengyang[2]

(1. Coal Transport Department, China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. Coal Transport Department, China Energy Investment Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: Train group operation technology can effectively alleviate the shortage of transportation capacity in heavy-haul railways. Real-time acquisition of the following distance between trains is one of the key prerequisites for implementing this technology. To this end, an improved method for real-time acquisition of group train following distance based on train dynamic responses was proposed, which obtained the train time interval according to the correlation of dynamic responses of adjacent trains in the group. To enhance the robustness of the method, an adaptive correction strategy was designed to cope with interference factors in the actual operation environment of trains. The method was validated through simulations using simulation data and actual line data, respectively.

收稿日期：2025-02-27　　**修订日期**：2026-01-28
通信作者：朱胜阳(1986—)，男，安徽宿州人，西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室研究员。
基金项目：国家能源投资集团有限责任公司科技创新项目资助项目(GJNY-22-7/2300-K1220053)；国家自然科学基金项目(52222217)

The results show that the calculated train following distances can achieve high accuracy when using both simulation data and field measured data. Moreover, the designed improved strategy makes the method possess extremely high computational efficiency and excellent anti-interference capability, which can meet the real-time requirements for group train following distance acquisition and provide a reference for the development of heavy-haul train group operation technology.

Keywords: Train Following Distance Acquisition; Heavy-Haul Group Train; Dynamic Response; Correlation Analysis; Adaptive Strategy

0　引言

随着铁路运输需求不断增加，现有铁路运输能力已经逐渐不能满足需求，铁路运输效率提升问题已迫在眉睫。群组运行是近年来兴起的一种列车运行控制技术[1-3]，可以有效缓解当前铁路运输的压力。其核心思想是令多列列车以编组的形式运行，通过车-车通信，实时获取并传递前后列车运行状态，调控后车跟随距离[4](即前后列车相对距离(RDT))，使列车组按照群组形式以较小的跟随距离运行，以减小运行间隔的方式提升列车运行效率。在群组运行模式下，随着列车运行间隔缩短，留给列车控制的时间裕度也大幅减少[5]，在这样的前提下能够快速、准确地获取RDT至关重要。

然而，对于列车间隔控制的既有研究主要集中在车-车通信[6]和列车自动驾驶技术(ATO)[7]，而作为核心要素的群组列车跟随距离的获取方法却鲜有研究。目前，列车均是通过前后绝对距离间接计算RDT，主流的列车定位技术包括里程计法、应答器定位、多普勒雷达测速定位和卫星导航定位技术等[8]。里程计法通过累计车轮转数计算列车行驶里程，实现群组列车测距，然而该方法存在历史累计误差，使得定位精度随运行距离增加而逐渐降低。地面应答器只能进行点式定位和测距，无法实时连续获取列车位置，且需沿线铺设，设备成本和运维成本较高[9]。雷达测速定位虽可以达到较高的计算精度，但通透性差，定位效果受环境影响[10]。卫星导航通过在车辆上安装全球定位系统(GPS)或全球导航卫星系统(GNSS)接收器，获取车辆的位置和速度信息，进而实现列车定位，然而在山区、隧道等特殊路段存在盲区，且信号容易受到环境因素影响，使得定位精度降低。我国铁路使用“差分卫星定位+车轮速度传感器”实现列车定位[11]，通过车载设备结合卫星定位信息和列车运行信息计算当前列车位置，并通过绝对距离间接计算跟随距离。这种方式传送位置信息需要地面配合建造复杂设备，建设运营维护成本较高，传送信息存在时延，且在障碍物遮挡的情况下会失效[12-13]。地下GNSS可以通过伪卫星基站模拟信号解决隧道定位问题，但部署复杂且成本高昂。上述列车定位方法均存在建设运营成本高，且受环境影响较大等缺点，因而亟需寻求一种轻量化的、受线路条件影响较小的列车定位技术。

已有学者对新型的群组列车跟随距离获取方法进行探索，Zhang等[14]提出一种轻量化的、基于列车动力学响应的群组列车跟随距离获取方法，可以在仅有加速度计、速度计的条件下快速准确获取列车跟随距离。该方法的基本原理是前后列车经过线路相同位置时会产生相似的振动响应形状，通过对比前后列车的响应数据，找出最匹配的响应区段，可以得到前后列车在当前线路位置的时距，由此可实时计算群组列车跟随距离。相比传统方法，Zhang等[14]所提出的群组列车跟随距离获取方法可在保证较高计算准确性的基础上，显著降低成本，且该方法受环境影响较小，因而本研究认为该方法有望成为主流的列车跟随距离获取方法之一。然而，Zhang等[14]所提方法存在计算效率较低的问题，难以满足群组列车实际运行过程中实时获取跟随距离的需求，因而需对该方法进行改进。

基于此，在Zhang等[14]研究的基础上，提出一种基于列车动力学响应的群组列车跟随距离实时获取改进方法。相较于现有列车定位测距方法，所提方法具备获取容易、建设成本低(仅需加速度计和速度计)且受线路环境影响较小等优点。本研究对原有方法的计算过程进行改进，并提出一种轻量化的自适应修正系统，使得该方法计算效率更高，可以满足群组运行列车跟随距离获取的实时性要求。

1　基于列车动力学响应的跟随距离实时获取原理分析

轨道随机不平顺是钢轨在高低和水平方向与钢轨理想位置几何尺寸的偏差，其幅值与轨道位置相关[15]。作为列车系统的主要激励源，轨道随机不平顺直接影响车辆运动响应，因此车辆动力学响应中隐藏着线路位置信息。观察发现，通过同一线路位置的车辆会产生相似的动力学响应，因此通过找出群组内前后列车动力学响应中的相似片段，即可确定前后列车到达该线路位置的时间间隔，并进一步确定当前群组列车跟随距离。

基于列车动力学响应的跟随距离实时获取方法主要包括3个步骤：响应数据截取、灰色关联分析和列车跟随距离计算。具体来说，首先采用车载速度计与加速度计获取群组内前后列车头车的运行速度和动力学响应，从中截取后车的一段响应数据片段，以及对应截取前车的一组响应数据片段。然后基于灰色关联分析方法，在前车截取的响应数据片段组中寻找与后车所截片段关联性最高的片段，并计算两者在时域上的差值ΔT。最后根据时间间隔ΔT和前车运行速度计算群组列车跟随距离RDT。

1.1　响应数据截取

为了高效、准确找出与后车响应数据关联性最高的前车数据片段，建立2个移动窗口分别置于前后车的动力学响应上，每次只使用窗口截取的数据开展关联分析。定义放置在后车响应数据上的窗口为基准窗口(BW)，放置在前车响应数据上的窗口为检索窗口(SW)。一次关联分析流程内，数据截取过程如下。BW截取一定宽度的后车响应数据，SW在前车响应数据上移动，每次移动都会截取当前窗口内数据，并与BW数据开展一次关联分析。完成一个检索流程后，BW沿着响应产生的方向移动一段固定距离Δx并截取新的数据，SW同样沿着响应产生的方向移动Δx后开启下一个检索流程，并重复上述流程。基于上述操作，可使得后车响应数据中每个区段的数据均遍历前车的整条响应数据，并与前车整条响应数据的每个区段均开展一次关联性分析，由此可寻找与后车所选区段关联性最强的前车动力学响应区段。

该方法中BW与SW的窗口宽度需保持动态变化，这是由于列车速度会对列车系统振动响应的几何形状产生较大影响。在相同的运行条件下，列车系统以较高的速度运行，动力学响应会产生较大的振动幅值，同时通过单位长度线路时间会变短。这使得相较于低速下的响应，高速下的响应形状会呈现在纵向方向上拉伸，在横向方向上压缩的情形，尤其是横向方向上的差异，会直接导致无法比较BW和SW内的数据。针对以上问题，分别为BW与SW设计动态窗口宽度。具体而言，根据群组列车中不同的前后列车速度，选择不同的BW与SW的窗口宽度，然后采用时空域转换的方法将两者转换到统一宽度比较。整个过程分为2个阶段：第1阶段建立动态变化的BW和SW窗口并截取数据，第2阶段利用时域里程变换将不规则时间宽度的时域响应变换到空间域。

第1阶段，为了比较在不同速度下的响应数据，需截取空间域下相同长度的数据。设置参数L_w作为BW和SW在空间域下统一的窗口宽度，则BW和SW窗口宽度的最小值$L_B^{\min}$，$L_{Si}^{\min}$计算公式为

$$\begin{cases} L_B^{\min} = \dfrac{L_w}{V_{B\max}} \\ L_{Si}^{\min} = \dfrac{L_w}{V_{f\max}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$V_{B\max}$，$V_{f\max}$为整个行驶过程中后车速度的最大值与前车速度的最大值，m/s。

采用积分法计算当前时刻BW和SW的窗口宽度L_B与L_{si}。以L_B的计算为例，初始L_{Bj}取最小值，计算该窗口宽度下所截区段速度对时间的积分$f(L_{Bj})$，并将积分值与L_w进行对比。若$f(L_{Bj})$小于L_w，则增大L_{Bj}至L_{Bj+1}并重复上述操作，直至积分值大于L_w，最终选择最接近L_w的L_{Bj}作为BW窗口的真实宽度L_B。同理，L_{si}的动态宽度同样通过上述流程计算得到。

第2阶段，根据列车速度将车辆系统的振动响应从时间坐标系变换到里程坐标系。由于列车速度与列车通过窗口的时间长度成反比，因此通过第1阶段计算得到的BW和SW窗口在时间域上不同，需要转化到同一长度才可以进行特征匹配。采用插值的方法，将BW和SW窗口内的数据转换为同一数据长度，使后续操作得以开展。

1.2　灰色关联分析

采用灰色关联分析方法对BW和SW窗口截取到的响应数据进行关联分析。灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线形状的相似程度判断其联系是否紧密。按照前一节介绍的检索框架，单位步长内，BW截取一段响应数据W_r，SW在每个检索位置分别截取一段响应数据W_{fi}，i=1，2，…，k，下标i表示检索窗口的编号，k表示检索范围。基于灰色关联分析方法，计算BW截取的响应数据W_r与SW截取的第i个响应数据W_{fi}的灰色关联度GRD_i计算公式为

$$GRD_i = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\delta(W_r(j),\ W_{fi}(j)) \tag{2}$$

$$\delta(W_r(j),\ W_{fi}(j)) = \frac{\min\limits_i \min\limits_j \left|W_r(j) - W_{fi}(j)\right| + \sigma \cdot \max\limits_i \max\limits_j \left|W_r(j) - W_{fi}(j)\right|}{\left|W_r(j) - W_{fi}(j)\right| + \sigma \cdot \max\limits_i \max\limits_j \left|W_r(j) - W_{fi}(j)\right|} \tag{3}$$

式中：J为检索窗口的宽度；σ为灰色关联度计算系数，一般取0.5。

遍历W_{fi}，可求得SW截取的每段前车响应数据对应的GRD_i值，并计算得到最大GRD_i对应的W_{fi}的编号i，基于此可计算BW与最大GRD_i对应的SW的时间间隔ΔT，此数值即为前后列车在当前位置处的时间间隔ΔT。

1.3　列车跟随距离计算

基于移动窗口检索和灰色关联分析方法计算得到前后车在当前位置处的时间间隔ΔT后，可以很容易地计算当前时刻群组列车跟随距离。在空间域上，BW和最大GRD_i对应的SW所截取动力学响应均产生于同一位置，即当前时刻后车所在线路位置。在时间域上，前车与后车到达该位置的时间相差ΔT。可以预见的是，当后车到达该位置时，前车已经继续前进了ΔT，因此此时前后车RDT为过去ΔT时间内前车行进的距离。因此D_{RDT}计算公式为

$$D_{RDT} = \int_{T-\Delta T}^{T} V_f \mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：T为当前时刻；V_f为前车速度，m/s。

2　改进的群组列车跟随距离实时获取方法分析

上述基于列车动力学响应计算列车跟随距离的方法计算效率较低，且仅可以在不受干扰的模拟环境中使用，无法应用到现实场景中，因此需要对该方法进行完善。本研究提出一种基于列车动力学响应的群组列车跟随距离实时获取改进方法，选择使用二分法计算BW与SW的窗口宽度以提高计算效率，并加入自适应修正系统以应对现实运行中的各种不确定因素。

2.1　基于二分法的动态窗口宽度计算

Zhang等[14]提出的列车跟随距离实时获取方法在计算BW与SW的窗口宽度时选用积分法，该方法需要从最小窗口宽度开始，对不同窗口下的列车速度开展多次积分计算，积分次数较多，无法快速定位到窗口的实际宽度，这使得该距离获取方法的计算效率较低。本研究提出一种基于二分法的动态窗口宽度计算方法，以L_B的计算为例，开始计算时，L_B的实际值一定存在于区间[a_0，b_0]中，a_0，b_0计算公式为

$$\begin{cases} a_0 = \dfrac{L_w}{V_{Bmax}} \\ b_0 = \dfrac{L_w}{V_{Bmin}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：V_{Bmax}，V_{Bmin}分别为整个行驶过程中后车速度的最大值与最小值，m/s。

取区间[a_0，b_0]的中值c_0，计算L_B取c_0时窗口所截区段速度对时间的积分$f(c_0)$并与L_w对比，由此得到新定位区间[a_1，b_1]，区间端点值计算公式为

$$\begin{cases} \begin{cases} a_1 = a_0 \\ b_1 = c_0 \end{cases} & f(c_0) \geqslant L_w \\ \begin{cases} a_1 = c_0 \\ b_1 = b_0 \end{cases} & f(c_0) < L_w \end{cases} \tag{6}$$

取区间[a_1，b_1]的中值c_1，并重复以上操作直至$b_n - a_n$=1，分别计算$f(a_n)$与$f(b_n)$，选取与L_w最接近的边界值作为L_B的真实值。相较于积分法，二分法可以快速定位L_B所在位置，大幅增加收敛速度，减少积分次数，增加算法计算效率。

2.2　自适应修正系统

现实场景中列车运行还会受到多种不确定因素影响，除车辆参数(如编组长度、载重等)、随机噪声、环境影响、测量误差外，轮轨养护状态相关干扰(如轨道磨损、轨道波磨、车轮多边形等)也是关键影响因素。这些因素都会不同程度地影响列车动

力学响应的形状，使得真正帮助特征匹配的波形被淹没。因此，在使用灰色关联分析方法进行特征匹配时，这些因素导致的响应波形改变可能会让搜索范围内产生多个相似的错误匹配，最终导致计算结果中产生异常值。由于不确定因素种类繁多，且难以量化对响应波形的影响，因此不可能彻底从来源去除这类不确定性因素，本研究设计了一种轻量化的、从计算结果中去除异常值的方式。

基于RDT变化是连续的这样一个基本事实，且较短的时间内变化幅度有限，因此可以通过遍历计算结果，与自身附近小范围内数值比较后，判断是否为异常点。具体操作是将上述方法计算得到的RDT，划分为数据长度为d的若干片段，依次对片段里的每个值进行检验，自动找出异常点并用新的数据替代。定义当检查点的值S_i满足式(7)时，该点视为异常点。

$$\left|S_i - S_{\text{mean}}\right| \geqslant k \cdot S_{\text{std}} \tag{7}$$

式中：S_{mean}为当前片段数据的平均值；S_{std}为当前片段数据的标准差；k为异常值阈值。

找出异常点所在位置后用前后正常数据的值替代，异常点替代值$S_{i\text{New}}$计算公式为

$$S_{i\text{New}} = \begin{cases} S_{i+m} & i = 1;\ m = 1,\ 2,\ \ldots,\ d-i; \\ & n = 1,\ 2,\ \ldots,\ i-1 \\ \left(S_{i+m} + S_{i-n}\right)/2 & 1 < i < d; \\ & m = 1,\ 2,\ \ldots,\ d-i;\ n = 1,\ 2,\ \ldots,\ i-1 \\ S_{i-n} & i = d;\ m = 1,\ 2,\ \ldots,\ d-i; \\ & n = 1,\ 2,\ \ldots,\ i-1 \end{cases} \tag{8}$$

式中：S_{i+m}为异常点右侧第1个非异常点的值；S_{i-n}为异常点左侧第1个非异常点的值。

3　仿真分析

3.1　仿真数据验证

3.1.1　仿真数据

为了验证方法的可靠性，使用我国重载列车运行仿真数据进行模型验证。基于多刚体动力学理论，采用多体动力学软件建立群组列车动力学模型。模型包括前后2个编组，每个编组均采用1台HXN3内燃机车与3辆C_{80}货车的组合，重载列车动力学模型如图1所示。分别选择2台机车前转向架第一轮对左侧轴箱垂向加速度作为仿真数据，采样



图1　重载列车动力学模型

Fig.1　Dynamics model of heavy-haul train

频率均设置为100 Hz。

选用轴箱加速度信号主要原因如下。一是信号敏感性强。轴箱直接承受轮轨垂向载荷，能实时精准反映轮轨接触状态与列车运行姿态，相较受悬挂滤波、动态响应滞后的车体加速度，其对列车间相对运动特征捕捉更灵敏。二是工程可获取性高。该信号运行中稳定可测，低成本传感器即可获取。三是动力学关联性好。轴箱垂向加速度能有效体现前后列车轮轨激励经轨道结构产生的间接耦合，为后续特征相关性分析提供稳定物理基础。此外，轮轨垂向力、钢轨垂向位移等信号虽有潜力，但前者需特殊测力轮对，成本高且维护难，钢轨位移需密集布设传感器，影响轨道完整性；车体横向、构架垂向加速度或受结构振动干扰，或关联性弱，性价比与精度均不及轴箱垂向加速度信号[15-17]。

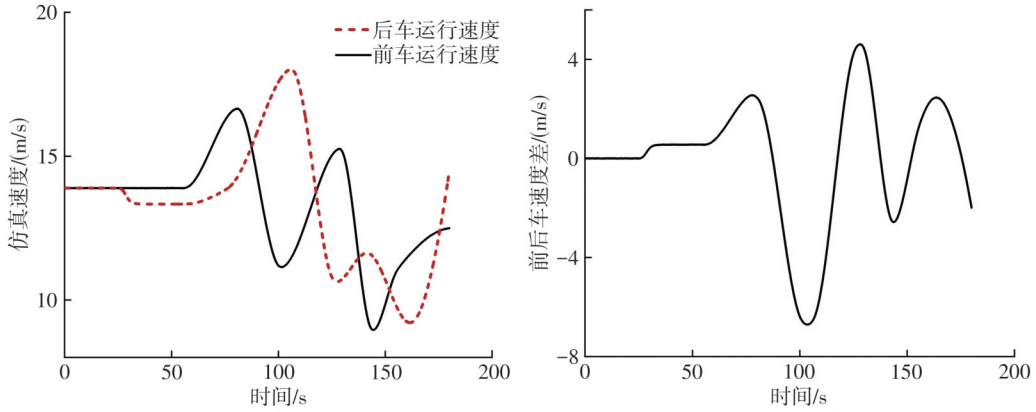
仿真速度如图2所示，对模型施加美国铁路5级随机轨道不平顺，动力学响应仿真结果如图3所示。

3.1.2　RDT计算

基于图3所示的列车动力学响应仿真结果，采用改进的群组列车跟随距离实时获取方法，开展RDT计算。RDT仿真结果如图4所示。由图4可知，在仿真环境下，本研究提出的方法具有较高的计算精度，RDT最大相对误差(MRE)为0.81%，均方根误差(RMSE)为0.51 m，平均相对误差(ARE)低至0.18%。

为了更贴近列车实际运行环境，并评估本研究提出的方法在不确定性条件下的性能，在上述仿真得到的列车动力学响应数据中引入信噪比为50%的高斯白噪声，以模拟实际运行中可能出现的各种干扰因素。重新开展RDT仿真计算，加入噪声后的RDT计算结果如图5所示。

由图5可知，受到噪声影响，本研究提出的方法在部分区段的识别性能有所下降，表现为部分区段产生异常值，分析其主要原因是该部分区段的动

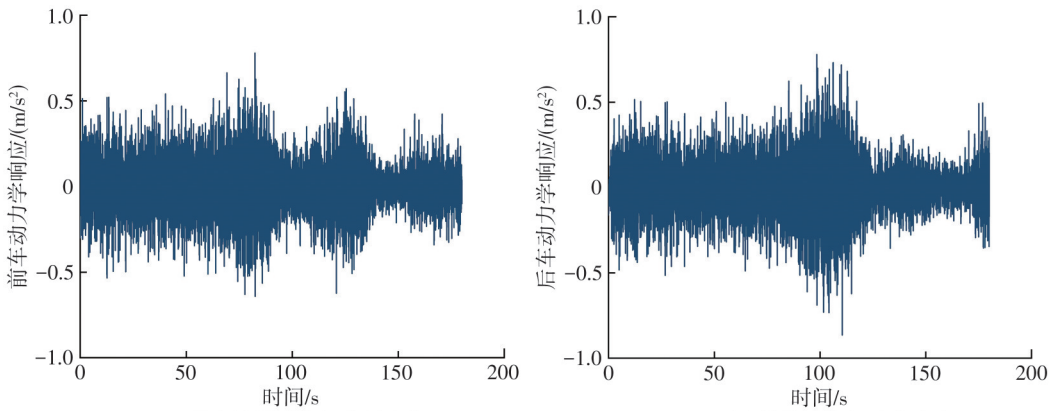


a　前后列车运行速度
a　Front and rear train speed

b　前后列车速度差
b　Difference between front and rear train speed

图2　仿真速度

Fig.2　Simulation speed



a　前车轴箱垂向加速度响应
a　Vertical acceleration response of front axle box

b　后车轴箱垂向加速度响应
b　Vertical acceleration response of rear axle box

图3　动力学响应仿真结果

Fig.3　Dynamic response simulation results

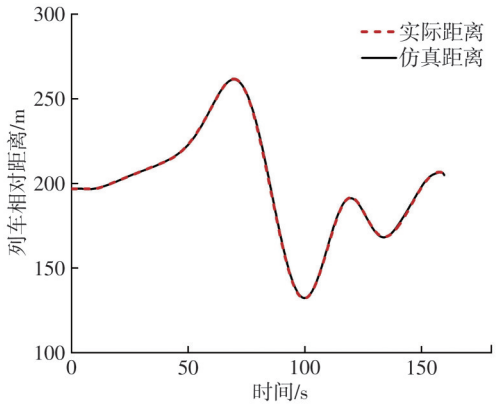


图4　RDT仿真结果

Fig.4　RDT simulation results

力学响应数据中，用于识别的关键特征形状被高斯白噪声所掩盖，从而影响了识别的准确性。定量分析结果表明，加入信噪比为50%的高斯白噪声后MRE增加至7.8%，RMSE增加至1.54 m，ARE增加至0.29%。

针对上述加入噪声后RDT计算结果中出现的异常值，采用自适应修正系统对异常值进行修正处理，对异常值处理后的RDT计算结果如图6所示。通过对比图5和图6可以直观地展现出自适应修正系统发挥的作用。结果表明，所建立的自适应修正系统可以有效去除异常值，修正后的RDT计算结果能够恢复到较高的计算精度，具体表现为：MRE减小至0.76%，RMSE减小到0.5 m，ARE减小到0.19%，与未添加噪声时的计算精度相近。这一结果有力地证明了改进的群组列车跟随距离实时获取方法具备优秀的计算精度，并且所设计的自适应修正系统能够有效地抑制由不确定性因素引起的异常值，从而提高方法的鲁棒性和可靠性。

为了进一步验证改进的群组列车跟随距离实时

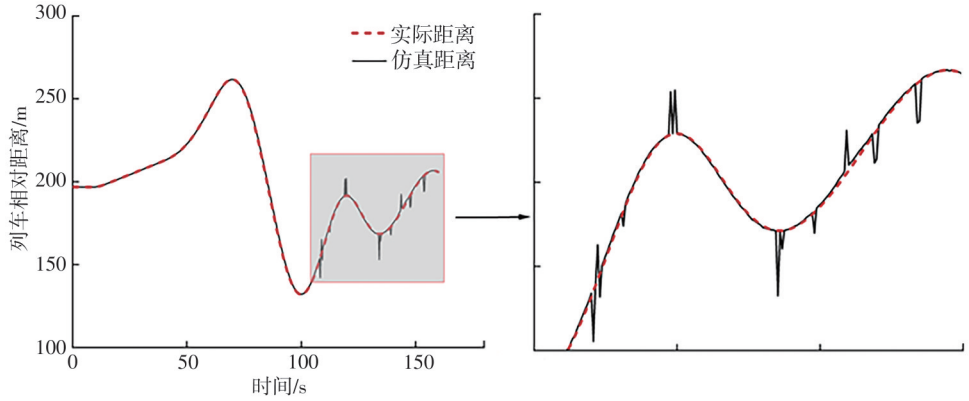


图5　加入噪声后的RDT计算结果

Fig.5　RDT calculation results after adding noise

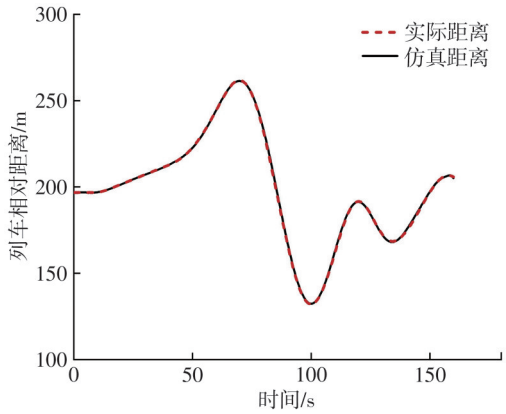


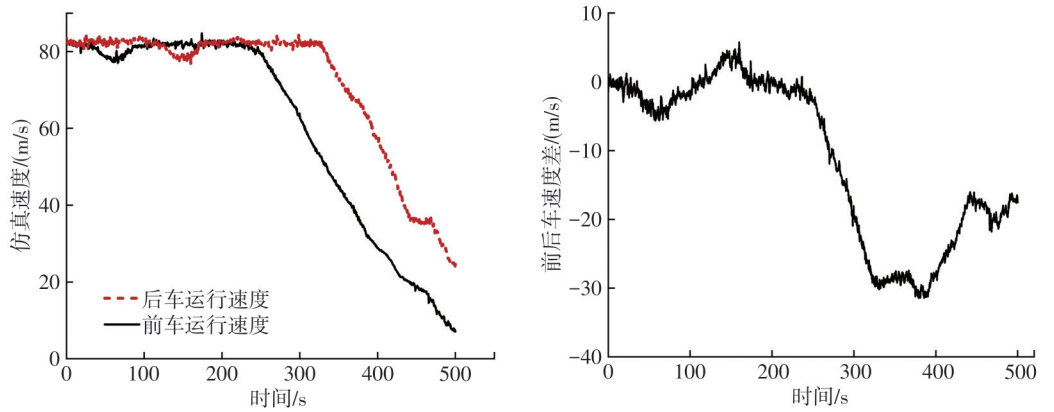
图6　对异常值处理后的RDT计算结果

Fig.6　RDT calculation results after processing outliers

获取方法的可靠性，以及在计算效率方面的优势，与Zhang等[14]的研究成果进行对比分析。使用相同仿真数据与计算参数，从计算精度和仿真时间2个维度进行全面对比评估。结果表明，2种方法在去除异常值方面均达到了令人满意的结果，具体而言，去除异常点后，ARE分别为0.76%，0.83%，MRE分别达到0.19%，0.15%。在计算效率方面，本研究提出的方法明显优于Zhang等[14]所提方法，整个案例仿真在移动步长取30 m的条件下，采用Zhang等[14]所提方法计算整段2 400 m线路RDT并去除坏点所需计算时间为28.01 s，而采用本研究提出的改进方法所需计算时间为8.34 s，相对计算时间减少70.2%。更高的计算效率不仅保障了该方法实时计算的能力，也为后续进一步改进方法留出较大的时间裕度。

3.2　实测数据验证

为了验证本研究所提方法在现实运行环境中的表现，选择一组我国高速铁路现场实测数据开展仿真。在此不对响应数据进行预处理，以此检验该方法在未经优化的现实环境中的有效性和鲁棒性。列车实测数据仿真速度如图7所示。



a　前后列车速度曲线

a　Front and rear train speed curve

b　前后列车速度差

b　The speed difference between the front and rear trains

图7　实测数据仿真速度

Fig.7　Simulation speed of measured data

实测数据RDT计算结果如图8所示。结果表明，基于未经处理的实测线路计算RDT时，MRE为2.67%，RMSE为61.39 m，ARE为1.004%。上述误差指标相较于模拟工况下的结果略微增大，这一现象的主要原因在于实际列车运行环境的复杂程度远超实验室模拟环境，其间充斥着更多难以预测和控制的不确定性因素。线路的实际状况(如轨道不平顺、线路几何偏差等)、环境因素(如风力、温度变化等)及列车运行状态的波动等，都可能对RDT计算的精度产生影响。但从整体误差水平来看，本研究所提方法在实测数据上的表现仍然令人满意，证明了该方法在现实场景中同样具备良好的适用性和有效性，可为群组运行列车跟随距离获取提供支持。未来，将进一步结合包神铁路重载列车群组运行现场测试结果强化该方法的适应性。同时，针对编组长度影响振动传递特性、载重改变轮轨载荷的情况，分析表明其对该方法的影响可控，优化自适应修正系统模块是解决该问题的关键途径。

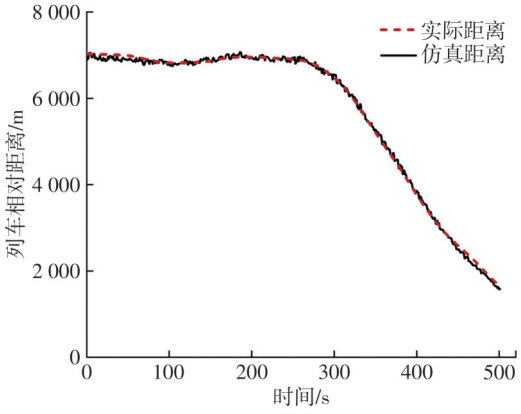


图8　实测数据RDT计算结果

Fig.8　RDT calculation results for measured data

4　结论

（1）改进的RDT实时获取方法，在采用仿真数据和现场实测数据时均具有极高精度和抗干扰能力。使用加入信噪比为50%的高斯白噪声的仿真数据，计算结果与真实结果MRE不超过0.76%，RMSE收敛到0.5 m，ARE达到0.19%，与未加入噪声时的精度相近。使用未经处理的我国高速铁路现场实测数据，MRE为3.28%，RMSE为65.05 m，ARE为2.08%，计算精度达到群组运行技术要求，可为提升重载铁路运输能力提供技术支持。

（2）改进的RDT实时获取方法，具备极高的计算效率。计算长度为2 400 m线路上的前后列车RDT，所需计算时间为8.34 s，相较于Zhang等[14]所提方法，计算效率提升了70.2%，证明了改进的RDT实时获取方法具备更优秀的计算效率，可满足群组运行列车跟随距离获取的实时性要求。

参考文献：

[1] 张　淼，何仪娟，杨博宇，等. 基于LSTM-KF模型的高速列车群组追踪运行轨迹预测方法[J]. 交通运输工程学报，2024，24(3)：296-310.
ZHANG Miao，HE Yijuan，YANG Boyu，et al. Trajectory Prediction Method for High Speed Train Group Tracking Operation Based on LSTM-KF Model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2024，24(3)：296-310.

[2] 宋宗莹，胡　灿，白志军，等. 重载机车异质群组操纵特性建模与协同控制[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：2066-2075.
SONG Zongying，HU Can，BAI Zhijun，et al. Operation Characteristics Modeling and Cooperative Control of Heavy-Haul Heterogeneous Locomotives[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(5)：2066-2075.

[3] 程　育，阴佳腾，杨立兴，等. 考虑灵活编组变换的城轨列车群组运行图和车底接续协同优化[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(4)：1506-1518.
CHENG Yu，YIN Jiateng，YANG Lixing，et al. Collaborative Optimization of Urban Rail Train Group Schedules and Rolling Stock Circulation Considering Flexible Train Composition[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(4)：1506-1518.

[4] 康随武. CBTC列车追踪间隔的研究与优化[D]. 兰州：兰州交通大学，2014.

[5] STICKEL S，SCHENKER M，DITTUS H，et al. Technical Feasibility Analysis and Introduction Strategy of the Virtually Coupled Train Set Concept[J]. Scientific Reports，2022，12：4248.

[6] 许　镇，尤瑞君，杨　森，等. 基于车车通信的移动闭塞制式下列车追踪距离控制研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：118-123，140.
XU Zhen，YOU Ruijun，YANG Sen，et al. Train Headway Control in Moving Block Mode Based on Train-to-Train Communication[J]. Railway Transport and Economy，2024，

46(5)：118-123，140.

[7] 华润恺，于逸尘，李纪元. 基于改进遗传算法的列车自动驾驶规划速度曲线生成研究[J]. 交通科技与管理，2024，5(8)：18-21.

[8] 赵　颖，罗　浩，柳青红，等. 列车超视距信息推送策略与关联算法研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(10)：127-132.
ZHAO Ying，LUO Hao，LIU Qinghong，et al. Train Over-the-Horizon Information Push Method and Correlation Algorithm[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(10)：127-132.

[9] 靳洪都. 高速铁路列车追踪接近预警系统车载设备研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.

[10] 张　梁. 列车组合测速定位方法及其安全评估研究[D]. 上海：上海交通大学，2018.

[11] 张志豪，汪　洋. 基于5G网络车车通信的列车接近预警系统研究[J]. 铁道通信信号，2022，58(11)：1-7.
ZHANG Zhihao，WANG Yang. Research on Train Approach Early Warning System Based on 5G Network Train-Train Communication[J]. Railway Signalling & Communication，2022，58(11)：1-7.

[12] 程剑锋，冯　凯，孙文哲. 基于车车通信的铁路列车控制系统技术研究[J]. 中国铁路，2021(1)：79-84.
CHENG Jianfeng，FENG Kai，SUN Wenzhe. Technical Research on Railway Train Control System Based on Vehicle-to-Vehicle Communication[J]. Chinese Railways，2021(1)：79-84.

[13] MARAIS J，BEUGIN J，BERBINEAU M. A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2017，18(10)：2602-2618.

[14] ZHANG Q L，GAO J M，WU Q，et al. A Novel Vibration-Based Self-Adapting Method to Acquire Real-Time Following Distance for Virtually Coupled Trains[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica，2025，12(1)：27-39.

[15] ZHOU Y K，CHEN Q J，WANG R S，et al. Onboard Train Localization Based on Railway Track Irregularity Matching[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2022，71：9501013.

[16] 刘仁哲，王红兵，陈是扦，等. 变速工况下重载机车车轮多边形识别方法研究[J]. 机械工程学报，2024，60(24)：244-253.
LIU Renzhe，WANG Hongbing，CHEN Shiqian，et al. Research on Wheel Polygon Recognition Method of Heavy-Haul Locomotive under Variable-Speed Condition[J]. Journal of Mechanical Engineering，2024，60(24)：244-253.

[17] 张　航，卢春房，高　亮. 基于波噪比的高速铁路钢轨波磨快速检测方法[J]. 铁道学报，2024，46(4)：1-8.
ZHANG Hang，LU Chunfang，GAO Liang. Rapid Detection Method for Rail Corrugation in High Speed Railways Based on Corrugation-Noise Ratio[J]. Journal of the China Railway Society，2024，46(4)：1-8.

(责任编辑　李丹丹)