

基于 PELT 与稳健估计的高速铁路曲线控制点识别方法

谢智峰¹, 魏 晖^{1,2}, 朱洪涛³, 杨 飞⁴, 吴仕凤⁵, 赵琳渊⁵, 李 昌⁵

(1. 江西科技学院协同创新中心, 南昌 330098; 2. 江西省铁路大数据技术开发与应用工程研究中心, 南昌 330098;
3. 江西日月测控科技股份有限公司, 南昌 330096; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所, 北京 100081;
5. 中国铁路南昌局集团有限公司南昌高铁基础设施段, 南昌 330103)

摘要:为能在天窗作业条件下准确掌握高速铁路曲线状态,并为之后的维修作业提供依据,利用部分轨道内部几何参数与曲线控制点存在映射关系,设计了一种基于相对测量数据的高速铁路曲线控制点识别方法。首先,计算并比较不同类型轨道内部几何参数的信噪比,优选出线形特征较明显的水平(超高)参数作为识别方法的输入数据;其次,依据高速铁路曲线线形类型及输入数据的特征,设置 PELT 搜索算法的目标函数及识别策略,实现水平(超高)数据的概略分割与曲线控制点初次识别;然后,对概略分割的水平(超高)数据进行分段线性稳健估计,实现变点里程的精确估计与曲线控制点二次识别,以减小异常数据对识别精度影响;最后,基于模拟和某试验线的水平(超高)数据,验证了识别方法在蒙特卡洛仿真实验中的正确性及实测应用中的有效性。仿真实验结果显示,受检信号信噪比不小于 40.09 dB 时,控制点识别总误差估计为 0.26 m;实测实验结果显示,往返数据识别误差 ≤ 1.346 m,而单程数据识别误差一般不大于 0.2 m,识别结果具有较高的重复性。由于识别数据来源于轨道内部几何参数,避免了外部几何参数的测量,因此具有较高的效率,可用于高铁日常轨道质量评价并为轨道维修作业提供依据。

关键词:高速铁路; 曲线控制点识别; PELT 搜索算法; 蒙特卡洛方法; 稳健估计

中图分类号:U238; U216.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202406190007

High-Speed Railway Curve Control Point Identification Method Based on PELT and Robust Estimation

XIE Zhifeng¹, WEI Hui^{1,2}, ZHU Hongtao³, YANG Fei⁴, WU Shifeng⁵, ZHAO Linyuan⁵, LI Chang⁵

(1. Collaborative Innovation Center, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China; 2. Railway Big Data Technology Development & Application Engineering Research Center of Jiangxi Province, Nanchang 330098, China; 3. Jiangxi Everbright Measurement and Control Technology Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 4. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 5. Nanchang Division of HSR, China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 330103, China)

Abstract: In order to accurately grasp the curve status of a high-speed railway under maintenance window conditions and provide a basis for the subsequent maintenance operations, a method of identifying the curve control points of high-speed railway based on relative measurement data was designed by utilizing the mapping relationship between some of the internal geometric parameters of the railway track and curve control points. Firstly, the signal-to-noise ratio (SNR) of the internal geometric parameters of different

types of the railway track was calculated and compared, and the horizontal (superelevation) parameters with more obvious alignment characteristics were selected as the input data of the identification method. Secondly, according to the alignment type of the high-speed railway curve and the characteristics of the input data, the objective function and identification strategy of the

收稿日期:2024-06-19; 修回日期:2024-07-26; 网络首发日期:2024-12-10

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFB2602905);国家自然科学基金项目(52278465, 52068052);江西省自然科学基金项目(20202BABL204056);江西省重大科技研发专项(20203ABC28W008);江西省汽车服务工程及产业升级协同创新中心开放基金(232KFJJ04)

作者简介:谢智峰(1993—),男,讲师,2019年毕业于南昌工程学院动力工程专业,工学硕士,主要从事数据挖掘与算法优化研究工作, E-mail: xiezhifeng_jxut@163.com。

通信作者:魏 晖(1975—),男,教授,工学博士,主要从事轨道平顺性表征与控制研究工作, E-mail: weihui@163.com。

PELT search algorithm were set to realize the rough segmentation of the horizontal (superelevation) data and the initial identification of curve control points. Then, the segmented horizontal (superelevation) data were subjected to piecewise linear robust estimation to achieve accurate estimation of change-point mileage and secondary identification of curve control points, so as to reduce the influence of abnormal data on identification accuracy. Finally, based on the simulation and the horizontal (superelevation) data of a test line, the correctness of the identification method in the Monte Carlo simulation experiment and its effectiveness in field application were verified. The results of simulation experiments showed that when the SNR of the detected signal was not less than 40.09 dB, the total error of the control point identification was estimated to be 0.26 m. The results of field experiments showed that the identification error of round-trip data was no greater than 1.346 m, while the identification error of one-way data was generally not more than 0.2 m, and the identification results showed high repeatability. Since the identification data are derived from the internal geometric parameters of the railway track, the method demonstrates efficiency and can be used in the daily track quality evaluation of high-speed railways as well as providing a basis for track maintenance operations.

Key words: high-speed railway; curve control point identification; PELT search algorithm; Monte Carlo method; robust estimation

引言

铁路轨道中线是一条低阶几何连续曲线,线形包括直线、圆曲线及缓和曲线^[1]。在高速行车条件下轨道线形条件将对列车动力响应以及乘车舒适性产生影响^[2-5],因此应在轨道设计中合理地设置线形参数并在轨道运营中保持线形的稳定。然而在列车重复的动力作用下,轨道变形将不断积累,设计的线形可能被破坏^[6]。此时,应对轨道进行质量评价与整正作业,以保持轨道良好的服役状态。

轨道评价与作业需要构造轨道的目标线形,而构造目标线形的前提是合理地识别曲线特征点并分割轨道观测数据。因此,TG/GW115—2023《高速铁路线路维修规则》要求“曲线直缓(缓直)点、缓圆(圆缓)点处应设标识,现场曲线始终点、缓和曲线长度、曲线全长、曲线半径、实设超高均应与设计文件保持一致”^[7]。曲线控制点可提供轨道线形的关键描述,然而由于轨道建设施工误差与轨道检查里程误差,使得上述控制点不可避免地与实际轨道状态存在偏差。

为从观测数据中提取目标线形,LIU等^[8]提出一种轨道图生成与车载系统集成的范式,用于完整性地图精度匹配,实验表明其有助于在铁路应用和服务中实现卫星导航;GARACH等^[9]提出一种利用实地UTM坐标数据识别道路形态及其曲率的方法,用于重构道路的几何形状,实验结果验证了其方法在不同道路类型取得了较好的识别效果;高鸿剑等^[10]利用小波去噪方法解决平面线形重构中准确测点归属与分段问题,有效减少拨量,提高了铁路运营的安全性和效率;缪鹏

等^[11]将改进粒子群算法应用于多组既有线曲线进行整正计算,满足了整数化和控制点拨距限制,极大简化了识别过程;马洪磊等^[12]使用选权迭代法检测并剔除既有铁路平面线形中含粗差测点,实现无需精确分组的可靠线形拟合及参数估值;LI等^[13]结合遗传算法,提出一种摆动迭代的方法,用于精准识别直线、曲线边界,实现轨道平顺化,适配重建线路,实验效果显著;陶维杰等^[14]利用基于方位角的曲率方法和整体最小二乘的方法实现数字轨道地图的平面线形特征提取,其识别精度满足应用的要求;SONG等^[15]通过设计分布比率序列来描述点配置,验证了其在点沿一定弧线受限时比其他任意配置表现更好;SONG、PU等^[16-17]从水平线形重建(Horizontal Alignment Reconstruction)的角度分别构造基于坐标观测值的线形分割方法,但坐标观测往往需要采用绝对测量方式进行,而轨道测量仪的数据采集效率一般 ≤ 100 m/h,天窗内要完成曲线测量存在一定困难。相较于绝对测量,综合检测列车动态测量与轨道检查仪相对测量有着较高的数据采集效率,因此目前高铁轨道质量评价多以动态测量与相对测量方式完成。由于采用惯性测量,因此其线形分割或控制点识别难以沿用水平线形重建方法。基于综合检测列车,李颖^[18]、程朝阳^[19]以曲率的DP(Douglas-Peucker)算法为基础构造了曲线特征点识别方法,并用于曲线半径及全长的估计;基于轨道检查仪,殷华^[20]利用SVD对正矢不平顺滤波,并以稳健回归减少离群值导致的控制点拟合偏差,但精度依赖于分段点选择;熊丽娟^[21]则通过对正矢与方位角的Hough变换与稳健估计,实现 ≤ 3.6 m的控制点识别精

度。

轨道检查仪可以 2~8 km 时速连续且精确地采集轨向、正矢、高低、水平(超高)、轨距、轨距变化率及扭曲等内部几何参数,并兼具较好定位精度,可实现天窗作业条件下的曲线状态数据采集。但要进一步保障高铁既有线的曲线质量,还需解决相对测量数据的线形分割问题。因此,本文围绕相对测量中的曲线控制点精确识别问题,从线形特征出发,筛选对线形敏感的内部几何参数作为输入变量;然后构造基于统计变异性的变点检测方法来搜索线形控制点,并依据线形属性对输入数据进行概略分割;对分割数据进行估计,实现存在异常观测值情况下的线形控制点精确识别;最后,通过 Monte Carlo 方法及实测数据,检验估计的质量。

1 线形特征及输入变量筛选

1.1 线形特征及控制点

高铁轨道的平面线形可用缓和曲线长 l_0 、圆曲线半径 R 与转向角 α 等线形参数,以及直缓(ZH)、缓圆(HY)、圆缓(YH)、缓直(HZ)等相应的控制点来描述,并由横(垂)向偏差等外部几何参数与曲率、轨向(正矢)、水平(超高)等内部几何参数来表征、测量与控制。依据曲率 K 的特征,直线线形 $K=0$,圆曲线线形 $K=1/R$,而缓和曲线 K 则为变量^[22]。我国铁路线路

平面的直线与圆曲线间采用缓和曲线连接,而缓和曲线采用三次抛物线线形^[1]并直线顺坡。依据方位角特征,直线线形的方位角为一定值,圆曲线线形的方位角则线性递增或递减,缓和曲线线形的方位角呈二次抛物线变化^[15]。

此外,以中点弦测法定义的轨向或正矢,由其定义式可知,其可直接表征轨道里程方向的二阶导数或曲率^[23],因此不同线形的轨向或正矢特征与曲率 K 相似;考虑到我国缓和曲线纵断面的超高顺坡一般采用直线型顺坡,因此,不同线形的水平(超高)特征也与曲率或轨向、正矢相似,即呈现一种多变点的线性结构,其中变点即为曲线控制点。

1.2 控制点识别输入变量筛选

显然,水平(超高)与轨向、正矢等的波形均能体现线形特征,但不同输入对变点检测效果有着显著的影响,线形特征明显的输入有望得到更优的检测结果。本文利用信噪比 SNR(Signal-to-Noise Ratio)衡量不同参数的线形特征显著程度。如将设计文件确定的变量作为信号 S ,而将采集的偏差 N 作为噪声,分别对水平(超高)与轨向、正矢等的波形计算信噪比,选择信噪比最高的参数作为多变点线性模型的输入变量。图 1 为某实测数据样本中不同内部几何参数的信噪比估计,因此选择水平(超高)作为多变点线性模型的输入变量。

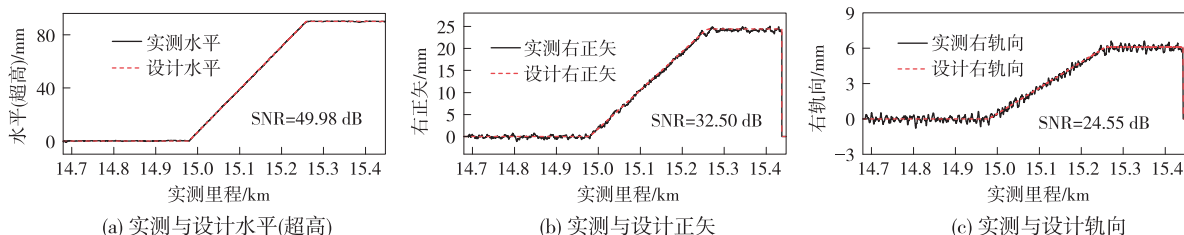


图 1 不同内部几何参数的信噪比估计

Fig. 1 Estimation of SNR for different internal geometric parameters

2 变点检测及控制点里程估计

变点检测(Change Point Detection, CPD)^[24]是一种搜索并识别一个受系统性因素而非偶然性影响发生显著性变化的信号突变情况的方法。该方法可以帮助研究者分析某种系统的简单或复杂的潜在状态转移与变化,已广泛应用于图像、语音和生物信息学等工程领域。依据数据采集方式、处理流程及决策需求等因素,CPD 变点检测方法分为实时 CPD 和离线 CPD 变点检测。它们区别在于,在线 CPD 变点检测要求能够实时搜索并识别序列化中的变点,对实时性要求高;离线 CPD 变点检测是对历史序列化数据进行回顾性搜索

并识别变点,对实时性无要求。因此,控制点里程估计可采用离线 CPD 变点检测算法,用于识别铁路轨道曲线控制点。在搜索变点的过程中,可以通过修剪规则加快变点搜索效率,同时迭代计算区间中所有变点集构建的路径搜索代价,定位变点所在位置,用于区分由变点分割的不同区间。

2.1 PELT 搜索算法

PELT(Pruned Exact Linear Time)搜索算法是一种基于动态规划和修剪技术的变点检测算法^[25],可以用于识别与定位信号中的变点。PELT 搜索算法按照设定的步长和跳跃因子,在起始点和终止点区间内依次遍历每个点,生成包含多个子区间的多条路径。通过

计算与比较起始点到终止点区间多条路径的搜索代价,选择搜索代价最小的一条路径作为当前最优路径;依据修剪规则删除不符合要求的点,再进行下一轮迭代搜索,从而提高搜索效率;重复迭代更新直至最后一个点,得到全局最优路径,其起始点到终止点之间的节点即为变点。

2.1.1 搜索代价

给定一组信号 Y , 搜索域为 $[0, 1, 2, \dots, T]$ 。如果从该信号 Y 中采样一段子信号区间 $[a, b]$ ($0 < a < b < T$), 则子信号可表示为 $\{y_i\}_{i=a}^b$ 。假定信号 Y 存在 $K+1$ 个非同质性子区间信号, 则整个信号区间存在 K 个变点, 变点集设置为 $\Omega = \{t_1, t_2, \dots, t_{k-1}, t_k\}$ 。依据定量准则^[26], 求解信号 Y 的最佳变点位置, 可转换为优化问题, 数学模型定义见式(1)。

$$V(\Omega, y) = \sum_{k=0}^K c(y(t_k) : y(t_{k+1})) \quad (1)$$

式中, $c(\cdot)$ 为用于测量的子信号 $y(t_k) : y(t_{k+1})$ 拟合度的代价函数。

为了高效搜索信号中的变点位置, 针对信号 Y 变点离散复杂情况, 使用惩罚系数动态控制候选变点数, 寻找最优变点位置, 使得模型效率高和代价低, 数学模型定义见式(2)。

$$c(\Omega, y) = \min V(\Omega, y) + \eta \quad (2)$$

式中, η 为惩罚系数, 表征信号离散复杂程度。

使用线形拟合任意两变点 $t_k : t_{k+1}$ 之间的信号点, 数学模型定义见式(3)。

$$\begin{cases} f(t) = \alpha_k(t - t_k) + \beta_k \\ \alpha_k = \frac{y_{t_{k+1}-1} - y_{t_k-1}}{t_{k+1} - t_k} \\ \beta_k = y_{t_k-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $t = t_k, t_k + 1, \dots, t_{k+1} - 1$ 为任意两变点 $t_k : t_{k+1}$ 之间的所有信号坐标点 (但不包括坐标点 t_{k+1}); α_k, β_k 分别为斜率和截距。

当使用式(3)拟合任意两变点 $t_k : t_{k+1}$ 之间的信号点时, 则实际信号和拟合信号之间的 2 范数可以作为代价函数, 数学模型定义见式(4)。

$$c(y(t_k) : y(t_{k+1})) = \sum_{t=t_k}^{t_{k+1}-1} \|y_t - \beta_k - \alpha_k \cdot (t - t_k + 1)\|^2 + \eta \quad (4)$$

式中, $c(y(t_k) : y(t_{k+1}))$ 为任意两变点 $t_k : t_{k+1}$ 之间的代价函数。

2.1.2 搜索策略

为了搜索与识别信号 Y 的所有变点位置, 设置搜索步长因子为 s , 跳跃因子 j 。依据跳跃因子和步长因

子的值, 可以计算出初步的候选变点集 Ω , 计算规则见式(5)。

$$\begin{cases} \Omega_1 = \{0, j, 2j, \dots, mj\} & (m = 0, 1, 2, \dots, (T/j) - 1) \\ \Omega_2 = \{0, j, 2j, \dots, nj\} \\ & (n = 0, 1, 2, \dots, (T/j - 1, nj < s)) \\ \Omega_3 = \{T\} \\ \Omega = (\Omega_1 - \Omega_2) \cup \Omega_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, 步长因子和跳跃因子取值范围为 $[1, T]$ 。

依次从集合 Ω 中取出候选变点记作 τ_i 使用, 当前获取的候选变点 τ_i 计算新候选变点 τ_{new_i} , 计算规则见式(6)。

$$\tau_{\text{new}_i} = \text{floor}((\tau_i - s)/j) \cdot j \quad (6)$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数。

计算得到新候选变点 τ_{new_i} 并加入新候选变点集 Ω_{new} , 使用公式(4)计算新候选变点 τ_{new_i} 至当前候选变点 τ_i 之间代价, 记作 $c(y(\tau_{\text{new}_i}) : y(\tau_i))$ 。每次迭代过程中, 会累计产生 $\text{size}(\Omega_{\text{new}})$ 个新候选变点, $\text{size}(\cdot)$ 用于求解集合元素个数, 则会存在 $\text{size}(\Omega_{\text{new}})$ 条从起点-新候选变点-当前候选变点组成的代价路径, 记作 $P(\tau_i)$ 。依据最小代价原则, 当前候选变点 τ_i 最佳路径代价计算规则见式(7)。

$$c(y(0) : y(\tau_i)) = \min P(\tau_i) \quad (7)$$

为了提高搜索变点效率, 需要对当前候选变点 τ_i 代价路径进行修剪, 删除不满足修剪规则的路径, 以最大程度地减少路径条数。以当前候选变点 τ_i 最佳路径为基础, 添加惩罚系数 η , 数学模型定义见式(8)。

$$c^{\text{pen}}(y(0) : y(\tau_i)) = \min P(\tau_i) + \eta \quad (8)$$

式中 $c^{\text{pen}}(y(0) : y(\tau_i))$ 为当前候选变点 τ_i 的最佳路径代价添加惩罚项后的新路径代价。

依次取出当前候选变点 τ_i 的代价路径集 $|P(\tau_i)|$ 的路径代价与添加惩罚项后的最佳路径代价 $c^{\text{pen}}(y(0) : y(\tau_i))$ 做比较, 若小于 $c^{\text{pen}}(y(0) : y(\tau_i))$, 则保留此路径; 反之, 则删除此路径。修剪后的新代价路径, 记作 $\text{new}_P(\tau_i)$ 。下一个候选变点基于修剪后的新代价路径 $\text{new}_P(\tau_i)$ 。继续按照上述流程寻找变点, 直至搜索至第 T 个点, 搜索过程结束。累计修剪后的代价路径 $\text{new}_P(\tau_i)$ 即为整个信号最佳代价路径, 而构成最佳路径相应的点即为整个信号的最终变点集。变点检测伪代码见表 1。

2.2 曲线控制点识别

PELT 搜索算法能实现线形概略分割, 但概略分割后依然可能存在误分类的观测值, 而异常观测值可能显著影响估计质量^[27]。如进一步提高曲线参数的

控制点识别精度,可在已求得的变点基础之上,使用稳健估计(Robust Estimation)对曲线控制点进行二次识别。稳健估计通过权函数迭代计算各观测值的权值,虽牺牲最优性,但估计值更稳健^[12]。不失一般性,以两变点为例,说明相关计算规则如下。

表 1 PELT 搜索算法伪代码

Tab. 1 Pseudocode of PELT search algorithm

```

输入: 信号  $Y$ , 函数  $V(\Omega, y)$ , 步长因子  $s$ , 跳跃因子  $j$ , 惩罚系数  $\eta$ 
依据式(5), 计算得到初步候选变点集  $\Omega$ 
for  $\tau_i$  in  $\Omega$ :
    根据式(6)计算新候选变点  $\tau_{new,i}$  并加入新候选变点集  $\Omega_{new}$ 
for  $\tau_{new,i}$  in  $\Omega_{new}$ :
    根据式(4)分别计算  $(0, \tau_{new,i})$  和  $(\tau_{new,i}, \tau_i)$  区间代价
    拼接  $(0, \tau_{new,i})$  和  $(\tau_{new,i}, \tau_i)$  区间并加入路径集  $P(\tau_i)$ 
    根据式(7)计算得到  $(0, \tau_i)$  区间路径代价  $c(y(0):y(\tau_i))$ 
end for
根据公式(8)修剪初步候选变点集  $\Omega$ 
end for
输出: 最佳代价路径  $P(\tau_T)$  和相应的变点集  $\Omega$ 

```

设某序列 $Y = \{y(0), y(1), \dots, y(T)\}$ 顺序包含直线、缓和曲线及圆曲线的水平(超高)信号(图 1(a)), 相邻的两变点 r_1 和 r_2 将曲线分割为 3 段, 对应地产生 3 个里程子区间 $[0, r_1]$, $[r_1, r_2]$, $(r_2, T]$ 和线形子区间 $[y(0), y(r_1)]$, $[y(r_1), y(r_2)]$, $(y(r_2), y(T)]$ 。依据高速铁路水平(超高)与线形的关系, 直线与圆曲线的水平(超高)应为常数, 而缓和曲线的水平(超高)则依据顺坡率呈直线变化。对于直线与圆曲线, 如存在数据的误分类, 选择中位数作为此两类线形水平(超高)的估计较均值更稳健^[27], 而对于缓和曲线则可采用线性稳健估计来确定相关的参数。因此, 可首先计算直线子区间 $[0, r_1]$ 和圆曲线子区间 $(r_2, T]$ 信号值的中位数, 分别记作为 m_1 和 m_2 ; 然后, 对于缓和曲线子区间 $[y(r_1), y(r_2)]$, 使用 M 估计计算超高顺坡的斜率 α 和截距 β , 其中权函数采用 Huber 权函数。Huber 权函数见式(9)。

$$\bar{p}_{ii} = \begin{cases} p_i & |V_i| \leq c\sigma \\ p_i \cdot \frac{c}{|V_i|} & |V_i| \geq c\sigma \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\bar{p}_{ii}$ 、 p_i 分别为等价权与初始权; c 为调和系数; V_i 为观测值改正数; σ 为单位权中误差。

对 PELT 搜索算法初次识别的变点 $[r_1, r_2]$ 进行 M 估计, 计算得到基于中位数的二次识别变点 $(\hat{r}_1, \hat{r}_2)$, 计算规则见式(10)。

$$\begin{cases} \hat{r}_1 = (m_1 - \beta)/\alpha \\ \hat{r}_2 = (m_2 - \beta)/\alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\hat{r}_1$ 、 $\hat{r}_2$ 分别为直缓点与缓圆点里程估计。

3 曲线线形参数识别仿真与实验

由于实际轨道的精确控制点里程难以获得, 为了验证基于 PELT 与稳健估计的曲线控制点识别方法性能, 本文采用计算机仿真验证不同信噪比条件下方法的正确性, 采用实测数据验证方法的重复性与一致性。

3.1 基于仿真的控制点识别方法性能验证

3.1.1 仿真过程

采用蒙特卡洛法验证方法正确性, 过程如下。

Step1. 首先仿造高速铁路线路条件, 构建某平面曲线的外轨水平(超高)设计值如图 2 所示。该曲线里程范围为 K443+000 ~ K444+000, 缓和曲线长 $l_0 = 300$ m, 设计超高 $H = 175$ mm 并直线顺坡; 相应各控制点里程 $r_{ZH} = K443+080$ 、 $r_{HY} = K443+380$ 、 $r_{YH} = K443+620$ 和 $r_{HZ} = K443+920$ 。

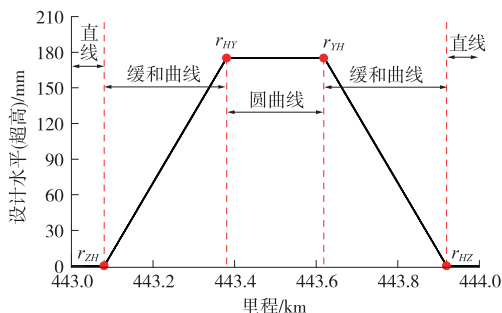


图 2 外轨超高设计值

Fig. 2 Design value of outer rail superelevation

Step2. 在设计值基础上加入标准差为 $\sigma = 0.5$ mm 的正态白噪声, 作为不平顺; 然后按照表 1 所示 PELT 搜索算法搜索变点, 其中设置 $s = 1$, $j = 10$, $\eta = 3\,000$; 利用变点分割数据并分段稳健估计, 得到曲线各控制点估计, 并计算其与设计值偏差 Δ_{ZH} 、 Δ_{HY} 、 Δ_{YH} 和 Δ_{HZ} , 则定义总偏差见式(11)。

$$\Delta = |\Delta_{ZH}| + |\Delta_{HY}| + |\Delta_{YH}| + |\Delta_{HZ}| \quad (11)$$

重复上述过程 10 000 次, 得到该噪声水平下的识别性能。

Step3. 扰动噪声的标准差按 0.05 mm 递增, 并重复 Step2 直至噪声水平达到给定阈值。

3.1.2 仿真结果

仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知, 随着不平顺噪声水平的增加或超高设计值与偏差值信噪比的降低, 控制点识别总误差及其标准差均增大。其中相比于识别总误差的估计, 其标准差较小, 意味着变点检测结果的离散性小。同时, 当信噪比不低于 40.09 dB 时, 控制点识别总误差的估计为 0.26 m。此时对应的不平顺标准差为 1.15 mm, 已超过一般 TQI 的单项标

准差管理值。

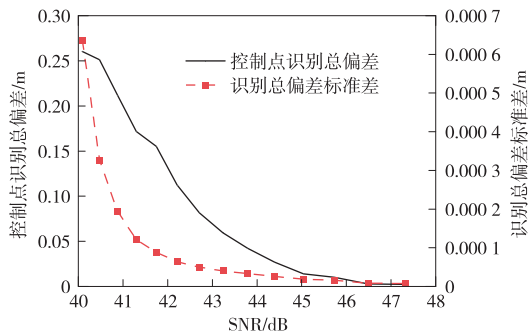


图3 不同噪声水平下控制点识别总偏差

Fig. 3 Total deviation of control point identification under different noise levels

3.2 基于实测数据的控制点识别方法性能验证

3.2.1 实验设计

参照 TB/T 3147—2020《铁路轨道检查仪》附录 C 要求,选择某连续轨道作为试验线,以验证所述控制点识别方法的重复性与一致性。试验线里程范围为 K14+680.925~K15+448.800,包括直线、缓和曲线和圆曲线等三类线形与 ZH、HY 两个曲线控制点。按计量要求采用 0 级轨道检查仪对试验线进行 5 个往返的实际测量,得到顺逆里程共 10 个相对测量数据样本,参见图 1(a)。

抽取数据样本中的水平(超高)数据作为输入信号 Y ,按表 1 所示 PELT 搜索算法依次对 Y 交替进行遍历和修剪,得到变点里程 r_1 与 r_2 ,并将输入信号概略分为 $[y(0), y(r_1))$, $[y(r_1), y(r_2)]$ 与 $(y(r_2), y(T)]$

3 个子信号;然后按 2.2 节所述的稳健估计方法,对各个子信号分段线性拟合,得到直缓、缓圆点的里程估计 $\hat{r}_{ZH}$ 与 $\hat{r}_{HY}$ 并计算缓和曲线长 $\hat{l}_0$;进而计算往/返、往/返不同分组的样本均值 $\bar{r}_{ZH}$ 、 $\bar{r}_{HY}$ 与 $\bar{l}_0$ 及相应样本标准不确定度 u_{ZH} 、 u_{HY} 与 u_l 。

3.2.2 实验结果

曲线控制点识别结果见表 2,可知不同分组的控制点识别结果重复性不尽相同,其中往/返分组的曲线控制点识别重复性相对较低,其标准不确定度达 0.673 m,即 95%置信概率下,控制点识别误差 ≤ 1.346 m。

表2 曲线控制点识别结果重复性

Tab. 2 Repeatability of curve control point identification results

控制点里程	$\bar{r}_{ZH}(u_{ZH})/\text{m}$	$\bar{r}_{HY}(u_{HY})/\text{m}$	$\bar{l}_0(u_l)/\text{m}$
往/返	14 979.966(0.673)	15 259.738(0.650)	279.773(0.075)
往	14 979.296(0.055)	15 259.096(0.133)	279.801(0.092)
返	14 980.637(0.060)	15 260.381(0.041)	279.745(0.033)

同时也注意到,往分组与返分组的曲线控制点识别结果存在一定差异。对往分组与返分组的结果进行 t 检验(图 4),显示不同采集方向的曲线控制点识别结果并不一致,各控制点 p 值均小于 0.001;而二次变点识别的前缓曲长估计不存在显著性差异,因此可认为由不同采集方向引入的偏差主要是因为不同采集方向的里程基准不一致所导致;无论何种方向,相对于基于 PELT 的初次变点识别,二次变点识别的控制点识别误差一般不大于 0.2 m,具有较高的重复性。

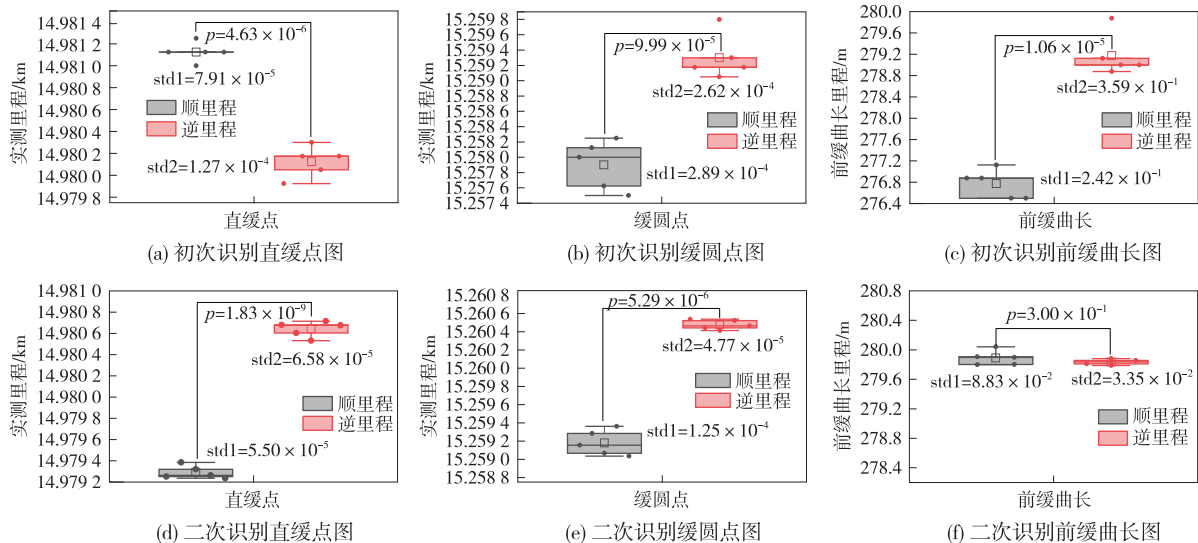


图4 两次识别结果箱形图对比

Fig. 4 Comparison of box plots of two identification results

4 结论

高速铁路的水平(超高)、轨向与正矢等轨道内部

几何参数具有多变点线性结构特征,而变点与曲线控制点有着强映射关系。依据这种映射关系,构建一种基于相对测量的曲线控制点精确识别方法。首先优选

曲线水平(超高)作为 PELT 搜索算法的输入变量;然后进行变点概略分割与曲线控制点初次识别;最后将概略分割的数据进行分段线性稳健估计,实现变点里程的精确估计。得出主要结论如下。

(1)为评价方法的识别性能,分别采用计算机仿真与实测数据样本验证方法的正确性与重复性,其中仿真结果显示,当水平(超高)不平顺的信噪比不小于 40.09 dB 时,曲线控制点识别总偏差 ≤ 0.26 m;参照《铁路轨道检查仪》对 5 个往返的实际测量数据样本进行控制点识别,显示往返的识别误差 ≤ 1.346 m,而单程的识别误差一般不大于 0.2 m,具有较高的重复性;

(2)由于本方法避免了外部几何参数的测量,可以 2~8 km 的时速采集数据,故具有较高的效率,可用于高铁日常轨道质量评价,并为轨道维修作业提供依据。

参考文献:

- [1] 国家铁路局. 高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S]. 北京:中国铁道出版社,2015.
- [2] 王开云,吕凯凯. 高速铁路线路空间线形的动力学评价指标体系研究[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2):227-235.
WANG Kaiyun, LYU Kaikai. Dynamic Evaluation Index System for Spatial Alignment of High-speed Railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016,51(2):227-235.
- [3] 魏庆朝,李鸣,吕希奎,等. 高速铁路三维线形参数及其对列车运动的影响[J]. 铁道工程学报,2019,36(1):31-37.
WEI Qingchao, LI Ming, LV Xikui, et al. Three-dimensional Alignment Parameters of the High-speed Railway and Their Influence on Motion of Train[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1):31-37.
- [4] 时瑾,孙征南,孙宪夫,等. 现行 350 km/h 高铁线路技术条件运营 400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020, 17(9):2171-2180.
SHI Jin, SUN Zhengnan, SUN Xianfu, et al. Research on the Adaptability of High-speed Train Running at 400 km/h Under Current 350 km/h High-speed Railway Technical Conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(9):2171-2180.
- [5] LONG X Y, WEI Q C, ZHENG F Y. Dynamic Analysis of Railway Transition Curves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(1):1-14.
- [6] 王平,杨荣山. 轨道工程[M]. 北京:机械工业出版社,2021:391-401.
- [7] 中国国家铁路集团有限公司. 高速铁路线路维修规则:TG/GW115—2023[S]. 北京:中国铁道出版社,2023.
- [8] LIU J, CAI B G, WANG J. Electronic Track Map Building for Satellite-based High Integrity Railway Train Positioning[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2013,6(2):610-629.
- [9] GARACH L, DE OÑA J, PASADAS M. Mathematical Formulation and Preliminary Testing of a Spline Approximation Algorithm for the Extraction of Road Alignments[J]. Automation in Construction, 2014,47:1-9.
- [10] 高鸿剑,缪鹏. 基于小波去噪的既有铁路平面重构方法[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(12):3600-3611.
GAO Hongjian, MIAO Kun. A Method for Recreating Horizontal Alignment of Existing Railway Based on Wavelet Denoising[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022,19(12):3600-3611.
- [11] 缪鹏,田家凯,杨小礼. 基于 PSO 的既有曲线线型校正方法[J]. 中国铁道科学,2014,35(3):8-14.
MIAO Kun, TIAN Jiakai, YANG Xiaoli. Realignment Method for Existing Railway Curve Based on PSO[J]. China Railway Science, 2014,35(3):8-14.
- [12] 马洪磊,刘成龙. 基于选权迭代法的既有铁路平面线形拟合方法[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(12):2375-2380.
MA Honglei, LIU Chenglong. The Linear Fitting Method of Existing Railway Horizontal Alignment Based on Iteration Method with Variable Weights[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12):2375-2380.
- [13] LI W, PU H, SCHONFELD P, et al. A Method for Automatically Recreating the Horizontal Alignment Geometry of Existing Railways[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019, 34(1):71-94.
- [14] 陶维杰,蔡伯根,王剑,等. 数字轨道地图平面线形特征提取方法研究[J]. 铁道学报,2019,41(9):81-87.
TAO Weijie, CAI Baigen, WANG Jian, et al. Research on Geometry Extraction of Railway Horizontal Curves for Digital Track Map[J]. Journal of the China Railway Society, 2019,41(9):81-87.
- [15] SONG Z F, FANG T, SCHONFELD P, et al. Effect of Point Configurations on Parameter Estimation Analysis of Circles[J]. Journal of Surveying Engineering, 2021,147(3):04021010.
- [16] SONG T R, SCHONFELD P, PU H. A Review of Alignment Optimization Research for Roads, Railways and Rail Transit Lines[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(5):4738-4757.
- [17] PU H, FU H D, SONG T R, et al. Recreating Horizontal Alignments of Existing Railways with a Hybrid Analytic and Harmony Search Algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024,128:107354.
- [18] 李颖,程朝阳,陆永彪,等. 轨道曲线参数检测算法优化[J]. 铁道建筑,2023,63(10):1-5.
LI Ying, CHENG Zhaoyang, LU Yongbiao, et al. Optimization of Algorithm for Detecting Track Curve Parameters[J]. Railway Engineering, 2023,63(10):1-5.
- [19] 程朝阳,王昊,李颖,等. 纵断面曲率检测及线形识别方法[J]. 铁道建筑,2023,63(8):40-43.
CHENG Zhaoyang, WANG Hao, LI Ying, et al. Longitudinal Section Curvature Detection and Profile Recognition Method[J]. Railway Engineering, 2023,63(8):40-43.
- [20] 殷华,朱洪涛,王志勇. 基于奇异滤波及稳健回归的轨道曲线主点定位方法研究[J]. 铁道标准设计,2017,61(2):43-47.
YIN Hua, ZHU Hongtao, WANG Zhiyong. Localization Algorithm for Track Curve Feature Point Based on Singular Value Decomposition

- and Robust Regression[J]. Railway Standard Design, 2017,61(2): 43-47.
- [21] 熊丽娟,朱洪涛,魏晖,等. 基于轨道相对测量数据识别曲线关键参数的研究[J]. 铁道学报,2018,40(4):127-134.
- XIONG Lijuan, ZHU Hongtao, WEI Hui, et al. Research on Curve Key-parameter Identification Based Upon Track Relative Survey Data [J]. Journal of the China Railway Society, 2018,40(4):127-134.
- [22] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 4版. 成都:西南交通大学出版社, 2017:96-101.
- [23] 魏晖,朱洪涛,赵国堂,等. 基于中点弦测模型的无砟轨道精测量迭代求解[J]. 西南交通大学学报,2015,50(1):131-136.
- WEI Hui, ZHU Hongtao, ZHAO Guotang, et al. Iterative Algorithm of HSR Ballastless Track Realignment Calculation Based on MCO Model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015,50(1): 131-136.
- [24] GAO Z, XIAO X, FANG Y P, et al. A Selective Review on Information Criteria in Multiple Change Point Detection[J]. Entropy, 2024, 26(1):50.
- [25] HAYNES K,FEARNHEAD P, ECKLEY I A. A Computationally Efficient Nonparametric Approach for Changepoint Detection[J]. Statistics and Computing, 2017,27(5):1293-1305.
- [26] TRUONG C, OUDRE L, VAYATIS N. Selective Review of Offline Change Point Detection Methods [J]. Signal Processing, 2020, 167:107299.
- [27] 茆诗松,王静龙,濮晓龙. 高等数理统计[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:147-158.
- (编辑:王婷)
-
- (上接第30页)
- [12] 聂莹莹,谢刚,郭彦宏,等. 基于改进 DE 的城轨列车节能速度曲线研究[J]. 铁路计算机应用,2020,29(11):30-35.
- NIE Yingying, XIE Gang, GUO Yanhong, et al. Research on Energy Saving Speed Curve of Urban Rail Train Based on Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(11):30-35.
- [13] 王一栋,肖宝弟,岳丽丽,等. 改进麻雀算法在列车 ATO 多目标优化中的应用[J]. 铁道标准设计,2024,68(7):192-199.
- WANG Yidong, XIAO Baodi, YUE Lili, et al. Application of Improved Sparrow Algorithm in Multi-objective Optimization of Train ATO[J]. Railway Standard Design, 2024,68(7):192-199.
- [14] 黄江平,程绍榕. 改进粒子群算法的轨道列车节能控制优化[J]. 华东交通大学学报,2020,37(2):56-63.
- HUANG Jiangping, CHENG Shaorong. Study on Energy-saving Control of Railway Train Based on Improved PSO[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(2):56-63.
- [15] 宿帅,唐涛,阴佳腾,等. 城轨列车节能运行控制与优化方法[M]. 北京:北京交通大学出版社,2021.
- [16] 景苏银,李华. 城市轨道交通列车混合编组运行的仿真与优化[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(3):75-78.
- JING Suyin, LI Hua. Simulation and Optimization of Mixed Urban Rail Transit Train Marshalling[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(3):75-78.
- [17] ALBRECHT A, HOWLETT P, PUDNEY P, et al. The Key Principles of Optimal Train Control; Part 1: Formulation of the Model, Strategies of Optimal Type, Evolutionary Lines, Location of Optimal Switching Points[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016,94:482-508.
- [18] 郑晓彬,柏赞,周姗姗. 基于实测数据的地铁列车能耗特征分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(6):264-271.
- ZHENG Xiaobin, BAI Yun, ZHOU Shanshan. Metro Train Energy Consumption Characteristics Based on Empirical Data Analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021,21(6):264-271.
- [19] 杨辉,李莹,周艳丽. 基于 APSO 的地铁节能运行速度优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(8):1926-1934.
- YANG Hui, LI Ying, ZHOU Yanli. Research on Optimization of Energy-saving Operation Speed of Metro Based on APSO[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(8):1926-1934.
- [20] 汤旻安,王茜茜,蔚璠. 黄金比例 NSGA-II 算法在动车组列车多目标优化中的应用[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(10):2469-2478.
- TANG Minan, WANG Qianqian, YU Fan. Application of Golden Ratio NSGA-II Algorithm in Multi-objective Optimization of EMU Trains [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(10): 2469-2478.
- [21] 徐凯,吴磊,杨飞凤. PSO-ICS 算法优化的城轨列车自动驾驶系统[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(12):2704-2712.
- XU Kai, WU Lei, YANG Feifeng. Automatic Train Operation System in Urban Rail Transit Based on PSO-ICS Algorithm Optimization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017,14(12):2704-2712.
- [22] 赵立丹. 列车自动驾驶节能运行智能优化及深度强化学习[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- ZHAO Lidan. Intelligent Optimization and Deep Reinforcement Learning for Energy-efficient Train Operation of Automatic Driving[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [23] 黄璞,张琨,杜庆. 城市轨道交通列车自动控制停站舒适度研究[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(6):39-43,49.
- HUANG Pu, ZHANG Kun, DU Qing. Research on Urban Rail Transit Train Stop-ping Comfort Level under Automatic Control[J]. Urban Mass Transit, 2023,26(6):39-43,49.
- [24] 李婉婷. 基于分层学习黄金正弦—鲸鱼算法的列车速度曲线优化[D]. 长沙:长沙理工大学,2022.
- LI Wanting. Multi-objective Optimization of Train Speed Based on Hierarchical Learning Golden Sine-whale Algorithm [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2022.
- [25] SHEHADEH H A, AHMEDY I, IDRIS M Y I. Sperm Swarm Optimization Algorithm for Optimizing Wireless Sensor Network Challenges [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Communications and Broadband Networking. Singapore Singapore. ACM,2018: 53-59.
- (编辑:夏梦然)