

文章编号:1001-9081(2016)12-3499-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.12.3499

基于惯导角度量测的轨道平面最佳线形参数估计算法

李晓雯, 元向辉^{*}, 周春翔

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(*通信作者电子邮箱 xhyuan@mail.xjtu.edu.cn)

摘要:轨道线形分段及线形参数优化是铁路轨道既有线复测工作的核心。基于惯导角度量测数据,提出了一种轨道平面线形分段及最佳线形参数估计算法。所提算法根据轨道线形变化规律,利用组合迭代的方法计算轨道的最佳线形参数。该算法将轨道平面线形确定建模成优化问题:首先根据定长曲率曲线最小二乘拟合斜率变化对轨道进行概略分段;然后基于量测数据拟合轨道线形;最后使用组合迭代算法进行精确分段并确定最佳线形参数。仿真算例结果表明,所提算法结果优于现有人工判定算法——基于两组不同分段点的线形参数拟合结果,与穷举法结果更为接近,所提算法均方根误差(RMSE)仅比穷举法高4.93%,但计算量仅为穷举法的0.02%。西安地铁三号线的实测结果也验证了所提算法的有效性。

关键词:线形参数;既有线;约束优化;组合迭代;最小二乘法

中图分类号:TP301.6 **文献标志码:**A

Optimal line-shape parameter estimation algorithm of orbit plane based on inertial angle measurement

LI Xiaowen, YUAN Xianghui^{*}, ZHOU Chunxiang

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: The kernels of retest on existing railway are orbit line-shape segmentation and line-shape parameter optimization. Based on statistics of inertial angle measurement, an algorithm for line-shape segmentation of orbit plane and optimal line-shape parameter estimation was proposed. On the basis of change laws of orbit line-shape, the combined iterative method was utilized to calculate the optimal line-shape parameter of the orbit. The option of orbit plane line-shape was modeled as an optimization issue. Firstly, the orbit was roughly segmented by least square fitted slope change of fixed-curvature curves. Then, the orbit line-shape was fitted based on the measured data. Finally, the combined iterative method was applied to achieve precise segmentation and establish the optimal line-shape parameter. The simulation examples indicate that the proposed algorithm surpasses the existing artificial estimation algorithm which obtains the line-shape parameter fitting results based on two sets of different segmentation points, and has less differences from the results yielded by the exhaustion method. The Root Mean Square Error (RMSE) of the proposed algorithm is only higher than the exhaustion method by 4.93%, while the computational complexity is just 0.02% of that of the exhaustion method. The actual measurements on Xi'an metro line No. 3 also have convinced the availability of the proposed algorithm.

Key words: line-shape parameter; existing railway; constrained optimization; combined iteration; Least Square (LS) method

0 引言

铁路既有线的实际线形参数是工务部门进行轨道维护的基准。既有铁路在长期运营和维护过程中,其轨道线形会不断发生变化,因此需要对既有铁路的轨道线形进行定期复测^[1]。基于复测数据,通过合理的优化方法对轨道平面线形进行分段并估计最佳线形参数,有利于在最小施工量的前提下指导轨道维修达到平面最优线形。

目前轨道实际线形参数的检测,主要采用全站仪配合轨检小车获取轨道实际线形三维坐标数据^[2]。针对这种检测方法,文献[2]提出依据相邻30 m弦之间夹角变化进行平面

线形概略分段,该方法要求轨道自身形变小且测量精度高,因此实用性差。文献[3]提出基于圆曲线最小二乘拟合方法优化平面线形,该方法需要人工根据正矢变化判断分界点,而且在大半径曲线优化时容易产生病态结果。文献[4]提出利用三次样条曲线拟合测点曲率求得初始值,再迭代优化平面线形参数的方法,该方法需要人工判断初始分段点,并且在优化结果不满意时需人工多次修改分段点,自动化程度低。文献[5]提出基于正交距离最短的平面线形拟合方法,该方法只拟合直线和圆曲线段,未考虑缓和曲线对施工量的影响。文献[6]提出以夹直线的最小二乘拟合为切入点优化平面曲线,该方法需要依据超高变化人工识别分段点。文献[7]提

收稿日期:2016-05-05;修回日期:2016-07-12。 基金项目:陕西省交通运输厅交通科研项目(15-49X)。

作者简介:李晓雯(1992—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:轨道不平顺检测、多源信息融合; 元向辉(1979—),男,河北邢台人,副教授,博士,主要研究方向:参数估计、状态估计、随机系统理论、多源信息融合; 周春翔(1994—),男,山东潍坊人,主要研究方向:轨道不平顺检测。

出采用三次样条函数与稳健估计相结合的方法识别分段点,该方法对采样精度要求高。文献[8]提出平差法,文献[9]提出方向加速法,但均是在分段点已知情况下优化平面线形参数,并未提出如何对轨道平面线形进行分段。另一方面,基于全站仪的轨道检测速度慢、需要建立铁路工程基桩控制网(Control network for railway Piles, CPIII)并长期维护,增加了轨道维护工作的成本和复杂度。

文献[10~11]分别提出利用陀螺仪测量角度的高精确性配合里程计检测轨道实际线形的方法,说明了惯性器件检测轨道线形的可行性,但并没有提出相应的线形参数优化算法。文献[12]提出了一种基于惯性器件的轨道检测新方法,该方法通过量测惯导角度数据检测轨道平面线形参数,具有检测效率高、精度高、结果重复性好等优点,为轨道检测领域开辟了新的发展方向;该文献提出根据方向角变量曲线人工分段,再用最小二乘法拟合线形参数的方法,该方法因存在人工介入数据处理过程,有人工误判进而影响参数估计结果的可能,并且其得出的并不是优化的轨道线形,不能保证施工量最小。

因此,基于新检测方法得到的包含轨道不平顺及量测噪声的轨道方向角、里程数据,通过合理的优化方法对轨道平面线形进行分段并估计最佳线形参数是一项十分重要的工作。为了解决上述问题,本文将轨道平面最佳线形确定建模成优化问题,提出首先根据定长曲率曲线最小二乘拟合斜率变化对轨道进行概略分段,然后使用组合迭代算法进行精确分段并拟合最佳线形参数,最后通过仿真算例及应用实例验证了本算法的有效性。

1 轨道平面最佳线形估计问题建模

轨道线形设计中最常见的类型为对称基本型,该线形由直线-缓和曲线-圆曲线-缓和曲线-直线组合而成,且前后缓和曲线长度相同。分析轨道线形沿里程的方向角特征有:直线段方向角保持不变,圆曲线段方向角线性变化,缓和曲线段方向角呈二次抛物线变化,如图1所示。

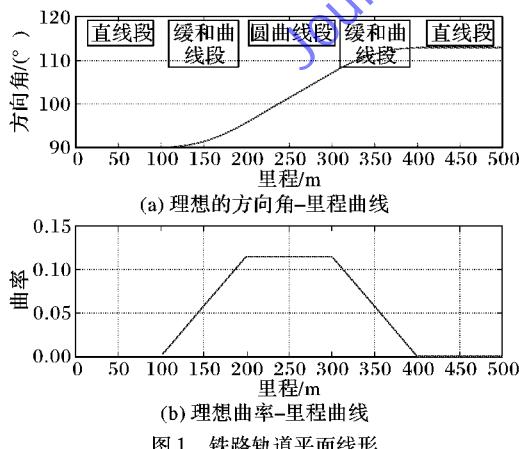


图1 铁路轨道平面线形

本文将轨道最佳线形估计问题建模为以各量测点方向角与拟合方向角偏差平方和最小为目标函数,通过优化轨道线形参数确定轨道最佳线形。考虑到沿里程的轨道测点曲率变化规律明显,且直线拟合相比高次曲线拟合误差小、算法简单,因此本文从曲率-里程曲线入手对轨道进行分段,先拟合轨道测点曲率,然后积分得到拟合方向角,再优化目标函数以

确定轨道最佳线形参数。

目标函数: $\min(f(dS, X)) = \sum \Delta_i^2$, 其中 dS 是自变量,其意义为轨道每一量测点里程及该里程处拟合曲率值的有序集合 $\{(m_1, k_1), (m_2, k_2), \dots, (m_n, k_n)\}$, 对 dS 沿里程进行积分可得 S , 其意义为轨道每一量测点里程及该里程处拟合方向角的有序集合 $\{(m_1, \alpha_1), (m_2, \alpha_2), \dots, (m_n, \alpha_n)\}$, 由 S 及 dS 可判别轨道线形,计算轨道线形参数(线形长度、圆曲线半径等),线形起、终点处的里程,因此可以得到全线轨道设计参数; X 为量测数据里程、方向角的有序集合, $X = \{(m_1, \alpha_1), (m_2, \alpha_2), \dots, (m_n, \alpha_n)\}$; 用 $\Delta_i = \alpha_i - \alpha_i'$ 表示测点方向角与拟合方向角的偏差。目标函数以最小化各量测点方向角与拟合方向角的偏差平方和为目标,其解为轨道各量测点最佳方向角序列,由其可计算轨道最佳线形参数。

约束条件应满足轨道线形曲率变化规律要求,以及铁路轨道设计规范所规定的各类参数最小值要求,且对称基本型线形应满足前后缓和曲线长度相等。因此有约束条件:

$$\begin{cases} k_Z = 0 \\ k_{ci} = \varepsilon_i \\ k_{h(i-1)} = a \times \varepsilon_i + b_{(i-1)} \\ k_{h(i+1)} = -a \times \varepsilon_i + b_{(i+1)} \\ R \geq R_{\min} \\ l_R \geq l_{R\min} \\ l \geq l_{\min} \\ l_{\text{former}} = l_{\text{latter}} \end{cases}$$

式中: $k_Z = 0$ 表示直线段的曲率为 0; $k_{ci} = \varepsilon_i$ 表示第 i 段圆曲线的曲率为一定值 ε_i , $k_{h(i-1)} = a \times \varepsilon_i + b_{(i-1)}$ 表示第 i 段圆曲线的前缓和曲线上各测点曲率在 0 到 ε_i 间线性变化, $k_{h(i+1)} = -a \times \varepsilon_i + b_{(i+1)}$ 表示第 i 段圆曲线的后缓和曲线上各测点曲率在 ε_i 到 0 间线性变化; R_{\min} 、 $l_{R\min}$ 、 l_{\min} 分别为设计规范规定的最小曲线半径、最小圆曲线长度和最小缓和曲线长度; l_{former} 、 l_{latter} 分别表示同一圆曲线前后两段缓和曲线的长度。

2 模型复杂性分析

轨道最佳线形参数确定模型的复杂性在于不同线形参数之间具有耦合作用,某一线形参数的微小变化都会使得线路整体发生改变,所以需要不断改变自变量 dS 中的有序集合 $\{(m_1, k_1), (m_2, k_2), \dots, (m_n, k_n)\}$, 每次改变后重新计算目标函数值 $\min(f(dS, X)) = \sum \Delta_i^2$ 直到最优。因此线路长度越长,其解空间规模越大,处理起来越复杂。

穷举法是处理此类搜索最优解问题的一种常用方法。定义一段完整的直线-缓和曲线-圆曲线-缓和曲线-直线线形组合为一基本线元组。一基本线元组中的任一测点在满足设计规范前提下都有可能成为分段点,因此在测点数量庞大的情况下,穷举法需要遍历的分段点组合规模相当大。假设在 M 个测点中只存在一组基本线元,随着 M 的不断增大,穷举法所要遍历的分段点组合种类呈指数型增长,如图2所示。

实际上轨道检测线路长、测点多,因此使用穷举法解决该问题计算量庞大,时效性差。本文提出先将轨道分为多个基本线元组,然后在之前分段结果的基础上进行组合迭代得到每一基本线元组的最佳轨道参数,最终合并为整条轨道的最

佳线形参数。在识别分段点时以每一基本线元组内必定存在的 4 个分段点(直缓(ZH)点、缓圆(HY)点、圆缓(YH)点、缓直(HZ)点)为一组进行分段,然后每次优化包含该组分段点在内的一段数据 $\{(m_i, \alpha_i), \dots, (m_{ZH}, \alpha_{ZH}), \dots, (m_{HY}, k_{HY}), \dots, (m_{YH}, k_{YH}), \dots, (m_{HZ}, k_{HZ}), \dots, (m_{i+n}, k_{i+n})\}$ 在当前基本线元组最优的基础上再对下一个基本线元组进行优化,相邻两个基本线元组之间设有一定交集以保证每一个基本线元组的最优性,且避免穷举法指数增长的遍历次数。

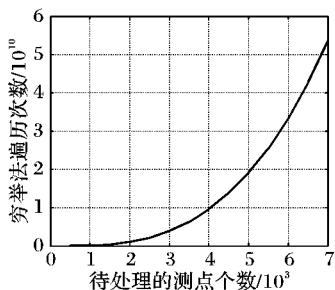


图 2 穷举法遍历次数随测点个数的改变

3 轨道最佳线形参数确定过程

针对曲率-里程曲线,先基于最小二乘拟合斜率变化规律提取出概略分段点,将轨道分为多个基本线元组,然后根据轨道线形曲率变化规律拟合出基于该分段点的轨道线形,再进行组合迭代,最终取使目标函数最优的一组线形参数为轨道最佳线形参数。

3.1 基于轨道曲率曲线最小二乘拟合斜率变化的概略分段

量测数据得到的曲率-里程曲线中包含测量误差和轨道不平顺,通过摒弃粗差和中值滤波能够得到较为平顺的曲率-里程曲线。对图 1 一例中曲率-里程曲线中的测点 i 前后两段数据 $X = \{(m_{i-n_1}, k_{i-n_1}), \dots, (m_{i-1}, k_{i-1}), (m_i, k_i)\}$ 和 $X = \{(m_i, k_i), (m_{i+1}, k_{i+1}), \dots, (m_{i+n_1}, k_{i+n_1})\}$ 分别应用最小二乘直线拟合算法进行拟合,计算前一段拟合曲线与后一段拟合曲线的斜率差如图 3 所示。

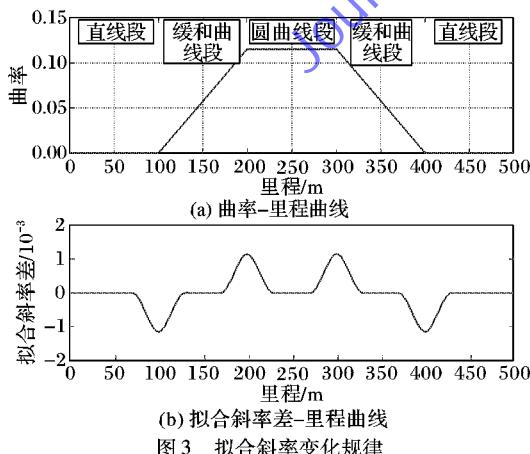


图 3 拟合斜率变化规律

由图 3 可知,轨道曲率曲线基于最小二乘拟合的斜率变化存在如下规律:其斜率差在各分段点处有极值,其中 ZH 点和 HZ 点处有极小值,HY 点和 YH 点处有极大值。对于圆曲线弯曲方向相反的情况,拟合斜率差变化规律相反,其中 ZH 点和 HZ 点处有极大值,HY 点和 YH 点处有极小值,如图 4 所示。

因此,根据轨道线形曲率特征以及曲率曲线基于最小二乘拟合斜率变化规律可以对线形进行概略分段得到多组分段点坐标,将轨道分为多段基本线元组。

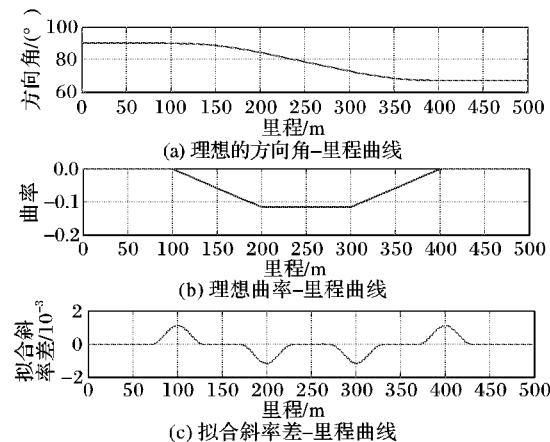


图 4 轨道转向相同时曲率曲线拟合斜率变化规律

3.2 基于组合迭代的轨道线形优化算法

针对每一基本线元组的分段点,先根据轨道线形曲率特征拟合线形,然后组合迭代至该基本线元组最优,再处理下一基本线元组。

轨道线形拟合应如下进行:确定起点、一组分段点以及终点横坐标 $(M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_e)$ 后,结合图 1~2 中轨道平面线形曲率的特征,应按照以下原则确定其曲率值:

$$k(M_i) = \begin{cases} 0, & i = 0, 1, 4, e \\ \omega = E(k(M_2), k(M_2 + 1), \dots, k(M_3)), & i = 2, 3 \end{cases}$$

其中:直线段曲率为 0;圆曲线段曲率为 $1/R$ 。

将坐标确定的各点逐次相连后得到拟合的曲率-里程曲线,沿里程积分后得到拟合的方向角-里程曲线,由此可以计算每一分段点组合下的目标函数值。

组合迭代算法是将概略分段点一定阈值范围内的分段点组合作为搜索域,遍历搜索域内所有组合确定轨道最优线形的算法,步骤如下:

步骤 1 确定迭代进行的搜索域范围,代入概略分段点轨道线形为初始目标解 (dS, X) ,计算初始目标函数值 $f(dS, X)$ 。

步骤 2 在搜索域内改变分段点组合,重新确定轨道线形 (dS_n, X_n) ,计算目标函数值 $f(dS_n, X_n)$,若 $f(dS_n, X_n) < f(dS, X)$,则接受新解;否则接受原解。

步骤 3 判断是否遍历搜索域内的所有分段点组合,是则算法终止;否则重复步骤 2。

完整的算法流程如图 5 所示,通过本算法可以得到整条轨道的最佳线形参数。

4 实验算例

引入均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)评价轨道线形拟合优劣程度,RMSE 越小表示拟合程度越好:

$$RMSE = \sqrt{(\sum \Delta_i^2)/N}$$

其中: $\Delta_i = \alpha_i - \alpha'_i$ 表示测点方向角与拟合方向角的偏差; N 表示参与拟合的测点个数。

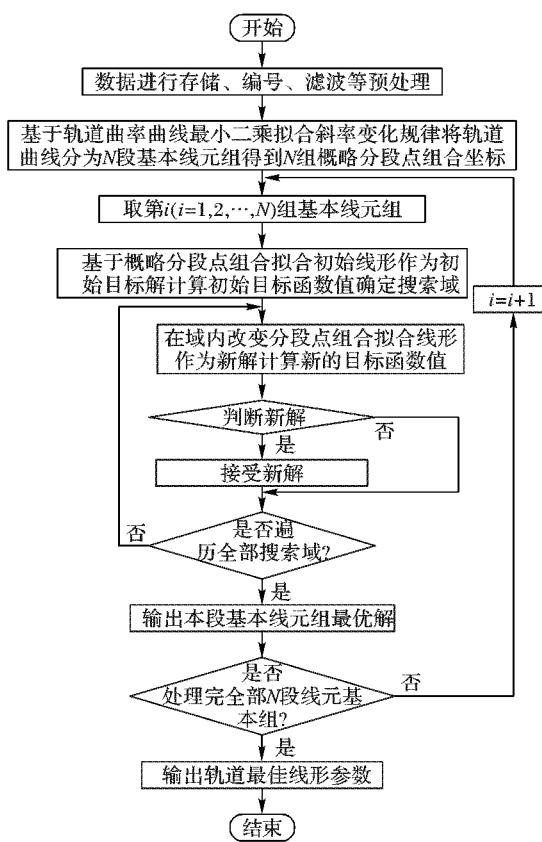


图 5 轨道平面线形最佳参数确定算法流程

4.1 仿真算例

设计仿真实验,以0.6 m采样间隔仿真一条包含两段基本线元组的轨道线形,长900 m,有测点1501个。取最小缓和曲线长度、最小圆曲线长度均为30 m,惯导测角误差取不超过 $\pm 0.05^\circ$ 的随机值,轨道不平顺取不超过 $\pm 10 \text{ mm}$ 的随机值,分别应用穷举法、文献[12]算法和本文算法对两段基本线元组进行处理。

本文算法首先根据定长曲率曲线最小二乘拟合斜率变化对轨道进行概略分段,取定长为30 m,最小二乘拟合斜率变化曲线经滤波后如图6所示。

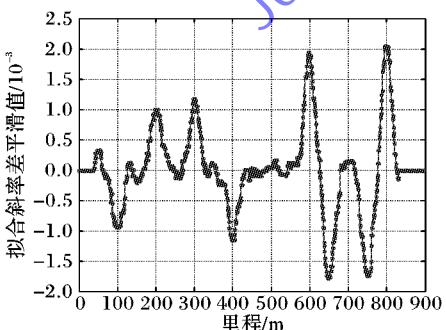
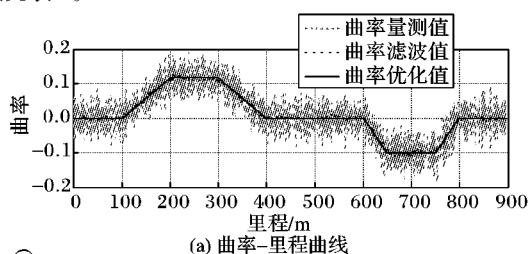


图 6 定长曲率曲线最小二乘拟合斜率变化图

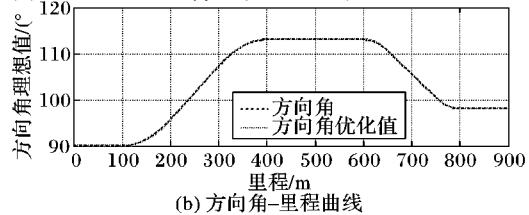
图6中曲线的极值点即为本算法得到的概略分段点。基于概略分段结果使用组合迭代算法进行精确分段并拟合最佳线形参数,得到的线形优化结果如图7所示。

文献[12]根据带噪声的方向角变量曲线(如图8所示)人工判断出两组分段点,基于这两组分段点得到线形参数拟合结果,与穷举法及本算法的结果比较如图9。对图9中方向角拟合结果曲线中矩形框一段放大后如图10所示。各算法线形分段及参数估计结果见表1,线形参数估计评价指标

列表见表2。



(a) 曲率-里程曲线



(b) 方向角-里程曲线

图 7 轨道平面线形最佳参数确定算法

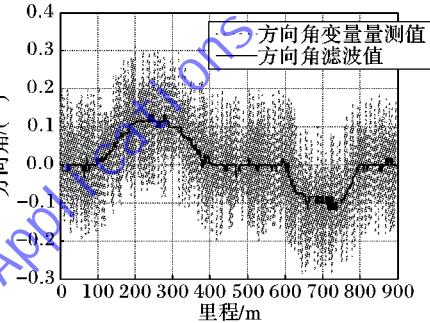
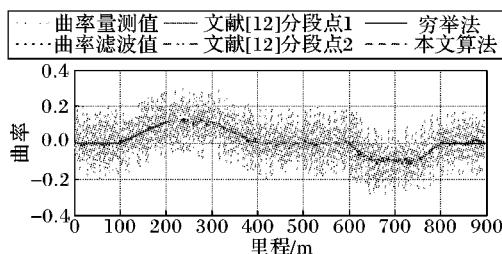
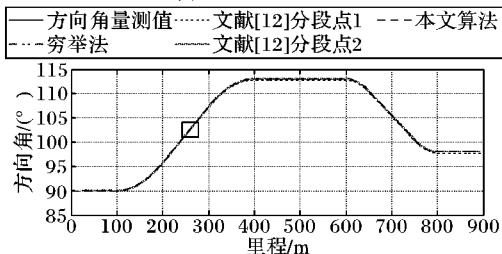


图 8 带噪声的方向角变量曲线



(a) 曲率-里程曲线



(b) 方向角-里程曲线

图 9 三种算法线形参数结果比较

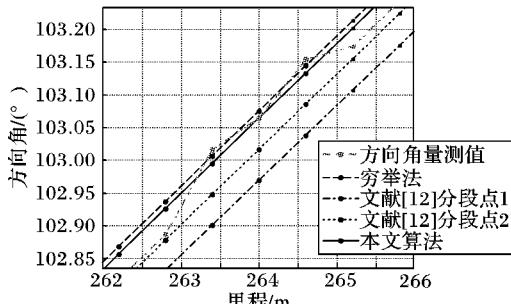


图 10 方向角结果放大比较

表 1 线形分段点及线形参数估计结果

元组	算法	ZH 点	HY 点	YH 点	HZ 点	圆曲线半径	缓曲长度	m
第一基本线元组	穷举法	100.2	199.2	301.2	400.2	298.93	99.0	
	文献[12]分段点 1	99.0	202.8	300.0	401.4	301.35	103.8	
	文献[12]分段点 2	100.8	201.0	301.2	400.8	298.69	100.2	
第二基本线元组	本文算法	100.2	199.2	300.6	400.2	299.19	99.0	
	穷举法	599.4	649.2	750.6	800.4	343.77	49.8	
	文献[12]分段点 1	597.6	654.0	751.2	801.6	343.10	56.4	
	文献[12]分段点 2	598.8	652.2	748.8	801.6	343.77	53.4	
	本文算法	600.0	648.6	751.2	799.8	343.15	48.6	

表 2 各算法线形参数估计指标

算法	目标函数值	RMSE 指标
穷举法	2.7265	0.0426
文献[12]分段点 1	51.5031	0.1853
文献[12]分段点 2	4.2585	0.0533
本文算法	2.9985	0.0447

结果分析:由于量测值中包含噪声和轨道不平顺,因此得到的是有噪声干扰的最佳曲线而非真实的设计曲线,穷举法拟合出的轨道线形参数能够使得目标函数最小,由表 1 中的线形分段及参数估计结果可知,本文算法与穷举法结果更相近,文献[12]分段点 2 结果次之,文献[12]分段点 1 结果与穷举法偏差较大。

从穷举法、文献[12]算法、本文算法线形参数估计指标列表表 2 中可以看出,目标函数值有 $\sum \Delta_i^2_{\text{穷举法}} < \sum \Delta_i^2_{\text{本文算法}} < \sum \Delta_i^2_{\text{文献[5]分段点1}} < \sum \Delta_i^2_{\text{文献[5]分段点2}}$, RMSE 指标有 $RMSE_{\text{穷举法}} < RMSE_{\text{本文算法}} < RMSE_{\text{文献[5]分段点1}} < RMSE_{\text{文献[5]分段点2}}$, 因此在本算例中,穷举法结果最优,然后依次是本算法、文献[12]分段点 2、文献[12]分段点 1。图 9 所示结果放大图也表明本算法与穷举法结果相近,优于文献[12]方法的结果。

与文献[12]相比,由于文献[12]方法不存在优化过程,其结果优劣完全取决于人工判断分段点的准确性,分段点判断越精确线形参数拟合结果越好。但由于方向角变量曲线存在噪声(如图 8 所示),人工往往很难从其中准确分辨出分段点,因此线形参数拟合结果具有不确定性。由于第二组分段点精确性优于第一组,因此基于第二组分段点得到的线形参数拟合结果更优。本算法经迭代优化得到的分段点精确性一般高于人工判断,因此本算法较文献[12]更优。

与穷举法相比,本算法的 RMSE 指标仅比穷举法大 4.93%,说明本算法计算结果的准确性与可行性。另一方面,穷举法的遍历次数高于 4×10^7 次,本算法在仿真中设置搜索域为 ± 20 个测点因此遍历分段点组合 8 000 个,计算量仅为穷举法的 0.02%,在计算量上本算法远远优于穷举法。

4.2 应用算例

应用本算法对西安地铁 3 号线右线 K18 + 554 ~ K21 + 000 段轨道按轨枕间距(平均为 0.6 m)采样,该段轨道共包含圆曲线 5 段、缓和曲线 10 段、直线段 6 段,测点 4 030 个,依本文算法进行线形优化,得到最终线形优化结果如图 11,线形分段结果及线形参数见表 3,表中缓和曲线长度为该圆曲线前后两段缓和曲线长度的平均值。

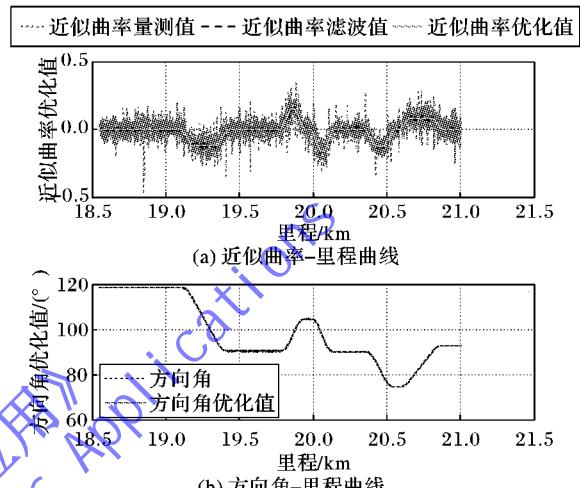


图 11 应用实例轨道线形

表 3 应用实例轨道线形分段结果及线形参数 m

序号	线形类型	起点里程	终点里程	缓和曲线长度	圆曲线半径
1	直线	18 553.602	19 107.539	—	—
2	圆曲线	19 176.326	19 348.621	68.787	490.55
3	直线	19 417.336	19 780.285	—	—
4	圆曲线	19 847.900	19 874.438	66.603	381.21
5	直线	19 942.041	19 989.230	—	—
6	圆曲线	20 051.613	20 075.902	62.131	344.12
7	直线	20 138.033	20 358.996	—	—
8	圆曲线	20 422.408	20 484.938	68.430	466.2
9	直线	20 548.398	20 592.820	—	—
10	圆曲线	20 651.066	20 816.051	58.842	703.02
11	直线	21 874.893	21 004.230	—	—

图 11 中优化曲线与量测曲线基本重合,说明两者贴合度好;表 3 中列出各直线段及圆曲线段起、终点处的里程值、各圆曲线的缓和曲线长度及圆曲线半径。结合数据算得目标函数值为 $\sum \Delta_i^2 = 21.3015$, RMSE 为 0.073,反映了量测噪声以及轨道不平顺。该应用算例表明本算法可以很好地对实际轨道中的基本线元组进行分段,并能够有效地从量测数据中提取出轨道最佳线形参数。

5 结语

本文提出先基于曲率曲线最小二乘拟合斜率变化对轨道线形概略分段,再使用组合迭代算法精确分段并优化线形的轨道平面最佳线形估计算法,可以获得与实际量测曲线最为贴合的符合设计规范的轨道线形参数。应用本算法可以处理

轨道既有线线形优化问题,得到调拨量最小前提下的轨道平面线形最佳参数,也为后续处理轨道不平顺奠定了基础。本算法由量测值拟合轨道曲率再积分成方向角,积分起点选择不佳会造成误差随积分累积而导致结果不理想,应进一步改进轨道线形拟合方法以减少噪声对轨道线形确定的影响。

参考文献:

- [1] 覃庆.既有线测量新技术[J].铁道工程学报,2007(2):47–50.
(QIN Q. The new measuring techniques for the existing railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(2): 47–50.)
- [2] 郭良浩,刘成龙,宋韬,等.铁路既有线平面和竖面线形精确分段方法研究[J].铁道工程学报,2014(7):48–52.(GUO L H, LIU C L, SONG T, et al. Research on the new method for accurate linear segmentation of plane and vertical curve type in existing railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(7): 48–52.)
- [3] 李红艳,陈治亚,邢诚,等.铁路既有线曲线复测计算方法[J].中国铁道科学,2009,30(2):18–22.(LI H Y, CHEN Z Y, XING C, et al. Calculation method for curve re-surveying of the existing railway line [J]. China Railway Science, 2009, 30(2):18–22.)
- [4] 秦方方,易思蓉,杨长根.基于三次样条曲线的铁路既有曲线整正方法[J].中国铁道科学,2010,31(2):18–23.(QIN F F, YI S R, YANG C G. Method for the realignment of the existing railway curve based on the cubic spline curve [J]. China Railway Science, 2010, 31(2): 18–23.)
- [5] 王利朋,刘成龙,杨雪峰.基于正交距离最短的平面线形拟合方法及应用[J].铁道科学与工程学报,2014(5):125–130.
(WANG L P, LIU C L, YANG X F. Method and application of plane linear fitting based on shortest orthogonal distance [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014(5): 125–130.)
- [6] 陈峰,辜良瑶,杨岳,等.铁路既有线复测平面曲线优化方法[J].铁道科学与工程学报,2012(5):90–95.(CHEN F, GU L Y, YANG Y, et al. Optimum method for horizontal curve re-surveying of the existing railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012(5): 90–95.)
- [7] 姚连壁,刘春.样条函数与稳健估计在线路线形识别中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(7):943–946.(YAO L B, LIU C. Spline function and robust estimation applied in line type identification for railways [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(7): 943–946.)
- [8] 丁克良,刘大杰,周全基.既有铁路曲线整正平差算法[J].测绘学报,2004,33(3):195–199.(DING K L, LIU D J, ZHOU Q J. Adjustment algorithm for realignment of the existing railway curve [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(3): 195–199.)
- [9] 李伟,蒲浩,彭先宝.基于方向加速法的铁路既有线平面重构优化算法[J].铁道科学与工程学报,2009,6(3):47–51.(LI W, PU H, PENG X B. Existing railway plane line reconstruction algorithm based on direction acceleration method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(3): 47–51.)
- [10] 吴双卿,王泽勇,高晓蓉.倾角传感器检测轨道不平顺状态[J].铁道标准设计,2004(12):24–26.(WU S Q, WANG Z Y, GAO X R. Detecting track irregularity with inclination sensor [J]. Railway Standard Design, 2004(12): 24–26.)
- [11] 韩丙虎,王丽,黄伟.铁路轨道不平顺的一种检测方法[J].铁道标准设计,2006(4):50–52.(HAN B H, WANG L, HUANG W. An inspection method for the unsMOOTH railway track [J]. Railway Standard Design, 2006(4): 50–52.)
- [12] 韩云飞.一种卫星导航与惯性测量组合轨道测量系统与方法:CN103207403A[P].2013-07-17.(HAN Y F. Railway track inspection and data processing method using satellite navigation and inertial measurement: CN103207403A [P]. 2013-07-17.)

Background

This work is partially supported by the 2015 Annual Transportation Research Projects of Traffic and Transportation Department of Shaanxi Province (15-49X).

LI Xiaowen, born in 1992, M. S. candidate. Her research interests include track irregularity detection, multi-source information fusion.

YUAN Xianghui, born in 1979, Ph. D., associate professor. His research interests include parameter estimation, state estimation, stochastic system theory, multi-source information fusion.

ZHOU Chunxiang, born in 1994. His research interests include track irregularity detection.

(上接第 3480 页)

- [9] GUO L, TAN E, CHEN S, et al. The stretched exponential distribution of Internet media access patterns [C]// Proceedings of the 27th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. New York: ACM, 2008: 283–294.
- [10] CALZAROSSA M C, MASSARI L, TESSERA D. Workload characterization: a survey revisited [J]. ACM Computing Surveys, 2016, 48(3):1–43.
- [11] SHAKER A, LUGHOFER E. Self-adaptive and local strategies for a smooth treatment of drifts in data streams[J]. Evolving Systems, 2014, 5(4):239–257.
- [12] KARAGIANNIS T, FALOUTSOS M. SELFIS: a tool for self-similarity and long-range dependence analysis [EB/OL]. [2016-02-20]. <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/kdd02.pdf>.
- [13] ARLITT M F, WILLIAMSON C L. Web server workload characterization: the search for invariants [J]. ACM SIGMETRICS Performance

Evaluation Review, 1996, 24(1): 126–137.

- [14] PAXSON V, FLOYD S. Wide area traffic: the failure of poisson modeling [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, 3(3): 226–244.
- [15] 彭行雄,肖如良,张桂刚.基于自适应提升的概率矩阵分解算法[J].计算机应用,2015,35(12):3497–3501.(PENG X X, XIAO R L, ZHANG G G. Probabilistic matrix factorization algorithm based on AdaBoost [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(12): 3497–3501.)

Background

This work is partially supported by the Fujian Provincial Great Plan Project (2016H6007).

PENG Xingxiong, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include machine learning.

XIAO Ruliang, born in 1966, Ph. D., professor. His research interests include software engineering, big data software.