

李松伟¹ 乔书波¹ 马洪磊¹ 杨显赐¹ 彭华东¹

考虑设计姿态辅助 IMU/ODO 的轨道不平顺检测算法

摘要

采用 GNSS 定位的轨道几何状态测量仪在隧道、地铁等 GNSS 拒止环境中无法工作。由于即使铁路轨道发生变形,其仍然接近设计线形,实际轨道位置与其设计值的差异始终保持在一定范围内。本文结合铁路设计参数与惯导/里程计信息,提出一种考虑设计姿态辅助 IMU/ODO 的轨道不平顺检测算法,该方法将设计姿态与惯导解算姿态相结合进行卡尔曼滤波,并使用里程计速度进行航位推算。通过计算实验,分析了轨道设计姿态信息对轨道不平顺检测精度的提升作用。实验结果表明:铁路设计姿态信息能够显著提高轨道不平顺检测精度,所提方法较基于全站仪辅助的动态检测方法,在 30 m 弦轨道不平顺检测精度相当,且整体检测效率较高,可以满足日常轨道检测的需要。

关键词

设计姿态;IMU/ODO;轨道不平顺;卡尔曼滤波;动态检测

中图分类号 P227.9

文献标志码 A

收稿日期 2023-03-25

资助项目 国家自然科学基金(42074010)

作者简介

李松伟,男,硕士生,主要研究方向为组合导航在铁路轨道平顺性测量中的应用。sw1839@126.com

乔书波(通信作者),男,博士,教授,主要从事空间大地测量方面的研究。chxyqsb@126.com

0 引言

随着我国高铁运营里程的快速增长,轨道不平顺检测技术受到了广泛关注。如何实现高效率、高精度、全场景的轨道不平顺检测已成为铁路运营维护面临的重要难题之一。目前,国内外主要采用的轨道不平顺检测技术包括:1)以全站仪(Total Station, TS)自由设站和三维极坐标测量为核心技术的静态轨检小车技术,采用“走停式”的作业模式;2)以 TS 不整平后方交会测量和组合导航为核心技术的半动态轨检小车技术,一般需要间隔 60~100 m 进行一次静态的全站仪不整平后方交会测量;3)以全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)定位辅助惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)为核心技术动态轨检小车技术,除初始和终止时刻外一般不需要静止测量。基于第 1 种技术的静态轨检小车由于需要频繁的静止观测作业效率极低,但绝对定位精度高。基于第 2 种技术的半动态轨检小车只需要较少的静止观测其余均为动态测量,故也常称为“动态轨检小车”。本文将其称为半动态轨检小车以区分基于第 3 种技术的轨检小车。半动态轨检小车既具有较高的作业效率,也具有与静态轨检小车接近或相当的绝对定位精度。基于第 3 种技术的动态轨检小车在作业开始后和结束前不需要静止观测,作业效率极高,但受 GNSS 绝对定位精度的限制,一般认为仅具有厘米级绝对定位精度。

本文围绕基于第 3 种技术的动态轨检小车的数据处理展开。针对地铁、隧道、城市峡谷等 GNSS 拒止环境,房博乐^[1]建立了带有运动约束的 GNSS/INS 的组合导航定位方法,用于轨道中线测量,其考虑了 GNSS 信号部分遮蔽的情形,但设计中仍然需 GNSS 信号。谈畅等^[2]针对地铁环境下无法接受 GNSS 信号的问题,提出一种基于惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)/里程计(Odometer, ODO)轨道检测系统,但其并没有考虑设计文件线形的问题。Li 等^[3]针对地铁环境中 GNSS 信号不可用的状况,设计了一种激光辅助 INS/ODO 组合导航系统进行轨道检测,但需要提前布设大量控制点,且整套系统价格昂贵,推广难度大。综上所述,在地铁、隧道等 GNSS 拒止环境下,为达到轨道不平顺检测精度要求,现有文献一般均考虑了轨道测量/检测设备紧贴轨道运动的特征,即:1)轨检小车的水平横向速度几乎为零,简称横向速度为零;2)轨检小车垂直于轨面方向的速度几乎为零,简称竖向速度为零。尽管现有文献均顾及了轨道运动特征对组合测量的

¹ 信息工程大学 地理空间信息学院,郑州,450001

辅助作用,但并未考虑铁路设计参数在其中的辅助作用.因此,本文结合轨道设计参数与 INS/ODO 数据,提出一种考虑设计姿态辅助 IMU/ODO 的轨道不平顺检测算法,用于隧道、地铁等 GNSS 拒止环境下的轨道检测,并且通过实验验证了该方法的有效性和准确性.

1 设计姿态辅助 IMU/ODO 组合模型

设计姿态辅助 IMU/ODO 组合原理如图 1 所示.由于即使轨道发生变形,但其实际值与设计值仍在一定范围,可以考虑使用设计文件进行辅助;在进行航位推算的过程中,INS 解算的姿态实际上在缓慢发散,利用设计姿态进行辅助,能在一定程度上抑制惯导姿态的发散,从而提高测量的精度.

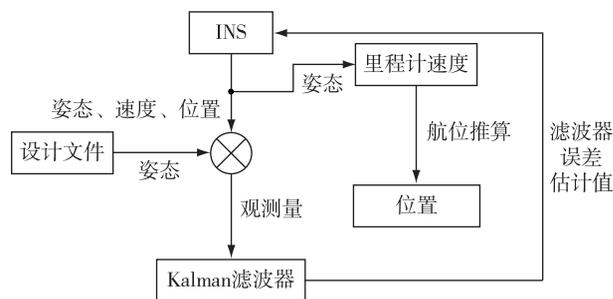


图 1 设计姿态辅助 IMU/ODO 组合原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of design attitude assisted IMU/ODO approach

1.1 姿态量测方程

本文选取当地水平坐标系(东北天)为导航系,记为 n 系;建立载体系 b 系,以车辆前进方向为 y 轴, x 轴垂直于 y 轴指向右方, z 轴垂直向上.捷联惯性导航系统中,将真实导航系与计算导航系之间的误差角称为平台失准角 φ^n , $\varphi^n = [\varphi_x^n \ \varphi_y^n \ \varphi_z^n]^T$.加入设计姿态辅助需要明确姿态角误差与平台失准角之间的关系,以便于提高惯导的姿态校正精度.姿态角误差可以表示为

$$\Delta \mathbf{A} = \mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}, \quad (1)$$

式中:姿态角误差 $\Delta \mathbf{A} = [\Delta p \ \Delta r \ \Delta y]^T$; $\mathbf{A} = [p \ r \ y]^T$ 为姿态角真值; $\hat{\mathbf{A}} = [\hat{p} \ \hat{r} \ \hat{y}]^T$ 为惯导解算的姿态角估值,具体为俯仰角、横滚角和方位角的估值.

设捷联惯导系统计算得到的姿态矩阵为

$$\mathbf{C}_b^{n'} = \mathbf{C}_n^n \mathbf{C}_b^n, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{C}_n^n \approx \mathbf{I} - (\varphi^n \times)$ 为真实导航坐标系到计算导航坐标系的转换矩阵.

根据姿态矩阵定义可得:

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} c_r c_y - s_p s_r s_y & -s_y c_p & s_r c_y + s_p c_r s_y \\ c_r s_y + s_p s_r c_y & c_y c_p & s_r s_y - s_p c_r c_y \\ -s_r c_p & s_p & c_r c_p \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_b^{n'} = \begin{bmatrix} c_r c_{\hat{y}} - s_{\hat{p}} s_r s_{\hat{y}} & -s_{\hat{y}} c_{\hat{p}} & s_r c_{\hat{y}} + s_{\hat{p}} c_r s_{\hat{y}} \\ c_r s_{\hat{y}} + s_{\hat{p}} s_r c_{\hat{y}} & c_{\hat{y}} c_{\hat{p}} & s_r s_{\hat{y}} - s_{\hat{p}} c_r c_{\hat{y}} \\ -s_r c_{\hat{p}} & s_{\hat{p}} & c_r c_{\hat{p}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式(3)、(4)代入式(2),经化简对比可以得到姿态角误差与平台失准角之间的关系(式(5)).具体过程推导过程见文献[4-8].

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta r \\ \Delta y \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos \hat{p}} \begin{bmatrix} -\cos \hat{p} \cos \hat{y} & -\cos \hat{p} \sin \hat{y} & 0 \\ \sin \hat{y} & -\cos \hat{y} & 0 \\ -\sin \hat{p} \sin \hat{y} & \sin \hat{p} \cos \hat{y} & -\cos \hat{p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_x^n \\ \varphi_y^n \\ \varphi_z^n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

使用轨道设计姿态信息 $\alpha_{\text{design}} = [p_d \ r_d \ y_d]^T$ 作为虚拟观测量,得姿态观测方程:

$$\alpha_{\text{design}} - \alpha_{\text{INS}} = \mathbf{A}_{\alpha, 3 \times 3} \cdot \varphi^n + \mathbf{e}_{\alpha}, \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{\alpha, 3 \times 3} =$$

$$\frac{1}{\cos \hat{p}} \begin{bmatrix} -\cos \hat{p} \cos \hat{y} & -\cos \hat{p} \sin \hat{y} & 0 \\ \sin \hat{y} & -\cos \hat{y} & 0 \\ -\sin \hat{p} \sin \hat{y} & \sin \hat{p} \cos \hat{y} & -\cos \hat{p} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, \mathbf{e}_{α} 为虚拟观测值的测量噪声.

根据式(6)可得设计姿态辅助 IMU/ODO 观测方程:

$$\mathbf{L}_{\alpha} = [\mathbf{A}_{\alpha, 3 \times 3} \ \mathbf{0}_{3 \times 12}] \mathbf{X} + \mathbf{e}_{\alpha}, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{A}_{\alpha, 3 \times 3}$ 为姿态系数矩阵; $\mathbf{X} = [(\varphi^n)^T \ (\delta v^n)^T \ (\delta p^e)^T \ (\boldsymbol{\varepsilon}^b)^T \ (\nabla^b)^T]^T$ 表示平台失准角、速度误差和位置误差以及陀螺仪与加计零偏,共 15 维状态参数; $\mathbf{L}_{\alpha} = \alpha_{\text{design}} - \alpha_{\text{INS}}$ 表示组合导航姿态观测值.

1.2 航位推算算法

航位推算(Dead Reckoning, DR)可以利用姿态、航向和里程信息推算载车相对于起始点的相对位置^[9].轨检小车在轨道上短距离行驶轨迹可看作直线^[10],行驶速度一般不超过 5 m/s,即使有弯道但其半径比较大,符合非完整性约束(Non-Holonomic Constraints, NHC)的假设,则其载体系下的侧向和垂向速度可认为是零;轨检小车的前向速度可由装配其上的里程计获得.考虑到 IMU 安装角为小角度,结合 NHC 和里程计, b 系下速度车辆速度为

$$\mathbf{v}_{\text{NHC,od}}^b = [0 \quad v_{\text{od}} \quad 0]^T, \quad (9)$$

其中, v_{od} 为里程计测得的前向速度大小, 右向和天向速度视为零。

通过惯导数据解算可以计算出轨检小车的姿态矩阵, 姿态矩阵对里程计速度转换可以得到导航系下的里程计速度, 记为 \mathbf{v}_{od}^n . 由导航系下里程计速度可得航位推算定位解算的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{L}_D = \frac{v_{\text{odN}}}{R_{MhD}}, \\ \dot{\lambda}_D = \frac{v_{\text{odE}} \sec L_D}{R_{NhD}}, \\ \dot{h}_D = v_{\text{odU}}, \end{cases} \quad (10)$$

其中: L_D , λ_D 和 h_D 分别为航位推算的地理纬度、经度和高度; $R_{MhD} = R_{MD} + h_D$, $R_{NhD} = R_{ND} + h_D$, R_{MD} 和 R_{ND} 分别为使用航位推算地理位置计算的子午圈和卯酉圈主曲率半径; $\mathbf{v}_{\text{od}}^n = [v_{\text{odE}} \quad v_{\text{odN}} \quad v_{\text{odU}}]^T$; $\sec L_D$ 表示 L_D 的正割。

2 实验结果与分析

2.1 仿真实验

铁路平面的设计线形主要有直线、圆曲线和缓和曲线 3 大类. 为了验证设计姿态辅助 IMU/ODO 的轨道不平顺检测算法的有效性, 以设计线形为直线情况为例进行仿真实验. 由于铁路轨道运营一段时间后不可避免地发生形变, 铁路实际线形不可能为理想的直线线形, 故模拟铁路轨道的实际几何形状示意如图 2 所示。

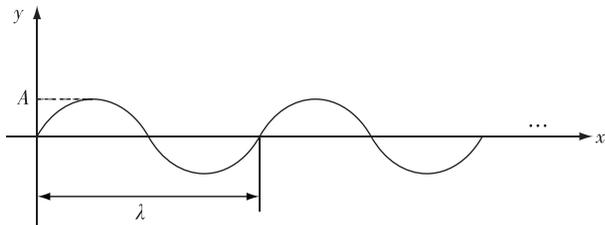


图 2 模拟轨道实际几何形状示意

Fig. 2 Schematic diagram of simulated track geometry

为了使模拟的轨道线形与真实情况更加接近, 令设计线形方程为 $y = 0$, 实际线形表达式为

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right), \quad (11)$$

式中, y 为模拟线形相对于设计线形的偏差, A 为偏差的振幅, λ 为偏差的周期, x 为里程。

令 $A = 5 \text{ mm}$, 偏差周期分别取 $\lambda = 30 \text{ m}$ 和 $\lambda =$

300 m 模拟轨道线形; 设轨检小车运行速度为 1 m/s , 运行时间为 $20\,000 \text{ s}$, IMU 频率为 200 Hz , 陀螺零偏为 $0.01 \text{ (}^\circ\text{)/h}$, 角度随机游走为 $0.005 \text{ (}^\circ\text{)/}\sqrt{\text{h}}$, 加速度计零偏 $50 \text{ }\mu\text{g}$, 速度随机游走为 $10 \text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$; ODO 频率与 IMU 频率一致, ODO 误差为 1% (即 1 km 误差为 1 m), 模拟 IMU 数据和 ODO 数据. 另外, 按照高速铁路工程测量规范^[11], 以间隔 0.625 m 模拟全站仪测量坐标。

轨道不平顺测量主要关注轨道内部几何参数, 例如: 轨距、超高/水平、轨向不平顺和高低不平顺等. 轨距和超高/水平通过轨检小车上搭载的激光测距系统和倾角传感器获得, 因此, 下文主要关注轨向不平顺和高低不平顺. 轨向不平顺和高低不平顺统称为轨道不平顺, 常采用 30 m 弦和 300 m 弦检测轨道短波和长波不平顺。

1) 设计姿态辅助对 IMU/ODO 定位性能的影响

采用考虑设计姿态辅助与无设计姿态辅助 IMU/ODO 算法分别计算轨道坐标, 并与模拟线形真值比较, 其结果如图 3、4 所示。

图 3 和图 4 分别为 $\lambda = 30 \text{ m}$ 和 $\lambda = 300 \text{ m}$ 时考虑与不考虑设计姿态辅助的条件下 IMU/ODO 轨道不平顺检测算法东北天 (ENU) 方向误差的结果对比。

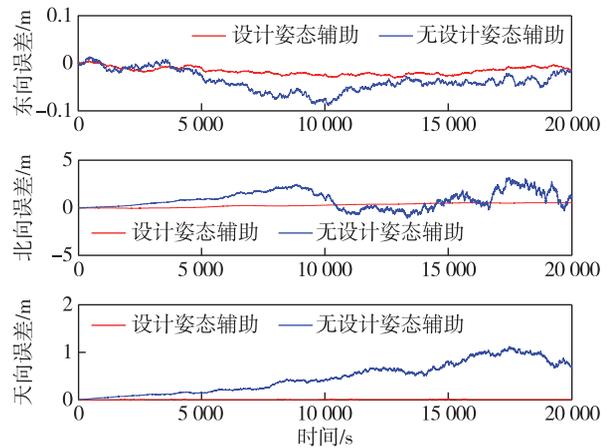


图 3 $\lambda = 30 \text{ m}$ 东、北、天方向误差对比

Fig. 3 Comparison of errors in three directions of east, north and up at $\lambda = 30 \text{ m}$

坐标误差的最大值如表 1 所示。

结果显示, 在不考虑设计姿态辅助时, 误差发散很快, 特别是北向和天向, $\lambda = 30 \text{ m}$ 和 $\lambda = 300 \text{ m}$ 时东北天坐标误差最大值分别达到了 3.15 m 和 4.35 m . 当加入设计姿态辅助后, $\lambda = 30 \text{ m}$ 和 $\lambda = 300 \text{ m}$ 时东北天 3 个方向定位精度分别提升了 66% 、 83% 、 99%

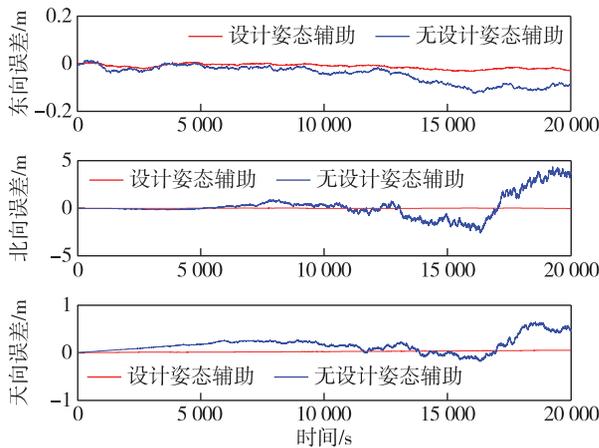


图 4 $\lambda = 300$ m 东、北、天方向误差对比

Fig. 4 Comparison of errors in three directions of east, north and up at $\lambda = 300$ m

表 1 坐标误差统计

Table 1 Statistical values of coordinate error

方向	坐标误差最大值/m				加入姿态后提升/%	
	无设计姿态辅助		设计姿态辅助		$\lambda = 30$ m	$\lambda = 300$ m
	$\lambda = 30$ m	$\lambda = 300$ m	$\lambda = 30$ m	$\lambda = 300$ m		
东向(E)	0.09	0.13	0.03	0.03	66	74
北向(N)	3.15	4.35	0.54	0.03	83	99
天向(U)	1.13	0.65	0.01	0.05	99	92

和 74%、99%、92%，可见设计姿态辅助对定位效果的提升作用明显。

2) 不考虑与考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法和全站仪坐标辅助算法的轨道不平顺值的偏差对比

首先, 定义轨道不平顺值偏差为计算的轨道不平顺值与其真值的差值。其中, 轨道不平顺值的具体计算方法可参考文献[12-15]。由于仿真实验仅模拟了平面设计线形, 故下文仅对轨向不平顺值进行统计分析。采用不考虑与考虑设计姿态辅助方法的 IMU/ODO 算法和全站仪坐标辅助算法分别计算轨道坐标, 进而计算出相应的轨道不平顺值, 再与其真值比较得到 3 种方法的轨道不平顺值偏差。3 种方法的轨道不平顺值偏差的统计情况如表 2 所示。

将轨道不平顺值偏差的中误差 (RMS) 作为统计值, 其中全站仪数据统计值为 1 000 组轨道不平顺值偏差中误差 (RMS) 的均值。

图 5—8 为 $\lambda = 30$ m 和 $\lambda = 300$ m 时不考虑和考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法 30 m 弦和 300 m 弦轨道不平顺值偏差的对比结果。

表 2 轨道不平顺值偏差统计 (RMS)

Table 2 Statistical values of track irregularity deviation (RMS)

λ /m	方法	轨道不平顺值偏差 (RMS)/mm	
		30 m 弦	300 m 弦
30	不考虑设计姿态	52.23	247.99
	考虑设计姿态	0.44	1.77
	全站仪坐标辅助	1.00	1.01
300	不考虑设计姿态	52.83	244.65
	考虑设计姿态	0.14	2.27
	全站仪坐标辅助	1.00	1.11

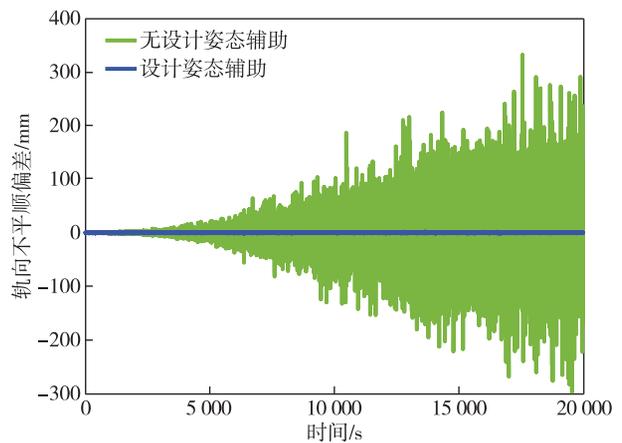


图 5 $\lambda = 30$ m 时 30 m 弦轨向不平顺值偏差对比

Fig. 5 Comparison of deviation of 30 m chord track alignment irregularity values at $\lambda = 30$ m

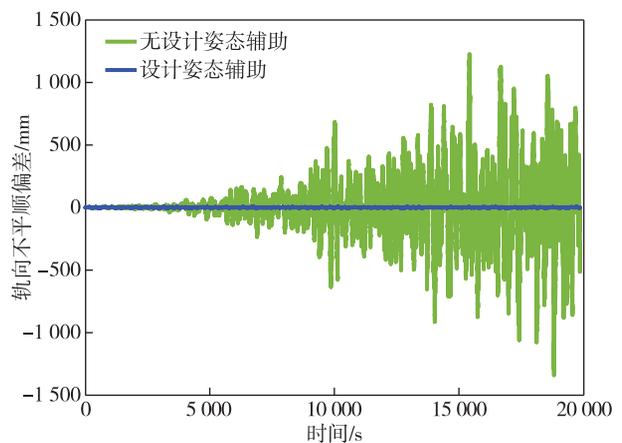


图 6 $\lambda = 30$ m 时 300 m 弦轨向不平顺值偏差对比

Fig. 6 Comparison of deviation of 300 m chord track alignment irregularity values at $\lambda = 30$ m

从图 5—8 可以看出: 未考虑设计姿态时, 轨向不平顺值偏差随时间的增长而增大; 而添加姿态后, 轨向不平顺偏差较为稳定。这是因为未考虑设计姿态时, 姿态角 (主要是航向角) 一直在发散, 而轨向不

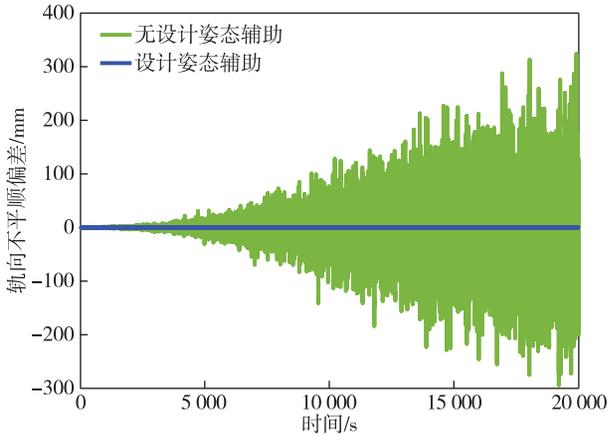


图 7 $\lambda = 300$ m 时 30 m 弦轨向不平顺值偏差对比
Fig. 7 Comparison of deviation of 30 m chord track alignment irregularity values at $\lambda = 300$ m

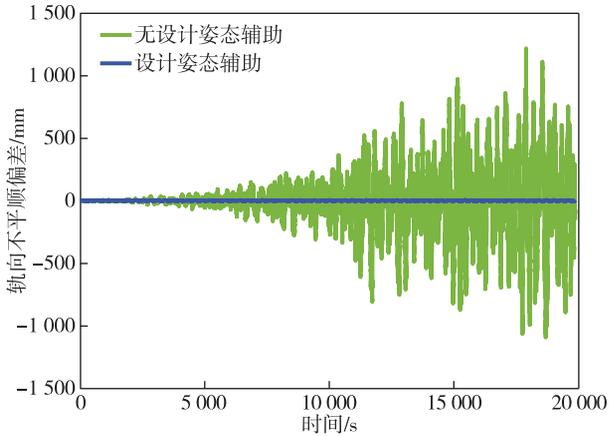


图 8 $\lambda = 300$ m 时 300 m 弦轨向不平顺值偏差对比
Fig. 8 Comparison of deviation of 300 m chord track alignment irregularity values at $\lambda = 300$ m

发散表现为轨向不平顺值偏差的增大;而加入了合理的设计姿态辅助后,轨向不平顺值偏差不再增大,趋于稳定.可见添加设计姿态辅助信息对轨道不平顺精度的提升作用明显.

从表 2 可以看出:未考虑设计姿态时,30 m 弦和 300 弦的轨向不平顺值偏差远远超过允许限差(30 m 弦和 300 m 弦轨道不平顺值分别要求不超过 2 mm 和 10 mm,即在均值为零的情况下,按照 2 倍限差计算,则其均方差分别不应超过 1 mm 和 5 mm);加入设计姿态辅助之后,结果大为改善,30 m 弦轨向不平顺值偏差分别从 52.23 mm、52.83 mm 减小到 0.44 mm、0.14 mm,分别占允许限差的 44% 和 14%,300 m 弦轨向不平顺值偏差分别从 247.99 mm、244.65 mm 减小到 1.77 mm、2.27 mm,分别占允许限差的 35.4% 和 45.4%;使用全站仪坐标辅助轨向不平顺值偏差较为稳定,在 1 mm 左右.从仿真结果来看,考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法在 30 m 弦轨向不平顺值偏差结果优于全站仪坐标辅助方法,在 300 m 弦结果稍差于全站仪坐标辅助方法,但仍满足规范.

2.2 实测实验

本次试验路段为隧道路段,平面线形包含直线、缓和曲线和圆曲线,竖直面包含 2 段直线以及衔接的圆曲线,如图 9 所示.惯导频率为 200 Hz,陀螺零偏为 0.01 ($^{\circ}$)/h,角度随机游走为 0.005 ($^{\circ}$)/ \sqrt{h} ,加速度计零偏 $50 \mu\text{g}$,速度随机游走为 $10 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$; ODO 提供的里程误差小于 1‰;轨检小车上还搭载有倾角仪、轨距传感器等设备.

选取长约 2 km 的轨道不平顺测量数据,分别使

平顺值偏差可由航向角偏差的积分所反映,航向角

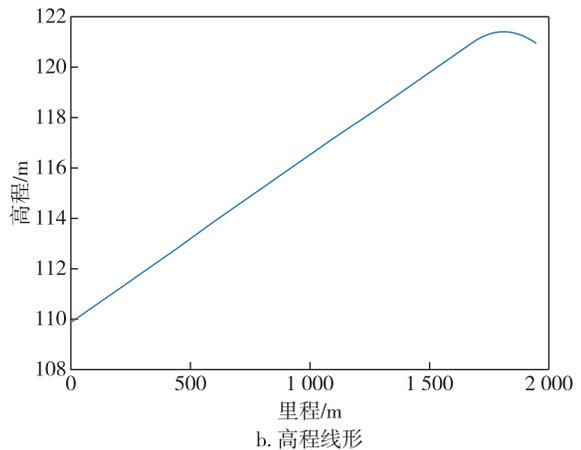
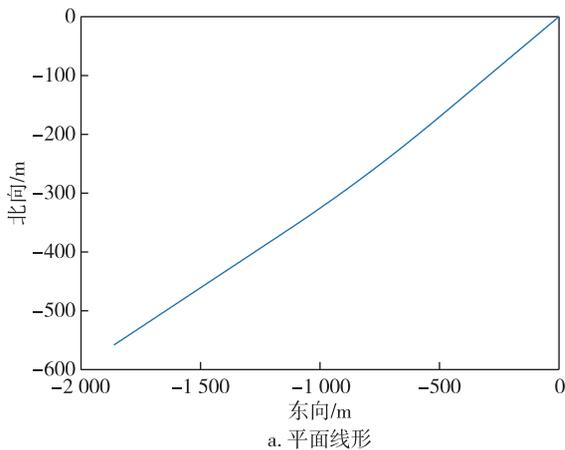


图 9 实验平面和高程线型

Fig. 9 Plane and elevation line diagrams of the experiment

用考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法和基于全站仪辅助的动态检测方法^[16]进行轨道不平顺值的计算,统计 30 m 和 300 m 弦的轨道不平顺值,以验证考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法的效果.图 10—13 为 2 种方法 30 m 和 300 m 弦的轨道不平顺值.

2 种方法计算的轨道不平顺值的精度 (RMS) 统计结果如表 3 所示.

2 种方法计算的 30 m 弦轨向/高低重复性误差最大值分别为 1.546 3 mm 和 1.039 1 mm,误差范围及占比结果如表 4 所示.

结果显示,本文提出的考虑设计姿态辅助 IMU/ODO 的轨道不平顺算法计算的 30 m 弦轨向/高低不平顺值精度与基于全站仪辅助的动态检测方法基本相当,满足基本检测需求 (<0.7 mm).在 300 m 弦的轨向/高低不平顺值计算结果中,基于全站仪辅助的

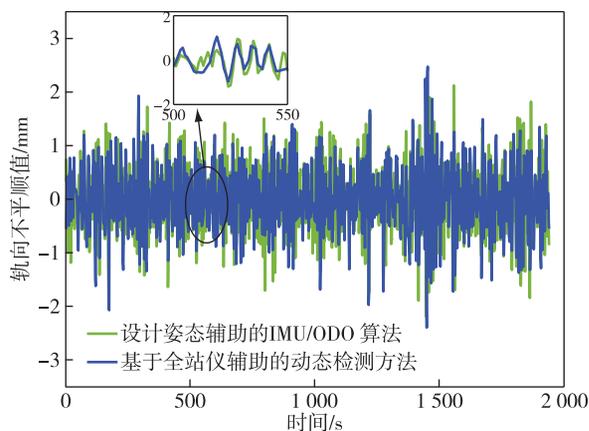


图 10 30 m 弦轨向不平顺值对比
Fig. 10 Comparison of track alignment irregularity values of 30 m chord

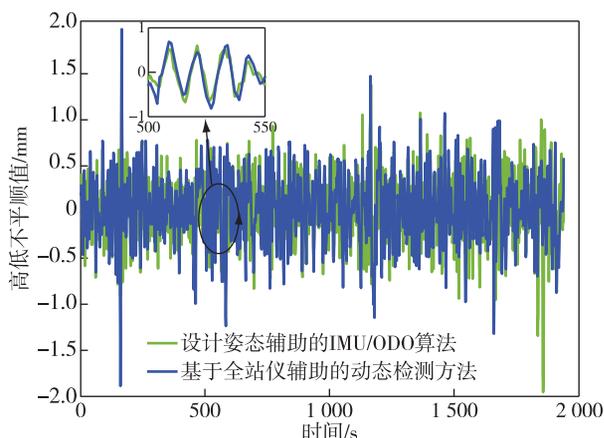


图 11 30 m 弦高低不平顺值对比
Fig. 11 Comparison of track vertical irregularity values of 30 m chord

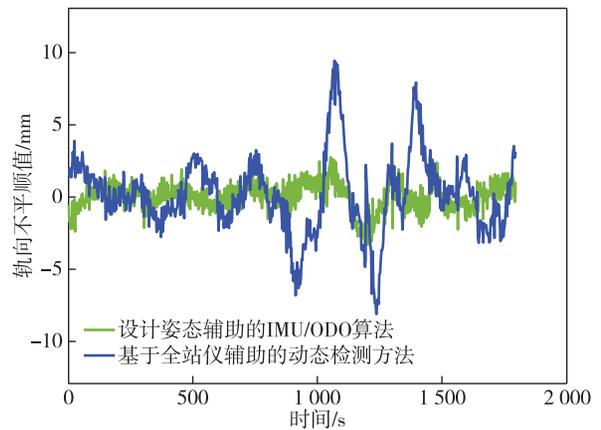


图 12 300 m 弦轨向不平顺值对比
Fig. 12 Comparison of track alignment irregularity values of 300 m chord

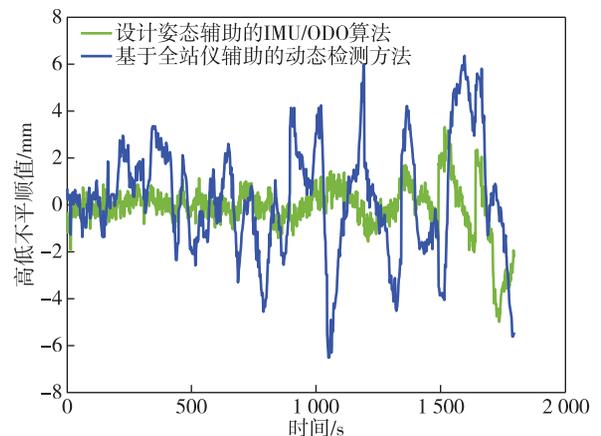


图 13 300 m 弦高低不平顺值对比
Fig. 13 Comparison of track vertical irregularity values of 300 m chord

表 3 某段实测轨道不平顺值精度结果 (RMS) 对比

Table 3 Comparison with measured track irregularity results (RMS) mm

		irregularity results (RMS) mm	
不平顺方向		设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法	全站仪辅助的动态检测方法
30 m 弦	轨向	0.594 9	0.571 1
	高低	0.330 1	0.357 3
300 m 弦	轨向	0.948 7	2.626 5
	高低	1.071 7	2.421 0

表 4 30 m 弦重复性误差范围占比

Table 4 Proportion of repeatability error range of 30 m chord

重复性误差	占比/%	
	轨向不平顺	高低不平顺
≤0.6 mm	82.41	95.26
≤0.8 mm	92.68	99.12

动态检测方法存在接边误差,因为其需要每隔一段距离进行换站,每次换站会进行一次位置修正,相应点的轨道不平顺值会发生较大变化;而设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法的姿态和里程计数据是连续的,可以从一定程度上避免这个问题。

从图 10、11 及表 4 可以看出,2 种算法轨向/高低不平顺值结果基本一致,90%以上的区段 30 m 弦的轨向和高低不平顺值重复性误差小于 0.8 mm。因此,本文提出的设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法的轨道不平顺检测精度与基于全站仪辅助的动态检测方法相当,可以满足现阶段铁路养护的需要。由于基于全站仪辅助的动态检测方法需要每隔 60~100 m 进行换站,而设计姿态辅助的 IMU/ODO 算法仅需要初始位置信息,中间不需停靠,轨检小车可不间断推行,从而提高了测量效率,削弱了对轨道控制网或 GNSS 信号的依赖。

3 结论

本文针对地铁、隧道等 GNSS 拒止环境下,现有轨道不平顺测量/检测技术难以实现轨道快速、准确检测的现状,提出一种考虑设计姿态辅助的 IMU/ODO 轨道不平顺检测方法。优势如下:

1) 充分利用轨道设计线形,顾及设计线形信息,实现了与全站仪辅助的动态检测方法一样的检测效果。

2) 削弱了对轨道控制网或 GNSS 信号的依赖,能够有效解决地铁、隧道、城市峡谷、山区等 GNSS 拒止环境下无法快速、准确进行轨道检测的问题。

本算法并未考虑因路况较差造成里程计打滑或故障等因素,因此,后续可以对小车行驶状态进行判断,只在状态良好时使用里程计数据,状态不好时使用惯导信息。受限于实验条件,实测数据仅计算了 2 km,需要进一步研究在更长距离下的实际结果。

参考文献

References

- [1] 房博乐.复杂城市环境下 GNSS/INS 轻轨轨道中线精密测量方法 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9 (4): 136-141
FANG Bole. Precision measurement method of light rail centerline based on GNSS/INS in complex urban environment [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9 (4): 136-141
- [2] 谈畅,肖昌炎.基于卡尔曼滤波的地铁轨道不平顺参数测量系统 [C]//2022 中国自动化大会论文集, 2022:513-518

- TAN Chang, XIAO Changyan. Measurement system of metro track irregularity parameters based on Kalman filter [C]//Collection of Theses for the 2022 China Automation Congress, 2022:513-518
- [3] Li Q Q, Chen Z P, Hu Q W, et al. Laser-aided INS and odometer navigation system for subway track irregularity measurement [J]. Journal of Surveying Engineering, 2017, 143(4):04017014
- [4] 严恭敏,翁浚.捷联惯导算法与组合导航原理 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2019
- [5] 秦永元.惯性导航 [M]. 北京:科学出版社, 2006
- [6] Chia L, Bhardwaj B, Lu P, et al. Railroad track condition monitoring using inertial sensors and digital signal processing: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (1): 25-33
- [7] 严恭敏,秦永元,杨波.车载航位推算系统误差补偿技术研究 [J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 26-30
YAN Gongmin, QIN Yongyuan, YANG Bo. On error compensation technology for vehicular dead reckoning (DR) system [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 26-30
- [8] Muñoz S, Ros J, Urda P, et al. Estimation of lateral track irregularity using a Kalman filter. Experimental validation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 504: 116122
- [9] 王付有,高成发,甘露,等.复杂环境智能手机 RTK/DR 车载组合定位方法 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2022, 14(6): 715-721
WANG Fuyou, GAO Chengfa, GAN Lu, et al. Integrated mobile phone RTK/DR vehicle positioning in complex environment [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(6): 715-721
- [10] Gao Z Z, Ge M R, Li Y, et al. Railway irregularity measuring using Rauch-Tung-Striebel smoothed multi-sensors fusion system: quad-GNSS PPP, IMU, odometer, and track gauge [J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 36
- [11] 中铁二院工程集团有限责任公司.高速铁路工程测量规范: TB10601—2009 [S]. 北京:中国铁道出版社, 2010
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd.. Code for engineering survey of high speed railway: TB10601—2009 [S]. Beijing: China Railway Press, 2010
- [12] 全顺喜,王平,陈嵘.无砟轨道高低和方向不平顺计算方法研究 [J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 81-85
QUAN Shunxi, WANG Ping, CHEN Rong. Study on calculation methods of lateral and vertical profile irregularity of ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(5): 81-85
- [13] 姜庆安.基于平滑滤波的高精度惯性测量与参数估计方法研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2017
JIANG Qing'an. Research on high-precision inertial surveying and parameter estimating based on smoothing and filtering [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017
- [14] 周武星.基于 GNSS/INS 组合系统的高铁轨道几何状态不平顺精密测量方法 [D]. 武汉:武汉大学, 2020
ZHOU Wuxing. Research on high-speed railway track geometry irregularity precise measuring based on GNSS/

- INS integration system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020
- [15] Chen Q J, Niu X J, Zhang Q, et al. Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration [J]. Navigation, 2015, 62(1): 83-93
- [16] 吴维军. 基于免置平车载全站仪的高速铁路无砟轨道精测方法研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018
- WU Weijun. Research on the precision measurement method of ballastless track based on the vehicle ETS without leveling in high-speed railway [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018

Design attitude assisted IMU/ODO approach for track irregularity detection

LI Songwei¹ QIAO Shubo¹ MA Honglei¹ YANG Xianci¹ PENG Huadong¹

¹ School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract The track geometry state measuring instrument using GNSS positioning cannot work in GNSS rejection environment such as tunnel and underground. Since the railroad track is still close to the design alignment even if it is deformed, the difference between actual track position and its design value always remains within a certain range. Herein, a track irregularity detection approach considering design attitude assisted IMU/ODO (Inertial Measurement Unit/Odometer) is proposed, which combines design attitude with inertial guidance solved attitude for Kalman filtering and uses odometer velocity for dead reckoning. Computational experiment results show that the railroad design attitude information can significantly improve the track irregularity detection accuracy, and the proposed approach is comparable to the total station assisted dynamic detection method according to the 30 m chord track irregularity detection results. The overall detection efficiency is high enough to meet the needs of daily track detection.

Key words design attitude; inertial measurement unit/odometer (IMU/ODO); track irregularity; Kalman filtering; dynamic detection