

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514795

基于自适应 NHC 量测噪声的车载测向算法^{*}

陈熙源^{1,2}, 颜亚强¹, 孙可欣¹, 高 宁¹

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210046; 2. 贵州理工学院航空航天工程学院 贵阳 550000)

摘 要:为了提高车载捷联航姿系统(AHRS)的定姿精度,提出利用非完整性运动约束(NHC)对航姿系统误差进行在线自主补偿,然而传统组合导航方案存在非完整性运动约束(NHC)失效和横向速度噪声建模不准确等问题,从而导致航向角误差累积,严重影响车载定位定向的可靠性与稳定性。针对车辆转弯过程中因轮胎侧偏效应引起的横向速度分量,提出一种基于自适应非完整性运动约束(NHC)量测噪声的车载测向算法。首先,基于二自由度车辆动力学模型,构建出前向速度与横向加速度的非线性耦合函数,实现对车辆运动过程中横向速度噪声特性的精准表征,完成非完整性运动约束(NHC)量测噪声的动态修正;同时,引入方差受限调节机制,根据车辆运动状态实时调整约束强度。由全球卫星导航系统/捷联惯性导航系统(GNSS/SINS)组合导航的实车实验表明,在连续弯道和环形绕行两种典型转弯场景下,在维持俯仰角、横滚角等姿态测量精度基本不变的前提下,显著改善航向角估计精度,与传统方法相比,航向角测量精度提升 15% 以上,且在全球卫星导航系统(GNSS)信号短时中断、遮挡等异常工况下表现出良好的鲁棒性与收敛性。算法从噪声建模与约束自适应两方面同步优化,有效解决了车辆转弯运动过程中组合导航系统航向角精度退化、滤波易发散等问题,可为地面无人载具、智能车载导航等系统提供更高精度、更高可靠性的航向姿态参考。

关键词: 组合导航;非完整性约束;自适应噪声;航向估计

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 510.40

Vehicle-mounted orientation determination algorithm based on the adaptive non-holonomic constraints measurement noise

Chen Xiyuan^{1,2}, Yan Yaqiang¹, Sun Kexin¹, Gao Ning¹

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210046, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550000, China)

Abstract: To improve the attitude determination accuracy of vehicle-mounted strapdown attitude and heading reference system (AHRS), the non-holonomic constraint (NHC) is adopted to compensate the errors of attitude and heading system online. However, traditional integrated navigation schemes suffer from problems such as the failure of non-holonomic constraint (NHC) and inaccurate modeling of lateral velocity noise, which lead to the accumulation of heading angle errors and seriously affect the reliability and stability of on-board positioning and orientation. Considering the lateral velocity component caused by the tire camber effect during vehicle turning, this study proposes a vehicle orientation algorithm based on the adaptive non-holonomic constraint (NHC) measurement noise. Firstly, based on the vehicle dynamics model with the two-degree-of-freedom, a nonlinear coupling function of forward velocity and lateral acceleration is constructed to accurately characterize the characteristics of lateral velocity noise during vehicle motion and complete the dynamic correction of non-holonomic constraint (NHC) measurement noise; Meanwhile a variance-limited adjustment mechanism is introduced to adjust the constraint intensity in real time according to the vehicle motion state. The real vehicle experiments of integrated navigation based on the global navigation satellite system/strapdown inertial navigation system (GNSS/SINS) demonstrate that, the proposed algorithm in both typical turning scenarios (continuous curves and circular driving) significantly improves the heading angle estimation accuracy while maintaining almost unchanged measurement accuracy of pitch and roll angles. The heading angle measurement accuracy is

收稿日期: 2025-12-20 Received Date: 2025-12-20

^{*} 基金项目: 贵州省科技计划(XKBF(2025)032)项目资助

improved by more than 15% compared to the traditional method, which shows the good robustness and convergence in abnormal conditions such as short-term interruption and occlusion of global navigation satellite system (GNSS) signal. The algorithm simultaneously optimizes the noise modeling and constraint adaptation, which effectively solves the problems of heading angle accuracy degradation and filter divergence in the integrated navigation system during the vehicle turning motion. It can provide the higher-precision and higher-reliability heading and attitude references for the ground unmanned vehicles, intelligent vehicle navigation and other systems.

Keywords: integrated navigation; nonholonomic constraints; adaptive noise; heading estimation

0 引 言

组合导航系统通过多源传感器信息融合,有效提升了系统的整体性能,但在车辆转弯运动过程中仍面临航向角精度显著下降的挑战^[1]。传统全球卫星系统/捷联惯性系统(global navigation satellite system/strapdown inertial navigation system, GNSS/SINS)组合导航系统虽然兼具 GNSS 的长期稳定性和 SINS 的短时高精度特性,但在转弯工况下,低成本的微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)惯性传感器由于陀螺漂移等问题,其独立推算的航向角误差会随转弯时间累积,与此同时,GNSS 天线相位中心速度与载体质心速度存在偏差^[2],无法有效校正累积误差。特别是在城市峡谷等复杂环境中,GNSS 信号易受建筑物遮挡、多路径和非视距等效应影响^[3],车辆频繁的转弯运动与 GNSS 信号质量波动会形成耦合效应,进一步加剧了航向角的估计误差。这一现象与 GNSS 完全失锁的情况有本质区别,主要表现为航向角精度的渐进性劣化而非突然失效,对自动驾驶等需要连续高精度航向信息的应用场景构成了严峻挑战。

目前,针对车辆转弯过程中组合导航系统航向角精度退化的问题,主流的解决方案有两种:1)引入新的外部传感器进行辅助;2)利用车辆自身的运动学约束。第 1 种方案是引入新的外部传感器以构建冗余观测^[4],例如罗经、星敏传感器以及磁力计等常用于辅助 SINS,可以显著提高组合系统的鲁棒性和定向性能,但是这种方法也增加了系统的成本和复杂度。

第 2 种方案是利用车辆的运动学特征,非完整性约束(non-holonomic constraints, NHC)作为一种简单有效的手段,常用于辅助低成本 GNSS/SINS 组合导航系统。NHC 假设陆地车辆在不发生跳跃、侧滑和弹跳的情况下,车辆的横向和垂向速度为^[5-6]。这一特性可转化为速度约束条件,用于构造虚拟观测量,在量测更新阶段预先给定相对保守的方差,可以在一定程度上提高 SINS 航位推算的精度。在直行工况下该约束条件成立,但在转弯过程中,由于轮胎侧偏效应的存在,车辆实际会产生横向速度分量^[7],导致传统 NHC 约束失效。针对这一问题,学者展开了相关研究。喻鑫涛^[8]提出了一种基于车辆速度与运动状态 NHC 噪声自适应估计方法,利用车辆状态

信息对约束噪声进行实时调整,但这种方法高度依赖于车辆状态预测精度,同时其噪声自适应机制采用离散化的分段函数设计,在状态切换时存在明显的非连续性。刘万科等^[9]根据车体的速度、角度变化与 NHC 观测量误差之间的相关性,对其量测噪声进行修正,将量测噪声方差建模为车辆前向速度与陀螺 z 轴输出的简单线性加权,这种加权关系缺乏严谨的理论推导依据,且难以准确表征车辆横向速度与运动状态之间复杂的非线性动态耦合关系;李晗旭等^[10]提出了一种基于车辆速度分类的长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM),用于预测车辆的三维速度,并基于速度新息调整其方差域,然而,神经网络模型训练数据采集成本较高,且难以满足车载嵌入式平台的实时性要求。目前学者们广泛将 NHC 应用于提高系统定位精度,但少有研究 NHC 在提升水平姿态角,尤其是航向精度方面的作用,闵于等^[11]提出 NHC 可以优化航向姿态角重复测量精度。

综上,本研究提出一种基于自适应 NHC 量测噪声的车载测向算法。该算法通过建立前向速度与横向加速度的非线性耦合函数精确表征横向速度噪声特性,并设计基于方差约束的自适应调节机制,在保证滤波稳定性的同时实现 NHC 约束权重动态优化。

1 组合导航抗差滤波模型

1.1 状态方程

以 SINS 系统为主导,通过角速度和比力信息积分解算出载体的速度、位置信息。通过不断更新姿态矩阵得到载体的姿态信息。以 SINS 的误差模型建立状态方程,误差状态包括:位置误差 $\delta \mathbf{p}^n$,速度误差 $\delta \mathbf{v}^n$ 、平台失准角 ϕ^n 、陀螺仪零漂误差 ϵ^b ,加速度计零偏误差 ∇^b ,在此基础上,考虑到 NHC 有效性严格依赖安装角精度^[12],将 SINS 相对于车体的俯仰安装角误差 $\delta \alpha_\theta$ 和航向安装角误差 $\delta \alpha_\psi$ 扩充为状态变量,17 维误差状态方程构建如式(1)~(2)所示^[13-15]。

$$\mathbf{X} = (\phi^n \quad \delta \mathbf{v}^n \quad \delta \mathbf{p}^n \quad \epsilon^b \quad \nabla^b \quad \delta \alpha)^T \quad (1)$$

$$\delta \alpha = (\delta \alpha_\theta \quad \delta \alpha_\psi)^T \quad (2)$$

式中:安装角误差 $\delta \alpha_\theta$ 和 $\delta \alpha_\psi$ 可视为随机常值,即:

$$\begin{cases} \delta \dot{\alpha}_\theta = 0 \\ \delta \dot{\alpha}_\psi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

系统状态方程如式(4)所示。

$$\dot{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k \quad (4)$$

式中: k 为时间参数; $\mathbf{F}$ 为系统状态转移矩阵; $\mathbf{G}$ 为噪声转移矩阵; $\mathbf{w}$ 为过程噪声向量, 其均值为 0, 且满足高斯分布。

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1 & \mathbf{0}_{15 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 15} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{G}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{w} = (\mathbf{w}_g^T \mathbf{w}_a^T \mathbf{w}_\alpha^T)^T \quad (7)$$

式中: $\mathbf{C}_b^n$ 为从载体坐标系(b 系)到导航坐标系(n 系)的姿态转换矩阵; $\mathbf{w}_g$ 为陀螺仪噪声; $\mathbf{w}_a$ 为加速度计噪声; $\mathbf{w}_\alpha$ 为安装角噪声。

1.2 量测方程

构建系统状态方程之后,需要定期利用反馈信息来对系统进行校正,以确保其稳定性,避免发散。结合实际需求,本研究利用双天线 GNSS 测量的航向角和速度数据对 SINS 进行定期滤波校正,同时利用 NHC 原理构造虚拟观测测量,组成 6 维量测模型,如式(8)所示。

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \psi_{\text{SINS}}^n - \psi_{\text{GNSS}}^n \\ \mathbf{v}_{\text{SINS}}^n - \mathbf{v}_{\text{GNSS}}^n \\ v_x^m - 0 \\ v_z^m - 0 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \boldsymbol{\sigma}_k \quad (8)$$

式中: ψ_{SINS}^n 、 ψ_{GNSS}^n 分别为 SINS 和 GNSS 在 n 系下的航向角向量; $\mathbf{v}_{\text{SINS}}^n$ 、 $\mathbf{v}_{\text{GNSS}}^n$ 分别为 SINS 和 GNSS 在 n 系下的速度向

$$\mathbf{C}_m^b = \begin{bmatrix} \cos \alpha_\gamma \cos \alpha_\psi + \sin \alpha_\gamma \sin \alpha_\psi \sin \alpha_\theta & \sin \alpha_\psi \cos \alpha_\theta \\ \cos \alpha_\gamma \sin \alpha_\psi + \sin \alpha_\gamma \cos \alpha_\psi \sin \alpha_\theta & \cos \alpha_\psi \cos \alpha_\theta \\ -\sin \alpha_\gamma \cos \alpha_\theta & \sin \alpha_\theta \end{bmatrix}$$

从式(14)中可以看出: v_y^m 为 SINS 在车体坐标系(m 系)下的前向速度,显然不为 0, v_x^m 和 v_z^m 为 SINS 在载体系(m 系)下的右向速度和垂向速度,由于车辆安装角的存在,均不为 0, α_θ 、 α_γ 和 α_ψ 分别为 SINS 相对车体的俯仰、横滚和航向安装角,并且 α_γ 不影响 b 系下的速度分量,因此在状态方程中未予以考虑。

2) 忽略 α_γ 的影响,先将俯仰安装角误差和航向安装角误差合并,获得安装角误差向量,从而构造安装角误差余弦矩阵如式(15)所示。

$$\delta \boldsymbol{\alpha} = (\delta \alpha_\theta \quad 0 \quad \delta \alpha_\psi)^T \quad (15)$$

$$\delta \mathbf{C}_b^m = -(\delta \boldsymbol{\alpha} \times) \mathbf{C}_b^m \quad (16)$$

3) 结合式(15),对式(12)全微分得到 NHC 误差相关的量测矩阵,即:

量,由东北天三向速度组成; v_x^m 、 v_z^m 分别为 SINS 在车体坐标系(m 系)下的右向速度和垂向速度,这里 m 系定义在右前上坐标系下, $\mathbf{H}$ 为量测矩阵, $\boldsymbol{\sigma}$ 为量测噪声。其中:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{\psi_v} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \mathbf{H}_{\text{NHC}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_\phi \\ \boldsymbol{\sigma}_v \\ \boldsymbol{\sigma}_p \\ \boldsymbol{\sigma}_{\text{NHC}} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{NHC}} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{v_x} \\ \boldsymbol{\sigma}_{v_z} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_\phi$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_v$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_p$ 都为 GNSS 的量测噪声方差; $\boldsymbol{\sigma}_{\text{NHC}}$ 为 NHC 相关的量测噪声方差,由横向速度量测噪声方差 $\boldsymbol{\sigma}_{v_x}$ 和垂向速度量测噪声方差 $\boldsymbol{\sigma}_{v_z}$ 组成; $\mathbf{H}_{\psi_v}$ 为航向角和速度误差相关的量测矩阵,具体表达式如式(12)所示。

$$\mathbf{H}_{\psi_v} = \begin{pmatrix} -\tan \theta \times \sin \psi & \tan \theta \times \cos \psi & -1 & \mathbf{0}_{1 \times 12} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{H}_{\text{NHC}}$ 为 NHC 误差相关的量测矩阵,具体推导见下 1)~3):

1) 首先定义从载体坐标系(b 系)到车体坐标系(m 系)的姿态转换矩阵为 $\mathbf{C}_b^m$, 则非完整性约束关系可以表示如式(13)所示^[16]。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \mathbf{v}_{\text{SINS}}^n = \begin{pmatrix} v_x^m \\ v_z^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中:对 $\mathbf{C}_b^m$ 进行解析,可以得到如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} \sin \alpha_\gamma \cos \alpha_\psi - \cos \alpha_\gamma \sin \alpha_\psi \sin \alpha_\theta \\ -\sin \alpha_\gamma \sin \alpha_\psi - \cos \alpha_\gamma \cos \alpha_\psi \sin \alpha_\theta \\ \cos \alpha_\gamma \cos \alpha_\theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (-\delta \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \mathbf{v}^n + \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \boldsymbol{\phi}^n \times \mathbf{v}^n + \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \delta \mathbf{v}^n) \quad (17)$$

其中,式(17)进行变量替换后,可以得到式(18),即:

$$\begin{pmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (\mathbf{M}_1 \boldsymbol{\phi}^n + \mathbf{M}_2 \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{M}_3 \delta \boldsymbol{\alpha}) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{M}_1$ 、 $\mathbf{M}_2$ 和 $\mathbf{M}_3$ 的具体表达式如式(19)~(21)所示。

$$\mathbf{M}_1 = -\mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b (\mathbf{v}^n \times) \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \quad (20)$$

$$\mathbf{M}_3 = (\mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \mathbf{v}^n) \times \quad (21)$$

进一步,给出 NHC 误差相关的量测矩阵 $\mathbf{H}_{\text{NHC}}$ 的具体表达式如式(22)所示^[17]。

$$\mathbf{H}_{NHC} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1(1, \sim) & \mathbf{M}_2(1, \sim) & \mathbf{0}_{1 \times 9} & 0 & \mathbf{M}_3(1, 3) \\ \mathbf{M}_1(3, \sim) & \mathbf{M}_2(3, \sim) & \mathbf{0}_{1 \times 9} & \mathbf{M}_3(3, 1) & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{M}_k(i, \sim)$ 代表 $\mathbf{M}_k$ 矩阵中第 i 行的全部元素, 其中 $k, i = 1, 2, 3$ 。NHC 的量测频率与 SINS 保持一致。

在 NHC 量测方程的系数矩阵中, 因为车辆安装角误差通常较小^[18], 这里为了分析 NHC 量测对航向测量精度的影响, 先不予考虑, 下面给出横向速度的量测方程, 即:

$$\begin{aligned} v_x^m \approx & (1 \ 0 \ 0) [-\mathbf{C}_n^b(\mathbf{v}^n \times) \boldsymbol{\phi}^n + \mathbf{C}_n^b \delta \mathbf{v}^n] \approx \\ & -\sin\psi \times v_N \phi_U - \cos\psi \times v_E \phi_U - \\ & \sin\psi \times \sigma_{v_E} + \cos\psi \times \sigma_{v_N} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: ϕ_U 为天向失准角, 与航向角误差关联; v_E, v_N 分别为东向速度和北向速度, 都定义在导航系(n 系)下; σ_{v_E} 、 σ_{v_N} 为东向速度误差和北向速度误差。

从中不难看出, ϕ_U 项对横向速度量测的影响较显著, 而 ϕ_U 又与航向角误差直接关联, 当车辆直线行驶时, 航向误差会导致 SINS 估计的速度在横向出现非零分量。NHC 量测通过校正该残差, 直接估计并补偿航向误差。

2 自适应 NHC 量测噪声建模

2.1 车辆转弯运动分析

如图 1 所示, 在车体坐标参考系(m 系)下, 根据阿克曼理论转向特性, 车辆在转弯运动时, 全部车轮都必须围绕着一个瞬时转向中心做圆周滚动^[19-21], 但这是以车辆低速行驶, 所有轮胎为绝对刚性体, 轮胎与地面接触时无侧向弹性变形为假设条件的。实际上, 目前所有车辆均采用充气橡胶轮胎, 在侧向力作用下会产生弹性变形, 车辆的瞬时转向中心将从理论位置 O 偏移至 O' , 导致实际前向速度 v 和理想前向速度 v_y 之间存在侧偏角 α , 从而

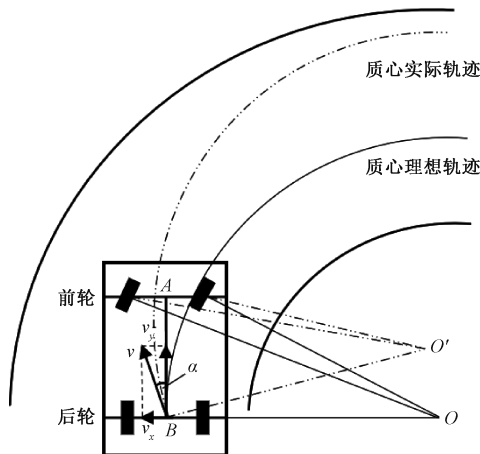


图 1 车辆转弯示意图

Fig. 1 Vehicle turning diagram

产生横向速度分量 v_x , 即:

$$v_x = v_y \times \tan \alpha \quad (24)$$

假设车辆前向速度 $v_y = 20 \text{ m/s}$, 侧偏角 $\alpha = 5^\circ$, 则由转弯引起的横向速度分量 $v_x \approx 1.75 \text{ m/s}$, 这将显著降低卡尔曼滤波器的状态估计精度, 严重时甚至会导致滤波器发散。

因此, 在构建 NHC 量测噪声模型时, 需系统性地考虑车辆转弯场景下的轮胎侧偏效应。传统基于固定值或简单线性关系的噪声设定方法存在明显局限性, 应充分考虑侧偏角 α 和前向速度 v_y 的影响, 因为横向速度分量 v_x 与前向速度 v_y 、侧偏角 α 之间存在非线性动态耦合关系。

2.2 量测噪声自适应方法

基于 2.1 节中对车辆转弯运动的分析, 横向速度与前向速度以及侧偏角之间存在非线性耦合关系, 其中前向速度 v_y 可由 SINS 输出得到, 而侧偏角 α 通常需要通过侧倾角传感器测量得到^[22], 但本研究所提算法基于二自由度模型实现了对侧偏角的实时估计, 从而避免了引入额外的外部传感器, 降低了系统的硬件成本与集成复杂度。

如图 2 所示, 本研究基于二自由度汽车模型, 即只考虑车辆的横摆运动和侧向运动, 汽车正常行驶时, 侧向加速度不超过 $0.4 g$, 侧偏角不超过 $4 \sim 5^\circ$, 可以认为侧偏角与侧偏力成线性关系^[23], 因此可通过式 (25) ~ (27) 对侧偏角 α 进行实时估计, 即:

$$F_x = k_\alpha \times \alpha \quad (25)$$

$$F_x = F_y \times \cos \alpha \quad (26)$$

$$F_x = m a_\psi = m (v_y \times \dot{\psi}) \quad (27)$$

式中: F_x 为轮胎侧偏力; k_α 为轮胎侧偏刚度绝对值; F_y 为轮胎侧向力, 用于平衡离心力; m 为车辆质量; a_ψ 为横摆运动的向心加速度; v_y 为前向速度; $\dot{\psi}$ 为航向角变化率。

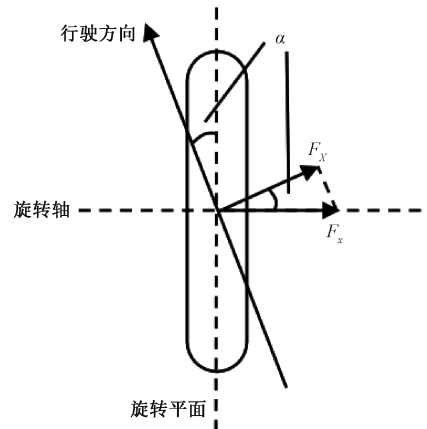


图 2 转弯时的车轮

Fig. 2 The wheels at the turning case

对式(25)进行变换,并对 $\cos\alpha$ 作二阶近似,可以得到侧偏角 α 的表达式,即:

$$\alpha \approx \frac{k_\alpha}{ma_\psi} \left(\sqrt{1 + \frac{2(ma_\psi)^2}{k_\alpha^2}} - 1 \right) \quad (28)$$

建模得到侧偏角 α 后,结合 SINS 输出的前向速度 v_y 、车辆横向速度 v_x 可由式(29)进行估计,即:

$$v_x \approx v_y \times \tan \left[\frac{k_\alpha}{ma_\psi} \left(\sqrt{1 + \frac{2(ma_\psi)^2}{k_\alpha^2}} - 1 \right) \right] \quad (29)$$

由式(29)不难看出:横向速度 v_x 与 SINS 输出的前向速度 v_y 呈线性正相关关系,而与向心加速度 a_ψ 呈非线性正相关关系。这种耦合关系表明, v_x 的大小同时受到 v_y 和 a_ψ 的共同影响。在实际行驶过程中,车辆的转弯将更加复杂,轮胎物理特性、垂直载荷、空气动力学以及路面粗糙程度均会影响轮胎侧偏特性^[24],很难精确建模横向速度,因此本研究通过构建基于前向速度和横向加速度的自适应噪声调节函数,在保持核心物理关系的同时,实现对横向速度量测噪声的动态优化。

对式(30)进一步简化,定义横向速度约束的调节函数为:

$$\sigma_{v_{x,k}} = v_y \times |\tan(k_1 \times a_x)| \times k_2 \quad (30)$$

式中: $\sigma_{v_{x,k}}$ 为车辆的横向速度量测噪声; k_1 为车辆参数,大小为 m/k_a ; k_2 为尺度因子,视实际情况设定。

为了避免横向速度约束过松或过紧,在卡尔曼量测更新阶段采用方差约束,首先计算横向速度量测预测残差 V_k 及其协方差阵 S_k 如式(31)~(32)所示。

$$V_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} \quad (31)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T \quad (32)$$

式中: $\hat{X}_{k|k-1}$ 为状态一步预测向量; $P_{k|k-1}$ 为状态一步预测协方差阵; Z_k 为量测向量,定义为 SINS 机械编排推算的横向速度值与理论值之差。

接着定义量测残差的方差调整量 r_k ,并设置横向速度的最大方差 $R_{\max}$ 和最小方差 $R_{\min}$,然后判断调整量 r_k 与 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 的大小关系,对横向速度量测噪声 $\sigma_{v_{x,k}}$ 进行递推更新,当统计量 r_k 超出合理区间时,方差被约束于预设边界,避免因异常扰动导致约束失效或滤波发散;在正常范围内,方差按照一阶指数平滑更新,将新的残差信息 r_k 与历史方差估计 $\sigma_{v_{x,k}}^2$ 进行加权融合,最终确定的横向速度量测方差 $\hat{\sigma}_{v_{x,k}}^2$ 如式(34)所示。

$$r_k = V_k^2 - S_k \quad (33)$$

$$\hat{\sigma}_{v_{x,k}}^2 = \begin{cases} R_{\min}, & r_k < R_{\min} \\ (1 - \beta) \sigma_{v_{x,k}}^2 + \beta \times r_k, & R_{\min} < r_k < R_{\max} \\ R_{\max}, & r_k > R_{\max} \end{cases} \quad (34)$$

$$\beta = \beta/(\beta + b) \quad (35)$$

式中: β 为遗忘因子,初始设置为1,并在每次量测更新后按照一定规律衰减, b 为衰减因子,根据经验设置为0.5。

3 实车实验

为了验证所提算法在实际应用场景中的性能表现,本研究选用家用汽车作为载体,在城市环境中进行跑车试验。车辆传感器安装情况如图3所示。



图3 车辆传感器安装情况

Fig. 3 Installation status of vehicle sensors

其中,FSINS3X为光纤捷联惯性导航系统,由光纤陀螺仪和石英挠性加速度计集成,与高精度GNSS RTK接收机组合,作为实验基准。STIM 300为MEMS惯性测量单元,与GNSS接收机组合,作为测试平台。所用传感器的具体参数见表1。

表1 传感器具体参数

Table 1 The specific parameters of sensor

传感器	精度指标	数值	采样频率/Hz
STIM 300	陀螺零偏稳定性/(deg·h ⁻¹)	0.5	125
	角度随机游走/(deg·h ^{-1/2})	0.15	
	加计零偏稳定性/μg	50	
	速度随机游走/(μg·Hz ^{-1/2})	60	
FSINS3X	姿态精度/(°)	<0.12	100
	陀螺零偏稳定性/(deg·h ⁻¹)	0.01	
	角度随机游走/(deg·h ^{-1/2})	0.003	
	加计零偏稳定性/μg	50	
GNSS 接收机	速度随机游走/(μg·Hz ^{-1/2})	5	1
	姿态精度/(°)	<0.02	
	位置精度/m	1.2	
	基线长度/m	1.0	
RTK 接收机	定向精度/(°/1 m 基线)	0.3	
	位置精度/m	0.08	
	基线长度/m	1.0	
	定向精度/(°/1 m 基线)	<0.1	

本研究选取了实车实验的两段行驶轨迹,见图4。两段轨迹分别对应连续弯道与环形绕行两类典型转弯场

景,车辆速度保持在 0~80 km/h 范围,符合城市道路典型行驶状态。



图 4 车辆行驶轨迹
Fig. 4 Vehicle driving trajectory

本研究对比了 3 种方法,分别是基于固定 NHC 量测噪声的滤波方法 (fixed non-holonomic constraint Kalman filter, FNHC-KF)、基于相关性调节 NHC 量测噪声的滤波方法 (correlation-regulated non-holonomic constraint Kalman filter, CNHC-KF) 以及本研究提出的基于动力学耦合调节 NHC 量测噪声的滤波方法 (dynamics-coupled non-holonomic constraint Kalman filter, DNHC-KF)。同时,本研究针对两段行驶轨迹,设计了两种 GNSS 信号条件下的对比实验:实验 1 在 GNSS 信号保持完整的场景下进行,3 种方法的姿态角误差对比如图 5~7 所示。

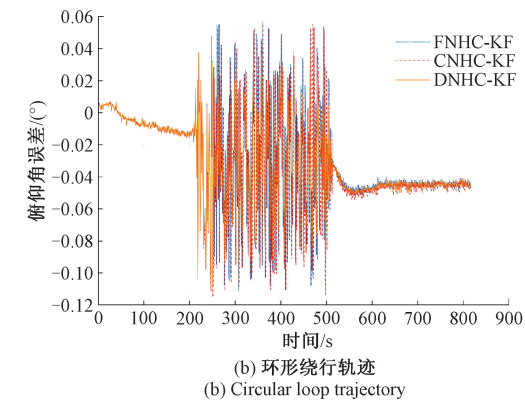
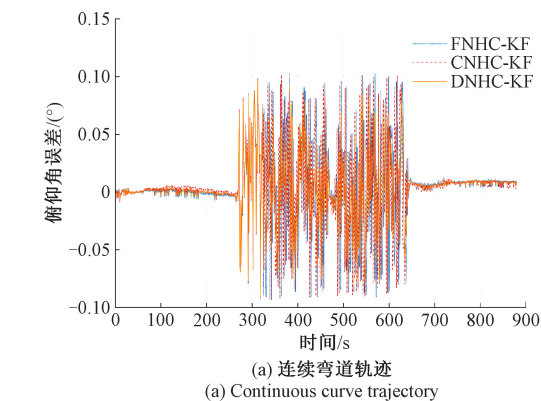


图 5 俯仰角误差对比 (实验 1)
Fig. 5 Comparison of pitch angle errors (experiment 1)

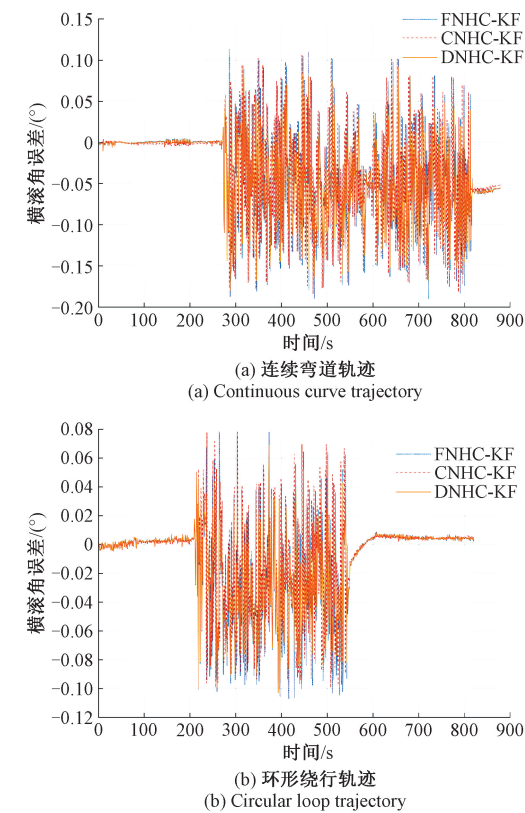


图 6 横滚角误差对比 (实验 1)
Fig. 6 Comparison of roll angle errors (experiment 1)

从姿态误差对比实验中,可以看出:在俯仰角误差对比 (图 5) 和横滚角误差对比 (图 6) 中,3 种方法的表现相对接近,但在航向角误差对比 (图 7) 中,3 种方法在两类转弯场景中均表现出显著的性能差异。FNHC-KF 方法表现出最大的航向误差,这主要源于其采用固定阈值设置 NHC 量测噪声的局限性:在转弯工况下,由于未能考虑轮胎侧偏效应引起的横向速度分量,这种强约束会导致滤波器持续接收错误的运动学约束信息,从而造成航

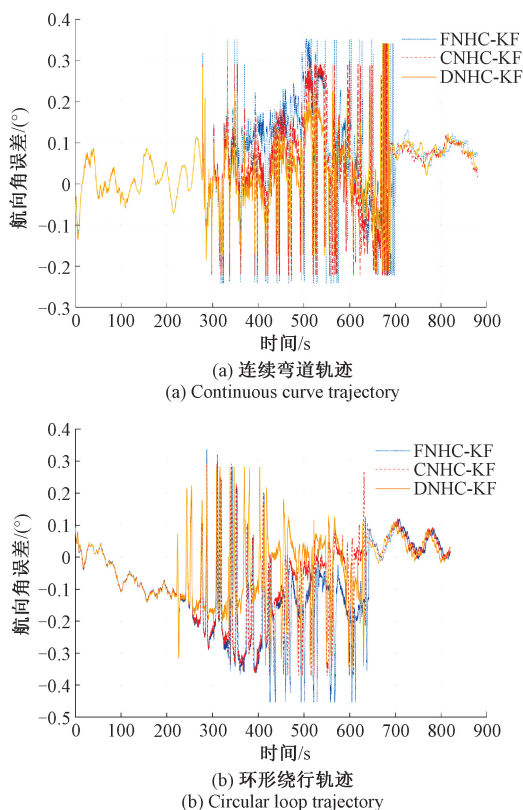


图7 航向角误差对比(实验1)

Fig. 7 Comparison of heading angle errors (experiment 1)

向角估计的系统性偏差。CNHC-KF方法相较前者有所改进,通过引入基于相关性的NHC横向速度噪声自适应调节机制,在一定程度上缓解了固定阈值带来的问题,但由于未能准确建立横向速度与车辆动力学参数之间的非线性耦合关系,最终航向估计精度仍未能达到理想水平。本研究提出的DNHC-KF方法表现出最优的性能,其创新之处在于通过构建前向速度与横向加速度的动态耦合函数,并引入方差受限机制,提升了车辆在复杂转弯工况下的航向估计精度。在连续弯道场景下,3种方法在全程(含静止、直行、转弯场景)的航向角均方根误差分别为:0.104 8°(FNHC-KF)、0.095 6°(CNHC-KF)和0.081 1°(DNHC-KF),相较于前两种算法,本研究所提算法在航向角精度方面分别提高22.61%和15.17%;在环形绕行场景下,3种方法在全程的航向角均方根误差分别为:0.150 7°(FNHC-KF)、0.134 0°(CNHC-KF)和0.103 8°(DNHC-KF),相较于前两种算法,本研究所提算法在航向角精度方面分别提高31.12%和22.54%。

同时,为了充分验证本研究所提方法在典型城市应用场景下的鲁棒性,本研究基于前述实车试验的两组轨迹数据,对GNSS数据进行缺失处理,实验2模拟了在实际城市环境中因隧道、高架桥或城市峡谷环境导致的卫星信号中断场景。图8给出了3种方法在实验2中的航

向角误差对比,其中250~270 s、330~370 s和400~500 s为GNSS信号缺失时间段。

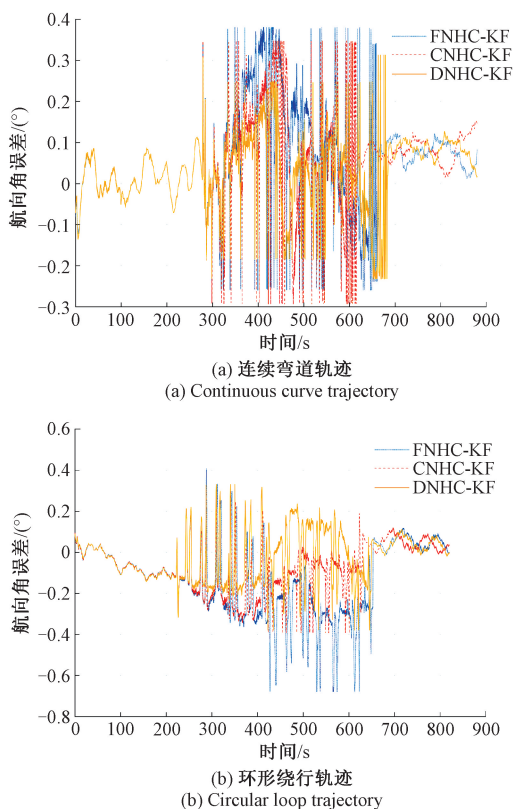


图8 航向角误差对比(实验2)

Fig. 8 Comparison of heading angle errors (experiment 2)

从图8中可以看出,在GNSS信号正常时段,3种方法的航向角误差均保持在较低水平;而在信号缺失时段, FNHC-KF的误差显著增大且出现明显发散, CNHC-KF的误差虽有上升但相对平缓,而本研究所提的DNHC-KF方法在整个过程中均能保持最为稳定和最小的误差波动,表现出优越的鲁棒性与估计精度。在连续弯道场景下,3种方法在全程的航向角均方根误差分别为:0.126 4°(FNHC-KF)、0.107 7°(CNHC-KF)和0.089 4°(DNHC-KF),相较于前两种算法,本研究所提算法在航向角精度方面分别提高29.27%和16.99%;在环形绕行场景下,3种方法在全程的航向角均方根误差分别为:0.202 1°(FNHC-KF)、0.168 8°(CNHC-KF)和0.115 9°(DNHC-KF),相较于前两种算法,本研究所提算法在航向角精度方面分别提高42.65%和31.34%。

为了更加全面地分析结果,表2给出了两组实验中,基于两组行驶轨迹数据的3种航向角估计方法的统计误差评价指标,包括均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)。

从统计结果可以看出,本研究提出的DNHC-KF算法在两种评价指标上均表现出最优性能。尤其在实验2

表 2 航向角误差对比
Table 2 Comparison of heading angle errors (°)

实验 编号	算法	连续弯道轨迹		环形绕行轨迹	
		RMSE	MAE	RMSE	MAE
实验 1	FNHC-KF	0.104 8	0.081 9	0.150 7	0.117 1
	CNHC-KF	0.095 6	0.076 0	0.134 0	0.104 0
	DNHC-KF	0.081 1	0.072 0	0.103 8	0.082 1
实验 2	FNHC-KF	0.126 4	0.089 2	0.202 1	0.152 0
	CNHC-KF	0.107 7	0.084 5	0.168 8	0.130 1
	DNHC-KF	0.089 4	0.079 0	0.115 9	0.093 9

中,各算法的误差均较实验 1 有所增大,而本研究所提 DNHC-KF 方法仍保持最小的误差波动与最高的估计一致性,体现出其在 GNSS 信号不稳定时更强的适应能力与估计稳健性,进一步验证了所提自适应 NHC 噪声调节机制在复杂城市环境中的有效性。

4 结 论

本研究针对车辆转弯工况下因轮胎侧偏效应导致的非完整性约束失效与航向角发散问题,提出并验证了一种基于自适应 NHC 量测噪声的车载测向算法。本研究的主要贡献为:首先,通过建立前向速度与横向加速度的非线性动态耦合模型,本研究实现了对横向速度噪声特性的精确表征,修正了传统方法在转弯场景下噪声建模不准确的缺陷。其次,引入的带遗忘因子的方差约束机制,实现了 NHC 约束权重的动态自适应调节,有效平衡了模型约束力与机动不确定性,保障了滤波的稳定性。实车实验证实,本算法相较于其他传统方法,在连续转弯场景中显著提升了航向角的测量精度与系统鲁棒性。然而,本研究构建的噪声模型基于二自由度车辆模型,在极端低附着力或剧烈变道等工况下的普适性仍有待进一步验证。未来的研究可考虑引入更精确的轮胎模型或融合更多车载传感器信息,以进一步提升算法在极限工况下的性能与适用范围。

参考文献

[1] CHEN Q J, LIN H, KUANG J, et al. Rapid initial heading alignment for MEMS land vehicular GNSS/INS navigation system [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7656-7666.

[2] 韦永僧,贺凯飞,邱立杰,等. 陆地导航中 GNSS 单天线姿态测量的误差及精度分析[J]. 大地测量与地球

动力学, 2021, 41(10): 1014-1017, 1050.

WEI Y S, HE K F, QIU L J, et al. Error and accuracy analysis of GNSS single-antenna attitude determination for land navigation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(10): 1014-1017, 1050.

[3] 沈凯,刘庭欣,左思琪,等. 复杂城市环境下 GNSS/INS 组合导航可观测度分析及鲁棒滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 252-261.

SHEN K, LIU T X, ZUO S Q, et al. Observability analysis and robust fusion algorithms of GNSS/INS integrated navigation in complex urban environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 252-261.

[4] 滕洪钊,邓朝晖,吕黎曙,等. 多传感器信息融合的加工过程状态监测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 26-41.

TENG H ZH, DENG ZH H, LYU L SH, et al. Research of process condition monitoring based on multi-sensor information fusion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(6): 26-41.

[5] 张小红,周宇辉,朱锋,等. 参数自主学习的车辆运动约束新模型及其惯性推算误差抑制分析[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1249-1258.

ZHANG X H, ZHOU Y H, ZHU F, et al. A new vehicle motion constraint model with parameter autonomous learning and analysis on inertial drift error suppression[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1249-1258.

[6] DISSANAYAKE G, SUKKARIEH S, NEBOT E, et al. The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 17(5): 731-747.

[7] 卢梓豪,冯译苇,栗广才. 深度学习优化的智能手机运动状态识别与自适应非完整性约束车载导航[J]. 全球定位系统, 2025, 50(5): 41-50.

LU Z H, FENG Y W, LI G C. Deep learning-assisted smartphone motion state recognition and adaptive non-holonomic constraint for vehicle navigation [J]. GNSS World of China, 2025, 50(5): 41-50.

[8] 喻鑫涛. 车载 SINS/GNSS/OD 容错组合导航系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.

YU X T. Research on vehicle-mounted SINS/GNSS/OD fault-tolerant integrated navigation system [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

- [9] 刘万科, 农旗, 陶贤露, 等. 非完整约束的 OD/SINS 自适应组合导航方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 9-17.
- LIU W K, NONG Q, TAO X L, et al. OD/SINS adaptive integrated navigation method with non-holonomic constraints[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(1): 9-17.
- [10] 李晗旭, 李昕, 黄观文, 等. 速度分类的 LSTM 神经网络辅助 GNSS/SINS 车载定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(7): 1311-1320.
- LI H X, LI X, HUANG G W, et al. LSTM neural network assisted GNSS/SINS vehicle positioning based on speed classification [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(7): 1311-1320.
- [11] 闵于, 许桥壮, 高周正. 基于 GNSS/INS/NHC 理论模型的轨道平顺性检测方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(3): 70-75.
- MIN Y, XU Q ZH, GAO ZH ZH. Research on theory and method for railway-track irregularities monitoring by using GNSS/INS/NHC integration [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(3): 70-75.
- [12] 张且且, 郭静茹, 赖际舟. 车载 GNSS/INS 组合导航任意安装角在线自动标定算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 290-300.
- ZHANG Q Q, GUO J R, LAI J ZH. Research on online auto-calibration algorithm of arbitrary installation angles for vehicle GNSS/INS integrated navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 290-300.
- [13] 杨波, 刘枫, 薛亮, 等. 基于运动约束的航姿系统误差自主补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(6): 2099-2106.
- YANG B, LIU F, XUE L, et al. Independent error compensation method of attitude and heading system based on motion constraints [J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(6): 2099-2106.
- [14] HASHEMI E, KHAJEPOUR A, MOSHCHUK N, et al. Real-time road bank estimation with disturbance observers for vehicle control systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(1): 443-450.
- [15] WEN Z Y, YANG G L, CAI Q ZH. An improved SINS/NHC integrated navigation algorithm based on Ackermann turning geometry[J]. Measurement, 2022, 192: 110859.
- [16] 吴鹏博, 潘树国, 高旺, 等. 顾及非视距与系统误差的 UWB 质量控制及其与 GNSS/INS 的组合定位[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 51-60.
- WU P B, PAN SH G, GAO W, et al. UWB quality control and its integrated positioning with GNSS/INS considering NLOS and system errors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 51-60.
- [17] 孙振乾. 车载 MIMU/GNSS 组合高精度无缝导航关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- SUN ZH Q. Research on the key technologies of high precision seamless navigation for vehicle MIMU/GNSS integrated navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [18] 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 G M, QIN Y Y, YANG B. On error compensation technology for vehicular dead reckoning (DR) system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 26-30.
- [19] 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.
- YU ZH P, GAO X J. Review of vehicle state estimation problem under driving situation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.
- [20] 陈熙源, 崔天昊, 钟雨露. 基于自适应 MCMC 的鲁棒因子图优化组合导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 81-91.
- CHEN X Y, CUI T H, ZHONG Y L. Robust factor graph optimization integrated navigation algorithm based on adaptive MCMC [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 81-91.
- [21] 邓召文, 张福兴. 基于转向半径的汽车稳态转向特性分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2007(1): 23-26.
- DENG ZH W, ZHANG F X. The analysis of steady-state steering characteristic turning radius-based in vehicle[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2007(1): 23-26.
- [22] 陈建锋, 吴强, 葛新元, 等. 基于切换策略的车辆质心侧偏角高性能获取[J]. 汽车工程, 2024, 46(2): 346-355.
- CHEN J F, WU Q, GE X Y, et al. High-performance acquisition for vehicle sideslip angle based on switch strategy[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(2): 346-355.
- [23] 余志生. 汽车理论[M]. 第4版. 北京: 机械工业出

版社, 2006.

YU ZH SH. Automotive theory[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2006.

[24] 杨绍普, 张俊宁, 路永婕, 等. 汽车-道路相互作用研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 1-17.

YANG SH P, ZHANG J N, LU Y J, et al. Research progress of vehicle-pavement interaction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 1-17.

作者简介



陈熙源 (通信作者), 1998 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为惯性技术、软件接收机及多源组合导航。
E-mail: chxiyuan@ seu. edu. cn

Chen Xiyuan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University (SEU) in 1998. He is currently a professor at SEU. His main research interests include inertial technologies, software defined receiver and multi-source integrated navigation.



颜亚强, 2024 年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为信号处理与组合导航。
E-mail: 220243699@ seu. edu. cn

Yan Yaqiang received his B.Sc. degree from Southeast University in 2024. He is currently a master student at Southeast University. His main research interests include signal processing and integrated navigation.