

寒区高速公路路面平整度车载快速检测方法与应用

齐磊¹ 薛立波¹ 赵春雷^{2*} 杨帆¹ 李佳谕¹ 王健²

1. 黑龙江交通发展股份有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150040

2. 黑龙江路升公路科技开发有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150040

摘要: 针对传统检测方法在寒区高速公路应用中存在的效率低、适应性差等问题, 本研究研发了一套基于多传感器融合的车载快速检测系统。系统集成了高精度 MEMS 姿态传感器、双天线 GNSS/INS 组合导航单元及专用采集控制软硬件, 构建了模块化、可快速部署的数据采集平台, 具备良好的工程适用性。通过建立规范的现场部署与操作流程, 在哈大高速进行了实地应用验证, 系统展现了优异的稳定性和数据一致性。结果表明, 该系统能在约 80 km/h 行车速度下稳定运行, 实现长距离、连续、非干扰式数据采集, 并通过云端平台实现数据的自动化高效管理与深度分析。

关键词: 平整度; 多传感器融合; GNSS; 云端数据管理

A Vehicle-borne Rapid Detection Method and Its Application for Pavement Roughness on Cold Region Expressways

Qi Lei¹, Xue Libo¹, Zhao Chunlei^{2*}, Yang Fan¹, Li Jiayu¹, Wang Jian²

1. Heilongjiang Transportation Development Co., Ltd., China Heilongjiang Harbin 150040

2. Heilongjiang Lusheng Highway Technology Development Co., Ltd., China Heilongjiang Harbin 150040

Abstract: To address the issues of low efficiency and poor adaptability of traditional detection methods in the application of cold region expressways, this study developed a vehicle-borne rapid detection system based on multi-sensor fusion. The system integrates a high-precision MEMS attitude sensor, a dual-antenna GNSS/INS integrated navigation unit, and dedicated acquisition and control hardware and software, forming a modular, rapidly deployable data acquisition platform with good engineering applicability. By establishing standardized on-site deployment and operational procedures, field application and verification were conducted on the Harbin-Daqing Expressway, demonstrating the system's excellent stability and data consistency. The results show that the system can operate stably at driving speeds of approximately 80 km/h, enabling long-distance, continuous, and non-interfering data collection, with automated, efficient management and in-depth analysis of data through a cloud-based platform. The research findings provide a complete engineering solution for the regular and efficient inspection of pavement roughness on cold region expressways. This holds significant practical importance for enhancing the scientific maintenance and precise decision-making levels of the road network and demonstrates promising application prospects and promotion value.

Keywords: Roughness; Multi-sensor fusion; GNSS; Cloud-based data management

0 引言

随着我国高速公路网络规模持续扩大与服役年限增长, 路面平整度^[1]作为评价行车安全性、舒适性及道路结构性能的关键指标, 其高效、精准的检测与监测已成为公路科学养护决策的重要基础。传统的路面平整度检测主要依赖激光断面仪^[2]等专业设备, 虽精度较高, 但存在设备昂贵、操作复杂、需封闭交通或低速(通常低于 30 km/h)作业等问题, 难以适应大规模路网常态化、快速化巡检的迫切需求。近年来, 基于车载惯性传感技术^[3]的检测方法因其成本较低、效率高、对交通干扰小等优势, 成为研究

与应用的热点。然而, 现有方法在工程化推广中仍面临挑战: 一方面, 多传感器集成方案^[4]往往设备分散、安装繁琐, 现场部署一致性难以保证; 另一方面, 数据采集^[5]、处理^[6]与上传^[7]流程缺乏标准化, 严重依赖人工操作与经验, 影响了检测结果的可靠性与作业效率。

针对上述挑战, 国内外学者从不同技术路径寻求突破。国际上, 研究多集中于高频惯性测量单元数据融合算法^[8]、基于深度学习的车体振动信号滤波^[9]以及与高精度 GNSS/^[10]里程计的组合导航, 旨在通过复杂的后处理剥离车体振动噪声。例如, 魏克新^[11]等人提出了自适应卡尔曼

滤波框架, 动态估计车辆悬挂系统参数以修正信号; 而闫旭等^[12] 则利用卷积神经网络, 直接从原始加速度数据中识别并提取路面激励分量。这些方法显著提升了单一惯性传感器的性能, 但其算法普遍依赖大量标定数据与特定车型, 泛化能力与工程易用性受限。在国内, 研究焦点更偏向于低成本传感器的工程化集成方案与云平台数据处理流程。有团队开发了集成多轴加速度计、陀螺仪与 GPS 模块^[13] 的一体化采集终端, 并构建了云端数据处理系统, 推动了该技术的规模化试点应用。然而, 现有系统在根本上仍未解决一个核心物理问题: 单个或空间位置未精确约束的多个传感器, 其测量信号本质上是车体复杂振动与路面真实激励的混合物, 信噪比存在理论上限。

本研究聚焦于寒区高速公路路面平整度车载快速检测的数据采集环节, 通过设计高精度采集硬件、开展现场试验验证以及建立数据预处理流程, 系统解决了从硬件集成、数据同步到现场采集与质控的关键工程问题, 从而为平整度指标的精确解算奠定可靠数据基础, 并为该技术在寒区环境下的工程化应用提供完整的解决方案与实践支撑。

1 系统硬件组成与关键技术

为构建稳定、可靠且适用于寒区高速公路环境的车载快速检测平台, 本研究设计并集成了一套模块化、高性能的硬件系统。该方案的核心是构建一个完整的数据采集链路, 确保能够同步、高精度地获取车辆动态响应与时空基准信息, 并为后续的平整度分析算法提供高质量的原始数据。硬件系统主要由高精度姿态感知模块、组合导航定位模块、数据采集处理核心、人机交互单元以及一体化供电与保障系统组成。

1.1 高精度姿态感知模块

本系统的核心姿态感知模块采用 YIS512 高性能 IMU 传感器, 作为反演路面平整度的直接数据源。该传感器集成三轴 MEMS 陀螺仪、加速度计及磁传感器, 通过 YFusion® 融合算法与误差补偿技术, 实现高动态性能测量: 加速度计量程 $\pm 12g$ 、噪声密度 $190 \mu g/\sqrt{Hz}$, 可高信噪比捕获路面微振; 陀螺仪零偏不稳定性达 $5^\circ/h$, 保障姿态长期稳定, 最终输出精度为 0.15° (横滚/俯仰) 和 0.2° (航向) 的三维姿态角及高精度原始数据。

传感器采用全铝合金外壳, 具备 IP67 防护等级, 工作温度范围 $-40^\circ C$ 至 $85^\circ C$, 可抗 2000g 冲击, 适应寒区高速振动环境。通过 9 芯航空接口支持 RS232/CAN 通信, 200Hz 输出频率完整覆盖路面激励频带。安装时需严格对齐传感器与车辆坐标系, 并通过强磁或螺栓刚性固定于后

备箱轮眉平整处, 确保数据物理意义准确。



图1 YIS512姿态传感器

1.2 组合导航定位模块

精准的时空基准是关联振动数据与具体路面位置、进行有效速度补偿和长距离数据拼接的关键。本系统采用了一款高性能的 GNSS/INS 组合导航定位终端。

该终端支持 GPS L1/L2/L5、北斗 B1/B2、GLONASS L1/L2 及伽利略 L1 等多频段卫星信号, 并可通过 4G 网络接入省网 CORS 或千寻等差分服务, 实现实时动态载波相位差分 (RTK) 定位, 提供厘米级精度的绝对位置 (经纬度、高程) 与速度信息。尤为关键的是, 终端支持双天线输入, 利用前后天线的空间矢量解算出的航向角精度优于 0.09° , 这不仅提供了比磁航向更稳定可靠的方位基准, 也增强了整个系统的姿态感知能力。定位数据输出频率最高可达 50Hz, 与 IMU 数据频率相匹配, 便于后续同步融合。在部署时, 两根 GNSS 天线 (主天线与航向天线) 需以“共线、等高、距中”的原则牢固吸附于车顶, 以获取最佳卫星视野与航向解算精度。



图2 边缘计算单元

1.3 数据采集处理核心与存储单元

该核心基于一台高性能嵌入式工业计算机, 搭载第 12 代 Intel Core i7 处理器、16GB 内存和 1TB 固态硬盘。其承担着系统“大脑”的职责: 运行定制化的数据采集控制软件, 通过 USB/ 串口等接口同步接收并时间戳对齐来自 IMU 的原始惯性数据和来自 GNSS 终端的位置/速度/航向数据; 对采集过程进行实时监控与质量控制; 并将封装好的原始数据流暂存于本地高速固态硬盘中。

工业计算机具备丰富的接口 (USB 3.0/2.0, HDMI, RJ45) 和 Wi-Fi 6 无线网络能力, 确保了与各外设的可靠

连接以及采集完成后数据向云端平台的快速上传。其坚固的设计也保证了在车载移动环境下的稳定运行。

1.4 机交互与辅助单元

为便于现场操作人员监控与控制系统，方案配置了便携式人机交互单元。包括一块 14 英寸高清显示屏（分辨率 1920x1080），通过专用支架固定于车内副驾驶位，经由无线 HDMI 与工控机连接，实时显示采集软件界面，呈现传感器状态、定位质量、实时波形、车速等关键信息。交互通过无线鼠标完成，操作便捷。



图3 显示单元

1.5 一体化供电与系统集成

为提升供电稳定性与寒区作业可靠性，本系统采用大容量便携式锂电储能电源独立供电，替代车载点烟器取电方案。该电源具备宽温工作能力，支持多种充电方式，可为所有设备持续供电，保障长里程作业需求。此外，所有硬件（除车顶天线）均集成于专用“采集作业箱”内，实现了设备集中收纳、快速部署与高效防护，显著增强了系统在寒区野外环境中的适应性 with 操作效率。



图4 供电单元

2 面向寒区应用的系统部署与软件流程

为确保车载快速检测系统在寒区复杂环境下能够可靠、高效地投入应用，本研究设计了一套标准化的现场部署流程，并开发了与之配套的专用数据采集与控制软件。该软硬件协同方案，旨在将精密的传感器系统转化为一线养护人员可便捷操作的工程化工具，实现从设备准备、数据采集到质量控制的全程规范化作业。

2.1 标准化现场部署流程

针对寒区野外作业条件艰苦、设备需频繁装卸的特点，系统采用“一体化作业箱”设计，所有核心设备（除天线外）均集成于定制箱体内部，实现了设备的集中收纳、运输防护与快速部署。标准部署流程如下：

（1）系统开箱与设备定位：开启采集作业箱，取出高

精度姿态传感器（IMU），将其通过强磁性底座牢固吸附于车辆后备箱内左右轮眉处的平整金属表面。安装时需确保传感器本体坐标系（X/Y/Z 轴）与车辆坐标系（前进方向、右侧方向、垂直向上）严格对齐，这是保证数据物理意义准确的前提。随后，将 IMU 的 USB 数据线连接至车载工控机的扩展接口。



图5 打开采集作业箱

（2）车顶天线布局与连接：取出集成线束，将两根 GNSS 天线（一长一短）放置于车顶。遵循“共线、等高、距中”原则，将较长的定位主天线置于车辆前部，较短的航向天线置于车辆后部，两者尽量保持在车辆纵轴中心线上，以获取最优的卫星信号与航向解算精度。将 4G 通信天线的 SMA 接头与线束对应接口拧紧，为 GNSS 接收机提供差分数据链路。最后，将 5G WiFi 模块接入线束，为工控机提供网络连接。

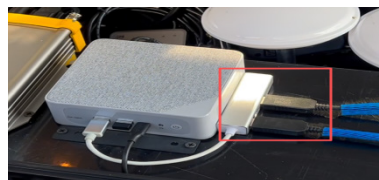


图6 将平整度模块的USB连接

（3）供电与显控系统搭建：启动大容量便携锂电电源，使用配套电源线为整个系统供电。将车载显示器支架固定于副驾驶位，安装便携显示器，并将其通过 USB 线从车辆点烟器取电或使用移动电源供电。开启车载工控机，并通过无线 HDMI 将显示器与工控机连接，建立人机交互界面。

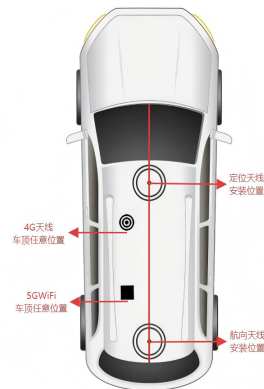


图7 车顶天线连接

此标准化流程将复杂的系统集成简化为清晰的步骤，所有连接均采用快插接口，使经过培训的技术人员可在严寒环境下于 15 分钟内完成全部部署，极大提升了野外作业的效率 and 适应性。

2.2 专用采集控制软件工作流程

专用软件是协调整个系统有序工作的“神经中枢”，其设计遵循工程逻辑，将任务管理、设备控制、数据采集与质量控制集成于一体。具体环节如下：

(1) 任务同步与信息绑定：软件启动后，自动通过无线网络同步云端管理平台下发的巡检任务列表。操作员选择本次检测的路段任务后，软件引导在安全位置（如应急车道）暂停，并填写本次采集的“电子路单”，关键信息包括：行进方向、起始桩号基准（以米为单位，如 K100+200 填写为 100200），以及所采用的 GPS 坐标系。该步骤实现了检测数据与空间位置信息的精确关联，是数据可追溯性的基础。

(2) 设备连接与采集初始化：进入采集界面后，操作员首先点击“连接设备”建立与 GNSS 接收机的通信，并在界面中实时监控定位状态。只有当状态值稳定在“4”或“5”（代表 RTK 固定解或浮点解，定位精度达到厘米至分米级）时，才表明空间基准满足高精度采集要求。随后，选择对应串口打开 IMU 传感器，并执行“姿态航向重置”指令。此操作用于消除传感器在通电初期的零偏漂移，相当于对测量仪器进行“清零”标定，是保证每次采集数据起始基准一致性的关键步骤，对数据质量至关重要。

(3) 实时采集与过程监控：完成初始化后，点击“开始采集”，系统即开始同步记录 IMU 的原始惯性数据与 GNSS 的时空定位数据。软件界面实时动态显示三轴加速度波形、车辆实时速度、俯仰 / 横滚角、卫星数量及定位状态等信息。驾驶员可根据引导，以约 80 km/h 的目标车速驶入行车道进行检测。此过程中的实时监控使得操作员能够即时发现定位失锁或数据异常等问题。

(4) 采集结束与数据闭环：到达预定路段终点后，操作员首先在软件中停止 IMU 数据采集，然后断开 GNSS 设备连接。软件会自动将本时段采集的原始数据包（含时间戳、惯性数据、定位数据）暂存于本地，并启动后台线程将其上传至云端数据中心。上传完成后，软件界面会给予提示，操作员可关闭软件与电源，并按规程回收设备。至此，从任务下发到原始数据回传的“采集端”闭环流程完成。

3 数据管理体系与应用

本系统构建了“端 - 云”协同的数据管理体系，实现

了从采集到归档应用的全流程数字化管理。

3.1 云端数据汇聚与任务管理

所有在现场采集的原始数据包，均在采集结束后通过 5G/4G 网络自动上传至统一的云端数据管理平台。该平台作为数据中枢。图 8、9 展示了基于 Web 的巡查任务管理界面，用户可以清晰查阅所有历史采集记录。



图8 平台登录

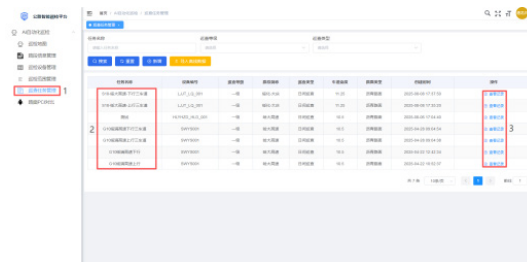


图9 巡查任务管理

3.2 数据查询、可视化与导出

平台提供了灵活的数据查询与初步分析功能。用户可基于巡查日期、路段名称、桩号区间等条件快速定位到某一次具体的采集记录。点击进入后，可在线查看关键平整度指标（如 IRI）的初步计算结果。对于需要深度分析的数据，平台支持一键导出功能。导出的数据包为结构化文件，通常包含：

图 10 展示了从平台导出的平整度数据表格片段，可直接用于养护决策分析或报告生成。

图10 平台数据查询

4 结语

(1) 成功构建并验证了一套完整的车载快速检测系统。该系统集成了高精度 MEMS 姿态传感器、双天线 GNSS/INS 组合导航单元与专用软硬件,形成了模块化、可快速部署的数据采集平台。在典型寒区高速公路(哈大高速)的实地应用中,系统在约 80 km/h 车速下运行稳定,证明了其环境适应性与可靠性。

(2) 建立了标准化的现场作业与数据采集流程。通过“一体化作业箱”设计、规范的安装步骤和引导式软件操作,实现了从设备部署、质量控制到数据采集的全程规范化,显著提升了外业作业效率,降低了操作门槛。

(3) 实现了检测数据的闭环管理与高效应用。系统通过“端-云”协同架构,实现了采集数据的自动上传、云端汇聚与结构化管理。该数据管理体系保障了数据的质量、可追溯性,并为路面状况评估与养护决策提供了直接的数据基础。

参考文献:

[1] 王大为,王宠惠,STEINAUER Bernhard等.德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述[J].中国公路学报,2019,32(04):105-113+129.

[2] 徐粒,吴润华,彭慧婷等.三维激光断面仪调查系统工作原理及其应用[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(10):1202-1211.

[3] 王浙.基于多传感器融合的车载导航定位系统设计与实现[D].哈尔滨工程大学,2024.

[4] 王先涛.芯片级多传感器融合高精度卫星导航定位智能模组.四川省,成都天合世纪科技有限责任公司,2021-07-20.

[5] 钟华,孙莉.基于多传感器数据融合的动作识别训练辅助系统仿真研究[J].自动化与仪器仪表,2025(07):205-209.

[6] 杨子于,赵健,李存金等.倾角传感器数据处理的液压机械臂关节位置识别方法[J].液压气动与密封,2025,45(11):71-77.

[7] 葛世祥,李娜娜,杨林杰等.高速旋转设备智能感知系统搭建及数据上传方法研究[J].化工自动化及仪表,2024,51(03):528-534.

[8] 刘兴川,张盛,李丽哲等.基于四元数的MARG传感器姿态测量算法[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(05):627-631.

[9] 杨兆升,朱中.基于卡尔曼滤波理论的交通流量实时预测模型[J].中国公路学报,1999(03):63-67.

[10] 张小红,李星星,李盼.GNSS精密单点定位技术及应用进展[J].测绘学报,2017,46(10):1399-1407.

[11] 魏克新,陈峭岩.基于自适应无迹卡尔曼滤波算法的锂离子动力电池状态估计[J].中国电机工程学报,2014,34(03):445-452.

[12] 闫旭,范晓亮,郑传潘等.基于图卷积神经网络的城市交通态势预测算法[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(06):1147-1155.

[13] 吕维,赵万欣,陈思屹.基于MMA7361三轴加速度计传感器与LPA550陀螺仪的融合姿态检测[J].电脑知识与技术,2014,10(25):5996-5997.

作者简介:齐磊(1985-),女,黑龙江省宾县,本科,中级,研究方向:高速公路运营管理。

* 通讯作者:赵春雷。