doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.017

车载 GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台

程香平，贾晓东，邱伊健，胡　强
（江西省科学院材料与智能制造研究所，南昌 330096）

摘要：基于全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）和 IMU/里程计导航系统各自的功能特点，构建出车载 GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台。分析组合导航系统的功能，给出具体架构和操作流程，并通过试验测试进行真实数据的采集载入系统仿真平台。结果表明：IMU/里程计和 GNSS 导航系统测量出数据的吻合性非常好，当车辆行驶到立交桥、天桥或山洞等时，GNSS 天线接收信号的能力变弱或处于无信号状态，而 IMU/里程计系统不受影响正好弥补 GNSS 系统的缺陷，能实现 GNSS+IMU/里程计组合导航定位系统精确度和稳定性要求。

关键词：霍尔里程计；组合导航系统；精确定位；解算模式
中图分类号：TP212; TN967　**文献标志码：**A

Vehicle-mounted GNSS+IMU/Odometer Integrated Navigation System Simulation Platform

Cheng Xiangping, Jia Xiaodong, Qiu Yijian, Hu Qiang
(*Institute of Materials and Intelligent Manufacturing*, *Jiangxi Academy of Sciences*, *Nanchang* 330096, *China*)

Abstract: Based on the functional characteristics of the global navigation satellite system (GNSS) and the IMU/odometer navigation system, a simulation platform for the vehicle-mounted GNSS+IMU/odometer integrated navigation system is constructed. The functions of the integrated navigation system are analyzed, and the specific architecture and operation process are presented. Real data are collected through experimental testing and loaded into the system simulation platform. The results show that the consistency of data measured by the IMU/odometer and GNSS navigation systems is excellent. When the vehicle travels to overpasses, bridges, or tunnels, the GNSS antenna's ability to receive signals weakens or is in a no-signal state, while the IMU/odometer system remains unaffected, which compensates for the defects of the GNSS system and meets the accuracy and stability requirements of the GNSS+IMU/odometer integrated navigation and positioning system.

Keywords: Hall odometer; integrated navigation system; precise positioning; calculation mode

0　引言

全球导航卫星系统（GNSS）凭借其全天候、高精度的优势，已成为车载和无人机领域的关键技术。然而，GNSS 信号易受环境影响，在树木遮蔽、高楼峡谷、立交桥下及隧道等场景中，信号衰减或多路径效应将导致定位精度骤降甚至失效[1-3]。为弥补此缺陷，惯性导航系统（INS）因其不依赖外部信号的自主性而被引入。惯性测量单元（IMU）通过测量载体的角速度和比力信息，结合初始条件可实时推算姿态、速度和位置[4-6]。但 INS 存在误差随时间累积的固有缺陷，长时工作精度难以保证。里程计作为一种速度传感器，能够有效抑制 INS 的误差发散；因此，GNSS+IMU/里程计的组合导航方案成为主流，通过优势互补实现复杂环境下的连续、可靠定位[7-9]。

尽管组合导航技术在理论层面已相对成熟，但在工程化仿真验证环节仍面临显著挑战，制约着算法从理论走向实际应用。主要体现在：1) 复杂场景下多源异构数据融合问题缺乏有效的验证平台。实际行车环境（如城市峡谷、隧道等）中存在卫星信号失锁与恢复的频繁切换，如何在动态场景下验证融合算法的鲁棒性与实时性，亟须能够模拟真实工况的可控平台；2) 现有仿真平台对不同精度等级传感器的适配性严重不足。车载导航系统因成本和应用场景不同，常选用 MEMS、光纤陀螺或激光陀螺等不同精度等级的 IMU，以及霍尔、光电码盘等各类里程计。不同传感器的误差特性（如零偏稳定性、刻度因子、量化误差等）差异显著，而当前多数平台缺乏对这些特性的精细化建模，难以支撑多场景下的算法比选与性能评估；3) 缺乏对传感器误差特性与

收稿日期：2025-02-12；**修回日期：**2025-03-28
基金项目：江西省重点研发项目（20201BBE51015）；江西省项目（20232ABC03A18）；江西省科学院重点研发项目（2022YSBG21017）
第一作者：程香平（1978—），女，河南人，博士。

环境影响因素的系统性模拟能力。温度漂移、电磁干扰、路面振动等环境因素会直接改变传感器的输出特性，进而影响融合定位精度。现有平台通常忽略或简化此类影响，导致仿真结果与实测数据存在较大偏差，降低了仿真置信度。

针对上述挑战，构建出一种可扩展、可重构的 GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台。主要贡献在于：1) 提出模块化的多源融合算法架构，支持卡尔曼滤波、粒子滤波等多种算法的快速封装与动态对比评估；2) 建立涵盖 MEMS、光纤、激光等多种精度等级 IMU 及多类型里程计的传感器误差模型库，支持用户自定义误差参数注入；3) 引入环境干扰因素模拟机制，可量化分析温度、振动等对定位精度的影响规律。通过实测数据与模拟数据的双重验证，为组合导航算法的改进与可靠性评估提供有力支撑。

1　GNSS+IMU/里程计组合导航仿真平台

GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真软件平台设计的目的是为了解决单独导航形式所存在的信源无法采用、多源导航极易造成信源间的冲突及融合导航系统缺少有效模拟仿真平台的问题。通过 GNSS+IMU/里程计组合导航，平台可处理多种场景下的导航信息源，经数据预处理剔除噪声，并利用多源融合算法实现数据有机融合，内置算法库支持数据输入、多种算法接入及端口验证，提升系统在新场景下的鲁棒性与自适应性，满足用户功能与性能需求，为多源融合导航算法的改进提供测试环境。

在功能设计上，平台注重扩展性、重构性、显示交互性与容错性，通过接口设置、可视化界面、模块化设计及容错机制实现相应能力。定位解算是其核心，集成多源融合、神经网络及数据处理技术，针对不同场景对数据文件进行预处理，选择适宜融合算法完成高精度导航。平台还具备模拟功能，通过内置数学模型生成多源数据与载体运动轨迹。针对特定场景下某导航方式失效导致精度偏差的问题，平台提供算法对比评估功能，以确定最适配的融合算法并支持算法改进。此外，采用模块化与可配置架构，将数据处理流程标准化，抽离共性部分形成通用类和函数，降低代码冗余度，便于系统调度及后续功能扩展[10−11]。

1.1　组合导航系统仿真平台构架

GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台由显示与控制、组合导航数据载入、主要控制、数据预处理和信息融合等 5 大模块组成，如图 1 所示。

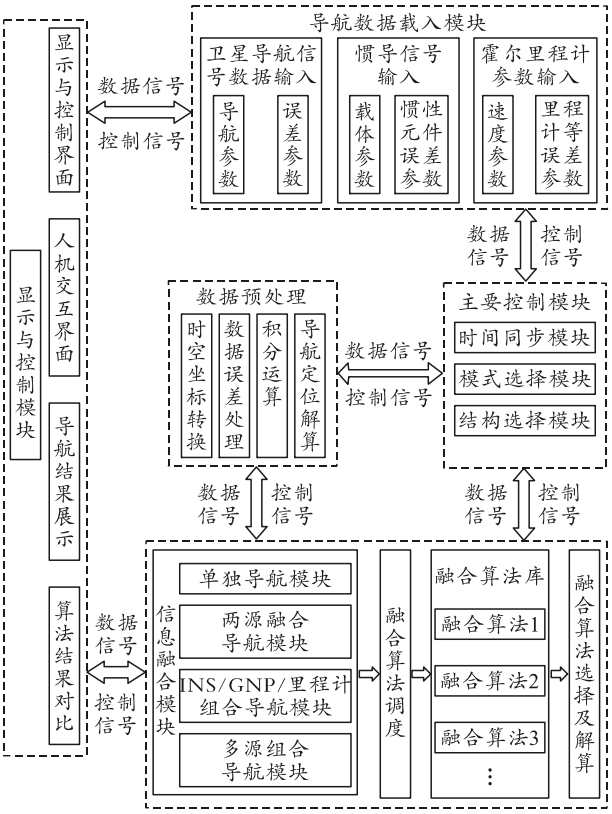


图 1　GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台架构

各模块间利用控制和数字信号来传输与交接，控制信号利用回调后的函数来实现控制，数据信号将数据存储在 struct 文件中生成数据包在各模块间进行传递和交互。通过现场卫星导航、惯性导航、里程计、视觉等系统或者组态软件上采集数据，再经过数据辨识、数据分类、规则策略实现、时空坐标转换、误差处理、定位解算等数据存储和数据预处理；通过实时数据库、应用数据库、知识库等实现信息融合建模，再由 GNSS+IMU/里程计组合导航系统将融合算法中的重复代码提取出来，形成单独的类和函数，满足仿真平台的可接入性以及可扩展性，使得整个平台易于集成和扩展；同时，平台提供接口支持 Modbus 协议、OPC 协议、Socket 协议等主流通信方式的数据输入，除去系统中内置的算法外，也支持接入其他本地导航算法以便进行处理和对比。

1.2　平台模式及操作流程

如图 2 所示，GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台的操作运行可分为组合导航解算和算法对比 2 种模式。

在组合导航解算模式下，通过研究惯性导航系统的姿态、速度、位置更新算法，分析惯性导航系统中里程计定位定向系统的主要误差，并分别对惯性导航和里程计的误差进行分析，得到组合定位定向系统的误差方程。然后，对系统的初始对准算法和组合导航算法进行研究和设计，使用系统所选器件的参数对初始对准算法和组合导航算法进行仿真，综合分析车身环境对传感器的各种干扰，采用专门的滤波处理电路来提高霍尔里程计的抗干扰能力，完成精度较高车辆导航里程计的设计，并将卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波技术应用到惯性导航系统中，并通过仿真模拟来分析随机误差、量化误差、安装误差角、刻度系数及延时估算误差等，进而减弱整体误差实现惯性导航/霍尔里程计组合系统精确定位定向目的。

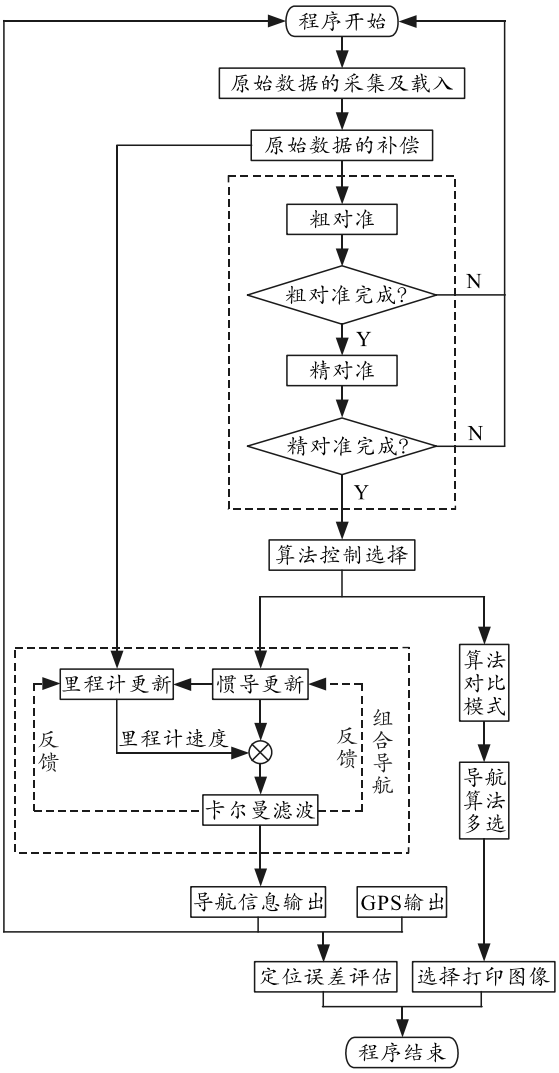


图 2　组合导航系统仿真平台的操作及运行流程

在算法对比模式下，GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台不仅能实现导航算法的对比功能，而且能实现导航算法相关性能的展示。通过选择多种导航算法或融合算法进行性能比较，算法对比流程为：1) 由界面显示模块来选择融合算法的种类；2) 选出数据种类并直接读取库中数据；3) 采用待评估的算法对模拟数据进行融合解算，并输出解算值；4) 将输出的解算值与标准值进行比对分析，并输出比对评估结论。同时，为提升平台容错性，在GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台中，需增添判错机制，以防数据不能载入或载入错误等情况出现。最后，根据对比结果选出需要的性能图像进行打印输出。

2　软件平台搭建及仿真测试

2.1　平台核心功能模块

为满足复杂场景下组合导航算法的验证需求，GNSS+IMU/里程计仿真平台采用模块化架构，将核心功能解耦为 5 个相对独立又相互协作的模块，各模块通过标准化接口通信，保证平台扩展性与验证效率。

1) 数据载入与解析模块。支持实测数据(车载试验采集的 GNSS、IMU 及里程计原始数据)、公开数据集(KITTI、EuRoC 等领域内通用数据集)、模拟数据(由轨迹发生器生成) 3 类数据源载入。模块内置数据解析器，可自动识别数据格式、统一时间基准、完成时空坐标转换，并剔除明显粗差噪声。数据载入成功后以内部数据包形式分发至其他模块。

2) 多源融合算法库管理模块。内置卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波及粒子滤波等经典组合导航算法，以动态链接库形式模块化封装。可通过配置文件调用内置算法，也可通过预留接口接入自行开发的算法。模块支持传感器误差特性建模，可根据 IMU(如 MEMS、光纤陀螺)或里程计(如霍尔、光电码盘)类型，配置相应的误差参数(如零偏稳定性、刻度因子、量化误差等)，使仿真更贴近真实硬件特性。

3) 轨迹模拟与仿真模块。内置轨迹发生器，用户可通过设定起点、终点、速度、加速度、角速度等参数，自定义生成直线、弯道、紧急制动等多工况下的理想轨迹。模块可根据预设传感器误差模型，向理想轨迹中叠加不同等级的 IMU 及里程计误差，生成具有统计特性的仿真传感器数据，提升算法研发初期的灵活性与可用性。

4) 算法对比与评估模块。支持横向对比测试，可选择多种算法(如 EKF 与 UKF)对同一组数据分

别进行解算。模块自动记录各算法的解算结果，并调用评估函数将其与参考真值(可由高精度组合导航系统提供或由轨迹发生器生成)进行比对，并生成对比曲线图，直观展示不同算法在精度、稳定性及计算耗时方面的差异。

5) 结果显示与交互模块。主界面集成地图显示区、功能操作区、组合导航状态区及系统菜单区。地图显示区可实时绘制车辆轨迹、卫星分布及惯导推算路径；功能操作区提供“开始导航”“无 GPS 模式模拟”等按钮，支持实时干预仿真进程；状态区动态刷新当前定位模式、车速等信息。模块还支持结果图形化输出与数据导出，便于后续深入分析。

2.2　仿真平台主页面设计

为了更好地对 GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台进行验证与处理，设计出的主页界面更加直观且易于操作，可实现仿真平台相应的功能。(例如模式选择、导航数据载入、轨迹模拟、结果显示、运行、退出等功能)。图 3 为 GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台的主界面。

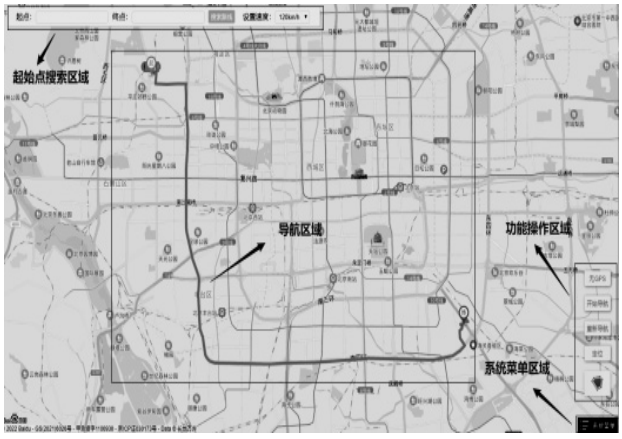


图 3　主页展示

主页的总体功能展示部分分为 4 个区域：1) 起始点、终点搜索区域；2) 功能操作区域；3) 组合导航区域；4) 系统菜单区域。为了满足仿真平台的运行流程，在其运行初期时，界面上的某些控件显现为灰色，无法操作，等待相应的导航数据加载完毕后，经过数据预处理后的信号源载入多源融合算法库，由控制信号选择出相应的算法进行解算完毕，而后才能进行其他模式选择。即当选择某种导航信息源时，则只有该导航算法库的按钮处于可选状态，反之，其他融合算法库的按钮同理亦然。

2.2.1　起始点搜索

GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台主页中的起始点搜索位于左上角位置。当需要模拟组合导航状态下的行车轨迹时，根据事先预设的行车路线，在界面的起始点搜索中分别输入“起点”“终点”的地址名称，然后在候选地址中选定“起点”和“终点”的名称，点击“搜索路线”按钮，主页界面中就会显示从“起点”到“终点”的预设导航线路，如图 4 所示。

图 4　起点终点设置及行车线路

与此同时，GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台在模拟行车轨迹时所用到的测试适用数据主要来源有 3 种：1) 经由轨迹模拟发生器模拟出行车运动轨迹，通过整合获得轨迹数据，并保存至系统内部的文件夹里所形成的模拟数据；2) 利用导航领域里比较知名的数据集对预定算法进行对比测试，即采用能够搜集到的公开数据集；3) 将行车所需的传感器设备安装在车辆上，而获得真实的导航数据。

2.2.2　系统菜单

仿真平台的系统菜单位于主页界面右下角的最底部，能够提供刷新主界面、恢复常规、最大化、最小化和退出等功能。其中，系统菜单的常驻系统标题栏常规情况下是处于隐藏状态的，当需要展示时，鼠标右键点击小车图标显示，而左键点击小车图标则消失。

2.2.3　功能操作演示

在演示导航功能前，需要先选择模拟行车速度，然后进行操作演示。

“开始导航”按钮：点击“开启导航”，此时小车会按导航线路由起点向终点行进。此时名称会切换为“停止导航”。点击“停止导航”，导航停止，小车位于最后行进的位置。

“重新导航”按钮：点击“重新导航”，小车将回到起始点。如果之前处于导航中，则仍然继续从起点开始导航；如果处于停止中，则需要点击“开始导航”重新开启导航模式。

“无 GPS 模式”按钮：模拟无 GPS 模式的情况，此时主页上将显示“惯导行驶中，霍尔速度 27.2 m/s”的字样，如图 5 所示，表示在无 GPS 时，模拟惯导行驶的情况。

图 5 显示速度

定位：点击“定位”功能按钮，就可以将地图放大到车辆附近区域，如图 6 所示。

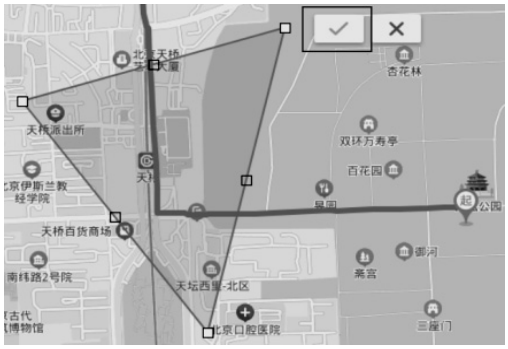


图 6 划定惯导行驶区域

多边形选区：可以划定需要惯导行驶的区域，并按两点直线行驶，如图 7 所示。

图 7 惯导行驶规划路线

2.3 导航数据的载入及功能性仿真测试

2.3.1 数据载入与传感器适配

为满足组合导航算法对多源数据及多样化传感器的验证需求，设计出统一的数据载入与传感器适配机制，支持实测数据与仿真数据灵活接入，并兼容不同精度等级的传感器误差建模。

1) 多源数据载入。平台支持 3 类数据源接入：实测数据通过车载试验采集 GNSS、IMU 及里程计原始数据，涵盖城市道路、隧道等典型场景；公开数据集支持 KITTI、EuRoC 等通用数据集，便于横向对比；模拟数据通过内置轨迹发生器自定义运动参数，用于算法快速验证。3 类数据源均采用统一结构体封装，实现标准化处理，便于算法验证与平台升级。

为使数据载入更具可操作性和复用性，三类数据源均采用统一的结构体格式进行封装。表 1 和 2 分别给出 GNSS 和 IMU 主要数据结构体字段定义，所有传感器数据均按照该规范进行标准化处理，既可实现各类型算法验证，又便于平台后续升级开发。

表 1 GNSS 主要数据结构体字段

符号	含义	介绍
t	时间向量	数据采集的始终时刻
Del *T*	时间间隔	数值
lat	纬度矢量	*N**1 向量
lon	经度矢量	*N**1 向量
vel	速度矢量	*N**3 向量
std	位置标准差	*N**3 向量
stdm	位置标准差	*N**3 向量
freq	采样频率	数值

表 2 惯性导航主要数据结构体字段

符号	含义	介绍
t	时间向量	数据采集时长
Del *T*	时间间隔	数值
fb	加速度矢量	*N**3 向量
wb	转弯速度矢量	*N**3 向量
vel	速度矢量	*N**3 向量
ini_align	初始姿态矢量	1*3 向量
ini_align_erro	初始姿态误差	1*3 向量
location	位置矢量	*N**3 向量

2) 多类型传感器适配。为适应不同应用场景下硬件配置差异，平台支持多种精度等级与工作原理的传感器接入。惯性导航系统支持 MEMS、光纤陀螺、激光陀螺等 IMU，可配置零偏稳定性、角度随机游走等误差参数；里程计系统支持霍尔里程计、光电码盘、光学里程计等类型，可设置刻度因子误差、分辨率、安装偏差等参数，实现硬件差异化配置。

3) 误差特性与环境影响模拟。平台引入误差特性建模与环境因素模拟机制，提升仿真结果与实测数据的一致性。误差特性建模可根据标定结果设置量化误差、随机游走、刻度因子误差、安装误差角等参数，生成符合统计规律仿真传感器数据；环境

影响模拟支持温度漂移、振动干扰、电磁干扰等误差注入功能，可量化分析环境因素对定位精度影响，为算法鲁棒性评估提供依据。

通过以上数据载入与传感器适配机制，平台可满足从算法原型验证到实际应用的全流程仿真测试需求，为组合导航技术研究与开发提供有力支撑。

2.3.2　功能性测试

实验测试车租用北京航空航天大学的测试试验车，将仿真实验平台及测试硬件装置安置在实验测试车中，如图 8 所示。

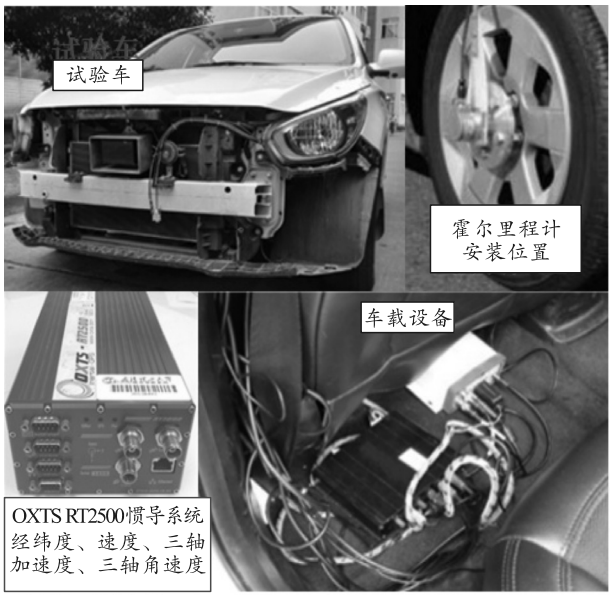
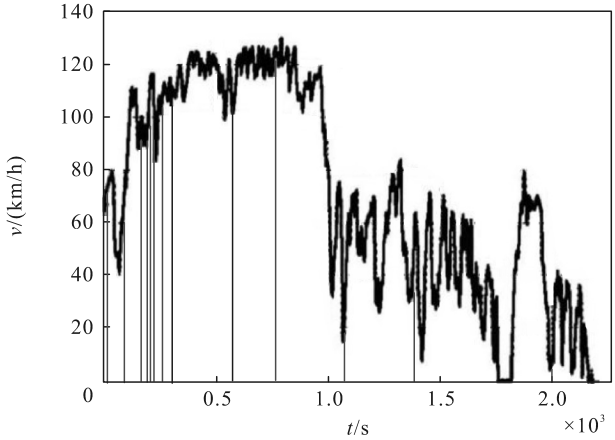


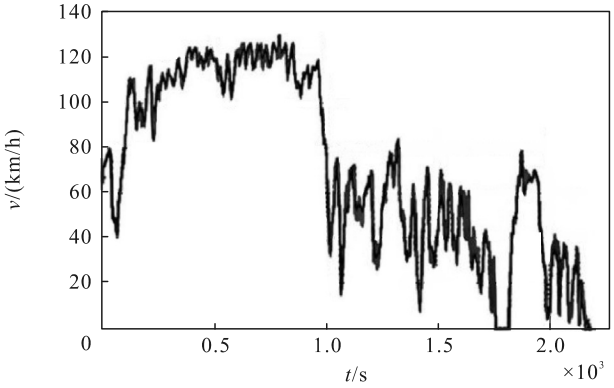
图 8　测试试验车及部分测试硬件设备

通过试验测试车进行真实数据的采集，并载入 GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台中。采集路段的起点为天坛公园，终点为天安门广场，跑车路线如图 4 所示。

分别采用 GNSS 系统和 IMU/里程计系统进行导航测试，如图 9 所示。



(a) GNSS 导航系统测量数值



(b) IMU/里程计组合系统测量数值

图 9　GNSS 和 IMU/里程计系统测试数据对比

在车辆的行驶过程中，最高速度达到 125 km/h，行驶的里程约为 4.8 km。可以看出：图 9(a)和(b)中曲线大部分时间均处于重合状态，表明 IMU/里程计和 GNSS 导航系统测量出的数据吻合性非常好。又因为当车辆行驶到立交桥或天桥等路段以及停车时 GNSS 天线接收的信号微弱、无信号或处于停车状态，将会导致代表 GNSS 测量数据的曲线骤降至 0 或起伏较大，则此时 GNSS 测量出的数据为无效数据。

3　结论

1) 基于 GNSS 导航系统、IMU/里程计系统各自的功能特点，构建 GNSS+IMU/里程计组合导航系统，达到优势互补的效果，满足提升定位系统精确度和稳定性要求；

2) 搭建出的 GNSS+IMU/里程计导航组合系统仿真平台具有扩展性、重构性、显示交互性和容错性等特点，可实现模式选择、导航数据载入、轨迹模拟、结果显示、运行和退出等相应的功能；

3) 通过试验测试车进行真实数据采集并载入 GNSS+IMU/里程计组合导航系统仿真平台中。经测试发现 IMU/里程计和 GNSS 导航系统测量出数据的吻合性非常好。当车辆行驶到立交桥或天桥等时，发现 GNSS 测量的数据值骤然下降至 0 或起伏较大，而 IMU/里程计系统测出的数据却显示正常，则表明此时 GNSS 天线接收信号微弱或处于无信号状态等，IMU/里程计系统正好弥补 GNSS 的缺陷。

参考文献：

[1] 王杰. 基于 DSP 的 SINS/GPS 组合导航系统信息处理[D]. 长春: 长春工业大学, 2016: 20−60.

[2] 郭承军. 多源组合导航系统信息融合关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 11−30.

[3] 臧荣春, 崔平远, 崔祜涛, 等. 基于 IMM-UKF 的组合导航算法[J]. 控制理论与应用, 2007(4): 634−638.
[4] 杨晓丹, 王运峰. 多源航迹信息融合主要技术研究[J]. 现代计算机(专业版), 2017(8): 8−11.
[5] ABDOLKARIMI E S, MOSAVI M R.Wavelet-adaptive neural subtractive clustering fuzzy inference system to enhance low-cost and high-speed INS/GPS navigation system[J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 1−17.
[6] 邓红, 刘光斌, 陈昊明, 等. 基于 UKF 的导弹 SINS/CNS/姿态估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9): 1987−1990.
[7] 张玲娜. 基于霍尔传感器的电机转速测量与调速系统设计和研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
[8] 李泽勇, 王文生. 闭环霍尔电流传感器在车用电源系统中的应用[J]. 电子元器件应用, 2004, 6(5): 25−26, 35.
[9] NING X L, YUAN W P, LIU Y H. A tightly coupled rotational SINS/CNS integrated navigation method for aircraft[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(4): 770−782.
[10] LI X D, YU C J, SU F L, et al. Novel training algorithms for long short-term memory neural network[J]. IET Signal Processing, 2019, 13(3): 304−308.
[11] KHANKALANTARY S, RAFATNIA S, MOHAMMADKHANI H. An adaptive constrained type-2 fuzzy Hammerstein neural network data fusion scheme for low-cost SINS/GNSS navigation system[J]. Applied Soft Computing, 2020, 86: 105917.

****

（上接第 39 页）

参考文献：

[1] 张阳, 廖晓烨, 杨书敏, 等. 一种结构优化的深度信任网络短时交通流预测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(11): 126−133.
[2] 韩浩东, 陈盛双, 谢良. 基于超图的多任务注意力交通流预测模型[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(10): 150−159.
[3] 刘安乐, 杨承玥, 明庆忠, 等. 资源型城市的交通演化与旅游发展耦合关系——以六盘水市为实证案例[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 70−78.
[4] ZHU W Q, CHEN H Y, LIUL, et al. Traffic FLOW Prediction Model Based on Multivariate Time Series and pattern Mining in Terminal Area[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 40(5): 595−606.
[5] 杨国亮, 习浩, 龚家仁, 等. 基于多图融合的时空交通流预测方法[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(10): 126−129, 134.
[6] 周安众, 谢丁峰. 基于图注意力机制的交通流预测模型[J]. 软件工程, 2023, 26(8): 48−52, 62.
[7] 张阳, 胡月, 陈德旺, 等. 基于GCN-BiLSTM的短时交通流预测模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(5): 802−806.
[8] 陈孟, 千可, 李凯, 等. 基于实时多模态时空数据的时空图卷积网络精准鲁棒交通流预测模型[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 134−139, 158.
[9] 刘赏, 陈浩, 陈小玉, 等. 面向交通流预测的双分支时空图卷积神经网络[J]. 信息与控制, 2023, 52(3): 391−404, 416.
[10] 齐小刚, 张皓然, 李家慧, 等. 基于动态时间扭曲的NFV网络故障检测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2023, 59(2): 343−350.
[11] 郑国强, 乔宇昊, 孙思民. 基于POI数据的城市功能区识别研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(10): 58−61.
[12] 胡应钢, 郭翔, 赵海燕, 等. 基于粒子群优化GRU-RNN 组合模型的云计算资源负载预测[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(4): 315−321.
[13] 万铮, 王芳, 黄树成. 基于权重词向量与改进 TextCNN 的中文新闻分类[J]. 软件导刊, 2023, 22(9): 59−64.