

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.01.010

# 变电站环境下 GNSS/INS 组合导航系统设计与实现

李广元<sup>1,2</sup>, 熊鸣<sup>1,2</sup>, 王丽婕<sup>1,2</sup>, 张人丰<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192; 2. 北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘要:**针对工程车辆在变电站环境下单一导航模式无法提供精确稳定的定位信息问题,文章围绕全球卫星导航系统/惯性导航系统(global navigation satellite system/inertial navigation system,GNSS/INS)定位原理,详细给出 GNSS/INS 松组合模型和卡尔曼滤波算法,研发高动态、低成本的 GNSS/INS 组合导航终端设备,并以 2022 年 3 月在江苏省虞城(姑苏)换流站 GNSS 和 GNSS/INS 数据为例,比较分析工程车辆静止、运动状态下 GNSS 和 GNSS/INS 组合导航定位模式下车辆的点位、姿态角偏差值大小,分析其是否满足作业要求。结果表明提出的 GNSS/INS 组合模型及其算法数学模型简单、易于程序设计;研发的 GNSS/INS 终端设备成本低、效率高;车辆在运动状态下组合导航的位置误差要小于 GNSS 状态下的 3 cm,航向角误差小于 0.5°,且系统在静态情况下比动态情况下有较高的定向精度。该文的系统设计可以满足变电站工程车辆生产作业的需要,也为变电站环境下高精度、高可靠性的工程车辆导航提供借鉴和参考。

**关键词:**工程车辆;变电站;组合导航;卡尔曼滤波;松组合

**中图分类号:**TH89 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)01-0062-07

## Design and implementation of GNSS/INS integrated navigation system in substation environment

LI Guangyuan<sup>1,2</sup>, XIONG Ming<sup>1,2</sup>, WANG Lijie<sup>1,2</sup>, ZHANG Renfeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that single navigation mode of engineering vehicles in substation environment cannot provide accurate and stable positioning information, based on the positioning principle of global navigation satellite system/inertial navigation system(GNSS/INS), this paper studies the system formed by a model of loosely coupled GNSS/INS and the Kalman filtering mechanism. A GNSS/INS integrated navigation module with better dynamics and less investment is designed. Taking the GNSS and GNSS/INS data in Yucheng(Gusu) converter station in Jiangsu Province in March 2022 as an example, the deviation values of point position and attitude angle of engineering vehicles under the GNSS and GNSS/INS integrated navigation and positioning modes in stationary and moving states are compared and analyzed. In addition, whether the operation regulations are met or not is given. The results show that the proposed GNSS/INS integrated model and its mathematical model are simple and easy to compile. The input of the whole module is not large, and the performance is better. The positioning error of the integrated navigation of the vehicle in the moving state is less than 3 cm in the GNSS mode, and the heading angle error is less than 0.5°. Moreover, the system has higher orientation accuracy in the stationary state than in the moving state. The designed system can meet the needs of substation engineering vehicle operation, and also provide reference for engineering vehicle navigation with high precision and high reliability in substation environment.

**收稿日期:**2022-09-07;**修回日期:**2022-11-16

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2020YFC1511702);国家自然科学基金资助项目(61771059;61801032;61971048);北京市自然科学基金资助项目(4212003)和北京市科技计划资助项目(Z191100001419012)

**作者简介:**李广元(1997—),男,重庆市人,北京信息科技大学硕士生;

熊鸣(1978—),男,江西丰城人,博士,北京信息科技大学高级实验师,硕士生导师,通信作者,E-mail:xmcc@bistu.edu.cn

**Key words:** engineering vehicles; substation; integrated navigation; Kalman filtering; loose coupling

变电站是电网的核心构成之一,其作用是将聚集的电予以电压升降和资源的分配<sup>[1-3]</sup>。随着电力技术的发展,用电单位对用电质量要求提高,供电单位必须尽量减少停电时间,尽可能多地进行带电作业<sup>[4]</sup>。目前经常存在需要维护的设备停电检修而其余的设备仍然正常带电运行的情况,此时维护人员与大型工程车辆需要在带电高压设备附近工作<sup>[5]</sup>。现场维护人员以及工程车辆的操作者都有可能疏忽或误操作的情况下跨越安全间距,甚至工程车辆直接接触带电高压设备,导致人员伤亡和停电故障,造成极坏的后果和经济损失,严重影响电力安全生产<sup>[6]</sup>。为了保证安全生产,必须实时监测工程车辆的位置信息。

变电站带电作业要求工程车辆在变电站环境下完成带电作业,静态定位误差小于 0.1 m,动态平均误差小于 0.2 m。工程车辆带电作业不仅对操作人员的安全意识、技术要求高,而且作业时间长,作业人员长时间处于强电磁场环境。为了减少带电作业带来的不安全性,提高工作效率,满足持续电力供应的新需求,研制带电作业精确定位设备是智能电网的新趋势。智能电网能够保障人员的安全性,提高电网运行质量,具有一定的经济效益和社会效益。

较为普遍的车辆导航技术有全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)、地理信息系统(geographic information system,GIS)、惯性导航系统(inertial navigation system,INS)、全球定位系统(global positioning system,GPS)、计算机视觉以及地磁匹配定位技术等<sup>[7-11]</sup>。当前,以实时差分定位(real time kinematic,RTK)的 GNSS 技术应用十分普遍<sup>[12]</sup>。单一的导航系统不能完全满足用户的需求,组合导航是当前的主要趋势。GNSS 与 INS 系统之间具有天然的互补性,后者具有自主导航的特点,不受环境干扰,应用较广,但随着时间推移,系统误差不断累积<sup>[13]</sup>。INS 可以有效地补偿 GNSS 信号对外部环境干扰的易感性,提高单一 GNSS 卫星信号的抗干扰能力<sup>[14]</sup>。GNSS 容易受环境干扰导致信号丢失,但其实时性和高精度性能可以有效抑制 INS 误差的累积,使 INS 误差受到制约,GNSS 的高精度定位和测速信息可以为 INS 提供高精度的初始信息<sup>[15]</sup>。

文献[16]给出 INS/GPS 超紧组合的组合导

航机制,该方法在数据要求方面较高,使用不便利;文献[17]提出一种以误差状态为核心的扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter,EKF)融合轮式里程计(wheel odometry,WO)和视觉里程计(visual odometry,VO)的方法,并搭建微机电导航平台;文献[18]利用多普勒计程仪测量的速度数据对惯性导航测量单元的测量及推算数据进行修正,从而提高惯性导航测量单元导航精度,引入水声通信/定位系统,利用其水声通信功能,使用超短基线定位系统定时测量水下平台位置,并将位置发送回水下平台以对自主导航系统推算位置进行修正,构建组合导航系统;文献[19]提出一种复合导航系统,利用微机电惯性导航系统、GPS 和地磁导航技术,对组合导航系统的基本原理和各子系统的误差特性进行深入分析,并针对组合导航中的初始对准、数据同步以及数据融合滤波算法等关键技术进行深入研究,提出的组合导向体系和滤波模式能够有效满足应用需求。

伴随北斗卫星导航技术不断完善,其在交通运输、环境监测等多个方面开始被广泛应用<sup>[20]</sup>。北斗导航的大环境下,本文研究设计的 GNSS/INS 组合导航系统,极大地提升了导航系统长期工作的稳定性和精确性。

## 1 系统设计

### 1.1 导航控制原理

GNSS 的误差不会随时间积累,但其卫星信号极易遭受遮蔽等影响,无法给出姿态数据,同时输出的频率不高。INS 主要以牛顿力学定理为核心,结合包括速度计、陀螺仪等各方面的信息予以时间积分分析得到导航坐标系的速率、姿态角方位等数据。INS 导航对于外界数据要求并不高,但是其误差会由于时间推移而不断扩大。GNSS/INS 联合的导航模式将这 2 种导航技术予以有效整合,前者的稳定性并不理想,但是短期稳定性突出,后者则完全相反,这两者在误差方面能够起到非常好的互补控制,从而提升系统整体性能水平。

常用的组合导航有松组合和紧组合。前者技术形式为相对简易的组合模式,如图 1 所示。松组合模式利用 GNSS 与 INS 融合的数据校正 INS 系统参数,从而得到最优导航参数,其组合方式相对容易和简单,具体是将 GNSS/INS 作为独

立的位置和姿态参数输入到组合导航框架中。紧组合模式里的 GNSS/INS 并非独立的系统,只是作为测量传输模块,利用 INS 得到载体位置和速率数据从而推算 GNSS 伪距以及伪距率,GNSS 与 INS 的差值建立观测方程,经 Kalman 滤波算法,得到精准导航解。相比较松组合,紧组合的数学模型相对复杂,运行方式更为繁复,实际工程方面的应用也不多,大多数实际工程应用中依旧采用松组合模式。

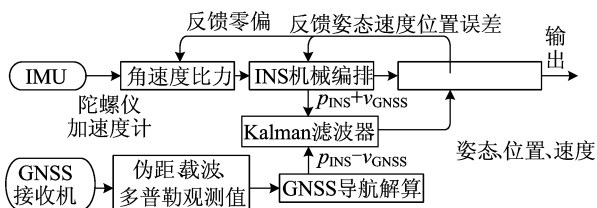


图 1 松组合流程

图 1 中： $p_{INS}$ 、 $v_{INS}$  分别为由 INS 计算得出的位置和速度； $p_{GNSS}$ 、 $v_{GNSS}$  分别为由 GNSS 计算得出的位置和速度。INS 利用 IMU 的加速度计和陀螺仪数据来估计设备的当前位置、速度和姿态；GNSS 通过接收到的伪距、载波和多普勒观测值计算接收机(即载体)的位置和速度。在数据融合过程中,INS 的估计通常与 GNSS 数据结合,以提高定位的精确度和可靠性。GNSS 提供全球定位数据,它可以帮助校正 INS 积分过程中积累的误差,GNSS 不依赖于设备的动作或者先前的位置估计。这种结合通常在动态环境中用于持续且精确的位置跟踪,如车辆导航和航空导航应用。

### 1.2 GNSS/INS 组合导航系统架构

本文研究的 GNSS/INS 组合导航系统使用双天线卫星系统与惯性导航进行组合,结合基准站的差分信息,解算出高精度定位数据,系统架构如图 2 所示。

差分流动站包括 GNSS 双天线、接收天线和接收终端等多个部分,而差分基准站主要用于为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_0^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_0q_3 + q_1q_2) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_0^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_0^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过转换公式实时更新姿态角,即

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}, \\ \theta &= \arcsin 2(q_0q_2 - q_1q_3), \\ \psi &= \arctan \frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中： $\varphi$  为载体航向角； $\theta$  为载体俯仰角； $\psi$  为载体

差分流动站提供高精度的差分校正信息。差分基准站包含卫星监测天线、接收模块、发射天线等多个组成部分。为了实现组合导航系统的应用,本文研发差分车载设备。

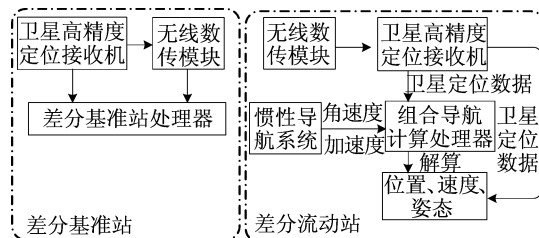


图 2 组合导航系统架构

### 1.3 GNSS/INS 组合导航算法

GNSS 的绝对定位与 INS 相对定位可以相互补充,GNSS 的长期精度相对突出,但是易受外界影响,数据输出频率低<sup>[21]</sup>;INS 的短期精度较为可靠、输出频率高、抗干扰性能强和时效性突出,但是存在累积误差<sup>[22-23]</sup>。GNSS/INS 组合可以提供长时间的高精度、高时效性的位置以及姿态数据<sup>[24]</sup>。松组合模式组合导航不仅仅可以精确解算点位、速率和姿态,此外也能突出鲁棒性<sup>[25-28]</sup>。

#### 1.3.1 INS 解算方法

常见的 INS 姿态解算方法主要采用四元数法,该方法具有无奇点、计算量小、全姿态解算等优点,从而广泛应用于姿态解算中。为了更好地描述载体姿态变化,定义导航坐标系为  $n$  系、载体坐标系为  $b$  系。

$n$  系与  $b$  系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = C_b^n \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

由四元数  $q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$  表示姿态变换矩阵  $C_b^n$ ,即

横滚角。

#### 1.3.2 Kalman 滤波融合算法

本文通过使用松组合方式,设计了 Kalman 滤波融合算法,并取得了比单个子系统更好的定位精度。Kalman 滤波融合算法的流程如图 3 所示。

图 3 中:  $p$  为载体的位置;  $v$  为载体的速度;  $a$  为载体加速度;  $\varphi, \theta, \psi$  含义同上。

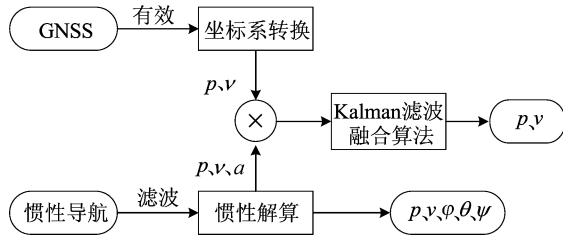


图 3 Kalman 滤波融合算法

当 GNSS 信号有效时, NMEA0183 报文中的位置和速度数值经坐标转化处理后, 与滤波后的惯性导航参数一并输入到 Kalman 滤波器进行融合计算, 获得最佳估计参数; 当 GNSS 信号失效时, 惯导系统独立输出导航参数。

系统的状态向量  $\mathbf{X}$  计算公式为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{p}^n \quad \mathbf{v}^n \quad \mathbf{a}^b \quad \mathbf{b}_a]^T \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{p}^n = [p_x^n & p_y^n & p_z^n]^T, \\ \mathbf{v}^n = [v_x^n & v_y^n & v_z^n]^T, \\ \mathbf{a}^b = [a_x^b & a_y^b & a_z^b]^T \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{p}^n$  为  $n$  系中的位置矢量;  $\mathbf{v}^n$  为  $n$  系中的速度矢量;  $\mathbf{a}^b$  为  $b$  系中的加速度矢量;  $\mathbf{b}_a$  为惯导的零偏误差。

Kalman 滤波器的状态方程为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{X}_k$  为系统状态向量; 下标  $k$  表示  $k$  时刻;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{w}_k$  分别为系统状态转移矩阵和系统噪声, 即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \Delta t & \frac{1}{2} \mathbf{C}_b^n \Delta t^2 & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \Delta t & \mathbf{O}_{9 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{9 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{I}_{i \times i}$ 、 $\mathbf{O}_{i \times j}$  分别为  $i$  阶单位阵和  $i \times j$  阶零矩阵。

Kalman 滤波器的测量方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{Z}_k$  为系统在  $k$  时刻的测量向量;  $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{v}_k$  分别为测量系统的系统参数和测量噪声, 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Kalman 滤波计算的步骤如下:

1) 状态一步预测。计算公式为:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (10)$$

2) 状态一步预测均方误差。计算公式为:

$$\mathbf{P}_{k/(k-1)} = \mathbf{A}_{k/(k-1)} \mathbf{P}_{(k-1)} \mathbf{A}_{k/(k-1)}^T + \mathbf{Q} \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{P}_{k/(k-1)}$ 、 $\mathbf{Q}$  分别为误差协方差矩阵和系统过程噪声协方差矩阵。

3) 滤波增益。计算公式为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/(k-1)} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k/(k-1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{K}_k$ 、 $\mathbf{R}$  分别为 Kalman 滤波增益和测量噪声方差矩阵。

4) 状态估计。计算公式为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/(k-1)} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{k/(k-1)}) \quad (13)$$

5) 状态估计均方误差。计算公式为:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k/(k-1)} \quad (14)$$

## 1.4 系统软件设计

GNSS/INS 组合导航系统包含 GNSS 接收终端、低投入的微型惯性测量单元 (micro-electro-mechanical systems inertial measurement unit, MEMS IMU)、控制模块和数据传输单元。GNSS 选取千寻位置企业的 D300 产品, 支持全系统多频段的信号联入; 20 Hz 数据更新速率; 串口/USB 多种接口通信。IMU 选取北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室研发的低成本 IRHK\_30P 六轴姿态传感器, 配置了三轴 MEMS 陀螺、三轴 MEMS 加速度计, 零偏稳定性为  $2^\circ/\text{h}$ 。数据传输模块采用 P900 无线电台, 主要用来获取实时差分校正信息。车载终端程序流程如图 4 所示。

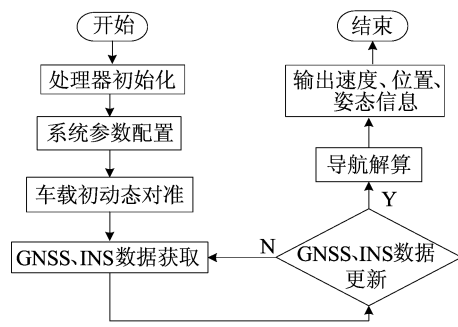


图 4 车载终端程序流程

## 2 试 验

### 2.1 试验平台

为分析研发的终端在变电站环境下的稳定性和精准性, 以唐骏吊车 LXQY-16 为载体, 搭建测试平台, 差分基准站安置于没有遮掩物的空旷位置; GNSS 天线安置于车顶, P900 数传模块、低成本 MEMS IMU 和高精度定位板卡在内的集成设备固定在载体上。集成设备如图 5 所示, 试验平台如图 6 所示。

INS 使用惯性传感器 IRHK-30P 和惯性传感器 STM32-F767 的组合。IRHK-30P 惯性传感器工作于  $-45\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境温度下, 主要应用于军品等高可靠性领域。



图 5 集成设备

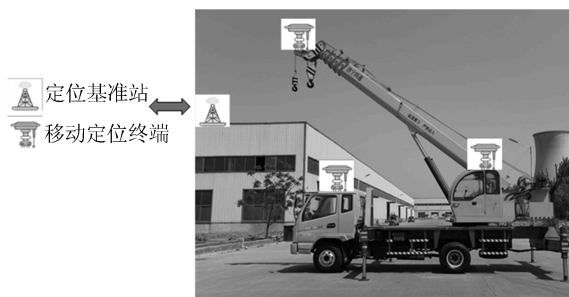


图 6 试验平台

精度定位接收模块选取千寻位置有限公司的 D300 设备。其功耗较低, 支持毫米级载波相位观测以及厘米级的 RTK 定位, 此外兼容芯片级的多路径管控, 超前的瞬时 RTK 技术, 自适应抗干扰, 兼容北斗卫星导航系统 (Beidou Navigation Satellite System, BDS) 等多频数据, 搭载 3 个串口, 便于和其他终端交互; 20 Hz 的刷新率、1 s 的 RTK 重捕获周期, 兼容热启动、网络、多串口等多方面的连接应用场合。

无线数传电台终端为 P900, 其内部搭载高功率的数传电台, 体积小、质量轻、功耗低。此外电台还支持高低功率转换、空中波特率转换等多方面的应用需要。支持处理器的有效管控, 整个电台兼容的工频为  $902\sim 928\text{ MHz}$ , 运行温度要求为  $-55\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 传输跨度可以达到 60 km; 标配 5 dBi 天线实测 35 km, 满足工程车辆工作的环境需求。

GNSS 天线 GPS500 是覆盖 GPS L1/L2、GLONASS L1/L2、BDS B1/B2/B3 的三系统七频外置监测天线, 满足时下测量设备多系统兼容的要求。

天线方面应用多馈点设计模式, 完成相对中心和几何中心的高度重合, 把天线对测量偏差的干扰控制在最低范围内, 天线模块增益较大, 分析图波束宽, 保证低仰角信号的接入质量, 在部分遮蔽较严重的情况下依旧可以正常工作, 搭载防范多径扼流板, 有效降低多径以及精度水平的强关联性, 对水以及紫外线有着较好的防范效用, 为天线的长期稳定运行奠定基础。

### 2.2 静止状态试验

在工程车辆静止状态下测试导航系统定位的性能, 比较 GNSS 定位和 GNSS/INS 组合定位的效果。试验于 2022 年 3 月在江苏省虞城 (姑苏) 换流站进行。试验中保持工程车处于静止模式, 系统给出 GNSS、GNSS/INS 2 个方面的导航信息, 其输出频率 1 Hz。把位置、航向角信息和对应均数的偏差视作定位偏差, 以评估定位定向精确性。

静止状态下航向角对比结果如图 7 所示, GNSS 定位结果如图 8 所示, GNSS/INS 组合定位结果如图 9 所示。

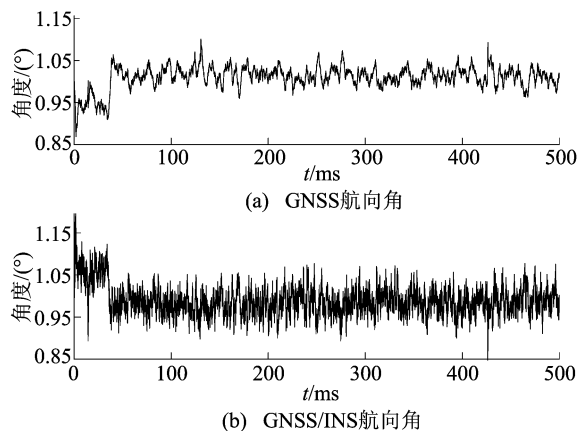


图 7 静止状态下航向角对比结果

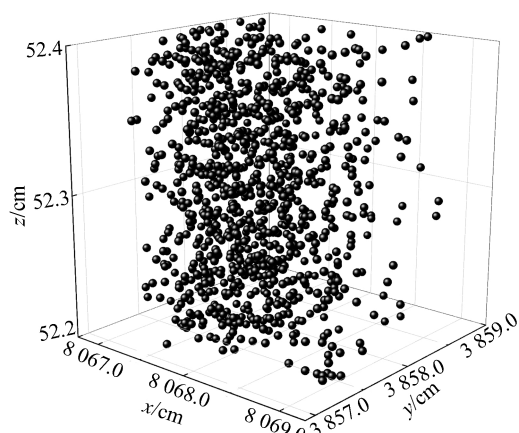


图 8 GNSS 定位结果

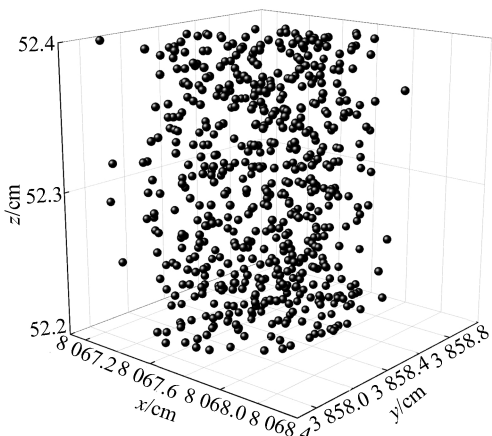


图 9 GNSS/INS 定位结果

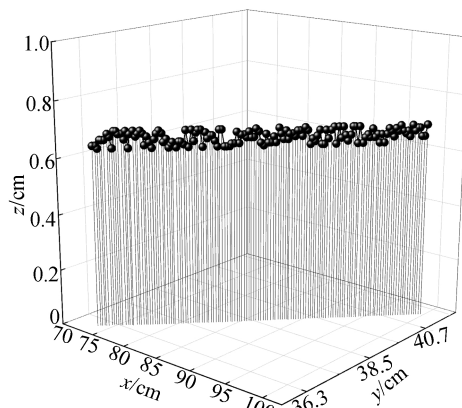


图 11 GNSS 轨迹

车辆处于静止状态时,单独 GNSS 定位与 GNSS/INS 组合定位的位置误差均为 1 cm,航向角误差均为  $0.1^\circ$ ;单独 GNSS 在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的均值为 8 067. 3、3 857. 8、52. 3 cm,航向角均值为  $1.01^\circ$ 。GNSS/INS 组合方式下在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的均值为 8 067. 7、3 858. 4、52. 3 cm,航向角均值为  $0.99^\circ$ 。

组合导航的定位信息相对集中,系统的可靠性高。在定向方面,两者无明显差距,静止状态下,系统的定向精度可靠。

### 2.3 运动状态试验

运动状态试验在工程车辆行驶状态下测试系统导航定位的性能,并比较 GNSS 定位与 GNSS/INS 组合定位的效果。试验中车辆沿着预设线路行驶,以 1 Hz 的频率同时输出 GNSS 定位数据和 GNSS/INS 组合定位数据。

运动状态下航向角对比如图 10 所示,GNSS 导航轨迹如图 11 所示,GNSS/INS 组合导航轨迹如图 12 所示。

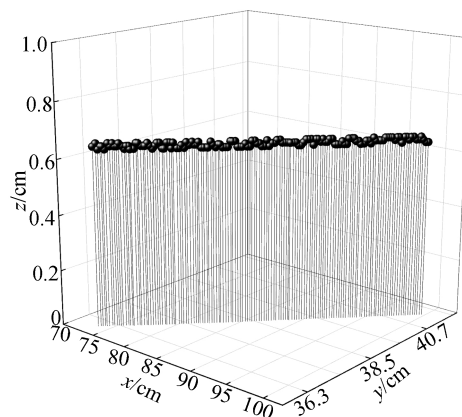


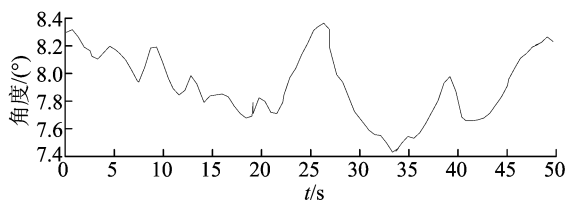
图 12 GNSS/INS 轨迹

车辆处于运动状态时,GNSS 的位置误差为 6 cm,航向角误差为  $1.0^\circ$ ,航向角均值为  $7.91^\circ$ ;GNSS/INS 组合导航方式下的位置误差为 3 cm,航向角误差为  $0.5^\circ$ ,航向角均值为  $8.69^\circ$ 。组合导航定位定向的结果明显优于 GNSS。

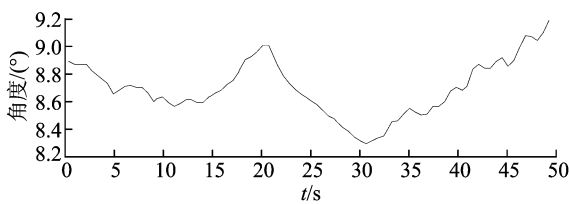
### 3 结 论

本文针对变电站工程车辆导航定位的问题,以唐骏吊车 LXQY-16 为试验平台设计 GNSS/INS 组合导航系统。研制基于 D300 接收机、IRHK-30P 惯性测量单元与 P900 数传电台组合的集成设备。开发围绕 Kalman 滤波为核心的 GNSS/INS 组合导航系统,进行工程车辆在静止、运动状态下的导航性能分析与比较,结果表明:

- 1) 本文提出的 GNSS/INS 组合模型及其算法数学模型简单、易于程序设计。
- 2) 研发的 GNSS/INS 终端设备成本低、效率高。
- 3) 系统在静止状态情况下的位置误差小于 1 cm,航向角误差为  $0.1^\circ$ ;较运动状态情况下有



(a) GNSS航向角



(b) GNSS/INS航向角

图 10 运动状态下航向角对比结果

较高的定向精度。

4) 车辆在运动状态情况下,GNSS 的航向角误差为  $1.0^\circ$ ,位置误差小于 6 cm,GNSS/INS 组合下的航向角误差为  $0.5^\circ$ ,位置误差小于 3 cm,GNSS/INS 组合导航定位的结果比 GNSS 导航更加精准,系统更加稳定。

本文设计的系统可以满足变电站工程车辆生产作业的需要,也为变电站环境下高精度、高可靠性的工程车辆导航提供借鉴和参考。

### [参 考 文 献]

- [1] LIU M H. The analysis and display method of digital substation network based on business chains[J]. International Journal of Power and Energy Engineering, 2021, 3(10): 18-22.
- [2] MATHEBULA V C, SAHA A K. Impact of imperfect repairs and diagnostic coverage on the reliability of multi-channel iec-61850 substation communication network[J]. IEEE ACCESS, 2021, 9: 2758-2769.
- [3] LIU J X, ZHANG X R, ZHANG F Q. Research on communication network configuration and simulation of smart substation based on ethernet[J]. Energy and Power Engineering, 2020, 12(4): 14-24.
- [4] GAO J C, WANG L N, LI G L, et al. Discharge characteristics of ground potential live-line work air gaps in cup towers and double circuit towers[J]. Energy Reports, 2022, 8(Suppl5): 285-291.
- [5] 纪璐, 彭冲. 地区电网设备停电检修的运行方式分析[J]. 电力系统装备, 2017(10): 53-54.
- [6] 张远建, 陈搏卿, 姜炫丞, 等. 电力系统临近电安全距离预警系统研究[J]. 电气工程学报, 2022, 17(1): 186-191.
- [7] XIA Y, PAN S G, MENG X L, et al. Anomaly detection for urban vehicle gnss observation with a hybrid machine learning system[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 971.
- [8] 左朝阳, 陈坡, 孟东容. 低成本 PPP/INS 组合导航在车辆导航中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(4): 20-23.
- [9] CHAI L T, WONG C J, JAMES D, et al. Vertical accuracy comparison of multi-source digital elevation model (DEM) with airborne light detection and ranging (LIDAR)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1053(1): 012025.
- [10] 蒋郡祥. 基于图优化的视觉/惯性/GNSS 融合导航方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [11] 赵航, 纪新春, 陆一, 等. 面向车辆导航的多用户云端地磁匹配定位技术研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(6): 844-849.
- [12] ZHANG L H, CHANG G B, CHEN C, et al. GNSS real-time instantaneous velocimetry based on moving-window polynomial modelling[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(8): 1150-1158.
- [13] 王思远, 韩松来, 任星宇, 等. MEMS 惯性导航技术及其应用与展望[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 21-26, 49.
- [14] 李昕. 多频率多星座 GNSS 快速精密定位关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [15] ZHANG T, NIU X, BAN Y, et al. Modeling and development of ins-aided ppls in a GNSS/INS deeply-coupled hardware prototype for dynamic applications [J]. Sensors, 2015, 15(1): 733-759.
- [16] ZHAO H D, LI Z P, ZHANG H S. Ultra-tight GPS/INS integration based long-range rocket projectile navigation method[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(2): 153-160.
- [17] 崔晓珍, 周琪, 武东杰, 等. 可融合里程计的 INS/GNSS 组合导航系统设计与试验分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(2): 84-89.
- [18] 郑天海. 自治水下平台组合导航系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [19] 王萌. MINS/GPS/GM 组合导航系统设计与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [20] 谢军, 张建军, 武向军. 大数据时代“北斗”卫星导航系统发展研究[J]. 中国航天, 2021(1): 8-19.
- [21] 温哲君, 陈安升, 陈帅, 等. 基于 SINS/BDS 的抗差组合导航技术研究[J]. 航天控制, 2019, 37(5): 9-15.
- [22] ZHOU H J, ZHONG Y H, SONG H, et al. Gyro-free inertial navigation technology[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [23] LIU M, CHANG G B. Numerically and statistically stable kalman filter for INS/GNSS integration[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(2): 321-332.
- [24] 闫飞, 王春博, 吴永睿, 等. 森林 BDS/GPS 组合定位算法与精度分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 221-227, 373.
- [25] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [26] SHARMA D, DAVIDSON P, MULLER P, et al. Indirect estimation of vertical ground reaction force from a body-mounted INS/GPS using machine learning [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1553-1563.
- [27] GROVES, PAUL D. Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems[J]. Industrial Robot, 2013, 67(3): 191-192.
- [28] 李哲, 刘强, 王箫杨. GPS/MEMS-IMU 组合导航系统的设计[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(12): 52-56, 59.

(责任编辑 张 镛)