

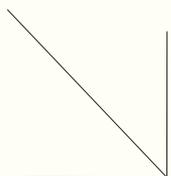
# 基于 DSP F28335 和 CCS 的捷联惯导实时解算

文 ◆ 中国海警局东海分局

山东省军区烟台第三离职干部休养所

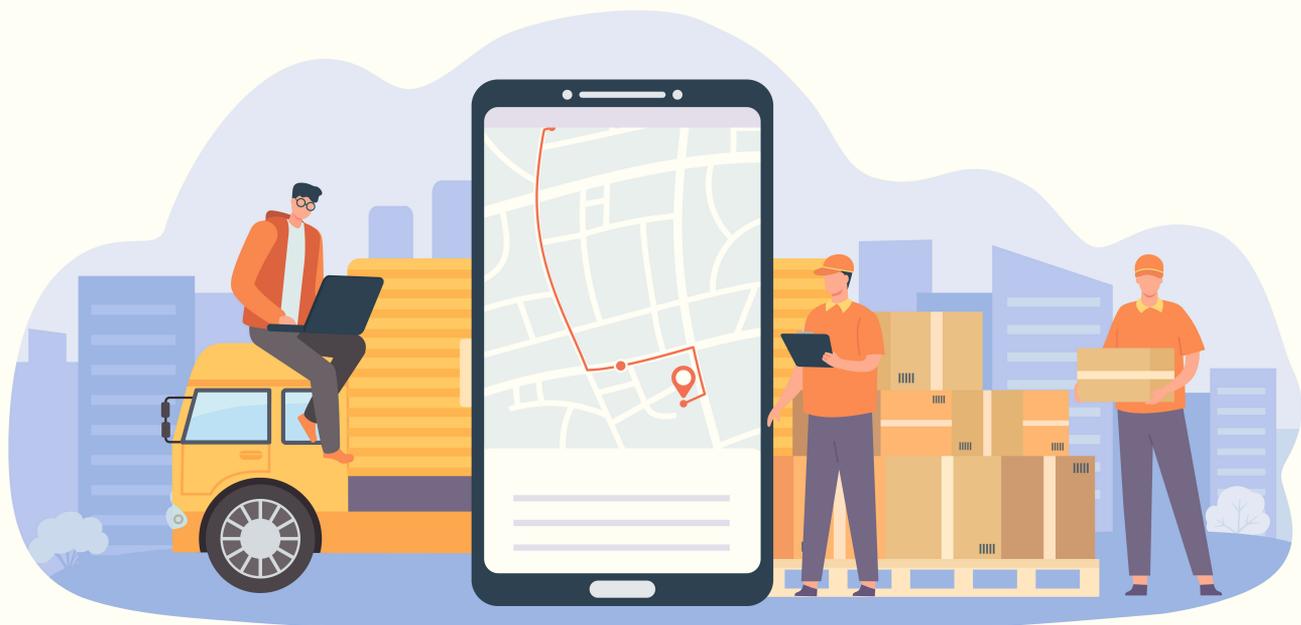
张 阳 李文斌

孙振岚



## 引言

惯性导航系统是一种不依赖于外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统。捷联式惯性导航系统则是将惯性器件直接固连在运载载体上，惯性器件可以感应运载体的加速度和姿态等信息，且不受任何外部因素的影响，实现自主式导航<sup>[1-2]</sup>。对比传统的平台式惯导系统，捷联式惯性导航系统具有高度数字化的特点，通过计算机实现其导航平台的功能，数字平台替代物理平台，不仅降低了系统的体积，还减少了成本支出。DSP（Digital Signal Processor）开发板即数字信号处理器，拥有能够实现数字信号处理技术的芯片，具有处理功耗低、精度高和实时性强



【作者简介】张阳（1998—），男，安徽淮南人，本科，助理工程师，研究方向：通信技术。

【通讯作者】李文斌（1975—），男，福建惠安人，高级工程师，硕士研究生，研究方向：通信技术。

等特点，广泛应用于各种嵌入式系统中<sup>[3]</sup>。利用捷联惯性测量组件（加速度计和陀螺仪）输出的数据信息，基于 DSP F28335 开发板和 CCS 开发环境，实现对运载体的位置、速度和姿态等导航信息的实时解算。为了完成捷联惯导解算，应先实现捷联惯性测量组件与 DSP F28335 开发板的串行通信，然后完成对嵌入式捷联惯导解算程序设计与实现。本文设计分析了捷联惯导嵌入式系统和串口通信，实现了导航数据实时解算输出，并通过了静态实验验证，实现了惯性测量组件与 DSP 的串行通信、嵌入式惯导解算程序设计与实现。通过对比惯导本身结算的数据，本文设计的嵌入式惯性导航结算系统运行稳定、解算可靠。

## 1 DSP F28335 和 CCS 简介

DSP F28335 是美国德州仪器公司推出的一种微处理器，具有 150MHz 的高速处理能力，具备 32 位浮点处理单元，在数字信号处理领域表现优异，广泛应用于工业控制、汽车电子、太阳能逆变器、数码电源控制和其他高性能实时信号处理中<sup>[4]</sup>。

CCS (Code Composer Studio, CCS 集成代码开发环境) 是专门用于 DSP 芯片的集成软件开发平台，采用了类似 Windows 的界面，集成了编辑、编译、连接、软件仿真以及硬件调试等功能。不仅提供了配置、建立、调试、跟踪和分析程序的工具，还便于实现嵌入式信号处理程序的编制和测试，加速程序开发进程，提高设计工作效率。

## 2 嵌入式系统

嵌入式系统以应用为中心，以计算机技术为基础，具有软硬件可裁剪的特点，适用于对功能、可靠性、成本、体积、功耗等有严格要求的专用计算机系统。系统由硬件和软件组成，独立运作，并根据具体的应用任务，以功耗、成本、体积、可靠性、处理能力等为指标进行选择。

嵌入式系统开发流程以及姿态参考的系统架构与桌面系统对比，嵌入式系统在系统的内存占用、功率消耗、体积和成本等方面有诸多限制，同时在可靠性、实时性等方面有着更高的要求。嵌入式系统的核心是应用软件和系统软件，由于存储空间有限，软件代码编写时需要考虑内容的紧凑性、可靠性，且对实时性有严格要求。随着嵌入式系统的广

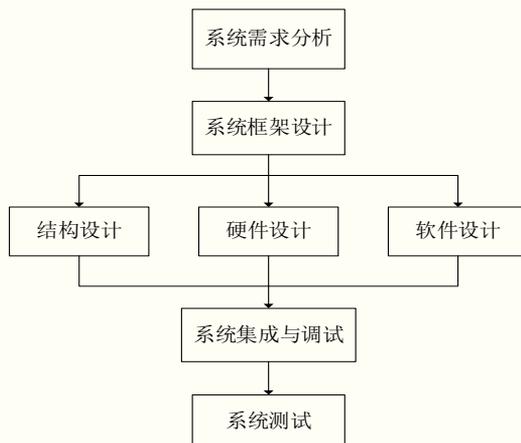


图 1 嵌入式开发流程

泛应用，系统功能越来越复杂，系统开发重心也越来越集中于软件开发。

典型的嵌入式系统在软件部分的功能实现与开发费用在整个系统中占据较大比重。嵌入式开发流程如图 1 所示，一般分为 5 个阶段，一是系统需求分析，二是系统构架设计，三是结构设计、硬件设计和软件设计，四是系统集成与调试，五是系统测试。

## 3 串口通信

串口通信是指串口按位发送和接收字节的通信方式。串行通信接口 (SCI) 模块分为 SCI-A、SCI-B、SCI-C 3 个串行通信接口模块，可任意使用其中一个或两个。SCI 是两线的异步串行端口，分为 RXD 与 TXD。当两个 CPU 通信时，CPU1 发送端口与 CPU2 的接收端口相连，CPU1 的接收端口与 CPU2 的发送端口相连，传送时逐位传送。

### 3.1 DSP F28335 串口工作模式

#### 3.1.1 空闲线工作机制

首先，发送起始位，单独的区间 (Address) 发送地址，有一个延迟周期可大于 10bit。其次，传送数据，有一个 10bit 的空闲周期，当最后一个数据发送完成后，标志当前数据块发送的整个过程完毕，第二个数据块发送前需要延时 10bit，再进行发送。

#### 3.1.2 地址位机制

每帧中都有区别数据与地址的信号，为“1”时表示地址，为“0”时表示数据，每个数据之间的延时非常小，或者不需要延时。与空闲线模式对比，空闲线模式有自己静态的地址位空间，可发送大量数据，发送数据大于 10

帧时具有明显的优势，而小于 10 帧时，则效率不高。地址位模式没有独立的地址位空间，用“0”与“1”区别地址和数据，当数据小于 10 帧时数据传送效率比较高。

串行通信包括 1 个起始位，1 ~ 8 个编程的数据位，1 个可选择的奇偶检验位，还有 1 个或 2 个停止位。每一个 bit 的数据发送周期为 8 个 SCICLK，采样周期一般为 3 次，保证每次有结果。当接收到起始位为连续的 4 个低电平后，系统认为收到启动信号。

### 3.1.3 SCI 模块

SCI 模块支持 CPU 与其它异步外设之间的使用标准非归零码 (NRZ) 格式的数字通信。SCI 接收器和发射器具有双缓冲功能，并且它们都有独立的使能和中

断位，两个器件可独立或者同时运行在全双工模式。为了确保数据完整性，SCI 在中断检测、奇偶校验、超载和组帧错误方面，对接收到的数据进行检查。通过 16 位波特率选择寄存器，可将比特率设定为超过 65000 个不同的速度。

### 3.2 串口通信设计

通过宏定义，初始化对应的 GPIO。完成 SCI 工作方式及参数设置，包括数据格式、波特率、使能发送、接收功能等。SCI 发送字节函数，使用 SCI 进行数据收发。SCI 发送数据前，先查询发送完成标志，如果发送完成则可以继续发送下面的数据，否则一直等待<sup>[5]</sup>。SCI 接收字节函数时，有发送就会有接收数据。SCI 在接收数据之前，应先判断接收完成标志，然后再开始接收下面的数据。

本文使用 DSP F28335 模块，其接收与发送都具有一个 16 等级深度的 FIFO (First In First Out, 先进先出)，旨在实现实时捷联惯导信息采集解算，并支持多个数据接收，即使用 FIFO 功能。串口通信主要分为 4 个步骤。

- (1) GPIO 初始化。
- (2) 初始化串口 IO 口。
- (3) 初始化串口寄存器，设置波特率。
- (4) 初始化 FIFO。

串口通信在串口助手工具下，实现了数据收发功能，串口助手对数据的收发如图 2 所示。

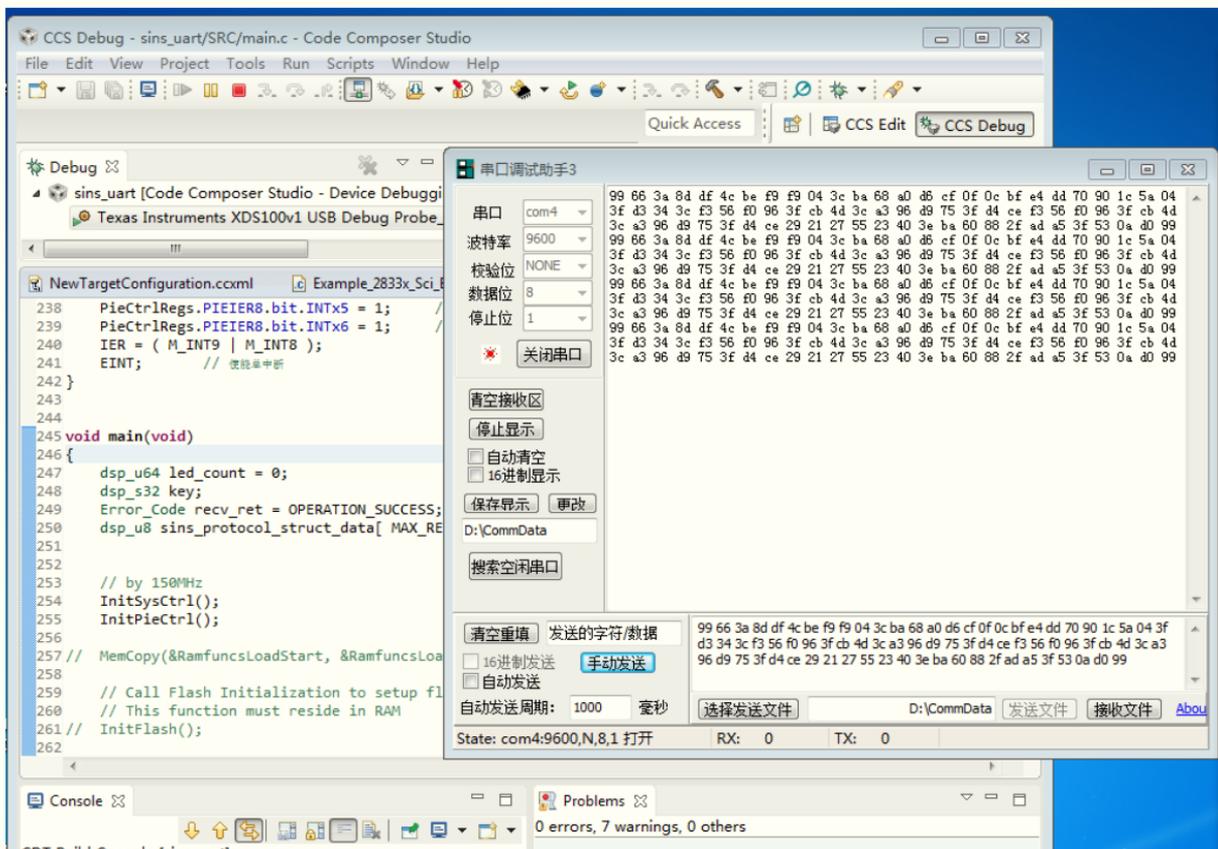


图 2 串口助手对数据的收发

#### 4 静态实验验证

为了研究捷联惯导在不同工作状态下的实时解算，进行静态实验，以验证在静态条件下的解算性能，验证能否实现捷联惯导原始数据的实时采集、解算和输出。本文实验数据采集和解算的频率为 100Hz，导航信息输出的频率为 10Hz，目的在于通过不同工作状态下的实验对本文设计的嵌入式惯导系统进行对比分析。

设计静态实验，应根据实验设计连接实验器件（见图 3）。使用的捷联惯性导航系统为北京自动化控制设备研究所研制的 FOSC 型捷联惯

导系统，选用北京自动化控制设备研究所研制的 FOSC 型光纤陀螺 IMU 组件，在实验室环境下采集光纤陀螺惯导原始数据，INS 陀螺仪零偏约为  $0.02^{\circ}/h$ ，输出频率为 200Hz。实验惯导位于北纬  $30.58^{\circ}$ ，东经  $114.24^{\circ}$ ，初始横滚角、俯仰角、航向角分别为  $-4.783^{\circ}$ ， $-13.54^{\circ}$ ， $51.825^{\circ}$ ，初始北向速度和东向速度均为  $0m/s$ ，实验时长约 3.5h，每五分钟记录一个数据。

将捷联惯导通电，惯导本身解算的导航信息实时显示在笔记本界面上，将惯导的初始对准值输入程序中，经过调试、编译，通过仿真器在 DSP F28335 开发板中运行，惯导的原始数据经开发板解算后，将导航信息显示在

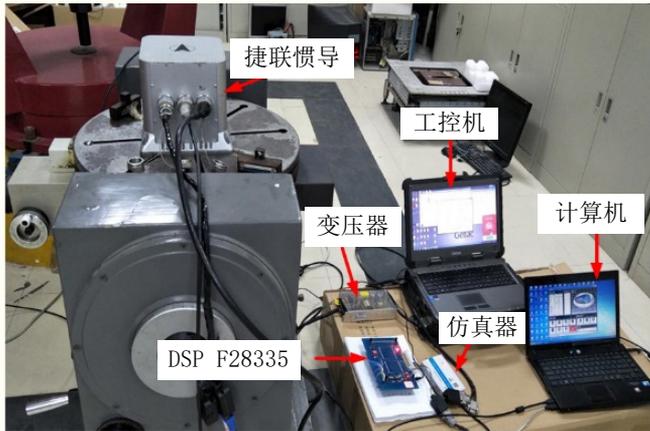


图 3 实验器材连接

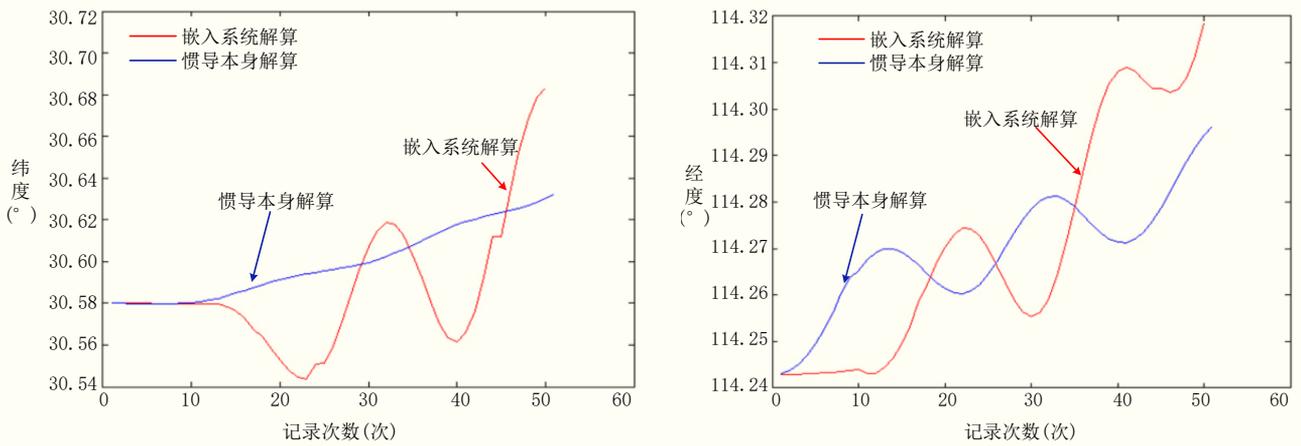


图 4 位置解算曲线

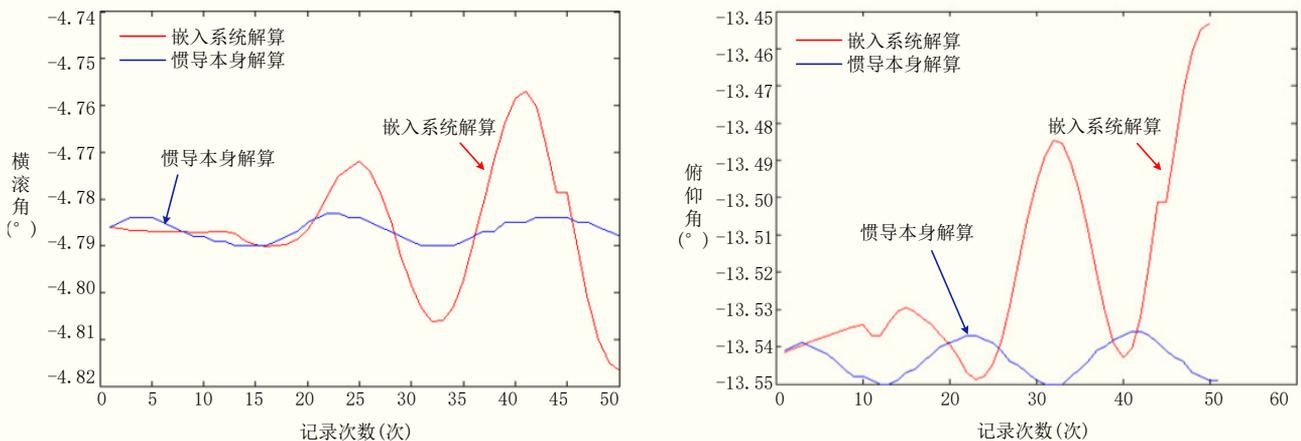


图 5 姿态角解算

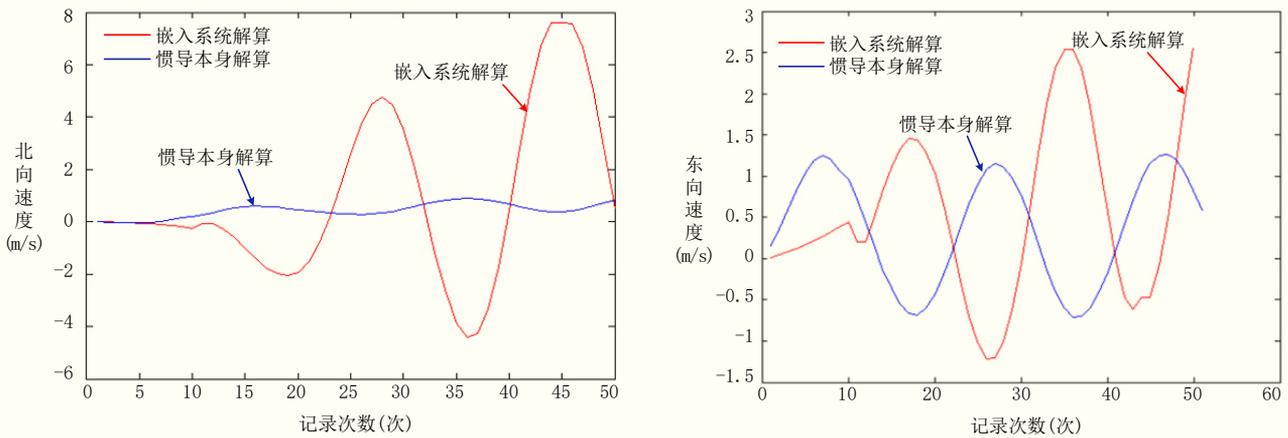


图6 速度解算曲线

表1 经过3.5h 嵌入式捷联惯导系统解算与惯导本身解算误差峰值

参数	位置参数		速度参数			姿态参数		
	纬度误差 (°)	经度误差 (°)	东速误差 (m/s)	北速误差 (m/s)	横滚角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	航向角误差 (°)	
最大差值	0.05	0.08	7.5	1.5	0.025	0.052	0.3	

工控机的界面上。假如在初始对准过程中，初始值发散比较明显，必须重启惯导进行重新初始对准（初始对准时间为300s），选取初始对准状态比较好的一组进行实验。

同时，保存惯导本身解算的信息与基于DSP F28335开发板研究设计的嵌入式导航解算系统的解算数据，画出曲线进行对比分析（红色曲线为本文设计的嵌入式捷联惯导系统解算数据，蓝色曲线为惯导本身解算的数据）（见图4、5、6）。

在3.5h的实验时长内，工业产品解算出的纬度、经度、横滚角、俯仰角、航向角最大误差分别为0.05°，0.08°，0.023°，0.055°，0.4°，本文构建的嵌入式解算系统得到的纬度、经度、横滚角、俯仰角、航向角误差峰值分别为0.1°，0.03°，0.025°，0.052°，0.3°，考虑到实测数据实验中使用的惯性测量组件陀螺零偏稳定性指标为0.02°/h，经度误差在理论误差允许的范围之内。工业产品解算出的北向速

度、东向速度最大误差分别为7m/s和2.5m/s，系统北向速度、东向速度误差峰值分别为7.5m/s和1.5m/s，误差较工业产品的解算结果相对较大。从误差特性上看，系统的北向速度、东向速度解算结果有明显的周期性，振荡周期符合惯性导航系统舒勒周期的基本特性。因此，可以得出结论，解算结果基本正确，能够反映惯性导航系统的误差特性<sup>[6]</sup>。

### 结语

根据多次实验的分析结果，嵌入式惯性导航解算系统运行稳定可靠，解算结果正确。静态实验验证了基于DSP F28335开发板研究设计的嵌入式导航解算系统的可用性，实时解算的位置、姿态、速度信息均与惯导本身解算得出的结果近似。从对误差数据处理的结果可以看出，各项误差值均在可接受的范围之内，表明捷联惯导的嵌入式设计与实现具有实用价值。同时，实验过程中存在不足，导致数据分析过程中未进行误差补偿，数据输出频率不高（仅为100Hz），解算过程采用积分的形式过于粗糙，在以后的实验中应考虑多方面因素，以期得到更理想的结果。

### 引用

- [1] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 陈永冰,钟斌.惯性导航原理[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 苏奎峰,吕强.TMS320X28 XXX原理与开发[M].北京:电子工业出版社,2009.3.
- [4] 刘陵顺,高艳丽.TMS320F28335 DSP原理与开发编程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [5] 余晖冬,陈鑫,王书磊.基于DSP28335的捷联惯导通信模块设计[J].电脑与电信,2021(4):62-65.
- [6] 李久顺.捷联惯导系统误差抑制及补偿方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.