

一种基于 GD32H7 的惯性测量单元设计

赵子龙, 贾 铎

(中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214035)

摘要: 该研究旨在利用 GD32H7 单片机设计一款全国产化惯性测量单元, 并提高互补滤波算法的解算频率。所采用的全国产化器件包括 GD32H7 单片机、国产加速度计、陀螺仪以及国产 FRAM。设计方法涵盖总体架构设计、硬件电路设计以及互补滤波算法优化。通过 GD32H7 的高主频和双精度 FPU, 显著提升了互补滤波算法的解算频率。实验结果表明, 基于 GD32H7 的全国产化惯性测量单元在性能、可靠性及成本控制方面具有显著优势, 有效推动了国内相关产业的发展, 为惯性测量单元的全国产化提供了可行的技术路径。

关键词: 全国产化; 惯性测量单元; GD32H7; 互补滤波算法

中图分类号: TP274

文章编号: 1000-0682(2026)04-0027-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.005

Design of an inertial measurement unit based on GD32H7

ZHAO Zilong, JIA Duo

(China Electronics Technology Group Corporation No. 58 Research Institute, Jiangsu Wuxi 214035, China)

Abstract: This research aims to design a fully localized inertial measurement unit using the GD32H7 microcontroller and improve the calculation frequency of the complementary filtering algorithm. The fully localized components include the GD32H7 microcontroller, domestic accelerometers, gyroscopes, and domestic FRAM. The design methods cover overall architecture design, hardware circuit design, and optimization of the complementary filtering algorithm. By leveraging the high main frequency of the GD32H7, and double-precision FPU, the calculation frequency of the complementary filtering algorithm is significantly improved. The design results show that the fully localized inertial measurement unit based on the GD32H7 has significant advantages in terms of performance, reliability, and cost control, effectively promoting the development of relevant domestic industries and providing a feasible technical path for the full localization of inertial measurement units.

Keywords: full domestication; inertial measurement unit; GD32H7; complementary filtering algorithm

0 引言

惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)作为现代导航与控制系统中的核心组件广泛应用于航空航天、船舶稳定控制、车辆导航以及小型武器制导等领域^[1-2]。传统惯性测量单元在设计与应用中存在若干问题, 主要体现在器件依赖进口与算法解算频率受限 2 个方面^[3-4]。首先, 现有惯性测量单

元的核心如陀螺仪和加速度计多依赖进口, 这些器件虽然性能优越, 但受制于国际供应链的不确定性, 难以满足某些高可靠性应用场景的需求。其次, 在算法层面, 互补滤波等姿态解算算法的解算频率往往受到硬件平台计算能力的限制, 导致系统无法在高频动态环境下提供高精度的姿态信息。针对上述问题, 该研究提出一种基于 GD32H7 单片机的全国产化惯性测量单元, 利用 GD32H7 单片机的高主频、双精度 FPU 与高速 SPI 通信接口, 显著提升互补滤波算法的解算频率。

目前关于惯性测量单元的研究主要集中在多传感器融合和算法优化方面。赵雨婷等^[5]提出了一

收稿日期: 2026-03-04

第一作者: 赵子龙(1988—), 男, 陕西渭南人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为嵌入式软件开发。E-mail: 609421785@qq.com

种基于 DSP,融合三轴磁通门和加速度计的高精度实时姿态测量系统。胡楷等^[6]以国产 DSP 为核心,设计了图像传感器和陀螺传感器融合的人体头部姿态解算系统。宗意凯等^[7]基于 DSP 以及 BMI088 和 ICM20689 这 2 种六轴传感器,有效提高了互补滤波算法的解算精度。黄亚辉等^[8]对卡尔曼滤波算法与互补滤波算法进行了详细的对比分析。李瑞等^[9]提出一种基于决策树自适应的互补滤波姿态解算方法,解决了在磁场干扰和大加速度干扰环境下的姿态解算精度下降的问题。李文良等^[10]以 TC264 单片机为主控模块,进行了互补滤波器与四元数滤波器的对比研究。上述研究全部或部分基于进口器件,该研究通过设计基于 GD32H7 的国产化惯性测量单元,探索如何利用国产器件的高性能特性提高互补滤波算法的解算频率,为惯性测量单元的国产化发展提供新的解决方案。

1 系统设计与实现

该文设计的惯性测量单元由两部分板卡组成:核心板和接口板。核心板主要完成传感器信号采集和处理工作,接口板主要完成外部输入电源的隔离滤波、以及相应的接口信号的隔离和转换工作。系统硬件电路原理框图如图 1 所示。

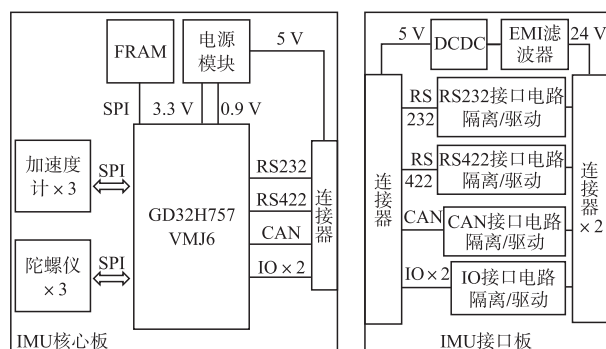


图 1 硬件电路原理框图

1.1 核心板电路

核心板由主控芯片、加速度计、陀螺仪传感器,以及国产铁电存储器 (Ferroelectric Random Access Memory, FRAM) 和电源模块组成。

主控芯片选用北京兆易创新科技的高性能 ARM 芯片,型号为 GD32H757VMJ6,封装形式为 GBA100。其内部包含高性能低功耗内核 Cortex-M7,主频高达 600 MHz,支持 6 级超标量流水线架构和高带宽的 AXI 和 AHB 总线接口,可实现更高的处理性能。内置高级 DSP 硬件加速器和双精度浮点单元 (FPU)。该芯片配备了片上 FLASH 和

SRAM,可确保关键指令与数据的零等待执行,还配备了 Cache 高速缓存,有效提升 CPU 处理效率和实时性,外部总线扩展 (EXMC) 支持访问多种片外存储器。GD32H7 系列含有大量通用外设资源,包含 UART、I²C、SPI、SDIO、USB2.0、CAN、以及以太网,可满足高速互联应用所需。

加速度计选用国产某型号加速度传感器,该器件为单轴加速度计,量程为 ± 20 g,输出精度 24 bit,采样频率 1.5 kHz,零偏稳定性 ≤ 50 μ g,带宽为 100 Hz(可调),电源电压为 5 V,通信接口为 SPI。陀螺仪选用国产某型号角速度传感器,该器件为单轴角速度传感器,量程为 400 deg/s,输出精度 24bit,数据输出率为 12 kHz,零偏稳定性 < 0.05 deg/hr,带宽为 200 Hz,电源电压 5 V,通信接口为 SPI。

为了保存加速度计、陀螺仪的刻度因子等关键参数,需要选用一款可靠的外部存储芯片。系统选用国产某型号铁电存储器,该器件容量为 2 Mbit,接口类型为 SPI 接口。研究表明,相对于使用 EEPROM 芯片,使用铁电存储器可以将惯性测量单元的启动时间提高 50% 以上。而且其读/写耐久性也大大超过 EEPROM。

核心板电源部分选用国产某型号电源转换芯片,该器件是一款双路输出的降压式 DCDC 模块电源,能够输出两路高达 2.5 A 的输出电流,支持 0.6 ~ 5.5 V 的可调节输出电压范围,采用 BGA25 的小型化封装,内置了功率管、电感以及保护功能组件,外部仅需配置少量阻容元件,同时含有故障保护功能。能够实现核心板 5 V、3.3 V 和 0.9 V 的电源转换要求,用于给传感器和 ARM 提供稳定电源。

1.2 接口板电路

接口板由电源模块、数字隔离器、隔离式 CAN、RS422 和 RS232 收发器五部分组成。

电源模块采用国产某型号 DCDC 电源模块,该模块最大输出功率为 5 W,支持 16 ~ 24 V 宽电压输入范围,输出波纹 30 mV,输出效率 82%,具有输入欠压保护、输出过流、短路保护功能。该器件为全隔离器件,可实现 24 V 输入与 5 V 输出的电气隔离。同时在电源模块前级配有共模电感器和滤波器,有效减少电源噪声,提升滤波效果,降低辐射干扰,提高电磁兼容性能。

数字隔离器选用国产某型号高性能双通道数字隔离器,完成 IO 信号的隔离传输,其内部集成了 DCDC 转换器,可替代传统分立器件组成隔离电源的方案,具有 3 ~ 5.5 V 宽输入电压范围,150 Mbps

信号传输速率,同时内置软启电路、具有过载和短路保护功能。并在外部连接器侧配有静电防护二极管,防止静电损伤器件。

为了保证通信的可靠和兼容性,该模块设计了 CAN 和 RS422 两路通信接口,其中 CAN 通信选用国产某型号隔离式 CAN 收发器,内部集成隔离 DC-DC 转换器,将双通道隔离器、收发器和电源集成于单个芯片, SOP-20 表贴封装, 5 V 单电源供电,提供完全隔离的 CAN 解决方案,最高工作速率为 1 Mbps,具有限流和热关断特性,可防止输出短路。同时在总线侧配有 ESD 二极管,防止接口静电损坏器件。RS422 通信选用国产某型号 RS422 收发器,该器件是完全集成式 2.5 kVrm 信号和电源隔离数据收发器,适合多点传输线路上的高速通信应用,其内部集成了隔离 DCDC 电源,省去了外部 DCDC 隔离模块,将隔离器、差分驱动和差分输入集成于单片,实现完成集成的信号、电源双隔离的 RS422 解决方案。其内部驱动和接收器具有使能和限流性,可防止输出短路和总线竞争导致功耗过大的情况,采用 CSOP16 高集成度封装,在总线侧配有静电保护二极管,防止外部静电损坏器件。

系统还预留由 RS232 接口,用于软件调试。RS232 接口选用国产某型号单通道隔离 RS232 收发器,采用单电源供电,内部集成了数字隔离器和 DC-DC 转换器,实现了电源和信号的完全隔离,该器件供电范围为 3~5.5 V,具有 3000 V 隔离耐压,最高传输速率为 460 kbps,封装形式为 SOP-20,总线引脚具有 ESD 防护能力,适合应用于环境复杂的 RS232 总线中。

2 姿态解算算法设计

该文使用陀螺仪和加速度计两种传感器来检测被测物的姿态,这种采用多用传感器数据来检测姿态的处理算法被称为姿态融合^[11]。而在姿态融合解算时,最常用四元数来表示姿态,四元数可表示为一个四维单位向量:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

陀螺仪能够提供高动态响应的角速度数据,但由于其存在零偏误差和随机噪声,长时间积分会导致姿态漂移;而加速度计在静态情况下能够准确测

量重力方向,但其动态性能较差,在高频振动环境下易受干扰^[9]。该文引入互补滤波算法进行误差校正。互补滤波算法是一种广泛应用于惯性测量单元姿态解算的经典算法,其核心思想是通过融合加速度计和陀螺仪的数据来获取高精度的姿态信息。通过结合两者的优势,利用加速度计的数据对陀螺仪的累积误差进行校正,从而实现载体姿态的精确估计。

使用互补滤波算法进行姿态解算的具体步骤如下:设陀螺仪获取的 X 、 Y 、 Z 三个方向的角速度值分别为 g_x 、 g_y 、 g_z ,加速度计获取的 X 、 Y 、 Z 三个方向的加速度值分别为 a_x 、 a_y 、 a_z 。

(1) 为四元数赋初始值

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

读取陀螺仪和加速度计的原始数据,并将陀螺仪的原始值转化为弧度。

(2) 对加速度值进行归一化

$$recipNorm = \frac{1}{\sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}} \quad (2)$$

$$a_{norm} = recipNorm \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x_norm} \\ a_{y_norm} \\ a_{z_norm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 在导航坐标系中,重力加速度 G 可表示为:

$$G = [0, 0, 1] \quad (4)$$

则加速度预测值 a_s 的计算公式为:

$$a_s = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C_E^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:

$$C_E^b = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

(4) 由于加速度计测的是在机体坐标系下的重力向量,因此将 a_{norm} 和 a_s 两个向量作叉积,即可得到它们之间的误差:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x_norm} \\ a_{y_norm} \\ a_{z_norm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{y_norm}v_z - a_{z_norm}v_y \\ a_{z_norm}v_x - a_{x_norm}v_z \\ a_{x_norm}v_y - a_{y_norm}v_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

(5)在互补滤波算法中,PI 控制器的参数调节对于姿态估计的准确性至关重要,PI 参数包括比例系数 K_p 和积分系数 K_i , K_p 用于快速纠正姿态误差, K_i 用于长期补偿陀螺仪零漂。

计算积分误差 e_{x_int} 、 e_{y_int} 、 e_{z_int} :

$$\begin{cases} e_{x_int} = e_{x_int} + K_i e_x \\ e_{y_int} = e_{y_int} + K_i e_y \\ e_{z_int} = e_{z_int} + K_i e_z \end{cases} \quad (8)$$

式中: e_{x_int} 、 e_{y_int} 、 e_{z_int} 的初始值均为 0。

(6)修正陀螺仪角速度:

$$\begin{cases} g_x = K_p e_x + e_{x_int} \\ g_y = K_p e_y + e_{y_int} \\ g_z = K_p e_z + e_{z_int} \end{cases} \quad (9)$$

(7)使用一阶龙格库塔法求解四元数微分方程,这里略去推导过程,直接给出最终的计算公式:

$$\begin{cases} q'_0 = q_0 + (-q_1 g_x - q_2 g_y - q_3 g_z) \times 0.5 \Delta_t \\ q'_1 = q_1 + (q_0 g_x + q_2 g_z - q_3 g_y) \times 0.5 \Delta_t \\ q'_2 = q_2 + (q_0 g_y - q_1 g_z + q_3 g_x) \times 0.5 \Delta_t \\ q'_3 = q_3 + (q_0 g_z + q_1 g_y - q_2 g_x) \times 0.5 \Delta_t \end{cases} \quad (10)$$

式中: q'_x 表示更新后的四元数; Δ_t 表示传感器的采样周期。

同时,为了避免积分漂移导致四元数模偏离 1,进行四元数归一化:

$$recipNorm = \frac{1}{\sqrt{(q_0)^2 + (q_1)^2 + (q_2)^2 + (q_3)^2}} \quad (11)$$

$$q_{norm} = recipNorm \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{0_norm} \\ q_{1_norm} \\ q_{2_norm} \\ q_{3_norm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

(8)最后,根据公式将四元数反解出欧拉角,欧拉角包含绕 X 轴的俯仰角 P_{itch} 、绕 Y 轴的横滚角 R_{oll} 和绕 Z 轴的偏航角 Y_{aw} ,转换公式为:

$$\begin{cases} R_{oll} = \arctan \left[\frac{2(q_{2_norm} q_{3_norm} - q_{0_norm} q_{1_norm})}{q_{0_norm}^2 - q_{1_norm}^2 - q_{2_norm}^2 + q_{3_norm}^2} \right] \\ P_{itch} = -\arcsin \left[-2(q_{0_norm} q_{2_norm} + q_{1_norm} q_{3_norm}) \right] \\ Y_{aw} = \arctan \left[\frac{2(q_{1_norm} q_{2_norm} - q_{0_norm} q_{3_norm})}{q_{0_norm}^2 + q_{1_norm}^2 - q_{2_norm}^2 - q_{3_norm}^2} \right] \end{cases} \quad (13)$$

3 实验结果及分析

3.1 功能测试

为了验证硬件和软件是否工作正常,将单片机

采集到的俯仰角、横滚角和方位角数据通过 422 串口发送至上位机,以波形的形式显示。图 2 ~ 图 4 分别为 30 s 内解算后的俯仰角、横滚角和方位角数据。

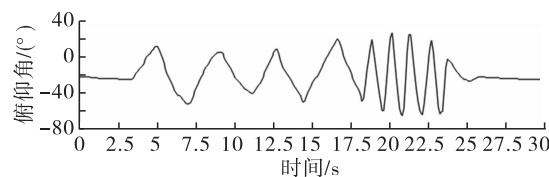


图 2 解算后俯仰角

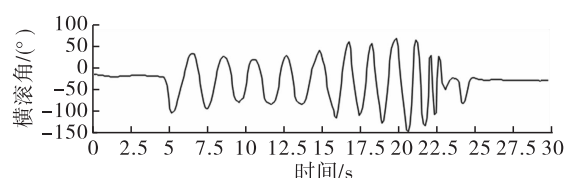


图 3 解算后横滚角

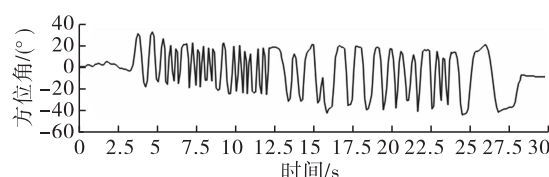


图 4 解算后方位角

3.2 性能测试

为了验证硬件对算法解算频率的提升效果,设计了如下试验方案:在数据解算流程中加入 GPIO 控制部分,程序初始化时,将 GPIO 置为低电平,进入姿态解算算法函数前,将 IO 拉高,算法函数执行完毕后将 IO 拉低。通过示波器观察该 IO 输出的波形,其高电平持续的时间即为解算算法执行所消耗的时间。

为了进行对比测试,该文以 Cortex M4 内核,主频为 100 MHz 的 STM32F411 作为参照对象,分别测量开启和关闭 FPU 两种情况下算法的解算时间。在开启 FPU 的情况下,图 5 和图 6 分别示出了 STM32F411 和 GD32H757 的测试结果,详细的测试数据见表 1。

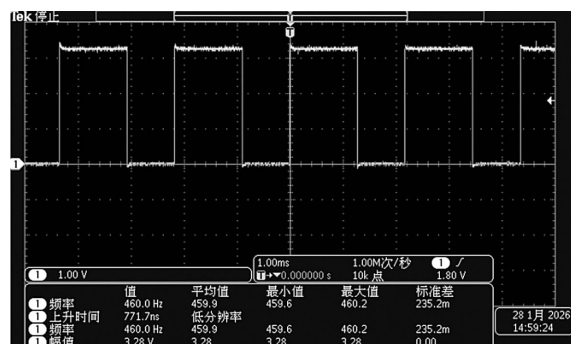


图 5 STM32F411 测试结果

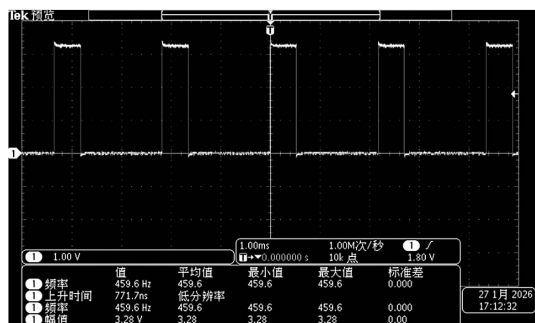


图 6 GD32H757 测试结果

表 1 算法解算频率对比

	STM32F411	GD32H757
启用 FPU/ μ s	1280	530
不启用 FPU/ μ s	1344	640

从表 1 可以看出,开启 FPU 后,GD32H757 的姿态解算时间比自身减少了约 17%,比 STM32F411 减少了约 59%。该结果表明,GD32H7 的高主频和双精度 FPU 有效提升了互补滤波算法的计算速度。新的硬件设计使解算频率提高至 1 kHz 以上。

4 结论

该文基于 GD32H757 单片机设计了一种全国产化的惯性测量单元,并搭建平台完成了算法执行效率的验证实验。实验结果表明,GD32H757 单片机硬件性能的提升能够显著提高系统的数据处理能力和算法执行效率。另外,该文还解决了传统设计中

对进口器件的依赖问题,为国内相关领域的技术发

展提供了新的解决方案。

参考文献:

- [1] 张燕,王博.微惯性测量单元研究[J].电工技术,2023(6):13-15.
- [2] 李孟委,徐文武,张鹏.基于四元数互补滤波算法的车载 MIMU[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):111-117.
- [3] 张禹,钱宏文.一种全国产化捷联惯性导航信号处理平台设计[J].电子技术应用,2021,47(5):102-107.
- [4] 陈世强,刘明.基于 STM32F767IGT6 的 AGV 姿态解算系统设计[J].电子设计工程,2023,31(5):70-79.
- [5] 赵雨婷,邢计元,张东钥,等.基于 DSP 的实时姿态感知系统设计[J].电子技术应用,2025,51(11):76-82.
- [6] 胡楷,李雷.基于国产 DSP 多传感器融合姿态解算系统[J].现代电子技术,2024,47(21):177-182.
- [7] 宗意凯,苏淑靖,高瑜宏.基于多源 IMU 和粒子滤波优化的姿态融合算法[J].仪表技术与传感器,2023(8):88-95.
- [8] 黄亚辉,王巍,阳领.卡尔曼滤波与互补滤波在移动机器人导航中的对比研究[J].电子制作,2025(1):109-112.
- [9] 李瑞,王伟,唐龙鑫,等.基于决策树的自适应互补滤波姿态解算[J].科学技术与工程,2024,24(4):1538-1545.
- [10] 李文良,颜斌,冯彬.基于单片机的互补滤波与四元数滤波的研究[J].电子制作,2024(6):37-39.
- [11] 彭井花.基于 STM32 和 MPU9250 的高精度姿态检测系统设计[J].宁夏大学学报,2025,46(4):428-436.

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 马晓菲,姜继芳,杜明亮.喀什地区苦咸水利用潜力及成因研究[J].地下水,2025,47(2):76-79+115.
- [2] 刘绍山,张鹤,朱伯媛.库尔勒地区苦咸水自然冷冻淡化技术研究[J].当代化工研究,2023,23(7):164-166.
- [3] 陈泉.风光耦合电解水制氢技术在光伏发电中的应用分析[J].光源与照明,2025,48(5):157-159.
- [4] 李娜,许楚斯,曾湘安.沙尘天气对屋顶光伏组件性能影响分析[J].环境技术,2024,42(6):200-204+212.
- [5] 黄平.基于 PLC 控制的智能农业灌溉系统设计与优化[J].中国农机装备,2025,25(10):123-125.

- [6] 沈昱雯,王昊洋.偏远地区光伏-储能一体化系统供电关键技术及其应用[J].光源与照明,2025,48(9):190-192.
- [7] 朱烈兵.设计自动化 PLC 标准程序在水处理中的应用[J].流体测量与控制,2021,2(2):49-52.
- [8] 胡津诚.光伏牛棚提水系统的设计过程浅析[J].高原工业,2026,10(1):103-109.
- [9] 张融,张铭杰,陈旭.基于卡尔曼滤波与电磁屏蔽的真空微推力测量信号降噪方法研究[J].集成电路与嵌入式系统,2026,25(2):1-6.
- [10] 赵晴晴.汽车动力电池 SOC 估算的卡尔曼滤波数学算法[J].汽车电器,2026,67(2):23-25.