

适用于CH0x0/HI02/04/05/06/14/50/90/70系列共享编程接口

本手册基于固件版本: 1.7.1

具体功能以实际产品型号、固件版本及交付配置为准



文件: imu\_cum\_cn

技术支持: support@hipnuc.com

属性: 公开

网站: www.hipnuc.com

# **HiPNUC**

© 2016-2025 北京超核电子科技有限公司版权所有。文档包含的信息可能在未经通知的情况下发生变更。

## 指令与编程手册

- 1 手册版本说明(重要)
- 2 模块配置简述
  - 2.1 工作模式配置 - AHRS/9轴模式
  - 2.2 同步输入 - SYNC\_IN/PPS
    - 2.2.1 SYNC\_IN同步数据触发
    - 2.2.2 PPS标准秒脉冲接入
      - 2.2.2.1 1. 时序与信号要求
      - 2.2.2.2 2. 硬件与接口配置要求
      - 2.2.2.3 3. 时间消息示例 (以GPRMC为例)
  - 2.3 同步输出 - SOUT
  - 2.4 船舶海浪补偿位移输出 - Heave, Surge, Sway
    - 2.4.1 使用限制
- 3 产品特性支持表
- 4 模块配置命令 (ASCII)
  - 4.1 配置命令总览
  - 4.2 指令详解
    - 4.2.1 REBOOT
    - 4.2.2 SAVECONFIG
    - 4.2.3 SERIALCONFIG
    - 4.2.4 CONFIG
      - 4.2.4.1 工作模式配置
      - 4.2.4.2 姿态用户校准
      - 4.2.4.3 安装角度设置
      - 4.2.4.4 多功能IO复用功能配置
      - 4.2.4.5 SOUT(PMUX2)同步输出分频设置
      - 4.2.4.6 地磁校准
      - 4.2.4.7 坐标系定义设置
      - 4.2.4.8 用户级陀螺校准
    - 4.2.5 LOG
      - 4.2.5.1 开/关闭数据输出
      - 4.2.5.2 模块版本信息
      - 4.2.5.3 显示串口配置信息
      - 4.2.5.4 设置数据帧输出类型及频率
      - 4.2.5.5 HI83 可变数据帧配置
    - 4.2.6 FRESET
- 5 RS-232/TTL/USB 数据协议 (二进制)
  - 5.1 数据帧格式
  - 5.2 出厂默认输出
  - 5.3 数据域内容
    - 5.3.1 浮点型IMU数据帧 (HI91)
    - 5.3.2 可变类型协议 (HI83)
    - 5.3.3 data\_bitmap位及数据段说明
    - 5.3.4 MAIN\_STATUS状态字说明

- 5.4 CRC校验
- 5.5 数据帧结构示例 (以HI91为例)
- 5.6 C语言解析代码示例 (以HI91为例)
  - 5.6.1 校验CRC
  - 5.6.2 定义数据接收结构
  - 5.6.3 接收数据
  - 5.6.4 打印接收到的数据
- 5.7 最大传输速率
- 6 RS-485输出协议 (Modbus)
  - 6.1 Modbus指令说明
  - 6.2 数据帧格式
    - 6.2.1 读寄存器 (0x03)
    - 6.2.2 写寄存器 (0x06)
  - 6.3 寄存器列表
  - 6.4 常用配置
    - 6.4.1 保存配置到 Flash
    - 6.4.2 恢复出厂设置
    - 6.4.3 复位
    - 6.4.4 配置波特率 (0x04)
    - 6.4.5 配置节点 ID (0x05)
    - 6.4.6 设置安装方式 (0xA6)
    - 6.4.7 设置水平校准 (0xA5)
    - 6.4.8 设置6轴或9轴模式 (0x06)
  - 6.5 读取模块版本信息 (0x70-0x82)
  - 6.6 读取传感器数据 (0x34-0x4B)
- 7 CAN数据协议 (J1939)
  - 7.0.1 CAN扩展帧格式
  - 7.0.2 数据字节序 (Endianness)
  - 7.0.3 CANFD 支持
  - 7.1 协议参数配置
  - 7.2 PGN消息列表
    - 7.2.1 PGN 65327 (0xFF2F) - 时间信息
    - 7.2.2 PGN 65332 (0xFF34) - 三轴加速度
    - 7.2.3 PGN 65335 (0xFF37) - 三轴角速度
    - 7.2.4 PGN 65341 (0xFF3D) - 俯仰横滚角
    - 7.2.5 PGN 65345 (0xFF41) - 航向角
    - 7.2.6 PGN 65338 (0xFF3A) - 三轴磁场强度
    - 7.2.7 PGN 65350 (0xFF46) - 四元数
    - 7.2.8 PGN 65354 (0xFF4A) - 倾角仪输出
    - 7.2.9 PGN 65370 (0xFF5A) - CANFD数据帧0 - IMU数据
  - 7.3 配置协议
    - 7.3.1 协议格式
    - 7.3.2 寄存器地址映射
  - 7.4 配置示例

- 7.5 时间同步
  - 7.5.0.1 使用说明
  - 7.5.0.2 输出示例
- 8 CAN数据协议 (CANopen)
  - 8.1 CANopen 默认设置
  - 8.2 CANopen TPDO
    - 8.2.1 数据解析示例
  - 8.3 上位机连接CAN设备
  - 8.4 配置指令 (SDO协议)
    - 8.4.1 SDO (Service Data Object) 协议
    - 8.4.2 常用配置指令
      - 8.4.2.1 修改节点 ID (0x209C)
      - 8.4.2.2 保存配置到 Flash (0x2000)
      - 8.4.2.3 复位 (0x2000)
      - 8.4.2.4 恢复出厂设置 (0x2000)
      - 8.4.2.5 修改CAN波特率 (0x209A)
    - 8.4.3 TPDO配置
      - 8.4.3.1 修改/关闭/开启数据输出速率 (0x1800-0x1805)
      - 8.4.3.2 设置倾角仪零点 (0x20A5)
    - 8.4.4 同步协议
      - 8.4.4.1 配置TPDO为同步模式
      - 8.4.4.2 发送CANopen同步帧
      - 8.4.4.3 设置心跳包
- 9 地磁校准
  - 9.1 地磁校准适用场景
  - 9.2 地磁校准步骤
    - 9.2.1 1. 模式切换
    - 9.2.2 2. 环境检查
    - 9.2.3 3. 校准操作
    - 9.2.4 4. 校准状态查询
    - 9.2.5 5. 校准结果验证
  - 9.3 校准故障排查流程
  - 9.4 常见问题及解决方案
  - 9.5 重要提醒
  - 9.6 校准频率与模式选择
- 10 附录1 四元数/欧拉角/旋转矩阵互转
  - 10.1 四元数转旋转矩阵
  - 10.2 四元数转欧拉角 - 东北天(ENU)-312(先转Z,然后X轴,最后Y轴)旋转顺序下的欧拉角
  - 10.3 四元数转欧拉角 - 北东地(NED)-321(先转Z轴,然后Y轴,最后X轴)旋转顺序下的欧拉角
- 11 附录2 固件升级
- 12 附录3 关于磁干扰的更多知识
- 13 附录5 技术支持



# 1. 手册版本说明(重要)

由于新老固件指令,性能,功能 存在细微差异,请根据产品固件版本选择参考对应的用户手册:

适用于产品的固件版本	对应用户手册版本	下载地址
1.7.1	1.7.1	本手册
1.5.5 - 1.7.0	1.3.0	<a href="#">imu_cum_cn_150_170.pdf</a>

## 2. 模块配置简述

在使用产品前,请仔细阅读本章节,结合实际使用需求,判断是否需要进行用户配置。

### 2.1 工作模式配置 - AHRS/9轴模式

#### ⚠ 警告

在机器人应用及室内环境中, AHRS (9轴) 模式容易受到环境磁场或电机产生磁场干扰, 导致航向角产生误差。

在空旷且无磁场干扰的环境下(如无人机户外飞行场景), 可使用地磁辅助模式。使用前需要:

1. 将模块配置为地磁辅助模式;
2. 进行地磁校准(详见“地磁校准”章节)。

### 2.2 同步输入 - SYNC\_IN/PPS

模块的同步相关功能依赖于 `SYNC_IN/PPS` 引脚, 主要包括以下两类:

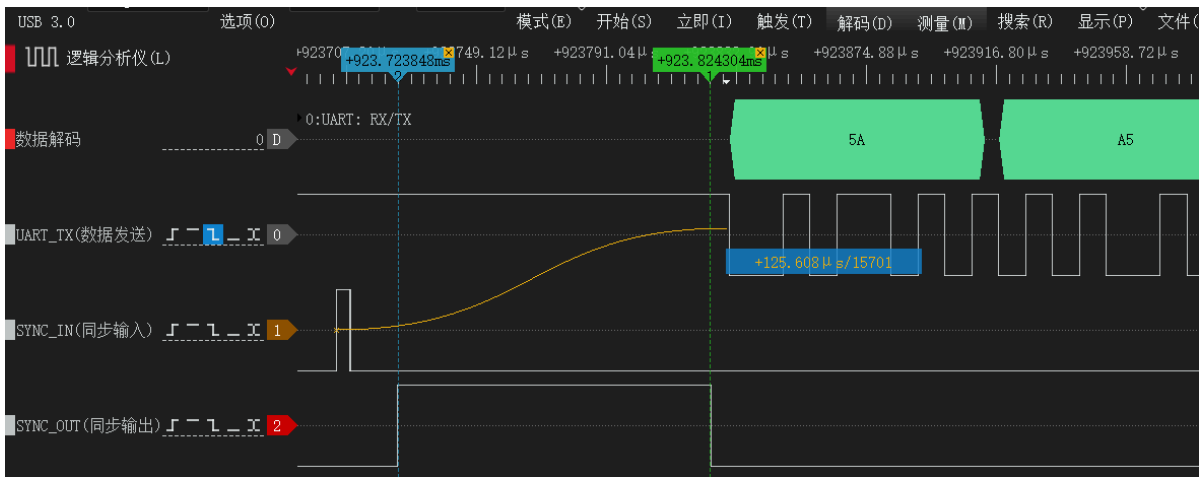
- SYNC\_IN同步数据触发
- PPS标准秒脉冲接入, 用于UTC时间同步

#### 2.2.1 SYNC\_IN同步数据触发

部分产品提供同步输入引脚 (SYNC\_IN/PPS), 可用于外部脉冲触发数据输出。不使用时建议悬空或接地。

工作原理: 当输出协议配置为 `ONMARK` 触发模式时(详见 `LOG` 指令), 模块在 `SYNC_IN` 引脚检测到上升沿后输出一帧数据。

应用场景: 主要用于接收主控或外部时钟源产生的高精度脉冲, 以触发同步输出 IMU 数据。

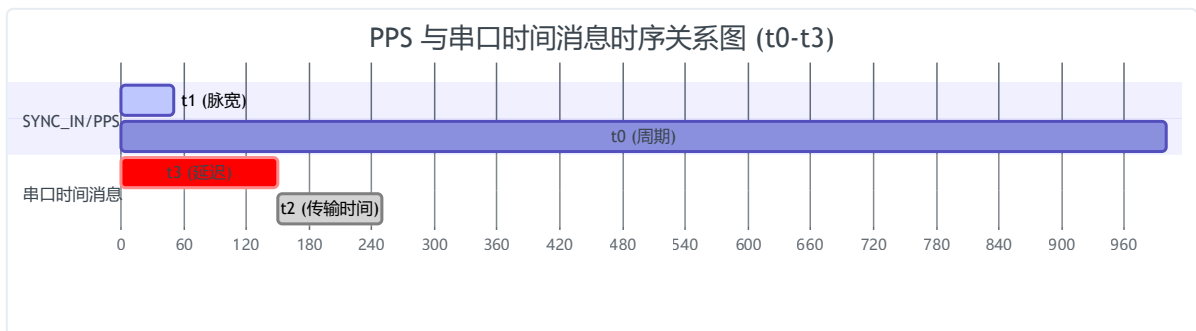


## 2.2.2 PPS标准秒脉冲接入

此功能使用 (SYNC\_IN/PPS) 引脚接入GPS的PPS秒脉冲信号，配合串口接收时间消息，为IMU提供精确的UTC时间同步。当模块检测到有效的PPS上升沿，并通过串口接收到匹配的时间消息后，内部时钟将自动对齐至UTC整秒。

### 2.2.2.1 1. 时序与信号要求

为确保时间同步可靠，PPS 脉冲与串口时间消息需满足如下横向时序要求：



参数说明：

参数	描述	有效范围	推荐值
t0	相邻两次秒脉冲上升沿的间隔	990 ms ~ 1010 ms	1000 ms
t1	秒脉冲的高电平时间 (脉宽)	1 ms ~ 100 ms	10 ms ~ 50 ms
t2	时间消息的传输时间	与波特率相关	-
t3	时间消息开始发送相对于脉冲上升沿的延迟	-200 ms ~ +200 ms	0 ms ~ 100 ms

**⚠️ 核心要求：**用于对时的时间消息必须在 PPS 上升沿到来前后 **200ms** 内发出 (即  $|t3| \leq 200ms$ )，否则 IMU 将无法正确匹配 UTC 时间。

### 2.2.2.2.2. 硬件与接口配置要求

- **硬件引脚 (SYNC\_IN/PPS):**
  - **触发方式：**上升沿有效；
  - **电平标准：**高电平  $\leq 5V$  (TTL/CMOS兼容)；
- **串口数据 (RX):**
  - **报文频率：**1~10 Hz (推荐 1 Hz)；

- **波特率**: 必须与IMU当前配置的波特率严格一致;
- **支持协议**: 仅支持标准 NMEA `RMC` 或 `GGA` 消息。

### 2.2.2.3 3. 时间消息示例 (以GPRMC为例)

```
1 $GPRMC,235952.00,A,3112.5000,N,12127.5000,E,0.0,0.0,141125,0.0,E,A*3B
```

时间同步后, 数据帧中的时间戳 (uint32\_t) 表示自当日 UTC 00:00:00 起累计的毫秒数。

参数	值
范围	0~86,399,999 ms
对应时间	00:00:00.000至23:59:59.999
精度	1毫秒

### 时间戳转换示例与 C 代码

时间戳 (ms)	UTC时间
0	00:00:00.000
3661000	01:01:01.000
43200000	12:00:00.000
86399999	23:59:59.999

```

1 // Time conversion formula:
2 // Hours = timestamp / 3600000
3 // Minutes = (timestamp % 3600000) / 60000
4 // Seconds = (timestamp % 60000) / 1000
5 // Milliseconds = timestamp % 1000
6
7 void ms_to_utc_time(uint32_t total_ms, char *utc_time, int buf_size)
8 {
9     // Calculate hours, minutes, seconds and milliseconds
10    uint32_t total_seconds = total_ms / 1000;
11    uint32_t ms_part = total_ms % 1000;
12
13    uint8_t hours = (total_seconds / 3600) % 24;
14    uint8_t minutes = (total_seconds % 3600) / 60;
15    uint8_t seconds = total_seconds % 60;
16
17    // Format as hh:mm:ss.sss
18    snprintf(utc_time, buf_size, "%02d:%02d:%02d.%03d",
19             hours, minutes, seconds, ms_part);
20 }

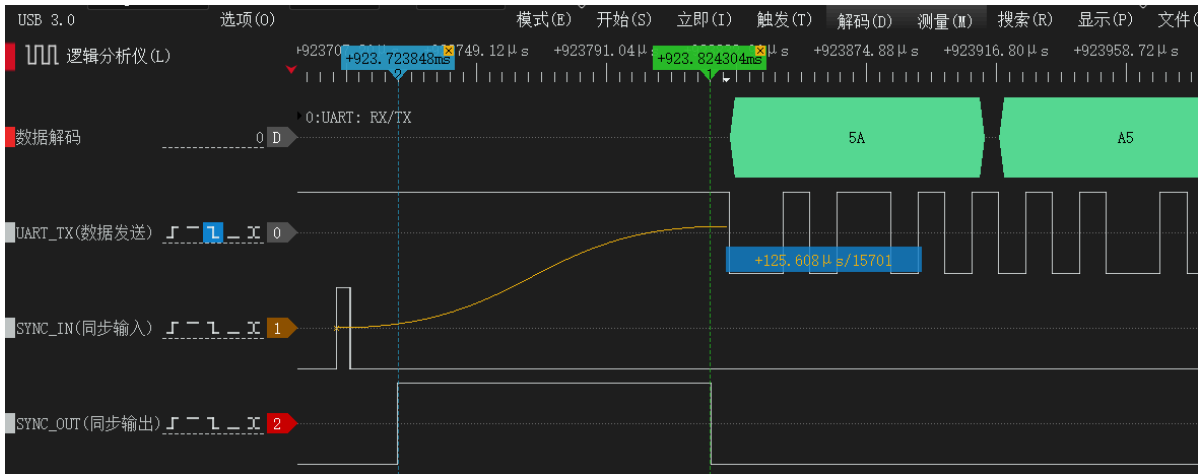
```

### 📌 注意事项

- 时间戳不包含日期信息，仅表示当日UTC时间（自00:00:00起的毫秒数）；
- 不包含时区信息，默认按 UTC+0 解释；如需本地时间，请由主机侧自行叠加时区偏移。

## 2.3 同步输出 - SOUT

**SOUT** 是模块的同步输出引脚。无数据输出时为低电平（空闲）；当一帧数据开始发送前，会先输出一个高脉冲，脉冲结束（下降沿）后紧接数据输出。



SOUT 引脚还支持分频输出，可按设定的分频系数输出同步脉冲，用于触发相机等低速率设备，实现严格时间同步。分频系数配置见“模块配置”章节中的 `CONFIG PMUX2 DIV`。

## 2.4 船舶海浪补偿位移输出 - Heave, Surge, Sway

本产品支持测量海浪引起的船舶周期性运动（垂荡、纵荡、横荡），可提供高精度的实时三轴海浪运动信息：

运动轴	描述	输出数据
Heave	垂直升沉	垂直位移、垂直速度、垂直位移周期
Surge	纵向涌浪	纵向位移、纵向速度、纵向位移周期
Sway	横向摇摆	横向位移、横向速度、横向位移周期

### 应用场景：

- 船舶动态监测与姿态控制
- 海洋工程作业补偿（起重、对接）
- 波浪特性研究与统计分析
- 海上平台稳定性分析
- 动态定位系统（DP）辅助

## 2.4.1 使用限制

### 重要限制

- 仅适用于周期性往复运动
- 以下情况通常无法准确测量：
  - 周期过长的运动 (>30 s)
  - 单向线性运动
  - 阶跃式位移
- **零均值假设**：算法假设位移的长期平均值为 0
- **初始化时间**：需要稳定的 **5~20 个海浪周期** 作为初始化时间才能获得正确结果
- **频率响应范围**：典型海浪周期 3~20 s，超出此范围精度下降

### 产品兼容性

仅 HI7x/9x 系列产品支持此功能，详见“产品特性支持表”。

### 3. 产品特性支持表

下表给出各产品家族的常用功能支持概览。具体功能以实际产品型号、固件版本及交付配置为准。

表中未列项不表示该功能一定支持或默认开放；对于单一型号产品，请结合实际交付说明确认。

型号/指令	HI02	HI05/06	CH0x0, HI04/12/13/14	HI50	HI7x/9x
地磁辅助/地磁校准	X	✓	✓	X	✓
用户姿态校准	X	✓	✓	✓	✓
IO复用映射(PMUX)	X	✓	✓	X	X
CAN通讯接口	X	✓	✓	✓	✓
船舶垂荡信息输出	X	X	X	X	✓
倾角输出	X	X	X	✓	X

### 4. 模块配置命令 (ASCII)

模块配置采用串口 ASCII 字符串命令格式，每条命令必须以回车换行 `\r\n` 结束（类似 AT 指令）。

凡涉及参数修改的操作，建议按“发送配置指令 -> 执行 `SAVECONFIG` -> 复位或重新上电 -> 再次确认”的流程进行。查询类命令以及部分通信控制命令可能在当前通信会话中立即体现，但不改变上述推荐配置流程。

#### 配置语义说明

- 命令是否立即生效，以各命令说明为准；
- 需要长期保留的配置，建议执行 `SAVECONFIG` 后再复位或重新上电确认；
- 通信参数类命令可能在当前接口上立即切换；
- 恢复类命令可能自动保存并触发复位。

下表列出常用对外配置命令。对于兼容、调试或定制用途的附加命令，请以实际交付说明为准。

#### 4.1 配置命令总览

指令	功能	备注
REBOOT	复位模块	和重上电等效
SAVECONFIG	保存所有配置参数	立即生效
SERIALCONFIG	串口波特率设置	立即生效
CONFIG	配置模块各种参数及模式	保存后,复位生效
LOG	查询模块信息或配置输出数据	立即生效
FRESET	恢复出厂设置	立即生效

## 4.2 指令详解

### 4.2.1 REBOOT

复位模块。执行 `REBOOT BL` 可复位进入 Bootloader 模式。

示例: `REBOOT`、`REBOOT BL`

### 4.2.2 SAVECONFIG

保存所有用户配置到 Flash。

示例: `SAVECONFIG`

### 4.2.3 SERIALCONFIG

设置当前串口波特率。

格式: `SERIALCONFIG <BAUD>`

参数说明:

- `BAUD`: 目标波特率。当前支持值: `4800`、`9600`、`19200`、`38400`、`57600`、`115200`、`230400`、`256000`、`460800`、`921600`

示例:

- `SERIALCONFIG 115200` - 设置当前串口为115200波特率

#### ⚠ 重要提示

该指令立即生效，当执行该指令后，需要切换到新波特率才能和模块继续通讯。

### 4.2.4 CONFIG

用于配置模块各种参数及工作模式。建议所有需要长期保存的 `CONFIG` 配置在完成后执行 `SAVECONFIG` 保存，并在复位或重新上电后确认配置结果。

#### 4.2.4.1 工作模式配置

工作模式配置: 6轴或9轴（地磁辅助）模式，格式: `CONFIG ATT MODE <VAL>`。以下列出常用模式，其他行业模式或定制模式请以实际交付说明为准。

示例:

- `CONFIG ATT MODE 0` - 配置模块为VRU（6轴）模式
- `CONFIG ATT MODE 1` - 配置模块为AHRS（9轴）模式
- `CONFIG ATT MODE 4` - 人形机器人专用模式

#### 4.2.4.2 姿态用户校准

用于执行姿态零点相关操作，格式：`CONFIG ATT RST <VAL>`。执行该命令时，设备应保持静止，否则可能引入较大校准误差。

示例：

- `CONFIG ATT RST 1` - 航向复位：将当前航向角置零
- `CONFIG ATT RST 2` - 设置相对零点：将当前 Pitch、Roll 角度置零
- `CONFIG ATT RST 3` - 自动校平：仅在设备接近水平放置时有效，具体定义如下：
  - 如果当前Pitch/Roll接近0°（水平正面放置），则自动校准到Pitch=0°，Roll=0°；
  - 如果当前Pitch接近0°，Roll接近180°（水平倒放），则自动校准到Pitch=0°，Roll=180°；
  - 判定阈值为Pitch、Roll均小于5°。
- `CONFIG ATT RST 5` - 取消水平校平：清除相对 Pitch、Roll 角度，恢复绝对角度

#### 4.2.4.3 安装角度设置

用于修改模块安装方向，如水平安装、垂直安装、倒装以及组合导航前向安装等。此类配置建议保存后复位确认，无需每次上电重复发送。

格式：`CONFIG IMU URFR <CODE>`

参数说明：

- `CODE`：2~3 位方向编码，表示用户坐标系相对于传感器坐标系的安装方向。
- 编码写作 `ABC`，其中：
  - `A` 表示用户坐标系 `X` 轴对应传感器坐标系的哪个方向
  - `B` 表示用户坐标系 `Y` 轴对应传感器坐标系的哪个方向
  - `C` 表示用户坐标系 `Z` 轴对应传感器坐标系的哪个方向
- 每一位数字的含义如下：

数字	方向
0	+X
1	-X
2	+Y
3	-Y
4	+Z
5	-Z

使用说明：

- `24` 等价于 `024`，表示用户坐标系 `X=+X`、`Y=+Y`、`Z=+Z`。对本产品默认安装方向，可理解为 `X` 指右，`Y` 指前，`Z` 指上。
- 该命令使用空格分隔参数，正确写法为 `CONFIG IMU URFR 24`，不是 `CONFIG IMU URFR=24`。

- 当前配置查询结果会以 URFR=<CODE> 的形式显示。
- 如果用户坐标系定义与机体右、前、上方向一致，则可直接按安装朝向从下表选择对应编码。

完整配置示例（24种合法右手系）：

- 下表按“等效安装描述”展示（与上位机下拉一致）：IMU X/Y/Z 在 Body(B) 中的方向。
- URFR 本质编码仍是 ABC 三位数字（右手系约束： $X \times Y = Z$ ）；2位显示值等价于补前导零后的3位值（如 24 = 024）。

等效安装描述 (IMU 轴在 Body(B) 中)	配置命令	说明
IMU X 指右, IMU Y 指前, IMU Z 指上	CONFIG IMU URFR 24	默认水平安装; 完整编码为 024。
IMU X 指右, IMU Y 指后, IMU Z 指下	CONFIG IMU URFR 35	相对默认姿态绕 X 轴翻转后的常见倒装; 完整编码为 035。
IMU X 指右, IMU Y 指下, IMU Z 指前	CONFIG IMU URFR 43	常见侧装; 该组合与上位机“Right + Down”一致。
IMU X 指右, IMU Y 指上, IMU Z 指后	CONFIG IMU URFR 52	常见侧装; 该组合与上位机“Right + Up”一致。
IMU X 指左, IMU Y 指前, IMU Z 指下	CONFIG IMU URFR 125	X 轴反向且 Z 向下的倒装组合。
IMU X 指左, IMU Y 指后, IMU Z 指上	CONFIG IMU URFR 134	X/Y 同时反向、Z 向上, 常见于朝向对调安装。
IMU X 指左, IMU Y 指上, IMU Z 指前	CONFIG IMU URFR 142	左向立装组合, Y 轴朝上。
IMU X 指左, IMU Y 指下, IMU Z 指后	CONFIG IMU URFR 153	左向立装组合, Y 轴朝下。
IMU X 指前, IMU Y 指右, IMU Z 指下	CONFIG IMU URFR 205	前向安装组合, 适合 X 轴沿车头方向布置。
IMU X 指后, IMU Y 指右, IMU Z 指上	CONFIG IMU URFR 214	后向安装组合, Y 轴保持朝右。
IMU X 指上, IMU Y 指右, IMU Z 指前	CONFIG IMU URFR 240	立装组合, X 轴朝上、Y 轴朝右。
IMU X 指下, IMU Y 指右, IMU Z 指后	CONFIG IMU URFR 251	立装组合, X 轴朝下、Y 轴朝右。
IMU X 指前, IMU Y 指左, IMU Z 指上	CONFIG IMU URFR 304	前向安装组合, Y 轴改为朝左。
IMU X 指后, IMU Y 指左, IMU Z 指下	CONFIG IMU URFR 315	后向倒装组合, X/Y 均为反向。
IMU X 指下, IMU Y 指左, IMU Z 指前	CONFIG IMU URFR 341	左向立装组合, X 轴朝下。

等效安装描述 (IMU 轴在 Body(B) 中)	配置命令	说明
IMU X 指上, IMU Y 指左, IMU Z 指后	CONFIG IMU URFR 350	左向立装组合, X 轴朝上。
IMU X 指前, IMU Y 指上, IMU Z 指右	CONFIG IMU URFR 402	Y 轴朝上、Z 轴朝右的前向立装。
IMU X 指后, IMU Y 指下, IMU Z 指右	CONFIG IMU URFR 413	后向立装, Y 轴朝下、Z 轴朝右。
IMU X 指下, IMU Y 指前, IMU Z 指右	CONFIG IMU URFR 421	立装组合, X 朝下且 Z 朝右。
IMU X 指上, IMU Y 指后, IMU Z 指右	CONFIG IMU URFR 430	立装组合, X 朝上且 Z 朝右。
IMU X 指前, IMU Y 指下, IMU Z 指左	CONFIG IMU URFR 503	前向立装, Y 轴朝下、Z 轴朝左。
IMU X 指后, IMU Y 指上, IMU Z 指左	CONFIG IMU URFR 512	后向立装, Y 轴朝上、Z 轴朝左。
IMU X 指上, IMU Y 指前, IMU Z 指左	CONFIG IMU URFR 520	常见立装组合, X 轴朝上、Z 朝左。
IMU X 指下, IMU Y 指后, IMU Z 指左	CONFIG IMU URFR 531	常见立装组合, X 轴朝下、Z 朝左。

#### 4.2.4.4 多功能IO复用功能配置

模块提供多个多功能引脚 (IOx)。每个 IO 引脚具有默认复用功能, 也可通过软件重新映射为其他复用功能。

格式: CONFIG <PMUX> <IO>。

参数说明:

- PMUX : 复用功能编号 ( PMUX1 ~ PMUX3 )
- IO : 目标引脚编号 ( IO1 ~ IO5 )

功能	名称	方向	说明	默认 IO
PMUX1	SIN/PPS	I	同步脉冲输入 (SIN/PPS) : 输入引脚, 见"同步输入与同步输出"章节	IO1
PMUX2	SOUT	O	无数据输出时为低电平 (空闲), 当一帧数据开始发送前会发送一个高脉冲, 高脉冲结束 (下降沿) 后紧接着输出数据	IO2
PMUX3	LED	O	运行状态指示灯输出	IO5

示例:

- CONFIG PMUX3 IO2 - 将IO2引脚分配为LED (PMUX3) 功能
- CONFIG PMUX2 IO1 - 将IO1引脚分配为同步输出 (PMUX2) 功能

 注意

并非所有 IO 引脚都会在具体产品上实际引出，详细硬件资源请参见对应产品用户手册。

#### 4.2.4.5 SOUT(PMUX2)同步输出分频设置

SOUT 同步输出支持分频，可用于触发相机等低速率传感器融合设备。格式：`CONFIG PMUX2 DIV <N>`。

参数说明：

- `N`：分频系数，范围 `1~1000`，默认值为 `1`（不分频）

示例：

- `CONFIG PMUX2 DIV 5` - 设置SOUT分频系数为5，若数据输出速率为100 Hz，则SOUT脉冲输出频率为 20 Hz

#### 4.2.4.6 地磁校准

开始一次手动地磁校准：`CONFIG MCAL START`。发送该指令后，模块开始地磁校准流程，并根据空间磁场分布自动完成校准，无需再手动发送结束指令。执行过程中应在原地缓慢旋转模块，并确保与模块刚性连接的物体（PCB、外壳、机器人等）相对位置保持不变。详细说明见“地磁校准”章节。

发送开始校准指令后，可通过 `LOG MCAL STAT` 查询地磁校准状态，返回示例如下：

```
1 STAT=1
2 PROGRESS=8
3 OK
```

- `STAT`：当前地磁校准状态。`0` 表示空闲，`1` 表示校准中，`3` 表示校准完成，`4` 表示校准失败
- `PROGRESS`：当前校准进度，范围 `0~100`

#### 重要提示

地磁校准指令要求固件版本  $\geq 1.7.0$ 。

#### 4.2.4.7 坐标系定义设置

模块默认采用东北天（ENU）坐标系，也可通过以下命令切换世界坐标系定义：

- `CONFIG IMU COORD 0` - 将模块世界坐标系定义为东北天（ENU）坐标系
- `CONFIG IMU COORD 4` - 将模块世界坐标系定义为北西天（NWU）坐标系

#### 4.2.4.8 用户级陀螺校准

该命令用于手动校准陀螺仪Z轴比例因子。正确执行该指令后，可提升航向角精度（校准后可保证比例因子误差在0.1%以内）。适用于AGV、大型水平移动机器人等，且对长期航向角误差要求高的工况下使用。格式：

`CONFIG USRCAL START <ANGLE>`。

参数说明：

- `ANGLE` : 校准角度, 范围 `720~1800°` (2~5 圈)。旋转圈数越多, 统计误差越小, 但需确保旋转速度均匀。

示例:

1. 准备工作: 将模块 (连同固联设备, 如机器人等) 放置在水平、平整地面上, 确保环境温度稳定, 避免强烈振动干扰。
2. 发送开始命令: 如 `CONFIG USRCAL START 720` - 开始720° (2圈) 校准。
3. 执行校准动作: 按照 `<ANGLE>` 设定的角度以20~100 deg/s (约5~20秒转一圈) 完成水平旋转, 旋转方向任意 (顺时针或逆时针), 整个旋转 (校准) 过程需保持速度均匀, 避免中途停顿、突然加减速等。
4. 发送结束命令: 当旋转完成后, 确保实际旋转角度与ANGLE设定值的误差在±5°以内, 发送 `CONFIG USRCAL STOP` 指令完成校准。发送指令后, 如果校准成功, 则返回 `OK`, 否则返回 `ERR`。

常见校准失败原因:

失败原因	说明
旋转操作不规范	确保模块放置水平、平稳
操作不当	转动太快或太慢, 中途停顿
环境干扰	避免在有振动的设备附近操作, 机器人电机振动过大等
校准后误差依然存在甚至更大	最有可能的原因是校准操作不规范。校准是一个精密的过程, 假设标定时规定旋转720°, 实际却旋转了725°, 则比例因子则会错误的标定为 $5/720 = 0.6\%$ , 这已经远超出厂精度

## 4.2.5 LOG

### 4.2.5.1 开/关闭数据输出

- `LOG ENABLE` - 全局使能数据帧输出
- `LOG DISABLE` - 全局禁止数据帧输出

### 4.2.5.2 模块版本信息

`LOG VERSION` - 查询并打印固件版本信息

### 4.2.5.3 显示串口配置信息

`LOG COMCONFIG` - 打印串口及输出协议配置信息

### 4.2.5.4 设置数据帧输出类型及频率

格式: `LOG <MSG> <TYPE> <VALUE>`

参数说明:

- `MSG`: 数据帧种类, 常用如 `HI91`、`HI81`、`HI83`、`GGA`、`RMC`、`SXT` 等, 具体可用项以对应产品和当前串口配置为准
- `TYPE`: 输出触发方式, 支持 `ONTIME` (定时输出) 和 `ONMARK` (同步脉冲触发或软件触发)
- `VALUE`: 当 `TYPE=ONTIME` 时表示输出周期, 单位为 s, 可选范围: `0.001` (1 kHz) ~ `1` (1 Hz), 其中 `0` 表示关闭定时输出; 当 `TYPE=ONMARK` 时, `1` 表示由 `SYNC_IN/PPS` 脉冲触发, `ONCE` 表示手动触发一次输出

示例:

- `LOG HI91 ONTIME 0.01` - 将当前串口的 `HI91` 数据帧输出周期设置为 `0.01 s` (100 Hz)
- `LOG HI91 ONTIME 0.05` - 将当前串口的 `HI91` 数据帧输出周期设置为 `0.05 s` (20 Hz)
- `LOG HI91 ONTIME 0` - 关闭 `HI91` 数据帧输出
- `LOG HI91 ONMARK 1` - 将当前串口的 `HI91` 数据帧配置为 `SYNC_IN/PPS` 引脚脉冲触发模式
- `LOG HI91 ONMARK ONCE` - 手动触发一次 `HI91` 数据输出, 效果与 `SYNC_IN/PPS` 脉冲触发一次相同

#### 4.2.5.5 HI83 可变数据帧配置

`HI83` 是可变长度二进制输出帧, 适用于需要同时输出 IMU、姿态、时间、GNSS 或组合导航数据, 并希望按需控制帧长的应用。`HI83` 的数据内容由 `data_bitmap` 决定, `data_bitmap` 中每一位对应一种数据段; 置 `1` 表示输出该数据段, 置 `0` 表示不输出。实际数据段在帧内按 bit 从低到高的顺序依次排列。

字段配置格式: `LOG HI83 MAP <BITMAP>`

- `<BITMAP>` 可使用十六进制或十进制形式, 例如 `0x000000FF` ;
- `data_bitmap` 各 bit 的含义见后文“可变类型协议 (HI83)”章节;
- `HI83` 字段位图默认值为 `0x000000FF`

常用配置示例:

指令	说明
<code>LOG HI83 MAP 0x000000FF</code>	配置 <code>HI83</code> 默认字段组合: 加速度、角速度、磁场、欧拉角、四元数、系统时间、UTC、气压
<code>LOG HI83 MAP 0x0000001F</code>	配置 IMU + 姿态基础字段: 加速度、角速度、磁场、欧拉角、四元数
<code>LOG HI83 ONTIME 0.01</code>	将当前串口的 <code>HI83</code> 数据帧输出周期设置为 <code>0.01 s</code> (100 Hz)
<code>LOG HI83 ONTIME 0</code>	关闭当前串口的 <code>HI83</code> 定时输出

#### ⚠ 波特率注意事项

当输出帧率设置较高时 (如 500 Hz), 默认的 `115200` 波特率可能无法满足输出带宽要求, 此时建议将模块波特率提高到更高档位 (如 `921600`), 以保证数据能够稳定输出。

#### 4.2.6 FRESET

用于恢复模块默认用户配置。执行后模块会自动保存并复位, 请谨慎使用。

部分校准相关参数可能保留, 具体以当前固件行为为准。

示例: `FRESET`

## 5. RS-232/TTL/USB 数据协议（二进制）

RS-232、串口 TTL 以及 USB（虚拟串口）均属于流式串行数据接口，这些接口支持超核自定义二进制协议。

### 5.1 数据帧格式

域名称	值	长度（字节）	说明
SOF	5A A5	2	帧头同步标志
LEN	1-4096	2	帧中数据域的长度，LSB（低字节在前）长度表示数据域的长度（不包含帧头、帧类型、长度及CRC）
CRC校验	-	2	对帧头、长度和数据域进行16位CRC校验（不包含CRC字段本身）
数据域	-	1-4096	一帧携带的数据，由若干个子数据段组成。每个子数据段由标签和数据两部分组成，标签决定数据类型及长度

### 5.2 出厂默认输出

**出厂默认输出：**浮点型 IMU 数据帧（HI91）

### 5.3 数据域内容

#### 5.3.1 浮点型IMU数据帧（HI91）

数据域共76字节，包含模块ID、温度、IMU的原始数据、地磁、气压、融合后的姿态数据等。

字节偏移	名称	数据类型	大小（Byte）	单位	比例因子	说明
0	tag	uint8_t	1	-	-	数据标签：0x91
1	main_status	uint16_t	2	-	-	状态字，见 MAIN_STATUS 状态字说明
3	temperature	int8_t	1	°C	1	模块平均温度
4	air_pressure	float	4	Pa	1	气压
8	system_time	uint32_t	4	ms	1	当 GPS 时间未同步成功时，该字段为本地时间戳，即自系统上电以来累计的毫秒数；当 GPS 时间同步成功时，该字段对齐为 UTC 当日时间戳
12	acc_b	float	4×3	G	1	经过出厂校准后的加速度，顺序为：XYZ轴 1G = 1倍标准重力加速度（约9.8 m/s <sup>2</sup> ）
24	gyr_b	float	4×3	deg/s	1	经过出厂校准后的角速度，顺序为：XYZ轴
36	mag_b	float	4×3	μT	1	磁强度，顺序为：XYZ轴
48	roll	float	4	deg	1	横滚角
52	pitch	float	4	deg	1	俯仰角
56	yaw	float	4	deg	1	航向角
60	quat	float	4×4	-	-	节点四元数集合，顺序为WXYZ

### 5.3.2 可变类型协议 (HI83)

此协议所携带的数据可以配置, 可根据 `data_bitmap` 输出不同的数据组合, 协议帧大小也会随配置改变。

字节 偏移	名称	数据类 型	大小 (Byte)	单 位	比例 因子	说明
0	tag	uint8_t	1	-	-	数据标签: <code>0x83</code>
1	main_status	uint16_t	2	-	-	状态字, 见 <code>MAIN_STATUS</code> 状态字说明 组合导航解状态(只针对组合导航产品): 0: 解无效:无GNSS信息,无法初始化位置 1:对准中: 位置初始化成功, 但需要一定速度来完成组合导 航滤波器初始化,从而进入组合导航状态 3:组合导航中: 当前已进入组合导航状态 6:惯性递推中: 当前处于组合导航状态, 但GNSS信号丢失, 处于纯惯导状态(隧道或地库等)
3	ins_status	uint8_t	1	-	-	
4	data_bitmap	uint32_t	4	-	-	所携带数据段的位图标识 <code>data_bitmap</code> , 可配置。每一位对应一种数据类型, 后续数据段按位图从低位到高位 的顺序依次排列
8	-	-	1-512	-	-	后续数据内容由 <code>data_bitmap</code> 定义。

### 5.3.3 data\_bitmap位及数据段说明

data_bitmap 位	名称	数据类 型	大小	单位	比 例 因 子	说明
0	acc_b	float	4x3	m/s <sup>(2)</sup>	1	IMU载体系, 经出厂校准的加速度, 顺序:XYZ
1	gyr_b	float	4x3	rad/s	1	IMU载体系, 经出厂校准的角速度, 顺序:XYZ
2	mag_b	float	4x3	μT	1	IMU载体系, 经校准的磁场强度, 顺序:XYZ
3	rpy	float	4x3	deg	1	姿态角(欧拉角) 顺序为 横滚角roll, 范围:180 - 180 俯仰角pitch, 范围: -90 - 90 航向角yaw, 范围:-180 - 180, 逆时针为正
4	quat	float	4x4	-	1	节点四元数集合, 顺序为WXYZ
5	system_time_us	uint64_t	8	us	1	该字段为本地高分辨率时间戳, 即自系统 上电以来累计的微秒数, 每 1 us 递增 1

data_bitmap 位	名称	数据类型	大小	单位	比例 因子	说明
6	utc	-	8	-	-	UTC 时间, 共 8 字节: 年: 1字节, 如 24 表示 2024 年 月: 1字节 日: 1字节 时: 1字节 分: 1字节 秒: 2字节, 单位为 1 ms, 例如 12 s 表示 为 12000 保留: 1字节
7	air_pressure	float	4	Pa	1	气压
8	temperature	float	4	°C	1	模块平均温度
9	inclination	float	4x3	deg	1	倾角仪输出, 顺序: 饶X轴, 饶Y轴, 饶Z轴
10	heave_surge_sway	float	4x3	m	1	船舶升沉位移信息, 顺序: 垂荡(heave)、纵 荡(surge)、横荡(sway)
11	heave_surge_sway_frq	float	4x3	Hz	1	船舶升沉频率信息, 顺序: 垂荡(heave)、纵 荡(surge)、横荡(sway)
12	vel_enu	float	4x3	m/s	1	导航系下东北天速度, 组合导航解算输出
13	acc_enu	float	4x3	m/s <sup>(2)</sup>	1	导航系下东北天加速度, 组合导航解算输出
14	ins_lon_lat_msl	double	8x3	-	1	组合导航融合后的经纬度, 顺序: 经度 (deg), 纬度(deg), 海拔高度(m)
15	gnss_quality_nv	-	4	-	-	GNSS解状态组, 共4字节, 顺序依次为 solq_pos: 1字节, 位置解状态 nv_pos: 1字节, 位置解使用卫星数 solq_heading: 1字节, 航向解状态 nv_heading: 1字节, 航向解使用卫星数
16	od_speed	float	4	m/s	-	外接里程计传感器速度
17	undulation	float	4	m	-	高程异常值
18	diff_age	float	4	s	-	RTK差分龄期
19	node_info	-	4	-	-	设备版本及 ID 信息: node_id : 1 字节, 节点 ID 与 CAN ID 相同, 范围 1~127 保留: 3 字节
20-24						保留
25	event_counter	uint32_t	4x16	-	1	内部量测事件计数器。常用顺序包括 gravity、mag、gnss_pos、gnss_vel、 dual_heading、nhc、zupt、zaru、zihr、 od, 其余保留
26	kf_acc_bias	float	4x3	m/s <sup>(2)</sup>	1	组合导航 KF 估计的加速度零偏, 顺序: XYZ

data_bitmap 位	名称	数据类型	大小	单位	比例 因子	说明
27	kf_gyr_bias	float	4x3	rad/s	1	组合导航 KF 估计的陀螺零偏, 顺序: XYZ
28	gnss_std	float	4x3	-	1	GNSS 精度信息, 顺序: 位置标准差范数、速度标准差范数、保留
29	gnss_heading_info	float	4x3	-	1	双天线 GNSS 航向信息, 顺序: 基线长度(m)、俯仰角(deg)、航向角(deg)
30	gnss_lon_lat_msl	double	8x3	-	1	GNSS 原始经纬高, 顺序: 经度(deg)、纬度(deg)、海拔高度(m)
31	gnss_vel	float	4x3	m/s	1	GNSS 东北天速度, 顺序: E、N、U

### 5.3.4 MAIN\_STATUS状态字说明

位	名称	描述
0-2	保留	-
3	WB_CONV	零偏收敛状态报警 1: 当前零偏估计收敛精度差, 建议将模块静止3~5 s以提高航向角精度 0: 当前零偏收敛良好
4	MAG_DIST	磁场异常检测报警: 1: 检测到当前环境磁场有干扰, 或磁传感器未进行校准, 或硬磁环境已经变化, 9轴模式下航向角误差可能大 0: 当前地磁环境良好, 磁航向精度收敛, 或系统处于6轴模式
5	ACC_SAT	加速度计量程饱和报警 1: 当前或最近 2 s 内检测到加速度计量程饱和 0: 当前未检测到加速度计量程饱和, 且已连续 2 s 无饱和事件
6	GYR_SAT	陀螺仪量程饱和报警 1: 当前或最近 2 s 内检测到陀螺仪量程饱和 0: 当前未检测到陀螺仪量程饱和, 且已连续 2 s 无饱和事件
7	ATT_CONV	姿态精度指示 1: 当前姿态精度较差, AHRs姿态KF协方差较大, 建议保持静止片刻以等待姿态精度恢复 0: 当前姿态精度正常
8-9	保留	-
10	MAG_AIDING	磁参与姿态解算标志: 1: 磁传感器正在参与航向计算 (9轴模式) 0: 磁传感器不参与航向计算 (6轴模式)
11	UTC_SYNCED	时间同步标志: 1 表示未完成时间同步, 此时 <code>system_time</code> 为本地时间; 0 表示 UTC 时间同步成功, 此时 HI91 中的 <code>system_time</code> 已对齐为当日 UTC 毫秒计数
12	SOUT_PULSE	SOUT脉冲输出标志, 用于与低速传感器 (摄像头、LiDAR 等) 进行时间同步: 1 表示当前数据帧对应 SOUT 脉冲输出; 0 表示当前数据帧不对应 SOUT 脉冲输出
13-15	保留	-

#### 兼容性说明

MAIN\_STATUS 状态字仅适用于产品固件版本  $\geq 1.7.0$ 。

## 5.4 CRC校验

CRC校验采用 CRC-16/CCITT格式, C语言实现示例如下:

```
1  /*
2     currentCrc: previous crc value, set 0 if it's first section
3     src: source stream data
4     lengthInBytes: length
5  */
6  static void crc16_update(uint16_t *currentCrc, const uint8_t *src, uint32_t
    lengthInBytes)
7  {
8     uint32_t crc = *currentCrc;
9     uint32_t j;
10    for (j=0; j < lengthInBytes; ++j)
11    {
12        uint32_t i;
13        uint32_t byte = src[j];
14        crc ^= byte << 8;
15        for (i = 0; i < 8; ++i)
16        {
17            uint32_t temp = crc << 1;
18            if (crc & 0x8000)
19            {
20                temp ^= 0x1021;
21            }
22            crc = temp;
23        }
24    }
25    *currentCrc = crc;
26 }
```

## 5.5 数据帧结构示例 (以HI91为例)

使用串口助手采样一帧数据 (HI91数据帧), 共82字节, 前6字节为帧头、长度和CRC校验值, 剩余76字节为数据域。假设数据接收到C语言数组 buf 中, 如下所示:

```
1  5A A5 4C 00 14 BB 91 08 15 23 09 A2 C4 47 08 15 1C 00 CC E8 61 BE 9A 35 56 3E 65
   EA 72 3F 31 D0 7C BD 75 DD C5 BB 6B D7 24 BC 89 88 FC 40 01 00 6A 41 AB 2A 70 C2
   96 D4 50 41 ED 03 43 41 41 F4 F4 C2 CC CA F8 BE 73 6A 19 BE F0 00 1C 3D 8D 37 5C
   3F
```

### 数据解析表:

字段名称	类型	原始值	解析值	描述
帧头	-	5A A5	-	帧头
数据域长度	-	4C 00	0x004C = 76	数据域长度=76字节
CRC	-	14 BB	0xBB14	CRC校验值
tag	-	91	0x91	0x91 子数据段标签 (从此字段开始为 payload 数据域)
main_status	uint16_t	08 15	0x1508	状态字
temperature	int8_t	23	0x23 = 35	温度: °C
air_pressure	float	09 A2 C4 47	100676	气压, Pa
system_time	uint32_t	08 15 1C 00	0x001C1508 = 1840392	时间戳, ms
acc_b_x	float	CC E8 61 BE	-0.220615	加速度X轴, G
acc_b_y	float	9A 35 56 3E	0.209189	加速度Y轴, G
acc_b_z	float	65 EA 72 3F	0.948889	加速度Z轴, G
gyr_b_x	float	31 D0 7C BD	-0.061722	角速度X轴, deg/s
gyr_b_y	float	75 DD C5 BB	-0.00603836	角速度Y轴, deg/s
gyr_b_z	float	6B D7 24 BC	-0.0100611	角速度Z轴, deg/s
mag_b_x	float	89 88 FC 40	7.89167	磁场X轴, μT
mag_b_y	float	01 00 6A 41	14.625	磁场Y轴, μT
mag_b_z	float	AB 2A 70 C2	-60.0417	磁场Z轴, μT

字段名称	类型	原始值	解析值	描述
roll	float	96 D4 50 41	13.0519	横滚角, deg
pitch	float	ED 03 43 41	12.1885	俯仰角, deg
yaw	float	41 F4 F4 C2	-122.477	航向角, deg
q_w	float	CC CA F8 BE	-0.485922	四元数W
q_x	float	73 6A 19 BE	-0.14982	四元数X
q_y	float	F0 00 1C 3D	0.0380868	四元数Y
q_z	float	8D 37 5C 3F	0.860223	四元数Z

## 5.6 C语言解析代码示例 (以HI91为例)

以下示例给出常用的 C 语言解析片段:

### 5.6.1 校验CRC

```

1  int16_t payload_len;
2  uint16_t crc;
3  crc = 0;
4  payload_len = buf[2] + (buf[3] << 8);
5
6  /* Calculate 5A A5 and LEN field crc */
7  crc16_update(&crc, buf, 4);
8
9  /* Calculate payload crc */
10 crc16_update(&crc, buf + 6, payload_len);

```

计算得到的CRC值为0xBB14, 与数据帧中的CRC字段值相同, CRC校验通过。

### 5.6.2 定义数据接收结构

从 0x91 开始为该子数据段的数据域, 下面给出示例数据结构和常用转换宏:

```

1  #include "stdio.h"
2  #include "string.h"
3
4  /* Common type conversion */
5  #define U1(p) (*((uint8_t *) (p)))

```

```

6 #define I1(p) (*(int8_t *) (p))
7 #define I2(p) (*(int16_t *) (p))
8
9 static uint16_t U2(uint8_t *p) {uint16_t u; memcpy(&u,p,2); return u;}
10 static uint32_t U4(uint8_t *p) {uint32_t u; memcpy(&u,p,4); return u;}
11 static int32_t I4(uint8_t *p) {int32_t u; memcpy(&u,p,4); return u;}
12 static float R4(uint8_t *p) {float r; memcpy(&r,p,4); return r;}
13
14 typedef struct
15 {
16     uint8_t tag; /* Item tag: 0x91 */
17     float acc[3]; /* Acceleration */
18     float gyr[3]; /* Angular velocity */
19     float mag[3]; /* Magnetic field */
20     float eul[3]; /* Attitude: Euler angle */
21     float quat[4]; /* Attitude: quaternion */
22     float pressure; /* Air pressure */
23     uint32_t timestamp; /* Timestamp */
24 }imu_data_t;

```

### 5.6.3 接收数据

从buf[6]=0x91开始为payload部分:

```

1 imu_data_t i0x91 = {0};
2 int offset = 6; /* Payload start at buf[6] */
3
4 i0x91.tag = U1(buf+offset+0);
5 i0x91.pressure = R4(buf+offset+4);
6 i0x91.timestamp = U4(buf+offset+8);
7 i0x91.acc[0] = R4(buf+offset+12);
8 i0x91.acc[1] = R4(buf+offset+16);
9 i0x91.acc[2] = R4(buf+offset+20);
10 i0x91.gyr[0] = R4(buf+offset+24);
11 i0x91.gyr[1] = R4(buf+offset+28);
12 i0x91.gyr[2] = R4(buf+offset+32);
13 i0x91.mag[0] = R4(buf+offset+36);
14 i0x91.mag[1] = R4(buf+offset+40);
15 i0x91.mag[2] = R4(buf+offset+44);
16 i0x91.eul[0] = R4(buf+offset+48);
17 i0x91.eul[1] = R4(buf+offset+52);
18 i0x91.eul[2] = R4(buf+offset+56);
19 i0x91.quat[0] = R4(buf+offset+60);
20 i0x91.quat[1] = R4(buf+offset+64);

```

```

21  i0x91.quat[2] =          R4(buf+offset+68);
22  i0x91.quat[3] =          R4(buf+offset+72);

```

### 5.6.4 打印接收到的数据

```

1  printf("%-16s0x%X\r\n",          "tag:",          i0x91.tag);
2  printf("%-16s%8.4f %8.4f %8.4f\r\n",  "acc(G):",      i0x91.acc[0],
    i0x91.acc[1], i0x91.acc[2]);
3  printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n",  "gyr(deg/s):",  i0x91.gyr[0],
    i0x91.gyr[1], i0x91.gyr[2]);
4  printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n",  "mag(uT):",     i0x91.mag[0],
    i0x91.mag[1], i0x91.mag[2]);
5  printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n",  "eul(deg):",    i0x91.eul[0],
    i0x91.eul[1], i0x91.eul[2]);
6  printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f %8.3f\r\n", "quat:",        i0x91.quat[0],
    i0x91.quat[1], i0x91.quat[2], i0x91.quat[3]);
7  printf("%-16s%8.3f\r\n",                "pressure(pa):", i0x91.pressure);
8  printf("%-16s%d\r\n",                    "timestamp(ms):", i0x91.timestamp);

```

### 5.7 最大传输速率

协议	字节数	9600bps	115200bps	230400bps	256000bps	460800bps	921600bps
HI91	76	10Hz	100Hz	250Hz	250Hz	500Hz	1000Hz

## 6. RS-485输出协议 (Modbus)

Modbus 协议是工业自动化领域常用的通用协议，可运行于 RS485 或以太网接口。带有 RS485 或以太网接口的相关产品通常支持 Modbus，具体以实际产品型号和交付配置为准。

当前固件默认将 Modbus 从站挂载在 COM1 对应的 RS485 通道上。若产品存在多接口或定制通信映射，请以实际交付配置为准。

### 6.1 Modbus指令说明

RS485通讯协议遵循Modbus RTU协议规范，数据以寄存器为单位进行发送和接收，每个寄存器占用2个字节，采用大端模式（高字节在前）。采用标准Modbus CRC校验。

支持的功能码：

- **0x06** (Write Single Register)：写单个寄存器（每个Modbus寄存器为2个字节）
- **0x03** (Read Holding Registers)：读取单个或多个寄存器数据
- **0x50** (自定义功能码)：用于 Modbus ID 自动分配等场景，便于量产部署和固件升级

出厂默认节点 ID: 80 (0x50)

### 6.2 数据帧格式

#### 6.2.1 读寄存器 (0x03)

主机发送：

域名称	值	说明
ID	1-0xFF	Modbus 节点ID
FUN_CODE	0x03	命令码
ADDR_H	-	要读取的寄存器地址高8位
ADDR_L	-	要读取的寄存器地址低8位
LEN_H	-	要读取寄存器长度高8位（以寄存器个数为单位）
LEN_L	-	要读取寄存器长度低8位（以寄存器个数为单位）
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

从机（模块）返回：

域名称	值	说明
ID	1-0xFF	Modbus 节点ID
FUN_CODE	0x03	命令码
LEN	-	返回寄存器数据的长度（不算ID, FUN_CODE, LEN, CRC字段）以字节为单位
DATAH	-	返回数据高8位
DATAL	-	返回数据低8位
...	-	更多返回数据

域名称	值	说明
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

## 6.2.2 写寄存器 (0x06)

### 主机发送:

域名称	值	说明
ID	1-0xFF	Modbus 节点ID
FUN_CODE	0x06	命令码
ADDR_H	-	寄存器地址高8位
ADDR_L	-	寄存器地址低8位
DATA_H	-	写入数据高8位
DATA_L	-	写入数据低8位
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

### 从机返回:

域名称	值	说明
ID	1-0xFF	Modbus 节点ID
FUN_CODE	0x06	命令码
ADDR_H	-	寄存器地址高8位
ADDR_L	-	寄存器地址低8位
DATA_H	-	写入数据高8位
DATA_L	-	写入数据低8位
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

## 6.3 寄存器列表

地址 (Hex)	地址 (Dec)	名称	类型	功能	R/W	说明
0x00	0	CTRL	u16	控制	W	参见控制寄存器说明
0x04	4	UART1_BAUD	u16	波特率	R/W	串口波特率
0x05	5	MD_ID	u16	Modbus ID	R/W	Modbus ID: 有效范围: 1-128
0x06	6	HEADING_MODE	u16	航向角模式	R/W	0: 6轴模式(相对航向, 航向角上电为0). 1: 9轴模式(地磁融合, 绝对航向)
0x34	52	ACCX	i16	加速度X	R	单位: G (1G = 1×重力加速度), 比例因子: 0.00048828
0x35	53	ACCY	i16	加速度Y	R	单位: G (1G = 1×重力加速度), 比例因子: 0.00048828
0x36	54	ACCZ	i16	加速度Z	R	单位: G (1G = 1×重力加速度), 比例因子: 0.00048828

地址 (Hex)	地址 (Dec)	名称	类 型	功能	R/W	说明
0x37	55	GYRX	i16	角速度X	R	单位deg/s, 比例因子:0.061035
0x38	56	GYRY	i16	角速度Y	R	单位deg/s, 比例因子:0.061035
0x39	57	GYRZ	i16	角速度Z	R	单位deg/s, 比例因子:0.061035
0x3A	58	MAGX	i16	磁强度X	R	单位uT, 比例因子: 0.030517
0x3B	59	MAGY	i16	磁强度Y	R	单位uT, 比例因子: 0.030517
0x3C	60	MAGZ	i16	磁强度Z	R	单位uT, 比例因子: 0.030517
0x3D	61	R_H	i32	横滚角高 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x3E	62	R_L	-	横滚角低 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x3F	63	P_H	i32	俯仰角高 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x40	64	P_L	-	俯仰角低 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x41	65	Y_H	i32	航向角高 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x42	66	Y_L	-	航向角低 16位	R	单位deg, 比例因子:0.001
0x43	67	TEMP	i16	温度	R	单位°C, 比例因子:0.01
0x44	68	PRS_H	i32	气压高16 位	R	单位Pa, 比例因子:0.01
0x45	69	PRS_L	-	气压低16 位	R	单位Pa, 比例因子:0.01
0x46	70	Q0	u16	四元数 QW	R	四元数, 比例因子: 0.0001
0x47	71	Q1	u16	四元数 QX	R	四元数, 比例因子: 0.0001
0x48	72	Q2	u16	四元数 QY	R	四元数, 比例因子: 0.0001
0x49	73	Q3	u16	四元数 QZ	R	四元数, 比例因子: 0.0001
0x4A	74	INCLI_X	i16	倾角仪X 轴角度	R	双轴倾角仪产品:X角度, ±180, 单位deg, 比例因子: 0.011 单轴倾角仪产品:X角度, 0-360, 单位deg, 比例因子: 0.011
0x4B	75	INCLI_Y	i16	倾角仪Y 轴角度	R	双轴倾角仪Y角度: ±90, 单位deg,比例因子: 0.011 单轴倾角仪: 此寄存器保留
0x4E	78	HEVAE	i16	船舶垂荡	R	船舶垂荡位移输出, 单位 m, 比例因子 0.01
0x51	81	HEAVE_PERIOD	i16	船舶垂荡 周期	R	船舶垂荡位移周期, 单位s, 比例因子 0.001

地址 (Hex)	地址 (Dec)	名称	类型	功能	R/W	说明
0x70- 0x77	112- 119	PNAME	u16	设备名	R	设备名字符串, ASCII码, 共占8个寄存器
0x78	120	SW_VERSION	u16	软件版本	R	软件版本
0x79	121	BL_VERSION	u16	BL版本	R	BL版本
0x7F- 0x82	127- 130	SN	u16	产品唯一 序列号	R	产品唯一序列号, 占4寄存器
0xA5	165	ATT_RST	u16	自动校平	W	<p>3: 执行一次自动调平: 如果当前俯仰角/横滚角接近 0°,0°(水平正面放置), 则自动校准到0,0. 前如果当前俯仰角/横滚角接近0° 或 180°(水平倒放), 则自动校准到 0°,180° 适用于机器人安装环境。其中, “接近”定义为 Pitch Roll均小于15°</p> <p>5: 取消自动调平, 恢复绝对测量角度</p> <p>其他值: 无效</p>

控制寄存器说明 (寄存器地址: 0x00)

命令	CTL寄存器写入值
保存所有配置参数到 Flash	0x0000
恢复出厂设置	0x0001
复位	0x00FF

## 6.4 常用配置

### 注意

以下所有配置示例均以 Modbus 地址 `0x50` (出厂默认) 为例。若用户已修改 Modbus ID, 则需要同步修改报文中的 ID 字段和 CRC。

### 6.4.1 保存配置到 Flash

```
50 06 00 00 00 00 84 4B
```

### 6.4.2 恢复出厂设置

```
50 06 00 00 00 01 45 8B
```

 执行后将恢复模块默认用户配置, 并自动保存后复位。部分校准相关参数可能保留。

### 6.4.3 复位

```
50 06 00 00 00 FF C4 0B
```

#### 6.4.4 配置波特率 (0x04)

配置目标波特率	指令 (Hex) ID= 0x50 (出厂默认)
4800	50 06 00 04 00 00 C5 8A
9600	50 06 00 04 00 01 04 4A
19200	50 06 00 04 00 02 44 4B
38400	50 06 00 04 00 03 85 8B
57600	50 06 00 04 00 04 C4 49
115200	50 06 00 04 00 05 05 89
230400	50 06 00 04 00 06 45 88
460800	50 06 00 04 00 07 84 48
921600	50 06 00 04 00 08 C4 4C

#### 6.4.5 配置节点 ID (0x05)

格式: [CURRENT\_ID] 06 00 05 00 [NEW\_ID] CRC(2字节)

参数说明:

- CURRENT\_ID : 当前 Modbus 节点 ID
- NEW\_ID : 新的目标 Modbus 节点 ID

示例 (当前节点 ID = 0x50) :

- 设置 NEW\_ID=0x50 : 50 06 00 05 00 50 94 76
- 设置 NEW\_ID=0x51 : 50 06 00 05 00 51 55 B6
- 设置 NEW\_ID=0x52 : 50 06 00 05 00 52 15 B7
- 设置 NEW\_ID=0x53 : 50 06 00 05 00 53 D4 77

##### ⚠ 重要提示

修改成功后, Modbus 地址会立即生效。主机侧后续发送时, 需要将 CURRENT\_ID 切换为新的节点 ID。若不熟悉 Modbus 报文构造, 建议使用上位机工具完成配置。

#### 6.4.6 设置安装方式 (0xA6)

配置目标安装方式	指令 (Hex) ID= 0x50 (出厂默认)
水平, Z轴朝上安装 (默认值)	50 06 00 A6 00 18 64 62
绕X轴旋转-90° (Y轴正方向朝下的垂直安装)	50 06 00 A6 00 2B 24 77
绕X轴旋转90° (Y轴正方向朝上的垂直安装)	50 06 00 A6 00 34 65 BF
绕Y轴旋转90° (X轴正方向朝上的垂直安装)	50 06 00 A6 02 08 64 CE
绕Y轴旋转-90° (X轴正方向朝下垂直安装)	50 06 00 A6 01 A5 A5 83

### 6.4.7 设置水平校准 (0xA5)

- 启动自动水平校准: 50 06 00 A5 00 02 15 A9
- 取消自动水平校准: 50 06 00 A5 00 05 54 6B

### 6.4.8 设置6轴或9轴模式 (0x06)

- 设置为6轴模式: 50 06 00 06 00 00 64 4A
- 设置为9轴模式: 50 06 00 06 00 01 A5 8A

## 6.5 读取模块版本信息 (0x70-0x82)

读取模块产品名、软件版本及SN号: 请求帧: 50 03 00 70 00 14 49 9F

字段	值	说明
Modbus节点ID	0x50	Modbus节点ID
功能码	0x03	读保持寄存器
起始地址	0x0070	产品信息起始地址
读取长度	0x0014	读取20个寄存器
CRC校验	0x9F49	-

响应帧: 50 03 28 48 49 31 34 52 32 4E 2D 34 38 35 2D 30 30 30 00 00 98 00 6B 00 00 00 00 00 00 00 00 04 7D 95 5F 8D 2A 17 08 00 00 4D 0C

字段	数据	说明
Modbus节点ID	0x50	Modbus节点ID
功能码	0x03	功能码
数据长度	0x28	返回40字节数据,一共请求读取20个寄存器,每个寄存器2字节
产品名	48 49...30 30	CH10x(M)
软件版本	0x98	V1.52
引导版本	0x6B	V1.07
序列号	047D955F8D2A1708	SN码

## 6.6 读取传感器数据 (0x34-0x4B)

请求帧: 50 03 00 34 00 18 09 8F

字段	值	说明
Modbus节点ID	0x50	Modbus节点ID
功能码	0x03	读保持寄存器
起始地址	0x0034	传感器数据起始地址
读取长度	0x0018	读取24个寄存器
CRC校验	0x8F09	-

响应帧: 50 03 30 FF 01 03 B0 06 50 FC C9 FF 7C 00 91 01 D5 FD DB FD 27 00 00 21 FF 00 00 7F F6 FF FD 73 E7 00 00 00 00 00 00 10 A6 0D 59 DD 4E 86 A8 06 30 17 82 1E CE

数据解析示例:

**加速度 (单位: G, 可取9.8m/s<sup>2</sup>) :**

轴向	寄存器值 (HEX)	原始值 (DEC)	比例因子	计算得出物理值
X	FF 01	-255	0.00048828	-0.1245
Y	03 B0	944	0.00048828	0.4609
Z	06 50	1616	0.00048828	0.7891

**角速度 (单位: deg/s) :**

轴向	寄存器值 (HEX)	原始值 (DEC)	比例因子	计算得出物理值
X	FC C9	-823	0.061035	-50.2318
Y	FF 7C	-132	0.061035	-8.0566
Z	00 91	145	0.061035	8.8501

**磁场 (单位:  $\mu$ T) :**

轴向	寄存器值 (HEX)	原始值 (DEC)	比例因子	计算得出物理值
X	01 D5	469	0.030517	14.3125
Y	FD DB	-549	0.030517	-16.7538
Z	FD 27	-729	0.030517	-22.2469

**欧拉角 (单位: deg) :**

轴向	寄存器值 (HEX)	原始值 (DEC)	比例因子	计算得出物理值
横滚 (Roll)	00 00 21 FF	8703	0.001	8.703
俯仰角 (Pitch)	00 00 7F F6	32758	0.001	32.758
航向角 (Yaw)	FF FD 73 E7	-166937	0.001	-166.937

## 7. CAN数据协议 (J1939)

支持 CAN 输出的相关产品通常默认采用 J1939 协议，严格遵循 [SAE J1939](#) 国际标准。J1939 是基于 CAN 2.0B 扩展帧格式的高层协议，广泛应用于商用车辆和工业设备的网络通信。有关 J1939 协议的更多细节可参考[这里](#)。

### 7.0.1 CAN扩展帧格式

J1939使用CAN 2.0B扩展帧格式，29位标识符结构如下：

1	位域分布 (MSB → LSB) :	
2	[28:26] Priority (P)	- 优先级 (3位)
3	[25] Reserved (R)	- 保留位 (1位)
4	[24] Data Page (DP)	- 数据页 (1位)
5	[23:16] PDU Format (PF)	- PDU格式 (8位)
6	[15:8] PDU Specific (PS)	- PDU特定 (8位)
7	[7:0] Source Address	- 源地址 (8位)

标识符计算公式：

```
1 CAN_ID = (Priority << 26) | (Reserved << 25) | (DataPage << 24) | (PF << 16) | (PS << 8) | SourceAddress
```

### 7.0.2 数据字节序 (Endianness)

**重要说明：** J1939协议采用**小端序 (Little-Endian)** 数据格式：

- **多字节数据：** 低位字节在前，高位字节在后
- **位序：** LSB (Least Significant Bit) 在低位
- **示例：** 32位整数0x12345678在CAN帧中的字节顺序为： `78 56 34 12`

### 7.0.3 CANFD 支持

本节描述 CANFD 数据输出的协议格式。具体产品是否支持 CANFD、以及当前固件是否启用 CANFD 功能，以实际产品型号和固件配置为准。

当产品支持并启用 CANFD 输出时，CANFD 帧控制域波特率与经典 CAN 2.0B 模式相同，FD 帧数据域波特率通常配置为 4Mbps，数据长度为 64 字节。

## 7.1 协议参数配置

参数项	配置值	说明
CAN波特率	500Kbps (默认)	支持125K/250K/500K/800K/1000K
帧格式	CAN 2.0B扩展帧 (29位标识符)	符合J1939标准

参数项	配置值	说明
数据长度	8字节 (经典J1939)	经典PGN数据载荷长度, CANFD数据帧请见对应章节
帧优先级	3 (默认)	范围: 0-7, 0为最高优先级
默认节点地址	8	可配置范围: 1-127, 广播地址:255
PF (PDU Format)	0xFF (专有PGN)	厂商自定义PGN范围
PS (PDU Specific)	数据类型标识	区分不同的传感器数据类型
数据格式	小端序 (LSB优先)	多字节数据低位在前
数据类型	有符号/无符号整型	根据具体PGN定义

## 7.2 PGN消息列表

本产品支持多种传感器数据的J1939 PGN消息, 所有PGN均采用厂商自定义格式 (PF=0xFF)。大多数经典J1939 PGN包含8字节数据载荷, 采用小端序编码; CANFD数据帧请见对应章节。

### 7.2.1 PGN 65327 (0xFF2F) - 时间信息

**功能描述:** 提供UTC时间信息输出, 用于状态查看或上位机解析。

**CAN标识符格式:** 0x0CFF2F[SA]

- Priority: 3 (0x0C)
- PF: 0xFF, PS: 0x2F
- SA: 源地址 (默认0x08)

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0	UTC年	uint8	0-99	年	1	20代表2020年
1	UTC月	uint8	0-12	月	1	1-12表示月份
2	UTC日	uint8	0-31	日	1	1-31表示日期
3	UTC时	uint8	0-23	时	1	24小时制
4	UTC分	uint8	0-59	分	1	分钟
5	UTC秒	uint8	0-59	秒	1	秒
6-7	UTC毫秒	uint16	0-999	ms	1	毫秒, 小端序存储

**输出示例:**

```

1  CAN ID: 0x0CFF2F08
2  数据: 18 06 12 0E 1E 2D 58 02
3  解析: 2024年6月18日 14:30:45.600 UTC

```

### 7.2.2 PGN 65332 (0xFF34) - 三轴加速度

**功能描述:** 提供三轴加速度测量数据

**CAN标识符格式:** 0x0CFF34[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-1	加速度X	int16	±32767	G	0.00048828	X轴加速度, 小端序
2-3	加速度Y	int16	±32767	G	0.00048828	Y轴加速度, 小端序
4-5	加速度Z	int16	±32767	G	0.00048828	Z轴加速度, 小端序
6-7	保留	uint16	0	-	-	保留字段, 固定为0

### 7.2.3 PGN 65335 (0xFF37) - 三轴角速度

**功能描述:** 提供三轴角速度 (陀螺仪) 测量数据

**CAN标识符格式:** 0x0CFF37[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-1	角速度X	int16	±32767	deg/s	0.061035	X轴角速度, 小端序
2-3	角速度Y	int16	±32767	deg/s	0.061035	Y轴角速度, 小端序
4-5	角速度Z	int16	±32767	deg/s	0.061035	Z轴角速度, 小端序
6-7	保留	uint16	0	-	-	保留字段, 固定为0

### 7.2.4 PGN 65341 (0xFF3D) - 俯仰横滚角

**功能描述:** 提供俯仰角和横滚角姿态信息

**CAN标识符格式:** 0x0CFF3D[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-3	横滚角 (Roll)	int32	±180000000	deg	0.001	横滚角, 小端序
4-7	俯仰角 (Pitch)	int32	±90000000	deg	0.001	俯仰角, 小端序

### 7.2.5 PGN 65345 (0xFF41) - 航向角

**功能描述:** 提供航向角 (偏航角) 信息, 支持两种表示方式

**CAN标识符格式:** 0x0CFF41[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-3	航向角 (0-360°)	uint32	0-360000000	deg	0.001	0-360°表示, 顺时针为正, 小端序

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
4-7	航向角 (±180°)	int32	±180000000	deg	0.001	±180°表示, 逆时针为正, 小端序

### 7.2.6 PGN 65338 (0xFF3A) - 三轴磁场强度

**功能描述:** 提供三轴磁场强度测量数据

**CAN标识符格式:** 0x0CFF3A[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-1	磁场强度X	int16	±32767	μT	0.030517	X轴磁场强度, 小端序
2-3	磁场强度Y	int16	±32767	μT	0.030517	Y轴磁场强度, 小端序
4-5	磁场强度Z	int16	±32767	μT	0.030517	Z轴磁场强度, 小端序
6-7	保留	uint16	0	-	-	保留字段, 固定为0

### 7.2.7 PGN 65350 (0xFF46) - 四元数

**功能描述:** 提供姿态四元数表示

**CAN标识符格式:** 0x0CFF46[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-1	四元数 qw	int16	±32767	-	0.0001	四元数实部, 小端序
2-3	四元数 qx	int16	±32767	-	0.0001	四元数i分量, 小端序
4-5	四元数 qy	int16	±32767	-	0.0001	四元数j分量, 小端序
6-7	四元数 qz	int16	±32767	-	0.0001	四元数k分量, 小端序

### 7.2.8 PGN 65354 (0xFF4A) - 倾角仪输出

**功能描述:** 专用于倾角仪产品的角度输出。

**适用范围:** 仅适用于启用 J1939 输出的倾角仪产品及固件配置

**CAN标识符格式:** 0x0CFF4A[SA]

**数据格式:**

字节位置	字段名称	数据类型	取值范围	单位	比例因子	说明
0-3	X轴倾角	int32	0-360000000	deg	0.001	X轴倾角, 可配置0-360°或±180°
4-7	Y轴倾角	int32	0-360000000	deg	0.001	Y轴倾角, 可配置0-360°或±90°

## 7.2.9 PGN 65370 (0xFF5A) - CANFD数据帧0 - IMU数据

**功能描述:** 当产品支持并启用 CANFD 输出时, 可输出 CANFD 数据帧0, 包含打包后的 IMU 数据, 帧长为 64 字节。

**适用范围:** 仅适用于支持并启用 CANFD 输出的产品及固件配置

**CAN标识符格式:** 0x0CFF5A[SA]

**数据格式:**

数据域共64字节, 包含主状态、时间戳、IMU原始数据、姿态角、四元数、温度等信息。

字节偏移	名称	数据类型	大小 (Byte)	单位	比例因子	说明
0	main_status	uint16	2	-	-	状态字, 见 MAIN_STATUS 状态字说明
2	reserved	uint8	1	-	-	保留
3	reserved	uint8	1	-	-	保留
4	system_time	uint32	4	ms	1	本地时间戳 (系统开机累计ms)
8	acc_x	int16	2	g	0.00048828	加速度X
10	acc_y	int16	2	g	0.00048828	加速度Y
12	acc_z	int16	2	g	0.00048828	加速度Z
14	gyr_x	int16	2	deg/s	0.061035	角速度X
16	gyr_y	int16	2	deg/s	0.061035	角速度Y
18	gyr_z	int16	2	deg/s	0.061035	角速度Z
20	mag_x	int16	2	uT	0.030517	磁强度X
22	mag_y	int16	2	uT	0.030517	磁强度Y
24	mag_z	int16	2	uT	0.030517	磁强度Z
26	roll	int32	4	deg	0.001	横滚角
30	pitch	int32	4	deg	0.001	俯仰角
34	yaw	int32	4	deg	0.001	航向角
38	qw	int16	2	-	0.0001	四元数w
40	qx	int16	2	-	0.0001	四元数x
42	qy	int16	2	-	0.0001	四元数y
44	qz	int16	2	-	0.0001	四元数z
46	temp	int16	2	°C	0.01	模块平均温度
48	reserved	uint8	16	-	-	保留

## 7.3 配置协议

### 7.3.1 协议格式

本产品采用基于 J1939 的配置协议, 支持主机对部分设备参数进行读写。配置消息使用专用 PGN, 并通过标准 J1939 扩展帧格式传输。

**配置帧格式:**

- **CAN标识符:** 0x0CEF[DA][SA]
- SA: 源地址, 表示发起配置请求的主机地址, 可按主机侧规划分配
- DA: 目的地址, 通常为产品节点 ID, 也可使用广播地址 255

#### 数据载荷格式:

字节位置	字段名称	数据类型	说明
0-1	ADDR	uint16	寄存器地址, 小端序
2	CMD	uint8	命令类型 (0x06=写, 0x03=读)
3	STATUS	uint8	状态字段 (写命令时为0, 读响应时为状态)
4-7	VAL	uint32	数据值, 小端序

### 7.3.2 寄存器地址映射

见 Modbus 协议章节中的寄存器列表。

### 7.4 配置示例

以下配置示例以出厂默认节点 ID 8 为例。

29'b 拓展帧地址	数据	描述	说明
0x0CEF08xx	2F 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF2F(UTC时间) 发送间隔, 单位ms, 范围:5 - 1000
0x0CEF08xx	34 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF34(加速度) 发送间隔, 单位ms, 范围:5 - 1000
0x0CEF08xx	37 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF37(角速度) 发送间隔, 单位ms, 范围:5 - 1000
0x0CEF08xx	3D 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF3D(俯仰横滚) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000
0x0CEF08xx	41 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF41(航向角) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000
0x0CEF08xx	3A 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF3A(磁强度) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000
0x0CEF08xx	46 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF46(四元数) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000
0x0CEF08xx	4A 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF4A(倾角仪输出) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000
0x0CEF08xx	5A 01 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	PGN:FF5A(CANFD帧0) 发送间隔, 单位ms, 范围:5-1000, 仅在支持并启用 CANFD 输出时有效
0x0CEF08xx	96 00 06 00 [PGN]	PGN: 4 字节	同步触发输出。例如 PGN=0xFF34 (加速度) 时, 发送 96 00 06 00 34 FF 00 00 可触发模块发送一次加速度帧。该请求无响应帧, 发送成功后模块直接输出相应数据帧

29'b 拓展帧地址	数据	描述	说明
0x0CEF08xx	A5 00 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	VAL=1 航向复位: 重置航向角为 0
			VAL=2 设置相对零点: 将当前 Pitch、Roll 角度设置为零
			VAL=3 自动校平: 自动校准到水平位置
			VAL=5 取消水平校平: 清除相对 Pitch、Roll 角度
0x0CEF08xx	9D 00 06 00 01 00 00 00	-	全局使能节点数据输出(默认)
0x0CEF08xx	9D 00 06 00 00 00 00 00	-	全局关闭节点数据输出
0x0CEF08xx	00 00 06 00 00 00 00 00	-	保存所有配置参数到 Flash
0x0CEF08xx	00 00 06 00 01 00 00 00	-	恢复模块默认用户配置, 执行后自动保存并复位
0x0CEF08xx	00 00 06 00 FF 00 00 00	-	复位
0x0CEF08xx	9A 00 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	配置波特率(保存设置, 复位生效): 0:1000K, 1:800K, 2:500K, 3:250K, 4:125K
0x0CEF08xx	9C 00 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	设置J1939 节点ID: 1-127
0x0CEF08xx	9E 00 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	设置倾角仪X轴正负方向, 0:默认 1:反向
0x0CEF08xx	9F 00 06 00 [VAL]	VAL: 4 字节	设置倾角仪Y轴正负方向, 0:默认 1:反向

#### 📄 地址说明

- 地址域中xx: J1939协议标识符的源地址(SA), 可为任意字节
- 数据域中xx: 任意字节

**示例:** ID=0x0CEF0855, DATA = 37 01 06 00 64 00 00 00: 将PGN:FF37(角速度)设置为100ms周期(10Hz)

## 7.5 时间同步

当前固件中, J1939 的 PGN 65327 (时间信息) 用于输出UTC时间信息, 不作为模块内部时钟的对时输入通道。

如需对模块时间进行UTC同步, 请使用前文“同步输入 - SYNC\_IN/PPS”章节中描述的 PPS + 串口时间消息方案。

### 7.5.0.1 使用说明

- PGN 65327 可用于读取模块当前输出的UTC时间信息;
- 当前固件不支持通过发送 J1939 时间帧来校准模块内部时钟;
- 如项目需要高精度时间同步, 请参见前文 PPS 接入与串口时间同步配置要求。

### 7.5.0.2 输出示例

以下示例表示模块通过 J1939 输出一帧时间信息, 供主机解析当前UTC时间:

```
1 CAN ID: 0x0CFF2F08
2 数据: 18 06 12 0E 1E 2D 58 02
3 解析:
4 - UTC年: 0x18 = 24 (2024年)
5 - UTC月: 0x06 = 6 (6月)
6 - UTC日: 0x12 = 18 (18日)
7 - UTC时: 0x0E = 14 (14时)
8 - UTC分: 0x1E = 30 (30分)
9 - UTC秒: 0x2D = 45 (45秒)
10 - UTC毫秒: 0x0258 = 600 (600毫秒)
```

## 8. CAN数据协议 (CANopen)

支持 CAN 接口的相关产品通常默认采用 J1939 协议栈。部分产品或交付配置支持 CANopen 从站通信，是否启用以实际产品型号和交付配置为准。CANopen 通信使用标准数据帧，常用数据通过 TPDO1/2/3/4/6/7 传输，不使用远程帧和扩展数据帧。默认配置下，TPDO 采用异步定时触发模式；如需同步模式，可参考后文“同步协议”章节。

### 8.1 CANopen 默认设置

以下默认值适用于常规交付配置，具体仍以实际产品型号和交付配置为准。

默认配置	值
CAN波特率	500 kbit/s
节点ID	8
初始化状态	Operational
TPDO输出速率	1Hz - 200Hz (每个TPDO)

### 8.2 CANopen TPDO

通道	帧ID	数据长度 (DLC)	传输方式	输出频率 (Hz)	数据	说明
TPDO1	0x180+ID	6	异步定时 (0xFE)	100	加速度	类型: int16, 低字节在前, 每个轴2字节, 共6字节 分别为X、Y、Z轴加速度, 单位为mG (0.001G)
TPDO2	0x280+ID	6	异步定时 (0xFE)	100	角速度	类型: int16, 低字节在前, 每个轴2字节, 共6字节 分别为X、Y、Z轴角速度, 单位为0.1deg/s
TPDO3	0x380+ID	6	异步定时 (0xFE)	100	欧拉角	类型: int16, 低字节在前, 每个轴2字节, 共6字节 顺序分别为横滚角 (Roll)、俯仰角 (Pitch)、航向角 (Yaw), 单位为0.01°
TPDO4	0x480+ID	8	异步定时 (0xFE)	100	四元数	类型: int16, 低字节在前, 每个元素2字节, 共8字节 分别为w,x,y,z, 单位四元数扩大10000倍后结果。如四元数为1,0,0,0时, 输出10000,0,0,0
TPDO6	0x680+ID	4	异步定时 (0xFE)	20	气压	类型: int32, 共4字节, 单位Pa
TPDO7	0x780+ID	8	异步定时 (0xFE)	100	倾角仪角度	类型: int32, 低字节在前, 每个轴4字节, 共8字节 顺序分别为X轴、Y轴, 单位为0.01°

#### 8.2.1 数据解析示例

**加速度和角速度数据解析:**

**加速度CAN帧:** ID=0x188, DATA = 4A 00 1F 00 C8 03

- ID=0x188: ID为8的设备发送的加速度数据帧
- 加速度X轴 = 0x004A = 74 = 74mG

- 加速度Y轴 =  $0x001F = 31 = 31mG$
- 加速度Z轴 =  $0x03C8 = 968 = 968mG$

**角速度CAN帧:** ID=0x288, DATA = 15 00 14 01 34 00

- ID=0x288: ID为8的设备发送的角速度数据帧
- 角速度X轴 =  $0x0015 = 21 = 2.1deg/s$
- 角速度Y轴 =  $0x0114 = 276 = 27.6deg/s$
- 角速度Z轴 =  $0x0034 = 52 = 5.2deg/s$

### 8.3 上位机连接CAN设备

使用 PCAN-View 配合 PCAN 适配器, 可在接收窗口 (Rx Message) 中查看收到的 CAN 消息及帧率, 如下图所示:

CAN-ID	Type	Length	Data	Cycle Time ^	Count
688h		4	00 00 00 00	102.6	27
488h		8	E0 26 FB 02 0E 02 1A 01	10.2	270
388h		6	48 02 7B 03 17 01	10.1	270
288h		6	00 00 00 00 00 00	10.1	270
188h		6	9B FF 94 00 BD 03	10.2	270

### 8.4 配置指令 (SDO协议)

本节常用配置指令均采用快速 SDO。若需要掉电保持, 请在配置完成后执行保存配置指令, 将参数写入 Flash。

#### 8.4.1 SDO (Service Data Object) 协议

**快速SDO格式:**

**主机发送SDO命令到从机:**

CAN_ID	CS命令符 (1B)	数据字典索引 (2B)	子索引 (1B)	数据 (4B)
0x600+ID	0x23 (写4B)	低位在前	子索引	数据, 低位在前

**从机回复SDO命令到主机:**

CAN_ID	SDO命令 (1B)	数据字典索引 (2B)	子索引 (1B)	数据 (4B)
0x580+ID	0x60 (写成功应答)	低位在前	子索引	保留

## 8.4.2 常用配置指令

### 8.4.2.1 修改节点 ID (0x209C)

指令: ID=0x608, DATA=23,9C,20,00,[ID],00,00,00

- ID修改范围: 1-127
- 如需掉电保持, 修改后请保存配置到 Flash, 并复位 (或重新上电) 使其生效

### 8.4.2.2 保存配置到 Flash (0x2000)

指令: ID=0x608, DATA=23,00,20,00,00,00,00,00

### 8.4.2.3 复位 (0x2000)

指令: ID=0x608, DATA=23,00,20,00,FF,00,00,00

### 8.4.2.4 恢复出厂设置 (0x2000)

指令: ID=0x608, DATA=23,00,20,00,01,00,00,00

**⚠ 警告** 恢复出厂设置将恢复模块默认用户配置, 执行后模块会自动保存并复位。部分校准相关参数可能保留, 请谨慎使用。

### 8.4.2.5 修改CAN波特率 (0x209A)

指令: ID=0x608, DATA=23,9A,20,00,[BAUD\_CODE]

如需掉电保持, 修改后请保存配置到 Flash, 并复位 (或重新上电) 使其生效。

- CAN波特率修改为1000 kbit/s: ID=0x608, DATA=23,9A,20,00,00,00,00,00
- CAN波特率修改为500 kbit/s: ID=0x608, DATA=23,9A,20,00,02,00,00,00
- CAN波特率修改为250 kbit/s: ID=0x608, DATA=23,9A,20,00,03,00,00,00
- CAN波特率修改为125 kbit/s: ID=0x608, DATA=23,9A,20,00,04,00,00,00

## 8.4.3 TPDO配置

以下配置操作均通过快速 SDO 写入对应数据字典, 其中 TPDO 通道与参数索引的对应关系如下:

通道	帧ID	参数索引地址	说明
TPDO1	0x180+ID	0x1800	加速度
TPDO2	0x280+ID	0x1801	角速度
TPDO3	0x380+ID	0x1802	欧拉角
TPDO4	0x480+ID	0x1803	四元数
TPDO6	0x680+ID	0x1804	气压
TPDO7	0x780+ID	0x1805	倾角仪输出

### 8.4.3.1 修改/关闭/开启数据输出速率 (0x1800-0x1805)

 **配置说明** 此项配置写入后立即生效；如需掉电保持，请另行保存配置。

#### 常用配置示例：

- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,00,00,00,00 — 关闭加速度输出 (1800.5=0)
- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,05,00,00,00 — 加速度200Hz输出 (1800.5=5)
- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,0A,00,00,00 — 加速度100Hz输出 (1800.5=10)
- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,14,00,00,00 — 加速度50Hz输出 (1800.5=20)
- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,32,00,00,00 — 加速度20Hz输出 (1800.5=50)
- ID=0x608, DATA=2B,00,18,05,64,00,00,00 — 加速度10Hz输出 (1800.5=100)

#### 角速度配置：

- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,00,00,00,00 — 关闭角速度输出 (1801.5=0)
- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,05,00,00,00 — 角速度200Hz输出 (1801.5=5)
- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,0A,00,00,00 — 角速度100Hz输出 (1801.5=10)
- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,14,00,00,00 — 角速度50Hz输出 (1801.5=20)
- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,32,00,00,00 — 角速度20Hz输出 (1801.5=50)
- ID=0x608, DATA=2B,01,18,05,64,00,00,00 — 角速度10Hz输出 (1801.5=100)

#### 欧拉角配置：

- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,00,00,00,00 — 关闭欧拉角输出 (1802.5=0)
- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,05,00,00,00 — 欧拉角200Hz输出 (1802.5=5)
- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,0A,00,00,00 — 欧拉角100Hz输出 (1802.5=10)
- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,14,00,00,00 — 欧拉角50Hz输出 (1802.5=20)
- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,32,00,00,00 — 欧拉角20Hz输出 (1802.5=50)
- ID=0x608, DATA=2B,02,18,05,64,00,00,00 — 欧拉角10Hz输出 (1802.5=100)

#### 四元数配置：

- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,00,00,00,00 — 关闭四元数输出 (1803.5=0)
- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,05,00,00,00 — 四元数200Hz输出 (1803.5=5)
- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,0A,00,00,00 — 四元数100Hz输出 (1803.5=10)
- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,14,00,00,00 — 四元数50Hz输出 (1803.5=20)
- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,32,00,00,00 — 四元数20Hz输出 (1803.5=50)
- ID=0x608, DATA=2B,03,18,05,64,00,00,00 — 四元数10Hz输出 (1803.5=100)

## 气压配置:

- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,00,00,00,00 — 关闭气压输出 (1804.5=0)
- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,05,00,00,00 — 气压200Hz输出 (1804.5=5)
- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,0A,00,00,00 — 气压100Hz输出 (1804.5=10)
- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,14,00,00,00 — 气压50Hz输出 (1804.5=20)
- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,32,00,00,00 — 气压20Hz输出 (1804.5=50)
- ID=0x608, DATA=2B,04,18,05,64,00,00,00 — 气压10Hz输出 (1804.5=100)

**配置示例说明** 以 TPDO1 (加速度) 输出速率为 100 Hz (每 10 ms 输出一次) 为例: 0x23 表示 SDO 写入 4 字节, 0x00 0x18 对应索引 0x1800, 0x05 为子索引, 0x0A 0x00 表示周期值 10 (单位 ms), 剩余字节补 0。

### 8.4.3.2 设置倾角仪零点 (0x20A5)

- ID=0x608, DATA=23,A5,20,00,02,00,00,00 — 写入后即设置当前位置为输出零点 (X=0, Y=0)
- ID=0x608, DATA=23,A5,20,00,05,00,00,00 — 写入后取消零点配置, 输出真实的X、Y角度 (相当于X、Y offset=0)

## 8.4.4 同步协议

模块支持将各个 TPDO 配置为同步模式。启用后, 模块停止异步定时发送, 转而等待 CANopen 同步帧; 当同步帧到来时, 再发送一帧对应的 TPDO 数据。

### 8.4.4.1 配置TPDO为同步模式

如需将某个 TPDO 配置为同步模式, 可将对应 TPDO 通讯参数字典 [0x180x.2] (Transmission type) 设置为 0x01。相关字段定义请参考标准 CANopen 协议说明。

#### 以TPDO1 (加速度信息) 为例:

- ID=0x608, DATA=2F,00,18,02,01,00,00,00 — 写入 [0x1800.2] = 1, 将 TPDO1 通讯模式设置为同步模式
- ID=0x608, DATA=2F,00,18,02,FF,00,00,00 — 写入 [0x1800.2] = 0xFF, 将 TPDO1 通讯模式设置为异步模式 (出厂默认)

### 8.4.4.2 发送CANopen同步帧

发送 CANopen 同步帧: ID=0x80, DATA 为空

模块接收到同步帧后, 所有配置为同步模式的TPDO会发送一帧数据, 实现同步。

### 8.4.4.3 设置心跳包

心跳包周期通过写入 [0x1017.0] 设置, 有效范围 0~65535, 单位为 ms。其中 0 表示禁用心跳包。

**示例:** ID=0x608, DATA=2B,17,10,00,64,00,00,00 — 设置心跳包周期为100ms

## 9. 地磁校准

### 9.1 地磁校准适用场景

9 轴模式（磁辅助绝对航向角模式）建议在满足以下条件时使用：

1. 首次使用 9 轴模式前，至少进行一次用户地磁校准
2. 使用环境中不存在明显空间磁场干扰；建议在室外空旷处校准，室内复杂磁环境下难以保证校准效果
3. 模块与安装载体（PCB、外壳、机器人等）的相对位置在使用过程中保持固定

### 9.2 地磁校准步骤

当首次使用模块且需要使用 AHRS（9 轴）模式时，应按以下步骤进行校准操作：

#### 9.2.1 1. 模式切换

先将模块切换到 9 轴模式，详见“工作模式配置”章节。

#### 9.2.2 2. 环境检查

**常见磁场干扰源：** 铁质家具、电脑显示器、电机与变压器、手机充电器、建筑钢筋结构等。

**推荐校准环境：**

- 最佳：室外空旷场地，远离建筑物和车辆（距离 > 5m）
- 可接受：室内远离干扰源的区域（距离 > 30cm）

#### ⚠ 重要提示

如果模块已安装在产品的 PCB 上，或产品具有磁性外壳，或已安装在机器人/机械设备上，**必须将这些与模块固联的物体视为一个整体进行校准**。单独校准模块后再安装到产品中无法达到校准效果。

#### 9.2.3 3. 校准操作

**发送校准指令：** `CONFIG MCAL START`（需固件版本  $\geq 1.7.0$ ）

**执行校准动作：**

1. 在尽量小的空间范围内保持位置基本不变，仅缓慢旋转模块
2. 每个轴至少旋转 `360°`（建议 `2~3` 圈），速度保持均匀，推荐 `20~100 deg/s`（约 `5~20` 秒转一圈），避免中途停顿
3. 校准时间通常需要 `30~60 s`

**建议旋转方案：** 绕X轴旋转2圈 → 绕Y轴旋转2圈 → 绕Z轴旋转2圈，或随机旋转确保每个轴都经历充分的角度变化

#### 9.2.4 4. 校准状态查询

发送指令： LOG MCAL STAT

返回示例：

```
1  STAT=1
2  PROGRESS=8
3  OK
```

#### 状态字段STAT

STAT值	状态说明	操作建议
0	当前空闲	可以开始新的校准
1	正在校准中	继续旋转模块，等待校准完成
2	正在验证结果	保持静止，等待验证完成
3	校准已完成	校准成功，可以正常使用
4	校准失败	参考故障排查流程，重新校准

**PROGRESS**：范围 0~100，表示当前校准进度百分比。当 PROGRESS=100 且 STAT=3 时，表示校准成功。

#### 9.2.5 5. 校准结果验证

1. 校准完成后，水平放置模块，缓慢旋转一周 (360°)
2. 观察航向角输出：理想情况下应连续变化 0°~360° 且无跳变，可接受误差在 ±5° 以内
3. 若出现大角度跳变 (> 10°) 或航向角不随旋转变化的，请参考下文“校准故障排查流程”

### 9.3 校准故障排查流程

当校准失败 (STAT=4) 或验证结果异常时，按以下步骤排查：

#### 步骤1：检查环境磁场强度

在校准位置静止放置模块，读取磁场强度 ( mag\_b 字段)，计算磁场总强度： $B_{total} = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}$ 。

磁场强度	环境评估	处理建议
20-60 μT	正常	可以继续校准
< 20 μT 或 > 60 μT	异常	检查是否靠近强磁性物体，远离磁场干扰源，必要时更换位置

**步骤2：检查旋转动作** - 确保每个轴至少旋转 360°，速度保持在 20~100 deg/s，避免停顿

**步骤3：检查空间磁场干扰** - 在同一位置、不同朝向测量磁场强度。若变化 > 10 μT，说明存在空间磁场干扰，需更换位置或改用 6 轴模式

## 9.4 常见问题及解决方案

失败原因	典型现象	解决方案
环境磁场干扰过大	STAT=4或航向角跳变	更换校准环境至室外空旷处
旋转动作不规范	PROGRESS增长缓慢或停滞	确保每个轴充分旋转，速度均匀
旋转时位置移动	校准完成但精度差	校准时保持位置固定，仅旋转姿态
模块与载体位置变化	重新安装后航向角误差增大	将模块与载体作为整体重新校准

## 9.5 重要提醒

**⚠ 警告1：室内磁场环境限制** - 室内空间磁场干扰严重且无法通过校准消除，地磁辅助（9轴）模式航向角精度很大程度上取决于室内磁场畸变程度。

**⚠ 警告2：室内使用建议** - 若室内磁场环境较差（电脑机房、实验室、车间、地下车库等），即使校准成功，航向角精度可能仍不如6轴模式，甚至会出现大角度误差（ $>10^\circ$ ）。**建议在室内环境下优先使用6轴模式。**

**⚠ 警告3：固定安装要求** - 若安装环境存在磁场干扰，该干扰源必须与模块保持固定相对位置。模块安装在导磁刚体（机器人/机械设备/车辆/船舶/三脚架/PCB板等）之上时，需要将整个系统一起旋转校准。模块在使用过程中不应与被安装体发生相对位移，一旦分离需要重新校准。

**⚠ 警告4：电机振动影响** - 机器人电机运行时产生的振动和磁场干扰可能影响校准效果。建议在电机停止状态下进行校准，或在实际工作状态下校准（将电机磁场视为固定干扰源）。

## 9.6 校准频率与模式选择

### 校准频率建议：

- 固定安装且环境稳定时，首次校准 1 次即可；
- 移动应用在每次更换环境后建议重新校准；
- 模块与载体相对位置发生变化时应重新校准；
- 长期使用（ $>1$  年）建议每年校准 1 次；
- 出现异常航向角误差时应立即重新校准。

### 模式选择建议：

应用场景	推荐模式	原因
室外空旷环境（无人机等）	9轴模式	磁场干扰小，可获得绝对航向角
室内环境（AGV、机器人等）	6轴模式	室内磁场干扰大，6轴模式更稳定
靠近电机/电磁设备	6轴模式	电磁干扰无法通过校准消除
需要绝对航向角	9轴模式	必须确保环境磁场稳定且完成校准
仅需相对航向角	6轴模式	6轴模式航向角上电为0，适合相对测量

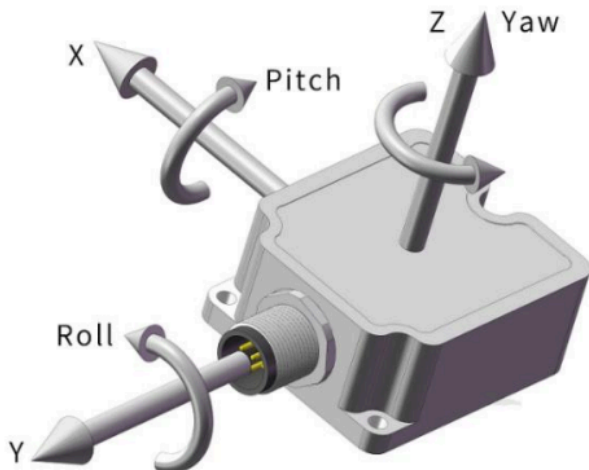
## 10. 附录1 四元数/欧拉角/旋转矩阵互转

### 10.1 四元数转旋转矩阵

给定四元数  $Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ , 方向余弦矩阵为:

$$C_{b2n} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

### 10.2 四元数转欧拉角 - 东北天(ENU)-312(先转Z,然后X轴,最后Y轴)旋转顺序下的欧拉角



给定四元数  $Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ , 其中  $q_0$  为标量部分,  $[q_1, q_2, q_3]$  为矢量部分。  $Q_{b2n}$  代表b系到n系的坐标旋转四元数: 其中:

- pitch( $\theta$ ): 绕X轴的旋转角度, 范围  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
- roll( $\varphi$ ): 绕Y轴的旋转角度, 范围  $[-\pi, \pi]$
- yaw( $\psi$ ): 绕Z轴的旋转角度, 范围  $[-\pi, \pi]$

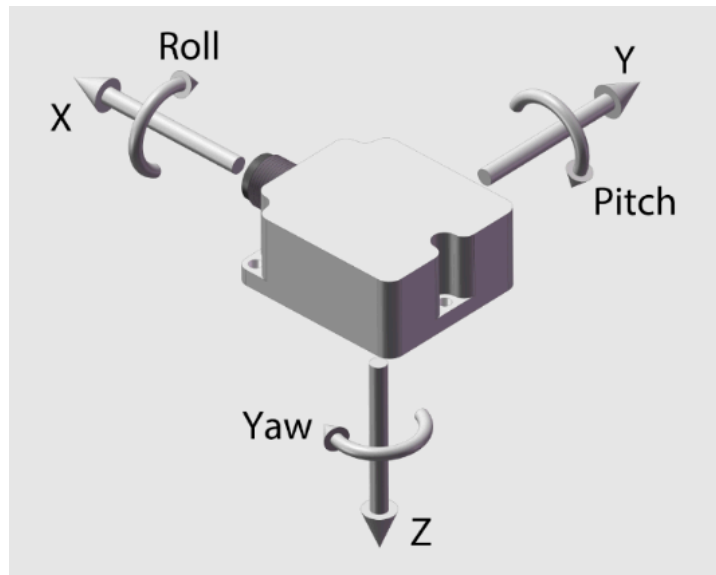
四元数转欧拉角:

$$\begin{aligned} pitch &= \arcsin(2(q_0q_1 + q_2q_3)) \\ roll &= -\arctan 2(2(q_1q_3 - q_0q_2), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \\ yaw &= -\arctan 2(2(q_1q_2 - q_0q_3), q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) \end{aligned}$$

欧拉角转四元数:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) - \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) - \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) \sin\left(\frac{roll}{2}\right) + \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) + \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) \end{bmatrix}$$

### 10.3 四元数转欧拉角 - 北东地(NED)-321(先转Z轴,然后Y轴,最后X轴)旋转顺序下的欧拉角



给定四元数  $Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ , 其中  $q_0$  为标量部分,  $[q_1, q_2, q_3]$  为矢量部分。  $Q_{b2n}$ 代表b系到n系的坐标旋转四元数: 其中:

- pitch( $\theta$ ): 绕Y轴的旋转角度, 范围  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
- roll( $\varphi$ ): 绕X轴的旋转角度, 范围  $[-\pi, \pi]$
- yaw( $\psi$ ): 绕Z轴的旋转角度, 范围  $[-\pi, \pi]$

四元数转欧拉角:

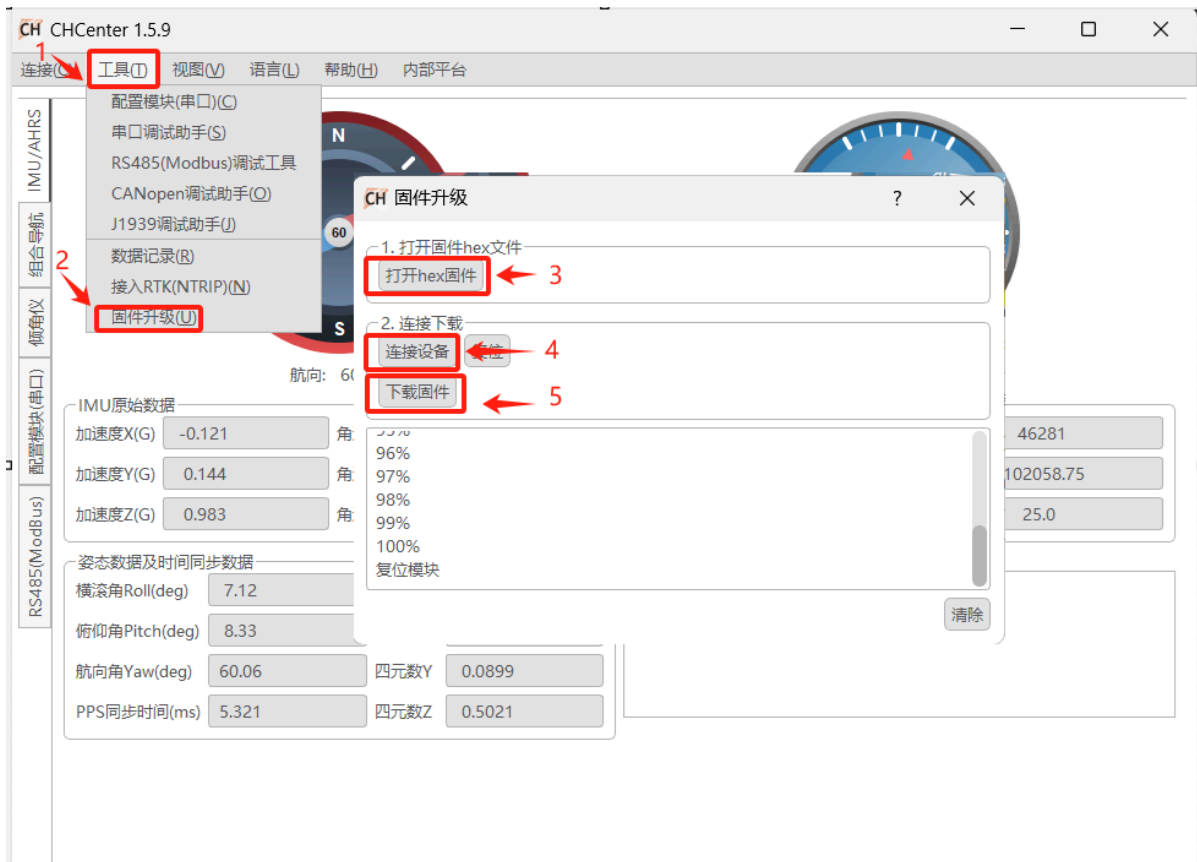
$$\begin{aligned} roll &= \arctan 2(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ pitch &= \arcsin(2(q_0q_2 - q_1q_3)) \\ yaw &= \arctan 2(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{aligned}$$

欧拉角转四元数:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) + \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) - \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) + \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) - \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) \end{bmatrix}$$



## 11. 附录2 固件升级

本产品支持固件升级。请使用 CHCenter 上位机软件按下图步骤进行升级；固件升级文件（.hex）请联系技术支持获取。



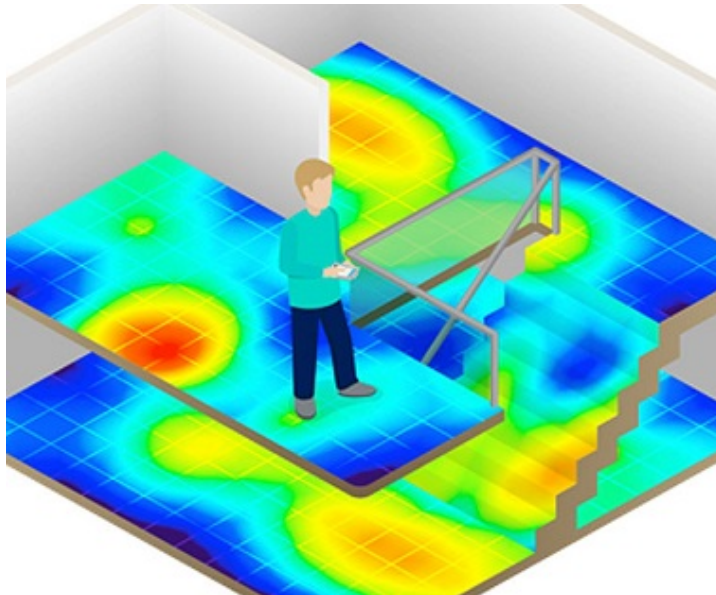
## 12. 附录3 关于磁干扰的更多知识

磁干扰可分为空间磁场干扰与传感器坐标系下的磁场干扰，如下图所示：

Distortions that move with the sensor	Distortions that do not move with the sensor
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibration errors</li> <li>• Hard iron effects</li> <li>• Soft iron effects</li> <li>• Etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spatial distortions</li> <li>• Temporal distortions</li> <li>• Etc.</li> </ul>

磁干扰类型	随传感器坐标系的磁场干扰 (硬磁干扰/软磁干扰)	空间磁场干扰
<b>特点</b>	干扰源随传感器运动而运动	干扰源不随传感器运动而运动
<b>典型干扰源</b>	与模块固定在一起的PCB、金属外壳、无人机等	家具、家用电器、线缆、房屋内的钢筋结构等
<b>校准可能性</b>	可以	不可能
<b>抗干扰措施</b>	可以通过用户磁校准过程消除	无论如何校准都无法消除，会严重影响航向角误差

**空间磁场干扰说明** 空间磁场干扰是造成室内地磁融合难以稳定使用的主要原因。这类干扰无法通过校准消除，会显著增大航向角误差。在室内环境中，尤其是靠近桌椅、家电等区域时，这类干扰通常更明显。



**图例说明** 上图展示了典型的室内空间磁场干扰分布：蓝色表示弱干扰区，红色表示强干扰区。

## 13. 附录5 技术支持

新产品与资料信息可通过官方网站及公众号获取。

微信：



Telegram:

