



战术级 MEMS 6 自由度惯性传感器

FSS-IMU16460-B 产品手册

特性

战术级 MEMS 陀螺仪

- $2.0^{\circ}/\text{hr}$ 零偏不稳定性
- $0.3^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$ 角度随机游走
- $0.03^{\circ}/\text{s}$ 温漂 ($-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$, $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ @ 1σ)

战术级 MEMS 加速度计

- $20\mu\text{g}$ 零偏不稳定性
- $0.05\text{ m/s}/\sqrt{\text{hr}}$ 速度随机游走
- 0.5 mg 温漂 ($-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$, $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ @ 1σ)

大范围精细化温度补偿

- -40°C 至 85°C 温度补偿
- 精细化温度标定

独立转台标定

- 独立标定每个模块：灵敏度、零偏、非正交误差

高强度工况耐受

- 超强冲击耐受：2000g (0.5ms, 半正弦, 3 轴)
- 超强振动耐受：10g (10~2KHz, 3 轴)
- 全温环境稳定工作： $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
- 100%磁屏蔽

实时而灵活的数字接口、体积小巧

- 高达 1KHz 的可配置输出采样率
- 支持串口、SPI 多种接口
- $22.4 \times 24.05 \times 9.0\text{mm}$, 重量 8.6g

产品概述

FSS-IMU16460-B 是原极科技倾力打造的 6 自由度 MEMS 惯性传感器模块。标配输出三轴陀螺仪与加速度信息。

高精度、高分辨率, 可捕捉细微的震动与倾斜。大量程的输出, 让大动态下的动作感知成为可能。所有模块出厂前都配置超宽温域的精细化温补与独立标定, 让每个模块都能在各种极限工况下稳定发挥, 同时保证所有产品性能高度一致。

应用领域

- 自动驾驶：车载、机器人、工程车、水下
- 精密测量：井下、隧道、震动、倾斜
- 稳定平台：云台、动中通、
- 自动控制：自控系统、固定翼无人机

在标准性能及输出参数的基础上, 原极也为您的特殊需求提供定制化软件及 LOGO 定制服务, 在产品上助您一臂之力!



目录

1. 性能参数	1
1.1 陀螺仪关键指标	1
1.2 加速度计关键指标	2
2. 外形结构	4
3. 电气特性	5
3.1 最大耐受值	5
3.2 工作条件	5
3.3 IO 阈值特性	5
4. 引脚定义	6
5. 通信协议	7
5.1 串口通信协议	7
5.1.1 串口接口参数	7
5.1.2 数据包格式	7
5.1.3 数据流帧——AHRS 数据	8
5.1.4 命令模式 GET 输出——系统状态	9
5.1.5 命令模式 GET 输出——读取参数	9
5.1.6 命令模式 SET 指令	10
5.1.7 命令模式输出——用户命令响应	12
5.1.8 DRDY	14
5.1.9 坐标系设置功能	15
5.1.9 串口连接常见问题	17
5.2 SPI 通信协议	18
5.2.1 SPI 接口参数	18
5.2.2 SPI 连接示意图	19
5.2.3 SPI 通信位序	19
5.2.4 SPI 寄存器	20
6. 坐标系定义	24
7. CRC 查表法计算	25
8. 使用示例	27
8.1 设备安装	27
8.2 连接上位机示例	29
9. 选配附件	30
10. 更新记录	31

1. 性能参数

1.1 陀螺仪关键指标

表 1 陀螺仪关键指标

参数	测试条件/备注	最小值	典型值	最大值	单位
测量范围			±500		° /s
零偏不稳定性 ¹	@25°C, ALLAN 方差, 1σ		2.0		° /hr
零偏稳定性	国军标, 10s 平滑		5		° /hr
零偏重复性	国军标		0.5		° /s
分辨率			0.0076		° /s
g 值灵敏度			/		° /h/g
轴间非正交			0.02		deg
内部低通截止频率	软件可调整		116		Hz
ODR			1000		Hz
测量延时			7		ms
全温范围零偏变化 ²	-40°C~85°C, ≤1°C/min @1σ		0.03		° /s
随机游走 X 轴 ¹	@25°C, ALLAN 方差, 1σ		0.4		° /√hr
随机游走 Y 轴			0.4		° /√hr
随机游走 Z 轴			0.3		° /√hr
刻度系数误差			2.5		‰
刻度系数非线性			200		ppm

注 1: IEEE 标准, 在静态 25°C 环境下 Allan 方差曲线给出

注 2: 1°C/分钟升温情况下全温零偏变化 1σ 值

1.2 加速度计关键指标

表 2 加速度计关键指标

参数	测试条件/备注	最小值	典型值	最大值	单位
测量范围			±6		g
零偏不稳定性 ¹	@25°C, ALLAN 方差, 1σ		20		μg
零偏稳定性	国军标, 10s 平滑		40		μg
零偏重复性	国军标		10		mg
分辨率			0.0916		mg
轴间非正交			0.02		deg
内部低通截止频率	软件可调整		116		Hz
ODR			1000		Hz
测量延时			7		ms
全温范围零偏变化 ²	-40°C~85°C, ≤1°C/min @1σ		xy: 0.5 z: 2		mg
随机游走 ¹	@25°C, ALLAN 方差, 1σ		0.05		m/s/√hr
刻度系数误差			0.5		‰
刻度系数非线性			200		ppm

注 1: IEEE 标准, 在静态 25°C 环境下 Allan 方差曲线给出

注 2: 1°C/分钟升温情况下全温零偏变化 1σ 值

图 1 陀螺仪 ALLAN 方差典型曲线

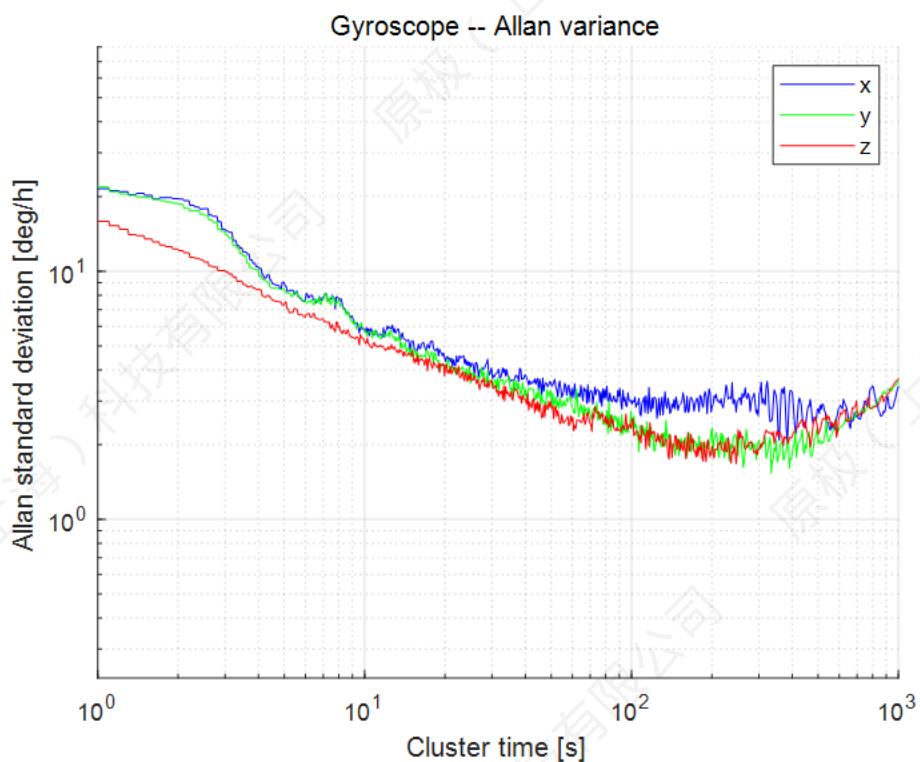
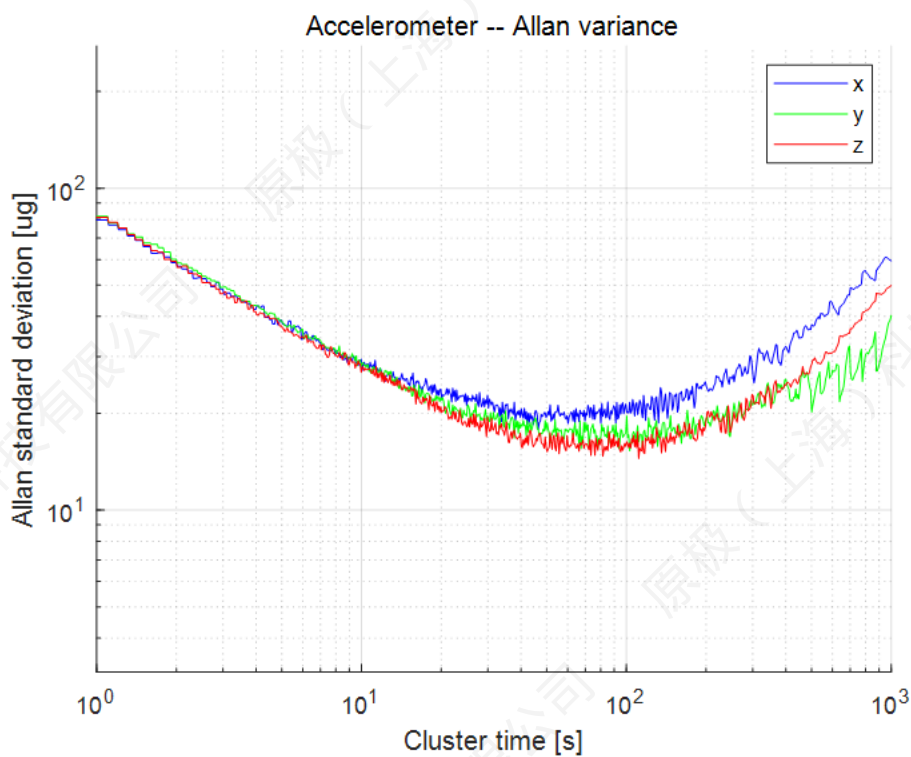
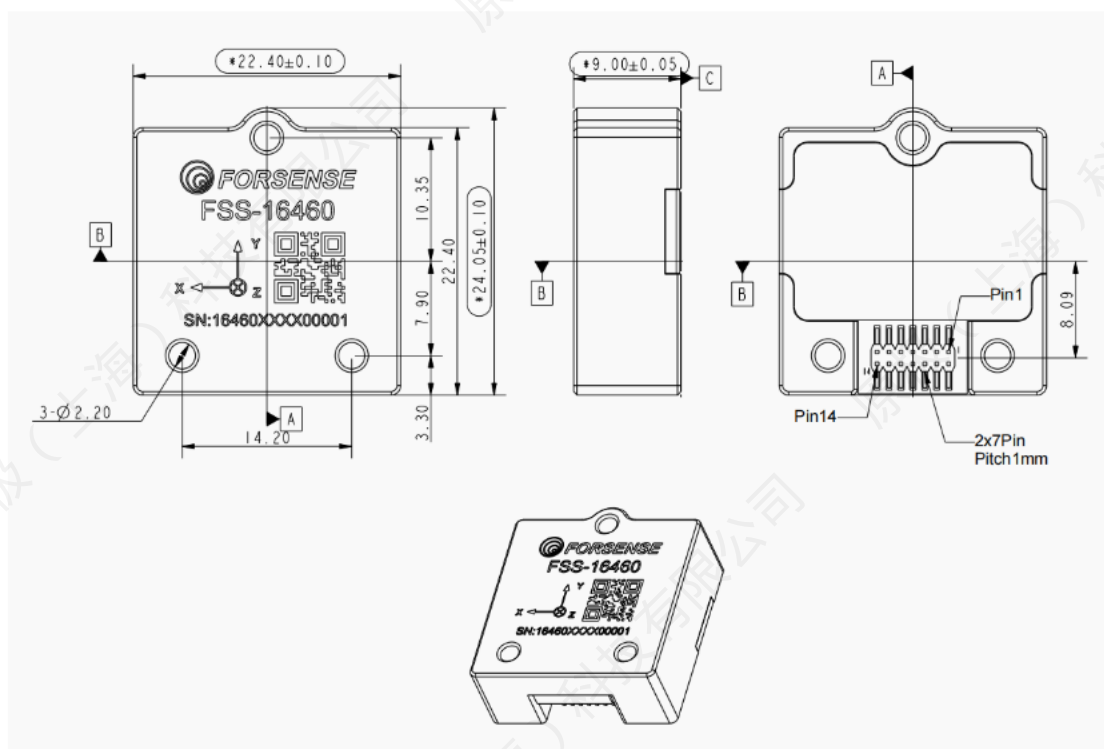


图 2 加速度计 ALLAN 方差典型曲线



2. 外形结构

图 3 外形结构及尺寸（单位：mm）



3. 电气特性

3.1 最大耐受值

表 3 最大额定绝对值

参数	符号	范围	单位
供电电压	VCC	-0.3 to 4.0	V
电源地	GND	-	-
输入管脚电压	Vin	-0.3 to VCC+0.2	V
使用温度	Tot	-40 to 85	°C
存储温度	Tstg	-40 to 85	°C

3.2 工作条件

表 4 工作条件

参数	符号	最小值	典型值	最大值	单位
供电电压	VCC	3.2	3.3	3.4	V
VCC 最大纹波	Vrpp		±40		mV
功耗	P		0.17		W
使用温度	Tot	-40		85	°C
存储温度	Tstg	-40		85	°C

3.3 I/O 阈值特性

表 5 I/O 阈值特性

参数	符号	最小值	典型值	最大值	单位
输入管脚低电平	Vin_low	0		VCC*0.2	V
输入管脚高电平	Vin_high	VCC*0.7		VCC+0.2	V
输出管脚低电平	Vout_low	0		0.45	V
输出管脚高电平	Vout_high	VCC-0.45		VCC	V

4. 引脚定义

图 4 引脚示意图

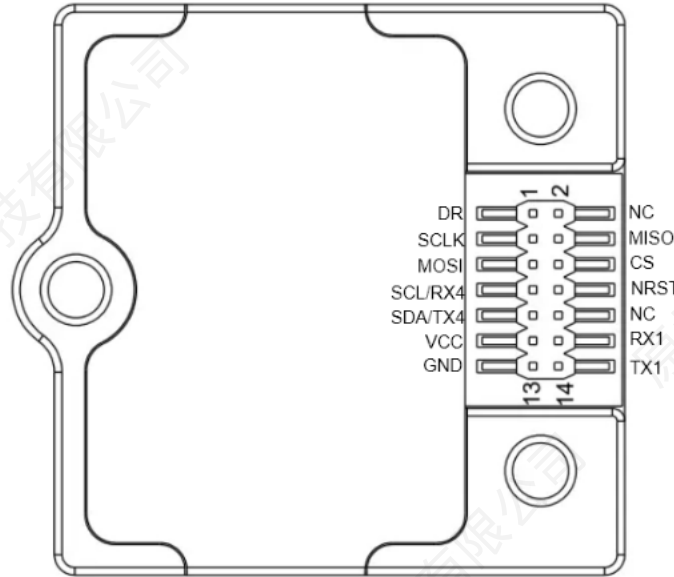


表 6 引脚定义

引脚序号	引脚名称	引脚描述
1	DRDY	Data Ready
2	NC	不连接
3	SCLK	SPI 串行时钟
4	MISO	SPI 串行数据输出
5	MOSI	SPI 串行数据输入
6	CS	SPI 片选
7	SCL/RX4	I2C 时钟/接收异步数据输入
8	NRST	外部硬件复位输入，内部上拉(用于 SPI 模式)
9	SDA/TX4	I2C 数据/接收异步数据输出
10	NC	不连接
11	VCC	电源输入，+3.3V 输入
12	RX1	接收异步数据输入(数据通信接口(LVTTL))
13	GND	电源地
14	TX1	接收异步数据输出(数据通信接口(LVTTL))

注 1: 主机初始化时需使用/RST 将 IMU 硬件复位一次

5. 通信协议

5.1 串口通信协议

基于 QT、ROS 和 STM32 的串口协议示例：

<https://data.forsense-imu.com/page/download.html>

串口通信具有两种模式：数据流模式(Stream Mode)和命令模式(Command Mode)，IMU 在上电初始化完成后，根据参数配置的模式值进入对应模式。

数据流模式：以固定频率周期性输出 AHRS 数据；

命令模式：在此模式下，停止周期性输出，用户通过发送命令与 IMU 进行通信，可通过 GET 指令获取传感器数据、状态、参数等，也可配置 IMU 的参数。

5.1.1 串口接口参数

表 7 串口接口参数

传输速率范围	115200bps ~ 1.5Mbps
默认传输速率	115200bps
开始位	1 bit
数据位	8 bits
停止位	1 bit
奇偶校验	无

5.1.2 数据包格式

IMU 输出和用户输入的数据包结构组成如下：

表 8 IMU 输出和用户输入数据结构

偏移量	数据类型	名称	描述
0	uint8	帧头 1	IMU 输出帧头：0xAA, 0x55 用户输入帧头：0x55, 0xAA
1	uint8	帧头 2	
2	uint16	ID 低位	串口通信帧 ID 的低位字节
3		ID 高位	串口通信帧 ID 的高位字节
4	uint16	数据长度低位	串口通信帧长度的低位字节，length 为 payload 所占字节数，即为 n
5		数据长度高位	串口通信帧长度的高位字节，length 为 payload 所占字节数，即为 n
6	uint8	Payload (n 个字节)	数据负载
6+n	Uint32	CRC_CHECK (32 位数据低字节)	CRC 校验
7+n		CRC_CHECK (32 位数据中低字节)	
8+n		CRC_CHECK (32 位数据中高字节)	
9+n		RC_CHECK (32 位数据高字节)	

注 1：数据以小端格式传输，低字节在前，高字节在后

注 2：crc32 的初值为 1，CRC 计算不包括本身的帧所有数据，查表算法见文档末尾

5.1.3 数据流帧——AHRS 数据

表 9 串口 AHRS 数据格式

	帧头	帧头	ID	length	payload	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	A1	uint32
编码	0xAA	0x55	0x0002	0x002C		crc32

注 1：最大输出更新率不大于 200Hz@115200bps

表 10 串口 A1 负载数据格式

offset	名称	数据类型	单位	描述
0	timer	uint32	μs	时间标
4	pitch	float	$^{\circ}$	俯仰角
8	roll	float	$^{\circ}$	横滚角
12	yaw	float	$^{\circ}$	航向角
16	ax	float	g	X 轴加速度
20	ay	float	g	Y 轴加速度
24	az	float	g	Z 轴加速度
28	gx	float	$^{\circ}/s$	X 轴角速度
32	gy	float	$^{\circ}/s$	Y 轴角速度
36	gz	float	$^{\circ}/s$	Z 轴角速度
40	temp	float	$^{\circ}C$	IMU 芯片温度

例：获取到 AHRS 数据流：

AA 55 02 00 2C 00 6D 89 16 05 8F C2 65 40 14 AE 07 BF 5C 0F B2 43 25 06 81 3D BC
74 13 3C 60 E5 80 BF EC 51 38 BD 0A D7 A3 BB CD CC CC BC D7 A3 EE 41 0C BF 84 80

解析如下：

表 11 串口 A1 获取到 AHRS 数据流

描述	原始值	解析值	描述	原始值	解析值
ID	0200	02	Y 轴加速度	BC74133C	0.009g
长度	2C00	44	Z 轴加速度	60E580BF	-1.007g
时间标	6D891605	85363053	X 轴角速度	EC5138BD	-0.045 $^{\circ}/s$
俯仰角	8FC26540	3.59 $^{\circ}$	Y 轴角速度	0AD7A3BB	-0.005 $^{\circ}/s$
横滚角	14AE07BF	-0.53 $^{\circ}$	Z 轴角速度	CDCCCCBC	-0.025 $^{\circ}/s$
航向角	5C0FB243	356.12 $^{\circ}$	IMU 芯片温度	D7A3EE41	29.83 $^{\circ}C$
X 轴加速度	2506813D	0.063g	crc32 校验	0CBF8480	2156183308

5.1.4 命令模式 GET 输出——系统状态

表 12 串口系统状态数据格式

	帧头	帧头	ID	length	payload	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	S1	uint32
编码	0xAA	0x55	0x00FF	0x002A		crc32

注 1：不同 IMU 型号，此帧的长度会有差别，都代表 S1 的长度，需要根据 IMU 型号确认。

表 13 串口 S1 负载数据格式

offset	名称	数据类型	描述
0	Software_ver	uint32	软件版本号
4	Hardware_ver	uint32	硬件版本号
8	rev	uint16	保留字节
10	sn0	uint32	第一 SN 号
14	sn1	uint32	第二 SN 号
18	sn2	uint32	第三 SN 号
22	Board_version	uint32	底板版本号
26	Rev[16]	Uin8	后续都是保留字节

注 1：不同 IMU 型号，后续保留字节也不同，需要根据 IMU 型号进行确认，IMU614E 为 16 字节。

例：获取系统状态

输入数据：55 AA 01 00 18 00 BD DB 31 34

响应数据：AA 55 FF 00 2A 00 1F 39 03 00 65 6F 01 00 50 83 30 33 35 55 34 50 15 FF 8F 5F FF FF 50 83 FF 1F 29 00 00 00 00 E0 00 07 10 17 08 50 D0 37 10 3B 7A C3 00 02

根据响应数据，解析得到软件版本号 211231 (1F 39 03 00)，硬件版本号 94053 (65 6F 01 00)。

5.1.5 命令模式 GET 输出——读取参数

表 14 串口参数输入数据格式

	帧头	帧头	ID	length	payload	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	P1	uint32
编码	0x55	0xAA	0x0006	0x0018		crc32

表 15 串口参数输出数据格式

	帧头	帧头	ID	length	payload	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	P1	uint32
编码	0xAA	0x55	0x7530	0x0018		crc32

注 1：读取参数时，IMU 会将数据流关闭，设置完毕后需要重新开启数据流。

表 16 串口 P1 负载数据格式

offset	名称	数据类型	描述
0	Param1	float	获取的参数（输入数据可无视）
4	Param2	float	保留，默认为 0
8	Param3	uint32	设置的参数索引
12	Param4	uint32	保留，默认为 0
16	Param5	Int32	保留，默认为 0
20	Param6	Int32	保留，默认为 0

表 17 串口 P1 负载参数索引表

Param3	Param1	单位
3	串口输出波特率，支持以下波特率 115200、230400、460800、921600、1500000	bps
4	坐标系朝向（见表 24 坐标系朝向对应表）	
8	X 轴陀螺零偏标定结果，GYRO_X_OFF	° /s
9	Y 轴陀螺零偏标定结果，GYRO_Y_OFF	° /s
10	Z 轴陀螺零偏标定结果，GYRO_Z_OFF	° /s
21	AHRS 输出频率，默认 100Hz	Hz
31	内部滤波器配置，定义同 SPI 的 FILTER_CTRL 对照表	

例：获取 AHRS 输出频率

输入数据：55 AA 06 00 18 00 00 00 00 00 00 00 00 00 15 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 66 CB 46 AC

响应数据：AA 55 30 75 18 00 00 00 48 42 00 00 00 00 15 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 31 2F A2 0A

根据响应数据，解析得到输出频率为 50hz（00 00 48 42）。

5.1.6 命令模式 SET 指令

表 18 串口输入命令格式

	帧头	帧头	ID	length	payload	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	R1	uint32
编码	0x55	0xAA	CMD	0x0018		crc32

注 1：CMD 与 R1 关系，详见 R1 负载参数索引表

表 19 串口 R1 负载数据格式

offset	名称	数据类型	描述
0	Param1	float	设置的参数
4	Param2	float	保留，默认为 0
8	Param3	uint32	设置的参数索引
12	Param4	uint32	保留，默认为 0
16	Param5	Int32	保留，默认为 0
20	Param6	Int32	保留，默认为 0

表 20 串口 R1 负载参数索引表

CMD	Param1	Param3	描述
1	0	0	触发获取一次系统状态数据
2	0	0	触发获取一次 AHRS 数据
3	<mode>	0	设置输出模式： Mode=1, 数据流输出 AHRS Mode=100, 禁止数据流模式, 进入 COMMAD 模式
5	0	0	保存当前参数到 FLASH
6	0	<value>	读取参数, value 为要读取的参数索引, 即 P1.index, 详见串口应答性输出-参数读取 例如需读取 AHRS 输出频率 (ODR), 则设置 value=21 例如需读取串口波特率, 则设置 value=3 例如需读取内部滤波器, 则设置 value=31 例如需读取坐标系方向, 则设置 value=4
9	0	0	执行软件重启
14	<value>	3	设置串口输出波特率, 单位 bps value 的有效值为: 115200, 230400, 460800, 921600, 1500000 value 为其他值时, 默认采用 115200bps 设置波特率参数后, 需要重启才能生效。 不断电的设置流程: 设置波特率, 保存参数到 flash, 执行软件复位
14	<value>	21	设置周期性 AHRS 数据输出频率, 单位 Hz value 的常用 值为: 1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 输出频率与串口波特率的推荐对应关系 1000Hz: 921600bps 500Hz: 460800bps 250Hz: 460800bps 200Hz: 460800bps 100Hz: 115200bps
14	<value>	31	内部滤波器配置, 定义同 SPI 加速度计和陀螺仪滤波器配置, 默认 0xBB, 即 47Hz
14	<value>	4	设置 IMU 坐标系朝向, value 的取值范围为 101~124, 具体 坐标系朝向对应关系见表 24

注 1: 请注意本表中数值均为十进制

注 2: 可使用上位机命令生成器功能生成对应命令发送, 使用方法见本手册上位机使用部分



CMD ID 填入 3，参数 1 填入 1，生成的十六进制数组可以填入串口助手或程序数组中发送给 IMU。

图 5 命令生成器生成 AHRS 输出指令

[illegible]

5.1.7 命令模式输出——用户命令响应

表 21 设置参数串口响应数据格式

	帧头	帧头	ID	length	ACK	Param3	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	uint16	uint16	uint32
编码	0xAA	0x55	0x753D	0x0004	0x7534	参数索引	crc32

表 22 保留参数串口响应数据格式

	帧头	帧头	ID	length	ACK	result	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	uint16	uint16	uint32
编码	0xAA	0x55	0x753D	0x0004	0x0005	0x01	crc32

表 23 串口用户命令响应数据格式

	帧头	帧头	ID	length	command	result	帧尾
数据类型	uint8	uint8	uint16	uint16	uint16	uint16	uint32
编码	0xAA	0x55	0x0064	0x0004	命令 ID	0x01	crc32

响应数据: AA 55 3D 75 04 00 34 75 03 00 A7 98 2A 54

设置周期性 AHRS 数据输出频率 100hz

输入数据: 55 AA 0E 00 18 00 00 00 C8 42 00 00 00 00 15 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 00 00 0A 2B 2C 8D

响应数据: AA 55 3D 75 04 00 34 75 15 00 70 2D B2 48

保存当前参数到 FLASH

输入数据: 55 AA 05 00 18 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 00 00 C9 2F E6 32

响应数据: AA 55 3D 75 04 00 05 00 01 00 5A CF B1 7C

设置输出模式为 AHRS 数据流

输入数据: 55 AA 03 00 18 00 00 00 80 3F 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 00 00 52 D8 8E E8

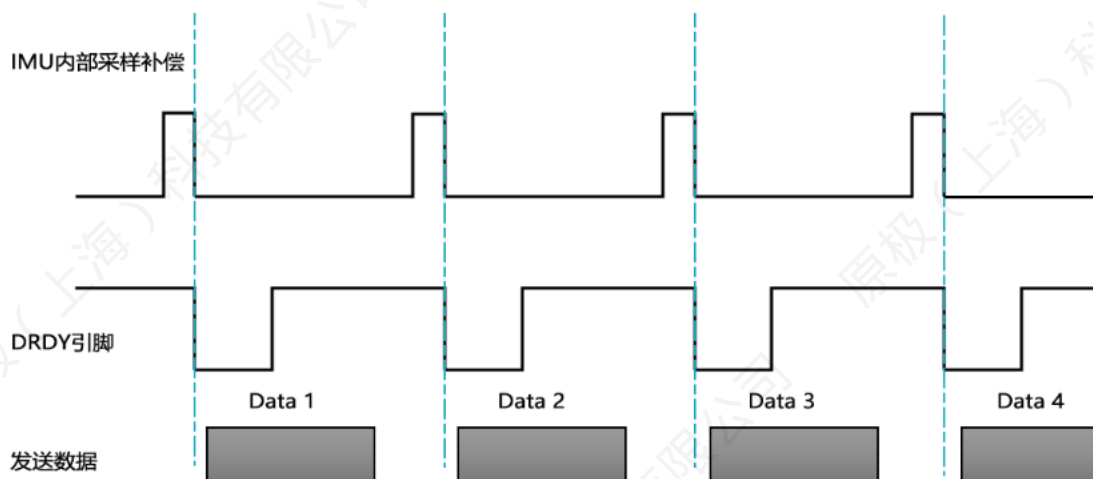
响应数据: AA 55 64 00 04 00 03 00 01 00 E7 87 E3 AD

5.1.8 DRDY

DRDY 引脚输出有两个目的：

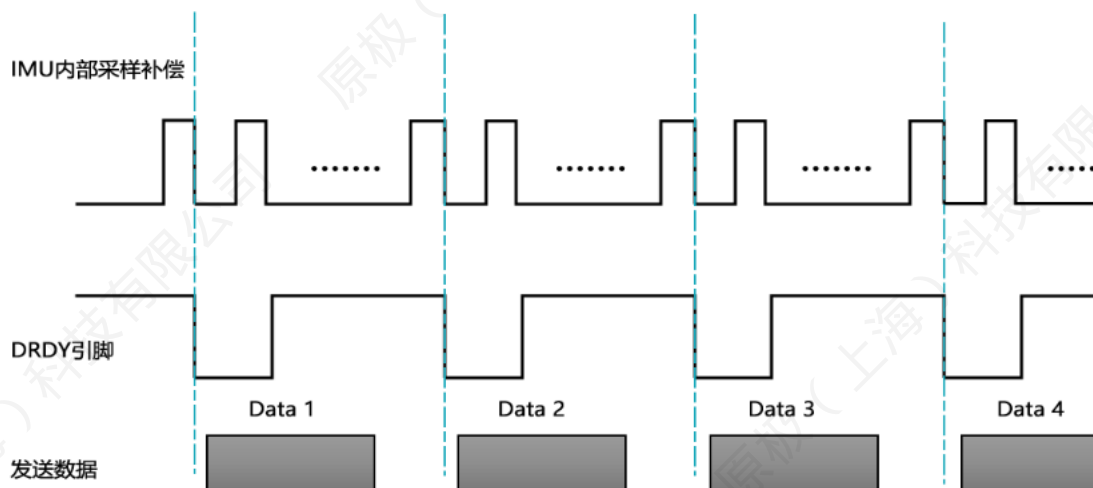
1. 提供来自 IMU 内部的时钟同步信号；
2. 提供信号表示开始传送数据帧。

图 6 内部采样频率与串口输出频率一致



当 IMU 内部采样频率（最大 ODR）与串口输出频率（当前 ODR）一致时，每当 imu 数据采样补偿完成后，DRDY 引脚将被立即拉低，此时数据帧将从串口发送，在下一周期 DRDY 引脚将被重新拉高。

图 7 串口输出频率小于 IMU 内部采样频率

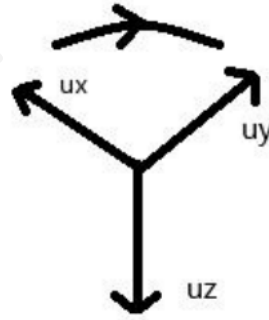


当串口输出频率小于 IMU 内部采样频率时，每当 imu 数据采样补偿完成后，根据分频计数值（最大 ODR/当前 ODR）决定 DRDY 引脚是否被立即拉低。DRDY 拉低后数据帧将从串口发送，在下一 IMU 采样周期 DRDY 引脚将被重新拉高。

5.1.9 坐标系设置功能

设置固件坐标系，在上位机当中显示对应固件设计坐标系

图 8 固件原始坐标系



按照上图规则，当 X 和 Y 轴确定之后，Z 轴确定。Z 轴垂直于 X 轴到 Y 轴的面。

X/Y/Z 三轴的朝向总共有二十四种，如下表所示：

表 24 坐标系朝向对应表

朝向 (value)	XAxis	YAxis	ZAxis	说明
101	+Ux	+Uy	+Uz	默认朝向
102	-Ux	-Uy	+Uz	
103	-Uy	+Ux	+Uz	
104	+Uy	-Ux	+Uz	
105	-Ux	+Uy	-Uz	
106	+Ux	-Uy	-Uz	
107	+Uy	+Ux	-Uz	
108	-Uy	-Ux	-Uz	
109	-Uz	+Uy	+Ux	
110	+Uz	-Uy	+Ux	
111	+Uy	+Uz	+Ux	
112	-Uy	-Uz	+Ux	
113	+Uz	+Uy	-Ux	
114	-Uz	-Uy	-Ux	
115	-Uy	+Uz	-Ux	
116	+Uy	-Uz	-Ux	
117	-Ux	+Uz	+Uy	
118	+Ux	-Uz	+Uy	
119	+Uz	+Ux	+Uy	
120	-Uz	-Ux	+Uy	
121	+Ux	+Uz	-Uy	
122	-Ux	-Uz	-Uy	
123	-Uz	+Ux	-Uy	
124	+Uz	-Ux	-Uy	

如何更改坐标系为 102 朝向:

CMD ID 填入 14，参数 1 填入 102，参数 3 填入 4，生成的十六进制数组可以填入串口助手或程序数组中发送给 IMU。

图 9 命令生成器生成修改坐标系指令

端口号:

CPU1 * 828 5

波特率:

115200

展开

命令生成器

固件版本:
220813

硬件版本:
58

底板版本:
G14E

配置扇区地址码:
0

校准扇区地址码:
0

主机:
从机

序列号:
36373454415015EE

405+EEEE

命令生成器

命令ID参数1参数3功能描述

1	0	0	触发获取一次系统状态数据
2	0	0	触发获取一次AHRS数据
3	<mode>	0	设置输出模式: Mode=1,数据流输出AHRS Mode=100,禁止数据流模式。进入COMMAND模式
5	0	0	保存当前参数到FLASH
6	0	<value>	读取参数。value为要读取的参数索引。 例如需读取串口输出波特率,则设置value=3; 读取AHRS输出数据(OOR),则设置value=21; 读取内部波特率配置,则设置value=31
9	0	0	执行软件重启

设置串口输出波特率,单位bps, value的有效值为:

命令生成器使用说明

帮助说明:
如欲执行启动AHRS输出: CMD_ID输入3, 参数1输入1, 点选主机命令按钮, 则命令生成框对应的命令。生成的十六进制数组可以填入串口助手或点击发送命令按钮(前提是已打开串口通讯)将数据发送给BAU)

上位机版本: 2023-07-08 09:50:37

设备连接:

如何读取坐标系朝向:

CMD ID 填入 06，参数 3 填入 4，生成的十六进制数组可以填入串口助手或程序数组中发送给 IMU。

图 10 命令生成器生成读取坐标系指令

[illegible]

例： 设置坐标系为 115 朝向

输入数据:

55, aa, 0e, 00, 18, 00, 00, 00, e6, 42, 00, 00, 00, 00, 04, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00,
00, 00, 00, 00, 46, 6a, 4e, 86

响应数据: AA 55 3D 75 04 00 34 75 04 00 60 0E 6B 1B

参考表 21 解析得到参数索引为 04，设置成功

读取坐标系：

输入数据: 55 AA 06 00 18 00 00 00 00 00 00 00 00 00 04 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 00 00 69 64 09 E4

响应数据: AA 55 30 75 18 00 00 00 E6 42 00 00 00 00 04 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 B2 2F 2D 4E

根据表 15 与表 16，解析得到参数 1 为 115 (float)，参数 3 为 04。即坐标系为 115 朝向。

5.1.10 串口连接常见问题

1) IMU 的 RX 不能接 2 个主机 TX

串口的 RX 不能同时接 2 个 TX，所以如果需要连接原极上位机时，需要断开其与用户主机的串口通信，否则上位机只能接收到数据，不能发送命令给 IMU。

如下图所示：

图 11 串口连接方式示意图



注: IMU TX 可接多路 RX, RX 不可接多路 TX;
IMU 串口不可同时连接客户主机和原极上位机;
IMU 可以预留另外一路串口专门连接原极上位机。

2) 获取不到版本号

检查串口线是否丢包，推荐使用 FT232 芯片的串口线，CH340、PL2303 数据线在高波特率时 (>115200bps) 会丢包。

建议串口线直连，不建议串联，如 RS422 的接口接电脑，直接使用 RS422 转 USB 线，不要用 RS422 转 RS232+RS232Z 转 USB 线串联。

3) 上位机曲线显示卡顿

如果是 FT232 数据线，用系统管理员打开上位机，自动配置串口延时。

手动在设备管理器中配置串口延时。

5.2 SPI 通信协议

基于 STM32 的 SPI 主机读取驱动示例：

<https://data.forsense-imu.com/page/download.html>

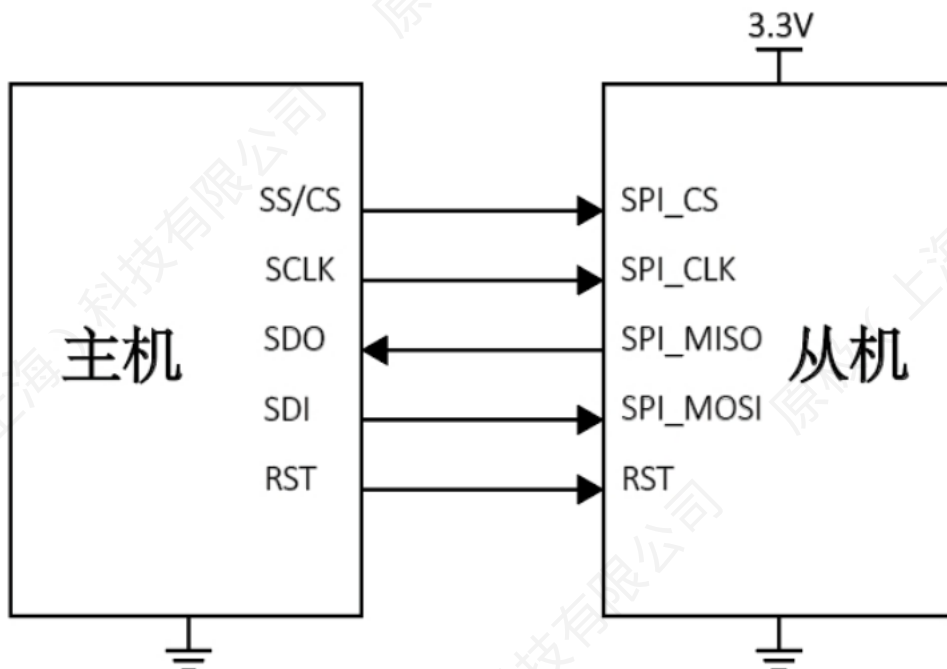
5.2.1 SPI 接口参数

表 25 SPI 接口参数

SPI 主机	本产品作为从机
SPI 速率	0.2~2MHz
SPI 字长	16bit
相位	上升沿触发 (模式 3, CPHA=1)
极性	空闲为高电平 (模式 3, CPOL=1)
位序	MSB 优先

5.2.2 SPI 连接示意图

图 12 SPI 连线示意图



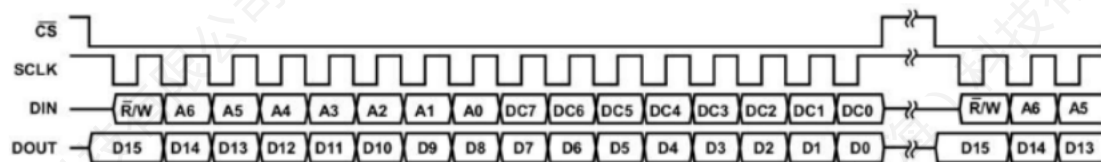
注 1：初始化读取前，需将 IMU 复位并等待 3s，使得 IMU 进入正常工作状态。

注 2：不同 IMU 型号的 SPI 引脚参考对应手册

5.2.3 SPI 通信位序

SPI 接口支持全双工串行通信（同时执行发送和接收），采用下图所示的位序。

图 13 SPI 通信位序示意图



其中，DIN 最高位表示读/写操作，[A6:A0]表示寄存器地址，[DC7:DC0]表示写入的数据（写操作）或 DUMMY 数据（读操作）。

当 $\bar{R}/W = 1$ 时，此SPI 周期的DOUT数据无意义。当 $\bar{R}/W = 0$ 时，此SPI 周期的DOUT数据表示上两个周期的寄存器输出数据，具体见BURST读取示例。

5.2.4 SPI 寄存器

表 26 SPI 寄存器列表

名称	地址	读/写	默认值	窗 ID	描述
MSC_CTRL	0x32	RW	0x00C1	1	其他控制
FILTER_CTRL	0x38	RW	0x00BB	1	滤波器选择
BURST	0x3E	RW	\	0	连续读取
PROD_ID1	0x6A	R	0x4653	1	ID 号 1
PROD_ID2	0x6C	R	0x2D31	1	ID 号 2
PROD_ID3	0x6E	R	0x3634	1	ID 号 3
PROD_ID4	0x70	R	0x3630	1	ID 号 4
WIN_CTRL	0x7F, 0x7E	RW	0x0000	0, 1	窗 ID 选择
XGYRO_LOW	0x04	R	\	0	陀螺 X 轴低字节
XGYRO_HIGH	0x06	R	\	0	陀螺 X 轴高字节
YGYRO_LOW	0x08	R	\	0	陀螺 Y 轴低字节
YGYRO_HIGH	0x0A	R	\	0	陀螺 Y 轴高字节
ZGYRO_LOW	0x0C	R	\	0	陀螺 Z 轴低字节
ZGYRO_HIGH	0x0E	R	\	0	陀螺 Z 轴高字节
XACCEL_LOW	0x10	R	\	0	加表 X 轴低字节
XACCEL_HIGH	0x12	R	\	0	加表 X 轴高字节
YACCEL_LOW	0x14	R	\	0	加表 Y 轴低字节
YACCEL_HIGH	0x16	R	\	0	加表 Y 轴高字节
ZACCEL_LOW	0x18	R	\	0	加表 Z 轴低字节
ZACCEL_HIGH	0x1A	R	\	0	加表 Z 轴高字节
TEMP	0x1E	R	\	0	温度

5.2.4.1 SPI BURST 寄存器

BURST 为连续读取寄存器，在一个数据流中读取所有数据，各16位段之间无停转。

表 27 SPI BURST 寄存器格式

地址	bit15	bit14	bit13	bit12	bit11	bit10	bit9	bit8	读/写
0x01									RW
地址	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	读/写
0x00	BURST_CMD								RW

BURST 读取方法是：读取前发送 0x3E00 表示设置 BURST 并开始读取，然后一直发送 0x0000 并接收数据，输出寄存器内容比读取指令发送偏移 2 个SPI 周期，读取期间一直持续片选低电平。

图 14 SPI BURST 连续读取示意图

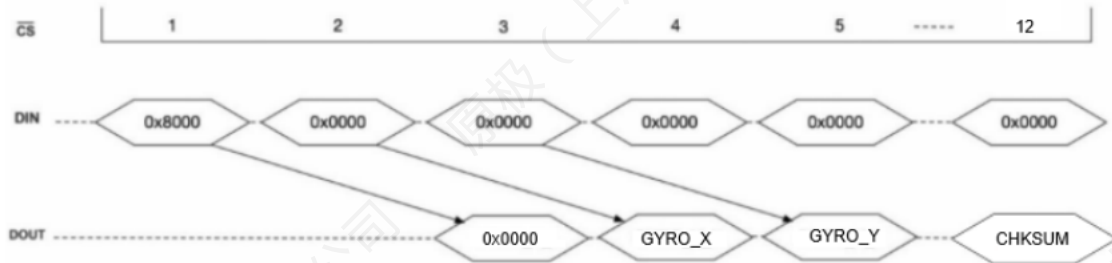


表 28 SPI BURST 连续读取基本格式

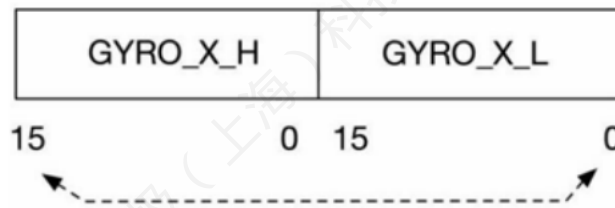
发送顺序	1	2	3	4	5	6
发送内容	0x00	GYRO_X	GYRO_Y	GYRO_Z	ACCL_X	ACCL_Y
发送顺序	7	8	9	10		
发送内容	ACCL_Z	TEMP	0x00	CHKSM		

注 1：所有数据均为 16-bit 宽度

注 2：CHKSM 即 CHECKSUM，用于确认数据完整性。计算方法为将 CHECKSUM 之前的所有数据累加求和

在单个寄存器读取过程中，32位的完整数据被拆分成高16位和低16位分别输出，输出时采用小端模式，即低字节先输出。用户需要将这两部分16位数据首尾拼接，还原出完整的32位数据。

图 15 SPI 32 位数据还原示意图



32位陀螺仪数据格式

得到完整的32位数据后，标准帧用户可根据以下公式将其转换为角速度、加速度、温度和姿态角信息。

表 29 标准帧 SPI 32 位数据转换公式

名称	单位	公式	条件/备注
角速度	° /s	$G = SF * GYRO$	GYRO 为上表中 X/Y/Z 轴的 GYRO 数据 ● Burst 模式时 $\square = 0.016$ ● 单寄存器模式时, $SF = 0.016 * 65536$
加速度	g	$A = SF * ACCL$	ACCL 为上表中 X/Y/Z 轴的 ACCL 数据 ● Burst 模式时, $\square = 0.2/1000$ ● 单寄存器模式时, $SF = 0.2/1000 * 65536$
温度	°C	$T = SF * (TEMP - 2634) + 25$	TEMP 为上表中的 TEMP 数据 ● 温度刻度因子 $\square = -1/263.4$
姿态角	°	$D = SF / 65536 * ATT$	ATT 为上表中 ATT 数据 ● 姿态刻度因子 $\square = 0.00699411$

5.2.4.2 SPI FILTER_CTRL 寄存器

FILTER_CTRL寄存器为用户提供对数字低通滤波器的控制。此寄存器为可读/写寄存器，写命令为发送0xB8XX，且当前SPI周期设置有效；读命令发送 0x3800，输出寄存器内容比读取指令发送偏移2个SPI周期。

表 30 SPI FILTER_CTRL 寄存器格式

地址	bit15	bit14	bit13	bit12	bit11	bit10	bit9	bit8	读/写
0x07									RW
地址	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	读/写
0x06	加速度计滤波器配置				陀螺仪滤波器配置				RW

表 31 滤波器配置

	编码	描述
加速度计/ 陀螺仪滤波器配置	4' b 0000	IIR filter fc=1 Hz
	4' b 0001	IIR filter fc=1 Hz
	4' b 0010	IIR filter fc=2 Hz
	4' b 0011	IIR filter fc=5 Hz
	4' b 0100	IIR filter fc=10 Hz
	4' b 0101	IIR filter fc=15 Hz
	4' b 0110	IIR filter fc=20 Hz
	4' b 0111	IIR filter fc=25 Hz
	4' b 1000	IIR filter fc=30 Hz
	4' b 1001	IIR filter fc=35 Hz
	4' b 1010	IIR filter fc=40 Hz
	4' b 1011	no filter

注：比如配置陀螺、加速度计滤波器为10Hz，则写入0xB844 值。

5.2.4.3 SPI ID 寄存器

ID 寄存器为只读寄存器，数据内容为ASCII 编码形式的字符 “FS-16460”，读取方法类似BURST 数据读取：读取时发送 0x6A00~0x7000，并接收数据。输出寄存器内容比读取指令发送偏移 2 个周期。

将 4 个16位ID数据拼接后转为ASCII 码，可获得产品的完整ID。拼接方法同BURST连续读取数据的拼接，PROD_ID1在高位，PROD_ID4在低位。

表 32 SPI ID 寄存器格式

地址	bit15 ~ bit0	编码	读/写
0x6A	PROD_ID1	0x4653	R
0x6C	PROD_ID2	0x2D31	R
0x6E	PROD_ID3	0x3634	R
0x70	PROD_ID4	0x3630	R

5.2.4.4 SPI WIN_CTRL 寄存器

此寄存器用于控制切换窗口 ID，可读可写。窗口默认为 0，写入 0xFE01，则切换为 1。

表 33 SPI WIN_CTRL 寄存器格式

地址	bit15	bit14	bit13	bit12	bit11	bit10	bit9	bit8	读/写
0x7F									RW
地址	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	读/写
0x7E	WINDOW_ID								RW

表 34 SPI 寄存器 WIN_CTRL.WINDOW_ID 编码

名称	编码	描述
WINDOW_ID	0x00	window0, 开始读取数据
	0x01	window1, 进入配置

5.2.4.5 SPI MSC_CTRL 寄存器

此寄存器用于控制 SYNC 和 DATA READY 引脚模式和极性，默认 0xC1。

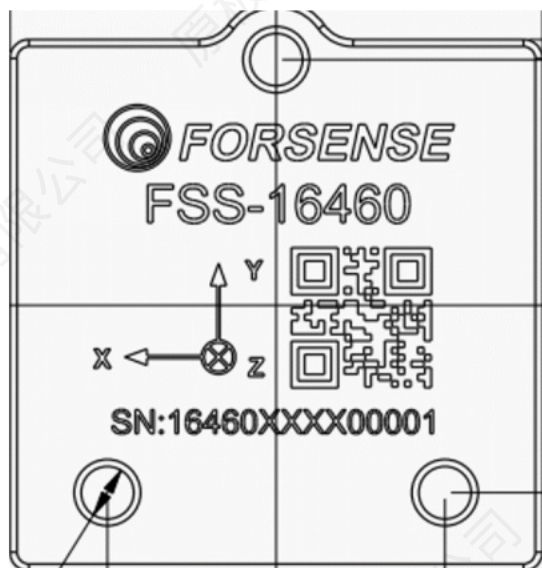
表 35 SPI MSC_CTRL 寄存器格式

地址	bit15	bit14	bit13	bit12	bit11	bit10	bit9	bit8	读/写
0x32									RW
地址	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	读/写
0x33					SYNC 功能 设置		SYNC 极性	DR 极性	RW

表 36 SPI 寄存器 MSC_CTRL 编码

名称	编码	描述
DR 极性	0x00	低电平有效(数据有效时)
	0x01	高电平有效(数据有效时)
SYNC 极性	0x00	上升沿触发采样
	0x01	下降沿触发采样
SYNC 功能设置	0x00	禁用(内部采样时钟)
	0x01	直接采样控制(输入)

6. 坐标系定义



本产品坐标系使用 前-右-下 (FRD) 坐标系，欧拉角范围如下：

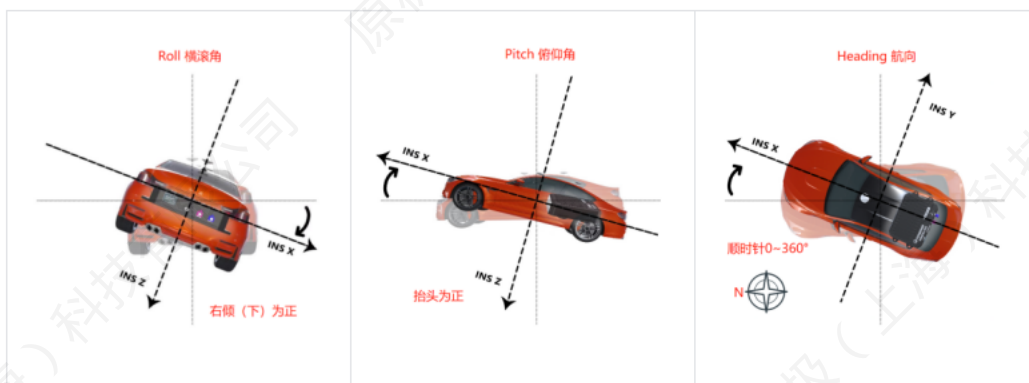
绕 Z 轴方向旋转：航向角 Yaw 范围： $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ ；

绕 X 轴方向旋转：横滚角 Roll 范围： $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ；

绕 Y 轴方向旋转：俯仰角 Pitch 范围： $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

横滚、俯仰、航向角度示意图如下：

图 17 横滚、俯仰、航向角示意图



7. CRC 查表法计算

建议直接参考示例代码。

注 1：数据以小端格式传输，低字节在前，高字节在后

注 2：crc32 的初值为 1，CRC 计算不包括本身的本帧所有数据

```
static const uint32_t crc32_tab [ ] = {
0x00000000, 0x77073096, 0xee0e612c, 0x990951ba, 0x076dc419, 0x706af48f,
0xe963a535, 0x9e6495a3, 0x0edb8832, 0x79dcb8a4, 0xe0d5e91e, 0x97d2d988,
0x09b64c2b, 0x7eb17cbd, 0xe7b82d07, 0x90bf1d91, 0x1db71064, 0x6ab020f2,
0xf3b97148, 0x84be41de, 0x1adad47d, 0x6ddde4eb, 0xf4d4b551, 0x83d385c7,
0x136c9856, 0x646ba8c0, 0xfd62f97a, 0x8a65c9ec, 0x14015c4f, 0x63066cd9,
0xfa0f3d63, 0x8d080df5, 0x3b6e20c8, 0x4c69105e, 0xd56041e4, 0xa2677172,
0x3c03e4d1, 0x4b04d447, 0xd20d85fd, 0xa50ab56b, 0x35b5a8fa, 0x42b2986c,
0xdbbbc9d6, 0xacbcf940, 0x32d86ce3, 0x45df5c75, 0xdcd60dcf, 0xabd13d59,
0x26d930ac, 0x51de003a, 0xc8d75180, 0xbf7d0611, 0x21b4f4b5, 0x56b3c423,
0xcfba9599, 0xb8bda50f, 0x2802b89e, 0x5f058808, 0xc60cd9b2, 0xb10be924,
0x2f6f7c87, 0x58684c11, 0xc1611dab, 0xb6662d3d, 0x76dc4190, 0x01db7106,
0x98d220bc, 0xefd5102a, 0x71b18589, 0x06b6b51f, 0x9fbfe4a5, 0xe8b8d433,
0x7807c9a2, 0x0f00f934, 0x9609a88e, 0xe10e9818, 0x7f6a0dbb, 0x086d3d2d,
0x91646c97, 0xe6635c01, 0x6b6b51f4, 0x1c6c6162, 0x856530d8, 0xf26200de,
0x6c0695ed, 0x1b01a57b, 0x8208f4c1, 0xf50fc457, 0x65b0d9c6, 0x12b7e950,
0x8bbeb8ea, 0xfcb9887c, 0x62dd1ddf, 0x15da2d49, 0x8cd37cf3, 0xfbd44c65,
0x4db26158, 0x3ab551ce, 0xa3bc0074, 0xd4bb30e2, 0x4adfa541, 0x3dd895d7,
0xa4d1c46d, 0xd3d6f4fb, 0x4369e96a, 0x346ed9fc, 0xad678846, 0xda60b8d0,
0x44042d73, 0x33031de5, 0xaa0a4c5f, 0xdd0d7cc9, 0x5005713c, 0x270241aa,
0xbe0b1010, 0xc90c2086, 0x5768b525, 0x206f85b3, 0xb966d409, 0xce61e49f,
0x5edef90e, 0x29d9c998, 0xb0d09822, 0xc7d7a8b4, 0x59b33d17, 0x2eb40d81,
0xb7bd5c3b, 0xc0ba6cad, 0xedb88320, 0x9abfb3b6, 0x03b6e20c, 0x74b1d29a,
0xeada5473, 0x9dd277af, 0x04db2615, 0x73dc1683, 0xe3630b12, 0x94643b84,
0x0d6d6a3e, 0x7a6a5aa8, 0xe40ecf0b, 0x9309ff9d, 0x0a00ae27, 0x7d079eb1,
0xf00f9344, 0x8708a3d2, 0x1e01f268, 0x6906c2fe, 0xf762575d, 0x806567cb,
0x196c3671, 0x6e6b06e7, 0xfed41b76, 0x89d32be0, 0x10da7a5a, 0x67dd4acc,
0xf9b9df6f, 0x8ebeeff9, 0x17b7be43, 0x60b08ed5, 0xd6d6a3e8, 0xa1d1937e,
0x38d8c2c4, 0x4fdff252, 0xd1bb67f1, 0xa6bc5767, 0x3fb506dd, 0x48b2364b,
0xd80d2bda, 0xaf0a1b4c, 0x36034af6, 0xa1047a60, 0xdf60efc3, 0xa867df55,
0x316e8eef, 0x4669be79, 0xcb61b38c, 0xbc66831a, 0x256fd2a0, 0x5268e236,
0xcc0c7795, 0xbb0b4703, 0x220216b9, 0x5505262f, 0xc5ba3bbe, 0xb2bd0b28,
0x2bb45a92, 0x5cb36a04, 0xc2d7ffa7, 0xb5d0cf31, 0x2cd99e8b, 0x5bdeae1d,
0x9b64c2b0, 0xec63f226, 0x756aa39c, 0x026d930a, 0x9c0906a9, 0xeb0e363f,
0x72076785, 0x05005713, 0x95bf4a82, 0xe2b87a14, 0x7bb12bae, 0x0cb61b38,
0x92d28e9b, 0xe5d5be0d, 0x7cdcefb7, 0x0bdbdf21, 0x86d3d2d4, 0xf1d4e242,
```

```

0x68ddb3f8, 0x1fda836e, 0x81be16cd, 0xf6b9265b, 0x6fb077e1, 0x18b74777,
0x88085ae6, 0xff0f6a70, 0x66063bca, 0x11010b5c, 0x8f659eff, 0xf862ae69,
0x616bffd3, 0x166ccf45, 0xa00ae278, 0xd70dd2ee, 0x4e048354, 0x3903b3c2,
0xa7672661, 0xd06016f7, 0x4969474d, 0x3e6e77db, 0xaed16a4a, 0xd9d65adc,
0x40df0b66, 0x37d83bf0, 0xa9bcae53, 0xdebb9ec5, 0x47b2cf7f, 0x30b5ffe9,
0xbdbdf21c, 0xcabac28a, 0x53b39330, 0x24b4a3a6, 0xbad03605, 0xcdd70693,
0x54de5729, 0x23d967bf, 0xb3667a2e, 0xc4614ab8, 0x5d681b02, 0x2a6f2b94,
0xb40bbe37, 0xc30c8ea1, 0x5a05df1b, 0x2d02ef8d,
}
uint32_t crc_crc32 (uint32_t crc, const uint8_t *buf, uint32_t size) {
for (uint32_t i=0; i<size; i++) {
crc = crc32_tab [ (crc ^ buf[i]) & 0xff] ^ (crc >> 8);
}
return crc;
}
    
```

8. 使用示例

8.1 设备安装

1. 模块应牢靠固定在刚性平面上，避免安装在震动大的位置。
2. 模块安装朝向应与车头方向保持一致。

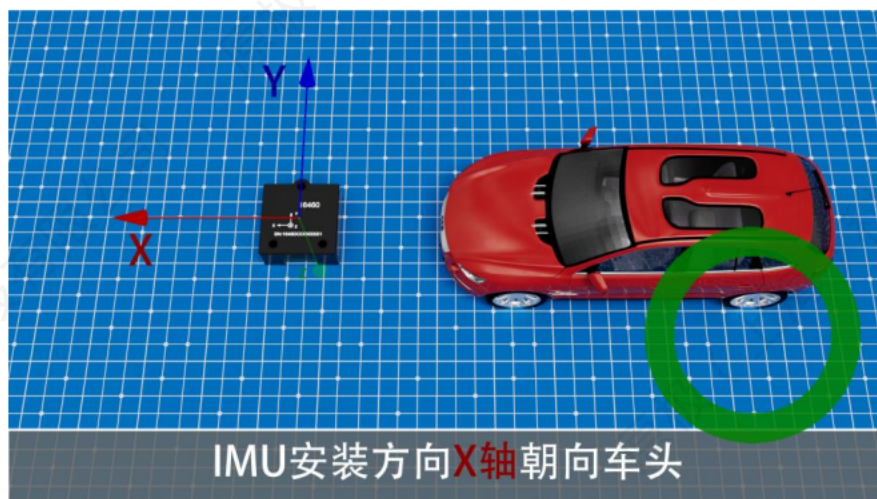
图 18 模块安装示意图



正确安装示意图如下

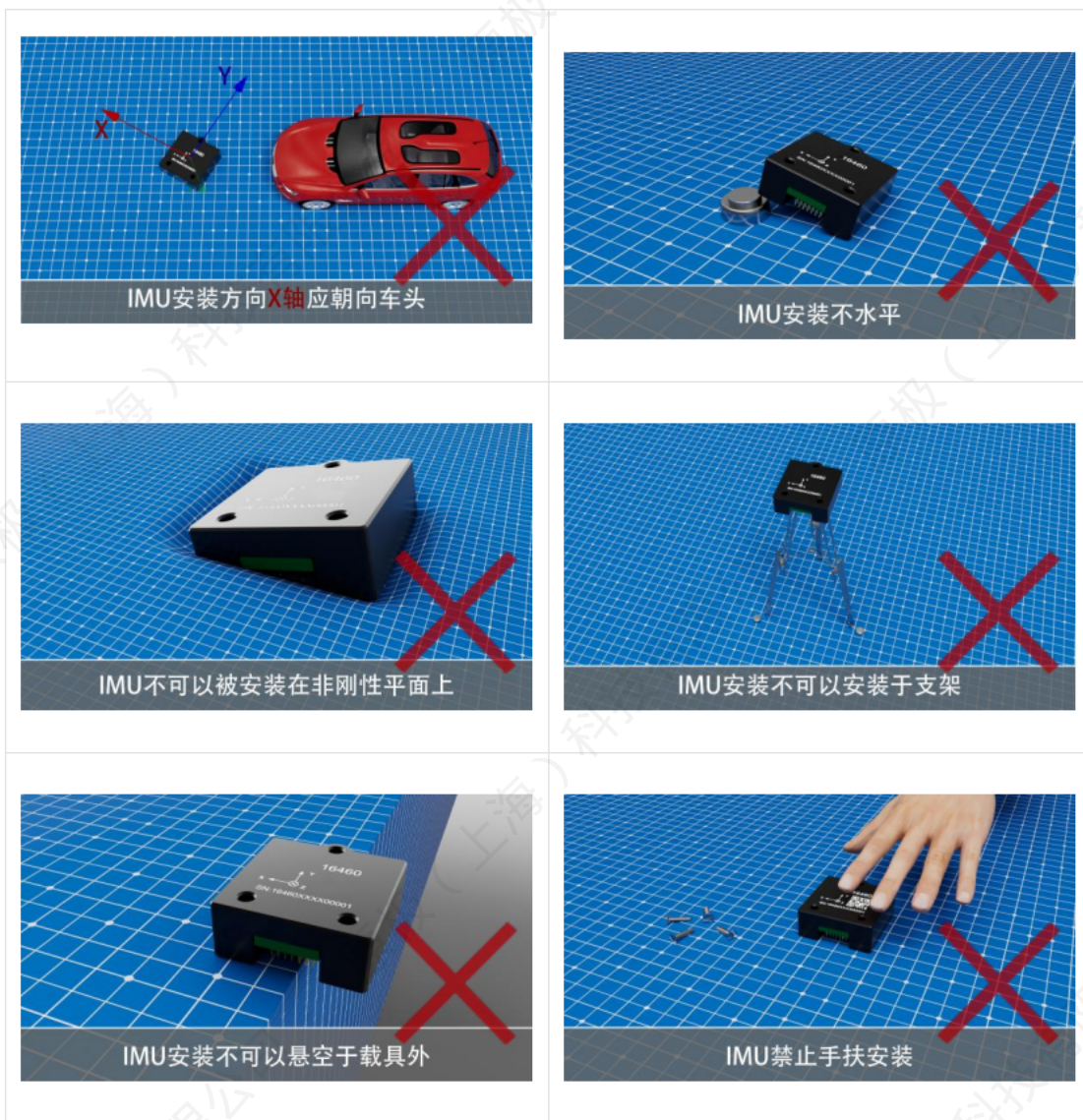
X 轴朝向车头

图 19 正确安装示意图



以下安装方式均是错误安装

图 20 安装错误示意图



3. IMU 安装注意事项

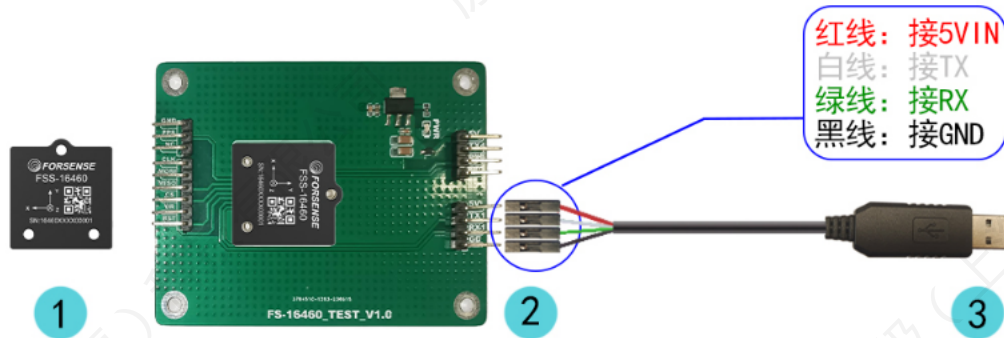
IMU 周围禁止打胶或其他流动液体，防止液体通过缝隙流入 IMU 内部，影响 IMU 性能。

图 21 安装错误示意图



8.2 连接上位机示例

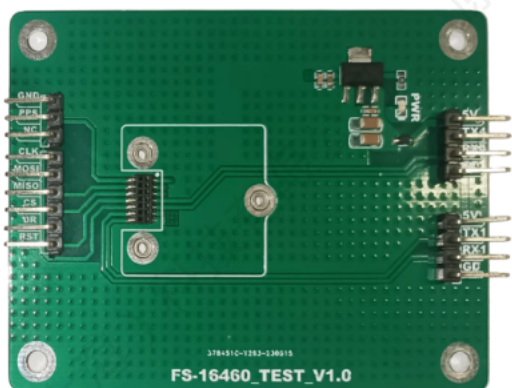
图 22 模块连接上位机示意图



	名称	数量
1	IMU16460	1个
	附件名称	数量
2	16460测试底板	1个
3	TTL串口线	1个

9. 选配附件

图 23 配件示意图



IMU16460 测试底板



TTL 串口线

10. 更新记录

版本	日期	状态/注释
版本 1.0	2023.09.15	首次发行
版本 1.1	2023.10.07	更新坐标系定义
版本 1.2	2023.12.14	增加附件
版本 1.3	2024.04.11	更新电气特性
版本 1.4	2024.05.10	增加上位机连接示意图
版本 1.5	2025.01.21	修改表图序号定义