

.....



版本号 V3.2

16488D

惯性测量单元使用说明书



1.概述

16488D 是一款高性能惯性测量单元，经过全温区精密校准以满足不同条件下的性能需求。内置三轴陀螺仪、三轴加速度计，用于测量载体的三轴角速率，加速度等参数，通过 SPI 按照通讯协议输出经过误差补偿（包括温度补偿、安装失准角补偿、非线性补偿等）的数据。

2.性能指标

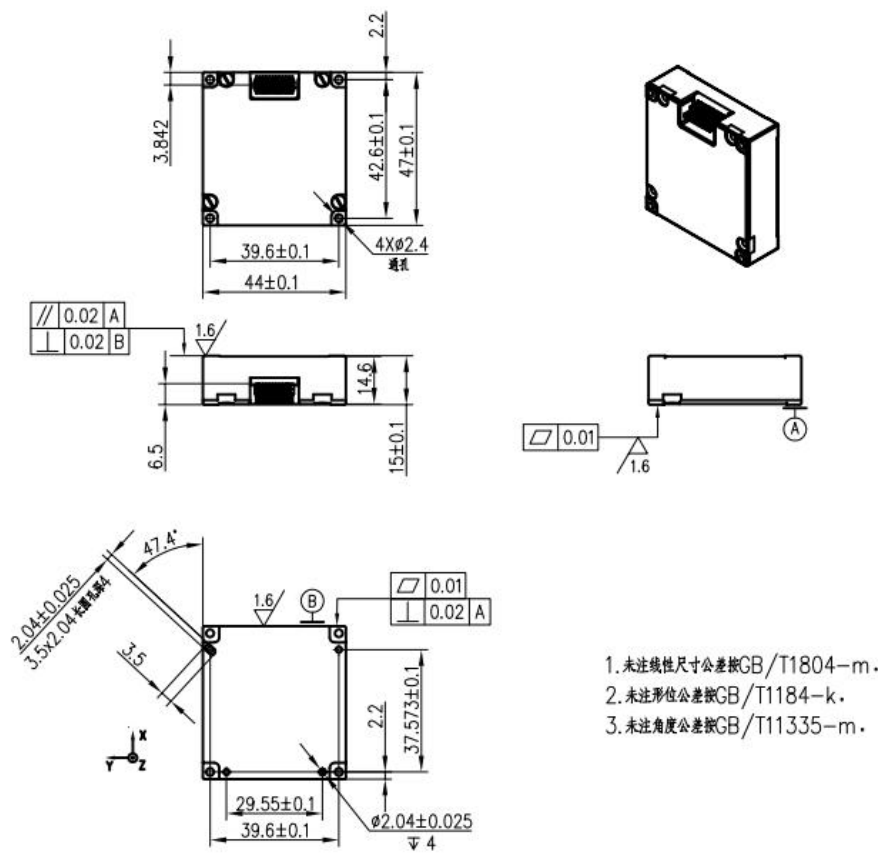
16488D 具体性能指标配置，如表 1 所示：

表 1 性能指标

	参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
陀螺	动态测量范围			±500		°/s
	零偏不稳定性	Allan 方差		1		°/h
	零偏稳定性	1s 平滑, rms		7		°/h
	全温范围内零偏	-40°C~85°C,10s 平滑, rms		0.007		°/s
	随机游走	1σ		0.13		°/√h
	零偏重复性	1σ		5		°/h
	输出噪声	无滤波, rms		0.02		°/s
	标度因数非线性	1σ		0.01		%
	标度因数	FS=500 °/s		524.287		LSB/°/sec
	带宽 (-3dB)			150	280	Hz
	交叉耦合			0.05		%
	加速度灵敏度			10.7		°/h/g
	谐振频率			19k		Hz
加速度计	动态测量范围			±16		g
	零偏稳定性	Allan 方差		18		ug
	全温范围内零偏	-40°C~85°C,10s 平滑, rms		0.3		mg
	随机游走	1σ		0.015		m/s/√h
	零偏重复性	1σ		1		mg
	输出噪声	无滤波, rms		0.2		mg
	标度因数	±16		16383		g/LSB
	带宽 (-3dB)			150	280	Hz
	交叉耦合			0.05		%
磁力	量程			2 (8)		guass
	分辨率			0.1		mg
气压	量程		260		1260	hPa
	分辨率			4096		LSB/hPa
温度	刻度因数			0.019		°C/LSB

	参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
通讯接口	1 路 SPI	输入时钟频率		6	12	MHz
电气特性	电压	直流	3	3.3	3.6	V
	功耗			1		W
	纹波	P-P		50		mV
使用环境	工作温度	可扩展	-40		85	℃
	存储温度		-55		105	℃
	冲击			2000g		

3.外观结构



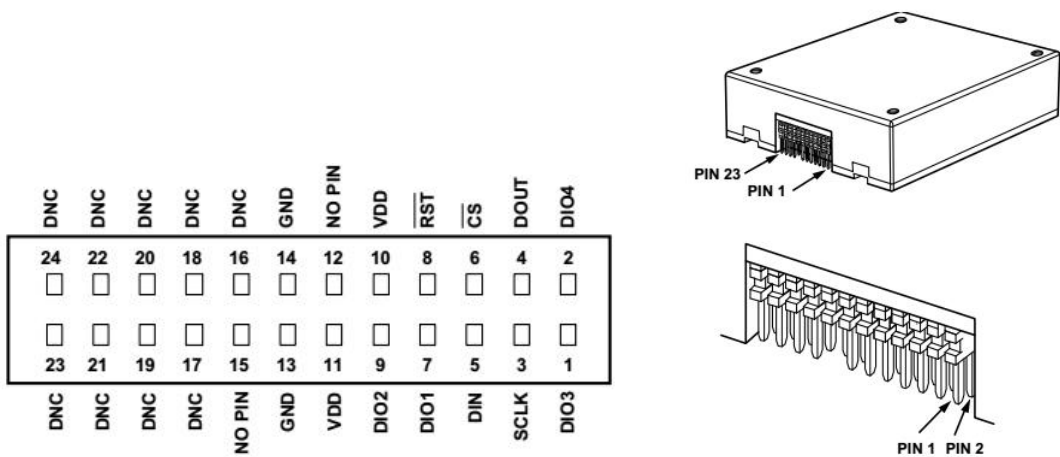


图 2 16488D 外观

表 1 接点定义

管脚序号	名称	类型	描述
10, 11	VDD	电源	
13, 14	GND	电源	
7	DIO1	输入/输出	通用 IO, 可配置
9	DIO2	输入/输出	
1	DIO3	输入/输出	
2	DIO4	输入/输出	
3	SPI-CLK	输入/输出	SPI 从模式
4	SPI-MISO	输入/输出	
5	SPI-MOSI	输入/输出	
6	SPI-/CS	输入/输出	
其它	NC	备用	厂家保留

产品轴向见图 3

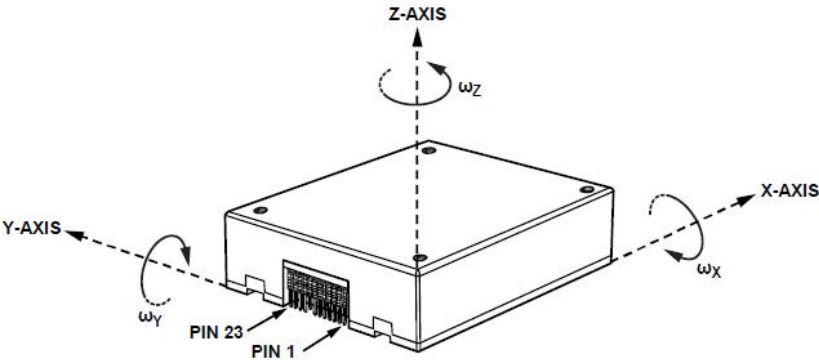


图 3 产品敏感轴向

4 通讯接口

4.1 SPI 通讯

IMU 的通信采用 4 线 SPI 标准接口, 产品内部数据刷新频率最大 2KHz, 通信 SPI 速率最大 12Mbps。

4.1.1 时序规格

除非另有说明, TC = 25°C, VDD = 3.3 V。

表 2 时序规格

参数	说明	正常模式			单位
		最小值	典型值	最大值	
fSCLK	串行时钟	0.01		12	MHz
tSTALL	数据之间的停转周期	2			μs
tCLS	串行时钟低电平周期	31			ns
tCHS	串行时钟高电平周期	31			ns
tCS	片选至时钟边沿	32			ns
tDAV	SCLK 边沿之后的 DOUT 有效时间			10	ns
tDSU	SCLK 上升沿之前的 DIN 建立时间	2			ns
tDHD	SCLK 上升沿之后的 DIN 保持时间	2			ns
tDR, tDF	DOUT 上升/下降时间, 负载 100 pF		3	8	ns
tDSOE	CS 置位至数据输出有效	0		11	ns
tHD	SCLK 边沿至数据输出无效	0			ns
tSFS	上一个 SCLK 边沿至 CS 解除置位	32			ns
tDSHI 0	CS 解除置位至数据输出高阻态	0		9	ns

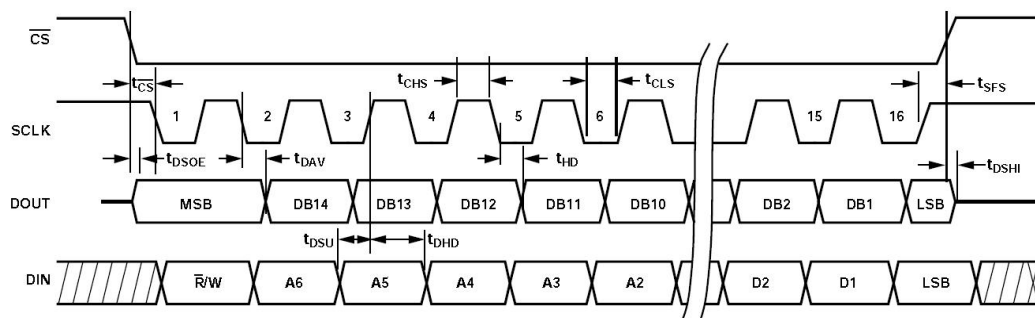


图 4 时序图

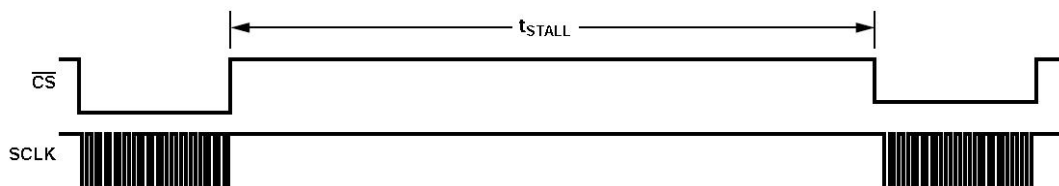


图 5 停转时间和数据速率

4.1.2 数据寄存器地址映射

用户寄存器存储器映射数据定义见表 4。

表 3 用户寄存器存储器映射数据

名称	R/W	PAGE_ID	地址	默认	寄存器描述
PAGE_ID	R/W	0x00	0x00	0x00	页面标识
TEMP_OUT	R	0x00	0x0E	N/A	温度
X_GYRO_LOW	R	0x00	0x10,0x11	N/A	x 轴陀螺仪输出, 低位字
X_GYRO_OUT	R	0x00	0x12,0x13	N/A	x 轴陀螺仪输出, 高位字
Y_GYRO_LOW	R	0x00	0x14,0x15	N/A	y 轴陀螺仪输出, 低位字
Y_GYRO_OUT	R	0x00	0x16,0x17	N/A	y 轴陀螺仪输出, 高位字
Z_GYRO_LOW	R	0x00	0x18,0x19	N/A	z 轴陀螺仪输出, 低位字
Z_GYRO_OUT	R	0x00	0x1A,0x1B	N/A	z 轴陀螺仪输出, 高位字
X_ACCL_LOW	R	0x00	0x1C,0x1D	N/A	x 轴加速度计输出, 低位字
X_ACCL_OUT	R	0x00	0x1E,0x1F	N/A	x 轴加速度计输出, 高位字
Y_ACCL_LOW	R	0x00	0x20,0x21	N/A	y 轴加速度计输出, 低位字
Y_ACCL_OUT	R	0x00	0x22,0x23	N/A	y 轴加速度计输出, 高位字
Z_ACCL_LOW	R	0x00	0x24,0x25	N/A	z 轴加速度计输出, 低位字
Z_ACCL_OUT	R	0x00	0x26,0x27	N/A	z 轴加速度计输出, 高位字
FILTR_BNK_0	R/W	0x03	0x16,0x17	0x0000	Filter selection
FILTR_BNK_1	R/W	0x03	0x18,0x19	0x0000	Filter selection
FIR_COEF_Axxx	R/W	0x05	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank A, Coefficient 0 through Coefficient 59
FIR_COEF_Axxx	R/W	0x06	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank A, Coefficient 60 through Coefficient 119

FIR_COEF_Bxxx	R/W	0x07	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank B, Coefficient 0 through Coefficient 59
FIR_COEF_Bxxx	R/W	0x08	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank B, Coefficient 60 through Coefficient 119
FIR_COEF_Cxxx	R/W	0x09	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank C, Coefficient 0 through Coefficient 59
FIR_COEF_Cxxx	R/W	0x0A	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank C, Coefficient 60 through Coefficient 119
FIR_COEF_Dxxx	R/W	0x0B	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank D, Coefficient 0 through Coefficient 59
FIR_COEF_Dxxx	R/W	0x0C	0x02 to 0x7E	N/A	FIR Filter Bank D, Coefficient 60 through Coefficient 119

4.1.3 SPI 通讯及配置

读取传感器数据

单个寄存器读操作需要两个 16 位 SPI 周期。在第一个周期中，利用图 6 中的位分配功能请求读取一个寄存器的内容；在第二个周期中，寄存器内容通过 DOUT 输出。DIN 命令的第一位是 0，然后是寄存器的高位或低位地址。后 8 位是无关位，但 SPI 需要完整的 16 个 SCLK 来接收请求。图 5 显示了两个连续的寄存器读操作，首先是 DIN = 0x1A00，请求 Z_GYRO_OUT 寄存器的内容，然后是 DIN = 0x1800，请求 Z_GYRO_LOW 寄存器的内容。

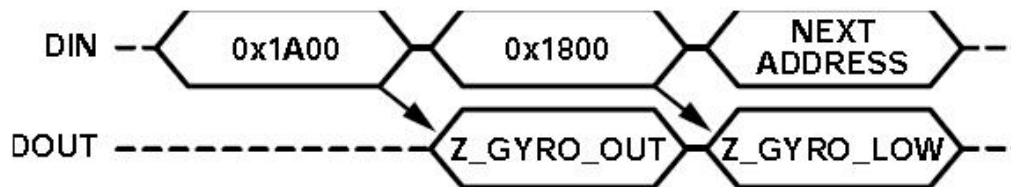


图 6 SPI 读操作示例

5 SPI 数据寄存器

16488D 启动过程后，PAGE_ID 寄存器值为 0x0000，将第 0 页设置为 SPI 访问的有效页面。第 0 页包括输出数据、产品标识寄存器。

5.1 惯性传感器数据格式

陀螺仪、加速度计的输出数据寄存器使用 32 位二进制补码格式。每个输出使用两个寄存器来支持这一分辨率。图 7 通过示例说明各寄存器在各种惯性测量中的作用。本例中，X_GYRO_OUT 是最高有效字(高 16 位)，X_GYRO_LOW 是最低有效字(低 16 位)。许多情况下，仅使用最高有效字寄存器就能提供足够的分辨率来反映关键性能指标。

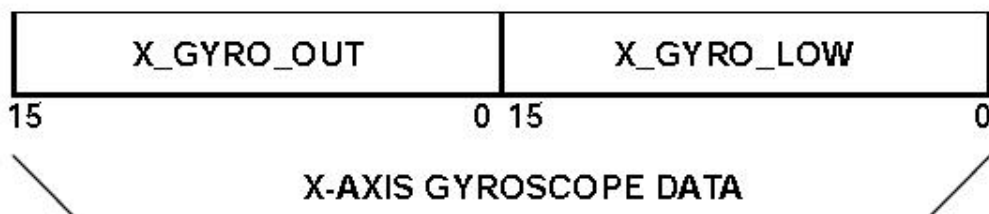


图 7 陀螺数据输出示例

5.1.1 陀螺仪

用于陀螺仪测量的主寄存器使用 X_GYRO_OUT 格式(参见表 5、表 6 和表 7)。处理这些寄存器的数据时, 使用 16 位二进制补码数据格式。表 8 给出了 X_GYRO_OUT 数字编码示例。

表 4 X_GYRO_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x12)

位	说明
[15:0]	X 轴陀螺仪数据; 二进制补码, $\pm 450^\circ/\text{秒}$ 范围, $0^\circ/\text{秒} = 0x0000$, 1 LSB = $0.025^\circ/\text{秒}$

表 5 Y_GYRO_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x16)

位	说明
[15:0]	Y 轴陀螺仪数据; 二进制补码, $\pm 450^\circ/\text{秒}$ 范围, $0^\circ/\text{秒} = 0x0000$, 1 LSB = $0.025^\circ/\text{秒}$

表 6 Z_GYRO_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x1A)

位	说明
[15:0]	Z 轴陀螺仪数据; 二进制补码, $\pm 450^\circ/\text{秒}$ 范围, $0^\circ/\text{秒} = 0x0000$, 1 LSB = $0.025^\circ/\text{秒}$

表 7 X_GYRO_OUT 数据格式示例

旋转速率	十进制	十六进制	二进制
+450°/sec	+18,000	0x4650	0100 0110 0101 0000
+0.05°/sec	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0.025°/sec	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0°/sec	0	0x0000	0000 0000 0000 0000
-0.025°/sec	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0.05°/sec	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-450°/sec	-18,000	0xB9B0	1011 1001 1011 0000

使用 X_GYRO_LOW 命名格式的寄存器用于提高陀螺仪测量的分辨率(参见表 9、表 10 和表 11。MSB 的权重为 $0.0125^\circ/\text{秒}$, 后续各位的权重为前一位的 $\frac{1}{2}$ 。

表 8 X_GYRO_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x10)

位	说明
[15:0]	X 轴陀螺仪数据; 附加分辨率位

表 9 Y_GYRO_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x14)

位	说明
[15:0]	Y 轴陀螺仪数据; 附加分辨率位

表 10 Z_GYRO_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x18)

位	说明
[15:0]	Z 轴陀螺仪数据; 附加分辨率位

5.1.2 加速度计

用于加速度计测量的主寄存器使用 X_ACCL_OUT 格式(参见表 12、表 13 和表 14)。处理这些寄存器的数据时, 使用 16 位二进制补码数据格式。表 15 给出了 X_ACCL_OUT 数字编码示例。

表 11 X_ACCL_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x1E)

位	说明
[15:0]	X 轴加速度计数据; 二进制补码, $\pm 20\text{ g}$ 范围, $0\text{ g} = 0x0000$, $1\text{ LSB} = 1\text{ mg}$

表 12 Y_ACCL_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x22)

位	说明
[15:0]	Y 轴加速度计数据; 二进制补码, $\pm 20\text{ g}$ 范围, $0\text{ g} = 0x0000$, $1\text{ LSB} = 1\text{ mg}$

表 13 Z_ACCL_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x26)

位	说明
[15:0]	Z 轴加速度计数据; 二进制补码, $\pm 20\text{ g}$ 范围, $0\text{ g} = 0x0000$, $1\text{ LSB} = 1\text{ mg}$

表 14 X_ACCL_OUT 数据格式示例

加速度	十进制	十六进制	二进制
+20g	+20,000	0x4E20	0100 1110 0010 0000
+2mg	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+1mg	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 mg	0	0x0000	0000 0000 0000 0000
-1mg	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-2mg	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-20g	-20,000	0xB1E0	1011 0001 1110 0000

使用 X_ACCL_LOW 命名格式的寄存器用于提高加速度计测量的分辨率(参见表 16、表 17 和表 18)。MSB 的权重为 0.5 mg , 后续各位的权重为前一位的 $\frac{1}{2}$ 。

表 15 X_ACCL_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x1C)

位	说明
[15:0]	X 轴加速度计数据; 附加分辨率位

表 16 Y_ACCL_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x20)

位	说明
[15:0]	X 轴加速度计数据; 附加分辨率位

表 17 Z_ACCL_LOW(第 0 页, 基地址 = 0x24)

位	说明
[15:0]	X 轴加速度计数据; 附加分辨率位

5.1.3 内部温度

TEMP_OUT 寄存器提供内部温度测量结果, 用于观察产品内部的相对温度变化(见表 19)。表 20 给出了 TEMP_OUT 数字编码示例。注意, 由于自热效应, 此温度高于环境温度。

表 18 TEMP_OUT(第 0 页, 基地址 = 0x0E)位

位	说明
[15:0]	温度数据; 二进制补码, 0.0125°C/LSB, 25°C = 0x0000

表 19 TEMP_OUT 数据格式示例

温度	十进制	十六进制	二进制
+85	+4800	0x12C0	0001 0010 1100 0000
+25 + 0.0113	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+25 + 0.00565	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
+25	0	0x0000	0000 0000 0000 0000
+25 - 0.00565	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
+25 - 0.0113	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-40	-5200	0xEBB0	1110 1011 1011 0000

6 功能性测试

6.1 接线方法

若用户通过SPI端口可访问该数据, 连接图参见图 8。

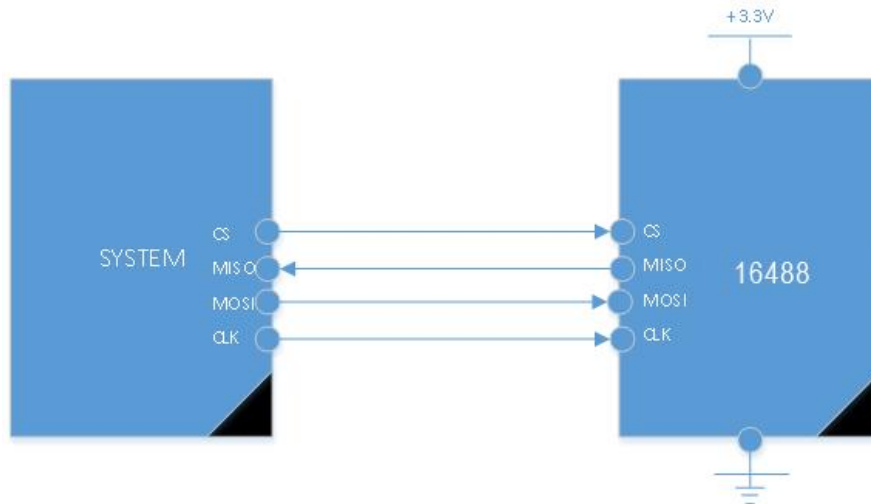


图 8 SPI 接线示意图

6.2 功能性测试

外部 MCU 通过 SPI 读取 16488D 惯性测量单元的各寄存器数据，按照相应的方法计算出陀螺、加速度计的参数，通过各项数据对产品的功能进行验证测试。

7 安装及调整

16488D 三轴陀螺组合通过 4 个 $\Phi 2.5$ 的通孔安装，采用螺钉进行安装。接插件安装时，插头应与插座各管脚对应好，并通过螺丝固定好。

建议与基准面相对的安装面平面度不大于 0.02mm，垂直度不大于 0.04mm，表面粗糙度不大于 0.8 μm 。

8 使用维护要求

使用前，必须检查系统安装位置，保证安装正确。仔细检查各信号线的连接，保证连接正确。

加电前，应对电缆网接点、电源的数值进行检查，电源极性禁止反接。

使用中，系统机械地应保证良好接地。

本产品应存放在温度为（15 ~ 35） $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 75%，且无酸碱无腐蚀性气体并通风良好的库房中。

附录 A 装箱清单

16488D 产品配套表

序号	名称	数量	单位	备注
1	16488D 产品	1	台	
2	产品合格证	1	份	
3	使用说明书	1	份	
4	装箱清单	1	份	
5	产品包装箱	1	个	

使用、保养注意事项

- 1、注意设备的加速度计和陀螺仪的量程，避免设备出现超量程的情况。
- 2、注意设备的供电电压，设备供电避免出现过压欠压的情况。
- 3、注意设备输出数据的传输距离。
- 4、避免热插拔，即避免带电插拔。
- 5、建议至少三个月通电一次进行自检。
- 6、请勿跌落：高空跌落、撞击等有可能导致内部结构件损坏。
- 7、防止腐蚀性液体腐蚀导航仪或浸泡在任何液体中。
- 8、避免辐射干扰：来自其他电子设备的辐射干扰可能会影响正常工作。

维修注意事项

- 在安装及使用过程中，如出现以下现象，请与我司工程师联系以确定是否可以继续使用或返厂维修。
- 1、外形出现明显损坏痕迹，包括严重划痕、磕碰痕迹、部件遗失等。
 - 2、无法正常安装至支架，或安装后达不到安装精度要求。
 - 3、电气接口有损失、损坏。
 - 4、常温常压下通电，3.3V 工作电流大于 0.5A。
 - 5、无法正常接收数据或接收错误数据。
 - 6、按使用说明书使用条件下使用，性能指标与使用说明书所载严重不符。
- *以上条款基于合同使用年限及保修政策的前提下进行。