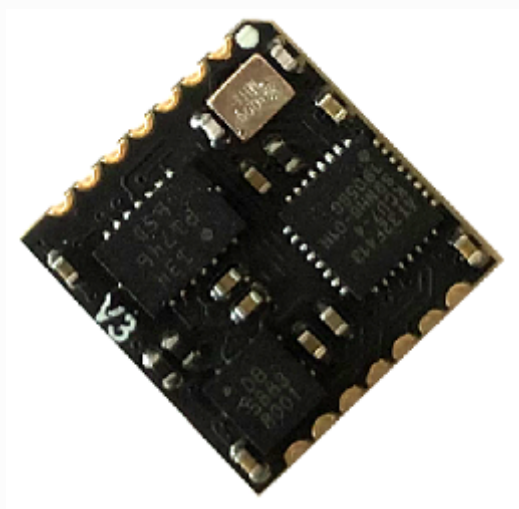


HI226/HI229 使用說明書

IMU/VRU/AHRS 慣性測量(姿態測量)模組, Rev 1.0



HI226/HI229 使用說明書

簡介

特性

板載傳感器

數據處理

通訊接口及供電

其他

硬體及尺寸

硬體參數

尺寸

引腳定義

性能指標

姿態角輸出精度

陀螺儀

加速度計

磁傳感器參數

模組數據接口參數

融合及校準算法

陀螺儀校準

磁干擾，抗干擾及磁校準

磁干擾分類

工作模式

地磁校準

安裝及焊接

參考系定義

使用指南

模組與PC機連接

模組與MCU進行連接

串口通訊協議

幀格式

舊版數據包(2020年6月前)

新版數據包

0x90(用戶ID)

0xA0(加速度)

0xB0(角速度)

0xC0(磁場強度)

0xD0(歐拉角)

0xD1(四元數)

0xF0(氣壓)

0X91(IMUSOL)

0x62(GWSOL)

數據幀結構示例

數據幀配置為 0x90,0xA0,0xB0,0xC0,0xD0,0xF0 數據包

數據幀配置為 0x91 數據包

通用AT指令

AT+ID

AT+URFR

AT+INFO

AT+ODR

AT+BAUD

AT+EOUT

AT+RST

AT+TRG

AT+SETPEL

AT+MODE

AT+GYRCTL

AT+GWID

AT+GWCFG

附錄A - 評估板

評估板簡介

從評估板上取下產品

附錄B - 四元數-歐拉角轉換

四元數基礎

四元數與旋轉矩陣・歐拉角轉換

四元數->旋轉矩陣

四元數->歐拉角

歐拉角->四元數

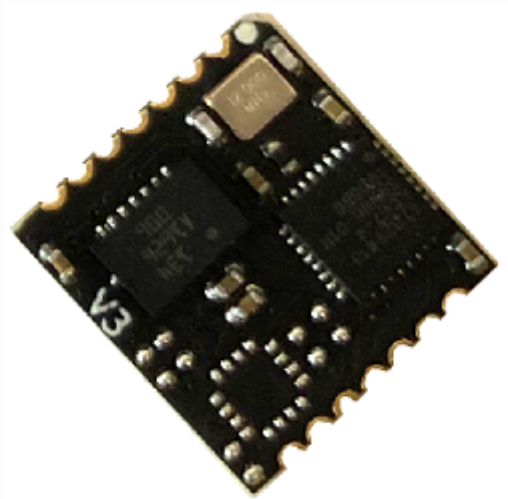
歐拉角->旋轉矩陣(n->b)

旋轉矩陣(n->b) 到歐拉角

附錄C - 韌體升級與恢復出廠設置

簡介

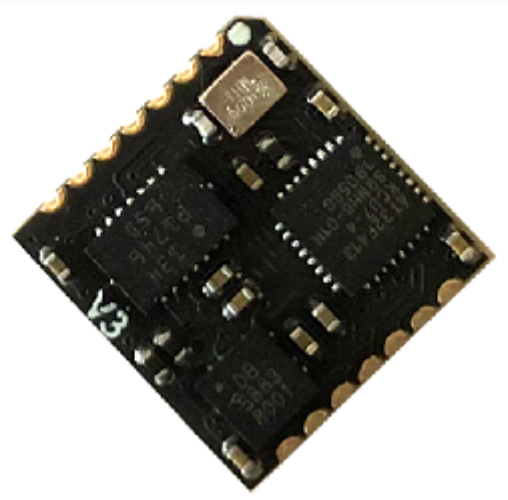
HI226是超核電子推出的一款超低成本、高性能、小體積、低延時的慣性測量單元(IMU)，本產品集成了三軸加速度計、三軸陀螺儀和一款微控制器。可輸出經過傳感器融合算法計算得到的基於當地地理坐標的三維方位數據，包含無絕對參考的相對航向角，俯仰角和橫滾角。同時也可以輸出校準過的原始的傳感器數據。



典型應用:

- 掃地機/機器人航向跟蹤/飛鼠/遊戲控制器

HI229是超核電子推出的一款低成本、高性能、小體積、低延時的航姿參考單元（AHRS），本產品集成了三軸加速度計、三軸陀螺儀、三軸磁場傳感器和一款微控制器。可輸出經過傳感器融合算法計算得到的基於當地地理坐標的三維方位數據，包含航向角，俯仰角和橫滾角。同時也可以輸出校準過的原始的傳感器數據。本產品具有一定的室內地磁抗干擾性能，在一定強度的地磁場干擾環境下仍可正常工作。



典型應用:

- VR\動作捕捉
- 高動態環境下姿態測量\運動性能評估
- 無人機控制

特性

板載傳感器

- 三軸陀螺儀, 最大量程: $\pm 2000^{\circ}/s$
- 三軸加速度計, 最大量程: $\pm 8G$
- 三軸磁場傳感器, 最大量程: 800mG (毫高斯)

數據處理

- 加速度和陀螺儀出廠前經過三軸非正交和標度因子校準
- 數據融合算法計算並輸出地理坐標系下的旋轉四元數及歐拉角等姿態資訊

通訊接口及供電

- 串口(兼容TTL 可直接與5V 或3.3V 串口設備連接)
- 供電電壓: 3.3 (+/- 100 mV)
- 最大峰值功耗: 32mA

其他

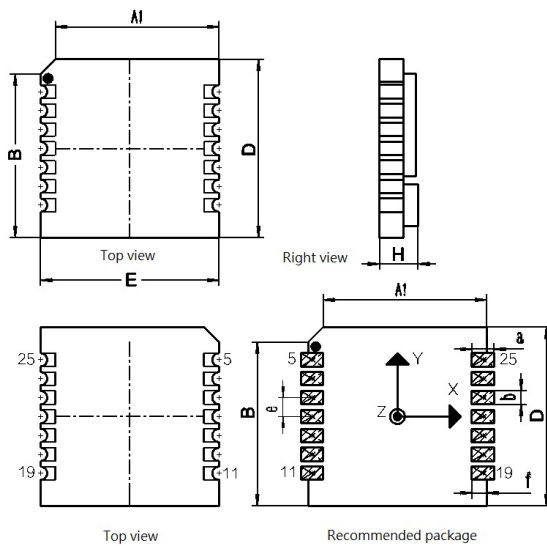
- PC端上位機程序, 提供實時數據顯示, 波形, 校準及excel 數據記錄功能
- 多項模組參數用戶可配置

硬體及尺寸

硬體參數

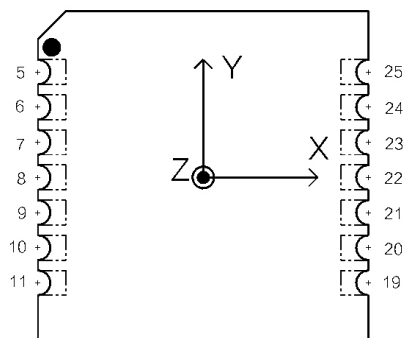
參數	描述
輸出數據接口	UART(TTL 1.8V - 3.3V)
工作電壓	3.3V ($\pm 100mV$)
功耗	86mW @3.3V
溫度範圍	-20°C - 85 °C
最大線性加速度	0 - 115 m/s^2
尺寸	12 x 12 x 2.6mm (W x L x H)
板載傳感器	三軸加速度計 三軸陀螺儀 三軸磁場傳感器(HI229)

尺寸



符號	最小值	典型值	最大值	單位
A1	-	11	-	mm
B	-	11	-	mm
D	-	12	-	mm
E	-	12	-	mm
H	2.5	2.6	2.7	mm
a	-	1.5	-	mm
b	-	0.9	-	mm
c	-	1	-	mm
e	-	1.27	-	mm
f	-	1	-	mm

引腳定義



引腳號	名稱	說明
5	N/C	保留
6	VCC	電源 3.3V
7	SYNC_OUT	數據輸出同步: 數據輸出時, 此引腳為高電平, 空閒時為低電平。
8	RXD	模組串口接收 UART RXD(接 MCU 的 TXD)
9	TXD	模組串口發送 UART TXD (接 MCU 的 RXD)
10	SYNC_IN	數據輸入同步: 內部下拉, 當模組檢測到上升沿時, 輸出一幀數據。最高同步頻率為200Hz, 且輸出幀率不能超過當前串口波特率下總帶寬。
11	N/C	保留
19	GND	GND
20	RST	復位, 內部上拉。>10uS 低電平復位模組。無需要外接阻容, 建議接到 MCU的GPIO引腳以實現軟體復位
21	N/C	保留
22	N/C	保留
23	N/C	保留
24	GND	GND
25	N/C	保留

性能指標

姿態角輸出精度

姿態角	典型值
橫滾角\俯仰角 - 靜態誤差	0.8°
橫滾角\俯仰角 - 動態誤差	2.5°
零偏穩定性	10°/h
運動中航向角精度(9軸模式下,無磁干擾,地磁校準後)	3°

陀螺儀

參數	值
測量範圍	±2000°/s
非線性度	±0.1% (25°最佳)
噪聲密度	0.08°/s/ \sqrt{Hz}
採樣率	2000Hz

加速度計

參數	值
測量範圍	±8G (1G = 1x 重力加速度)
非線性度	±0.5% (25°最佳)
最大零點偏移	10mG
噪聲密度	250 $\mu G\sqrt{Hz}$
採樣率	500Hz

磁傳感器參數

參數	值
測量範圍	±8Gauss
非線性度	±0.1%
採樣率	100Hz

模組數據接口參數

參數	值
串口輸出波特率	4800/9600/115200/460800可選
幀輸出速率	0/1/10/25/50/100/200/400/500Hz 可選

融合及校準算法

陀螺儀校準

每一個姿態傳感器都單獨進行過全測量範圍內的校準和測試。陀螺和加速度計的非正交和刻度因子誤差參數都會保存在模組內部的Flash中。陀螺儀自動校準需要在上電後靜止模組3s 左右以獲得最好的校準效果。如果上電靜置短於規定時間，則模組陀螺儀零偏校準效果會下降。

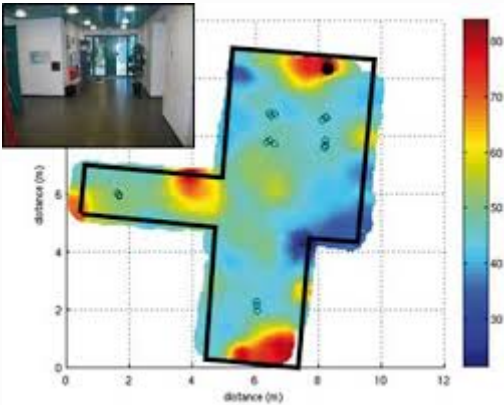
姿態傳感器內建陀螺零速檢測機制，當檢測到長時間內三軸陀螺速度均小於1°/s時，模組認為當前為靜止狀態，陀螺輸出為零偏，此次模組會將此時的陀螺讀數記錄下來作為零偏補償。所以本產品不能用於旋轉速度<1°/s的運動場景。(既旋轉速度低於秒針平均轉速的1/6)

磁干擾，抗干擾及磁校準

磁干擾分類

種類	定義	典型干擾源	影響	措施
空間磁場干擾	干擾不隨傳感器運動而運動，而處於世界坐標系下	各種固定的磁干擾源，傢俱，家用電器，電纜，房屋內的鋼筋結構等。一切不隨磁傳感器運動而運動的干擾源	無論磁場傳感器是否校準的好，這些空間磁場的干擾(或者說環境磁場不均勻)都會使得空間地磁場發生畸變。地磁補償會錯誤並且無法獲得正確的航向角。他們是造成室內地磁融合難以使用的主要元兇。這種干擾不能被校準，會嚴重影響地磁性能。空間磁場干擾在室內尤其嚴重。	模組內置的勻質磁場檢測及屏蔽非勻質磁場
傳感器坐標系下的干擾	干擾源隨傳感器運動而運動	模組PCB，與模組固定在一起的板子，儀器設備，產品等。他們和磁傳感器視為同一個剛體，隨磁傳感器運動而運動	對傳感器造成硬磁/軟磁干擾。這些干擾可以通過地磁校準算法加以很好的消除。	地磁校準

下圖是一個典型的室內磁場分佈圖。可以看到：一般室內環境的空間磁場畸變是比較嚴重的。



Notes

在室內環境下，空間磁場干擾尤其嚴重，而且空間磁干擾並不能通過校準來消除。在室內環境下，儘管模組內置均質磁場檢測及屏蔽機制，但9軸模式航向角的準確度很大程度上取決於室內磁場畸變程度，如果室內磁場環境很差(如電腦機房旁，電磁實驗室，車間，地下車庫等等)，即使校準後，9軸的航向角精度可能還不如6軸甚至會出現大角度誤差。

工作模式

正因為地磁場非常容易受到空間干擾，所以使用9軸模式時應非常注意。下表列舉了不同的使用場合和工況下的使用建議

模式	適用環境	典型應用	優點	缺點	注意事項
6 軸模式	各種環境	雲台等低動態姿態檢測，室內機器人	1. 姿態角輸出穩定性好 2. 完全不受磁場干擾	航向角隨時間緩慢漂移	航向角會隨時間緩慢飄移且無法補償
9 軸模式	無磁干擾環境	1.指南針，尋北系統 2. 空曠且磁干擾較少的室內，模組基本不會大範圍在室內移動(典型的如攝影棚內動作捕捉，且被測者不會做大範圍走動)	1. 航向角不會隨時間漂移 2. 一旦檢測到地磁場可快速修正航向角指北	任何磁干擾都會出現航向角準確度下降。室內干擾嚴重情況下 航向角無法指向正確方向。另外，移動機器人的金屬結構和電機運行時會產生非常強的磁干擾，所以移動機器人平台不適用於9軸模式。	首次使用前需要校準地磁傳感器

地磁校準

模組的自動地磁校準系統只能處理和模組安裝在一起的，固定的磁場干擾。安裝環境如果有磁場干擾，這種干擾必須是固定的，並且這個干擾磁場與模組 安裝之後不會再發生距離變化(例：模組安裝在一個鐵材料之上，因為鐵會有磁場干擾，這時就需要把鐵與模組一起旋轉校準，並且這個鐵在使用當中是不會和羅盤再分開的(發生相對位移)，一旦分開是需要再重新校準。如果這個鐵大小是不固定的，或與羅盤的距離變化也不是固定的，這種干擾是無法校準，即使校準成功，也會精度非常差，只能避而遠之安裝。安全距離控制在 40CM 以上)。

本模組集成了主動無干預地磁校準算法。模組會自動收集地磁場資訊並進行硬磁軟磁校準參數估計，校準成功後校準資訊會保存在模組Flash上。用戶無須任何操作即可實現地磁在線校準。首次使用時，模組會自動採集周圍地磁場，並且嘗試估計地磁傳感器零偏參數，一旦估算完成。在靜止環境下，模組會自動將校準參數寫入Flash以便下次直接調用。所以當首次使用模組並且需要使用9軸模式時，應進行如下校準操作：

- 在盡量小範圍內，緩慢的讓模組運動和旋轉，或者進行8字運動 或者分別繞每個軸360度。讓模組經歷盡量多的姿態。一般情況下，如果地磁干擾在可接受的範圍內，即可完成校準。如果後面在同樣地磁環境下(同地點)，則無需再次校準。如果始終沒能成功校準模組，說明周圍地磁場干擾比較大。

地磁校準狀態可以使用AT指令來查看：

發送 `AT+INFO=HSI` 指令，模組會打印當前地磁校準系統狀態：

Received Message

```
valid:      13  
fiterr:     0.026630  
bin_status: 100%  
cal_cnt:    1  
flux:       61.265064  
inclination: 63.203552
```

OK

Clear

Send AT

AT+INFO=MSI

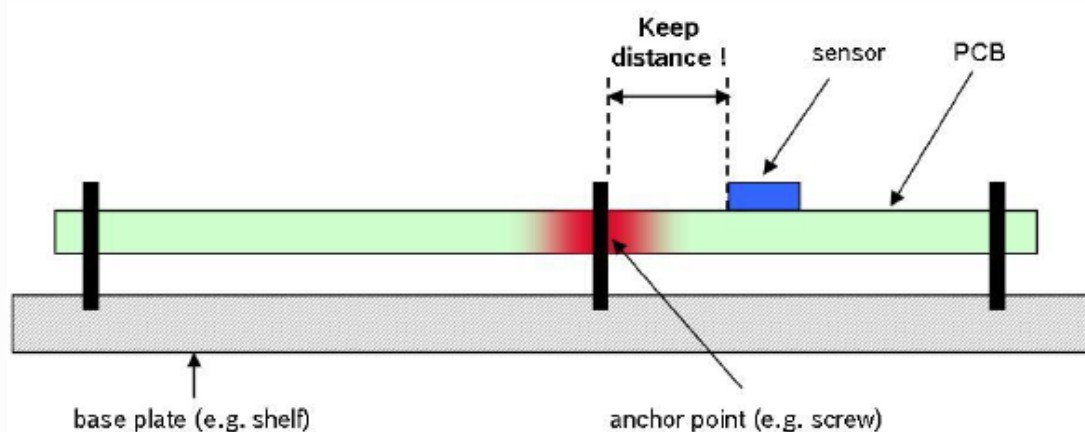
Write

HSI參數顯示	意義	說明
valid	地磁校準有效標誌	0: 不存在有效校準參數(沒有校準或者從來沒有校準成功過)。 5: 存在有效校準參數，但擬合效果不好(校準環境有地磁干擾/校準動作過快/校準時所經歷的旋轉不足) 13:存在有效的校準參數且校準效果良好
fiterr	最近一次擬合殘差	殘差越小，說明參數擬合效果越好，通常在0.05以下說明校準結果已經足夠好。如果擬合結果始終>0.1，說明地磁干擾很大，最好再次校準以期得到更好的校準結果。擬合殘差會隨著時間緩慢增長。
bin_status	當前地磁數據採集進度	表示最近一次地磁數據採集進度，為百分比： 0-100%。 100%時會嘗試擬合地磁校準參數。如果擬合成功，則會更新valid 和 fiterr。
cal_cnt	校準成功次數	擬合器校準地磁參數完成的次數，該數據累加，掉電保存
flux	擬合器估計的地磁場強	最近一次擬合器估計出的地磁場強，單位為uT
inclination	擬合器估計的地磁傾角	最近一次擬合器估計出的磁傾角，單位為°

- 雖然地磁參數估計可以在線自動採集數據，自動的動態擬合地磁校準參數。但是如果周圍地磁環境改變(比如需要到另外房間或者室內室外切換)，最好還需重複手工校準操作。

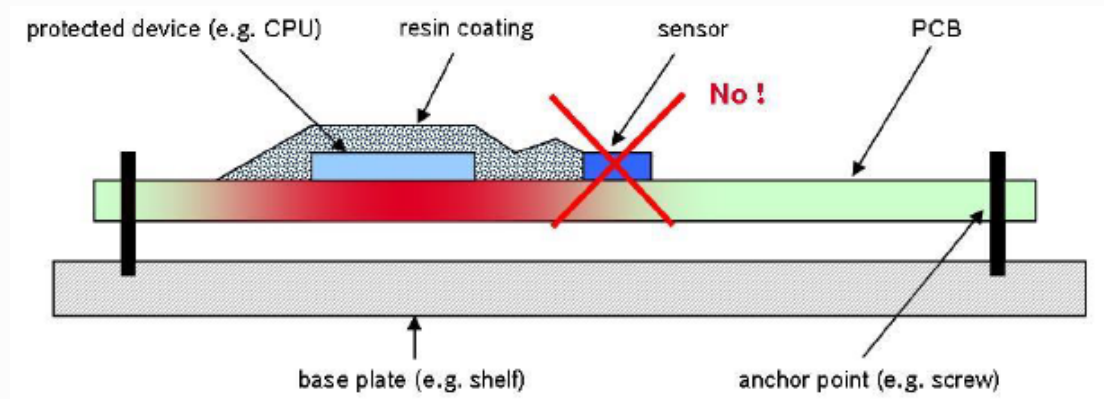
安裝及焊接

- 安裝位置請遠離PCB容易形變點，盡量遠離PCB邊緣(>30mm)，遠離PCB定位螺絲孔(>10mm)等。



- 安裝位置請遠離強磁設備，如電機，喇叭等強磁器件。

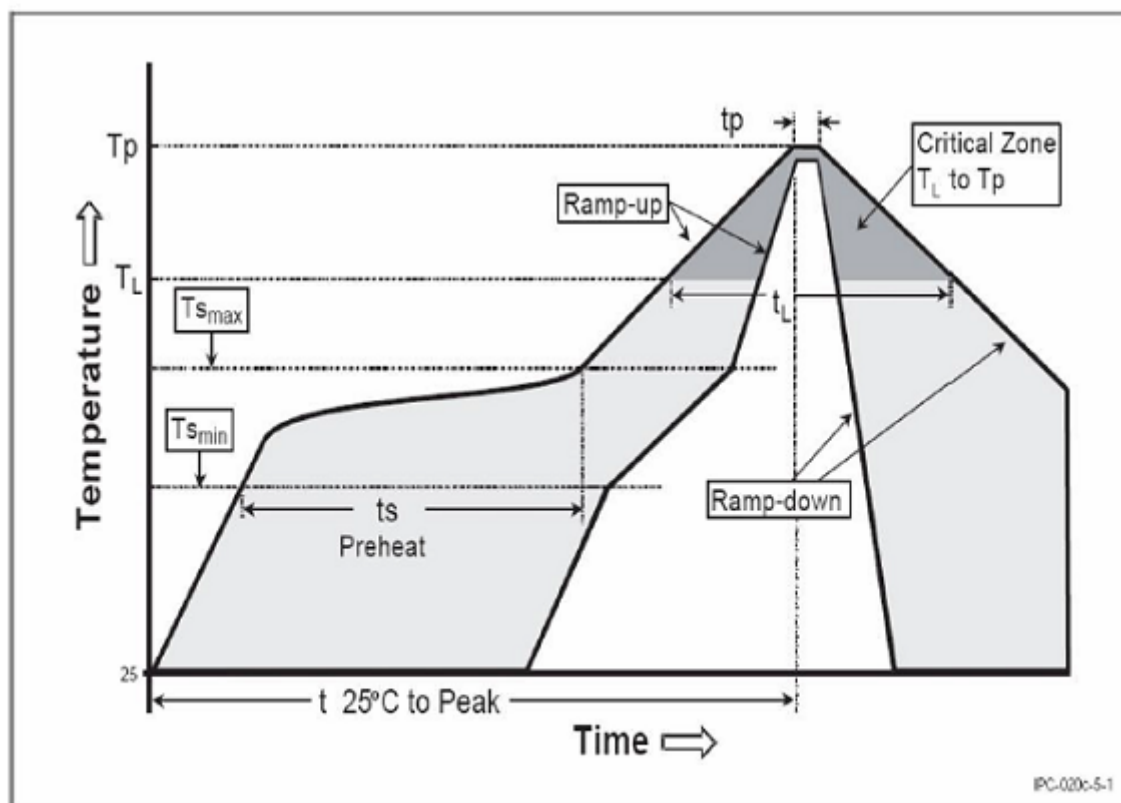
3. 由於MEMS傳感器對PCB板應力非常敏感, 建議手工焊接模組, 不使用回流焊焊接模組, 否則會對傳感器性能造成影響。如果必須使用回流焊, 則應注意: 用印刷刮板在網板上印刷錫膏, 使錫膏通過網板開口漏印到PCB上。為保證回流焊質量, 推薦焊盤部分對應的鋼網厚度為0.18mm。
4. 組裝好的PCB不得使用超聲波清潔儀進行清潔。
5. 本產品不可使用塑封或噴塗三防漆, 噴漆或塑封會造成傳感器應力改變進而影響性能。



6. 推薦回流焊的爐溫曲線圖如下:

Profile Feature		Pb-Free Assembly
Average Ramp-Up Rate ($T_{s_{max}}$ to T_p)		3° C/second max.
Preheat - Temperature Min ($T_{s_{min}}$) - Temperature Max ($T_{s_{max}}$) - Time ($t_{s_{min}}$ to $t_{s_{max}}$)		150 °C 200 °C 60-180 seconds
Time maintained above: - Temperature (T_L) - Time (t_L)		217 °C 60-150 seconds
Peak/Classification Temperature (T_p)		260 °C
Time within 5 °C of actual Peak Temperature (t_p)		20-40 seconds
Ramp-Down Rate		6 °C/second max.
Time 25 °C to Peak Temperature		8 minutes max.

Note 1: All temperatures refer to top-side of the package, measured on the package body surface.



參考: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/application_notes/BST-MA-S-HS000.pdf

參考系定義

本產品採用右手(RH, Right-Hand)坐標系。輸出的四元數及歐拉角為 傳感器坐標系 到 慣性坐標系(世界坐標系) 的旋轉。其中歐拉角旋轉順序為 ZYX(先轉Z軸，再轉Y軸，最後轉X軸)旋轉順序，歐拉角具體定義如下：

- 繞 Z 軸方向旋轉: 航向角\Yaw\phi(\psi) 範圍: -180° - 180°
- 繞 Y 軸方向旋轉: 俯仰角\Pitch\theta(\theta) 範圍: -90°-90°
- 繞 X 軸方向旋轉: 橫滾角\Roll\psi(\phi)範圍: -180°-180°

本產品使用北西天(North-West-Up NWU) 坐標系統，即視為模組的地理坐標系(世界坐標系)定義如下：

- X 軸正方向指向北
- Y 軸正方向指向西
- Z 軸正方向指向天

當採用 NWU 系時，如果將模組視為飛行器的話。X 軸應視為機頭方向。當傳感器系與慣性系重合時，歐拉角的理想輸出為:Pitch = 0°, Roll = 0°, Yaw = 0°

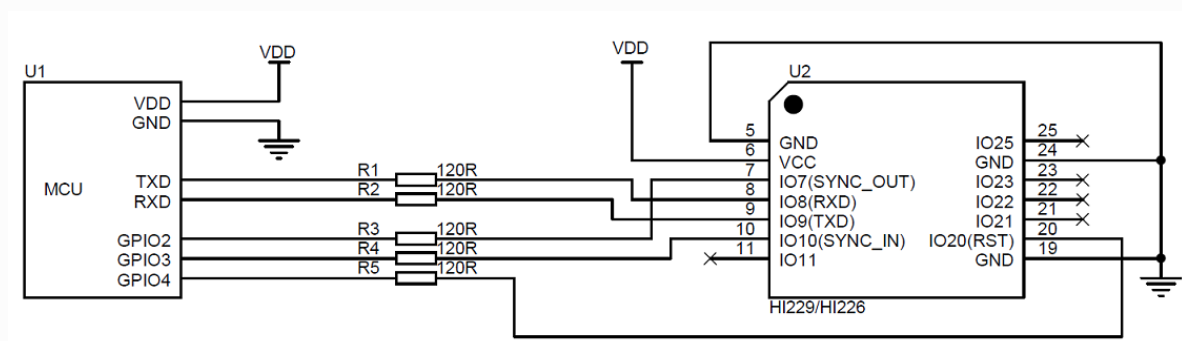
使用指南

模組與PC機連接

建議使用評估板與PC機進行連接，評估板板載USB供電及USB轉串口功能，可以方便的配合PC機上的評估軟體進行性能測試。具體請參見附錄中的評估板一節。

模組與MCU進行連接

模組與MCU通過TTL電平的串口進行連接，建議模組的RST引腳建議接到MCU的GPIO上。方便MCU強制復位模組。



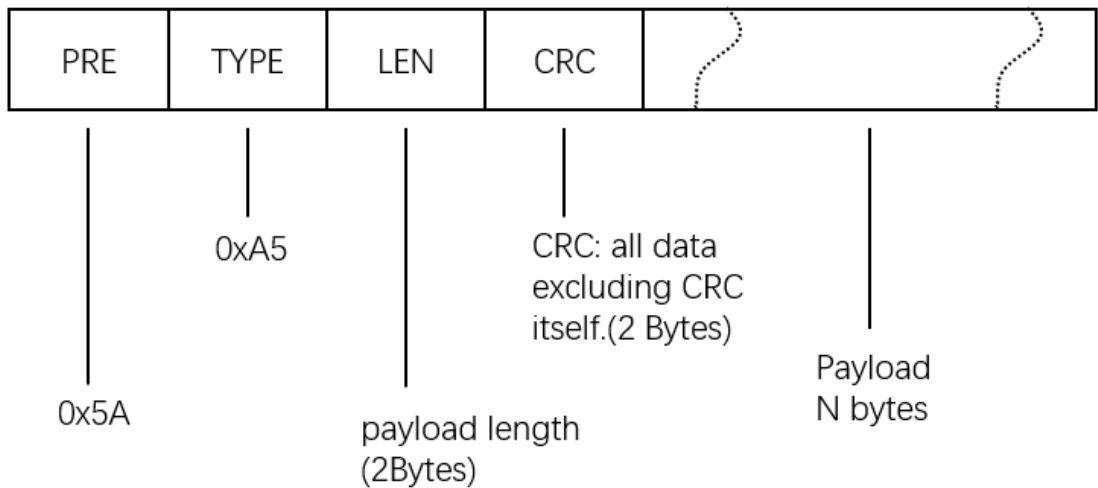
!!! note

1. 如不使用同步輸入(SYNC_IN) 和同步輸出功能(SYNC_OUT) 可不接 SYNC_IN 和 SYNC_OUT。
2. 120歐電阻的作用是為了方便調試，以及防止MCU和模組電平不匹配，可以去掉，建議保留。
3. VCC的電壓範圍具體參加手冊說明

串口通訊協議

幀格式

模組上電後，模組默認按100Hz (出廠默認輸出速率) 輸出幀數據，幀格式如下：



其中：

域	值	長度 (字節)	說明
PRE	0x5A	1	固定為0x5A
TYPE	0xA5	1	固定為0xA5
LEN	1-512	2	幀中數據域的長度。LSB(低字節在前)，長度表示數據域的長度，不包含 PRE , TYPE , LEN , CRC 字段。
CRC	-	2	除CRC 本身外其餘所有幀數據的16 位CRC 校驗和。LSB(低字節在前)
PAYLOAD	-	1-512	一幀攜帶的數據。PAYLOAD 由若干個 子數據包 組成。每個數據包 包含：數據包標籤(DATA_ID)和數據(DATA) 兩部分。DATA_ID 決定了數據的類型及長度， DATA 為數據包內容。

CRC實現函數：

```

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 }

```

舊版數據包(2020年6月前)

此款協議適用於2020年6月前出貨的硬體版本，請注意硬體差異，新版數據包協議將無法在舊款硬體上執行。

寄存器地址 (REG_ADDR)	寄存器長度(DATA長度, 單位字節)	名稱	單位	支持該數據包 的產品
0x90	1	用戶ID	無	HI22X
0xA0	6	加速度	0.001G[^G]	HI22X
0xA5	6	線性加速度	0.001G	HI22X
0xB0	6	角速度	0.1°/s	HI22X
0xC0	6	磁場強度	0.001Gauss	HI22X
0xD0	6	歐拉角 (整形輸出)	度	HI22X
0xD9	12	歐拉角(浮點輸出)	度	HI22X
0xD1	16	四元數	N/A	HI22X
0xF0	4	氣壓	Pa	N/A
0x71	128-256字節可變	無線節點四元數集合	無	HI221GW(接收機)
0x72	48-96字節可變	無線節點歐拉角集合	同0xD0	HI221GW(接收機)
0x75	48-96字節可變	無線節點加速度集合	同0xA0	HI221GW(接收機)
0x78	48-96字節可變	無線節點角速度集合	同0xB0	HI221GW(接收機)
0x61	3	無線數據幀拓展標識	N/A	HI221GW(接收機)

- 0x90
用戶ID
- 0xA0
加速度，格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，X、Y、Z 三軸共6 個字節，LSB。傳感器輸出的原始加速度
- 0xA5
性加速度，格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，X、Y、Z 三軸共6 個字節，LSB。地理坐標系下去除重力份量的加速度值
- 0xB0
角速度，格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，X、Y、Z 三軸共6 個字節，LSB。傳感器輸出的角速度

- 0xC0
磁場強度，格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，X、Y、Z 三軸共6 個字節，LSB。傳感器輸出的磁場強度
- 0xD0
歐拉角整形格式，格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，順序為Pitch/Roll/Yaw。LSB。接收到Roll, Pitch 為物理值乘以100 後得到的數值，Yaw 為乘以10 得到的數值舉例：當接收到的Yaw = 100 時，表示航向角為10°
- 0xD9
浮點格式輸出的歐拉角。格式為float，共3 個值(Pitch/Roll/Yaw)，每個值占4 字節(float 型單精度浮點數)，LSB。
- 0XD1
四元數，格式為float，共4個值，順序為:W X Y Z.。每個值占4 字節(float)，整個四元數為4個float，共16字節，LSB。
- 0XF0
氣壓。格式為float。(只針對有氣壓傳感器的產品)
- 0x71
節點四元數集合. 所有節點的四元數， 每個節點16字節，從0到最後一個節點順序排列。每個節點 4個浮點數，分別為W X Y Z, 每個數用float 型表示，每個float 4字節。float為LSB
- 0x72
節點歐拉集合. 所有節點的歐拉角， 每個節點6字節，從0到最後一個節點順序排列。每個節點歐拉為角整形格式， 格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，順序為Pitch/Roll/Yaw。LSB。接收到Roll, Pitch 為物理值乘以100 後得到的數值，Yaw 為乘以10 得到的數值舉例：當接收到的Yaw = 100 時，表示航向角為10°
- 0x75
節點加速度集合. 每個節點6字節，從0到最後一個節點順序排列。每個節點3個int16_t 型數據。分別為X Y Z的加速度。每個int16_t 占2字節， LSB
- 0x78
節點角速度集合. 每個節點6字節，從0到最後一個節點順序排列。每個節點3個int16_t 型數據。分別為X Y Z的角速度。每個int16_t 占2字節， LSB
- 0x61
數據幀拓展資訊標識，共3個字節:

數據幀拓展資訊字節偏移	值	說明
0	-	保留
1	GWID	接收機GWID
2	CNT	此幀包含無線節點數: 1-16

新版數據包

由於硬體的更新，台版於2020年6月後將已默認使用此新版數據包協議，簡化了開發者的流程。舊款產品仍適用於Uranus軟體。

數據包標籤 (DATA_ID)	數據包長度(包含標 籤1字節)	名稱	支持該數據包的產 品	備註
0x90	2	用戶ID	HI226/HI229/HI221	
0xA0	7	加速度	HI226/HI229/HI221	
0xB0	7	角速度	HI226/HI229/HI221	
0xC0	7	磁場強度	HI226/HI229/HI221	
0xD0	7	歐拉角	HI226/HI229/HI221	
0xD1	17	四元數	HI226/HI229/HI221	
0x91	76	IMUSOL(IMU數據集 合)	HI226/HI229/HI221	台版 默認 輸出
0x62	76*節點數量	GWSOL(無線節點數 據集合)	HI221GW	台版 默認 輸出

0x90(用戶ID)

共2字節，用戶設置的ID。

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0x90
1	uint8_t	1	-	用戶ID

0xA0(加速度)

共7 個字節，LSB。輸出傳感器的原始加速度

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0xA0
1	int16_t	2	0.001G(1G = 1重力加速度)	X軸加速度
3	int16_t	2	0.001G	Y軸加速度
5	int16_t	2	0.001G	Z軸加速度

0xB0(角速度)

共7字節，LSB。輸出傳感器的原始角速度

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤：0xB0
1	int16_t	2	0.1°/s	X軸角速度
3	int16_t	2	0.1°/s	Y軸角速度
5	int16_t	2	0.1°/s	Z軸角速度

0xC0(磁場強度)

共7字節，LSB。輸出傳感器的原始磁場強度

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0xC0
1	int16_t	2	0.001Gauss	X軸磁場強度
3	int16_t	2	0.001Gauss	Y軸磁場強度
5	int16_t	2	0.001Gauss	Z軸磁場強度

0xD0(歐拉角)

共7字節，LSB。格式為int16，共三個軸，每個軸占2 個字節，順序為Pitch/Roll/Yaw。接收到 Roll, Pitch 為物理值乘以100 後得到的數值，Yaw 為乘以10 得到的數值。

例：當接收到的Yaw = 100 時，表示航向角為10°

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0xD0
1	int16_t	2	0.01°	Pitch(俯仰角)
3	int16_t	2	0.01°	Roll(橫滾角)
5	int16_t	2	0.1°	Yaw(航向角)

0XD1(四元數)

共17字節，格式為float，共4個值，順序為:W X Y Z.。每個值占4 字節(float)，整個四元數為4個float，LSB。

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0xD1
1	float	4	-	W
5	float	4	-	X
9	float	4	-	Y
13	float	4	-	Z

0XF0(氣壓)

共5字節，格式為float。(只針對有氣壓傳感器的產品)

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0xF0
1	float	4	Pa	大氣壓

0X91(IMUSOL)

共76字節，新加入的數據包，用於替代A0,B0,C0,D0,D1等數據包。集成了IMU的傳感器原始輸出和姿態解算數據。

字節偏移	類型	大小	單位	說明
0	uint8_t	1	-	數據包標籤:0x91
1	uint8_t	1	-	ID
2	-	6	-	保留
8	uint32_t	4	ms	時間戳資訊，從系統開機開始累加，每毫秒增加1
12	float	12	1G(1G = 1 重力加速度)	X,Y,Z軸的加速度，注意單位和0xA0不同
24	float	12	deg/s	X,Y,Z軸的角速度，注意單位和0xB0不同
36	float	12	uT	X,Y,Z軸的磁場強度(HI229支持,注意單位和0xC0不同)
48	float	12	deg	節點歐拉角集合，順序為：橫滾角(Roll)，俯仰角(Pitch)，航向角(Yaw)(注意順序和單位與0xD0數據包不同)
60	float	16	-	節點四元數集合,順序為WXYZ

0x62(GWSOL)

新版本無線接收機支持此數據包。數據包前8個字節為接收機資訊。後面分為N個數據塊。每個數據塊描述一個節點的姿態數據(最大支持16個節點)。每個數據塊大小為76字節，數據結構同0x91。

此協議包數據量較大，建議將波特率調整至921600以獲得最高的幀率輸出。此協議需要接收機韌體版本>1.06, 上位機版本>1.2.4.9。格式如下：

字節偏移	大小	類型	單位	說明
0	1	uint8_t	-	數據包標籤:0x62
1	1	uint8_t	-	GWID, 接收機網絡ID
2	1	uint8_t	-	N, 此幀包含節點數據塊個數
3	5	-	-	保留
----節點數據塊開始----	-	-	-	數據結構同0x91
8+76*N(N=0-15)	1	uint8_t	-	數據包標籤:0x91
9+76*N(N=0-15)	1	uint8_t	-	節點N的ID
10+76*N	10	-	-	保留
20+76*N	12	float	-	節點N三軸加速度
32+76*N	12	float	-	節點N三軸角速度
44+76*N	12	float	-	節點N軸磁場強度
56+76*N	12	float	-	節點N歐拉角
68+76*N	16	float	-	節點N四元數
----節點數據塊結束----	-	-	-	-----

數據幀結構示例

數據幀配置為 0x90, 0xA0, 0xB0, 0xC0, 0xD0, 0xF0 數據包

使用串口助手採樣一幀數據,共41字節, 前6字節為幀頭, 長度和CRC校驗值。剩餘35字節為數據域。假設數據接收到C語言數組 buf 中。如下所示：

5A A5 23 00 FD 61 **90** 00 **A0** 55 02 3D 01 E2 02 **B0** FE FF 17 00 44 00 **C0** 80 FF 60 FF 32 FF **D0** 64 F2 6C 0E BB 01 **F0** 00 00 00 00

- 第一步：判斷幀頭，得到數據域長度和幀CRC：

幀頭: 5A A5

幀數據域長度: 23 00 : (0x00<<8) + 0x23 = 35

幀CRC校驗值: FD 61 : (0x61<<8) + 0xFD = 0x61FD

- 第二步：校驗CRC

```

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

```

得到CRC值為0x61FD, 與幀攜帶的CRC值相同, 幀CRC校驗通過。

- 第三步：接收數據

90 00 : ID 數據包, 0x90為數據包標籤, ID = 0x00.

A0 55 02 3D 01 E2 02 :加速度數據包,0xA0為數據包標籤, 三軸加速度為:

X軸加速度= (int16_t)((0x02<<8)+ 0x55) = 597(單位為mG)

Y軸加速度 = (int16_t)((0x01<<8)+ 0x3D) = 317

Z軸加速度= (int16_t)((0x02<<8)+ 0xE2) = 738

B0 FE FF 17 00 44 00 :角速度數據包,0xB0為數據包標籤, 三軸角速度為:

X軸角速度= (int16_t)((0xFF<<8)+ 0xFE) = -2(單位為0.1°/s)

Y軸角速度 = (int16_t)((0x00<<8)+ 0x17) = 23

Z軸角速度= (int16_t)((0x00<<8)+ 0x44) = 68

C0 80 FF 60 FF 32 FF :磁場數據包,0xC0為數據包標籤, 三軸磁場為:

X軸角速度= (int16_t)((0xFF<<8)+ 0x80) = -128 (單位為0.001Gauss)

Y軸角速度 = (int16_t)((0xFF<<8)+ 0x60) = -160

Z軸角速度= (int16_t)((0xFF<<8)+ 0x32) = -206

D0 64 F2 6C 0E BB 01 歐拉角數據包, 0xD0為數據包標籤

Pitch= (int16_t)((0xF2<<8)+ 0x64) / 100 = -3484 / 100 = -34.84 °

Roll= (int16_t)((0x0E<<8)+ 0x6C) / 100 = 3692 / 100 = 36.92°

Yaw = (int16_t)((0x01<<8)+ 0xBB) / 10 = 443 /10 = 44.3°

F0 00 00 00 00 氣壓數據包, 0xF0為數據包標籤

```

1      float prs;
2      prs = memcpy(&prs, &buf[37], 4);

```

最後得到結果:

1	id	:	0		
2	acc(G)	:	0.597	0.317	0.738
3	gyr(deg/s)	:	-0.200	2.300	6.800
4	mag(uT)	:	-12.800	-16.000	-20.600
5	eul(R/P/Y)	:	36.920	-34.840	44.300

數據幀配置為 0x91 數據包

使用串口助手採樣一幀數據,共82字節,前6字節為幀頭,長度和CRC校驗值。剩餘76字節為數據域。假設數據接收到C語言數組 `buf` 中。如下所示:

5A A5 4C 00 6C 51 91 00 A0 3B 01 A8 02 97 BD BB 04 00 9C A0 65 3E A2 26 45 3F 5C E7 30
3F E2 D4 5A C2 E5 9D A0 C1 EB 23 EE C2 78 77 99 41 AB AA D1 C1 AB 2A 0A C2 8D E1 42
42 8F 1D A8 C1 1E 0C 36 C2 E6 E5 5A 3F C1 94 9E 3E B8 C0 9E BE BE DF 8D BE

- 第一步: 判斷幀頭, 得到數據域長度和幀CRC:

幀頭: 5A A5

幀數據域長度: 4C 00 : $(0x00 \ll 8) + 0x4C = 76$

幀CRC校驗值: 6C 51 : $(0x51 \ll 8) + 0x6C = 0x516C$

- 第二步: 校驗CRC

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

得到CRC值為0x516C. 幀CRC校驗通過。

- 第三步: 接收數據

從 0x91 開始為數據包的數據域。在C語言中可以定義結構體來方便的讀取數據:

定義0x91數據包結構體如下:

```
1  __packed typedef struct
2  {
3      uint8_t    tag;                /* data packet tag */
4      uint8_t    id;
5      uint8_t    rev[6];            /* reserved */
6      uint32_t    ts;                /* timestamp */
7      float      acc[3];
8      float      gyr[3];
9      float      mag[3];
10     float      eul[3];            /* euler angles: Roll,Pitch,Yaw */
11     float      quat[4];           /* quaternion */
12 }id0x91_t;
```

`__packed` 為編譯器關鍵字(Keil下), 表示結構體按字節緊對齊, 結構體每一個元素一一對應 0x91數據包的結構定義。接收數據時將接收到的數組直接memcpy到結構體即可: (注意定義結構體時必須4字節對齊), 其中buf 指向幀頭


```

1  /* 接收數據並使用0x91數據包結構定義來解釋數據 */
2  __align(4) id0x91_t dat;    /* struct must be 4 byte aligned */
3  memcpy(&dat, &buf[6], sizeof(id0x91_t));

```

最後得到dat數據結果：

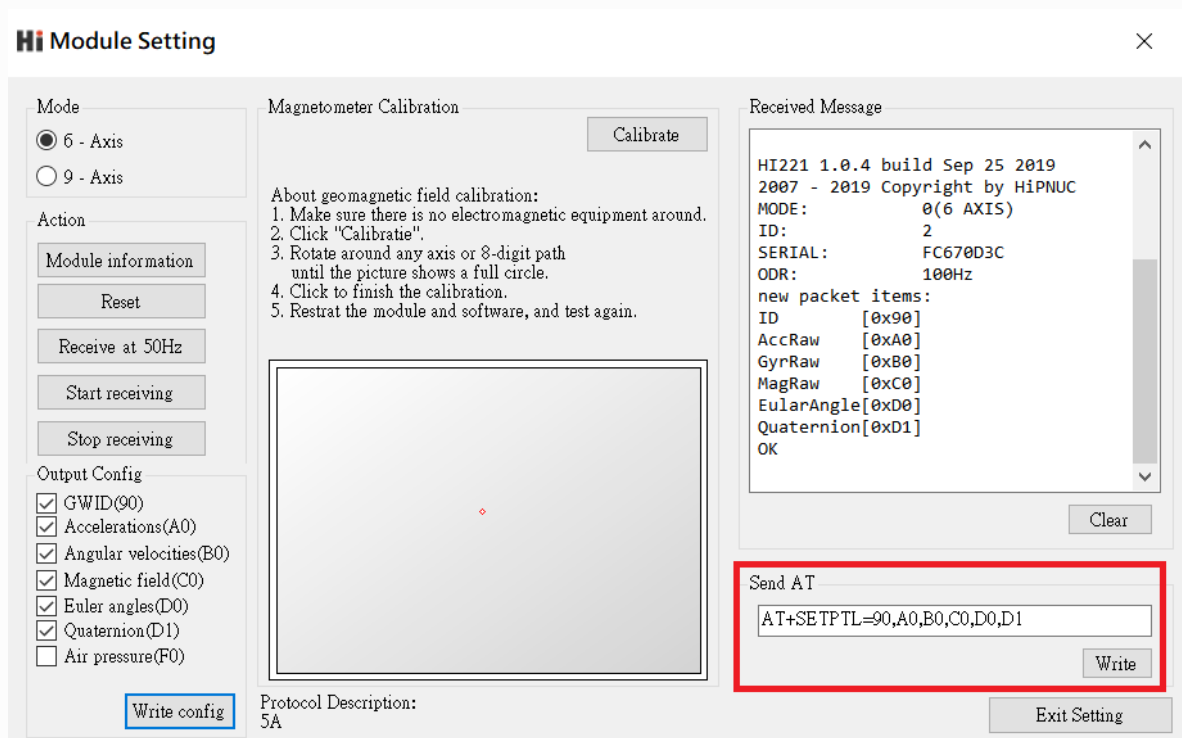
```

1  id          : 0
2  timestamp   : 310205
3  acc         : 0.224 0.770 0.691
4  gyr         : -54.708 -20.077 -119.070
5  mag         : 19.183 -26.208 -34.542
6  eul(R/P/Y) : 48.720 -21.014 -45.512
7  quat        : 0.855 0.310 -0.310 -0.277

```

通用AT指令

模組採用AT 指令集配置/查看模組參數。AT 指令總以ASCII 碼 **AT** 開頭，後面跟控制字符，最後以回車換行 `\r\n` 結束。可使用串口調試助手進行測試：



通用模組 AT指令如下

指令	功能	掉電保存(Y)	備註(立即生效(Y),復位生效(R))	支持該指令的產品
AT+ID	設置模組用戶ID	Y	R	HI226/HI229/HI221
AT+URFR	旋轉模組傳感器坐標系	Y	R	HI226/HI229
AT+INFO	打印模組資訊	N	Y	HI226/HI229/HI221/HI221GW
AT+ODR	設置模組串口輸出幀頻率	Y	R	HI226/HI229/HI221/HI221GW
AT+BAUD	設置串口波特率	Y	R	HI226/HI229/HI221/HI221GW
AT+EOUT	數據輸出開關	N	Y	HI226/HI229/HI221/HI221GW
AT+RST	復位模組	N	Y	HI226/HI229/HI221/HI221GW
AT+TRG	單次輸出觸發	N	Y	HI226/HI229
AT+SETPEL	設置輸出數據包	Y	R	HI226/HI229
AT+MODE	設置模組工作模式	Y	R	HI229/HI221
AT+GYRCTL	設置陀螺儀限幅濾波器參數	Y	R	HI226/HI229
AT+GWID	設置無線網關ID	Y	R	HI221GW/HI221
AT+GWCFG	設置接收機無線網絡屬性	Y	R	HI221GW

AT+ID

設置模組用戶ID

例 AT+ID=1

AT+URFR

某些情況下傳感器需要傾斜垂直安裝，這時候需要旋轉傳感器坐標系，這條指令提供了旋轉傳感器坐標系的接口：

`AT+URFR=C00,C01,C02,C10,C11,C12,C20,C21,C22`

其中 C_{nn} 支持浮點數

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U = \begin{bmatrix} C00 & C01 & C02 \\ C10 & C11 & C12 \\ C20 & C21 & C22 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B$$

其中 $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U$ 為旋轉後的傳感器坐標系下傳感器數據， $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B$ 為旋轉前傳感器坐標系下傳感器數據

下面是幾種常用旋轉舉例：

- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 X 軸旋轉 90° ，輸入命令：
`AT+URFR=1,0,0,0,0,1,0,-1,0`
- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 X 軸旋轉 -90° ，輸入命令：
`AT+URFR=1,0,0,0,0,-1,0,1,0`
- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 X 軸旋轉 180° ，輸入命令：
`AT+URFR=1,0,0,0,-1,0,0,0,-1`
- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 Y 軸旋轉 90° ，輸入命令：`AT+URFR=0,0,-1,0,1,0,1,0,0`
- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 Y 軸旋轉 -90° ，輸入命令：`AT+URFR=0,0,1,0,1,0,-1,0,0`
- 新傳感器坐標系為繞原坐標系 Y 軸旋轉 180° ，輸入命令：`AT+URFR=-1,0,0,0,1,0,0,0,-1`
- 恢復默認值：`AT+URFR=1,0,0,0,1,0,0,0,1`

AT+INFO

打印模組資訊，包括產品型號，版本，韌體發佈日期等。AT+INFO可以拓展二級指令實現更多資訊的查詢

INFO二級拓展指令	功能	示例
CAL	顯示模組內部校準參數	AT+INFO=CAL
RF	顯示無線設備參數	AT+INFO=RF
VER	顯示詳細版本資訊	AT+INFO=VER

AT+ODR

設置模組串口輸出速率。掉電保存，復位模組生效

例 設置串口輸出速率為100Hz: `AT+ODR=100`

AT+BAUD

設置串口波特率，可選值：4800/9600/115200/256000/460800`

例 `AT+BAUD=115200`

!!! note "注意"

- 使用此指令需要特別注意，輸入錯誤波特率後可能會導致無法和模組通訊
- 波特率參數設置好後掉電保存，復位模組生效。上位機的波特率也要做相應修改。
- 升級韌體時，需要切換回115200 波特率。

AT+EOUT

串口輸出開關

例 打開串口輸出 `AT+EOUT=1` 關閉串口輸出 `AT+EOUT=0`

AT+RST

復位模組

例 `AT+RST`

AT+TRG

觸發模組輸出一幀數據，可以配合AT+ODR=0來實現單次觸發輸出。

例 `AT+TRG`

AT+SETPEL

設置輸出協議:

模組數據幀中的數據包組成可使用AT指令配置，格式為 `AT+SETPTL=<ITEM_ID>, <ITEM_ID>...`

一幀輸出可包含最多8個數據包。

例 配置模組輸出加速度，角速度，整形格式歐拉角和四元數的指令為：

`AT+SETPTL=A0,B1,D0,D1`

Mode
☒ 6 - Axis
☐ 9 - Axis

Action

Module information

Reset

Receive at 50Hz

Start receiving

Stop receiving

Output Config
☒ GWID(90)
☒ Accelerations(A0)
☒ Angular velocities(B0)
☒ Magnetic field(C0)
☒ Euler angles(D0)
☒ Quaternion(D1)
☐ Air pressure(F0)

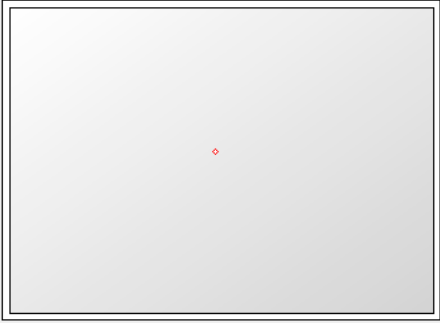
Write config

Magnetometer Calibration

Calibrate

About geomagnetic field calibration:

1. Make sure there is no electromagnetic equipment around.
2. Click "Calibrate".
3. Rotate around any axis or 8-digit path until the picture shows a full circle.
4. Click to finish the calibration.
5. Restart the module and software, and test again.



Protocol Description:
5A

Received Message

HI221 1.0.4 build Sep 25 2019
2007 - 2019 Copyright by HiPNUC
MODE: 0(6 AXIS)
ID: 2
SERIAL: FC670D3C
ODR: 100Hz
new packet items:
ID [0x90]
AccRaw [0xA0]
GyrRaw [0xB0]
MagRaw [0xC0]
EularAngle[0xD0]
Quaternion[0xD1]
OK

Clear

Send AT

AT+SETPTL=90,A0,B0,C0,D0,D1

Write

Exit Setting

AT+MODE

設置模組工作模式

例

- 設置模組工作在6軸模式(無磁校準) `AT+MODE=0`
- 設置模組工作在9軸模式(地磁場傳感器參與航向角校正) `AT+MODE=1`

AT+GYRCTL

設置陀螺限幅濾波器閾值(出廠默認值1.0)

例

- 設置陀螺限幅濾波器限幅閾值為1.5°/s: `AT+GYRCTL=LMF,1.5`

陀螺限幅濾波主要為解決陀螺零偏問題，當模組靜止經受機械振動時(比如安裝在機器上，機器人上電待機但不移動時會有電機空載振動)，陀螺航向角會因為Z軸振動而緩慢飄移。當陀螺Z軸小於設定閾值時，模組則會強制把Z軸數值歸0。

限幅濾波可以解決由於陀螺零偏或小範圍振動時帶來的航向角飄移問題，但缺點是小於設定閾值的轉動會無法檢測。一般情況下，閾值設定範圍應在0.1 - 3.5之間。

限幅閾值過高會導致小於閾值的轉動角速度無法檢測

限幅閾值過低會導致陀螺零偏無法校準，航向角隨時間緩慢飄移。

AT+GWID

可通過AT+GWID指令配置，GWID屬性決定了接收器和節點的RF頻率，只有節點的GWID 和接收器的 GWID相同時，模組和接收器直接才能通訊。GWID相當於無線網段，當在同一地點使用多個接收機組成多個星形網絡時，必須保證每個接收器的GWID(網段)不同。

例 將一個接收器設置為GWID=3，並將3個模組的自身ID設置為 0,1,2 並連接到這個接收器上：

接收機配置： `AT+GWID=3`

節點0配置： `AT+GWID=3` `AT+ID=0`

節點1配置： `AT+GWID=3` `AT+ID=1`

節點2配置： `AT+GWID=3` `AT+ID=2`

AT+GWCFG

配置接收機支持的節點數和無線通訊頻率。接收機默認支持8個節點，每個節點100Hz通訊頻率。(通訊頻率乘以節點)的乘積受到RF帶寬的限制，錯誤的配置將會導致無法輸出數據。推薦的配置如下：

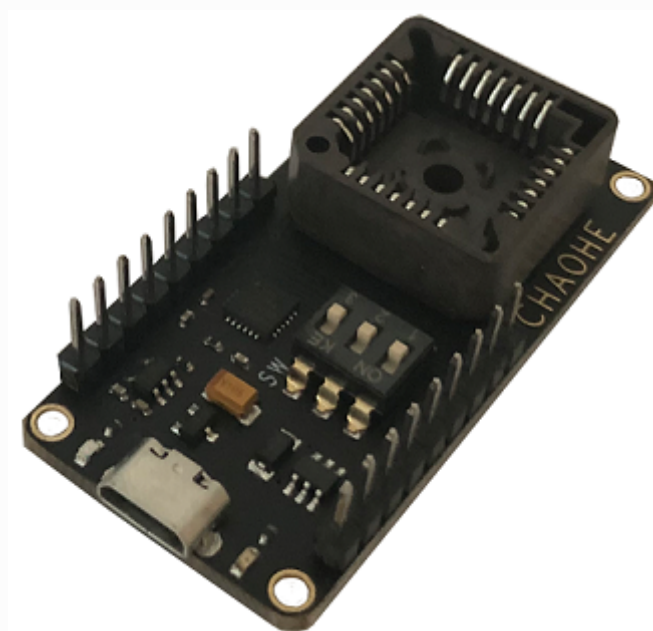
配置選項	通訊頻率(Hz,每個節點)	支持的節點數
1(出廠默認)	100	8
2	200	4
3	30	16

例 配置接收機支持的最大節點數為16，每個節點接收頻率為30Hz，依次輸入：

`AT+GWCFG=FRQ,30`

`AT+GWCFG=CNT,16`

附錄A - 評估板



評估板簡介

評估板提供了快速評估本產品的方法。板載USB-UART芯片(CP2104)以及供電LDO，並將模組接口引出方便調試評估。

安裝資料包中的CP2104 USB-UART 驅動程序, 將MicroUSB 線連接電腦和模組，打開資料包中的Uranus 上位機，連接串口，默認狀態下，模組會以115200-N-8-N-1 輸出出廠默認的數據包。

從評估板上取下產品

模組默認被嵌入評估板的PLCC28 插槽中，如需取出模組，請按如下步驟操作：

- 斷電，準備好細螺絲刀或鑷子
- 從PLCC 插座或者背面圓形空洞內將模組撬出或頂出。

note "注意"

- 評估板的主要作用僅僅是快速評估模組性能，Micro-USB 接口本身不適合於工業級場景或者高運動場合的電氣連接，如果您的應用為高運動環境(動作捕捉等)，則不建議在您的產品中直接使用評估板。

附錄B - 四元數-歐拉角轉換

四元數基礎

四元數是一個四維空間上的一點，使用一個實數和三個虛數來代表： $q \in \mathbb{R}^4 = \mathbb{H}$

四元數有如下幾種常用的表示方法：

複數表示	向量表示	四元數表示法1	四元數表示法2
$q = q_0 + \mathbf{i}q_1 + \mathbf{j}q_2 + \mathbf{k}q_3$	$q = [q_0, \mathbf{q}] = \left[q_0, \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \right]$	$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$	$q = [q_w, q_x, q_y,$

其中：

$$\begin{aligned} \mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \\ \mathbf{ij} = \mathbf{k} = -\mathbf{ji}, \quad \mathbf{jk} = \mathbf{i} = -\mathbf{kj}, \quad \mathbf{ki} = \mathbf{j} = -\mathbf{ik} \end{aligned}$$

四元數乘法：

$$\mathbf{p} \otimes \mathbf{q} = \begin{bmatrix} p_w q_w - p_x q_x - p_y q_y - p_z q_z \\ p_w q_x + p_x q_w + p_y q_z - p_z q_y \\ p_w q_y - p_x q_z + p_y q_w + p_z q_x \\ p_w q_z + p_x q_y - p_y q_x + p_z q_w \end{bmatrix}$$

一個單位四元數總是可以表示為這種這種形式： $q_R(\alpha, \mathbf{u}) = \left[\cos \frac{\alpha}{2}, \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \mathbf{u} \right]$

其中 α 是旋轉角度， $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$ 為旋轉軸，且 $\|\mathbf{u}\| = 1$ 。

四元數與旋轉矩陣，歐拉角轉換

四元數->旋轉矩陣

(對應四元數 q_n^b 代表從n系到b系的坐標變換矩陣， q_n^b 也可以理解為 從b系到n系的坐標系的變換，前半句說的是"坐標變換"，後半句說的是"坐標系變換"，請注意兩者區別。

$$R_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

四元數->歐拉角

旋轉矩陣，四元數和歐拉角是表示旋轉的三種常用方式，其中另外兩種表示形式轉換為歐拉角時，必須先指定歐拉角旋轉順序。本產品使用"ZYX"旋轉順序,即先旋轉航向角，然後俯仰角，最後橫滾角：

轉換公式為：

$$\begin{bmatrix} \phi(\text{橫滾}) \\ \theta(\text{俯仰}) \\ \psi(\text{航向}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2q_2 q_3 + 2q_0 q_1, q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) \\ -\text{asin}(2q_1 q_3 - 2q_0 q_2) \\ \text{atan2}(2q_1 q_2 + 2q_0 q_3, q_1^2 + q_0^2 - q_3^2 - q_2^2) \end{bmatrix}$$

歐拉角->四元數

記 $s_\phi = \sin \frac{\phi}{2}$, $c_\phi = \cos \frac{\phi}{2}$, 以此類推：

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} c_{\phi/2} c_{\theta/2} c_{\psi/2} + s_{\phi/2} s_{\theta/2} s_{\psi/2} \\ -c_{\phi/2} s_{\theta/2} s_{\psi/2} + c_{\theta/2} c_{\psi/2} s_{\phi/2} \\ c_{\phi/2} c_{\psi/2} s_{\theta/2} + s_{\phi/2} c_{\theta/2} s_{\psi/2} \\ c_{\phi/2} c_{\theta/2} s_{\psi/2} - s_{\phi/2} c_{\psi/2} s_{\theta/2} \end{bmatrix}$$

歐拉角->旋轉矩陣(n->b)

$$R_n^b = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\theta s_\phi \\ c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}$$

旋轉矩陣(n->b) 到歐拉角

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(r_{23}, r_{33}) \\ -\text{asin}(r_{13}) \\ \text{atan2}(r_{12}, r_{11}) \end{bmatrix}$$

附錄C - 韌體升級與恢復出廠設置

本產品支持升級韌體。

韌體升級步驟：

- 連接模組，打開上位機，將模組和上位機波特率都設置為115200. 打開韌體升級窗口
- 點擊連接按鈕，如出現模組連接資訊。則說明升級系統準備就緒，點擊文件選擇器(...)選擇拓展名為.hex 的韌體，然後點擊開始編程。下載完成後會提示編程完成，此時關閉串口，重新給模組上電，模組升級完成。

