

《MPU-6500 产品说明书》

1. 版本更新

2. 应用范围

1.3 产品概述

MPU-6500 是一种 6 轴运动跟踪装置，结合了 3 轴陀螺仪、3 轴加速度计，以及一个数字运动处理器（DMP），全部采用 3x300.9mm 的小型封装。它还具有 512 字节的 FIFO 它可以降低串行总线接口上的流量，并通过允许系统降低功耗。处理器突发读取传感器数据，然后进入低功耗模式。专用 I2C 传感器总线，MPU-6500 直接接受来自外部 I2C 设备的输入。MPU-6500 具有 6 轴集成、Onchip DMP 和运行时校准固件，使制造商能够消除昂贵和复杂的离散设备的选择、鉴定和系统级集成，确保最佳运动消费者的表现。MPU-6500 还可与多个非惯性数字接口。辅助 I2C 端口上的传感器，如压力传感器。

陀螺仪具有 ± 250 ， ± 500 ， ± 1000 和 ± 2000 度/秒的可编程满量程范围，以及 0.01 dps / $\sqrt{\text{Hz}}$ 的极低速率噪声。加速度计具有用户可编程的加速度计满量程范围 $\pm 2g$ ， $\pm 4g$ ， $\pm 8g$ 和 $\pm 16g$ 。两种传感器的工厂校准初始灵敏度降低了生产线校准要求。

其他业界领先的功能包括片上 16 位 ADC，可编程数字滤波器， -40°C 至 85°C 1% 漂移的精密时钟，嵌入式温度传感器和可编程中断。该器件具有 I2C 和 SPI 串行接口，VDD 工作电压范围为 1.71 至 3.6V，独立的数字 IO 电源，VDDIO 为 1.71V 至 3.6V。

使用 400kHz 的 I2C 或 1MHz 的 SPI 执行与器件的所有寄存器的通信。对于需要更快通信的应用，可以使用 20MHz 的 SPI 读取传感器和中断寄存器。

通过利用其专利且经过体积验证的 CMOS-MEMS 制造平台，通过晶圆级键合将 MEMS 晶圆与配套 CMOS 电子器件集成在一起，InvenSense 将封装尺寸缩小至占位面积，厚度为 3x3x0.90mm（24 引脚 QFN），提供非常小但高性能的低成本封装。该器件通过支持 10,000g 的冲击可靠性提供高稳健性。

1.4 应用

- TouchAnywhere™ 技术（用于“无触摸”UI 应用程序控制/导航）
- MotionCommand™ 技术（用于手势快捷方式）
- 支持运动的游戏和应用程序框架
- 基于位置的服务，兴趣点和航位推算
- 手机和便携式游戏
- 基于动作的游戏控制器
- 用于互联网连接的数字电视和机顶盒，3D 鼠标的 3D 遥控器
- 适用于健康，健身和运动的可穿戴传感器

2 功能

2.1 陀螺仪功能

MPU-6500 中的三轴 MEMS 陀螺仪具有多种功能：

- 数字输出 X，Y 和 Z 轴角速率传感器（陀螺仪），具有 ± 250 ， ± 500 ， ± 1000 和 $\pm 2000^{\circ}$

/秒的用户可编程满量程范围和集成的 16 位 ADC

- 数字可编程低通滤波器
- 陀螺仪工作电流：3.2mA
- 出厂校准的灵敏度比例因子
- 自我测试

2.2 加速度计功能

MPU-6500 中的三轴 MEMS 加速度计具有多种功能：

- 数字输出 X、Y 和 Z 轴加速度计，可编程满量程范围 $\pm 2g$ ， $\pm 4g$ ， $\pm 8g$ 和 $\pm 16g$ ，集成 16 位 ADC
- 加速度计正常工作电流：450 μA
- 低功耗加速度计模式电流：0.98Hz 时为 6.37 μA ，31.25Hz 时为 17.75 μA
- 用户可编程中断
- 唤醒动作中断，用于应用处理器的低功耗操作
- 自我测试

2.3 附加功能

MPU-6500 包括以下附加功能：

- 辅助主 I2C 总线，用于从外部传感器（例如磁力计）读取数据
- 当所有 6 个运动感应轴都有效时，工作电流为 3.4mA
- VDD 电源电压范围为 $1.8 - 3.3V \pm 5\%$
- 辅助 I2C 器件的 VDDIO 参考电压为 $1.8 - 3.3V \pm 5\%$
- 适用于便携式设备的最小和最薄的 QFN 封装：3x3x0.9mm
- 加速度计和陀螺仪轴之间的最小横轴灵敏度
- 512 字节 FIFO 缓冲区使应用程序处理器能够以突发方式读取数据
- 数字输出温度传感器
- 用户可编程数字滤波器，用于陀螺仪，加速度计和温度传感器
- 10,000 克耐冲击性
- 400kHz 快速模式 I2C，用于与所有寄存器通信
- 1MHz SPI 串行接口，用于与所有寄存器通信
- 20MHz SPI 串行接口，用于读取传感器和中断寄存器
- MEMS 结构在晶圆级密封和粘合
- 符合 RoHS 和绿色标准

2.4 MotionProcessing

- 内部数字运动处理™（DMP™）引擎支持高级 MotionProcessing 和低功耗功能，例如使用可编程中断的手势识别
- 除角速率外，该设备还可选择输出角度位置（角度）。
- 低功耗计步器功能允许主机处理器在 DMP 保持步数时休眠。

3 电气特性

3.1 陀螺仪规格

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路，VDD = 1.8V，VDDIO = 1.8V，TA = 25° C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	3
	FS_SEL=1		±500		°/s	3
	FS_SEL=2		±1000		°/s	3
	FS_SEL=3		±2000		°/s	3
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	3
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	3
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±3		%	2
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%	1
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%	1
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	1
ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s	2
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±0.24		°/s/°C	1
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE (FS_SEL=0)						
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (92 Hz)		0.1		°/s-rms	2
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz	4
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES		25	27	29	KHz	2
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		250	Hz	3
GYROSCOPE START-UP TIME	From Sleep mode		35		ms	1
OUTPUT DATA RATE	Programmable, Normal (Filtered) mode	4		8000	Hz	1

Table 1: Gyroscope Specifications

笔记：

- 1.源自部件的验证或表征，不保证在生产中。
- 2.在生产中测试过。
- 3.设计保证。
- 4.根据总 RMS 噪声计算

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	3
	AFS_SEL=1		±4		g	3
	AFS_SEL=2		±8		g	3
	AFS_SEL=3		±16		g	3
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	3
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	3
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	3
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	3
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	3
Initial Tolerance	Component-level		±3		%	2
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C	1
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%	1
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	1
ZERO-G OUTPUT						
Initial Tolerance	Component-level, all axes		±60		mg	2
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C, Board-level	X and Y axes	±0.64		mg/°C	1
		Z axis	±1		mg/°C	1
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	Low noise mode		300		μg/√Hz	4
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		260	Hz	3
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			4		mg/LSB	3
ACCELEROMETER STARTUP TIME	From Sleep mode		20		ms	1
	From Cold Start, 1ms V _{DD} ramp		30		ms	1
OUTPUT DATA RATE	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz	1
	Duty-cycled, over temp		±15		%	
	Low noise (active)	4		4000	Hz	

3.2 加速度计规格

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路，VDD = 1.8V，VDDIO = 1.8V，TA = 25° C。

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	3
	AFS_SEL=1		±4		g	3
	AFS_SEL=2		±8		g	3
	AFS_SEL=3		±16		g	3
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	3
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	3
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	3
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	3
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	3
Initial Tolerance	Component-level		±3		%	2
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C	1
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%	1
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	1
ZERO-G OUTPUT						
Initial Tolerance	Component-level, all axes		±60		mg	2
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C, Board-level	X and Y axes	±0.64		mg/°C	1
		Z axis	±1		mg/°C	1

NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	Low noise mode		300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	4
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		260	Hz	3
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			4		mg/LSB	3
ACCELEROMETER STARTUP TIME	From Sleep mode		20		ms	1
	From Cold Start, 1ms V_{DD} ramp		30		ms	1
OUTPUT DATA RATE	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz	1
	Duty-cycled, over temp		± 15		%	
	Low noise (active)	4		4000	Hz	

3.3 电气规范

3.3.1 D.C.电气特性

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路， $V_{DD} = 1.8\text{V}$ ， $V_{DDIO} = 1.8\text{V}$ ， $T_A = 25^\circ\text{C}$ 。

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
SUPPLY VOLTAGES						
VDD		1.71	1.8	3.45	V	1
VDDIO		1.71	1.8	3.45	V	1
SUPPLY CURRENTS						
Normal Mode	6-axis		3.4		mA	1
	3-axis Gyroscope		3.2		mA	1
	3-Axis Accelerometer, 4kHz ODR		450		μA	1
Accelerometer Low Power Mode	0.98 Hz update rate		7.27		μA	1,2
	31.25 Hz update rate		18.65		μA	1,2
Standby Mode			1.6		mA	1
Full-Chip Sleep Mode			6		μA	1
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	$^\circ\text{C}$	1

笔记：

- 源自部件的验证或表征，不保证在生产中。
- 加速度计低功耗模式支持以下输出数据速率（ODR）：0.24,0.49,0.98, 1.95,3.91,7.81,15.63,31.25,62.50,125,250,500Hz。任何更新率的供电电流可以计算如下：一个。电源电流 $\mu\text{A} = 6.9 + \text{更新速率} \times 0.376$

3.3.2 A.C.电气特性

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路， $V_{DD} = 1.8\text{V}$ ， $V_{DDIO} = 1.8\text{V}$ ， $T_A = 25^\circ\text{C}$ 。

Parameter	Conditions	MIN	TYP	MAX	Units	NOTES
SUPPLIES						
Supply Ramp Time	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value	0.1		100	ms	1
TEMPERATURE SENSOR						
Operating Range	Ambient	-40		85	°C	1
Sensitivity	Untrimmed		333.87		LSB/°C	
Room Temp Offset	21°C		0		LSB	
Power-On RESET						
Supply Ramp Time (T _{RAMP})	Valid power-on RESET	0.01	20	100	ms	1
Start-up time for register read/write	From power-up		11	100	ms	1
I ² C ADDRESS	AD0 = 0		1101000			
	AD0 = 1		1101001			

DIGITAL INPUTS (FSYNC, AD0, SCLK, SDI, CS)						
V _{IH} , High Level Input Voltage		0.7*VDDIO			V	1
V _{IL} , Low Level Input Voltage				0.3*VDDIO	V	
C _i , Input Capacitance			< 10		pF	
DIGITAL OUTPUT (SDO, INT)						
V _{OH} , High Level Output Voltage	R _{LOAD} =1MΩ;	0.9*VDDIO			V	1
V _{OL1} , LOW-Level Output Voltage	R _{LOAD} =1MΩ;			0.1*VDDIO	V	
V _{OLINT1} , INT Low-Level Output Voltage	OPEN=1, 0.3mA sink current			0.1	V	
Output Leakage Current	OPEN=1		100		nA	
t _{INT} , INT Pulse Width	LATCH_INT_EN=0		50		μs	
I2C I/O (SCL, SDA)						
V _{IL} , LOW Level Input Voltage		-0.5V		0.3*VDDIO	V	1
V _{IH} , HIGH-Level Input Voltage		0.7*VDDIO		VDDIO + 0.5V	V	
V _{hys} , Hysteresis			0.1*VDDIO		V	
V _{OL} , LOW-Level Output Voltage	3mA sink current	0		0.4	V	
I _{OL} , LOW-Level Output Current	V _{OL} =0.4V V _{OL} =0.6V		3 6		mA mA	
Output Leakage Current			100		nA	
t _{of} , Output Fall Time from V _{IHmax} to V _{ILmax}	C _b bus capacitance in pF	20+0.1C _b		250	ns	
AUXILIARY I/O (AUX_CL, AUX_DA)						
V _{IL} , LOW-Level Input Voltage		-0.5V		0.3*VDDIO	V	1
V _{IH} , HIGH-Level Input Voltage		0.7* VDDIO		VDDIO + 0.5V	V	
V _{hys} , Hysteresis			0.1* VDDIO		V	
V _{OL1} , LOW-Level Output Voltage	VDDIO > 2V; 1mA sink current	0		0.4	V	
Parameter	Conditions	MIN	TYP	MAX	Units	NOTES
V _{OL3} , LOW-Level Output Voltage	VDDIO < 2V; 1mA sink current	0		0.2* VDDIO	V	
I _{OL} , LOW-Level Output Current	V _{OL} = 0.4V V _{OL} = 0.6V		3 6		mA mA	
Output Leakage Current			100		nA	
t _d , Output Fall Time from V _{IHmax} to V _{ILmax}	C _b bus capacitance in pF	20+0.1C _b		250	ns	
INTERNAL CLOCK SOURCE						
Sample Rate	Fchoice=0,1,2 SMPLRT_DIV=0		32		kHz	2
	Fchoice=3; DLPFCFG=0 or 7 SMPLRT_DIV=0		8		kHz	2
	Fchoice=3; DLPFCFG=1,2,3,4,5,6; SMPLRT_DIV=0		1		kHz	2
Clock Frequency Initial Tolerance	CLK_SEL=0, 6; 25°C	-2		+2	%	1
	CLK_SEL=1,2,3,4,5; 25°C	-1		+1	%	1
Frequency Variation over Temperature	CLK_SEL=0,6	-10		+10	%	1
	CLK_SEL=1,2,3,4,5		±1		%	1

3.3.3 其他电气规范

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路，VDD = 1.8V，VDDIO = 1.8V，TA = 25° C。

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
SERIAL INTERFACE						
SPI Operating Frequency, All Registers Read/Write	Low Speed Characterization		100 $\pm 10\%$		kHz	1
	High Speed Characterization		1 $\pm 10\%$		MHz	1
SPI Operating Frequency, Sensor and Interrupt Registers Read Only			20 $\pm 10\%$		MHz	1
I ² C Operating Frequency	All registers, Fast-mode			400	kHz	1
	All registers, Standard-mode			100	kHz	1

Table 5: Other Electrical Specifications

3.4 I2C 时序特性

除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路，VDD = 1.8V，VDDIO = 1.8V，TA = 25° C。

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
I²C TIMING						
f_{SCL} , SCL Clock Frequency	I ² C FAST-MODE			400	kHz	1
$t_{HD,STA}$, (Repeated) START Condition Hold Time		0.6			μ s	2
t_{LOW} , SCL Low Period		1.3			μ s	2
t_{HIGH} , SCL High Period		0.6			μ s	2
$t_{SU,STA}$, Repeated START Condition Setup Time		0.6			μ s	2
$t_{HD,DAT}$, SDA Data Hold Time		0			μ s	2
$t_{SU,DAT}$, SDA Data Setup Time		100			ns	2
t_r , SDA and SCL Rise Time	C_b bus cap. from 10 to 400pF	$20+0.1C_b$		300	ns	2
t_f , SDA and SCL Fall Time	C_b bus cap. from 10 to 400pF	$20+0.1C_b$		300	ns	2
$t_{SU,STO}$, STOP Condition Setup Time		0.6			μ s	2
t_{BUF} , Bus Free Time Between STOP and START Condition		1.3			μ s	2
C_b , Capacitive Load for each Bus Line			< 400		pF	2
$t_{VD,DAT}$, Data Valid Time				0.9	μ s	2
$t_{VD,ACK}$, Data Valid Acknowledge Time				0.9	μ s	2

Table 6: I²C Timing Characteristics

笔记:

- 1.时序特性适用于主 I2C 总线和辅助 I2C 总线
- 2.基于安装在评估板或插座上的 5 个部件的温度和电压特性

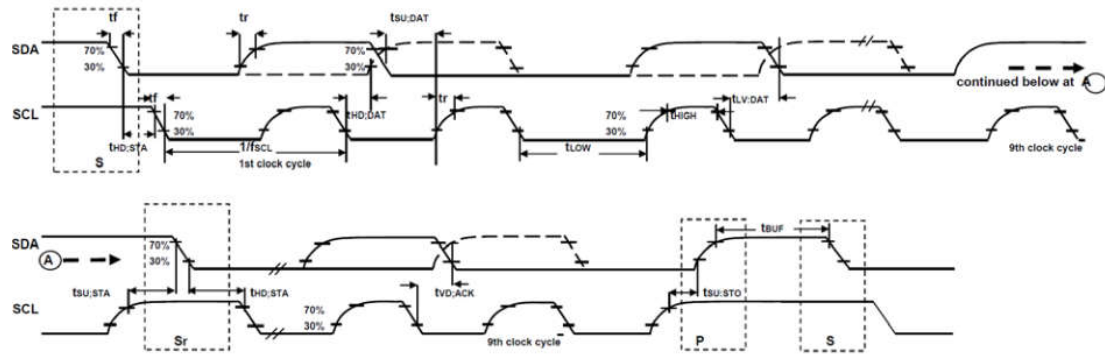


Figure 1: I2C Bus Timing Diagram

3.5 SPI 时序特性

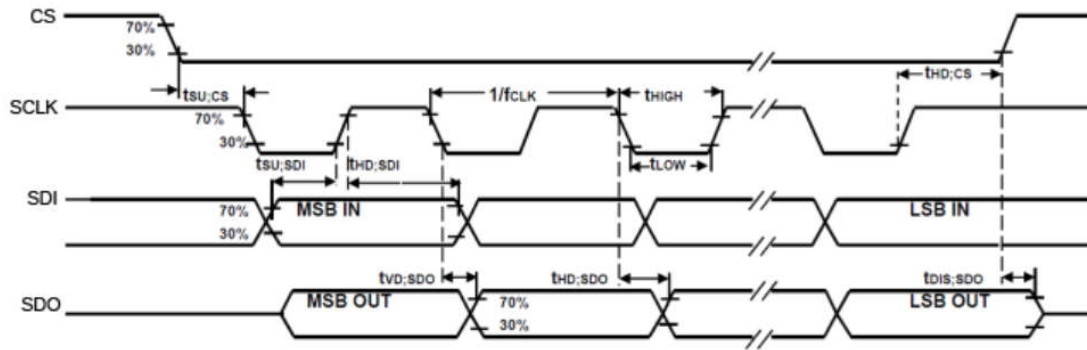
除非另有说明，否则 4.2 节的典型工作电路，VDD = 1.8V，VDDIO = 1.8V，TA = 25° C。

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
SPI TIMING						
f_{SCLK} , SCLK Clock Frequency				1	MHz	1
t_{LOW} , SCLK Low Period		400			ns	1
t_{HIGH} , SCLK High Period		400			ns	1
$t_{SU,CS}$, CS Setup Time		8			ns	1
$t_{HD,CS}$, CS Hold Time		500			ns	1
$t_{SU,SDI}$, SDI Setup Time		11			ns	1
$t_{HD,SDI}$, SDI Hold Time		7			ns	1
$t_{VD,SDO}$, SDO Valid Time	$C_{load} = 20pF$			100	ns	1
$t_{HD,SDO}$, SDO Hold Time	$C_{load} = 20pF$	4			ns	1
$t_{DIS,SDO}$, SDO Output Disable Time				50	ns	1

Table 7: SPI Timing Characteristics

Notes:

1. Based on characterization of 5 parts over temperature and voltage as mounted on evaluation board or in sockets

**Figure 2: SPI Bus Timing Diagram****3.5.1 fSCLK = 20MHz**

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
SPI TIMING						
f_{SCLK} , SCLK Clock Frequency		0.9		20	MHz	1
t_{LOW} , SCLK Low Period		-		-	ns	
t_{HIGH} , SCLK High Period		-		-	ns	
$t_{SU,CS}$, CS Setup Time		1			ns	1
$t_{HD,CS}$, CS Hold Time		1			ns	1
$t_{SU,SDI}$, SDI Setup Time		0			ns	1
$t_{HD,SDI}$, SDI Hold Time		1			ns	1
$t_{VD,SDO}$, SDO Valid Time	$C_{load} = 20pF$		25		ns	1
$t_{DIS,SDO}$, SDO Output Disable Time				25	ns	1

Table 8: fCLK = 20MHz**3.6 绝对最大额定值**

超过“绝对最大额定值”列出的应力可能会对器件造成永久性损坏。
这些仅是应力额定值，并不暗示在这些条件下器件的功能操作。

Parameter	Rating
Supply Voltage, VDD	-0.5V to +4V
Supply Voltage, VDDIO	-0.5V to +4V
REGOUT	-0.5V to 2V
Input Voltage Level (AUX_DA, AD0, FSYNC, INT, SCL, SDA)	-0.5V to VDD + 0.5V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10,000g for 0.2ms
Operating Temperature Range	-40°C to +105°C
Storage Temperature Range	-40°C to +125°C
Electrostatic Discharge (ESD) Protection	2kV (HBM); 250V (MM)
Latch-up	JEDEC Class II (2), 125°C, $\pm 100mA$

Table 9: Absolute Maximum Ratings

长时间暴露在绝对最大额定值条件下可能会影响器件的可靠性。

4 应用信息

4.1 引脚图和信号描述

Pin Number	Pin Name	Pin Description
7	AUX_CL	I ² C Master serial clock, for connecting to external sensors
8	VDDIO	Digital I/O supply voltage
9	AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
10	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
11	FSYNC	Frame synchronization digital input. Connect to GND if unused.
12	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain) Note: The Interrupt line should be connected to a pin on the Application Processor (AP) that can bring the AP out of suspend mode.
13	VDD	Power supply voltage and Digital I/O supply voltage
18	GND	Power supply ground
19	RESV	Reserved. Do not connect.
20	RESV	Reserved. Connect to GND.
21	AUX_DA	I ² C master serial data, for connecting to external sensors
22	nCS	Chip select (SPI mode only)
23	SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
24	SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
1 – 6, 14 – 17	NC	No Connect pins. Do not connect.

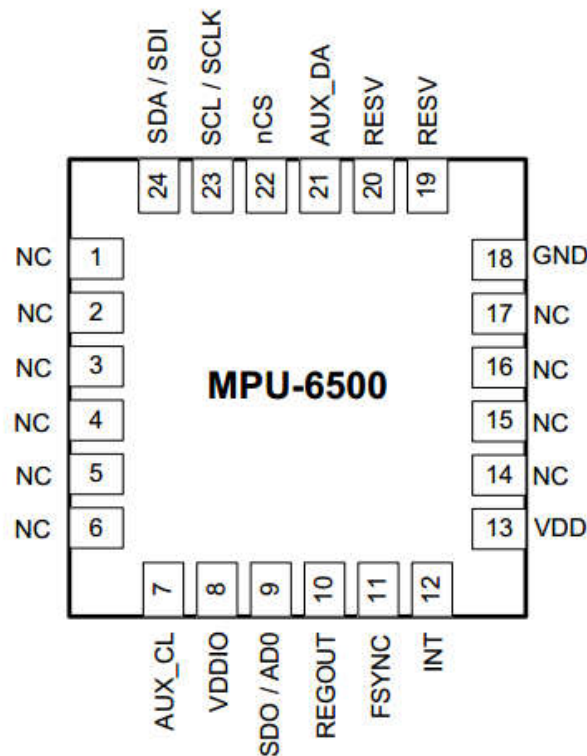


Figure 3: Pin out Diagram for MPU-6500 3.0x3.0x0.9mm QFN

4.2 典型工作电路

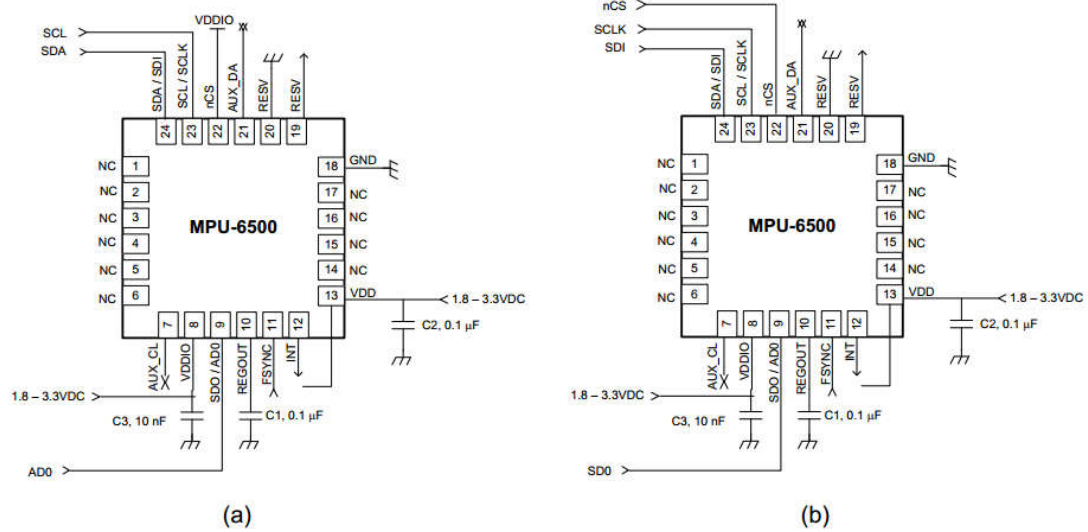


Figure 4: MPU-6500 QFN Application Schematic. (a) I2C operation, (b) SPI operation.

4.3 外部组件材料清单

Component	Label	Specification	Quantity
Regulator Filter Capacitor	C1	Ceramic, X7R, 0.1μF ±10%, 2V	1
VDD Bypass Capacitor	C2	Ceramic, X7R, 0.1μF ±10%, 4V	1
VDDIO Bypass Capacitor	C3	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

Table 11: Bill of Materials

4.4 框图

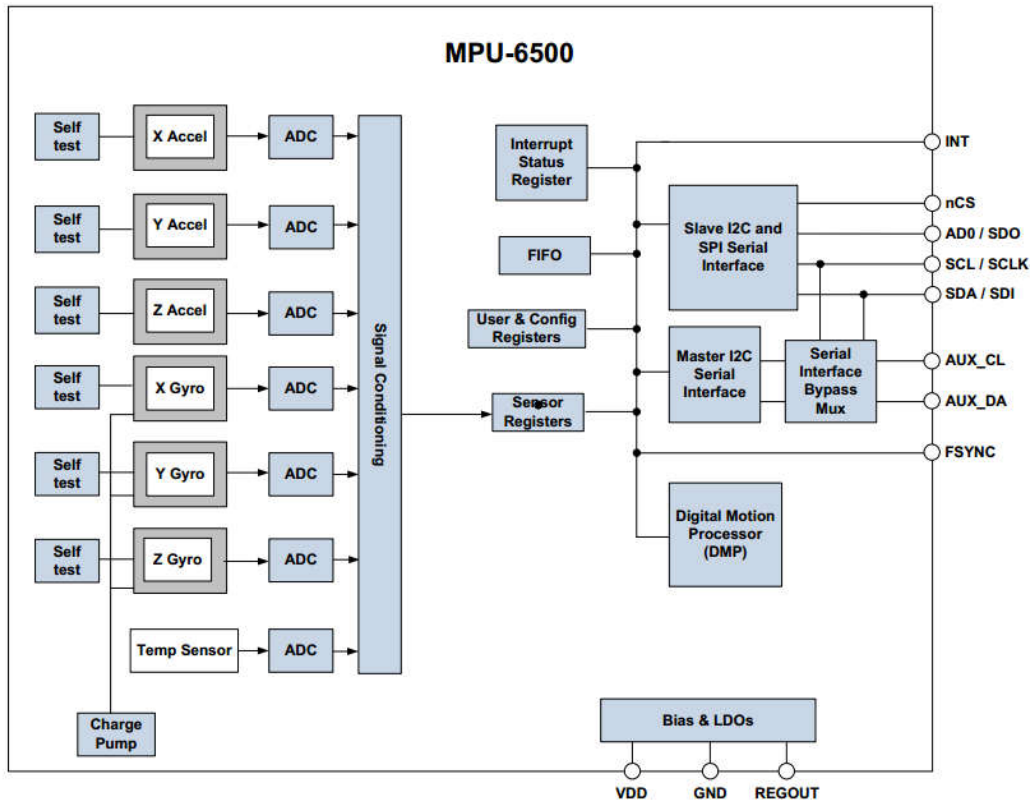


Figure 5: MPU-6500 Block Diagram

4.5 概述

MPU-6500 由以下关键块和功能组成：

- 具有 16 位 ADC 和信号调理功能的三轴 MEMS 速率陀螺仪传感器
- 具有 16 位 ADC 和信号调理功能的三轴 MEMS 加速度传感器
- 数字运动处理器（DMP）引擎
- 主 I2C 和 SPI 串行通信接口
- 辅助 I2C 串行接口
- 自我测试
- 时钟
- 传感器数据寄存器
- FIFO
- 中断
- 数字输出温度传感器
- 偏置和 LDO
- 电荷泵
- 标准电源模式

4.6 具有 16 位 ADC 和信号调理的三轴 MEMS 陀螺仪

MPU-6500 由三个独立的振动 MEMS 速率陀螺仪组成，可检测绕 X 轴，Y 轴和 Z 轴的

旋转。当陀螺仪围绕任何感测轴旋转时，科里奥利效应引起由电容传感器检测到的振动。对得到的信号进行放大，解调和滤波，以产生与角速率成比例的电压。使用单独的片上 16 位模数转换器（ADC）对该电压进行数字化，以对每个轴进行采样。陀螺仪传感器的满量程范围可以数字编程为 ± 250 ， ± 500 ， ± 1000 或 ± 2000 度/秒（dps）。ADC 采样率可编程为每秒 8,000 个采样，低至每秒 3.9 个采样，用户可选择的低通滤波器可实现多种截止频率。

4.7 具有 16 位 ADC 和信号调理的三轴 MEMS 加速度计

MPU-6500 的 3 轴加速度计为每个轴使用单独的检测质量。沿着特定轴的加速度引起相应检测质量上的位移，并且电容传感器差动地检测位移。MPU-6500 的架构降低了加速度计对制造变化和热漂移的敏感性。当设备放置在平坦表面上时，它将在 X 轴和 Y 轴上测量为 0g，在 Z 轴上测量为 +1g。加速度计的比例因子在工厂校准，名义上与供电电压无关。每个传感器都有一个用于提供数字输出的 dedicated sigma-delta ADC。数字输出的满量程范围可以调整为 $\pm 2g$ ， $\pm 4g$ ， $\pm 8g$ 或 $\pm 16g$ 。

4.8 数字运动处理器

MPU-6500 内的嵌入式数字运动处理器（DMP）可卸载主处理器的运动处理算法计算。DMP 从加速度计，陀螺仪，和额外的第三方传感器，如磁力计，并处理数据。可以从 FIFO 读取结果数据。DMP 可以访问 MPU 的一个外部引脚，可用于产生中断。

DMP 的目的是从主处理器卸载时序要求和处理能力。通常，运动处理算法应该以高速率运行，通常在 200Hz 左右，以便以低延迟提供准确的结果。即使应用程序以更低的速率更新，也需要这样做；例如，低功率用户界面可以以 5Hz 的速度缓慢更新，但运动处理仍应以 200Hz 运行。DMP 可用于最小化功耗，简化时序，简化软件架构，并在主处理器上节省宝贵的 MIPS 以用于应用程序。

DMP 支持以下功能：

- 低功率四元数（3 轴陀螺仪）
- 屏幕方向（Android 屏幕旋转算法的低功耗实现）
- 计步器（InvenSense 实施）

4.9 主 I2C 和 SPI 串行通信接口

MPU-6500 使用 SPI 或 I2C 串行接口与系统处理器通信。在与系统处理器通信时，MPU-6500 始终充当从站。I2C 从地址的 LSB 由引脚 9（AD0）置 1。

4.9.1 使用 I2C 接口的 MPU-6500

解决方案在下图中，系统处理器是 MPU-6500 的 I2C 主控制器。此外，MPU-6500 是可选外部罗盘传感器的 I2C 主控制器。MPU-6500 作为 I2C 主机具有有限的功能，并且依赖于系统处理器来管理任何辅助传感器的初始配置。

MPU-6500 具有接口旁路多路复用器，它将系统处理器 I2C 总线引脚 23 和 24（SDA 和 SCL）直接连接到辅助传感器 I2C 总线引脚 6 和 7（AUX_DA 和 AUX_CL）。

一旦系统处理器配置了辅助传感器，就应禁用接口旁路多路复用器，以便 MPU-6500 辅助 I2C 主控制器可以控制传感器 I2C 总线并从辅助传感器收集数据。有关 I2C 主控制的更多信息，请参见第 6 节。

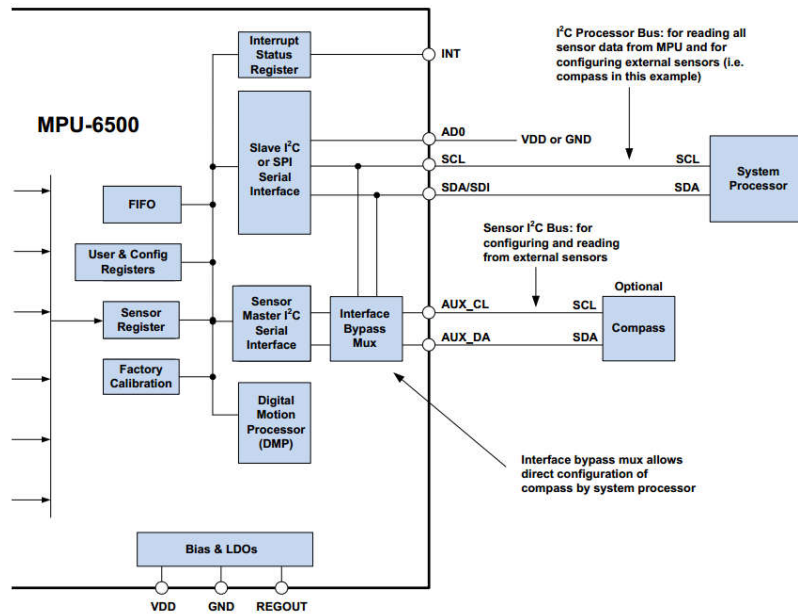


图 6: 使用 I2C 接口的 MPU-6500 解决方案

注意：中断线应连接到应用处理器（AP）上的引脚，该引脚可以使 AP 退出挂起模式。

4.9.2 使用 SPI 接口的 MPU-6500 解决方案

在下图中，系统处理器是 MPU-6500 的 SPI 主控制器。引脚 8,9,23 和 24 用于支持 SPI 通信的 CS, SDO, SCLK 和 SDI 信号。由于这些 SPI 引脚与 I2C 从引脚（9,23 和 24）共用，因此系统处理器无法通过接口旁路多路复用器访问辅助 I2C 总线，该多路复用器将处理器 I2C 接口引脚连接到传感器 I2C 接口引脚。由于 MPU-6500 作为 I2C 主控制器的能力有限，并且依靠系统处理器来管理任何辅助传感器的初始配置，因此必须使用另一种方法对辅助传感器 I2C 总线引脚 6 和 7 上的传感器进行编程（AUX_DA 和 AUX_CL）。

当在 MPU-6500 和系统处理器之间使用 SPI 通信时，可以通过使用 I2C 从器件 0-4 来执行读写的辅助 I2C 传感器总线上的器件配置

任何设备上的事务和辅助 I2C 总线上的寄存器。I2C Slave 4 接口可用于仅执行单字节读写事务。配置外部传感器后，MPU-6500 可以使用传感器 I2C 总线执行单字节或多字节读取。从机 0-3 控制器的读取结果可以写入 FIFO 缓冲区以及外部传感器寄存器。

有关控制 MPU-6500 辅助 I2C 接口的更多信息，请参阅 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。

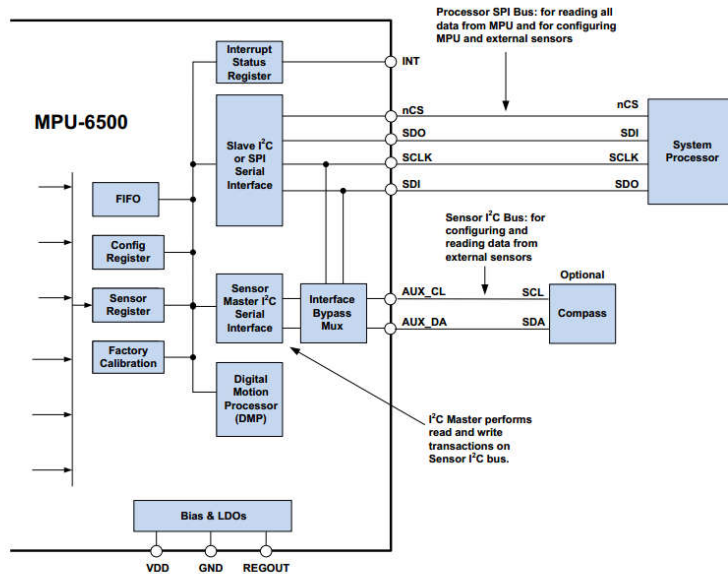


Figure 7: MPU-6500 Solution Using SPI Interface

注意：中断线应连接到应用处理器（AP）上的引脚，该引脚可以使 AP 退出挂起模式。

4.10 辅助 I2C 串行接口

MPU-6500 具有辅助 I2C 总线，用于与片外 3 轴数字输出磁力计或其他传感器通信。该总线有两种操作模式：

- I2C 主模式：MPU-6500 充当连接到辅助 I2C 总线的任何外部传感器的主设备
- 直通模式：MPU-6500 将主要和辅助 I2C 总线直接连接在一起，允许系统处理器直接与任何外部传感器通信。

辅助 I2C 总线工作模式：

- I2C 主模式：允许 MPU-6500 直接访问外部数字传感器的数据寄存器，例如磁力计。在此模式下，MPU-6500 直接从辅助传感器获取数据，无需系统应用处理器的干预。

例如，在 I2C 主模式下，MPU-6500 可配置为执行突发读取，返回来自磁力计的以下数据：

- ♣ X 磁力计数据（2 个字节）
- ♣ Y 磁力计数据（2 个字节）
- ♣ Z 磁力计数据（2 个字节）

I2C 主设备可配置为从最多 4 个辅助传感器读取最多 24 个字节。第五传感器可以配置为工作单字节读/写模式。

• 直通模式：允许外部系统处理器充当主设备，并直接与连接到辅助 I2C 总线引脚（AUX_DA 和 AUX_CL）的外部传感器通信。在这种模式下，辅助 I2C 总线控制逻辑（第三方传感器接口块）的

MPU-6500 被禁用，辅助 I2C 引脚 AUX_DA 和 AUX_CL（引脚 6 和 7）通过内部模拟开关连接到主 I2C 总线（引脚 23 和 24）。

直通模式对于配置外部传感器或在仅使用外部传感器时将 MPU-6500 保持在低功耗模式非常有用。在此模式下，系统处理器仍可通过 I2C 接口访问 MPU-6500 数据。

4.11 自我测试

有关自检的更多详细信息，请参阅寄存器映射文档。

自检允许测试传感器的机械和电气部分。每个人的自我测试测量轴可以通过陀螺仪和加速度计自检寄存器（寄存器 13 至 16）激活。当自检被激活时，电子装置使传感器被驱动并产生输出信号。输出信号用于观察自检响应。

自测响应定义如下：

自检响应=启用自检的传感器输出 - 未启用自检的传感器输出每个陀螺仪轴的自检响应在陀螺仪规格表中定义，而每个加速度计轴的自检响应在加速度计规格表中定义。

当自检响应的值在产品规格的指定最小/最大限制范围内时，该部件已通过自检。当自检响应超过最小值/最大值时，该部件被视为自检失败。建议使用 InvenSense MotionApps 软件执行自检。

4.12 时钟

MPU-6500 具有灵活的时钟方案，允许各种内部时钟源用于内部同步电路。该同步电路包括信号调理和 ADC，DMP 以及各种控制电路和寄存器。片上 PLL 为允许输入提供灵活性，以生成此时钟。

用于生成内部时钟的允许内部源是：

- 内部张弛振荡器
- 任何 X，Y 或 Z 陀螺仪（MEMS 振荡器，温度变化 $\pm 1\%$ ）

选择产生内部同步时钟的源取决于功耗和时钟精度的要求。这些要求很可能因操作方式而异。例如，在一种模式中，最大的问题是功耗，用户可能希望操作 MPU-6500 的数字运动处理器来处理加速度计数据，同时保持陀螺仪关闭。在这种情况下，内部张弛振荡器是一个很好的时钟选择。然而，在陀螺仪有效的另一模式中，选择陀螺仪作为时钟源提供更精确的时钟源。

时钟精度很重要，因为定时误差直接影响数字运动处理器（以及任何处理器）执行的距离和角度计算。

还有一些启动条件需要考虑。当 MPU-6500 首次启动时，器件会使用其内部时钟，直到被编程为从另一个源运行。例如，这允许用户在选择 MEMS 振荡器作为时钟源之前等待 MEMS 振荡器稳定。

4.13 传感器数据寄存器

传感器数据寄存器包含最新的陀螺仪，加速度计，辅助传感器和温度测量数

据。它们是只读寄存器，可通过串行接口访问。可以随时读取这些寄存器中的数据。

4.14 FIFO

MPU-6500 包含一个 512 字节的 FIFO 寄存器，可通过串行接口访问。FIFO 配置寄存器确定将哪些数据写入 FIFO。可能的选择包括陀螺仪数据，加速度计数据，温度读数，辅助传感器读数和 FSYNC 输入。FIFO 计数器跟踪 FIFO 中包含多少字节的有效数据。FIFO 寄存器支持突发读取。中断功能可用于确定何时有新数据可用。有关 FIFO 的更多信息，请参阅 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。

4.15 中断

通过中断配置寄存器配置中断功能。可配置的项目包括 INT 引脚配置，中断锁存和清除方法以及中断触发。可触发中断的项目是

- (1) 时钟发生器锁定到新的参考振荡器（用于切换时钟源时）；
- (2) 可以读取新数据（来自 FIFO 和数据寄存器）；
- (3) 加速度计事件中断；

(4) MPU-6500 未从辅助 I2C 总线上的辅助传感器接收到确认。可以从中断状态寄存器中读取中断状态。

有关中断的更多信息，请参阅 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。

4.16 数字输出温度传感器

片上温度传感器和 ADC 用于测量 MPU-6500 芯片温度。可以从 FIFO 或传感器数据寄存器读取 ADC 的读数。

4.17 偏置和 LDO

偏置和 LDO 部分产生内部电源以及 MPU-6500 所需的参考电压和电流。其两个输入是未调节的 VDD 和 VDDIO 逻辑参考电源电压。在 REGOUT 处，电容旁路 LDO 输出。有关电容器的更多详细信息，请参阅外部元件的材料清单。

4.18 电荷泵

片上电荷泵产生 MEMS 振荡器所需的高电压。

4.19 标准电源模式

下表列出了 MPU-6500 的用户可访问电源模式。

Mode	Name	Gyro	Accel	DMP
1	Sleep Mode	Off	Off	Off
2	Standby Mode	Drive On	Off	Off
3	Low-Power Accelerometer Mode	Off	Duty-Cycled	Off
4	Low-Noise Accelerometer Mode	Off	On	Off
5	Gyroscope Mode	On	Off	On or Off
6	6-Axis Mode	On	On	On or Off

Table 12: Standard Power Modes for MPU-6500

笔记:

1. 各个模式的功耗可以在 3.3.1 节中找到

5 可编程中断

MPU-6500 具有可编程中断系统，可在 INT 引脚上产生中断信号。状态标志指示中断源。可以单独启用和禁用中断源。

Interrupt Name	Module
Motion Detection	Motion
FIFO Overflow	FIFO
Data Ready	Sensor Registers
I ² C Master errors: Lost Arbitration, NACKs	I ² C Master
I ² C Slave 4	I ² C Master

Table 13: Table of Interrupt Sources

有关中断允许/禁止寄存器和标志寄存器的信息，请参阅 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。下面解释了一些中断源。

5.1 唤醒动作中断

MPU-6500 提供运动检测功能。合格的运动样本是来自任何轴的高通样本具有超过用户可编程阈值的绝对值的样本。以下流程图说明了如何配置动作唤醒中断。有关各个寄存器的更多详细信息，请参阅 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。

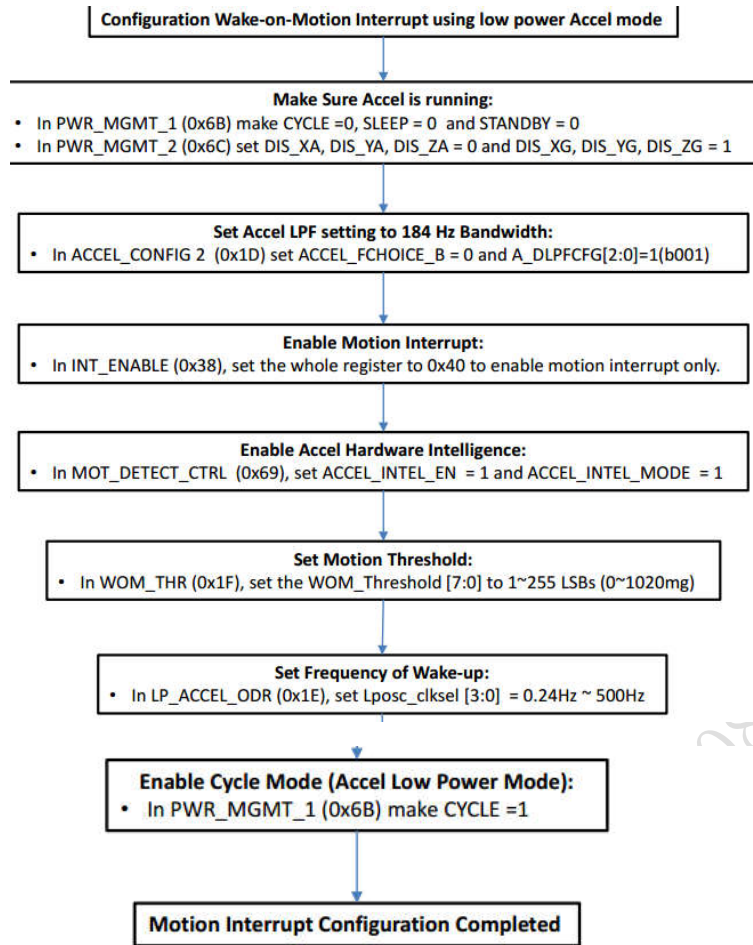


Figure 8: Wake-on-Motion Interrupt Configuration

6 数字接口

6.1 I2C 和 SPI 串行接口

可以使用 400 kHz 的 I2C 或 1MHz 的 SPI 访问 MPU-6500 的内部寄存器和存储器。SPI 以四线模式运行。

Pin Number	Pin Name	Pin Description
6	VDDIO	Digital I/O supply voltage.
7	AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
21	SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
22	SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)

Table 14: Serial Interface

注意：

为防止在使用 SPI 时切换到 I2C 模式，应通过将 I2C_IF_DIS 配置位置 1 来禁止 I2C 接口。在等待时间后应立即执行此位设置

由 6.3 节中的“寄存器读/写的启动时间”指定。有关 I2C_IF_DIS 位的更多信息，请参考 MPU-6500 寄存器映射和寄存器描述文档。

6.2 I2C 接口

I2C 是一种双线接口，由信号串行数据（SDA）和串行时钟（SCL）组成。通常，线路是开漏和双向的。在通用 I2C 接口实现中，连接的设备可以是主设备或从设备。主设备将从设备地址放在总线上，具有匹配地址的从设备确认主设备。在与系统处理器通信时，MPU-6500 始终作为从设备运行，因此系统处理器充当主设备。SDA 和 SCL 线通常需要上拉电阻到 VDD。最大总线速度为 400 kHz。MPU-6500 的从机地址为 b110100X，长度为 7 位。7 位地址的 LSB 位由引脚 AD0 上的逻辑电平决定。这允许两个 MPU-6500 连接到同一 I2C 总线。

在此配置中使用时，其中一个器件的地址应为 b1101000（引脚 AD0 为逻辑低电平），另一个器件的地址应为 b1101001（引脚 AD0 为逻辑高电平）。

6.3 I2C 通信协议

START (S) 和 STOP (P) 条件当主机将 START 条件 (S) 置于总线上时，I2C 总线上的通信开始，这被定义为 SDA 线从高电平到低电平的转换，同时 SCL 线为高电平（见下图）。总线被认为是忙，直到主机在总线上设置 STOP 条件 (P)，这被定义为 SDA 线上的低电平到高电平转换，而 SCL 为高电平（见下图）。

此外，如果生成重复的 START (Sr) 而不是 STOP 条件，则总线保持忙碌状态。

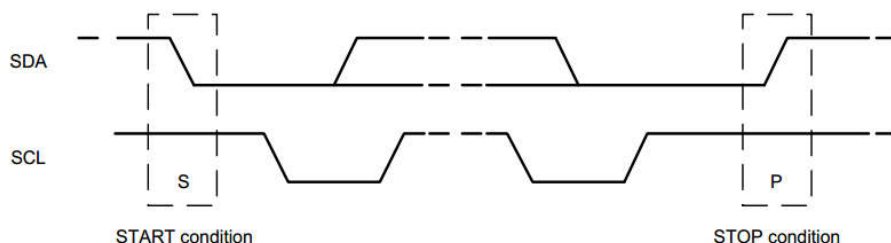
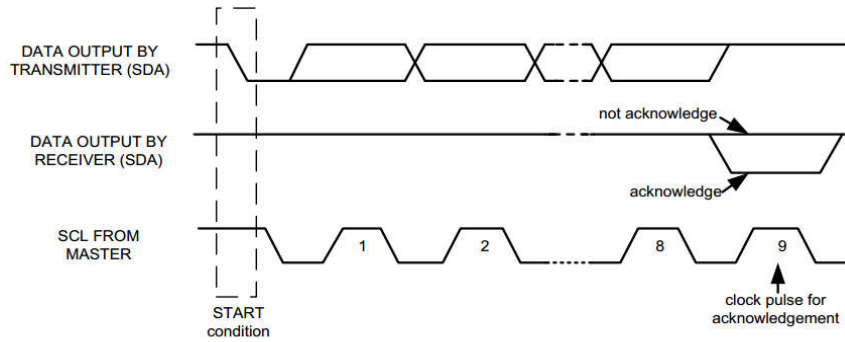


Figure 9: START and STOP Conditions

数据格式/确认

I2C 数据字节定义为 8 位长。每次数据传输的字节数没有限制。传输的每个字节后面必须跟一个确认 (ACK) 信号。确认信号的时钟由主机产生，而接收机通过拉低 SDA 并在应答时钟脉冲的高电平部分保持低电平来产生实际的确认信号。

如果从器件忙，并且在执行某个其他任务之前无法发送或接收另一个数据字节，则它可以将 SCL 保持为低电平，从而强制主器件进入等待状态。从机准备就绪后，正常数据传输恢复，并释放时钟线（参见下图）。

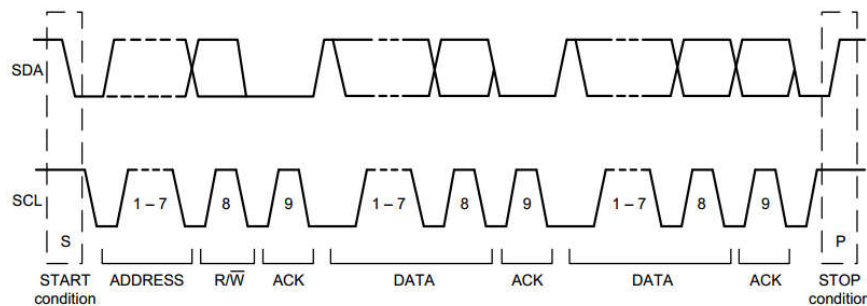
Figure 10: Acknowledge on the I²C Bus

通讯

在开始与 **START** 条件 (**S**) 通信后, 主机发送一个 7 位从机地址, 然后是第 8 位, 即读/写位。读/写位指示主设备是从从设备接收数据还是正在写入从设备。然后, 主设备释放 **SDA** 线并等待来自从设备的确认信号 (**ACK**)。传输的每个字节后面必须跟一个应答位。要确认, 从器件将 **SDA** 线拉低, 并在 **SCL** 线的高电平期间保持低电平。

数据传输总是由主机以 **STOP** 条件 (**P**) 终止, 从而释放通信线路。但是, 主机可以生成重复的 **START** 条件 (**Sr**) 和地址

另一个从机没有先生成停止条件 (**P**)。当 **SCL** 为高电平时, **SDA** 线上的低电平到高电平转换定义了停止条件。所有 **SDA** 更改都应在 **SCL** 为低时进行, 但启动和停止条件除外。

Figure 11: Complete I²C Data Transfer

要写入内部 **MPU-6500** 寄存器, 主器件发送启动条件 (**S**), 然后发送 **I2C** 地址和写入位 (**0**)。在第 9 个时钟周期 (当时钟为高电平时), **MPU-6500** 确认传输。然后主设备将寄存器地址 (**RA**) 放在总线上。在 **MPU-6500** 确认接收到寄存器地址后, 主器件将寄存器数据放入总线。接下来是 **ACK** 信号, 并且可以通过停止条件 (**P**) 结束数据传输。要在最后一个 **ACK** 信号之后写入多个字节, 主设备可以继续输出数据而不是发送停止信号。在这种情况下, **MPU-6500** 自动递增寄存器地址并将数据加载到适当的寄存器。下图显示了单字节和双字节写序列。

Single-Byte Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

Burst Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	

要读取内部 MPU-6500 寄存器，主器件发送一个启动条件，然后是 I2C 地址和一个写入位，然后是要读取的寄存器地址。在从 MPU-6500 接收到 ACK 信号后，主机发送启动信号，然后发送从机地址和读取位。结果，MPU-6500 发送 ACK 信号和数据。通信以非应答（NACK）信号和来自主设备的停止位结束。定义 NACK 条件使得 SDA 线在第 9 个时钟周期保持高电平。下图显示了单字节和双字节读取序列。

Slave			ACK		ACK		ACK	DATA		DATA		
Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK P

Burst Read Sequence

Slave			ACK		ACK		ACK	DATA			
Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P

*Single-Byte Read Sequence*6.4 I²C Terms

Signal	Description
S	Start Condition: SDA goes from high to low while SCL is high
AD	Slave I ² C address
W	Write bit (0)
R	Read bit (1)
ACK	Acknowledge: SDA line is low while the SCL line is high at the 9 th clock cycle
NACK	Not-Acknowledge: SDA line stays high at the 9 th clock cycle
RA	MPU-6500 internal register address
DATA	Transmit or received data
P	Stop condition: SDA going from low to high while SCL is high

Table 15: I²C Terms

6.5 SPI 接口

SPI 是一种 4 线同步串行接口，使用两条控制线和两条数据线。在标准主从 SPI 操作期间，MPU-6500 始终作为从器件工作。

对于主器件，串行时钟输出（SCLK），串行数据输出（SDO）和串行数据输入（SDI）在从器件之间共享。每个 SPI 从设备都需要主设备自己的片选（CS）线。CS 在传输开始时变为低电平（有效），并在结束时返回高电平（无效）。一次只

有一个 CS 线处于活动状态，确保在任何给定时间只选择一个从站。未选择的从器件的 CS 线保持高电平，使其 SDO 线保持高阻（高阻）状态，这样它们就不会干扰任何有源器件。

SPI 操作功能

1. 数据首先是 MSB，最后是 LSB
2. 数据在 SCLK 的上升沿锁存
3. 数据应在 SCLK 的下降沿转换
4. SCLK 的最大频率为 1MHz
5. SPI 读写操作在 16 个或更多个时钟周期（两个或更多字节）内完成。第一个字节包含 SPI 地址，后面的字节包含 SPI 数据。第一个字节的第一位包含读/写位，表示 Read（1）或 Write（0）操作。

以下 7 位包含寄存器地址。在多字节读/写的情况下，数据是两个或更多字节：

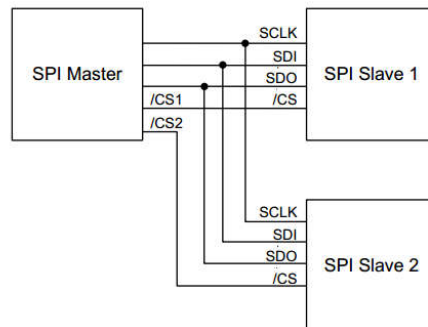
SPI Address format

MSB								LSB
R/W	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	

SPI Data format

MSB								LSB
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	

6. Supports Single or Burst Read/Writes.



7 串行接口注意事项

7.1 MPU-6500 支持的接口

MPU-6500 在其主（微处理器）串行接口及其辅助接口上支持 I2C 通信。MPU-6500 的 I/O 逻辑电平设置为 VDDIO。

下图描绘了 MPU-6500 的示例电路，其中第三方磁力计连接到辅助 I2C 总线。它显示了相关的逻辑电平和电压连接。

注意：实际配置取决于所使用的辅助传感器。

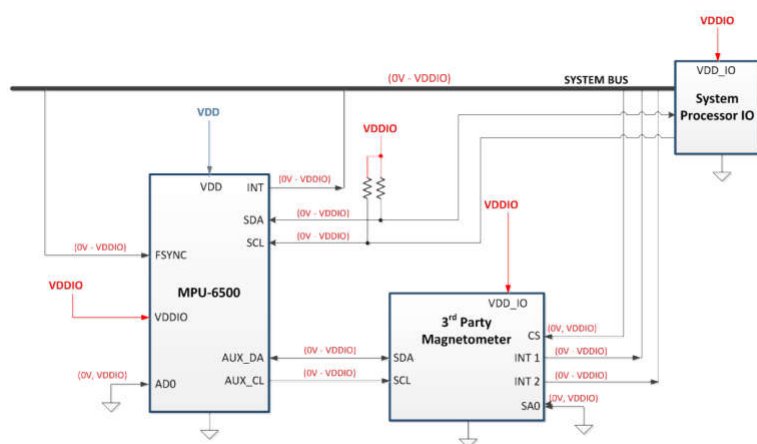


Figure 13: I/O Levels and Connections

注意：中断线应连接到应用处理器（AP）上的引脚，该引脚可以使 AP 退出挂起模式。