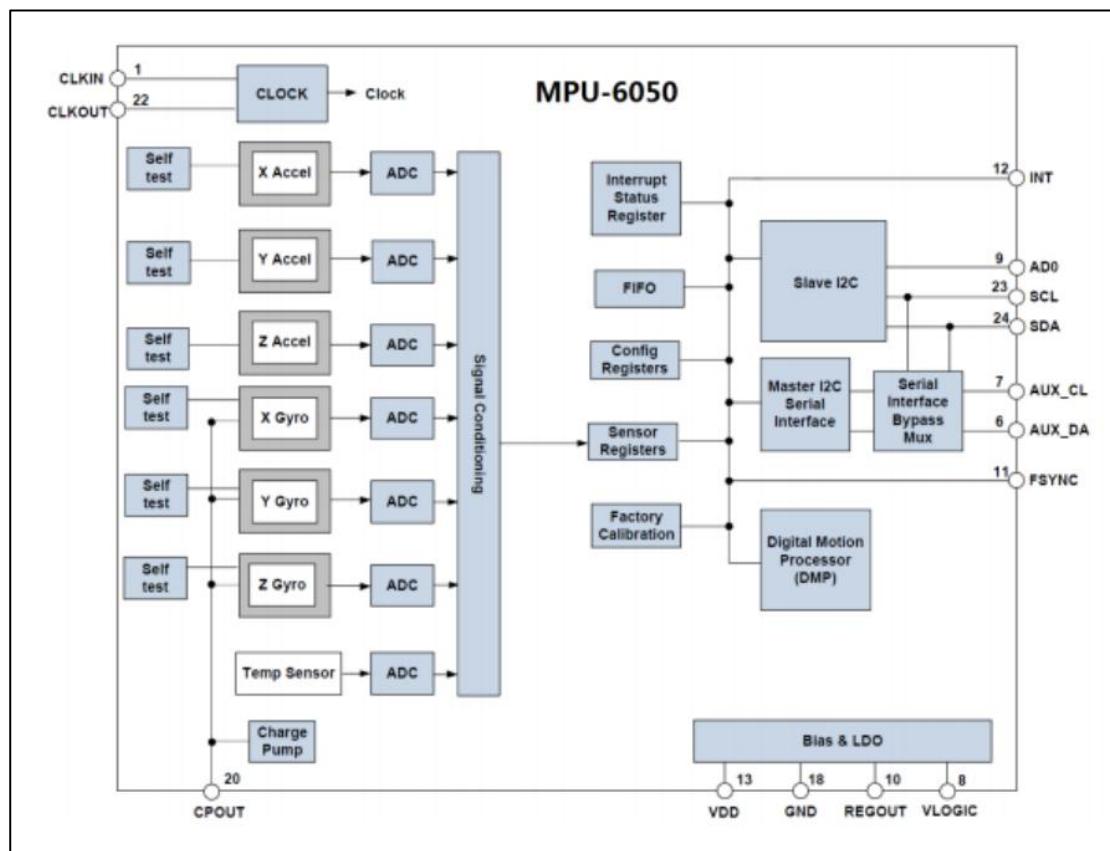
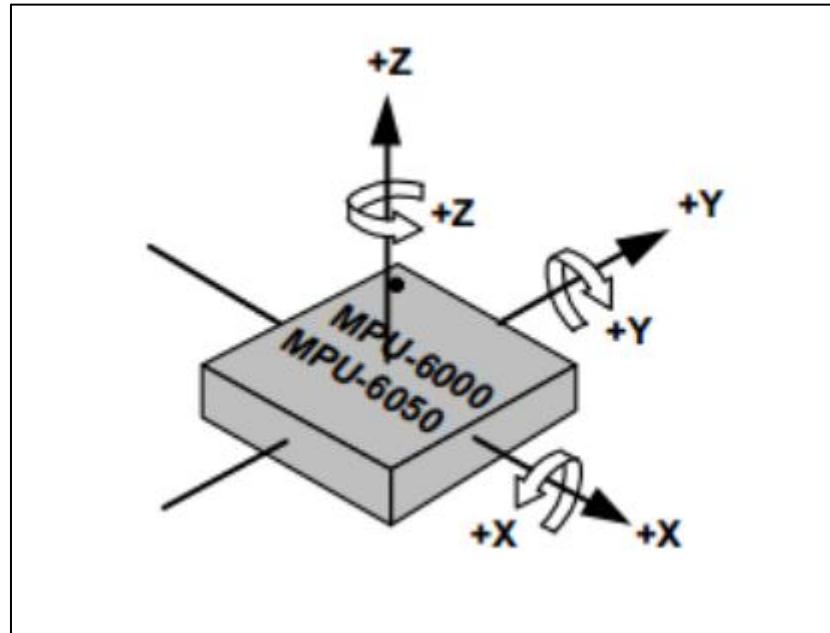


1 MPU6050 基础介绍

MPU-6050 是 InvenSense 公司推出的全球首款整合性 6 轴运动处理组件，相较于多组件方案，免除了组合陀螺仪与加速器时的轴间差的问题，减少了安装空间。MPU-6050 内部整合了 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度传感器，并且含有一个第二 IIC 接口，可用于连接外部磁力传感器，并利用自带的数字运动处理器（DMP: Digital Motion Processor）硬件加速引擎，通过主 IIC 接口，向应用端输出完整的 9 轴融合演算数据。有了 DMP，我们可以使用 InvenSense 公司提供的运动处理资料库，非常方便的实现姿态解算，降低了运动处理运算对操作系统的负荷，同时大大降低了开发难度。MPU6050 的特点包括：

- ① 以数字形式输出 6 轴或 9 轴(需外接磁传感器)的旋转矩阵、四元数(quaternion)、欧 拉角格 式(Euler Angle forma)的融合演算数据（需 DMP 支持）
- ② 具有 131 LSBs/ $^{\circ}$ /sec 敏感度与全格感测范围为 ± 250 、 ± 500 、 ± 1000 与 ± 2000 $^{\circ}$ /sec 的 3 轴角 速度感测器(陀螺仪)
- ③ 集成可程序控制，范围为 $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$ 和 $\pm 16g$ 的 3 轴加速度传感器
- ④ 移除加速器与陀螺仪轴间敏感度，降低设定给予的影响与感测器的飘移
- ⑤ 自带数字运动处理(DMP: Digital Motion Processing)引擎可减少 MCU 复杂的融合演算 数据、感 测器同步化、姿势感应等的负荷
- ⑥ 内建运作时间偏差与磁力感测器校正演算技术，免除了客户须另外进行校正的需求
- ⑦ 自带一个数字温度传感器
- ⑧ 带数字输入同步引脚(Sync pin)支持视频电子影相稳定技术与 GPS
- ⑨ 可程序控制的中断(interrupt)，支持姿势识别、摇摄、画面放大缩小、滚动、快速下降 中断、high-G 中断、零动作感应、触击感应、摇动感应功能
- ⑩ VDD 供电电压为 $2.5V \pm 5\%$ 、 $3.0V \pm 5\%$ 、 $3.3V \pm 5\%$ ； VLOGIC 可低至 $1.8V \pm 5\%$
- ⑪ 陀螺仪工作电流： 5mA， 陀螺仪待机电流： 5uA； 加速器工作电流： 500uA， 加速器省电模式 电流： 40uA@10Hz
- ⑫ 自带 1024 字节 FIFO，有助于降低系统功耗
- ⑬ 高达 400Khz 的 IIC 通信接口
- ⑭ 超小封装尺寸： 4x4x0.9mm (QFN)



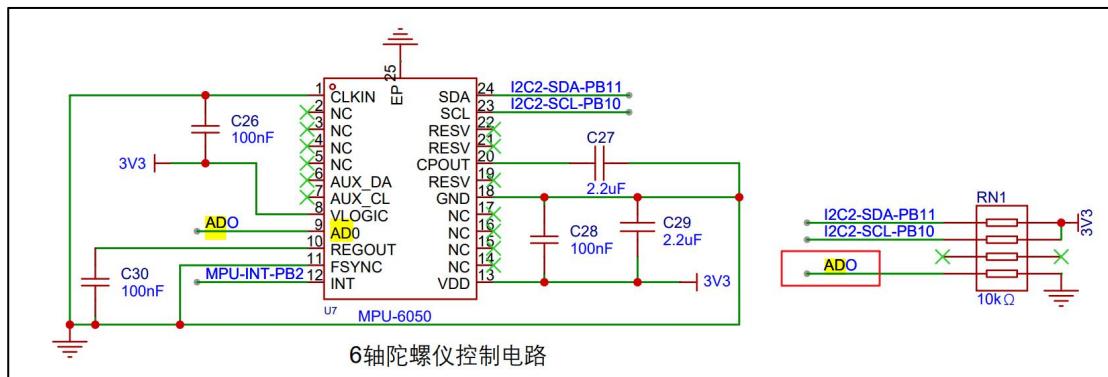
SCL 和 SDA 是连接 MCU 的 IIC 接口，MCU 通过这个 IIC 接口来控制 MPU-6050

另外还有一个 IIC 接口：AUX_CL 和 AUX_DA，这个接口可用来连接外部从设备，比如磁传感器，这样就可以组成一个九轴传感器。

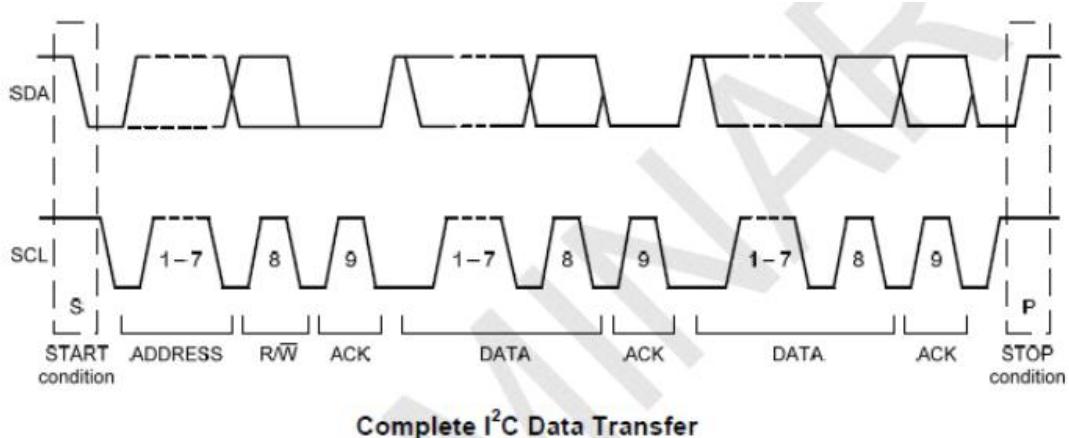
VLOGIC 是 IO 口电压，该引脚最低可以到 1.8V，我们一般直接接 VDD 即可。

AD0 是从 I²C 接口（接 MCU）的地址控制引脚，该引脚控制 I²C 地址的最低位。

如果接 GND，则 MPU6050 的 I²C 地址是：0X68，如果接 VDD，则是 0X69。这里的地址是不包含数据传输的最低位的，最低位用来表示读写！我们的原理图中，AD0 是接 GND 的，所以 MPU6050 的 I²C 地址是 0X68（不含最低位）。



2 MPU6050 读写时序



2.1 写入时序

2.1.1 单字节写入时序

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

2.1.2 连续写入时序

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

2.2 读取时序

2.2.1 单字节读出时序

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

2.2.2 连续读出时序

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

信号	描述
S	开始标志: SCL 为高时 SDA 的下降沿
AD	从设备地址 (Slave 地址)
W	写数据位 (0)
R	读数据位 (1)
ACK	应答信号: 在第 9 个时钟周期 SCL 为高时, SDA 为低
NACK	拒绝应答: 在第 9 个时钟周期, SDA 一直为高
RA	MPU-60X0 内部寄存器地址
DATA	发送或接受的数据
P	停止标志: SCL 为高时 SDA 的上升沿

3 MPU6050 初始化流程

3.1 初始化 IIC 接口

MPU-6050 采用 IIC 通信，所以我们需要先初始化与 MPU6050 连接的 SDA 和 SCL 数据线。

3.2 复位 MPU-6050

让 MPU-6050 内部所有寄存器恢复默认值，通过对“电源管理寄存器 1”(0X6B) 的 bit7 写 1 实现，上电复位后建议延时一段时间。复位后，“电源管理寄存器 1”恢复默认值(0X40)，然后必须设置该寄存器为 0X00，以唤醒 MPU6050，进入正常工作状态。

3.3 设置角速度传感器（陀螺仪）和加速度传感器的满量程范围

设置两个传感器的满量程范围(FSR)，分别通过“陀螺仪配置寄存器”(0X1B) 和“加速度传感器配置寄存器”(0X1C) 设置。我们一般设置陀螺仪的满量程范围为 $\pm 2000\text{dps}$ ，加速度传感器的满量程范围为 $\pm 2\text{g}$ 。

3.4 设置其他参数

还需要配置的参数有：关闭中断、关闭 AUX IIC 接口、禁止 FIFO、设置陀螺仪采样率和设置数字低通滤波器（DLPF）等。

我们不用中断方式读取数据，所以关闭中断，然后也没用到 AUX IIC 接口外接其他传感器，所以也关闭这个接口。分别通过“中断使能寄存器”(0X38) 和“用户控制寄存器”(0X6A) 控制。

MPU-6050 可以使用 FIFO 存储传感器数据，我们没有用到，所以关闭所有 FIFO 通道，通过“FIFO 使能寄存器”(0X23) 控制，默认都是 0（即禁止 FIFO），所以用默认值就可以了。

陀螺仪采样率通过“采样率分频寄存器”(0X19) 控制，这个采样率我们一般设置为 50 即可。

数字低通滤波器(DLPF)则通过配置寄存器 (0X1A) 设置，一般设置 DLPF 为带宽的 1/2 即可。

3.5 配置系统时钟源并使能角速度传感器和加速度传感器

系统时钟源同样是通过“电源管理寄存器 1”(0X6B) 来设置，该寄存器的最低三位用于设置系统时钟源选择，默认值是 0（内部 8M RC 震荡），不过我们一般设置为 1，选择 x 轴陀螺 PLL 作为时钟源，以获得更高精度的时钟。同时，使能角速度传感器和加速度传感器，这两个操作通过“电源管理寄存器 2”(0X6C) 来设置，设置对应位为 0 即可开启。

以上 MPU6050 的初始化就完成了，可以正常工作了（其他未设置的寄存器全部采用默认值即可）。初始化完就可以读取相关寄存器，得到加速度传感器、角速度传感器和温度传感器的数据了。

4 涉及的寄存器详解

4.1 电源管理寄存器 1

寄存器地址为： 0X6B

4.30 REGISTER 107 - POWER MANAGEMENT 1 电源管理 1

PWR_MGMT_1

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
6B	107	DEVICE_RESET	SLEEP	CYCLE	-	TEMP_DIS	CLKSEL[2:0]		

DEVICE_RESET 位用来控制复位，设置为 1，复位 MPU6050，复位结束后，MPU 硬件自动清零该位。

SLEEP 位用于控制 MPU6050 的工作模式，复位后，该位为 1，即进入了睡眠模式（低功耗），所以我们要清零该位，以进入正常工作模式。

TEMP_DIS 用于设置是否使能温度传感器，设置为 0，则使能。最后 CLKSEL[2:0]用于选择系统时钟源，选择关系如表 所示：

CLKSEL	Clock Source
0	Internal 8MHz oscillator
1	PLL with X axis gyroscope reference
2	PLL with Y axis gyroscope reference
3	PLL with Z axis gyroscope reference
4	PLL with external 32.768kHz reference
5	PLL with external 19.2MHz reference
6	Reserved
7	Stops the clock and keeps the timing generator in reset

默认是使用内部 8M RC 晶振的，精度不高，所以我们一般选择 X/Y/Z 轴陀螺作为参考的 PLL 作为时钟源，一般设置 CLKSEL=001 即可。

4.2 陀螺仪配置寄存器

寄存器地址为： 0X1B

4.4 REGISTER 27 - GYROSCOPE CONFIGURATION

陀螺仪配置

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1B	27	XG_ST	YG_ST	ZG_ST	FS_SEL[1:0]	-	-	-	-

该寄存器我们只关心 FS_SEL[1:0]这两个位，用于设置陀螺仪的满量程范围：

FS_SEL 选择陀螺仪的满量程，如下表：

FS_SEL	Full Scale Range
0	$\pm 250^{\circ}/s$
1	$\pm 500^{\circ}/s$
2	$\pm 1000^{\circ}/s$
3	$\pm 2000^{\circ}/s$

我们一般设置为 3，即 $\pm 2000^{\circ}/s$ ，因为陀螺仪的 ADC 为 16 位分辨率，所以得到灵敏度为： $65536/4000=16.4\text{ LSB}/(^{\circ}/\text{s})$ 。

比如，采样值为 32768，表示 1000

4.3 加速度传感器配置寄存器

寄存器地址为：0X1C

4.5 REGISTER 28 - ACCELEROMETER CONFIGURATION

加速度计配置

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1C	28	XA_ST	YA_ST	ZA_ST	AFS_SEL[1:0]	-	-	-	-

该寄存器我们只关心 AFS_SEL[1:0]这两个位，用于设置加速度传感器的满量程范围：

AFS_SEL 用于选择加速度计的满量程范围，如下表：

AFS_SEL	Full Scale Range
0	$\pm 2g$
1	$\pm 4g$
2	$\pm 8g$
3	$\pm 16g$

我们一般设置为 0，即 $\pm 2g$ ，因为加速度传感器的 ADC 也是 16 位，所以得到灵敏度为： $65536/4=16384\text{LSB/g}$ 。

4.4 FIFO 使能寄存器

寄存器地址为：0X23

4.7 REGISTER 35 - FIFO ENABLE FIFO 使能

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
23	35	TEMP_FIFO_EN	XG_FIFO_EN	YG_FIFO_EN	ZG_FIFO_EN	ACCEL_FIFO_EN	SLV2_FIFO_EN	SLV1_FIFO_EN	SLV0_FIFO_EN

该寄存器用于控制 FIFO 使能，在简单读取传感器数据的时候，可以不用 FIFO，设置对应位为 0 即可禁止 FIFO，设置为 1，则使能 FIFO。注意加速度传感器的 3 个轴，全由 1 个位（ACCEL_FIFO_EN）控制，只要该位置 1，则加速度传感器的三个通道都开启 FIFO 了。

ACCEL_FIFO_EN

该位置 1，该位使能 ACCEL_XOUT_H, ACCEL_XOUT_L, ACCEL_YOUT_H, ACCEL_YOUT_L, ACCEL_ZOUT_H 和 ACCEL_ZOUT_L(寄存器 59 to 64)可以加载到 FIFO 缓冲区。

4.5 陀螺仪采样率分频寄存器

寄存器地址为：0X19

4.2 REGISTER 25 - SAMPLE RATE DIVIDER

采样频率分频器

SMPRT_DIV

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
19	25								SMPLRT_DIV[7:0]

该寄存器用于设置 MPU6050 的陀螺仪采样频率，计算公式为：

$$\text{采样频率} = \text{陀螺仪输出频率} / (1 + \text{SMPLRT_DIV})$$

这里陀螺仪的输出频率，是 1Khz 或者 8Khz，与数字低通滤波器（DLPF）的设置有关，当 DLPF_CFG=0/7 的时候，频率为 8Khz，其他情况是 1Khz。而且 DLPF 滤波频率一般设置为采样率的一半。采样率，我们假定设置为 50Hz，那么 SMPLRT_DIV=1000/50-1=19。

4.6 配置寄存器

寄存器地址为： 0X1A

4.3 REGISTER 26 - CONFIGURATION 配置

CONFIG

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1A	26	-	-		EXT_SYNC_SET[2:0]				DLPF_CFG[2:0]

数字低通滤波器（DLPF）的设置位，即：DLPF_CFG[2:0]，加速度计和陀螺仪，都是根据这三个位的配置进行过滤的。

DLPF(数字低通滤波器)由 DLPF_CFG 配置。加速度计和陀螺仪根据 DLPF_CFG 的值被过滤。下表显示过滤情况：

DLPF_CFG	Accelerometer ($F_s = 1\text{kHz}$)		Gyroscope		
	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	$F_s (\text{kHz})$
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVED		RESERVED		8

这里的加速度传感器，输出速率(Fs)固定是 1Khz，而角速度传感器的输出速率(Fs)，则根据 DLPF_CFG 的配置有所不同。一般我们设置角速度传感器的带宽为其采样率的一半，如前面所说的，如果设置采样率为 50Hz，那么带宽就应该设置为 25Hz，取近似值 20Hz，就应该设置 DLPF_CFG=4。

采样定理(奈奎斯特定理): 在进行模拟数字信号的转换过程中，当采样频率大于等于信号中最高频率(信号带宽)的 2 倍时，采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息。

4.7 电源管理寄存器 2

寄存器地址为: 0X6C

4.31 REGISTER 108 - POWER MANAGEMENT 2 电源管理 2									
PWR_MGMT_2									
Type: Read/Write									
Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
6C	108	LP_WAKE_CTRL[1:0]	STBY_XA	STBY_YA	STBY_ZA	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG	

该寄存器的 LP_WAKE_CTRL 用于控制低功耗时的唤醒频率，我们用不到。剩下的 6 位，分别控制加速度和陀螺仪的 x/y/z 轴是否进入待机模式，这里我们全部都不进入待机模式，所以全部设置为 0 即可。

4.8 陀螺仪数据输出寄存器

6 个寄存器: 0X43~0X48

通过读取这 6 个寄存器，就可以读到陀螺仪 x/y/z 轴的值，比如 x 轴的数据，可以通过读取 0X43 (高 8 位) 和 0X44 (低 8 位) 寄存器得到，其他轴以此类推。

4.9 加速度传感器数据输出寄存器

6 个寄存器: 0X3B~0X40

通过读取这 8 个 寄存器，就可以读到加速度传感器 x/y/z 轴的值，比如读 x 轴的数据，可以通过读取 0X3B (高 8 位) 和 0X3C (低 8 位) 寄存器得到，其他轴以此类推。