



## ANM002 - 3 轴 MEMS 加速度传感器的跌倒检测

## 内置自由落体、唤醒和静止检测功能

匹配码	传感器说明	订购码
WSEN-ITDS	三轴加速度传感器	2533020201601
WSEN-EVAL	三轴加速度传感器评估板	2533203301691

## 缩写

缩写	缩写说明
FS	Full scale, 满量程
I <sup>2</sup> C	Inter integrated circuit, I <sup>2</sup> C 总线
MEMS	Micro-electro-mechanical system, 微机电系统
LSB	Least significant bit, 最低有效位
ODR	Output data rate, 输出数据速率

# 目錄

1 介紹.....	3
2 MEMS 三轴加速度传感器 .....	4
2.1 内置传感器功能 .....	4
3 用于跌倒检测的内置传感器功能 .....	5
4 自由落体检测 .....	6
4.1 自由落体持续时间 .....	7
4.2 自由落体阈值 .....	7
4.3 自由落体特性的初始化 .....	8
4.3.1 禁用锁定模式 .....	9
4.3.2 启用锁存模式 .....	9
5 唤醒检测 .....	9
5.0.1 禁用锁定模式 .....	10
5.0.2 启用锁存模式 .....	10
5.1 唤醒阈值 .....	10
5.2 唤醒持续时间 .....	10
5.3 使用高通滤波器输出初始化唤醒功能 .....	10
5.4 使用偏移输出初始化唤醒功能 .....	11
6 静止检测 .....	13
6.1 传感器处于静止状态（无运动） .....	14
6.2 传感器处于活动状态 .....	14
6.3 静态特征的初始化 .....	15
7 使用传感器特征解释跌倒情境 .....	16
8 结论 .....	17

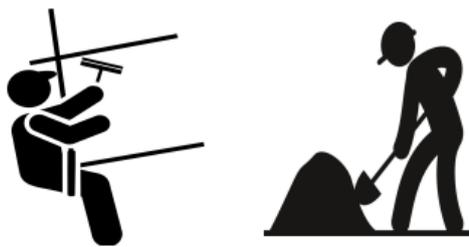
## 1 介绍

无意识跌倒成为了许多老龄化人口社区的主要健康问题。如果这个人立即接受治疗，最初的受伤很可能导致严重的后果。相比其他事件而言，这是对老年人和需要特殊援助群体最大的威胁之一。人们注意到，跌倒的本质不同取决于人与人之间身体状况，弱点和平衡问题等的差异。



图 1:跌倒情境

例如，许多老人由于身体虚弱和头晕导致无意识的跌倒。主要的后果与摔倒无关，而是由于没有辅助和延迟处理。为了给老年人和那些有特殊援助需要的人提供更好的生活，有必要开发一个监测系统，用来提醒提供紧急援助的护理人员。监测系统的目的是为独居老人提供更好的生活条件 and 健康护理。人员监测系统能够通知健康护理代表们任何紧急事件。除了对老年人的支持外，还有很多活动可以从这样的跌倒监测系统中获益，尤其是对于登山运动员，建筑工人，屋顶作业者和擦窗工人。



a) 擦窗工人

b) 建筑工人

图 2:工作间意外坠落

开发一个实现跌倒检测的系统可以有不同的方法。它可以是基于视觉、光线和运动传感器系统。这些系统可以进一步分为可穿戴和非可穿戴的检测系统。一种简单的方法来开发可穿戴的检测系统是基于运动的传感器。它需要一个 3 轴加速度传感器来用加速度数据检测跌倒。本文档提供了将内置传感器特性的 WSEN-ITDS 3 轴 MEMS 加速度传感器用于开发跌倒检测系统的初步想法。

-这份文件提供了用加速度传感器来开发跌倒检测系统的初步方法。

-实际跌倒检测系统可能因人而异和因应用功能而异。因为跌倒可以是线性的，旋转的或某些情况下两者兼而有之。

## 2 MEMS 3 轴加速度传感器

WSEN-ITDS 是基于 MEMS 技术并具备数字通讯接口的 3 轴加速度传感器。在三个轴上有四种测量范围可供选择： $\pm 2\text{ g}$ 、 $\pm 4\text{ g}$ 、 $\pm 8\text{ g}$  和  $\pm 16\text{ g}$ 。在包含标准 I<sup>2</sup>C 通讯接口的同时封装尺寸仅为  $2.0 \times 2.0 \times 0.7\text{ mm}$ 。其超低电流消耗特性非常适合于开发基于电池供电的跌倒检测系统。

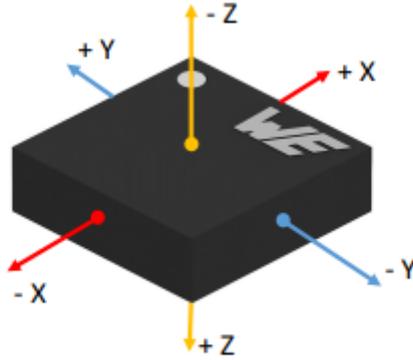


图 3：3 轴 MEMS 加速度传感器

传感器内置了自由落体、唤醒、轻拍、运动/静止和活动/不活动等特性并可通过两个可编程中断引脚获知相应状态。这些特性能够大大减轻开发跌倒检测系统在复杂算法上的付出。这些特性上的组合能够实现人体跌倒检测从而使 WSEN-ITDS 非常适用于此项应用。内置特性可以减少传感器加速度数据的连续传输，以及对这些数据进行复杂的运算。针对不同类型的应用，跌倒检测系统可以装配在人的手腕、胸以及腿等不同位置。

### 2.1 内置传感器功能

- 自由落体
- 唤醒
- 轻敲功能
- 运动和静止
- 活动和不活动
- 4D 和 6D 方向

### 3 用于跌倒检测的内置传感器功能

3 轴加速度传感器 WSEN-ITDS 有两个可编程中断引脚 INT\_0 和 INT\_1。这两个引脚可以单独使能或关闭。来自传感器功能的中断信号会反馈到这两个引脚。中断引脚功能的详细信息在 WSEN-ITDS 的用户手册第 12 章中进行了解释，对应的订购编码为 2533020201601。本文档描述了如何利用内置的传感器特性开发基于运动的跌倒检测系统。

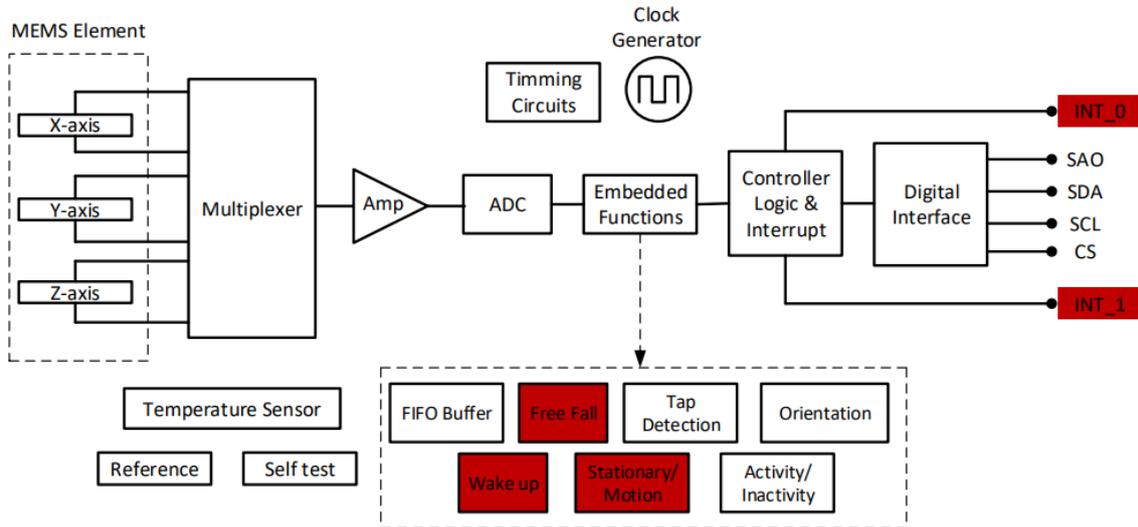


图 4: 传感器功能框图

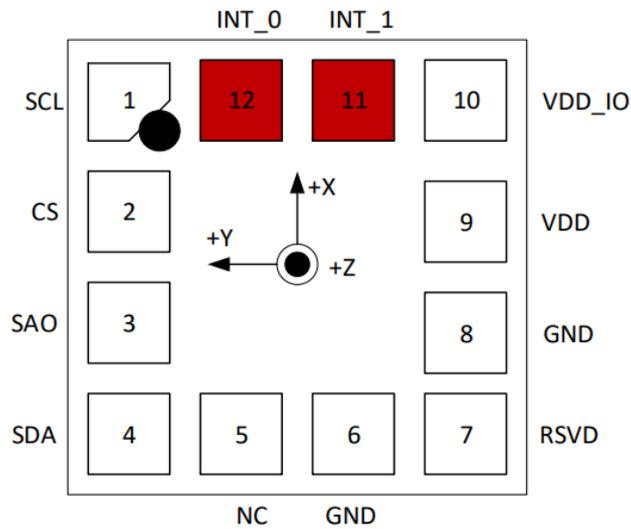


图 5: 传感器固定（顶视图）

跌倒检测可以通过三种传感器内置特性实现，如自由落体、唤醒和静止检测功能。这些传感器特性的结合有助于检测一个人何时跌倒，跌倒但可以移动，跌倒但不能移动。这些事件的中断信号可以分别反馈到 INT\_0 和 INT\_1 引脚。这些事件的组合构成了整个跌倒检测算法。当跌倒发生时，它能够启动监测系统并发出警报。

### Sensor features

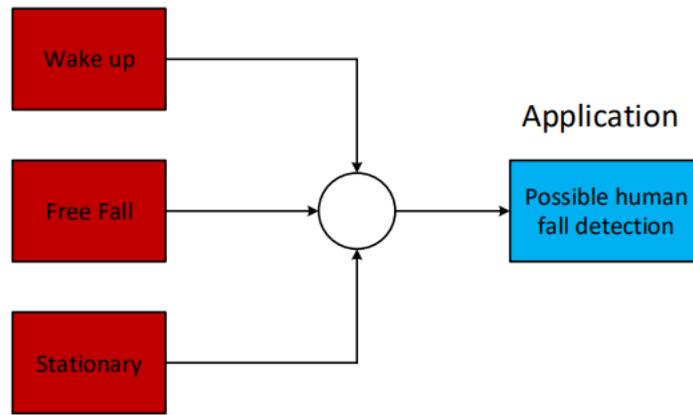


图 6: 用于跌倒检测的传感器功能组合

自由落体和静止/唤醒事件之间的时间间隔是取决于应用。同时，不同应用对应的自由落体持续时间也不同。例如，擦窗工人从几米高跌落的时长要大于日常活动中老年人发生跌倒的时长。

- 跌倒检测的内置传感器特性组合取决于跌倒的类型、条件和持续时间。
- 关于寄存器的映射和描述等详细信息，请参考产品用户手册。

### 4 自由落体检测

自由落体检测特性描述的是如何配置特定的寄存器来识别自由落体事件。在自由落体时，所有三个轴的加速度值都会趋近于零。三个轴上的加速度值在很小且接近于零的情况下被定义为将产生一个中断。如图 7 中所示的两个参数对于实现自由落体检测特性是必须的。

- 自由落体持续时间
- 自由落体阈值

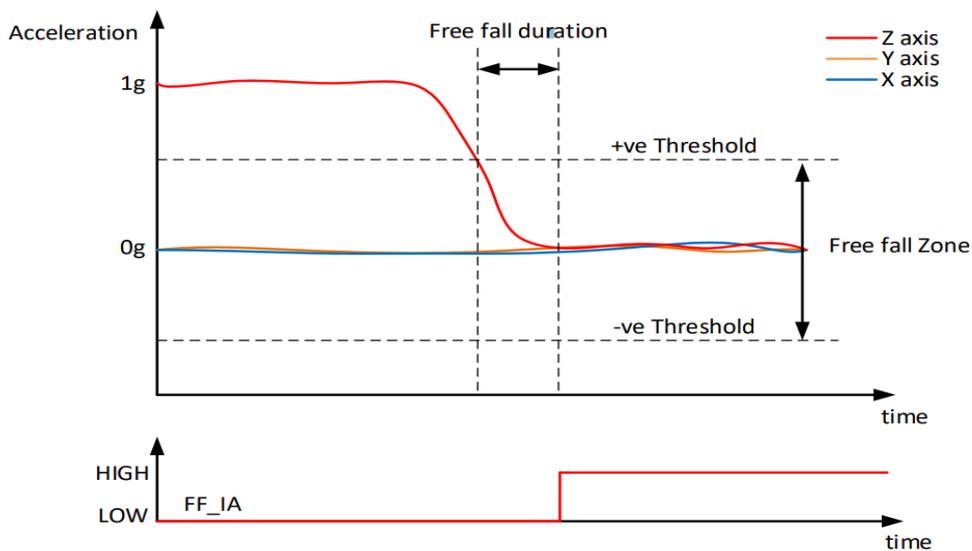


图 7: 自由落体中断

当三个轴的加速度值在一段时间内低于阈值时就会触发自由落体中断，比如自由落体持续时间。自由落体中断信号可以通过使能控制寄存器 CTRL\_4 (0x23)中的 INT0\_FF 位从而反馈到中断引脚 INT\_0。同时，通过读取 STATUS\_DETECT 寄存器(0x37)中的 FF\_IA 位可检测自由落体中断事件的发生。

#### 4.1 自由落体持续时间

自由落体的持续时间由 WAKE\_UP\_DUR (0x35)寄存器中的 FF\_DUR5 位和 FREE\_FALL 寄存器(0x36)中的 FF\_DUR[4:0]位组合来配置。自由落体持续时间由  $1 \text{ LSB} = 1 * 1 / \text{ODR}$  计算。表 1 是输出数据速率 (ODR)为 200hz 时的自由落体持续时间。

举例如下： -

FF\_DUR5 = 1; FF\_DUR[4:0] = 01000

FF\_Duration (组合 FF\_DUR5 和 FF\_DUR[4:0]) = b101000 (十进制等于 40)

Free fall = FF\_Duration\*(1/ODR) = 40\*(1/200) = 200ms

FF_DUR5	FF_DUR[4:0]	Free fall duration
0	00001	5 ms (1/ODR)
0	00010	10 ms (2/ODR)
0	00011	15 ms (3/ODR)
0	00100	20 ms (4/ODR)
0	00101	25 ms (5/ODR)
0	00110	30 ms (6/ODR)
0	00111	35 ms (7/ODR)
-	-	-
1	11111	315 ms (63/ODR)

表 1: ODR 200Hz 的自由落体持续时间

#### 4.2 自由落体阈值

自由落体阈值是通过将来自 FREE\_FALL 寄存器(0x36)的阈值解码值乘以 31.25 mg 来计算的。表 2 中的计算显示了可能的自由落体阈值。

FF_THS[2:0]	Threshold decoding (LSB)	Free fall threshold value
000	5	5 * 31.25mg = 156.5 mg
001	7	7 * 31.25mg = 218.75 mg
010	8	8 * 31.25mg = 250 mg
011	10	10 * 31.25mg = 312.5 mg
100	11	11 * 31.25mg = 343.75 mg
101	13	13 * 31.25mg = 406.25 mg
110	15	15 * 31.25mg = 468.75 mg
111	16	16 * 31.25mg = 500 mg

表 2: 自由落体阈值

### 4.3 自由落体特性的初始化

流程图显示了自由落体特性的初始化。它一步一步地描述寄存器配置，以激活自由落体特性。表 1 和表 2 显示了可能的自由落体持续时间和阈值。

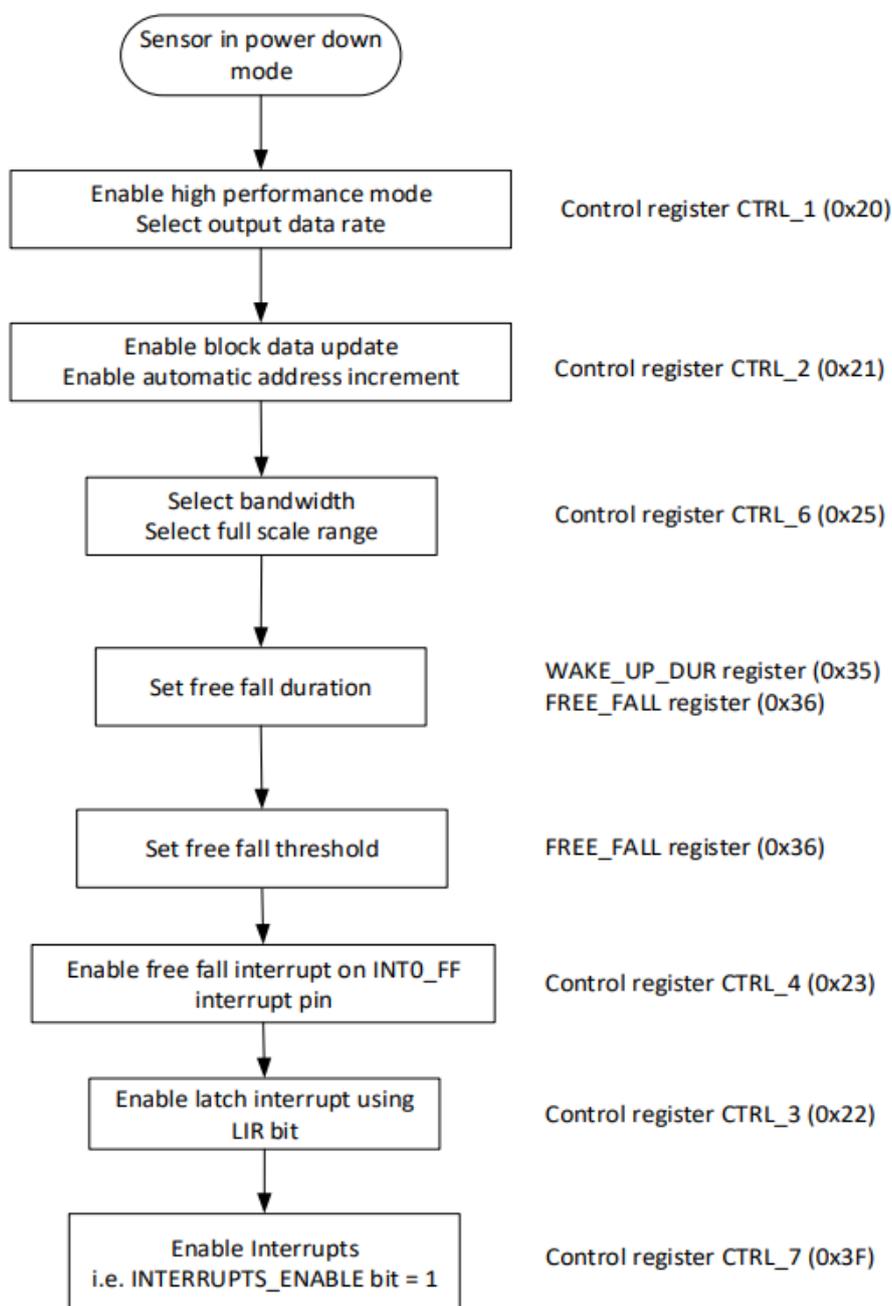


图 8：自由落体检测的初始化

自由落体中断信号的复位取决于锁存模式的启用或禁用。它可以由控制寄存器 CTRL\_3 (0x22) 中的 LIR 位定义。

### 4.3.1 禁用锁存模式

如果锁存模式被禁用，当自由落体条件不再有效时，中断信号会自动重置。即 STATUS\_DETECT (0x37)寄存器中的 FF\_IA 位将自动复位。

### 4.3.2 启用锁存模式

锁存模式使用控制寄存器 CTRL\_3 (0x22)中的 LIR 位使能，FF\_IA 中断信号反馈到中断引脚 INT\_0。此时中断信号不会自动复位。它将通过读取 WAKE\_UP\_EVENT (0x38)或 ALL\_INT\_EVENT (0x3B)寄存器的内容来重置。

使用控制寄存器 CTRL\_3 (0x22)中的 LIR 位使能锁存模式，并且 FF\_IA 中断信号不反馈到中断引脚 INT\_0。当自由落体条件不再有效时，中断信号自动复位。即 STATUS\_DETECT (0x37)寄存器中的 FF\_IA 位自动复位。

## 5 唤醒检测

在睡眠/不活动/静止事件之后如果任一轴上的加速度值超过了一定阈值则会产生唤醒中断信号。唤醒特性使用了高通滤波器的输出数据或者补偿输出数据来产生中断。控制寄存器 CTRL\_7(0x3F)中的 USER\_OFF\_ON\_WU 位定义了唤醒特性检测所需数据的来源，比如来自高通滤波器输出或偏移输出。

通过使能控制寄存器 CTRL\_4(0x23)中的 INT0\_WU 位可将唤醒中断信号反馈到 INT\_0 中断引脚。相同的中断信号也可通过读取寄存器 ALL\_INT\_EVENT(0x3B)中的 WU\_IA 位进行识别。寄存器 WAKE\_UP\_EVENT(0x38)中的 X\_WU,Y\_WU,Z\_WU 位表明了是哪个轴产生了唤醒事件。

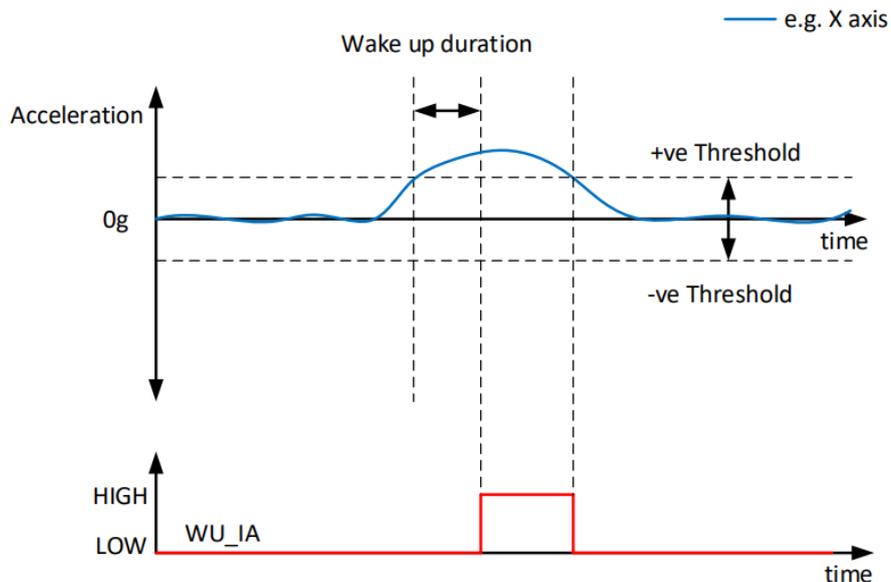


图 9: 唤醒中断，例如 X 轴

唤醒中断信号的复位取决于锁存模式的启用或禁用。它可以由控制寄存器 CTRL\_3 (0x22)中的 LIR 位定义。

### 5.0.1 禁用锁定模式

如果锁存模式被禁用，当唤醒条件不再有效时，中断信号将自动重置。即 WAKE\_UP\_EVENT (0x38)寄存器中的 WU\_IA 位将自动复位。

### 5.0.2 启用锁存模式

使用控制寄存器 CTRL\_3 (0x22)中的 LIR 位使能锁存模式，并且 WU\_IA 中断信号反馈到中断引脚 INT\_0。此时中断信号不会自动复位。它将通过读取 WAKE\_UP\_EVENT (0x38)或 ALL\_INT\_EVENT (0x3B)寄存器的内容来重置。

使用控制寄存器 CTRL\_3 (0x22)中的 LIR 位使能锁存模式，并且 WU\_IA 中断信号不反馈到中断引脚 INT\_0。当唤醒条件不再有效时，中断信号将自动复位。即，WAKE\_UP\_EVENT (0x38)寄存器中的 WU\_IA 位将自动复位。

## 5.1 唤醒阈值

寄存器 WAKE\_UP\_DUR (0x35)中的 WK\_THS[5:0]位定义了唤醒特性的无符号阈值。该阈值对正加速度数据和负加速度数据均适用。为了实现唤醒功能，至少加速度轴中的任何一个值都应该超过阈值。阈值由控制寄存器 CTRL\_1 (0x20)中定义的选定的满量程范围计算。唤醒阈值为  $1 \text{ LSB} = \text{FS}/64$ 。表 3 为  $\pm 2g$  全量程可能的阈值。

WK_THS[5:0]	Threshold value (mg)
000001	$1*(2/64) = 31.25$
000010	$2*(2/64) = 62.5$
000011	$3*(2/64) = 93.75$
000100	$4*(2/64) = 125$
000101	$5*(2/64) = 156.25$
-	-
111111	$63*(2/64) = 1968.75$

表 3:  $\pm 2g$  的唤醒阈值

## 5.2 唤醒持续时间

寄存器 WAKE\_UP\_DUR (0x35)中的 WAKE\_DUR[1:0]位定义了能够识别唤醒事件所需的最小持续时间。这取决于控制寄存器 CTRL\_1(0x20)所选择的数据输出速率 ODR。唤醒持续时间可以通过  $1 \text{ LSB} = 1*1/\text{ODR}$  进行计算。为了避免某一个轴上突然出现的峰值造成不真实的唤醒中断事件，因此定义持续时间参数是有必要的。表 4 为 ODR 等于 200Hz 时可能的唤醒持续时间。

WAKE_DUR[1:0]	Duration (ms)
00	0
01	$1*(1/200) = 5$
10	$2*(1/200) = 10$
11	$3*(1/200) = 30$

表 4: ODR 200Hz 的唤醒持续时间

### 5.3 使用高通滤波器输出初始化唤醒功能

流程图显示了高通滤波器输出数据唤醒特性的初始化。为了在唤醒事件识别过程中排除重力矢量和极低频干扰，需要使用高通滤波器输出。

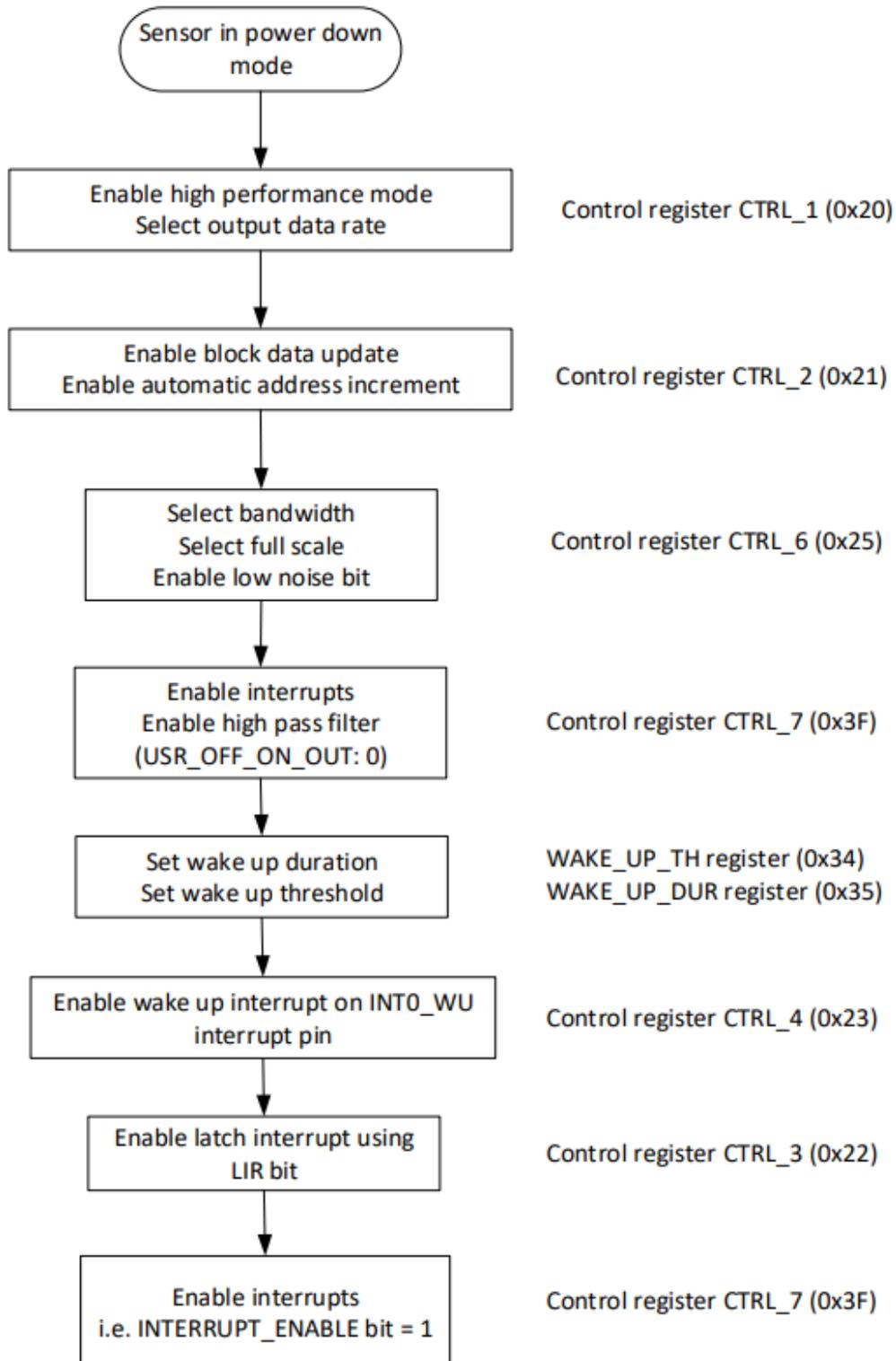


图 10: 具有高通滤波器输出的初始化唤醒事件检测

## 5.4 使用偏移输出初始化唤醒功能

流程图显示了使用偏移输出数据唤醒功能的初始化。控制寄存器 CTRL\_7 (0x3F) 中的 USR\_OFF\_W 位定义了偏移值的权重。将 USR\_OFF\_W 位写入 1 将得到 15.6 mg/LSB，将 'b01000000' (十进制值:64) 写入寄存器 Z\_OFS\_USR (0x3E) 将得到 Z 轴上的偏移值  $64 * 15.6 \text{ mg} = 0.9984 \text{ g}$ ，这大约是 1g。

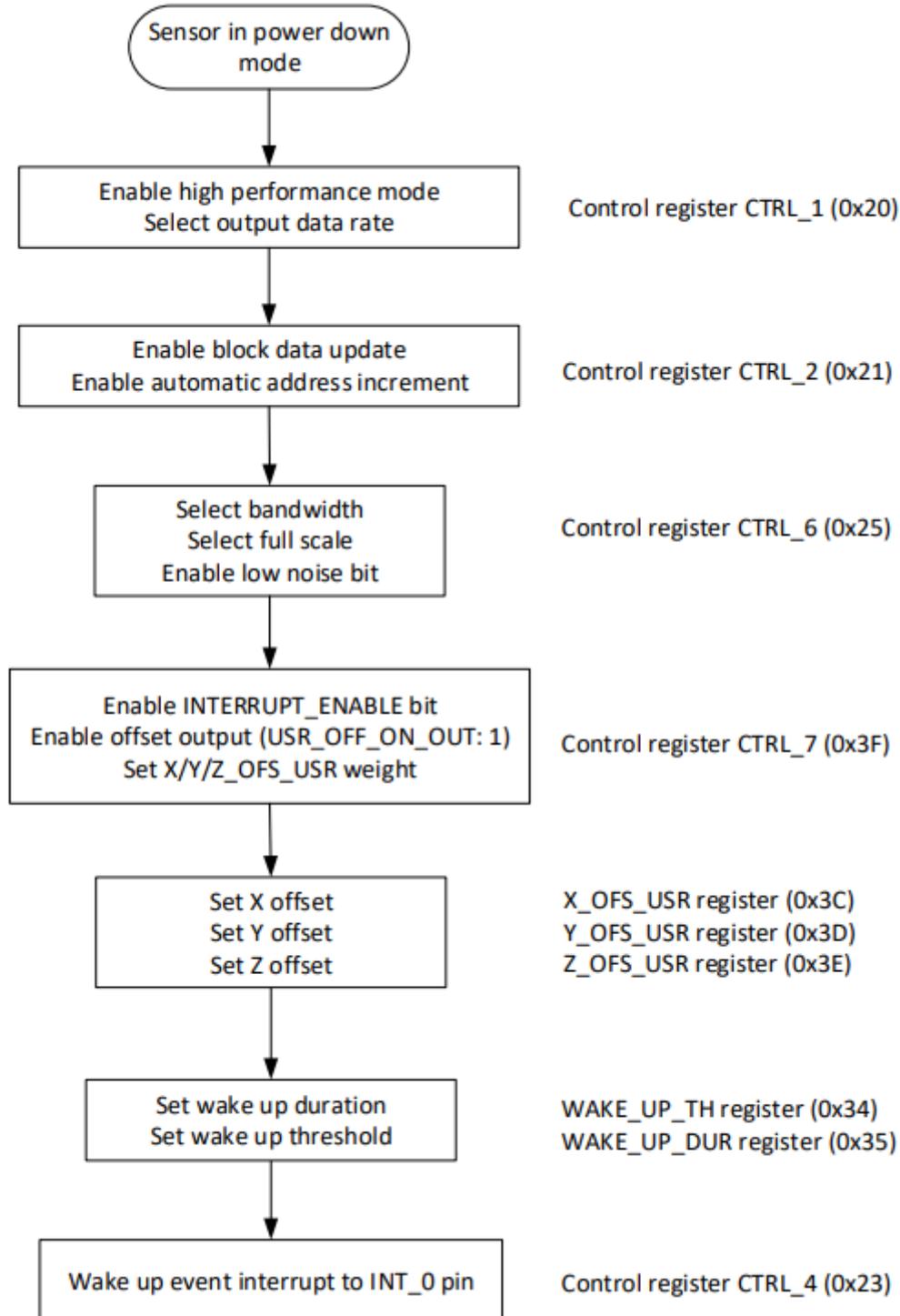


图 11: 带有偏移输出的初始化唤醒事件检测

## 6 静止检测

静止特性结合了睡眠和唤醒检测事件来实现静止事件。没有单独的静止中断信号。它可以通过监控睡眠和唤醒中断信号来实现。静止特性可以通过在 WAKE\_UP\_TH (0x34) 寄存器中写入 SLEEP\_ON 位为 '1'，同时在 WAKE\_UP\_DUR (0x35) 寄存器中写入 stationary 位为 '1' 来启用。由于静态检测特征使用唤醒特性来产生中断，可以使用寄存器 CTRL\_7 (0x3F) 中的 USR\_OFF\_OUT 位来选择输出数据来产生唤醒检测事件，即高通滤波器输出或偏移量输出。可以根据用户应用程序定义唤醒阈值和持续时间参数。

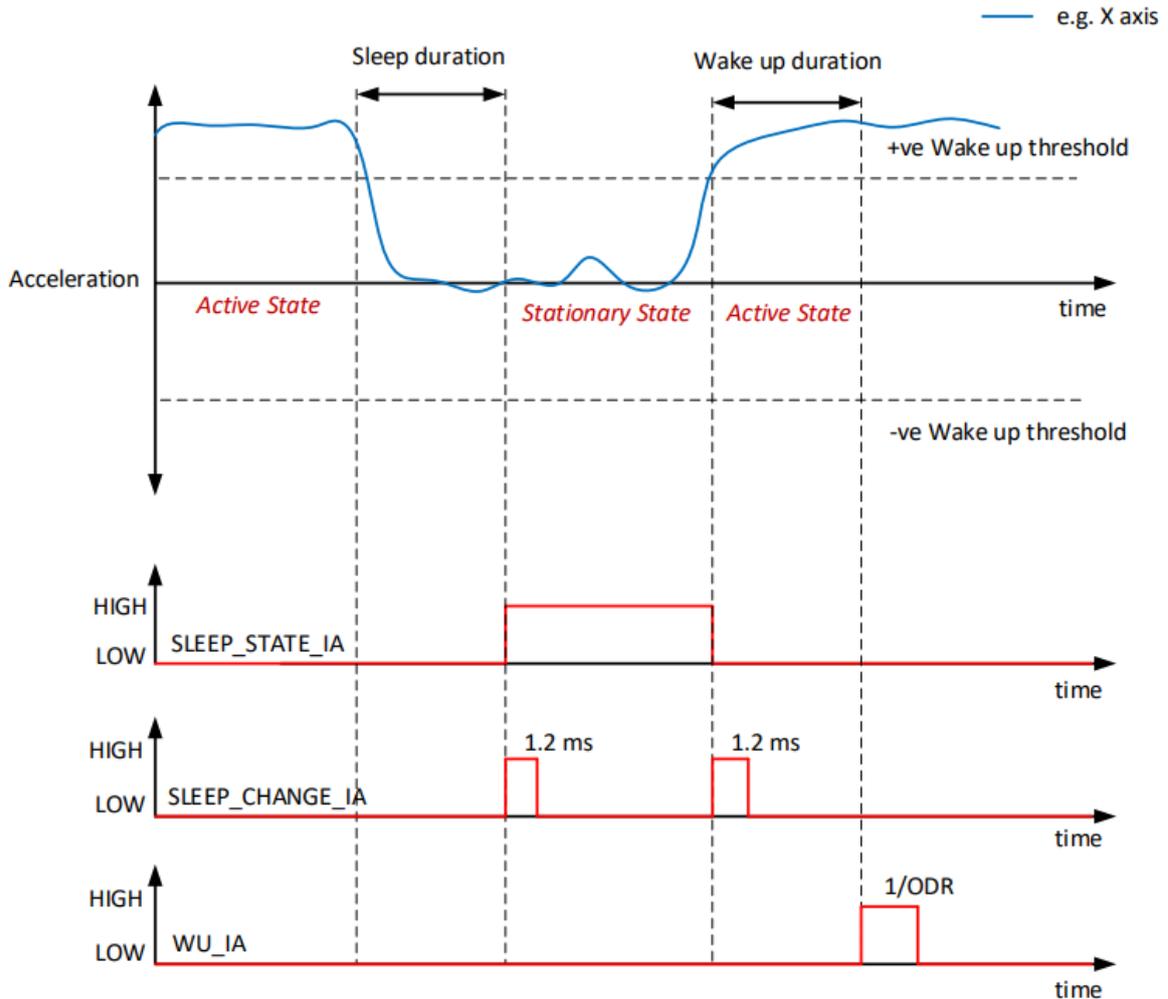


图 12: 使用高通滤波器数据的静止事件检测, 例如 X 轴

-没有单独的静止中断信号。它可以通过监控睡眠和唤醒中断信号来定义。

## 6.1 传感器处于静止状态（无运动）

当 X、Y、Z 轴输出的加速度值小于唤醒阈值，且输出值在此范围内保持一定时间时，产生 SLEEP\_STATE\_IA 中断信号。阈值由 WAKE\_UP\_TH (0x34) 寄存器中的 WK\_THS 位定义。持续时间由 WAKE\_UP\_DUR (0x35) 寄存器中的 SLEEP\_DUR 位定义。

静止事件检测状态使用 SLEEP\_STATE\_IA 位进行检测。这个中断信号可以反馈到 INT\_1 中断引脚。同时，当传感器状态从运动变为静止或反之，ALL\_INT\_SRC 寄存器中的 SLEEP\_CHANGE\_IA 位被设置为 1.2 ms。这个状态位也可以反馈到 INT\_1 中断引脚。在这种情况下，SLEEP\_CHANGE\_IA 信号与锁存模式不兼容，因此 CTRL\_3 (0x22) 寄存器的 LIR 位应该设置为 0。

## 6.2 传感器处于活动状态

当来自任意一个轴的单个数据高于定义的唤醒阈值，并且数据在指定的时间内保持在该范围内时，就会产生 WU\_IA 中断信号。这个中断信号可以被反馈到 INT\_0 中断引脚。持续时间参数由 WAKE\_UP\_DUR (0x35) 寄存器中的 WAKE\_DUR 位定义。同时，当传感器从静止状态变为运动状态时，ALL\_INT\_SRC 寄存器中的 SLEEP\_CHANGE\_IA 位被重新设置为 1.2 ms。

—WU\_IA 中断信号的持续时间为 1/ODR。

### 6.3 静态特征的初始化

流程图显示了对传感器静止特性的初始化。此流程图显示了启用静态特性的逐步配置。

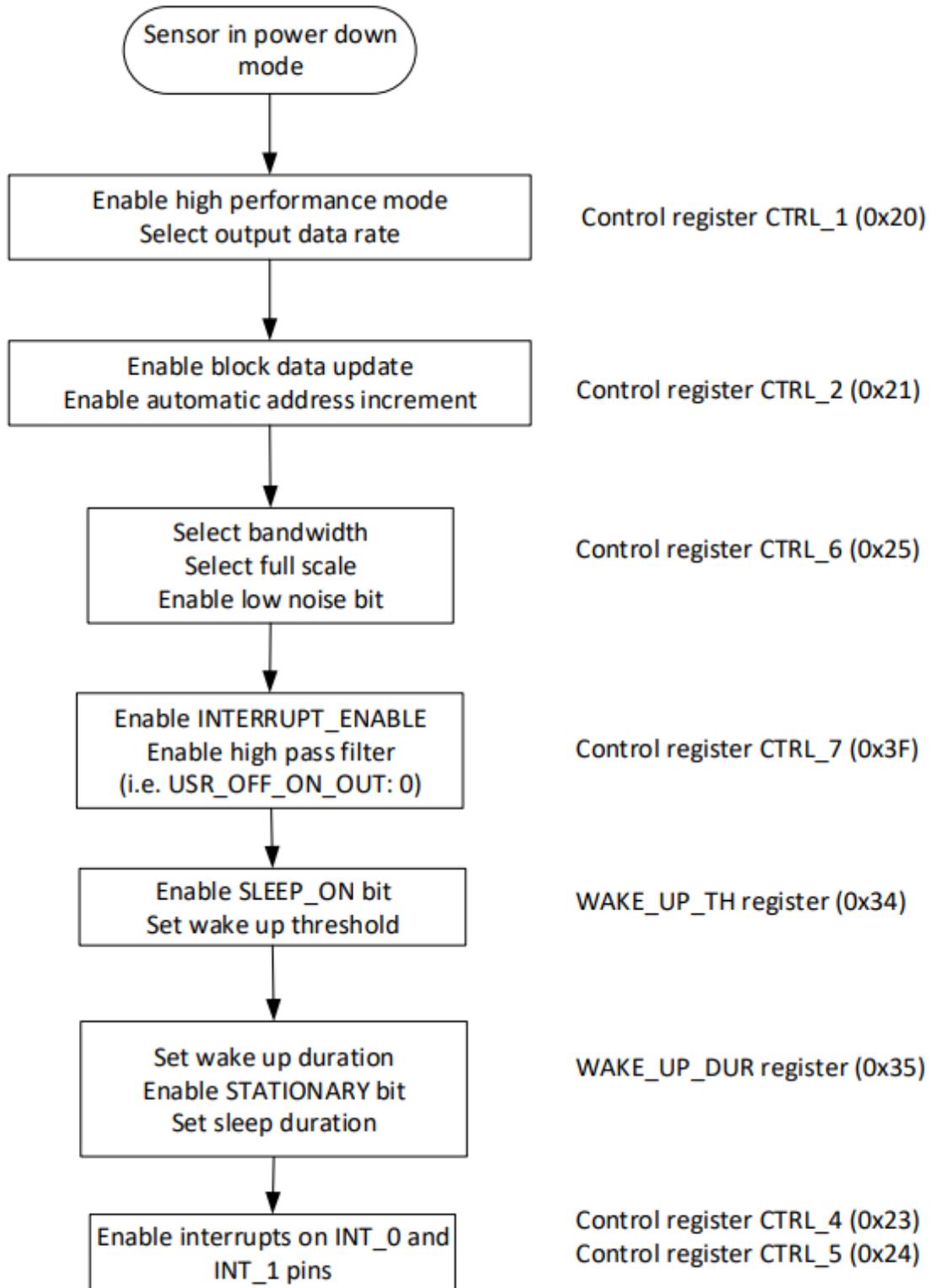


图 13: 静止事件检测

7 使用传感器特征解释跌倒情境

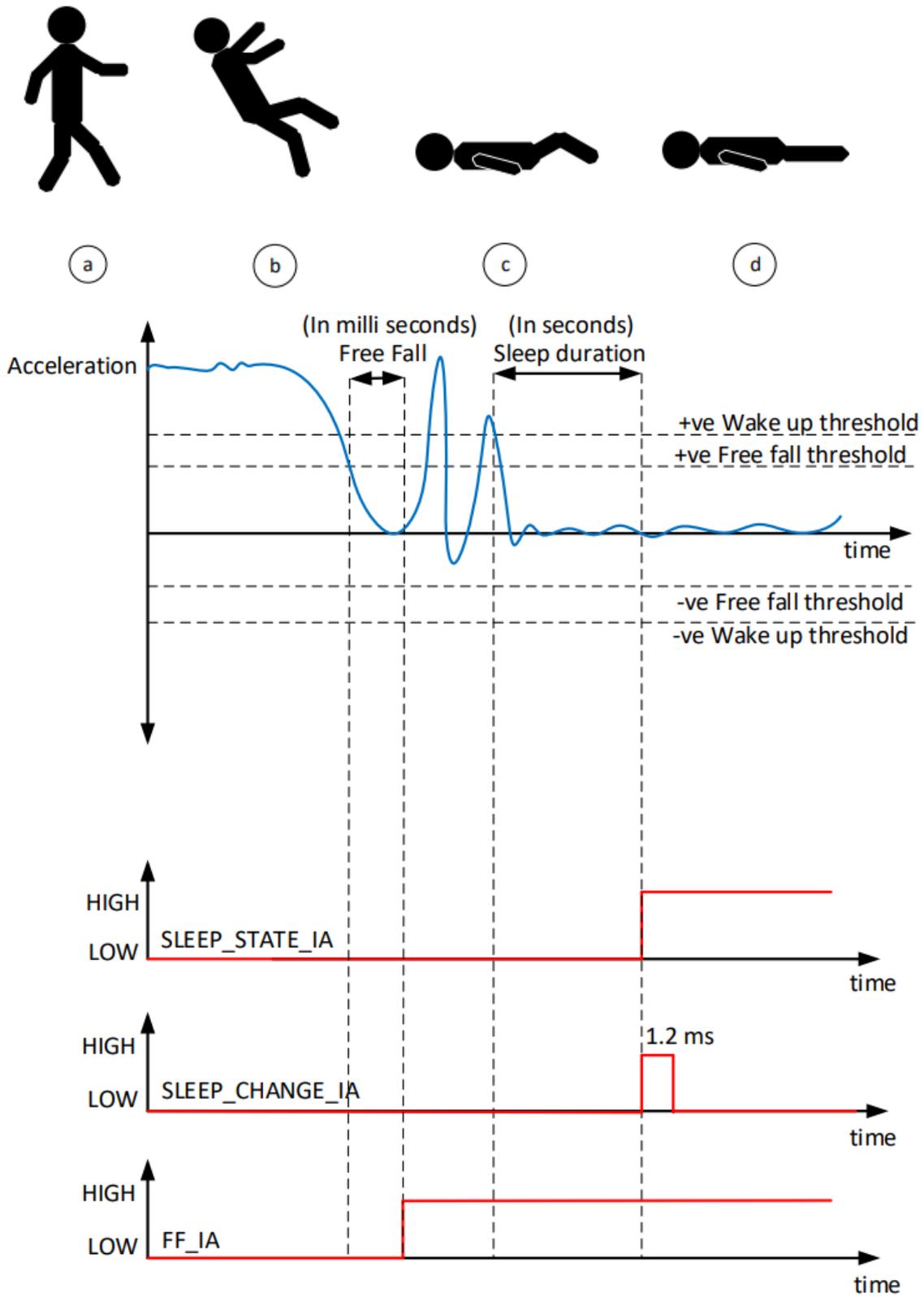


图 14: 使用高通滤波器数据进行静止事件检测，例如 X 轴

本章提供了使用自由落体、唤醒和睡眠中断信号来解释人体跌倒的必要信息，如图 14 所示。在这种情况下，一个人跌倒后由于跌倒的影响无法移动也被考虑在内。

1. 在跌倒之前，来自三个轴的加速度值的矢量总和接近 1 g。通过同时监测跌倒前后加速度的方向，可以获得跌倒事件的更多信息。
2. 在自由落体条件下，失重总是发生在跌倒开始时。通过定义适当的自由落体持续时间和阈值，可以通过中断信号 FF\_IA 检测到跌倒。在自由落体过程中，加速度趋向于 0 g，但在自由落体之后，人会撞击到地面，出现较高的加速度峰值。
3. 跌倒后，取决于撞击的影响，如果撞击不是很严重，人会立即尝试移动。如果跌倒导致的撞击严重，人可能在跌倒后无法立即移动。此事件的持续时间可以通过静止检测功能进行配置。持续时间可以被设置为秒级。
4. 如果人在一定时间后（在静止功能中配置）因无法移动或因撞击导致丧失意识，则生成中断信号 SLEEP\_STATE\_IA 和 SLEEP\_CHANGE\_IA。通过比较跌倒前后传感器加速度的方向，跌倒检测系统会生成警报。如果人在一定时间内实现站立或移动，则生成唤醒信号 WU\_IA，而不是 SLEEP\_STATE\_IA 和 SLEEP\_CHANGE\_IA 中断信号。在这种情况下，跌倒检测系统不会生成自动警报。

-有必要验证和检查哪些传感器特性最适合开发跌倒检测系统。

## 8 结论

WSEN-ITDS 三轴加速度传感器的紧凑型封装、低功耗及特定应用功能等特性使得其非常适合于电池供电的人体跌倒检测系统。本文为开发跌倒检测系统提供了一个利用传感器内置特性以及两个独立中断引脚的全新简易方案。通过利用传感器灵活的内置特性和中断引脚，能够实现针对大范围应用的跌倒监控系统，从而解决擦窗工人、屋顶作业者、建筑工人及老年人等跌倒检测问题。

更多信息：[https://www.we-online.de/katalog/media/o175411v410%20ANM002\\_Human%20fall%20detection%20with%203-axis%20MEMS%20acceleration%20sensor.pdf](https://www.we-online.de/katalog/media/o175411v410%20ANM002_Human%20fall%20detection%20with%203-axis%20MEMS%20acceleration%20sensor.pdf)

作者：伍尔特电子传感器元器件产品经理 Vinod Kumar Ramu, [www.we-online.com](http://www.we-online.com)

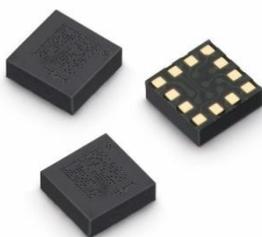


图 15: 传感器模块 WSEN-ITDS (图片来源: 伍尔特电子)