

---

## 引言

本文档介绍了ST25R3916器件的唤醒模式，该模式包含不同的低功耗模式，可用于检卡。

可使用三种唤醒源：

- 电容感应
- 幅度测量
- 相位测量。

每个源均可单独配置，可以向MCU产生中断。

# 目录

1	术语和缩略语	5
2	唤醒模式	6
2.1	低功耗唤醒发生器	6
2.2	自动平均	7
2.3	电容感应	7
2.3.1	测量原理	7
2.3.2	CCOUP布局优化	8
2.3.3	材料影响	9
2.3.4	电极形状	9
2.3.5	唤醒系统的设置	9
2.3.6	数字电容感应装置	9
2.4	幅度感应	10
2.5	相位感应	10
3	唤醒配置	12
3.1	通用配置	12
3.2	测量特定配置	13
4	唤醒流程	14
4.1	电容传感器校准	14
4.2	进入唤醒模式	15
4.3	退出唤醒模式	17
5	唤醒模式功耗计算	18
6	带AAT功能的唤醒模式	23
7	结论	26
8	版本历史	27

## 表格目录

表1.	术语和缩略语	5
表2.	唤醒模式的相关寄存器	12
表3.	文档版本历史	27
表4.	中文文档版本历史	27

## 图片目录

图1.	唤醒测量周期	6
图2.	电容唤醒框图	7
图3.	电容唤醒寄生效应	8
图4.	电容唤醒原理	9
图5.	电感幅度框图	10
图6.	电感相位框图	11
图7.	开启xm_aam时的自动平均	13
图8.	禁用xm_aam时的自动平均	13
图9.	电容传感器校准	14
图10.	启用唤醒模式	15
图11.	禁用唤醒模式	17
图12.	幅度测量	18
图13.	相位测量	19
图14.	相位和幅度测量	19
图15.	电容测量	20
图16.	平均电流消耗	22
图17.	软件标签检测	24
图18.	电流消耗	25

## 1 术语和缩略语

表1. 术语和缩略语

缩略语	说明
AAT	自动天线调谐
ADC	模数转换器
CSO	电容感应输出
CSI	电容感应输入
DAC	数模转换器
EMC	电磁兼容性能
HW	硬件
IRQ	中断请求
MCU	微控制器
PCB	印刷电路板
RC	电阻电容
RF	射频
SW	软件

## 2 唤醒模式

ST25R3916唤醒模式用于低功耗检卡。它有三种可能性：

- 电容传感器
- 相位测量
- 幅度测量

通常，卡检测由轮询循环完成，轮询循环要求设备定期启动场，等待一段时间，即度过卡的保护时间（通常为5至20毫秒），然后发送轮询请求。

由于就功耗和检测时间而言，此过程效率低下，因此ST25R系列提供低功耗唤醒模式。

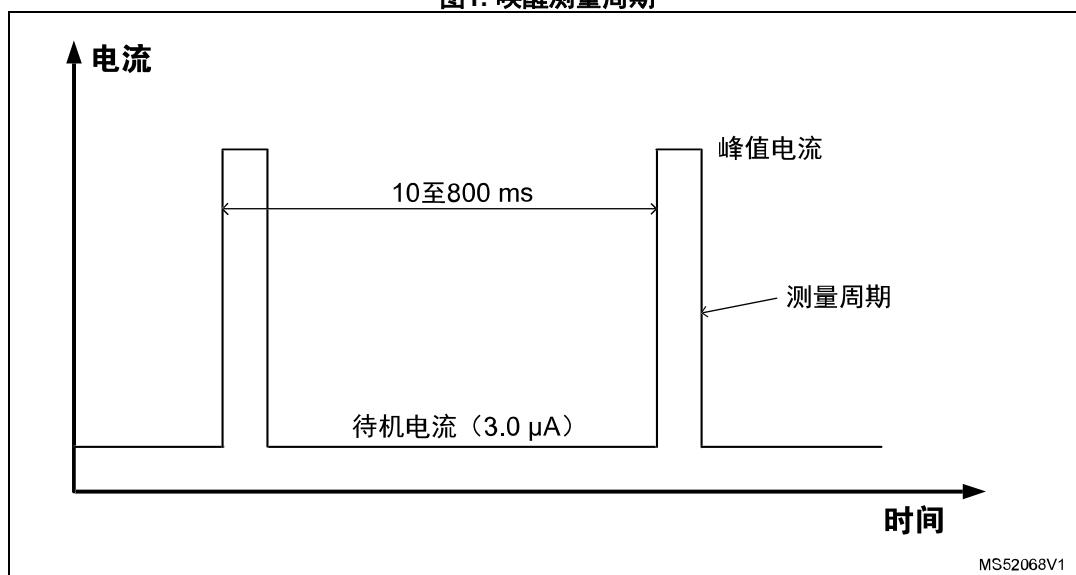
一旦进入此模式，ST25R3916就可以在内部低功耗RC振荡器上工作，同时进行测量。在设备内部，比较周期性测量值与用户预设值，如果测量值超出限制，将触发中断。这允许MCU在ST25R3916自主检测到接近的标签时休眠。然后，可以通过中断引脚唤醒MCU，开始正常轮询。

### 2.1 低功耗唤醒发生器

低功耗唤醒发生器始终处于活动状态，器件在唤醒模式下通常消耗 $3.0\mu\text{A}$ 。

可以在10到800毫秒之间，按照16步进对唤醒发生器进行编程，以触发测量并将其与预设限制进行比较。

图1. 唤醒测量周期



## 2.2 自动平均

自动平均方法使用加权移动平均值，动态调整慢变环境条件（例如温度、电压）的参考值。权重越高，参考值需要进行调整的时间越长，因为需要更多的测量。权重值为4、8、16和32。

每次测量新的ADC值时，新值和存储值的加权差值将被加到存储值中。

$$\text{新平均值} = \text{旧平均值} + (\text{测量值} - \text{旧平均值}) / \text{权重}$$

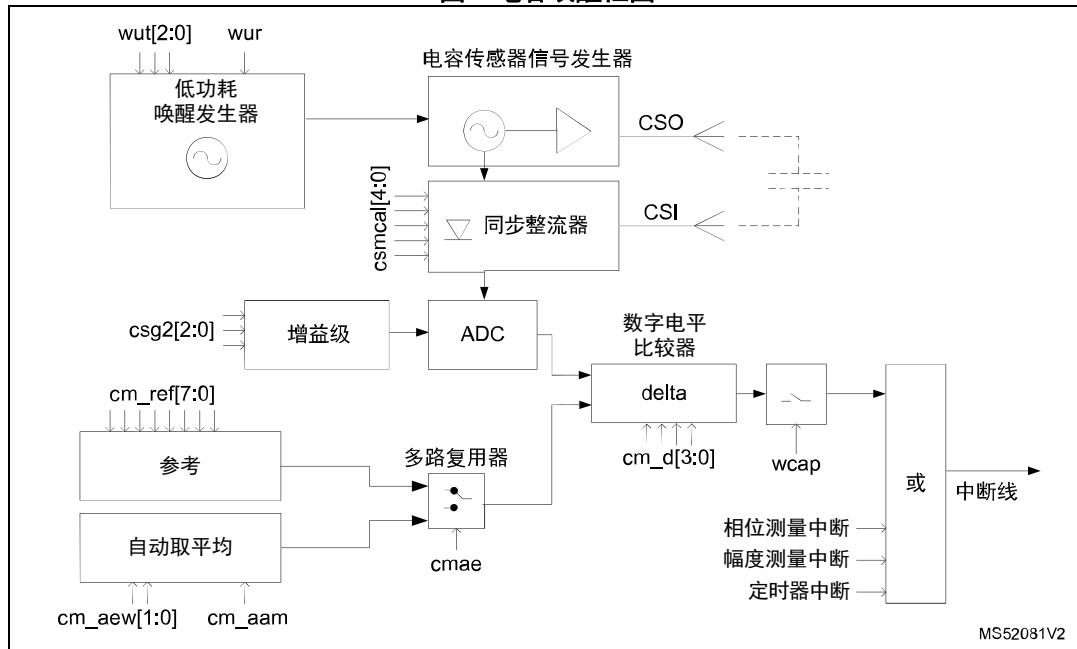
启用自动平均后，参考值会自动演变成以适应新的环境条件。该参考值存储在内部，即使退出唤醒模式后重新启动，它也会持续存在。直接命令Set default将重置存储的参考值。

## 2.3 电容感应

图2 显示了电容唤醒系统，它由两个电极、一个500 kHz信号发生器和一个带校准单元和设备ADC的同步整流器组成。

如何使用不同的程序实现电容唤醒，将在下一节中进行说明。

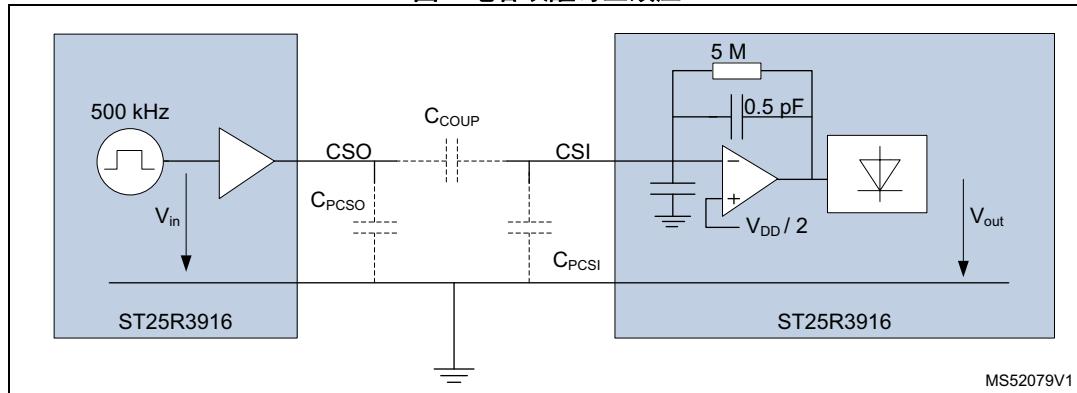
图2. 电容唤醒框图



### 2.3.1 测量原理

该系统包括两个电极，CSO和CSI。每个引脚连接到由PCB的实心区域制成的电极。在CSO输出上，短暂（300μs）施加500 kHz矩形载波电压，并通过寄生电容C<sub>COUP</sub>耦合到CSI输入的电极上。

图3. 电容唤醒寄生效应



每个电极拥有一个接地的寄生电容。假设驱动器强大且CSO和接地之间的寄生电容较低，CSO引脚上的电压不会受到C<sub>PCSO</sub>的明显影响。

CSI输入端装载了一个电压放大器。该放大器使用内部反馈电容，将CSI输入电压保持恒定。由于CSI上的电压是恒定的，因此寄生电容C<sub>PCSI</sub>不会产生影响。

当物体接近电极的电场时，可能会发生两种情况：

- 如果物体具有导电性且没有接地，则电容C<sub>COUP</sub>将随着物体受到发射极的影响而增加，接收极将接收更高的电场。
- 如果物体具有导电性且已经接地（或具有高接地电容），它将作为发射极和接收极之间的屏蔽，从而减小电容C<sub>COUP</sub>，接收电极将接收较低的电场。

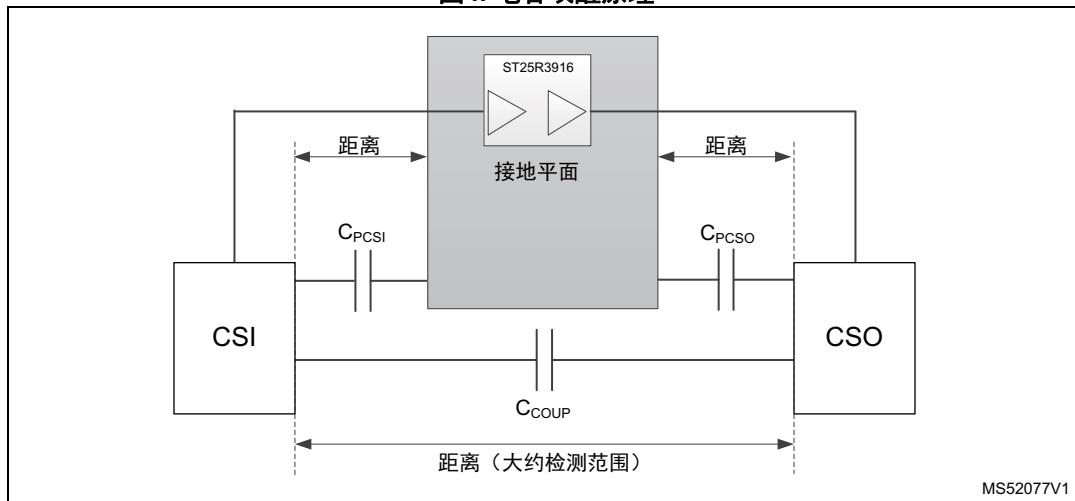
在两种情况下，器件都会检测到从CSO到CSI的电容C<sub>COUP</sub>的容值变化。

### 2.3.2 C<sub>COUP</sub>布局优化

可以通过将电容板远离GND参考平面以尽可能减小接地寄生电容。

为了提高测量范围或测量精度，ST25R3916可以执行电容传感器的偏移校准。可以手动选择电容测量偏移值（最高可达3.1 pF），或选择ST25R3916内置校准。为了保证自校准的余量，建议使用不超过2.7 pF的耦合电容。

图4. 电容唤醒原理



### 2.3.3 材料影响

正常应用案例是人手持卡。手中含有的水分会改变场的传播。测量结果显示，当人手接近读卡器时电容值会减小。

### 2.3.4 电极形状

电极可以是实心平面，网状平面或者是条状的。

实心平面提供最佳的面积/电容比，但是不要太靠近RFID天线，因为在唤醒电极中产生的涡流会抑制场。

RF天线和电极之间的距离须至少为5 mm。

### 2.3.5 唤醒系统的设置

电容测量的最小分辨率为1.2 fF。为了配置唤醒电容，ST25R3916提供了一个校准系统，可以抑制引脚焊盘引起的初始电容，同时还具有可配置的阈值电平，在该阈值电平下，电容的变化会报告给微控制器。[第4.1节](#)中介绍了校准过程。

### 2.3.6 数字电容感应装置

电容传感器系统由频率发生器组成，后者将信号传递到电极（CSO引脚）上。在由输入电极（CSI引脚）的耦合电容接收信号。

为了最小化系统噪声，使用内嵌的同步整流器生成直流信号。校准位cs\_mcal调节直流电压从而抑制寄生电容效应。然后，在可编程增益级放大上述直流信号（cs\_g位用于配置增益），并将其馈送至ADC。随后，ADC将直流值转换为数字域，并为电平比较器提供数值。

电平比较器有两个输入，一个来自ADC，另一个是参考电平。

有两种选项用于设置参考值：

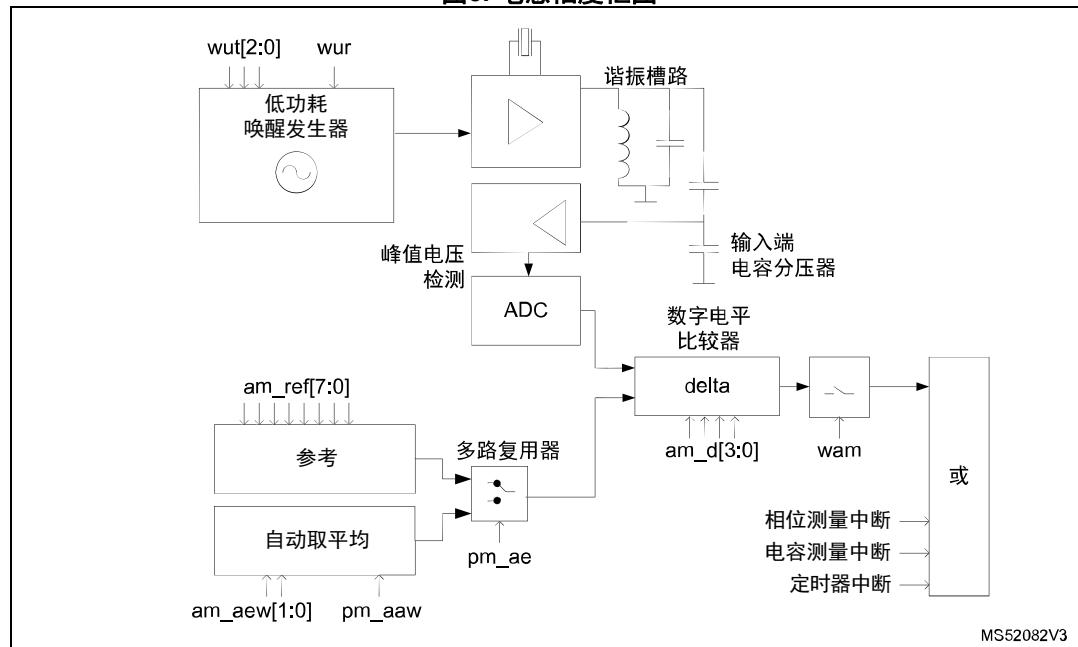
- 寄存器内的固定值
- 数字平均电路生成的浮动平均值。

## 2.4 幅度感应

电感唤醒通过标签靠近引起的天线失谐来唤醒设备。由于该方法需要运行晶体振荡器和射频场，因此与电容唤醒相比，平均电流消耗更高。为了减小传输过程中的电流，可以使用RFO正常电平定义寄存器，将驱动器输出电阻更改为更高的值。

测量和中断触发过程类似于电容唤醒，不同之处在于ADC值的生成。

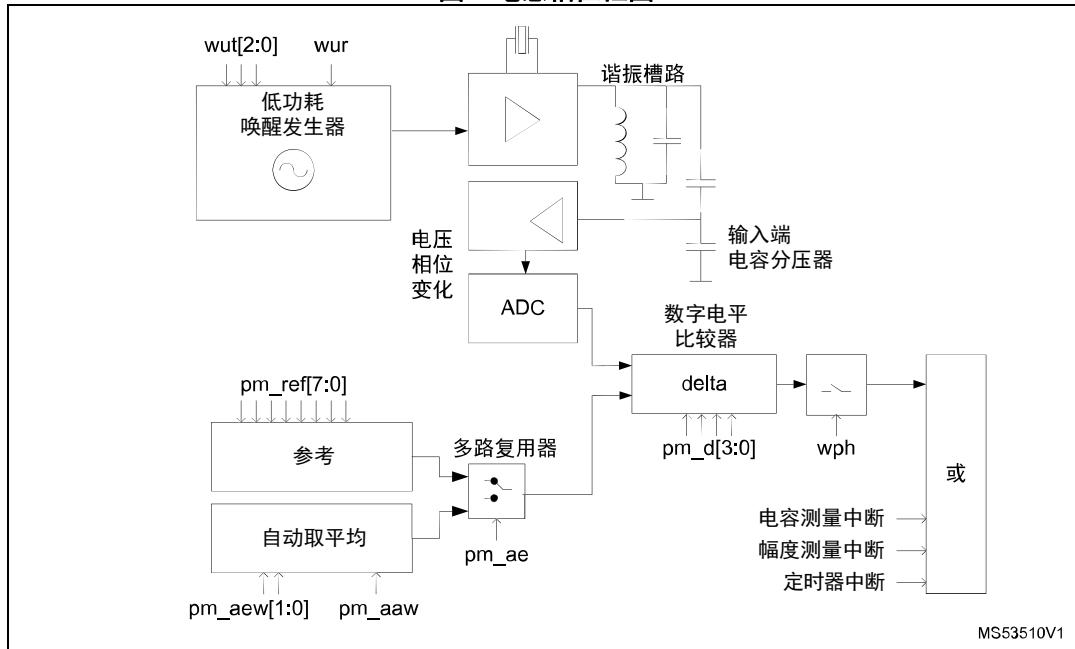
图5. 电感幅度框图



## 2.5 相位感应

具有相位变化的感应唤醒类似于具有幅度变化的电感唤醒，但是测量值来自相位测量。

图6. 电感相位框图



### 3 唤醒配置

可以通过配置唤醒模式来选择电容或电感测量。如果需要唤醒，幅度测量可以与相位测量结合使用，但电容测量不可与其他任何测量一起进行。

表2. 唤醒模式的相关寄存器

地址 (HEX)	名称	说明
02	操作控制	使能唤醒模式
32	唤醒定时器控制	唤醒配置
33	幅度测量配置	
34	幅度测量参考	幅度测量配置和显示
35	幅度测量自动取平均显示	
36	幅度测量显示	
37	相位测量配置	
38	相位测量参考	相位测量配置和显示
39	相位测量自动取平均显示	
3A	相位测量显示	
3B	电容测量配置	
3C	电容测量参考	电容测量配置和显示
3D	电容测量自动取平均显示	
3E	电容测量显示	

为了设置唤醒模式，需要同时用到通用配置和测量特定配置。

#### 3.1 通用配置

寄存器32h包含唤醒模式的通用配置，包括以下位：

- **wur**和**wut**配置唤醒模式执行指定测量时的间隔
- **wto**定义主机控制器是否会在每次超时时获得中断（无论是否检测到卡）
- **wam**、**wph**和**wcap**定义定期测量的类型。

## 3.2 测量特定配置

每种类型的测量均分别具有一组寄存器，用于配置各自的测量参数。三种测量的可用配置相同。

为简单起见，用于各个测量的类似位将进行统一解释。

因此，使用字母x，分别代替a、p或c，表示幅度、相位和电容。

测量配置寄存器（33h、37h和3Bh）使用以下位配置各个测量细节

- xm\_d设置参考值与测量值的差值，在达到这个差值时将触发唤醒中断。
- xm\_aam允许在使用自动取平均功能时包括或排除导致IRQ的测量。当包括时，自动平均参考值在发出IRQ信号后演变位新的环境条件。当排除时，自动平均参考值保持原来的值，继续发出IRQ信号。
- Xm\_aem\_ae启用或禁用自动平均功能。

[图 7](#)和[图 8](#)显示xm\_aam位如何影响参考值（蓝线）变化，以及它如何影响触发的唤醒中断（红点）。

图7. 开启xm\_aam时的自动平均

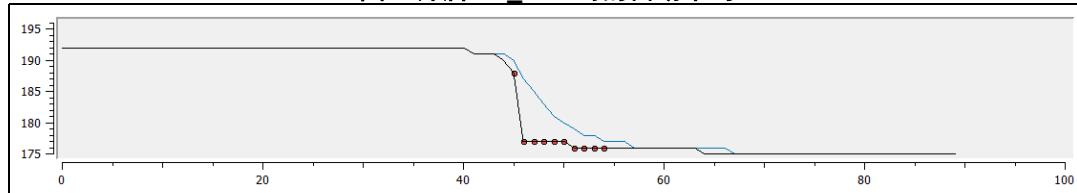
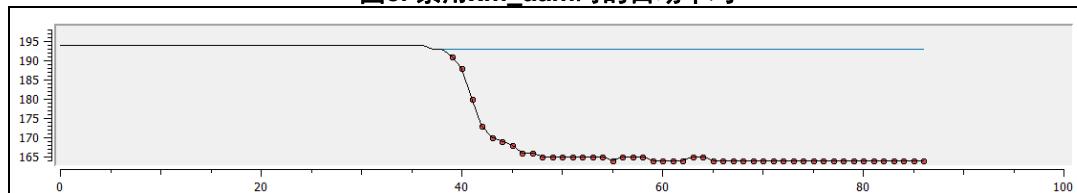


图8. 禁用xm\_aam时的自动平均



测量参考寄存器（34h、38h和3Ch）定义每个单独测量的参考值。定期对比这些参考值与测量值，如果差值大于或等于xm\_d，则触发唤醒中断。

测量自动取平均显示寄存器（35h、39h和3Dh）显示启用自动取平均功能时的当前参考值。

测量显示寄存器（36h、3Ah和3Eh）显示最后一次测量的结果。

## 4 唤醒流程

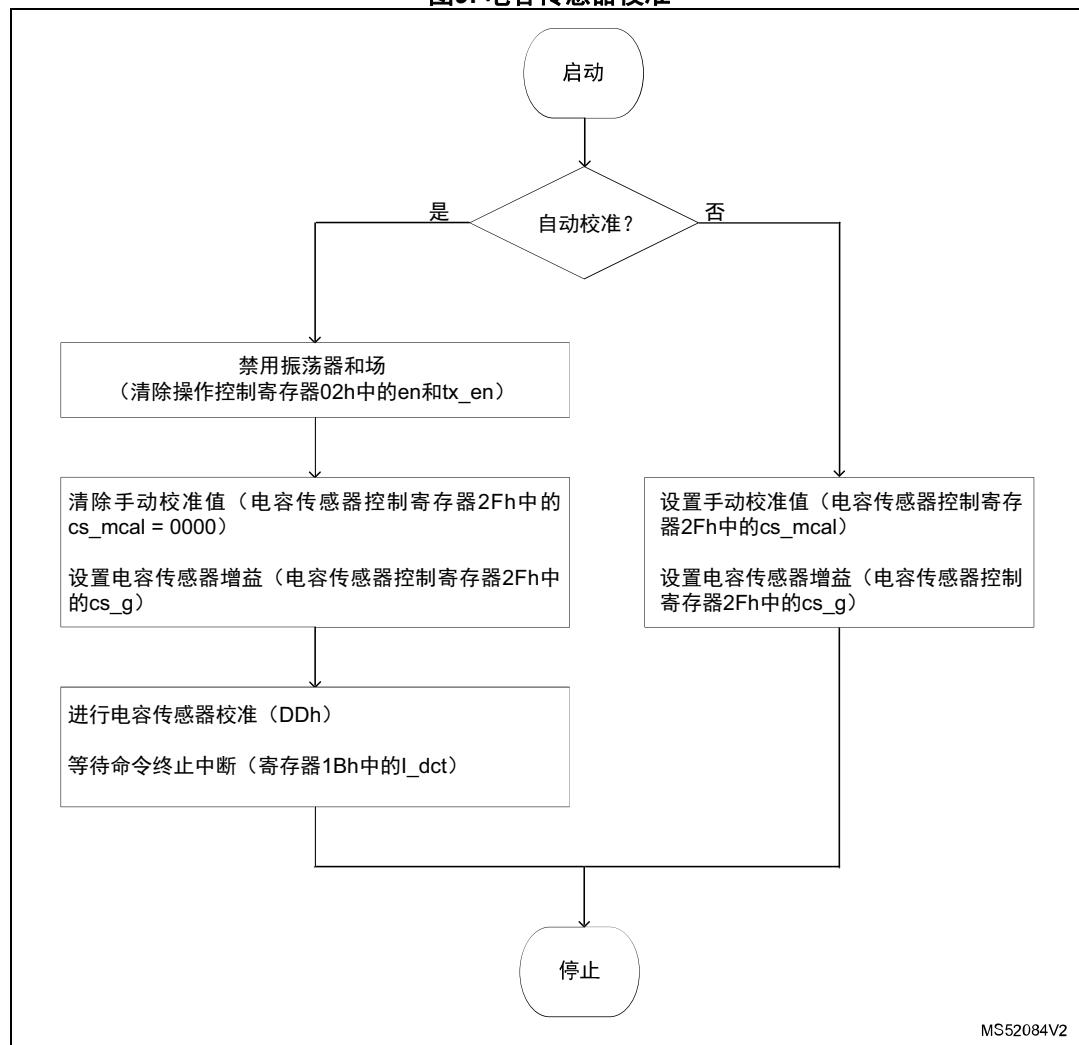
进入和退出唤醒模式必须按特定顺序操作。

每次唤醒测量的过程是类似的，如果使用电容测量（需要预先校准），则需要执行额外一个步骤。

### 4.1 电容传感器校准

有两种方法可以校准电容传感器，即手动校准或自动校准，在图 9 中有详细介绍。

图9. 电容传感器校准

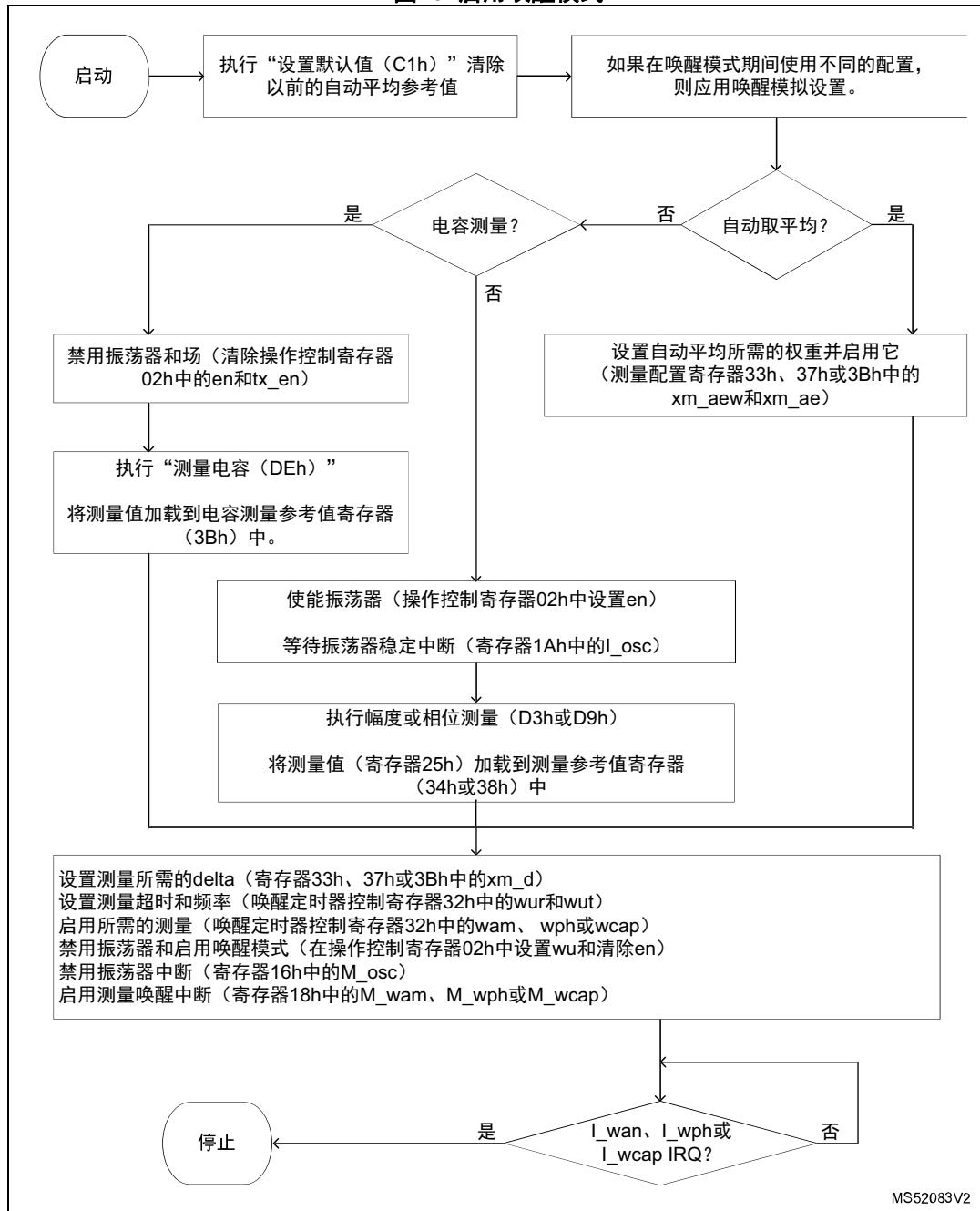


MS52084V2

## 4.2 进入唤醒模式

图 10 说明了正确配置和启用唤醒模式的顺序。

图10. 启用唤醒模式



最初，执行Set default指令，重置自动取平均参考值。只有在使用自动取平均功能时才需要Set default指令，但无论如何，建议运行该指令，因为它可以确保处于确定的状态。

在ST25R3916上设置默认值后，须使用已知的正确唤醒模拟设置。

部分系统需要为唤醒和正常模式设置不同的模拟设置，以优化功耗，最大化范围。

如果必须使用自动平均功能，则每次测量时必须配置并启用该功能。

在没有自动平均的情况下，须通过执行相应的测量指令来获得参考测量值。然后，需要将测量值设置为每种测量类型的参考值。

执行电容或电感（相位和幅度）测量之间存在差异。

- 对于电容测量，须校准传感器（如前所述），且ST25R3916须处于掉电模式（禁用场和振荡器），以避免干扰。
- 对于电感测量，须启用振荡器并保持稳定，以便执行参考测量。

完成参考测量后，须将值加载到相应的测量参考寄存器中。

此时，务必确保测量值处于预期的有效范围内。

意外/无效值表示测量出现了问题，通常是天线配置错误或在振荡器不稳定的情况下触发测量。

接近边缘的值可能导致永远不会唤醒系统的配置，如果触发中断的差值为delta，则该参考值必须始终满足以下条件：

- 参考值 - delta > 0
- 参考值 + delta < 255。

然后，可以通过定义测量间隔、执行哪些测量来配置唤醒，将ST25R3916置于唤醒模式。

注：

众所周知，长时间启用场可能会导致匹配元件（例如绕线EMC电感）的温度上升。

在进入唤醒模式时，进行参考测量。根据观察结果，在部分系统中，匹配元件的温度升高导致偏离参考值。这种情况会导致，一旦元件冷却，

ST25R3916立即触发唤醒IRQ。

参考测量必须在类似唤醒模式运行条件的条件下进行。因此，在某些系统设计中，建议在执行唤醒模式启用程序之前，确保关闭场一段时间，从而允许元件恢复到环境温度。

### 4.3 退出唤醒模式

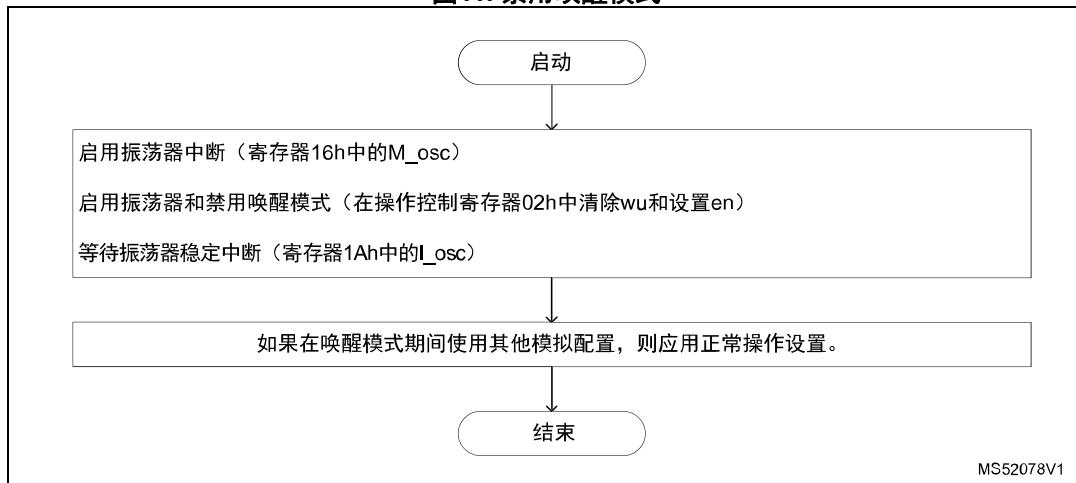
一旦启用唤醒模式，主机MCU便可进入低功耗模式，最大限度地降低功耗。

一旦ST25R3916检测到测量值的变化大于定义的差值，它将触发IRQ。

接下来，主机MCU应做出反应，即禁用ST25R3916的唤醒模式并执行轮询周期。

[图 11](#) 显示了退出唤醒模式的顺序。

图11. 禁用唤醒模式



为了返回正常模式，须禁用唤醒模式并启用振荡器。

如果在唤醒模式期间使用不同的模拟设置，则须应用正常操作设置。

## 5 唤醒模式功耗计算

在唤醒模式下, ST25R3916执行已启用的测量(感应和/或电容), 更频繁的测量会导致更高的功耗。

与电容测量不同, 感应测量的功耗取决于目标匹配阻抗。

每次测量都有不同的持续时间, 因此功耗也不同。每种测量类型的持续时间如下图所示, 其中黄色表示RF磁场, 绿色表示 $V_{SP\_RF}$ 。

图12. 幅度测量

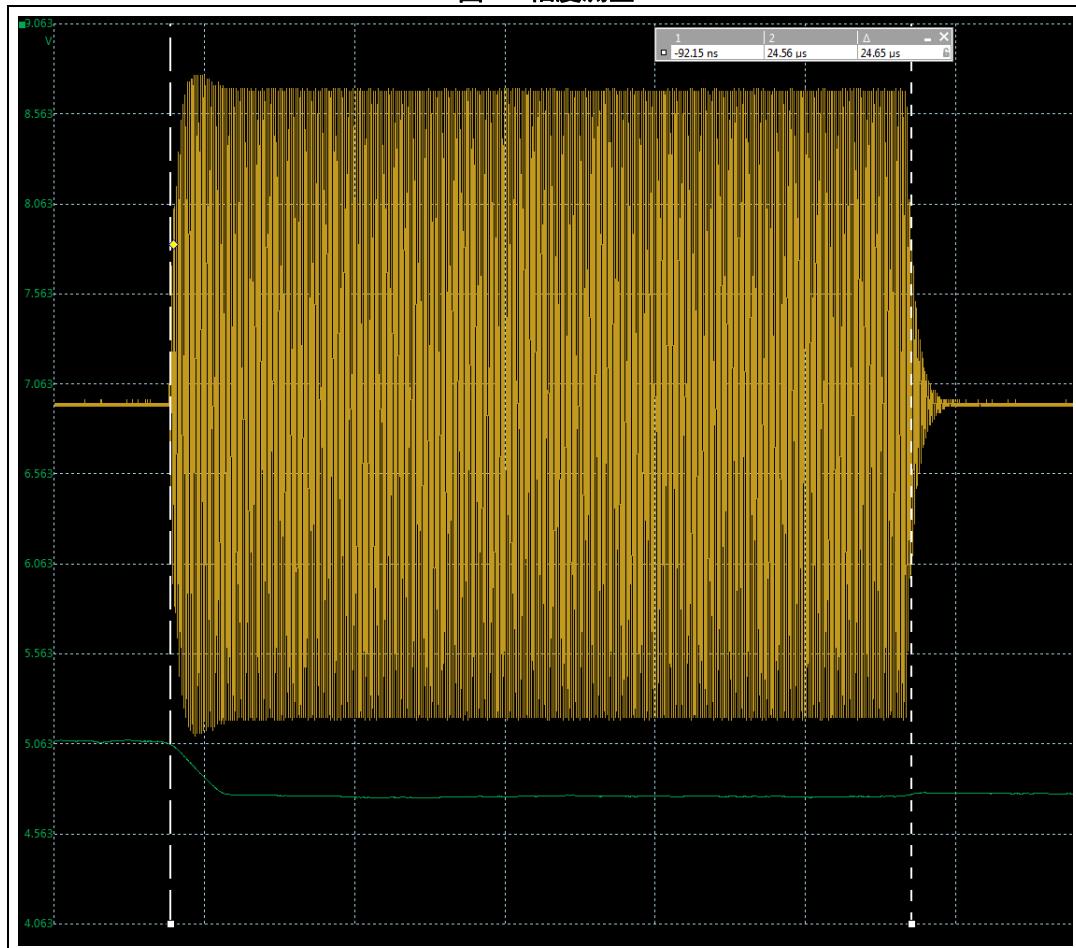


图13. 相位测量

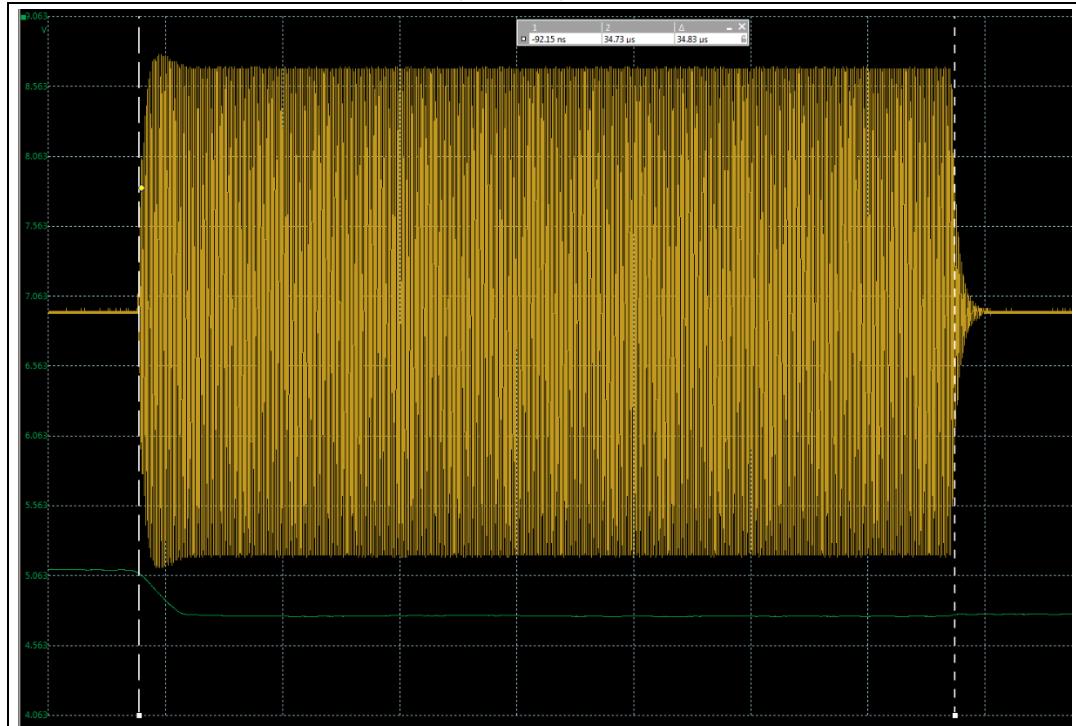
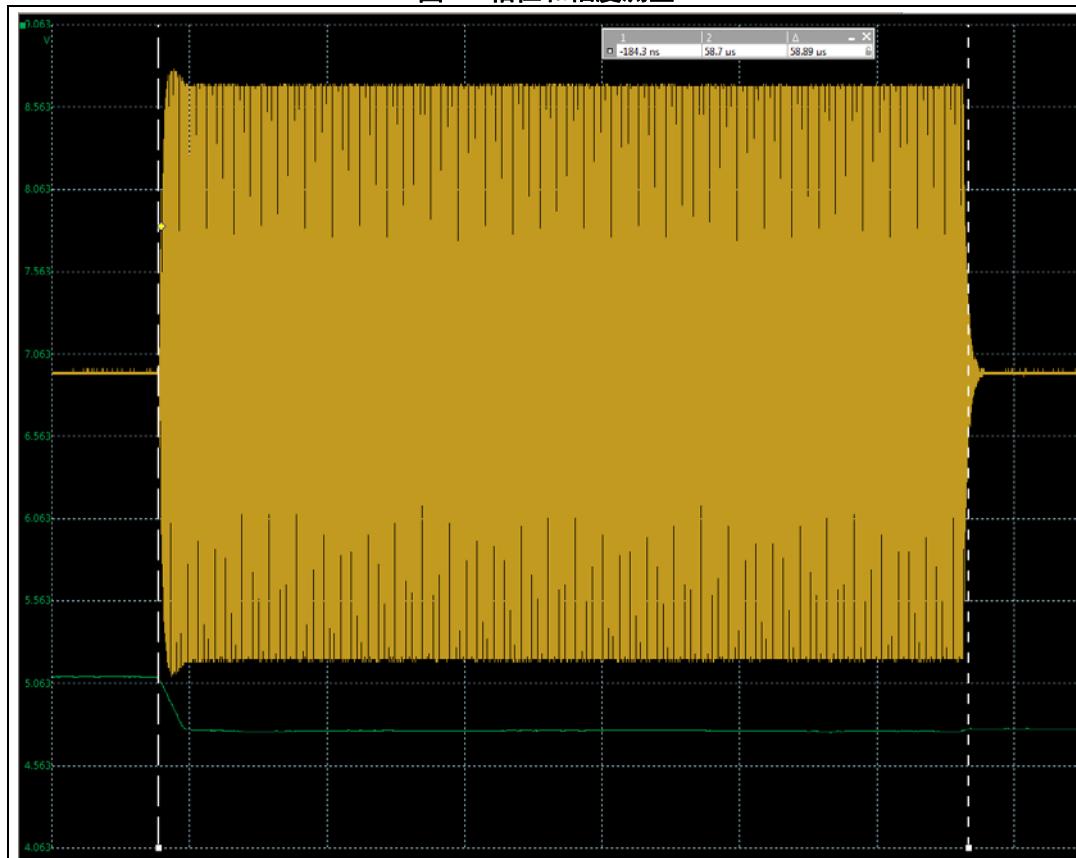


图14. 相位和幅度测量



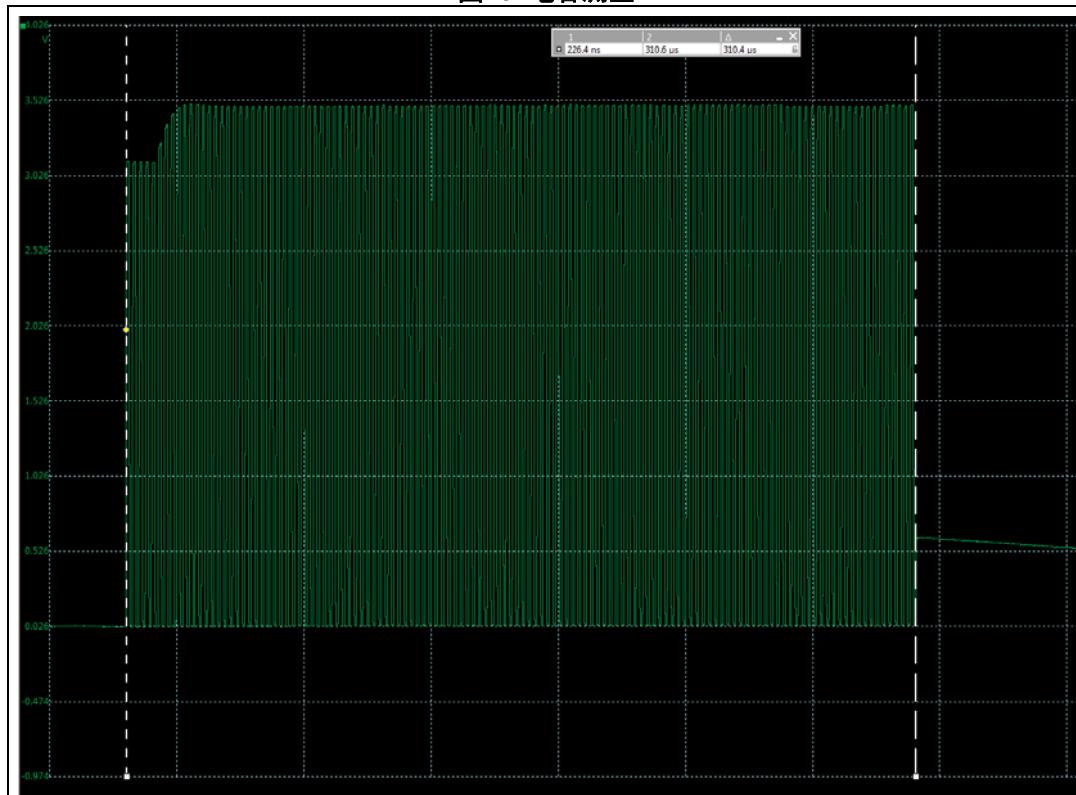
如图 12 和图 13 所示，幅度测量 ( $T_{AWU}$ ) 和相位测量 ( $T_{PWU}$ ) 的持续时间分别为约 24  $\mu$ s 和约 35  $\mu$ s。

当两个感应测量结合时（如图 14 所示），总测量持续时间约为 59  $\mu$ s。

另外，可以观察到  $V_{SP\_RF}$  压降。电压从  $V_{DD}$  下降并稳定在定义的  $V_{SP\_RF}$  电压。这是预期的行为，表明在达到估计的  $V_{SP\_RF}$  值之后，电压保持恒定。 $V_{SP\_RF}$  中的振荡或压降表示电源电压出现问题，说明了在唤醒模式下测量不稳定的原因。

图 15 显示 CSO 信号为绿色（RF 磁场通道未显示）：电容测量的时长 ( $T_{CWU}$ ) 约为 310  $\mu$ s。

图15. 电容测量



以下计算显示如何估计唤醒模式下的平均功耗。

每次测量的持续时间为

- $T_{AWU} = 25 \mu\text{s}$
- $T_{PWU} = 35 \mu\text{s}$
- $T_{CWU} = 310 \mu\text{s}$

唤醒模式下供电电流的典型消耗值（可参见ST25R3916数据手册）如下

- $I_{CS} = 1.1 \text{ mA}$
- $I_{WU} = 3.0 \mu\text{A}$
- $I_{RD} = 4.5 \text{ mA}$

感应测量期间的电流 ( $I_{IP} = I_{IA}$ ) 取决于匹配阻抗，因此随系统的不同而变化，通常位于 150 和 200 mA 之间。

每个测量阶段之间的超时/间隔 ( $T_{out}$ ) 是可配置的。

为了计算电流消耗估算值  $I_{AVG}$ ，需要计算每个单独测量 ( $I_{C,AVG}$ 、 $I_{IP,AVG}$  和  $I_{IA,AVG}$ ) 的电流消耗，使用以下公式：

- $I_{C,AVG} = (I_{CS} - I_{WU}) (T_{CWU} / T_{OUT})$
- $I_{IP,AVG} = (I_{IP} - I_{WU}) (T_{PWU} / T_{OUT})$
- $I_{IA,AVG} = (I_{IA} - I_{WU}) (T_{AWU} / T_{OUT})$

当使用电感测量（幅度和/或相位）时，在使能振荡器时还需要考虑一个额外因素。

$$I_{OSC,AVG} = (I_{RD} - I_{WU}) (T_{OSC} / T_{OUT})$$

接下来，电流消耗总估算值  $I_{AVG}$  如下：

$$I_{AVG} = I_{C,AVG} + I_{IP,AVG} + I_{IA,AVG} + I_{OSC,AVG} + I_{WU}$$

例如，假设特定系统的  $I_{IP,AVG} = 200 \text{ mA}$ ， $T_{OSC} = 0.7 \text{ ms}$ ，且  $T_{OUT} = 200 \text{ ms}$ ，该系统在唤醒模式期间使用电感幅度测量，则电流消耗值可估计为：

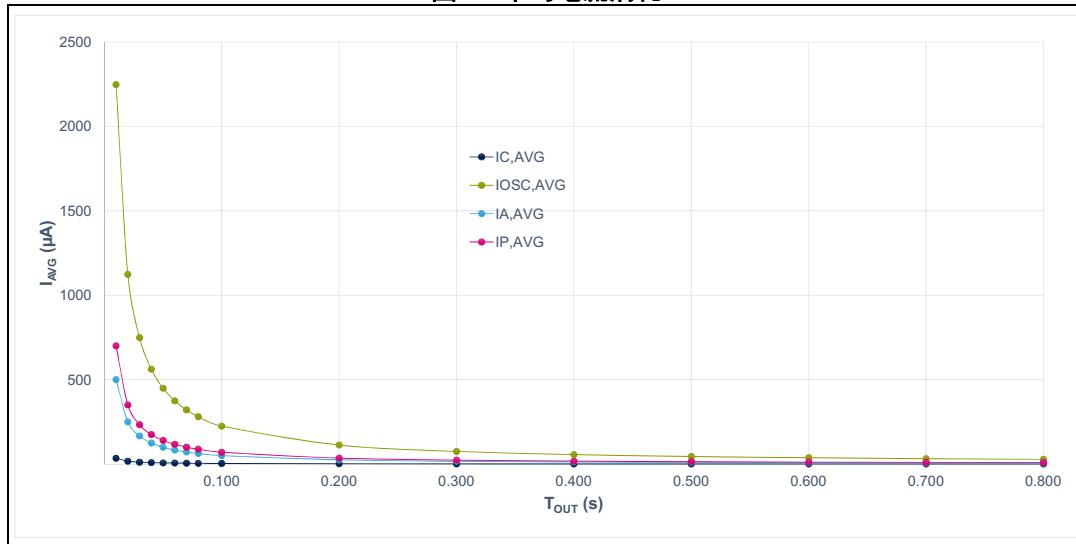
- $I_{C,AVG} = 0$
- $I_{IP,AVG} = 0$
- $I_{IA,AVG} = (200 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-6}) \times (25 \times 10^{-6} / 200 \times 10^{-3}) = 25.00 \mu\text{A}$
- $I_{OSC,AVG} = (4.5 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-6}) \times (0.7 \times 10^{-3} / 200 \times 10^{-3}) = 15.74 \mu\text{A}$ .

该系统（在唤醒模式期间使用电容和幅度电感幅度测量）的总电流消耗值可估计为：

$$I_{AVG} = I_{C,AVG} + I_{IP,AVG} + I_{IA,AVG} + I_{WU} = 0 + 0 + 25 + 15.74 + 3.0 = 43.74 \mu\text{A}$$

在 [图 16](#) 可以看到每个平均电流消耗与不同的超时/周期配置之间的关系 ( $I_{IP} = I_{IA} = 200 \text{ mA}$ )。

图16. 平均电流消耗



## 6 带AAT功能的唤醒模式

ST25R3916支持通过固定匹配进行设计、或者通过AAT技术使用可变调谐，详细信息请参见[www.st.com](http://www.st.com)上的“ST25R3916自动天线调谐（AAT）（AN5322）”。

ST25R3916 AAT是通过两个DAC输出驱动电压控制电容器（变容二极管）实现的，这使得动态更改匹配的串行和并行电容成为可能。

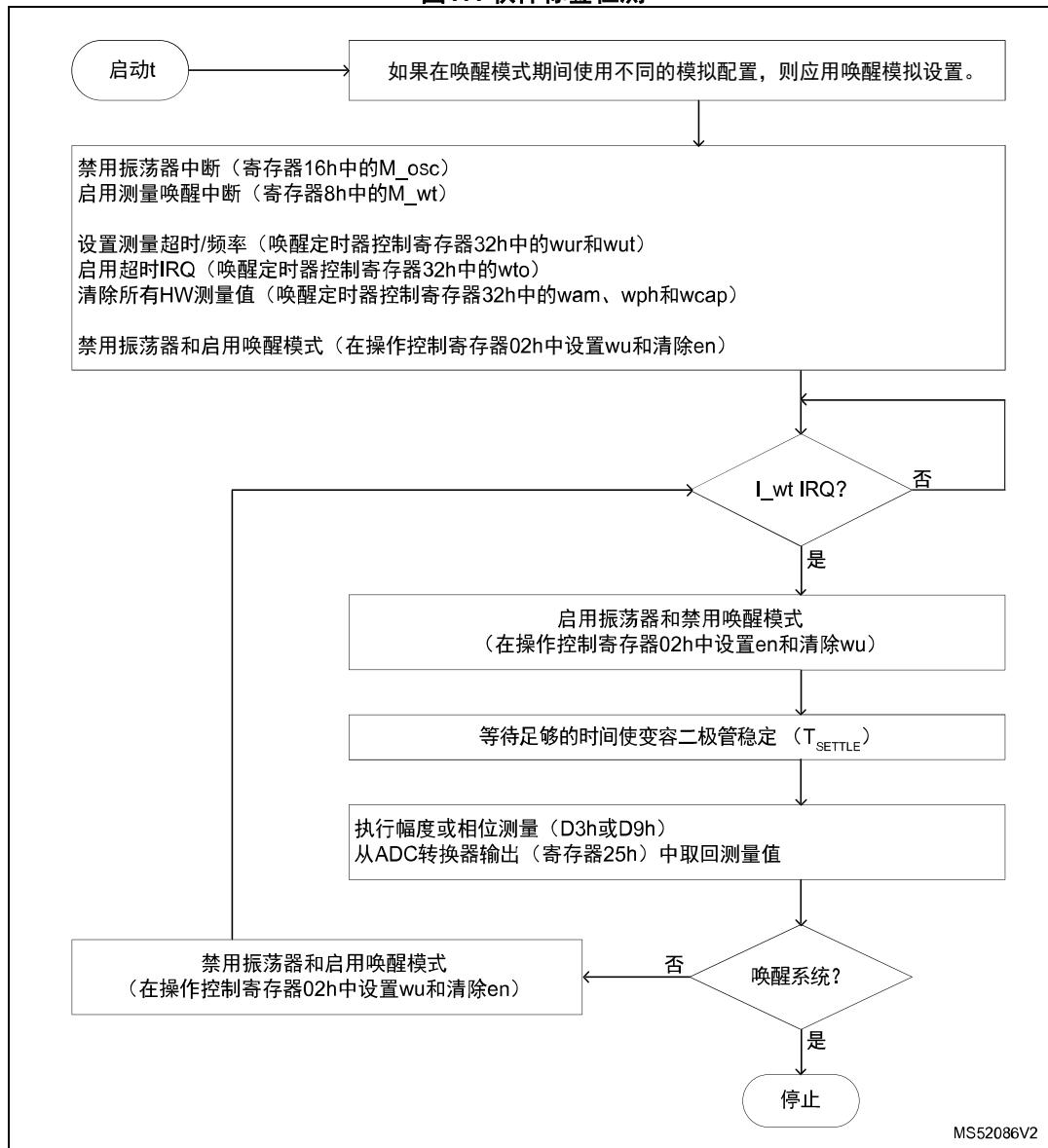
由于功耗效率，当ST25R3916处于省电模式且AAT\_A/AAT\_B引脚处于未定义/浮空状态时，这些DAC输出不会启用。

一旦出现唤醒超时，DAC输出被启用为定义的电压，一旦振荡器稳定，会进行电感测量。在正常工作和唤醒模式下，变容二极管仍然可以调整到新的控制电压，这可能导致不同的天线匹配。因此，在准备模式下获得的参考值与唤醒模式下获得的参考值不同，从而导致系统被唤醒。为了将该影响降至最低，可以使用软件标签检测（参见图 17）。

在这种情况下，ST25R3916被设为省电模式（此时的功耗最小），唤醒计时器用于唤醒/触发主机MCU以定期进行测量。

在此过程中，主机MCU也可以处于低功耗模式。当其周期性地从ST25R3916接收外部IRQ时，主机将其置于准备模式，并在适当的变容二极管稳定时间（它们在T<sub>SETTLE</sub>之后达到最终电容值，T<sub>settle</sub>是变容二极管达到其最终电容值时测量脉冲的延迟时间）之后执行所需的测量。然后，它评估与以前样本的差异，并决定系统是否必须轮询NFC设备，还是返回低功耗模式。

图17. 软件标签检测



如要终止软件标签检测，请执行[第 4.3 节：退出唤醒模式](#)中描述的步骤。

为了提高软件标签检测的可靠性，可以使用一个移动参照，类似于[第 2.2 节：自动平均](#)中描述的过程。

软件标签检测和唤醒模式间的主要区别在于主机必须定期被唤醒以执行测量，而设备至少在每个周期的 $T_{SETTLE}$ 时间内处于就绪模式，会影响整体功耗和系统响应能力。

如果进行软件标签检测， $T_{SETTLE}$ 对功耗有显著影响。根据第5节中描述的计算，并假设 $T_{OSC} < T_{SETTLE}$ ，ST25R3916的平均功耗可估算为

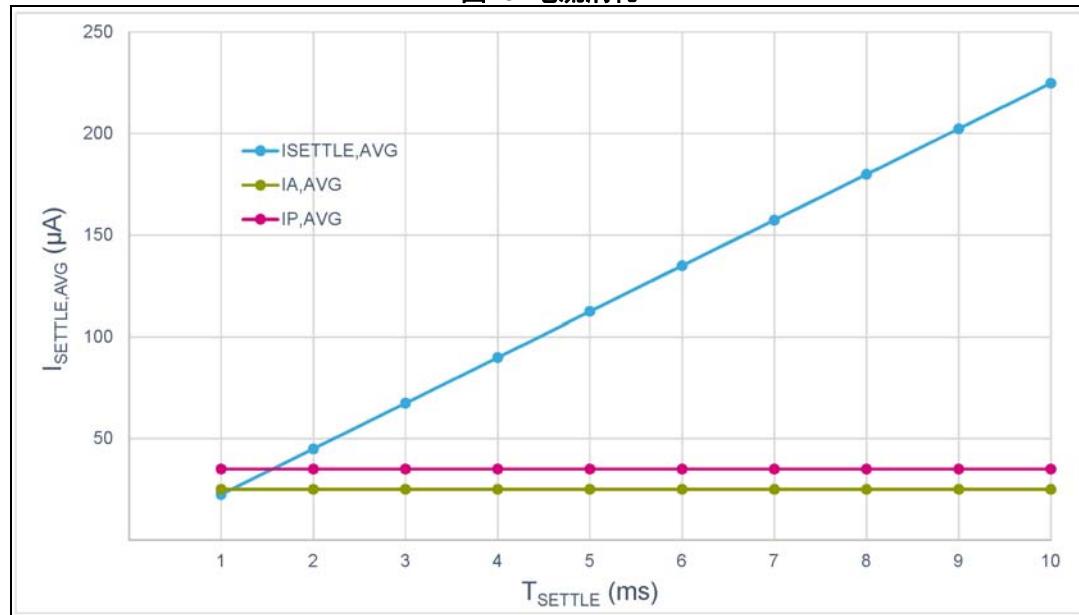
- $I_{AVG} = I_{C,AVG} + I_{IP,AVG} + I_{IA,AVG} + I_{SETTLE,AVG} + I_{WU}$
- $I_{SETTLE,AVG} = (I_{RD} - I_{WU}) T_{SETTLE} / T_{OUT}$

使用第5节中的示例 ( $I_{IP} = I_{IA} = 200 \text{ mA}$ ,  $T_{out} = 200 \text{ ms}$ )，并且让 $T_{SETTLE} = 5 \text{ ms}$ ，功耗可以计算为

- $I_{SETTLE,AVG} = (I_{RD} - I_{WU}) T_{SETTLE} / T_{OUT} = (4.5 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-6}) \times (5 \times 10^{-3} / 200 \times 10^{-3}) = 112.43 \mu\text{A}$
- $I_{AVG} = I_{C,AVG} + I_{IP,AVG} + I_{IA,AVG} + I_{SETTLE,AVG} + I_{WU} = 0 + 0 + 25 + 112.43 + 3.0 = 140.43 \mu\text{A}$

图18显示了 $I_{SETTLE,AVG}$ 如何随 $T_{SETTLE}$ 的变化而线性增加，从而影响总体功耗。

图18. 电流消耗



## 7 结论

ST25R3916器件的低功耗唤醒模式允许用户实现功耗优化的卡检测，该检测可从微控制器完全自主运行。

此功能有助于将系统整体电流消耗保持在最低水平，同时可以对接近NFC读卡器设备的卡做出反应。

幅度、相位和电容唤醒的可用资源性为客户提供了广泛的设计灵活性。

## 8 版本历史

表3. 文档版本历史

日期	版本	变更
2019年5月9日	1	初始版本。
2019年7月9日	2	更新了 <a href="#">第 2.1 节：低功耗唤醒发生器</a> 、 <a href="#">第 5 节：唤醒模式功耗计算</a> 和 <a href="#">第 6 节：带AAT功能的唤醒模式</a> 。
2020年2月6日	3	更新了 <a href="#">第 5 节：唤醒模式功耗计算</a> 和 <a href="#">第 6 节：带AAT功能的唤醒模式</a> 。 更新了 <a href="#">图 2：电容唤醒框图</a> 、 <a href="#">图 5：电感幅度框图</a> 、 <a href="#">图 6：电感相位框图</a> 、 <a href="#">图 9：电容传感器校准</a> 、 <a href="#">图 10：启用唤醒模式</a> 和 <a href="#">图 17：软件标签检测</a> 。 增加了 <a href="#">图 18：电流消耗</a> 。 对整个文档进行少量文字修订。

表4. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2020年5月22日	1	中文初始版本。

**重要通知 - 请仔细阅读**

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。若需 ST 商标的更多信息，请参考 [www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks)。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2020 STMicroelectronics - 保留所有权利