

Application Note

使用 TI 无线 MCU 设计智能旋转式水表、热量表和热量成本分配器



Milen Stefanov, Theo Phil Lange

摘要

TI 的 CC1312R、CC1312R7 和 CC1314R10 无线 MCU 集成了支持旋转检测计量的 wM-Bus 协议栈，以及 TI 专利的创新分段式 LCD 驱动能力（通过 GPIO 实现）。LCD 可根据用户请求通过电容式触摸按键开启，并在可配置的超时时间后自动关闭以节省功耗。计量与 LCD 功能均以固件形式在 16 位超低功耗传感器控制器引擎 (SCE) MCU 内核中实现，该内核配备 4KB SRAM。SCE 可独立于主 M4F 或 M33 CPU 内核，对传感器数据进行采样、存储和处理。

凭借丰富的安全特性和加密加速器，CC1312R、CC1312R7 和 CC1314R10 无线 MCU 提供了完整的硬件开发平台，使产品易于满足欧盟《网络弹性法案》(CRA) 的要求。

TI 专利的 MUX 电阻网络与优化固件代码相结合，实现了低功耗 LCD 显示功能，这对于智能旋转式水表和热量表以及热量成本分配器而言是必不可少的功能。

广受欢迎的面向机械水表的 wM-Bus 改造附加模块是另一类终端设备，同样可受益于这些 TI 无线 MCU 内置的旋转检测和 IrDA 链路支持。

通过在 SCE 中以超低功耗方式同时实现 LCD 控制和旋转计量，TI 的单芯片 Sub-1GHz 无线 MCU 器件可为全球快速增长的智能水表、热量表及热量成本分配器市场提供高性价比、紧凑尺寸的设计方案。

内容

1 简介.....2

1.1 智能仪表欧盟法规.....3

1.2 旋转计量设计.....3

2 智能流量表与分计量设备.....4

2.1 热量成本分配器（分计量）.....4

2.2 机械水表用改造附加模块.....7

2.3 智能旋转式水表.....10

2.4 热量表（冷/热计量）.....14

2.5 流量表中的蓝牙®低功耗 (BLE).....16

2.6 CRA 对智能流量表和热量成本分配器的影响.....16

3 总结.....18

4 参考资料.....19

商标

LaunchPad™ and BoosterPack™ are trademarks of Texas Instruments.
1-Wire™ is a trademark of Maxim Integrated Products, Inc.
蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

全球对智能**热量成本分配器**、**水表**及**热量表**（冷热计量表）的需求正快速增长，智能流量表正成为全球主流类型，逐步取代传统的机械式流量表。所谓“智能”，是指这些仪表能够通过有线或无线链路进行通信，既可以是单向的（仅上报与计费相关的数据），也可以是双向的，从而具备现场固件升级的能力。

868MHz ISM 频段在全球范围内得到广泛使用，因为该频段无需许可，且存在多种无线电协议可将仪表数据传输至数据采集器或移动抄表单元。目前采用两种不同的网络架构来构建智能计量基础设施，即自动计量基础设施 (AMI) 和自动抄表 (AMR)。21 世纪初智能计量与分计量的早期阶段始于 AMR：移动抄表设备以步行或车载方式采集仪表发出的无线报文，然后通过专用链路将这些数据传输至后端计费系统。

现代远程智能抄表采用的是 AMI 方式：这是一种集成架构，将智能仪表连接至永久安装、持续运行的固定 Sub-1GHz 网络，与 4G 和 5G 蜂窝网络非常相似。该 AMI 基础设施由多个数据采集器或数据网关组成，由公用事业公司或计费公司负责安装和维护。

AMI 和 AMR 两种网络架构均可由 **OMS 协议栈** 支持，该协议栈在欧盟市场极为流行，参见 **OMS 集团** 的声明：

OMS 是唯一开放且标准化的能源计量系统，将各能源领域的消耗值整合到统一系统中：电力、燃气、热能、水——涵盖计量与分计量。此外，OMS 兼容建筑技术领域的国际通信标准 KNX，可实现楼宇自动化、能源管理和智能家居系统的直接集成。通信基于久经考验的 M-Bus 标准。

868MHz 频段的 **OMS wM-Bus v4.2.1** 协议以及传导功率 +14dBm 有效辐射功率 (ERP) 的 C 模式，已成为许多欧盟国家**热量成本分配器**、**水表**、**热量表**及改造附加模块的既定标准。**OMS wM-Bus v5.0.1** 中定义了可实现更广泛覆盖范围的新模式，预计将很快开始部署。

在欧盟，169MHz ISM 频段是一种已经流行的选择，可实现远距离通信（代价是更高的发射功率，但可利用更优的射频传播特性）。这是一个既有的免许可频段，由 **EN13757-4 wM-Bus N** 模式支持。N 模式用于意大利和法国的智能流量表抄读，由于智能仪表允许的最大 ERP 功率为 +27dBm (500mW)，网关数量较少即可实现数公里范围的覆盖。

《**欧洲智能仪表对 169MHz wM-Bus 的需求**》一文进一步详述了使用 N 模式的技术挑战与优势。**Wize 技术**是一种低功耗、远距离、双向无线通信的注册商标，作为业界知名的解决方案，已在多个国家的 169MHz 频段投入运行。

有时，除 **OMS wM-Bus** 之外还会并行采用其他专有协议，或用于延长智能仪表至智能网关之间的通信距离，或用于在智能网关之间转发数据——这些网关负责从多个仪表和分仪表采集数据。

此外，NB-IoT 等蜂窝技术也正凭借其深度穿透能力，依托公共蜂窝基础设施，逐步切入智能流量表市场。

1.1 智能仪表欧盟法规

所有智能流量计在现场均有预定的运行年限，通常为五至十年不等，某些市场甚至更长，到期后必须更换。任何智能仪表都必须提供某种受计量法规管控的显示装置，用于显示与计费相关的用户消耗数据。在欧盟，这一点由 [MID 2014/32/EU](#) (附件 I，基本要求) 文件作出规定，其中指出显示要求可通过多种方式满足，包括机械计数器 (如全球范围内的传统机械水表)、电子流量计中的液晶显示器 (LCD)、发光二极管 (LED) 或其他电子显示装置，前提是它们满足该指令在可读性、无歧义性和安全性方面的标准。

分段式 LCD 显示器迄今为止仍是智能流量计和热量成本分配器中的主导技术。欧盟法规确实允许关闭 LCD 显示，但在这种情况下，终端用户必须能够按需即时激活它，通常通过按键或电容式触摸按键、用于检测表盖开启的光学传感器或其他用户触发的提示方式来实现。

1.2 旋转计量设计

计量功能是所有智能仪表设备的核心特性；数十年来已有多种电子传感技术得到应用，各有优劣。

TI 已推出 [MSP430FR6989 EVM](#) 及配套硬件，支持旋转式流量计传感中最常用的三种传感方式：[电感式 \(LC 传感\)](#)、[光学式](#)和[磁式](#)。这些参考设计面向大批量流量计量终端设备，如热水表和冷水表 (在德国广受欢迎)、机械表的改造附加模块，以及分计量应用 (包括[热量表](#)和[热量成本分配器](#))。

需要注意的是，除旋转式流量计——其至今仍是全球主导技术——之外，还有超声波流量测量，由 TI 的 [MSP430FR6043](#) 器件系列提供支持，超声波流量计量正在全球许多市场获得越来越多的关注。

本文档聚焦于采用 [CC1312R](#)、[CC1312R7](#) 和 [CC1314R10](#) 无线 MCU 的旋转传感设计，在许多情况下，这些器件可实现更高集成度、符合 CRA 要求的设计，代价是功耗相较 [MSP430FR6989](#) 略有增加。

本文档所呈现的结果大量利用了 [CC1312](#) 和 [CC1314](#) 器件系列内部的超低功耗 SCE 模块，并证明在 SCE 中集成旋转计量、IrDA 通信、基于 GPIO 的分段式 LCD 显示控制以及磁篡改检测是可行的。

以下章节所记录的业界领先的超低功耗数据，为开发单芯片计量与分计量设备奠定了基础，凭借集成的 Sub-1GHz 射频和 SCE 模块，可实现更低的整体系统成本。

2 智能流量计与分计量设备

CC1312R SimpleLink™ 高性能 Sub-1GHz 无线 MCU 由 TI 内部设计并制造，具备多项独特特性：超低漏电的 TI CMOS 65nm 工艺，以及配备 4KB SRAM、可以 2MHz 或 24MHz 运行的超低功耗传感器控制器引擎 (SCE)。此外，该器件还集成了多个专用模拟外设，如可编程电流源、带内部基准 DAC 的模拟比较器、脉冲计数器和时间数字转换器 (TDC)，均可由 SCE 模块控制。

该平台还集成了先进的加密能力，包括 AES 128 位和 256 位加密加速器、TRNG、ECC 和 RSA 公钥硬件加速器以及 SHA2 加速器，使其能够应对欧盟即将实施的 **CRA 法规**。

因此，单芯片 CC1312R 和 CC1314R10 无线 MCU 集成了软件定义的 Sub-1GHz 射频系统与可编程 16 位 SCE，既能处理三种最常用的旋转计量方式，又能利用 TI 专利的 GPIO LCD 控制技术驱动分段式 LCD 显示器。

2.1 热量成本分配器 (分计量)

热量成本分配器并不直接测量燃料或热能的物理体积 (kWh)，而只是记录无量纲的散热单位，为此大多数 HCA 设备采用双传感器原理。**热量表** (此处指热计量表) 与 HCA 配合安装，可实现对每套公寓或住宅单元热能的公平计费。HCA 设备早在几十年前就已在丹麦和德国推出，最初采用简单的蒸发管，到 2000 年代中期发展为采用 OMS wM-Bus 无线协议的完全电子化设备。

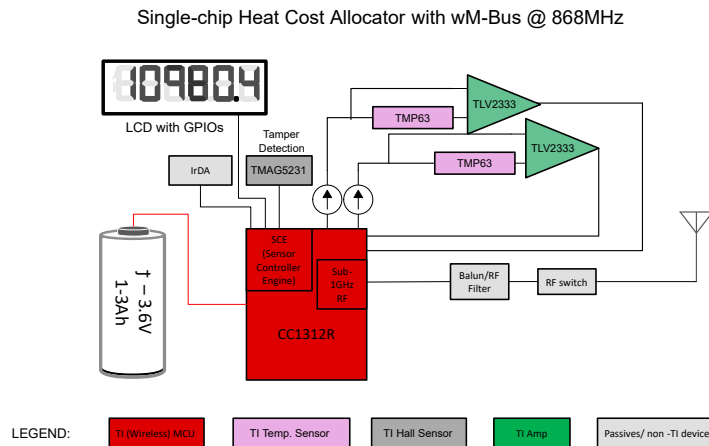


图 2-1. 采用 CC1312R/R7 的双传感器 HCA

欧盟《能源效率指令》(EED) 规定，在欧盟国家所有采用集中供热或供冷系统的多公寓和多用途建筑中，分户计量在法律上为强制要求。需要注意的是，HCA 设备属于远程可读性强制令的管辖范围：所有新安装的 HCA 和**热量表**都必须支持远程抄读。到 2027 年 1 月 1 日，必须全面完成从传统非电子化和非智能电子化 HCA 的过渡，届时将不再需要进入公寓现场抄读消耗数据。

现代数字 HCA 设备采用单个 Sub-1GHz 无线 CU 和两个温度传感器，如 图 2-1 所示，其中散热器传感器测量散热器的精确表面温度 T_{rad} ，而室温传感器则测量设备所在房间的环境空气温度 T_{air} 。

2.1.1 HCA 关键功能

HCA 设备的框图由多个子系统组成，全部由支持 CRA 的 [CC1312R](#) 无线 MCU 控制，该 MCU 运行应用代码和 Sub-1GHz 无线协议（例如 [wM-Bus v4.2.1](#) 或 [v5.0.1](#)）：

1. [SCE](#) 固件中的 [IrDA](#) 半双工或全双工端口
2. 两个温度传感器（室温与散热器/加热器）
3. 带外部巴伦/射频滤波器和天线的 Sub-1GHz 射频（单向或双向）
4. 由 [SCE](#) 固件驱动的分段式 [LCD](#)（可选配用于激活 [LCD](#) 的按键）
5. 篡改检测（例如 HCA 从散热器本体上被拆下）

2.1.1.1 IrDA 通信端口

这一关键的 HCA 子系统用于安装和维护，也用于生产制造过程中，作为一种简便方式在各 HCA 设备中配置厂商参数。可以实现对 [IrDA](#) 接收 [LED](#) 的定期轮询，以检测来自 HCA 读表单元等外部源的唤醒信号。此类典型的 [IrDA](#) 应用场景记录于 [TIDA-01212](#) 《[单双向红外 LED 通信端口参考设计](#)》，其中提供了超低功耗半双工 [IrDA](#) 设计及 [SCE](#) 中的固件示例代码。

由于硬件和固件需求极为精简，[TIDA-01212](#) 中的 [IrDA](#) 轮询功能可轻松与 [TIDA-00848](#) 中的 [LCD](#) 支持相结合，二者均可作为任务在传感器控制器引擎中运行。在检测到轮询序列（示例见 [节 2.2.3](#)）后，[SCE](#) 唤醒主 [Cortex-MCU](#)，由其处理 HCA 与外部读表单元之间的 [IrDA](#) 协议数据交换。

2.1.1.2 温度测量（双传感器法）

每个 HCA 设备都牢固安装于散热器本体上，用于测量 T_{rad} 的加热器温度传感器必须与本体保持热接触（但非电接触）。相反，用于测量 T_{air} 的室温传感器则朝向房间的反方向，即背离散热器本体。HCA 设备持续记录随时间变化的温差：

$$\Delta T = T_{rad} - T_{air}$$

如果存在外部热源，如电加热器或直射阳光，室温传感器会感知到空气升温并记录到 ΔT 减小。

在面向成本敏感型系统的 HCA 双温度测量中，两个具有正温度系数 (PTC) 的 [TMP63](#) 硅基热敏电阻与一个双通道 [TLV2333](#) 双路、350kHz、低噪声、RRIO、CMOS 运算放大器配合使用。

已对室温和散热器传感器各自的电路进行了仿真，并证明在充分利用内部 [ADC12](#) 模块全量程时可提供足够的温度分辨率。[TIDA-00848](#) 参考设计中提供了每个 [TMP63](#) 电路预期性能的详细仿真，两个传感器均由 [CC1312R](#) 中 [SCE](#) 模块的可编程电流源激励。

为提高测量精度和分辨率，建议为每个传感器采用单级放大，其主要差异在于可实现的增益，这取决于两个因素：[ADC12](#) 模块的参考电压和每个传感器支持的温度范围。以 2.1V 作为 [ADC12](#) 最大参考电压时，散热器传感器可实现约 4 倍的增益级，覆盖 20°C 至 95°C 的大温度范围。对于室温传感器，假设温度范围为 20°C 至 40°C，则可实现 12 倍的增益。

2.1.1.3 分段式 LCD 支持

TIDA-00848 《使用 GPIO 引脚控制分段式 LCD 的单芯片热量成本分配器参考设计》实现了通过 CapTouch 按键激活分段式 LCD 显示器，该显示器由 GPIO 和 TI 专利 MUX 网络控制。

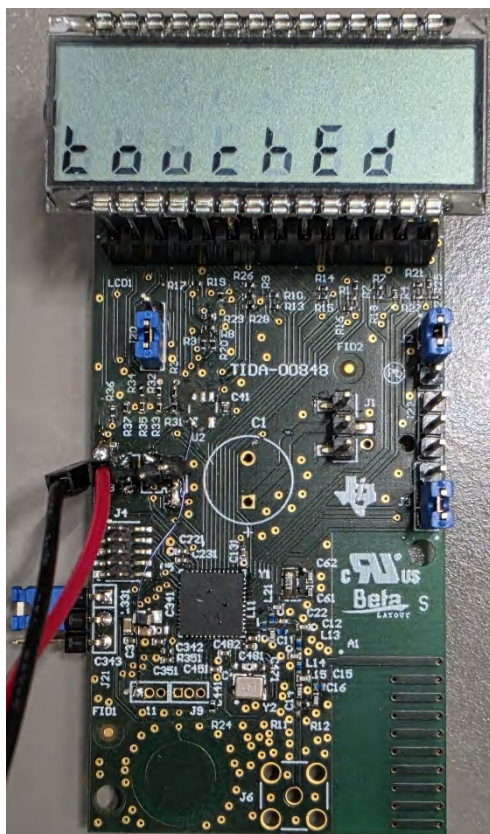


图 2-2. TIDA-00848 采用 CC1312R/7 和分段式 LCD 显示器的单芯片 HCA

TIDA-00848 中的固件示例已针对超低功耗进行了优化，因为它使用了 Sensor Controller Studio 工具中的 LCD 资源，该工具用于为 SCE 模块开发代码。在连接分段式 LCD 且 SCE 运行 LCD 时序时，功耗为 $7.3\ \mu\text{A}$ ；在 3.3V 电压下 (BTL002 4-MUX LCD 显示器上激活 28 段) 为 $11.9\ \mu\text{A}$ 。

2.2 机械水表用改造附加模块

该终端设备是一种快速且高性价比的设计方案，通过添加电子改造附加模块，使全球目前仍最流行的机械水表实现 *智能化*。该电子组件集成了四个关键子系统：计量、Sub-1GHz 无线链路、篡改检测，以及与 [节 2.1.1.1](#) 完全相同的 IrDA 通信端口。由于传统旋转式水表的机械表盘仍然可见，因此无需分段式 LCD 显示器，也无需任何温度测量。

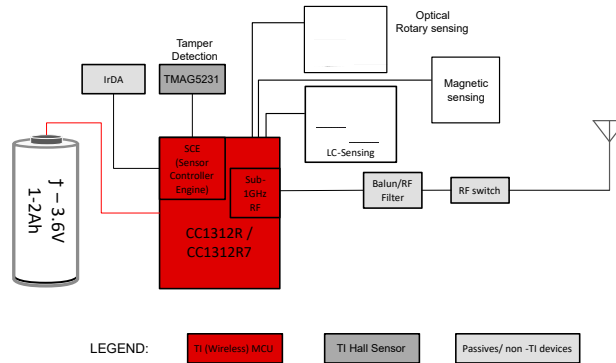


图 2-3. 采用 CC1312R/R7 的 wM-Bus 机械水表改造附加模块

2.2.1 改造附加模块关键功能

如 [图 2-3](#) 所示，该框图集成了这些子系统，全部由支持 CRA 的 CC1312R 无线 MCU 控制，该 MCU 运行应用代码和 Sub-1GHz 无线协议（例如 OMS wM-Bus v4.2.1 或 v5.0.1）：

1. IrDA 半双工或全双工端口
2. 带外部巴伦/射频滤波器和天线的 Sub-1GHz 射频（单向或双向）（与 HCA 相同）
3. 篡改检测（改造附加模块从机械水表上被拆下，或检测设备附近的强磁场——与 HCA 相同/非常相似）
4. 旋转运动计量：光学式、电感式或磁式（流量计量子系统）

备注

旋转检测的电容式传感设计也存在，但应用远不如上述方式广泛，因此本文档不予讨论。

2.2.2 旋转流量计量实现

内部已开发并测试了一款采用 [CC1312R](#)、半圆形外形的硬件原型，重点关注超低功耗。通常，为获得最佳射频性能，建议采用四层 PCB 设计，这也为在半圆形小面积内进行元件布局和布线提供了更大的灵活性。

最常用的传感方式为光学式和电感式，以下章节将对二者进行讨论。

2.2.2.1 光学与磁式旋转传感

计量和 IrDA 通信的固件代码均在 SCE 模块上以 2MHz 模式运行，两项任务交替执行。流量测量通过以下过程以 12Hz 频率进行仿真：

1. 发出持续 1μs 的激励脉冲，并针对 COMPA 阈值测量接收信号，保存结果 A
2. 发出持续 1μs 的激励脉冲，并针对 COMPA 阈值测量接收信号，保存结果 B
3. 利用两次测量结果 A 和 B 更新状态机的旋转状态，并转换为流量测量的旋转计数

此处的 1μs 激励脉冲可用于光学式和电感式 (LC) 传感，具体取决于所选的计量方式。SCE 固件中的状态机实现与 [TIDA-010050《用于 AMR 的超低功耗水流量测量参考设计》](#) 中采用 LC 传感的设计文档完全相同。

[图 2-4](#) 中的功率分析仪捕获显示了 12Hz 测量结果，一秒内出现 12 个尖峰，每个尖峰包含每次测量的两个脉冲。两个较高的尖峰是传感器控制器引擎的再充电脉冲（参见标记 1 和 2，Delta T = 1s）。

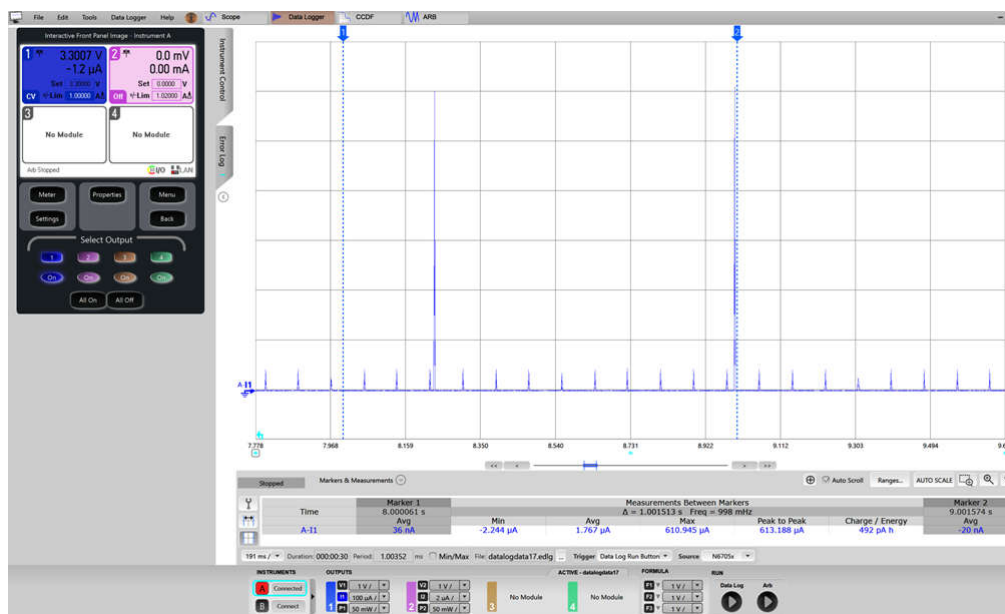


图 2-4. CC1312R 以 12Hz 进行双旋转传感器激励

图 2-4 中 $1.8\mu\text{A}$ 的平均功耗是估算光学或磁式传感方案功耗的良好起点。此外还需要额外功耗来驱动两个（或必要时三个）光学接收器，这些接收器需要检测来自许多机械水表中常用的半镀金属旋转盘所反射的光。对于采用 AMR 或 TMR 或 GMR 传感器的磁式传感，差分输出馈入比较器的两个输入端，并根据所用磁体的最大旋转速度，以所需的采样频率对结果进行采样。

2.2.2.2 电感式旋转传感

全球范围内可能最流行的旋转流量测量方式是电感式或 LC 法，使用两个或三个 LC 传感器，记录于 TIDA-010050 《用于 AMR 的超低功耗水流量测量参考设计》。这一用于通过机械表电子测量水流的超低功耗设计，聚焦于面向改造附加模块或智能旋转式水表的电感式计量子系统。这一极为紧凑的单芯片 CC1312R 无线 MCU 实现方案，在 3.3V 供电下以 16Hz 采样两个 LC 传感器时功耗为 $1.8\mu\text{A}$ ，可在电感与旋转盘之间最远 5.8mm 的距离内实现精确测量。

由于机械表内部的旋转盘通常位于玻璃或塑料罩之后，且改造附加模块也置于塑料外壳中，因此 LC 传感器电感始终与旋转盘相距数毫米。支持更大的检测距离（通常在 5mm 至 6mm 范围内）是任何旋转传感方式的关键要求。

Figure 24. Power Consumption With Different Sampling Rates

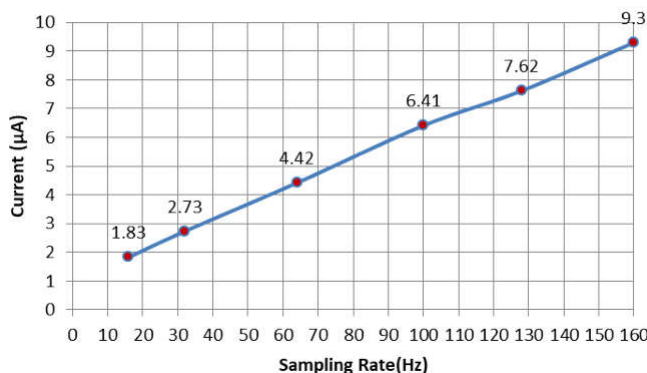


图 2-5. 两个 LC 传感器的采样率与功耗关系

Figure 25. Results of Detection Distance Under Different Voltages With the Gemphil Inductor

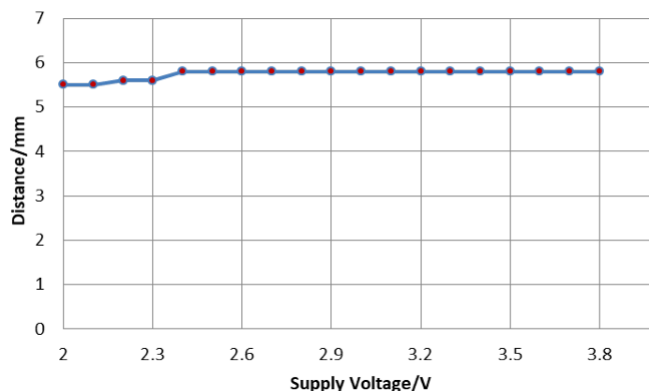


图 2-6. 到半镀盘的间距 L

为确认对 LiMnO₂ 一次电池的支持——其开路电压最高可达 3.2V，寿命终止时的典型截止电压为 2V——收集了表 2-2 中的数据：

表 2-1. TIDA-010050 双 LC 传感器电路功耗

电源电压 (V)	2	2.1	2.2	2.5	3	3.3	3.5	3.8
电流 (μA)	4.5	4.6	4.8	4.3	4.4	4.4	4.5	4.8
功率 (μW)	9	9.7	10.5	10.7	13.3	14.6	15.9	18.2

2.2.3 IrDA 唤醒检测

针对 TI 内部采用 CC1312R 的改造附加模块硬件原型，已开发并测试了示例代码，并可供下载（本应用笔记）。IrDA 唤醒序列的例程在每第 12 次双脉冲流量测量后执行一次，从而实现 1Hz 的采样率。此处定义的 IrDA 唤醒序列为“0xF0”字节，必须被检测到：因此，IR LED 以 9600bps 的速率依次充电和放电七次，在有红外光存在的情况下，如果 $1/9600 = 104\mu s$ ，放电超时后的电压下降会显著更大。通过将该电压下降与预定义的 COMPA 参考阈值进行比较，可以可靠地检测到 IrDA 的“0”位，在图 2-7 中，这些是下降到略低于 0V 的较大尖峰。

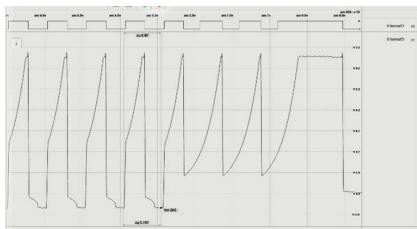


图 2-7. 相距 5cm 的 IrDA 检测

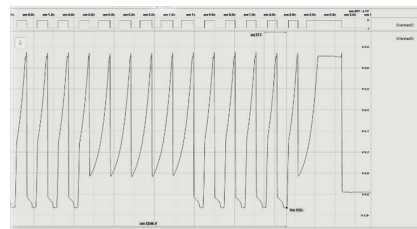


图 2-8. 相距 10cm 的 IrDA 检测

如果检测到至少一个“0”位，传感器控制器会以 9600bps 再检查 30 位，以避免误唤醒；如果随后检测到至少五个“0”位，则启动 CC1312 中的主 MCU 来处理 IrDA 协议。在正常情况下（无红外光存在），IrDA 检测在每第 12 次迭代中额外增加约 904μs 的执行时间。在有红外光存在时，由于唤醒前需额外检查 30 位，持续时间约为 4ms。

计量与 IrDA 唤醒检测检查相结合的 SCE 代码功耗如表 2-2 所示：

表 2-2. 改造附加模块 12Hz 双传感器读取与 IrDA 轮询功耗

功率测量	平均电流消耗 (μA)
不含 IrDA 的流量测量	1.4
含 IrDA 且以 1Hz 采样的流量测量	1.6
含 IrDA 且以 0.5Hz 采样的流量测量	1.5

2.3 智能旋转式水表

这类设备是全电子式仪表，集成 Sub-1GHz 通信链路、用于取代机械表盘的分段式 LCD 显示器，并采用与改造附加模块相同的光学、磁式或电感式计量功能。智能水表还集成了篡改检测检测和 IrDA 通信链路，有时还支持多种 Sub-1GHz 无线协议，如 OMS wM-Bus、专有协议和 BLE。

这类仪表也称为旋转活塞式或容积式智能水表，通过机械旋转元件测量用水量，该元件通常是活塞或章动盘，在容积式腔体内旋转。集成的计量子系统感测圆盘旋转，将流量测量数字化，并通过无线方式将数据传输至智能网关或移动抄表单元。

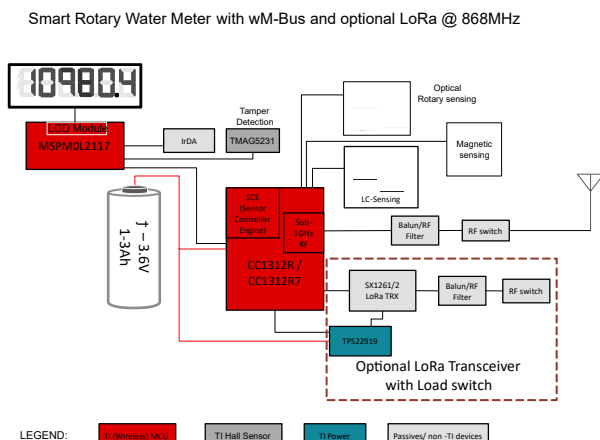


图 2-9. 双 MCU 方案

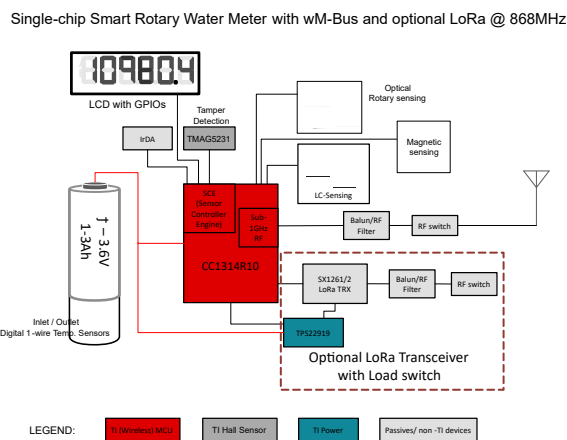


图 2-10. 采用 wM-Bus v5.0.1 及可选专有 WAN 的单芯片智能旋转式水表

2.3.1 水表关键功能

图 2-10 中的旋转式智能水表框图展示了多个子系统，全部由支持 CRA 的 CC1312R 或 CC1314R10 无线 MCU 控制，该 MCU 运行应用代码和 Sub-1GHz 无线协议（例如 OMS wM-Bus v4.2.1 或 v5.0.1）：

1. IrDA 半双工或全双工端口
2. 带外部巴伦/射频滤波器和天线的 Sub-1GHz 射频（单向或双向）
3. 由 SCE 固件控制的分段式 LCD 显示器（带用于激活 LCD 的按键）
4. 通过 TMAG5231 实现篡改检测（例如 HCA 从加热器上被拆下）

左侧展示的是 LCD 常亮时的双 MCU 方案，此处使用 MSPM0L2117 作为 LCD 驱动器，同时还可处理 IrDA 端口和篡改检测功能，从而减轻 CC1312R 器件的负担。

若采用基于 GPIO 的分段式 LCD，则适用右侧的第二个框图：CC1314R10 除 IrDA 端口和篡改检测功能外，还负责驱动所有 LCD 控制 GPIO。该设计适用于 LCD 显示器通常处于关闭状态、仅在用户按下按键时才启用的水表。

此外，还可选配外部 SPI Flash 器件（图中未绘出），挂载于 SPI 总线并由 TPS22919 负载开关供电，用于存储历史日志数据或备份固件镜像，以应对 CC1314R10 片上 1MB Flash 容量不足以满足系统需求的少数情况。

另一可选器件是 SEMTECH 的 SX1261 或 SX1262 收发器，可支持专有远距离 Sub-1GHz 协议 LoRa WAN，该协议在部分市场可能有所应用。LoRa WAN 软件栈运行于 CC1314R10 之上，该器件具备 296KB SRAM，可同时支持 wM-Bus 与专有远距离协议的双栈运行。SX126x 和 SPI Flash 器件均为 BOM 可选装项，如不需要可直接省略，从而以单一 PCB 设计实现灵活的系统方案，覆盖不同市场的多种配置。

水表选用 CC1314R10 而非 CC1312R/R7，原因在于分段式 LCD 功能需要更多 GPIO。VQFN64 8mm × 8mm RSK 封装提供 46 个 GPIO，可确保为 LCD 控制预留充足引脚，因为水表显示器通常具有 80 至 120 段。TIDA-011020 将使用 30 个 GPIO 引脚驱动 96 段 4 MUX LCD 显示器，而其余 16 个 GPIO 则是实现计量、篡改检测和 IrDA 通信功能所不可或缺的。

为节省功耗，设计中加入了典型关断电流 ISD 仅为 2nA 的负载开关 TPS22919，仅在用到 SX126x 和 SPI Flash 器件时才为其供电；其余情况下，这些器件由负载开关断电。当既不需要专有远距离射频，也不需要 SPI Flash 时，TPS22919 也可保留。

2.3.2 带 CapTouch 激活功能的分段式 LCD

图 2-11 和 图 2-12 所示的 TI 专利 GPIO 多路复用 LCD 控制方案已在 TIDA-011020 中实现，该设计作为 TI LaunchPad™ 的 BoosterPack™ 评估板提供：

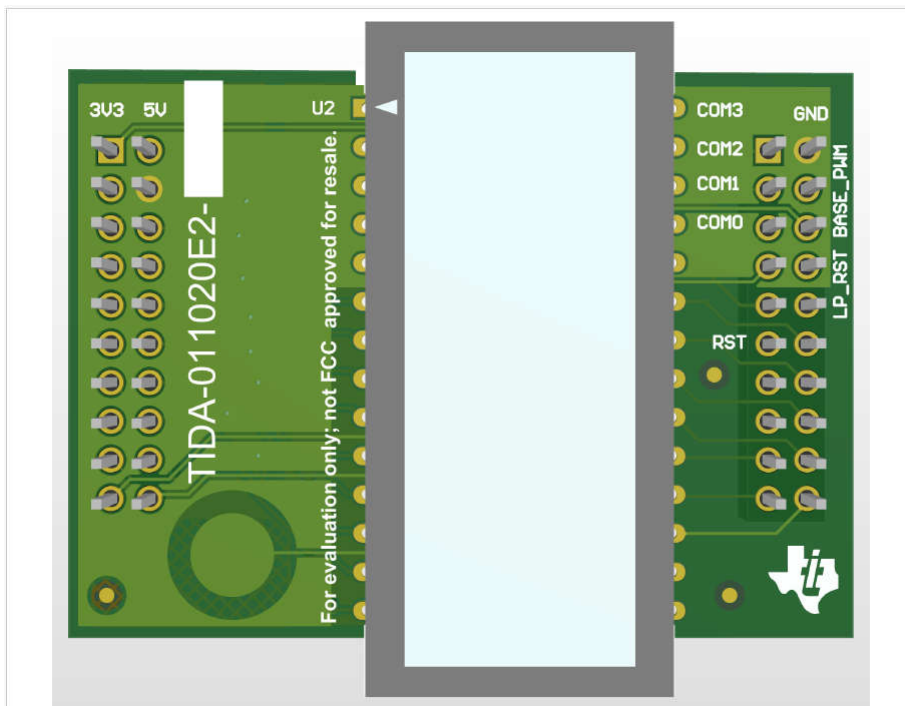


图 2-11. TI 专利多路复用 LCD 的 BoosterPack 设计 TIDA-011020

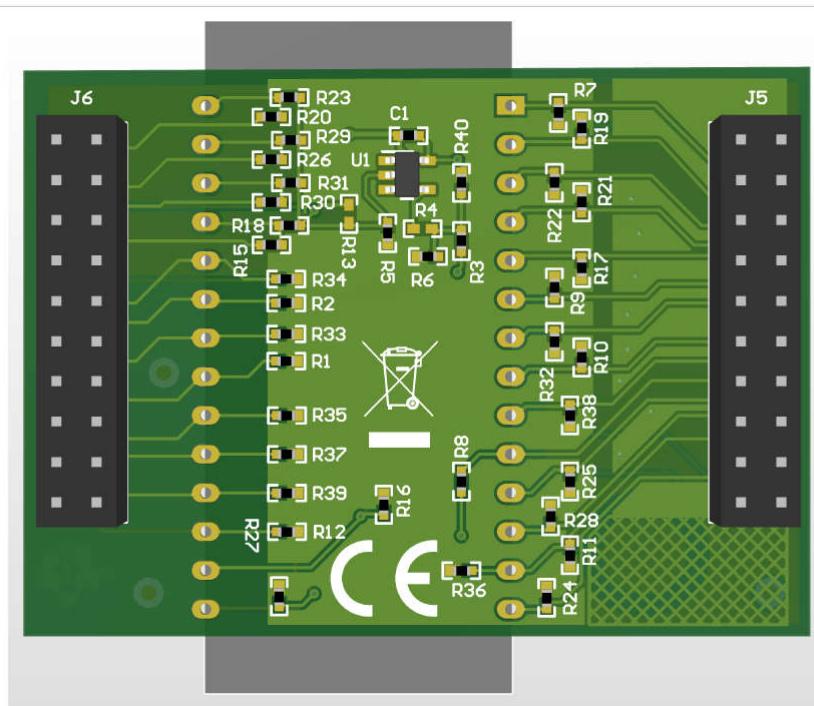


图 2-12. TIDA-011020 背面视图

该设计与 [TIDA-00848](#) 单芯片 HCA 参考设计一脉相承，同样通过 CapTouch 方式激活分段式 LCD 显示器，由 GPIO 和 TI 专利多路复用网络驱动控制，并针对超低功耗进行了优化。用于 LCD 控制的 SCE 代码，连同面向 CC1312R LPAD 的 CCS 示例，均收录于本应用笔记的软件包中。

备注

TI 此项用于驱动分段式 LCD 显示器的多路复用电阻网络专利设计，仅可与 Texas Instruments Inc. 的有线或无线 MCU 产品配合免费使用，例如 MSPM0+、MSPM33、C2000™、CC13xx、CC26xx 和 CC27xx 等系列。

SCE 代码每秒轮询一次 CapTouch 区域（1 秒周期可调）。一旦检测到触摸事件，分段式 LCD 即被激活，直至达到预定义的 5 秒超时（该周期同样可调）。随后 LCD 关闭以节省功耗，等待下一次触摸事件触发。实际用例分析表明，LCD 的总活动时间可仅占智能水表设备寿命的 1% 甚至更低，相比 LCD 常亮设计可显著降低功耗。

对于所有支持在用户请求时短时启用 LCD 的计量与分计量设备，均推荐采用这一 TI 专利设计。有关 SCE 软硬件实现的完整细节及开源代码示例，均记录于 [TIDA-00848](#) 参考设计中。

2.3.3 使用 TMAG5231 实现篡改检测

TMAG5231 是一款平面内霍尔效应开关，专为在成本优先的应用中替代 TMR、AMR 和干簧开关而设计。当通过传感器灵敏度轴施加的磁通密度超过工作点阈值 (BOP) 时，器件输出低电压。该输出保持低电平，直至磁通密度降至释放点阈值 (BRP) 以下，随后器件输出高电压。为最大限度降低功耗，TMAG5233 版本在内部以 5Hz 占空比运行，平均功耗仅为 0.55μA。得益于 32μs 的快速启动时间和 2.6mA 的最大供电电流，TMAG5233 的供电引脚可由 CC1314R10 上具备中等驱动能力的 GPIO 引脚供电，并额外通过占空比控制将有效采样率降至 1Hz 或更低。因此，仅需两个 GPIO 即可为 TMAG5233 传感器供电并读取其输出。该设计已在内部改造附加模块设计中与 IrDA 通信及 12Hz 计量采样率一同实现并测试。用于为 TMAG5233 供电并检测其输出信号 of SCE 代码示例已在开源代码示例中提供。

2.3.4 符合 OMS 规范的 wM-Bus 通信子系统

如果仅实现 868MHz 频段中广泛使用的 OMS wM-Bus 协议，或在意大利和法国流行的 169MHz N 模式，CC1312R/R7 和 CC1314R10 均可在片内处理。仅在专有远距离应用场景下，才需使用 SX1262 收发器，而双协议栈则运行于 TI 的 CC1312R/R7 或 CC1314R10 无线 MCU 上。

双频段 Sub-1GHz 和 2.4GHz 器件 CC1352R/CC1352P 和 CC1354R10 / CC1354P10 额外具备在 2.4GHz 频段运行协议的能力，例如 Matter 和 BLE。这些协议由于覆盖距离较短，专用于通过智能手机或平板电脑实现厂商安装与配置工具。

2.4 热量表 (冷/热计量)

智能旋转式热量表是全电子式设备,集成了 Sub-1GHz 通信链路、分段式 LCD 显示器和旋转计量功能。它们还具备篡改检测功能,并使用 IrDA 通信。简而言之,热量表是水表的超集,因为它新增了一项关键功能:对两个、三个或四个 RTD 元件 (也称为 PT100、PT500 或 PT1000) 进行精确温度测量。

2.4.1 热量表关键功能

图 2-13 中的旋转式智能热量表框图展示了多个子系统,全部由支持 CRA 的 CC1314R10 无线 MCU 控制,该 MCU 运行应用代码和 Sub-1GHz 无线协议 (例如 wM-Bus v4.2.1 或 v5.0.1) :

1. SCE 固件中的 IrDA 半双工或全双工端口
2. 带外部巴伦/射频滤波器和天线的 Sub-1GHz 射频 (单向或双向)
3. 由 SCE 固件控制的分段式 LCD 显示器 (带用于激活 LCD 的按键)
4. 通过 TMAG5231 实现篡改检测 (例如 HCA 从加热器上被拆下)
5. 精确温度测量 (模拟或数字)

Smart Rotary Thermal Meter with wM-Bus and optional LoRa @ 868MHz

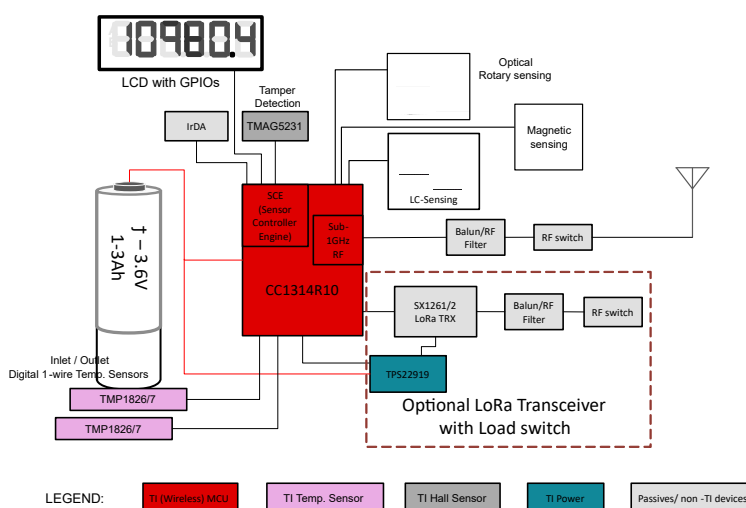


图 2-13. 采用 CC1314R10 和数字 1-Wire 温度传感器的智能旋转式热量表

热量表的温度设计需要差分温度测量 (DTM) 子系统,其分辨率和精度远高于 HCA 的双传感器测量。

2.4.2 用于 DTM 的模拟信号链

通常采用 ADS122U04 等 24 位 delta-sigma 模数转换器,以满足 EN1434-5:2014 对热量表和热量计算器中 RTD 传感器对温度测量子系统的要求。这种热量表中 DTM 的传统方法已记录于 TIDA-01526 《用于冷热计量的高精度温度测量》中,因为它支持标准 PT100、PT500 和 PT1000 元件。

此类 RTD 测量可很好地配合旋转式 MSP430FR6989 EVM 和超声波 MSP430FR6043 EVM 使用,并满足 EN1434 的所有要求——这对热量表而言是强制性的。该设计的缺点在于,增加了经过精细调整和校准的模拟信号链的复杂性,并需额外配置一颗精密 ADC 器件。

2.4.3 卓越的全数字 DTM 设计

2019 年, TI 与合作伙伴 JUMO GmbH & Co. KG 共同推出了 TIDA-010002: 《用数字温度传感器替代铂 RTD 传感器》——一种面向热量表精密温度子系统的全数字设计方法。

TMP117 是一款精度为 0.1°C、带 48 位 EEPROM 的数字温度传感器,旨在替代 PT100/PT1000 RTD,因其无需校准即可在 -55°C 至 150°C 范围内满足 IEC/EN 60751-2008 A 级精度要求,仅需单点校准即可达到 AA 级精度。这一创新技术设计利用了 TMP117 内部集成的精密 ADC 内核及其专有校准技术,省去了精密基准、匹配走线、复杂算法和制造过程中多道校准步骤等诸多 RTD 的复杂性,从而简化了设计工作。

2.4.3.1 用于热量计量的 I2C 和 SMBus 兼容数字传感器

TIDA-010002 采用 I2C 数字接口，因为当今几乎所有有线与无线 MCU 均支持该接口。I2C 协议设计的缺点在于，每个替代 RTD 的温度传感器需要四根线，一根用于进水口，另一根用于出水口。通常，住宅热量表需要两个 2 线 RTD 探头，它们牢固固定于设备上且不可更换。4 线配置在很大程度上抵消了采用 TMP117 消除复杂模拟链设计所带来的成本节约，因而推动了仅需两根铜线的下一代解决方案的需求。

2.4.3.2 用于热量表的 1-Wire 兼容数字传感器

在高精度 TMP117 器件的基础上，兼容 1-Wire® 协议的 TMP1826 数字集成 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 温度传感器被开发出来。作为常见两线 RTD100/500/1000 传感器的替代方案，采用 1-Wire® 协议可实现两线数字温度传感器。尽管模拟 RTD 元件与 TMP1826 1-Wire™ 温度传感器的外观和感觉完全相同，但务必注意，二者并非引脚对引脚兼容。传统模拟 RTD 元件需要可编程电流源激励，以便使用 ADS1220 等精密 ADC 测量 PT 元件两端的电压降。而数字传感器只需与 MCU 内核之间采用简单的数字 1-Wire 协议，即一根数据线和一根地线。

借助 TMP1826 以及与它引脚对引脚兼容、集成 SHA-256 认证器的 TMP1827，TI 通过从根本上简化热量表校准的制造流程，显著降低了系统成本。

表 2-3. 标准 RTD 与 1-Wire 数字温度传感器对比

	RTD	TMP1826/7 1-Wire
总导线数	2	2
推荐最大长度	10m	300m
模拟信号链	有	无 (集成于 TMP1826/7 内部)
需要可编程电流源	有	无
精密基准电阻	有	无
布局复杂度	高，需匹配走线和开尔文连接	无 (数字接口)
校准点	3	1
厂商信息 (每传感器)	无法实现	2kbit EEPROM
NIST 可追溯性	无法实现	有 (出厂编程)

2.5 流量表中的蓝牙®低功耗 (BLE)

双频段 CC2652 和 CC2654 无线 MCU 增加了对 2.4GHz ISM 频段的额外支持，可在 Sub-1GHz 和 2.4GHz ISM 频段上处理时分复用通信。借助双频段射频子系统，所有主流协议均可得到支持：6LoWPAN、Amazon Sidewalk、蓝牙低功耗 (BLE)、IEEE 802.15.4、MIOTY™、Matter、专有协议、专有 2.4GHz、Thread、Wi-SUN、OMS Wireless M-Bus v5.0.1 以及 Zigbee。

2.4GHz 频段尤为有用，可作为 BLE 安装与配置工具的使能技术，此类工具通过移动应用在智能手机或平板电脑上运行。如今几乎 100% 的移动设备均支持 BLE 协议，相较于传统上依赖 IrDA 通信协议的旧式设计，BLE 凭借其高数据速率、双向通信能力以及对终端用户和计量厂商而言的易用性，代表着重大进步。

2.6 CRA 对智能流量表和热量成本分配器的影响

欧洲《网络弹性法案》(CRA, 欧盟法规 2024/2847) 是一项欧盟范围内的法规，为投放欧盟市场的所有含数字元素产品确立了强制性网络安全要求。该法规于 2024 年 12 月 10 日生效，自 2027 年 12 月 11 日起全面强制执行。该法规涵盖任何处理数字数据、且预期或合理预期会连接至另一设备或网络的硬件或软件产品。这一定义涵盖所有现代智能流量表和热量成本分配器。

CRA 的一项基本原则是，它适用于投放市场的完整成品。虽然 TI 为其器件（如无线 MCU）在欧盟市场销售而寻求认证，但计量表厂商才是负责验证完整产品作为系统满足所有适用 CRA 要求并相应加贴 CE 标志的主体。经 CRA 认证的半导体产品并不自动赋予成品计量表 CRA 合规性。

CRA 将含数字元素产品分为四个类别，合规评估义务依次递增：

Default	• Products in scope: All products with digital elements not listed as important class I, II or critical products (e.g. Smart speakers) • Certification: Module A – Internal control procedure
Important I	• Products in scope: Physical and virtual network interfaces – <i>Meters</i>; Smart home products with security functionalities, including smart door locks, security cameras, and alarm systems; Personal wearable products to be worn or placed on a human body that have a health monitoring (such as tracking) purpose • Certification: Module A – Internal control procedure
Important II	• Products in scope: Hypervisors and container runtime systems that support virtualised execution of operating systems and similar environments. Firewalls, intrusion detection and prevention systems. • Certification: Module B + C – EU-type examination procedure
Critical	• Products in scope: Smart meter gateways electricity, gas, heat metering. Hardware Devices with Security Boxes • Certification: Module B + C – EU-type examination procedure

图 2-14. CRA 中的产品类别

计量表被列入重要类别 I (Important I)。这包括智能水表、热量表和改造附加模块。热量成本分配器未被明确列为 CRA 下的产品，但由于其与智能流量表一样收集用户数据并将其传输至网关，很可能被归类为重要类别 I 设备，至少需要采用相关协调标准进行自我符合性声明。

CRA 的关键要求作为基本网络安全要求概述于该法律附件 I 中，包括开发过程要求和生命周期要求。

- 开发要求：
 - **设计安全与默认安全：**安全功能必须在产品默认配置中处于激活状态，而非可选附加项。在市场投放时不存在已知的可利用漏洞。
 - **技术文档：**需提供技术文件，包括软件物料清单 (SBOM)、威胁与风险评估 (TARA)、测试报告，以及在支持期内维护的安全更新策略。
 - **安全事件日志：**产品必须记录安全相关事件并采取适当措施。
- 生命周期要求：
 - **漏洞处理流程：**OEM 必须提供一个门户，供报告已发现的漏洞。这些漏洞需在规定的响应时限内处理并在确认后披露（24 小时内确认，根据严重程度在 30、60 或 90 天内提供补丁，重大漏洞需通知 ENISA）。

- **上市后监督：**OEM 必须在声明的支持期内主动监控已部署产品是否存在新漏洞，并发布安全更新。这些安全更新可能需要对已部署设备进行空中 (OTA) 升级。

2.6.1 通过精心的系统设计实现 CRA 合规

HCA 和智能流量计要满足 CRA 合规，需要一套安全架构，同时涵盖硬件信任根以及从设计到上市后漏洞处理的完整产品生命周期。HCA 和智能流量计制造商可采用的核心设计论据是：密封且带篡改监测的外壳构成了一道物理安全边界——只要设备强制执行经过验证的启动流程，且无线链路采用经过认证的加密通信，外壳内的所有组件均运行于可信环境之中。

2.6.1.1 篡改检测作为物理安全论据

智能流量计和 HCA 是现场部署设备，终端用户可接触到，因此 CRA 要求防止未经授权的物理访问。如 [节 2.3.3](#) 所述，TMAG5231 霍尔效应传感器通过监测设备是否从加热器上被拆下或是否暴露于强外部磁场来实现篡改检测。当检测到篡改时，CC1312R 无线 MCU 可记录带时间戳的事件，通过无线链路发出告警，并可选择擦除敏感数据。

该机制同时满足 CRA 附件 I 的两项要求：该机制可防止未经授权的访问，并能够记录和监测安全相关事件。该机制还为内部架构的合规论据提供支撑：由于任何对物理外壳边界的破坏都会触发可检测、可记录的事件，因此内部组件——MCU、固件、加密密钥和计量数据——可被视为运行于受监测的信任边界之内。

2.6.1.2 安全密钥存储

上述受保护外壳的论据可用于论证：只要密钥存储在设备外壳内部，即为安全的。一旦检测到入侵，必须擦除加密密钥，以防止对网络的未经授权访问。若需要进一步的应用隔离，以防止软件某些部分访问加密密钥，则可使用 CC1314 和 CC1354 的 TrustZone 功能。

2.6.1.3 安全启动

所有与 HCA 和智能流量计设计相关的 CC1312 器件均支持安全启动。上一代 CC1310 器件使用启动镜像管理器 (BIM)，而所有较新器件均使用 MCUBoot，后者在执行前会验证每个固件镜像的数字签名。这可防止执行未经授权或损坏的固件镜像，直接满足 CRA 对适当网络安全水平的要求。

另一个方面是启动期间整个系统的安全性。有人可能会指出，保护产品的篡改检测在启动期间并未处于激活状态以防范物理访问。这可通过明确的安全指南加以缓解，确保仅由可信人员安装并启动设备。此后，篡改检测即可用于在设备遭受未经授权物理访问时触发相应措施。

2.6.1.4 经过认证的 wM-Bus 通信

OMS wM-Bus v4.5.1 支持安全配置文件 A 或 B (加密模式 5 和 7)，为所有无线数据帧提供 AES-128 认证加密，保护传输中的计量数据免遭窃听和篡改。这直接满足 CRA 对产品所传输数据、命令和程序的机密性与完整性要求。CC1312 和 CC1314 无线 MCU 的加密加速器可用于高效运行加密运算。

2.6.1.5 通过空中下载 (OAD) 实现安全固件更新

CRA 强制要求能够向已部署在现场的产品推送安全补丁。CC1312R7 和 CC1314R10 通过 MCUBoot 支持片上 OTA：新固件镜像经 Sub-1GHz 无线链路接收、经过加密验证后应用，无需对设备进行物理接触。这是满足 CRA 漏洞修复时限要求的主要机制。CC1312R 支持片外 OAD，先将新镜像暂存于外部 SPI Flash，再进行验证和应用。在所有情况下，OTA 镜像传输都必须经过 AES-128 加密和 ECDSA 或 CMAC 认证，以防止安装未经授权的固件镜像。

2.6.1.6 安全事件日志

CC1312 和 CC1314 [SDK](#) 提供 TI Logger 驱动程序，可记录带时间戳的安全相关事件：篡改告警、认证失败尝试、OAD 操作以及接口锁定状态变化。这些日志满足 CRA 对记录和监测安全相关事件的要求，并构成 OEM 所需上市后监督证据的一部分。

3 总结

TI 的单芯片 [CC1312R](#)、[CC1312R7](#) 和 [CC1314R10](#) 无线 MCU 支持片上 OMS wM-Bus 协议栈，并可选配片外收发器以运行专有远距离协议栈。凭借丰富的安全特性和加密加速器，[CC1312R](#)、[CC1312R7](#) 和 [CC1314R10](#) 无线 MCU 为智能旋转式水表、热量表和热量成本分配器提供了优化的硬件开发平台，能够满足欧盟 CRA 的严格要求。

三大关键特性使智能旋转式水表和热量表、改造附加模块及 HCA 的高性价比系统设计成为可能：

1. 面向最新欧盟法规的 CRA 就绪能力
2. 在高达 +105°C 的整个温度范围内保持超低功耗
3. 基于 TI 专利 GPIO 分段式 LCD 驱动能力的高集成度设计 (LCD)。

通过将这三大突出特性与 SCE 模块中的超低功耗[旋转检测计量](#)相结合，TI 的 SimpleLink Arm Cortex [CC1312R/R7](#) 和 [CC1314R10](#) 无线 MCU 可为全球快速增长的智能流量表和热量成本分配器市场提供高性价比、紧凑尺寸的设计方案。

所介绍的系统设计还涵盖单芯片智能[热量表](#)以及面向机械水表的 [wM-Bus](#) 改造附加无线模块。本文对所有这类终端设备进行了分析，并针对每种类型给出了占用极小 PCB 面积的优化硬件架构。

针对 LC 传感、磁篡改检测、基于 GPIO 的分段式 LCD 驱动能力以及 IrDA 通信的固件开源代码实现均已通过测试，[本文](#)还提供了各项功能的超低功耗示例。

4 参考资料

1. Google , [用于多路复用 LCD 的调制器](#) , 网页。
2. 德州仪器 (TI) , [TIDA-010050 : 用于 AMR 的超低功耗水流量测量参考设计](#) , 参考设计。
3. 德州仪器 (TI) , [TIDA-01012 : 单双向红外 LED 通信端口参考设计](#) , 参考设计。
4. 德州仪器 (TI) , [TIDA-00848 : 使用 GPIO 引脚控制分段式 LCD 以提高系统灵活性的参考设计](#) , 参考设计。
5. 德州仪器 (TI) , [TIDA-010002 : 用数字温度传感器替代铂 RTD 传感器参考设计](#) , 参考设计。
6. 德州仪器 (TI) , [TIDA-01526 : 用于冷热计量的高精度温度测量参考设计](#) , 参考设计。
7. 德州仪器 (TI) , [CC1312R : SimpleLink™ 32 位 Arm Cortex-M4F Sub-1GHz 无线 MCU , 352kB Flash](#) , 产品页面。
8. 德州仪器 (TI) , [CC1312R7 : SimpleLink™ Arm® Cortex®-M4F 多协议 Sub-1GHz 无线 MCU , 704kB Flash](#) , 产品页面。
9. 德州仪器 (TI) , [CC1314R10 : SimpleLink™ Arm® Cortex®-M33 Sub-1GHz 无线 MCU , 1MB Flash 及高达 296kB SRAM](#) , 产品页面。
10. 德州仪器 (TI) , [TMP1827 : SHA-256 认证器及 2Kbit EEPROM , 集成 \$\pm 0.2^{\circ}\text{C}\$ 温度传感器 , 兼容 1-Wire® 协议](#) , 产品页面。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月