

TI Designs

使用 4 节 AA 电池，可实现 5 年以上电池使用寿命且配备扩展闪存的智能锁参考设计



说明

由于越来越多的楼宇和住宅业主希望改造他们的楼宇或住宅的智能锁（或电子锁），这使得由电池供电的无线智能锁在当今市场中越来越受欢迎。在智能锁应用中，高电流电机和无线电通常耗电较快，因此会影响电池的寿命。更换多节电池可能十分费时且成本高昂，因此降低平均电流消耗通常是一项关键的设计注意事项。

资源

TIDA-00757	设计文件夹
DRV8833	产品文件夹
CC2640R2F	产品文件夹
TPS62745	产品文件夹
LP55231	产品文件夹
CSD25310Q2	产品文件夹
TPD1E10B06	产品文件夹



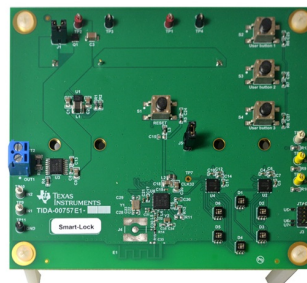
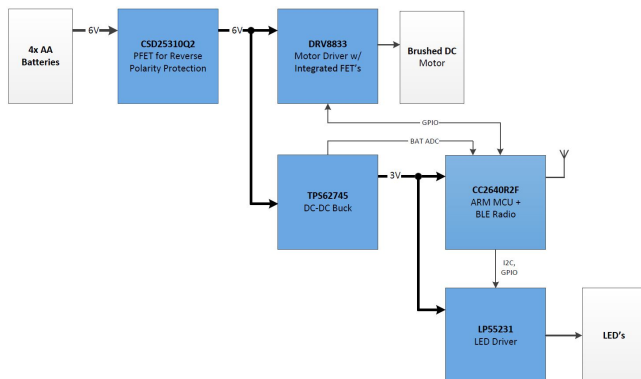
咨询我们的 E2E™ 专家

特性

- 使用 4 节 AA 电池实现 5 年电池寿命
- 超低功耗：
 - 平均总电流消耗为 58.2 μ A（每天门锁闭和解锁 24 次）
 - 4.6 μ A 待机电流
 - 61 μ A/MHz Arm® Cortex®-M3
 - 直流/直流转换器使用 33.4 μ A 的平均功耗（500ms 连接间隔）
- 集成型 Bluetooth®无线电和 MCU，可实现更小外形尺寸
- 电机驱动器具有集成型 FET 和电流感应比较器，能够最大限度地减少分立器件的数量，因此可轻松完成设计并实现较小尺寸解决方案
- 可配置通告间隔高达 4 秒

应用

- 电子智能锁
- 门键盘和读取器
- 楼宇自动化
- 楼宇安全系统
- HVAC 阀门和传动器控制



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 主要系统规格

表 1. 主要系统规格

参数	规格	详细信息
输入电源	四节 AA 碱性电池（工作电压范围为 3.7V 至 6.4V）	请参阅 节 8.1.1
低功耗蓝牙广播间隔	500ms	请参阅 节 8.2
低功耗蓝牙和 MCU 平均电流损耗	26 μ A 平均值（时间周期为 24 小时）	请参阅 节 8.2
电源拓扑的平均损耗（根据设计）	LDO: 366.9 μ W	请参阅 节 3.2
	降压: 30.7 μ W	
	升压: 349.9 μ W	
门门锁定或解锁事件	每天 24 个事件	
电机类型	直流有刷	请参阅 节 7.3
电机电流	50mA 平均值（2A 峰值）	请参阅 节 8.4.4
不带 LED 的电机驱动	45mA 平均值（每个事件，2 秒）	请参阅 节 8.4.4
带 LED 的电机驱动	50mA 平均值（每个事件，2 秒）	请参阅 节 8.5.1
	27.8 μ A 平均值（每天，24 个事件）	
用户界面	3 个按钮，6 个 RGB LED	请参阅 节 2.6
系统总功耗	58 μ A 平均值（带 LED）	请参阅 节 8.5.4
估算电池寿命	5.29 年	请参阅 节 8.5.5
测试结果	5.0V, 25°C, 24 个事件, 500ms	请参阅 节 8

2 系统说明

随着楼宇日益增多以及越来越多的住宅业主希望为其楼宇或住宅改装智能锁（或电子锁），无线电池供电型智能锁在当今市场中越来越受欢迎。在智能锁应用中，高电流电机和无线电通常耗电较快，因此会影响电池的寿命。更换多节电池可能十分费时且成本高昂，因此降低平均电流消耗通常是一项关键的设计注意事项。本设计指南由 TI 的轻负载高效直流/直流转换器、SimpleLink™ 超低功耗无线 MCU 平台、集成电机驱动器和 RGB LED 驱动器提供支持，演示了轻负载高效电源拓扑如何通过低待机电流和长关闭状态间隔延长电池寿命。本设计指南介绍了此 TI 参考设计系统的组件选择、设计理论和测试结果。本设计指南涵盖甚广，有助于系统设计人员在电子锁、门禁键盘和读取器、无线自动百叶窗以及 HVAC 风门和执行器的低功耗门锁设计中占得先机。

以下各小节介绍了该 TI 参考设计系统中的各模块以及便于最好地实现相应功能的最关键特性。

2.1 电池选择

本设计在选择电池时考虑了两个主要因素：容量和电池平台的普及度。AA 电池的容量大于 AAA 电池。此外，在撰写本文档时，当今市场上更多类似于智能风门的应用都选择使用 AA 电池。

2.2 反极性保护

图 1 显示了反极性保护。

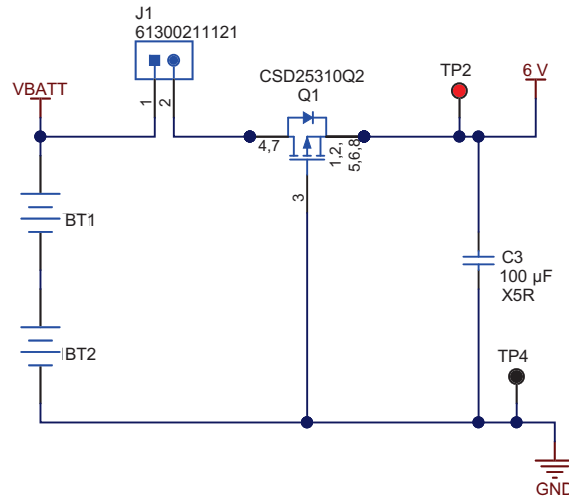


图 1. 电池极性保护

可以使用 PFET 或 NFET 来提供反极性保护。不过，在该参考设计中使用了 PFET，因为 PFET 不会像等效的 NFET 电路那样破坏接地电路。

2.2.1 使用 FET

最新的 MOSFET 具有极低的电阻，因此非常适用于以最低损耗提供反向电流保护。图 2 显示了接地回路中的低侧 NMOS FET，图 3 显示了电源路径中的高侧 PMOS FET。

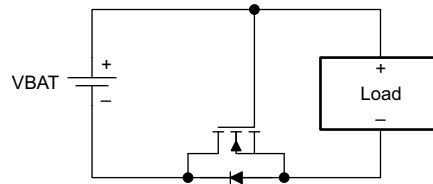


图 2. NMOS FET 接地回路

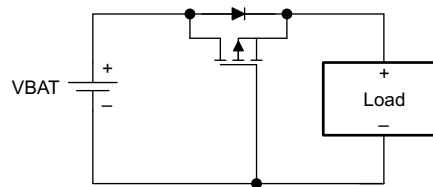


图 3. PMOS FET 电源路径

在每个电路中，FET 的体二极管朝向正常电流的方向。当电池安装错误时，FET 的 NMOS (PMOS) 栅极电压为低电平（高电平），从而阻止其开启。当电池安装正确并且便携式设备通电时，FET 的 NMOS (PMOS) 栅极电压变为高电平（低电平），其通道使二极管短路。

使用 NMOS FET 时，可以在接地回路中看到 $r_{DS(on)} \times I_{LOAD}$ 压降，而使用 PMOS FET 时也可以在电源路径中看到该压降。过去，这些电路的主要缺点是低 $r_{DS(on)}$ 、低阈值电压 FET 的成本较高。但是，得益于半导体工艺的进步，能够以小型封装提供极低压降的 FET 应运而生。

2.3 电源拓扑

主要有三种电源拓扑可用于此类智能锁应用：低压降 (LDO) 稳压器、降压转换器和升压转换器（请参阅图 4）。LDO 和降压解决方案与事件不相关，这意味着无论一天之内发生了多少个锁定和解锁事件，这两种拓扑都使用相同的能量。LDO 和降压会使电压降低以生成电压较低的电源轨来运行 MCU，而电压较高的组件则由电压较高的电池供电。升压配置与事件相关，因为每个锁定和解锁事件必须将电压从 3V 升高至 5V 以保证电机和 LED 运行。

本设计选择了降压配置，因为 LDO 具有接地泄漏电流，而降压具有零接地泄漏电流，因此效率更高。3.2 节中进一步分析了电源拓扑。

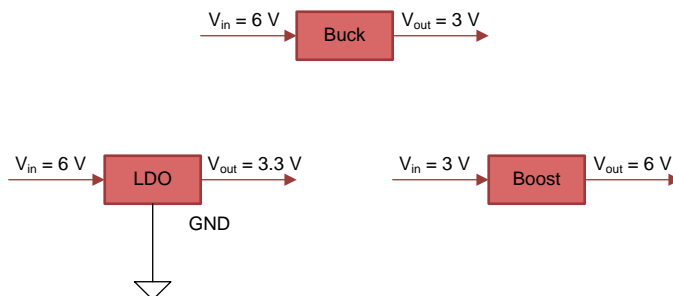


图 4. 电源拓扑

由于 TPS62745 降压转换器能够为低功耗设计提供额外的好处，因此选择了该转换器。该 TPS 器件具有允许用户选择输出电压的选择线路，因此无需反馈电阻器。由于没有反馈电阻器，BOM 成本可能会稍有降低。TPS62745 可以使用使能引脚和外部电阻分压器动态启用或禁用电池电压检查。由于分压器仅在需要进行电池电压检查时启用，因此可以节能。在其余情况下，分压器电路不消耗能量，保持未连接状态。TPS62745 在极轻的负载下也很高效；它在 10 μ A 下的效率为 85%。

2.4 具有集成低功耗 Bluetooth® 无线的 MCU

该参考设计必须连接中心设备并与其进行通信。不过，由于功耗是电池供电应用需要关注的问题，因此无线电和处理器必须是低功耗的。此外，终端设备系统所需的无线协议是选择无线电设备的重要考虑因素。TI 的 SimpleLink 超低功耗无线 MCU 平台兼具低功耗特点与无线电和 MCU 功能，可极大延长传感器终端节点的电池寿命。此外，CC2650 器件是一款多标准器件，适用于 ZigBee®、6LoWPAN 和 ZigBee RF4CE 远程控制应用而设计。

2.5 电机驱动器

在选择电机驱动器时，驱动电流、电源电压范围、负载电机类型和安全关断功能都是要考虑的因素。DRV8833 包含所有必需的功能。DRV8833 可以驱动多种电机和电感负载，具有 2A 峰值电流以及 2.7V 至 10.8V 的电源电压范围，因此非常适合由四节 AA 电池供电。电池供电的标称驱动电压为 5V。DRV8833 的主要亮点在于能够将电流钳制在由外部电阻器决定的特定水平。DRV8833 具有电流感应功能，允许驱动器监控和调节输出电流，因此电机不会烧坏或浪费电池供应的电量。将 DRV8833 电流限制设置为低于电机堵转电流可以保护电机。

2.6 用户界面

板上的用户界面必须简单且功耗低，但应足够完善以显示了解器件状态所需的所有信息。本设计选择了六个呈环形排列的 RGB LED，通过显示不同的图形和颜色向用户传达当前的状态。图形和颜色的搭配非常实用，因为色盲人士可能无法区分颜色。LP55231 是一款 9 通道 LED 驱动器，其中的两个通道支持先前介绍的 6 RGB LED 实现。如果成本是个问题，则可以使用较少的 LED（仅使用一个 LP55231）。LP55231 的其他重要特性包括高效 LED 驱动器和电荷泵（高达 94%）、200nA 待机电流、自动节电模式、可编程 LED 图形和小型封装 (4mm x 4mm)。由于该参考设计需要实现两个 LED 驱动器，因此选择了 LP55231，因为它允许与触发器输入进行简单同步。

3 系统设计原理

该设计指南使用具有集成低功耗蓝牙 (BLE) 无线器件的 CC2640R2F MCU 来无线锁定和解锁门，同时还可通过监控电池电压指示寿命殆尽状态、限制流过电机的电流（有助于延长电机寿命）以及利用 LED 照明和图形将相关事件传达给用户。该设计通过选择电源拓扑（在本例中为高效降压转换器 TPS62745）和延长低功耗蓝牙连接事件的占空比实现了极长的电池寿命。

各种智能锁系统中通常包含四个主要器件：MCU、低功耗蓝牙无线电、电机驱动器和电源管理。该设计重点介绍了这四个器件（在本例中为三个，因为 CC2640R2F 是具有集成蓝牙无线电的 MCU）以及各自用于确定电池寿命的平均功耗公式。计算出每个器件的平均功耗后，便可以计算出电池的寿命（以毫瓦时为单单位）。要计算电池寿命，需要研究两种不同的电流方案：

- 蓝牙开启并且每 500ms（或者用户选择的任何其他值）发送一次连接事件
 - 锁定或解锁事件向电机驱动器发送信号，指示驱动器通过直流电机提供大约 1A 的电流
- 我们将忽略蓝牙配对的时间，因为这通常意味着有事件将要发生，并且通过电机提供的电流几乎比流入蓝牙器件的电流高两个数量级。本指南提及的事件是指锁定或解锁情形。例如，如果用户解锁门，然后再将其锁定，这被视为两个事件（一个是锁定事件，一个是解锁事件）。

3.1 低功耗 Bluetooth® 和 MCU 的连接间隔和平均功耗

由于该系统拓扑，CC2640R2F 仅使用 3 节中所述的第一种电流方案。图 5 显示了一个典型的电流波形。在蓝牙堆栈中，可以在 10ms 至 4s 的范围内对连接事件之间的周期进行编程。连接事件电流（或开启电流）的脉宽为 5ms。

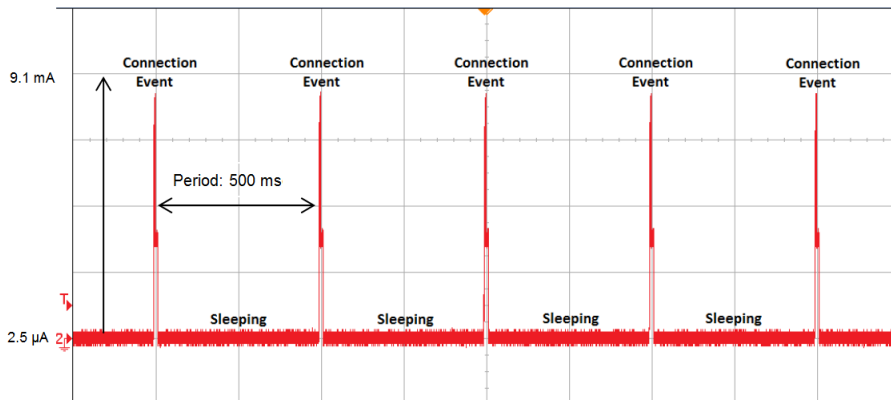


图 5. 低功耗 Bluetooth® 连接期间的电流消耗与时间

影响总估算电池寿命的蓝牙和 MCU 主要参数如下：

- 电源电压： $V_{\text{supply}} = 3\text{V}$
- 开启电流： $I_{\text{on}} = 9.1\text{mA}$
- 关闭电流： $I_{\text{off}} = 2.5\mu\text{A}$
- 开占空比： $D_{\text{on}} = t_{\text{on}}/T = 5\text{ms}/500\text{ms} = 1\%$
- 关占空比： $D_{\text{off}} = 1 - D_{\text{on}} = 99\%$

公式 1 描述了在采用各自数据表所列参数值运行期间消耗的平均功率。

$$P_{BLE} = (V_{supply}) \times (I_{on}) \times (D_{on}) + (V_{supply}) \times (I_{off}) \times (D_{off})$$

$$P_{BLE} = (3V) \times (9.1mA) \times (0.01) + (3V) \times (2.5\mu A) \times (0.99) = 280.4\mu W \quad (1)$$

无论用户无线锁定或解锁门多少次，在电池耗尽之前都会出现图 5 中的电流波形。

3.2 电源拓扑：LDO、降压和升压

智能锁系统可以使用三种不同类型的电源拓扑：LDO、降压和升压。这些稳压器可从输入到输出传输功率。并非所有功率都会传输到输出，而是有一部分的功率损耗。每个器件的效率通过从输入到输出传输的功率进行测量。LDO 和降压拓扑为蓝牙无线电、MCU 和 LED 驱动器供电，而电机驱动器直接由四节 AA 电池供电。升压拓扑完全相反，它为电机驱动器供电，而电池为其他器件供电。四节 AA 电池的电压为 6V，但仅允许短时作业，如碱性电池寿命曲线所示。通常，典型的单节 AA 电池（和 AAA 电池）在其寿命的大部分时间中可提供 1.25V 的电压。以下公式基于此类 5V 四节电池（每节电池具有 1.25V 额定电压）进行计算，因为这可以更精确地测量平均功率损失。LDO 和降压拓扑都采用 4s1p 电池配置，而升压配置采用 2s2p 配置。重申一次，本节中使用的平均功率公式表示的是功率损失，而不是消耗的功率。本节介绍了全部三种拓扑的功率损失公式，便于更好地为智能锁设计选择电源拓扑。

3.2.1 LDO

影响总估算电池寿命的 LDO 变压器主要参数有：

- 输入电压： $V_{in} = 5V$ （四节串联 AA 电池，标称电压）
- 输出电压： $V_{out} = 3V$
- 输出开启电流： $I_{on} = 9.1mA$
- 输出关闭电流： $I_{off} = 5\mu A$
- 接地电流： $I_{gnd} = 35\mu A$ （该值可能会更高，具体取决于 LDO）
- 开占空比： $D_{on} = t_{on}/T = 5ms/500ms = 1\%$
- 关占空比： $D_{off} = 1 - D_{on} = 99\%$

公式 2 描述了运行期间 LDO 的平均功率损失。

$$P_{LDO} = (V_{in} - V_{out}) \times (I_{on}) \times (D_{on}) + (V_{in} - V_{out}) \times (I_{off}) \times (D_{off}) + (V_{in}) \times (I_{gnd})$$

$$P_{LDO} = (5V - 3V) \times (9.1mA) \times (0.01) + (5V - 3V) \times (5\mu A) \times (0.99) + (5V) \times (35\mu A) = 366.9\mu W \quad (2)$$

由于 BLE 器件 (CC2640R2F) 和 LED 驱动器 (LP55231) 的静态电流， I_{off} 电流为 $5\mu A$ 。 I_{gnd} 电流值可摘自任何 LDO 稳压器的数据表。在某些数据表中，该值也可能称为静态电流。 I_{gnd} 是输入电流和输出电流之间的差值，它是区分不同 LDO 的效率的关键特性。

3.2.2 降压

影响总估算电池寿命的降压转换器主要参数有：

- 输出电压： $V_{out} = 3V$
- 输出开启电流： $I_{on} = 9.1mA$
- 输出关闭电流： $I_{off} = 5\mu A$
- 开启电流下的效率： $\eta_{on} = 91\%$ （摘自 TPS62745 数据表）
- 关闭电流下的效率： $\eta_{off} = 80\%$ （摘自 TPS62745 数据表）
- 开占空比： $D_{on} = t_{on}/T = 5msec/500msec = 1\%$
- 关占空比： $D_{off} = 1 - D_{on} = 99\%$

公式 3 描述了运行期间降压转换器的平均功率损失。

$$P_{Buck} = \left(\frac{1}{\eta_{on}} - 1\right) \times (V_{out}) \times (I_{on}) \times (D_{on}) + \left(\frac{1}{\eta_{off}} - 1\right) \times (V_{out}) \times (I_{off}) \times (D_{off})$$

$$P_{Buck} = \left(\frac{1}{0.91} - 1\right) \times (3V) \times (9.1mA) \times (0.01) + \left(\frac{1}{0.8} - 1\right) \times (3V) \times (5\mu A) \times (0.99) = 30.7\mu W \quad (3)$$

用户可能已经看到降压转换器中的平均功率损耗的数量级低于 LDO。降压转换器的最大差异化优势在于两个电流负载下的效率，尤其是轻负载 $5\mu A$ 下的效率。大多数转换器在这些较轻负载下的效率没有这么高。选择 TPS62745 的原因在于这是一款非常高效的降压转换器。大多数降压转换器的效率值位于图 6 中显示的曲线上。

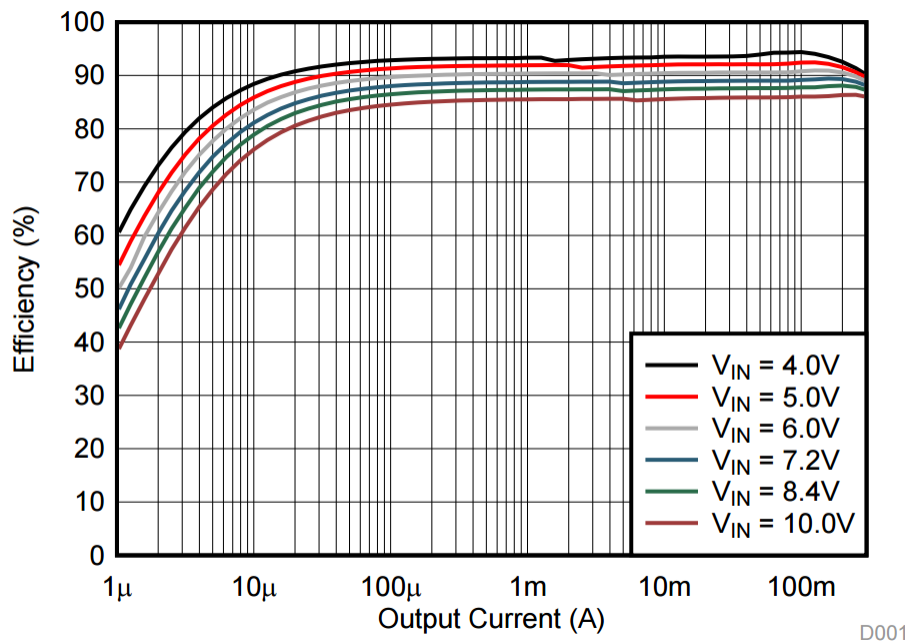


图 6. $V_{out} = 3.3V$ 下的 TPS62745 效率曲线

3.2.3 升压

影响总估算电池寿命的升压转换器主要参数有：

- 输出电压： $V_{out} = 5V$
- 平均输出电机电流 1： $I_{out1} = 600mA$
- 平均输出电机电流 2： $I_{out2} = 168mA$
- I_{out1} 下的效率： $\eta_1 = 90\%$ （该值可能会更低，具体取决于升压器件）
- I_{out2} 下的效率： $\eta_2 = 85\%$ （该值可能会更低，具体取决于升压器件）
- 平均每天的锁定和解锁事件数量： $N = 24$ （该数量可能会有所变化）
- I_{out1} 的开启时间： $t_{on1} = 2$ 秒（电机开始旋转的时间）
- I_{out2} 的开启时间： $t_{on2} = 4$ 秒（制动电机和重新配置其方向的时间）
- 一天中的总周期： $T = (3600) \times (24) = 86,400$ 秒

公式 4 描述了运行期间升压转换器的平均功率损失。

$$P_{Boost} = \left(\frac{1}{\eta_1} - 1\right) \times (V_{out}) \times (I_{out1}) \times \left(\frac{(t_{on1}) \times (N)}{T}\right) + \left(\frac{1}{\eta_2} - 1\right) \times (V_{out}) \times (I_{out2}) \times \left(\frac{(t_{on2}) \times (N)}{T}\right)$$

$$P_{Boost} = \left(\frac{1}{0.9} - 1\right) \times (5 V) \times (600 mA) \times \left(\frac{(2) \times (24)}{86400}\right) + \left(\frac{1}{0.85} - 1\right) \times (5 V) \times (168 mA) \times \left(\frac{(4) \times (24)}{86400}\right) = 349.9 \mu W \quad (4)$$

升压配置在很大程度上取决于每天发生的锁定和解锁事件的数量 (N)，如公式 4 中所示。当锁定和解锁事件的数量降至 12（24 的一半）时，功率损失也会减半。由于事件数量与功率损失成正比（升压配置的不利后果），因此当从 5V 升高至 6V（从 2.5V 升高至 3V）时，在智能电子锁设计中不宜采用升压。

3.2.4 全部三种电源拓扑的功率预算

就目前来看，降压转换器是该设计中电源拓扑的不二之选。因为大部分功率消耗和损失发生在三个主要器件（低功耗蓝牙/MCU、电源稳压器和电机驱动器）中，图 7 显示了这三个主要器件以及三者各自占用的功率百分比。将在下一节中介绍电机驱动器的功率消耗和损失，不过，图中也提供了相应的值以便直观反映问题。饼图中未包含用于反极性保护的 PFET，因为在以下所有情况下它消耗的功率都不足总功率的 1%。所有饼图中的事件数量均为 24。图 7 显示了 500ms 低功耗蓝牙连接周期下的情况；而图 8 显示了 220ms 低功耗蓝牙连接周期下的情况（该连接周期有时用于不同的应用，如 Apple® HomeKit™）。

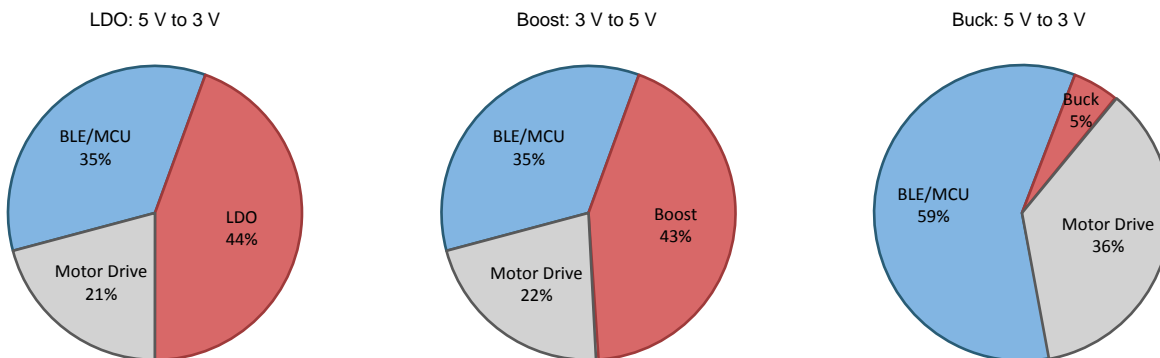


图 7. 500ms 低功耗 Bluetooth® 连接周期下的功耗（24 个锁定和解锁事件）

在 500ms 连接周期下，系统在大多数时间中处于睡眠或关闭状态。与降压配置（仅 6%）相比，LDO 和升压电源配置占据了大部分功耗（在两种情况下都几乎占据一半）。将连接事件周期“增”（此处增加的是占空比）至 220ms（请参阅图 8）得到了类似的结果。在这种情况下，低功耗蓝牙/MCU 的功耗更大。如图 7 和图 8 中所示，目前来看降压配置是最理想的电源拓扑。

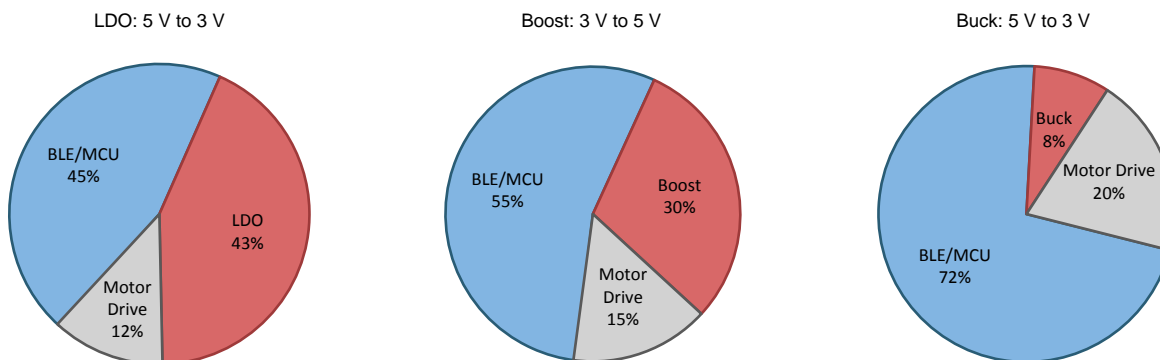


图 8. 220ms 低功耗 Bluetooth® 连接周期下的功耗（24 个锁定和解锁事件）

3.2.5 全部三种电源拓扑的电池寿命与锁定和解锁事件数量

以下各图显示了电池寿命（以月为单位）与锁定和解锁事件每天数量的关系。这些图更直观地表示了为何从延长电池寿命角度考虑降压转换器是电源拓扑的理想之选。以下各图包含了所有器件（低功耗蓝牙/MCU、PFET、电机驱动和电源）的功耗。各图均采用了3.2节中使用的公式。图9显示了500ms低功耗蓝牙连接周期下的电池寿命，而图10显示了220ms低功耗蓝牙连接周期下的电池寿命。

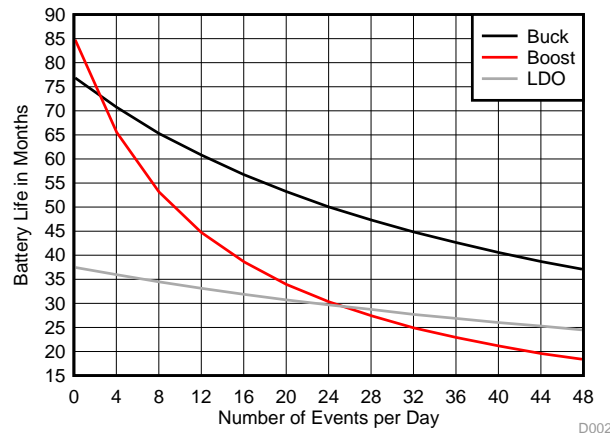


图 9. 事件数量与电池寿命（500ms 低功耗 Bluetooth® 连接）

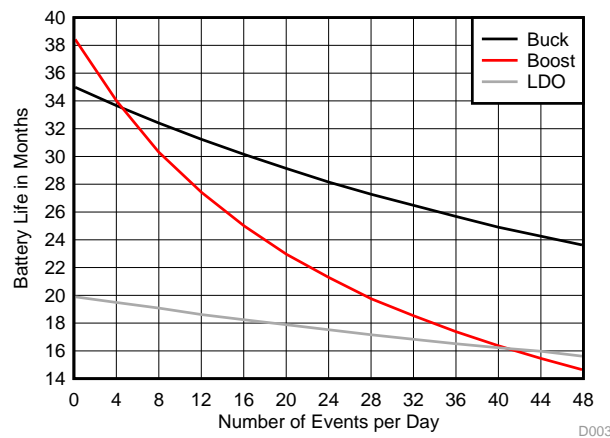


图 10. 事件数量与电池寿命（220ms 低功耗 Bluetooth® 连接）

另一种延长电池寿命的方法是延长低功耗蓝牙连接周期。通过对 CC2640R2F 进行编程可在 10ms 至 4s 的范围内延长连接周期。某些产品（如 Apple HomeKit）具有严格的连接规格。图 11 显示了在 12 个锁定和解锁事件条件下电池寿命与低功耗蓝牙连接周期的关系，而图 12 显示了相同的曲线图，只是 24 个锁定和解锁事件条件下的情况。随着锁定和解锁事件的增加，降压拓扑相对于其他电源拓扑的优势越来越明显，如图 12 中所示。

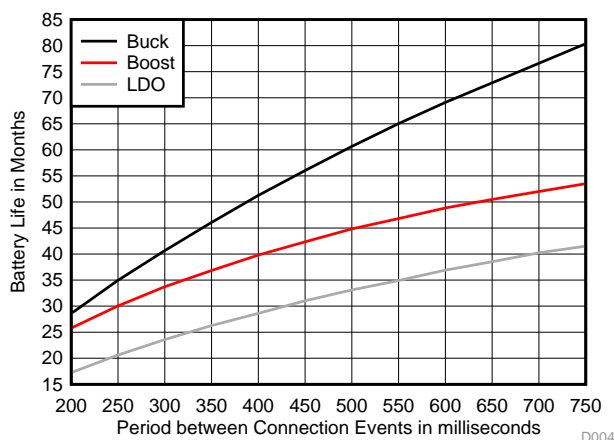


图 11. 低功耗 Bluetooth® 连接周期与电池寿命（12 个事件）

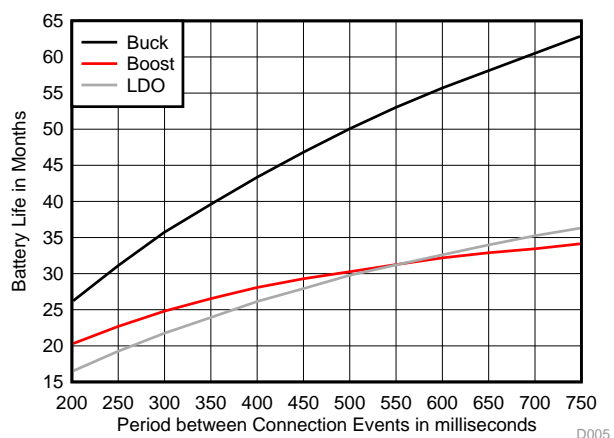


图 12. 低功耗 Bluetooth® 连接周期与电池寿命（24 个事件）

3.3 电机驱动器平均功耗

电机驱动器 IC 中存在大量的功耗来源。要准确评估总功耗，必须考虑所有来源。该设计中的电机驱动器 (DRV8833) 具有一个电流感应引脚，用于限制流经 H 桥和电机的电流。除其他来源之外，感应电阻器也会损耗功率。电机驱动器应用中一共存在四个功耗来源（事实上还存在其他的功耗来源，但这些来源的功耗可忽略不计，因此对整个公式影响很小）。有关计算电机驱动器功耗的更多深入介绍，请参阅《计算电机驱动器的功耗》。

3.3.1 R_{DSon} 功耗

电机驱动器器件中的最大功耗来源是 FET 导通电阻 R_{DSon} 损耗的功率。与升压电源拓扑部分类似，此处使用两种电流方案：电机开始旋转时以及电机惯性滑行和制动时。

影响总估算电池寿命的 R_{DSon} 功耗主要参数如下：

- H 桥 FET 的导通电阻： $R_{DSon} = 360\text{m}\Omega$ （DRV8833 数据表）
- 均方根电流 1： $I_{RMS1} = 447\text{mA}$ （此值不同于平均电流）
- 均方根电流 2： $I_{RMS2} = 140\text{mA}$

公式 5 显示了运行期间通过 FET 导通电阻损耗的功率。

$$P_{Rds1} = (R_{DSon}) \times (I_{RMS1})^2$$

$$P_{Rds1} = (360\text{ m}\Omega) \times (0.447\text{ A})^2 = 71.93\text{ mW}$$

$$P_{Rds2} = (R_{DSon}) \times (I_{RMS2})^2$$

$$P_{Rds2} = (360\text{ m}\Omega) \times (0.14\text{ A})^2 = 7.06\text{ mW} \quad (5)$$

3.3.2 开关损耗

影响总估算电池寿命的开关损耗主要参数如下：

- 电源电压： $V_M = 5\text{V}$
- 平均输出电机电流 1： $I_{M1} = 600\text{mA}$
- 平均输出电机电流 2： $I_{M2} = 168\text{mA}$
- 开关输出频率： $f_{sw} = 50\text{kHz}$ （DRV8833 数据表）
- 输出的上升和下降时间： $t_{rise} + t_{fall} = 340$ 纳秒（DRV8833 数据表）

公式 6 显示了运行期间 H 桥 FET 的开关损耗。

$$P_{SW1} = (1/2) \times (V_M) \times (I_{M1}) \times (f_{SW}) \times (t_{rise} + t_{fall})$$

$$P_{SW1} = (1/2) \times (5\text{ V}) \times (600\text{ mA}) \times (50\text{ kHz}) \times (340\text{ ns}) = 25.5\text{ mW}$$

$$P_{SW2} = (1/2) \times (V_M) \times (I_{M2}) \times (f_{SW}) \times (t_{rise} + t_{fall})$$

$$P_{SW2} = (1/2) \times (5\text{ V}) \times (168\text{ mA}) \times (50\text{ kHz}) \times (340\text{ ns}) = 7.14\text{ mW} \quad (6)$$

3.3.3 工作电源电流

影响总估算电池寿命的工作电源电流主要参数如下：

- 电源电压： $V_M = 5\text{V}$
- 电源电流： $I_M = 1.7\text{mA}$ （DRV8833 数据表）
- 睡眠电流： $I_{MQ} = 1.6\mu\text{A}$ （DRV8833 数据表）

公式 7 显示了通过电机驱动器器件消耗的功率。

$$P_M = (V_M) \times (I_M)$$

$$P_M = (5\text{ V}) \times (1.7\text{ mA}) = 8.5\text{ mW}$$

$$P_{MQ} = (V_M) \times (I_{MQ})$$

$$P_{MQ} = (5\text{ V}) \times (1.6\mu\text{A}) = 8.0\text{ }\mu\text{W} \quad (7)$$

3.3.4 感应电阻器功耗

感应电阻器用于调节电流。最大跳闸电流根据 DRV8833 数据表中的公式而设。影响总估算电池寿命的感应电阻器功耗主要参数如下：

- 感应电阻器: $R_{sen} = 100\text{m}\Omega$
- 均方根电流 1: $I_{RMS1} = 447\text{mA}$ (此值不同于平均电流)
- 均方根电流 2: $I_{RMS2} = 140\text{mA}$

公式 8 显示了运行期间通过感应电阻器损耗的功率。

$$P_{sen1} = (R_{DSon}) \times (I_{RMS1})^2$$

$$P_{sen1} = (100 \text{ m}\Omega) \times (0.447 \text{ A}) = 19.98 \text{ mW}$$

$$P_{sen2} = (R_{DSon}) \times (I_{RMS2})^2$$

$$P_{sen2} = (100 \text{ m}\Omega) \times (0.14 \text{ A}) = 1.96 \text{ mW} \tag{8}$$

3.3.5 总平均功耗

DRV8833 中有两个 H 桥，分别以并联方式与有刷直流电机连接。由于这些 H 桥的存在，整个电机驱动器系统的 R_{DSon} 功耗和开关损耗都会增加一倍。影响总估算电池寿命的总电机驱动器功耗主要参数如下：

- 开启时间 1: $t_{on1} = 2$ 秒 (电机开始旋转的时间)
- 开启时间 2: $t_{on2} = 4$ 秒 (制动电机、使其惯性滑行以及重新配置其方向所耗费的时间)
- 平均每天的锁定和解锁事件数量: $N = 24$ (该数量可能会有所变化)
- 一天中的总周期: $T = (3600) \times (24) = 86,400$ 秒

公式 9 显示了运行期间整个电机驱动器中的平均功耗。

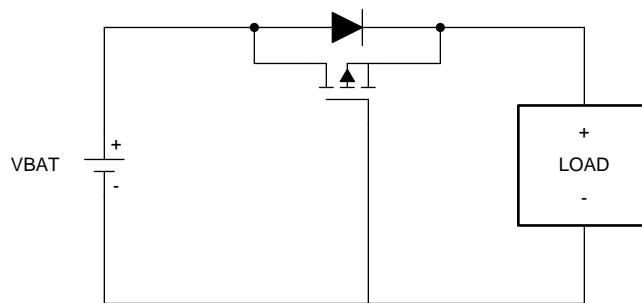
$$P_{MD} = (2 \times P_{Rds1} + 2 \times P_{SW1} + P_M + P_{sen1}) \times \left(\frac{t_{on1} \times N}{T}\right) + (2 \times P_{Rds2} + 2 \times P_{SW2} + P_M + P_{sen2}) \times \left(\frac{t_{on2} \times N}{T}\right) + P_{MQ}$$

$$P_{MD} = (2 \times 71.93 \text{ mW} + 2 \times 25.5 \text{ mW} + 8.5 \text{ mW} + 19.98 \text{ mW}) \times \left(\frac{(2) \times (24)}{86400}\right) + (2 \times 7.06 \text{ mW} + 2 \times 7.14 \text{ mW} + 8.5 \text{ mW} + 1.99 \text{ mW}) \times \left(\frac{(4) \times (24)}{86400}\right) + 8 \mu\text{W} = 175.26 \mu\text{W} \tag{9}$$

电机驱动器器件的功耗几乎与锁定和解锁事件数量成正比。除了使用前述的所有公式之外，还可使用 3.6 节中电池寿命与事件数量的坐标图快速计算估算电池寿命 (以月为单位)。8 节中介绍了实验平均电流值。

3.4 PFET 的反极性保护功耗

任何由电池供电的系统都必须具有某种保护措施，以防止装反电池。一旦电池装反，未配备反极性保护电路的内部电子元件可能会受到严重损坏。为实现超低功耗，该设计没有选用二极管，而是采用了具有极低开启电阻和压降的 PFET。之所以使用 PFET (而不是 NFET)，是为了防止损坏接地平面。NFET 位于接地回路中，而 PFET 位于电源路径中。图 13 显示了整个电路 PFET 的连线情况。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 13. 反极性保护 PFET 配置

在图 13 中的电路中，PFET 的体二极管沿着正常电流的方向。当电池安装错误时，PFET 的栅极电压为高电平，从而阻止其打开。当电池安装正确时，PFET 的栅极电压将变为低电平，其通道会将二极管短路。

选择 PFET 时需要考虑的最重要的参数是 R_{DSon} 的值（越低越好）。栅极电荷的值并不重要，因为该应用不会将 PFET 用作开关组件，因此没有开关损耗。影响总估算电池寿命的 PFET 主要参数如下：

- PFET 的开启电阻： $R_{DSon} = 18\text{m}\Omega$ （CSD25310Q2 数据表）
- 流经 PFET 的输出开启电流： $I_{on} = 6\text{mA}$ （从电池到降压转换器的输入电流）
- 流经 PFET 的输出关闭电流： $I_{off} = 3.75\mu\text{A}$ （从电池到降压转换器的输入电流）

其余的参数与先前介绍的参数相同，如下所示：

- 开占空比： $D_{on} = t_{on}/T = 5\text{ms}/500\text{ms} = 1\%$
- 关占空比： $D_{off} = 1 - D_{on} = 99\%$
- 平均输出电机电流 1： $I_{out1} = 600\text{mA}$
- 平均输出电机电流 2： $I_{out2} = 168\text{mA}$
- 开启时间 1： $t_{on1} = 2$ 秒（电机开始旋转的时间）
- 开启时间 2： $t_{on2} = 4$ 秒（制动电机、使其惯性滑行以及重新配置其方向所耗费的时间）
- 平均每天的锁定和解锁事件数量： $N = 24$ （该数量可能会有所变化）
- 一天中的总周期： $T = (3600) \times (24) = 86,400$ 秒

公式 10 显示了运行期间 PFET 的平均功耗。

$$P_{PFET} = (R_{DSon}) \times (I_{on})^2 \times (D_{on}) + (R_{DSon}) \times (I_{off})^2 \times (D_{off}) + (R_{DSon}) \times (I_{out1})^2 \times \left(\frac{t_{on1} \times (N)}{T}\right) + (R_{DSon}) \times (I_{out2})^2 \times \left(\frac{t_{on2} \times (N)}{T}\right)$$

$$P_{PFET} = (18\text{ m}\Omega) \times (6\text{ mA})^2 \times (0.01) + (18\text{ m}\Omega) \times (3.75\mu\text{A})^2 \times (0.99) + (18\text{ m}\Omega) \times (600\text{ mA})^2 \times \left(\frac{(2) \times (24)}{86400}\right) + (18\text{ m}\Omega) \times (168\text{ mA})^2 \times \left(\frac{(4) \times (24)}{86400}\right) = 4.17\ \mu\text{W} \quad (10)$$

从电池流入的电流 (I_{on} 和 I_{off}) 的计算方法如下：利用降压转换器的效率反推出输入功率，进而得出输入电流（标称电池电压为 5V）。通过观察公式 10 中的值，可以发现 $4.17\mu\text{W}$ 低于该设计所消耗和损耗总功率的 1%。因此，PFET 对总体功率预算和电池寿命的影响微不足道。

3.5 系统总功耗

要计算系统总平均功耗，只需将前面各节中所述的每个器件（去掉 LDO 和升压）的所有平均功率值相加。

公式 11 反映了这一加法运算，并显示了运行期间系统的总平均功耗。

$$P_{avg} = P_{BLE} + P_{Buck} + P_{MD} + P_{PFET}$$

$$P_{avg} = 280.4\ \mu\text{W} + 30.7\ \mu\text{W} + 175.26\ \mu\text{W} + 4.17\ \mu\text{W} = 490.53\ \mu\text{W} \text{ (total average power)} \quad (11)$$

如本设计指南开篇所述，这些公式仅考虑了各种智能锁设计中的核心组件。如果该系统中添加了更多外设，则需使用与前述方法类似的方法计算每个附加外设消耗的平均功率。例如，确定占空比、计算每个外设的开启和关闭电流消耗等。

3.6 理论估算电池寿命

大多数电池以毫安时 (mAh) 为单位表示电池容量。mAh 可用于衡量电流容量，实际上并不是能量容量（不过两者紧密相关）。衡量电池能量容量的单位更适合使用毫瓦时 (mWh)。要将电池的 mAh 容量转换为 mWh，请首先查看电池数据表。

以 AA Energizer® 电池为例，如图 14 中所示。

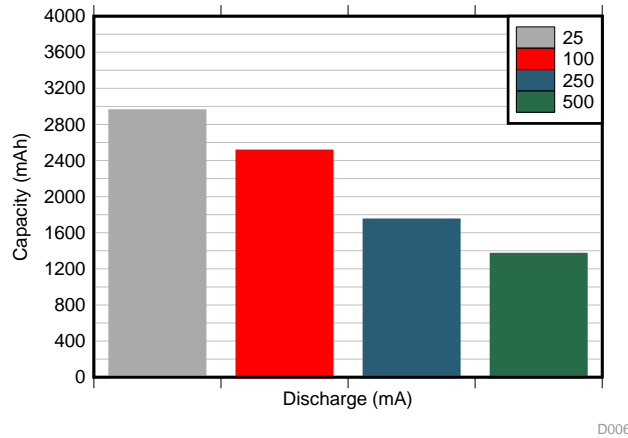


图 14. Energizer® 电池的 mAh 容量

首先，计算智能锁系统中的平均放电电流。在本例中，平均负载电流远小于 25mA，因此查看该值条件下的容量（这是电池数据表中的最低值）。然后，使用这些参数得出计算电池总能量容量所需的值：

- 一节电池的电池电流容量： $I_{\text{energy}} = 3000\text{mAh}$ （碱性 AA 电池数据表）
- 以并联方式配置的电池数量： $Batt_{\parallel} = 1$ （全部四节电池以串联方式连接：4s1p）
- 以串联方式配置的电池数量： $Batt_{\text{series}} = 4$
- 一节电池的起始电压： $V_{\text{batt}} = 1.5\text{V}$ （一节碱性 AA 电池）

要将电池电流容量 mAh 转换为 mWh，请参阅公式 12。

$$E_{\text{total}} = (I_{\text{energy}}) \times (Batt_{\parallel}) \times (V_{\text{batt}}) \times (Batt_{\text{series}})$$

$$E_{\text{total}} = (3,000\text{mA} - \text{h}) \times (1) \times (1.5\text{V}) \times (4) = 18,000\text{mW} - \text{hours} \quad (12)$$

最后，通过利用公式 11 得出系统的平均功耗以及利用公式 12 得出电池的总能量容量，可以计算得出电池寿命（以小时为单位）。

公式 13 显示了运行期间的电池寿命（月数）。

$$\text{Months} = \left(\frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{avg}}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hours}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ month}}{30.5 \text{ days}} \right)$$

$$\text{Months} = \left(\frac{18,000 \text{ mW} - \text{hours}}{0.49053\text{mW}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hours}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ month}}{30.5 \text{ days}} \right) = 50.1 \text{ months of battery life (5 years)} \quad (13)$$

最后的图显示了仅使用降压拓扑（本参考设计选用的电源拓扑）时的电池寿命（以月为单位）与每天的锁定和解锁事件数量。图 15 中显示的图在同一幅图中显示了四种不同的低功耗蓝牙连接事件周期：220ms、360ms、500ms 和 640ms。该 MATLAB 图中考虑了所有器件（低功耗蓝牙/MCU、PFET、电机驱动和电源）的功耗。各图均采用了 3 节中使用的公式。

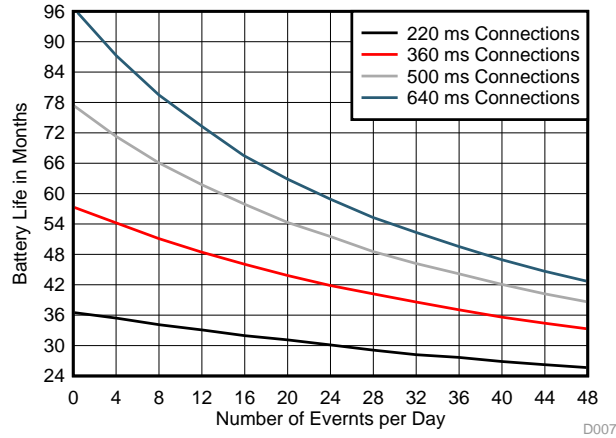


图 15. 使用降压转换器时的事件数量与电池寿命

3.7 固件控制

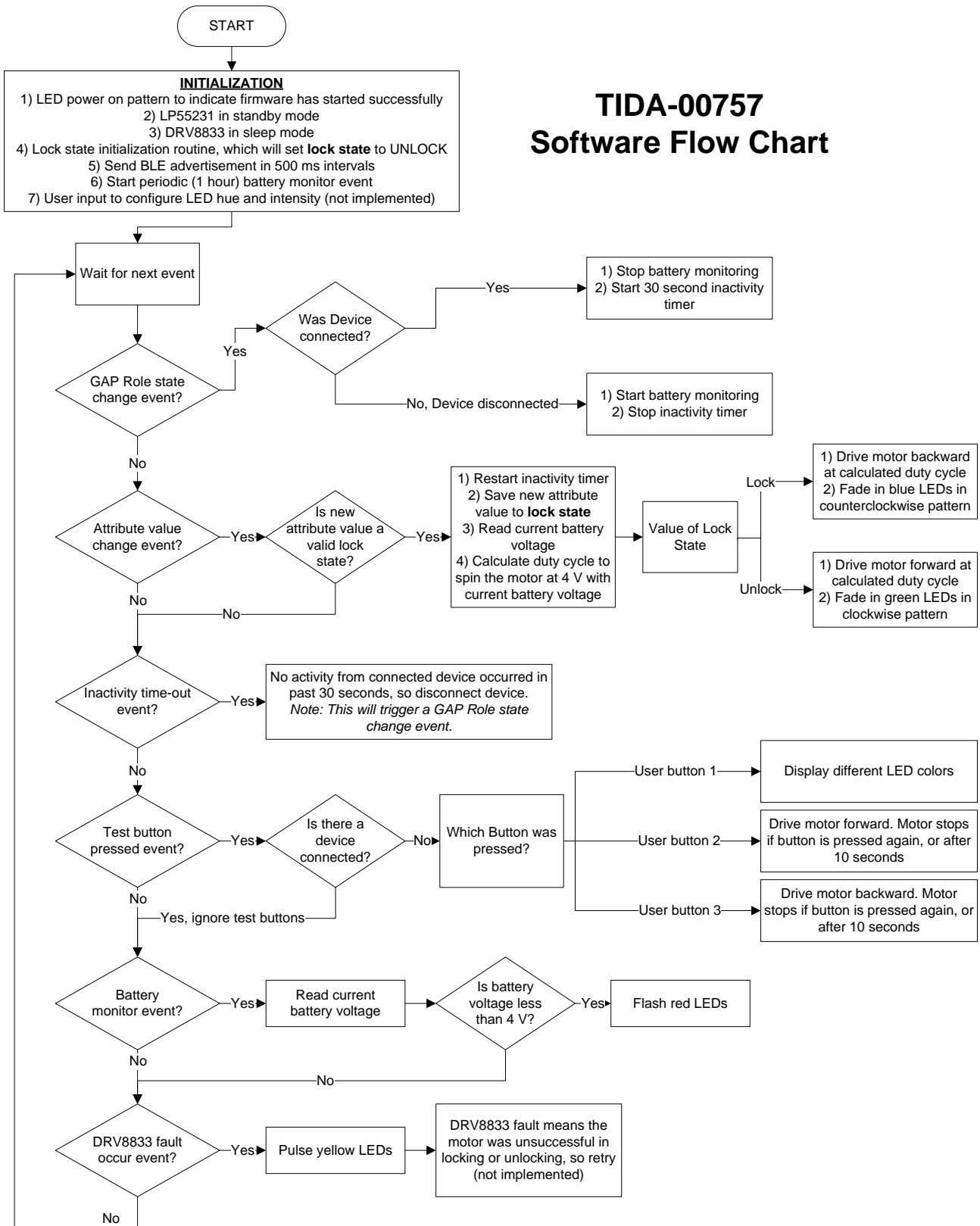


图 16. 软件流程图

图 16 中显示的该流程图介绍了 CC2640R2F 在此 TI 设计中的工作原理。CC2640R2F 一开始将 LP55231 和 DRV8833 器件初始化并配置到其最低功耗状态。然后，CC2640R2F 以 500ms 的间隔进行广播。CC2640R2F 还在其等待器件连接时以 1 小时的间隔监测电池电压。CC2640R2F 的主循环基于事件进行。CC2640R2F 有时需要传输广播数据包或检查电池电压，除此之外的大部分时间中，该器件均处于待机模式。当触发某个事件时，CC2640R2F 将被唤醒并根据事件源执行功能。

CC2640R2F 具有六个事件触发器：

- **GAP 角色状态更改事件：**此事件在 GAP 角色状态更改时（例如，器件连接至 CC2640R2F 或与其断开连接）发生。当器件连接至 CC2640R2F 时，电流负载更改。基于电压的电池监控无法精确地表示电池电压，因为测量得到的电压是电池阻抗和负载电流的函数。此外，为了安全和电池节电，不得无限期地连接器件。在该固件中，器件会在处于不活动状态 30 秒后自动断开。当器件连接时，电池监控器将停止工作，不活动计时器立即启动。当器件（因用户操作或不活动超时）断开连接时，电池监控将继续工作。
- **属性值更改事件：**此事件在用户更改锁定状态时发生。CC2640R2F 一开始首先验证新值是否有效。如果新值无效，则丢弃该值，不执行任何操作。如果新值有效，则保存锁定状态并且重新启动不活动计时器。接下来，将读取电池电压，以计算在 4V 电压下运行电机所需的合适 PWM 占空比。如果新值为锁定，则电机驱动器后退 1.8 秒，同时蓝色 LED 沿逆时针方向转动 2 秒。如果新值为解锁，则电机驱动器前进 1.8 秒，同时绿色 LED 沿顺时针方向转动 2 秒。
- **不活动超时事件：**如果 30 秒不活动超时失效，CC2640R2F 将断开与器件的连接并返回到广播状态。当该事件发生时，CC2640R2F 也会触发 GAP 角色状态更改事件。
- **测试按钮按下事件：**测试按钮仅在器件未连接时有效。如果器件已连接，测试按钮被忽略，因此器件不影响用户操作。如果按下用户按钮 1，CC2640R2F 将显示不同的 LED 颜色。如果按下用户按钮 2，CC2640R2F 将驱动电机前进长达 10 秒或者直到再次按下用户按钮 2。如果按下用户按钮 3，CC2640R2F 将驱动电机后退长达 10 秒或者直到再次按下用户按钮 3。
- **电池监控事件：**该事件是 1 小时电池监控周期性事件。C2640 读取当前电池电压。如果电池电压低于 4V，LED 将呈红色闪烁。
- **DRV8833 故障发生事件：**如果 DRV8833 故障引脚指示运行电机时发生了错误，LED 将呈黄色脉动闪烁。固件的当前实施仅显示发生故障的直观指示。固件经过修改，可用于重新运行电机，直到能够成功锁定或解锁，而不发生故障。此外，固件包含 GATT 服务器以及以下服务：
 - GAP
 - GATT
 - 器件信息
 - 锁定

器件信息服务与官方 SIG 配置文件保持一致。锁定配置文件是具有 128 位唯一 UUID 的定制配置文件。配置文件使器件能够配置 TIDA-00757 TI 参考设计的锁定状态。表 2 中显示了 TIDA-00757 的完整属性表。

表 2. TIDA-00757 属性表

句柄 (十六进制)	句柄 (十进制)	类型 (十六进制)	类型 (文本)	十六进制值	GATT 服务器权限	说明 和值 (文本)
0x1	1	0x2800	GATT 主服务声明	0x1800	R	通用访问服务
0x2	2	0x2803	GATT 特征声明	02:03:00:00:2A	R	器件名称
0x3	3	0x2A00	器件名称	—	R	—
0x4	4	0x2803	GATT 特征声明	02:05:00:01:2A	R	外观
0x5	5	0x2A01	外观	—	R	—
0x6	6	0x2803	GATT 特征声明	02:07:00:04:2A	R	外设首选连接参数
0x7	7	0x2A04	外设首选连接参数	—	R	—
0x8	8	0x2800	GATT 主服务声明	0x1801	R	通用属性服务
0x9	9	0x2800	GATT 主服务声明	0x180A	R	设备信息服务
0xA	10	0x2803	GATT 特征声明	02:0B:00:23:2A	R	系统 ID
0xB	11	0x2A23	系统 ID	8B:EF:AD:00:00:84:BE:C4	R	—
0xC	12	0x2803	GATT 特征声明	02:0D:00:24:2A	R	型号字符串
0xD	13	0x2A24	型号字符串	54:49:44:41:2D:30:30:37:35:37:20:54:49:20:44:65:73:69:67:6E	R	TIDA-00757 TI 参考设计
0xE	14	0x2803	GATT 特征声明	02:0F:00:25:2A	R	序列号字符串
0xF	15	0x2A25	序列号字符串	53:65:72:69:61:6C:20:4E:75:6D:62:65:72	R	序列号
0x10	16	0x2803	GATT 特征声明	02:11:00:26:2A	R	固件版本字符串
0x11	17	0x2A26	固件版本字符串	46:69:72:6D:77:61:72:65:20:52:65:76:3A:20:31:2E:30	R	固件版本: 1.0
0x12	18	0x2803	GATT 特征声明	02:13:00:27:2A	R	硬件版本字符串
0x13	19	0x2A27	硬件版本字符串	48:61:72:64:77:61:72:65:20:52:65:76:3A:20:31:2E:30	R	硬件版本: 1.0
0x14	20	0x2803	GATT 特征声明	02:15:00:28:2A	R	软件版本字符串
0x15	21	0x2A28	软件版本字符串	53:6F:66:74:77:61:72:65:20:52:65:76:3A:20:31:2E:30	R	软件版本: 1.0
0x16	22	0x2803	GATT 特征声明	02:17:00:29:2A	R	制造商名称字符串
0x17	23	0x2A29	制造商名称字符串	54:65:78:61:73:20:49:6E:73:74:72:75:6D:65:6E:74:73	R	德州仪器 (TI)
0x18	24	0x2803	GATT 特征声明	02:19:00:2A:2A	R	IEEE 11073-20601 法规认证数据列表
0x19	25	0x2A2A	IEEE 11073-20601 法规认证数据列表	FE:00:65:78:70:65:72:69:6D:65:6E:74:61:6C	R	实验
0x1A	26	0x2803	GATT 特征声明	02:1B:00:50:2A	R	PnP ID
0x1B	27	0x2A50	PnP ID	01:0D:00:00:00:10:01	R	—
0x1C	28	0x2800	GATT 主服务声明	F0007570-0451-4000-B000-000000000000	R	锁定服务

表 2. TIDA-00757 属性表 (continued)

句柄 (十六进制)	句柄 (十进制)	类型 (十六进制)	类型 (文本)	十六进制值	GATT 服务器权限	说明 和值 (文本)
0x1D	29	0x2803	GATT 特征声明	0E:1E:00:00:00:00: 00:00:00:00:B0:00: 40:51:04:71:75:00: F0	R	锁定状态
0x1E	30	0x7571	锁定状态配置	00	RW	写入 0 解锁, 写入 1 锁定
0x1F	31	0x2901	特性用户 说明	4C:6F:63:6B:20:53: :74:61:74:65:20:28: 30:3A:55:6E:6C:6F: :63:6B:2C:20:31:3 A: 4C:6F:63:6B:29	R	锁定状态 (0: 解锁, 1: 锁定)

4 框图

图 17 显示了 TIDA-00757 框图。

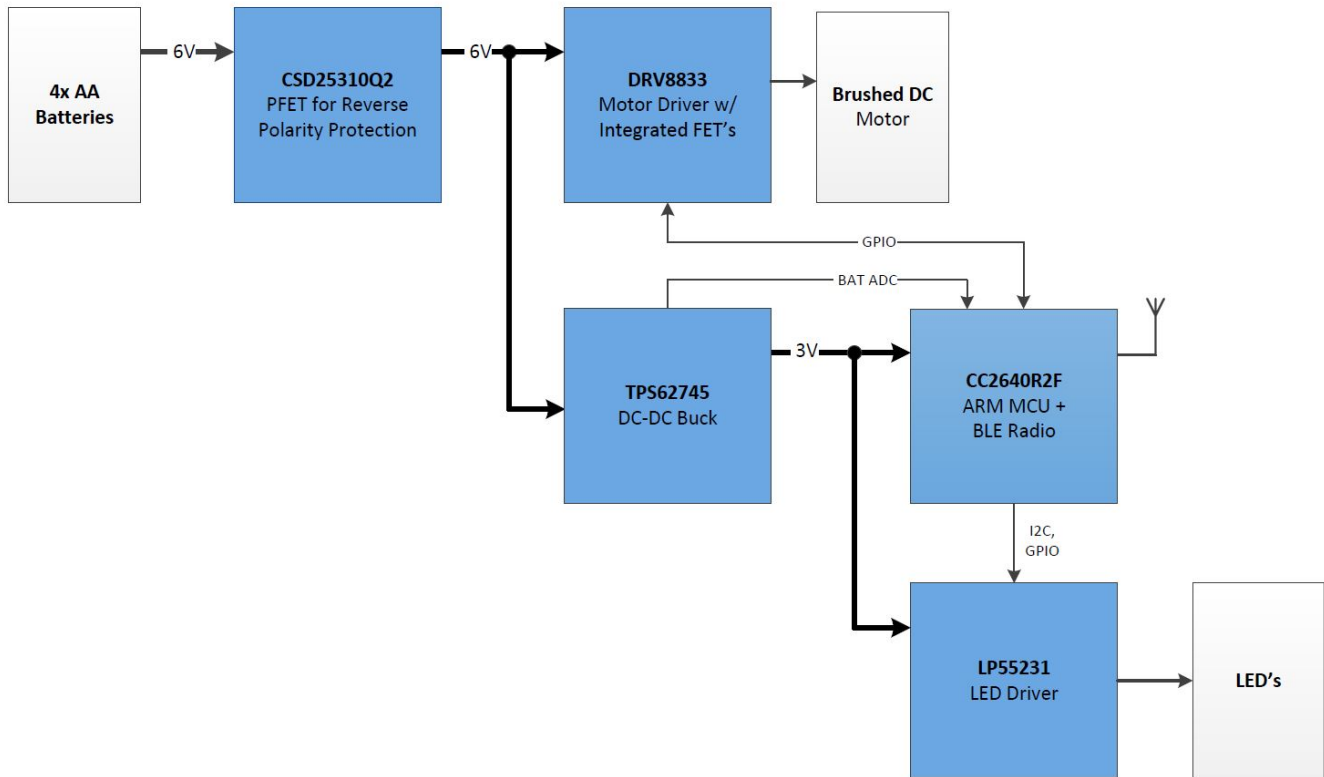


图 17. TIDA-00757 框图

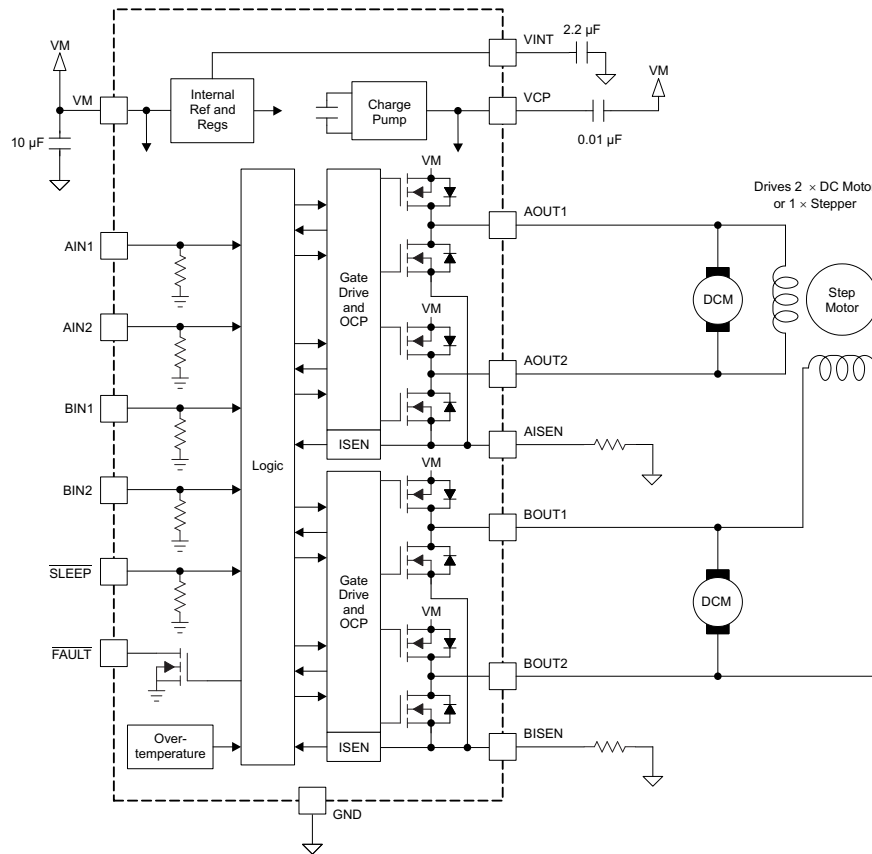
4.1 主要产品

此 TI 参考设计 采用 以下产品：

- DRV8833 (节 4.1.1)：具有电机电流控制功能和 360mΩ 低 R_{DSon} 的双 H 桥电机驱动器
- CC2640R2F (节 4.1.2)：具有超低功耗无线 MCU (32 位 Arm Cortex-M3 处理器) 的 2.4GHz 低功耗蓝牙
- TPS62745 (节 4.1.3)：具有 16 种可选输出电压 (1.8V 至 3.3V) 和 90% 效率 (负载电流 $\geq 15\mu A$ 时) 的超低 IQ 降压转换器
- LP55231 (节 4.1.4)：用于为移动设备制造灯光效果的九通道 LED 驱动器
- CSD25310Q2 (节 4.1.5)：具有 $\pm 8V$ 栅极-源极电压和 19mΩ 低 R_{DSon} 的低成本功率 PFET
- TPD1E10B06 (节 4.1.6)：采用 0402 封装且具有 10pF 电容和 6V 击穿电压的单通道 ESD

4.1.1 DRV8833

该器件具有两个 H 桥驱动器，能够驱动两部直流刷式电机、一部双极步进电机、多个电磁阀或其他电感负载 (请参阅图 18)。每个 H 桥的输出驱动器模块由配置为 H 桥的 N 沟道功率 MOSFET 组成，用于驱动电机绕组。每个 H 桥均具备调节或限制绕组电流的电路。该器件利用故障输出引脚实现内部关断功能，提供过流保护、短路保护、欠压锁定和过热保护。另外，还提供了一种低功耗休眠模式。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

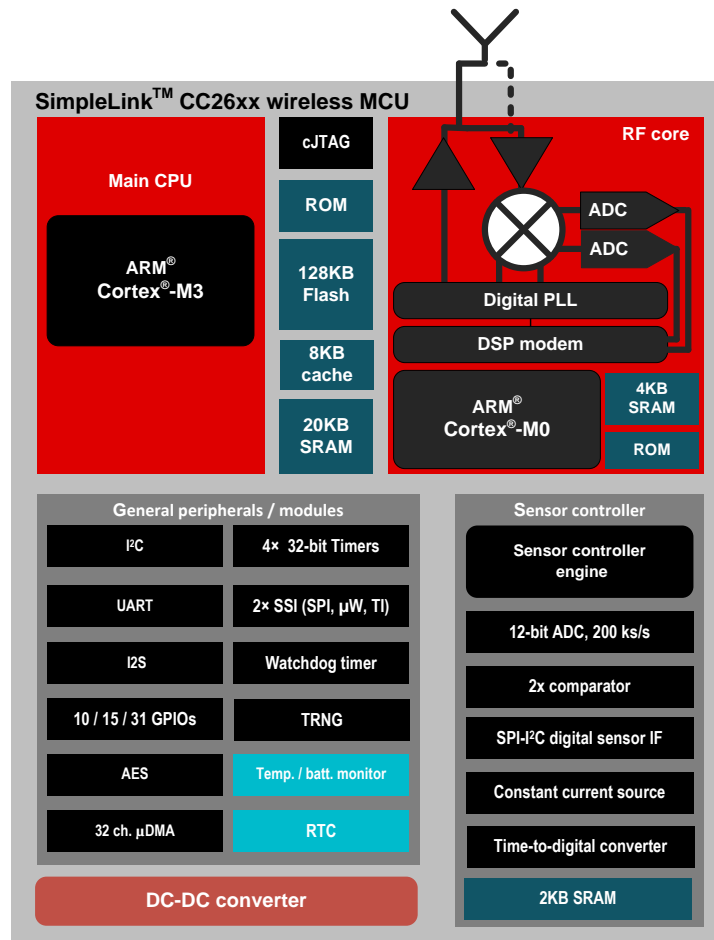
图 18. DRV8833 框图

DRV8833 特性:

- 双 H 桥电流控制电机驱动器
 - 可以驱动两部直流电机或一部步进电机
 - 低 MOSFET 导通电阻: HS + LS 360mΩ
- 输出电流 ($V_M = 5V, 25^\circ C$)
 - 每个 H 桥的 RMS 电流为 1.5A, 峰值电流为 2A (提供 PWP 和 RTY 封装选项)
 - 每个 H 桥的 RMS 电流为 500mA, 峰值电流为 2A (PW 封装)
- 可以将输出并联, 以实现:
 - 3A RMS 电流、4A 峰值电流 (PWP 和 RTY)
 - 1A RMS 电流、4A 峰值电流 (PW)
- 宽电源电压范围: 2.7V 至 10.8V
- PWM 绕组电流调节和电流限制
- 耐热增强型表面贴装封装

4.1.2 CC2640R2F

CC2640R2F 器件是一款面向蓝牙应用的无线 MCU。此器件属于 CC26xx 系列，是一款具有成本效益的超低功耗 2.4GHz 射频器件。它具有极低的有源 RF 和 MCU 电流以及低功耗模式流耗，可确保卓越的电池使用寿命，适合小型纽扣电池供电以及在能源采集型应用中 使用而设计。CC2640R2F 器件包含一个以 48MHz 频率运行的 32 位 Arm Cortex-M3 处理器作为主处理器，并具有丰富的外设功能集，其中包括一个独特的超低功耗传感器控制器（参阅 图 19）。此传感器控制器非常适合连接外部传感器，还适用于在系统其余部分处于睡眠模式的情况下自主收集模拟和数字数据。因此，CC2640R2F 器件非常适合 需要持久电池使用寿命、小尺寸以及易用性的各类应用。低功耗蓝牙控制器嵌入在 ROM 中，并且在 Arm Cortex-M0 处理器上单独运行。此架构可改善整体系统性能和功耗，并释放闪存以供应用使用。可从 [Ti.com](http://ti.com) 免费获取蓝牙栈。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 19. CC2640R2F 方框图

CC2640R2F 特性:

- 微控制器
 - 功能强大的 Arm Cortex-M3
 - EEMBC CoreMark®评分: 142
 - 高达 48MHz 的时钟速度
 - 128KB 系统内可编程闪存
 - 8KB 缓存 SRAM

- 20KB 超低泄漏 SRAM
- 2 引脚 cJTAG 和 JTAG 调试
- 支持无线 (OTA) 升级
- 超低功耗传感器控制器
 - 可独立于系统其余部分自主运行
 - 16 位架构
 - 存储代码和数据的 2KB 超低泄漏 SRAM
- 具有高效的代码空间, ROM 中装载驱动程序、低功耗蓝牙控制器和引导加载程序
- 符合 RoHS 标准的封装
 - 4mm × 4mm RSM VQFN32 封装 (10 个 GPIO)
 - 5mm × 5mm RHB VQFN32 封装 (15 个 GPIO)
 - 7mm × 7mm RGZ VQFN48 (31 GPIO)
- 外设
 - 所有数字外设引脚均可连接至任何 GPIO
 - 四个通用计时器模块 (8 个 16 位计时器或 4 个 32 位计时器, 均采用 PWM)
 - 12 位 ADC、200ksps、8 通道模拟多路复用器
 - 持续时间比较器
 - 超低功耗模拟比较器
 - 可编程电流源
 - UART
 - 2 个同步串行接口 (SSI) (SPI、MICROWIRE 和 TI)
 - I²C
 - I2S
 - 实时时钟 (RTC)
 - AES-128 安全模块
 - 真随机数发生器 (TRNG)
 - 10、15 或 31 个 GPIO, 具体取决于所用封装选项
 - 支持 8 个电容式感应按钮
 - 集成温度传感器
- 外部系统
 - 片上内部直流/直流转换器
 - 极少的外部组件
 - 与 SimpleLink CC2590 和 CC2592 范围扩展器无缝集成
 - 与采用 4mm × 4mm 和 5mm × 5mm VQFN 封装的 SimpleLink CC13xx 引脚兼容
- 低功耗
 - 宽电源电压范围
 - 正常工作电压: 1.8 至 3.8V
 - 外部稳压器模式: 1.7 至 1.95V

- 有源模式 RX: 5.9mA
- 有源模式 TX (0dBm): 6.1mA
- 有源模式 TX (+5dBm): 9.1mA
- 有源模式 MCU: 61 μ A/MHz
- 有源模式 MCU: 48.5 CoreMark/mA
- 有源模式传感器控制器: 8.2 μ A/MHz
- 待机电流: 1 μ A (RTC 运行, RAM/CPU 保持)
- 关断电流: 100nA (发生外部事件时唤醒)
- 射频部分
 - 与低功耗蓝牙 4.1 规范兼容的 2.4GHz 射频收发器
 - 出色的接收器灵敏度 (对于低功耗蓝牙为 -97dBm)、可选择性和阻断性能
 - 适用于低功耗蓝牙的 102dB 链路预算
 - 高达 +5dBm 的可编程输出功率
 - 单端或差分 RF 接口
 - 适用于符合各项全球射频规范的系统
 - ETSI EN 300 328 (欧洲)
 - EN 300 440 2 类 (欧洲)
 - FCC CFR47 第 15 部分 (美国)
 - ARIB STD-T66 (日本)
- 工具和开发环境
 - 功能全面的低成本开发套件
 - 针对不同 RF 配置的多种参考设计
 - 数据包监听器 PC 软件
 - Sensor Controller Studio:
 - SmartRF™Studio
 - SmartRF Flash Programmer 2
 - 用于 Arm 的 IAR 嵌入式工作平台
 - Code Composer Studio™

4.1.3 TPS62745

TPS62745 是一款高效超低功耗同步降压转换器，针对低功耗无线应用进行了优化。该器件仅消耗 400nA 的静态电流即可提供稳定的输出电压。该器件可由两节可再充电的锂离子电池或以锂为主要成分的化学电池（如 Li-SOCl₂、Li-SO₂、Li-MnO₂）供电，也可由四到六节碱性电池供电。输入电压范围高达 10V，因此也允许由 USB 端口和薄膜太阳能模块供电。输出电压通过四个 VSEL 引脚设置，TPS62745 的电压范围为 1.8V 至 3.3V，TPS627451 的电压范围为 1.3V 至 2.8V。TPS62745 通过一个小型输出电容实现低输出纹波电压和低噪声。由引脚 EN_VIN_SW 控制的内部输入电压开关将电源电压连接至引脚 VIN_SW。此开关专用于外部分压器，按比例降低外部 ADC 的输入电压。当电源电压低于欠压锁定阈值时，此开关会自动断开。TPS62745 采用小型 12 引脚 3mm × 2mm WSON 封装。

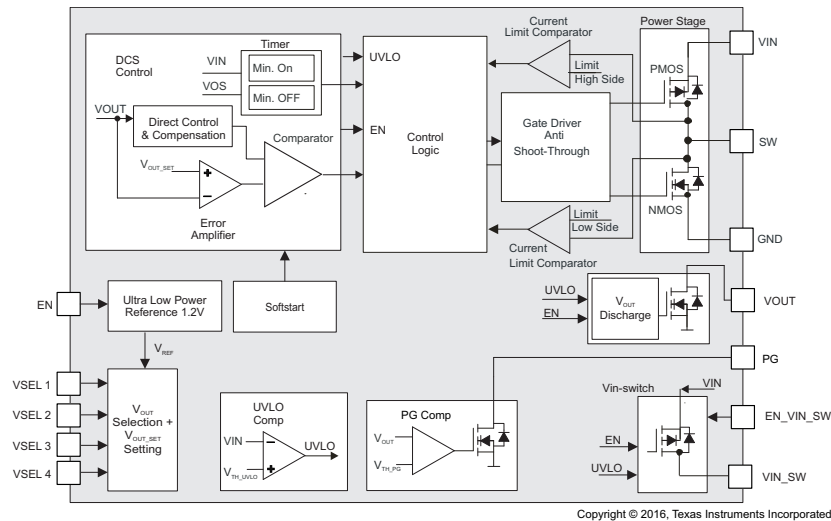


图 20. TPS62745 框图

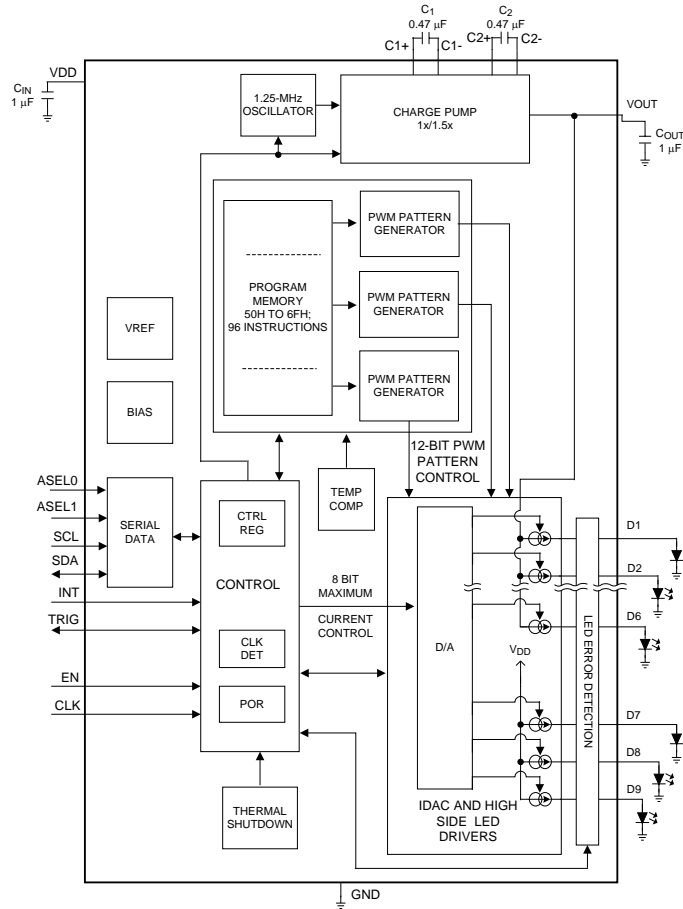
TPS62745 特性：

- 3.3V 至 10V 的输入电压范围
- 400nA 典型静态电流
- 负载电流大于 15 μ A 时的效率高达 90%
- 高达 300mA 的输出电流
- 射频友好型 DCS-Control™
- 低输出纹波电压
- 16 种可选输出电压：
 - 1.8V 至 3.3V (TPS62745)
 - 1.3V 至 2.8V (TPS627451)
- 集成输入电压开关
- VOUT 集成放电功能
- 开漏电源正常输出
- 采用微型 3.3 μ H 或 4.7 μ H 电感器工作
- 小型 3mm × 2mm WSON 封装

4.1.4 LP55231

LP55231 是一款九通道 LED 驱动器，用于为移动设备制造灯光效果。采用高效的电荷泵，支持在锂离子电池电压范围内驱动 LED。该器件配有内部程序存储器，可在不使用处理器控制的情况下运行。

LP55231 有一个 I²C 兼容控制接口并配有四个引脚可选地址。INT 引脚可用于在灯光序列结束时通知处理器（中断功能）。另外，该器件具有一个触发输入接口，可实现多个 LP55231 器件之间的同步。根据 LED 正向电压要求自主选择最佳电荷泵增益，可在宽运行电压范围内保持出色的效率。当 LED 输出未激活时，该器件能够自动进入节电模式，从而将空闲电流消耗降至 10 μ A（典型值）。仅需四个小型的低成本陶瓷电容。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 21. LP55231 框图

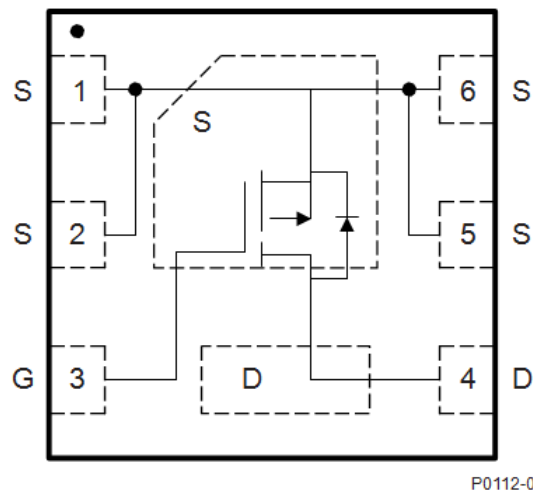
LP55231 特性：

- 3 个独立的程序执行引擎，9 个满量程电流为 25.5mA 的可编程输出，8 位电流设置分辨率和 12 位 PWM 控制分辨率
- 自适应高效 1x/1.5x 分数型电荷泵 - 效率高达 94%
- 效率高达 93% 的 LED 驱动器
- 具有软启动以及过流和短路保护功能的电荷泵
- 内置 LED 测试
- 200nA 典型待机电流
- 自动节电模式；I_{VDD} = 10 μ A（典型值）

- 两线制 I²C 兼容控制接口
- 灵活的指令集
- 大容量 SRAM 程序存储器
- 小型应用电路
- 源极（高侧）驱动器
- 架构支持颜色控制

4.1.5 CSD25310Q2

这款 19.9mΩ、-20V P 通道器件经过设计，适用于以超薄且具有出色散热特性的超小型封装提供最低的导通电阻和栅极电荷。该器件将低导通电阻与 SON 2mm × 2mm 塑料封装的极小封装尺寸融为一体，堪称电池供电型空间受限应用的理想之选。



P0112-01

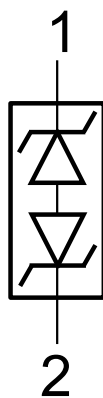
图 22. CSD25310Q2 器件配置

CSD25310Q2 特性:

- 超低 Q_g 和 Q_{gd}
- 低导通电阻
- 低热阻
- 无铅
- 符合 RoHS
- 无卤素
- SON 2mm × 2mm 塑料封装

4.1.6 TPD1E10B06

TPD1E10B06 器件是一款采用小型 0402 封装的单通道 ESD 瞬态电压抑制 (TVS) 二极管。这款 TVS 保护产品提供 $\pm 30\text{kV}$ 接触 ESD 和 $\pm 30\text{kV}$ IEC 气隙保护，并具有一个带背靠背 TVS 二极管的 ESD 钳位电路，用于支持双极或双向信号。该 ESD 保护二极管的线路电容为 12pF ，适用于支持高达 400Mbps 的数据速率的各种应用。0402 封装符合行业标准，便于将元件安装到空间受限型应用中。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 23. TPD1E10B06 框图

TPD1E10B06 特性:

- 可为低电压 I/O 接口提供系统级 ESD 保护
- IEC 61000-4-2 4 级 ESD 保护
 - $\pm 30\text{kV}$ 接触放电
 - $\pm 30\text{kV}$ 气隙放电
- IEC 61000-4-5 浪涌: 6A ($8/20\mu\text{s}$)
- I/O 电容 12pF (典型值)
- R_{DYN} 0.4Ω (典型值)
- 直流击穿电压为 $\pm 6\text{V}$ (最小值)
- 超低泄漏电流 100nA (最大值)
- 10V 钳位电压 ($I_{\text{PP}} = 1\text{A}$ 时的最大值)
- 工业温度范围: -40°C 至 125°C
- 节省空间的 0402 尺寸 ($1\text{mm} \times 0.6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$)

5 硬件入门

本节概要介绍了 EVM 硬件的入门使用方法。

5.1 硬件概述

图 24 显示了用于 TIDA-00757 参考设计的硬件。PCB 为 3.5 英寸 × 4.0 英寸的矩形。不过，在开发过程中未采取任何措施来缩小其外形尺寸。PCB 位于 1 英寸尼龙支柱上，可以在执行实验室测量时轻松使用。

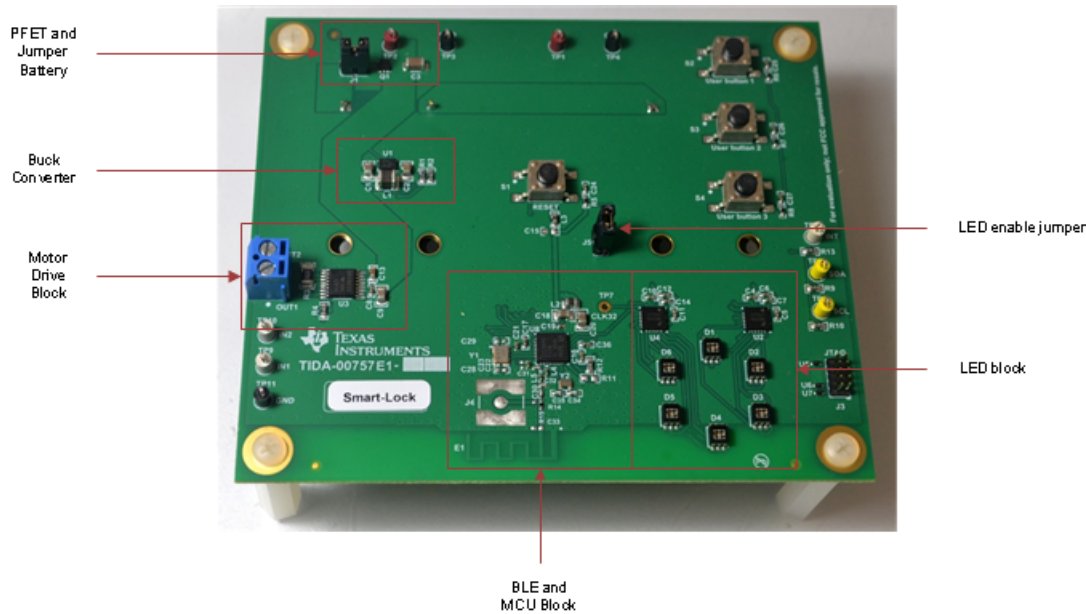


图 24. 智能锁参考设计硬件

该板具有两根跳线。利用板左上角的 J1，用户可以断开电池与该参考设计其余部分的连接。利用 J1，还可以通过 6V 电源轨对电流测量结果进行收集。J5 位于板中心附近，将 3V 电源轨连接到 LED 驱动器。当测试期间无需运行 LED 时，J5 的作用尤其突出。板的左下角包含电机连接终端块和测试点以及 DRV8833 电机控制器。I²C 测试点和 LED 控制器中断测试点位于板的右下角，靠近 JTAG 编程接头。

CC2640R2F 和 PCB 天线位于板的下部中间位置。六个 RGB LED 以环形排列在 CC2640R2F 的左侧，两个 LP55231 LED 控制器位于 LED 上方。该设计还包含一些按钮。三个用户按钮位于右上角，而复位按钮位于板的中心。

5.2 参考设计工作原理

TI 建议在拆下 J1 的情况下安装电池，然后再安装该跳线为电路供电。加电后，全部六个 LED 立即呈粉色闪烁，以通知用户器件已正确加电（请参阅图 25）。

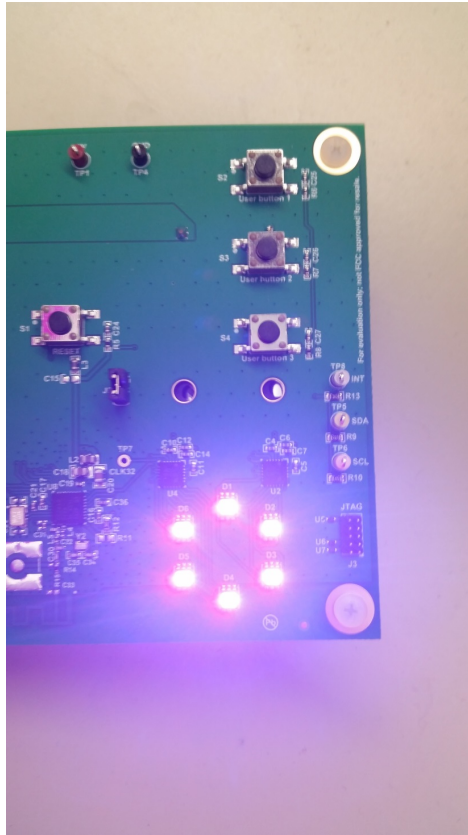


图 25. 粉色启动 LED

未使用蓝牙连接器件时，用户按钮（S2、S3 和 S4）可激活设计的不同功能。按下 S2 后，将开始一系列灯光变化，六个 RGB LED 循环亮起多种不同的颜色。S3 驱动电机前进。电机将在再次按下 S3 或 10 秒后停止。S4 驱动电机后退。电机将在再次按下 S4 或 10 秒后停止。为了使用蓝牙进行通信，使用名为 LightBlue™ 的 iOS 应用进行测试。可以在各种平台上使用其他通用蓝牙应用。已测试了 Samsung® Galaxy S®6 上 B-BLE 应用的功能。有关利用该参考设计运行固件的详细步骤，请参阅 6.3 节。

6 固件入门

6.1 编译固件

该 TI 参考设计所用固件使用 TI 的 CCS 软件（版本 6.1.0）、BLE SDK 2.02.00.31、TI-RTOS 2.18.00.03 和 Arm 编译器工具 5.2.7 开发而成。固件生成说明假设 CCS 和软件封装已正确设置和配置。有关如何设置开发环境的更多信息，请参阅 BLE SDK 的文档文件夹中提供的《CC2640R2F BLE 软件开发人员指南》。

导入 CCS 项目

1. 打开 CCS。
2. 单击 *Project* 工具栏。
3. 选择 *Import CCS Projects...*。
4. 选择单选按钮 *Select archive file*。
5. 导航到 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack.zip* 文件的安装位置。如果使用默认位置，则固件位于文件夹位置 *C:\ti\TIDA00757-Firmware*。
6. 验证是否已选中选项 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack*。
7. 单击 *Finish* 按钮。
8. 重复步骤 2 至 7，以导入 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App*。

此时，CCS 工作区应具有 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App* 和 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack* 项目。

生成固件

1. 将 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack* 项目设置为活动项目并使用 *Project* → *Build Project* 生成该项目。生成的二进制文件 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack.hex* 位于 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack/FlashROM* 文件夹中。
2. 将 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App* 项目设置为活动项目并使用 *Project* → *Build Project* 生成该项目。生成的二进制文件 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App.hex* 位于 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App/FlashROM* 文件夹中。

6.2 加载固件

通过使用 10 引脚迷你带状电缆将 J3 连接到 SmartRF06 EVM（10 引脚 Arm Cortex 调试连接器 P410），对 TI 参考设计硬件进行编程。在 SmartRF06 EVM 上，将源开关设置为 *USB*，并将 *VDD to EM* 跳线短接。在此配置中，SmartRF06 EVM 为 CC2640R2F 供电。有关更多信息，请参阅 SmartRF06 EVM 文档 ([SWRU321](#))。

有关将 TI 参考设计硬件连接到 SmartRF06 EVM 的正确设置，请参阅图 26。可以使用两个应用对 TIDA-00757 进行编程：Code Composer Studio 或 SmartRF Flash Programmer 2。

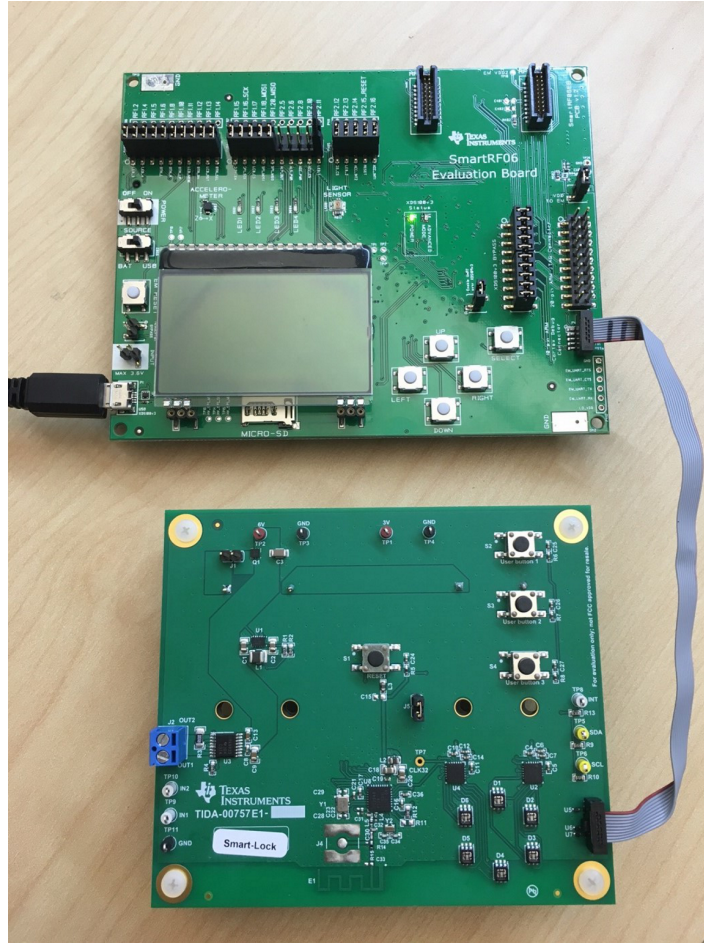


图 26. 连接 SmartRF06 评估板与 TI 参考设计硬件以进行编程和调试

6.2.1 使用 Code Composer Studio™ 进行编程

执行以下步骤，以使用 CCS 进行编程：

1. 选择 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack* 项目作为活动项目，然后选择 *Run* → *Debug*，从而下载 *TIDA00757_BLE_Peripheral_Stack*。
2. 选择 *Run* → *Terminate* 停止调试。
3. 选择 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App* 项目作为活动项目，然后选择 *Run* → *Debug*，从而下载 *TIDA00757_BLE_Peripheral_App*。

注：仅在初次下载以及修改 Stack 项目时才需要执行前述的步骤。只要未修改 Stack 项目，就只需执行以下步骤：

1. 生成应用。
2. 下载应用。

6.2.2 使用 SmartRF™ Flash Programmer 2 进行编程

执行以下步骤，以使用 SmartRF Flash Programmer 2 进行编程：

1. 下载并安装 SmartRF Flash Programmer 2，可通过以下网址获取：
<http://www.ti.com.cn/tool/cn/flash-programmer>。
2. 打开 SmartRF Flash Programmer 2。
3. 在 *Connected devices* 窗口中，CC2640R2F 列在 XDS100v3 下方。如果未列出，则检查电源以及 SmartRF06 到 TIDA-00757 的连接，然后单击 *Refresh* 按钮重新扫描器件。突出显示 CC2640R2F 器件（请参阅图 27）。
4. 在 *Main* 选项卡中，单击 *Multiple* 单选按钮。
5. 单击 *Browse* 按钮并导航到 *TIDA00757 Stack hex* 文件。
6. 单击 *Browse* 按钮并导航到 *TIDA00757 App hex* 文件。
7. 单击蓝色的圆形 *Play* 按钮将两个十六进制映像刷写到 TIDA-00757 中。

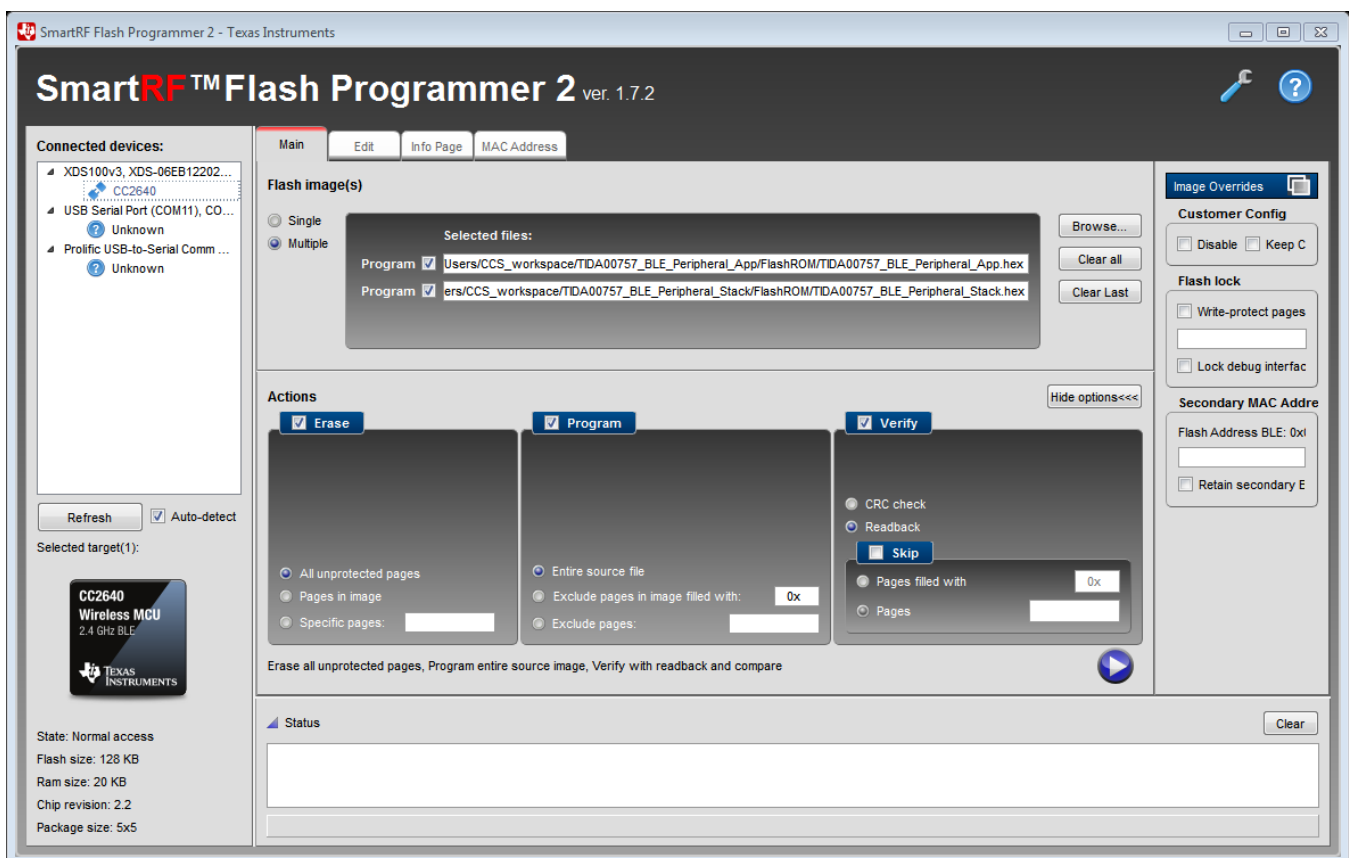


图 27. SmartRF™ Flash Programmer 2 配置

8. SmartRF Flash Programmer 2 底部的状态栏显示映像刷写是否成功（请参阅图 28）。

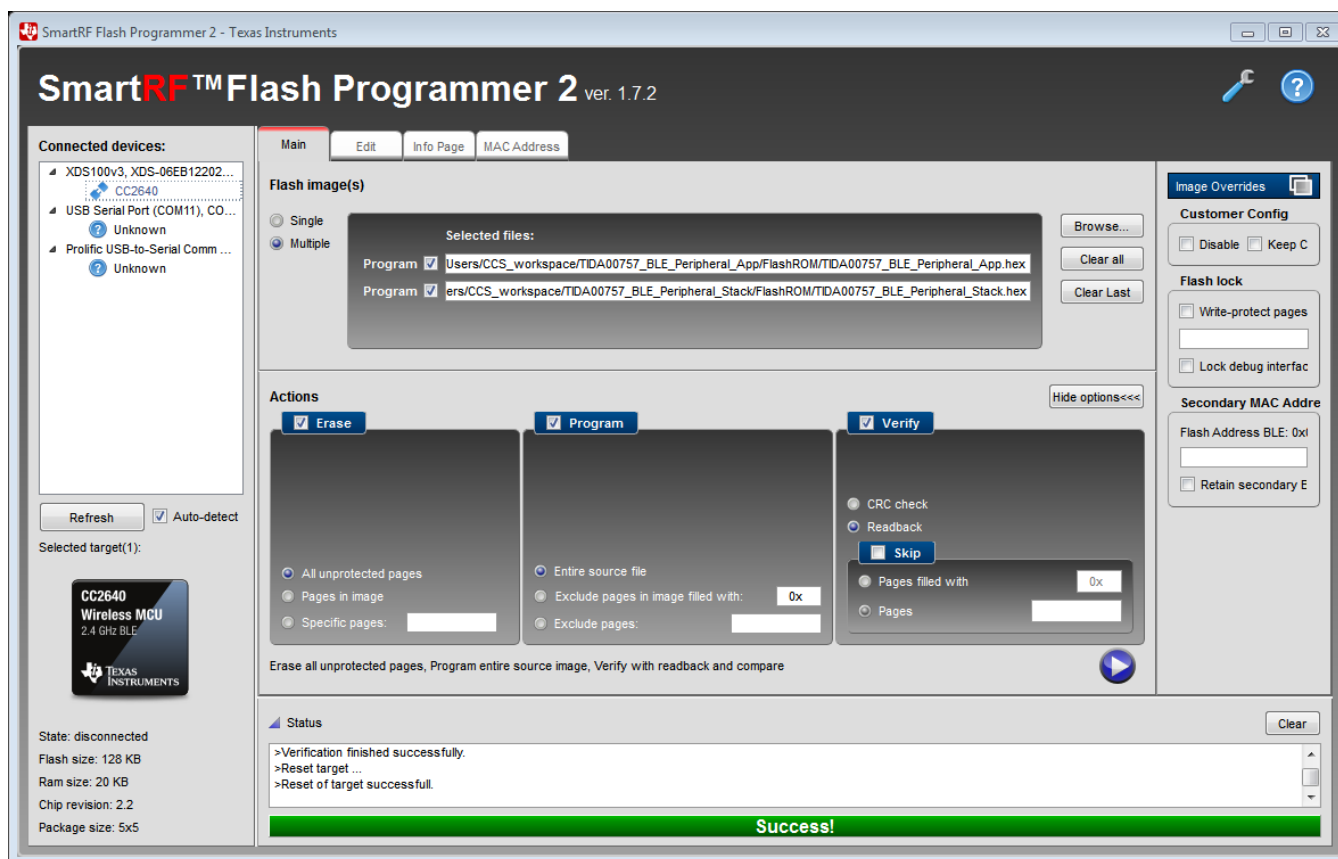


图 28. SmartRF™ Flash Programmer 2 成功刷写状态

6.3 运行固件

为了与 TIDA-00757 进行通信，使用装有 *LightBlue* iOS 应用的 iPhone 6 进行测试。其他平台或应用可以执行该功能。已测试了 Samsung Galaxy S6 上的应用 *B-BLE* 的功能。

1. 断开 SmartRF06 带状电缆与 TIDA-00757 的连接（如果以前未执行该操作）。
2. 拆下 J1，以断开电池与系统的连接。
3. 将四节 AA 电池插入到电池座中，或使用工作台电源。
4. 通过并联连接 J1 将电池连接到系统，以此为评估板加电。

注： TIDA-000757 的 LED 呈粉色闪烁，以指示固件正在运行。

5. 在 iPhone 上启用 Bluetooth。
6. 运行 *LightBlue* 应用。

7. 查看附近的外设（请参阅图 29）。

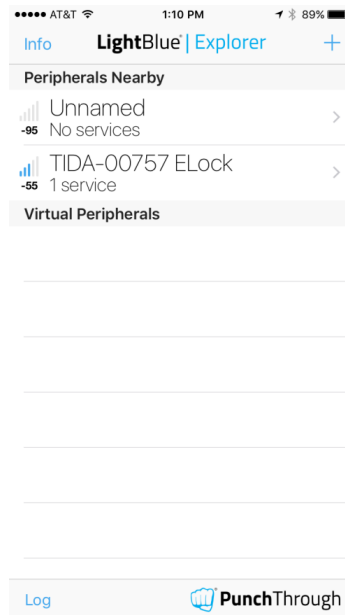


图 29. 查看外设页面

8. 单击 *TIDA-00757 ELock* 外设进行连接（请参阅图 30）。

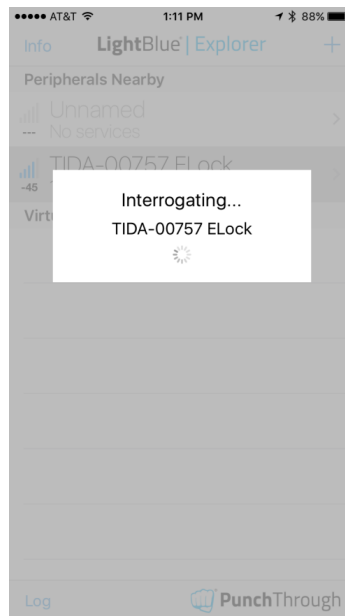


图 30. TIDA-00757 正在连接页面

9. 一旦连接，就可以看到广播数据和属性字段（请参阅图 31）。

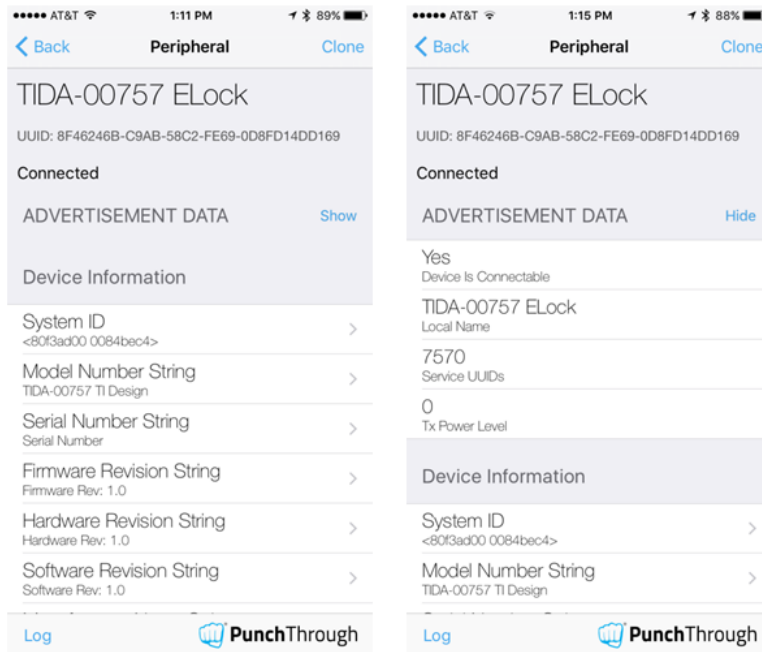


图 31. 广播数据页面

10. 滚动到屏幕底部，然后单击 *Lock State* 属性（请参阅图 32）。

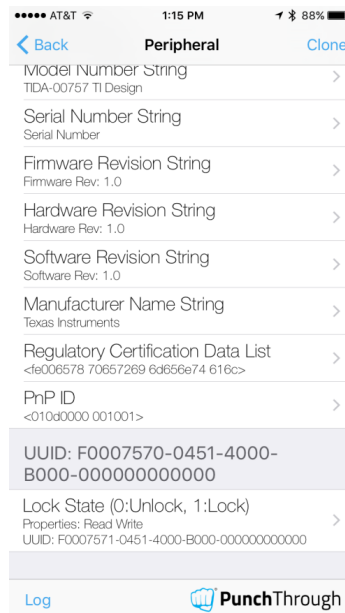


图 32. 锁定状态页面

- 在单击“Lock State”属性之后，器件将自动读取当前锁定状态。在图 33 中，锁定状态为解锁（值 0）。要更改该值，请单击 *Write new value* 选项。在 Android™B-LE 应用中，用户必须写入两个字符：00 或 01。

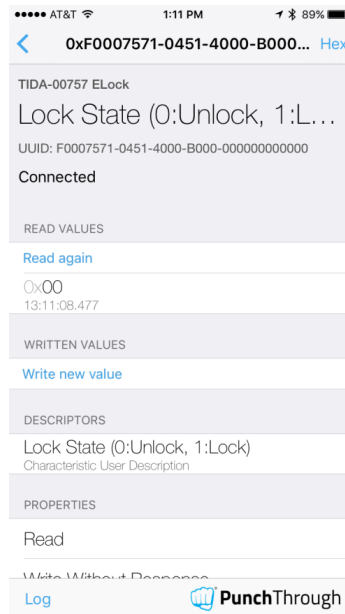


图 33. 锁定状态值页面

- 在文本框中写入值 1，然后单击“Done”（请参阅图 34）。这会触发属性值更改事件，从而使电机旋转并相应地显示 LED。

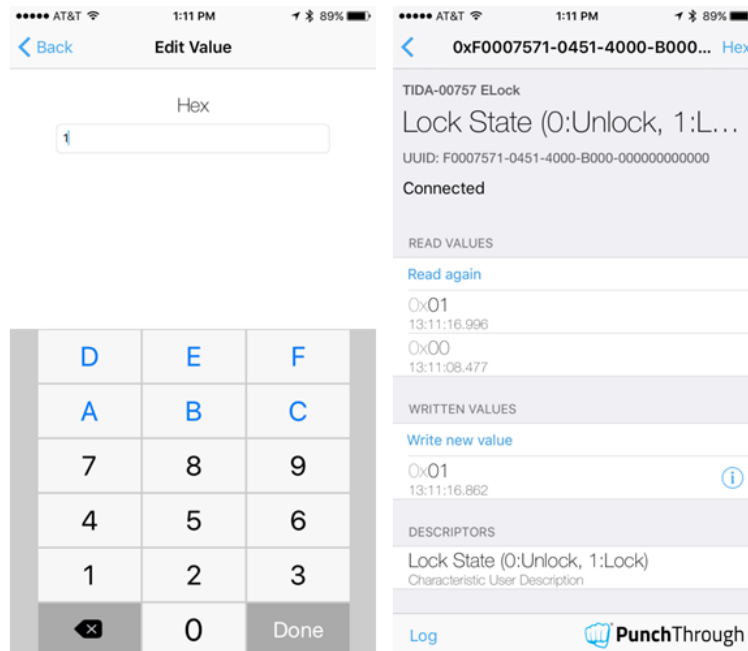


图 34. 选择锁定状态值 (1)

13. 在文本框中写入值 0（请参阅图 35），然后单击“Done”，使电机朝相反的方向旋转。

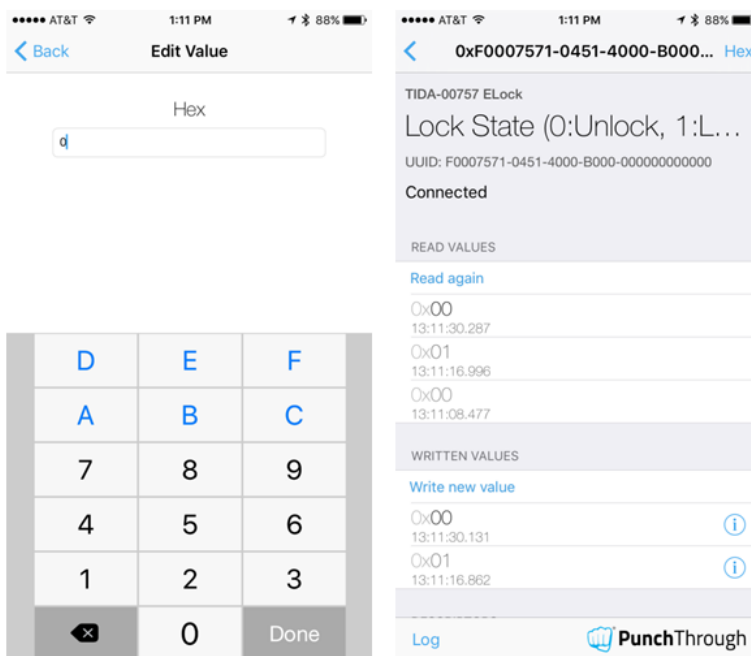


图 35. 选择锁定状态值 (0)

14. 如果在 30 秒内未写入新值，将触发不活动超时事件并断开器件（请参阅图 36）。

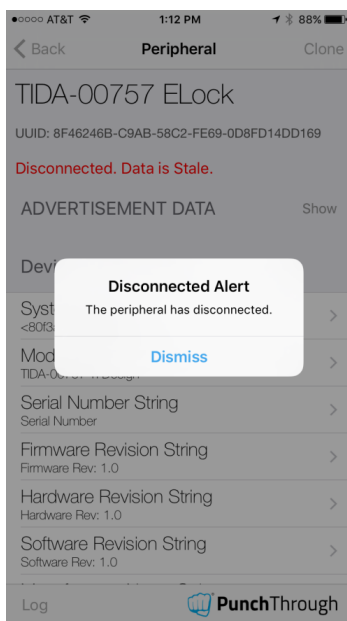


图 36. 不活动超时页面

7 测试设置

我们尽可能单独对 TIDA-00757 参考设计中的每个不同子系统进行了测试，以分类显示相应的电源统计信息，8.5 节对此进行了总结。本文在该节中概述了如果用户希望重新创建结果需要如何设置和执行测试。

7.1 电源

为了使结果标准化，使用 5V 电源为该参考设计供电，因为通常用于为该设计供电的电池的电压可能会随着时间的推移而下降。之所以选择 5 伏作为测试电压，是因为在电池寿命的大部分时间中，电池能在 5V 达到平衡。要注意电池具有电流限制，而电源没有。由于电池的固有电流限制，使用电池进行了测量以作为对照，我们也对此进行了讨论。电源连接到 J1 和接地测试点，如图 37 中所示。图 37 还显示了用于捕获高电流电机驱动波形的电流探针的配置。

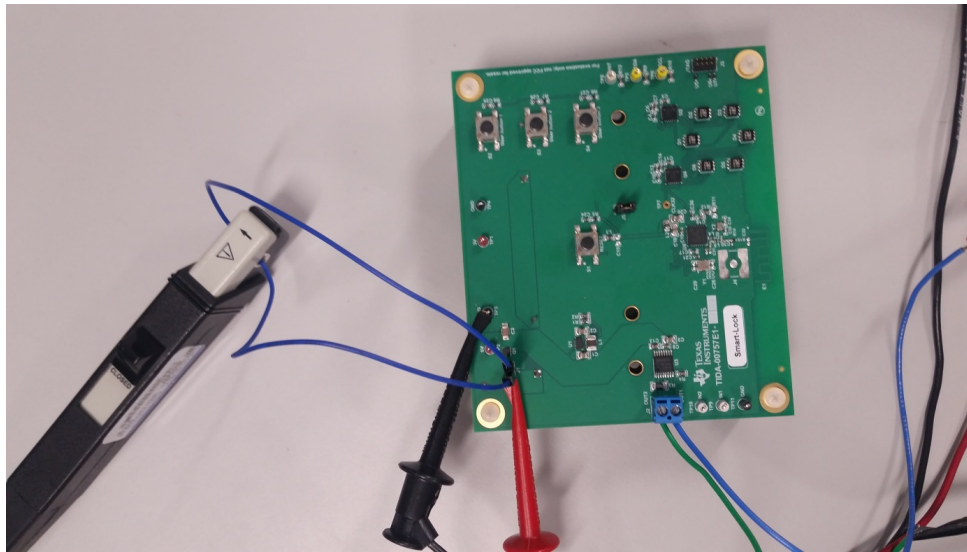


图 37. 5V 电源连接配置

7.2 示波器和波形捕获

我们使用了 Tektronix®DPO 7054 数字荧光示波器来捕获本文档中包含的大多数波形。该数字荧光示波器能够快速轻松地捕获波形并提供平均值和峰值。该示波器可以计算得出水平标记间各测量点的平均值，以即时提供精确的平均值，而不是仅计算屏幕上整个范围的平均值。测试结果中采用了该示波器计算出的平均值。对于特定的测试，当无法使用电流探针测量小电流时，我们使用了感应电阻器。感应电阻器跨 J1 的端子放置，如图 38 中所示。在将感应电阻器放置到电路中之前，我们使用了万用表来精确测量该电阻器的电阻。

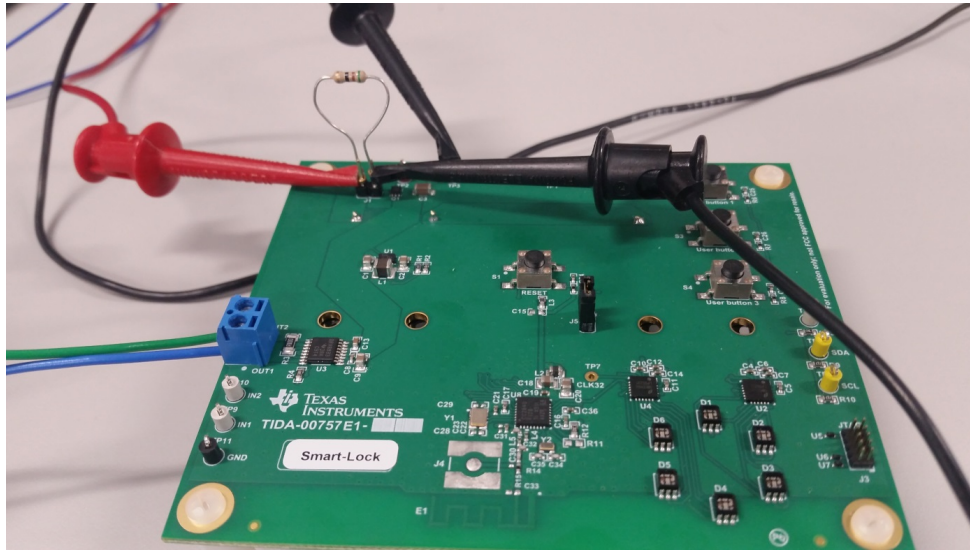


图 38. J1 上的感应电阻器测试配置

7.3 电机负载

为了对电动门锁的正常工作情况进行精确仿真，我们将电机连接到一个标准门栓装置（该装置安装在一个常见门上）。我们通过取代指旋器将电机连接到门栓芯。电机通过一个简单的键槽轴环与门栓连接，允许有少量过盈。这种过盈让电机能够在受到门栓的扭矩之前开始旋转。得益于该设计，电机使用稍小的电流即可开始旋转。

门栓配有 1 英寸的曲柄，电机需要运行大约 1.8 秒才能锁定或解锁门栓。对于负载电机和空载电机测试，所有测试和测量都采用 1.8 秒的电机运行时间。直流迷你电机的额定电压为 4V，其额定负载为 9.3mN·m。

8 测试数据

注：除非另有说明，后文中的测试数据均为系统在室温下测得的数据。本节所有测量结果都是使用校准过的实验设备测得的。

8.1 电源系统测试

8.1.1 降压输出和效率

J1 的输出电压在 6.4V 至 3.7V 的范围内变动，3V 电压轨上的电压在 TP1 和 TP2 处测得。表 3 列出了结果。

表 3. 输入电压与降压输出

输入电压 (V)	降压输出 (V)
6.4	3.00
6.0	3.00
5.6	3.00
5.2	3.00
5.0 (标称值)	3.00
4.8	3.00
4.4	3.00
4.0	3.00
3.7	3.00

TPS62745 的效率是使用 TI 的 WEBENCH®设计工具进行仿真的。图 39 和图 40 中的图显示了仿真结果。

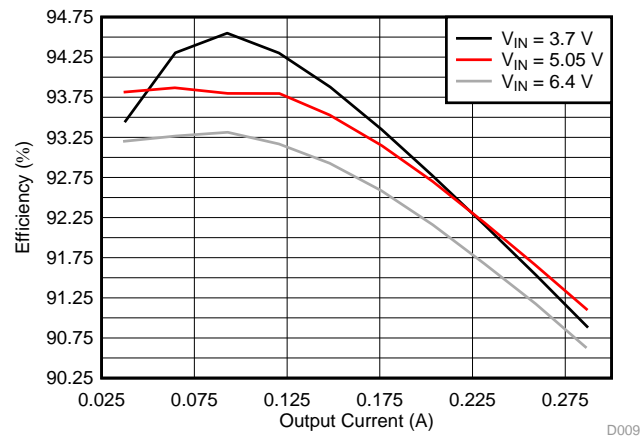


图 39. 降压输出电流与效率 (TPS62745)

图 40 显示了更宽电流范围的效率结果。

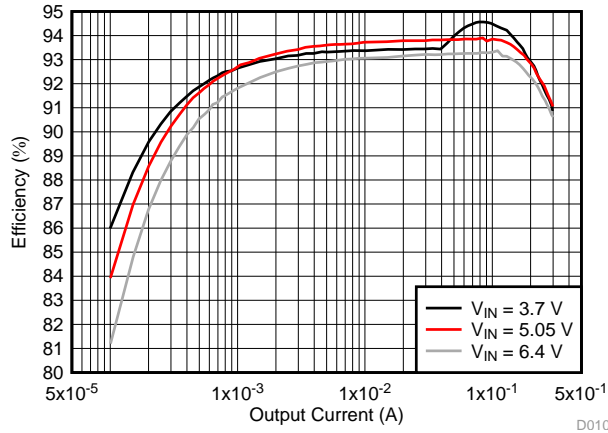


图 40. 更宽电流范围下的降压输出电流与效率 (TPS62745)

8.1.2 输入电压与平均电流消耗

电池的电压随着时间的推移而降低，但会稳定在 5V 标称电压水平。TIDA-00757 参考设计的大多数测试在由电源提供的 5V 标称电压下完成。不过，电池具有固有的电流限制，并且结果可能会根据所使用的电池及其新旧程度略有差异，而电源没有电流限制。表 4 捕获并记录了电机运行状态的峰值电流和平均电流。之所以选择了 6.4V 至 3.7V 的范围，是因为四节 AA 电池的最大电压可能接近 6.4V 并且降压的最低 V_{in} 为 3.7V。

表 4. 输入电压与平均电流

输入电压	峰值电流 (A)	平均电流 (mA)	降压输出 (V)
6.4	2.46	45.20	3.0
6.0	2.38	45.09	3.0
5.6	2.32	45.05	3.0
5.2	2.17	45.86	3.0
5.0 (标称值)	2.099	49.52	3.0
4.8	2.007	53.10	3.0
4.4	1.848	55.63	3.0
4.0	1.68	58.96	3.0
3.7	1.54	60.24	3.0

8.2 低功耗 Bluetooth® 通信

在低功耗蓝牙测试中，我们观察了广播数据包时序和电流消耗波形，而且检查了连接数据包时序和电流波形。我们使用了感应电阻器在蓝牙连接期间测量系统中的小电流。7 节介绍了感应电阻器方法。

图 41 显示了等效电流波形。随着数据包脉冲时间的推移对电压读数求平均值，此外，我们使用了 50.048Ω 的感应电阻器。

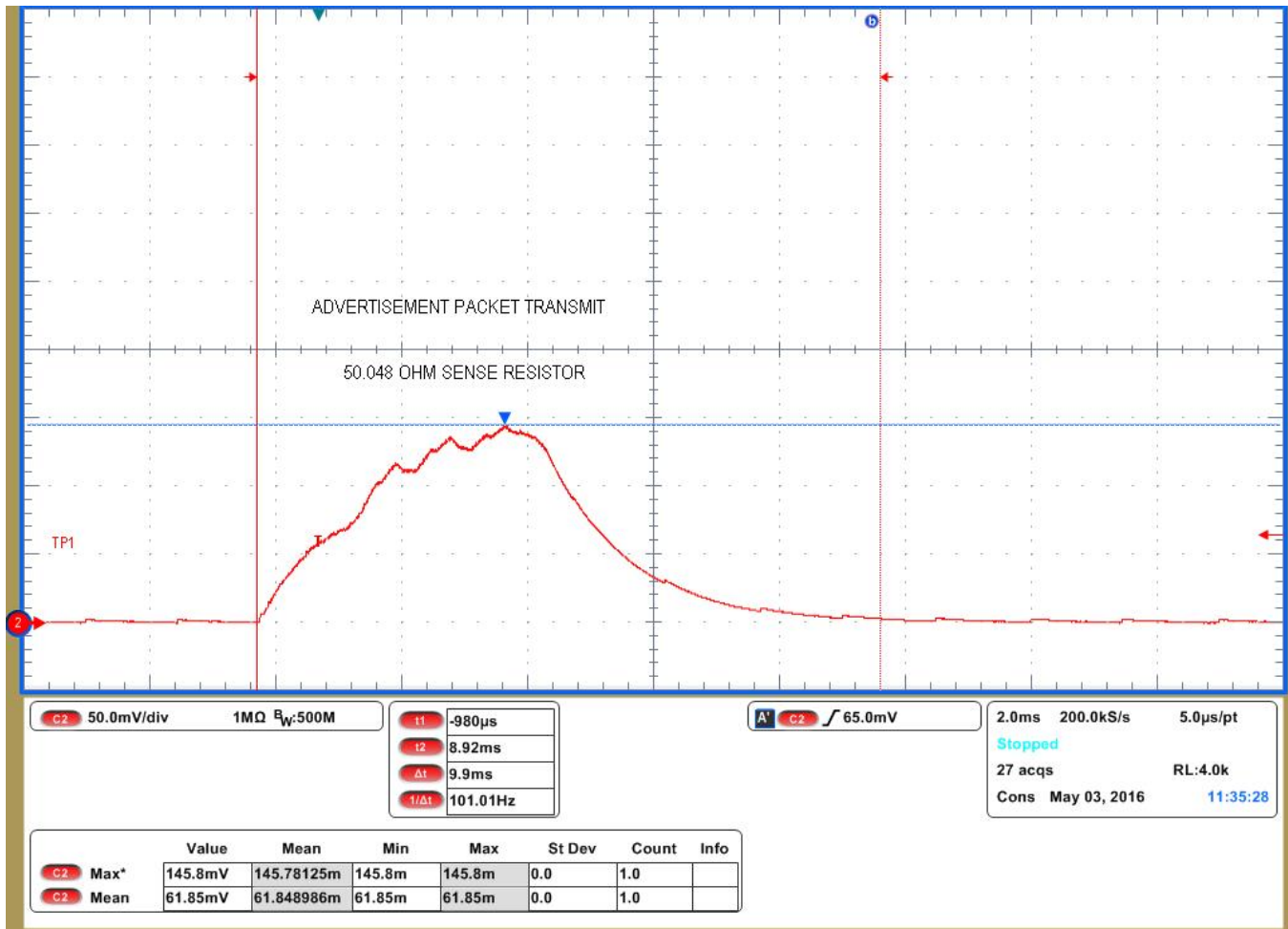


图 41. 低功耗 Bluetooth® 广播数据包

平均电压为 61.849mV，因此我们用电压除以电阻可以得到平均电流。在大约 9.9ms 的脉宽上，平均电流为 1.236mA。

$$\text{平均电流} = (61.849\text{mV}) / (50.048\Omega) = 1.236\text{mA} \quad (14)$$

图 42 显示了广播数据包传输周期。TIDA-00757 参考设计每 500ms 对其基本信息和存在情况进行广播，以此允许器件与其进行连接。图 42 是图 41 中显示的广播脉冲视图的缩小版本。传输间出现的微小脉冲表示 CC2640R2F 的内部直流/直流转换器正在为下一次传输进行充电。

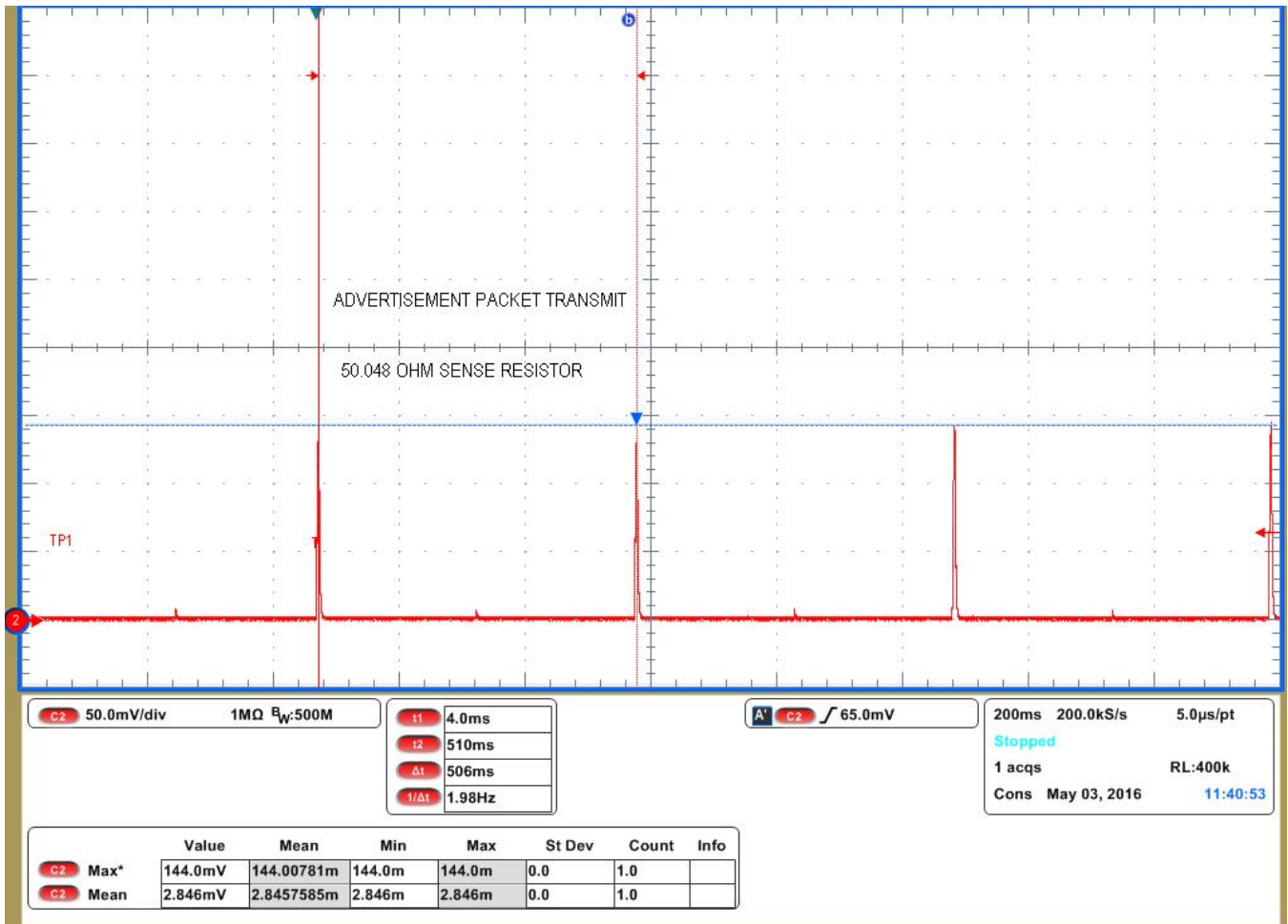


图 42. 低功耗 Bluetooth® 广播传输周期

一旦器件与 TIDA-00757 参考设计配对，该设计的电流消耗就会稍有不同。图 43 显示了每个连接脉冲的波形所呈现的状态。最高电压稍微低一点，脉冲长度更短。

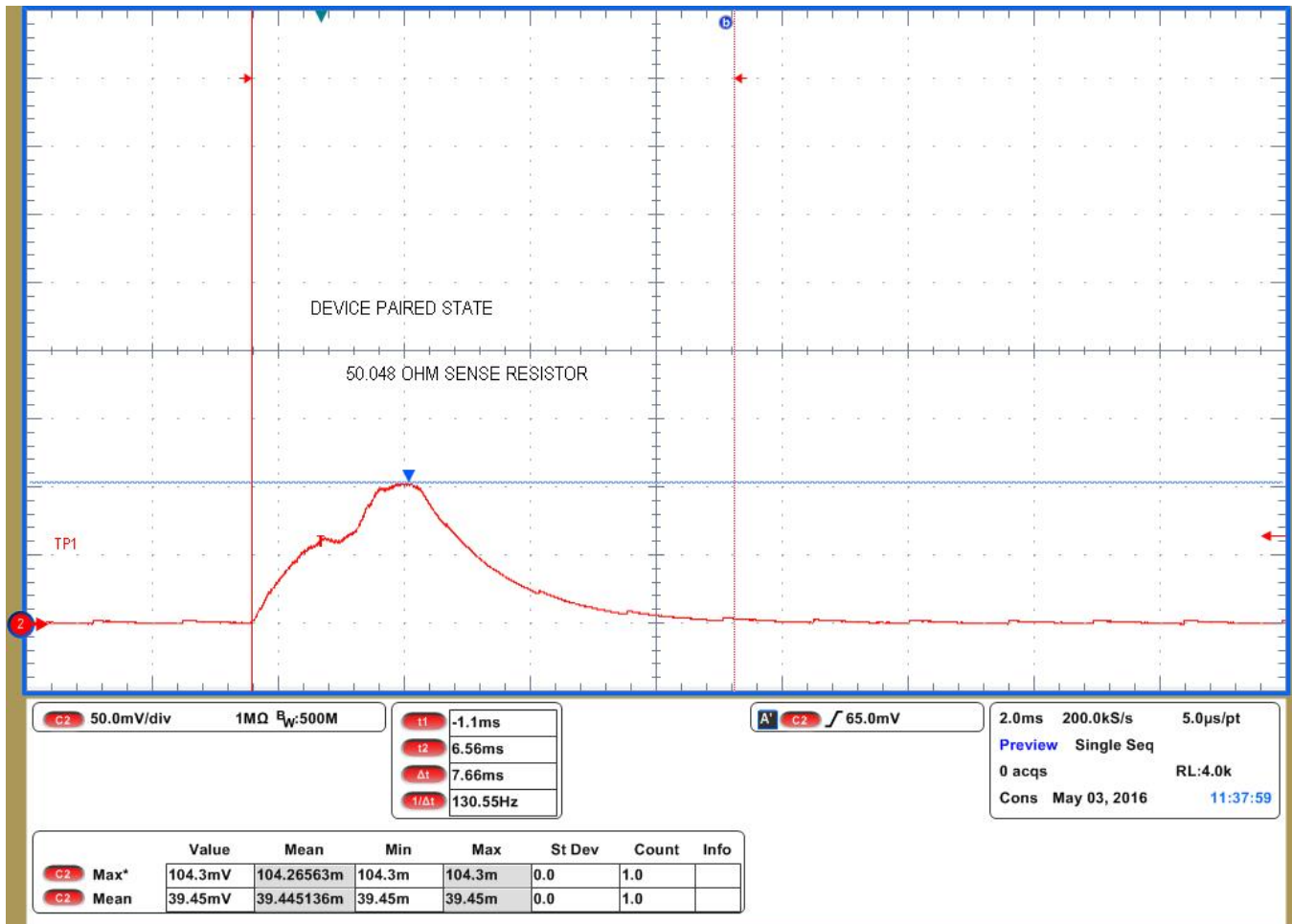


图 43. 低功耗 Bluetooth® 器件配对数据包

公式 15 描述了如何计算连接脉冲的平均电流。

$$\text{平均电流} = (39.445\text{mV}) / (50.048\Omega) = 0.788\text{mA} \tag{15}$$

持续大约 7.66ms 的单个连接脉冲的平均电流 = 0.788mA。

一旦器件连接到 TIDA-00757 参考设计，平均电流脉冲就会变得稍小。不过，脉冲周期已缩短，以减少延迟，从而提供更好的用户体验。

正如在图 44 中所示，在器件连接状态下周期为 30ms。30ms 传输周期在用户设备提供最后一次输入后的 30 秒内保持有效。3.7 节中更详细地讨论了软件算法。

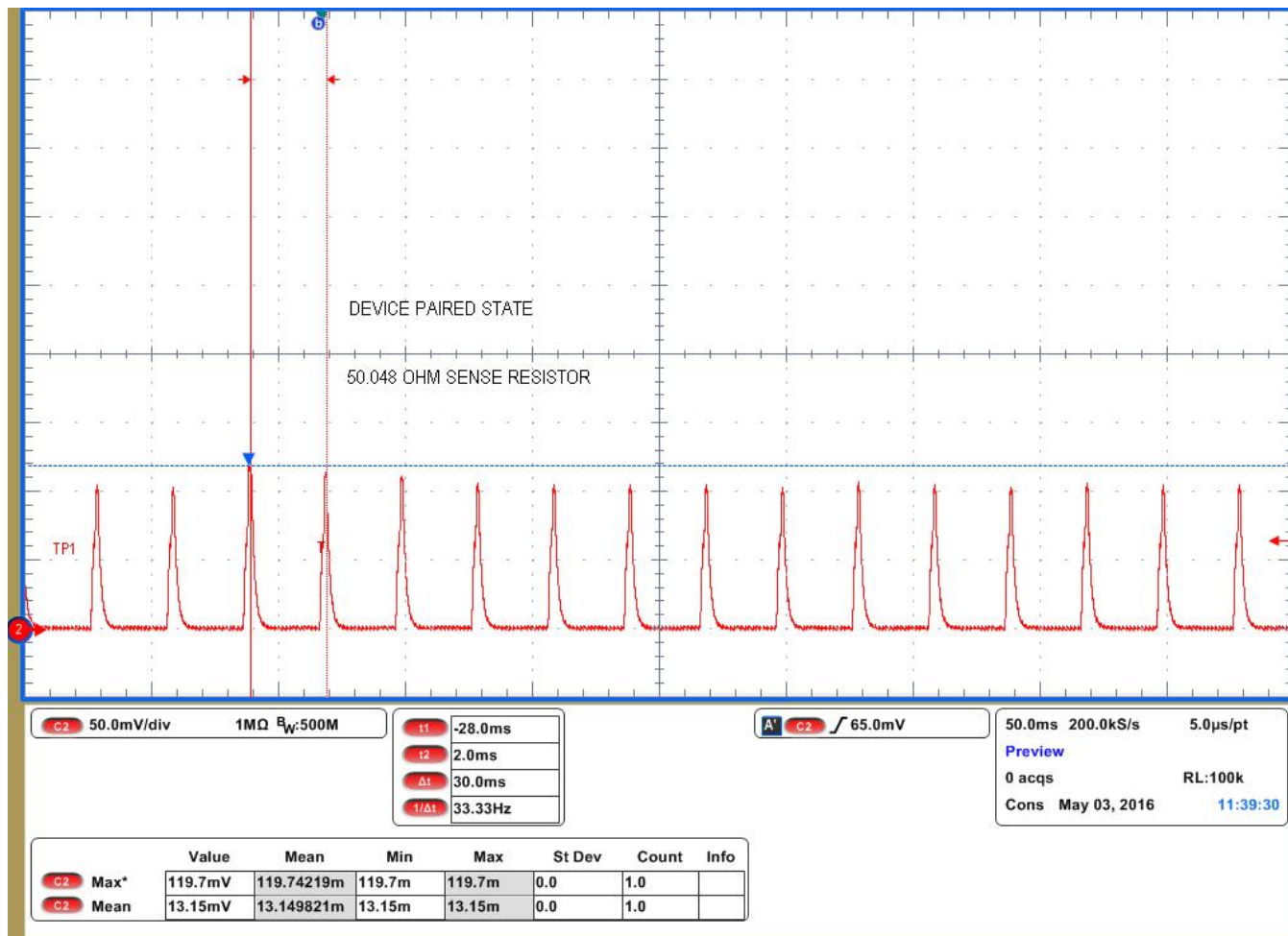


图 44. 低功耗 Bluetooth® 器件配对数据包传输周期

8.3 待机电流

通过测量广播数据包传输间的电流消耗可以得出平均待机电流。在此期间，TIDA-00757 参考设计中的其他器件处于待机或睡眠模式，从而允许精确地测量待机电流。我们使用了小型感应电阻器来测量小电流。利用 3.7 节中介绍的算法，可以得出该参考设计的平均待机电流大约为 4.7μA。

8.4 电机电流

本节逐一介绍了负载和电机空载电机在启用和禁用 LED 条件下的不同电机电流波形。空载表示电机自由旋转，负载则表示电机与门栓连接并且成功进行了锁定或解锁。每个锁定或解锁事件一共需要 2 秒。电机仅保持开启 1.8 秒，但 LED 图形序列持续 2 秒。所有平均值计算都在 2 秒的时间间隔内进行。

8.4.1 空载电机电流波形

电池具有固有的电流限制，由于该特性，电机开始旋转时的最大电流尖峰为 1.259A，并且 2 秒解锁事件的平均电流为 27.67mA。图 45 显示了电池供电的空载解锁事件波形。

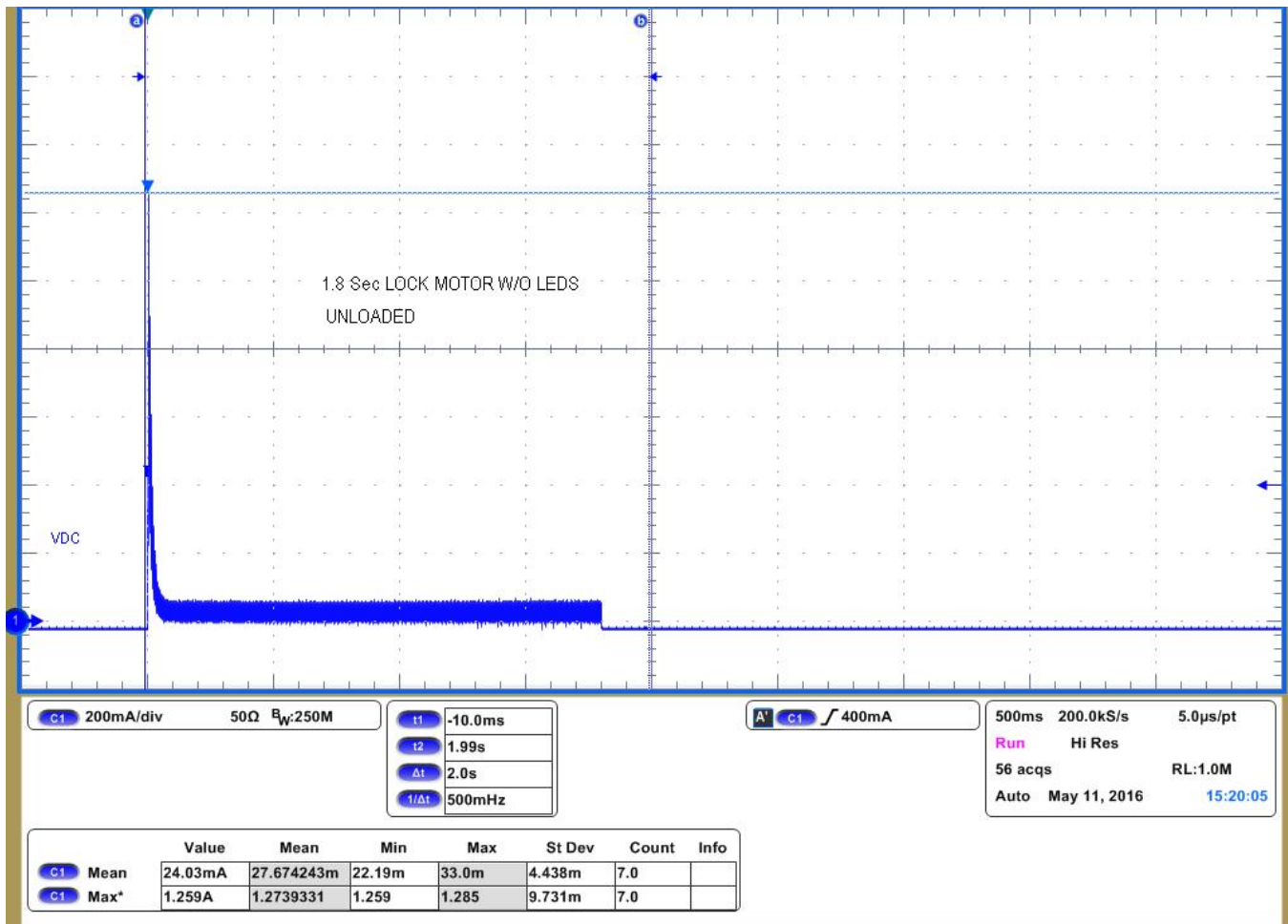


图 45. 由四节 AA 电池供电的 1.8 秒空载电机解锁（禁用 LED）

图 46 显示了相同的空载解锁事件，但该参考设计由 5V 电源供电。由于电源不限制电流，这种情况下的启动电流尖峰要大很多。由电池供电时，电流尖峰为 1.259A，而电源供电的电流尖峰为 1.92A。增加的尖峰会大幅度增加平均电流（从 27.67mA 增加到 43.717mA）。

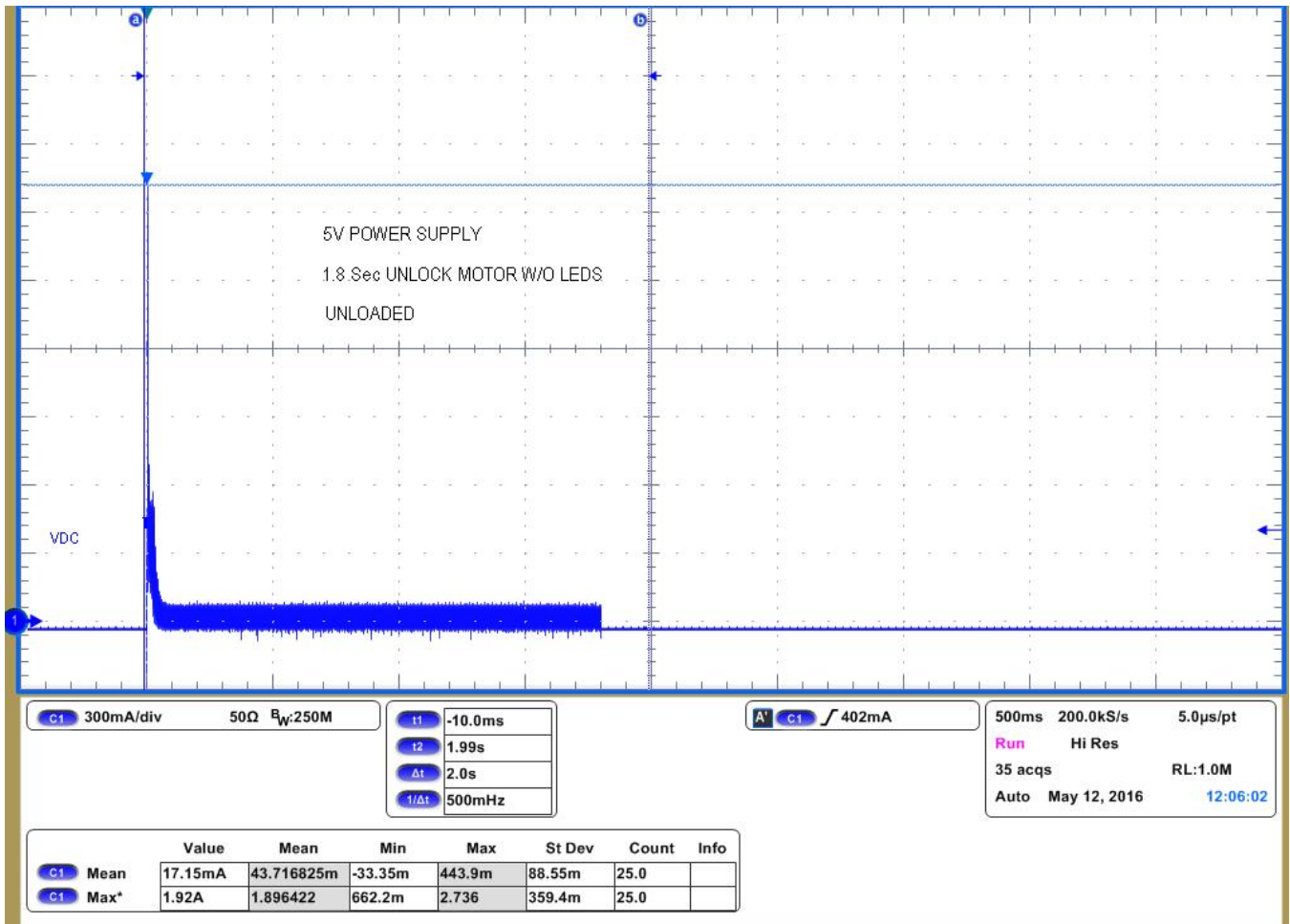


图 46. 1.8 秒空载电机解锁（禁用 LED）

从现在开始，仅使用该参考设计由电源供电时捕获的波形来计算电流消耗，以使结果标准化。之所以选择 5 伏作为测试电压，是因为在电池寿命的大部分时间中，电池能在 5V 达到平衡。需要记住的一点是，电池具有电流消耗限制，而电源没有。

图 47 显示了 LED 禁用条件下的空载锁定事件。锁定事件平均电流与解锁事件稍有不同。2 秒内的平均电流为 42.756mA。之所以得到这样的结果，是因为开始时的电流尖峰稍小，波形的其余部分更平滑一点。

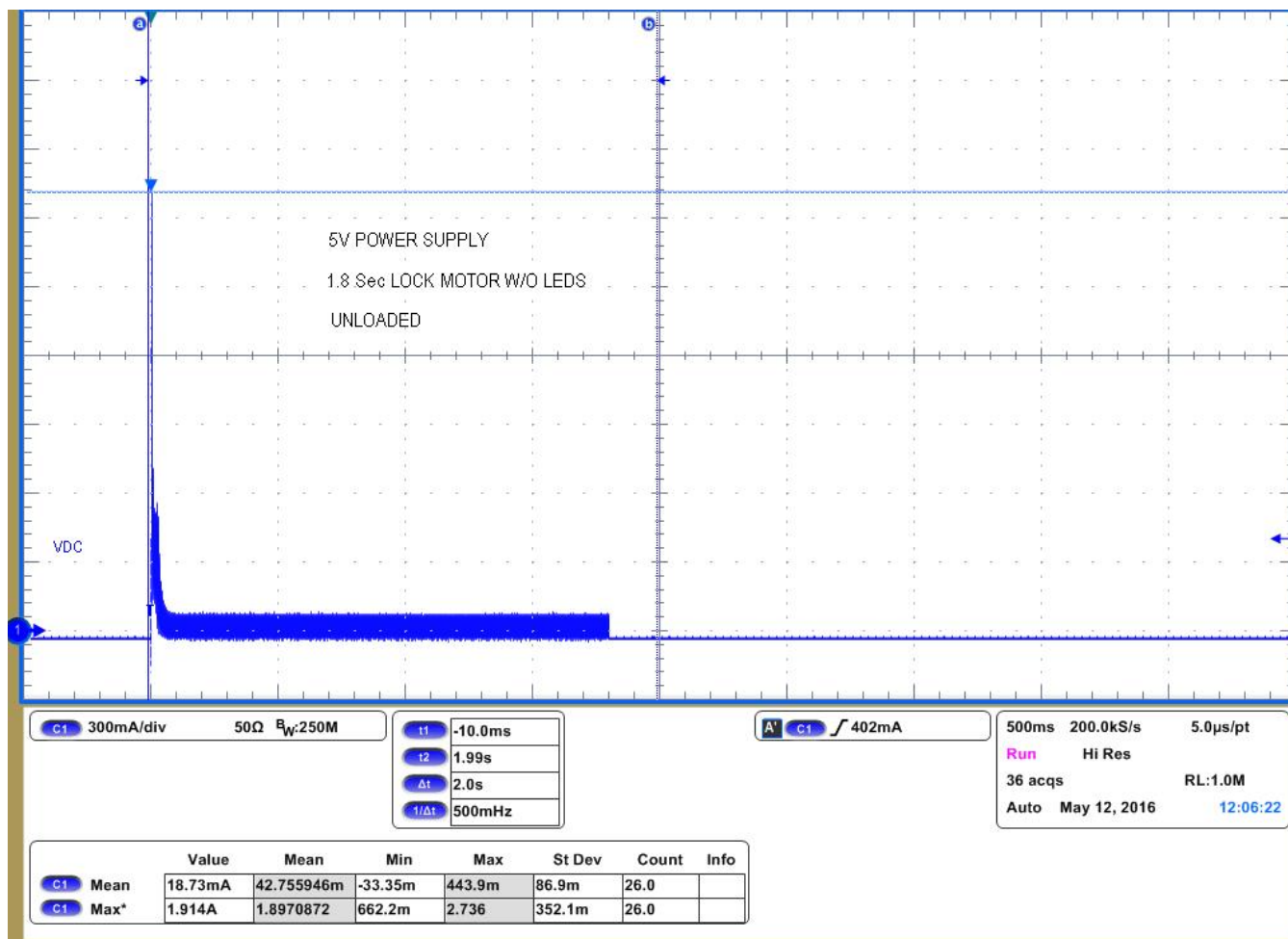


图 47. 1.8 秒空载电机锁定（禁用 LED）

图 48 显示了启用 LED 条件下的空载锁定事件。虽然也启用了 LED，但平均值稍低。电流尖峰也低于先前的波形，这能够更好地解释为何平均值相对较低。

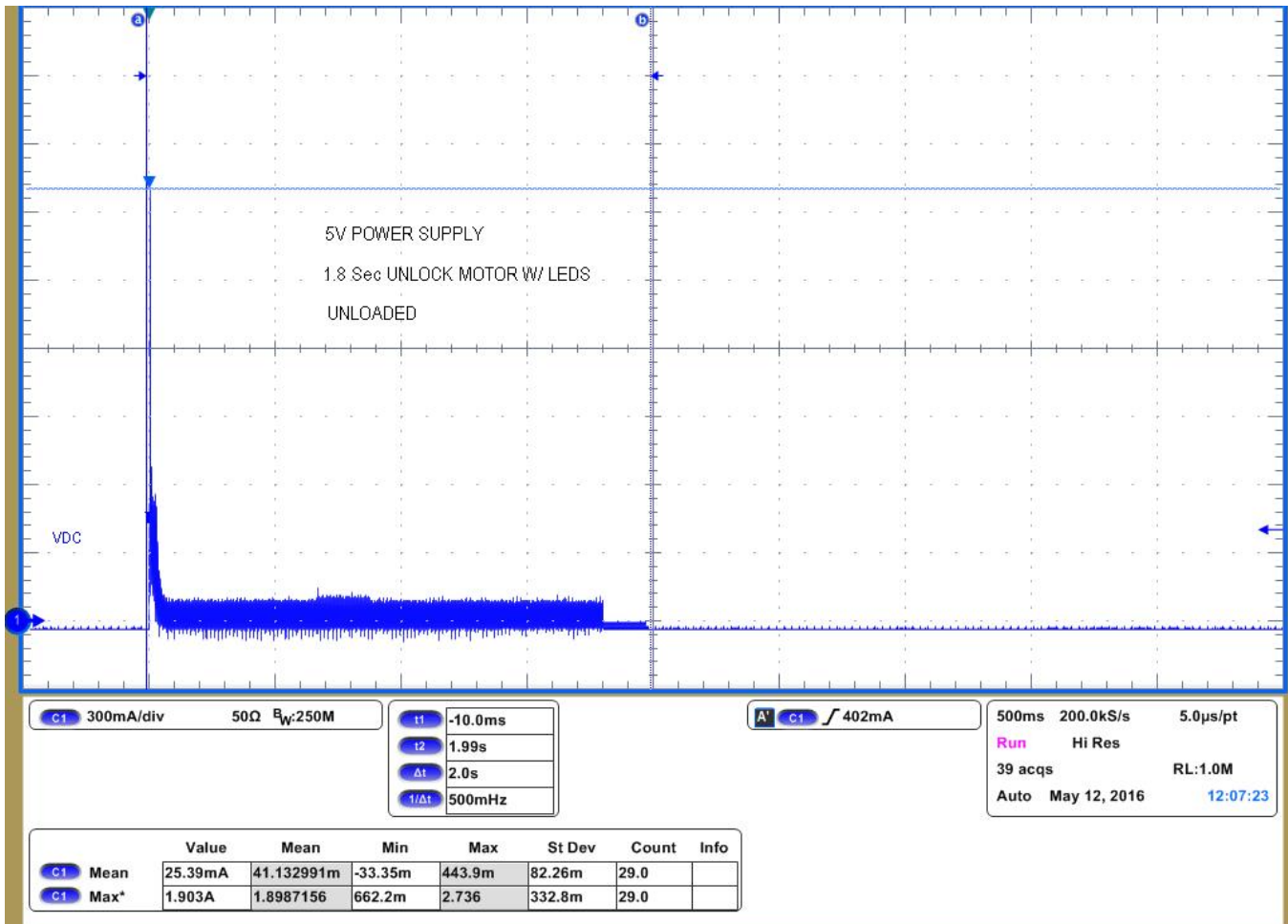


图 48. 1.8 秒空载电机解锁（启用 LED）

LED 序列持续整整 2 秒。可以在示波器捕获中看到 LED 序列的末尾，观察电机波形完成之后的最后 0.2 秒，可以看到 LED 电流。图 49 显示了 LED 序列的末尾。

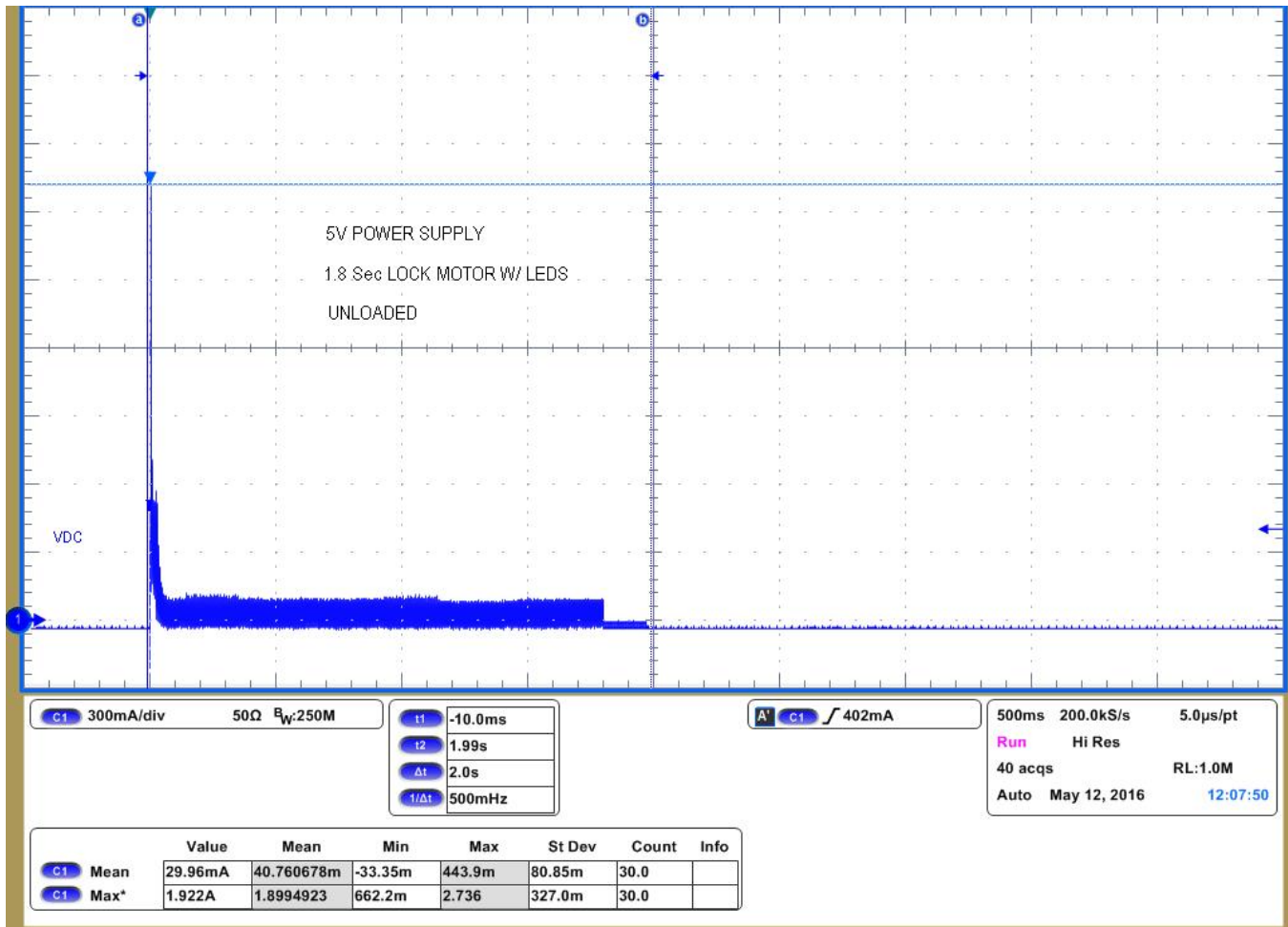


图 49. 1.8 秒空载电机锁定（启用 LED）

8.4.2 空载电机电流总结

表 5 总结了空载测试的所有结果。由于电池消耗，电池会提供不稳定的结果，因此我们没有使用电池，而是使用了 5V 电源以实现标准化。

表 5. 空载电机结果总结

空载电机配置 (5V)	峰值电流	平均电流
解锁（禁用 LED）	1.920A	43.717mA
锁定（禁用 LED）	1.914A	42.776mA
解锁（启用 LED）	1.903A	41.132mA
锁定（启用 LED）	1.922A	40.761mA

8.4.3 负载电机电流波形

负载下的直流电机所消耗的电流要大一点，这是可以预见的结果。本节介绍了当电机实际连接到门栓装置时门锁定和解锁操作的电流波形捕获和平均值。有关如何将电机连接到门栓的说明，请参阅本文档7.3节7节中的。图 50 显示了门栓解锁操作（禁用 LED）的第一个波形捕获。一开始的电流尖峰与空载电机的尖峰相同。当门栓开始向电机施加负载时以及末尾时门栓达到其伸出的最大长度时，电流开始稍微增大，因此波形的结尾部分有所不同。

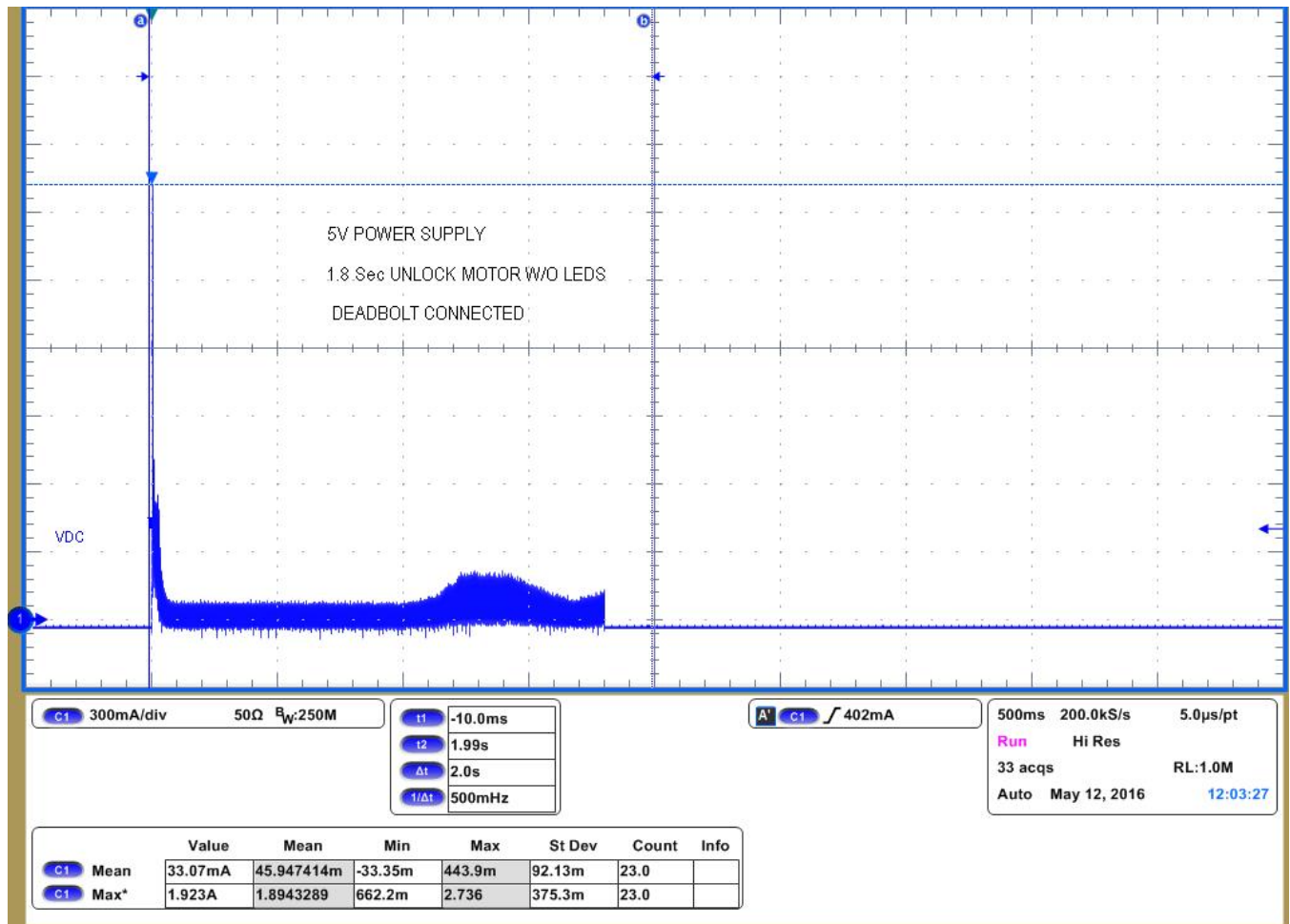


图 50. 1.8 秒负载电机解锁（禁用 LED）

在禁用 LED 的条件下锁定门栓具有非常类似的电流波形，如图 51 中所示。在禁用 LED 的条件下 2 秒内解锁门栓的平均电流大约为 46mA。2 秒内锁定门栓的平均电流大约为 48mA。

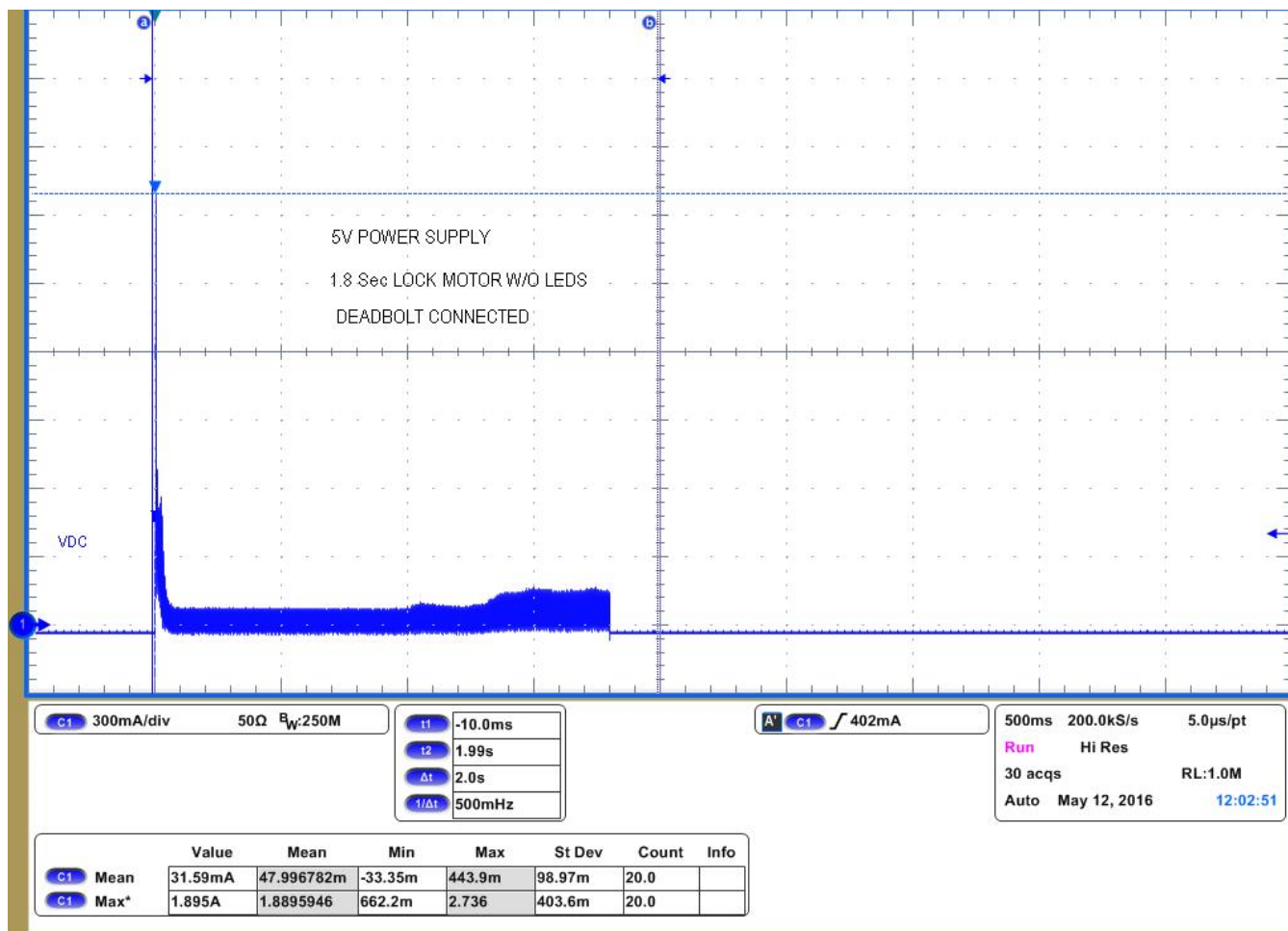


图 51. 1.8 秒负载电机锁定（禁用 LED）

当 LED 启用时，它会使 2 秒解锁或锁定事件的平均电流消耗增加 2mA。图 52 和图 53 分别显示了解锁和锁定事件的波形。解锁的平均电流消耗为 48mA，锁定平均电流为 50mA。

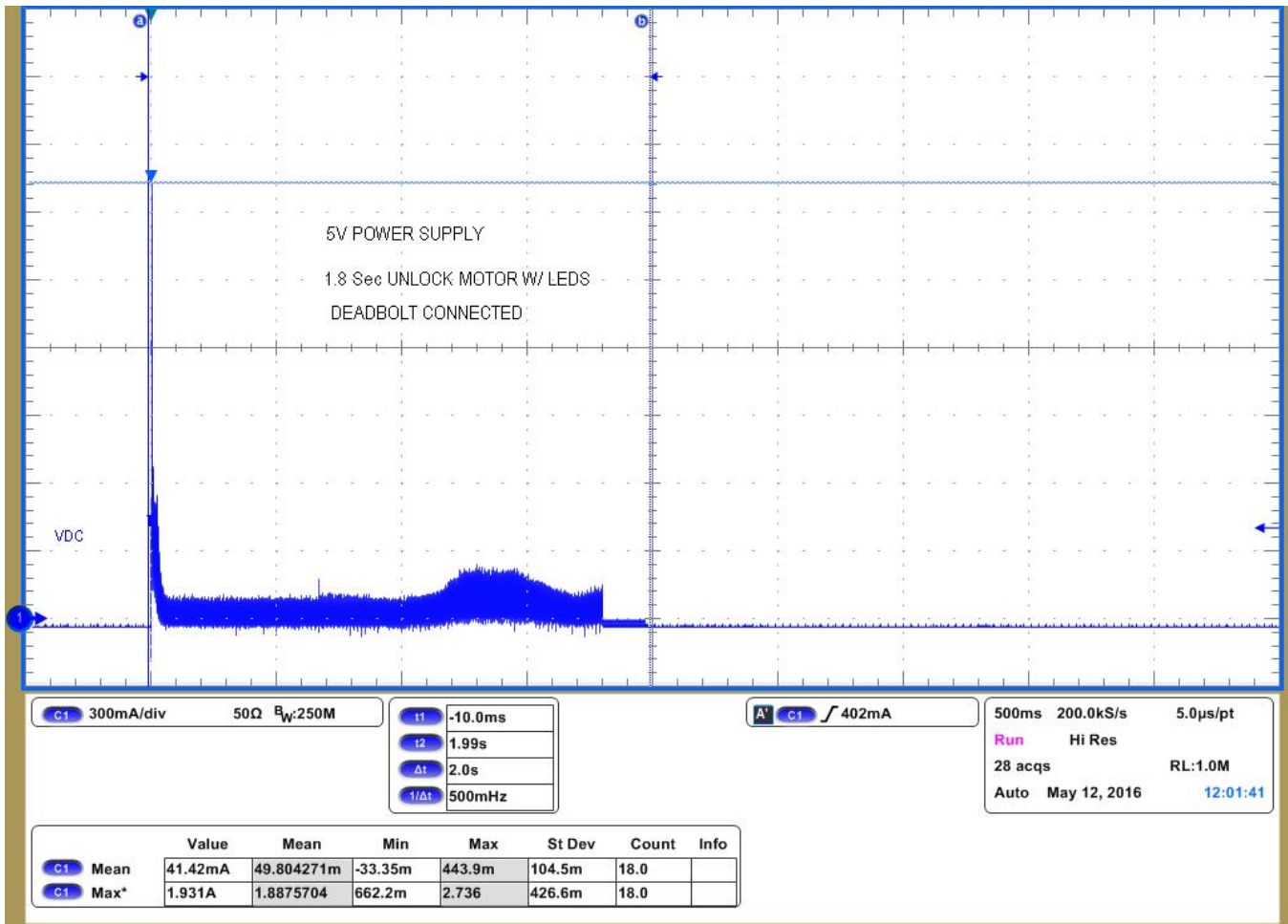


图 52. 1.8 秒负载电机解锁（启用 LED）

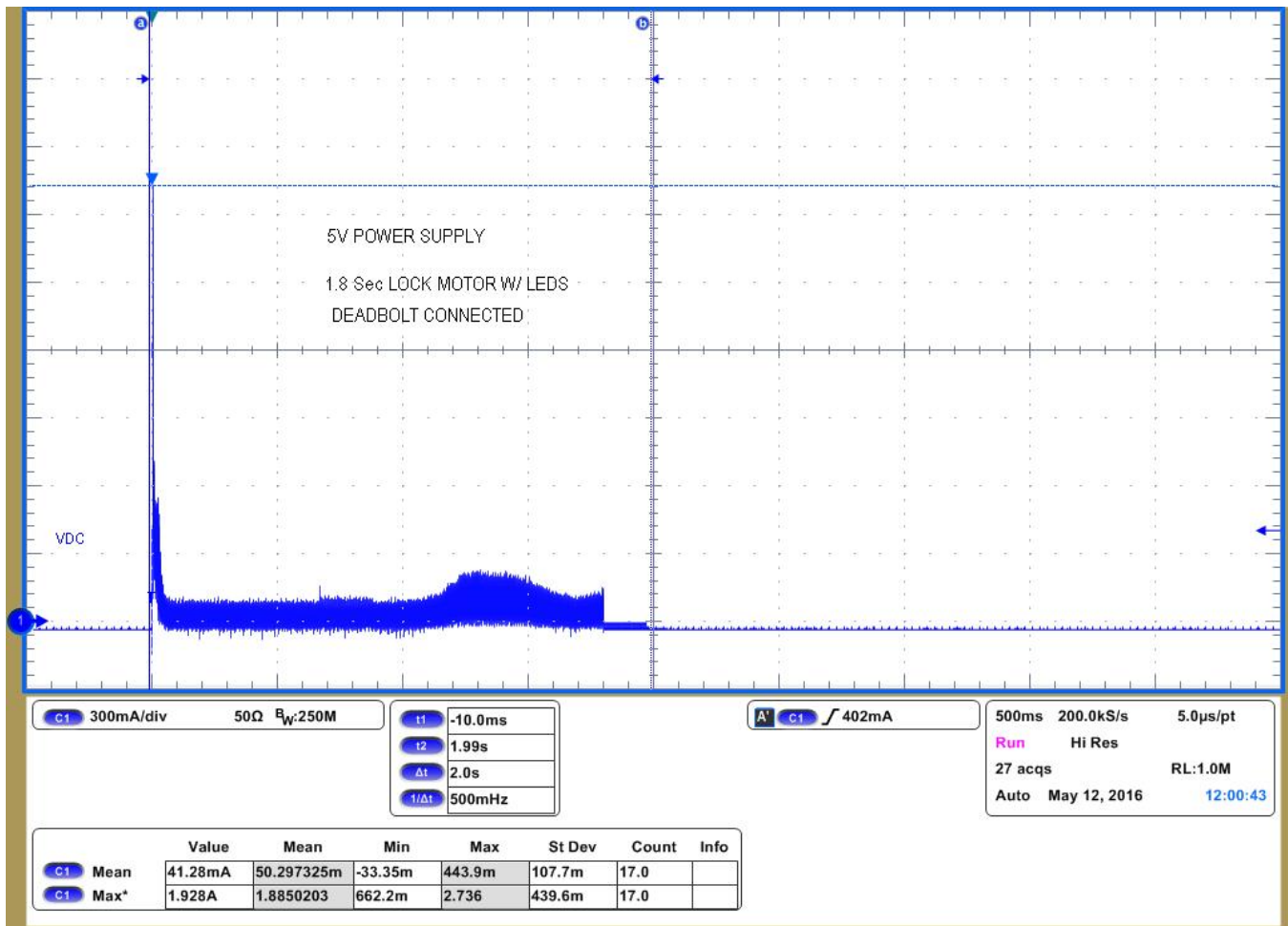


图 53. 1.8 秒负载电机锁定（启用 LED）

8.4.4 负载电机总结

表 6 总结了与门栓相连接的电机的所有测量结果。由于电池消耗，电池会提供不稳定的结果，因此我们没有使用电池，而是使用了 5V 电源以实现测量结果的标准化。

表 6. 空载电机结果总结

负载电机配置 (5V)	峰值电流	平均电流
解锁（禁用 LED）	1.923A	45.947mA
锁定（禁用 LED）	1.895A	47.997mA
解锁（启用 LED）	1.931A	49.804mA
锁定（启用 LED）	1.928A	50.297mA

8.5 估算电池寿命

为了轻松计算估算电池寿命，我们分别讨论了 TIDA-00757 参考设计在各个运行状态下的情况。我们在测试过程中收集了在待机、低功耗蓝牙广播、低功耗蓝牙连接以及电机和 LED 运行状态下的平均电流。为了估算在每个状态下消耗了多少电流，需要计算或测量每个事件的平均电流、每个事件的时间以及处于该状态的总时间。其中的计算均采用 24 小时的时间范围，因为我们假定在 24 小时的周期内发生 24 个锁定或解锁事件。由于采用 24 小时周期，更容易换算出以年为单位的电池寿命。

注：除非另有说明，否则以下各节中的电池容量计算以 mAh（而不是 mWh）为单位。

8.5.1 电机和 LED 平均电流

8.4 节中已测得了电机和 LED 的平均电流。这些电流计算都考虑到了最高电流消耗测量数据。在锁定事件期间（LED 处于运行状态），我们测得 2 秒内的平均电流为 50mA。要得出 24 小时内的平均电流消耗，请使用公式 16 和公式 17。

$$\text{Duty Cycle of Motor State} = \text{Events} \times \text{Event Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (16)$$

$$\text{Motor } I_{\text{avg}} = \text{LED and Motor } I_{\text{avg}} \times \text{Events} \times \text{Event Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (17)$$

$$\text{Motor } I_{\text{Avg}} = 50\text{mA} \times 24 \times 2\text{secs} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (18)$$

电机 $I_{\text{Avg}} = 0.028\text{mA}$

8.5.2 低功耗 Bluetooth® 连接状态平均电流

由于已得到单个低功耗蓝牙连接脉冲的平均电流，因此可以计算出 24 小时周期的总电流消耗。7.6ms 的平均电流为 0.788mA。必须计算 30 秒连接时间内低功耗蓝牙连接脉冲的数量。LED 和电机电流测量包含连接脉冲，因此必须从连接周期中减去持续 2 秒的电机事件。连接周期是指脉冲之间的时间或 30ms。

$$\text{BLE Connected Pulses Per Event} = \frac{\text{Connected Time} - \text{Motor Event Time}}{\text{Connection Period}} \quad (19)$$

$$\text{BLE Connected Pulses Per Event} = \frac{30\text{sec} - 2\text{sec}}{0.03\text{sec}} \quad (20)$$

$$\text{Duty Cycle of Connected State} = \text{BLE Connected Pulses} \times \text{Events} \times \text{Event Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (21)$$

$$\text{Connected } I_{\text{avg}} = \text{Connected } I_{\text{avg}} \times \text{BLE Connected Pulses} \times \text{Events} \times \text{Event Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (22)$$

$$\text{Connected } I_{\text{avg}} = 0.788\text{mA} \times \frac{30-2}{.03\text{sec}} \times 24 \times .0076\text{sec} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (23)$$

连接 $I_{\text{avg}} = 0.001553\text{mA}$

8.5.3 低功耗 Bluetooth® 广播状态平均电流

9.9ms 内低功耗蓝牙广播脉冲期间的平均电流为 1.235mA。CC2640R2F 仅在未连接至器件或电机正在运行时发送广播数据包；因此必须从低功耗蓝牙广播状态的运行时间中减去这些周期。

$$\text{Number of BLE Advertisement Packets} = \frac{24\text{hrs} \times 60\text{mins} \times 60\text{secs} - (\text{Connected Time} \times \text{Events})}{\text{Advertising Period}} \quad (24)$$

$$\text{Duty Cycle of Advertisement State} = \text{BLE Advertisement Pulses} \times \text{Pulse Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (25)$$

$$\text{Advertisement } I_{\text{avg}} = \text{Advertisement } I_{\text{avg}} \times \text{BLE Advertisement Pulses} \times \text{Events} \times \text{Event Duration} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (26)$$

$$\text{Advertisement } I_{\text{avg}} = 1.235\text{mA} \times \frac{86400 - (30 \times 24)}{0.5\text{sec}} \times .0099\text{sec} \times \frac{1}{24\text{hrs}} \times \frac{1}{60\text{mins}} \times \frac{1}{60\text{secs}} \quad (27)$$

广播 $I_{avg} = 0.024249\text{mA}$

8.5.4 平均待机电流

我们测量了待机电流，将其作为每个低功耗蓝牙广播脉冲之间的平均电流消耗。因此，要得出智能锁处于待机模式的时间，应从总时间中减去智能锁处于其他状态的时间（请参阅公式 28）。然后，将待机电流乘以它处于待机模式的总时间百分比（请参阅公式 30）。测得的待机电流为 $4.7\mu\text{A}$ 。

$$\text{Standby Time} = 24 \text{ hrs} \times 60 \text{ mins} \times 60 \text{ secs} - \text{Number of BLE Advertisement Pulses} \times \text{Pulse Duration} - \text{Number of BLE Connected Pulses} \times \text{Events} \times \text{Connected Pulse Duration} \quad (28)$$

连接时间包含智能锁处于电机状态和 LED 状态的时间。

$$\text{Time in Standby} = 86400 \text{ secs} - \frac{86400 - (\text{Connected Time} \times \text{Events})}{\text{Advertising Period}} \times \text{Pulse Duration} - \frac{\text{Connected Time} - \text{Motor Event Time}}{\text{Connection Period}} \times \text{Connected Pulse Duration} \times \text{Events} \quad (29)$$

$$\text{Standby } I_{avg} = 0.0047\text{mA} \times \left(86400 \text{ secs} - \frac{86400 \text{ secs} - (30 \text{ secs} \times \text{Events})}{0.5 \text{ secs}} \times 0.0099 \text{ secs} - \frac{30 \text{ secs} - 2 \text{ secs}}{0.03 \text{ secs}} \times 0.0076 \times \text{Events} \times \frac{1}{24 \text{ hrs}} \times \frac{1}{60 \text{ mins}} \times \frac{1}{60 \text{ secs}} \right) \quad (30)$$

待机 $I_{avg} = 0.004598\text{mA}$

8.5.5 估算电池寿命

要准确估算电池寿命，需要得出总系统平均电流。可以通过将每项平均电流相加来得出总平均电流（请参阅表 7 和公式 31）。

表 7. 每种状态的电流消耗

状态	平均电流 (μA)
电机和 LED	27.8μA
低功耗蓝牙已连接	1.6μA
低功耗蓝牙广播	24.2μA
待机	4.6μA
总平均电流	58.2μA

$$\text{Battery Life in Years} = \frac{\text{Battery Capacity (mAh)}}{\text{Avg Current (mA)}} \times \frac{1}{(8760 \text{ hr / yr})} \times \text{Derating Factor} \quad (31)$$

公式 31 中的降额因子代表电池的自然老化。

$$\text{Battery Life in Years} = \frac{3000 \text{ mAh}}{0.058178 \text{ mA}} \times \frac{1}{(8760 \text{ hr / yr})} \times 0.90 \quad (32)$$

图 54 比较了 TIDA-00757 参考设计的实验电池寿命和理论电池寿命。理论电池寿命更短，因为假设的电机电流、待机电流和电源拓扑损耗更多。每种状态下的理论估算电流消耗远高于在测试的实验阶段实际测得的值。

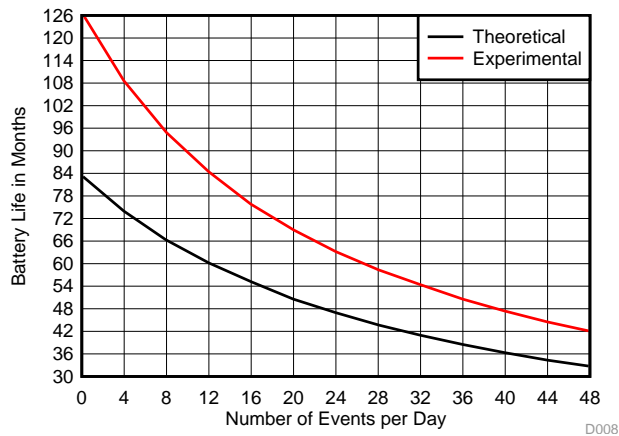


图 54. 事件数量与电池寿命（理论值与实验值）

9 设计文件

9.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

9.2 物料清单

要下载物料清单，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

9.3 PCB 布局建议

为了确保高性能，TIDA-00757 参考设计采用了 4 层 PCB 布局。第二层为固态接地层，第三层用于电源轨布线（无接地填充）。顶层和底层用于一般信号布线，未使用的区域还具有接地填充。对于本 TI 参考设计中使用的所有 TI 产品，应遵守各自数据表中详述的布局指南。我们将板载蓝牙天线放置在尽可能远离其他噪声源的位置，这些噪声源包括降压转换器或其他可充当天线的部件（例如测试点或大迹线）。

9.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

9.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

9.5 布局指南

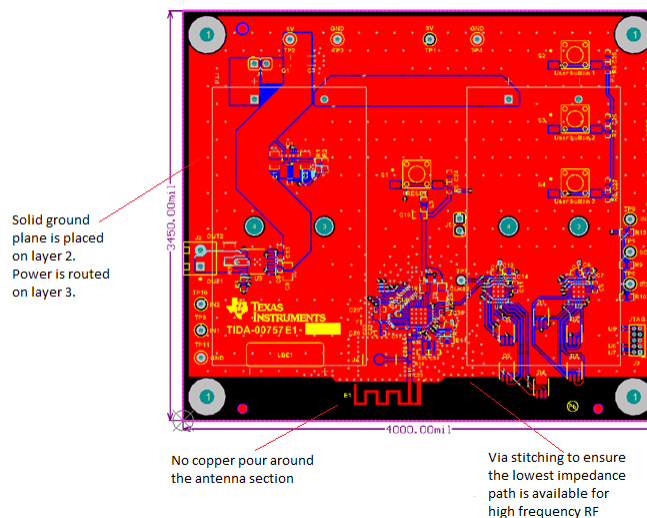


图 55. 智能锁参考设计布局指南

9.6 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

9.7 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

10 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-00757](#) 中的设计文件。

11 参考文献

1. Texas Instruments, *Reverse Current Battery Protection Circuits*, Application Report ([SLVA139](#))
2. Texas Instruments, *Calculating Motor Driver Power Dissipation*, Application Report ([SLVA504](#))
3. 德州仪器 (TI), WEBENCH 设计中心 (<http://www.ti.com.cn/webench>)

11.1 商标

E2E, SimpleLink, SmartRF, Code Composer Studio, DCS-Control, MSP430 are trademarks of Texas Instruments.

WEBENCH is a registered trademark of Texas Instruments.

Cortex is a registered trademark of ARM.

HomeKit, LightBlue are trademarks of Apple, Inc.

Apple is a registered trademark of Apple, Inc.

Arm is a registered trademark of Arm Limited (or its subsidiaries).

Bluetooth is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

CoreMark is a registered trademark of Core-Mark International, Inc.

Energizer is a registered trademark of Energizer Holdings, Inc.

Android is a trademark of Google, Inc.

Samsung, Galaxy S are registered trademarks of Samsung Electronics Co., Ltd.

Tektronix is a registered trademark of Tektronix, Inc.

ZigBee is a registered trademark of ZigBee Alliance.

12 关于作者

JARROD KREBS 是德州仪器 (TI) 的一名系统设计人员，负责开发工业领域的参考设计。Jarrod 在软件和嵌入式应用（在基于 ARM 的微控制器和 TI MSP430™ 平台上实现）领域经验丰富。Jarrod 毕业于美国堪萨斯州曼哈顿市的堪萨斯州立大学，拥有计算机工程理学学士学位。而且，Jarrod 还是电气电子工程师协会 (IEEE) 的成员。

ARAMIS P. ALVAREZ 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。Aramis 在工作中充分利用了他在系统级模拟、混合信号、电源管理和板设计方面积累的丰富经验。Aramis 在佛罗里达大学获得了电气工程理学学士 (BSEE) 学位，并在密歇根大学安娜堡分校获得了电气工程理学硕士 (MSEE) 学位。

CHRISTINA S. LAM 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发工业领域的参考设计解决方案固件。Christina 在应用处理器、微控制器以及数字信号处理器领域经验丰富，尤为擅长开发嵌入式固件。Christina 毕业于德克萨斯大学奥斯汀分校，拥有电气和计算机工程理学双学士学位。

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from B Revision (January 2018) to C Revision	Page
• 已更改 将所有 CC2640 实例更改成了 CC2640R2F	1
Changes from A Revision (October 2016) to B Revision	Page
• 删除了 <i>Bluetooth</i> ® 智能	2
Changes from Original (August 2016) to A Revision	Page
• 已删除 将“低 Rx/Tx 电流 (6mA/9mA)”从特性	1
• 已删除 将“电机驱动器的 360mΩ 低 $R_{DS(on)}$ ”从特性	1
• 已添加 将“平均总电流消耗为 58.2μA（每天门锁闭和解锁 24 次）”添加到了特性	1
• 已添加 将“4.6μA 待机电流”添加到了特性	1
• 已删除 将“直流/直流转换器使用 71.1μA 的平均功耗（220ms 连接间隔）”从特性	1

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能而设计。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等许可包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司