模拟 EEPROM 使用指南

概述

本手册适用范围：

适用范围
SPC1169，SPD1179，SPD1176

EEPROM（电可擦除可编程只读存储器）通常用于工业应用中存储可更新的数据。EEPROM 是一种永久非易失性存储器系统，用于电子设备在电源故障时存储和保留少量数据。

本手册以 **128K SPD1179** 为例：

- 文中示例代码中有关 Flash 及 RAM 地址范围的描述需要根据不同的产品进行更改；
- 采用 Flash 中的两个扇区来模拟 EEPROM 中 Page0 与 Page1；

目录

图片列表

表格列表

版本历史

版本	日期	作者	状态	变更
A/0	2023 年 3 月 10 日	黄恒方	Outdated	首次发布。
A/1	2023 年 12 月 6 日	柴灿	Released	内容描述改为 MEEPROM。

术语或缩写

术语或缩写	描述

1 外部 EEPROM 和模拟 EEPROM 之间的主要区别

EEPROM 是许多嵌入式应用（需要进行非易失性数据存储，且运行期间以 Byte 或 Word 的颗粒度进行更新）的关键元件。

用于这些系统的微控制器通常基于嵌入式 Flash 存储器。为了减少所用元件，节省 PCB 空间和降低系统成本，SPD1179 的 Flash 存储器可以用来替代外部 EEPROM，进行代码和数据存储。

然而与 Flash 存储器不同的是，在数据被重新写入前，外部 EEPROM 不需要擦除操作来释放空间。需要专门的软件管理来将数据存入嵌入式 Flash。

模拟软件的机制取决于多种因素，包括 EEPROM 可靠性、Flash 存储器的结构以及产品需求。嵌入式 Flash 和外部串行 EEPROM 之间的主要区别对于任何使用同样 Flash 技术的微控制器（并非特指 SPD1179）都是相同的。

表 1-1：外部 EEPROM 和模拟 EEPROM 之间的区别

特性	外部 EEPROM（例如，AT24C02：I2C 串行访问 EEPROM）	利用片上 Flash 模拟 EEPROM
写操作时间	– 写一个 Byte：5ms 以内。因此，写一个 Word = 20ms – 页（8Bytes）写：5ms 以内。因此，写一个 Word = 2.5ms	写一个 Word（32-bit）：从 50us 到 18ms
写方式	启动后，不依赖 CPU 只需要供电	一旦启动，则依赖 CPU
读访问时间	读一个 Word（32-bit）：66us	读一个 Word（32-bit）：3us（SYSCLK = 100MHz）
写/擦除周期	100 万次	每个 Flash 页 10 万次 使用多个片上闪存内存页相当于增加写入周期数。

1.1 写操作时间的不同

由于 Flash 的写操作时间(在没有翻页的情况下为 50us)相比外部 EEPROM（ms 级）更短，重要参数可以更快地存入模拟 EEPROM（比外部串行 EEPROM 更快），因此能够提高数据存储能力。

2 实现 EEPROM 模拟

2.1 原理

考虑到 Flash 存储器本身的特性和产品需求，存在多种方式实现模拟 EEPROM。下面所描述的方式需要至少两个相同大小的 Flash 页（分配给非易失性数据）。

第一个 Flash 页最初被擦除并用于存储新数据，Flash 编程操作按照 Flash 地址的递增顺序依次完成。一旦第一个 Flash 页充满了数据，需要将第一个 Flash 页中的有效数据搬移到第二个 Flash 页。

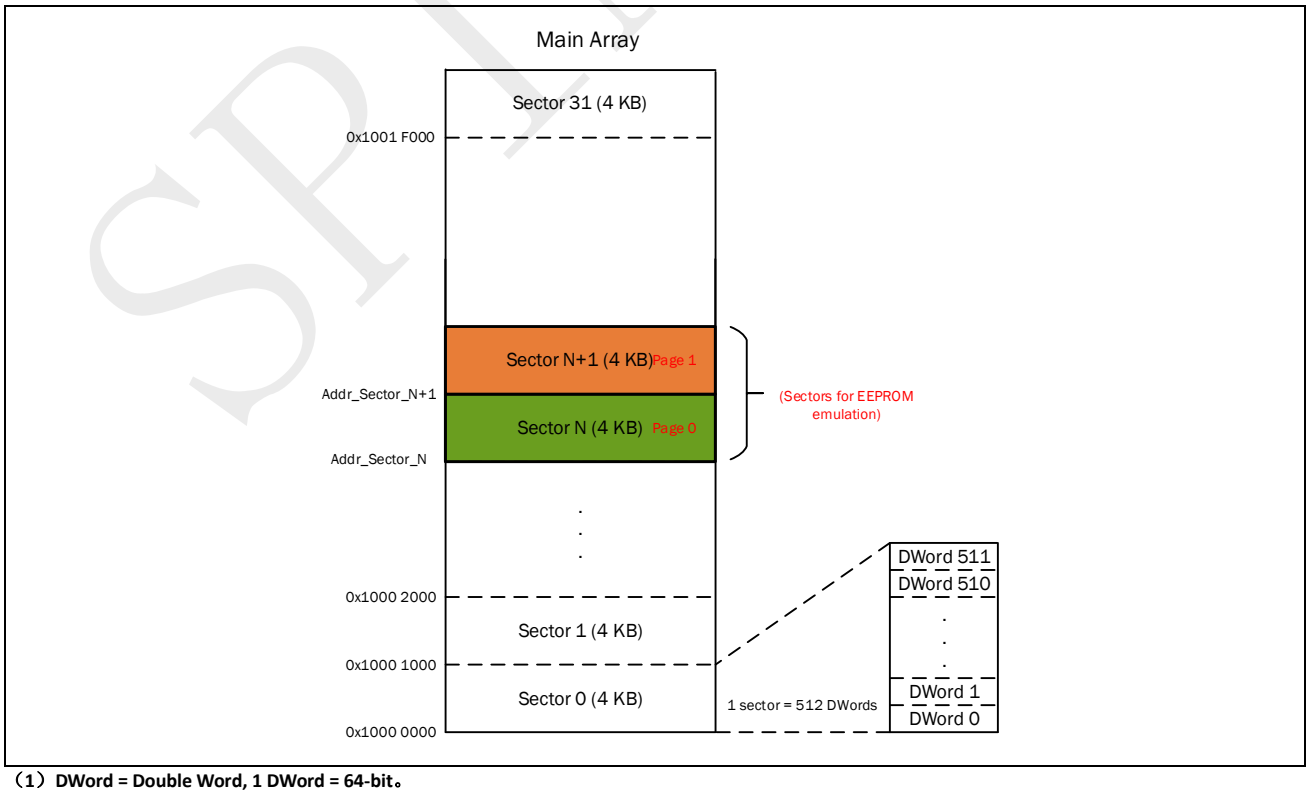
第二个 Flash 页仅收集第一个 Flash 页的有效数据，其余的区域可用于存储新数据。当将有效数据搬移到第二个 Flash 页之后，可以擦除第一个 Flash 页。

每个 Flash 页可以由 1 个或者多个 Flash 扇区组成。对于 SPD1179 而言，使用 2 个 Flash 页来实现 EEPROM 模拟（该模拟出来的 EEPROM 区域称为 MEEPROM，后文将使用此名称指代此 EEPROM 区域），每个 Flash 页由 1 个 Flash 扇区组成。如所图 2-1 示，在 Flash 主存储区域选择 Addr_Sector_N（Addr_Sector_N 需要以 Sector 大小对齐）为 MEEPROM 的起始地址（MEEPROM 算法会选择从 Addr_Sector_N 开始的连续两个 Sector 作为已用），这 2 个 Flash 页分别叫做 Page 0、Page 1。

每个 Flash 页的第一个 64 比特的双字（Double-Word）作为 Page Header，标识当前 Flash 页的状态。每个 Flash 页有下面两种可能的状态：

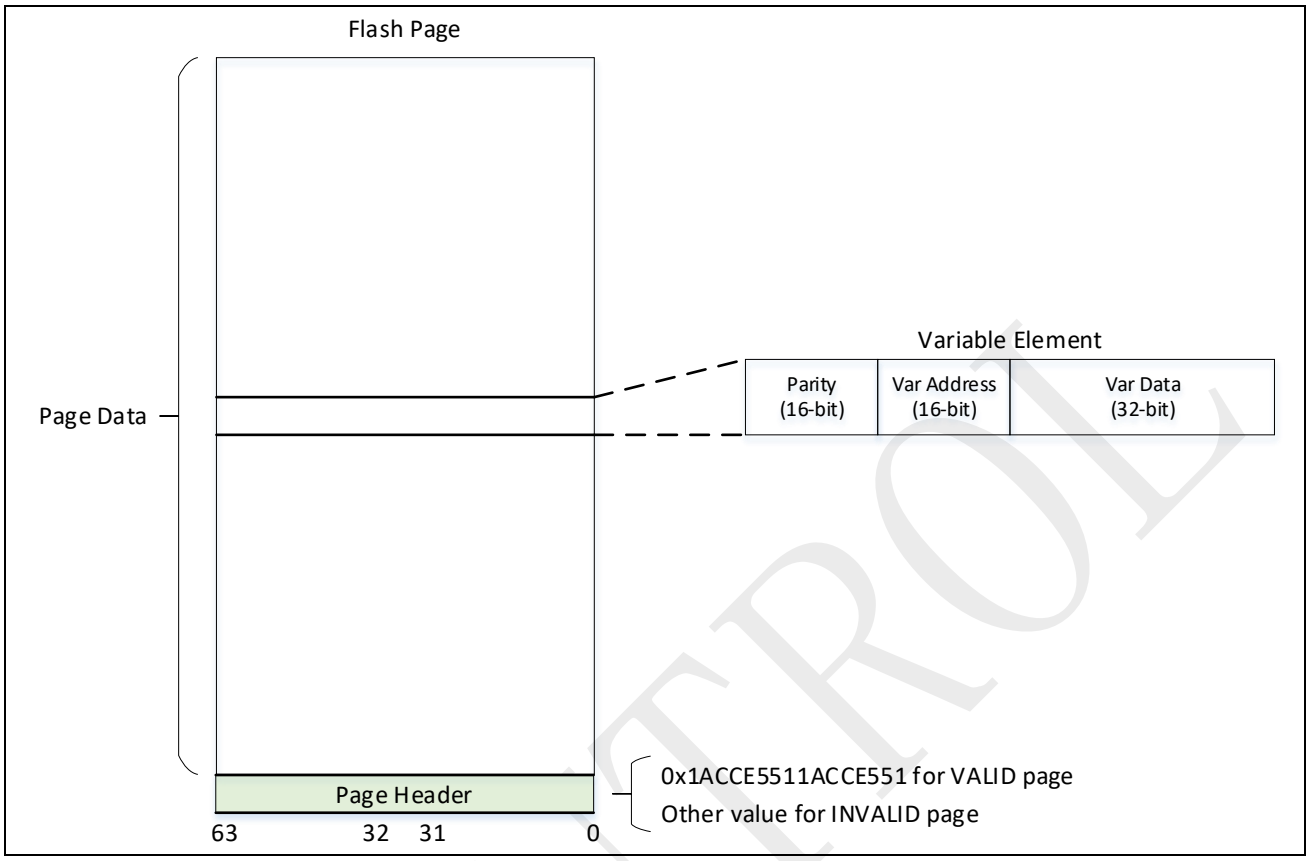
- INVALID：该页为空（初始状态，页擦除后即为空），或者正在接收其他页搬移来的数据；
- VALID：该页包含有效数据，用于存储新数据；直到所有有效数据被搬移到另一个 Flash 页，改页状态才会改变。

图 2-1：SPD1179 属于 MEEPROM 的 Flash 扇区



（1）DWord = Double Word, 1 DWord = 64-bit。

图 2-2：MEEPROM 中的变量格式



每个变量元素（Variable Element）都由一个虚拟地址（Var Address）和一个要存储在 Flash 中的数据值（Var Data）来定义，该数据值用于后续的检索或者更新。虚拟地址为 16 位，数据值为 32 位。SPD1179 中 MEEPROM 要求的虚拟地址范围为 0 ~ 255。

每个变量元素还包含一个 16 位 Parity，用于检查变量元素的完整性。修改数据时，与同一虚拟地址关联的修改后数据存储在新的 Flash 位置。数据检索会返回最新的数据值。

2.2 原理示例说明

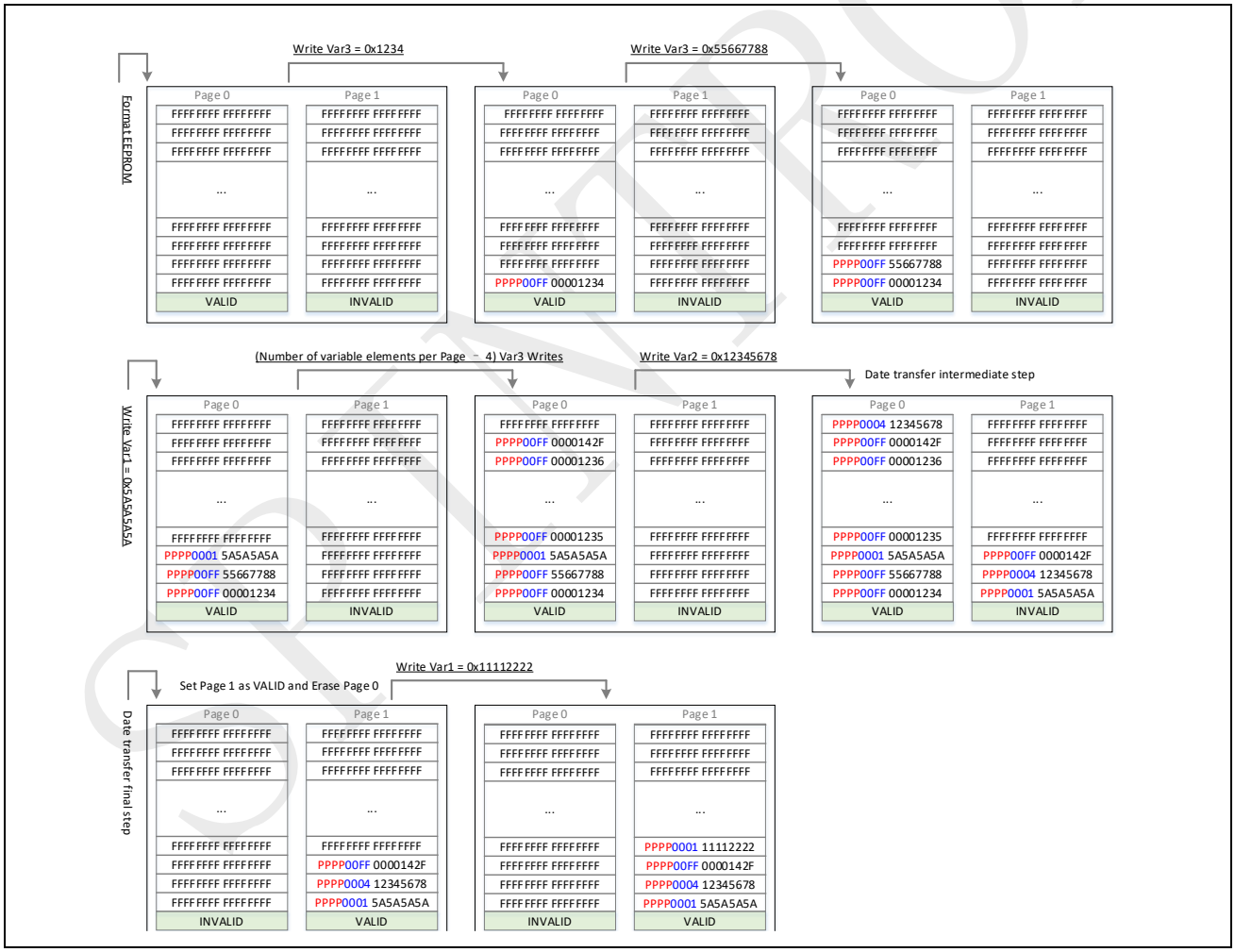
下面的示例展示了 3 个 MEEPROM 变量的软件管理。变量的虚拟地址如表 2-1 所示。

表 2-1：变量虚拟地址

变量	虚拟地址	数据位宽
Var1	0x01	32 位
Var2	0x04	32 位
Var3	0xFF	32 位

在本例中，只用到了两个 Flash 页：Page 0 和 Page 1。图 2-3 中，只展示了按 Flash 地址递增顺序执行的写命令，其中，PPPP 代表变量元素的 16 位 Parity。

图 2-3：数据更新过程



2.3 MEEPROM 固件说明

应用程序可以调用的 MEEPROPM 固件函数如表 2-2 所示。

表 2-2：MEEPROM API 说明

函数名称	说明
MEEPROM_Init	将模拟 EEPROM 变量元素配置为其初始状态，并将 Flash 页恢复到已知的良好状态。 芯片复位后，在访问模拟 EEPROM 之前，应该首先调用该函数。
MEEPROM_Format	擦除所有用于模拟 EEPROM 的 Flash 页，并初始化 EEPROM
MEEPROM_ReadWord	该函数用于获取虚拟地址对应的变量元素（最近一次存储）的数据值。 若找不到虚拟地址对应的变量元素，该函数返回 EEPROM_STATUS_NO_DATA。
MEEPROM_WriteWord	该函数用于更新虚拟地址对应的变量元素的数据值。

注意： MEEPROM_Init 与 MEEPROM_Format 均是初始化操作，调用 MEEPROM_Format 后无需再调用 EEPROM_Init。

表 2-3：模拟 EEPROM 固件 API 返回值说明

返回值符号	返回值	描述
EEPROM_STATUS_OK	0x00000000U	操作成功
EEPROM_STATUS_WRITE_ERROR	0x00000001U	Flash 编程操作错误
EEPROM_STATUS_ERASE_ERROR	0x00000002U	Flash 擦除操作错误
EEPROM_STATUS_INVALID_ADDR	0x00000004U	虚拟地址参数值不在有效范围（0 ~ 255）内
EEPROM_STATUS_WRITE_CHECK_FAIL	0x00000008U	写操作时，写入的变量元素回读校验错误
EEPROM_STATUS_NO_DATA	0x00000010U	读操作时，模拟 EEPROM 中找不到虚拟地址对应的变量元素
EEPROM_STATUS_INVALID_ENTRY	0x00000020U	写操作时，要写入变量元素的 Flash 地址，不在当前有效 Flash 页的地址范围内 读操作时，要读取变量元素的 Flash 地址，不在当前有效 Flash 页的地址范围内
EEPROM_STATUS_ELEMENT_NOT_EMPTY	0x00000040U	写操作时，要写入变量元素的 Flash 地址内容不为空
EEPROM_STATUS_ADDR_MISMATCH	0x00000080U	读操作时，虚拟地址参数值与读取的模拟 EEPROM 变量元素中的虚拟地址不一致
EEPROM_STATUS_PARITY_ERROR	0x00000100U	读操作时，读取的模拟 EEPROM 变量元素 Parity 检验错误
EEPROM_STATUS_NO_PAGE_FOUND	0x00000400U	读/写操作时，未找到 VALID 的 Flash 页
EEPROM_STATUS_PAGE_HEADER_ERROR	0x00000800U	设置 Flash 页 Page Header 为 VALID 时发生错误
EEPROM_STATUS_TRANSFER_ERROR	0x40000000U	Flash 页之间搬移数据错误，与其他错误返回值逻辑或
EEPROM_STATUS_INVALID_HEADER	0x80000000U	无效的 Flash 页 Page Header 状态组合（例如 Page0 Header Invalid, Page1 Header Invalid; Page0 Header Valid, Page1 Header Valid 且 Page0 和 Page1 中的数据数量一样多） **此时，需要调用 EEPROM_Format 函数格式化模拟 EEPROM**

2.4 MEEPROM 时序

本章节介绍 SPD1179 中 MEEPROM 相关的时序参数，如表 2-4 所示。

表 2-4：MEEPROM 时序（SYSCLK = 100MHz）

操作	模拟 EEPROM 时序		
	最小	典型	最大
MEEPROM_WriteWord（典型情况）	-	50us	-
MEEPROM_WriteWord（伴有 Flash 页数据搬移情况）	-	18ms	-
MEEPROM_Read	-	3us	-

3 工程应用讨论

本章节提供有关如何克服嵌入式应用程序中的软件限制以及如何满足不同应用程序需求的建议。

3.1 数据粒度管理

MEEPROM 可用于需要以字节、半字（Half-Word）或字（Word）粒度更新数据的非易失性存储的嵌入式应用。数据大小通常取决于应用要求，例如传感器或通信接口数据大小。

MEEPROM 固件设计是用于支持 32 位字粒度。对于字节、16 位半字的非易失性存储需求，应用程序可以将先将其转换成 32 位字类型，然后再存储到 MEEPROM 中。但是，这种方式对 Flash 的存储空间利用率较低。为了优化 Flash 的使用，用户应用程序可以将所有较小尺寸的数据元素收集到 32 位数据元素中，然后再将内容存储在 MEEPROM 中。这将通过同时写入 16 位虚拟地址、16 位 Parity 和 32 位数据值来确保 64 位 Flash 的最佳使用。

3.2 磨损均衡算法

磨损均衡算法允许监控和均匀分布不同 Flash 页之间的写和擦除操作。当不使用磨损均衡算法时，Flash 页不会以相同的频率使用。例如，具有长期数据的 Flash 页不会像包含频繁更新数据的 Flash 页那样经历那么多的写和擦除周期。磨损均衡算法可确保平等地使用每个 Flash 页的所有可用的写周期。

根据设计，MEEPROM 算法在 Flash 页之间均匀分配 Flash 写和擦除操作。无论什么用户变量被写入，Flash 写操作都按地址递增的顺序执行。当一个 Flash 页已满时，有效变量元素将被复制到另一个 Flash 页，并且第一个 Flash 页将被完全擦除。磨损均衡算法具体实现如下：

- 当 Page 0 已满时，将 Page 0 中的有效变量元素复制到 Page 1 中并将 Page 1 设置为 VALID，然后擦除 Page 0；
- 当 Page 1 已满时，将 Page 1 中的有效变量元素复制到 Page 0 中并将 Page 0 设置为 VALID，然后擦除 Page 1；

3.3 Page Header 恢复

在 Page Header 更新、Flash 页擦除或者数据搬移期间断电或复位的情况下，Page Header 可能会损坏。为了检测该损坏并从中恢复，MEEPROM 模拟算法提供了 MEEPROM_Init 函数。上电后，应当立即调用该函数，修复 Page Header。

3.4 错误数据处理

MEEPROM_Init(&MeepromCtrlInfo)会根据 Page0 或 Page1 中的数据填充 MeepromCtrlInfo，读取过程如果发现错误（EEPROM_STATUS_PARITY_ERROR，EEPROM_STATUS_INVALID_ADDR），会自动忽略，只根据有效数据填充 MeepromCtrlInfo。

如果不想忽略 Page0 或 Page1 中的无效数据，可通过调用 MEEPROM_Check(&MeepromCtrlInfo)来返回所有错误，并自行决定处理方式。例如可以在发现错误后调用 MEEPROM_Format(&MeepromCtrlInfo)，实现全擦，并填充 MeepromCtrlInfo。

0_Examples\18_6_Flash_EEPROM_Emulation_Controller

```
    /* Init eeprom struct */
    status = pHWLIB->MEEPROM_Init(&MeepromCtrlInfo);
    if (status != EEPROM_STATUS_OK)
    {
        if (status == EEPROM_STATUS_INVALID_HEADER)
        {
            status = pHWLIB->MEEPROM_Format(&MeepromCtrlInfo);
            if (status != EEPROM_STATUS_OK)
            {
                printf("Erases EEPROM pages and Select a page FAIL!\n");
                return 1;
            }
            else
            {
                printf("Erases EEPROM pages and Select a page as VALID
SUCCESS\n");
            }
        }
    }

    /* Check the data in meeprom */
    status = MEEPROM_Check(&MeepromCtrlInfo);
    if (status != EEPROM_STATUS_OK)
    {
        status = pHWLIB->MEEPROM_Format(&MeepromCtrlInfo);
        if (status != EEPROM_STATUS_OK)
        {
            printf("Erases EEPROM pages and Select a page FAIL!\n");
            return 1;
        }
        else
        {
            printf("Erases EEPROM pages and Select a page as VALID SUCCESS\n");
        }
    }
```

3.5 随机掉电处理

在实际应用中可能会遇到如下情形时仍需保存数据：

- 主动发送 SLEEP 或 STOP 指令，使得系统进入低功耗：
  - 处理方案：在这种情形中，需要确保先调用 MEEPROM_WriteWord 将数据保存后，再主动调用 SLEEP 以及 STOP 命令，使系统进入低功耗。
- 随机掉电（例如：电源故障等）：
  - 处理方案：从表 2-4 中可以看出，写一个 Word（32-bit）的时间从 50us 到 18ms（伴有 Flash 页数据搬移情况）不等。这意味着在随机掉电的应用场景中如果要使用 MEEPROM，需要考虑电容的电量是否能够满足数据写入的时间要求。若实际工程中，由于各种因素考量使得电容电量无法满足数据写入需求，此时可参考 SDK 中 **EEPROM_Data_Storage_Upon_VBAT_UV_Event** 示例工程提供的解决思路。