

TI 电力线载波 (PLC) 方案硬件设计指南

Richard Ma

Shenzhen MCU FAE Team

摘要

TI 专注于基于 OFDM 调制的窄带电力线载波 (PLC) 技术的研发和推广。通过 DSP 加高集成度的模拟前端 (AFE) 的架构, 使电力线载波设计变得灵活且简单。在设计过程中, TI 提供了详细的参考电路图帮助用户快速完成开发, 也提供了灵活的软件库帮助客户根据自己的需求深入定制软件。

尽管 TI 的 PLC 开发包已经提供了参考原理图, 但在设计过程中仍然有较多细节需要考虑。这些细节会对最终的性能产生较多影响。本文对 PLC 模块设计开发过程中的设计细节进行了阐述, 帮助读者快速上手, 完成 PLC 设计。

目录

前言	2
1 系统综述.....	2
2 主机端设计考量	3
3 C2000 DSP 硬件设计	4
4 模拟电路设计.....	5
4.1 AFE031 电路设计	5
4.2 滤波电路及耦合电路设计	5
参考文档	9

图

图 1. PLC 模块实现框图.....	2
图 2. 两种固件升级功能的实现构架	4
图 3. 接收端的滤波电路.....	6
图 4. 发送端的调理电路.....	6
图 5. 耦合电路	7
图 6. 三相耦合电路.....	8

表格

表格 1. PRIME 设计中针对不同电源变压器及 TVS 管选择	7
---	---

前言

常见的电力线载波（PLC）应用中，PLC 模块总是共用同一条总线，进行半双工式的通信。从应用方式上看，通常认为有两种典型的方式，即组网和非组网方式。在非组网方式下，用户需要自行考虑规避冲突、共用总线及设计握手协议；而组网的方式通常指通过使用组网协议（如 PRIME、G3、P1901.2 等）提供自动组网、自动中继的功能，也包括了使用用户自行设计组网协议。非组网方式非常简单，只需要使用相同的 PLC 模块即可通信。而组网方式相对复杂，部分组网协议要求网络中存在一个特殊的协调器来对网络进行管理，称为基础节点（Base Node, BN）或协调器(Coordinator)，而网络中的从节点（Service Node, SN）使用普通的 PLC 模块。

本文主要介绍 PLC 模块的设计，用于非组网方式或者组网方式的从节点。基础节点的设计不作为本文讨论范围。

1 系统综述

设计开始前，请确保前往 TI PLC 产品页面

(<http://www.ti.com/lstds/ti/apps/powerinfrastructure/plcmodem/product.page#software>) 下载安装最新的 PLC 软件开发包。安装后的软件包包含了相应方案的参考设计电路及说明文档。

PLC 模块主机通过 UART，将 TI PLC 模块作为 PLC Modem 使用，通过 UART 配置 PLC 模块并收发数据。PLC 模块可分为三部分，DSP、模拟前端（AFE）以及高压耦合电路。其中 DSP 的作用是实现 OFDM 信号的调制和解调；AFE 在接收端对信号进行滤波和调理，在发送端对信号进行滤波和放大；高压耦合电路通过高压电容将信号和高压电分离，使用变压器隔离保证安全。在低压直流线、冷线中，可以省略变压器以降低成本。PLC 模块及其在系统中的关系如图 1 所示。

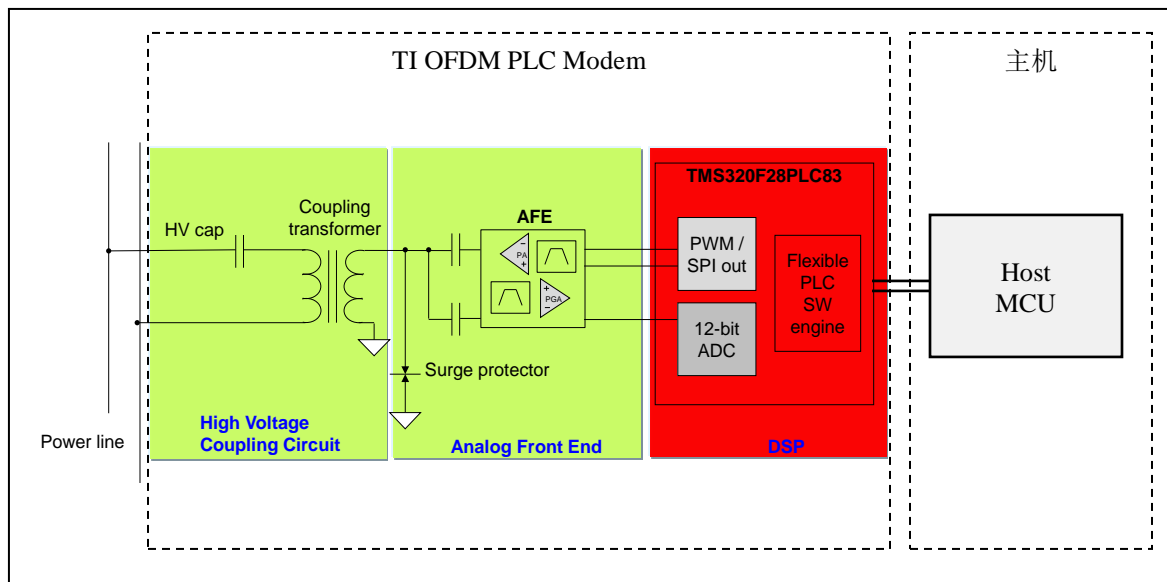


图 1. PLC 模块实现框图

2 主机端设计考量

主机端主要通过 UART 端口和 PLC 模块中的 DSP 进行通信。默认的 UART 通信速率为 57600-N-8-1。PLC84 DSP 上有两个 UART 端口，名字分别为 SCI-A 和 SCI-B。PLC 模块会响应来自任何一个串口的命令。但需要注意的是，PLC 模块只会根据配置，将数据（data port）或状态（diagnostic port）从其中一个串口发出，使用时注意配置回复信息的端口。

当 PLC 应用需要符合 PRIME 标准并进行认证时，升级 PLC 模块固件的升级功能是必须的。固件升级时，PLC 模块接收电力线上发来的固件数据，并存在上位主机端，在接收完成时，由主机控制重新烧写固件。G3 标准目前则没有固件升级的要求，但实现固件升级的方法类似。主机在设计时，应充分考虑升级功能逻辑，并留出存储升级固件所需的存储空间。所需的预留空间至少为 256KB；推荐预留的空间为 1MB，用于保存旧版本固件以便在升级出现故障时，恢复到正常工作的固件。

在现有系统中也许无法提供足够的资源完成固件升级，此时也可以考虑设计一个中间 MCU 协助完成升级功能。两种固件升级功能实现对比如

图 2 所示。

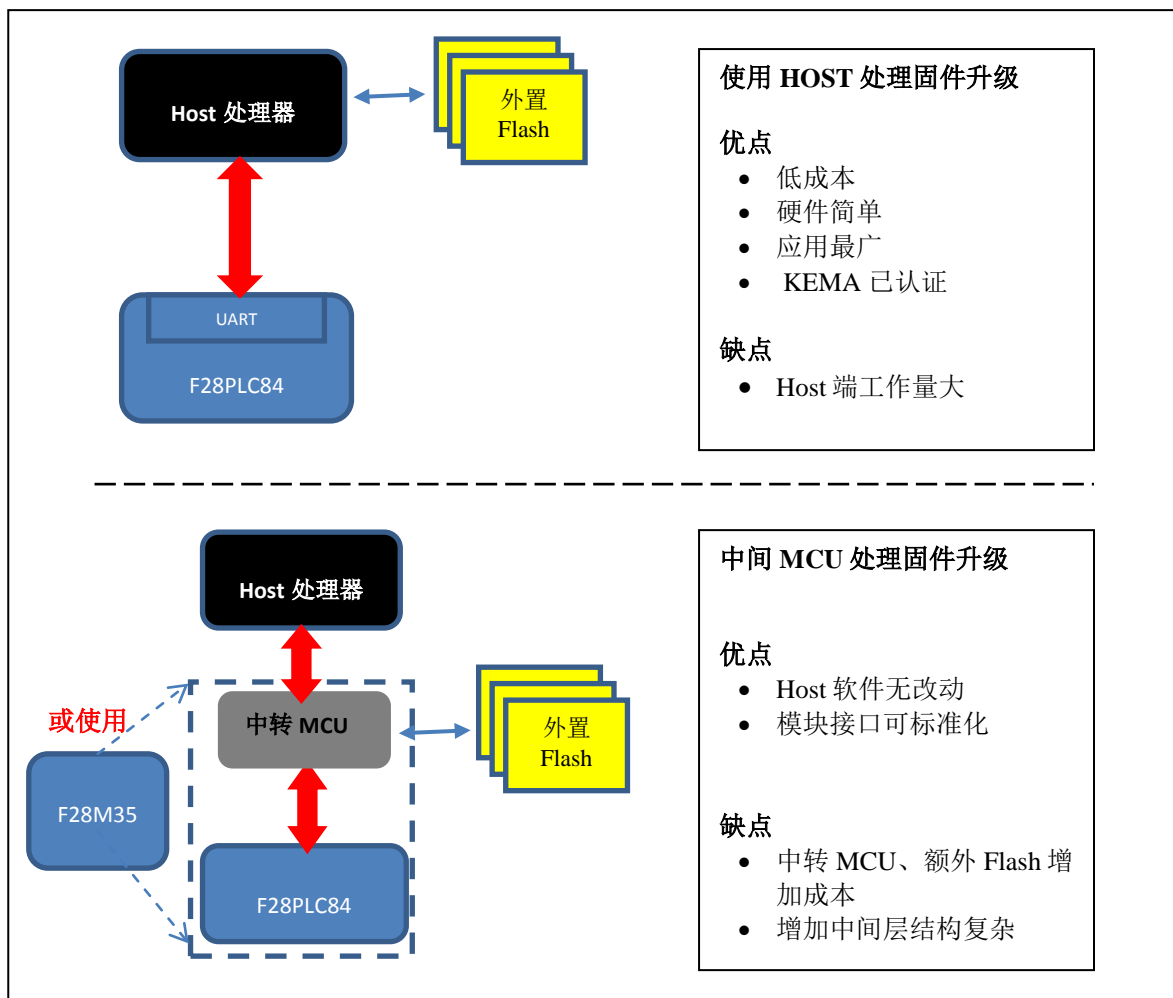


图 2. 两种固件升级功能的实现构架

3 C2000 DSP 硬件设计

DSP 端硬件一般用到以下三种 DSP 芯片的一种：

- TMS320F28PLC84PNT (TMS320F28069PNT)
- TMS320F28035PN
- TMS320F28M35H52C1

设计 DSP 硬件时，除了与 AFE031 的功能性连接外（参考 TI 参考电路），主要有以下考虑：

- 电源
- JTAG 仿真器
- 复位引脚
- UART 及 GPIO 引脚
- ADC 输入

C2000 DSP 工作时，使用单独的 3.3V 电源供电，同时该 3.3V 电源也可以为 AFE031 的逻辑部分供电。运行 PLC 固件时，DSP 和 AFE031 工作平均电流合约为 150mA ~ 160mA。

硬件完成后，需要烧写 PLC 固件。试验及小批量烧写，可使用 TI XDS100；该仿真器也可以在对固件做进一步开发时作为调试器使用。XDS v1、v2 和 v3 版本均可以支持。仿真器信息如引脚分布、驱动等可以在 TI Wiki Page (<http://processors.wiki.ti.com/index.php/XDS100>) 找到。

PLC 工作环境往往较为恶劣，应对 DSP 系统进行充分的保护；同时建议主机端对 DSP 工作状态进行监控，并直接控制 C2000 的复位信号，以便在出现情况时对模块进行复位，恢复正常工作。DSP 的复位信号采用开漏驱动。考虑到 ESD 及其它干扰的情况，复位信号线上应有高频去耦电容，可能的话增加 ESD 保护器件及复位芯片。布板时复位信号线应远离 PCB 边缘。

选定与主机端相连的 UART 后，在布板时准备引针（TX、RX 和 GND）可以方便日后调试。如果有两个 UART 的 PLC 芯片，建议将另一个串口预留出来以便调试。调试可以通过 USB 转 UART 工具，在计算机上直接用 TI 的 Zero Config GUI (ZCG) 软件进行测试，而无需专门设计测试程序。

在 F28PLC84 (F28069) 上，默认有一个心跳指示灯，在 GPIO34 引脚；F28035 的默认心跳灯在 GPIO31 引脚；F28M35 默认心跳灯在 GPIO71 引脚。烧录 PLC 固件后，当正常工作时，该引脚会输出频率为 1Hz 的心跳信号，建议连接 LED 指示灯。上电后，快速闪烁或者不闪烁都说明工作异常。

DSP 通过 ADC 引脚对 AFE031 调理后的 OFDM 信号进行采样，布板时 AFE031 Rx PGA2_OUT 到 ADC 引脚的线应尽可能短以避免干扰。

4 模拟电路设计

4.1 AFE031 电路设计

目前 PLC 中与 PLC84、F28035 DSP 搭配的模拟前端主要是 AFE031。TI 已经为 AFE031 的电路设计提供了完整的设计参考，应用中，几乎可以照搬 TI 的参考设计。参考设计主要针对两种频带设计：Cenelec A 及 Cenelec BCD，设计者应根据自己对频带的需求、评估的结果选择相应的外围电路。对于不同频带，外围电路拓扑都是一致的，主要区别为滤波电路中电容的值不同。起影响作用的，主要是 Tx_F_OUT、Tx_PGA_IN 间到地电容，Tx_PGA_OUT、PA_IN 间到地电容，Rx_C1 上、Rx_C2 上到地电容，Rx_F_OUT、RX_PGA2_IN 间电容，Rx_PGA1_IN 与无源滤波电路间的电容。具体的容值请参考 AFE031 数据手册，或直接使用 TI EVM 的参考电路中的取值。

除此以外，还应该考虑供电的选择及散热的问题。

供电

AFE031 逻辑部分使用 3.3V 电源，DSP 和 AFE031 工作电流合约为 150mA ~ 160mA。发送部分因为 PA 功率较大，使用 7-24V 电源供电。供电电源直接决定了发送时 PA 端的发送功率，在针对 PRIME/G3 的设计中，推荐使用 12V、15V 或 16V 的电源，配合这些电源的电路已经过充分的验证，可以较容易地通过 Cenelec 认证。若系统没有认证需求，设计时可以根据系统的情况自行决定。

在针对 PRIME/G3 的设计中，使用 15V 电源供电时，AFE031 的工作电流的有效（RMS）值通常约为 160mA 至 170mA，在某些特殊情况下可能达到 250mA。所以电源设计时，建议按照 300mA 左右设计。实际应用中可能从变压器耦合进较大干扰，建议在 AFE031 周围的 15V 上放置 200uF~250uF 以上电容以保证较大瞬间电流的供应。

散热

在重载（电力线等效阻抗很小的情况下）连续发送时，AFE031 消耗的功率可达 2W，会面临发热问题。若散热设计不当，导致温度升高过快出现过热，会导致通讯中断。设计时请仔细参考 AFE031 器件手册中关于散热问题的阐述。由于 AFE031 热量主要由底部的散热盘导出，设计的核心思想是增大与散热盘连接的金属铜的面积。可能的话，使用多层 PCB 并在 AFE031 下方放置尽可能大的散热盘。

4.2 滤波电路及耦合电路设计

为了获得更好的接收效果，进入 AFE031 接收端的信号（RxLineF）要经过如图 3 的滤波电路。设计时可以直接参考该电路的选值。其中箭头位置 RxLineF 是进入 AFE031 的信号。

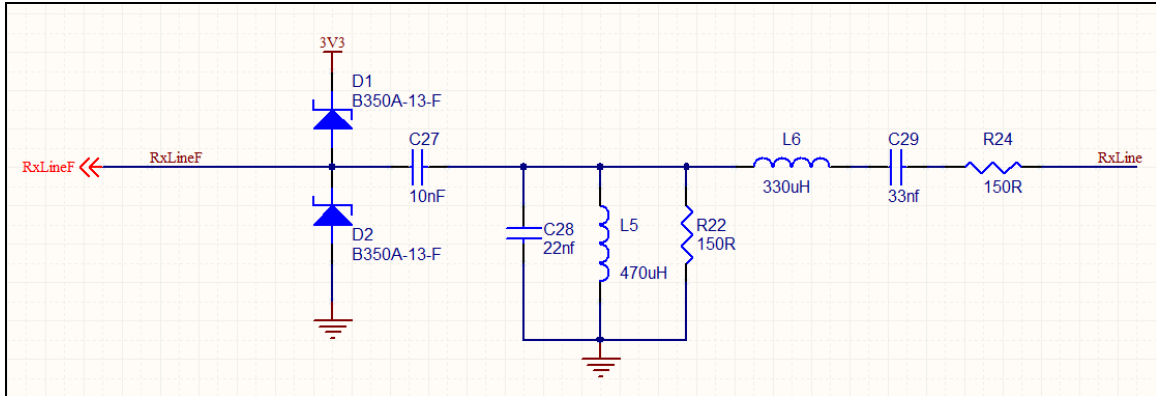


图 3. 接收端的滤波电路

如图 4 的发送端的调理电路对 AFE031 进行保护，L4 在负载较重时起到平滑波形的作用。需注意的是由于发送端电流可达 1.6A~1.7A，L4 的应选择 2A 以上电流的。图中箭头位置 TxLinePF 是 AFE031 发送的 PA 输出端。

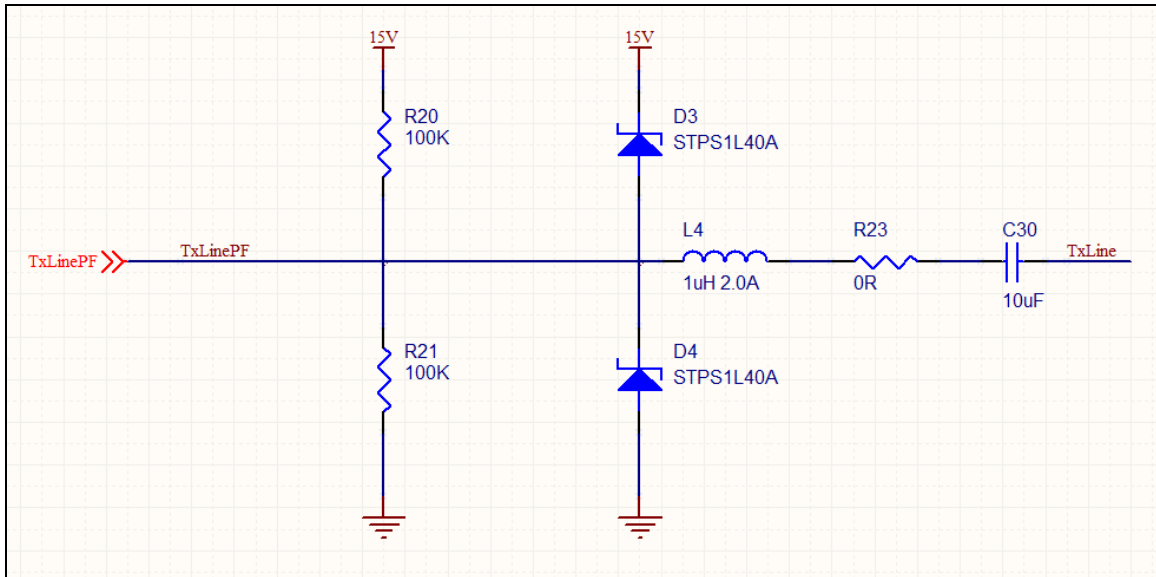


图 4. 发送端的调理电路

图 3、图 4 中 TxLine 与 RxLine 最终合并（图 5 中 TXRX 信号），连接耦合电路。图 5 中 C31、C32 及 R27 的取值可参考现有设计，以下三个器件需要根据应用进行适当调整：

- 变压器 T1

- TVS 管 ZD1
- 选频电感 L7

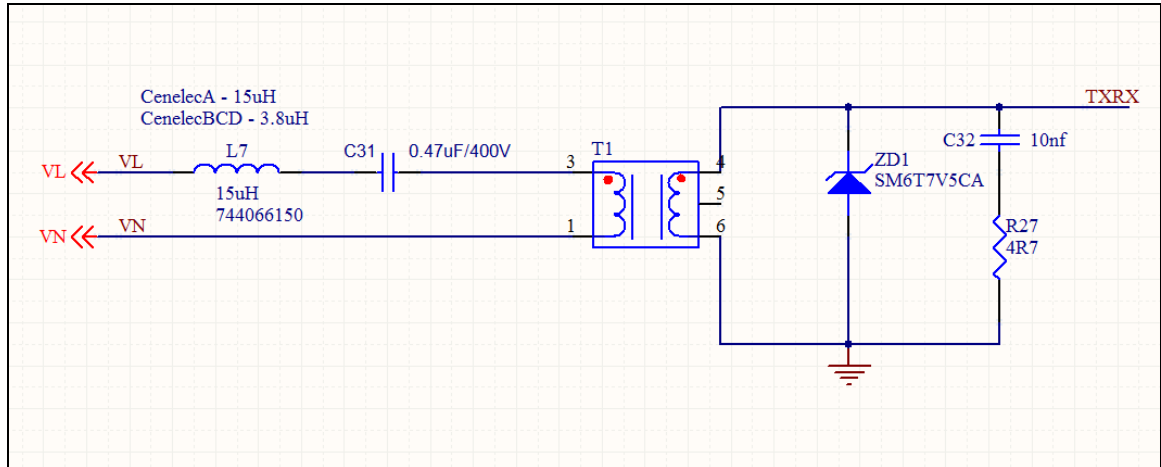


图 5. 耦合电路

图 5 中 L7 和 C31 共同组成了 LC 谐振选频电路，其中心频率 f_0 为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

在 CenelecA 和 CenelecBCD 频带间切换，固定 C31 调整 L7 即可。当工作于 Cenelec A 范围内，使用 15uH，中心频率为 60KHz；当工作于 Cenelec BCD 频带内使用 3.8uH，中心频率为 134KHz。当使用的频带为其它频带时，调整 L7 使频率中心对准频带的中心。例如当使用频带 90KHz~114KHz 时，应尽可能保证中心频率为 102KHz 左右，此时选择 L7 为 5.2uH 左右比较合适。

变压器在设计中起了隔离及调整功率的作用。虽然变压器不是必须的，但从安全的角度考虑，在交流高压电环境下建议使用；在用于低压直流的 PLC 通信系统中，可以省略。所选变压器应保证对 40KHz~500KHz 信号的良好通过性。WE 的 750510476r01 型变压器在 TI 方案中已经过充分验证，推荐在设计中使用；效率低下的变压器可能在负载较重时导致发射功率无法达到设计要求或带来较多频带的骚扰。

表格 1. PRIME 设计中针对不同电源变压器、TVS 及发射功率的选择

AFE PA 供电电压	12V	15V ~ 16V
变压器变比	1: 1	1.307: 1
TVS 推荐型号	SMCJ5.0CA	SMCJ6.8CA
发射功率配置	Level 1	Level 0 (MAX)

对于针对 PRIME 的设计，根据不同 AFE 供电电压，应使用不同的变压器及保护的 TVS 管。表格 1 列出了针对不同电源的设计要求，表中变压器变比指强电侧比连接 AFE 侧。发射功率配置指在使用模块时，需要通过 UART 对模块的发射功率进行配置调整（硬件设计时无区别）。根据表中的参考器件，可以在保证发射功率的前提下，尽可能使频带骚扰控制在 Cenelec 认证的范围内。

对于三相电表，推荐使用如图 6 的耦合电路。其它设计与单相相同，软硬件无需对电路其它参数进行修改。

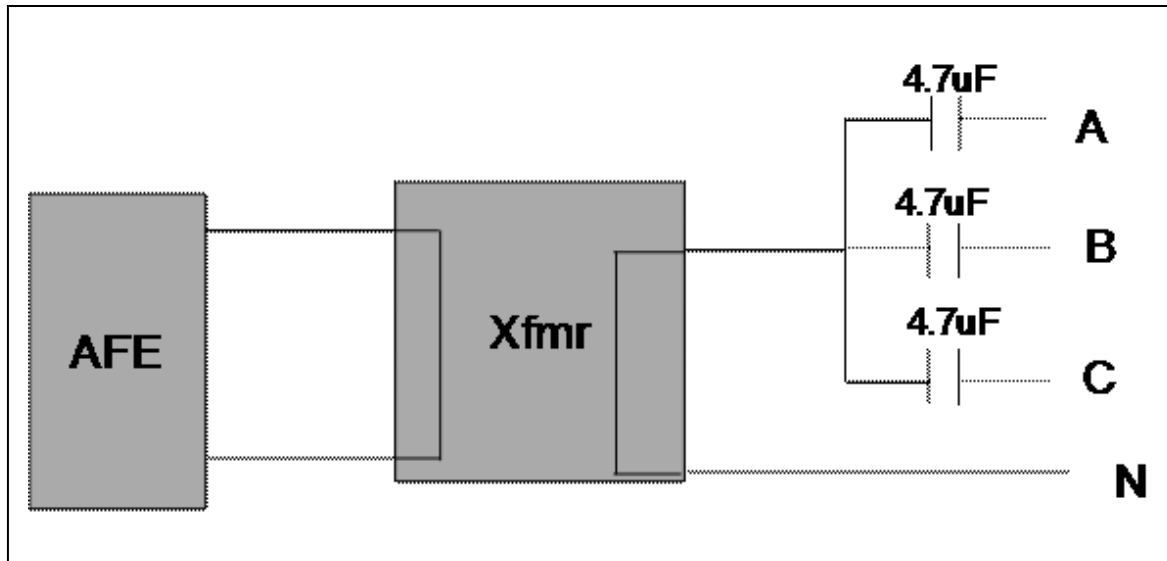


图 6. 与三相电路耦合

参考文档

1. *AFE031 Datasheet*
2. *Analog Front-End Design for a Narrowband Power-Line Communications Modem Using the AFE031 (SBOA130A)*
3. *PRIME specification v1.3.6*
4. *TI PRIME User Guide-Zero config GUI*
5. *Channel and Noise Measurement Methods*

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独立负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独立负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated