

Application Note

在航空航天应用中使用 AFE11612-SEP 偏置 GaN 和 LDMOS 射频功率放大器



摘要

本应用手册详细介绍了 AFE11612-SEP 的基本功能以及在航天级应用中用于射频功率放大器电压偏置时的优势。本报告回顾了功率放大器偏置和支持电路的基础知识。

内容

1 LDMOS 和 GaN 功率放大器 FET PA 基础知识.....	2
2 V_{GS} 补偿.....	3
3 时序控制.....	4
4 集成 PA 偏置解决方案.....	5
5 GaN PA 的负偏置.....	5
6 TDD 应用的快速开关.....	7
7 V_{DRAIN} 开关电路.....	7
8 受控栅极时序控制电路.....	8
9 V_{DRAIN} 监控.....	9
10 I_{DQ} 监控.....	9
11 外部负电源监控.....	10
12 PA 温度监控.....	10
13 总结.....	10
14 参考资料.....	11
15 修订历史记录.....	12

插图清单

图 1-1. GaN 和 LDMOS FET.....	2
图 1-2. FET V_{DRAIN} 、 I_{DS} 和 V_{GS} 行为.....	2
图 2-1. GaN PA V_{GS} 偏置电压与温度间的关系 (保持恒定的 I_{DS}).....	3
图 3-1. GaN 电源时序.....	4
图 4-1. AFE11612-SEP 典型应用.....	5
图 5-1. 差分运算放大器电路.....	5
图 5-2. 差分运算放大器输出.....	6
图 6-1. 栅极开关电路.....	7
图 7-1. V_{DRAIN} 启用电路.....	7
图 7-2. V_{DRAIN} 启用图.....	7
图 8-1. PA_ON 与栅极.....	8
图 8-2. PA_ON 电源序列控制.....	8
图 9-1. V_{DRAIN} 监控电路.....	9
图 10-1. I_{DQ} 监控电路.....	9
图 11-1. V_{SS} 监控电路.....	10
图 12-1. 远程温度监控电路.....	10

表格清单

表 8-1. PA_ON 真值表.....	8
表 13-1. 器件建议.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 LDMOS 和 GaN 功率放大器 FET PA 基础知识

大多数射频 (RF) 天线系统的射频发送器设计都采用功率放大器 (PA)。许多航空航天应用包括天线系统，例如：

- 雷达
- 雷达成像有效载荷
- 通信有效载荷
- 遥测

射频天线系统中部署 PA 偏置电路，可确保实现以下两点。首先，放大器的功率输出是已知且受控的；其次，系统安全上电和断电，可降低 PA 损坏的风险。PA 的设计通常采用氮化镓 (GaN)、砷化镓 (GaAs) 或横向扩散 MOSFET (LDMOS) 晶体管。GaN 和 LDMOS FET (场效应晶体管) 的功率输出取决于流经器件 (从漏极流向源极) 的电流 (I_{DS})。

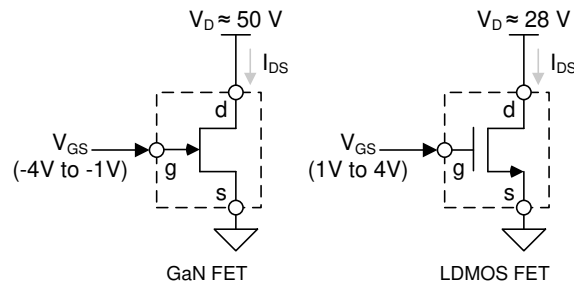


图 1-1. GaN 和 LDMOS FET

I_{DS} 由几个变量确定：漏极电压 (V_{DRAIN})、栅极电压 (V_{GS}) 和温度。图 1-2 展示了 GaN PA 的 I_{DS} 值与 V_{DRAIN} 和不同 V_{GS} 电压之间的关系示例。 V_{GS} 电压越高， I_{DS} 越高，或者说放大器的功率越大。当 V_{GS} 足够低时，PA 允许几乎为零的 I_{DS} 电流。该 V_{GS} 电压称为夹断电压。此外， I_{DS} 还取决于 V_{DRAIN} ，但大多数设计人员不会更改 V_{DRAIN} 。而是使用优选的 V_{DRAIN} 电压值来获取所需的功率级别。对于 GaN PA 和 LDMOS PA， V_{DRAIN} 值通常分别为大约 50V 和 28V。

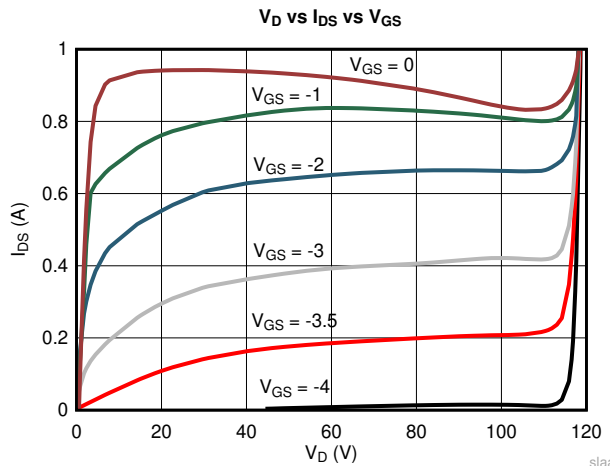


图 1-2. FET V_{DRAIN} 、 I_{DS} 和 V_{GS} 行为

2 V_{GS} 补偿

I_{DS} 取决于 PA 的温度。由热漂移导致的 I_{DS} 变化需要通过调整系统中其他两个变量之一来补偿 PA： V_{DRAIN} 或 V_{GS} 。尽管在不同的射频应用中调整 V_{DRAIN} 的原因有很多，但与 V_{DRAIN} 电压的变化相比，输出功率的响应非常低，如图 1-2 所示。调整 V_{GS} 可实现更快的响应时间和输出功率总振幅，因此更适用于温度补偿和其他应用。

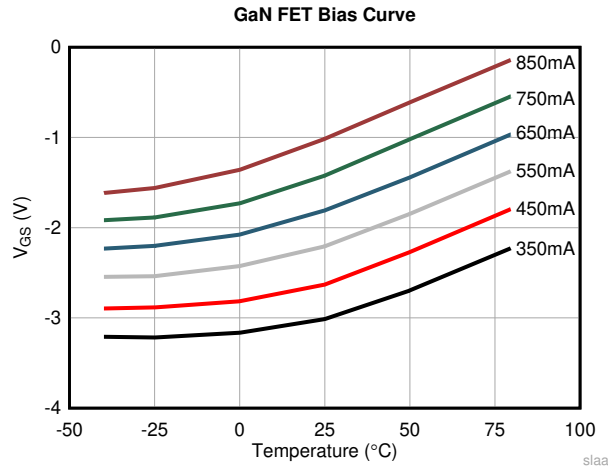


图 2-1. GaN PA V_{GS} 偏置电压与温度间的关系 (保持恒定的 I_{DS})

图 2-1 展示了需要调整 V_{GS} 以确保在热漂移情况下具有静态 I_{DS} 。使用这些 PA 的应用需要实施此类补偿，从而确保严格控制天线系统的功率。 V_{GS} 补偿可通过测量 PA 温度或使用分流器测量 I_{DS} 并相应地调整 V_{GS} 来实现。

3 时序控制

必须在受控例程中为 PA 上电和断电，从而防止在施加 V_{DRAIN} 后 V_{GS} 电压过高。这种状态会导致 PA 在饱和模式下运行，可能会对 PA 或其所在的电路板造成热损坏。需执行以下步骤，为 PA 上电：

1. 首先，对 PA 施加 V_{GS} 信号。 V_{GS} 电压必须转换为 V_{GS} 夹断电压或更低电压。这可确保在施加 V_{DRAIN} 电压时，栅极已处于低电平。
2. 接下来，启用漏极电压电源并允许将 V_{DRAIN} 充电至标称值（例如，50V）。由于 V_{GS} 等于夹断电压，因此 I_{DS} 必须为最小值。
3. 施加 V_{DRAIN} 后，增大 V_{GS} 偏置电压，以便设置所需的 PA 功率输出。
4. 最后，启用射频信号。这样，PA 即可发送信号。

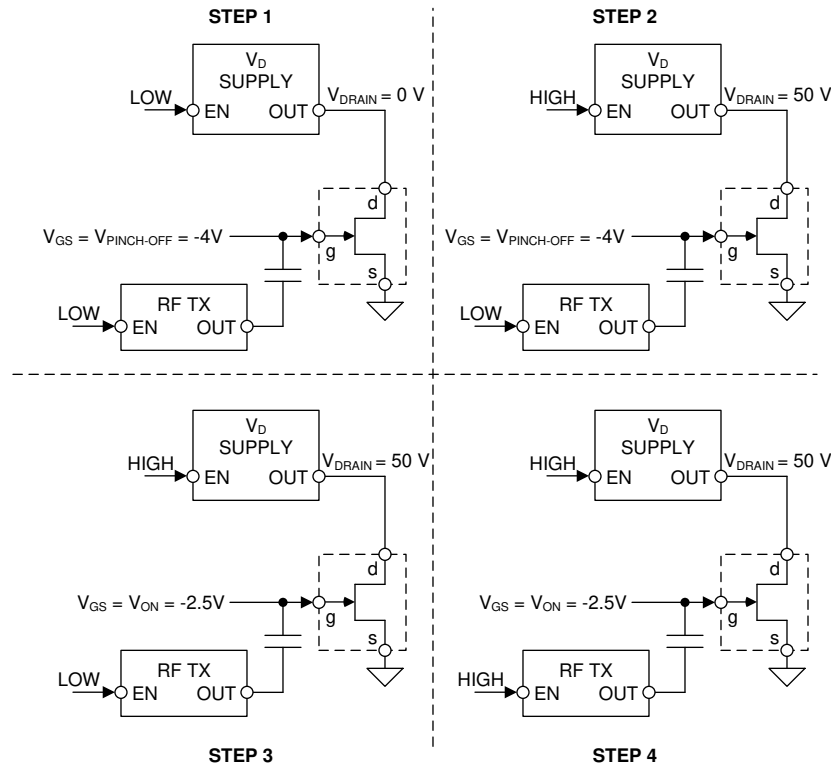


图 3-1. GaN 电源时序

通过倒序执行上电步骤即可安全关断 PA。

1. 禁用来自 PA 的射频信号。
2. 将 V_{GS} 电压降至夹断电压值，从而消除 PA 的功率输出。
3. 通过向漏极电源发送禁用信号来禁用 V_{DRAIN} 电压。
4. 最后，由于 PA 被完全禁用，可允许 V_{GS} 电压崩溃至接地。

4 集成 PA 偏置解决方案

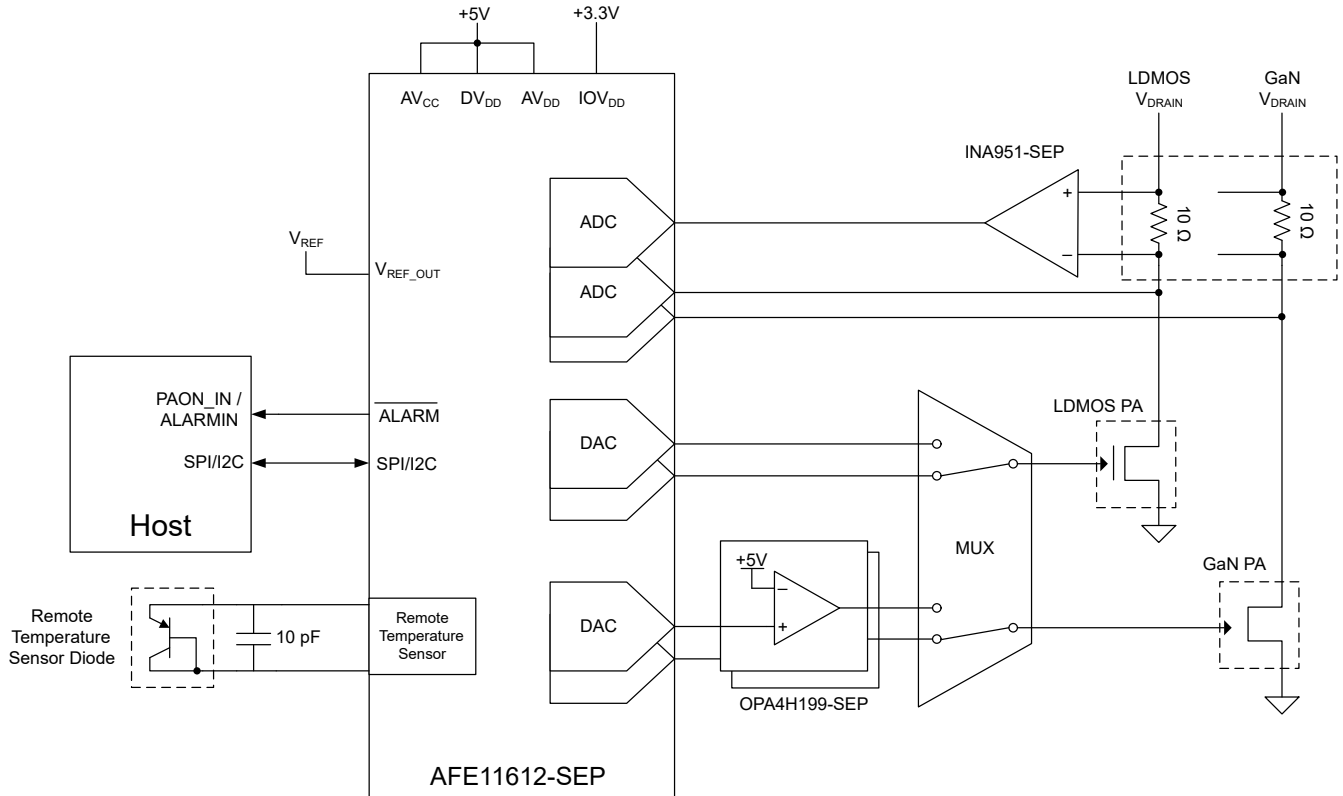


图 4-1. AFE11612-SEP 典型应用

AFE11612-SEP 是一款集成式功率放大器偏置解决方案，具备十二个 12 位精密数模转换器 (DAC)、一个十六通道输入 12 位模数转换器 (ADC)，以及两对远程温度传感器输入接口。DAC 输出可对多达 12 个 LDMOS PA 实现 V_{GS} 控制。GaN PA 可通过额外的电路获得支持。该器件还具有强大的 PA 监控和保护功能，并且针对两个远程温度传感器以及 ADC 输入中的四个提供可编程阈值。

5 GaN PA 的负偏置

AFE11612-SEP 具有一个 2.5V 内部基准，可将 DAC 输出电压在 0V 至 5V 范围内调节。GaN PA 需要负栅极电压以实现正确偏置，其夹断电压比导通电压更负。通过使用差分运算放大器电路，可以将 DAC 输出偏移至负电压。图 5-1 中的示例电路使用抗辐射运算放大器 OPA4H199-SEP 将 DAC 输出范围偏移并缩放至负电压范围。差分运算放大器电路用于在警报关断的情况下保护 PA。在警报状态下，DAC 将电压驱动至 0V。该差分电路向 GaN 栅极输出最大负电压，从而确保 GaN PA 关闭。

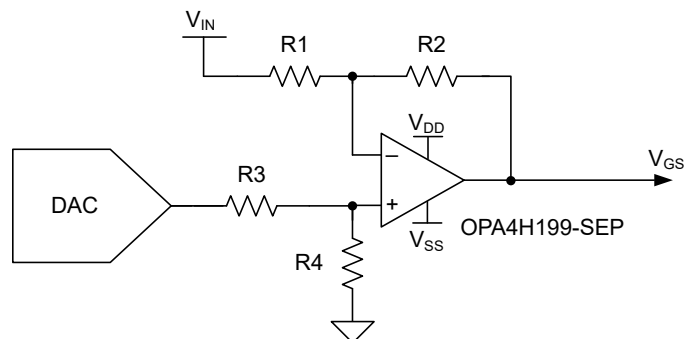


图 5-1. 差分运算放大器电路

根据所需的运算放大器输出、 V_{IN} 和 DAC 范围选择电阻器阻值。以下公式提供了电阻值的选择指南：

$$V_{GS} = -\left(V_{IN} \times \frac{R2}{R1}\right) + DAC \times \left(\frac{R4}{R4+R3}\right) \times \left(\frac{R1+R2}{R1}\right) \quad (1)$$

当 $DAC = 0V$ 时：

$$V_{GS}(\text{MIN}) = -\left(V_{IN} \times \frac{R2}{R1}\right) \quad (2)$$

$V_{GS}(\text{MIN})$ 选为 $-7.5V$ ， V_{IN} 选为 $5V$ 。

$$-7.5V = -\left(5 \times \frac{R2}{R1}\right) \quad (3)$$

$$\frac{R2}{R1} = 1.5 \quad (4)$$

根据此比率选择 $R2$ 和 $R1$ 值。在此示例中， $R1 = 10k\Omega$ ， $R2 = 15k\Omega$ 。要计算 $R3$ 和 $R4$ ，请使用所需的最大 DAC 值和 V_{GS} 值。在本示例中， $DAC = 5V$ 且 $V_{GS}(\text{MAX}) = 0V$ 。

$$V_{GS}(\text{MAX}) = -\left(V_{IN} \times \frac{R2}{R1}\right) + DAC \times \left(\frac{R4}{R4+R3}\right) \times \left(\frac{R1+R2}{R1}\right) \quad (5)$$

$$0 = -\left(5 \times \frac{15k}{10k}\right) + 5 \times \left(\frac{R4}{R4+R3}\right) \times \left(\frac{10k+15k}{10k}\right) \quad (6)$$

$$7.5 = 12.5 \times \left(\frac{R4}{R4+R3}\right) \quad (7)$$

化简公式可得到 [方程式 8](#) 中的电阻比。

$$\frac{R4}{R3} = 1.5 \quad (8)$$

由于这与 $R2/R1$ 的比率相同，因此 $R3$ 和 $R4$ 将使用相同的值： $R3 = 10k\Omega$ 且 $R4 = 15k\Omega$ 。[图 5-2](#) 显示了采用这些电阻器值时，DAC 与 V_{GS} 输出的关系。

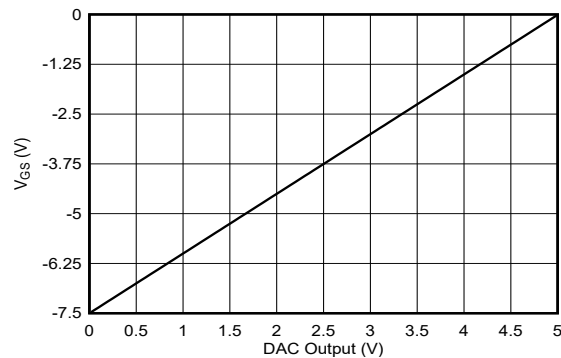


图 5-2. 差分运算放大器输出

6 TDD 应用的快速开关

时分双工等一些 PA 偏置应用需要快速的导通/关断栅极开关。通过使用低电阻的航天级多路复用器和电容电荷共享，可实现快速栅极开关。

电容电荷共享用于实现快速输出开关。图 6-1 展示了一些输入和输出电容器的建议电容值。两个输入电压需搭配大容量电容器，而输出则必须使用小容量电容器。当 MUX 切换时，输入电容器可快速为容量较小的输出电容器充电，从而实现所需的快速切换。

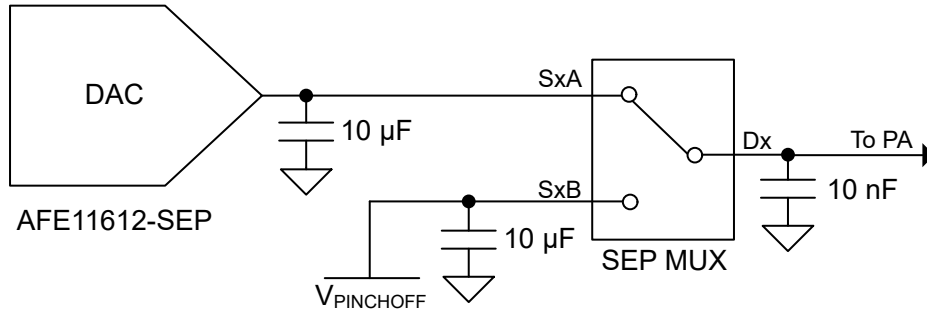


图 6-1. 栅极开关电路

7 V_{DRAIN} 开关电路

V_{DRAIN} 保护电路使用 NMOS 和 PMOS 晶体管来禁用施加到 PA 漏极的电压。此 PA_ON 电路充当一个高压开关。在启动、关断和警报事件期间的关键时刻，需要禁用 V_{DRAIN}。本设计使用 NMOS 和 PMOS 电路来实现这一点。将 PA_ON 电压施加到 NMOS 栅极时，电路会导通以允许 V_{DRAIN} 通过 PMOS。

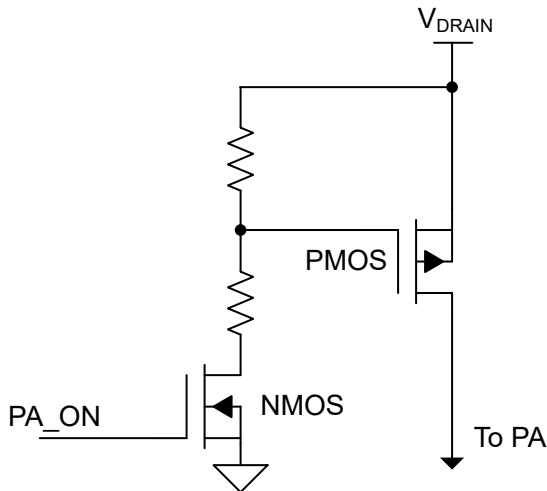


图 7-1. V_{DRAIN} 启用电路

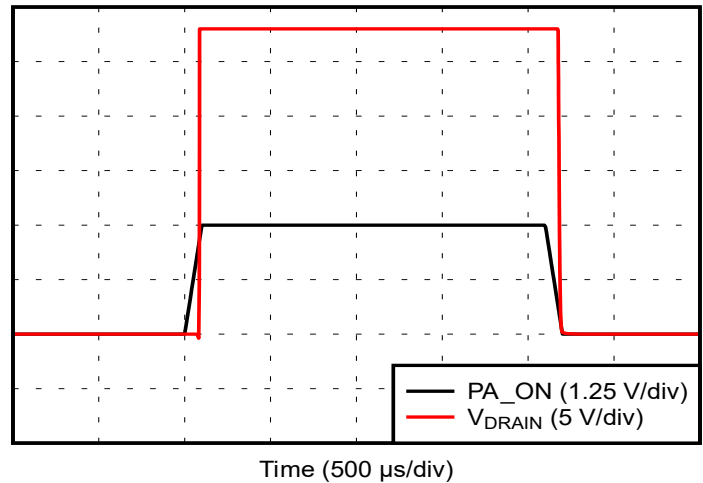


图 7-2. V_{DRAIN} 启用图

8 受控栅极时序控制电路

在启动、关断和警报条件下控制 PA，以确保 PA 在这些事件发生期间不会损坏，这一点非常重要。这是通过创建关键信号的三输入逻辑与门来实现的： V_{REF} 、主机 PA_EN 和 \overline{ALARM} 。

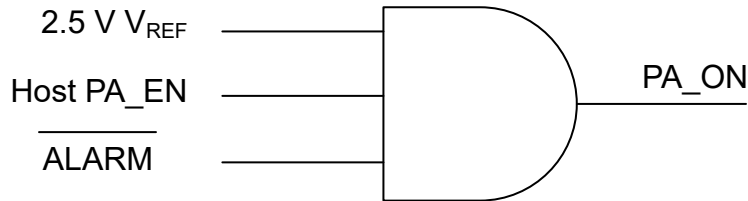


图 8-1. PA_ON 与栅极

V_{REF} 用作 PA_ON 输出的器件正常信号。可确保在启动时，PA 不会对其施加漏极电压，因为在 AFE11612-SEP 启动后， V_{REF} 必须由主机控制器启用。来自 AFE11612-SEP 电路的 \overline{ALARM} 信号在 AFE11612-SEP 检测到任何警报时，强制 PA_ON 为 0V。最后，主机微控制器可选择关闭 PA_ON。表 8-1 显示了所有数字输出如何与 PA_ON 相互作用。

表 8-1. PA_ON 真值表

V_{REF}	PA_EN	ALARM	PA_ON
0V	X	X	低
X	0V	X	低
X	X	0V	低
2.5V	高	高	高

以下是 PA_ON 上电序列的示例：

1. 初始化 AFE11612-SEP。主机发送命令以开启 V_{REF} 。在启动时无警报的状态下， \overline{ALARM} 引脚为高阻态。主机将 PA_EN 保持为低电平以使 PA 保持关闭状态。
2. 接下来，打开漏极电源。主机将 PA_EN 设置为高电平，从而启用 PA_ON 信号。
3. 第三，显示警报条件。 \overline{ALARM} 变为 0V，关闭 PA_ON，从而关闭 PA 以对其进行保护。
4. 第四，清除警报条件。 \overline{ALARM} 返回到高阻态，并且 PA_ON 打开。
5. 最后，在器件断电之前，需禁用 PA_EN，以关闭 PA_ON。将 AFE11612-SEP 断电。

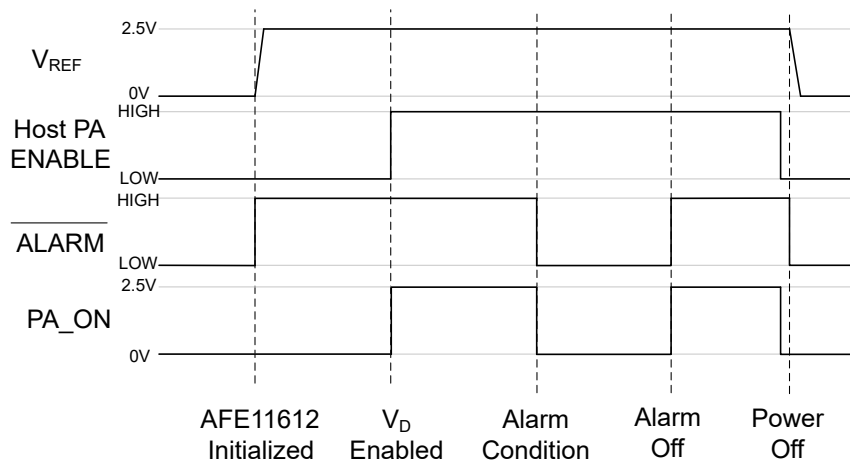


图 8-2. PA_ON 电源序列控制

9 V_{DRAIN} 监控

监控 V_{DRAIN} 电压，用于确保 PA 漏极电源在预期电压下运行，这一点非常重要。这可以使用 AFE11612-SEP 中的 ADC 来实现。需要使用电阻分压器将 V_{DRAIN} 电压适当调整到 5V ADC 范围。必须限制电阻分压器的阻抗，在理想情况下，该阻抗值应低于 10kΩ，以便允许足够的电流为采样电容器充电。需要一个大约 1nF 的外部电容器 (C_{FILT}) 来为 ADC 采样电容器快速充电。

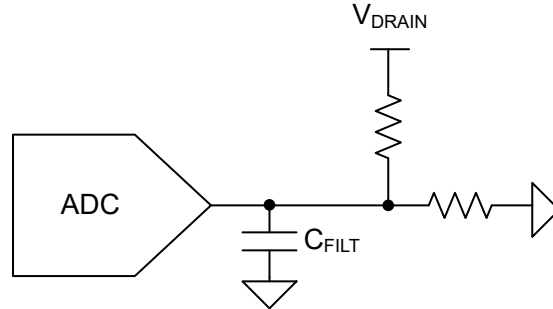


图 9-1. V_{DRAIN} 监控电路

10 I_{DQ} 监控

监控漏极静态电流 (I_{DQ}) 可以检测 PA 是否高效地传导所需的电流。可使用外部 INA 将电流测量值转换为 AFE11612-SEP 的电压输出。此示例电路中使用的 INA 是 INA951-SEP，其增益为 20V/V。使用 [方程式 9](#) 计算电阻器两端的理想电压差，其中 V_{DIFF} 是 INA 输入上的最大差分输入电压，V_{OUT} 是 2.5V 或 5V 的 ADC 范围，增益为 20V/V。通过计算得出，针对 2.5V ADC 范围和 5V ADC 范围，电阻器上的最大电压差分别为 125mV 和 250mV。

$$V_{DIFF} = \frac{V_{OUT}}{GAIN} \quad (9)$$

接下来，使用 [方程式 10](#) 计算电阻。R_{SENSE} 是分流电阻器值；V_{DIFF} 是之前计算得出的最大压降 125mV 或 250mV；I_{DQ_MAX} 是功率放大器的最大电流消耗。

$$R_{SENSE} = \frac{V_{DIFF}}{I_{DQ_MAX}} \quad (10)$$

与 V_{DRAIN} 监控电路类似，使用一个外部 RC 滤波器来减少噪声和进行电容器充电采样。

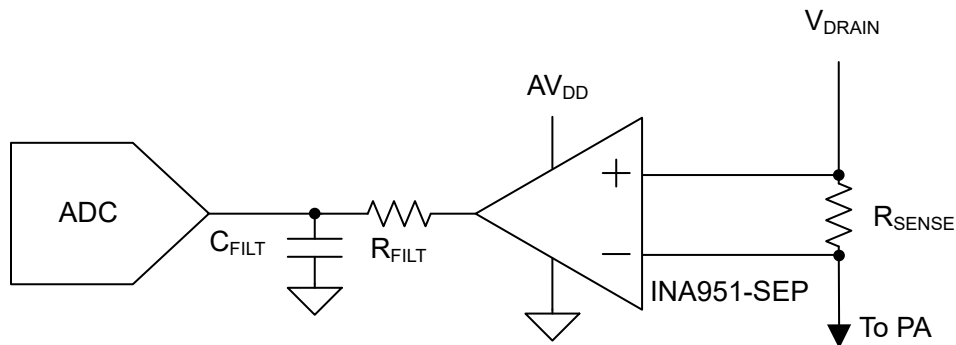


图 10-1. I_{DQ} 监控电路

11 外部负电源监控

如果 V_{GS} 电势过高而导致 PA 饱和，GaN PA 可能会受损。如果 V_{SS} 电源崩溃，差分运算放大器输出将转换至 0V。因此，监控 V_{SS} 电源是否发生崩溃事件至关重要。可以使用一个由外部基准电压（例如，用于器件模拟电源的 5V 电压）偏置的简单电阻分压器来完成监控。在外部 5V 电源崩溃的情况下，可以添加齐纳二极管来提供额外的保护。

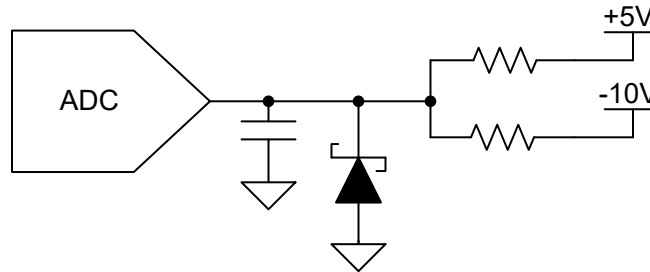


图 11-1. V_{SS} 监控电路

12 PA 温度监控

AFE11612-SEP 具有两组远程温度传感器输入，可用于监控放置在 PA 附近的两个连接有二极管的晶体管的温度。这两个温度传感器具有可编程警报阈值，用于触发警报状态并禁用 DAC 输出。

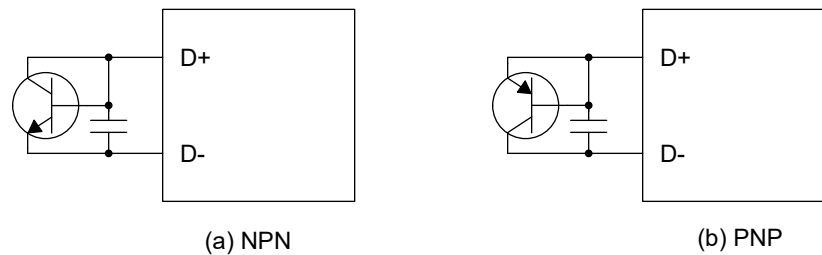


图 12-1. 远程温度监控电路

13 总结

功率放大器行为的细微差别使得分立式 V_{GS} 补偿解决方案复杂且成本高昂。AFE11612-SEP 在简化解方案的同时，增加了用于启动和关断时序控制的栅极监控、 V_{DRAIN} 监控、温度监控以及电源崩溃检测等有益特性，因此物超所值。

表 13-1. 器件建议

器件	优化参数	电离辐射总剂量 (TID) 特征值	单粒子锁定 (SEL) 特征值
AFE11612-SEP	具有 16 路 12 位 ADC 输入的航天增强型 12 路 12 位 DAC。	20krad(SI)	在 125°C 下的抗扰度为 43MeV-cm ² /mg
OPA4H199-SEP	航天增强型高电压四路输出运算放大器。	30krad(SI)	在 125°C 下的抗扰度为 43MeV-cm ² /mg
INA951-SEP	航天增强型、-4V 至 80V、1.3MHz 电流检测放大器	30krad(SI)	在 125°C 下的抗扰度为 43MeV-cm ² /mg

14 参考资料

- 德州仪器 (TI), [AFE11612-SEP](#) 具有多通道 ADC、DAC 和温度传感器的抗辐射模拟监测器和控制器, 数据表。
- 德州仪器 (TI), [OPA4H199-SEP](#) 采用增强型航天塑料封装的 40V、耐辐射、轨到轨输入/输出、低失调电压、低噪声运算放大器
- 德州仪器 (TI), [功率放大器 FET 偏置电压的温度补偿](#), 应用手册。

15 修订历史记录

Changes from Revision A (September 2025) to Revision B (May 2026) **Page**

• 添加了 INA951-SEP.....	5
• 添加了 INA951-SEP.....	9
• 添加了 INA951-SEP.....	10

Changes from Revision * (June 2023) to Revision A (September 2025) **Page**

• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 删除了对未发布产品的引用.....	1

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