

使用ADN8831 TEC控制器评估板

简介

ADN8831是一款热电冷却器(TEC)控制器,能够以出色的温度控制分辨率、稳定性和较高的功效驱动中等功率的TEC(电流 $<4\text{ A}$)。ADN8831集成了两个高性能放大器,专用于温度检测和热环路补偿,允许直接连接至热敏电阻、电阻式温度检测器(RTD)或其他温度传感器。

本应用笔记可配合ADN8831数据手册一起使用,说明如何配置ADN8831-EVALZ评估板(4.0版),以及如何利用ADN8831开发真正的TEC控制电路。ADN8831数据手册提供了详细的技术规格、内部功能框图及应用设计准则。

本应用笔记的“评估板布局”部分提供了重要的布局设计准则。

评估板描述

ADN8831评估板提供了一个可配置的设计平台,可兼容各种TEC和热敏电阻。在评估板上,ADN8831利用两对采用H桥配置方式的互补MOSFET提供并控制双向TEC电流。

通过片上可调元件,评估板可针对温度设定点、温度设定点范围、TEC电流和/或电压限值以及PID补偿网络进行配置。温度设定点范围(出厂默认)电路经过优化能够与 $10\text{ k}\Omega$ 负温度系数热敏电阻一起使用,也可以与其他类型的温度传感器一起使用。利用可调谐PID补偿网络能够实现控制电路和热负载之间的特性匹配,从而实现最快的响应速度和温度控制稳定性。如果TEMOUT电压处于TEMPSET设定点电压的 $\pm 100\text{ mV}$ 范围内,则绿色LED亮起。

功能框图

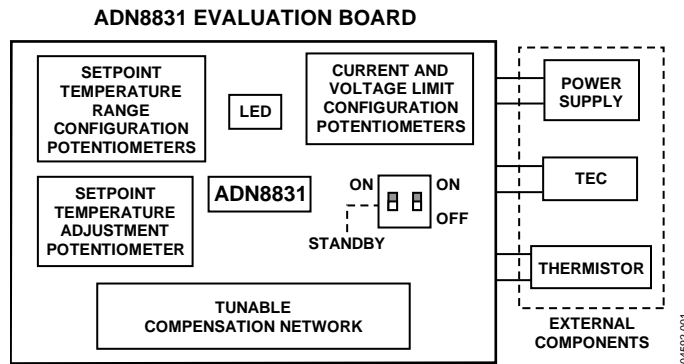


图1. ADN8831评估板功能框图

目录

简介.....	1	设置输出限压.....	6
评估板描述.....	1	监控TEC电压.....	6
功能框图.....	1	监控TEC电流.....	6
开始使用.....	3	温度补偿.....	6
开关和电位计.....	3	调节PWM开关频率.....	7
快速入门.....	4	多单元评估.....	7
配置设定点温度范围.....	4	评估板布局.....	8
配置设定点温度.....	5	评估板原理图与工艺图.....	9
设置输出限流.....	5		

开始使用

图2所示的ADN8831-EVALZ的出厂默认设置为，在25°C的条件下与10 kΩ的热敏电阻一起使用时可提供大约2 A的双向TEC电流。

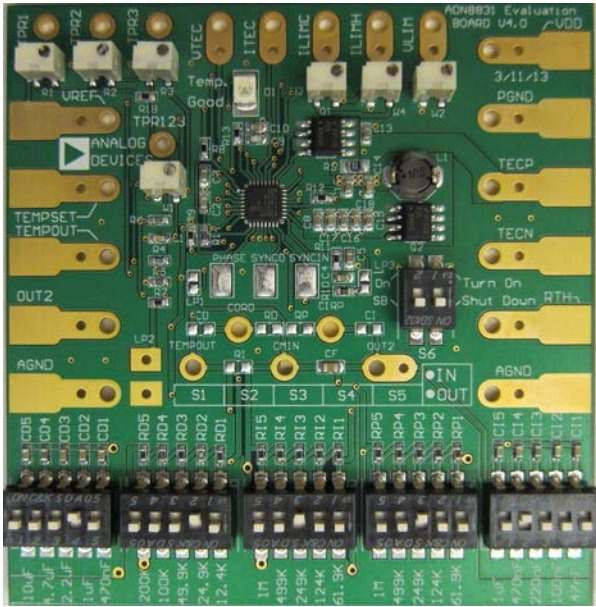


图2. 评估板的顶视图

出厂默认设置决定了图3所示的温度-电压转换器电路和PID电路的片上元件值。利用片上开关和电位计，图3中的电路可以调节为兼容电信领域使用的大多数TEC和热敏电阻。

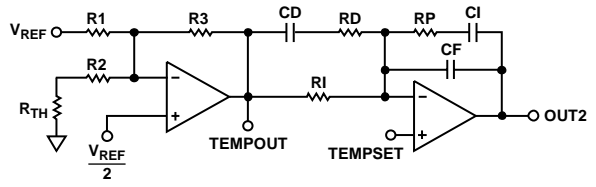


图3. 温度和补偿网络电路

参见图3，请注意，TEMPOUT是指来自引脚4 (OUT1)的输出电压信号，TEMPSET则是施加于引脚5 (IN2P)的电压信号。本应用笔记中通篇都会用到这些术语。

开关和电位计

表1. 开关设置

开关	功能	默认值
S1	CD	1 uF
S2	RD	24.9 kΩ
S3	RI	249 kΩ
S4	RP	249 kΩ
S5	CI	470 nF
S6	待机/关断	上/上

开关S6, 左侧: 待机控制

开关S6(左侧旋钮)向下时，ADN8831处于待机模式。此旋钮向上时(默认状态)，ADN8831离开待机模式。在待机模式下，除了ADN8831的V_{REF}和SYNCO输出之外的其他所有电路都处于断电状态。

开关S6, 右侧: 关断控制

开关S6(右侧旋钮)向下时，ADN8831处于关断模式。此旋钮向上时(默认状态)，ADN8831离开关断模式。关断模式下，ADN8831处于断电状态。

开关S1、S2、S3、S4和S5: 最佳PID补偿网络的可调元件

开关S1、S2、S3、S4和S5针对图3所示的CD、RD、RI、RP和CI提供了PID网络元件可调性。将一个TEC连接至ADN8831-EVALZ之后，可能就会发生热振荡。为了抑制振荡、优化系统建立时间并精确地控制TEC温度，有必要进行PID网络元件调谐。

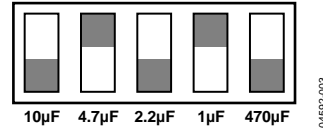


图4. 开关S1的位置

开关旋钮处于向上位置时，开关旋钮下方列出的值就是元件的增量。例如，开关S1决定了图3和图9中的CD值。开关S1的两个旋钮都向上，分别为4.7 μF和1 μF(注意，这两个旋钮都设置到上面的位置)。此例中，CD的值为

$$4.7 \mu\text{F} + 1 \mu\text{F} = 5.7 \mu\text{F}$$

对于开关S1、S2、S3、S4和S5也同样。

片上电位计

ADN8831-EVALZ拥有以下片上电位计，可用于调节元件值(如图3所示)并配置冷却和加热模式下的TEC限流值。

表2显示了默认设置。

表2. 电位计设置

电位计	功能	默认值
R1	温度补偿网络	17.5 kΩ
R2	温度补偿网络	7.5 kΩ
R3	温度补偿网络	81.3 kΩ
W1	TEMPSET	20 kΩ
W2	V _{LIM}	20 kΩ
W3	V _{LIMC} , V _{LIMH}	20 kΩ
W4	V _{LIMC} , V _{LIMH}	20 kΩ

快速入门

按照图5和第1步到第6步的介绍，将电源、TEC模块及热敏电阻连接至ADN8831-EVALZ。

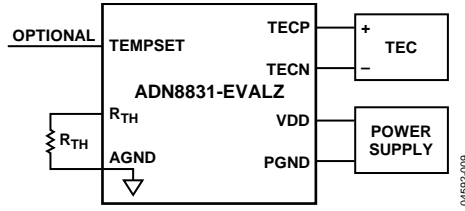


图5. ADN8831-EVALZ快速入门框图

1. 检查片上开关是否已设置为默认状态。
2. 将热敏电阻连接在标有 R_{TH} 和AGND的电路板焊盘之间。
3. 将热电冷却器的正端连接至TECP电路板焊盘，将负端连接至TECN。
4. 检查片上电位计是否已设置为默认状态。
5. 确保电源已切断，然后将其连接至电路板焊盘VDD和PGND将电源电压维持在3.0 V和5.5 V之间，以确保正常工作。
6. 接通电源。

与温度相关的热敏电阻电压TEMPOUT锁定至编程设置的设定点电压TEMPSET。在数秒内会亮起一个绿色LED，表示已成功锁定温度。

配置设定点温度范围

表2中列出的电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的默认值最适合10 k Ω 、 $\beta = 3450$ (25条件下)的热敏电阻将TEC温度锁定在25。接下来的章节介绍如何针对不同的负温度系数(NTC)热敏电阻配置电位计。

热敏电阻值

确定三个热敏电阻的电阻值： R_{HIGH} 、 R_{MID} 和 R_{LOW} 。为此，请参见相应的热敏电阻数据手册中的热敏电阻R-T表。其依据是所需的TEC热控制分辨率和可控目标温度范围。

这些电阻值对应于高、中和低设定点温度(T_{HIGH} 、 T_{MID} 和 T_{LOW})。{ T_{HIGH} , T_{LOW} }是TEC系统可控设定点温度范围。

$$T_{MID} = \frac{T_{HIGH} + T_{LOW}}{2}$$

T_{MID} 为平均温度，在 T_{HIGH} 和 T_{LOW} 之间。

$V_{TEMPOUT}$ 为TEMPOUT引脚上的输出电压。它取决于 R_{TH} 电阻。 $V_{TEMPOUT}$ 是 R_{TH} 、 R_1 、 R_2 和 R_3 的函数，如下所示

$$V_{TEMPOUT} = 0.5 \times V_{REF} \times R_3 \times \left[\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{TH}} \right]$$

在设计中，对应于热敏电阻的三种不同电阻值， $V_{TEMPOUT}$ 的值也各不相同：

$$R_{TH} = R_{HIGH} (T_{HIGH} \text{ 条件下}): V_{TEMPOUT} = V_{REF}$$

$$R_{TH} = R_{MID} (T_{MID} \text{ 条件下}): V_{TEMPOUT} = 0.5 \times V_{REF}$$

$$R_{TH} = R_{LOW} (T_{LOW} \text{ 条件下}): V_{TEMPOUT} = 0 V$$

此例中， V_{REF} 约等于2.5 V，是ADN8831的引脚8上的基准电压。

电阻值

为了在三种不同的设定点温度条件下实现所需的 $V_{TEMPOUT}$ 输出，请使用以下公式

$$R_1 = R_{MID} + \frac{R_{MID} (R_{LOW} + R_{HIGH}) - 2R_{HIGH} R_{LOW}}{R_{HIGH} + R_{LOW} - 2R_{MID}} \quad (1)$$

$$R_2 = R_1 - R_{MID} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{R_1 (R_1 + R_{LOW} - R_{MID})}{R_{LOW} - R_{MID}} \quad (3)$$

例如，将高设定点温度设置为35°C、低设定点温度设置为15°C，这样中设定点温度为 $(35 + 15)/2 = 25^\circ\text{C}$ 。通过热敏电阻的R-T表可知，

$$R_{HIGH} = 6.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_{MID} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{LOW} = 14.8 \text{ k}\Omega$$

注意，根据公式1和公式3可知

$$R_1 = 17.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 7.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 81.3 \text{ k}\Omega$$

调节电位计R1、R2和R3

要调节片上电位计以获取合适的 R_1 、 R_2 和 R_3 值，请切断电源，然后测量

- TPR1和TPR123之间的电阻，并将电位计R1调节为 $R_1 = 17.5 \text{ k}\Omega$ 。
- TPR2和TPR123之间的电阻，并将电位计R2调节为 $R_2 = 7.5 \text{ k}\Omega$ 。
- TPR3和TPR123之间的电阻，并将电位计R3调节为 $R_3 = 81.3 \text{ k}\Omega$ 。

由于这些电位计连接至ADN8831内部的有效元件，如果内部元件产生明显的漏电现象，那么测得的结果会不准确。这些元件的导通电压约为0.8 V。

配置R1、R2和R3之后，第一个放大器的输出电压 $V_{TEMPOUT}$ 如下

$$V_{TEMPOUT} = 0.5 \times V_{REF} \times R_3 \times \left[\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{TH}} \right]$$

其中：

R_{TH} 为设定点温度范围内的热敏电阻值。

V_{REF} 为ADN8831的基准电压值，标称值为2.5 V。

设定点温度范围较窄时，例如 $<20^{\circ}\text{C}$ ，热敏电阻温度和温度电压 $V_{TEMPOUT}$ 之间的关系几乎是线性的，误差小于0.15%。线性公式如下

$$V_{TEMPOUT} = V_{REF} \times \left[\frac{T_{SET} - T_{LOW}}{T_{HIGH} - T_{LOW}} \right]$$

其中：

T_{HIGH} 为温度上限($^{\circ}\text{C}$)。

T_{LOW} 为温度下限($^{\circ}\text{C}$)。

T_{SET} 为设定点温度值($^{\circ}\text{C}$)。

公式1的第二部分为负时，

$$\frac{R_{MID}(R_{LOW} + R_{HIGH}) - 2R_{HIGH}R_{LOW}}{R_{HIGH} + R_{LOW} - 2R_{MID}} \leq 0$$

设置为 $R1 = R_{MID}$ 、 $R2 = 0$ 。

有些应用中，设定点温度不是一个范围，而是一个单点温度。这种情况下，将单点温度设置为中点温度 T_{MID} ，并设置 $T_{HIGH} = T_{MID} + 5^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{LOW} = T_{MID} - 5^{\circ}\text{C}$ 。与此同时，设置 $R1 = R_{MID}$ 、 $R2 = 0$ 。因为设定点温度是一个单点值，所以无需对 $V_{TEMPOUT}$ 与温度响应曲线进行线性化处理。计算R3之后，检查第一级的增益是否在10和30之间。增益计算方式如下

$$GAIN = 2 \times R3/R_{MID}$$

如果增益过高，则扩大 T_{HIGH} 和 T_{LOW} 之间的范围，反之则缩小此范围。

注意，TEMPOUT引脚上的下限不能为0 V。最小输出电压为50 mV。配置设定点温度范围，使下限中存在一些裕量。例如，对于 35°C 至 15°C 的温度范围，请使用 14.5°C (比 15°C 的限值低2%)作为下限。

配置设定点温度

$V_{TEMPSET}$ 电压对应于TEC设定点温度。使用电位计W1配置 $V_{TEMPSET}$ 。有两种情况会使用公式4。第一种情况下，设定点温度是已知的。根据热敏电阻数据手册中的R-T表找到特定的 R_{TH} 值，然后求解 $V_{TEMPSET}$ 。对 T_{EMPSET} 引脚施加 $V_{TEMPSET}$ 电压。

第二种情况下，TEMPOUT引脚上的电压是已知的。求解 R_{TH} 公式，根据热敏电阻数据手册中的R-T表得出设定点温度。

$$V_{TEMPSET} = 0.5 \times V_{REF} \times R_3 \times \left[\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{TH}} \right] \quad (4)$$

其中：

R_{TH} 为设定点温度下的热敏电阻值。

V_{REF} 为ADN8831的基准电压值，标称值为2.5 V。

另一种方法是假设温度和电压之间存在线性关系；这类似于针对TEMPOUT引脚介绍的线性关系。设定点温度范围较窄时，例如 $<20^{\circ}\text{C}$ ，热敏电阻温度和温度电压 $V_{TEMPOUT}$ 之间的关系几乎是线性的，误差小于0.15%。可以通过温度和电压的上下限得出设定点温度。公式如下

$$V_{TEMPSET} = V_{REF} \times \frac{T_{SET} - T_{LOW}}{T_{HIGH} - T_{LOW}}$$

其中：

T_{HIGH} 为温度上限($^{\circ}\text{C}$)。

T_{LOW} 为温度下限($^{\circ}\text{C}$)。

T_{SET} 为设定点温度值($^{\circ}\text{C}$)。

设置输出电流限值

利用电位计W3和W4确定冷却和加热模式下的TEC电流限值。然后，根据公式5和公式6确定需要施加于ILIMC和ILIMH引脚的电平。

$$V_{ILIMC} = \frac{V_{REF}}{2} + 25 \times I_{TCMAX} \times R_S \quad (5)$$

$$V_{ILIMH} = \frac{V_{REF}}{2} - 25 \times I_{THMAX} \times R_S \quad (6)$$

其中：

V_{ILIMC} 为施加于ILIMC引脚的电压。

V_{ILIMH} 为施加于ILIMH引脚的电压。

I_{TCMAX} 为冷却模式的最大TEC电流。

I_{THMAX} 为加热模式的最大TEC电流。

R_S 为电流检测电阻的电阻值。图9中，

$R_S = 0.02 \Omega$ 。

V_{REF} 为基准电压。使用ADN8831时， $V_{REF} = 2.5 \text{ V}$ 。

例如，分别将 I_{TCMAX} 和 I_{THMAX} 设置为2 A和1.5 A，根据以下公式计算：

$$V_{ILIMC} = \frac{2.5}{2} + 25 \times 2 \times 0.02 = 2.25 \text{ V}$$

$$V_{ILIMH} = \frac{2.5}{2} - 25 \times 1.5 \times 0.02 = 0.5 \text{ V}$$

测量引脚1 (ILIMC)上的电压时，转动电位计W3；将此值设置为2.25 V。测量引脚32 (ILIMH)上的电压时，转动W4；将此值设置为0.5 V。

设置输出电压限值

为了保护TEC免于过驱，需要调节W2，以便设置 V_{LIM} 电压。通过设置引脚31 (VLIM)上的电压，可以限制对TEC施加的最大电压。这种电压为

$$V_{LIM} = V_{TMAX}/5$$

其中：

V_{LIM} 为VLIM引脚上设置的电压。

V_{TMAX} 为TEC两端的最大电压。

例如，要将最大TEC电压设置为4 V，请使用以下公式：

$$V_{LIM} = 4/5 = 0.8 \text{ V}$$

监控TEC电压

通过测量来自引脚30 (VTEC)的电压 V_{VTEC} ，可以实时监控TEC两端的电压 V_{TEC} 。

$$V_{TEC} = V_{LFB} - V_{SFB} = (V_{VTEC} - 0.5 \times V_{REF}) \times 4$$

其中：

V_{TEC} 为TEC两端的电压。

V_{LFB} 为LFB引脚上测得的电压。

V_{SFB} 为SFB引脚上测得的电压。

V_{VTEC} 为VTEC引脚上测得的电压。

V_{REF} 为基准电压。使用ADN8831时， $V_{REF} = 2.5 \text{ V}$ 。

另外，测量LFB和SFB引脚之间的电压差也可以得到TEC两端的电压(V_{TEC})。通常，LFB引脚连接至TEC的正端，SFB引脚连接至TEC的负端。TEC电压的定义是TEC正端和负端之间的电压差。

V_{TEC} 可以为正，也可为负。 V_{TEC} 为正时，TEC处于冷却模式。 V_{TEC} 为负时，TEC处于加热模式。

ADN8831设置为待机模式时，知道TEC两端的电压会很有用。此电压称为塞贝克电压，由两个TEC极板之间的温度差产生。这种测量有助于针对高端系统确定TEC的状况和/或TEC工作状态。

监控TEC电流

通过测量ITEC引脚(引脚29)上的电压 V_{ITEC} ，可以实时监控TEC电流。要根据ITEC引脚电压计算TEC电流，请使用以下公式：

$$I_{TEC} = \frac{V_{ITEC} - 0.5 \times V_{REF}}{25 \times R_S}$$

其中：

I_{TEC} 为TEC电流；定义为通过TEC正端(TECP)流入并通过TEC负端(TECN)流出的电流。

R_S 为电流检测电阻的值，在评估板上设置为0.02 Ω 。

温度补偿

温度稳定性和建立时间取决于控制环路增益和带宽。这包括ADN8831的增益和TEC/热敏电阻反馈。为实现最高的直流精度，控制环路使用比例积分微分(PID)补偿网络。因为每个TEC的热负载会有很大的差别，所以评估板上提供了可调谐补偿网络。

要调谐PID补偿网络，请向LP2焊盘施加一个低频方波，然后利用示波器监控OUT2测试点。

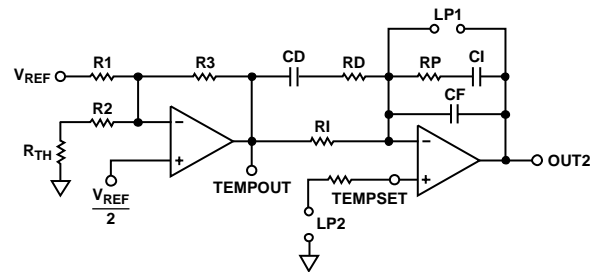


图6. 可调谐补偿网络

在此之前，将一个TEC连接至评估板的TECP和TECN焊盘，然后将连接至TEC的热敏电阻连接至评估板的RTH和AGND焊盘。低频方波等同于向TEMPSET发送一个阶跃函数。除了方波之外，还有一种方法是使用一对镊子将LP2焊盘与AGND测试点短接。观察OUT2上的波形，确定补偿网络是否与热负载匹配。OUT2上的理想响应是尽可能最短的上升时间和建立时间，而且很少有或没有过冲。执行下列步骤以调谐网络：

1. 将CI设置为1 μF 、RI和RP设置为249 k Ω 、RD设置为100 k Ω 、CD设置为470 nF。确保环路稳定。如果不稳定，则提高CI并降低RP。它具有增加环路时间常数的效果，允许其变得稳定。这种增加时间常数的效果会导致补偿网络的响应速度变慢。

- 补偿环路稳定时，可以调节网络中的元件值，从而缩短整体环路响应时间。其实现方法是慢慢降低CI、提高RP、降低RD、提高CD并降低RI。通过这些调节，让引脚OUT2上的输出在很少有或没有过冲的情况下实现很短的上升和下降时间。在快速响应至关重要的应用中，允许少量的过冲(10%至20%)。
- 将补偿网络调谐至令人满意的值后，建议用将来的系统中要用的分立式元件更换可调谐补偿网络元件，然后重复测试。焊接分立式元件后，将所有开关调至下方位置，从而关闭可调谐补偿网络元件。
- 补偿网络中使用的电容应该为X7R材料的多层陶瓷电容。这类电容可在温度和偏置漂移情况下维持稳定的电容值。X7R类型的电容还具备极低的漏电流和低噪声特性。

设定点温度变化1°C的情况下，蝴蝶封装式激光的典型建立时间性能大约为0.2秒至1秒；对1 W至3 W的大质量激光头而言，建立时间约为5秒至20秒。有关温度补偿网络的更多详情，请参见ADN8831数据手册。

调节PWM开关频率

ADN8831评估板默认设置为1 MHz的自由振荡PWM时钟频率。要修改RFREQ，请调节PWM开关频率(见图7)。降低PWM开关频率可以提高系统功效，但需要使用物理尺寸较大的LC滤波器电感和电容。

对于电信应用，建议的开关频率设置(默认值)为1 MHz。然而，对于效率至关重要的应用，可以选择500 kHz的时钟频率。

表3. 开关频率与R_{FREQ}

f _{SWITCH}	R _{FREQ}
250 kHz	484 kΩ
500 kHz	249 kΩ
750 kHz	168 kΩ
1 MHz	118 kΩ

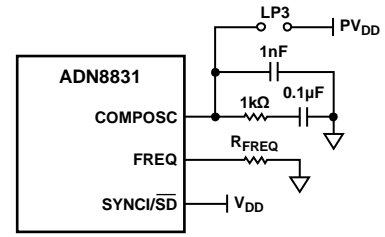


图7. 开关频率

多单元评估

ADN8831可以驱动一个TEC，在多单元配置情况下则可驱动多个TEC。ADN8831数据手册中提供了有关连接多个器件的详情。通过评估板中心的PHASE、SYNCO和SYNINCIN焊盘可以接触到用于同步和相位分配的连接引脚。

如果系统噪声很大，则将从机的1 MΩ电阻更改为比针对主机ADN8831建议的118 kΩ高出15%，也就是136 kΩ。有关详情，请联系ADI公司当地代理商。

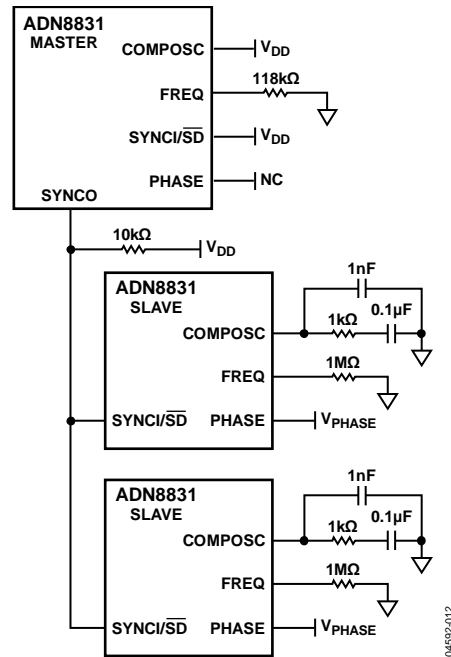


图8. 多单元配置

评估板布局

图10至图13显示了ADN8831评估板的布局。

设计ADN8831评估板布局时记住七大准则会很有帮助。此处列出的产品型号，请参见图9。

1. 从PVDD到PGND的去耦电容和PWM LC输出滤波器电容的接地端子必须连接在一起，以便降低供电轨纹波。使用PCB走线或接地层(具有较长的电流路径)连接这两个元件可能会产生(而不是降低)供电轨纹波(电源电压波动)。
2. PWM MOSFET的两个源极端子必须直接连接或通过一根粗的走线(>1 mm)连接至电源去耦电容的端子(C16和C19)。
3. ADN8831-EVALZ采用4层PCB布局。使用4层PCB时，请注意以下几点建议。
 - 将一个内部层用作接地层，另一个内部层用于信号走线。将顶层和底层用作ADN8831 IC、输出滤波器电感和输出MOSFET(线性端和PWM端)的散热器。
 - 避免在接地层传导较大的电流。
 - 对关键信号路径始终以差分形式使用PCB走线。例如，利用R2引脚1走线对模拟地采用专门的并行走线；两根都用于连接热敏电阻的两个端子。这样可以确保热敏电阻走线上耦合的任意干扰均可相互抵消。

- 由于整流器的作用，低频温度控制电路容易因高频干扰而出现性能下降。这种影响是指高频信号干扰低频电路时产生的现象；干扰信号会整流或耦合为直流或频率较低的信号，从而影响电路的运行。无法避免高频干扰时，请在热敏电阻两端连接一个最多100 nF的小型电容，安装到控制器附近，以便对高频干扰信号进行去耦操作。
4. 确保电源去耦电容的总值>40 μ F。建议使用X5R或X7R型SMT多层陶瓷电容。这类电容在不同温度下的电容值都很稳定，而且拥有非常低的等效串联电阻(ESR)。
 5. AVDD和PVDD之间的电阻值为1 Ω 至10 Ω 。
 6. 仔细地设计AGND和PGND，在PCB上电流密度最低的位置连接两个接地点。
 7. 由于ADN8831和MOSFET会消耗大量的电流，因此会很快聚积热量。为了实现稳定的元件性能，设计时采用金属散热器可以缓解元件散热问题，尤其是在PWM MOSFET端。设计布局时，在元件之间留出足够的空间是一种不错的做法。为确保散热器设计妥当，请联系ADI公司，以便在制造PCB之前为您提供布局设计审核支持。

评估板原理图和PCB布局图

图9显示了ADN8831评估板(4.0版)的原理图。注意，此原理图中显示为引脚33的THPAD是指芯片集下方裸露的散热焊盘。将THPAD连接至AGND，以便散热。

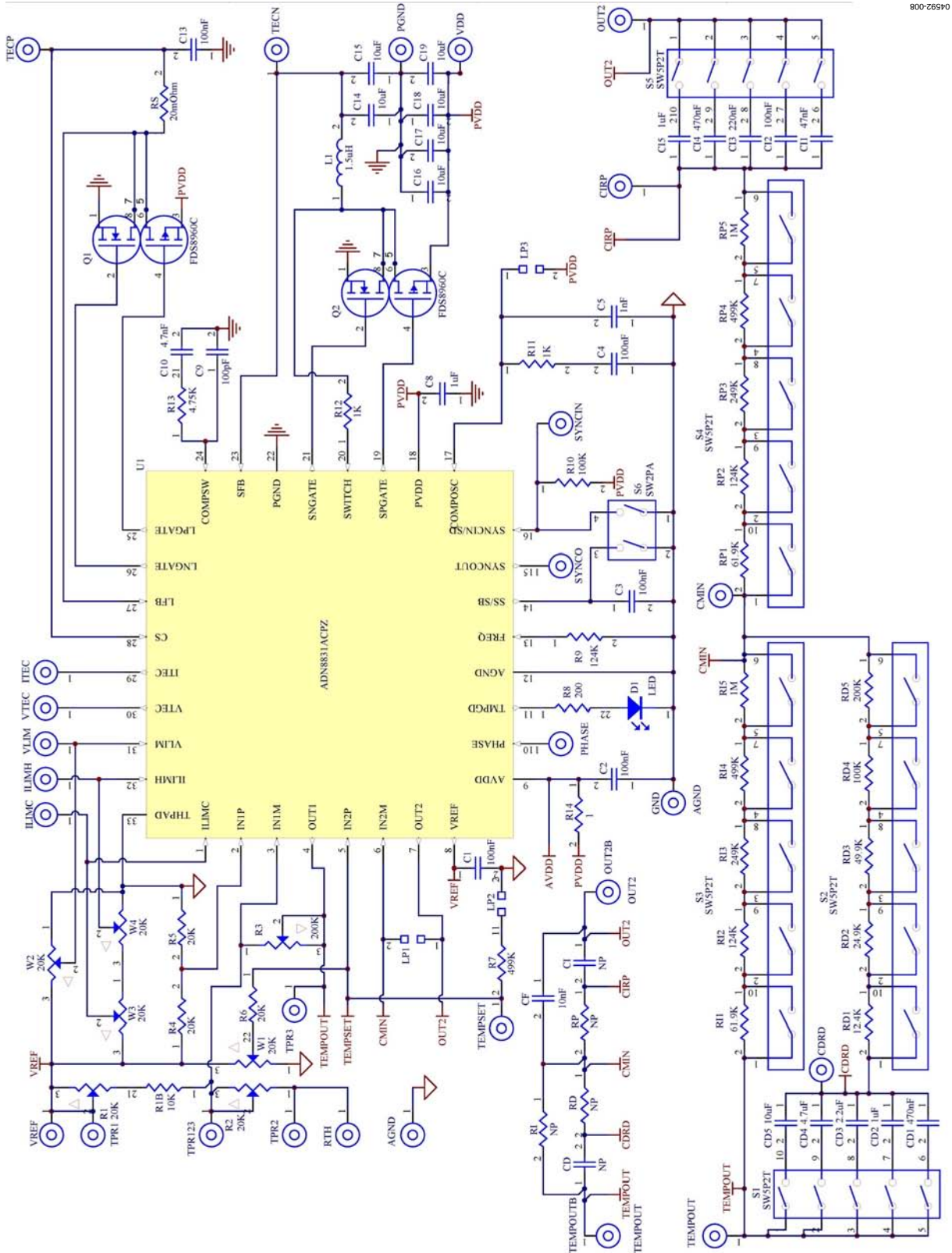


图9. ADN8831评估板原理图

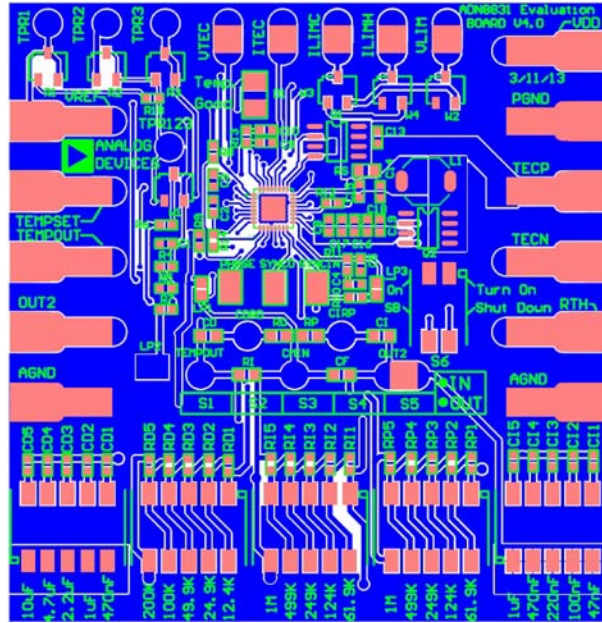


图10. 顶层丝印

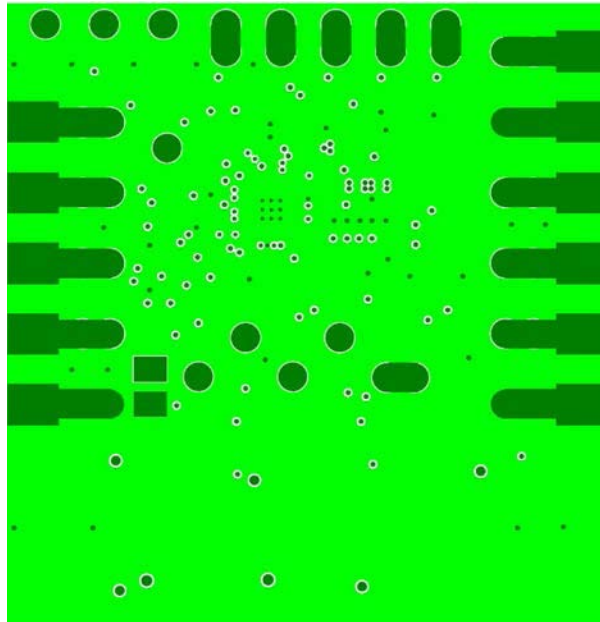


图11. 中层1布局

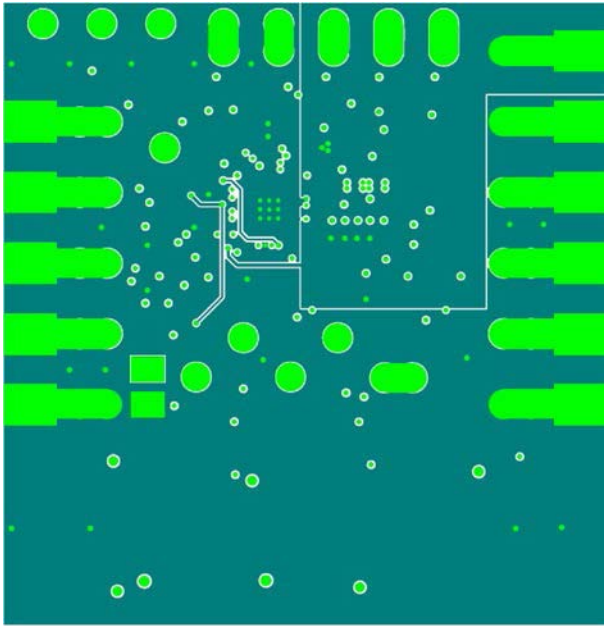


图12. 中层2布局

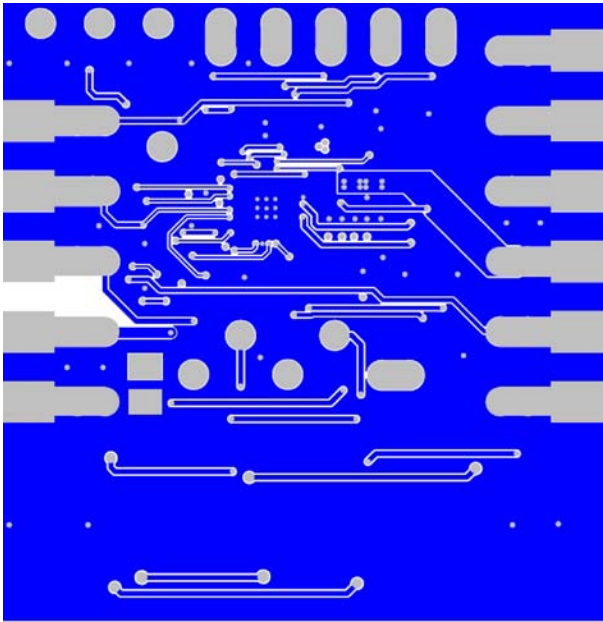


图13. 底层布局

物料清单

表4.

数量	标识	说明	制造厂商	产品型号
1	R14	1 Ω 0603电阻	Yageo	RC0603FR-071RL
1	L1	1.5 μH 3A, 0.2 mm × 6.2 mm × 2 mm	Toko	#A918CY-1R5M=P3
2	R11, R12	1 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1001V
2	RI5, RP5	1 mΩ电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1004V
1	C5	1 nF 0603 X7R 50 V陶瓷电容	Kemet	C0603C102J5RACTU
3	C8, CD2, C15	1 μF 0603 X5R 6.3 V陶瓷电容	Murata	GRM188R61C105KA93D
1	CD3	2.2 μF 0603 X5R 6.3 V陶瓷电容	Murata	GRM188R60J225KE19D
1	C10	4.7 nF 0603 X7R 50 V陶瓷电容	Yageo	CC0603KRX7R9BB472
1	CD4	4.7 μF 0603 X5R 6.3 V陶瓷电容	T-Y	JMK107BJ475KA-T
1	R13	4.75 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF4751V
1	R1B	10 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1002V
1	CF	10 nF 0805 X7R 50 V陶瓷电容	Murata	GRM216R71H103K
7	C14, C15, C16, C17, C18, C19, CD5	10 μF 0603 X5R 6.3 V陶瓷电容	Murata	GRM188R60J106ME47D
1	RD1	12.4 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1242V
3	R4, R5, R6	20 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3GEYJ203V
6	TPR1, TPR2, W1, W2, W3, W4	20 kΩ多匝调节电位计	Murata	PVG5A203C01R00
1	RS	20 mΩ 0805电阻	Vishay	WSL0805R0200FEA18
1	RD2	24.9 kΩ 0603电阻	SUSUMU	RR0816P-2492-D-39C
1	CI1	47 nF 0603 X7R 16 V陶瓷电容	Panasonic	ECJ-1VB1C473K
1	RD3	49.9 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF4992V
2	RI1, RP1	61.9 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF6192V
2	R10, RD4	100 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1003V
6	C1, C2, C3, C4, CI2, C13	100 nF 0603 X7R 10 V陶瓷电容	Kemet	C0603C104K8RACTU
1	C9	100 pF 0603陶瓷电容	Yageo	CC0603JRNP09BN101
3	R9, RI2, RP2	124 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF1243V
1	R8	200 Ω 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF2000V
1	RD5	200 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF2003V
1	TPR3	200 kΩ多匝调节电位计	Murata	PVG5A204C01R00
1	CI3	220 nF 0603 X5R 10 V陶瓷电容	Murata	GRM188R71A224KA01D
2	RI3, RP3	249 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF2493V
2	CD1, CI4	470 nF 0603 X5R 6.3 V陶瓷电容	Murata	RM188R71E474KA12D
3	R7, RI4, RP4	499 kΩ 0603电阻	Panasonic	ERJ-3EKF4993V
1	U1	TEC控制器	Analog Devices	ADN8831ACPZ
2	Q1, Q2	双N/P沟道MOSFET	Fairchild	FDS8960C
1	D1	LED SMT(绿色)	OSRAM	LG T67K-H2K1-24-Z
1	S6	开关, 2PST	C&K	SDA02H1SBD
5	S1, S2, S3, S4, S5	开关, 5PST	C&K	SDA05H1SBDA