

测试测量应用中的运放 INA818 发热 问题解决

Gary Zeng, Georgia Guo

摘要

运算放大器 (Operational Amplifier, 简称运放) 是电子系统中无处不在的核心器件, 其性能稳定性直接关系到整个电路的可靠性。然而, 在实际应用中, 尤其是驱动重负载或工作在高功率模式下, 运放的发热问题常常困扰着工程师。过高的温度不仅会缩短器件寿命, 更会引发参数漂移、热击穿甚至系统失效。尤其是测试测量应用当中, 运放发热会导致测量的数据异常甚至测量失败。本文将从运放发热的根本原因入手, 系统性地分析静态电流 (I_q)、供电电压 (V_s)、输入信号与负载情况、封装与热阻 (θ_{ja}) 等关键因素对发热的影响, 并提供一套行之有效的散热与选型策略, 旨在帮助工程师设计出更高效、更可靠的电路系统。

内容

1	运放发热的影响	2
1.1	静态参数漂移, 电路精度大幅下降.....	2
1.2	动态性能劣化, 信号处理能力减弱.....	3
1.3	噪声水平升高, 信噪比恶化.....	3
1.4	输出能力受限, 负载驱动失效.....	3
1.5	运放使用寿命缩短, 甚至直接烧毁.....	3
2	运放发热的根本原因	3
3	运放发热的核心影响因素分析与解决策略	4
3.1	运放的静态电流及其影响.....	4
3.2	运放的供电电压.....	4
3.3	输入信号与负载情况.....	5
3.4	封装与热阻 (θ_{ja}).....	5
4	仿真	6
4.1	软件仿真.....	6
4.2	增益 5 倍时的功耗仿真和计算.....	7
4.3	供电电压 $\pm 10V$ 时的功耗仿真和计算.....	7
4.4	负载电阻 $10k\Omega$ 时的功耗仿真和计算.....	8
4.5	增大输入电压范围的运放功耗仿真和计算.....	8
4.6	输入电压的共模电压从 $0V$ 设置为 $0.5V$ 的运放功耗与计算.....	9
5	实验验证	9
5.1	$\pm 15V$ 供电, 无信号输入时的实验.....	9
5.2	$\pm 15V$ 供电, $2V$ 输入, 带轻载时的实验.....	10
5.3	$\pm 15V$ 供电, $2V$ 输入, 带重载时的实验.....	10
5.4	$\pm 15V$ 供电, $1V$ 输入, 带轻载时的实验.....	11

5.5	$\pm 15V$ 供电, 1V 输入, 带重载时的实验	11
5.6	$\pm 11V$ 供电, 1V 输入, 轻载和重载实验	11
6	总结	12
References		12

Figures

Figure 1.	仪表放大器 INA818 的各部分的电流情况	6
Figure 2.	增益 5 倍时的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况	7
Figure 3.	增益 5 倍且 $\pm 10V$ 电源供电的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况	7
Figure 4.	负载 $10k\Omega$ 的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况	8
Figure 5.	增大输入电压的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况	8
Figure 6.	更改共模电压后的 INA818 各部分的电流情况	9
Figure 7.	INA818 的实验装置	9
Figure 8.	$\pm 15V$ 供电, 无信号输入时的热成像	10
Figure 9.	$\pm 15V$ 供电, 2V 输入, 带轻载时的热成像	10
Figure 10.	$\pm 15V$ 供电, 2V 输入, 带重载时的热成像	10
Figure 11.	$\pm 15V$ 供电, 1V 输入, 带轻载时的热成像	11
Figure 12.	$\pm 15V$ 供电, 1V 输入, 带重载时的热成像	11
Figure 13.	$\pm 11V$ 供电, 1V 输入, 轻载实验的热成像	12
Figure 14.	$\pm 11V$ 供电, 1V 输入, 轻载实验的热成像	12

1 运放发热的影响

运放发热的核心危害源于其内部半导体器件（晶体管、电阻等）的电特性对温度极其敏感，温度升高会直接改变这些器件的工作状态，进而引发性能劣化甚至物理损坏，具体影响及底层原因如下。

1.1 静态参数漂移，电路精度大幅下降

温度升高，输入失调电压、输入偏置电流、输入失调电流等静态参数会显著漂移，导致电路输出偏离设计的直流工作点（如精密放大电路输出出现固定误差）。运放内部的晶体管依赖 PN 结的导通特性工作，温度升高会使晶体管的基极-发射极电压 (V_{be}) 随温度漂移（约 $-2mV/^\circ C$ ），直接导致输入失调电压变化；半导体载流子浓度增加，晶体管反向漏电流增大，进而使输入偏置电流、失调电流上升，破坏电路的直流平衡。

精密仪表运放 INA818 广泛应用于测试测量系统当中，对于电压信号和微弱的电流信号进行放大。在 $-40^\circ C$ 到 $125^\circ C$ 的温度范围内，最大输入失调电压为 $75\mu V$ ，输入失调电压的温度漂移 V_{os_drift} 为 $0.4\mu V/^\circ C$ 。当运放温度从室温 $25^\circ C$ 因工作发热到 $125^\circ C$ 时，输入失调电压会增大到：

$$V_{os} = V_{initial} + V_{os_drift} * \Delta T = 75\mu V + 0.4\mu V/^\circ C * 100^\circ C = 115\mu V \quad (\text{公式 1})$$

若使用该运放采集 mV 级的信号时，就会产生约 10% 的误差。

1.2 动态性能劣化，信号处理能力减弱

温度升高，开环增益降低、带宽变窄、压摆率（**Slew Rate**）下降，导致运放处理高频信号或大摆幅信号时出现失真（如正弦波变方波、信号延迟）。开环增益下降：运放的开环增益主要由多级晶体管的电流放大系数（ β ）决定，温度超过一定范围后， β 会随温度升高而下降，直接导致开环增益降低；带宽变窄：晶体管的结电容（如基极-集电极电容 **Cbc**）随温度升高而增大，同时载流子迁移率下降，使器件的高频响应能力减弱，最终导致运放带宽收缩；压摆率下降：压摆率取决于运放内部电流源的驱动能力和补偿电容的充放电速度，高温会使电流源输出电流不稳定，且电容充放电速度变慢，导致压摆率降低。

1.3 噪声水平升高，信噪比恶化

温度升高，输出信号中的热噪声、闪烁噪声（**1/f 噪声**）显著增加。对测试测量应用中的微弱信号放大等场景，噪声会覆盖微弱信号，导致无法正常检测。热噪声：根据物理公式，热噪声功率与温度成正比。

$$P = 4kTB \quad (\text{公式 2})$$

k 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， B 为带宽，温度升高直接导致电阻、晶体管的热噪声增强；闪烁噪声：高温会加剧晶体管内部载流子的随机俘获/释放过程，使低频段的闪烁噪声（**1/f 噪声**）幅度增大。

1.4 输出能力受限，负载驱动失效

温度升高，运放的最大输出电流、输出电压范围收缩，无法满足负载需求（如驱动 **LED**、电机时电流不足，或输出信号幅度达不到设计值）。运放输出级多为推挽式功率晶体管，高温会降低晶体的最大允许集电极电流 **Ic(max)**，避免因结温过高导致热击穿，因此运放会限制输出电流；改变晶体管的饱和压降 **Vce(sat)**，导致输出电压范围（从正电源到负电源的幅度）缩小，无法达到设计的输出摆幅。

1.5 运放使用寿命缩短，甚至直接烧毁

长期高温工作会加速运放老化，缩短使用寿命；若温度超过额定结温（通常为 **125°C~150°C**），会直接导致器件烧毁，引发电路瘫痪。老化加速，高温会加剧半导体内部的金属化层迁移、氧化层劣化等物理过程，导致器件参数逐渐退化，最终失去功能；热击穿烧毁，当运放结温超过额定值时，晶体管 **PN 结** 的反向击穿电压急剧下降，引发“热击穿”，电流瞬间激增，导致器件永久损坏。

2 运放发热的根本原因

运算放大器并非理想器件，其工作过程本质上是一个能量转换的过程。发热，即热损耗，来自于运放内部消耗的电功率。这个总功耗（**Pd**）主要由两大部分组成：（1）静态功耗（**Pq**）：也称为空载功耗，是指运放在无负载、无输入信号情况下，维持其内部电路（如偏置电路、恒流源、输入级等）正常工作所消耗的功率。（2）动态功耗（**P_{signal}**）：指运放为了驱动输出信号和负载而产生的附加功耗。信号幅度越大、负载越重，这部分功耗就越大。

$$Pd = Pq + P_{\text{signal}} \quad (\text{公式 3})$$

这个总功耗 **Pd** 最终几乎全部转化为热量，使运放芯片的结温（**Tj, Junction Temperature**）升高，其发热量的计算公式为：

$$Pd = [(Vs+) + (Vs-)] * I_{cc} + [(Vs+) - V_{out}] * I_{load} \quad (\text{公式 4})$$

其中， V_{s+} 和 V_{s-} ：运放的正负供电电压； I_{cc} ：流入运放电源引脚的总静态电流； V_{out} ：运放的输出电压； I_{load} ：输出负载电流。从公式 4 可以看出，影响发热的关键变量就是供电电压、静态电流和输出功率。

3 运放发热的核心影响因素分析与解决策略

3.1 运放的静态电流及其影响

静态电流 (I_q / I_{cc}) 是运放自身的“待机功耗”，它决定了运放发热的基准线。运放的静态功耗为：

$$Pq = [(Vs+) + (Vs-)] * Icc \quad (\text{公式 5})$$

例如，一个静态电流为 5mA 的运放，在 $\pm 15V$ 供电下，其静态功耗就高达 $(15V + 15V) \times 5mA = 30V \times 5mA = 150mW$ 。这部分功率会持续产生热量。解决办法是选择低功耗（低静态电流）运放：现代半导体工艺提供了大量低 I_q 的运放选项。例如，TI 的 OPAx391 系列等，其静态电流可低至几微安 (μA) 甚至纳安 (nA) 级别。

选择低静态电流的运放也会显著影响其多个性能指标，这些影响主要源于静态电流与运放内部电路设计、功耗和性能之间的权衡关系。

(1) 带宽 (Bandwidth)，低静态电流可能导致带宽降低。运放的带宽通常与内部电路的电流驱动能力相关。静态电流较低时，内部补偿电容的充电/放电电流减小，导致频率响应变慢，带宽受限。

(2) 噪声 (Noise)，低静态电流可能增加噪声，尤其是低频噪声 (闪烁噪声)。静态电流与热噪声 (Johnson-Nyquist Noise) 成正比。低电流设计可能减少热噪声，但若采用更小的晶体管 (如 CMOS 工艺)，可能增加闪烁噪声 ($1/f$ 噪声)。例如，低功耗运放可能在低频段 (如 1Hz 以下) 表现出更高的噪声，影响精密测量或音频应用。

(3) 输出驱动能力 (Output Drive Capability)，输出电流能力可能下降。静态电流低意味着运放内部输出级的电流驱动能力受限。这可能导致输出阻抗升高：无法有效驱动低阻抗负载 (如大电容或电机)。失真增加：在大信号输出时，可能因电流不足导致非线性失真，低功耗运放可能无法驱动高功率扬声器或大容量电容。

(4) 摆动速度 (Slew Rate)，摆动速率 (Slew Rate) 可能降低。摆动速率与内部补偿电容的充电电流成正比。低静态电流会导致电容充电电流减小，从而降低运放对快速变化信号的响应能力。在满足带宽、噪声、输出能力和摆动速度要求的前提下，优先选择低 I_q 型号是从源头抑制发热的最有效手段。

3.2 运放的供电电压

供电电压对功耗的影响是巨大的，它直接线性影响静态功耗，如公式 5 所示，供电电压越大，运放的静态功耗就越大。更重要的是，它极大地影响了输出级的动态功耗。运放输出级晶体管的输出压降 ($V_s - V_{out}$) 是功耗的主要来源。压差越大，在相同负载电流下，晶体管上的损耗 $(V_s - V_{out}) \times I_{load}$ 就越大，效率越低，发热越严重。

采用满足功能所需的最低供电电压：在设计允许的范围内，尽可能降低运放供电电压。将电压从±15V降低到±5V，静态功耗和动态功耗都会大幅下降。使用轨到轨（Rail-to-Rail）输出运放：轨到轨输出运放能够使其输出电压非常接近供电轨电压，从而最小化输出级晶体管的压降（ $V_s - V_{out}$ ）。这在电池供电和低电压供电系统中对于提高效率、减少发热至关重要。

3.3 输入输出信号与负载

输入信号：INA818 是线性电压模式放大器，运放的输入阻抗高，输入信号的大小基本不会改变内部偏置电流，输入信号大小本身不会直接改变运放的功耗。

输出信号：运放输出电压的摆幅决定了负载电流，负载电流增加则输出级的功耗增加；当负载为容性负载时（如长的电缆、ADC 采样保持电路），输出信号的频率也会影响运放的动态功耗。 $I = C \times dV/dt$ ，对于正弦信号， $I_{avg} = 2\pi f C V_{pk}$ ，可以看到负载平均电流与输出信号频率 f 成正比。

负载：输出电压不变，负载越小，负载电流越大，芯片输出级的损耗越大。驱动低阻抗负载（如扬声器、传输线）或需要输出大电流时，动态功耗 P_{signal} 将成为总功耗的主导。

以上总结，输出信号的幅度、频率以及所驱动的负载，共同决定了运放的动态功耗大小。可以通过以下方面减少运放的功耗：**1. 满足要求的情况下尽量降低输出电压幅度；2. 优化负载匹配：**避免让运放直接驱动重负载。对于低阻抗负载，务必在运放后级增加缓冲级或功率驱动级（如 BUF634、分立元件推挽电路），让运放只处理电压摆幅，由专门的功率器件来提供电流。谨慎处理容性负载：在运放输出端串联一个小的隔离电阻（如 10-100Ω），可以减轻容性负载带来的稳定性问题和电流冲击。

3.4 封装与热阻（ θ_{ja} ）

即使产生了热量，如何高效地将热量散发到环境中，防止芯片结温过高，是设计的最后一道关卡。这主要由封装和热阻决定。

热阻（ θ_{ja} ）：结到环境的热阻（ θ_{ja} ），单位是 °C/W。它表示芯片每消耗 1 瓦的功率，结温相对于环境温度的温升。 θ_{ja} 越小，散热能力越强。

$$T_j = T_a + P_d * \theta_{ja} \quad (\text{公式 6})$$

T_j 为芯片的结温， T_a 为环境温度，为保证器件可靠工作，必须满足 $T_j < T_{j_max}$ （通常是 150°C）。

封装的影响：小型封装（如 SOT-23, SC-70）： θ_{ja} 很大（可能 200-300°C/W），散热能力极差，几乎只能靠 PCB 板散热。大型封装（如 SOIC, DIP）： θ_{ja} 较小（约 100-160°C/W），自身有一定散热能力。带裸露焊盘的封装（如 MSOP-PowerPAD, DFN, QFN）：这是高效散热的关键。芯片背面的金属焊盘可以通过过孔直接焊接在 PCB 的铺铜区，将热量高效地传导至大面积接地层散掉，可将 θ_{ja} 降至极低水平（如 40-50°C/W）。

仪表放大器 INA818 芯片的封装为 SOIC-8，热阻为 119.6°C/W，即功耗为 1W 时，芯片内部的 die 的温度会相对环境温度升高 119.6°C。

优先选择带裸露焊盘的封装：只要空间和工艺允许，应首选此类封装。充分利用 PCB 作为散热器： 1. 在运放下方的 PCB 各层创建大面积接地铜箔。 2. 使用多个 thermal vias（散热过孔）将顶层的芯片焊盘与内部和底层的地平面连接起来。过孔要尽可能多、尽可能大（或用阵列式小过孔）。 3. 如果允许，可以在 PCB 底层焊接一个额外的金属散热片。增加空气流动：在系统层面，通过风扇强制风冷可以显著降低环境温度 T_a 和有效热阻 θ_{ja} 。

4 仿真

在设计阶段，就必须进行热估算： $T_j = T_a + P_d * \theta_{ja}$ 。确保在最坏情况（Worst Case）下的结温 T_j 远小于芯片允许的最大结温 T_{j_max} （通常是 125°C 或 150°C ）。 θ_{ja} 值可参考数据手册，但要注意其测试条件。

4.1 软件仿真

使用 TI 的 Analog Engineer's Calculator 软件可以对运放的输入输出电流进行仿真，从而计算出运放的功耗情况。选用仪表放大器 INA818， $\pm 15\text{V}$ 双电源供电，输入 1V 的差分电压，10 倍增益， $1\text{k}\Omega$ 的负载电阻，可以得到下图所示的输入输出电流情况。

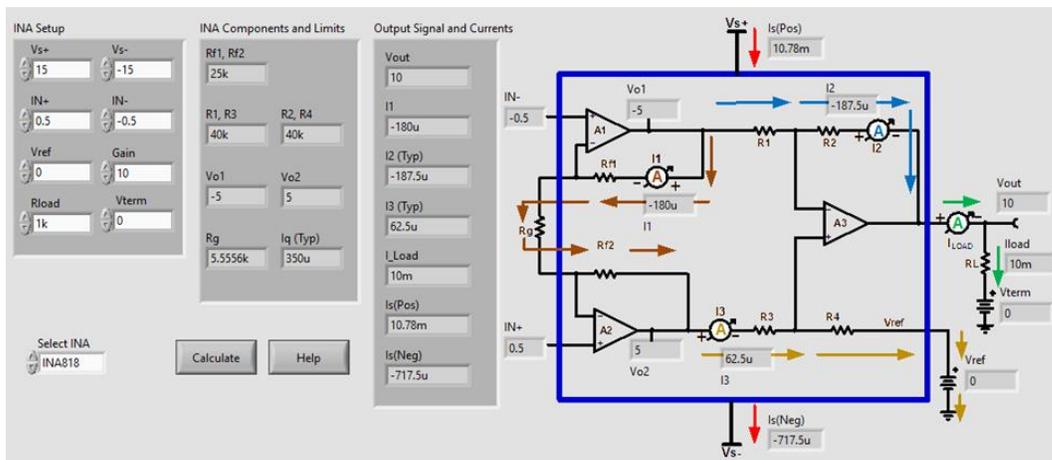


Figure 1. 仪表放大器 INA818 的各部分的电流情况

根据基尔霍夫电流定律，流入芯片的电流等于流出的电流。

$$(I_{vs+}) = (I_{vs-}) + I_{load} + I_{ref} \quad (\text{公式 7})$$

$$10.78\text{mA} = 717.5\mu\text{A} + 10\text{mA} + 62.5\mu\text{A} \quad (\text{公式 8})$$

如果忽略 I_{ref} 电流，那么芯片的功耗 P_1 为：

$$P_1 = (V_{s+}) * (I_{vs+}) + (V_{s-}) * (I_{s-}) - I_{load} * V_{out} \quad (\text{公式 9})$$

$$P_1 = 30\text{V} * 0.7175\text{mA} + 5\text{V} * 10\text{mA} = 71.525\text{mW} \quad (\text{公式 10})$$

可以看到公式 9 与公式 4 吻合，运放功耗与运放的供电电压，静态电流，输出电压以及负载大小有关。

4.2 增益 5 倍时的功耗仿真和计算

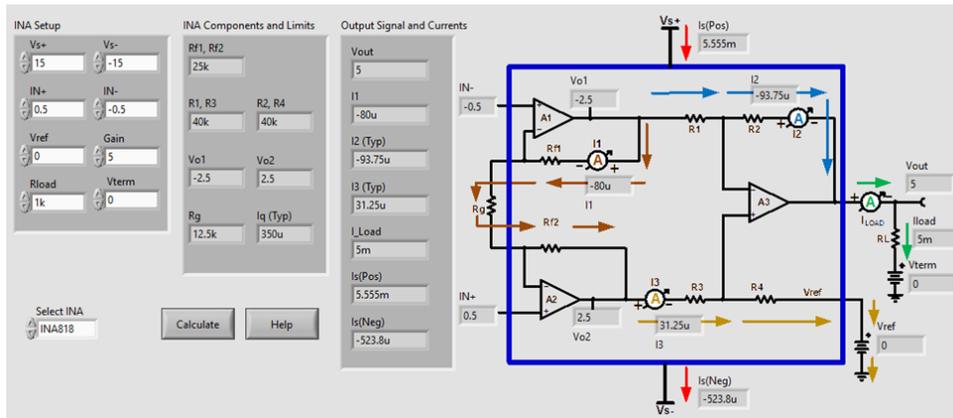


Figure 2. 增益 5 倍时的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况

将图 1 的 10 倍增益更改为 5 倍，可以看到输出电压从 10V 降为 5V，负载电流从 10mA 降为 5mA，静态电流从 717.5uA 降为 523.8uA。此时的功耗 P2 为：

$$P2 = 30V * 0.5238mA + 10V * 5mA = 65.714mW \quad (\text{公式 11})$$

相比图 1 的 10 倍增益时的功耗降低了 8.12%。

4.3 供电电压 ±10V 时的功耗仿真和计算

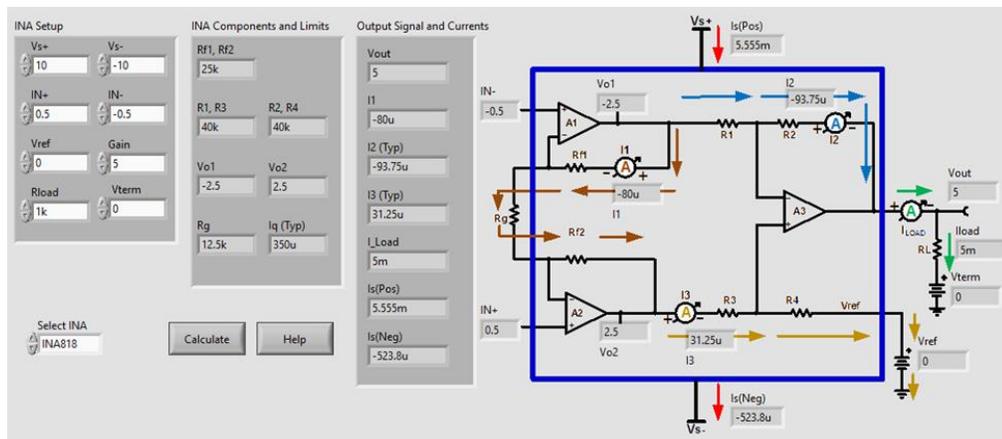


Figure 3. 增益 5 倍且 ±10V 电源供电的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况

进一步将 ±15V 的电源更改为 ±10V，可以看到芯片的各部分电流没有变化，但是功耗 P3 变为：

$$P3 = 20V * 0.5238mA + 5V * 5mA = 35.476mW \quad (\text{公式 12})$$

相比于 5 倍增益且 ±15V 供电的运放功耗，±10V 供电的运放功耗减少了 46%，可见减少运放的供电电压可以显著地降低运放的功耗。

4.4 负载电阻 10kΩ 时的功耗仿真和计算

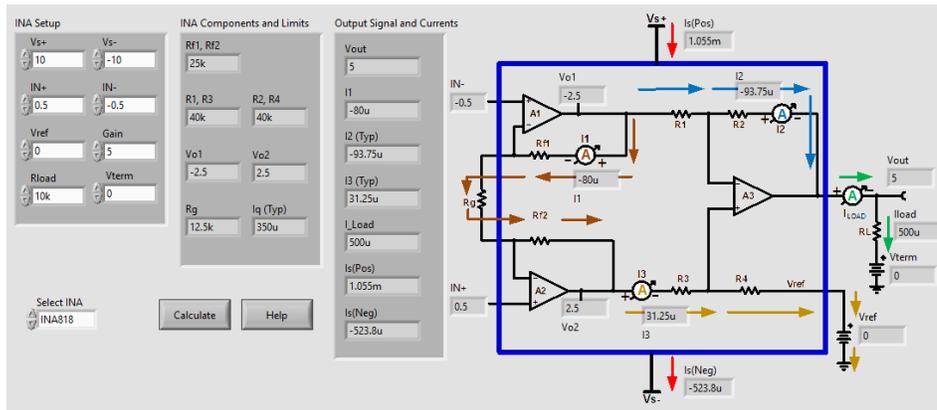


Figure 4. 负载 10kΩ 的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况

继续将负载电阻从 1kΩ 提升到 10kΩ，可以看到负载电流由 5mA 变为 0.5mA，则功耗 P4 为：

$$P4 = 20V * 0.5238mA + 5V * 0.5mA = 12.976mW \quad (\text{公式 13})$$

功耗又减少了 63.4%，可见增大驱动的阻性负载可以减少运放的功耗。

4.5 增大输入电压范围的运放功耗仿真和计算

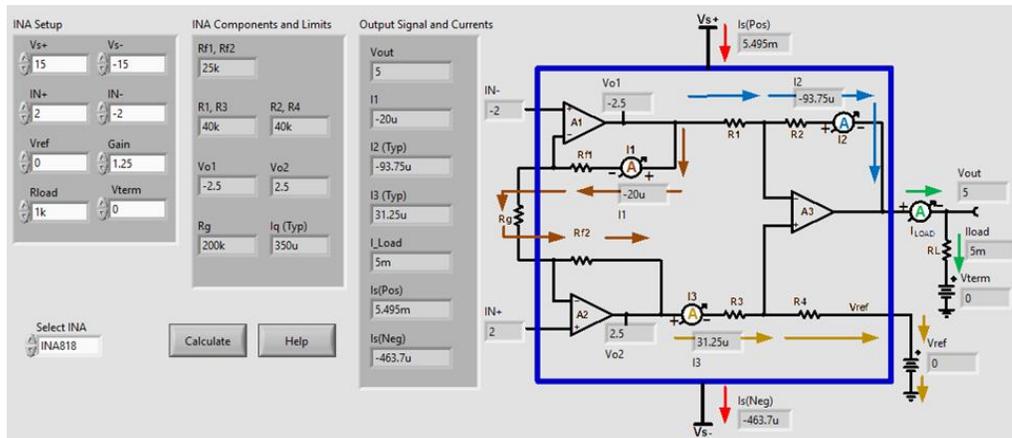


Figure 5. 增大输入电压的仪表放大器 INA818 各部分的电流情况

将图 2 的输入差分电压从 1V 增大到 4V 且把增益从 5 倍改为 1.25 倍以保持输出电压不变，可以看到运放的静态功耗从 523.8uA 降低到 463.7uA，功耗 P5 为：

$$P5 = 30V * 0.4637mA + 10V * 5mA = 63.911mW \quad (\text{公式 14})$$

功耗相比图 2 略微降低了 2.7%。

4.6 输入电压的共模电压从 0V 设置为 0.5V 的运放功耗与计算

将图 1 的输入差分电压的共模从 0V 更改为 0.5V，可得到下图 6。

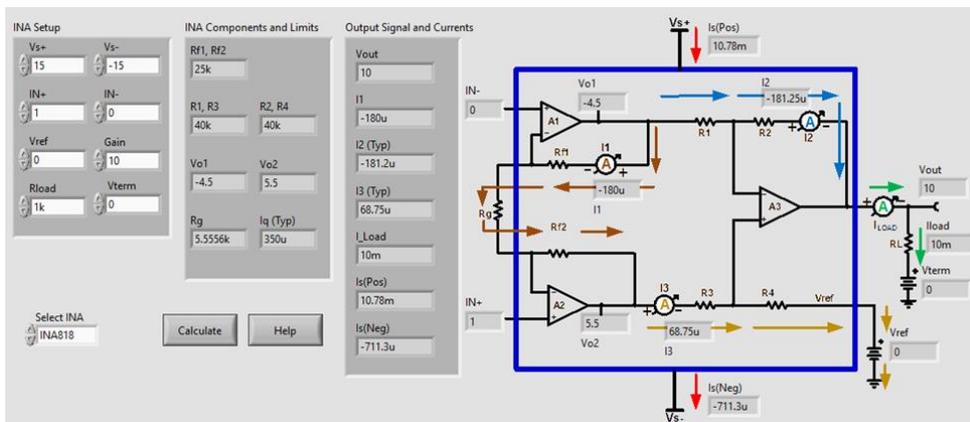


Figure 6. 更改共模电压后的 INA818 各部分的电流情况

更改输入差分电压的共模电压后，静态电流微弱地减小到 713.3uA，功耗 P6 为：

$$P6 = 30V * 0.7133 + 5V * 10mA = 71.399mW \quad (\text{公式 15})$$

相比图 1 的功耗减少了 0.18%，可见输入共模电压的改变对运放功耗的影响很小，可以忽略不记。

5 实验验证

由于 INA818 这个芯片没有官方的 demo 板，我们将 INA818 安装到通用仪表放大器评估模块 INAEVM 上，同样设置 1kΩ 的负载电阻和使用双电源供电，设置增益电阻 Rgain 为 12kΩ，近似地设置放大倍数为 5.16 倍 (G=1+50kΩ/R_G)，REF 接地。



Figure 7. INA818 的实验装置

5.1 ±15V 供电，无信号输入时的实验

将输入电压设置为 0V 时，输出也近似为 0V，启动 5 分钟后，使用热辐射仪测量板上的 INA818 的温度为 27.6°C，可以看到 INA818 在静态工作状态下的温度不高，为 27.4°C。



Figure 8. ±15V 供电，无信号输入时的热成像

5.2 ±15V 供电，2V 输入，带轻载时的实验

将输入电压设置为 2V 时，轻载下 (7.5kΩ)，输出为 10.32V，启动 5 分钟后，使用红外测温枪测量板上的 INA818 的温度为 28°C，温升不明显，为 28°C。符合理论预期，说明 INA818 处于健康工作状态且 EVM 散热良好。

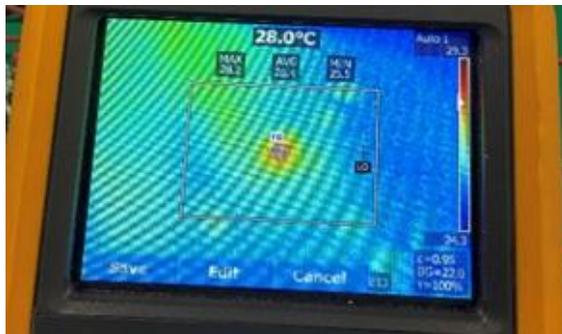


Figure 9. ±15V 供电，2V 输入，带轻载时的热成像

5.3 ±15V 供电，2V 输入，带重载时的实验

将输入电压设置为 2V 时，输出为 10.32V，将负载从 7.5kΩ 更改为 650Ω，负载电流增加约 14.6mA。启动 5 分钟后，使用热辐射仪测量板上的 INA818 的温度为 32.7°C，温升约 4.7°。



Figure 10. ±15V 供电，2V 输入，带重载时的热成像

5.4 ±15V 供电，1V 输入，带轻载时的实验

将输入电压更改为 1V 时，轻载下（7k5 Ω），输出为 5.16V；输出电流对比于 2V 输入，减小一半。测得的表面温度和静态时基本没有区别。



Figure 11. ±15V 供电，1V 输入，带轻载时的热成像

5.5 ±15V 供电，1V 输入，带重载时的实验

将负载阻值减小到 650 Ω，输出为 5.16V，测得的温升为 31.5°C。

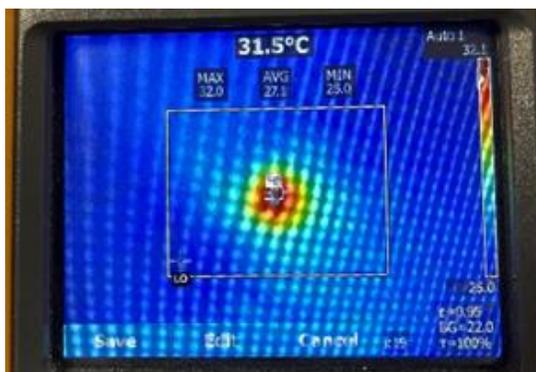


Figure 12. ±15V 供电，1V 输入，带重载时的热成像

5.6 ±11V 供电，1V 输入，轻载和重载实验

在 1V 输入条件不变的情况下，将 INA818 供电电压降低至 ±11V，在轻载（7k5 Ω，图 13）和重载（650 Ω，图 14）两种负载情况下，重复进行温升测试。与前述 ±15V 供电条件下的测试结果相比，在相同负载条件下，INA818 的温升表现出下降趋势。其主要原因在于输出级内部功耗与供电电压直接相关，供电电压降低使输出级两端的压降减小，从而降低了器件内部的功率损耗。

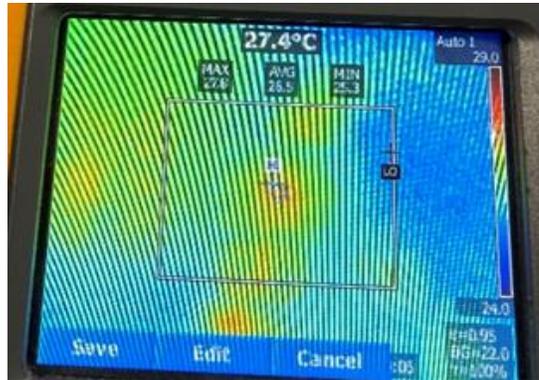


Figure 13. ±11V 供电，1V 输入，轻载实验的热成像

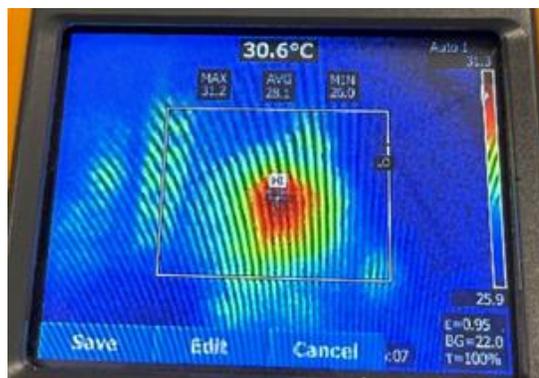


Figure 14. ±11V 供电，1V 输入，轻载实验的热成像

6 总结

分析与实验结果表明，运放的发热主要由其内部功耗引起，而功耗又同时受到供电电压、静态电流、输出摆幅及负载条件的共同影响。在保持输出电压不变的前提下，降低供电电压可显著减少输出级晶体管的压降，从而有效降低器件功耗与温升；同时，减轻负载或避免直接驱动低阻抗负载，也能显著改善热表现。

实验中测得的 INA818 温升低于基于数据手册 θ_{ja} 计算得到的理论最坏情况值，主要原因在于 θ_{ja} 本身是在标准测试板和保守散热条件下给出的参数，而实际评估板具有更大的 PCB 铜箔面积和更优的热扩散路径。

同时，实验测量的是器件封装表面温度而非芯片结温，在当前几十毫瓦功耗等级下，实际结温与环境温度之间的温升显著小于按最坏情况线性估算的结果。

对于测试测量系统而言，在满足信号摆幅与精度要求的前提下，合理降低供电电压、优化负载结构，是提升系统可靠性与长期稳定性的关键手段。

References

1. INA818 Datasheet

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