

## Application Note

## 使用 LOG200 对数放大器执行精确的光学电流传感测量



Luis Chioye

## 摘要

LOG200 是一款精密高速的电流-电压对数放大器，具有集成的自适应光电二极管偏置功能。该器件专为在 10pA 至 10mA (180dB) 的宽动态范围内进行电流测量而设计。它具有跨越多个输入电流阶数的高速响应，能够独特地结合快速瞬态响应、高精度和对数一致性。

本文档提供了将 LOG200 与光传感器连接起来进行光学电流检测应用的指南、示例和工作台测量。

## 内容

1 简介.....	2
2 关键光电二极管规范.....	3
3 将 LOG200 与光传感器连接.....	4
3.1 光电二极管连接.....	4
3.2 光电二极管自适应偏置电流输出.....	4
4 用于电流检测测量的光学工作台.....	7
4.1 光传感器的瞬态响应.....	8
5 使用 LOG200 进行光功率测量.....	10
6 误差源与未校准误差分析.....	11
7 辅助运算放大器电路.....	14
7.1 单端至差分转换.....	14
7.2 Sallen-Key 低通滤波器.....	15
8 总结.....	17
9 参考资料.....	18

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。



## 2 关键光电二极管规范

光电二极管是测量光源光功率最常见的探测器之一。光电二极管可以在以下两种模式之一运行：光电（反向偏置）或光伏（零偏置）。光电二极管的偏置条件取决于应用的速度要求以及传感器上可耐受的暗电流 ( $I_{\text{dark}}$ ) 大小。暗电流是光电二极管在没有入射光时产生的电流，在低光电二极管电流测量过程中可能成为较大的误差来源。

在光导模式下，施加外部反向偏置，测量的输出电流与输入光功率成线性关系。施加反向偏置增加了耗尽区的宽度，从而提高了响应度并降低了结电容，产生了非常线性的响应。然而，在反向偏置条件下工作往往会增加暗电流。图 2-1 展示了光电二极管反向偏置时的暗电流。

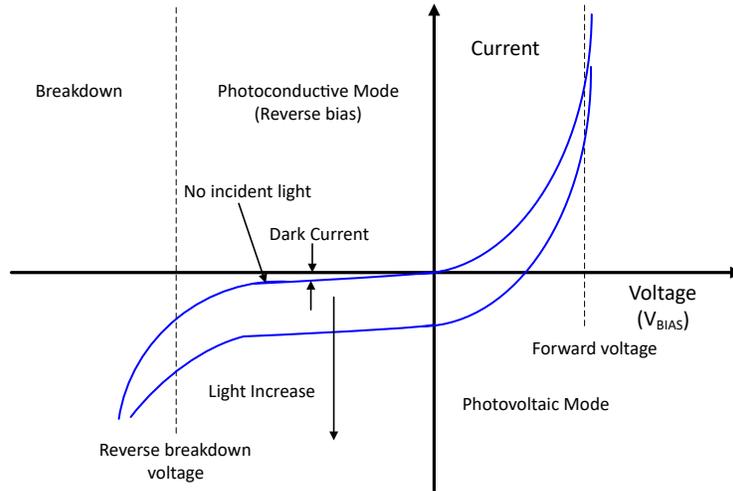


图 2-1. 光电二极管在光导模式下的暗电流

此示例展示了本设计中的近红外 (NIR) 波长铟镓砷 (InGaAs) 光电二极管。在此应用示例中，光电二极管在光电导模式下工作，其中光照射到探测器上时，会通过探测器产生反向电流。对光传感器施加反向偏置，以减小结电容。反向偏置电压 ( $V_R$ ) 增大了耗尽区宽度，从而减少了结电容；因此，增加  $V_R$  可以提高光电二极管的响应速度和线性度，但会带来较大的暗电流。

表 2-1 展示了 NIR G8195-12 光电二极管参数。

表 2-1. NIR (InGaAs) 光电二极管传感器规范

参数	符号	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
最大反向电压	$V_R$	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	V
频谱响应范围	$\lambda$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.9 至 1.7		$\mu\text{m}$
光电二极管共振性	$R(\lambda)$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$	0.75	0.9		A/W
结电容	$C_J$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_R = 5\text{V}$ $f = 1\text{MHz}$		1.0	1.5	pF
暗电流	$I_{\text{dark}}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_R = 5\text{V}$		0.02	0.4	nA

## 3 将 LOG200 与光传感器连接

### 3.1 光电二极管连接

**LOG200EVM** PCB 电路板布局包括一个光传感器封装 (D1)，用于在电流输入 I1 上安装用于对数分子计算的径向光电二极管、以及用于补偿和光传感器偏置电路的可选无源元件封装。有关 **LOG200EVM** 光传感器偏置连接的信息，请参阅 [图 3-1](#)。

LOG200 光电二极管 IBIAS 自适应偏置电流输出可通过可选的跳线电阻器 R2 访问。自适应电流输出偏置方案会产生一个电压，以与光电流成正比的电流对光电二极管进行偏置。补偿电容 C1 (C<sub>COMP</sub>) 有助于在快速瞬变期间提供动态电流，从而提高系统的稳定性。以下部分详细讨论了电流自适应偏置功能。

或者，光传感器阴极可以通过测试点 TP1、DBIAS 反向偏置。当不使用光电二极管自适应偏置功能时，请将 IBIAS 引脚悬空。通过 TP1 偏置光传感器时，请移除电阻器 R2。

### 3.2 光电二极管自适应偏置电流输出

LOG200 包括一个 IBIAS 电流源，用于对光电二极管进行偏置，并提供与光电流成比例的反向电压。在低光电二极管电流测量期间，自适应偏置电路会在光传感器上产生一个小的反向偏置电压，从而减少光电二极管的暗电流并提高测量的准确性。在测量高光电二极管电流时，光电二极管会产生更高的反向偏置电压，从而降低光电二极管的有效电容，增加电路带宽，并提供更快的瞬态响应。

[图 3-1](#) 展示了 LOG200EVM 上具有自适应偏置电路和光电二极管连接的方框图。内部晶体管 Q3 用于测量输入电流，而 IBIAS 电路产生的输出电流约为 I1 引脚输入电流的 1.14 倍 (典型值)。IBIAS 引脚连接到光电二极管阴极，R<sub>BIAS</sub> 电阻器与光电二极管阴极和 VCM 并联连接。



方程式 3 求解了最大可能  $R_{BIAS}$  电阻：

$$R_{BIAS\_MAX} = \frac{V_{R_{BIAS\_MAX}}}{I_{R_{BIAS\_MAX}}} \quad (3)$$

方程式 4 计算允许 10% 误差的最大  $R_{BIAS}$  电阻：

$$R_{BIAS} = 90\% \times R_{BIAS\_MAX} \quad (4)$$

表 3-1 展示了作为  $I_{PD\_MAX}$  函数的计算结果

表 3-1.  $R_{BIAS}$  电阻器计算

$I_{PD\_Max}$ (mA)	$I_{BIAS\_Ratio\_Max}$ @ 1mA (A/A)	$I_{BIAS\_Max}$ (mA)	$V_{BIAS\_Max}$ (V)	$R_{BIAS\_Max}$ (k $\Omega$ )	$R_{BIAS}$ (k $\Omega$ )
2.5	1.195	0.488	1.5	3.077	2.770

图 3-1 显示了当  $I_{PD} = 2.5\text{mA}$  时， $R_{BIAS}$  两端的典型  $V_{BIAS}$  电压。

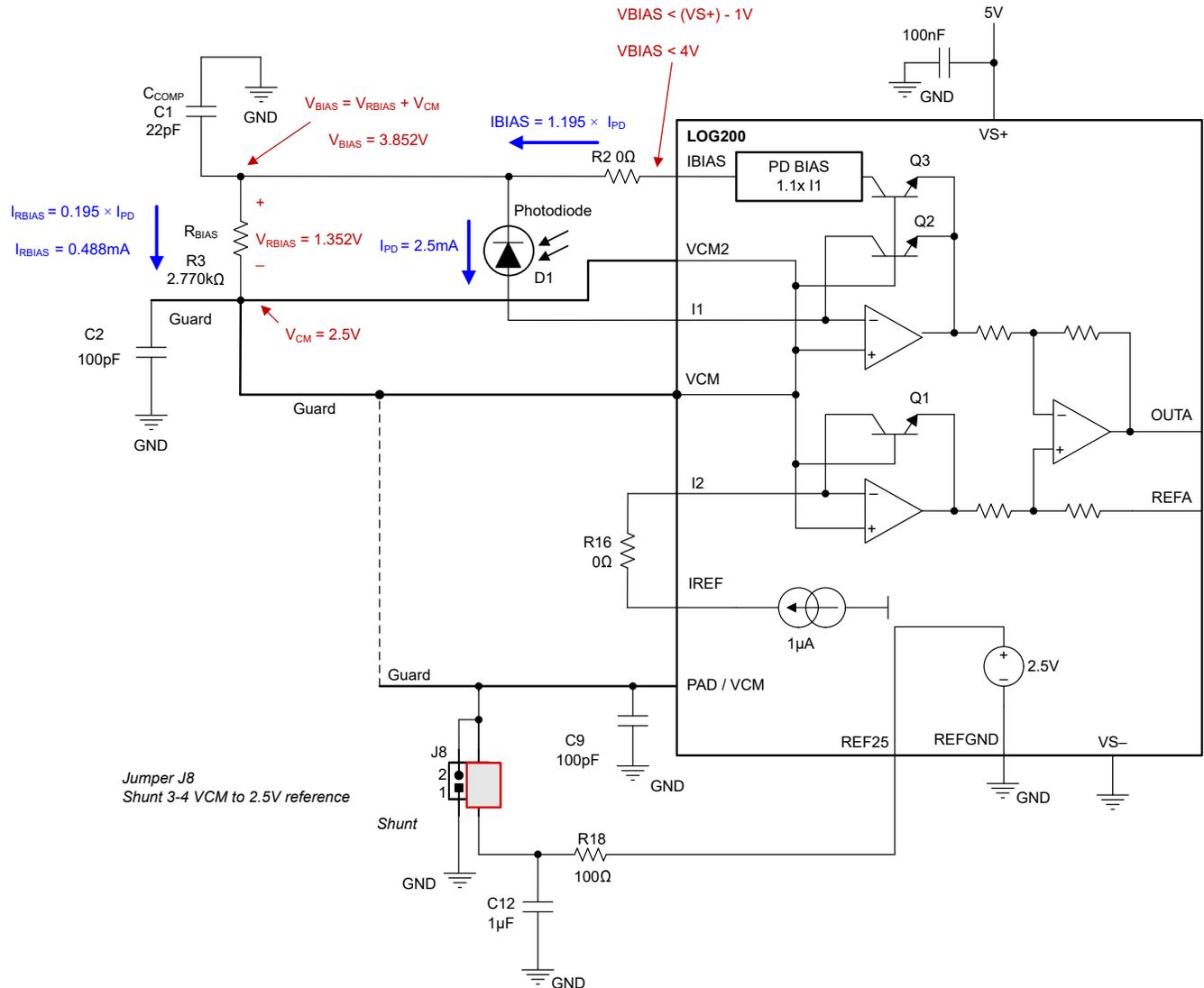


图 3-2.  $R_{BIAS}$  计算示例

## 4 用于电流检测测量的光学工作台

LOG200EVM 配置在工作台上，并安装了 G8195-12 光电二极管，如 图 3-1 中所示。

REF25 ( 2.5V 参考 ) 设置了 VCM 电位。IREF 电流 (1 $\mu$ A) 通过电阻器 R16 供应给 I2。使用 22pF 的 C<sub>COMP</sub> (C1) 补偿电容器将 RBIAS ( LOG200EVM 上的 R3 ) 设置为 1.65k $\Omega$ 。差分放大器参考输入 (REF) 连接到 REF165 ( 1.65V 参考 )。

图 4-1 展示了电流传感工作台装置。

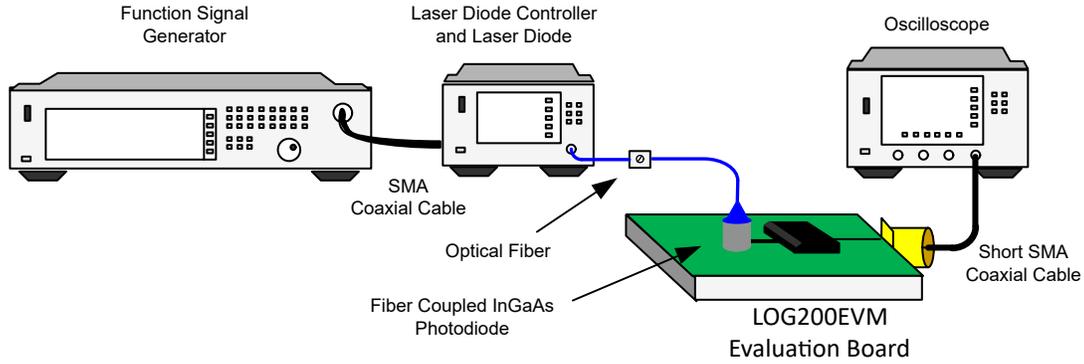


图 4-1. LOG200 光学电流传感测试

表 4-1 列出了在这些测量过程中使用的工作台设备。

表 4-1. LOG200 光学工作台设备

器件	制造商	器件型号	说明/备注
函数发生器	Agilent	Agilent 33500	30MHz 信号函数波形发生器用于激光调制
激光控制器	Thorlabs	CLD1010	设置为使用函数 Gen 驱动的电 流控制模式
激光二极管	Thorlabs	LPS-1310-FC	$\Delta T = 1.31 \mu\text{m}$ 阈值电流 5mA 至 20mA
可变光衰减器	Thorlabs	VOA50-FC-SM	1310/1550nm 50dB、FC/PC 连接器
评估板	德州仪器 (TI)	LOG200EVM	具有光电二极管的 LOG200 评估板
光电二极管	Hamamatsu	G8195-12	$\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 典型电容为 1pF 响应范围为 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ 到 $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$ 响应度 : 0.9A/W typ、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

LOG200EVM 跳线按 图 4-2 和 表 4-2 所示进行设置。

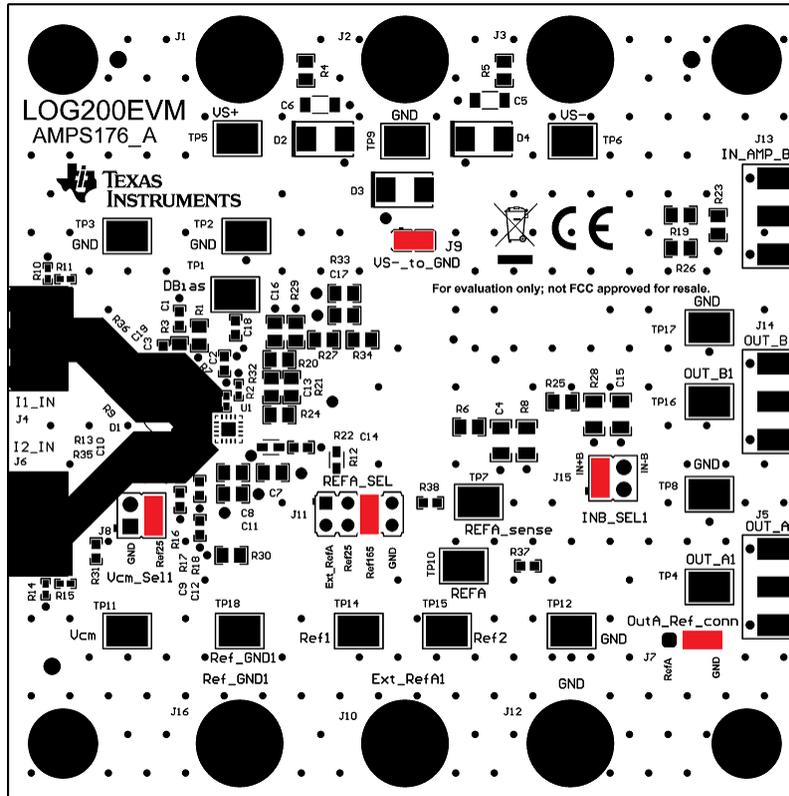


图 4-2. LOG200EVM 跳线设置

表 4-2. LOG200 跳线说明

跳线	功能	工作台位置	说明
J7	Out_ASMA J5 参考	分流器 2-3	分流器 2-3 : SMA 连接器 J3 以 GND 为基准 分流器 1-2 : SMA 连接器 J3 以 REFA 为基准
J8	VCM 选择	分流器 3-4	分流器 1-2 : VCM 输入连接到 GND 分流器 3-4 : 将 VCM 输入连接至 2.5V 基准
J9	VS - 连接	分流器 1-2	开路 : 双极电源配置 分流器 1-2 : 将 VS - 连接到 GND 以实现单极电源配置
J11	REF A 选择	分流器 5-6	分流器 1-2 : 通过 J10 将对数电压 REFA 设置为外部电压 分流器 3-4 : 将 REFA 设置为 REF25 分流器 5-6 : 将 REFA 设置为 REF165 分流器 7-8 : 将 REFA 设置为 GND
J15	次级运算放大器输入	分流器 1-2	分流器 1-2 : 将辅助 AMP+IN 连接到 OUTA 分流器 3-4 : 将辅助 AMP -IN 连接到 OUTA

#### 4.1 光传感器的瞬态响应

LOG200 通过采用一种新的放大器拓扑，实现了快速的瞬态响应。对数放大器级根据输入电流动态地调整放大器的开环增益。这种电路拓扑允许在多个电流范围内实现稳定的瞬态响应，而无需非常高带宽的放大器。LOG200 在低到高和高到低电流测量的瞬态响应速度上，明显快于上一代对数放大器。

以下图示展示了 LOG200 输出的示波器采集图，显示器件如何响应输入电流的十倍移位。光学激光驱动器产生一个尖锐的方波，以测量 100 $\mu$ A 到 1mA 之间以及 10nA 到 100nA 之间的上升和下降阶跃。将 30MHz 16 位电压分辨率函数发生器驱动激光驱动器进行激光调制。

图 4-3 和 图 4-4 展示了 20nA 到 200nA 电流级的示波器采集。LOG200 测量到的上升时间为 154ns，下降时间约为 472ns。

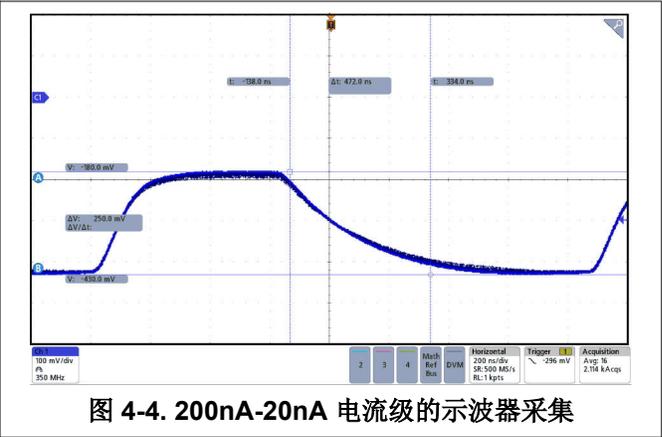
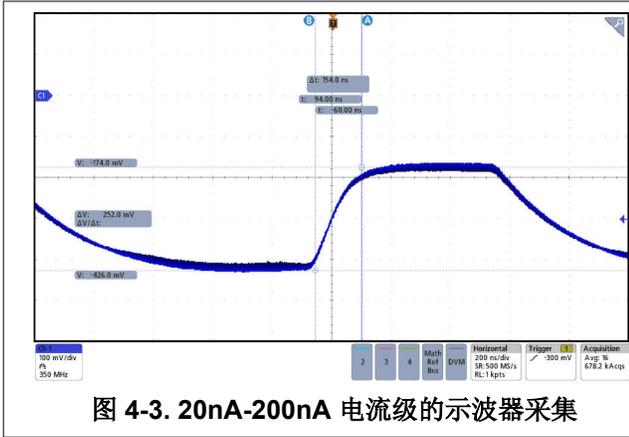
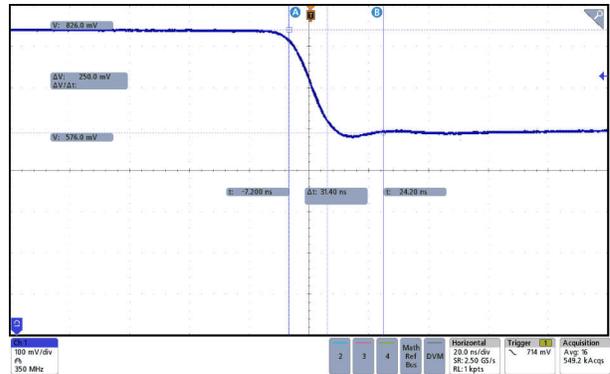
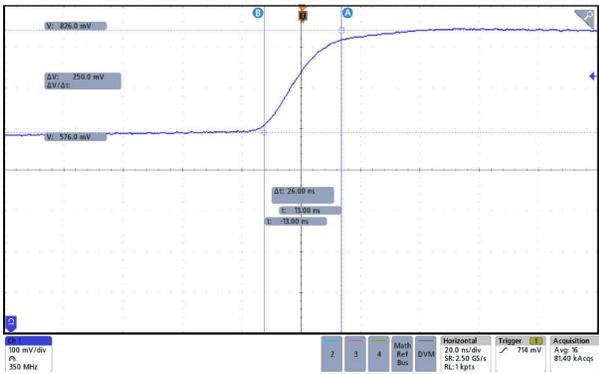


图 4-5 和 图 4-6 展示了 200 $\mu$ A 至 2mA 电流级的示波器采集。LOG200 测量到的上升时间为 26ns，下降时间约为 31ns。



## 5 使用 LOG200 进行光功率测量

光电二极管探测器是一种 p-n 结半导体，能够在入射光子能量超过材料带隙时产生电流。光电二极管 (R) 的灵敏度或响应度可以定义为在给定波长 ( $\lambda$ ) 下产生的光电流 ( $I_{PD}$ ) 与入射光功率 ( $P_{PD}$ ) 的比值。方程式 5 展示了光电二极管响应度的关系：

$$R(\lambda) = \frac{I_{PD}}{P_{PD}} \quad (5)$$

因此，光功率可以表示为光二极管产生的光电流与光传感器响应度的比值，如方程式 6 中所示。

$$P_{PD} = \frac{I_{PD}}{R(\lambda)} \quad (6)$$

在默认配置中，当光电二极管连接到输入 I1，且 LOG200 参考电流输出引脚 ( $I_{REF}$ ) 连接到输入 I2，电压输出由方程式 7 中所示的传递函数定义：

$$V_{LOG} = 0.250 \times \log_{10}\left(\frac{I_{PD}}{I_{REF}}\right) + V_{REF} \quad (7)$$

在此 LOG200 电路上，1 $\mu$ A 的  $I_{REF}$  对应于响应度为 0.8A/W 的光电二极管的等效有效基准功率  $P_{REF}$  为 1.25 $\mu$ W。因此，LOG200 输出传递功能可以表示为方程式 8：

$$V_{LOG} = 0.250 \times \log_{10}\left(\frac{P_{PD}}{P_{REF}}\right) + V_{REF} \quad (8)$$

$V_{LOG}$  电压输出可用于计算光功率，其中用于计算的斜率为每十倍光功率或光电二极管电流变化对应 250mV。

## 6 误差源与未校准误差分析

本节显示了 LOG200 电路的估计直流误差分析示例。这些计算使用典型的 LOG200 数据表规格来计算设备的未校准直流准确度。该误差估算仅包括 LOG200 器件独立运行时的误差。

该示例假设一个光传感器应用，需要的电流范围为 20nA 到 2.5mA，其中 LOG200 连接到一个 12 位伪差分输入 ADC，使用 3V 电源供电。图 6-1 展示了连接到 ADC 的 LOG200 电路。

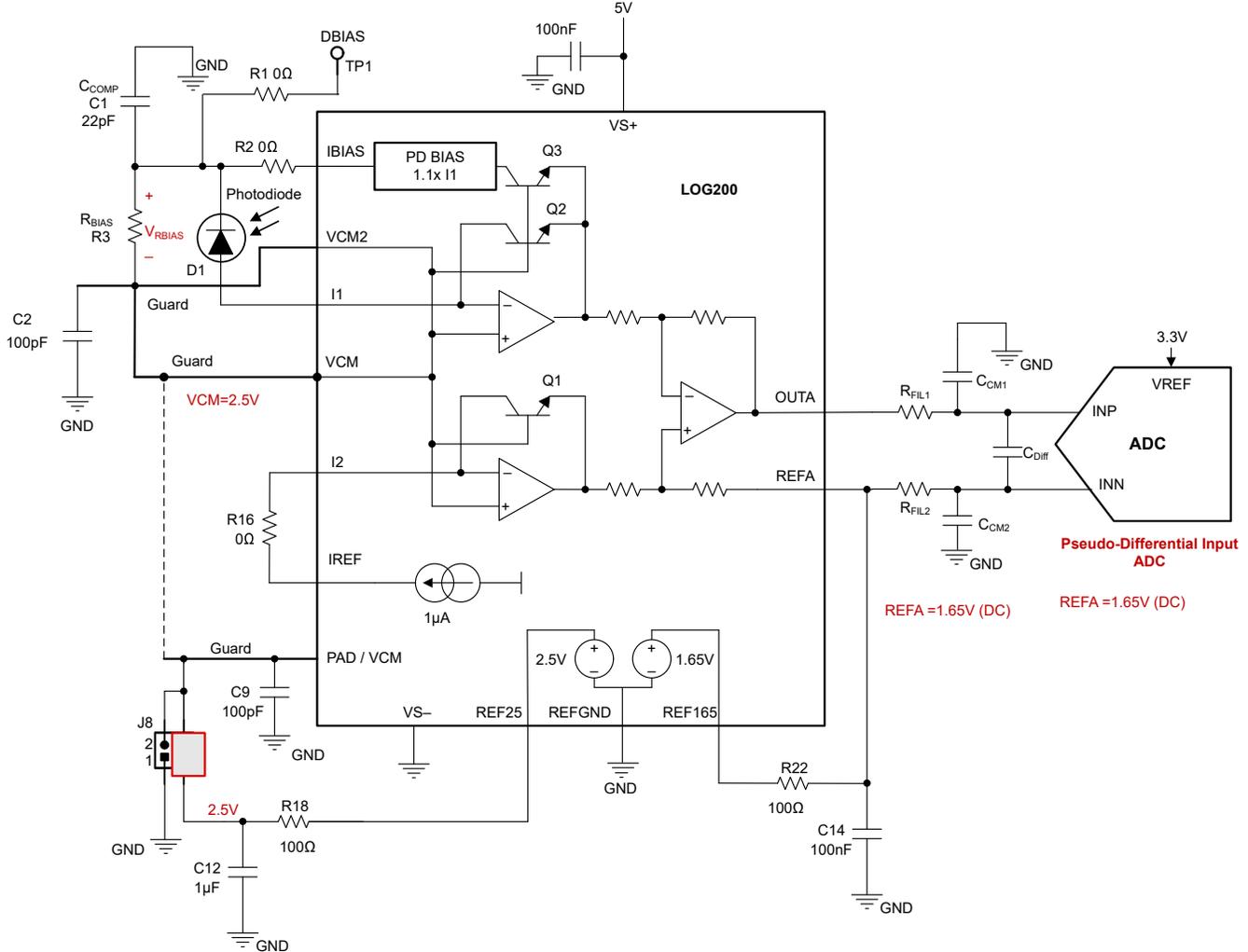


图 6-1. 连接到伪差分输入 ADC 的 LOG200 电路

表 6-1 展示了典型的 LOG200 误差计算规范：

表 6-1. LOG200 误差计算规范

参数	说明/注释	误差典型值	单位
$K_{Error}$	比例因子错误 100pA 至 1mA	$\pm 0.15$	%
$LCE_{Error}$	对数一致性误差 10nA 至 1mA	$\pm 0.050$	%
$I_{REF\_Error}$	参考电流误差 $\pm 0.3\%$ , $I_{REF} = 1\mu A$	$\pm 0.003$	$\mu A$
$V_{Oso}$	对数放大器的输出偏移误差	$\pm 1.300$	mV

方程式 9 显示了专为传递函数而设计的 LOG200：

$$V_{\text{LOG\_Ideal}} = K \times \log_{10}\left(\frac{I_{\text{PD}}}{I_{\text{REF}}}\right) + V_{\text{REF}} \quad (9)$$

方程式 10 使用专为传递函数设计的 LOG200 计算对数放大器输出，同时加入典型的数据表误差参数：

$$V_{\text{LOGOUT\_Actual}} = (K + \Delta K) \times \log_{10}\left(\frac{I_{\text{PD}}}{(I_{\text{REF}} - \Delta I_{\text{REF}})}\right) + (V_{\text{REF}} \pm \Delta V_{\text{REF}}) \pm \text{LCE}_{\text{Er}} \pm V_{\text{OSO}} \quad (10)$$

在典型的光电二极管测量应用中，当光传感器连接到 I1 时， $V_{\text{OS}}$  不会对对数放大器的传递函数产生显著误差。当光电二极管以适当的反向电压偏置时，传感器产生的输入电流几乎不受小的输入偏置电压  $V_{\text{OS}}$  的影响。因此，在此光电二极管测量中， $V_{\text{LOG\_Actual}}$  仅依赖于对数放大器的输出偏置误差 ( $V_{\text{OSO}}$ )。

在此示例中，REF165 1.65V 参考电压连接到伪差分输入 ADC 的负输入端，其中 ADC 只转换 ADC 正负输入端 (AINP-AINN) 之间的差值。因此，电压参考的精度不会对整体 ADC 转换产生误差，方程式 11 提供了在此示例中给定光电二极管电流下的总未校准输出误差估算：

$$V_{\text{LOGOUT\_Actual}} = (K + \Delta K) \times \log_{10}\left(\frac{I_{\text{PD}}}{(I_{\text{REF}} - \Delta I_{\text{REF}})}\right) + V_{\text{REF}} \pm \text{LCE}_{\text{Er}} \pm V_{\text{OSO}} \quad (11)$$

表 6-2 总结了 LOG200 应用中的主要误差源。计算假设一个光传感器应用，要求电流范围从  $I_{\min} = 20\text{nA}$  到  $I_{\max} = 2\text{mA}$ 。

表 6-2. 根据典型规格估算的  $V_{\text{LOG}}$  未校准误差计算

参数	公式	结果
<b><math>I_{\min} = 20\text{nA}</math>、<math>25^\circ\text{C}</math> 时的未校准直流精度</b>		
$I_{\min}$ 、 $V_{\text{LOG\_}I_{\min}}$ 时的 标称对数放大器输出	$V_{\text{LOG\_}I_{\min}} = K \times \log_{10}\left(\frac{I_{\min}}{I_{\text{REF}}}\right) + V_{\text{REF}}$	1.2253V
$I_{\min}$ 、 $\text{LCE}_{\text{Error\_}I_{\min}}$ 时的 对数一致性误差	$\Delta\text{LCE}_{\text{Er\_}I_{\min}} = \text{LCE}_{\text{Error}} \times (V_{\text{LOG\_}I_{\min}} - V_{\text{REF}})$	-0.212mV
$I_{\min}$ 、 $V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\min}}$ 时的 实际对数放大器输出	$V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\min}} = (K + \Delta K) \times \log_{10}\left(\frac{I_{\text{PD}}}{(I_{\text{REF}} - \Delta I_{\text{REF}})}\right) + V_{\text{REF}} - \Delta\text{LCE}_{\text{Er\_}I_{\min}} - V_{\text{OSO}}$	1.223V
$I_{\min}$ 、 $V_{\text{LOG\_Error\_}I_{\min}}$ 时的 对数放大器误差	$V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\min}} = V_{\text{LOG\_}I_{\min}} - V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\min}}$	-2.598mV
<b><math>25^\circ\text{C}</math> 条件下 <math>I_{\max} = 2.5\text{mA}</math> 时的未校准直流精度</b>		
$I_{\max}$ 时的 标称电压对数放大器输出 $V_{\text{LOG\_}I_{\max}}$	$V_{\text{LOG\_}I_{\max}} = K \times \log_{10}\left(\frac{I_{\max}}{I_{\text{REF}}}\right) + V_{\text{REF}}$	2.4995V
$I_{\max}$ 时的 对数一致性误差 $\text{LCE}_{\text{Error\_}I_{\max}}$	$\Delta\text{LCE}_{\text{Er\_}I_{\max}} = \text{LCE}_{\text{Error}} \times (V_{\text{LOG\_}I_{\max}} - V_{\text{REF}})$	0.425mV
$I_{\max}$ 时的 实际对数放大器输出 $V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\max}}$	$V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\max}} = (K + \Delta K) \times \log_{10}\left(\frac{I_{\max}}{(I_{\text{REF}} - \Delta I_{\text{REF}})}\right) + V_{\text{REF}} + \Delta\text{LCE}_{\text{Er\_}I_{\max}} + V_{\text{OSO}}$	2.504V
$I_{\max}$ 时的 对数放大器误差 $V_{\text{LOG\_Error\_}I_{\max}}$	$V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\max}} = V_{\text{LOG\_}I_{\max}} - V_{\text{LOG\_Actual\_}I_{\max}}$	4.526mV
总未校准误差占满量程的百分比		
$I_{\min}$ 、 $V_{\text{LOG\_Error\_}I_{\min\_FS}}$ 时的 满量程误差百分比	$V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\min\_FS}} = \frac{V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\min}}}{V_{\text{LOG\_}I_{\max}} - V_{\text{LOG\_}I_{\min}}} \times 100\%$	-0.204%
$I_{\max}$ 、 $V_{\text{LOG\_Error\_}I_{\max\_FS}}$ 时的 满量程误差百分比	$V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\max\_FS}} = \frac{V_{\text{LOG\_Er\_}I_{\max}}}{V_{\text{LOG\_}I_{\max}} - V_{\text{LOG\_}I_{\min}}} \times 100\%$	0.355%

将典型的误差规格添加到 LOG200 传递函数中，以计算总的复合误差。由于绝对值相加计算总误差，使用这些典型值进行的计算可能会得出保守的误差分析，因为不相关误差的叠加通常会导致预测的总复合误差大于实际系统中观察到的总误差。在许多应用中，电路设计人员可以通过进行两点线性校准来减少由偏移和比例因子引起的误差，从而降低直流误差。



## 7.2 Sallen-Key 低通滤波器

辅助放大器的典型应用案例是实现有源低通滤波器，并将低噪声信号传递给 ADC，避免高频别名信号。图 7-2 展示了一个 LOG200 与辅助放大器连接的二阶低通 Sallen-Key 滤波器示例。LOG200EVM 提供了可以在硬件中实现此滤波器的封装元件。此示例展示了一个二阶 Sallen-Key 滤波器配置，用于提供巴特沃斯滤波器响应，具有 40dB/十倍频程的衰减，并且 -3dB 频率为 50kHz。

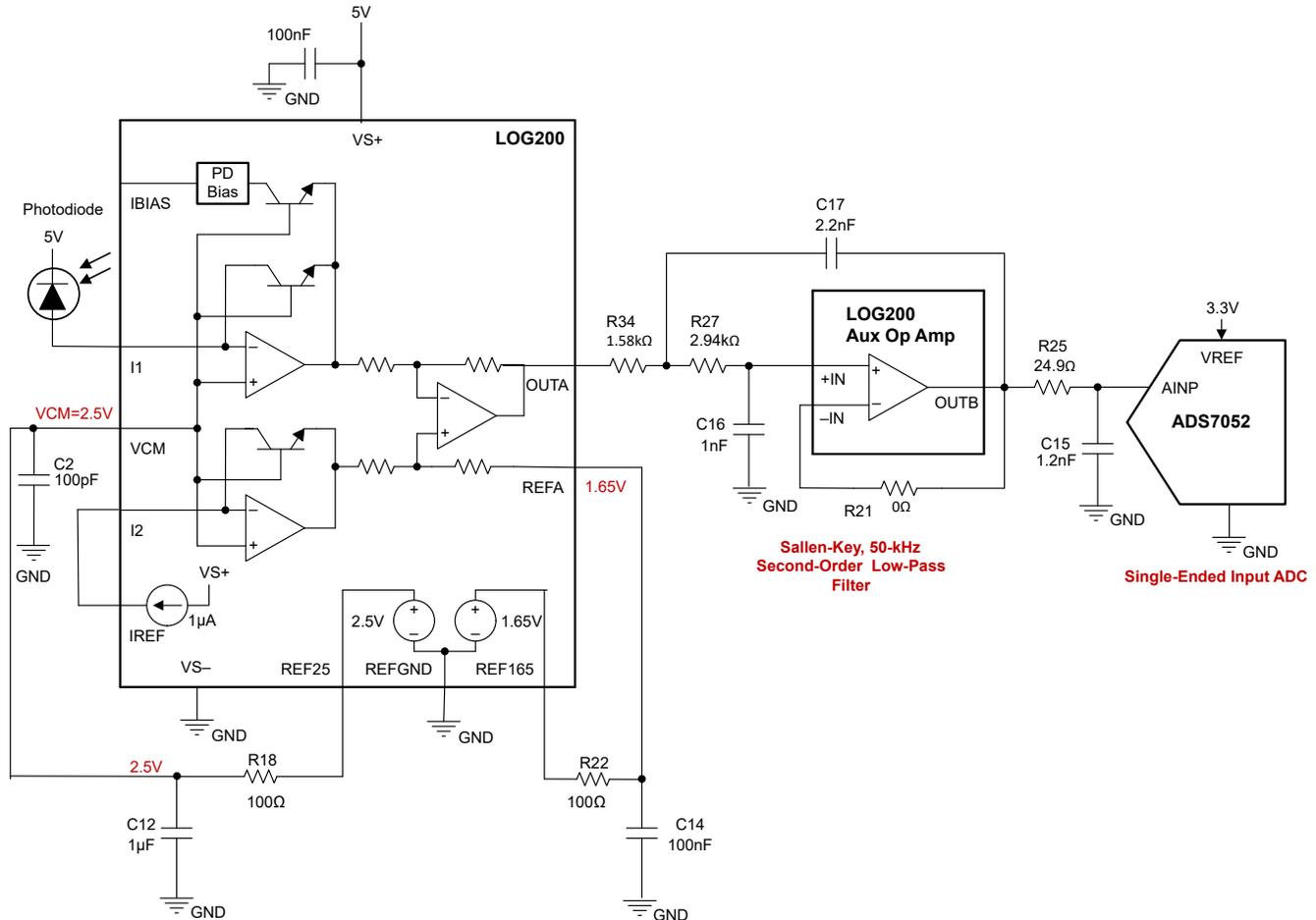


图 7-2. 具有 Sallen-Key 低通滤波器的 LOG200

设计说明：

该设计通过使用 TI 的 [滤波器设计工具](#) 来实现。设计滤波器的步骤如下：

1. 使用 TI 的 [滤波器设计工具](#) 选择增益为 0dB 的低通二阶滤波器、50kHz 通带频率和巴特沃斯滤波器响应。
2. 使用 TI 的模拟滤波器工具，选择 Sallen-Key 拓扑来设计滤波器并创建设计。
3. 小心地调整电阻值，确保它们不会显著增加 LOG200 产生的输出噪声。选择 E94 (5%) 或精度更高的电容器以及 E198 (0.1%) 电阻器以实现精确的滤波器频率响应。在滤波器和信号路径上选择高等级 C0G (NP0) 电容器，以更大限度地减少失真。
4. 将输出电阻设置为 24.9Ω，并使用 1.2nF 电容器。该示例中显示的值可为 LOG200、ADS7052 14 位 1MSPS 单端输入和 SAR 数据转换器提供良好的趋稳性能。如果电路进行了修改，设计人员需要根据所选的 ADC 和应用需求选择不同的 R-C 充电滤波器。请参阅 [SAR ADC 前端元件选择简介](#) 培训视频，了解更多信息。

图 7-2 展示了滤波器的增益和相位频率响应图。Sallen-Key 滤波器具有巴特沃斯响应，具有最大平坦通带增益，并且在 50kHz 时具有二阶衰减。该滤波器有效衰减了任何不必要的高频信号，并防止噪声重新混入光传感器信号的频率范围。

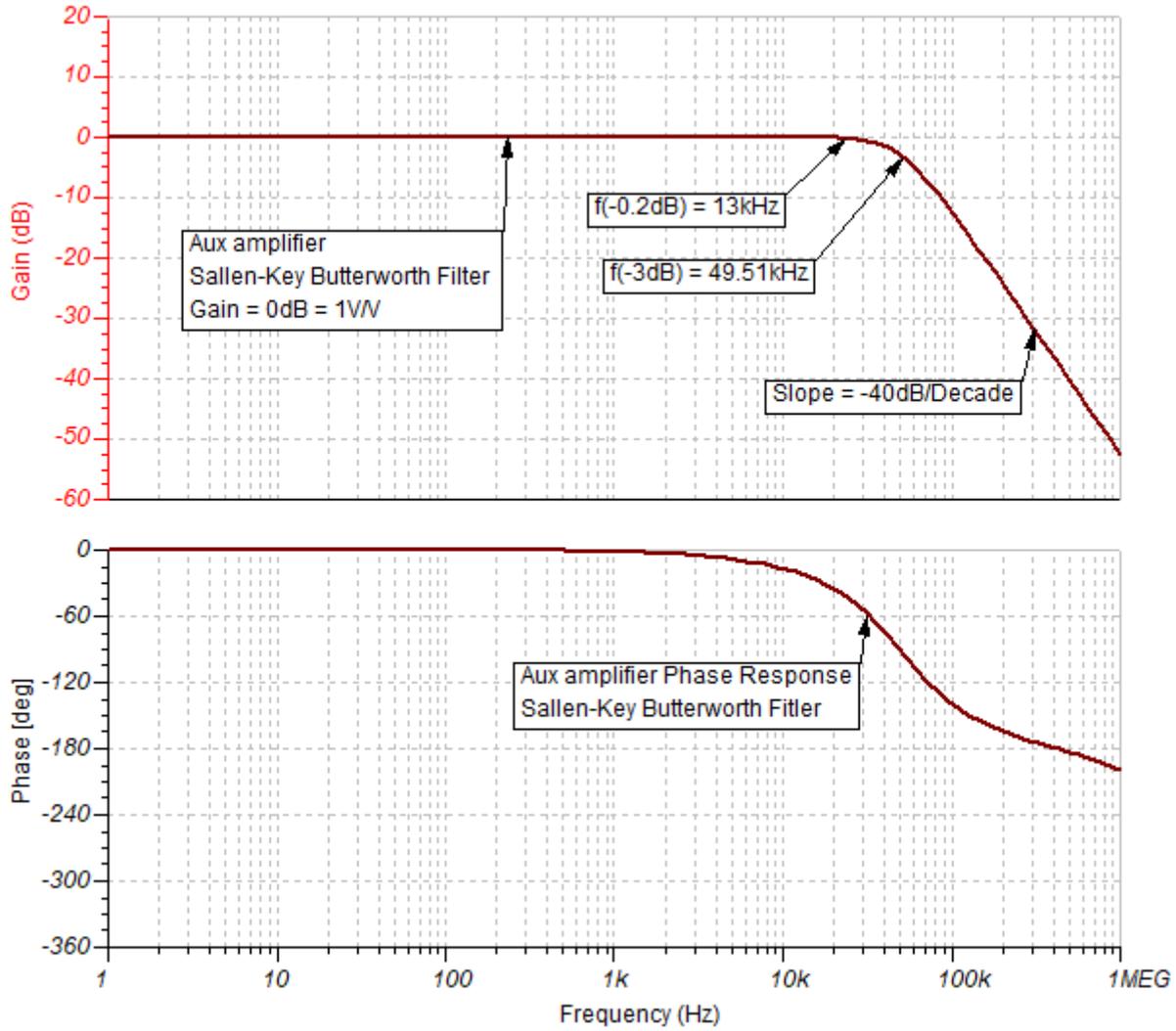


图 7-3. Aux 放大器 Sallen-Key 滤波器频率响应仿真

## 8 总结

以上讨论提供了有关如何连接 LOG200 以促进光学电流传感测量应用中的对数放大器设计的信息和示例。

## 9 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [LOG200 具有集成光电二极管偏置和暗电流校正的精密高速对数放大器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [LOG200 评估模块用户指南](#)
3. 德州仪器 (TI), [SAR ADC 前端元件选择简介](#) 培训视频。
4. 德州仪器 (TI), [滤波器设计工具](#)。

## 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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司