

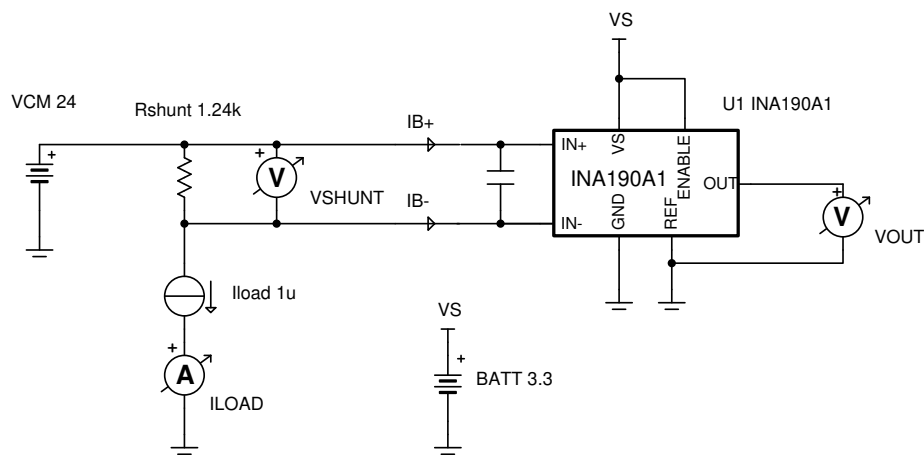
Analog Engineer's Circuit

電流センシング アンプ搭載、高電圧と高温に対応する、ハイサイド
低電流 (マイクロアンペア) センシング回路

入力			出力		電源			温度	
$I_{load\ Min}$	$I_{load\ Max}$	V_{CM}	$V_{OUT\ Min}$	$V_{OUT\ Max}$	$I_{Q\ Max}$	V_{VS}	V_{ee}	低	高
1 μ A	104 μ A	-0.1 V \leq V_{CM} \leq 40 V	1 μ A 時に 31.0 mV	104 μ A 時に 3.224 V	65 μ A	3.3V	GND (0V)	0°C	85°C

設計の説明

この回路は、電流センス アンプを使用して、マイクロアンペア単位の微小電流を最大限のダイナミックレンジで正確かつ確実に測定する方法を示しています。多くの電流センス アンプには、以下の誤差分析が適用できます。この設計では、高精度で入力バイアス電流が小さいセンス アンプを使用し、大きなシャント抵抗の入力バイアス電流による動的誤差を分析しています。



デザインノート

- 「[Getting Started with Current Sense Amplifiers](#)」ビデオ シリーズ (英語) では、電流センス アンプを使用するための実装、誤差要因、高度なトピックについて紹介しています。
- 大電流でのゲイン誤差を抑制するため、精度 0.1% のシャント抵抗を選択します。
- INA190 などの入力バイアス電流が小さい (入力インピーダンスが高い) アンプを選択します。
- V_{CM} が、次の INA190 の動作 V_{CM} 範囲内であることを確認します: -0.1V ~ 40V。
- DC オフセットが 1 点較正により除去される、またはデバイスが『[INA190 ピコアンペア バイアス電流およびインテグレーション付きの低電源電圧、高精度、ローサイドおよびハイサイド電流シャント モニタ](#)』データシートに規定されているのと同じ条件 ($V_{VS} = 1.8V$, $V_{CM} = 12V$, $V_{REF} = 0.9V$, $T_A = 25^\circ C$) で動作する場合、誤差は大幅に減少します。ゲイン誤差を除去するには、2 点較正を行えます。
- シャント抵抗が大きい場合、または大きな DC 電流を扱う場合、INA190 の入力に 1nF 以上の入力差動コンデンサを追加することを推奨します。
- データシートに従い、レイアウトのベスト プラクティスを守ります。デカップリング コンデンサは VS ピンの近くに配置し、IN+ と IN- の入力配線は差動ペアとしてルーティングする、などです。

設計手順

1. 所定の設計要件で、 $1\mu\text{A}$ の負荷電流で最大総合誤差 **3.51%** をシャント抵抗が達成することを確認します。すべてのオフセットおよびゲイン誤差は負であると仮定します。入力バイアス電流 (I_{IB}) による誤差は、 V_{SHUNT} と入力差動インピーダンス (R_{DIFF}) の関数であることに注意します。ここで、 $R_{\text{DIFF}} = I_{\text{IB}+} / V_{\text{DIFF}}$ です。 I_{IB} は約 $+500\text{pA}$ から始まり、 V_{SHUNT} の増大につれて減少するため、これによって負の入力オフセット誤差が生じます。データシートの「IB+ および IB- と差動入力電圧との関係」のプロットを参照してください。

$$T_{\text{MIN}} = 0^{\circ}\text{C}; T_{\text{MAX}} = 85^{\circ}\text{C}$$

$$I_{\text{LOAD_MINIMUM}} = 1\mu\text{A}$$

$$R_{\text{SHUNT}} = 1240\Omega, 0.1\%$$

$$V_{\text{VS}} = 3.3\text{V}; V_{\text{CM}} = 24\text{V}; V_{\text{REF}} = \text{GND} = 0\text{V}$$

$$V_{\text{OSI_MAX}} = -15\mu\text{V}$$

$$V_{\text{OS_CMRR_MAX}} = |12\text{V} - V_{\text{CM}}| \cdot 10^{-\text{CMRR}_{\text{MIN}}/20\text{dB}} = 12\text{V} \cdot 10^{-132\text{dB}/20\text{dB}} = -3.01\mu\text{V}$$

$$V_{\text{OS_PSRR_MAX}} = |1.8\text{V} - V_{\text{VS}}| \cdot \text{PSRR}_{\text{MAX}} = 3.2\text{V} \cdot 5\mu\text{V}/\text{V} = -7.5\mu\text{V}$$

$$V_{\text{OS_RVRR_MAX}} = |0.9\text{V} - V_{\text{REF}}| \cdot \text{RVRR}_{\text{MAX}} = 0.9\text{V} \cdot 10\mu\text{V}/\text{V} = -9\mu\text{V}$$

$$V_{\text{OS_Drift_MAX}} = |25^{\circ}\text{C} - T_{\text{MAX}}| \cdot \left(\frac{dV_{\text{OS}}}{dT}\right)_{\text{MAX}} = 60^{\circ}\text{C} \cdot 80\text{nV}/^{\circ}\text{C} = -4.8\mu\text{V}$$

$$V_{\text{OS_IB_MAX}} = \text{func}\{V_{\text{SHUNT}}\} = R_{\text{SHUNT}} \cdot \left[\frac{-V_{\text{SHUNT}}}{R_{\text{DIFF}}} + I_{\text{IB_Typ}}\right] = 1240\Omega \cdot \left[\frac{-1.24\text{mV}}{2.3\text{M}\Omega} + 0.5\text{nA}\right] = -48.5\text{nV}$$

$$V_{\text{OS_MAX}} = V_{\text{OSI_MAX}} + V_{\text{OS_CMRR}} + V_{\text{OS_PSRR}} + V_{\text{OS_RVRR}} + V_{\text{OS_Drift_Max}} + V_{\text{OS_IB_MAX}}$$

$$V_{\text{OS_MAX}} = -39.4\mu\text{V}$$

$$R_{\text{shunt_tolerance}} = -0.1\% = 0.001$$

$$GE_{25\text{C_MAX}} = -0.3\% = -0.003$$

$$GE_{\text{Drift_MAX}} = -7\text{ppm}/^{\circ}\text{C} \cdot (85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \cdot 10^{-6} = -0.00042$$

$$\text{Gain}_{\text{MAX}} = 25 \cdot (1 + GE_{25\text{C_MAX}} + GE_{\text{Drift_MAX}}) = 25 \cdot (0.99758) = 24.940\text{V}/\text{V}$$

$$V_{\text{OUT_MIN_}1\mu\text{A}} = [V_{\text{OS_MAX}} + I_{\text{LOAD}} \cdot R_{\text{SHUNT}} \cdot (1 + R_{\text{shunt_tolerance}})] \cdot \text{Gain}_{\text{MAX}} = 29.9\text{mV}$$

$$V_{\text{OUT_IDEAL_}1\mu\text{A}} = [I_{\text{LOAD_MINIMUM}} \cdot R_{\text{SHUNT}}] \cdot \text{Gain} = 31.0\text{mV}$$

$$\text{Error} = 100 \cdot (V_{\text{OUT_MIN}} - V_{\text{OUT_IDEAL}}) / V_{\text{OUT_IDEAL}}$$

$$\text{Error}_{1\mu\text{A}} = -3.51\%$$

$$\text{Error}_{6\mu\text{A}} = -0.91\%$$

2. 検出される電流の範囲が、デバイスの出力ダイナミックレンジに収まることを確認します。これは、次の 2 つの仕様によって異なります。対 V_{VS} (V_{SP}) 振幅およびゼロ電流出力電圧 (V_{ZL})。 V_{ZL} は $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ で、 $V_{\text{VS}} = 1.8\text{V}$ 、 $V_{\text{REF}} = 0\text{V}$ 、 $V_{\text{SENSE}} = 0\text{mV}$ 、 $V_{\text{CM}} = 12\text{V}$ 、 $R_{\text{L}} = 10\text{k}\Omega$ について規定されています。データシートの条件はこの設計の条件とは一致しないため、最大 V_{ZL} の値を外挿して求めます。
 - a. V_{ZL} のテスト条件に対する正のオフセットの可能な最大値を計算します。これを、 $V_{\text{OS_TestConditions}}$ と呼びます。
 - b. 可能な最大ゲインを乗算することで、この入力オフセットを出力オフセットに変換します。
 - c. データシートに記載されている $V_{\text{ZL_MAX}}$ と、前に決定した最大出力オフセットとの差を求め、ヘッドルーム電圧を決定します。
 - d. この設計で可能な最大出力オフセットにヘッドルーム電圧を加算し、この設計で $V_{\text{ZL_MAX}}$ を計算します。
 - e. $1\mu\text{A}$ での最小 V_{OUT} が、 $V_{\text{ZL_MAX}}$ より大きいことを確認します。 $1\mu\text{A}$ での $V_{\text{OUT_MIN}}$ は、 R_{SHUNT} および負の入力オフセットについて、 -1% 公差のワーストケース シナリオを想定していることに注意してください。

$$V_{OS_TestConditions} = V_{OSI_MAX} + |0.9V - 0V| \cdot R_{VRR_MAX} + |125^{\circ}C + 40^{\circ}C| \cdot \left(\frac{dV_{OS}}{dT}\right)_{MAX}$$

$$V_{OS_TestConditions} = +15\mu V + 9\mu V + 13.2\mu V = 37.2\mu V$$

$$Headroom = V_{ZL_MAX_DATASHEET} - V_{OS_TestConditions} \cdot Gain_{MAX}$$

$$Headroom = 3mV - 0.933mV = 2.07mV$$

$$V_{ZL_MAX} = Headroom + V_{OS_MAX} \cdot Gain_{MAX} = 2.07mV + (39.4\mu V \cdot 25.061 \frac{V}{V}) = 3.06mV$$

$$V_{OUT_MIN_1\mu A} = 29.9mV > V_{ZL_MAX}$$

f. 次に、 $104\mu A$ での最大 V_{OUT} が、 V_{SP_MIN} より小さいことを確認します。 $104\mu A$ での V_{OUT_MAX} は、 R_{SHUNT} および正の入力オフセットについて、+1% 公差のワーストケース シナリオを想定していることに注意してください。

$$V_{SP_MIN} = V_{VS} - 40mV = 3.26V$$

$$V_{OUT_MAX} = [R_{SHUNT} \cdot (1 + R_{shunt_tolerance}) \cdot I_{LOAD_MAX} + V_{OS_MAX}] \cdot Gain_{MAX}$$

$$V_{OUT_MAX} = [1240\Omega \cdot (1.001) \cdot 104\mu A - 29.6\mu V] \cdot 25.061 \frac{V}{V} = 3.234V$$

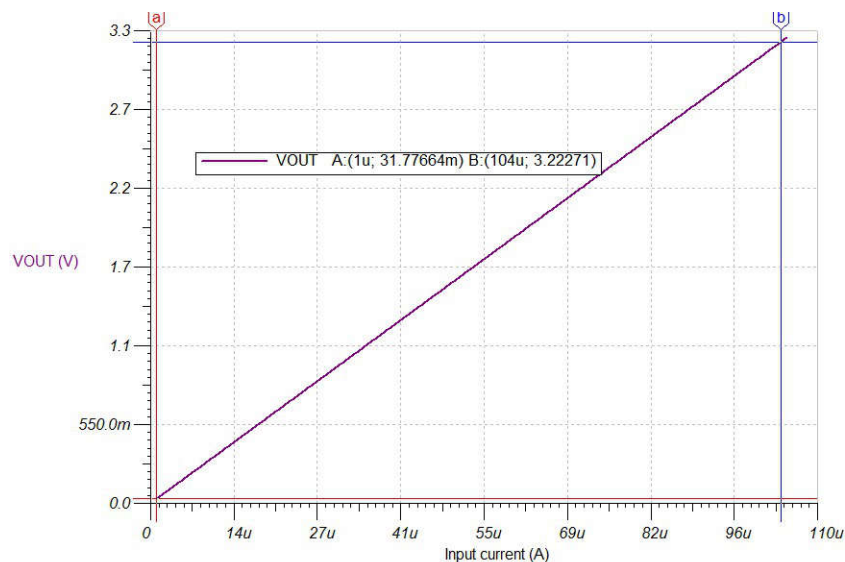
$$V_{OUT_MAX} < V_{SP_MIN}$$

3. 手順 1 の総合誤差の式に基づいて、「総合誤差と負荷電流との関係」曲線を作成します。データシートの標準値と最大値の仕様について、この作業を行います。

設計シミュレーション

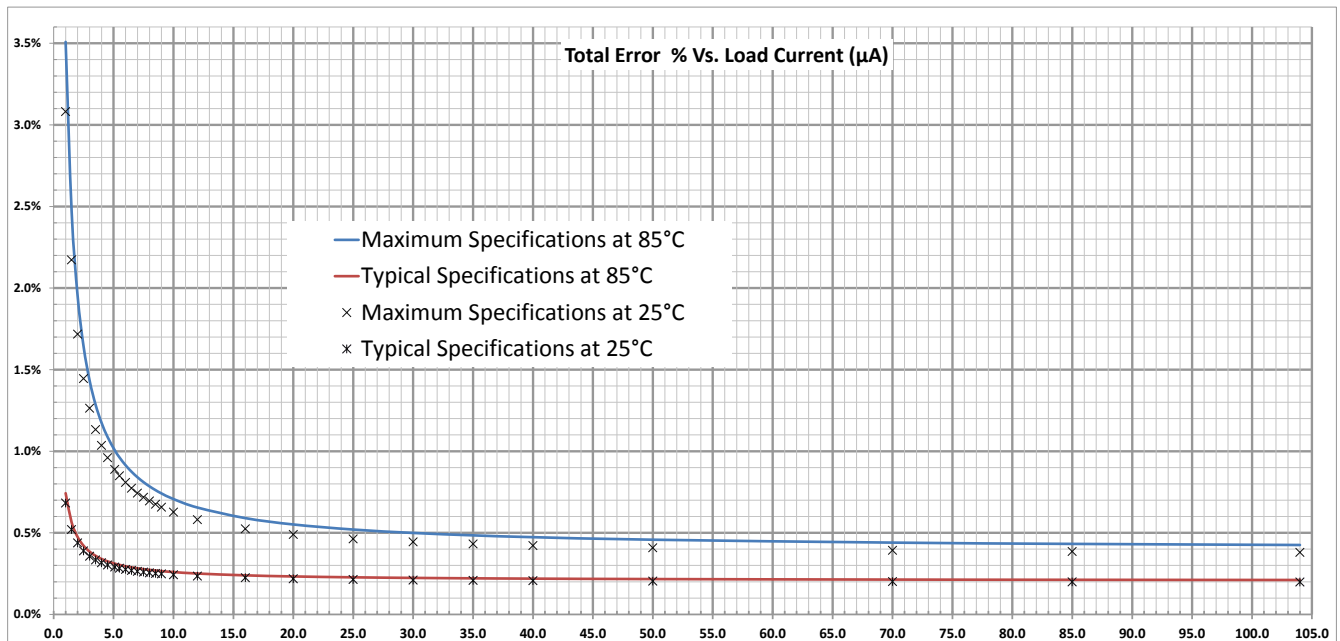
DC シミュレーション結果

次のグラフは、 $1\mu A$ から $104\mu A$ までの負荷電流について、線形出力応答を示しています。



総合誤差の計算

次のグラフは、想定する限界仕様と標準仕様の両方を使用して、動作温度範囲全体にわたる総合絶対誤差を示したものです。検出する電流の精度は、最小の電流ではオフセット電圧によって、より大きな電流ではゲイン誤差によって制限されることに注意してください。アクティブなオフセット チョッピングにより、温度に起因する誤差を抑制できます。



設計の参照資料

テキサス・インスツルメンツ、『[SBOMAI6 回路 SPICE](#)』、シミュレーション ファイル

テキサス・インスツルメンツ、『[Getting Started with Current Sense Amplifiers](#)』(英語)、プレジジョン ラボ ビデオ シリーズ

テキサス・インスツルメンツ、『[電流出力電流シャント モニタの同相電圧範囲の拡張](#)』、アプリケーション ブリーフ

テキサス・インスツルメンツ、『[電流センス アンプ](#)』、製品ページ

電流シャント モニタに使用されている設計

INA190A1	
V_{VS}	1.8V~5V (動作範囲)
V_{CM}	-0.3V~42V (絶対最大定格)
V_{OUT}	最大 (V_{VS}) + 0.3V
V_{OS}	$\pm 3\mu V \sim \pm 15\mu V$
I_Q	48 $\mu A \sim 65\mu A$
I_B	0.5nA~3nA
BW	25V/V で 45kHz (A1 ゲイン バリエーション)
チャンネル数	1
INA190	

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ（データシートを含みます）、設計リソース（リファレンス・デザインを含みます）、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated