



回路ノート CN-0382



テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は <http://www.analog.com/jp/CN0382> をご覧ください。

使用したリファレンス・デバイス	
AD7124-4	A/D コンバータ、低消費電力、24 ビット、 Σ - Δ 型、PGA / リファレンス内蔵
AD5421	D/A コンバータ、16 ビット、ループ給電、4 mA ~ 20 mA 出力
AD5700	低消費電力 HART モデム
ADuM1441	SPI アイソレータ
ADP162	リニアレギュレータ、150 mA、CMOS、超低静止時電流
ADG5433	アナログ・スイッチ、トリプル SPDT、高電圧、耐ラッチアップ機能付き

低消費電力の高精度 24 ビット・シグマ・デルタ A/D コンバータを使用した絶縁型 4 mA ~ 20 mA/HART 工業用温度および圧力トランスミッタ

評価および設計サポート

回路評価ボード

[DEMO-AD7124-DZ 評価ボード](#)

設計と統合ファイル

[回路図、レイアウト・ファイル、部品表](#)

回路の機能とその利点

図 1 に示す回路は工業用の絶縁型スマート・フィールド計測器で、温度センサー (Pt100、Pt1000、熱電対) やブリッジ圧力センサーなど、さまざまなタイプのアナログ・センサーに接続できます。この計測器は、4 mA ~ 20 mA のアナログ出力と HART® (Highway Addressable Remote Transducer) インターフェースを介して通信を行います。HART は、ピーク 10 ピーク 1 mA の周波数シフトキー (FSK) 信号を、標準的

な 4 mA ~ 20 mA のアナログ電流信号上で変調する双方向デジタル通信です。HART インターフェースを使用すれば、温度や圧力制御などのアプリケーションに必要なリモート・キヤリブレーション、フォルト調査、プロセス変数送信といった機能を実現することができます。

この回路は、超低消費電力の高精度 24 ビット Σ - Δ A/D コンバータ (ADC) [AD7124-4](#) を使用しています。この ADC には、温度および圧力システムに必要なすべての機能が含まれています。この回路には、[AD5421](#) (16 ビット 4 mA ~ 20 mA ループ給電 D/A コンバータ (DAC))、[AD5700](#) (業界最小の消費電力とフットプリントを誇る HART 対応 IC モデム)、[ADuM1441](#) (超低消費電力のシリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) アイソレータ)、[ADG5433](#) (CMOS スイッチ)、および [ADP162](#) (絶縁電源回路の低消費電力 3.3 V レギュレータ) も含まれています。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

Rev. 0

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイセズ株式会社

本社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー
電話 06 (6350) 6868

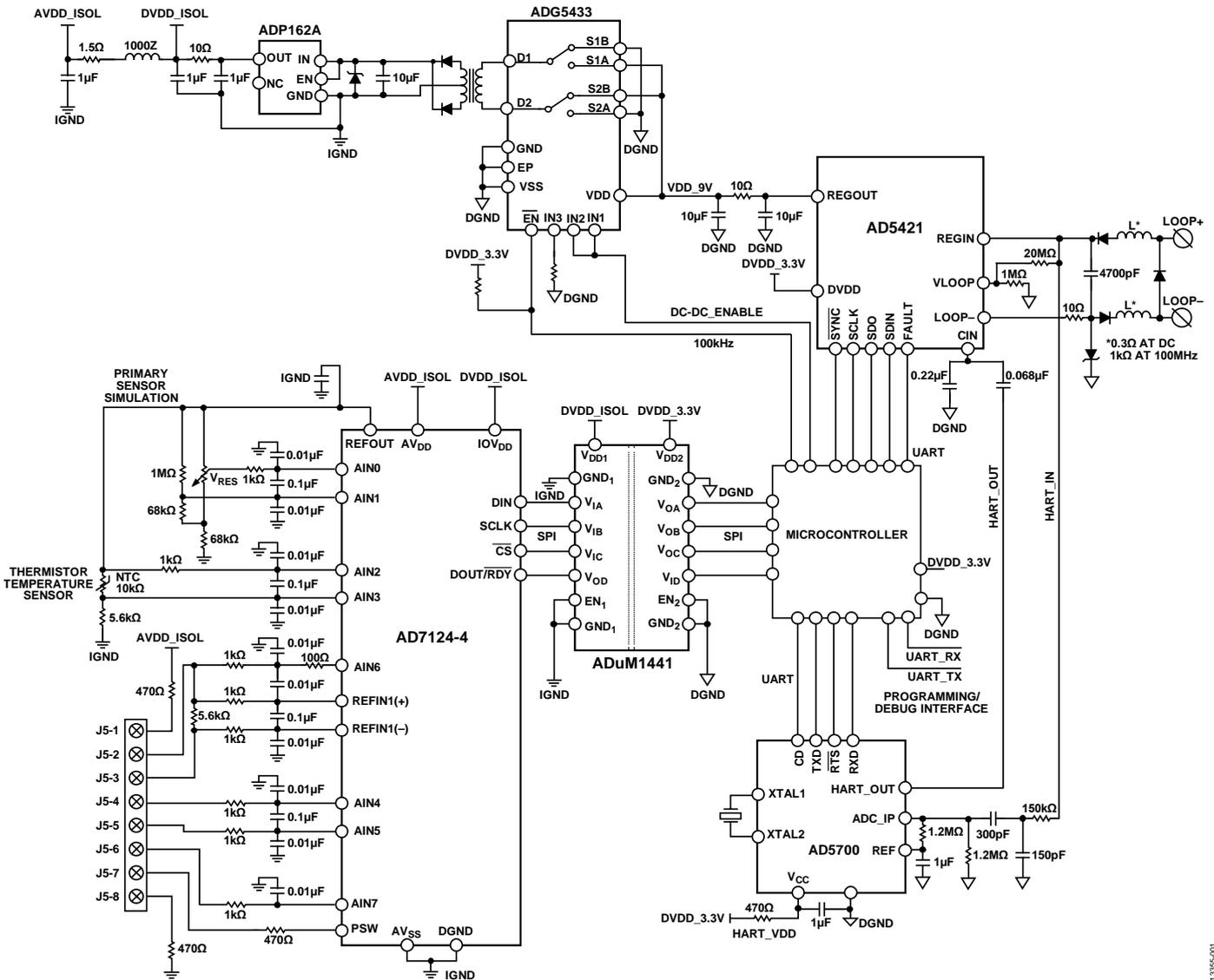


図 1. HART インターフェース使用の 4 mA ~ 20 mA ループ給電フィールド計測器
(簡略回路図：全接続の一部およびデカップリングは省略されています。)

回路説明

アナログ・フロントエンド・インターフェース

AD7124-4は、高精度計測アプリケーション向けに必要なすべての機能を内蔵した、低消費電力、低ノイズのアナログ・フロントエンドです。このデバイスには低ノイズの24ビットΣ-Δ A/Dコンバータ(ADC)が組み込まれており、4つの差動入力、もしくは7つのシングルエンド入力または疑似差動入力を持つように構成可能です。また、内蔵の低ノイズ・ゲイン段により、小振幅の信号でもADCに直接接続することができます。

AD7124-4の主な利点の1つは、3つの内蔵パワー・モードの1つを選択できるという柔軟性を備えていることです。消費電流、出力データレートの範囲、およびRMSノイズは、電力モードを選択することによって調整できます。また、複数のフィルタ・オプションを選択できるので、最大限の柔軟性が得られます。

AD7124-4は、25SPS(1サイクル・セトリング)の出力データレートでの動作時に50Hz除去と60Hz除去を同時に行うことができます。

AD7124-4は、最大限のシグナル・チェーン集積化を実現しています。このデバイスは、高精度、低ノイズ、低ドリフトのバンドギャップ・リファレンスを内蔵していますが、外部差動リファレンスを使用することもできます。外部差動リファレンスは内部でバッファ可能です。その他重要な内蔵機能としては、プログラマブル低ドリフト励起電流源、バーンアウト電流、およびチャンネルの同相電圧をAVDD2に設定するバイアス電圧ジェネレータがあります。ローサイド・パワー・スイッチは、変換と変換の間にブリッジ・センサーの電源を切ることを可能にして、システムの絶対最小消費電力を実現できます。また、動作に内部クロックを使用するか外部クロックを使用するかを選ぶことができます。

内蔵チャンネル・シーケンサはいくつかのチャンネルを同時にイネーブルすることができ、AD7124-4は各イネーブル・チャンネルをシーケンシャルに変換するので、デバイスとの通信を簡素化することができます。最大16個のチャンネルはいつでもイネーブルでき、各チャンネルはアナログ入力用、または電源チェックやリファレンス・チェックなどの診断用として定義されます。この独自の機能により、診断機能を変換機能とインターリーブさせることが可能です。AD7124-4は、チャンネルごとの構成設定もサポートしており、8種類の構成またはセットアップが可能です。それぞれの構成は、ゲイン、フィルタ・タイプ、出力データレート、バッファリング、およびリファレンス源から成ります。これらのセットアップは、チャンネルごとに割当て可能です。

AD7124-4には、その幅広い機能セットの一部として、さまざまな診断機能も組み込まれています。これらの診断機能には、ソリューションの信頼性を高める巡回冗長検査（CRC）、シグナル・チェーン・チェック、シリアル・インターフェース・チェックが含まれています。これらの診断機能は、診断機能実装用の外付け部品の必要性を減らし、必要なボードスペースや設計サイクル時間、コストの削減などを実現します。代表的アプリケーションの故障モード影響/診断解析（FMEDA）によれば、IEC 61508による安全側故障割合（SFF）は90%以上です。

センサー入力

この回路は、8ピン・コネクタを介して、3線および4線式RTD、熱電対、および圧力トランスデューサをサポートしています。AD7124-4には、これらのセンサーへの接続に必要なすべてのビルディング・ブロックが含まれています。このADCは、接続されたすべてのセンサー・タイプに対してもミドルパワー・モードで使用します。また、25SPSでの変換時に50 Hzおよび60 Hz除去を同時に行うことができるため、ポスト・フィルタが使われています。センサーを回路に接続する場合は、接続されたセンサーのタイプに合わせてADCの構成を設定します。さらに、オフセット誤差とフルスケール誤差を最小限に抑えるために、内部のフルスケール・キャリブレーションやオフセット・キャリブレーションを行うこともできます。キャリブレーションは、UARTコマンドまたはHARTコマンドによって開始します。

AD7124-4はさまざまな診断機能を搭載しており、信頼性の高い設計を行うことができます。この回路では、断線検出機能によってセンサーの接続を確認し、パワーオン・リセット発生時にユーザに通知できるようにステータス・レジスタのパワーオン・リセット（POR）をモニタすることができます。エラー・レジスタは変換ごとに読み込まれ、その内容がHART経由でセンサー出力とともに送られます。

RTD

測温抵抗体（RTD）は、 -200°C ~ $+600^{\circ}\text{C}$ の温度を測定できます。代表的なRTDはPt100とPt1000で、白金製です。この回路ではPt100を使用しています。

4線式RTD

4線式RTDと回路の接続方法を図2に示します。

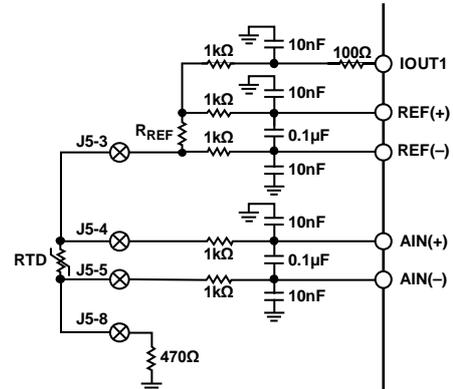


図 2. 4線式 RTD

AD7124-4のオンチップ励起電流の1つがPt100を励起します。Pt100の最大抵抗は $313.71\ \Omega$ です（ 600°C 時）。励起電流を $250\ \mu\text{A}$ に設定した場合、Pt100に生じる最大電圧は次式で表されます。

$$250\ \mu\text{A} \times 313.71\ \Omega = 78.43\ \text{mV}$$

プログラマブル・ゲイン・アレイ（PGA）をゲイン16に設定した場合、モジュレータ入力の電圧は次のようになります。

$$78.43\ \text{mV} \times 16 = 1.25\ \text{V}$$

$5.6\ \text{k}\Omega$ の精密抵抗（ 0.05% 、 $10\ \text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ）が、リファレンス電圧を生成します。リファレンス抵抗 R_{REF} は、その両端に生じる電圧がこの回路で最小 $1.25\ \text{V}$ となるように選択します。つまり、アナログ入力によってモジュレータ入力に生じる電圧が、リファレンス電圧以下となるようにします。Pt100に供給される $250\ \mu\text{A}$ の電流は $5.6\ \text{k}\Omega$ の抵抗にも流れるので、結果としてレシオメトリック構成となります。したがって、励起電流に変動が生じて、それが回路の性能に影響することはありません。精密抵抗に生じる電圧は次の通りです。

$$5.6\ \text{k}\Omega \times 250\ \mu\text{A} = 1.4\ \text{V}$$

アナログ入力とリファレンス入力にはアンチエイリアシング・フィルタが組み込まれています。これらのフィルタは、モジュレータ・サンプリング周波数の整数倍の周波数において、対象周波数帯に折り返される干渉を防ぎます。これらのフィルタと外付け抵抗がゲイン誤差を発生させないようにするために、リファレンス・バッファがイネーブルされます。PGA使用時にはアナログ入力バッファがイネーブルになるので、これらのバッファは自動的にイネーブルされます。リファレンス・バッファには、ある程度のヘッドルーム（電源レール内の $100\ \text{mV}$ ）が必要です。したがって、このヘッドルームを確保できるよう、下側に $470\ \Omega$ の抵抗が組み込まれています。

励起電流が $250\ \mu\text{A}$ の場合に必要なヘッドルームは $370\ \text{mV}$ です。このピンに生じる電圧は $(470 + 5600 + 313.71)\ \Omega \times 250\ \mu\text{A} = 1.6\ \text{V}$ で、許容範囲です。

AIN4ピンとAIN5ピンは、AINPおよびAINMアナログ入力として使われます。

コネクタ・ピンの $1\text{ k}\Omega$ 抵抗には、2つの目的があります。アンチエイリアス・フィルタを形成するほか、たとえば誤配線などによる過電圧発生時にアナログ入力を保護する役割も果たします。

回路ノート CN-0381 には、4線式 Pt100 センサーと AD7124-4 の接続、および変換の線形化またはポスト処理に関する詳細が示されています。

図 1 に示す回路は、4線式 Pt1000 RTD にも対応しています。回路接続は、Pt100 に使われている接続と同じです。ADC の構成はこの項前半に示したものと同じですが、PGA ゲインは 1 に設定します。

3線式 RTD

3線式 Pt100 RTD と回路の接続方法を図 3 に示します。

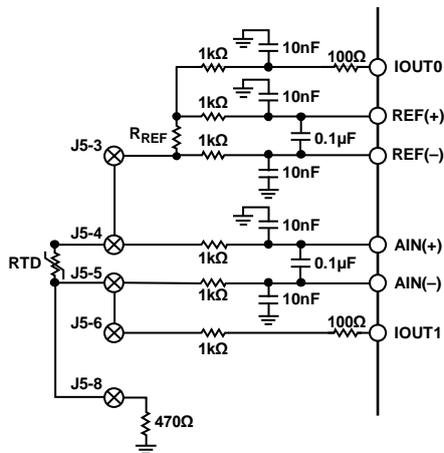


図 3. 3線式 RTD

AD7124-4 には整合した励起電流が 2つあります。どちらも、リード線補正を行うことができるように、3線式 RTD とともに使います。Pt100 の最大抵抗は 313.71Ω (600°C) なので、励起電流は $250\text{ }\mu\text{A}$ に設定します。リファレンス抵抗 R_{REF} は上側に接続します。したがって、一方の $250\text{ }\mu\text{A}$ 励起電流 (IOUT0) はピン AIN6 に出力され、 $5.6\text{ k}\Omega$ の精密リファレンス抵抗 (0.05% , $10\text{ppm}/^\circ\text{C}$) を通って Pt100 に流れ込みます。もう一方の $250\text{ }\mu\text{A}$ 電流 (IOUT1) はピン AIN7 に出力されます。この電流はリード線抵抗による電圧を発生させますが、AIN6 の電流によって生じるリード線抵抗電圧と逆極性になります。したがって、リード線抵抗による誤差は最小限に抑えられます。

$5.6\text{ k}\Omega$ の精密抵抗に生じる電圧は次の通りです。

$$250\text{ }\mu\text{A} \times 5.6\text{ k}\Omega = 1.4\text{ V}$$

Pt100 に生じる最大電圧は次の通りです。

$$250\text{ }\mu\text{A} \times 313.71\Omega = 78.43\text{ mV}$$

PGA をゲイン 16 に設定した場合、AD7124-4 のモジュレータにかかる電圧は次のようになります。

$$78.43\text{ mV} \times 16 = 1.25\text{ V}$$

これはリファレンス電圧より小さいので、許容範囲内です。

アナログ入力とリファレンス入力にはアンチエイリアシング・フィルタが組み込まれています。これらのフィルタは、モジュレータ・サンプリング周波数の整数倍の周波数において、対象周波数帯に折り返される干渉を防ぎます。これらのフィルタと外付け抵抗がゲイン誤差を発生させないようにするために、リファレンス・バッファがイネーブルされます。PGA 使用時にはアナログ入力バッファがイネーブルになるので、これらのバッファは自動的にイネーブルされます。リファレンス・バッファには、ある程度のヘッドルーム (電源レール内の 100 mV) が必要です。したがって、このヘッドルームを確保できるよう、下側に 470Ω の抵抗を組み込みました。励起電流が $250\text{ }\mu\text{A}$ の場合に必要ヘッドルームは 370 mV です。このピンに生じる電圧は $(470\Omega \times 2 \times 250\text{ }\mu\text{A}) + (5600 + 313.71)\Omega \times 250\text{ }\mu\text{A} = 1.713\text{ V}$ で、許容範囲です。

回路ノート CN-0383 には、3線式 Pt100 センサーと AD7124-4 の接続、および変換の線形化またはポスト処理に関する詳細が示されています。

図 1 に示す回路は、3線式 Pt1000 RTD にも対応しています。回路接続は、Pt100 に使われている接続と同じです。ADC の構成はこの項前半に示したものと同じですが、PGA ゲインは 1 に設定します。

熱電対

熱電対と回路の接続方法を図 4 に示します。

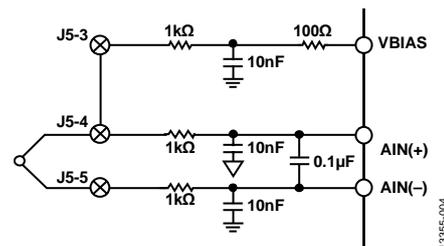


図 4. T タイプ熱電対

熱電対は、2種類のワイヤを接続することによって構成されています。生成される電圧は温度によって異なります。たとえば T タイプの熱電対では、一般的に 1°C の温度変化で $40\text{ }\mu\text{V}$ の電圧が生じます。

熱電対電圧は、ある電圧にバイアスする必要があります。AD7124-4 には、熱電対を $(AV_{\text{DD}} - AV_{\text{SS}}) / 2$ にバイアスする V_{BIAS} 電圧源が含まれています。このバイアス電圧は AIN6 チャネル上でイネーブルされ、図 4 に示すように熱電対に加えられます。バイアス電圧は、アナログ入力の AINM ピン上でイネーブルすることもできます。ただし、AINM のバイアス電圧と AINP のフィルタリングしたバイアス電圧には差があり、この差は変換結果に影響する程度の大きさなので、このケースでは外付けの R と C の値を制限する必要があります。

熱電対測定は絶対値測定で、変換には内部 2.5 V リファレンスが使われます。使用する熱電対は T タイプです。この熱電対は $-200^\circ\text{C} \sim +400^\circ\text{C}$ の測定が可能で、これに対応する熱電対の生成電圧は $-8\text{ mV} \sim +16\text{ mV}$ です。PGA は 128 に設定します。

冷接点補償には NTC サーミスタを使用します (10 kΩ、1%、3435K)。

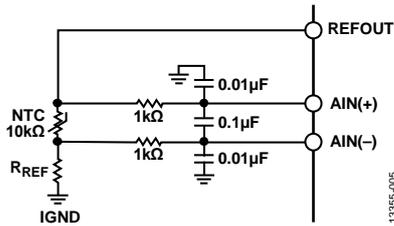


図 5. サーミスタ

内部リファレンスはサーミスタに電源を供給し、この変換ではゲインは 1 に設定します。サーミスタの下側には抵抗 R_{REF} を使います。これは 5.6 kΩ の精密抵抗 (0.05%、10ppm/°C) です。サーミスタに生じる電圧 V_{NTC} は次式で表されます。

$$V_{NTC} = \frac{V_{REF} \times ADC_{CODE}}{2^{24}}$$

ここで、 V_{REF} はリファレンス電圧、 ADC_{CODE} は AD7124-4 から読み込んだコード、 2^{24} は ADC の最大コードです。

サーミスタの抵抗 R_{NTC} は次式で表されます。

$$R_{NTC} = \frac{V_{NTC} \times R_{REF}}{V_{REF} - V_{NTC}}$$

ここで、 $R_{REF} = 5.6 \text{ k}\Omega$ 、 V_{REF} はリファレンス電圧です。これらの式をまとめると次式が得られます。

$$R_{NTC} = \frac{ADC_{CODE} \times R_{REF}}{FS_{CODE} - ADC_{CODE}}$$

ここで、 ADC_{CODE} は AD7124-4 から読み込んだコード、 $R_{REF} = 5.6 \text{ k}\Omega$ 、 FS_{CODE} は AD7124-4 のフルスケール・コード (2^{24}) です。

次いでこの抵抗は、下に示すサーミスタの式に基づくルックアップ・テーブルを使用して、マイクロコントローラ内で温度に変換されます。

$$T = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_0}\right)}{\beta} + \frac{1}{T_0}}$$

ここで、 T はサーミスタによって記録された温度 (K)、 $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $\beta = 3435\text{K}$ 、 $T_0 = 298.15\text{K}$

得られる温度 (°C) は $T - 273.15$ です。

アナログ入力バッファがイネーブルされていて、これらには 100 mV のヘッドルームが必要なので、5.6 kΩ の抵抗はアナログ入力のヘッドルームも提供します。この抵抗は誤配線時の電流を制限するので、回路保護の役割も果たします。

回路ノート CN-0384 には、熱電対センサーと AD7124-4 の接続、および変換の線形化またはポスト処理に関する詳細が示されています。

圧力センサー

電圧励起型圧力センサーは図 6 に示すように接続し、電流励起型圧力センサーは図 7 に示すように接続します。ここでは、ハネウェル社製圧力センサー (Honeywell S&C 24PCDFA6D) を使用します。

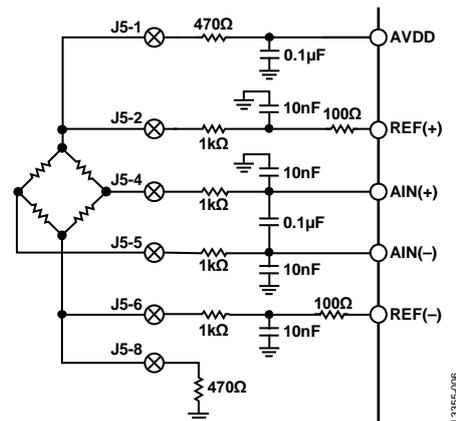


図 6. 電圧励起型圧力センサー

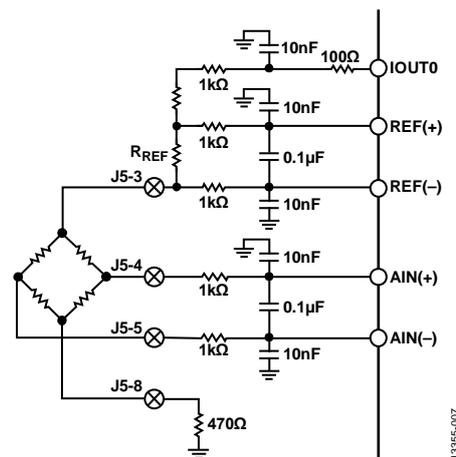


図 7. 電流励起型圧力センサー

電圧励起型アーキテクチャの場合は、 AV_{DD} (3.3 V) がセンサーを励起します。 AV_{DD} を使用してロードセルを励起した場合は、励起電圧を ADC のリファレンスとして直接使用することができます。センサーの上側と下側には、AD7124-4 のバッファのヘッドルーム要件を満たすために抵抗が追加されています。使用ゲインは 16 です。

電流励起モードでは AD7124-4 の両方の 100 μA 励起電流がピン AIN6 に供給され、センサーの励起電流は 200 μA になります。この場合も、PGA は 16 に設定します。5.6 kΩ の精密抵抗はリファレンス電圧を生成します。この仕組みはレシオメトリック構成となり、励起電流値に変動が生じてシステム精度には影響しません。

回路基板には、センサーの下側を AD7124-4 の GND またはパワー・スイッチに接続するオプションが含まれています。

すでに述べたように、アナログ入力とリファレンス入力には、ADC サンプル周波数の整数倍の周波数で生じる干渉を除去するために、アンチエイリアス・フィルタが組み込まれています。過電圧が生じた場合は、直列抵抗も電流を制限します。

プライマリ・センサーのシミュレーション

回路には、センサー・シミュレーションを可能にする抵抗ネットワークとポテンショメータが含まれています (図 1 に示すプライマリ・センサー・シミュレーション回路)。ポテンショメータを使用して、AIN0 (AINP) と AIN1 (AINM) の間に加える電圧を約 -0.09 V から約 $+1.36\text{ V}$ まで変えることができます。この回路は、変換に内部リファレンスを使用しています。AD7124-4 のゲインは 1 に設定され、アナログ入力バッファはイネーブルされています。この構成では、外部センサーを接続することなく回路を評価することができます。

デジタル・データ処理、アルゴリズム、および通信

デモンストレーション・ソフトウェア (CN-0382 Design Support Package に収録) は、初期化と構成設定、アナログ入力のデータ処理、アナログ出力の制御、および HART 通信を行います。以上で述べたすべてのセンサーには、線形化つまり補正が必要です。この線形化はソフトウェアで行います。RTD センサーと熱電対センサー、および必要な線形化の詳細については、回路ノート CN-0381、回路ノート CN-0383、および回路ノート CN-0384 を参照してください。

アナログ出力

AD5421 には $4\text{ mA} \sim 20\text{ mA}$ のループ給電出力ドライバを備えた低消費電力の高精度 16 ビット DAC が組み込まれています。このデバイスは、フィールド計測器のアナログ出力に必要なすべての機能を備えています。

AD5421 は、SPI インターフェースを介してマイクロコントローラに接続できます。

AD5421 には、 $4\text{ mA} \sim 20\text{ mA}$ ループに関連するさまざまな診断機能も含まれています。この補助的な ADC は、 V_{LOOP} ピンに接続した $20\text{ M}\Omega/1\text{ M}\Omega$ の抵抗分圧器を介して、計測器のループ端子の電圧を測定できます。また、内蔵センサーを介してチップ温度を測定することも可能です。AD5421 のすべての診断は、マイクロコントローラによって設定と読みを行うことができますが、AD5421 を自律的に動作させることもできます。

たとえば、コントローラと AD5421 の間の通信が機能しなくなった場合は、定められた時間が経過すると、AD5421 がそのアナログ出力を自動的に 3.2 mA アラーム電流にセットします。このアラーム電流は、フィールド計測器が動作しなかったことをホストに通知します。

ソフトウェアは、出力電流がある値から別の値へ変化する際に、HART 通信の障害を防ぐため、そのあらゆる変化を管理します。

HART 通信

AD5700 には、フル機能の HART FSK モデムが組み込まれています。このモデムは標準 UART インターフェースを介してマイクロコントローラに接続され、送信要求 (RTS) 信号とキャリア検出 (CD) 信号をやり取りします。

HART 出力は、 $0.068\text{ }\mu\text{F}/0.22\text{ }\mu\text{F}$ の容量分圧器によって必要な振幅にスケールングされて AD5421 の C_{IN} ピンにカップリングされ、ここで DAC 出力と結合し、出力電流を駆動して変調します。

HART 入力、LOOP+ からシンプルなパッシブ RC フィルタを介して、AD5700 の ADC_IP ピンにカップリングされます。RC フィルタは、HART 復調器の第 1 段バンドパス・フィルタとして機能するほか、システムの電磁耐性も改善します。これは、過酷な工業環境で使用される信頼性の高いアプリケーションにとって重要です。

AD5700 低消費電力発振器は、XTAL1 ピンと XTAL2 ピンに直接接続された 3.6864 MHz の外付け水晶発振器を使用して、HART モデム用のクロックを生成します。

出力保護

過渡電圧サプレッサ (TVS) は、 $4\text{ mA} \sim 20\text{ mA}$ HART インターフェースを過電圧から保護します。TVS 電圧定格は、AD5421 の REG_{IN} ピンの絶対最大電圧 60 V を超えないように選択してください。TVS リーク電流は電流出力精度に影響を与える可能性があるため、この部品を選ぶ際には、所定のループ電圧および温度範囲におけるリーク電流に注意してください。

外付けのデプレッション型 FET を AD5421 とともに使用すれば、ループ電圧を最大限まで上げることができます。

回路は、ループ出力に直列に接続した 1 組のダイオードによって、逆極性から保護されています。

また、ループに直列に接続されたフェライト・ビーズは、 4700 pF のコンデンサとともにシステムの EMC 性能を改善します。ループ端子間にはこれ以上の容量のコンデンサを使用しないでください。これは HART ネットワーク仕様による制約です。

4.7 V の低リーク・ツェナー・ダイオードは、AD5421 の COM ピンと LOOP ピンの間に誤って外部電圧が加わった場合 (たとえば回路のデバッグ中) に、AD5421 のオンチップ $50\text{ }\Omega$ ループ検出抵抗を保護します。

電源と電源管理

センサー駆動電流を含むフィールド計測器回路は、その全体が、 4 mA から 20 mA までのループで使用できる限られた電力量で動作しなければなりません。これは、あらゆるループ給電フィールド計測器設計に共通する課題です。図 1 に示す回路は、低消費電力と高性能の両方を実現するソリューションの一例です。このアプリケーションに使われているすべての集積回路は低消費電力を実現できるよう設計されており、回路はその内蔵機能を利用して、柔軟な電力管理構造と最適なループ給電ソリューションを実現します。

AD5421は4 mA ~ 20 mAのループ電圧を電源に使用し、安定化された低電圧を残りの回路に供給します。AD5421のREG_{OUT}電圧は、回路の要件に応じ、ピンによって1.8V ~ 12Vの範囲で設定可能です。図1の回路は、9V電源電圧オプションを使用しています。センサー側は、シンプルなプッシュプル型のDC-DCコンバータを使用し、4 mA ~ 20 mAループから絶縁されています。ADG5433は、マイクロコントローラのクロックを使用して、トランスを駆動する9Vの非オーバーラップ矩形波を生成します。トランスは2:1の電圧比で動作します。2次側の4.5Vは、AD7124-4用の低ノイズ3.3V電源を生成するために、ADP162によって整流され、安定化されます。AD7124-4のアナログおよびデジタル3.3V電源は、ともにADP162レギュレータによって供給されます。ただし、デジタル回路からのノイズがアナログ部分に入り込むのを防ぐために、フィルタ(L1/R19)が組み込まれています。

AD5421は、ループ側の3.3Vロジック電源を供給します。この電源は、マイクロコントローラとAD5700が直接使用します。

REG_{OUT} RCフィルタ(10 μF/10 Ω/10 μF)は、ループからの干渉がアナログ回路に影響を与えないようにします。また、回路によって生じる干渉、特にコントローラ回路やデジタル回路によって生じる干渉が、ループに入り込むのを防止します。これは、HART通信の信頼性を確保する上で重要です。

AD5700 HARTモデムの電源は、追加のRCフィルタ(470 Ω/1 μF)を介して供給されます。このフィルタは、AD5700からの電流ノイズが4 mA ~ 20 mAループ出力に入り込むのを防ぐので、ループ給電アプリケーションにとって非常に重要です。このノイズがループに入り込むと、HART通信に悪影響を与えます。AD5700モデムは、グラウンドとの間に8.2 pFのコンデンサを取り付けた外付け水晶振動子をXTAL1ピンとXTAL2ピンに接続して使用します。これは消費電力を最も小さくする選択肢です。

AD7124-4の主な利点の1つは、3つの内蔵パワー・モードの1つを選択できる柔軟性を備えていることです。消費電流、出力データレートの範囲、およびRMSノイズは、パワー・モードを選択することによって調整できます。したがって、4 mA ~ 20 mAの装置や携帯型装置では、ローパワーまたはミドルパワー・モードが最良の選択です。消費電力があまり問題とならないようなプロセス制御システムには、フルパワー・モードを使用してノイズを低く抑えることができます。このループ給電回路では、ミドルパワー・モードを使用します。パワー・モードの詳細については、AD7124-4のデータシートを参照してください。

AD7124-4のPSWグラウンド・スイッチ・ピンは、圧力トランスデューサ接続時の励起/電源を制御します。計測器の電源をオンにすると、このスイッチはデフォルトでオフになります。このデフォルト設定により、センサーをオンにする前に、適切なパワー・モードを含めてシステムを完全に構成することができ、結果として、4 mA ~ 20 mAループ出力における電源オン時のスパイク発生の可能性が最小限に抑えられます。

RTDセンサーを接続した場合、センサーの電源はAD7124-4のプログラマブル電流源から供給されるので、そのパワー・モードはソフトウェアによってすべて制御されます。同様に、熱電対センサーの場合は、バイアス電圧と絶対リファレンスがAD7124-4に組み込まれているので、これらもソフトウェアによって制御されます。

ソフトウェア

マイクロコントローラは、SPIインターフェースを使用してAD7124-4とAD5421に接続され、UARTインターフェースUART0を介してAD5700と通信します。ソフトウェアは、もう1つのUART(マイクロコントローラのインターフェース)であるUART1を介してマイクロコントローラにダウンロードされます。

起動時はマイクロコントローラが3個のデバイスすべての構成設定を行い、AD7124-4はTタイプ熱電対に合わせて設定されます。AD7124-4は、連続変換モードで動作します。したがって、DOUT/RDYピンもマイクロコントローラ上の割り込みに接続されます。ADCから変換結果が得られるごとにマイクロコントローラへの割り込みが生成されて、変換結果が読み込まれます。次いで、マイクロコントローラがデータの線形化と処理を行います。結果は、4 mA ~ 20 mAループで送信するためにAD5421 DACへ送られます。回路の機能と性能のデモに使用するソフトウェアは、[CN-0382 Design Support Package](#)に含まれています。このソフトウェアは、この回路ノートに述べたすべてのセンサー・タイプに対応しています。センサー・タイプに合わせてソフトウェアを変更する方法や、マイクロコントローラへのソフトウェアのダウンロードに関する詳細を示したドキュメントも、[CN-0382 Design Support Package](#)に含まれています。

コード例には、ハードウェアの機能と能力を示すための、基本的なHARTスレーブ・コマンド応答が含まれています。ただし、HART通信のプロトコル層は含まれていません。

バリエーション回路

AD7124-4には高性能で非常に柔軟なアナログ・フロントエンドが搭載されており、4個の差動アナログ入力用または7個の疑似差動アナログ入力用のピンと、電圧リファレンスおよび下側パワー・スイッチ用の追加ピンがあります。そのため、抵抗ブリッジ・センサー、抵抗温度センサー、熱電対など、タイプの異なる複数のアナログ・センサーに直接接続できます。したがって、フィールド計測器ソリューションを、この回路ノートに示したセンサー・タイプだけに限定する必要はありません。このデバイスは、ほぼあらゆるセンサーを使用したフィールド計測器に対応可能です。

AD7124-8は、AD7124-4の代わりに使用することができます。性能は、AD7124-4もAD7124-8も同じです。ただし、AD7124-8には8個の差動用または15個の疑似差動用の入力があるので、多数のチャンネルを必要とするアプリケーションに適しています。

AD5421は、保護回路を介してループに直接接続できます。あるいは、図8に示すように、AD5421とループ電源の間にデプレッション型NチャンネルMOSFETを接続することができます。この構成にMOSFETを追加すると、AD5421の電圧降下が約12Vに保たれ、AD5421パッケージで消費される電力が減るので、4 mA ~ 20 mAアナログ出力の精度が向上し

ます。また、これによりループ内で許容できる最大電圧が MOSFET の定格レベルまで増加します。追加の MOSFET が HART 通信に影響を与えることはありません。

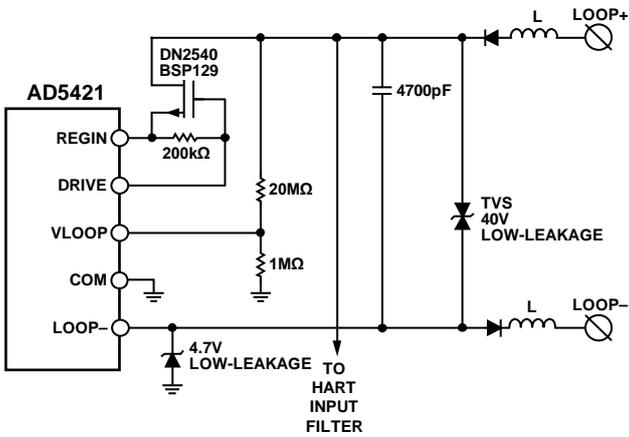


図 8. AD5421 ループ電源に接続した MOSFET

この回路では、AD5700 を 3.6864 MHz の水晶振動子とともに使用しています。これは最小限の消費電力を実現できる構成です。あるいは、精度 0.5% の高精度内部発振器を組み込んだ AD5700-1 を使用することもできます。内部発振器を使用した場合は水晶発振器使用時に比べてモデムの電源電流が最大 225 μ A まで増加しますが、外付け水晶振動子が不要になるので、この方法を選べば、コストと必要ボード面積を減らすことができます。

ループ給電を使用しないアプリケーションでは、AD5410、AD5420、AD5422、または AD5755 が 4 mA ~ 20 mA DAC に適しています。

最後に、ADuM1441 の代わりとなり得るアイソレータ製品には幅広い選択肢があり、ADuM1440、ADuM1442、ADuM1445、ADuM1446、ADuM1447、ADuM1240、ADuM1241、ADuM1245、および ADuM1246 を使用することができます。

回路の評価とテスト

回路ハードウェア

図 1 に示す回路は、図 9 に示す DEMO-AD7124-DZ プリント基板 (PCB) を基に構成されています。

DEMO-AD7124-DZ 回路基板には、システム評価を容易にする追加機能が含まれています。RTD 熱電対または圧力センサーは、8 ピン・コネクタ J5 を介して接続できます。また、HART RTS および CD 用のテスト・ポイントがあります。4 ピン・コネクタを使用すれば、マイクロコントローラにコードをダウンロードできます。

CN-0382 Design Support Package には、3 線式と 4 線式の Pt100 と Pt1000 RTD、熱電対、および電圧/電流励起圧力センサーを使用するフィールド計測器用の完全な C コード例も含まれています。この C コードを使用すれば、回路のすべてのハードウェア・ブロックと機能の検証と評価、および HART インターフェイス機能の部分的な検証を行うことができます。

HART インターフェイスの仕様およびリソースの詳細については、HART 通信協会 (HART Communication Foundation) へお問い合わせください。

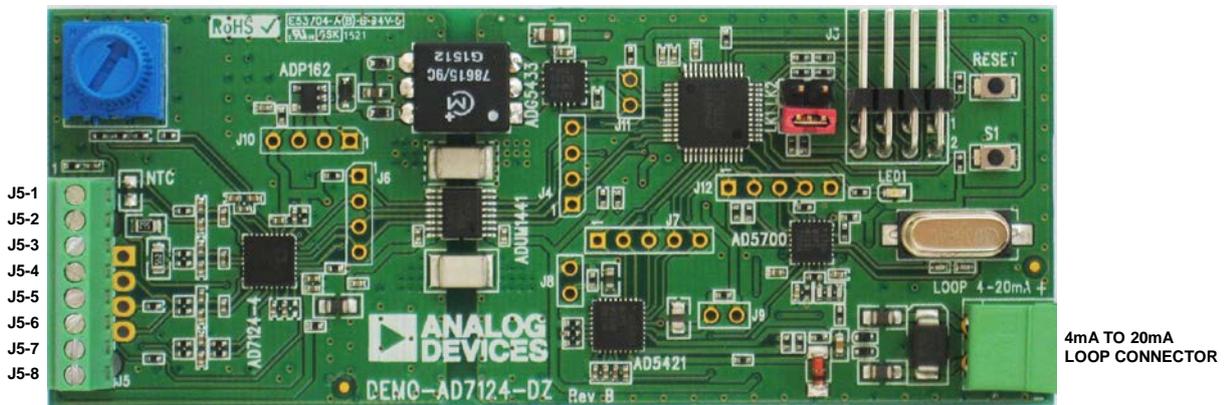


図 9. DEMO-AD7124-DZ プリント回路基板

回路の消費電力

回路内測定を容易にするために、回路には多数の電流測定用テスト・ポイントが設けられています。AD5421のREG_{OUT}ピンとDV_{DD}ピンの経路には、10Ωの抵抗が組み込まれています。また、ADP162の出力の場合も、その経路には同様の10Ω抵抗が組み込まれています。10Ω抵抗の両側には、複数のテスト・ポイントが設けられています。このセットアップは、各抵抗での電圧降下を測定して、電源電流を中断させたり回路に悪影響を与えたりすることなく、電流を計算することを可能にします。

回路の構成は以下の通りです。

- マイクロコントローラ・コア・クロック = 1 MHz
- AD7124-4とアナログ回路は、個々のセンサー・タイプに応じたモードで動作
- AD5421は10SPSのレートで動作し、ループ出力電流を更新
- HART通信（マスター要求に対して定期的に応答してデバイス変数を読み込む）

表 1. 回路の消費電流

Mode	AD5421 Internal (mA)	DVDD 3.3 V (mA)	REGOUT 9.0 V (mA)	Total Off Loop (mA)	Isolated 3.3 V (mA)
Simulation	0.28	0.63	0.82	1.73	0.48
RTD 4- wire	0.28	0.63	1.00	1.91	0.84
RTD 3- wire	0.28	0.63	1.12	2.03	1.08
TC	0.28	0.63	0.89	1.80	0.61
Pressure					
V Mode	0.28	0.63	1.16	2.07	1.15
I Mode	0.28	0.63	0.98	1.89	0.79

表 1に、個々のブロック、すなわちAD5421自体（見積値、AD5421を最小ループ電流に置くことによって検証）、3.3VのDV_{DD}から電源を供給する回路（マイクロコントローラ、HARTモデル、およびSPI絶縁の1次側）、ならびに絶縁型電源の1次側（9V）の電源電流を示します。これらの電流成分を合計すると、回路自体のためにループから供給される全電流量が得られます。ただし、これには出力を4mA～20mAとするための可変電流成分が含まれていません。

「Isolated 3.3V」の列は絶縁された3.3V電源からの電流値であり、これは、センサー、AD7124-4、およびSPI絶縁2次側の電源として使われます。

入力センサーを含め、関係するすべてのアナログおよびデジタル・ブロックを使った回路が消費する電源電流は、最小の4mAループ出力電流時の許容量内に十分収まります。

センサー入力性能

4線式RTD

4線式RTDに接続した場合のシステム性能を図10に示します。ここでは、BグレードのPt100センサーを使用します。AD7124-4の構成は以下の通りです。

- パワー・モード：ミドルパワー・モード
- フィルタ：ポスト・フィルタ、25SPS
- 励起電流：AIN6でイネーブルされ、250μAに設定
- ゲイン=16
- 極性：ユニポーラ
- リファレンス・バッファをイネーブル
- AIN4/AIN5チャンネルにRTDを接続
- リファレンス：REFIN1（5.6kΩのリファレンス抵抗をREFIN1端子間に接続）
- AD7124-4の内部オフセット・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションを起動時に実行

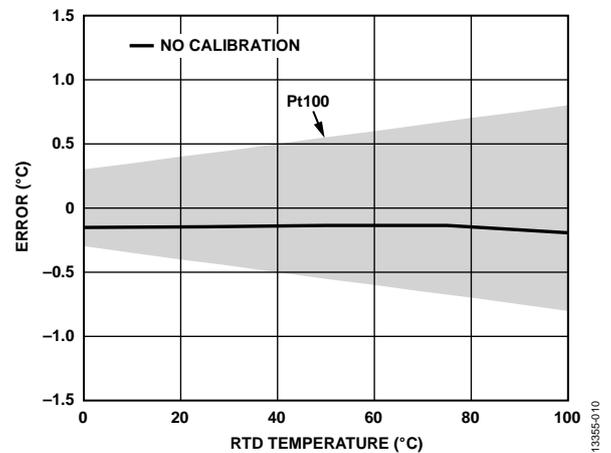


図 10. 4線式RTD測定

ADCから読み出した変換値を、マイクロコントローラ内で線形化しました。Pt100センサーの温度を0°Cから100°Cまで変化させ、回路基板を25°Cに保ちました。デモの精度を図10に示します。デモの測定精度は、BグレードPt100センサーの規定精度内です。

3線式 RTD

3線式 RTD に接続した場合のシステム性能を図 11 に示します。ここでは、B グレードの Pt100 を使用します。AD7124-4 の構成は以下の通りです。

- パワー・モード：ミドルパワー・モード
- フィルタ：ポスト・フィルタ、25SPS
- 励起電流 IOUT0：AIN6 でイネーブルされ、250 μ A に設定
- 励起電流 IOUT1：AIN7 でイネーブルされ、250 μ A に設定
- ゲイン=16
- 極性：ユニポーラ
- リファレンス・バッファをイネーブル
- AIN4/AIN5 チャンネルに RTD を接続
- リファレンス：REFIN1 (5.6k Ω のリファレンス抵抗を REFIN1 端子間に接続)
- AD7124-4 の内部オフセット・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションを起動時に実行

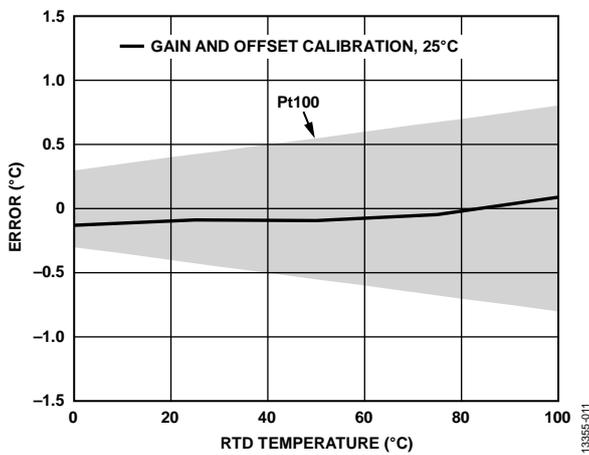


図 11.3 3線式 RTD 測定

Pt100 センサーの温度を 0°C から 100°C まで変化させ、回路基板を 25°C に保ちました。ADC から読み出した変換値を、マイクロコントローラ内で線形化しました。これにより、実際の温度と回路基板による測定温度の誤差が得られています。内部オフセット・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションは、温度を変化させる前に 25°C で行いました。このキャリブレーション後の 3線式 Pt100 は、B グレード Pt100 に許容されるエンベロップ内に十分収まっています。デモの精度を図 11 に示します。デモの測定精度は、B グレード Pt100 センサーの規定精度内です。

熱電対

T タイプ熱電対に接続した場合のシステム性能を図 12 に示します。AD7124-4 の構成は以下の通りです。

- パワー・モード：ミドルパワー・モード
- 熱電対の構成
 - ゲイン=128
 - チャンネル：AIN4/AIN5
 - 内部リファレンスをイネーブル
 - フィルタ：ポスト・フィルタ、25SPS
 - 極性：バイポーラ
- AD7124-4 の内部オフセット・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションを起動時に実行
- 冷接点の構成
 - ゲイン=1
 - フィルタ：高速セトリング Sinc³、44.44SPS
 - チャンネル：AIN2/AIN3
 - 内部リファレンスを選択
 - アナログ入力バッファをイネーブル
 - 極性：ユニポーラ

AD7124-4 のフルスケール誤差は工場 でゲイン 1 にキャリブレーションされているので、それ以外のキャリブレーションは行っていません。

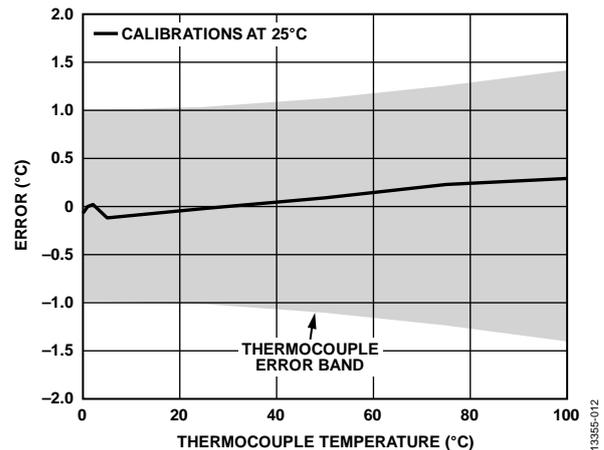


図 12. T タイプ熱電対測定 (冷接点を周囲温度に維持)

図 12 では、冷接点を 25°C に保って熱電対を 0°C から 100°C まで変化させています。ADC から読み出した変換値の処理と線形化は、マイクロコントローラ内で行いました。

T タイプ熱電対の精度は、1°C または 0.75% のいずれか大きい方です。サーミスタも、ある程度誤差を増加させます。この回路に使われているサーミスタの精度は、1% または 1°C のいずれか大きい方です。実際の温度と測定温度の差を図 12 に示します。結果は、熱電対/サーミスタの組み合わせに対する規定値の範囲内に十分収まっています。

測定は、熱電対を 25°C に維持し、冷接点を 0°C から 80°C まで変化させて繰り返し行いました (図 13 参照)。システムの全体的精度は 1.75°C ですが、これは、Pt100 センサーなど、より高精度の冷接点を使用することによって改善できます。

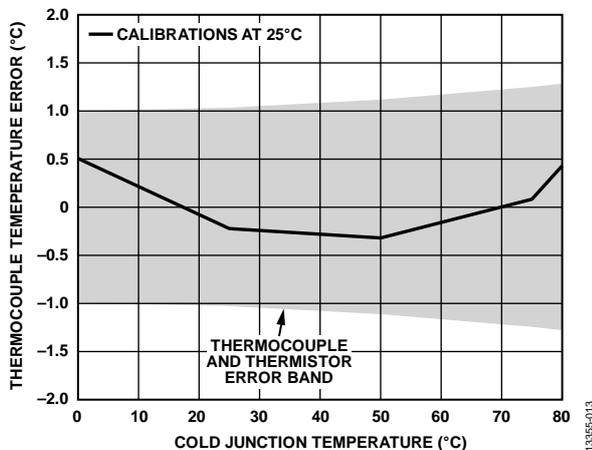


図 13. T タイプ熱電対測定 (熱電対を周囲温度に維持して冷接点を変化させる)

圧力

ノイズ・テストは、圧力センサーを接続した状態で行いました。アナログ・フロントエンドと、ボードの他の回路部分の相互作用によって影響を受ける可能性がある要素は、主にノイズのレベルです。このため、テストはシステムのノイズと、関連する分解能性能に焦点を当てて行いました。

デモは、HART 通信により kPa 単位の圧力を表すデータを送信するように構成し、100 個のサンプルを収集して、性能を定量化するための基本的なデータ解析を行いました。最初のテストは標準的な圧力センサー (Honeywell 24PCDFA6D) を接続して行い、2 回目のテストは、短絡状態の入力によって生成された入力信号を使用して行いました。

また、テストにあたっては、電流源と電圧によりセンサーを励起しました。電圧モードでの AD7124-4 の構成は以下の通りです。

- パワー・モード：ミドルパワー・モード
- フィルタ：ポスト・フィルタ、25SPS
- ゲイン=16
- 極性：バイポーラ
- リファレンス・バッファをイネーブル
- AIN4/AIN5 チャンネルにセンサーを接続
- リファレンス：REFIN2 (圧力センサーの検出抵抗によって提供されるリファレンス)

電流励起モードでの AD7124-4 の構成は以下の通りです。

- パワー・モード：ミドルパワー・モード
- フィルタ：ポスト・フィルタ、25SPS
- 励起電流：AIN6 では両方の励起電流をイネーブルして 100 μ A に設定するので、合計電流は 200 μ A
- ゲイン=16
- 極性：バイポーラ
- リファレンス・バッファをイネーブル
- AIN4/AIN5 チャンネルにセンサーを接続
- リファレンス：REFIN1 (5.6k Ω のリファレンス抵抗を REFIN1 端子間に接続)

性能の概要を表 2 に示し、信号プロットを図 14 から図 17 に示します。

表 2. 圧力センサーのノイズと分解能

Parameter	Voltage Mode		Current Mode		Unit
	Pressure Sensor	Shorted Input	Pressure Sensor	Shorted Input	
Full Scale	391.47	391.47	438.45	438.45	kPa
Noise RMS	0.66	0.61	1.76	1.69	pA
Peak-to-Peak Noise	3.5	3.2	11.1	9.8	pA
Effective (RMS) Resolution	19.2	19.3	17.9	18	Bits
Noise-Free (Peak-to-Peak) Resolution	16.8	16.9	15.3	15.4	Bits

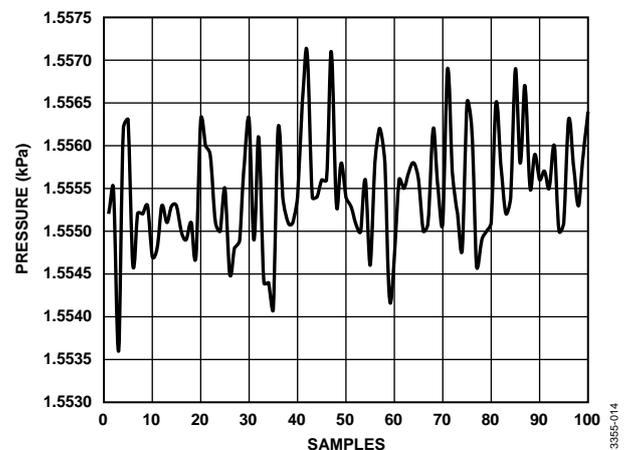


図 14. 電圧モード—圧力センサーの入力波形

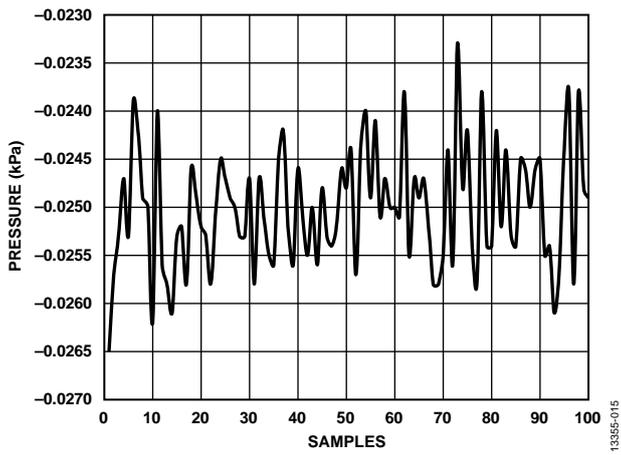


図 15. 電圧モード—短絡入力波形

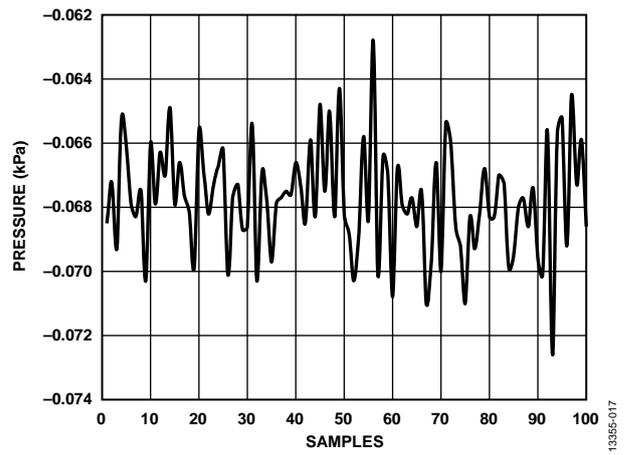


図 17. 電流モード—短絡入力波形

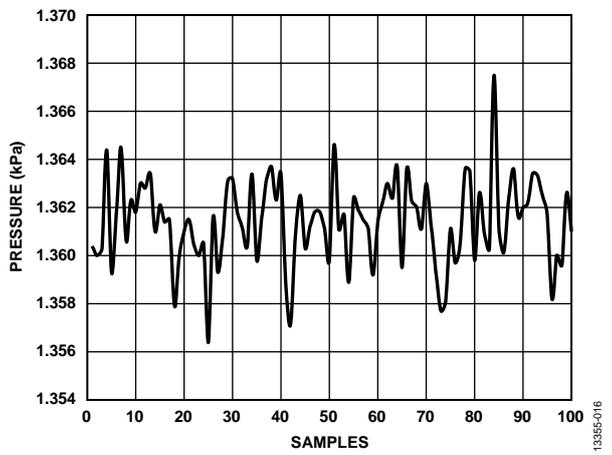


図 16. 電流モード—圧力センサー入力波形

さらに詳しい資料

CN-0382 Design Support Package:

www.analog.com/CN0382-DesignSupport

Analog Dialog 44-10 : 熱電対の簡便性、精度、フレキシビリティを利用して温度を測定する 2 つの方法

Application Note AN-0971 : *isoPower* デバイスでの EMI 放射制御についての推奨事項

Kester, Walt. "Temperature Sensors," Chapter 7 in *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices, 1999.

AN-615 Application Note : ピーク to ピーク分解能対有効分解能

AN-892 Application Note : 温度計測の理論と実践上のテクニック

AN-0970 Application Note. RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller. Analog Devices.

MS-2644 Technical Article: Ultralow Power Opening Applications to High Speed Isolation. Analog Devices.

MT-031 Tutorial: Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND". Analog Devices.

MT-101 Tutorial: Decoupling Techniques. Analog Devices.

Circuit Note CN-0172: 3-Channel Thermocouple Temperature Measurement System with 0.25 °C Accuracy, Analog Devices.

Circuit Note CN-0206: Thermocouple Temperature Measurement System with Less Than 500 µA Current Drain. Analog Devices.

Circuit Note CN-0209: Fully Programmable Universal Analog Front End for Process Control Applications. Analog Devices.

Circuit Note CN-0325: PLC/DCS Universal Analog Input Using Either 4 or 6 Pin Terminal Block. Analog Devices.

Circuit Note CN-0376: Channel-to-Channel Isolated Temperature Input (Thermocouple/RTD) for PLC/DCS Applications. Analog Devices.

Circuit Note CN-0381: Completely Integrated 4-Wire RTD Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC. Analog Devices.

Circuit Note CN-0383: Completely Integrated 3-Wire RTD Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC. Analog Devices.

Circuit Note CN-0384: Completely Integrated Thermocouple Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC. Analog Devices.

HART® Communication Foundation

データシートと評価ボード

AD7124-4 データシート/評価ボード

AD5421 データシート/評価ボード

AD5700 データシート/評価ボード

ADG5433 データシート

ADuM1441 データシート

ADP162 データシート

改訂履歴

7/15—Revision 0:初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイゼス社製品専用で作られており、アナログ・デバイゼス社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイゼス社の提供する情報は正確かつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイゼス社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイゼス社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。