

目次

1.0 目的	2
2.0 熱電対の理論	2
3.0 AN231E04 実装	5
3.1 デバイスピンのインターフェース	5
3.2 ゲイン要件	7
3.3 熱電対の直線化	8
3.3.1 伝達関数 CAM	8
3.3.1 伝達関数の定義	9
3.3.2 入力と出力の量子化	9
3.3.3 線形化の改善	9
3.3.4 ダイナミックレンジの最大化	10
4.0 完成回路	11
4.1 例示AD2回路の設定	12
5 キャリブレーション	12
6 性能	13
7 概要	14

1.0 目的

本アプリケーションノートでは、市販のほとんどの熱電対に適したAnadigmDesigner®2（AD2）回路の設計および構築方法について説明します。この回路は、熱電対の非線形伝達関数に対する大きな利得と補正を提供するように設計されています。

読者は、例示されたAD2回路を用いて設計プロセスの各段階を順を追って学び、徐々に完全な熱電対ソリューションを構築していきます。熱電対用AD2回路および線形化データを定義するためのスプレッドシートは、Okika Devicesのウェブサイトから入手可能です。

本アプリケーションノートは、読者がOkika DevicesのFPAA、評価ボード、および関連するAnadigmDesigner®2ソフトウェアに精通していることを前提としています。

2.0 熱電対の理論

本アプリケーションノートのこのセクションでは、熱電対の原理について説明します。

既にご存知の方は、次のセクション「AN231E04の実装」までスキップして読み進めてください。

単一のワイヤに沿って温度差が生じると、そのワイヤの両端に熱起電力が発生します。これを測定できれば、温度の指標として利用できます。実際には、測定機器のワイヤも同様の温度勾配にさらされるため、発生した電圧を容易に測定することはできません。測定値がゼロになるか、誤差が生じるかのいずれかになります。

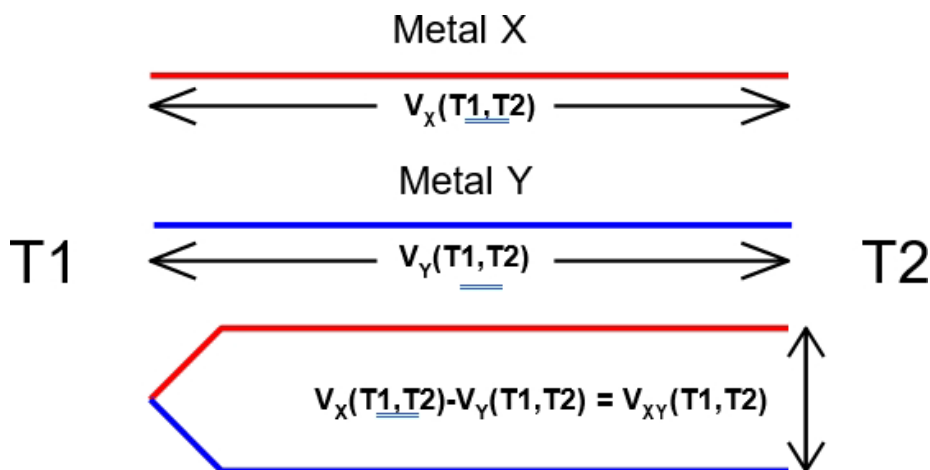


Figure 1: Thermocouple junction

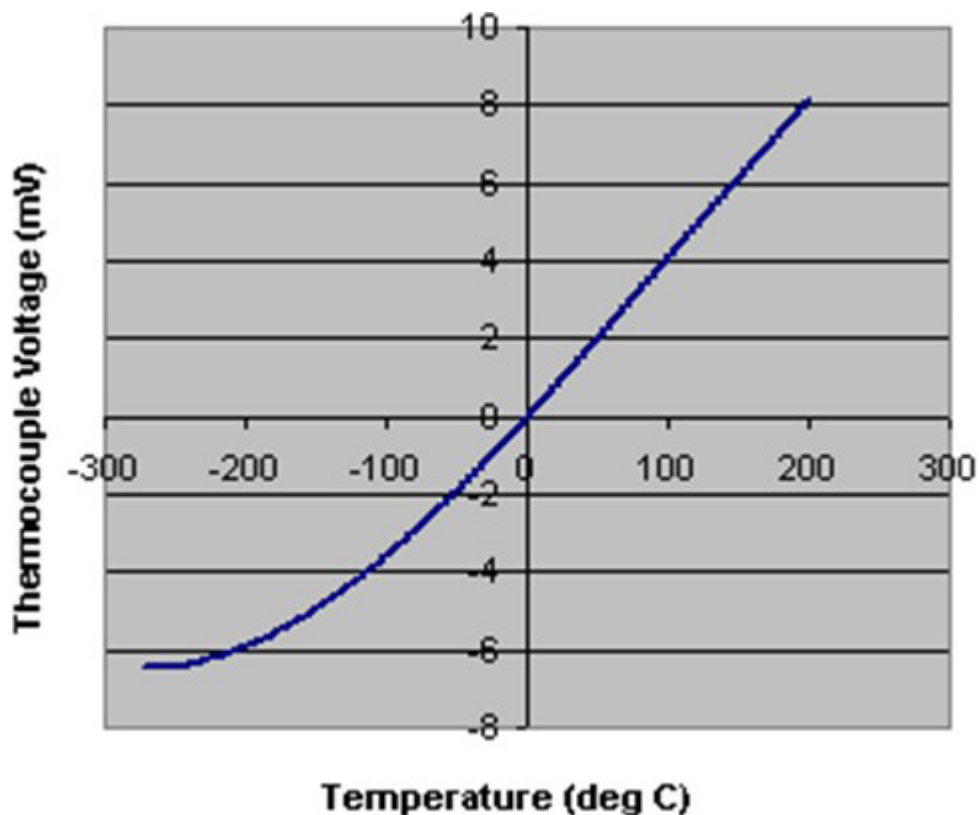


Figure 3: Type K thermocouple response

これは、出力電圧が検知温度に正比例しないことを意味します。このため、測定電圧を温度に変換するには熱電対表を使用する必要があります。

熱電対表は、基準接点と呼ばれる一方の接点が0℃にある場合を想定して公表されています。これは図1および図2におけるT2接点に相当します。前述した手法の中には、この接点を0℃ではなく他の既知の基準温度に保つものもあります。このような場合、熱電対表を使用する前に測定電圧を補正する必要があります。

補償は逆熱電対表でT2を検索して行います。この補償電圧を測定値に加算（または減算）した後、熱電対表を用いてT1を求めます。

最後に、冷接点の温度変化に対応するために必要な補償を実行できるICが利用可能です。これらのICは冷接点の温度を測定し、熱電対表を直接使用できるようにする適切な補償電圧を生成します。ICはT2を検出するために端子台に取り付け、生成した補償電圧を熱電対と直列に接続する必要があります。

冷接点の温度を測定し、それを補償する様々な方法は、しばしば「冷接点補償」と呼ばれる。選択する方法は、コスト、実用性、および要求される精度によって決まる。

3.0 AN231E04 実装

3.1 デバイスピンのインターフェース

熱電対とのインターフェースおよび線形化応答の提供に関する問題は、AN231E04を使用することで完全に解決されます。以下では、AnadigmDesigner®2ソフトウェアを用いた設計プロセスを説明し、例示回路を段階的に構築しながら完全な熱電対ソリューションを完成させます。

熱電対が生成する電圧は差動信号です。AN231E04は完全差動

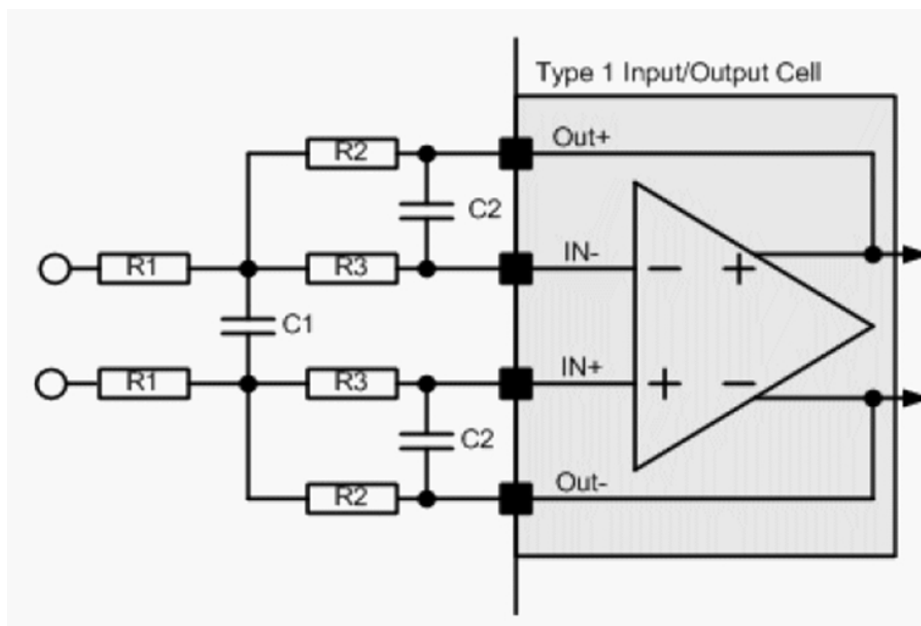


Figure 4: Rauch Filter

信号処理デバイスであるため、熱電対線をデバイスの入力ピンに接続するだけでインターフェースを実現できます。しかし、より優れた方法は、入力アンプ（

I/O 1-4) と少数の受動部品を組み合わせ、図4に示すように2次ローパス・ラウフフィルタを形成する方法です。

ラウフフィルタを使用する利点は3つある：

- a) これは2次ローパスフィルタを提供し、特に熱電対がインターフェース電子機器から離れている場合に、環境から容易に拾われるノイズを除去するのに有用である。
- b) 入力側で大幅な利得を得ることが可能です（入力増幅器のオフセット電圧は通常500 μ Vであるため、顕著なオフセットを発生させることなく十分な増幅余地があります）。
- c) ラウフフィルタは、熱電対をAN231E04デバイスの電圧中間レール（VMR）に自動的にバイアスします。

ラウフフィルタの部品値を計算する式は非常に複雑ですが、幸いなことにOkika Devices社がユーザーに代わってこれらの計算を行うシンプルなExcelツールを提供しています。Okika Devicesのウェブサイトからツールをダウンロードし、開いてコーナー周波数、利得、Qの希望値を入力してください。R1の希望値も入力します。ツールがR2、R3、C1、C2の値を計算します。次に、入手可能な希望値に合わせて調整した部品値を入力すると、ツールがパラメータを再計算し、応答特性をプロットします。

例として、以下のパラメータが必要だと仮定します： $F_o = 0.1\text{kHz}$ ゲイン = 100

$Q = 0.707$

$R_1 = 1\text{k}\Omega$ を選択

これらの値をExcelツールに入力し、結果として得られた部品値を入手可能な部品に合わせて調整すると、以下ようになります：

$R_1 = 1\text{k}\Omega$ $R_2 = 100\text{k}\Omega$
 $R_3 = 1\text{k}\Omega$ $C_1 = 1000\text{nF}$ $C_2 = 10\text{nF}$

フィルタの応答特性は図5に示す通りである。

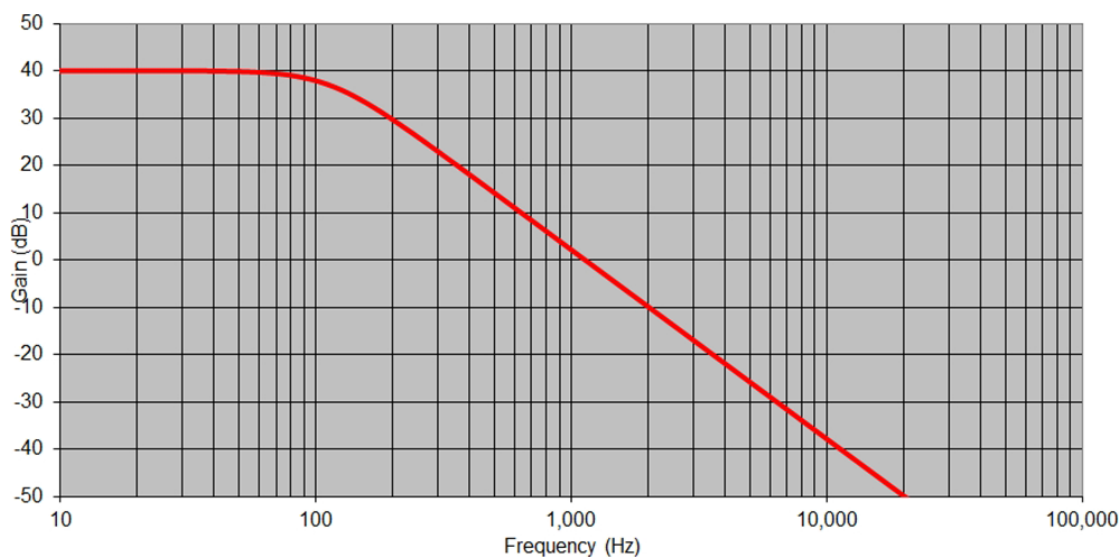


Figure 5: Rauch Filter response

3.2 利得要件

熱電対の感度は、熱電対の種類に応じて数V/°Cから数十V/°Cの範囲です。動作が要求される温度範囲と感度によって、必要な増幅率が決定されます。

最適な結果を得るには、さらなる信号処理の前に熱電対電圧範囲を±3Vまで増幅すべきである。これには100倍から10,000倍以上の利得が必要となる。前述の3.1節では、ラウフフィルタを用いた入力段での100倍増幅方法を示した。

全てのアナログ増幅器は入力帰一化オフセットの影響を受けます。これは有限の入力電圧がゼロ出力電圧を引き起こす状態です。増幅器の入力帰一化オフセットはゲイン設定で乗算されるため、注意を怠ると増幅器は自身のオフセット電圧のみで飽和する可能性があります。は自動ゼロ調整機能を採用しています。

AN231E04デバイス

オフセットを最小化するプロセスには、I/Oアンプも含まれます。このアンプの典型的なオフセット（自動ゼロ調整後）は500μV

。このオフセットは小さいものの、入力段の利得をx100を大幅に超える値に設定することは推奨されません。したがって、残りの利得はデバイス内部のCAMから得る必要があります。

オフセットの自動ゼロ調整に加え、特定のCAMは出力信号を提供し、ある位相でオフセットを測定し、別の位相でそれを相殺するクロッキング方式を用いて自身のオフセットを自動補償します。この技術を利用するCAMの一つがGainHoldです。

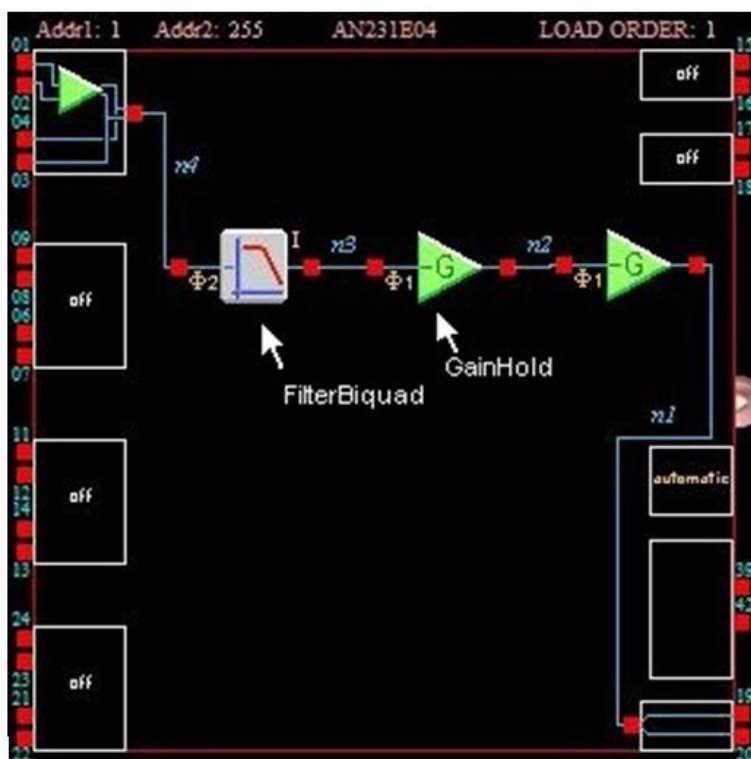


Figure 6: Thermocouple gain stages

図6はゲイン=1のローパス・バイクワッドフィルタCAMを示し、必要に応じて追加のノイズフィルタリングを提供する。これに続く2つのGainHold CAMは、それぞれ最大x100の高利得と極めて低いオフセットを併せ持つ。これにより熱電対に適した高利得回路が実現される。

ゲインホールドCAMを使用する際は、出力が入力サンプリングと同じ位相でオフセットフリーとなる点に留意してください。したがって、信号経路内の後続CAMで正しい位相がサンプリングされるよう注意が必要です。最初のゲインホールドCAMでは位相1が任意に選択されたため、2番目のゲインホールドCAMも位相1を使用し、最初のゲインホールドからのオフセット性能を維持します。

図6に示す回路は、完全な熱電対ソリューションに必要な利得要件を提供します。必要な利得が1000未満の場合、GainHold CAMのいずれか1つを除去できます。前述の通り、最適性能を得るためには、ラウフィルタ入力段の最大利得を100に制限する必要があります。

3.3 熱電対の直線化

典型的な熱電対の応答特性を図3に示す。グラフから、出力電圧が入力温度に理想的に比例していないことがわかる。したがって、熱電対電圧から温度を算出するには、ルックアップテーブル（LUT）またはアナログ線形化技術が必要となる。

AN231E04には、TransferFunction CAMに組み込まれた256値のルックアップテーブル（LUT）が搭載されており、センサーの非直線性を補正するために使用できます。

転移関数CAMの詳細を知りたい上級ユーザーは、「AN231E04デバイスにおける転移関数CAMの使用」と題する設計概要を参照してください。

熱電対の場合、TransferFunction CAM を使用して、検知温度に比例して変化するアナログ電圧を生成できます。基本手法はセクション 3.3.1 から 3.3.2 に、改良手法はセクション 3.3.3 に記載されています。

3.3.1 TransferFunction CAM

CAMの伝達関数は内部ADCを用いて入力信号をデジタル化し、その後8ビットのデジタルワードを「ルックアップテーブル」（LUT – 256×8ビットRAM）のアドレスとして使用する。

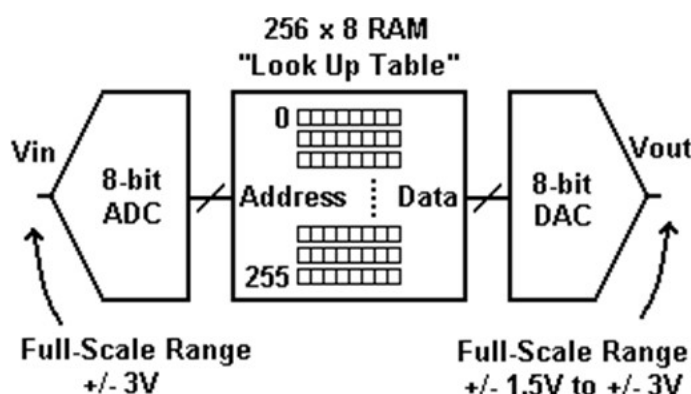


Figure 7: Block diagram of the TransferFunction CAM

LUTから得られた8ビットデータワードは、図に示すようにアナログ出力電圧へ再変換される。

7に示すように、LUTから得られる8ビットデータワードはアナログ出力電圧に再変換されます。フロントエンドの8ビットADCはフルスケール範囲が $\pm 3V$ です。入力電圧が $-3V$ から $+3V$ まで掃引すると、LUTアドレスは0から255（10進数）まで掃引する。

LUTの内容（データ）は完全に任意でユーザー定義です。データは8ビットDACによりアナログ出力電圧に変換され、そのフルスケール範囲は $\pm 3.0V$ まで柔軟に設定可能です。全256量子化レベルを動作させ最高の性能を得るためには、範囲は $\pm 1.5V$ を超える必要があります。これにより全256量子化レベルを有効化し、最高の性能を実現します。

3.3.1 伝達関数の定義

伝達関数はLUTに格納され、256個の浮動小数点数で構成されます。これらの数値は手動で入力するか、AnadigmDesigner@2ソフトウェアを介してファイル（「CSV」形式 – カンマ区切り値）から読み込むことができます。

3.3.2 入力および出力の量子化

TransferFunction CAMを使用する際は、LUTの入力信号と出力信号が8ビット量子化される点、および最大信号対雑音歪み比（SINAD）を達成するにはLUTのフルダイナミックIO範囲を使用する必要がある点に留意してください。つまり、入力信号を最大振幅が $\pm 3V$ となるようにスケーリングし、出力範囲が対称で $\pm 1.5V$ から $\pm 3.0V$ の間になるようにしてください。

3.3.3 線形化の改善

転送関数CAMは、入力値を受け取り線形化された出力値を返す単純な用途に使用できます。しかし、熱電対信号に既に強い線形成分が含まれている場合、CAMの性能は大幅に向上します。この場合、直線そのものを生成する関数ではなく、直線からの差分を用いてLUTをプログラミングすることで、はるかに優れた分解能とより正確な結果が得られます。

直線そのものを生成する関数ではなく、直線からの差分を用いてLUTをプログラミングすることで、はるかに優れた分解能、ひいてはより正確な結果を得ることができる。

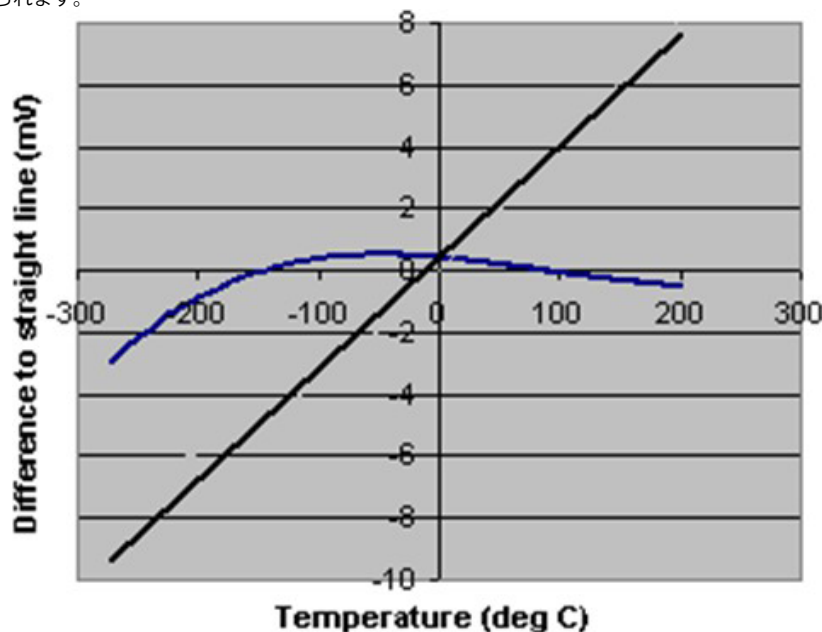


Figure 8: Type K difference from straight line

図3のK型熱電対について、直線成分およびこれからの熱電対の差分（デルタ）を図8に示す。

デルタ法を用いた線形化に必要なCAMは図9に示す。この回路では、「加算器」ブロックの下位入力に「直線」伝達関数を提供し、TransferFunction CAMが「直線」からの必要な摂動を提供する。

差分法による直線化に必要なLUTデータの計算は必ずしも容易ではなく、このためOkika Devicesでは幅広い業界標準サーモカップルに対応した計算支援用スプレッドシートを提供しています。

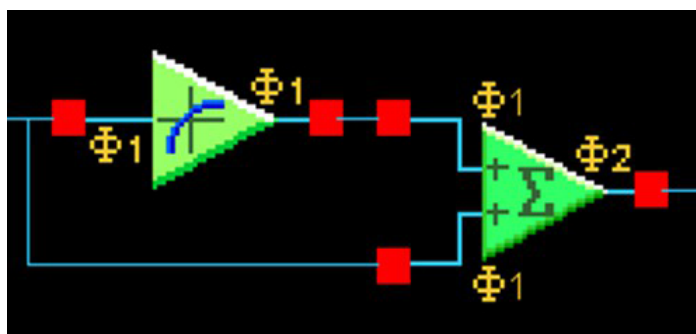


Figure 9: Straight line plus delta

3.3.4 ダイナミックレンジ

の最大化

図6に示すゲインブロックは、入力信号が0ボルトを中心に対称的に分布していることを前提としています。これが当てはまらない場合、AN231E04の全ダイナミックレンジが活用されず、性能が低下します。熱電対からの信号は通常、0ボルトを中心に対称的ではないため、DCシフトが必要です。

図6に示すゲイン回路は、図10に示すようにプログラマブルDCシフトを含むように変更されています。

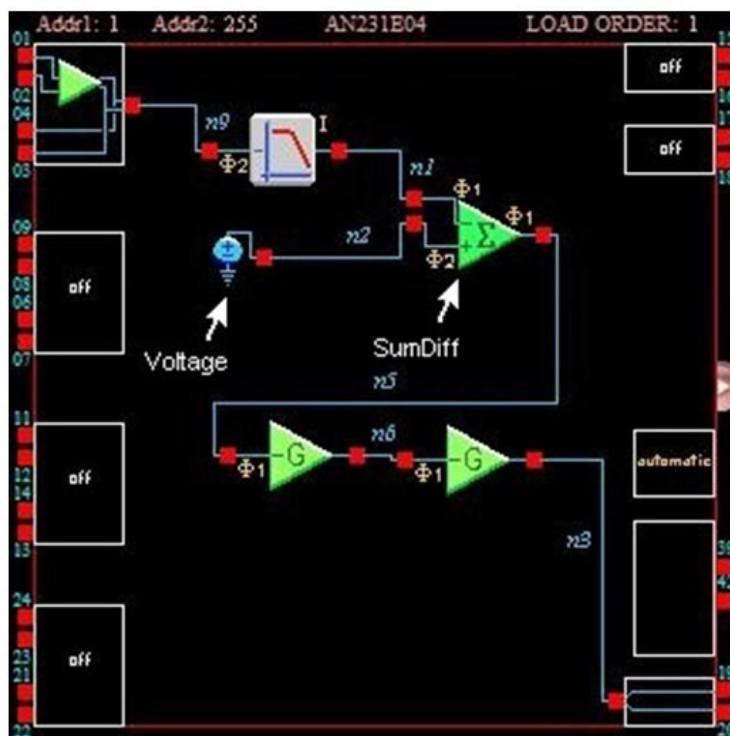


Figure 10: Maximising dynamic range by DC shifting

4.0 完成回路

図9と図10に示す回路を組み合わせることで、図11に示す完全な熱電対調整回路が実現されます。

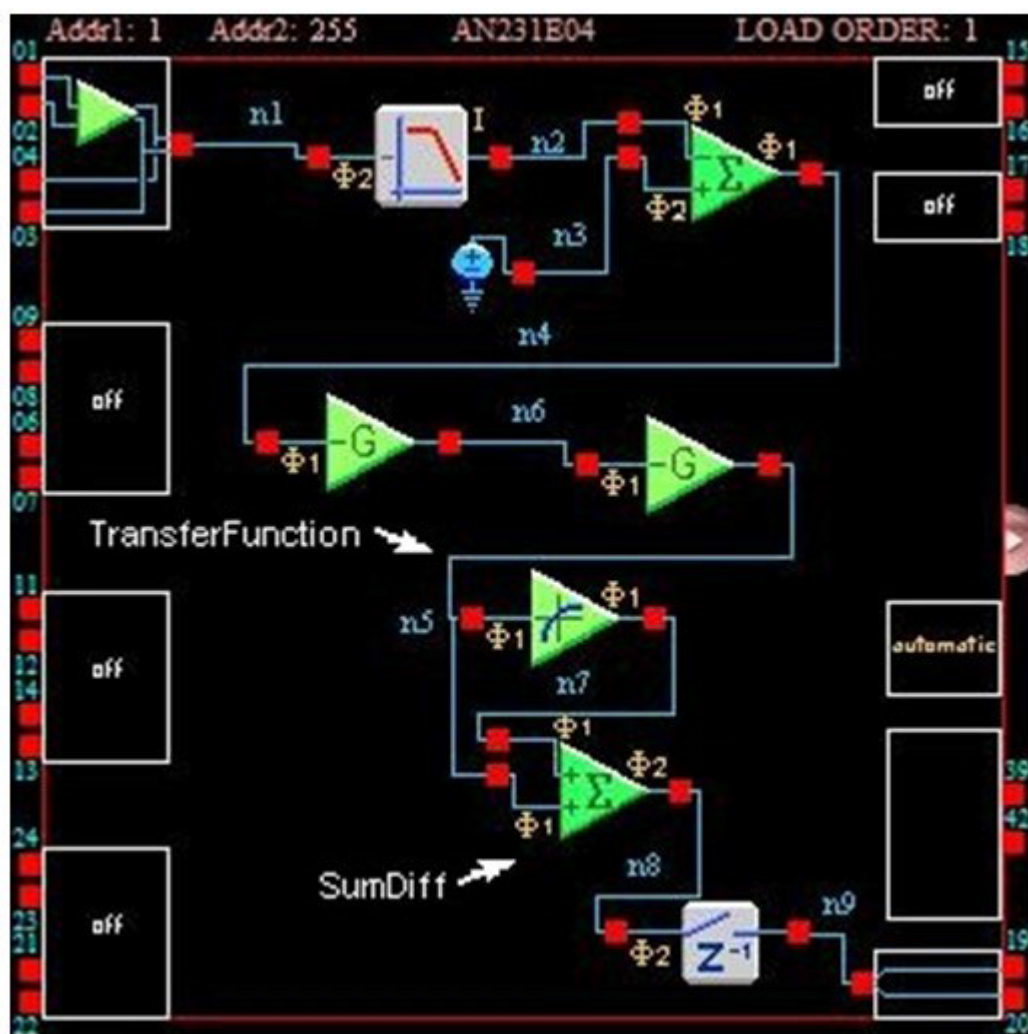


Figure 11: Complete thermocouple conditioning circuit

TransferFunction CAMは入力帰一化オフセットを補償します（これを実現するため、このCAMにはホールドオプションが設定されていません）。また、phase1を使用してサンプリングと出力の両方を行うようプログラムされています。2番目のSumDiff CAMは、phase1で両方の入力をサンプリングし（オフセットがゼロになった信号を維持するため）、phase2で自身のオフセットゼロ信号を出力します。最後に、SumDiff CAMの有効かつオフセットフリーな位相は片側のみ（もう片方はゼロに戻る）であるため、OutputCell2経由でチップ外へ信号を送る前にHold CAMを使用します。

完成した回路はOkika Devices®から入手可能で、下記に説明するプログラミングを支援するExcelスプレッドシートが付属します。

4.1 例示AD2回路の設定

AD2熱電対リニアライゼーション回路に付属するExcelスプレッドシートを開発し、迅速な解決を可能にしています。

熱電対の種類と使用温度範囲を入力すると、スプレッドシートは例示のAD2回路構成に必要な全パラメータおよび例示のAD2回路設定に必要なTransferFunction CAM LUTデータを提供します。このプロセスに関する完全な支援がスプレッドシート内で提供されます。

5 校正

AD2設計プロセスの各段階において、オフセットを最小限に抑え、プログラムされたゲインが選択したCAMの動作範囲内に確実に収まるよう細心の注意が払われています。

ただし、わずかなオフセットやゲイン誤差は避けられないため、回路を完全に最適化するには校正サイクルを実施する必要があります。

図11を参照すると、TransferFunction CAMに供給される信号は適切な利得を持ち、オフセットがないことが重要です。これにより、CAMのLUT内のデータが正しい熱電対電圧で非直線性を補正することが保証されます。したがって、推奨される校正作業（付属のスプレッドシートに詳細に記載）はノードn6に集中します。

校正は複数の段階で構成される。図11に示す例示のAD2熱電対回路は、まずスプレッドシートから導出されたデータを用いてプログラムされる。校正を開始するには、ホールドCAMを介してノードn6を監視する必要がある（ワイヤn8を削除し、ホールドCAMをノードn6に接続する）。

次に、熱電対範囲全体に分散させた複数の設定値で入力電圧を変更し、ノードn6の電圧を監視することで、ノードn6に対する達成ゲインを算出します。測定値とプログラム値の電圧ゲインに差異が生じた場合は、2つのゲインホールドCAMのゲインを変更して補正します。

AnadigmDesigner®2ソフトウェアによる回路設計中、熱電対の電圧範囲はゼロボルトを中心とするようにシフトされました。ノードn6で0ボルトを生成する正確な熱電対電圧はスプレッドシートに記載されています。残存する微小なオフセットをゼロにするため、入力はこの電圧で駆動し、SumDiff1の下側入力分岐のゲインを微調整してノードn6の電圧がゼロになるようにします。

常に正確にゼロを達成できるとは限りませんが、残存するオフセット電圧はTransferFunction CAM内のLUTを再プログラミングすることで補償可能です。スプレッドシートはこのプロセスを支援するよう設計されており、LUTを（残存）オフセット補正済みデータで容易にプログラミングできます。

新しいLUTデータはスプレッドシートに記載されているように微小なゲイン変化を伴う可能性があるため、その後ノードn6へのゲインを前述の手順に従って再校正する必要があります。

最後に、ホールドCAMをノードn6から切り離し、ノードn8に再接続する。

回路は、監視対象の熱電対温度に対する線形電圧出力を得よう最適化されました。最終回路の感度とゼロ点との切片は、以下の式を単純に再配置することで測定温度を決定します。

$$V_{out} = \text{感度} \times \text{温度} + \text{切片}$$

最後に、校正を完了するため、熱電対を入力に接続し、複数の入力温度における回路出力電圧を測定することで感度と切片を算出します。

ユーザーを支援するため、付属のスプレッドシートに校正作業の完全なステップバイステップ手順を示します。

熱電対インターフェースは完成し、アプリケーションで使用する準備が整いました。

6 性能

最終的な解決策の精度は、いくつかの要因に依存します。基準接点の温度を測定する能力は重要であり、外部ノイズ源が十分に遮断されていることも重要です。電子機器から生じる誤差は避けられず、これらの要因について以下で説明します。

CAMに起因するオフセットおよびゲイン誤差は、前述の手順を用いて校正可能であり、残存誤差は全体の誤差にわずかな寄与しか与えません。

熱電対の非直線性はLUTで補正されますが、アドレス数の有限性や補正データの量子化により一部は残存します。直線化による性能予測値は付属スプレッドシートに記載されており、使用する熱電対の種類と温度範囲の両方に依存します。

すべての測定システムにはランダム熱雑音が存在します。熱電対とのインターフェースに必要な高利得は、出力に顕著なランダム雑音をもたらす可能性があります。これは複数回の測定を行うことで平均化できます。最終的な測定値の不確かさは、測定回数に平方根を引いた値だけ減少します。

要約すると、達成される精度は上記のすべての要因に依存し、スプレッドシートは適切な平均化によって達成可能な精度を示す良い指標となる。

7 要約

本アプリケーションノートでは、熱電対の動作原理と冷接点補償の代替手法について説明しました。AnadigmDesigner®2ソフトウェア回路は段階的に開発され、飽和なしに高利得を実現する方法と、高精度熱電対ソリューションに必要な線形化技術を示しています。

完成したAnadigmDesigner®2ソフトウェア回路は、迅速な開発を支援するスプレッドシートとともに、Okika Devices社から入手可能です。

詳細は www.okikadevices.com をご覧いただくか、Okika Devices テクニカルサポートまでメールでお問い合わせください。 contact@okikadevices.com