

*Application Note***バッテリ管理システム向け BQ769x2 と TMP6x による温度測定性能の向上**

Kian Lin

概要

迅速かつ正確な温度測定の実現は、異常な状況からバッテリセルを保護するために、バッテリ管理システム(BMS)にとって不可欠です。BMSは、マルチストリング バッテリパックに対応するために、十分な温度測定チャネルをサポートする必要があります。GB/T 34131-2023のような一部の規格では、-20°Cから65°Cの範囲で、すべての単一セルの温度を±1°C未満の誤差で測定することが求められています。

このドキュメントでは、BQ769x2シリーズのバッテリモニタとTMP6xリニアサーミスタを使用して、サーミスタ測定チャネルを拡張し、温度測定の精度を向上させる方法をユーザーに示します。

目次

1 はじめに	2
2 BQ769x2 温度測定システム	3
3 サーミスタ測定チャネルを拡張するためのマルチプレクサ	4
4 TMP6x を用いた温度の計算	6
5 温度精度の改善	7
5.1 マルチプレクサの選定.....	7
5.2 サーミスタ端子のコンデンサ.....	7
5.3 固定抵抗の較正.....	8
5.4 テスト結果.....	9
6 まとめ	9
7 参考資料	9

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

バッテリが動作する温度は、バッテリの性能、充電、放電、および寿命に大きく影響します。高温環境に長時間さらされると、劣化が加速し、熱暴走や爆発につながる可能性があります。一方、低温ではバッテリの内部抵抗が増加し、充電容量が大幅に低下します。一般的に、Li-ion バッテリは、充電温度範囲 $0 \sim 45^{\circ}\text{C}$ 、放電温度範囲 $-20 \sim 6^{\circ}\text{C}$ での動作が推奨されています。

この課題に対処するため、BMS はバッテリからの温度データを監視し、そのデータをホストマイコンに転送してバッテリ温度を制御します。シリコンベースのリニアサーミスタである TMP61 は、 $0^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ の範囲で $\pm 1\%$ の許容誤差を持ち、 $-65^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ の広い動作範囲を備えているため、温度測定に推奨されます。高精度バッテリ監視および保護デバイスである BQ76972 は、リチウムイオン、リチウムポリマー、リチウムリン酸系セルを使用するアプリケーション向けに特別に設計されており、TMP61 の電圧測定に使用されます。

BQ76972 は、最大 9 個の外付けサーミスタ測定をサポートできます。しかし、セル数の多いアプリケーションでは、各セルの温度を測定するために、より多くのチャネルが必要になります。このため、BQ76972 と組み合わせてマルチプレクサ回路を使用することで、さらに多くのサーミスタ測定をサポートできます。

本書では、温度測定チャネルの拡張および測定精度向上のための設計上の考慮事項について説明します。

2 BQ769x2 温度測定システム

BQ769x2 デバイスは、マルチファンクション端子 (TS1, TS2, TS3, CFETOFF, DFETOFF, ALERT, HDQ, DCHG, DDSG) を使用して、最大 9 個の外付けサーミスタをサポートできます。これら 9 つの端子はすべて、内部マルチプレクサを介して 1 つの内部プルアップ抵抗に接続されているため、一度に電流を引き込むサーミスタは 1 つだけとなります。これにより、複数のサーミスタを使用する場合でも、最小限の消費電力で動作できます。

内部プルアップ抵抗は $18\text{k}\Omega$ または $180\text{k}\Omega$ (または無効) の 2 つのオプションから選択できるようになっています。抵抗値は工場出荷時の製造工程で測定され、温度計算時に使用するためデバイス内部に保存されています。図 2-1 は、BQ769x2 の温度測定システムのブロック図を示しています。

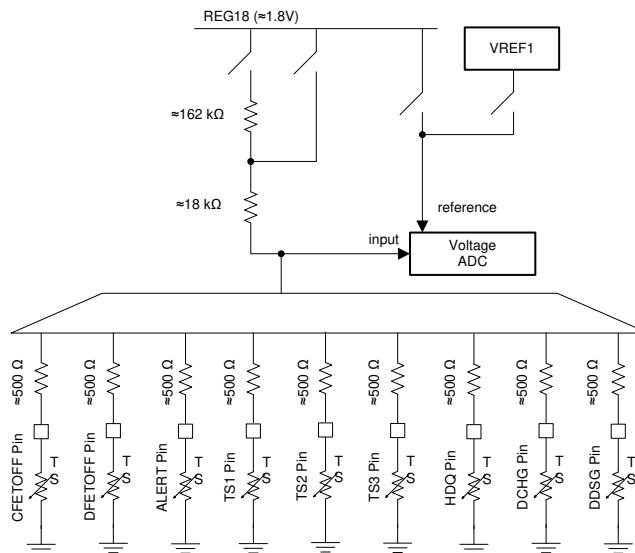


図 2-1. BQ769x2 温度測定システム

サーミスタ入力として設定された端子の温度は、温度モデルレジスタに特定の係数を書き込んで BQ769x2 の内部多項式を使用して計算するか、ホストマイコンが測定電圧の生データを読み取って計算することで求めることができます。

電圧の生データは、図 2-2 に示すように、複数の測定スロットで構成された連続的な反復測定ループ内で取得されます。

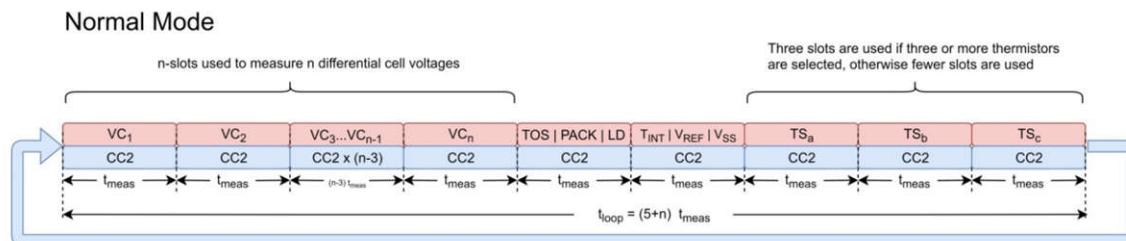


図 2-2. BQ769x2 の通常モード測定ループ

各測定ループ (ADCSCAN) には、最大 21 の測定スロットが含まれます。最後の 3 つのスロットは、端子がサーミスタ入力または ADCIN に設定されている場合にのみ、マルチファンクション端子の測定に使用されます。9 つの端子 (サーミスタ入力または ADCIN に設定されている場合) は、CFETOFF, DFETOFF, ALERT, TS1, TS2, TS3, HDQ, DCHG, DDSG の順に測定されます。この測定シーケンスは、完全なデータを 1 回の FULLSCAN サイクルとして取得するため 3 回の測定ループを要します。 t_{meas} スロット時間のデフォルト値は 3ms ですが、[FASTADC] ビットを設定することで 1.5ms に短縮できます。ただし、その場合は変換分解能が低下します。1 回の ADCSCAN は 31.5ms (FASTADC = 1) または 63ms (FASTADC = 0) かかるため、1 回の FULLSCAN は 94.5ms (FASTADC = 1) または 189ms (FASTADC = 0) かかります。内部温度多項式は 250ms ごとに計算されます。

3 サーミスタ測定チャネルを拡張するためのマルチプレクサ

しかし、これらの端子の多くは、ホストプロセッサへのアラーム割り込みや FET のターンオフを行うためのハードウェアピン制御など、システムで必要となる他の機能をサポートする場合もあります。アプリケーションで BQ76972 がネイティブでサポートできるよりも多くのサーミスタのサポートを必要とする場合、図 3-1 に示すように、追加のマルチプレクサ回路を組み込むことで対応できます。

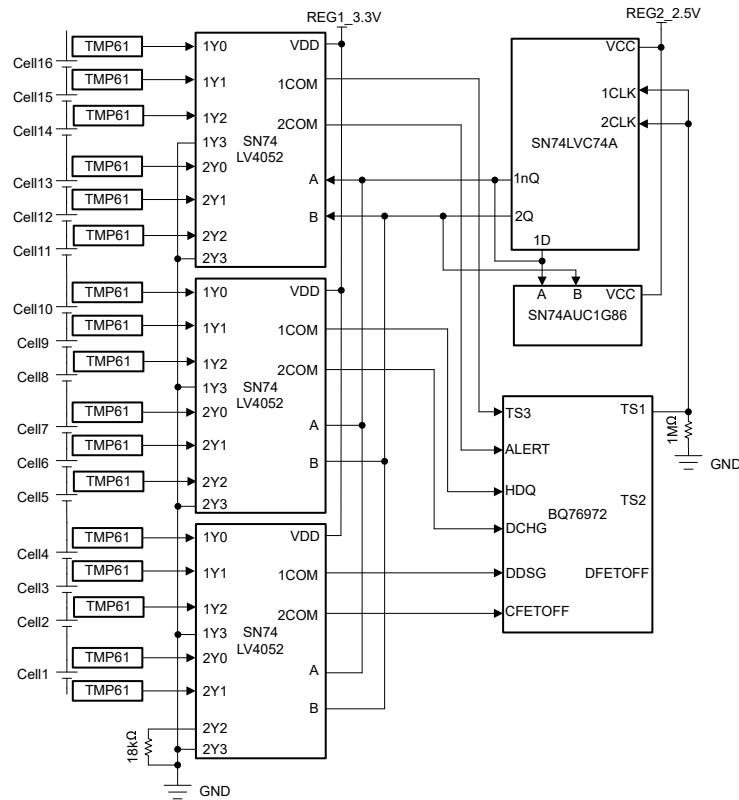


図 3-1. サーミスタ マルチプレクサのブロック図

6 つのマルチファンクション端子は 4:1 マルチプレクサによって多重化され、この構成では 1 つの BQ76972 により、合計 17 個のサーミスタ、1 個の固定抵抗、6 個のグランド電圧が測定されます。TS2 端子はウェイクアップ機能のために予約されており、DEFTOFF 端子は充電および放電 MOSFET の高速ターンオフに使用されます。設計者が一部のピンを他の用途に確保したい場合、多くのバリエーションが考えられます。これらの回路は、このセクションの残りの部分で説明されている基本的な原理に基づいて変更できます。

この設計では 9 個の端子をサーミスタ入力として設定しているため、9 個の端子を測定するのに 3 回の ADCSCAN が必要となり、これを FULLSCAN と呼びます。1 回の FULLSCAN サイクルの時間は、FASTADC = 1 の場合は約 94.5ms、FASTADC = 0 の場合は約 189ms です。この設計では 4:1 マルチプレクサを使用して 17 個のサーミスタを測定するため、1 回の温度センササイクル (FULLTEMP) は、FASTADC = 1 の場合は約 378ms、FASTADC = 0 の場合は約 756ms かかります。詳細については、「[バッテリ監視システムにおける電圧測定精度の改善](#)」を参照してください。

MUX を変更するタイミングは、変更が測定の途中で行なわれた場合に測定データが破損しないように、BQ76972 の通常の測定ループと適切に調整する必要があります。このデザインでは、図 3-1 に示すように、MUX 変更のタイミングを自動的に制御する手法が採用されています。TS1 端子は、1MΩ の抵抗と組み合わせて、外部バイナリカウンタ用のクロック信号を生成するために使用されます。このバイナリカウンタは、デュアルチャネル D 型フリップフロップと OR ゲートを用いることで簡単に構成でき、その構成を 図 3-2 に示します。

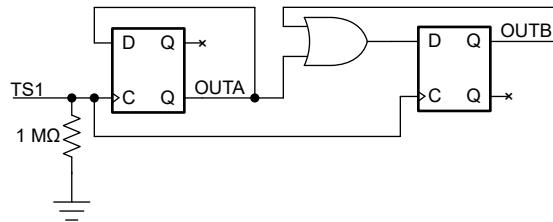


図 3-2. バイナリカウンタ

図 3-3 は、FASTADC = 1 の場合のバイナリカウンタ出力信号を示しています。

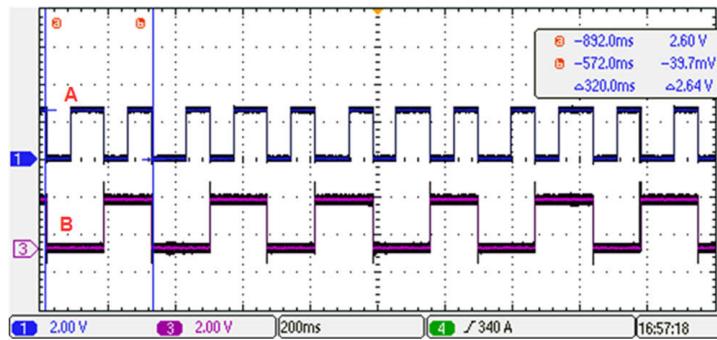


図 3-3. バイナリ カウンタの出力信号

カウントはマルチプレクサ (MUX) を制御し、各 MUX の 3 つのサーミスタと 1 つのグランドを 6 本のピンのいづれかに切り替えるため、合計最大 18 個のサーミスタをサポートします。グランド チャネルはマルチプレクサ回路の診断に使用されます。つまり、1 つのピンで 4 回の測定ごとにグランドが検出される場合、マルチプレクサは正常に動作していることになります。18 のチャネルのうちの 1 つは、温度測定キャリブレーション用に高精度の固定抵抗に接続されています。

9 本のピンは、CFETOFF、DFETOFF、ALERT、TS1、TS2、TS3、HDQ、DCHG、および DDSG の順序で測定されますが、BQ76972 はサーミスタ入力として設定されているピンのみを測定します。TS1 はクロック入力として使用されるため、TS2 は実際のサーミスタとしては使用されません。これは、TS2 は TS1 ピンの直後に測定されるため、測定に影響を及ぼす可能性がある MUX のセトリング過渡を回避するためです。BQ76972 のピン温度は 3 つのサーミスタと 1 つのグランドの間で移動するため、ホストマイコンを介してサーミスタ関連の温度保護を実装する必要があります。

マルチプレクサは FULLSCAN サイクルごとに切り替わり、内部の多項式計算サイクルとは同期していないため、ユーザーは内部温度多項式を使用する代わりに、ADC の生データを使用して温度を計算する必要があります。ADC 生データを使用して温度を計算するために、ユーザーは次の手順を実行できます。

1. R_{pu} と R_{pad} の格納されているプルアップ抵抗とパッド抵抗を BQ769x2 から読み出します。
2. 選択した多機能ピンを 設定:構成:ALERT ピン構成、CFETOFF ピン構成、DFETOFF ピン構成、TS1 構成、TS2 構成、TS3 構成、HDQ ピン構成、DCHG ピン構成、および DDSG ピン構成 の各構成レジスタで、サーミスタ測定に構成します。
3. 設定:アラーム:デフォルトアラーム マスクレジスタで FULLSCAN マスクビットを設定します。
4. 0x62 アラームステータスレジスタの () [FULLSCAN] ビットを監視して、測定サイクルが完了するのを待ちます。
5. 0x0076 DASTATUS6 () および 0x0077 DASTATUS7 () サブコマンドを送信し、多機能ピンの ADC の生カウントを読み取ります。
6. 生 ADC カウントに $0.358\mu V$ LSB を乗算して、測定されたサーミスタ電圧 V_{sense} を取得します。各 FULLTEMP サイクルで、 V_{sense} は一度、約 0V になります。
7. マイコン内で、 V_{sense} 、 R_{pu} 、 R_{pad} 、およびマルチプレクサ スイッチ抵抗 R_{on} からサーミスタ抵抗 R_T を逆算し、 R_T を温度値に変換します。

4 TMP6x を用いた温度の計算

シリコンベースのリニアサーミスタである TMP61 は、線形の正の温度係数 (PTC)を持ち、より高い温度測定精度を得るために使用されます。TMP61 は、全温度範囲にわたって良好な線形特性を示します。単なる抵抗デバイスである NTC とは異なり、TMP61 の抵抗はデバイスを流れる電流の影響を受け、その抵抗値は温度に応じて変化します。**TMP6-THERMISTOR-DESIGN** は、固定 10kΩ のバイアス抵抗を用いた TMP61 の R-T テーブルのみを提供しているため、BQ769x2 で TMP6x を測定する場合には、TI が提供する専用の R-T テーブルを使用する必要があります。

V_{sense} を温度に変換する一般的なソフトウェア手法の 1 つは、ルックアップテーブルを使用する方法です。この方法は R-T テーブルの設定が簡単である一方、マイコンのフラッシュメモリ要件が増加し、大規模な配列処理プログラムが必要になります。また、許容差のばらつきや温度係数などのシステム誤差により、R-T テーブルからの乖離が生じ、精度が低下する可能性もあります。

しかし、TMP6 リニアサーミスタを使用する場合、温度変換にはより優れたアルゴリズムが利用でき、それが [式 1](#) に示す 5 次多項式回帰モデルです。

$$T = A5 \times R_T^5 + A4 \times R_T^4 + A3 \times R_T^3 + A2 \times R_T^2 + A1 \times R_T + A0 \quad (1)$$

T = 温度 (摂氏)、 R = 測定抵抗値、 $A0 \sim A5$ = 算出された多項式係数を示します。 R_T は、 V_{sense} 、 R_{pu} 、 R_{pad} 、および R_{on} から逆算され、その式は [式 2](#) に示されています。

$$R_T = \frac{V_{sense}}{1.8 - V_{sense}} \times R_{pu} - R_{pad} - R_{on} \quad (2)$$

係数値を取得するために、R-T テーブルに含まれる一連のデータ点に最も良く一致するよう、5 次多項式フィッティングが実行されます。TMP61DEC パッケージの R-T テーブルに基づき、得られた係数は次のとおりです。

- $A0 = -3.513960E+02$
- $A1 = 9.021910E-02$
- $A2 = -1.011904E-05$
- $A3 = 7.112242E-10$
- $A4 = -2.612301E-14$
- $A5 = 3.863465E-19$

これらの係数は、1.8V のバイアス電圧、18kΩ のプルアップ抵抗、および TMP61DEC パッケージ専用の値です。

5 温度精度の改善

TMP61 は、「[低成本 TMP6x リニアサーミスタで温度全域にわたり \$\pm 1^{\circ}\text{C}\$ 以上の精度を達成する方法](#)」で示されている高精度を達成するための手法を備えており、これには次の内容が含まれます。

- TMP6x およびサーミスタバイアス回路内の他の部品による許容誤差を取り除くために、単点オフセット補正を実施する方法。
- ノイズを低減し、測定精度を高めるために、オーバーサンプリングおよびソフトウェアフィルタリングを実装する方法。

これらの方法に加えて、温度測定精度を向上させるために、システムレベルでの追加の検討事項も実装できます。

5.1 マルチプレクサの選定

マルチプレクサの選定も、温度測定の精度に影響します。主要な仕様および特性は、オン抵抗 (R_{ON})、オン容量 (C_{ON})、オン/オフ時のリーク電流 ($I_{\text{ON}}, I_{\text{OFF}}$) です。オン抵抗は信号損失や劣化に寄与するため、 R_{ON} が低いデバイスを選ぶ場合にはトレードオフも考慮する必要があります。総オン容量についても、応答時間、安定時間、およびファンアウト制限に影響するため、注意が必要です。リーク電流は、スイッチがオンのときもオフのときも DC 誤差に寄与しますが、この [図 3-1](#) 構成ではオン状態のリーク電流のみが誤差を引き起します。

ユーザは、マルチプレクサによる誤差や信号歪みを最小限に抑えるため、精密マルチプレクサを選択できます。たとえば、TMUX1109 は、典型値 R_{ON} が 2.5Ω 、 C_{ON} が 35pF 、 I_{ON} が 3nA の 2 チャネル精密マルチプレクサであり、SN74LV4052A の代替として使用できます。

5.2 サーミスタ端子のコンデンサ

サーミスタはセルに取り付けられることが多く、BQ769x2 まで戻るために長い配線が必要になる場合があります。そのため、予期せぬノイズをフィルタする目的で、サーミスタ端子からデバイスの VSS にコンデンサを追加することが有効な場合があります。ただし、コンデンサ値が大きすぎると、サーミスタにバイアスを印加して周期的に測定する際の安定時間に影響するため、注意が必要です。BQ769x2 のデータシートで推奨されている一般的なルールとして、回路の時定数を測定時間の 5% 未満に保つことが挙げられます。設定:構成:電源構成 [FASTADC] = 0 の場合、測定時間は約 3ms であり、[FASTADC] = 1 の場合、測定時間は半分の約 1.5ms になります。

温度精度を確保するためには、試験結果に基づき、コンデンサの値はより小さくすることが推奨されます。1nF のフィルタコンデンサを使用して $18\text{k}\Omega$ の固定抵抗を測定した場合、サーミスタ端子電圧の立ち上がりおよび立ち下がりが遅くなる様子が [図 5-1](#) に示されています。この影響により、2mV の電圧測定誤差が発生し、温度測定精度にも影響を及ぼします。[図 5-2](#) では、コンデンサ値を 220pF に小さくした場合の結果を示しています。測定電圧は、端子にコンデンサを使用しない場合の値に近くなります。

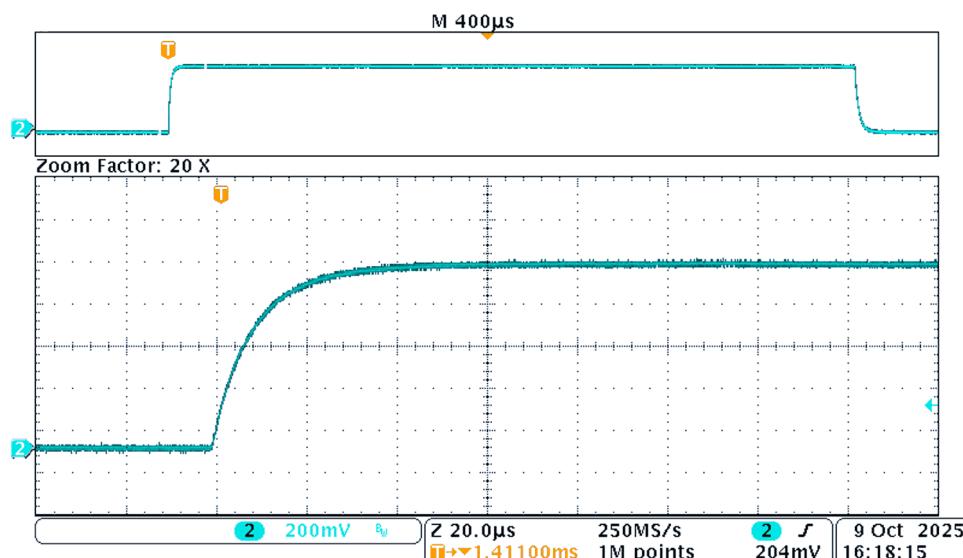


図 5-1. サーミスタ端子電圧 (1nF コンデンサ、 $18\text{k}\Omega$ 固定抵抗)

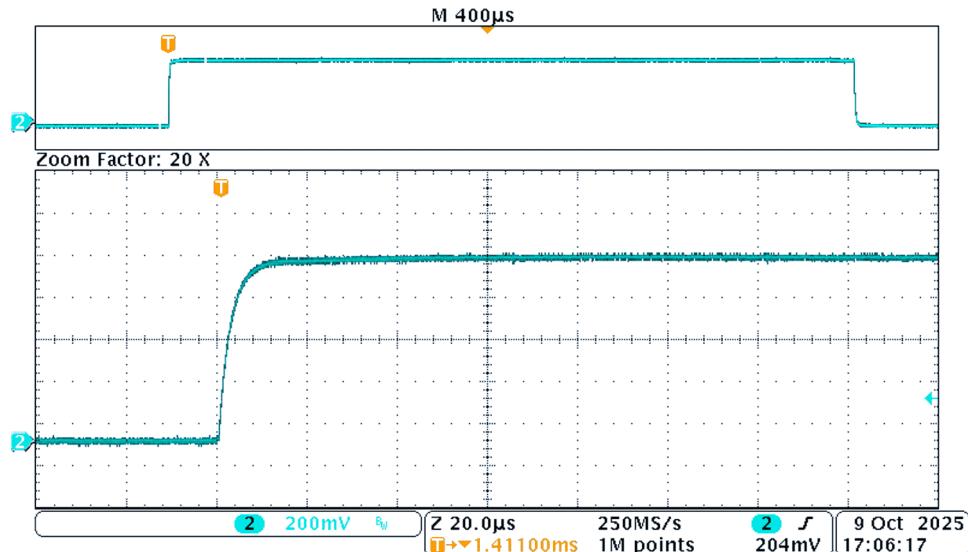


図 5-2. サーミスタ端子電圧 (220pF コンデンサ、18kΩ 固定抵抗)

5.3 固定抵抗の較正

TMP61 の抵抗値は $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で $6\text{k}\Omega$ から $18\text{k}\Omega$ に変化し、これに対応する電圧は $0.45 \sim 0.9\text{V}$ となります。この測定電圧範囲は、 $-0.2 \sim 5.5\text{V}$ の ADC 入力範囲と比較して狭いため、ADC に起因する誤差の差は大きくありません。

サーミスタ端子の一方に接続された固定抵抗は、ADC の誤差を較正するために使用できます。より高い精度を得るためにには、低抵抗許容差および低温度係数の抵抗を推奨します。

本書では、異なる固定抵抗値を使用した場合の、実測電圧と理論電圧の誤差を評価しており、その結果を [表 5-1](#) に示します。

表 5-1. 固定抵抗による ADC 誤差

測定電圧	抵抗	理論電圧	電圧誤差
508.18mV	6796Ω	510.38mV	2.20mV
687.82mV	11006Ω	690.28mV	2.46mV
896.25mV	17960Ω	898.45mV	2.20mV

各測定における ADC 誤差は大きく変わりません。そのため、各測定に対して同じ ADC 誤差を加えることで、測定電圧を較正できます。

5.4 テスト結果

TMP6x サーミスタは、従来の負の温度係数 (NTC) サーミスタと比較して、温度全体で誤差が比較的一貫しているという特長があります。そのため、本書では TMP61 の許容誤差を、単一温度点での誤差を差し引くだけで温度全体にわたって較正しています。

固定抵抗を使用して ADC の誤差を較正し、さらに 0°C で単点オフセット補正を行って TMP61 の許容誤差を補正した後、測定された温度誤差を 図 5-3 に示します。誤差は -20°C から 125°C の範囲で ±1°C 未満です。

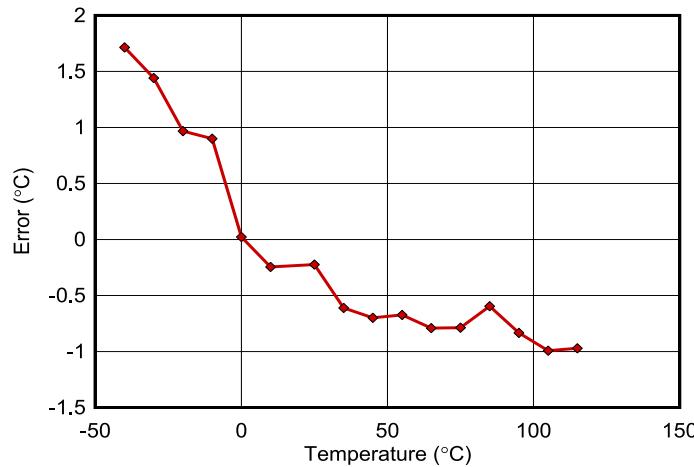


図 5-3. 温度測定精度試験結果

6 まとめ

本書では、TMP6x を使用して温度を測定する際の BQ769x2 の設計上の考慮事項について紹介します。推奨される較正方法を適用した後の試験結果では、-20°C から 125°C の範囲で誤差が ±1°C 未満であることが示されています。

7 参考資料

- テキサス インスツルメンツ、[『BQ769x2 テクニカルリファレンスマニュアル』](#)、テクニカルリファレンスマニュアル。
- テキサス インスツルメンツ、「[NTC サーミスタから TMP6 リニアサーミスタへの置換ガイド](#)」、ユーザーズガイド。
- テキサス インスツルメンツ、「[低コスト TMP6x リニアサーミスタで温度全域にわたり ±1°C 以上の精度を達成する方法](#)」、アプリケーションノート。
- テキサス インスツルメンツ、「[バッテリ監視システムにおける電圧測定精度の改善](#)」、アプリケーションノート。

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默示保証、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、明示的または默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、(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 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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月