

Application Note

リードスイッチおよび磁気抵抗スイッチを、コスト効率が高く低消費電力のホール効果スイッチに置き換える



Scott Bryson

概要

動作寿命を延ばし、ユーザーエクスペリエンスを向上させるために、多くのアプリケーションでは、機械的な摩耗、酸化、接点表面への汚染物質の堆積により経時的に故障しやすい機械的接点スイッチの使用を排除するために、磁気スイッチを採用しています。家電製品、錠前、ドアやウィンドウの制御、流量計などの多くのアプリケーションでは、電力効率を維持するために総消費電力を最小限に抑えることが重要です。機械式スイッチには、回路が開いているときに消費電力がゼロになるという利点がありますが、スイッチには長期的な信頼性の課題があります。リードスイッチ、ホール効果センサ、トンネル磁気抵抗センサーを含む磁気設計は、より信頼性の高い低消費電力の代替品として一般的に使用されています。

目次

1 はじめに.....	1
1.1 リードスイッチ.....	1
1.2 ホール効果センサ.....	3
1.3 トンネリング磁気抵抗 (TMR) センサ.....	5
2 設計上の考慮事項.....	6
2.1 技術の複雑さとコスト.....	6
2.2 感度軸.....	6
2.3 機械的制約.....	7
2.4 消費電力.....	8
3 まとめ.....	9
4 参考資料.....	10
5 改訂履歴.....	11

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

リードスイッチ、ホール効果センサ、およびトンネル型磁気抵抗 (TMR) センサはすべて、システムの信頼性を高める実用的な選択肢であり、各技術は多少異なる原理で動作します。ここでは、各技術を簡単に紹介した後、設計の複雑さ、機械的制約、消費電力の観点からそれぞれを比較し、各磁気スイッチ技術に関連する利点と課題について検証します。

1.1 リードスイッチ

前述の 3 つの技術 (リードスイッチ、ホール効果センサ、TMR センサ) のうち、リードスイッチのみがゼロ電力設計です。

リードスイッチは通常、[図 1-1](#) で示される強磁性材料で作られた 2 つまたは 3 つの金属接点で構成されています。2 つの金属接点を持つリードスイッチは、十分に強い磁場が存在するときに閉じる 1 つの接点を持ちますが、3 つの接点を持つリードスイッチは、磁石の有無に応じて 2 つの経路を切り替える共通ピンを持つことができます。どちらの場合も、これらの接点はリードスイッチメーカーによって決定されるノーマルクローズまたはオープンポジションを持つことができます。

リードスイッチはまた、接触抵抗を増加させたり、電気的接触を完全に遮断する可能性のある汚染物質や表面の酸化の蓄積を防ぐために、真空で密閉されるか、不活性ガスで充填されます。



図 1-1. 典型的なリードスイッチ

リードスイッチの一般的な用途は、磁気を通しやすい表面の裏側にスイッチを埋め込み、近くの磁場との相互作用によってスイッチを制御することです。可動対象に対して機械的なストライカープレートを配置する代わりに、リードスイッチの近傍に移動できる永久磁石があれば十分です。

リード自体は、磁場を導くことができる強磁性材料で作られています。正しく配置されると、磁場は両方のリード間に流れ、それぞれに小さなトルクがかかります。これにより、2枚のリードが互いに引き寄せられ、電気回路が閉じられます。磁石が存在 [図 1-2](#) すると、2つのリードの先端間に集中した磁束密度が生じることに注意してください。

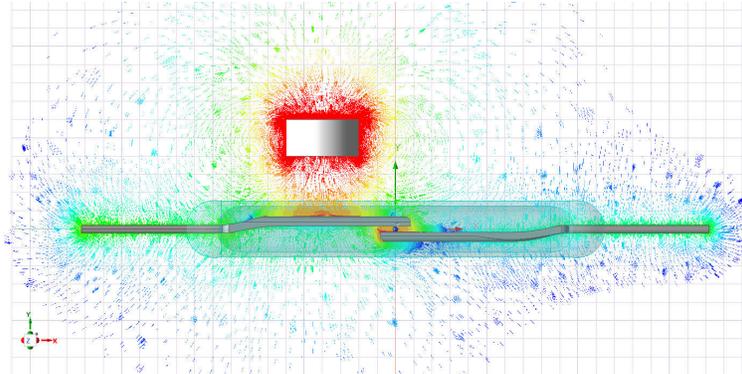


図 1-2. リードスイッチのシミュレーション応答

リードスイッチを閉じるために必要な磁石の具体的な配置と向きは、デバイスの構造によって異なります。その結果、2つのリードの間に生じる磁界は、リードが互いに屈曲するのに十分な強さでなければなりません。磁石が接合部から離れすぎていると、両方のリードに十分な磁界が流れない可能性があります。磁石の位置を水平方向にオフセットすることで、[図 1-3](#) のリード間に集中する磁界の大きさが減少します。

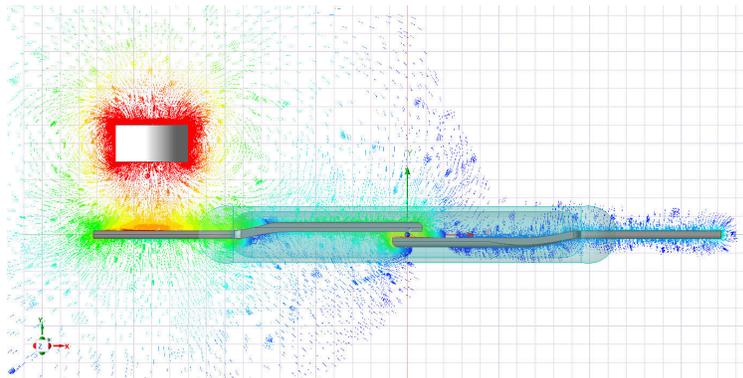


図 1-3. リードスイッチのオフセット シミュレーション

リードスイッチのメーカーから感度図が提供されている場合があります。これに従ってスイッチング用途に磁石を適切に配置する必要があります。

1.2 ホール効果センサ

ホール効果は、エドウィン・ホールによって発見されました。ホールは、磁場が直交して印加された導体に電流を流すと、ローレンツ力によって導体全体に測定可能な電位差が生じることを発見しました。

ローレンツ力は、[図 1-4](#) で示され [式 1](#) で説明されているように、電磁場中を移動する荷電粒子から生じます。

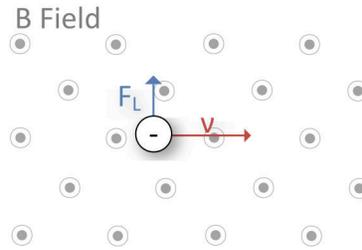


図 1-4. ローレンツ力

$$\vec{F}_L = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

磁場に電流を流すときのこの挙動を考えると、[図 1-5](#) に示すようなホール効果が観測されます。

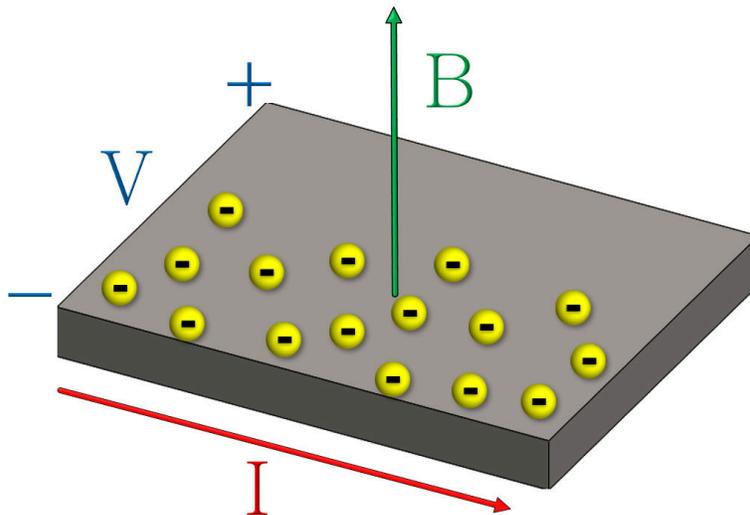


図 1-5. ホール効果

導電性のホール素子に電流を流し、磁場中に置くと、電流に直交する導体全体に生じる電圧に直線的な変化が生じます。これは、ソース磁石の位置を追跡するのに役立つ多くの出力形式を生成する際に特に有用です。

ここで特に注目すべきは、スイッチ形式です。[図 1-6](#) にあるようなコンパレータ構造で増幅および駆動されると、この電圧は [図 1-7](#) で示したバイナリ出力応答を生成するのに使用できます。このデバイスは、さまざまな動作スレッシュホールドおよび解除スレッシュホールド (一般にそれぞれ B_{OP} および B_{RP} と呼ばれる) を目標に設定でき、消費電流を制限するためにさまざまな間隔でサンプリングするように設定できます。

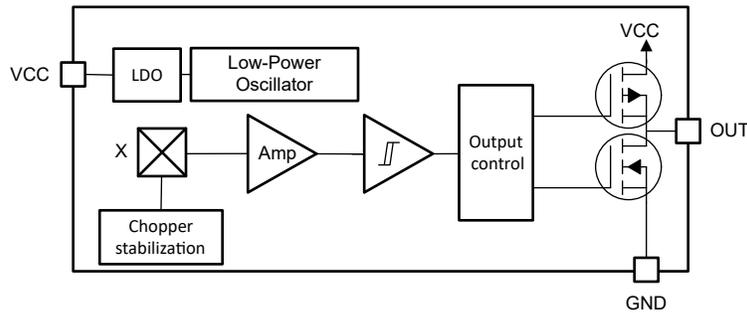


図 1-6. TMAG5233 のブロック図

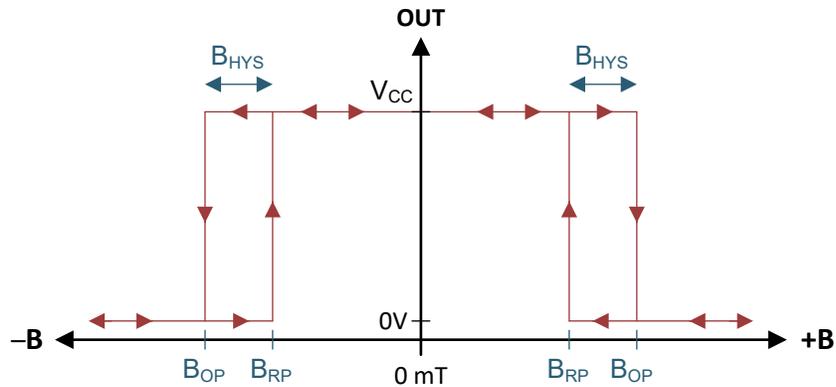


図 1-7. オムニポーラ スイッチ出力

この技術は、半導体プロセスに容易に統合できます。従来、ホール素子は PCB 表面に垂直な感度で構成され、[図 1-8](#)と同様に **B** フィールド ベクトルの **Z** 成分を検出していましたが、新しいデバイスでは、**X** 方向または **Y** 方向のいずれかの水平ベクトル成分を検出する面内検出素子を実装することもできます。この感度を [図 1-9](#) に示します。

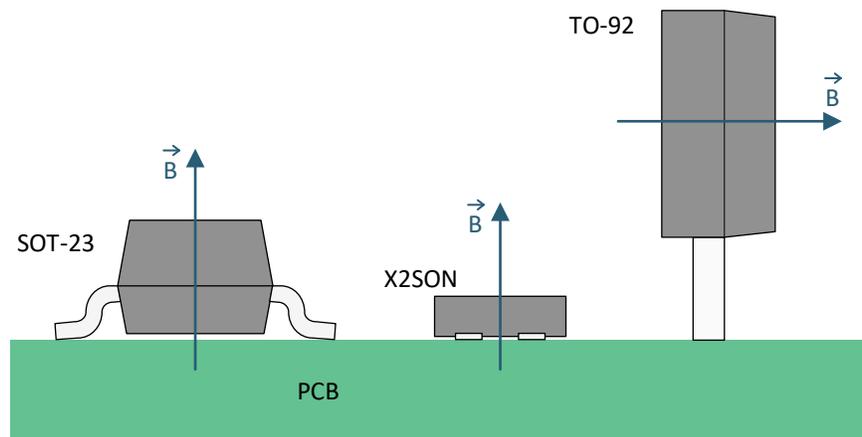


図 1-8. DRV5032 垂直感度

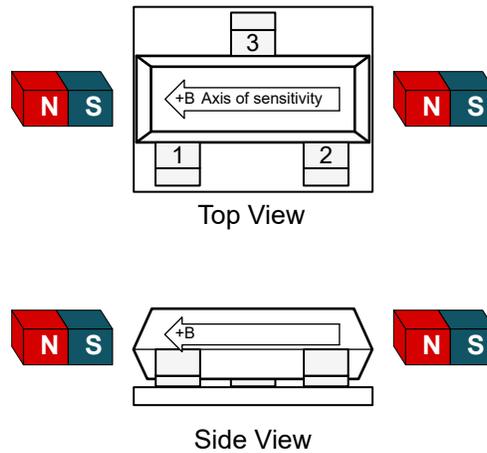


図 1-9. TMAG5233 面内感度

電流が最小の抵抗経路を流れるのと同様に、磁界もその伝播を妨げにくい材料 (低磁気抵抗) に自然と集中します。フラックス コンセントレーターは、磁界に対して低損失の経路を提供するよう設計された低磁気抵抗構造です。フラックス コンセントレーターを戦略的に活用することで、エンジニアは磁界を効果的に誘導・制御し、特定の設計要件を満たすことが可能になります。

TMAG5134 のようなデバイスは、ホール素子の感度を向上させるためにフラックス コンセントレーターを設計に直接組み込んでいます。これらのパッケージ内コンセントレーターは、低磁気抵抗の経路を形成し、磁界を集積ホール センサーに誘導・集中させます。特筆すべきは、フラックス コンセントレーターが受動的に動作し、消費電力を伴わずに感度を高め、 $\pm 1\text{mT}$ という低いしきい値の達成を可能にする点です。

1.3 トンネリング磁気抵抗 (TMR) センサ

材料科学と量子力学の進歩に伴い、極薄の誘電体層で区切られた磁気構造間で発生する電子のトンネリングを利用した新しい技術が磁気スイッチに採用されつつあります。

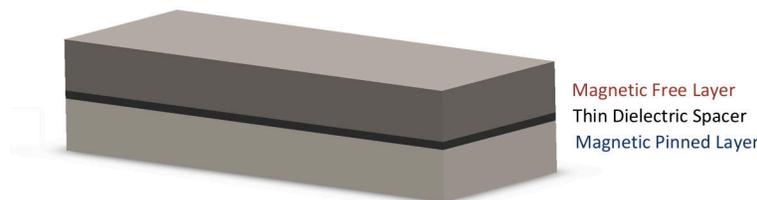


図 1-10. 簡略化された TMR スタックアップ

図 1-10 に示されている上下のブロックは、実際には TMR 効果を生み出すことができる導電性磁性材料の複雑な積層です。製造中、ボトム層には特定の磁化が適用され、一般にピン層と呼ばれています。また、トップ層は自由層とみなされます。

印加される磁場が構造体に導入されると、材料の全体的な抵抗は磁場の相対的な方向によって変化します。印加される磁気ベクトルが基材層の磁化に平行な場合、相対インピーダンスは最大になり得ますが、印加される磁場が電流の流れに反平行な方向に近づくと、インピーダンスは図 1-11 に示す最小値まで低下します。

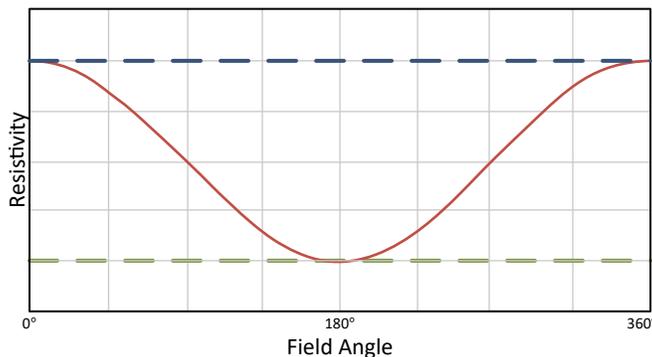


図 1-11. TMR インピーダンス図

この技術の通常の製造プロセスの結果、TMR センサは通常、XY 平面内で印加される磁場に対してセンサが感度を持つように構成されています。

2 設計上の考慮事項

さて、各技術の基本動作が説明されたところで、実際の設計においてそれぞれをどのように考慮するのが最良であるかが問題となります。実際には、設計の機械的堅牢性、センサの感度、全体的なコスト、消費電力が重要な決定要因になります。

2.1 技術の複雑さとコスト

どのようなスイッチング技術であれ、その複雑さはセンサのサイズとコストに直接影響を与えます。

ホール効果センサは小型化が可能で、最新の半導体プロセスに容易に統合できます。そのため、これらのデバイスは一般に TMR またはリード スイッチよりも低コストで製造および販売されています。

リード スイッチは、ガラス管やその他の密閉された筐体に封入され、このプロセスにより、より大きく、よりコストのかかるパッケージングが必要となります。これらのエンクロージャは壊れやすいため、取り扱いコストや設置コストが増加し、物理的な損傷によりこれらのデバイスを時間内に交換する必要性が生じるリスクが高くなります。

TMR センサの作成に関わる複雑な材料のスタックは、すべての半導体製造フローでは一般的でない特殊な蒸着装置を必要とし、ピン止め層を磁化する追加ステップを必要とします。プロセス工程の増加と特殊な材料により、TMR はホール効果センサよりも本質的に高価になります。低消費電力のホール効果センサーである [TMAG5233](#)、[TMAG5133](#)、または [TMAG5134](#) は、より実用的な選択肢となり得ます。

2.2 感度軸

各センサタイプの構造方法を考慮し、スイッチング機能を作動させる感度方向は、入力磁界に対するセンサの配置を制限することができます。

2.2.1 ホール効果スイッチ

ホール効果センサは、最も柔軟性の高い選択肢です。どのような磁場成分も検知できるため、 B_{OP} より強い磁界を検知するようにセンサを構成し、設置することができます。このセンシング技術で利用可能な小型表面実装パッケージサイズは、非常に柔軟な配置を可能にします。これらのデバイスは、対象物表面の裏側に埋め込むために長いワイヤで簡単に接続できます。また、垂直または水平 (面内) 感度を使用して、コントローラ PCB に簡単に取り付けることができます。図 2-1 を参照してください。

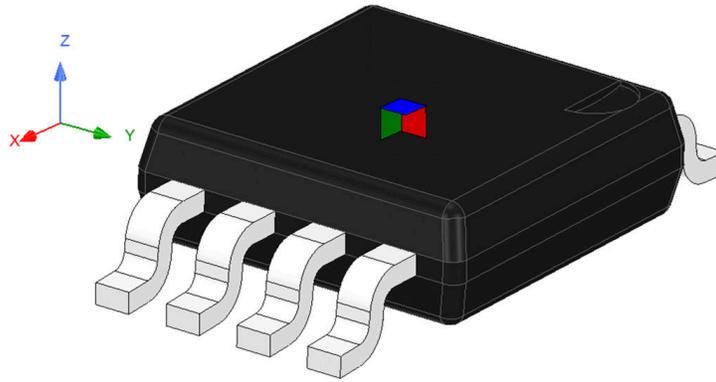


図 2-1. ホール効果の感度

2.2.2 TMR スイッチ

TMR スイッチは一般的に、XY 平面において主に感度が高くなるように作られています。ほとんどの場合、これらのデバイスは面内センサとみなされ、セクション 1.3 に示すように磁石を配置する必要があります。

2.2.3 リードスイッチ

リードスイッチの感度は、磁場がスイッチ内の強磁性構造とどのように相互作用するかによって決まります。磁界は 2 本のリード間に十分に強く流され、リードを曲げる必要があります。場合によっては、リードスイッチが磁石の存在に感応しないが、磁石を 90° 回転させると作動するゾーンが存在する可能性があります。

これらのデバイスは多くの場合、さまざまな配置に対応しますが、磁石の動きに応じて複数のトリップポイントを持つことがあり、デバイスのサイズのために配置と設置が困難です。

2.3 機械的制約

スイッチの全体的な感によって、感度センサに必要な入力磁石の範囲が制御されます。通常、各スイッチング技術は、5mT 未満の動作スレッシュホールド (B_{OP}) で構成できます。特定の磁石に必要な全範囲は、*TI Magnetic Sense Simulator* のようなシミュレーションツールを使用して決定できます。

TMR センサの電子トンネルは、磁気センサーで利用可能な最高の磁気感度を達成し、ホール効果センサと同様のオムニポーラ動作に設定できます。つまり、センサにどの磁極が提示されているかに関係なく、スイッチが動作します。これは、磁石の位置合わせに必要な労力を軽減するため、製品の組み立て時に役立ちます。しかし、どちらの磁極が提示されたかを区別する必要がある機能もあり、このような場合には図 2-2 に示すようなユニポーラスイッチが必要になります。

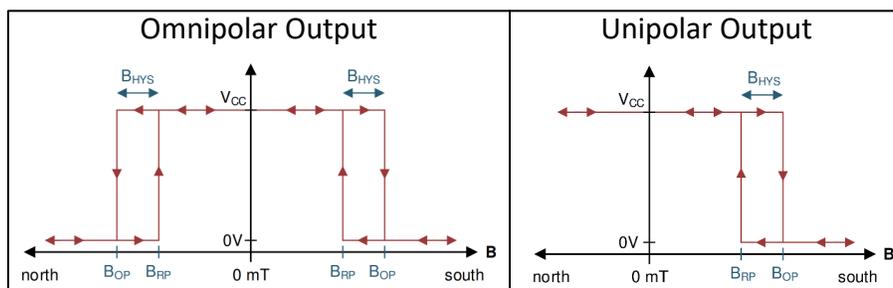


図 2-2. 磁気スイッチ出力モード

ホール効果センサは、検知方向が多様であるという利点を持つ同じ機能を提供しますが、TMR センサよりも磁石の位置決めへの柔軟性が高くなります。TMR センサを使用する際に特に考慮すべき点は、入力磁場が常に最大入力磁場定格の上限以下に保たなければならないということです。デバイスのピン層は特定の極性で磁化されているため、著しく強い磁場を導入するとセンサーに修復不可能な損傷を与える可能性があります。TMR 磁気過剰暴露は、オフセット、あるいはデバイスの全体的な感度の変化という形で現れます。ホール効果センサにはこのようなリスクはないため、磁石の近くに配置することができます。

いずれの場合も、入力磁界は、最大入力に常に B_{OP} の最大定格値を超え、磁石が引き抜かれたときの最小磁界が B_{RP} の最小定格値を下回るように変化する必要があります。これにより、エッジ状態のデバイスが異常に機能するリスクを排除することができます。リードスイッチの場合、個々のリードが磁界をどのように流すかによって、スイッチの実際の構造が動作ゾーンを作り出すことがあります。これには、不注意によるゾーン切り替えの可能性が含まれ、メーカーからの指導がなければ予測することは困難です。

リードスイッチの設計で考慮すべきもう一つの課題は、デバウンス (2 つのリードが接触した後に離れる弾性衝突の結果) が発生する可能性があることです。デバウンスは信号のセトリング タイムを延長し、適切に処理されなければ伝送の完全性に影響を与える可能性があります。また、これらの機械的接点の開閉は、時間の経過とともに摩耗や損傷を引き起こし、最終的にはスイッチング機構の故障につながる可能性があります。リードスイッチが破壊されるまでのスイッチングサイクル数は、スイッチの構造とスイッチにかかる負荷によって異なります。高負荷の場合、この破壊点は 10 万～100 万スイッチングサイクルの範囲になります。

リードスイッチに関する最後の機械的 検討事項 は、スイッチの構造上、パッケージ化されたホール効果センサや TMR センサほど容易に取り扱うことができない点です。多くの場合、筐体は、ピックアンドプレスマシン半田リフローを使用した標準的な組み立て手順による表面実装を禁止しています。組み立てプロセス中、筐体を損傷しないように注意する必要があります。

2.4 消費電力

リードスイッチは永久磁石の導入とそれに続くリードを引き寄せる電磁力によって動作するため、消費電力ゼロという設計目標を達成しています。

ホール効果センサと TMR センサはどちらも、ローレンツ力 (ホール効果) または量子トンネル効果 (TMR) によって影響を受ける検出素子にバイアス電流を流す必要があります。TMR センサは、一般的にホール効果センサよりもインピーダンスが高いため、同じ入力電圧を印加しても電流は低くなります。その結果、TMR センサはしばしば $1\mu\text{A}$ 以上の平均動作電流を達成します。

しかし、ホール効果センサは、多くのバッテリー駆動アプリケーションにおいて、依然として TMR と競合することがあります。両方のセンサの標準的な操作動作は、必要なアクティブバイアス電流でセンサを定期的にサンプリングすることです。サンプリングとサンプリングの間に、センサは所定の期間、低消費電力状態になります。この低消費電力状態の間、ホール効果センサは最小限の電力しか消費しません。

例えば、[TMAG5233](#) および [TMAG5133](#) の場合、これらのデバイスは、ヒューマンマシンインターフェイス (HMI) との相互作用のモニタリングなどの低消費電力スイッチングアプリケーション向けに設計されています。このような場合、検出素子の総アクティブ時間を短縮するために、データのリフレッシュ レートを非常に低く保つことができます。[TMAG5233](#) への平均電流を最小限に抑えるため、サンプルレートは 5Hz で、約 $0.55\mu\text{A}$ の標準的な動作電流を可能にします。[TMAG5133](#) では、サンプルレートを 20Hz に設定し、約 $1.8\mu\text{A}$ の標準動作電流を実現しています。

さらに厳しい要求がある用途向けに、[TMAG5134](#) は内蔵のフラックス コンセントレーターにより高感度を維持しつつ、1.25Hz のサンプリング時に数百ナノアンペアの消費電流を実現します。

3 まとめ

センシング技術の進歩により、システム全体の信頼性を高める低消費電力デバイスが提供されています。[TMAG5233](#) や [TMAG5133](#) のようなホール効果センサは、TMR よりも低い製造コストで、同等の感度スレッショルドで低消費電力の磁気検出を提供します。

表 3-1. 技術の比較

パラメータ	ホール効果	ホール効果 (コンセントレータ付き)	TMR	リード スイッチ
コスト	最低	Low	High	最高
センシング方向	垂直または面内 (X、Y、Z)	垂直または面内 (X、Y、Z)	通常は面内 (X、Y)	構造によっては垂直または面内
取り扱い	標準的な PCB アセンブリです	標準的な PCB アセンブリです	標準的な PCB アセンブリです	通常は手作業による取り付けが必要
消費電流	最小 0.55 μ A	最小 0.5 μ A	<0.3 μ A	ゼロ電流
標準的な動作 スレッショルド (B_{OP})	1mT	1mT	最小 0.3mT	<5mT
強電界による永続的な損傷	なし	なし	一部のデバイスは、100mT 以下の電界で損傷する可能性があります	非共通

低消費電力および面内磁気スイッチのオプションをさらに検討するには、[表 3-2](#) をご検討ください。

表 3-2. 関連デバイス

デバイス	グレード	感度方向	パッケージ オプション	平均電流 (μ A)
TMAG5233	商用	面内	SOT23-3(DBV)	2.7 μ A (40Hz) 0.55 μ A (5Hz)
TMAG5133	商用	面内	X1LGA (ZFC)	2.7 μ A (40Hz) 1.8 μ A (20Hz)
TMAG5134	商用	面内	SOT23-3 (DBV) X1LGA (ZFC)	0.5 μ A (1.25Hz) 0.6 μ A (5Hz) 0.9 μ A (10Hz) 1.4 μ A (20Hz)
DRV5032	商用	垂直	SOT23-3(DBV) TO-92(LPG) X2SON(DMR)	5.7 μ A (80Hz) 1.6 μ A (20Hz) 0.69 μ A (5Hz)
TMAG5231	商用	垂直	SOT23-3(DBV) X2SON (DMR)	16 μ A (216Hz) 2 μ A (20Hz) 1.3 μ A (10Hz)
TMAG5123 (Q1)	商用 (車載用)	面内	SOT23-3 (DBV)	3.5mA (10kHz)

4 参考資料

1. Flair Electronics、[磁気リードスイッチの動作原理](#)。
2. テキサス インスツルメンツ、[3D ホール効果センサー入門](#)、ビデオ。
3. [磁力](#)。
4. Electronic Design、[TMR センサと GMR センサの違いは何ですか？](#)。

5 改訂履歴

Changes from Revision A (June 2025) to Revision B (August 2025) Page

- ドキュメントのタイトルを「経済的なコストと低消費電力の磁気スイッチ設計」から「リードスイッチおよび磁気抵抗スイッチを、コスト効率が高く低消費電力のホール効果スイッチに置き換える」に変更..... 1
- ドキュメント全体を通して **TMAG5134** への参照を追加..... 1
- フラックス コンセントレーターに関する追加情報を追加..... 3
- 技術の比較表に「ホール効果 (コンセントレーター付き)」を追加..... 9

Changes from Revision * (September 2024) to Revision A (June 2025) Page

- ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新..... 1
- 文書全体に **TMAG5133** のリファレンスを追加..... 1

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated