

プローブ入門書

オシロスコーププローブの基礎 電流プローブ編

第1章 電流プローブの基礎

第2章 デスキューの基礎

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



第1章

電流プローブの基礎



▶ 動画版もご利用ください
(外部サイト YouTube へ移動します)



電流プローブの基礎

オシロスコープ用プローブ全般について

プローブは、オシロスコープで信号を捕捉する上で最も用いられる製品です。オシロスコープ用のプローブにはパッシブプローブ、アクティブプローブ、差動プローブ、ロジックプローブ、近磁界プローブなど多様な種類があります。

これらのプローブには違いがありますが、オシロスコープの入力に電圧を発生させるという点が共通しています。これは、オシロスコープが電圧を時間の関数として計測するためです。

それゆえ、オシロスコープを用いて電流を測定するためには、整合性があり予測可能な方法で、電流に対応する電圧を生成する必要があります。言い換えれば、オシロスコープが測定した電圧値を電流値に「変換」する手法が必要です。

シャント抵抗器を用いた電流測定

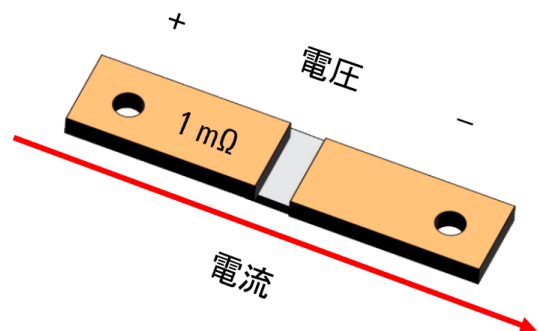
整合性があり予測可能な方法で電流に対応する電圧を生成する手法のひとつに、シャント抵抗器ないし検出抵抗器と呼ばれる抵抗器を用いるものがあります。

この抵抗器は非常に小さいながらも精密で、回路の妨げとなることを防ぐために、通常数 $m\Omega \sim 1\Omega$ 程度の非常に低い抵抗値となっています。この抵抗器での電圧降下を測定し、既知の抵抗値を用いることで、オームの法則により抵抗器を通過する電流を計算できます。この手法はマルチメーターが電流を測定する際に用いている手法です。

一方でシャント抵抗器を用いた電流測定には、回路に手を加える必要があるという大きなデメリットが存在します。他にも抵抗器が発する熱が測定結果に影響を及ぼす可能性があることや、抵抗器がもたらすインダクタンスが高周波での測定結果に影響を及ぼすという制限があります。

シャント抵抗器を用いた電流測定

- ▶ シャント抵抗器を用いることで電流測定が可能
- ▶ 非常に小さく精密な抵抗器を回路と直列に配置
 - 非常に低い抵抗値なので回路を妨げない
- ▶ この抵抗器での電圧降下を測定
 - オームの法則から電流を算出
- ▶ 従来のマルチメーターでの電流測定に用いられている手法
 - メーターを回路と並列に接続し、メーター内部のシャント抵抗器を用いて回路に流れる電流を計測
- ▶ この手法は回路に手を加える必要がある
 - 放熱や抵抗器がもたらすインダクタンスの影響といった制限がある



クランプタイプの電流プローブを用いた電流測定

電流測定において、より一般的で柔軟性の高い手法はクランプタイプの電流プローブを用いる方法です。このタイプの電流プローブは、ヘッド部でケーブルを挟み込むことで電流波形を観測できるため、回路に手を加えずに済みます。

電流プローブは、導体を流れる電流が生成する電磁場を測定し、既知の電圧と電流の比を用いて測定結果を電圧に対応させます。また、ほとんどの電流プローブはアクティブデバイスを搭載しているため、動作に際しては電力の供給が必要です。

クランプタイプの電流プローブを用いた電流測定

- ▶ クランプタイプの電流プローブを用いる手法がより一般的で柔軟性が高い
- ▶ この手法は回路に手を加えずに済む
- ▶ ケーブルをヘッド部で挟み込む
 - 矢印マーカが電流の方向と一致
- ▶ 導体を流れる電流が生成する電磁場を測定
- ▶ 既知の電圧と電流の比を用いて、測定結果を電圧に対応させる
- ▶ アクティブデバイスを搭載し、電力供給が必要



AC / DC プローブについて

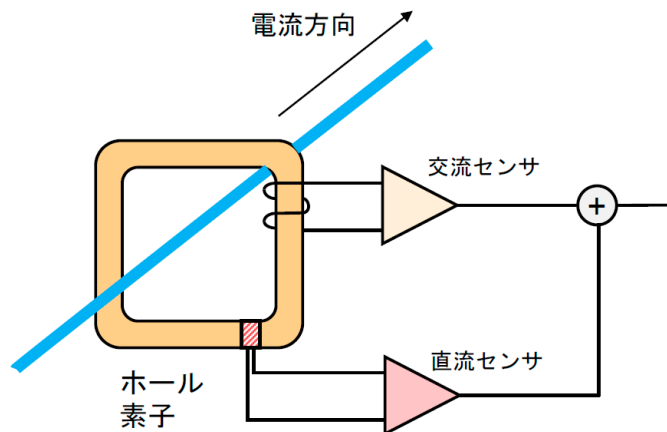
全ての電流プローブは交流を感知して、測定することができます。加えて一部の電流プローブは直流も測定することが可能です。それぞれの測定において異なるメカニズムが採用されています。

交流の測定では変流器を用いており、直流や周波数が非常に低い交流の測定においてはホール素子と呼ばれる部品を用いています。直流まで測ることができる電流プローブは、これら二つのメカニズムを組み合わせています。

ホール素子方式のプローブは動作する上で電力供給を必要とするため、AC / DC プローブは通常アクティブプローブに分類されます。

AC / DC プローブ

- ▶ 全ての電流プローブは交流を測定可能
 - 一部は直流も測定可能
- ▶ 交流の測定では**変流器**を用いる
- ▶ 直流や周波数が非常に低い交流の測定においては**ホール素子**を用いる
- ▶ ホール素子方式のプローブは**アクティブ**
 - 電力供給が必要
 - AC / DC プローブは**通常アクティブ**



電流プローブの重要なパラメータ

電流プローブを選択する際にいくつかの検討すべき点があります。

まず、交流のみ測定可能なタイプか、交流と直流の両方を測定可能なタイプかという点です。

もう一つの重要なポイントは帯域幅、すなわち電流を正確に測定できる周波数の範囲です。一般的に電流プローブの帯域幅は 100 MHz 以下となっていますが、交流のみを測定可能なタイプの場合、帯域幅はさらに制限されます。

電流プローブは、計測した電流に比例した電圧を生成するのでプローブのゲイン、感度、スケール係数も重要となってきます。これらはボルト・パー・アンペア (V / A)、すなわち、測定した電流 1 アンペアから何ボルトの電圧が生成されるかによって決まります。そして、いくつかの電流プローブはスイッチによってこのスケールリングを切り替えることができます。

また、プローブの最大電圧と定格電流は測定可能な最大値を制限する要素であるとともに、安全性とも関係があります。

オシロスコープとの接続について

各電流プローブはインターフェース、すなわちオシロスコープとの接続部にも違いがあります。多くの場合、独自のインターフェースか、標準的な BNC コネクタによってオシロスコープと接続されます。

独自のインターフェースを採用するメリットには、オシロスコープからの電力供給を受けることができるようになることや、オシロスコープがプローブの種類を識別し自動的に適したスケール係数を設定できるようになることが挙げられます。また、消磁やゼロイングもオシロスコープを通して実行可能です。

一方で、標準的な BNC コネクタを搭載した電流プローブはどんなオシロスコープでも使用することが可能です。このタイプの電流プローブは、ボタンなどの物理的な手法で消磁やゼロイングのコントロールをすることができますが、USB 接続、バッテリー、専用の外部電源などを用いた外部からの電力供給を必要とします。

オシロスコープとの接続

- ▶ 独自インターフェース / 標準的な BNC コネクタ
- ▶ 独自インターフェースのメリット
 - オシロスコープからの電力供給
 - プローブの識別とスケール係数の自動設定
 - オシロスコープ側で消磁やゼロイングが実行可能
- ▶ 標準的な BNC コネクタの場合
 - どんなオシロスコープでも使用可能
 - ボタンなどの物理的な手法での消磁やゼロイング
 - 外部からの電力供給が必要
 - USB 接続、バッテリー、専用の外部電源など

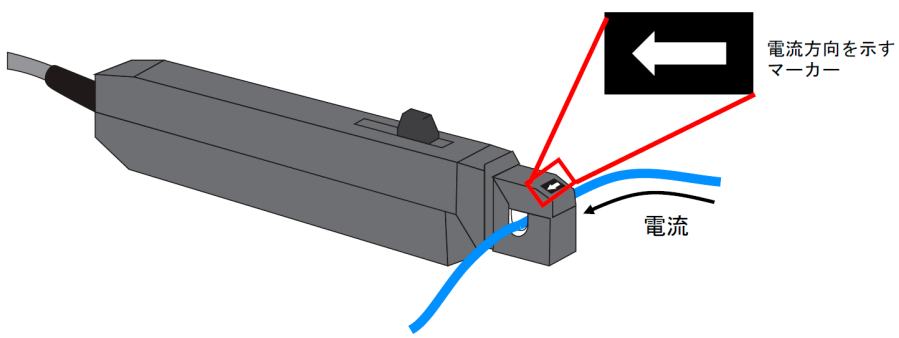


測定回路との接続について

クランプタイプの電流プローブはヘッド部でケーブルを挟み込むだけで使用することができます。そのため、回路に手を加える必要がありません。

多くの電流プローブには矢印のマーカがついており、測定するケーブル中を電流が流れる方向と矢印の方向が一致するようにヘッド部でケーブルを挟み込みます。電流プローブは逆向きに接続した場合でも正常に動作しますが、マーカは電流の流れとは逆の向きを示してしまうので注意が必要になります。

測定回路との接続



ケーブルの多重巻きについて

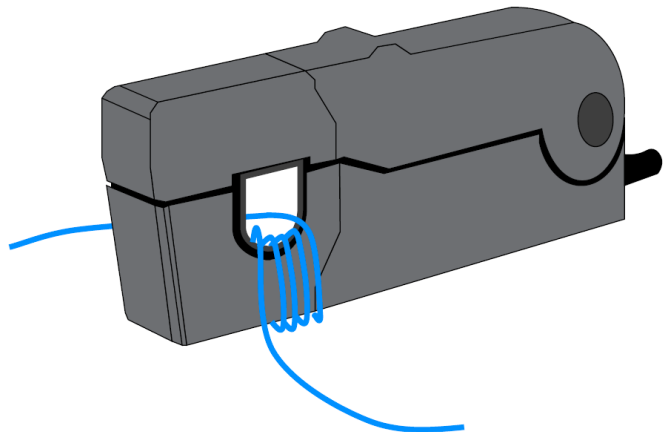
電流測定の感度を高めるテクニックの一つに、ケーブルをプローブに何重にも巻き付ける手法があります。

プローブの感度は巻き付けた回数に比例するように向上していきます。例えばケーブルを4重に巻き付ければ、プローブの感度は4倍になります。ただし、オシロスコープはケーブルが何回巻き付けられているのかわることができないため、巻き付けた回数を手動で必ず入力し、補正する必要があります。

一方でプローブの挿入インピーダンスは巻き付けた回数の2乗に比例するように増加していきます。つまりケーブルを4重に巻き付けた場合、プローブの挿入インピーダンスは16倍になります。しかしながら、挿入インピーダンスが何十倍に増加した場合であっても、その値は依然として極めて低く、電流レベルが低い場合には測定に重大な影響を及ぼすことはありません。

ケーブルの多重巻き

- ▶ ケーブルをプローブに何重にも巻き付けることで電流測定の感度が向上
 - プローブの感度は巻き付けた回数に比例して向上
 - (例) 4回巻 = 4倍の感度
 - 巻き付けた回数を手動で必ずオシロスコープに入力
- ▶ 挿入インピーダンスは巻き付けた回数の2乗に比例して増加
 - (例) 4回巻 = 16倍の挿入インピーダンス
 - 電流レベルが低い場合、測定に重大な影響を及ぼすことはない



ゼロイング

測定対象物に電流が流れていない場合、電流プローブは0アンペアを読み取らなければなりません。温度やその他の環境的要因により、時間が経つにつれて基準となるゼロ点の位置が変化してしまふことがあります。ゼロ点の校正をゼロイングと呼び、その実行には2種類の方法があります。

一般的なインターフェースを有する電流プローブを用いる場合は、本体に備え付けられているゼロオフセットノブを使って調整します。

独自のインターフェースを有する電流プローブを用いる場合は、接続先のオシロスコープを操作することで調整します。加えてオシロスコープの中には、適切な補正値を加減することで自動的にゼロ点を調整する機能を有しているものもあります。

正確な測定結果を得るためには、測定前に電流プローブのゼロイングを実施しておく必要があります。また、その際は、電流が流れているケーブルから離れた場所で実行する必要があります。

消磁

電流プローブを使用する際のもう一つの潜在的な問題は、電流が存在しないにもかかわらずプローブの強磁性コアが磁力を持ち続けていることです。この現象は、オンオフが切り替わる電流を測定した後に生じる可能性があります。この残留磁気はオフセットを引き起こし、測定結果に大きな影響を及ぼしかねません。

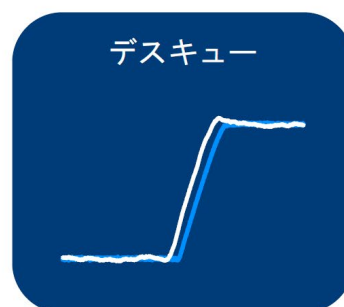
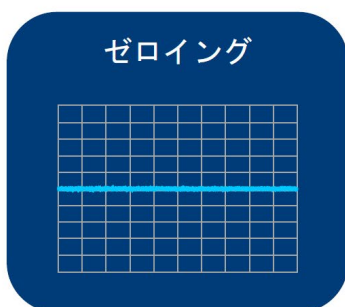
そのため、ほとんどの電流プローブは本体に備え付けられているボタンか接続先のオシロスコープを操作することで消磁を行うことができます。その仕組みは、基本的にはランダムな磁場を形成する特別な波形を生成することでプローブ内の残留磁気を消去します。この一連の動作は、通常ほんの数秒で終わりますのでゼロイングや測定を行う前に電流プローブを消磁してください。

デスクュー

電流プローブは、電圧と電流の両方の測定を含むパワー測定の際によく使用されますが、それぞれのプローブリード内で信号伝播時間に差があるために、測定電圧波形と測定電流波形との間に時間オフセットまたは「スキュー」が存在することがあります。このスキューは誤った測定結果をもたらす可能性があるため取り除かなければなりません。スキューの除去をデスクューと呼びます。

電圧プローブと電流プローブを特別なデスクュー用フィクスチャに接続し、フィクスチャが生成する時間調整された電圧パルスと電流パルスを同時に測定することで、スキューを検出し補正することができます。

押さえておくべき3つのポイント

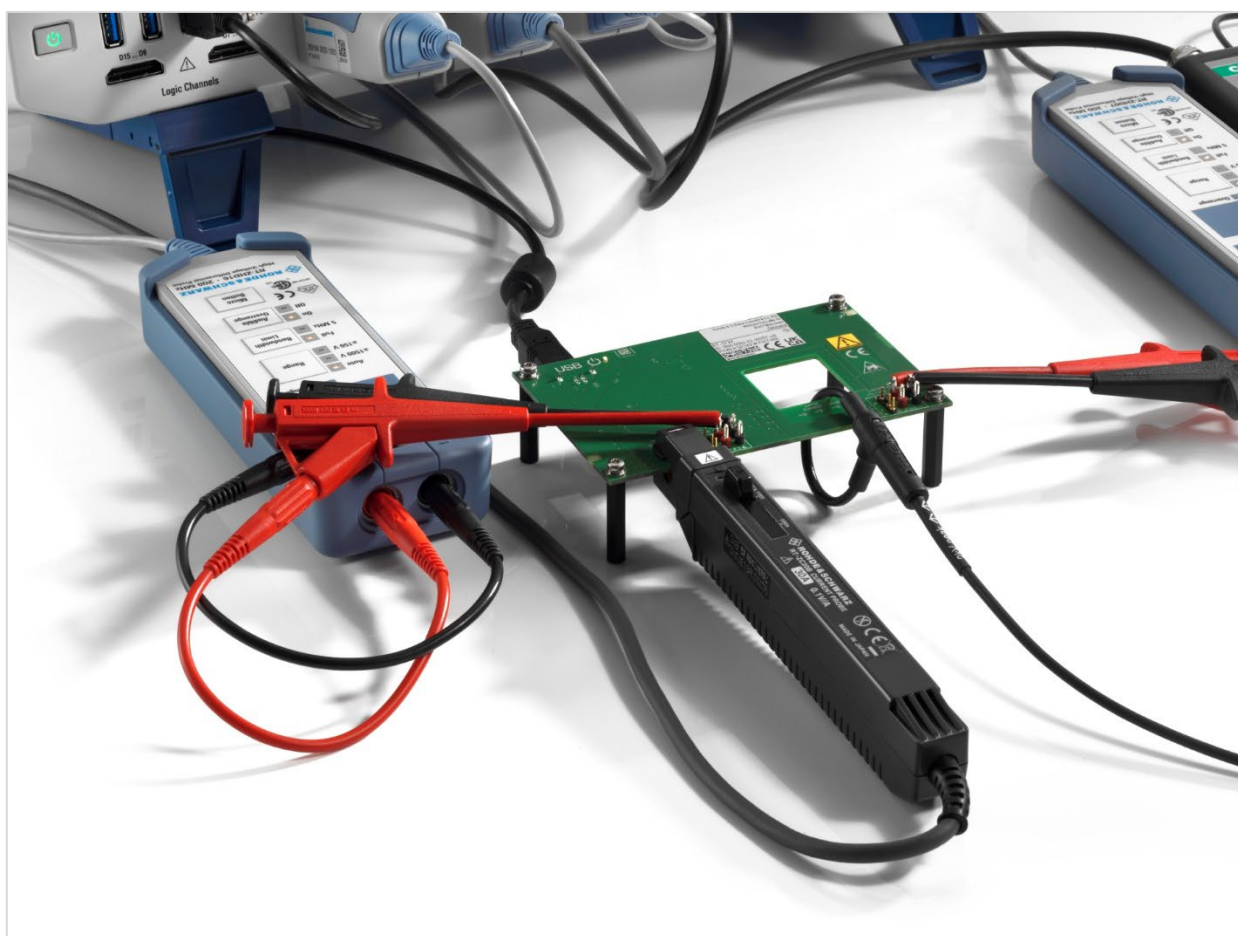


まとめ

- ▶ オシロスコープによる電流測定では、クランプタイプの電流プローブを使用するのが最も一般的な手法です。
 - 電流プローブは計測した電流に比例した電圧を生成します。
 - 計測する際に回路に手を加える必要がありません。
- ▶ 最新の電流プローブのほとんどはアクティブであり交流と直流の両方を計測可能です。
- ▶ 独自のインターフェースか、標準的な BNC コネクタによってオシロスコープと接続されます。
- ▶ 電流プローブの選定の際には、帯域幅・最大電圧と定格電流・感度といったパラメータが重要です。
- ▶ ゼロイング・消磁・デスキューを行うことで、測定結果の確度と繰り返し精度が向上します。

第 2 章

デスクューの基礎



▶ 動画版もご利用ください
(外部サイト YouTube へ移動します)



デスクューの基礎

スキューについて

オシロスコープの各チャンネルで異なる信号伝播時間は、表示波形間のタイミングオフセットを生み出します。このようなタイミングオフセットをスキューと呼びます。ほとんどの場合、プローブの異なるリードの長さが、各チャンネルでの信号伝播時間の違いを生み出しています。チャンネル間のスキューは通常数ナノ秒以下と僅かですが、測定結果に無視できない影響を与えます。

スキューについて

- ▶ オシロスコープの、各チャンネルで異なる信号伝播時間が、表示される波形の間にタイミングオフセットを生み出す
 - スキューと呼ばれる
- ▶ プローブのリードの長さが異なることが原因であることが多い
- ▶ スキューは通常数ナノ秒以下
 - わずかであったとしても、測定結果に無視できない影響を与える



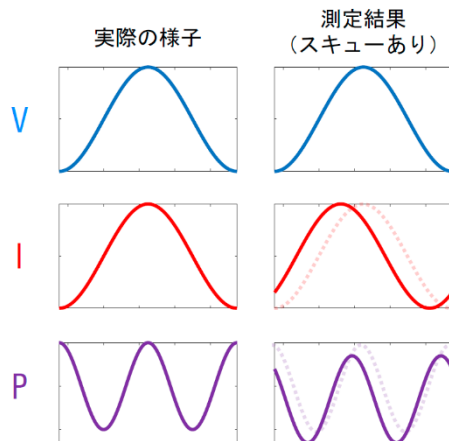
スキューの重要性について

スキューが致命的な問題となるアプリケーションの一つに、電力測定があります。電力は電圧と電流から算出されるので、オシロスコープを用いた電力測定では、一つのチャンネルに電圧プローブを繋ぎ、もう一つのチャンネルに電流プローブを繋いで測定を行います。各プローブリードの長さが異なることなどが原因で測定した電圧波形と電流波形の間にスキューが生じた場合、算出される電力は不正確なものとなり、なおかつ、測定した電力のピーク値は実際の電力のピーク値よりも低い値となります。

電力測定において、スキューは、複数の電圧波形のタイミングにおける関係性を探査しているとき、例えば、複数チャンネルにわたってトリガをかけるときや、高速デジタル信号を解析しているときなどにも悪影響を及ぼします。

スキューの重要性について

- ▶ スキューが致命的な問題となる電力測定:
 - 一つのチャンネルに電圧プローブを繋ぐ
 - もう一つのチャンネルに電流プローブを繋ぐ
- ▶ 測定した電圧波形と電流波形の間にスキューが存在し、算出される電力が不正確になる
- ▶ 複数の電圧波形のタイミングにおける関係性を探査する際にもスキューは重大な課題となる
 - 複数チャンネルにわたってトリガをかけるとき
 - 高速デジタル信号を解析しているとき

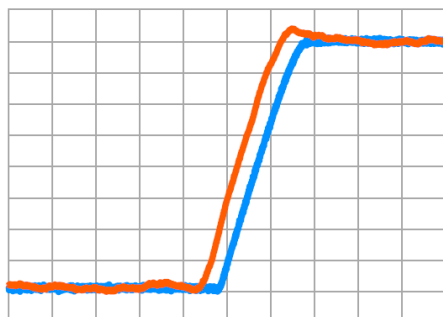


デスキューについて

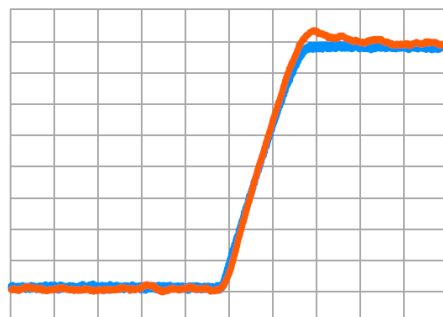
スキューを除去するプロセスをデスキューと呼び、最新のデジタルオシロスコープのほとんどはデスキューの機能を搭載しています。2つ以上のチャンネルでデスキューを行うには、同じ信号源から得られた波形が画面上で重なるように、必要なスキュー値を入力します。デスキューを行うために必要なスキュー値は、マーカーやカーソルを用いて波形間の時間オフセットを計測するか、手動で波形が重なりあうように調整することで求めることができます。

デスキューについて

- ▶ 最新のデジタルオシロスコープのほとんどはデスキューの機能を搭載
- ▶ 必要なスキュー値を入力
 - マーカーやカーソルを用いて波形間の時間オフセットを計測するか、手動で波形が重なりあうように調整することで求める



デスキュー前



デスキュー後

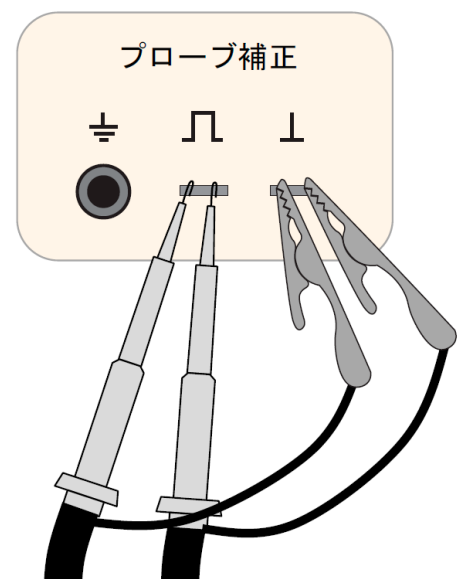
複数の電圧プローブをデスキューする方法について

まずは信号源を用意します。デスキューを容易に行うには、矩形波を発生可能な信号源を使用することが望ましいです。そのため、ほとんどのオシロスコープに搭載されているプローブ補正用の信号源は都合がよいです。

次に、それぞれの電圧プローブを信号源とグランドに接続し、各チャンネルの波形を観測します。波形同士がぴったりと重なり合っている場合、デスキューは不要です。そうでない場合は、波形が重なるまでチャンネルのスキューを調整する必要があります。この方法はプローブがパッシブであってもアクティブであっても実行することができます。

複数の電圧プローブをデスキューする方法について

- ▶ 一般的な信号源を用いる
 - 矩形波であることが望ましい
 - プローブ補正用の信号源を利用することが多い
- ▶ それぞれの電圧プローブを信号源とグランドに接続
- ▶ 波形が重なり合っている場合、デスキューは不要
- ▶ そうでない場合、波形が重なるまでチャンネルのスキューを調整
- ▶ この方法はプローブがパッシブであってもアクティブであっても実行可能



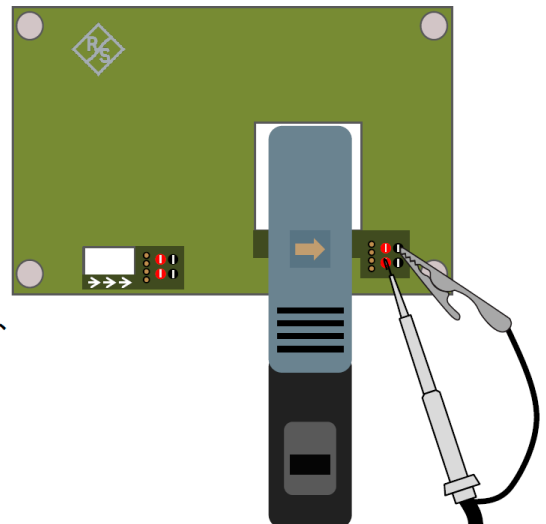
電圧プローブと電流プローブをデスキューする方法について

電力測定のために一対の電圧プローブと電流プローブをデスキューする際は、ほとんどの場合においてデスキュー用の特別なフィクスチャが必要になります。このフィクスチャは時間調整された電圧パルスと電流パルスを生成します。

ボード上の電流経路の一つを電流プローブで挟み込み、アクティブないしパッシブの電圧プローブを、電流プローブが接続されている箇所の隣にある専用の測定ポイントに接続します。画面上に表示されている電圧波形と電流波形を比較し、両者がぴったりと重なるまで片方ないし両方のチャンネルを調整することでデスキューを行うことができます。

電圧プローブと電流プローブをデスキューする方法について

- ▶ 電力測定のために電圧プローブと電流プローブをデスキューする場合、デスキュー用の特別なフィクスチャが必要
 - 専用フィクスチャは時間調整された電圧パルスと電流パルスを生成
- ▶ ボード上の電流経路の一つを電流プローブで挟み込む (右図参照 → → →)
- ▶ 電圧プローブを、専用の測定ポイントに接続
- ▶ 画面上に表示されている電圧波形と電流波形を比較し、デスキューを行う
 - 両者が重なるまでチャンネルのスキューを調整



まとめ

- ▶ 信号伝播時間の違いが、異なるオシロスコープチャンネルから取得された表示波形間にタイミングオフセットを生み出します。
 - このタイミングオフセットをスキューと呼びます。
- ▶ スキューは不正確な測定結果をもたらすので望ましくありません。
 - 電力測定においては致命的な問題であり、高速信号が含まれる場合は特に注意が必要です。
- ▶ デスキューはチャンネル間のスキューを取り除くプロセスであり、以下の方法で実行できます。
 - プローブを単純な信号源か時間調整された信号源に接続します。
 - 画面上で波形が重なり合うまでチャンネルのスキュー値を調整します。



測定マイスターカレッジ
基本的な測定器の基礎を横断的に学べる e ラーニングサイト

