

プローブ入門書

オシロスコーププローブの基礎 差動プローブ編

第 1 章 差動プローブの基礎

第 2 章 コモンモード除去比(CMRR)の基礎

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



第1章

差動プローブの基礎



▶ 動画版もご利用ください
(外部サイト YouTube へ移動します)



差動プローブの基礎

シングルエンド測定について

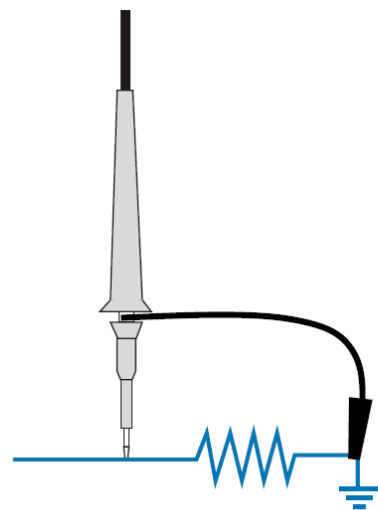
オシロスコープと共に用いられる一般的なパッシブプローブはシングルエンドであり、プローブチップとグラウンドの間の電圧を測定します。

グラウンド接続には特別なグラウンドリードを使用します。一般的にはワニ口クリップ付きのワイヤーですが、プローブチップの先端に、ばね状のコイルとして付いている場合もあります。多くの場合、プローブのグラウンドリードはオシロスコープの電気グラウンドやシャーシ・グラウンドと電氣的に繋がっています。そしてオシロスコープのチャンネル全体で共有されています。グラウンドリードが回路中の任意のポイントと接続されているとき、そのポイントは強制的にグラウンドと接続されます。

シングルエンド測定の問題点は、グラウンド接続に過剰な電流が流れることで、誤った測定結果を招き、さらに回路やスコープの損傷につながる事が挙げられます。電流レベルが十分に高い場合、この意図的でないグラウンドへの接続は、オシロスコープ使用者にとって安全上の危険にもなります。

シングルエンド測定について

- ▶ プローブチップとグラウンドの間の電圧を測定
 - グラウンド接続にはグラウンドリードを使用
- ▶ グラウンドリードはオシロスコープの電気 / シャーシ・グラウンドと電氣的に接続
 - チャンネル全体で共有
- ▶ グラウンドリードの接続ポイントは強制的にグラウンドと接続される
 - 過剰な電流が流れる可能性がある
 - 誤った結果を招き、回路の損傷やスコープの損傷につながる可能性がある
 - 安全上の危険にもなる



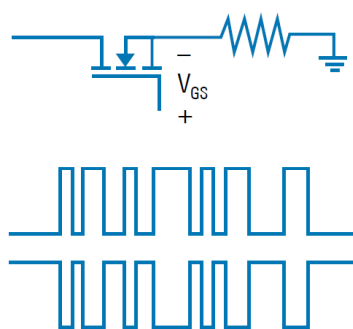
差動測定について

非接地の2点間の電圧を測定する際に用いられる手法が差動測定です。差動測定を必要とする有名なアプリケーションには、スイッチングモードの電力トランジスタにおけるゲート・ソース間の高電圧測定と USB や CAN などの差動信号の測定があります。差動伝送や差動エンコードでは二つの信号線の間の電位差を使って情報を伝達し、それによりシングルエンド信号よりも高いノイズイミュニティを実現しています。差動測定はグラウンドにノイズが存在する場合や、グラウンドが不安定である場合にも有効です。

差動電圧を測定する方法は2つあります。一つ目は疑似差動アプローチとよばれる2本のシングルエンドプローブを使用する方法です。二つ目は差動測定用の特別な差動プローブを使用する方法です。

差動測定について

- ▶ 非接地の2点間の電圧を測定する場合
 - 差動測定
- ▶ 例: スwitchングモードの電力トランジスタにおけるゲート・ソース間の高電圧測定
- ▶ 例: 差動的にエンコードされる信号の測定 (USB、CAN等)
 - 二つの信号線の間の電位差を使って情報を伝達
 - ノイズイミュニティの向上
- ▶ グラウンドにノイズがある / グラウンドが不安定である場合も有効



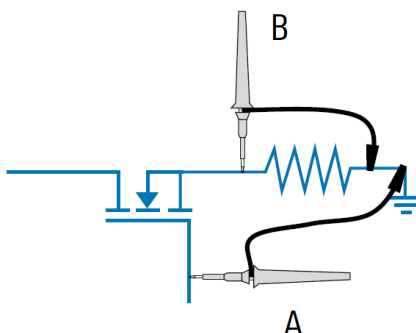
疑似差動アプローチについて

疑似差動アプローチでは信号の高電圧部分と低電圧部分を捕捉するために2つのシングルエンドプローブを使用します。これら2つのプローブはグラウンドにも接続されています。その後、オシロスコープの演算機能を用いて、2つのチャネルの入力電圧の差を取ることで、2点間の差動電圧を算出します。

この方法の最大の利点は一般的なパッシブプローブを用いて測定が可能ということです。一方でオシロスコープのチャネルを2つ使わなければなりません。また、正確な測定をする上では、2つのプローブが理想的には同等であること、つまり、2つのプローブが同じモデル/タイプであり、ケーブル長が等しく、グラウンドリードの長さや接続部が同じであることが必要です。

2本のシングルエンドプローブを使用する測定方法について (疑似差動アプローチ)

- ▶ 信号の高電圧部分と低電圧部分を捕捉するために2本のシングルエンドプローブを使用
 - オシロスコープの演算機能で、二つのチャネルの入力電圧を引き算(チャンネルA - チャンネルB)
- ▶ 一般的なパッシブプローブを使用可能
- ▶ 1つの差動信号当たり2つのチャネルを使用
- ▶ 2本のプローブが理想的には同等である必要がある:
 - 同じモデル/タイプ/製造メーカ, 等
 - 同じケーブル長 (スキュー回避のため)
 - グラウンドリードの長さや接続部が同じ



差動プローブを用いる測定方法について

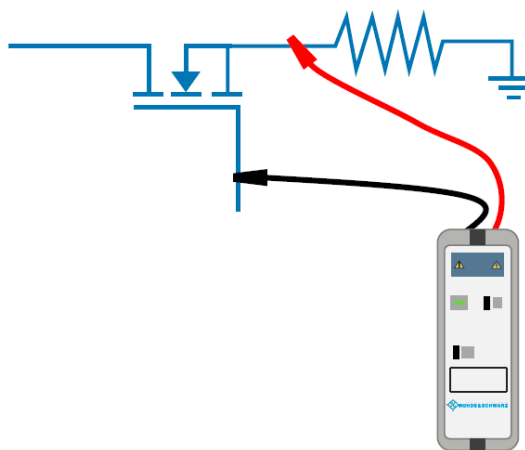
しかしながら、差動測定を行う上で推奨する方法は差動プローブを用いる方法です。差動プローブは回路の任意のポイントにつなぐことができる2つの入力端子を持っており、どちらの接続ポイントもグランドとなる必要はありません。差動プローブは内部に差動アンプをもち、測定ポイント間の電圧差に等しい電圧を出力します。この電圧は通常、既知またはユーザー定義可能な減衰比によって減衰されます。

差動アンプについては第2章で詳しく取り扱います。

理論上、差動プローブはいわゆるコモンモード信号、すなわち、両方の測定点に同一に存在する信号に応答しません。それにより、ノイズのある低レベルの信号を測定するときに、差動プローブは最良の選択肢となります。また、差動プローブは片方の入力端子をグランドにつなぐことでシングルエンド測定にも用いることができます。

差動プローブを用いる測定方法について

- ▶ 回路の任意のポイントに接続可能な2つの入力端子 (どちらもグランドとならない)
- ▶ 内部の差動アンプを使用
- ▶ 測定ポイント間の電圧差に等しい電圧を出力
 - 既知/ユーザー定義可能な減衰比によって減衰
- ▶ 理論上、コモンモード信号 に応答しない
 - ノイズのある低レベルの信号の測定に有効
- ▶ シングルエンド測定にも使用可能

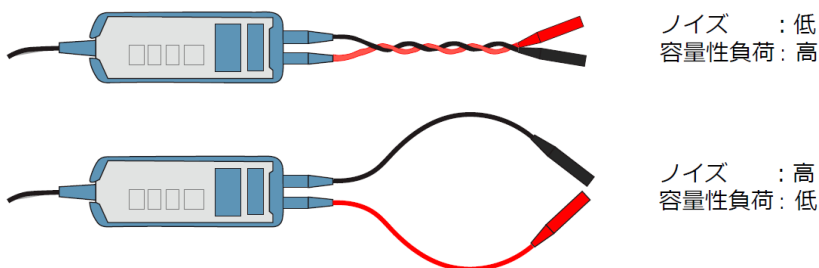


差動プローブのリードが絡り合わせてある理由について

差動プローブのリードは同相ノイズのピックアップを減らすために可能な限り短くなければなりません。しかし、ほとんどの差動プローブには、むしろ長いリードが付属しています。そのため、外部ノイズのピックアップを減らすために、これらのリードはしばしば絡り合わせてあります。しかしながら、このリードの絡り合わせはプローブの容量性負荷を増加させてしまいます。したがって、プローブの容量性負荷を最小限に抑えるには、リードを絡り合わせてはいけません。

差動プローブのリードが絡り合わせてある理由について

- ▶ 差動プローブのリードは、同相ノイズのピックアップを減らすために可能な限り短くあるべき
 - 外部ノイズのピックアップを減らすためにリードを絡り合わせる
- ▶ プローブの容量性負荷を最小限に抑えたい場合は、リードを絡り合わせない



差動プローブのメリットとデメリットについて

差動プローブの使用にはメリットとデメリットの両方があります。

メリットとしては以下のものが挙げられます。測定の際、オシロスコープのチャンネルを一つしか使わないこと、シングルエンド測定にも使用可能なこと、特に高電圧の測定において機器と測定者の両方の安全を守ることができること、そして、より高いコモンモード除去比を有していることです。

一方でデメリットとしては以下の3つが挙げられます。パッシブシングルエンドプローブに比べてはるかに高額であること、形が大きくスペースを取ることで、そして、電圧を比較するために差動アンプを使用する関係上、差動プローブはアクティブであり、電源を必要とすることです。

差動プローブのメリットとデメリットについて

- ▶ 差動プローブを使用する**メリット**:
 - チャンネルを一つしか使わない
 - シングルエンド測定と差動測定の両方で使用可能
 - 機器と測定者の両方の安全を守る
 - 高いCMRR
- ▶ 差動プローブを使用する**デメリット**:
 - シングルエンドプローブと比べて高額
 - 形が大きくスペースを取る
 - アクティブプローブであり、電源が必要



差動プローブの仕様について

帯域幅や減衰比といったオシロスコーププローブ全般の代表的な仕様に加えて、差動プローブを使用する上で特に考慮しなければならない重要なポイントが3つあります。それは、コモンモード除去比、差動モード電圧、そしてコモンモード電圧です。

コモンモード除去比(CMRR)

理論上、差動アンプは2つの入力端子に同じように現れるコモンモード信号を除去・抑制するはずですが、実際には、これらのコモンモード信号は通常ノイズやオフセットとして現れます。

コモンモード信号を除去する能力を、コモンモード除去比(CMRR)として定量化しています。そしてその定義は差動モードのゲインとコモンモードのゲインの比です。コモンモードのゲインの理想的な値は0であるため、CMRRの理想的な値は ∞ となります。

しかしながら、ほとんどの差動プローブのCMRRは30 dB ~ 80 dBとなっており、値が大きいほど望ましい値となります。また周波数が高くなるにつれてCMRRが悪化します。差動プローブを使用した場合、疑似差動アプローチを用いた場合に取りうるCMRRよりもはるかに高いCMRRを実現できます。

差動モード電圧(DMR)

CMRRに関係がある仕様に差動モード電圧(DMR)があります。これは、アンプの2つの入力端子の間に印加できる最大電圧をあらわしており、この値は一般的に極性と対称です。つまりプラスからマイナスへ、マイナスからプラスへも同様です。

測定可能な最大差動電圧の値を知ることは重要であるため、DMRは通常、直接プローブ本体に印字してあります。DMRの値はプローブの減衰比の設定にも依存します。差動信号はオシロスコープに表示されているため、DMRを超えていることに、容易に気づくことができます。最大電圧を超えている典型的な兆候には、測定信号のクリッピングまたは歪みがあります。

コモンモード電圧(CMR)

コモンモード電圧(CMR)とは、プローブの個々の入力端子とグラウンド間に印加できる最大電圧を意味します。DMRと同様に、この値は一般的に極性と対称です。また、値が直接プローブ本体に印字してある点もDMRと同様です。

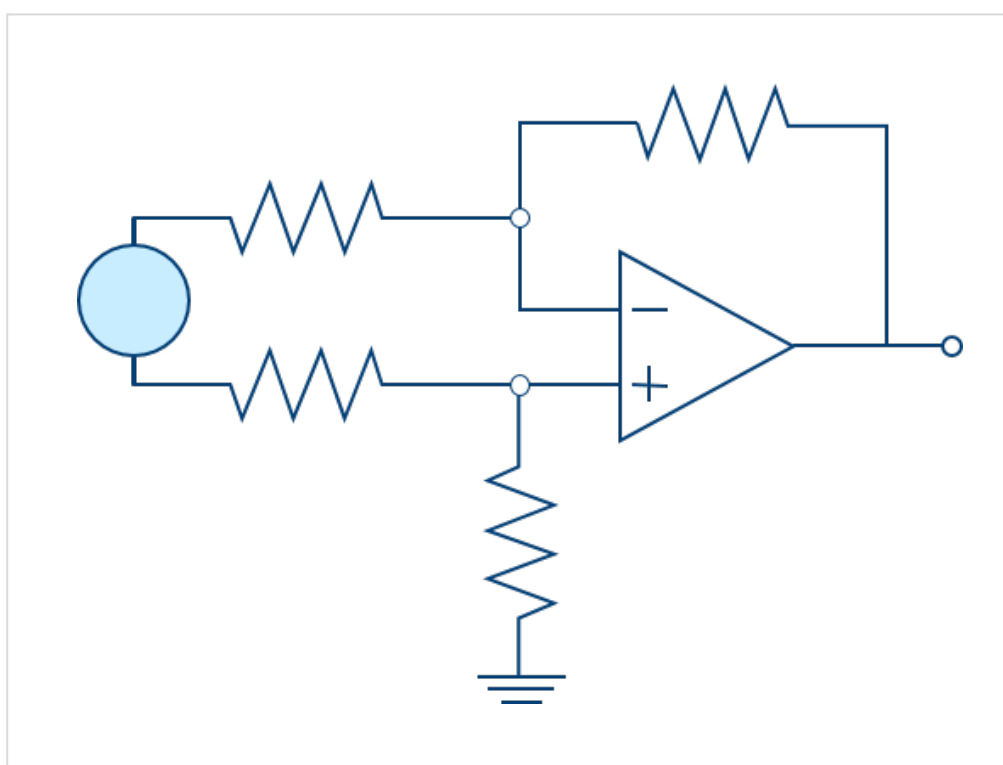
しかし、DMRとは異なり、CMRは減衰比によって値が変わることはありません。個々の入力端子とグラウンド間の電圧をオシロスコープ上で直接知ることはできないため、CMRを超えているかどうかを判断することが困難な場合があります。CMRを超過しているかを検出する方法の1つに、1つの入力端子を一時的に無効にしてグラウンドに接続する手法があります。

まとめ

- ▶ 差動測定は、シングルエンド測定とは異なり、非接地の 2 点間の電圧を測定します。
- ▶ 差動測定を必要とする有名なアプリケーション：
 - パワーエレクトロニクス測定
 - 差動信号測定
- ▶ 差動電圧を測定する方法：
 - 疑似差動アプローチ
 - 差動プローブを使用する
- ▶ ほとんどすべての差動電圧測定において、差動プローブを使用する方法が推奨されます。
- ▶ 差動プローブの重要な仕様：
 - コモンモード除去比(CMRR)
 - 差動モード電圧(DMR)
 - コモンモード電圧(CMR)

第 2 章

コモンモード除去比(CMRR)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)



コモンモード除去比(CMRR)の基礎

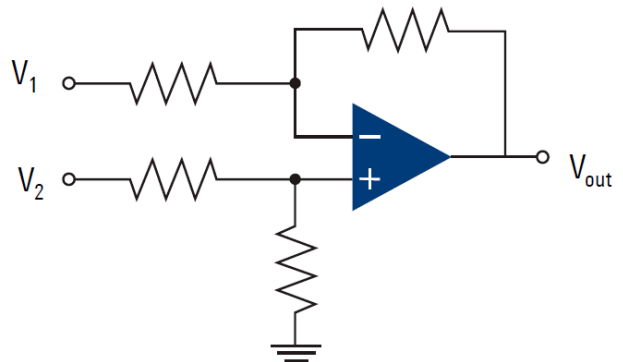
差動アンプについて

差動アンプには2つの電圧入力があり、それら2つの電位差である電圧出力を生成します。これら2つの入力のどちらもグラウンドに接続する必要がなく、ほとんどの場合グラウンドに接続されていません。出力電圧 V_{out} は、入力電圧の差に、差動モードゲインを乗算した値です。差動電圧プローブにおいて、差動モードゲインは通常、1 よりもはるかに小さな値であることに注意が必要です。

差動アンプについて

- ▶ 差動アンプの出力は2つの入力の差
- ▶ どちらの入力もグラウンドに接続する必要がない
 - ほとんどの場合グラウンドに接続されていない
- ▶ 差動電圧はアンプの**差動モードゲイン** (A_{dm})で乗算される

$$V_{out} = A_{dm}(V_1 - V_2)$$

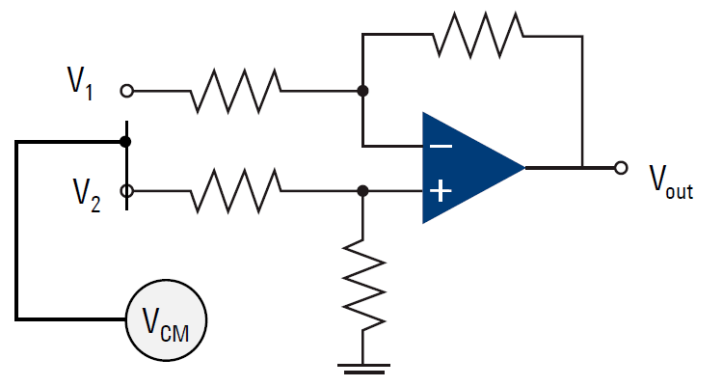


コモンモード信号について

コモンモード信号は両方の入力に存在する同一の信号で、両方の入力に共通となります。コモンモード信号の良い例は、両方の入力に等しく結合される外部ノイズです。差動アンプの出力は、差動電圧とコモンモード電圧の合計となり、電圧のタイプまたは「モード」ごとに、異なる量のゲイン A が得られます。理想的な差動アンプはコモンモード信号を増幅しません。つまり、コモンモードゲインは0 になります。

コモンモード信号について

- ▶ **コモンモード**信号は、両方の入力に存在する/同一の信号
 - 信号は両方の入力に**共通**
- ▶ コモンモード信号の良い例は、両方の入力に等しく結合されるノイズ
- ▶ アンプ出力は**差動モード電圧**と**コモンモード電圧**の合計値
- ▶ 理想的な差動アンプはコモンモード信号を増幅しない
 - コモンモード「ゲイン」 (A_{cm}) = 0



$$V_{out} = A_{dm}(V_1 - V_2) + A_{cm}(V_{cm})$$

コモンモード除去比 (CMRR) について

コモンモード信号を除去する差動アンプの能力は、コモンモード除去比 (CMRR) を使用して説明でき、数学的に表すと、アンプの差動モードゲインとアンプのコモンモードゲインの比となります。これは比率であるため、ほとんどの場合、デシベル (dB) で表現されます。差動アンプはコモンモードゲインよりもはるかに大きな差動モードゲインを持つ必要があるため、CMRR は常に正である必要がありますが、仕様やデータシートなどで CMRR が負の値として記載されていることもあります。コモンモード除去比率は主にアンプの設計に依存します。オペアンプ、抵抗器などの特性、特に各入力で異なる静電容量も、とりわけ高周波数では CMRR に影響します。

コモンモード除去比 (CMRR) について

- ▶ 差動アンプがコモンモード信号を除去する能力は、**コモンモード除去比 (CMRR)** として定量化される
- ▶ アンプの差動モードゲイン(A_{dm})とアンプのコモンモードゲイン(A_{cm})の比
 - これは比率であるため、通常は dB で表示
 - $A_{dm} \gg A_{cm}$ なので、CMRR は正になる
- ▶ 主にアンプの設計に依存する
 - オペアンプ、抵抗など
 - 入力容量の不整合は高周波数では重要である

$$CMRR = \left(\frac{A_{dm}}{|A_{cm}|} \right)$$

$$CMRR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{dm}}{|A_{cm}|} \right)$$

CMRR 値について

理想的な差動アンプでは、コモンモード信号は完全に遮断されます。つまり、コモンモードゲインはゼロになるため CMRR 値は無限大になります。現実の世界では起こり得ませんが、一般に、CMRR 値が大きいほどコモンモード信号の除去が大きいことを示すため、アンプの設計においては望ましいことになります。

CMRR 値が向上すると、測定がより正確になるだけでなく、測定のノイズが少なくなります。これは、信号レベルが低い場合やコモンモードノイズレベルが高い場合においては特に重要です。つまり CMRR 値は差動プローブの性能を判断する上で重要な指標となります。

まとめ

- ▶ 差動アンプは2つの入力信号の差を増幅する
 - コモンモード信号が両方の入力に現れる
 - ほとんどの場合、ノイズまたはオフセット
- ▶ コモンモード除去比 (CMRR) は、コモンモードゲインに対する差動モードゲインの比
 - 理想的には無限 – 高いほど良い
 - 周波数によって異なる（周波数が高くなると悪化する）
- ▶ CMRR は差動プローブの性能指数
 - 差動電圧の電位差をどの程度正確に測定できるか

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



