

第1章 電子計測

目の前で起こっている現象を知るためには計測しなければならない。計測とは物理量を測って定量化することであり、計測することは科学の基本である。計測技術はもはや現代社会になくってはならないものとなっている。

計測技術は、電子技術の進展とともに発展してきた。電子技術の発達計測技術を高め、逆に計測技術の発達も電子技術を高めてきたのである。さらに近年のデジタル技術、ICT (Information and communication Technology) の進歩は、微小計測や遠隔計測、複雑な信号処理や膨大なデータ処理を容易にしている。最新の計測技術は、一昔前まで不可能と考えられていたニュートリノの観測や重力波の計測すら可能としている。

現在の電子計測技術は単に各種物理量を測定するだけに留まらず、機器の中に組み込まれて自動制御やシーケンス制御に利用されている。これらは、産業や工業のあらゆる分野に適用され、省力や省エネに大きく寄与している。

1. 測定に関する基礎

測定値の正確さに影響をおよぼす要因は測定器自体の確度の他に測定環境、被測定信号の種類やその規模も含まれる。測定器自体の進歩は測定感度、動作特性、周波数特性、安定性等の向上があり、測定環境の影響としては温度、湿度、気圧、振動、電界、磁界、光、塵埃等の対応があげられる。

近年は微小信号の測定が多くなっており微小信号はノイズの影響を受けやすい。測定は信号の種類や性質によって測定器を選んで適切な環境のもとで行なう必要がある。

(1) 温度の影響

温度は装置内の電子素子、抵抗、コンデンサ、インダクタンス、金属材料、液体、導線等すべての部品や材料に影響をおよぼす。計器や装置に用いる金

属類の抵抗温度係数は一般に正であって、その値は $10^{-3} \sim 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 程度である。炭素、絶縁物、半導体、電界液等の抵抗温度係数は負であってその値は $10^{-2} \sim 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 程度が多く、金属の数十倍以上になる。温度上昇はばね材の弾性係数が減少し、磁性体の比透磁率を縮小する。温度が上がれば液体の粘度が急減し、その抵抗値は減少する。高絶縁物材料は抵抗の温度変化が一般的に非常に大きい。

装置は多くの部品が使用されており、個々の部品温度特性が異なるために複雑な温度影響が現れる。機器の種類によっては装置が安定するまでに数時間～数十時間の長時間を要するものもあり、ゼロ点の移動要因にもなる。また、機器の寿命は温度の影響を強く受ける。

(2) 信号の影響

計測器の最終段階に使用する表示計器は、通常、正弦波の実効値で目盛りされている。波形が正弦波でないものに対しては、真の実効値、平均値、ピーク値等を指示する計器がある。基本波に高調波が重畳しているものは、その高調波の種類や含有率を測定しなければならないこともある。

信号処理には矩形波のパルス波形を使用することが多い。信号波形が入力されて出力されるまでには微小であるが時間を要する。変化の速い信号は波形の立上がりや立下りにオーバーシュートやアンダーシュート等も発生しやすい。図1-1(a)の破線は理想的なパルス信号像であるが、この信号が入力されて回路を通過すると遅れ時間や波形変形が生じる。図(b)は波形各部の名称を示す。

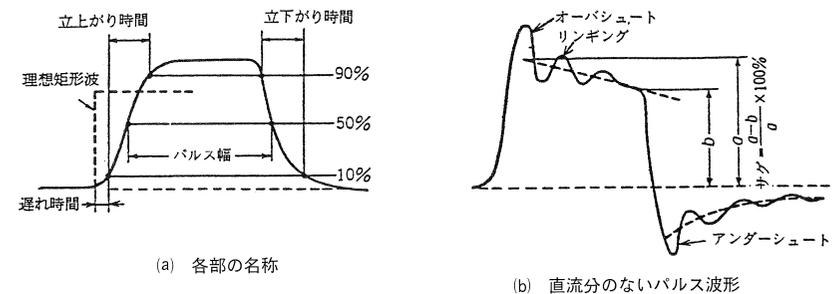


図1-1 パルス波形の名称

(3) 回路構成の影響

電気回路に使用される各種の半導体素子やその他のどのような部品にも余分の抵抗成分やリアクタンス成分が残る。これらの部品の取り付けや配線等によって生じるインダクタンスや浮遊容量は新たな回路構成となってもとの回路に重畳される。低い周波数のときは問題にならなくても、高い周波数になれば影響が大きくなる。構成回路によっては寄生発振や共振現象が生じる。信号が波形整形、増幅、演算などの回路を通過すると微小時間であるが遅れが生じる。

一般に半導体特性は非直線性であるので、伝達信号はその影響を受ける。例えば、歪みのない正弦波であっても非直線特性のダイオードを通過すると波形に歪みが生じる。サイリスタのような位相制御回路の導通角によって整形された波形などは立上がりや立下がり時間が速いのでサージが発生しやすい。

信号には規則的な繰り返しのもや不規則なものがあり、その他故障などによる偶発的なものなどがある。入力信号は回路の電気的性質によって影響を受けるので回路構成には素子の配置や配線の工夫がされる。回路自体には補償回路が付加され温度影響等に対して温度補償回路が設けられる。測定器には測定できる上限および下限の周波数で決まる周波数帯域がある。信号の性質によって計測方法を考慮しなければならない。

装置の個々の部品配置や結線の仕方により、精度や感度が変わることが多い。例えば、図1-2の $R_1 \sim R_3$ の既知抵抗3個と未知抵抗 R_x よりなる4個の抵抗素子で形成する直流ブリッジ回路において、平衡条件より R_x は次式で表

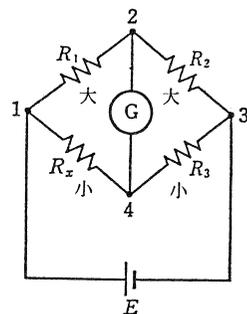


図1-2 直流ブリッジ最良条件

される。

$$R_x = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) R_3 \quad (1 \cdot 1)$$

検流計 G の内部抵抗 R_g は普通、数百 Ω ~数 $K\Omega$ であるが、電池 E の内部抵抗 R_e は数 Ω 以下である。検流計と電源を入れ替えても平衡条件は同じであるが、 R_x を求めるブリッジの感度は違ってくる。感度計算の結果、 $R_g \gg R_e$ の条件であると、図1-2のように検流計は2個の大きい抵抗と2個の小さい抵抗との間に挿入すれば感度が高くなって測定の最良条件が得られる。測定の最良条件は各種の測定においても検討することができる。

(4) 磁界の影響

磁界の影響は大電流のそばや巻回数の多いコイル付近で大きくなる。この対策としては取り付け方向を変えたり、磁気遮蔽をする。磁気を直接利用するホール素子やリレー等は外部磁界の影響を受けやすい。地磁気や一定方向の磁界が影響するときは、1回目の測定値と計器を 180° 回転して2回目の測定値の平均をとれば除くことができる。

(5) 静電気の影響

測定器や器具、作業者の衣服などは高分子化合物を素材とするものが多く使用されている。一般に、高分子材料は高絶縁物であるので、摩擦や衝撃等の外部エネルギーによって非常に静電気を帯びやすい。静電気の電圧は容易に数KV程度にもなる。工場における回路の組み立てや移動等の作業は生産性を高めるために高速に処理をしようとする。そのために高電圧の静電気が生じやすい。

近年の電子回路の動作電圧は5V回路が多いが、3V回路も増加している。回路の低電圧化や高密度素子化はますます進んでいる。

静電気に起因する放電は、素子の破損や機器のメモリを狂わして誤動作したり、爆発や火災等の原因にもなる。静電力は電子部品製造や組立て工程において、製品表面に微小物体や空気中の浮遊塵埃を吸着させて製品を不良に

する。電子素子の汚れや塵埃の付着は、その部品の表面抵抗の減少となって漏洩電流を増加する。電子部品や電子回路を扱う工場は静電気対策が生産の歩留りに直接関係している。静電気対策は重要な課題になっている。静電気の測定や静電気除去対策等の関連技術は急速な進歩を遂げている。

2. 雑音

信号以外のものはすべて雑音（ノイズ）として扱われる。微小信号の取り扱いが増え続けている。微小信号は周辺の雑音に埋もれてしまうことがあり、その時はそこから必要な信号を検出しなければならない。信号が小さいほど雑音の混入割合が多くなり検出が難しくなる。

雑音は単なる外部雑音だけでなく、回路素子の量子力学的な雑音や宇宙からの自然雑音など多岐にわたっている。電子計測は雑音対策技術が進歩すると共に、高感度化、広域化の計測技術が発展している。雑音は計測器自体の雑音対策だけでなく、システム全体の雑音も考慮しなければならない。雑音に埋もれた信号を取り出すにはロックインアンプ等が利用されている。

(1) 熱雑音

半導体や抵抗熱体には熱エネルギーによって電子や正孔が絶えず、いろいろの速度で動き回るので外部電源が無くてもその両端に変動する電位差があらわれる。この雑音電位のスペクトルは一様である。

(2) 散射雑音

トランジスタのベース広がり抵抗による熱雑音やベース・エミッタ間の接合点を通過するキャリアの数と速度の不規則性に基づく雑音であって、その周波数スペクトルはかなり高い周波数まで一様である。

(3) 過剰雑音

低周波域において、周波数 f に逆比例して増加する雑音であって、散射雑音と重畳する。トランジスタの接合部材料の不均一性に基づくキャリアの不規則性に起因する雑音は $1/f$ 雑音となる。これはフリッカ雑音とも呼ばれ

る。

(4) 電流雑音

抵抗体、半導体、薄膜抵抗体、導体などの接触面に電流を流すことによって発生する雑音であって、通常 10k Hz 以上で無視できるようになる。

(5) ドリフト

増幅器の基準値ゼロ点が時間の経過に伴い徐々に移動する現象をドリフトといい、周波数が低い領域の雑音は大きな影響を与える。主に装置個々の部品温度の変化による特性変化と電源電圧の変動に起因する。

(6) 雑音指数

増幅器で信号を増幅すれば入力信号に重畳している雑音の他に、増幅器内で発生した内部雑音も共に増幅されて出力側にあらわれる。入力側の信号対雑音比と出力側のそれとを比較すれば増幅器の雑音に関する性能をあらわすことができる。雑音指数 F は次式で定義される。

$$F = \frac{N_o}{N_i} \quad (1 \cdot 2)$$

S : 信号固有電力 N : 雑音固有電力

添字 i : 入力側 添字 o : 出力側

増幅器の個々の利得を G_1, G_2, \dots, G_n 、雑音指数 F_1, F_2, \dots, F_n とし、また、各段の帯域幅が等しい場合にこれらの増幅器を縦属接続すれば総合の雑音指数 F は次式で表される。

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (1 \cdot 3)$$

上式より初段の増幅器の利得 G_1 が大きければ $F \approx F_1$ となり、雑音指数は初段の雑音指数によって殆ど決まる。