

めかとり通信

< 比例ソレノイド >



油圧バルブ制御用比例ソレノイド

電子ホビーに詳しい方なら「サーボ」をご存知と思います。ラジコンでの遠隔操作や、マイコンと組み合わせて様々なものを動かすのに使用されます。最近はロボットに使われた例をよく見かけます。またラジコンでは飛行機の各操作舵面の駆動や、自動車のステアリング操作などに使われます。これは DC モータの回転力を減速機を通して出力として取り出すとともに、位置検出用のポテンショメータでフィードバックしながら任意の位置に制御を行うものです。PWM 信号による指令が可能なのでマイコンとも相性が良く、リニアに位置

制御が可能になるものです。

「DC モータ」は通電により回転させることが出来ますが、「サーボ」は位置制御が可能です。

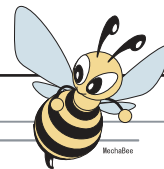
ソレノイドは通電することによって予め定められたストローク範囲を往復動作します。このような一般型に加え、一定の範囲内で任意の位置または推力を得ることが出来る、「サーボ」のような機能を持つのが比例ソレノイドです。

■ 1. 比例ソレノイドの磁極構成

マグネットを鉄板に近づけていくと吸着直前で急激に吸引力が大きくなることを感じられるでしょう。これは平坦な対向磁極を持つ一般的なソレノイドと同じです。吸着時が最も大きくなる傾向の推力特性を持っています。これに対してパイプ状の磁極を持つシリンダ型は、磁極に可動子が入り込む位置が推力最大になる傾向を持ち、対向磁極型よりもブロードで広い範囲で推力が得られます。対向磁極型は大きな推力が得られるとともに効率も高くよく使われますが、長い作動距離を得ることが出来ません。シリンダ型は、大きな推力は得られませんが、長めの作動距離での使用が可能です。ただし、変換効率はあまり高いとは言えません。このように磁極の形

状により特性が大きく異なります。パイプの端面の形状を斜めにする事で特性をチューニングしたシリンダ型と対向磁極型を組み合わせると、図 1 に示すような特性を得ることが出来ます。この特性図から、一定の領域で平坦な特性を示していることが分かります。ストップパ等を使用してこの領域のみに限定して使用可能なように構成すると平坦な特性を持つ、比例ソレノイドとして使用することが出来ます。ただし、このように合成で平坦になる領域はそれほど広いわけではなく、長いストロークはあまり得意ではありません。図 2 に代表的な比例ソレノイドの内部構造を示します。





■ 2. 比例動作

推力特性の合成で平坦な特性を有するソレノイドができました。では、これをどのように使用すると比例制御ができるのでしょうか。

比例制御には、位置を制御する位置制御と、発生する推力を制御する使い方があります。

ソレノイドは原理的に発生する推力がコイルに流した電流に比例します。磁極の形状は特殊でも基本的には変わりません。これは平坦な推力特性の場合、電流を一定値としておけば、位置が変わっても発生推力が変わらないということを意味します。逆に言えばどの位置であっても、流した電流によって推力が決まります。負荷に対する押圧力を電流で決めることが出来、負荷からの反力で位置が変化しても押圧力が変わらないことになります。

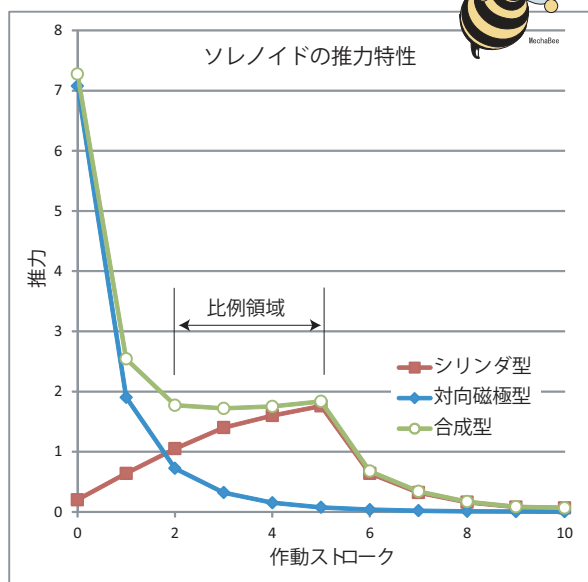
位置を制御したい場合は対抗ばねを使用します。対抗ばねのばね定数を適当に選べると、平坦な特性の範囲内でばね力と発生推力でバランス点が得られます。推力は電流で任意に制御できますので、結果的に電流で位置を定めることが出来るわけです。この様子を図3に示します。

「サーボ」は大きな減速比を持つ減速機をモータと出力軸の間に配置しています。比例ソレノイドはこのような機構が全く必要なく、出力軸が直接制御可能です。このシンプルな構造が大きなメリットです。このため高速な動作が可能で、信頼性の高い応用が期待できます。

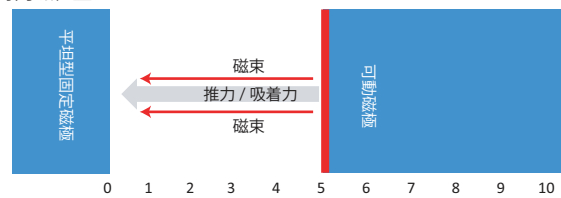
■ 3. 原理的な利点・問題点

平坦な対向磁極を持つソレノイドは主磁束の方向と推力の方向が一致しています。これに対して、シリンダ型のソレノイドはシリンダ状の固定磁極の内側に可動磁極が入り込んでいき、磁束は内側の可動磁極から外側に向かって流れています。発生する吸引力の方向も同じ向きです。しかし、推力として取り出される成分は移動可能に支持された方向のみです。このため、横方向の損失成分が発生します。この成分は支持軸の抵抗として働くことになります。この結果、作動時の機械抵抗が大きくなることで、往復させた際の推力差であるヒステリシスを生じる原因となります。このほかに、磁極を構成する磁性材料に磁気的なヒステリシスがあり、これも結果的にソレノイドのヒステリシスとなって現れます。この特性を改善した磁性材料も存在しますが、価格の高さや、加工しにくさなどから使用は限定的です。

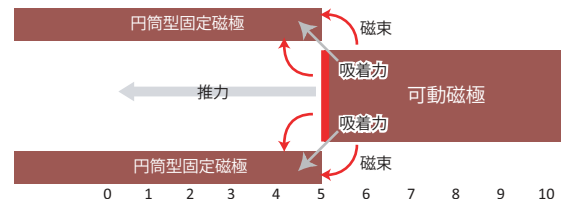
油圧機器は作動油に高い圧力を加えて使用されますが、ソレノイドはその可動部を高い圧力に耐える圧力容器内に封入できる構造が可能で、摺動部でこの圧力に耐える必要がありません。このため、油圧機器への応用が広く進んでいます。



対向磁極型



シリンダ型



合成型 (比例ソレノイド)

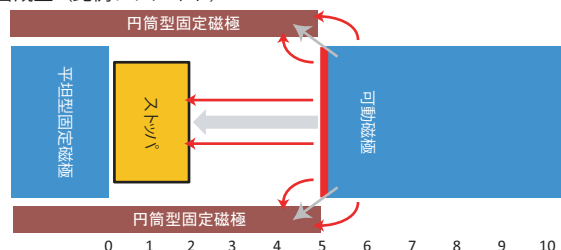


図1 各種ソレノイドの磁極と特性

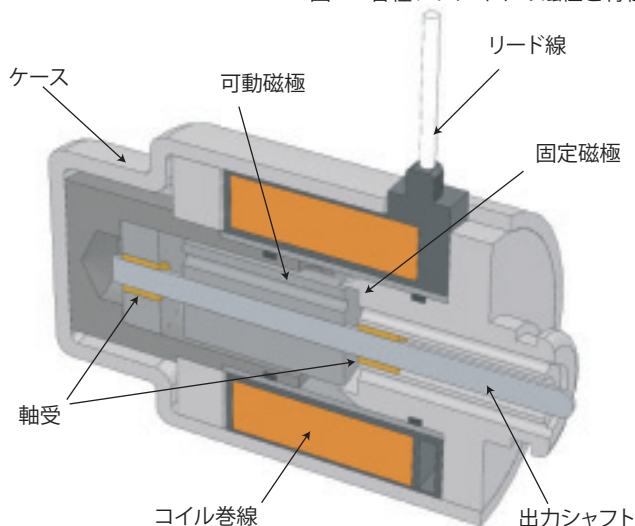
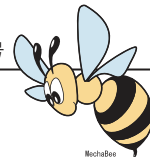


図2 比例ソレノイドの構造



比例ソレノイド位置制御説明図

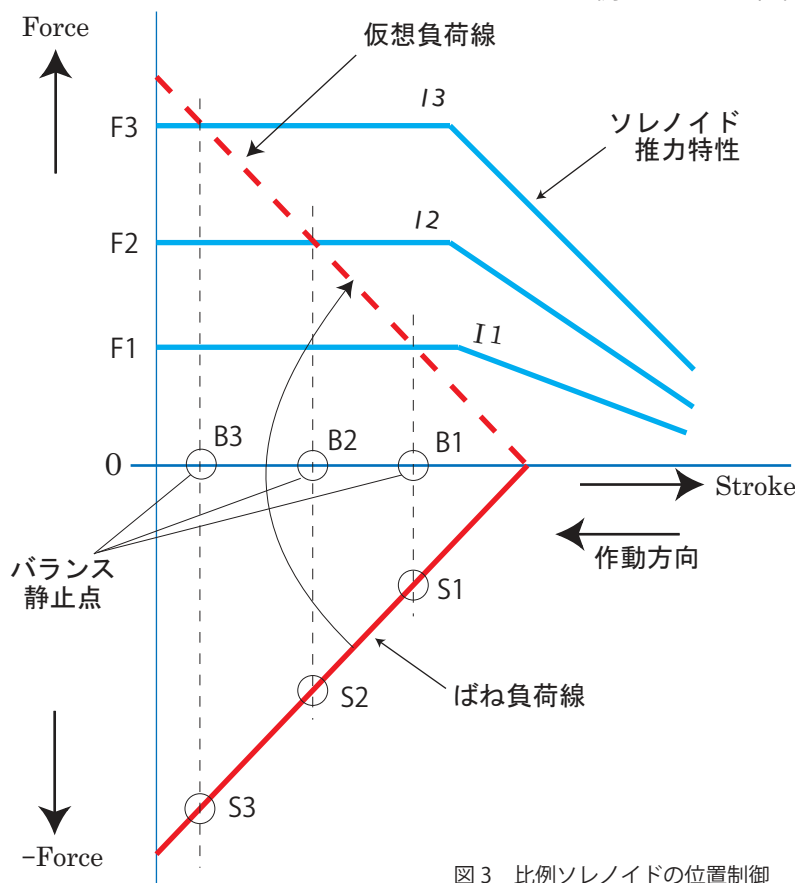


図 3 比例ソレノイドの位置制御

横軸は作動ストローク、ソレノイドの作動方向は左向き、ばねによる復帰は右方向です。

縦軸は推力およびばね力を示し、ソレノイドの発生推力は上方向で、負荷ばねはこれと対抗するように逆方向の下向きに設置されています。

比例ソレノイドは制御領域内で発生推力が一定の値を示すように設計されており、大きさを変えた電流 I_1 、 I_2 、 I_3 を流すと図示のような特性を示します。ここで、 I_1 を流した時には、発生推力とばね荷重の絶対値の等しい点 S_1 で推力とばね荷重が拮抗し B_1 にて静止します。同様に I_2 で B_2 、 I_3 で B_3 で静止することになり、駆動電流で位置制御が可能となります。

カタログ等に記載している特性図においては、絶対値の交点が分かりやすいように軸反転して仮想負荷線の表記を用いることが多いので注意してください。

また、ばねを取り去り、 B_3 付近で負荷に接触させた状態において、電流を I_1 、 I_2 、 I_3 と変化させたとき、推力は F_1 、 F_2 、 F_3 と変化します。このとき、位置が B_2 まで移動しても、電流と発生推力の関係は変化せず、負荷に与える荷重は変わりません。

■ 4. 駆動テクニック

一般のソレノイドと構造が異なっても、特別な駆動方法が必要なものではなく、電流値が制御できる電源であれば問題なく使用できます。制御対象が電圧でなく、電流なのは、原理的に発生推力はコイルの巻き回数とそこに流す電流の積で決定されることによります。コイルは銅線を巻いて作られており、銅線の抵抗温度係数はかなり大きな値を示します。このため電圧を一定に保っても、周囲の温度変化や自身の発熱によって抵抗値が変化し、電流が変化してしまいます。結果として推力の変化を招きます。このため、制御するには電流を制御してやる必要があるのです。一般の ON/OFF ソレノイドなら、温度変化による電流の低下分を見込んで少々オーバドライブしておけば事足りますが、比例ソレノイドではそれが許されないのです。

具体的な電流の制御方法には電圧を変化させる方法、スイッチングにより PWM で制御する方法があります。効率の高さから PWM による方法が良く用いられます。

比例ソレノイドの駆動は電流が制御できれば問題なく使用できるわけですが、ヒステリシスという原理的な問題を持っていることを前述しました。ヒステリシスは制御精度を高めようとしたとき大きな障害となります。このために対策が必要です。

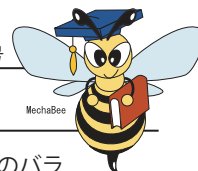
ヒステリシスは軸受の機械的な摩擦によって生じます。これに対しては可動部に微振動を与える方法が効果があります。微振動によって軸受の摺動抵抗が低減されます。この微振動をディザと呼びます。ディザの発生は駆動電流に振動成分を加え

ることで実現します。振動成分の付加には電流指令値に振動成分を加算する方法と、電流制御の為に使う PWM の周波数を低めに設定し、故意に脈動を発生させる方法があります。ディザの周波数は出力シャフトを振動させるのが目的ですから、負荷の性質によって最適値は異なります。周波数も振動振幅も異なります。実際に使用される環境での確認が必要となります。目安としては 100 ~ 200Hz 前後、定格電流の 10 ~ 20% 程度の振幅とします。ディザは大きい方が改善効果は大きくなりますが、負荷への影響、寿命への配慮などから決定します。

なお、ヒステリシスの原因には磁極の材質による磁気特性由来のものもあります。駆動電流に加える脈動は磁気ヒステリシスの低減にも効果があります。

ヒステリシスは駆動電流と発生推力の関係が、上昇時と下降時で異なることであり、ちょっと詳しい方なら結果をフィードバックさせれば問題ないはずだと思われるかもしれません。冒頭に引き合いに出した「サーボ」は出力シャフトの位置をポテンショメータで検出し、その位置を指令値と比較する形の制御を行っています。これと同じ形の制御を行えば問題ないのでは、というものです。結果的にはその通りです。ただし、応答性に差が生じます。安定性の確保にも影響があるでしょう。ソレノイドのメリットはシンプルで応答が良いことですから、そのメリットを生かすためには適切な対策を講じる必要があるでしょう。





■ 5. 代表的な応用例

● 流量制御弁・油圧機器・位置制御

油圧を使用して駆動される装置では、油圧シリンダ等で駆動される機構を作動油の流量や方向を制御することでその操作を行います。建設機械などがその代表です。従来は機械的なレバーやハンドル等で流量制御弁の位置を操作したり、方向切換弁で作動方向を切り替えたりすることで、その制御を行っていました。流量制御弁の動作は、水道の蛇口の開度で水の吐出量を制御するイメージです。蛇口ではハンドルの回転をねじ機構で絞り弁の開度を調整しています。この制御弁を比例ソレノイドで駆動して位置制御することで、電氣的に操作が可能になります。操作者はジョイスティック等の操作レバーを動かすことで作動指令を行うことが出来ます。電氣的な接続が保たればいいので、容易に遠隔制御が可能になります。また、制御用にコンピュータを使用、併用することで様々な自動化や省力化が可能になりました。

● 圧力制御弁・油圧機器・推力制御

油圧機器はポンプで作られた高压の作動油によって作動します。この圧力によって、シリンダ等の発生推力は異なりますし、制御対象によって最適値が異なります。このため、油圧ポンプで発生した高压を目的圧まで減圧する調整弁が必要となります。この用途に用いられる圧力調整弁(リリーフ弁)はバルブ内のシート面をスプリングの押圧力で塞いでおき、油圧がこのばね力を越えて大きくなったとき、作動油が逃げて圧力の上昇を抑えます。従ってこのばね力を任意に変更することで、目的の圧力を得ることが出来ます。このばねを比例ソレノイドに変えることで通電電流によって押圧力を調整できます。結果的に通電電流で、圧力を調整することが出来ます。この場合、比例ソレノイドは、対抗ばねとのバランスで位置を制御するわけではなく、油

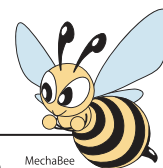
圧による発生力と通電電流で決まる推力とのバランスで動作します。位置はほとんど動きません。

● 燃料制御・内燃機関・位置制御

ディーゼルエンジンの燃料の制御に使われています。ディーゼルエンジンはその運転状況に応じて必要な燃料の供給量が刻々と変化します。この変化に応じて供給量を自動調整する仕組みをガバナといい、従来から機械的な仕組みのものが使用されてきました。制御精度や燃料消費効率の向上を目指して比例ソレノイドを燃料の供給制御に用いて電子制御化したものが電子ガバナです。大幅な性能向上を果たし、建機、農機などの産業用ディーゼルエンジンとして広く用いられています。ここに使用される比例ソレノイドはエンジンの性能に直接影響するため、性能要求はかなり高いものです。応答速度、設定精度に加えて、大きな作動距離が要求され、さらに直接エンジンに取り付けられるため、温度、振動など極めて過酷な環境に耐える必要があります。昨今の排気ガス規制からも不可欠な仕組みとして重要性が増しています。

● ミシン糸張力制御・ミシン・推力制御

縫製用ミシンの糸の供給機構はその張力の管理が仕上りに大きく影響することから、適切に管理することが求められます。これは、糸取ばねの加圧力を調節ダイヤルで機械的に設定して行われています。現在、縫製の対象となる布や、糸は極めて多様化しており、それぞれ縫製条件が異なるため、その管理は煩雑で大変です。この機構中のばねの加圧力を比例ソレノイドに置き換えれば、通電電流で加圧力を制御できるようになります。これにより素材ごとに記憶させた最適条件を設定することで、作業性や再現性の向上に大きな効果があります。



■ 6. 終わりに

比例ソレノイドは油圧機器の制御手段としてはごく当たり前のアクチュエータです。ただし、油圧業界以外においては知名度が高いとは言えないようです。使い方が一般のソレノイドと異なるところがあるせいか、難しい印象も持

たれているようです。今回は基本的なところについて説明してみました。何か新しい応用が見つかることを期待しています。疑問点につきましては遠慮なくお問い合わせください。

■この資料の内容は改良の為、お断り無く変更することがありますのでご了承ください

「めかとり通信」に関するお問い合わせは

2018年5月現在

新電元メカトロニクス株式会社 <http://www.shindengen.co.jp/smt/>

本社 社 〆357-0037 埼玉県飯能市稲荷町11番8号 TEL 042(971)6212 FAX 042(971)6218
西日本支店 〆460-0003 名古屋市中区錦1-19-24名古屋第一ビル TEL 052(219)9711 FAX 052(201)4780
茜台工場 〆357-0069 埼玉県飯能市茜台2丁目1番5号

新電元メカトロニクスのソレノイドのご用途は