

モータとドライバの選択

ステッピングモータはいろいろなアプリケーションに使用されています。このため、一般的なステップバイステップの設計フローチャートを示すことは困難です。設計プロセスは、経験、計算、および実験を含む、反復プロセスです。このアプリケーションノートの目的は、システム性能がモータおよびドライバの選択によってどのように影響されるかを示すことです。一般的なモータおよびドライバの例を扱います。また、モータと負荷の間の歯車装置の重要性についても説明します。

システム性能の限界

トルクと出力

ステッピングモータから得られる出力トルクと電力は、モータのサイズ、巻線、放熱、動作デューティ、および使用するドライバのタイプに関係します。低ダンピング負荷の用途では、ステッピングモータのトルクは共振によって急激に低下します。

ステッピングモータのデータシートでは、様々なタイプのモータとドライバの組合せに対して、プルイントルク/プルアウトトルクと速度（ステップレート）の関係が示されています。プルイントルク曲線は、同期を失うことなくモータが始動できるさまざまなステップ速度での最大摩擦トルクを表します。実際の用途では、この曲線は負荷の慣性を考慮して修正する必要があります。

プルアウト曲線は、モータが任意の周波数で一定の速度で動作するとき利用可能なトルクを表すため、より重要です。実際の用途では、このトルクは負荷摩擦トルクに打ち勝ち、負荷とモータ慣性を加速するために使用されます。

適切なモータのタイプとサイズを選択するときの問題として、ドライバが出力トルクと電力に大きな影響を及ぼすことがあります。7.5°、57mmのPM型モータの出力トルク、電力、およびシステム効率の差を図1に示します。巻線とドライバの両方で、このタイプのモータの最大消費電力7ワットを越えることなく、停止状態で巻線に流れる最大電流をドライブできるように設計されています。

このグラフから、基本的なユニポーラL/Rドライバと比較して、バイポーラ定電流ドライバを使用することで、モータの出力を6倍に増加可能ながわかります。増加した出力は、増加した全プルアウトトルクと増加したステップ周波数範囲の両方の関数になります。

図からわかるように、このタイプのモータの最大出力は、最大自起動周波数と比べて比較的高いステップ速度で得られます（ゼロ負荷慣性に対して、ドライバ回路により約150～400Hz）。このことは、ほとんどのアプリケーションに当てはまります。つまり、高性能のステッピングモータシステムを得るためには、モータと負荷の始動停止時に加速または減速をする必要があることを示しています。加減速を効果的に使用することで、ステッピングモータを高出力で使用でき、低性能な低出力システムに制限する必要はなくなります。

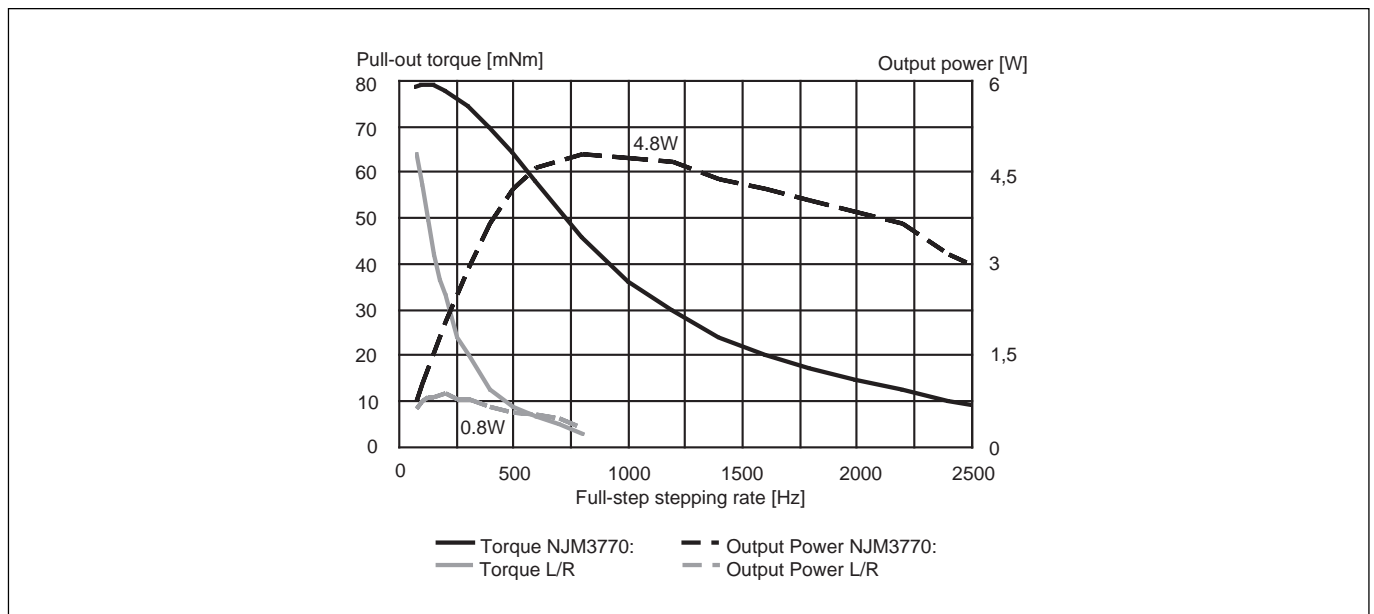


図1 ユニポーラL/RドライバとNJM3770Aバイポーラ定電流ドライバで駆動された57mm PMステッパのプルアウトトルクと出力

ダンピング（減衰）と共振

ステッピングモータのシステムで、ダンピングが小さなアプリケーションで共振が起こると、利用できるトルクと許容電力は急激に低下します。共振は、低速、中速、および高速のステップ領域でそれぞれ発生します。定電流ドライバでは、普通、低速域で共振が多く発生します。低周波で起こる共振は、ハーフステップやマイクロステップを採用することで多くの場合回避できます。定電圧ドライバの場合は通常、中速や高速、あるいはその両方で共振が発生します。これらの速度で起こる共振は、ハーフステップやマイクロステップでは低減されません。したがって、中速高速域でこのタイプのドライバを使用することは、高ダンピング負荷の有無により制限されます。ダンピングは、モータのタイプにも依存します。

PM型モータは、スライドベアリングの摩擦と磁気的な損失によって、HB型よりも大きなダンピングを持ちます。

モータとドライバの組合せ条件によっては、特定の速度でダンピングが非常に低くなるため、高ダンピング負荷なしでは動作しません。この条件は、無負荷不安定性として知られています。

分解能と位置決め精度

ステッピングモータシステムの分解能は、モータのフルステップ角、選択するドライバモード（フルステップ、ハーフステップ、またはマイクロステップ）、およびギア比など、複数の要素によって影響されます。このことは、必要な分解能を得るために、異なる複数の組合せが存在することを意味しています。このため、ステッピングモータシステム設計時、分解能の問題は、通常モータサイズとドライバタイプが決定された後に扱います。

設計時間

ステッピングモータのカスタム化は可能ですが、開発期間とサンプルの製造期間の両方が必要になります。チョッパ方式の定電流ドライバ回路等を使用すると、本来の性能を失うことなく、標準的なモータを採用できる可能性があります。

コスト

大量生産するアプリケーションに採用する場合、主要なコストはハードウェアの製造コストです。これには電源、ドライバ、巻線、モータ、および減速装置が含まれます。この場合は、開発のコストはあまり重要ではありません。多くの場合、より複雑なドライバ（多少コストの高いもの）と、低コストのモータおよび電源を使用することで、全システムコストを削減し、性能を向上させることができます。少量および中程度のアプリケーションでは、開発コストが全コストの大きな部分を占めるようになります。この場合は、定電力ドライバの柔軟性と完成度の高さを生かせば、開発の時間とコストを節約することができます。

表1 ユニポーラ定電圧ドライバの特性

特徴

- ・回路部品のコストが低い。
- ・小型モータで、非常に低コストのトランジスタアレイを使用できる。
- ・電氣的ノイズレベルが低い。

欠点

- ・モータ出力が低い。
- ・停止状態で消費電力が最大。
- ・モータのコストが高い。他のドライバと同じ出力に対してサイズが大きい。
- ・ドライバトランジスタは最大電源電圧の2倍に耐える必要がある。
- ・使用された電源電圧に対して巻線を設計する必要がある。
- ・調整された電源が通常必要。
- ・ホールディングトルクが電源電圧とモータ温度に依存する。
- ・ハーフステップモードでの駆動時のトルクリップルが大きい。

用途

- ・モータが主にトルクを発生するために使用される低速および低出力用途。
- ・通常は、小型モータでのみ使用される。

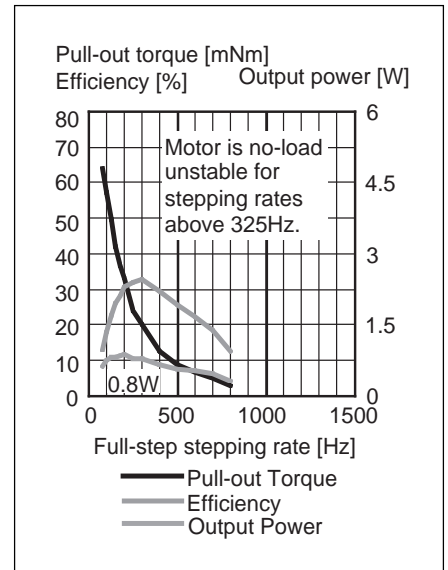


図2 20V L/R定電圧ドライバで駆動された100 ユニポーラ57mm PMモータの性能曲線

動特性

モータ軸がある位置から別の位置に移動し、可能なかぎり最短の時間で停止する必要がある場合、整定（セトリング）時間が非常に重要な要素になります。システムが適切に設計されている場合は、整定時間は最短に保つことができます。もしそうでない場合は、整定時間が数百ミリ秒かかることもめずらしくありません。オープンループシステムで優れた動特性を得るには、適切なギア比とモータ動作およびホールディングトルクの正確な制御が重要になります。適切な減速装置を使用すると、負荷慣性および摩擦の両方の変動に対処することができます。

ドライバの性能

以下の項では、一般に使用されるいくつかのドライバ構成の、57mm、7.5°PM型モータを駆動する場合の性能を比較します。駆動電圧/電流は、停止状態のモータ損失が最大定格7Wに保たれるように選択します。性能曲線は、プルアウトトルク、出力（モータ軸）、およびシステムの効率を表しています。効率は、モータから得られる機械的出力を、ドライバへの入力で割ったものとして定義されます。各ドライバに対して、特徴と欠点も挙げてあります。

ユニポーラ定電圧

これは、典型的なローエンドドライバです。ドライバ回路には4つのトランジスタが使用され、低い価格で提供されます。小型モータを駆動するには、ULN2003または類似のタイプのトランジスタアレイを使用できます。中型モータでは、電力用ダーリントントランジスタ、またはトランジスタアレイを使用できます。図2では、このタイプのドライバの性能を示します。100の巻線抵抗をもつモータが選択されています。これによって巻線電流の優れた制御と、電力用トランジスタの低い損失が得られます。このドライバを使用する場合、このモータでは325Hz以上の速度で無負荷不安定性の問題が発生します。

ユニポーラL/nR定電圧

このドライバは、ユニポーラ定電圧と似ていますが、モータ巻線と直列に外部直列抵抗が接続されています。このドライバは、L/R率の変更が可能です。L/2Rは全抵抗がモータの内部抵抗の2倍あることを意味します。LがRより高くなると高速での出力トルクが増大しますが、システム効率は低下します。図3に、内部抵抗100の、図2と同じユニポーラモータをL/2Rモードで駆動した特性を示します。L/Rドライバと比較して、より高い出力トルクと電力が得られます。最大出力は2倍になりますが、ピーク時のシステム効率は低下しています。

このドライブではまた、400Hzを超えるパルスレートで無負荷不安定性が発生します。これによって、高速でのアプリケーションは、高ダンピング負荷の駆動、またはモータが一定速度で動作しない、加速/減速用途に制限されます。不安定な範囲でモータが動作するステップ数が制限されている場合は、不安定な周波数では加減速を行うことで、通常の安全マージンで全プルアウトトルクを使用することができます。

表2 ユニポーラL/nR一定電圧ドライバの特性

特徴

- ・ 部品のコストが低い。
- ・ 電氣的ノイズレベルが低い。

欠点

- ・ 効率が低い、あるいは非常に低い。R_{ext}/Rの比率が大きくなると効率が低くなる。
- ・ 直列抵抗からの熱放散の問題。
- ・ L/nR比によって、停止状態での最大消費電力が通常のL/Rドライバと比較して増大している。
- ・ ハーフステップモードでのトルクリップルが大きい。
- ・ 保持トルクが電源電圧とモータ巻線温度に依存する。

用途

- ・ 低速、中速および低出力用途。

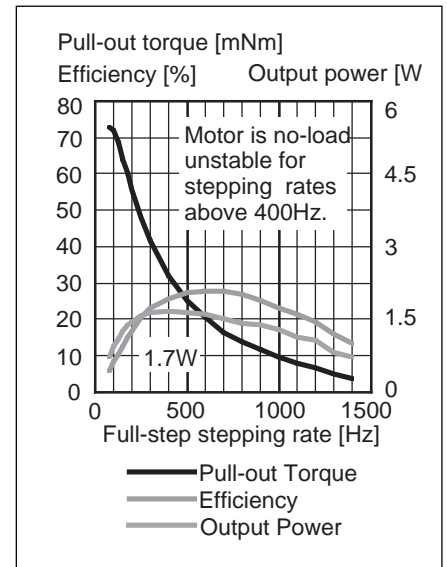


図3 40V L/2R一定電圧ドライバで駆動された100 ユニポーラ57mm PMモータの性能曲線（2 x 100 の外部直列抵抗）

ユニポーラバイレベル

このドライバは、モータ効率を高めるため、2つの電圧レベルを使用します。すべてのパルス入力において、停止状態で使用される定常電圧より高いレベルを、巻線両端に短時間だけ印加します。残りの時間では定常電圧が使用されます。このドライバは、「モータの動作/停止に応じて」バイレベルモードが設定できます。モータがステップする間は高電圧が使用され、停止状態では低電圧が使用されます。

このドライバはまた、停止ホールディングトルクを選択でより高い柔軟性を与える、L/nR型の直列抵抗と組み合わせることができます。NJM3517は、小型モータと共に使用するための、完成度が高いバイレベルドライバです。図4では、100 の同じユニポーラPM型モータを駆動する場合のL/2Rドライバの性能が示されています。任意のモータのトルク曲線は、HレベルとHレベルオン時間の関数です。この例では、Hレベル電圧は40V（定常電圧の2倍）であり、Hレベルオン時間は4msです。元のL/Rドライバと比較すると、最大出力は3倍高くなっています。L/nRドライバと比較すると、効率が上がっています。また、比率 U_{high}/U_{nom} が増大しているため、直列抵抗の損失があっても効率は低下していません。このドライバでも無負荷不安定性の問題が発生しますが、この場合は中間の周波数のみが影響されます。加速/減速用途で使用される場合は、850Hzより上の安定した領域で一定速度が選択されるならば、これは問題にはなりません。

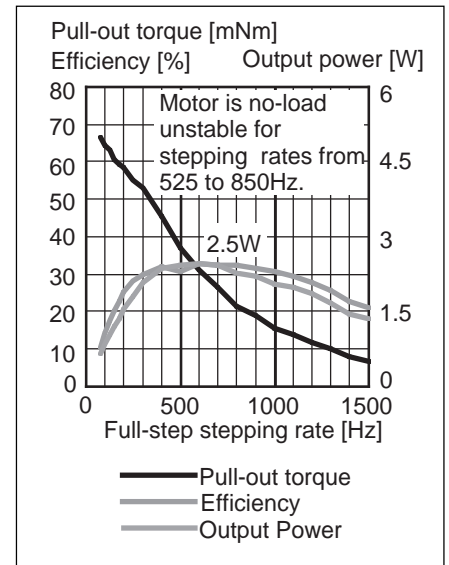


図4 40/20V バイレベル一定電圧ドライバで駆動された100 ユニポーラ57mm PMモータの性能曲線 (Hレベル電圧オン時間 = 4ms)

表3 ユニポーラバイレベル・ドライバの特性

特徴

- ・ 中程度の部品のコスト。
- ・ 中程度の電氣的ノイズレベル。

欠点

- ・ Hレベル電圧オン時間を制御するため、タイミング回路または追加のCPUオーバーヘッドが必要。
- ・ 標準およびL/nRユニポーラドライブでの4つと比較して、電力用トランジスタが6つ必要。
- ・ HからLの大きな駆動電圧比が使用される場合、保持トルクとステップ精度の制御は、巻線電流の変動によって困難である。
- ・ 保持トルクが巻線温度と電源電圧に依存する。

用途

- ・ 低速から中速、および低出力から中出力の用途。

表4 ユニポーラ一定電流ドライバの特性

特徴

- ・ バイポーラチョップドライブとほぼ同じ高速トルク。
- ・ バイポーラ一定電流の8つと比較して、電力用トランジスタを6つ使用する。
- ・ トルクリップルのないハーフステップが可能。

欠点

- ・ バイポーラ一定電流と比較して、保持トルクと低速トルクが約70%。
- ・ 電力用トランジスタは最大電源電圧の2倍に耐える必要がある。
- ・ スナバー回路を設計するとき、巻線漏れインダクタンスを考慮する必要がある。
- ・ 6本のリードワイヤによって、モータコネクタとフレキシブルケーブル用のコストとスペースが追加される。

用途

- ・ 高速および中出力用途。

ユニポーラ定電流

このドライバでは、ユニポーラドライバの最高の性能が得られますが、バイポーラチョップドライバの性能よりは低くなります。一度に半分の巻線しか利用できないことによる、大きな抵抗損失によって、効率が低下しています。高い周波数では、漏れインダクタンスとスナバ回路による電力損失も発生します。

バイポーラ定電流

どのようなモータに対しても、最大の出力と効率、バイポーラ定電流ドライバで得られます。DC損失は、最大の巻線利用によって、銅損が最小に保たれます。またすべての相は1本の巻線で構成されるため、漏れインダクタンスとスナバ回路からの電力損失はありません。図5に同じタイプの57mm PM型モータを駆動する、このタイプのドライバの性能を示します。ここでは、定電流に適合した巻線抵抗3.75Ωをもつモータを選択しています。巻線電流は、上記でテストされたユニポーラドライブと同じ抵抗損失を、停止状態で巻線内に発生するように選択されています。グラフから、出力、最大ステップレート、およびシステム効率の増加がわかります。巻線の利用率が向上することによって、ホールディングトルクも上昇しています。中速および高速域での無負荷不安定性は存在しません。これによって、一定速度の動作周波数の選択で柔軟性が向上します。しかし、100Hzでの共振は存在します。加速/減速用途では、この周波数が一定速度周波数として使用されないかぎり、問題にはなりません。このタイプのドライバは、小型および中型のモータの駆動で費用対効果が高くなっています。

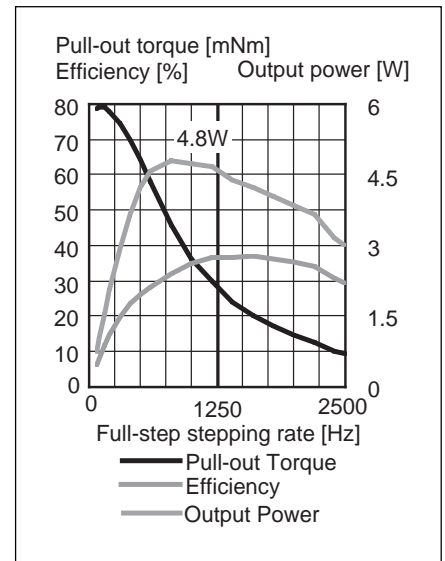


図5 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された3.75Ωバイポーラ57mm PMモータの性能曲線（チョップ電圧20V、巻線電流960mA）

表5 バイポーラ定電流ドライバの特性

特徴

- ・最大のモータ利用率と高い効率。
- ・高ステップング率と低ステップング率での最大のトルク。
- ・低損失のスタンバイモードが可能。
- ・8リードモータは、3つの異なる動作電流用に設定可能。
- ・スナバ回路は必要ない。電流ターンオフは、高速（電源に戻る）または低速を選択できる。
- ・高度に統合されたドライバが使用可能。二次ソースのドライバも使用可能。

欠点

- ・モータの駆動に8つの電力用トランジスタが必要になる。
- ・電氣的ノイズと干渉の問題が発生することがある。
- ・電流検出抵抗での電力損失。

用途

- ・小型および中型モータで、高度に統合されたドライバが使用可能。
- ・高速および高出力用途。

表6 バイポーラ定電流マイクロステップング・ドライバの特性

特徴

- ・バイポーラ定電流と同様。
- ・低ステップ率での共振のない動作。
- ・向上した停止位置分解能。

欠点

- ・バイポーラ定電流と同様。
- ・通常のバイポーラドライブよりも電流制御回路部品のコストが高い。

用途

- ・小型および中型モータで、高度に統合されたドライバが使用可能。
- ・高速および高出力用途。
- ・高い分解能が必要な用途。
- ・共振のない低速特性が必要な用途。

バイポーラ定電流マイクロステップ

これは、基本的なフルステップおよびハーフステップバイポーラ定電流ドライバの改良版です。ここでは、巻線電流は正弦／余弦の対を形成しています。これによって、オーバーシュート動作、リングング、および共振が取り除かれ、低速の挙動が大幅に改善されます。中速および高速での性能は、フルステップやハーフステップの性能に近づいています。

このドライバは、バイポーラ定電流ドライバと同じ出力部を使用しますが、正弦／余弦電流レベルを設定するため追加の部品が使用されています。マイクロステップは、異なるマイクロステップ角で使用できます。フルステップの1/3より短いステップ角では、通常モータの挙動は向上しません。ほとんどのマイクロステップコントローラでは、通常のフルステップまたはハーフステップモードを実行することもできます。マイクロステップはまた、モータの分解能とステップ精度を向上させます。

一般的ドライバの問題点

電源設計

全ての定電圧タイプドライバでは、制御された定電圧が通常必要になります。これは上の図で示された値よりも、電源での損失によって、全体的なシステム効率がさらに低下することを意味します。このことから、変圧器のコストが増大し、熱問題が発生します。無調整の電源を使用する場合は、ホールディングおよびダイナミックトルクの大きな変動が発生し、停止時間の最小化が困難になるか、不可能となります。定電圧ドライバへ無調整電源を使用すると、モータ消費電力にも影響し、モータ効率の改善が不可能になります。定電流ドライバでは通常、制御されていない電源を使用できます。モータ電流、およびホールディングトルクと消費電力は、ドライバ自体によって制御されます。高ステップング率でのプルアウトトルクは電源に影響されますが、低速ではこの影響は小さなものです。

決められた特定の用途でも、消費電力を計算するのは困難です。これを得るために最も優れた方法は、プロトタイプを作成して、異なる駆動条件下でドライバ入力電流を測定するものです。消費電力は入力電圧、電流レベル（定電流モードの場合）、負荷、モータ温度、動作デューティーなどに依存することに注意してください。

スナバ回路と電流ターンオフ回路

特に大型のモータを使用する場合など、すべてのユニポーラドライバでトラブルのない動作を保証するため、巻線と電流ターンオフ回路を適切に設計する必要があります。ユニポーラ巻線は二本巻であることは重要な点です。つまり各モータ磁極上のコイルに巻かれる2本のワイヤは並列に巻かれていることを意味します。これによって漏れインダクタンスは最小に保たれますが、電流をオフにするとき、巻線に蓄積されるエネルギーを処理する必要があります。これは、電流ターンオフ回路、またはスナバ回路によって行われます。電流ターンオフ回路が、一方の巻線からもう一方への電流の転流の原理によって動作する場合は、漏れインダクタンスに蓄積されたエネルギーはスナバ回路によって処理されます。バイポーラドライブの場合は、巻線はそれぞれ1つの部分から構成され、漏れインダクタンスは発生しないため、別個のスナバ回路は必要ありません。電流ターンオフ回路は、Hブリッジの4つの電力用トランジスタに対して、4つのダイオードから構成されています。

モータでのヒステリシス損失

一部の低インダクタンスモータを使用すると、チョップタイプのドライバでは巻線電流リップルによって鉄損が増大します。この鉄損を低減するには、高い発振周波数を使用し、必要な最大ステップレートを得るために必要となる以上に低いインダクタンスを使用しないでください。また、低いチョッピング電圧を使用することもできます。ほとんどの用途では、チョッピング電流リップルに関連するヒステリシス損失は、ステップング電流変化に関するヒステリシス損失と比較して低くなります。チョッピング電流リップルが定常電流の10%未満に保つことをおすすめします。

干渉の問題

すべてのチョップタイプのドライブでは、様々な干渉問題のリスクが高まることを考慮する必要があります。別個の幅広いGND配線、およびPCB上の高感度な部品からの物理的に分離することは、干渉の回避に役立ちます。ステップングモータのリードは、静電および誘導結合を低減させるため、高感度な信号ワイヤから離しておく必要があります。チョップ用途では、モータのリードに存在するチョップ電圧（これは、電源電圧と同じ振幅、およびチョッピング周波数と同じ周波数をもつ矩形波信号です）の結合にも対処することをおすすめします。

モータの性能

ステッピングモータの最大トルクと出力は、モータの損失によって制限されます。低速では大部分の損失はモータの巻線抵抗損失です。高速ではヒステリシスとうず電流損が主要な損失になります。特に低コストの（t i n - c a nタイプ）PMモータでは、これらの損失は高くなります。なぜなら、安価なPM型では回転子や固定子に使用されるコアが電磁鋼板で積層化されておらず、比較的的低性能の磁性材料が使用されているためです。いままでのドライバの比較から、あるモータから最大トルク、効率、および出力を引き出すには、バイポーラチョップドライバが最適であることがわかります。

次に、バイポーラチョップドライバで駆動した場合の、いくつかの一般的なステッピングモータタイプの性能について調べてみます。他のタイプのドライバを使用する場合、この57mm PM型モータと同様に、性能の低下が予想されます。

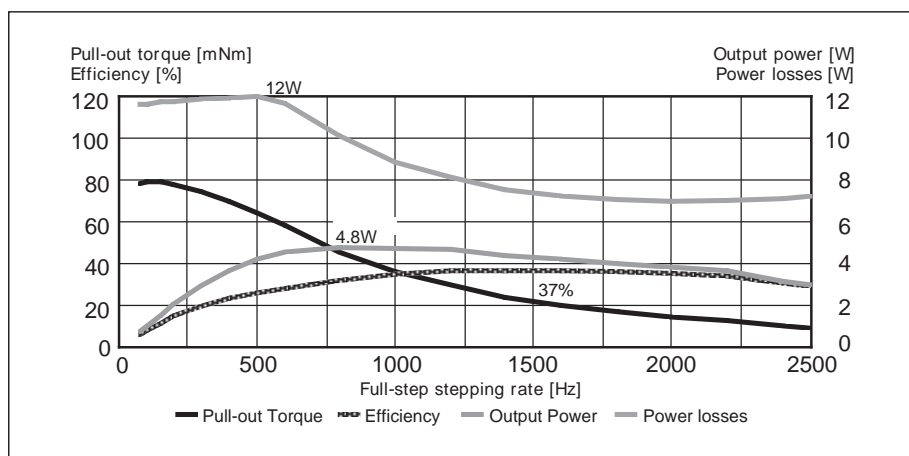


図6 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された3.75 Aバイポーラ57mm PMモータの性能曲線特性例。モータとドライバの電力損失も示されています。（チョップ電圧20V、巻線電流960mA）

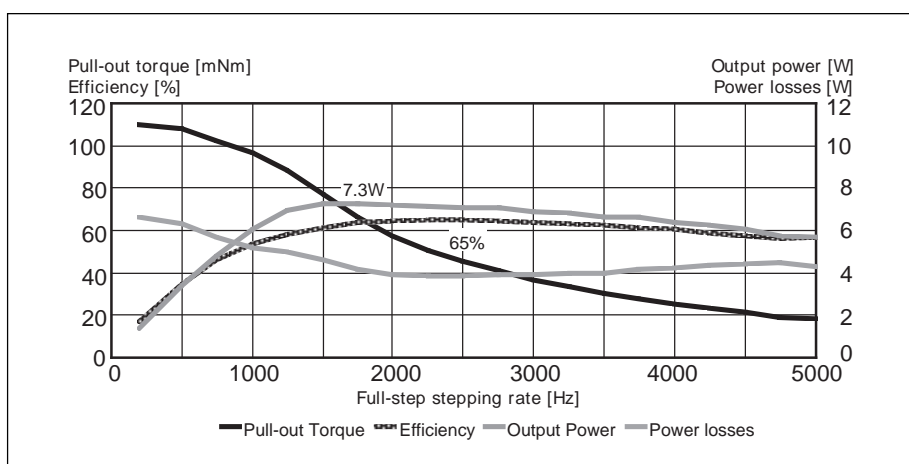


図7 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された2.5 Aバイポーラ42mmスクエア・ハイブリッド・ステッパの性能曲線特性例。（チョップ電圧40V、巻線電流280mA）

5 7 mm PM型モータ

PM型モータは、中程度の性能が必要なアプリケーションで、費用対効果の高い選択肢です。ベアリングと簡単な構造によって低コストになっています。HB型モータと比較すると、推定耐用年数は短くなり、ステップ精度と効率は低くなります。ベルトドライブがモータ軸に直接接続される場合、ベアリングが問題を引き起こすことがあります。たとえば、5 7 mm PMモータは、ミドルクラスのインクジェット、バブルジェット、その他のプリンタの紙送りおよびキャリッジドライブモータとしての使用に適しています。その他の用途には、ファックス機、マシン、弁制御、およびプロッタがあります。その他の一般的なPM型モータのサイズは、3 5 mmと4 2 mmです。2 0、2 5、および6 3 mmも一般的です。2 0 mmモータは、3 . 5 インチフロッピーディスクドライブのヘッドドライバとしての用途として知られています。一般に入手可能なモータのステップ角は、7 . 5 度と1 5 度ですが、その他の角度も入手可能です（たとえば9 °、1 1 . 2 5 °、1 8 °など）。図6では、このモータの性能を再び示します。電力損失は、ステップ周波数の関数としてプロットされています。このモータの定格は、最大消費電力7 Wです。このグラフは、モータとドライバの消費電力を示しています。低ステップレートでは、2 つのNJM3770A回路で約3 Wの損失、および電流検出抵抗でさらに約1 Wの損失、外部ダイオードで約1 Wの損失が予測されます。高速では巻線電流が減少し、スイッチングが停止するため、ドライバ損失は減少します。低速ではスイッチングによるモータ内の損失は7 Wになります。高速では全損失は減少します。これは、最大許容モータ損失7 Wを超過せずに、より高い出力を得る能力を示しています。同じモータに低い動作デューティまたは優れた放熱対策が適用されれば、少なくとも1 0 Wの最大出力が可能です。PM型モータは、HB型モータに対しても一つの利点があります。すなわち、内部ダンピングが高いため、HB型モータよりもより振動が少ない動作を提供できることです。

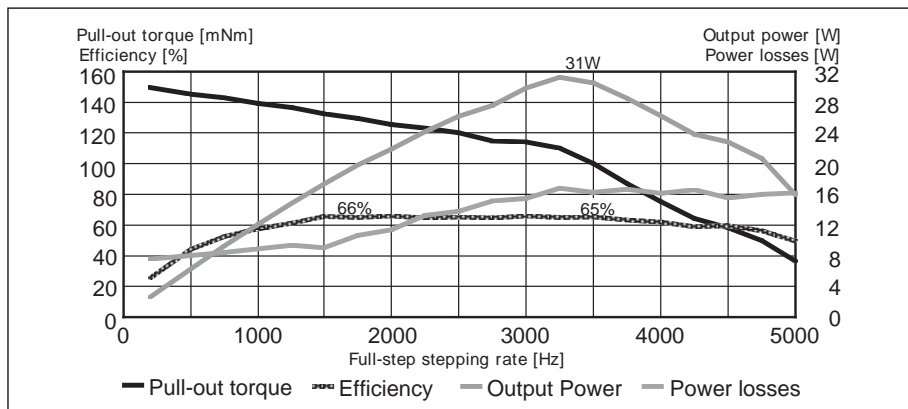


図8 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された2.8 バイポーラ57mmハイブリッドステッパ（長さ42mm）の性能曲線特性例。（チョップ電圧40V、巻線電流750mA）

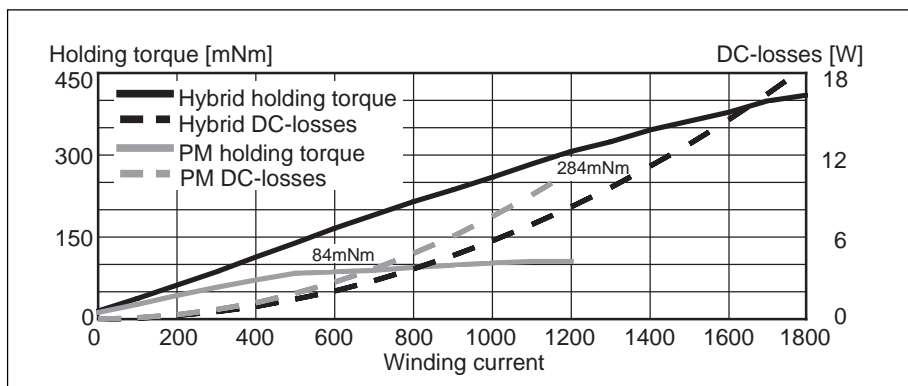


図9 57mm PMモータおよび57mmハイブリッドモータに対する、巻線電流の関数としての保持トルクとDC損失の性能曲線特性例。

4 2 mmスクエアモータ

このモータは、通常、 3.6° 、 1.8° 、 0.9° のステップ角のものが製造されています。ステップ精度はフルステップの $\pm 3\%$ から $\pm 7\%$ です。このモータでは、高い効率に必要な非常に小さなギャップを維持するため、ボールベアリングが使用されています。このタイプのステッピングモータは多くのメーカーから入手できますが、価格はPM型モータよりも高くなります。このタイプのモータの主な特徴は、57mm PM型モータと比べ、効率とステップ精度が高いことです。多くの場合、ボールベアリングによって寿命が長くなり、減速装置と構造の設計が容易になります。このタイプのモータは、5.25インチフロッピーおよびハードディスクのドライバとして、過去に非常に一般的になりました。また、このモータはプリンタやプロッタのキャリッジドライバとして、またタイプライタやデジタイザのプリントホイールの駆動に適用されています。このように高い効率またはボールベアリングが必要な用途で、小型PM型モータの競合品となります。図7は、定電流ドライバで駆動された2.5 バイポーラ 3.6° 42mmスクエアモータの特性を示しています。電流レベルは、停止状態で4Wの許容損失を得られるように選ばれています。このモータの定格損失は、メーカーによって差がありますが、4Wから6Wになります。図6の57mm PM型モータと比較すると、最も重要な相違点は、システム効率がほぼ2倍である点です。電力損失曲線から、高速では損失が減少することがわかります。これは、高いチョッピング電圧、または低いインダクタンスの巻線を使用すると、さらに高い高周波数性能が達成できることを示しています。

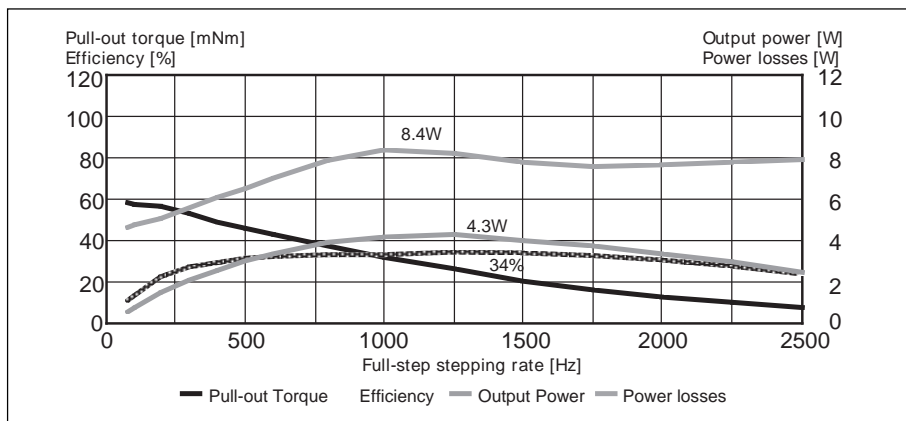


図10 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された3.75 バイポーラ57mm PMモータの性能曲線特性例。(チョッパ電圧20V、巻線電流480mA)

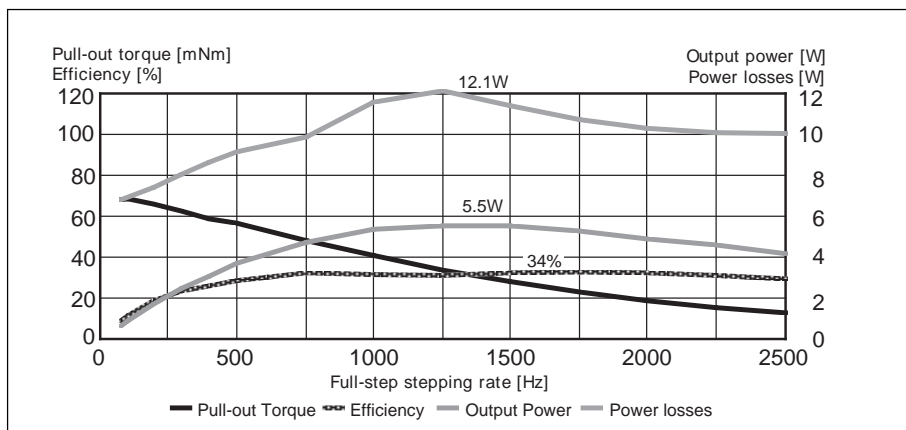


図11 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された3.75 バイポーラ57mm PMモータの性能曲線特性例。(チョッパ電圧25V、巻線電流600mA)

57mm (サイズ23) ハイブリッドモータ

このタイプのモータは、通常1.8°と0.9°のステップ角で、軸方向長さが40mmから100mmのものが入手できます。このモータは、上記の2つのタイプよりも高価ですが、一方、より高いトルクと出力を得られます。

このタイプのモータの特性を図8に示します。実例として、5°のステップ角、2.8のバイポーラ巻線、および42mmの長さをもつモータを選択します。このクラスで最小のモータサイズです。5°のステップ角は、高いホールディングトルクよりも高い軸速度のほうが重要な場合に適しています。この図では42mmスクエアモータと同じ高い効率を示していますが、出力は4倍の高さになっています。3000～3500Hzの範囲では、最大で30W以上に達します。高速でのモータ電力損失は、約12Wです（ドライバの16Wを含む）。これは、通常のモータ冷却と、100%の動作デューティで許容できる範囲です。低速では損失は低下し、停止状態での損失はわずかに3Wです。これは、低速では、さらに高い出力トルクと出力が必要な場合でも、モータ電流を増大できる余地があることを示しています。一方、低速トルクを削減することで、負荷慣性よりも負荷摩擦トルクがモータトルクの大きな部分を消費するアプリケーションで、ノイズと振動を低下させることができます。このモータは、高性能プリンタおよびプロッタでの紙送りおよびキャリッジ駆動、またはFA用に適しています。図10の性能をもつ5°モータは、レーザープリンタのプリント機構を駆動するのに適しています。NJM3770Aは、このサイズのモータ用ドライバとして適しています。

電力損失とホールディングトルク

高性能ステッピングモータを設計する場合の制限要素は、モータの消費電力です。ステッピングモータのメーカーは、停止状態での最大許容消費電力によってステッピングモータ巻線を選定しています。これによって、定格巻線電圧と電流レベルが得られます。実際の用途では多くの場合、最適性能はこれとは異なる電圧電流レベルで達成されます。図9は、上記の57mmPM型モータと57mmハイブリッドモータのホールディングトルクを、二相励磁電流と巻線内の抵抗電力損失の関数としてプロットしたものです。この図から、PM型モータでは、ホールディングトルク曲線は600mA付近に屈曲部があることがわかります。これは、巻線内の抵抗損失が指定の7Wに比べてわずかに3Wであるにもかかわらず、この電流レベルで磁気飽和が発生し始めていることを示しています。このことは、指定された電流レベル960mAを使用しても、低速では最適な性能を得られないことを示しています。図10は、巻線電流が480mAまで減少したとき、モータとドライバの性能に対する影響を表しています（図6で使用された値の50%）。図6と図10を比較すると、低速性能の向上が判ります。低速損失は50%未満に低下しますが、低速トルクは80%までしか低下しません。高速域では、小さなトルクの損失しか発生しません。図11では、駆動電流と電圧の別の組合せが使用され、図6と同じ最大損失で出力を5.5Wまで増大しています。ここでは、損失は最大出力が発生する速度で発生しています。HB型モータでは、磁気飽和をあまり生じることなく巻線電流の最大定格を超過して増大できることがわかります。図8では、このモータからのトルクは、3kHz未満のステップ周波数に対して、比較的平坦なトルク特性を示しています。これは750mAの電流レベルでは、このモータの低速特性が完全に生かされないためです。電流を増大させると、低速での出力トルクが上昇し、最大出力の領域が（低い周波数に向けて）広がりますが、これはピーク出力をわずかに向上させるだけです。

システムを設計する

負荷を分析する

ステッピングモータシステムを設計するとき、最初の質問は「負荷の特性はどのようなものか」というものです。この質問は、十分に考慮されないことがほとんどです。最大の性能を得るには、モータとドライバを選択する前、および変速機および機械的システム設計をする前に分析を行うことが重要になります。

摩擦または慣性負荷

システムの動的性能が高い場合（高加速度/減速）、モータからの出力トルクのほとんどはシステムの慣性を加速するために使用されます。このタイプのシステムから最大の性能を得るには、ギア比は通常、モータ軸に換算した負荷慣性がモータの内部慣性に近づくように設計する必要があります。モータ軸換算負荷慣性は、次のようになります。

$$J_{lm} = J_l / G_r^2$$

ここで、

J_l : 歯車装置なしの負荷慣性

G_r : ギア比

摩擦トルクは、ギア装置によって1/ G_r 倍に減少します。

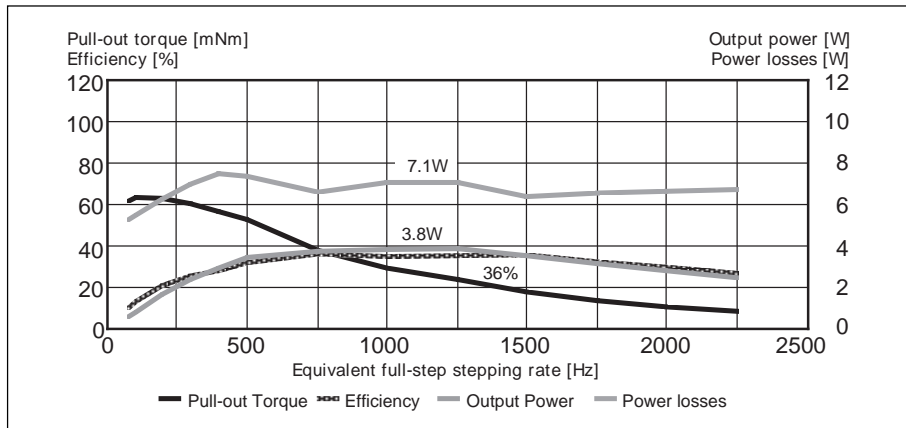


図12 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された3.75 ポール57mm PMモータの性能曲線特性例。(ハーフステップモード、高速電流減衰。チョップパ電圧20V、巻線電流480mA)

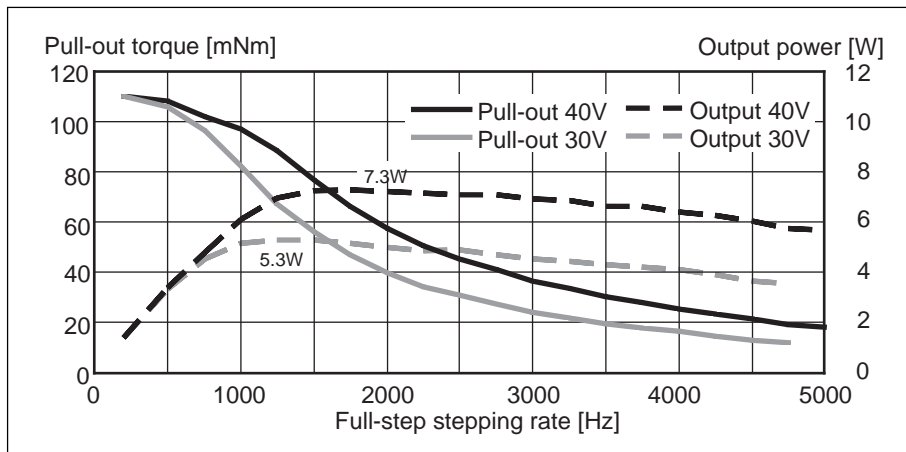


図13 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された25 ポール42mm スクエアハイブリッドステッパの、チョップパ電圧の関数としての性能を表した特性例。(チョップパ電圧40/30V、巻線電流280mA)

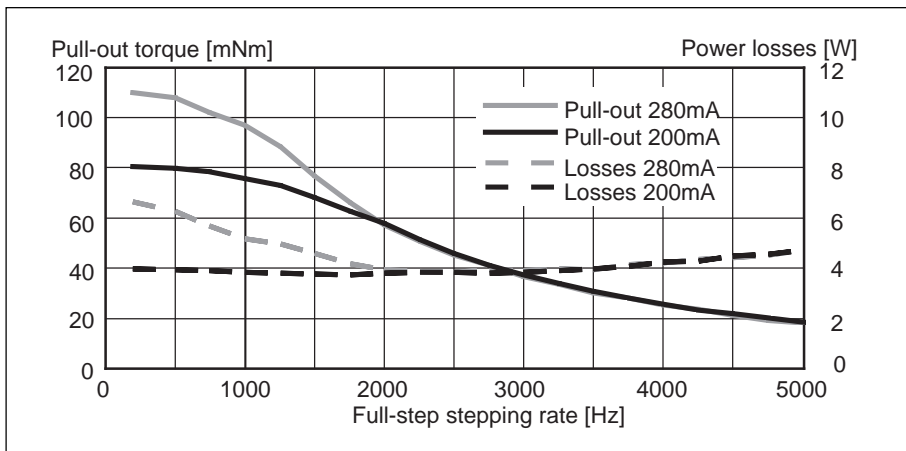


図14 NJM3770A一定電流ドライバで駆動された25 ポール42mm スクエアハイブリッドステッパの、巻線電流の関数としての性能を表した特性例。(チョップパ電圧40V、巻線電流280/200mA)

摩擦トルク/負荷消費電力

適切なモータサイズとドライバタイプを選択するには、負荷摩擦トルクを計算または測定する必要があります。ほとんどの負荷では、負荷摩擦トルクは異なる速度でもほぼ一定になるため、測定は簡単です。システムがリニア系動作を行う場合は、バネばかりを使用できます。回転系のシステムでは、トルクウォッチを使用できます。測定した力またはトルク、および動作の最大速度についての情報から、必要な最大負荷出力を計算できます。

リニアシステム（直線系）の場合

$$P[W] = v[m/s] \times F[N]$$

回転系システムの場合

$$P[W] = w[\text{ラジアン/s}] \times T[Nm]$$

負荷出力消費を推定するもう一つの方法は、モータ単体または減速装置と組み合わせたモータを、電流対トルクの関係が既知のDCモータと置き換えて、モータを所定の速度で駆動し、消費電流を測定するものです。この方法を使用する場合、異なる速度での消費電力を測定することができます。

ダンピング

すでに述べたように、ステッピングモータから利用可能なトルクは、共振によって特定の速度で低下することがあります。このトルク低下が発生する速度および共振レベルは、アプリケーションのダンピングと慣性に依存します。ドライバのダンピングは、トルクの低下にも影響します。

低速での共振は通常、ドライバの電流電圧レベルを低下させるか、ハーフまたはマイクロステップモードのドライバを選択することで低減できます。中程度の速度では、定電流ドライバでは通常共振の問題はほとんどありませんが、この場合は負荷の特性の影響が大きくなります。

低いシステム慣性では、共振の問題は少なくなります。しかし場合によっては、慣性の増加が、共振周波数を低い方に移動させることがあります。

選択時の考え方

負荷を分析すると、必要な出力、最大および最小ステップレート、および必要な分解能がわかります。設計者には、装置の目的とそれを満たす特性の重要度に応じ、システム内のモータの減速装置とドライバの組合せに幅広い選択肢があります。モータシステムの設計は通常、計算と実験を含む反復プロセスです。任意の性能に対して、最高の性能または最低のコストが重要な場合は、モータドライバと減速装置のいくつかの組合せを比較するとよいでしょう。高速ドライバと小型モータを適切な減速装置と共に使用すると、効率と出力に関しては、大型モータで負荷を直接駆動するよりも性能が向上する場合があります。

モータの選択

出力

これはステッピングモータシステムで最高の費用対効果を得ようとするときに、最も重要な設計基準です。いままでに示されたデータや方法、またはモータメーカのデータシートと、負荷の出力要件を比較検討してください。データシートを使用する場合は、ドライバが変わるとモータの性能も変化することに注意してください。また、ステッピングモータのプルアウトおよびプルイントルクの測定には注意を要します。測定値は測定システムの慣性と共振によって影響されやすく、実際の用途の慣性とダンピングとは通常異なります。そのため、データシートのプルアウト曲線は実際の用途には有効でない場合があります。

機械的要素

モータの物理的寸法と重さは、モータを選択するときに重要な基準です。多くの場合、小型のモータを選択することで、コンパクトな機構設計が容易になります。またモータがメカニズム上の可動部分にある場合、小型のモータを採用すれば移動システムの設計が容易になります。長い寿命が必要な用途では、ボールベアリングをもつモータが必要です。ハイブリッドモータでは、回転子と固定子の狭いギャップを維持するため、標準でボールベアリングが使用されていますが、小型のPM型モータでは通常スライドベアリングが使用されています。オプションとしてボールベアリングをもつPMモータは、一部のメーカから提供されています。モータがベルト歯車装置またはベルト変速機を直接駆動する場合は、ボールベアリングを強く推奨します。これによって、適切な寿命が保証され、ベルト張力によって発生するベアリング摩擦によるトルク損失が低減されます。

コスト

モータのコストは、モータのタイプとサイズに依存します。巻線タイプと抵抗は、コストに影響しません。一般に、ハイブリッドモータはPMモータよりも高価です。モータのコストは、通常、モータのサイズに比例して増大します。モータのコストに影響するもう一つの要素は、特定のモータの生産量と、そのモータのメーカの数です。これは、モータの出力が必要な出力より多少高くなっても、多くの場合「一般的な」タイプとサイズのモータが最も適していることを意味します。

モータをカスタマイズする

中容量および大容量用途では、モータをカスタマイズすることができます。ほとんどのメーカーは、次の項目に対してカスタマイズを提供しています。

軸	片面または両面 長さ ピニオン
巻線	抵抗 インダクタンス
回転子	磁石のタイプ ハイブリッド空隙距離
リードワイヤ	長さ コネクタ

一部のメーカーからは、軸の直径、ベアリングのタイプ、取り付けフランジなど、その他のパラメータをカスタマイズできます。しかし、これらは通常、大容量用途でのみしか利用できません。

ドライバの設計

ドライバの種類を選択するドライバの種類を選択するドライバの種類を選択するドライバの種類を選択するドライバの種類を選択する性能曲線の最初の部分は、システムに対するドライバの影響を表しています。低ステップング率のみ使用され、減速装置が使用できない場合は、ユニポーラLRドライバは任意の出力トルクに対する回路構成で最低のコストを提供します。モータからの出力の需要が高まるにつれ、より効率のよいドライバが最高の価格性能比を提供します。バイポーラ定電流ドライバを使用すると最高のモータ利用率を得られます。このドライバは、すべての高出力用途に対して最も優れています。低出力および中出力の範囲の用途では、複数の選択肢が存在します。システム効率が重要な場合は、バイポーラ定電流ドライバが最も適しています。このドライバは、チョッパ電圧と巻線内の電流を変更してモータから望みのプルアウトトルク曲線を得られるため、モータ巻線の選択で高い柔軟性が得られます。定電流ドライバには一般に調整された電源が必要ないため、電源設計は容易になり、電源損失は低下します。全体的なシステム性能ではなく、ドライバ回路構成の最小コストが最も重要な設計条件である場合は、別のユニポーラドライバが最も適しています。

ドライバのモードを選択する

フルステップ（2相励磁）モード：

これは基本的なドライブモードです。このモードは、制御回路が最も単純になります。高速および中速の動作に推奨できます。これらの速度では、モータと負荷の慣性がトルクを円滑化するため、低速動作と比較して振動とノイズが減少します。

ハーフステップモード：

相の電流が140%になるハーフステップ（修正ハーフステップ）では、フルステップと比較して、低速でより円滑な動作が得られます。このモードは、低速での共振を低減するために使用できます。ハーフステップでは、システムの分解能が2倍になります。ほとんどのモータで、ステップ精度の仕様は、2相励磁位置でのみ有効になることに注意してください。1相励磁位置では精度は低くなり、停止位置ヒステリシスは大きくなります。図12は、このモータにハーフステップが加えられたときの57mmPM型モータの性能への影響を示しています。フルステップと比較すると（同じ駆動条件については図10参照）、低速でのトルクが多少大きくなり、高速では多少低下します。大切なメリットは、低速でのノイズと振動の抑制です。低速高速両方で最大の性能を得る必要がある場合は、適切な速度でフルステップモードに切り換えることをお勧めします。ステップングモードをこのように変更すると、システムが制御ユニットとしてマイクロプロセッサを使用している場合は、CPU処理時間も低下します（ステップレートは高速で50%減少します）。

マイクロステップ：

マイクロステップでは、低速で最も円滑な動作が得られます。分解能も高くなります。つまり、低速で共振の少ない動作が重要な場合は、マイクロステップが最も適しています。マイクロステップはまた、モータの規定以上の停止位置精度の向上を実現させるためにも使用できます。

巻線の設計

定電流チョッパタイプドライバでは、巻線の設計は必要な出力、最大動作速度、およびチョッパ電源電圧に依存します。高出力が重要な場合に良い結果を得られる設計方法を以下に説明します。

EMF 選択

巻線設計で考慮すべき指標は、巻線の EMF（起電力）です。最善のモータ効率と出力を得られるポイントは、EMF ピーク値が駆動電圧（定電流ドライブの場合はチョッピング電圧）と等しくなる速度（ステップ周波数）です。例として、図 7 で示す性能をもつ 42 mm 角のモータで、20 mV / Hz の EMF 定数を持ちます（周波数はフルステップ時）。40 V のチョッピング電圧では、最適ステップ周波数 2 kHz が得られます。図 7 から、2 kHz では効率と出力の両方が最大になっていることがわかります。20 V で同じステップ周波数で最大出力を得られるように巻線を設計するには、10 mV / Hz の EMF 定数をもつ巻線を使用する必要があります。この巻線は巻数が半分になるため、元の巻線の 1 / 4 の抵抗とインダクタンスをもちます。同じホールディングトルクと低速性能を得るには、巻線電流を元の値の 2 倍まで上昇させる必要があります。

モータの最適ステップ周波数を非常に高い値まで増加させるのは、ヒステリシス損と回転子の漏れインダクタンスによって効率が下がってしまうため、不可能です。

モータの EMF 定数は、モータ巻線をオシロスコープに接続して、回転子を DC モータなどで定速回転させ、生成される信号のピーク値と周波数を測定することで測定します。発生される周波数は、フルステップの 4 倍の高さに相当します。これから、EMF 定数を計算できます。

図 13 は、チョッピング電圧が低下した場合の 42 mm HB 型モータのトルクと出力への影響を表しています。この図から、チョッピング電圧が 40 V から 30 V モータとドライバの選択

ステッピングモータはいろいろなアプリケーションに使用されています。このため、一般的なステップバイステップの設計フローチャートを示すことは困難です。設計プロセスは、経験、計算、および実験を含む、反復プロセスです。このアプリケーションノートの目的は、システム性能がモータおよびドライバの選択によってどのように影響されるかを示すことです。一般的なモータおよびドライバの例を扱います。また、モータと負荷の間の歯車装置の重要性についても説明します。

電流レベルを選択する

定電流ドライバでは、ドライバ電流レベルは主に低速でのトルクに影響します。ステッピング率の関数としての負荷トルクの需要（摩擦と慣性）によっては、モータからより平坦なトルク特性を得るために、電流レベルを低下させるのがよい場合があります。これによって、通常は共振と電力損失が少なくなるため、低い定格のドライバ回路を使用できます。図 14 では、巻線電流の低下の影響が示されています。この曲線から、低い電流によって、低速と中速のみ影響されることがわかります。低速での電力損失も減少します。しかし 2 kHz でのトルクは低下しにくいために、ピーク出力は影響しにくいと考えます。

要約

ユニポーラ L / R ドライバは、低速で駆動する場合は、与えられたトルクを満たす他のどの回路構成に対しても最低のコストになります。モータ出力の要求が高くなると、より効率のよいドライバがよい価格性能比を提供します。バイポーラ定電流ドライバを使用すると最善のモータ利用率を得られます。このドライバは、どのような高出力用途に対して最も優れています。