

# 工作機械用サーボシステムにおける主要技術

石塚 よし                      小市 伸太郎                      井出 勇治  
 Yoshi Ishizuka                      Shintarou koichi                      Yuuji Ide

## 1. まえがき

「マザーマシン」と呼ばれる工作機械は、産業の発展とともに広く世の中に普及しており、特にIT機器の隆盛に伴って、小型マシニングセンタはニーズが高まり、高性能・高機能化が図られてきた。それと共に、工作機械用サーボシステムに求められる仕様も高度化してきた。

本稿では、現在主流の小型マシニングセンタの高性能・高機能に貢献しているサーボシステムの主要技術を紹介する。

まず、工作機械用サーボシステムに求められる仕様の概要を示す。次に、加工能力の向上とサイクルタイムの短縮に貢献するモータ技術と制御技術を紹介すると共に、機械の振動抑制と加工精度の向上および省エネルギーに貢献するサーボ技術を示す。さらに、クーラント雰囲気や振動などの耐環境性および保守性に対するモータ設計への配慮について紹介する。

## 2. 工作機械用サーボシステムに求められる仕様

工作機械用サーボシステムに求められる仕様の概要は次のとおりである。

- ① 装置の小型化に合わせ、サーボアンプ、サーボモータ共に、より小型であること。
- ② 装置は小型であっても、加工能力は上位クラスの能力を有すること。
- ③ 加工費低減のため、サイクルタイムを短縮できること。
- ④ 振動、騒音を抑制できること。
- ⑤ 加工精度を向上できること。
- ⑥ 省エネルギー性能が向上すること。
- ⑦ 耐環境性能が向上すること。
- ⑧ メンテナンス性が向上すること。

図1に、当社における工作機械用サーボモータとサーボアンプの例を示す。



図1 サーボアンプとサーボモータ

## 3. 主軸モータによる加工能力の向上

### 3.1 低慣性高速主軸モータ

小型マシニングセンタ主軸モータには、以下の性能が要求される。

- 加工時間を短縮するため、高速・高トルクの特徴
- 非加工時間短縮のため、短時間で加工速度に達する、低慣性で高トルクの特徴
- 省エネ加工のための、低損失・高効率性能
- 幅広い加工対象に応じるための、高速化、高トルク化

当社は、工作機械主軸用として誘導型、同期型それぞれのモータをラインアップしているが、これらの要求に応えるため、低慣性同期型モータを専用に開発し、機械性能の向上に貢献している。

### 3.2 主軸モータの高速化による加工能力向上

加工対象がHDD用アルミ部品などの小物の場合、軽負荷の表面加工と小径穴・タップ加工がほとんどであり、主軸モータの特性には高速運転が求められる。

最高回転速度16,000min<sup>-1</sup>、22,000min<sup>-1</sup>および30,000min<sup>-1</sup>の高速仕様モータを機械に合わせてそれぞれ用意することで、単位時間当たりの加工量を増やし、加工能力の向上を達成した。

### 3.3 主軸モータの高トルク化による加工能力向上

加工対象が鉄系の場合、表面加工時の切込み量を増やすことや、大径の穴・タップ加工を連続で行うことにより、加工時間を短縮することが求められる。

最高回転速度を $10,000\text{min}^{-1}$ とし、最大トルクを汎用機の2倍とした高トルク仕様モータを用意することで、大幅な加工能力の向上に貢献した。図2に、トルク・回転速度特性の比較を示す。

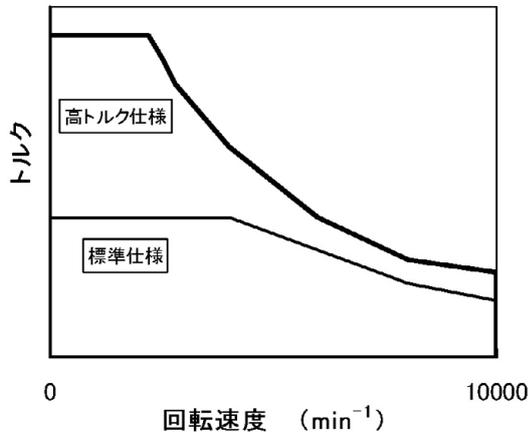


図2 主軸モータのトルク比較

## 4. サイクルタイム短縮

### 4.1 低慣性高トルク特性主軸モータによる高加減速運転

主軸の加工速度までの立ち上がり時間を短縮することと、タップ加工時の急反転動作をすばやく行うための高加減速運転は、サイクルタイム短縮のために重要な性能である。

当社では、前述のように、低慣性同期型モータを専用に開発し、高速運転域と低速域の高トルクを両立させると共に、タップ加工で最も使用される、中速域のトルクアップも図り、主軸動作の時間短縮を実現した。

### 4.2 加減速特性重視の送り軸サーボモータの実現

送り軸モータには、最大早送り速度の向上、加減速時間の短縮および安定した加工送りが求められる。

ロータイナーシャが大きければ加工送りが安定するが、加減速時間が長くなりサイクルタイムが長くなる。また、最大回転速度を高く設計するとモータのトルク定数が小さくなり、加減速に必要な最大トルクが小さくなる。当社では、加減速に適した中慣性モータを、必要最大トルクを確保できるトルク定数に保ったまま、高速運転を可能にするサーボパラメータにチューニングした。特に刃物を送るZ軸動作に適用することで、連続穴・タップ加工時のサイクルタイムを短縮した。

### 4.3 指令追従制御

送り軸の位置・速度制御系では、サンプリング周期を短縮し、無駄時間を削減することにより、ハイゲイン制御を実現した。また、速度制御器を見直し、位置決め整定時間が短縮されるような工夫をしている。このように、ハイゲイン制御により加工精度を向上させ、位置決め整定時間を短縮することによりサイクルタイムを削減した。

## 4.4 高速オリエンテーション

主軸モータを所望位置に位置決め停止するための技術としては、一定の速度(オリエンテーション速度)まで速度制御で運転し、制御モードを速度制御から位置制御に切り替え、指令停止位置に基づいて位置制御を行うオリエンテーション機能を搭載した。図3は、この動作を示したものである。高速回転中はモータを速度制御で駆動し、オリエンテーション指令が入力されると、オリエンテーション速度指令で速度制御する。これにより、モータ回転は最大トルクで減速し、オリエンテーション速度で回転する。オリエンテーション速度になると、位置制御系に切り換え、モータ1回転内のどこかで停止させるかを示す位置指令に基づき速度指令を算出し、位置制御を行い、指令位置に停止させる。モータが停止するとオリエンテーション完了信号を出力する。

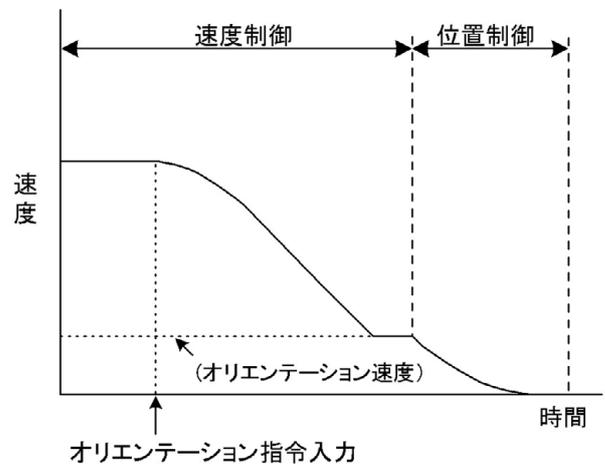


図3 オリエンテーション動作

## 5. 機械共振, 振動の抑制

### 5.1 微振動抑制制御

送り軸では、位置検出がデジタル値による検出であるため、位置指令を0にしてモータを停止させた場合、エンコーダの±1パルスの変動を生ずることがある。機械系の摩擦が大きい場合は、この変動は増幅されずに収束してしまい大きな問題は生じないが、摩擦が小さい場合はこの変動が増幅され、機械系に微振動に伴う音が生じることがある。工作機械用アンプには、このような微振動を抑制する機能を搭載し、モータ停止時の微振動を抑制した。

### 5.2 機械共振抑制制御

機械系には、カップリングなどに代表される共振点が存在し、サーボ系がそれを増幅すると大きな音となって現れる場合がある。このような機械系共振の抑制にはノッチフィルタが適している。しかし、ノッチフィルタの中心周波数が制御帯域に近いと、制御帯域の応答に遅れを生じ、制御性能を悪化させることがある。工作機械用アンプでは、この遅れを削減し、制御性能をできるだけ悪化させずにノッチフィルタを挿入できるよう、位相遅れを低減させるノッチフィルタや深さを調整できるノッチフィルタを搭載した。これらの

ノッチフィルタは多段搭載しており、機械共振が複数ある場合も、極端にローパスフィルタの遮断周波数を低下せずに、高域共振を抑制できるようになっている。これにより、サーボ剛性を高くでき、基本特性が大きく改善される。図4は、ノッチフィルタにより高域共振を抑制した時のトルク指令を示したものである。ノッチフィルタを有効にすることにより、高域共振が抑制できている。

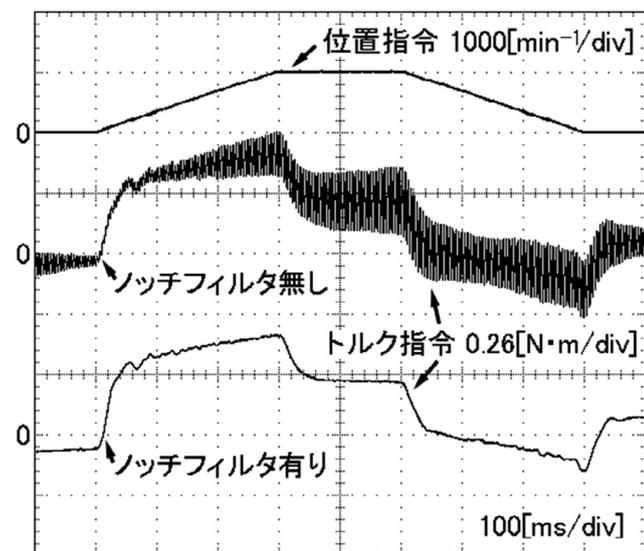


図4 高域共振抑制特性

### 5.3 機械振動抑制制御

工作機械の振動としては、ボールねじなどの動力伝達系のねじり剛性による振動の他に、機械の先端振動や機台振動がある。工作機械用アンプでは、この機械の先端振動や機台振動も抑制できるように、フィードフォワード制振制御機能を搭載した。フィードフォワード制振制御は機械振動を生じさせないようにフィードフォワード的に補償を行う構成をとっており、特別なセンサを設けることなく、機台振動や機械先端振動を抑制している。図5は、剛性の低いテストスタンドの負荷端の位置の振動抑制動作を示したものである。制振制御を有効にすることにより、負荷端の位置の振動が抑制できている。

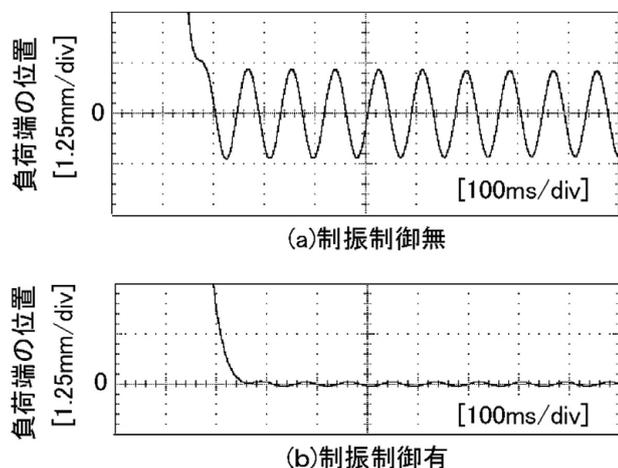


図5 制振制御特性

## 6. 高剛性化と加工精度の向上

### 6.1 外乱抑圧制御

工作機械におけるサーボシステムは、X、Y、Z軸などの多軸構成が多い。このような多軸構成において、他の軸の影響や、モータのコギングトルクなどの外乱の影響を抑制して位置決め精度を向上させるために、外乱オブザーバを搭載した。これにより、外乱の影響を抑制し、制御剛性を向上させ、位置決め精度を向上させた。

### 6.2 象限突起補償

モータおよびボールねじを用いて、XYテーブルを構成している工作機械で円弧切削を行う場合に、象限の切替わりで機械系の摩擦により、機械が停止してスティックモーションが生じる。スティックモーションは、加工精度を低下させるため、出来るだけ小さい方がよい。工作機械用アンプでは、このような象限突起を抑制する機能を搭載しており、象限切り替わりでの突起が小さくなるように対応した。

## 7. NCとの協調性向上

工作機械用アンプでは、多くの機能を搭載しており、パラメータ数が多くなっている。また、特定の機能は、NC側とアンプ側で処理を分担しているものもあり、NCとの協調性を上げるため、NCとの間を高速シリアル通信により接続した。通信速度は10MHzであり、当社独自のプロトコルを採用した。

## 8. 省エネルギー

### 8.1 同期型主軸モータによる高効率加工

誘導型に比べ高効率な同期型モータを主軸用に専用設計し、省エネルギー化を図った。また、低慣性であるため加減速時のエネルギーも少なく、1サイクルの消費電力は、中型マシニングセンタと比較すると30%に低減できる。

### 8.2 高効率トルク制御

工作機械用アンプでは、高周波PWM、短い電流ループサンプリング周期により、dq軸制御演算を高速化した。これら、dq軸電流を制御し、最適なトルクを出力させるのがトルク制御系である。トルク制御系では、トルク指令に基づき、トルクが小さい時にはd軸電流を小さくするような工夫を加えた。これにより、無負荷運転時のモータ電流を低減し、電力損失を削減している。このような電流制御の工夫と、効率の高いモータや、低損失主回路半導体により、高効率なトルク制御を実現した。

### 8.3 電源回生

工作機械用サーボシステムでは、省エネルギーのために、多軸アンプシステムを採用しており、主軸アンプのコンバータから送り軸に電力を供給する共通コンバータシステムになっている。共通コンバータシステムでは、回生を行っている軸から力行を行っている軸に電力が供給されるため、電源からの電力供給が少なくて済む。ま

た、主回路電解コンデンサを共用できるため、電解コンデンサの寿命も改善される。さらに、アンプ容量が300Aのシステムでは、電源回生機能を搭載している。電源回生方式としては、120°通電方式を採用しており、電源位相120°毎に電源に電力を回生する構成になっている。これにより、主軸の高加減速により生じる回生電力を電源に回生できるようになっており、従来、回生抵抗で消費していた電力を電源に回生して、大幅な省エネルギー化が図れるようになった。

## 9. 耐環境性の向上

### 9.1 クーラント雰囲気中での運転

加工性能の追求はサーボ性能だけでなく、モータの耐油性にも影響する。加工の仕上がりを追及したクーラント(切削油)は、その副作用として樹脂類への攻撃性が高まり、シール材やケーブルシース(表皮)を劣化させやすい傾向がある。樹脂類が劣化した結果、モータ・エンコーダの故障が発生し、装置停止ひいてはライン停止に至ることになる。そこで、モータは耐油性の高い部品を選定して耐久試験を実施し、モータの耐油性を高める設計を行った。しかし、モータの耐油性にも限界があるため、評価結果に基づき、攻撃性の高い切削油の情報を装置メーカーと共有しエンドユーザへ情報提供する対応も行った。

主軸モータ用冷却ファンは、耐油性向上のため、コイル部を樹脂でモールドしたものを採用した。

### 9.2 耐振動性に優れたエンコーダ

クーラントスルスピンドル用の主軸モータでは、耐環境性の優れた磁気式エンコーダを採用した。この磁気式エンコーダはクーラントへの耐性を向上させるために、検出素子の製造方法を見直し回路基板保護対策も施した。

また小型化と相反する上位クラス並の加工能力を実現するために、重切削時の振動に対する主軸モータへの対策が必要である。クーラントスルスピンドルで、重切削の振動が主軸モータへ伝わり、エンコーダの耐振性能を超えることにより、パルス抜けなどの異常が起り得る。その対策として、エンコーダの取り付けを強化し耐振性を向上させた仕様のエンコーダを用意した。この対策により、重切削における振動に対しても十分な耐振性を確保し異常発生を防止できた。

### 9.3 モータ軸受周辺部品の設計・採用

主軸の回転速度は、機械の開発に伴い向上してきたが、高速主軸モータでは、軸受設計にも配慮が必要である。軸受の材質、グリースの選定、加工時の振動により発生するクリープやフレッチングの対策などに留意する必要がある。これらに対して、実機運転を想定した耐久試験を繰り返し、機械性能達成のために日々継続して改良を重ねている。

## 10. 保守性の向上

主軸モータは、冷却ファンの清掃・交換が可能な構造を採用している。

加工室内で運転される主軸モータには、切粉やクーラントの残渣が溜まり、冷却能力が低下する。特に冷却ファンにこれらが詰まると通風が停止し、モータ過熱に至る。これらを事前に防止するためと寿命部品である冷却ファンを交換しやすくするため、周辺機構を工夫し、機械に載ったまま冷却ファンの清掃・交換ができる構造としている。

## 11. むすび

本稿では、工作機械、特に、小型マシニングセンタの高性能、高機能に貢献するサーボ技術として、以下の主要技術を紹介した。

### (1) 低慣性高速主軸モータと送り軸モータ

当社の「低慣性高速主軸モータ」は、加工対象に最適な特性を有するモータであり、また、送り軸モータも高速・高トルク特性を有するモータである。これらのモータは、機械の生産性向上(加工能力の向上、サイクルタイムの短縮)に貢献できる。

### (2) 振動抑制と高精度位置決め制御技術

当社の工作機械用サーボアンプは、モータ停止時の微振動、機械系の共振、機械の先端振動および機台振動を抑制する機能を有している。また、外乱抑制制御と象限突起補償など、高精度位置決め機能を有している。これらの技術は、機械の振動騒音抑制と高精度加工に貢献できる。

### (3) 省エネルギー技術

当社のサーボモータは、工作機械用に専用設計した低損失のモータである。また、サーボアンプは、高効率なトルク制御ができると共に、電源回生機能を有している。これらの技術は、機械の省エネルギーに大きく貢献できる。

### (4) 耐環境性と保守性

当社のサーボモータは、工作機械のクーラント(切削油)や加工に伴う機械振動に対して配慮した設計を行っている。また、冷却ファンの交換など、保守性に配慮した構造設計を施している。これらの技術は、機械の信頼性と保守性の向上に貢献できる。

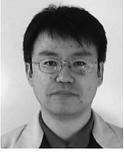
本稿で取り上げた「工作機械用サーボシステム製品」は、ご使用いただくお客さま視点での設計思想に基づくものであり、今後も、市場・お客さまに真に価値ある製品を提供していく所存である。



**石塚 よし**

1984年入社

サーボシステム事業部 設計第一部  
エンコーダの開発、設計に従事。



**小市 伸太郎**

1985年入社

サーボシステム事業部 設計第一部  
サーボモータの開発、設計に従事。



**井出 勇治**

1984年入社

サーボシステム事業部 設計第二部  
モータ制御装置の開発、設計に従事。