工作機械主軸スピンドルの高性能化*

中村 晋哉**

High Performed Machine Tool Spindles / Shinya NAKAMURA

Key words: ceramic ball bearings, oil air lubrication, oil jet lubrication, integrated-motor spindles, preload switching

1. はじめに

電子機器・航空機産業等の発展によりそれらの部品加工の高能率化要求や高品位化要求が高まり、NC工作機械分野全般にわたって高性能化が著しい。

その中で、マシニングセンタ（MC）主軸を中心とした高速化や精密旋盤を中心とした高精度化はめざましく、各工作機械メーカーにて凌ぎを削って主軸まわりの軸受、潤滑、部品精度、駆動方法等の改良を行っている。

ここでは、1990年日本工作機械見本市（大阪）での主軸スピンドルの高速化の状況について述べ、さらに主軸スピンドルの高速化、高精度化、高機能化に対する現状と新技術について、弊社の開発動向を中心に紹介する。

2. スピンドル高速化の状況

スピンドルの高速化としては、ここ数年オイルエア潤滑、セラミック玉軸受、さらにはジェット潤滑の出現によって、 $d_m \cdot n$ 値（ d_m : 軸受ピッチ円径（mm）、 n : 回転数（rpm））が急激に向上しており、 $d_m \cdot n$ 値 200×10^4 程度まで実用化され始めている。

図1に1990年日本工作機械見本市において $d_m \cdot n$ 値 60×10^4 以上の機械を調査して、わかる範囲内での主軸径と回転数の分布についてまとめた結果を示す。

グリース潤滑、オイルエア潤滑ともにセラミック玉軸受仕様のものがかなり増加して半数程となっており、それぞれ $d_m \cdot n$ 値が高くなって、 $d_m \cdot n$ 値 250×10^4 を越えるものも出現している。

しかし、各社とも展示の方法としては従来の見本市と違って高速化を全面に出しているところが少なかった様子である。

これはある意味では高速化が根づいて来たと言え、さらに高速化が進んで来た証拠とも言える。

図2にNSKカートリッジスピンドル高速化の変遷を示す。

1980年以前では $d_m \cdot n$ 値 50×10^4 以下であったものが、現在ではジェット潤滑の採用により $d_m \cdot n$ 値 300×10^4 も可能となってきた。

10年間にグリース潤滑、オイルエア潤滑、ジェット（見本市展示品より、 $d_m \cdot n$ 60万以上の主軸の分布を示す）

図1 1990年見本市におけるスピンドル高速化の状況

* 原稿受付 平成3年1月23日

** 正会員 日本精工(株)精機技術センター（前橋市島羽町78）

図2 NSK カートリッジスピンドルの高速化の変遷

ト潤滑と段階的に開発を行ってより高速化となってきたが、数年前よりセラミック玉軸受が採用となり $d_m \cdot n$ 値 $80 \sim 100 \times 10^4$ の領域では鋼球グリース潤滑、オイルエア潤滑からセラミック玉グリース潤滑に置き換わってきている。

現在、図2のようにスピンドル回転域がそれぞれの潤滑方法でカバーされているので、スピンドル仕様、使用条件、寿命、価格等を考慮して最適な方法を選定することが可能となってきた。

3. セラミック玉軸受スピンドル

軸受の転動体を従来の鋼球からセラミック玉（窒化けい素）に変えると、窒化けい素の比重が鋼の約40%と軽くなるので、より高速回転が可能となる。

セラミック玉が鋼球より軽いため、高速回転時のジャイロすべりや遠心力を低減でき、軸受内部荷重の増加を抑止できる。

セラミック玉軸受は開発当初は $d_m \cdot n$ 値 150×10^4 前後のオイルエア潤滑鋼球仕様では困難な領域で使用され、数量的には少なかったが、最近になって $d_m \cdot n$ 値 $80 \sim 100 \times 10^4$ のオイルエア潤滑に対してグリース潤滑でセラミック玉軸受という形で使用され始め、数量もかなり増加している。

グリース潤滑の場合、セラミック玉軸受を使用するとグリース寿命が鋼球に比較してかなり長くなるという結果を耐久回転試験¹⁾から得ている。

セラミック玉軸受は使用量が増加してコストが下がり、価格が実用レベルになってきている。

その結果、オイルエア潤滑システムよりセッティングやメンテナンス上の取扱いが簡便であるという以外に、価格の面でもメリットがでてきている。

オイルエア潤滑は新油が軸受に連続的に定量供給さ

れるのでグリース潤滑より信頼性が高いが、以上の内容を判断してセラミック玉軸受グリース潤滑のメリットも大きいので、 $d_m \cdot n$ 値 $80 \sim 100 \times 10^4$ の領域では両者を比較してオイルエア潤滑からセラミック玉軸受グリース潤滑に置き換わる傾向にある。

最近になってセラミックころ軸受もスピンドル後側軸受用として使用され始めており、1990年日本工作機械見本市出品機にも使用されたものがある。

今後、セラミック玉軸受は実績も増えて、従来の鋼球軸受と同じように標準使用されて、コストも下がっていくと期待している。

4. 主軸スピンドルのモータビルトイン化

4.1 MC用スピンドル

MC用スピンドルでは、従来は駆動方法としてベルト、カップリング、ギヤ等を用いていたが、スピンドル軸とモータ軸のミスアライメント等により、駆動部の発熱や振動・騒音が発生するので、高速化に対しては改良が必要であった。

従ってスピンドルの高速化のために、ACサーボモーター一体形としたモータビルトインスピンドルが使用されており、弊社にてもいち早く開発を行って50種以上の製造実績ができています。

軸受は高速回転すると、定位置予圧では予圧荷重の増大をまねくので焼付防止のために初期設定（停止時）予圧荷重を小さく設定せざるをえない。

そのために従来の高速スピンドルでは主軸剛性が低くなり、低速重切削が不可となり高速切削専用となっていたが、最近になって1つの主軸スピンドルで低速重切削から高速切削までという要求が高まり、予圧切換えスピンドル²⁾を開発した。

予圧切換えスピンドルでは油圧のオン・オフにより低速時定位置予圧にて予圧荷重を高く設定して、高速時には定圧予圧にて予圧荷重の増大を防ぐ機構を設けている。

従来の予圧切換えタイプでは、スピンドルの駆動方法として低速時ギヤ、高速時カップリング等で対応していたが、今回モータビルトインタイプの予圧切換えスピンドルを開発した。

図3にモータビルトイン予圧切換えスピンドルのモータ前側の予圧切換機構部分を示す。

モータを内蔵したことにより、モータ側でも巻線切換えを設けて出力切換えを行い、モータ特性としても低速重切削、高速切削に対応している。

図4に予圧切換えとモータ巻線切換えの特性図を示す。

図3 モータビルトイン予圧切換えスピンドル (日精浦和 UB-75 II)

モータビルトインタイプとしたことにより、主軸まわりの構造がカップリング、ギヤ駆動の切換え等というように複雑にならずに、予圧切換性能を十分に発揮できるようになっている。

1990年日本工作機械見本市では本方式を採用したNT40、主軸径65mm、2万rpmのMCが3社から出品されており、今後のモータビルトインスピンドルの1つの大きな方向となると考えている。

4.2 NC旋盤用スピンドル

NC旋盤の中で、特に精密旋盤用スピンドルはVTRのシリンダやその他の電子部品加工用として、近年高速・高精度化が著しく、実削ワーク真円度に対する要求が転がり軸受にて2000rpm程度で $0.2\sim0.3\mu\text{m}$ というオーダから6000rpm、さらには

8000rpm程度で真円度 $0.2\mu\text{m}^{3)}$ 以内というオーダに上がってきている。

2000rpm程度ではスピンドルはベルト駆動で行っていたが、4000rpm以上になるとミスアライメントによる振動のため高精度化が困難になるのでベルトの外乱をなくすためにモータビルトイン化となっている。

実削して得られるワーク真円度は機械全体の精度等にももちろん影響されるが、スピンドルの非繰返し成分の振れ精度、つまり軸心の振れにおおよそ相関の関係にあると言える。

実際にモータビルトインスピンドルの軸心の振れを測定してその値でスピンドル単体の精度保証を行っている。

図5にスピンドル振れ精度測定システムを示す。

スピンドルワーク側先端にボール(真球度 $0.05\mu\text{m}$)を取り付けて実際に使用する回転数で回転させて、ビルトインモータのエンコーダからの回転信号と同期させながらラジアル・アキシャル回転精度を非接触変位計で測定して、極座標表示をさせる。

ラジアル成分に関しては2センサ方式を用いて、偶数山成分をキャンセルしてボールの形状誤差分がある程度除いている。

図6に、本システムで測定したデータとスピンドルを実機に取り付けて実削したワークの真円度結果を示す。ある程度の相関性が得られており、スピンドル単体で動的精度を保証することが可能となっている。

図4 予圧切換えとモータ巻線切換特性図

図5 動的振れ精度測定システム

スピンドル回転精度 (8 周平均)

回転方向：反時計方向

回転速度：4000rpm

カットオフ：5000Hz

ラジアル方向回転誤差

回転誤差：0.101 μm (測定値)最大値：0.051 μm 最小値：-0.050 μm

軸受：70BNC10TYDBBP2

40BNC10TYDB

潤滑：グリース

動的振れ精度測定結果

実削ワーク真円度

図6 測定結果と実削結果

モータビルトインスピンドルは、モータ内蔵のためにスピンドル本体そのものは大きくなるが、主軸構造としてはヘッド構造が簡単でコンパクトとなり、主軸自身を回転・位置制御することができる。

工作機械主軸の高速化・高精度化だけでなく高機能化にも寄与すると言える。

5. ジェット潤滑スピンドル

ジェット潤滑は大量の潤滑油を軸受に強制的に供給して、強制的に排出する潤滑法である。

軸受1個あたり3~4l/min程の潤滑油を供給して、強制冷却しながら潤滑するので冷却効果が非常に高く $d_m \cdot n$ 値 150×10^4 以上の超高速域でも安定した回転が得られる。

ジェット潤滑システムは図7のようになり、潤滑油は流量調整弁で制御された流量がタンクからクーラを通じて給油ポンプによりスピンドルの各軸受に供給されて、その潤滑油はスピンドルの排油口から排油ポン

図7 ジェット潤滑システム図

プによりタンクに回収される。

従来、ジェット潤滑装置はかなり大がかりであったが、今回クーラ、給排油ポンプ、油タンク等コンパクトにまとめ、ジェット潤滑装置「ハイジェットループ」⁴⁾(図8)を新開発した。

ハイジェットループを用いると潤滑油温度の定常偏差は室温 $-1 \sim +1^\circ\text{C}$ 、脈動 2° 以内となり、スピンド

図8 ハイジェットループ

ルの熱変形を小さくできる。

軸受の安全装置としては、潤滑油量不足やポンプ等の異常を検知してスピンドル及びハイジェットループを安全に停止できるようになっている。

ジェット潤滑の欠点として、大量の潤滑油を供給するため、回転のかく拵抵抗により高速では消費動力が大きくなることがある。

潤滑油の動粘度が低いと消費動力は小さくなるので、超高速ジェット潤滑用として動粘度 1.5 cSt/40°C の潤滑油「JX-1」を新開発した。

従来のジェット潤滑油は 2 cSt 以上であったので、それに比較すると温度上昇、消費動力ともに小さくなっている。

JX-1 は極低粘度であるが、耐荷重能を高くして摩擦を発生しにくくするために、極圧添加剤を配合して、低速重切削にも十分耐える性能となっている。

1990 年日本工作機械見本市にジェット潤滑スピンドルとして、ハイジェットループ・JX-1 とともに主軸径 45 mm、回転数 5 万 rpm で $d_m \cdot n$ 値 300×10^4 のモータビルトインスピンドルを開発・出品した⁵⁾。

内蔵された AC サーボモータは連続定格 15 kW、30 分定格で 18.5 kW で 5 万 rpm 回転可能となっている。

図 9 に 5 万 rpm スピンドルの温度上昇とモータ消費動力を示す。

5 万 rpm で回転すると消費動力がモータ出力いっぱいとなるが、安定して回転している。

図9 スピンドル温上昇と消費動力

ジェット潤滑も採用するところが増加しており、本スピンドルによって、 $d_m \cdot n$ 値 200×10^4 以上の実機使用も十分可能となることがわかり、今後の MC 高速化がさらに展開されるであろう。

6. あとがき

工作機械主軸スピンドルは高速化を中心にして高精度化、高機能化と発展してきているが、今後それらの技術が複合化されてさらに高性能化となっていくであろう。

高性能化として残された課題は、軸受・潤滑技術だけでなくその他軸内径部品やモータ、駆動技術、さらには工具、熱変形、冷却技術といろいろあり、それに制御技術をいかに付加していくかと考えられ、それら総合力を発揮して展開していくことが重要と考える。

参考文献

- 1) 中村晋哉：スピンドル高速化技術の動向，マシニスト（1989）11.
- 2) 中村晋哉：予切換スピンドル，第 19 回工作機械関連技術者会議，（1989）.
- 3) 高橋鉄男：NC 旋盤における高速・高精度加工，ファクトリーオートメーション（1990）4.
- 4) NSK ハイジェットループカタログ，Pr. No. 1393.
- 5) 日経メカニカル，1991. 1. 7，p. 21.