

高速回転中における主軸の挙動

東京農工大学大学院 ○柴垣貴司, 堤正臣
 オークマ株式会社 奥村太史
 長岡技術科学大学 田辺郁男

要 旨

工作機械主軸が高速で回転すると、遠心力による主軸の振り回りや振動、主軸台全体の温度上昇による熱変形が起り工作精度に影響を及ぼす。本報告では、おもりを用いたバラシングを行い、主軸振れを抑制した。また、主軸台全体の温度によって主軸回転中心が漂動していることを明らかにし、主軸回転中心の漂動と主軸冷却油管路との関係について有限要素法を用いて解析を行った。

1. 緒論

金型の加工には高速切削が不可欠となっている。工作機械の高速化を目指す上で主軸系の高速化は重要であり、モータや軸受などの要素技術の発達によって高速化への対応が図られている。

しかし、主軸の高速化に伴い、主軸の偏心質量による遠心力や曲がりによる振れの増大、主軸台全体の温度上昇による熱変形など要素技術では対応しきれない現象によって精度が悪化している。

そこで本報告では、変位計を用いて主軸振れを測定し、おもりを用いて主軸のバラシングを試みた。また、有限要素法を用いて主軸の熱変形についても検討した。

2. 実験装置及び測定方法

実験に使用する主軸ユニットは、ビルトイン方式のモータを採用しており、軸径φ60mm、最高回転速度35000min⁻¹である。主軸の主な仕様を表1に、測定システムの概略図を図1に示す。

本報告では、主軸先端部及び後部における主軸振れ及び軸受付近の温度を測定する。主軸先端部には振れの大きさを拡大し、測定を容易にするために HSK-F63 形ツールを取付ける。主軸振れの測定には静電容量形変位計を、温度の測定には熱電対をそれぞれ用いる。

変位計の測定データには、遠心力による振れ成分、主軸の偏心成分、測定面形状成分等が含まれており、そのままでは振れの評価は難しい。そこで、得られた測定データに対してフーリエ解析を行い主軸振れ成分である回転周波数成分の振れ変位と振れ角度を取り出してベクトルとして表し、主軸振れの結果として定義することとする。

3. 実験方法及び結果

3.1 主軸のバラシング

本報告では、既知のおもりをある角度とそこから 180° ずれた方向とにそれぞれ取付けて主軸の振れを 1 本の変位計を用いて測定する。図 2 に測定された主軸振れをベクトル表示したものを示す。測定される主軸振れ

Table 1 Specifications of spindle unit

Maximum of spindle speed	35000 min ⁻¹
Spindle diameter	φ60 mm
Driving device	Built-in motor
Spindle bearing	Angular contact ceramic ball
Lubrication	Oil air

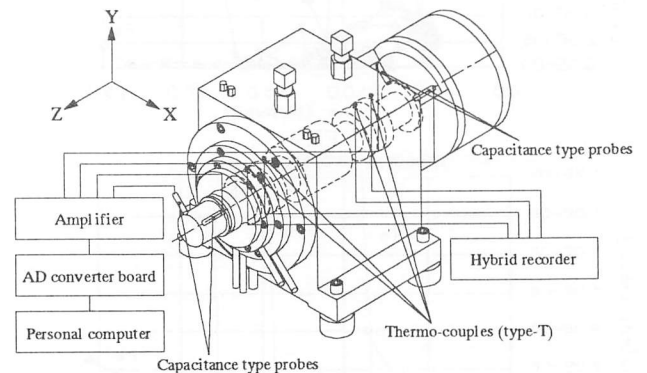


Fig. 1 Experimental set-up and measuring system

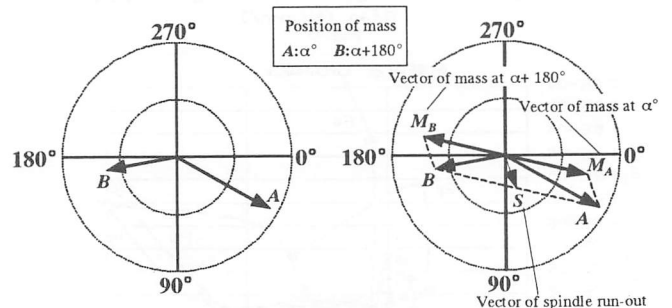


Fig. 2 Measured run-out

Fig. 3 Vector of mass

には主軸の偏心質量による振れとおもりによる振れとが含まれており、それぞれを図 3 のようなベクトル計算によって分離することで偏心質量による振れの大きさと方向とを求めることができる。そして、求めた主軸振れを補正するようにおもりを取付ける。主軸バランス前後の主軸先端部の振れを図 4 に示す。バランスの結果、主軸先端部の振れが $2.23\mu\text{m}$ から $0.31\mu\text{m}$ に、図には示していないが、主軸後部の振れについても $0.67\mu\text{m}$ から $0.53\mu\text{m}$ に低減することができた。

3.2 主軸回転中心の漂動

直交する 2 方向からの変位計を用いて主軸振れを測定し、その DC 成分の値を x-y 平面にプロットすることで主軸回転中心の位置を知ることができる。図 5 に主軸先端部及び後部での各主軸回転速度における主軸回転中心の位置を示す。また、図 6 に軸受付近の温度変化と主軸回転中心の移動距離との関係を示す。両者の関係が比例的であることから、主軸回転中心の漂動には温度が大きく関係していると考えられる。

また、主軸先端部の回転中心の漂動を見ると、わずかに左に傾いた動き方を示しているが、この原因として主軸冷却油管路の影響が考えられる。実験に使用している主軸の前側冷却油管路は左右に非対称な構造となっていることから、左右に流れる冷却油の流量に差が生じ、温度変化及び熱変形に影響を及ぼしているのではないかと考えられる。そこで、本報告では図 7 に示すような 2 次元の有限要素モデルを作成し、流体解析を行った。その結果を図 8 に示す。なお、解析にはサイバネットシステム株式会社の ANSYS を用いた。結果からもわかるように、管路の左側に比べ右側の流速が全体的に大きくなっている。これは、入口から出口までの管路長の差が原因であると考えられる。管路長の短い右側の管路抵抗が左側に比べ相対的に小さくなるため、より流れやすい右側に冷却油が多く流れてしまうと考えられる。このことから、先に述べた主軸先端部の回転中心の漂動は、非対称な主軸冷却油管路による主軸台の熱変形が影響を及ぼしていると考えられる。

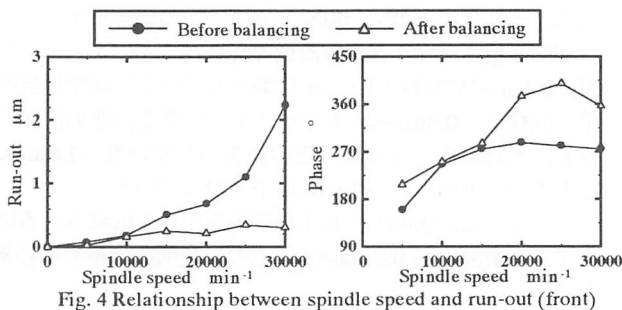


Fig. 4 Relationship between spindle speed and run-out (front)

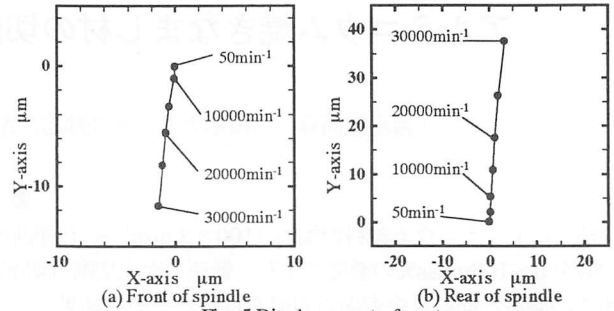


Fig. 5 Displacement of center

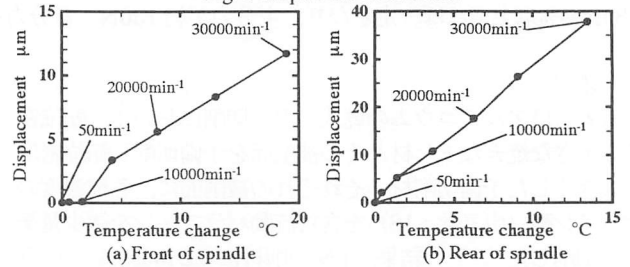


Fig. 6 Relationship between temperature change and displacement

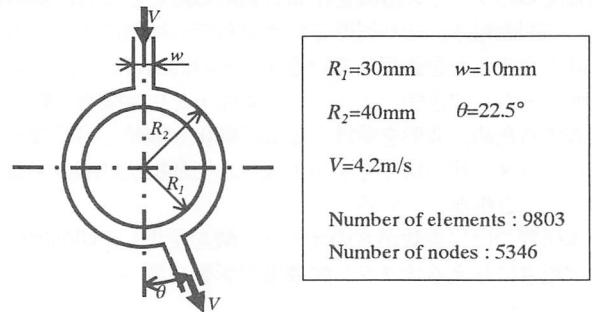


Fig. 7 FEM model

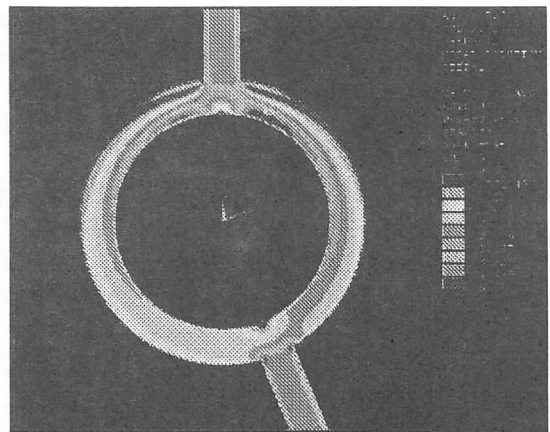


Fig. 8 Result of simulation

4. 結論

高速回転中における主軸の挙動について、

- 1) 主軸の偏心質量に加わる遠心力による主軸振れをおもりを用いることで低減することができた。
- 2) 主軸先端部及び後部で主軸回転中心が漂動することを明らかにした。また、その移動距離は主軸台の温度変化と密接な関係があると考えられる。
- 3) 主軸軸心の漂動には主軸冷却油管路の影響があると考えられる。