主軸回転中心位置測定法の開発*

(第2報, 測定法の評価と静圧軸受主軸の回転中心の挙動)

小澤 則光^{*1}, 菅野 健^{*1}, 吉田 嘉太郎^{*2}

Measuring Method of Central Position of Spindle Rotation (2nd Report, Evaluation of New Method and Experimental Results of Hydrostatic Bearing Spindle)

Norimitsu OZAWA, Takeshi SUGANO and Yoshitaro YOSHIDA

Evaluation of the new measurement method of the central position of spindle rotation (CPSR) was carried out. The CPSR was measured after the spindle was shifted in the orthogonal direction with the spindle axis. Measurement results of the CPSR were good agreement with the shift length of the spindle axis. We also investigated the relationship between the CPSR on the oil hydrostatic bearing spindle and rotational speed, rotational direction, mass of the workpiece, axial load to the workpiece and residual unbalance. We found that these factors considerably affect the CPSR.

Key Words: Spindle Rotation, Measuring Method, Central Position, Hydrostatic Bearing Spindle

1. はじめに

高精度な回転が要求される超精密加工機の主軸等に用いられる静圧軸受には、動圧ジャーナル軸受と同様の動圧効果が生じ得る構造にしたものが多く、ハイブリッドな軸受といってもよい。それゆえ、静圧軸受主軸の多くは、回転中に動圧効果の影響を受け、横置き形の場合には重力による影響も大きい。特に工作機械主軸では、回転条件や把持する工作物あるいは工具の質量等により動圧効果の影響が変化することが考えられる。加工時には、これに切削力の影響が重畳され、主軸-工作物(工具)系の不平衡質量の影響も付加される。したがって運転中の静圧軸受主軸は、これら複数の要因による複合的な影響を受けて複雑な挙動を示すことが考えられる。

軸の回転の評価は、特定の回転条件での回転誤差を計測して評価する、いわゆる回転精度評価に主眼がおかれている。しかし、静圧軸受主軸を一層高度なものにするには、さまざまな運転条件下での主軸の挙動を、

現象面から総合的に把握することが極めて重要である。このためには、実際の運転状態における主軸の回転中心位置の変動を直接計測することが有力な手段となる。これに関連した研究として、油静圧軸受の円周方向における油膜圧力が、静圧、重力および動圧効果により複雑な分布状態となることを解析的に示した例⁽¹⁾、回転精度の解析の面から軸心の振れを考察したもの⁽²⁾等があるが、静圧軸受主軸の回転中心位置を実測した例はまだない。

そこで本研究では、第1報で示した新しい測定法⁽³⁾の定量的な評価を行うとともに、超精密加工機に搭載された油静圧軸受主軸を対象にして、主軸の回転条件および主軸に作用する外力と回転中心位置(以下CPSRと略す)との関連を実験的に把握することにした。

2. 鋼球と変位計を用いた主軸回転 中心位置測定法の評価

2・1 評価実験の方法 高精度な鋼球と非接触変位計を用いた新しい主軸回転中心位置測定法の定量的な評価を行うため、図1に示すような装置による実験を行った。軸端に高精度鋼球(直径: 1/4 インチ, 真円度: 0.18 μm)を取付けた小形モータを X-Z 微動台に

* 平成4年9月30日 第70期全国大会講演会および平成5年10月4日 第71期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成5年9月21日。

^{*1} 正員, 機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)。

^{*2} 正員, 千葉大学工学部 (〒260 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

搭載し、これと軸方向で対向する位置に三次元微動台に固定した静電容量形変位計(ADE社マイクロセンス3016, 受感コア直径1.7 mm)を取付けた。

始めに、モータを1200 rpmで回転させてCPSRを検出した。次に回転数を同一に保ったまま、 X - Z 微動台によりモータを X 方向に約20 μm 移動させ、その場合のCPSRを変位計を取付けた微動台の X スライドで追跡して検出した。このときのモータの移動量は感度0.1 μm の電気マイクロメータで、変位計の移動量は表示感度0.01 μm のレーザ干渉計で計測した。この測定を繰返すことにより、回転軸の移動量とCPSRの変動量との関係を求めた。

2.2 評価実験の結果 図2は、回転軸を約20 μm 移動させるたびにCPSRを検出しながら100 μm まで2往復させた結果である。回転軸の移動量と、変位計で追跡して検出したCPSRの変動量とはよく一致している。

図1 鋼球による回転中心位置測定法の評価実験装置

図2 評価実験の結果

このことから、鋼球と非接触変位計を用いた、新しい回転中心位置測定法が軸の回転中心位置を正確に検出していることを確認した。

なお、この図に見られる実験値のばらつきは、モータの移動量のばらつきと使用したモータの軸方向の回転誤差などがおもな原因と考えられる。

3. 油静圧軸受主軸の回転中心位置の挙動

3.1 実験対象機 実験に用いた超精密加工機は、最大加工径300 mmで、主軸にビルトインされたACインバータモータにより240~2400 rpmの範囲で駆動され、主軸および X , Z スライドの案内内部には油静圧軸受を使用している。主軸は油静圧ジャーナル軸受二つと油静圧スラスト軸受一つによって支えられている。機械本体は除振台上のグラナイトベットの固定され、室温 $23\pm1^{\circ}\text{C}$ の恒温室内に設置されている。

スライドの移動距離は X 軸250 mm, Z 軸200 mmで、 X 軸には工具台を、 Z 軸には主軸台を搭載している。また、主軸の剛性は回転停止時における主軸端面での測定でラジアル方向:216 N/ μm , スラスト方向:490 N/ μm である。

3.2 実験内容と実験方法 図3に示すように中心部に鋼球を接着した円盤状の工作物を真空チャックで把持し、上述の評価実験で使用したのと同じ変位計を X スライドに固定した三次元微動台に取付けて、 X - Y 平面内におけるCPSRの変動を微動台のマイクロメータで測定した。使用した微動台の精度は、最小読取り量:0.5 μm , 真直度:2 $\mu\text{m}/13\text{ mm}$, ピッチング:8秒, ヨーイング:4秒である。

実験は、油静圧軸受主軸のCPSRに対する、①主軸回転数、②回転方向、③工作物質量、④軸方向(Z 方向)負荷、および⑤工作物の不平衡質量の影響を明らかにすることを目的として表1に示す条件で行った。使用した3種の工作物の中心部には高精度な鋼球を接着した。また、実験は熱変形の影響を最小限に抑えるために、主軸を約3時間回転させてから行った。

図3 回転中心位置計測実験の模式図

3.3 実験結果

(1) 主軸の回転数, 回転方向と CPSR

図4は, 工作物(A)を把持して400~2000 rpmの範囲で回転させ, 回転数を400 rpmずつ変えながらCPSRを検出し, 2往復分のデータをとって回転数によるCPSRの変動の軌跡を示したもので, 併せて回転方向を変えた場合の軌跡も図示した。

時計方向(CW)に回転させて回転速度を上げていくと, CPSRは主軸の回転と同じ方向に“の”の字の形の軌跡を描きながら移動する。また反時計方向(CCW)に回転させた場合には, “の”の字を裏返して縦にした形の軌跡になり, やはり回転方向と同じ方向に移動する。このように回転数の増加とともに, CPSRが回転方向と同じ方向に移動するのは動圧効果の特徴を表している。

しかし, 回転方向によるCPSRの軌跡の位置のずれや, 姿勢の変化, さらに両者ともに1200 rpmと2000 rpmとの間のCPSRの変動量が最大となる理由などは, この結果からだけでは説明することはできない。なお, 同一回転でのCPSRの測定結果でばらつき

がやや大きい場合があるのはおもに微動台スライドのバックラッシュと回転同期成分の測定精度の差によるものと考えられる。

(2) 工作物質量と CPSR

図5は, 図4の場合に比べて質量が極端に小さい工作物(B)を把持して同じ実験を行った結果である。両図から, 工作物質量が小さい場合でも回転数の変化とCPSRの軌跡の形との関係は定性的には同じであるが, CPSRの変動量が減少することと軌跡の位置が変化することがわかる。

このことは, 把持する工作物の質量が加工対象によって, あるいは加工過程(質量除去)によって変化すればCPSRが変動することを示している。しかし工作物質量の変化が, なぜCPSRの挙動に大きな影響を与えるのかということは明らかではない。

(3) 軸方向の負荷と CPSR

この実験は工作物(A)を把持して1000 rpmで回転させ, 中心から+X, および-X方向にそれぞれ70 mm離れた位置で, 直径25 mmのローラを介して工作物に軸方向(Z方向)の負荷をかけながらCPSRを検出した。負荷は0~12 N程度で, その大きさはひずみゲージを使ったロードセルで測定した。

図6は, 負荷が零の場合のCPSRを起点として中心の左右で負荷をかけた場合と, 回転方向を変えて負荷した場合の結果とをプロットしたものである。これよりCPSRは, 回転方向にかかわらず, 左側の負荷点では負荷の増大とともに右上方向に, 右側負荷点では左下方向に移動する。また, 左側負荷の場合にはCPSRの変動がやや大きい。

このように主軸が軸方向の負荷を受けた場合,

表1 実験条件

Rotational speed	400, 800, 1200, 1600, 2000 (rpm)		
Rotational direction	clockwise, counter-clockwise		
Axial load to the workpiece	0 ~ 12 (N)		
Residual unbalance	0, 162, 323, 485, 627 (g·mm)		
Workpiece No.	(A)	(B)	(C)
diameter (mm)	200	56	200
thickness (mm)	30	31.6	20
mass (kg)	8.2	0.2	4.7
steel ball dia.(mm)	12.7	12.7	6.4

図4 回転数, 回転方向と CPSR(工作物: A)

図5 回転数, 回転方向と CPSR(工作物: B)

図6 軸方向の負荷とCPSR(工作物:A)

図7 アンバランス量とCPSR(工作物:C)

CPSRの挙動が回転方向に依存しないということ、負荷点が大きく動いてもCPSRは少し傾きの異なる直線上を移動するという理由の解明は今後の課題である。

(4) 工作物の不平衡質量とCPSR

この実験で使用した工作物(C)は、その端面の直径77 mmの位置に幅10 mmの環状の溝を設け、この溝に沿って2個の重り(各々質量8.4 g)がスライドできるようにした。残留アンバランス量の大きさは、2個の重りの合成遠心力として与えられるので、重りの位置を動かしてアンバランス量と位置を調節した。また主軸の外周上の一点を基準位置(0°)として反時計方向に回転角を取り0°, 90°, 180°, 270°の位置にアンバランスが残留する場合についてCPSRの挙動を計測した。

図7は、回転数を2000 rpmに設定し、両回転方向の場合についての実験結果をプロットしたものである。アンバランス量はJIS規格(JIS B 0905)に則って重りの質量と、それが存在する位置(38.5 mm)との積(g·mm)で表示した。

時計方向回転(CW)の場合、0°の方向でアンバランス量を増すと、CPSRは-Y方向(工作物端面で下の方向)に移動する。アンバランス位置を90°, 180°, 270°と変えるとCPSRの挙動も時計方向に90°ずつ移動方向がずれていく。逆回転の場合のCPSRは、これと90°反時計方向にずれた挙動を示す。どちらの回転方向においてもY方向におけるCPSRの変動がやや大きく、また反時計方向回転の場合のほうが変動が小さ

い。

この実験においても、このような挙動の理由を実験結果だけで説明することは難しい。

4. おわりに

本論文では、前報で述べた新しい主軸回転中心位置測定法の評価と、油静圧軸受主軸を対象として回転中心位置の挙動を現象面から明らかにすることを試みた。おもな結果は次のようにまとめられる。

(1) 鋼球を付けた回転軸を移動させ、それを変位計で追跡するという手法によって、新しい測定法の定量的な評価を行った結果、この測定法が正確に回転中心位置を検出していることを確認した。

(2) 油静圧軸受主軸は回転数、回転方向を変えると、おもに動圧効果の影響で回転中心位置が変動する。

(3) 工作物質量、軸方向の負荷および不平衡質量の変動は、主軸の回転中心位置に顕著な影響を与える。この理由を解明することは今後の課題である。

本研究を進めるにあたって、実験に協力された元当所職員竹内喜代松氏、および元千葉大学学生浅野章浩、草間隆史の両君に感謝申し上げる。

文 献

- (1) 杉田, 精密機械, 50-5(1984), 796.
- (2) 矢部, 機論, 58-548, C(1992), 1177.
- (3) 竹内・小澤・ほか2名, 機論, 57-542, C(1991), 3305.