

高剛性・高減衰性を両立する減衰材料複合スピンドルの開発

東京大学工学部機械工学科杉田研究室 ○篠田一洋, 東京大学工学部機械工学科杉田研究室 ©杉田直彦

要旨

現在の切削加工用工作機械の減衰性は、高精度かつ高速に加工するためには十分ではない。減衰材料を挿入することで減衰性を高める試みがなされているが、その最適な配置についての研究は多くない。本研究では動剛性の高いスピンドル軸の開発を目的とした。伝達マトリクス法及び遺伝的アルゴリズムを組み合わせてスピンドル軸を設計したところ、1次固有振動数の減少を1%に抑えつつ減衰比が13%増加することを実験的に確認した。

1. 研究背景

マシニングセンタとは、フライス加工、穴あけ加工などを1台で行うことができる工作機械であり、多くの部品がマシニングセンタによって生み出されている。主要な用途である金型の製造をはじめ、金属部品の加工になくはならない存在となっている。中でも工具に直結するスピンドル軸は加工において最も重要な役割を果たしており、性能の向上が求められている。例えば、高速回転、高送り、高い切り込み深さなどがあげられるが、これらを実現するために、スピンドル軸には軽量、高剛性、高減衰性が必要となる。単一の材料で全ての要求機能を満足することは困難であり、複合材料での製造を検討する。

2. 従来研究

これまでに、鋼とCFRP、コルクを組み合わせたラムによって鋼のみで製作したラムと比べて、剛性を落とすことなく減衰性能が70%向上した、という報告[1]がある。またSuhらは、アルミ等からなるハニカム構造のコアを挿入したサンドイッチ構造をx, y軸スライドに用いる事で、垂直方向と水平方向のスライド質量がそれぞれ34%, 26%減少、減衰性能が1.5-5.7倍向上したと報告している[2]。

3. 研究目的

本研究では共振周波数付近における動剛性の高いスピンドル軸の設計を目的とする。その有効性を解析、実験の両面から確認する。

4. 提案手法

本研究ではスピンドル軸の内部構造を1次固有振動数が最大となるように最適化を行う。また最適化構造に減衰材料を挿入し減衰比を最大化する。1次固有振動数の計算方法としては伝達マトリクス法[3][4]を、また最適化の手法としては遺伝的アルゴリズムを用いる。

4.1 全体フローチャート

本研究の全体の流れをFig.1に示す。



Fig.1 全体のフローチャート

伝達マトリクス法によって回転軸に垂直に要素分割する。i番目の要素の外径を R_i 、空洞の半径 r_i とし、設計変数を r_i 、目的関数をスピンドル全体の1次固有振動数として、1次固有振動数の高い連続な構造を持ったスピンドル軸の設計を行う。

4.2 伝達マトリクス法

回転体の複素固有振動数を伝達マトリクス法により求める。伝

達マトリクス法は回転体を軸方向に要素分割し、分割された要素に加わる変位と力を、片方の端からもう片方の端まで伝達させるように計算していく方法である。以下にその手順を示す。

1. 解析対象の回転軸に垂直に要素に分割する。
2. その要素の両側の節点の状態量(変位, 変形角, 曲げモーメント, せん断力)からなる状態ベクトル Z_i, Z_{i-1} または Z_L, Z_R (両端)を関係づけるマトリクスを求める。
3. 求めた状態量ベクトルとマトリクスを順番にかけ合わせることで、全体の伝達マトリクスを求める。
4. 回転軸の両端の境界条件(普通両端とも自由端)を満足する複素固有値を求める。

4.3 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程を真似て作られたアルゴリズムであり学習最適化手法の1つである[5]。本研究では、局所安定に陥りにくくある程度の基準以上の解を少ない計算量で求めることができるという点で遺伝的アルゴリズムを採用した。以下に遺伝的アルゴリズムの流れを示す。

1. 初期集団を生成
2. 集団内の個について評価関数を用いて評価
3. 評価値を踏まえて親世代とする2つを選択
4. それらを交叉させ子を生成
5. 生成した子に対してランダムに突然変異を行う
6. 3~5を繰り返す
7. 子世代集団を親世代に移行
8. 2~7を収束するまで繰り返す。

5. 解析による有効性評価

5.1 最適化条件

最適化に用いたスピンドルの平面図をFig.2に示す。このスピンドルはFig.3に示す実物をモデルとした。また、ベアリングによる拘束は4方向によるばね拘束とし1つのベアリングにつき、Aは1方向に200 GPa, Bは1方向に100 GPaとした。

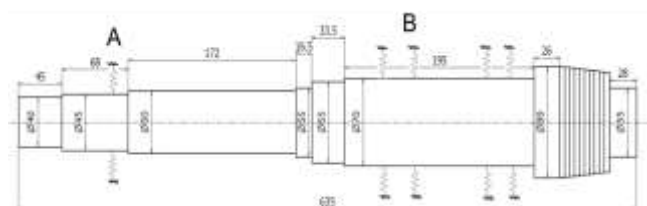


Fig.2 スピンドル軸の平面図



Fig.3 参考にした実物のスピンドル (片岡機械製作所)

5.2 最適化結果

最適化構造の平面図を Fig. 4 に示す.

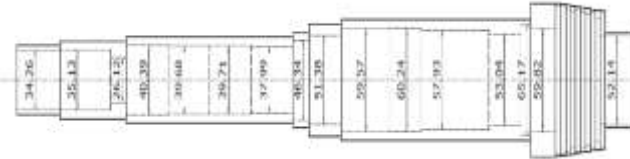


Fig. 4 最適化構造の平面図

全体的に内部に大きく空洞が作られている. 質量が減少することによって慣性モーメントも減少し, 1次固有振動数が大きくなったものと考えられる.

5.3 解析結果の比較

解析に用いた6つのモデルの形状を以下に説明する.

1. Fig. 3に示す実物モデル
2. 回転軸を中心にφ30を空洞としたモデル
3. 2の空洞に減衰材料を詰めたモデル
4. 1の形状に最適化を施したモデル
5. 4の空洞に減衰材料を詰めたモデル
6. 5と同じ体積の減衰材料を均一に挿入したモデル

解析結果を比較したものを table1 に示す.

・ table1 解析結果の比較

モデル	1次固有振動数 (Hz)	減衰比 ($\times 10^{-4}$)
1	608	3.75
2	660	3.75
3	654	4.28
4	919	5.27
5	847	36.8
6	720	34.7

5.4 考察

モデル 1 と 4 を比較すると最適化によって 1次固有振動数が 1.51 倍となっていることが確認できる. またモデル 4 と 5 を比較すると減衰材料を詰め込むことで 1次固有振動数は 0.92 倍とわずかに減少するが, 減衰比は 6.98 倍と大きく増加することを確認した. これによって減衰材料を詰めることが解析的に有効であることが確認した. 最後にモデル 5 と 6 を比較すると同じ体積の減衰材料を用いた場合においても 1次固有振動数と減衰比はともに増加しているため, 提案手法の有効性が解析的に確認できた.

6. 製造モデルによる実験的評価

6.1 製造条件と最適化結果

製造するスピンドルの最適化前の平面図を Fig. 5 に, 最適化後の減衰材料の平面図 Fig. 6 に示す. 要素の幅は指定があるところを除いて全て 10 mm である. ベアリングによる拘束は 1つ1方向につき 210 GPa で2か所とした.

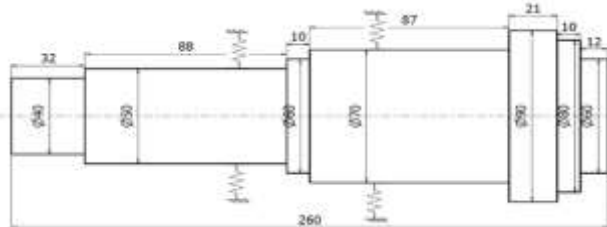


Fig. 5 製造モデルの平面図



Fig. 6 製造モデル最適化後の減衰材料の平面図

6.2 ハンマリング試験

ハンマリング試験の概要を Fig. 7 に示す.



Fig.7 ハンマリング試験の概要

6.3 試験結果

試験結果をまとめたものを table2 に示す.

・ table2 実験結果の比較

		中空モデル	減衰材料を詰めたモデル
1次固有振動数 (Hz)	1回目	810	800
	2回目	805	800
	Ave.	807.5	800
減衰比	1回目	0.0192	0.0236
	2回目	0.0199	0.0206
	Ave.	0.0196	0.0221

減衰材料挿入後に 1次固有振動数はわずかに小さくなっているが, 減衰比は増加している.

6.4 考察

まず初めに 1次固有振動数については 5.3 項の解析と同様に減衰材料を詰めるとわずかに減少していることを確認した. 減少量は 1%に留まったので, 剛性の損失は抑えることができたと言える. 次に, 減衰比については平均で 13%の増加が確認できた. 減衰比の増加率が解析に及ばなかった理由としては, 減衰材料として用いた硬質発泡ウレタンの減衰比が想定より小さかったこと, スピンドル軸中央の細い部分に減衰材料が完全には入らなかったことなどがあげられる.

またそれぞれの計測の際に考えられる誤差の原因としては, ベアリングを模した治具の土台との固定が完璧ではなかったこと, ばね拘束に用いたボルトの締め付けの強さが一定でなかったこと, そのボルトによるばね拘束の強さが 210 GPa には及ばなかったこと, が挙げられる.

7. 結論

- ・設計手法を用いることで, 動剛性の高いスピンドル軸を設計することができることを解析的に確認した.
- ・実際に製造した最適化モデルにおいては, 1次固有振動数を 1%の減少に抑えつつ減衰比を 13%高めることができた.

参考文献

- [1] KULISEK, V. APPLICATION OF FIBRE COMPOSITES IN A SPINDLE RAM DESIGN.: Journal of Machine Engineering, 2013. ページ: 13(1), 7-23.
- [2] SuhD.J. Composite Machine Tool Structures for High Speed Milling Machines.: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002. ページ: 51(1), 285-288.
- [3] 金光陽一. 回転軸の振動解析. (株)住原総合研究所, 1994
- [4] John, V. M., Rotordynamics of Turbomachinery. 1988. ページ: 276-289.
- [5] 村上・泉田研究室. 遺伝的アルゴリズム. (オンライン) <http://ipr20.cs.chime-u.ac.jp/column/ga/index.html>. 2018/1/23.