

ロバストなびびり振動抑制を実現する不等リードエンドミルの設計法の検証

名古屋大学 ○森田知樹, ◎鈴木教和, 社本英二

要旨

不等リードエンドミルは、びびり振動の原因となる再生効果を低減することができる。振動周波数と軸方向切込みに対するロバスト性は、ピッチ角、リード角の設計に強く依存する。本研究では、効果的なピッチ角とリード角の組合せを提案するとともに、大きなリード角差がびびり振動安定性に与える影響を解析的に明らかにする。さらに、ミリング実験を通じて、提案する不等リードエンドミルが高いロバスト性を示すことを検証する。

1. 緒言

切削加工においてびびり振動が発生すると、仕上げ面性状の劣化や工具寿命の低下等を引き起こす。このため、びびり振動は加工能率の上限を決める制約となることが多く、その対策は重要である。びびり振動は、1 刃前の振動が現在の切取り厚さに影響する再生効果に強く依存する。再生効果は不等リード工具を用いて抑制することができるが、効果的に利用するにはびびり振動周波数や加工条件に依らずに抑制が可能となるように最適設計が必要となる。これには、再生効果の定量指標である再生数 RF を用いた検討が有効であり、振動周波数の変化に対してロバストなびびり振動抑制を実現する不等リード工具の最適リード角設計理論が提案されている^{1,2)}。本研究では、振動周波数だけでなく軸方向切込みの変化に対してもロバスト性を向上する設計法を提案する。また、不等リード工具においては、各切れ刃のリード角に依存して切削抵抗係数が変化しますが、これがプロセスの安定性に与える影響は明らかにされていない。そこで、解析的な切削力モデルを利用してリード角の影響を考慮可能な安定限界解析モデルを考案する。実験及び解析を通じて、提案する設計法の効果、およびリード角差がびびり振動安定性に与える影響を明らかにする。

2. 不等リード工具の最適設計理論

偶数枚刃の工具において、切れ刃 2 枚を 1 対としてそのピッチ角差 $\Delta\theta_{12}$ が式 (1) を満たすように設計することで、周波数 f_c の単一の振動モードに対して再生効果を相殺し得ることが知られている¹⁾。

$$\Delta\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2 = \pi(2m + 1) \frac{n}{60f_c} \quad (1)$$

n は主軸回転数、 m は整数である。不等リード工具では、軸方向切込みの半分の位置で上述の最適ピッチ角差を与える場合に、対の切れ刃が全軸方向切込み範囲で式 (1) を満たす状態となる。この性質を利用して、周波数変化に対してロバストに再生効果を抑制するリード角の設計方法として、式 (2) が提案されている²⁾。

$$\beta_1 = \text{atan}\left(-\frac{D}{2a}k\Delta\theta_{opt} + \tan\beta_0\right) \quad \beta_1 < \beta_2, \quad k=1,2,3,\dots \quad (2)$$

$$\beta_2 = \text{atan}\left(\frac{D}{2a}k\Delta\theta_{opt} + \tan\beta_0\right)$$

D は工具径、 a は軸方向切込み、 $\Delta\theta_{opt}$ は最適ピッチ角差、 β_0 は基準となるねじれ角、 k は整数である。不等リード工具は、本質的に、振動周波数の変化に対してロバストに再生効果を抑制する性能に優れるが、軸方向切込み変化に対してはロバストではない。一方で、不等ピッチ工具はその逆の性質を持つ。本研究では、これらの長所を組み合わせた工具設計法を提案する。

単一の振動モードを抑制する 4 枚刃不等リード工具を考える。式

(1) および式 (2) から、最適ピッチ角 $[\theta_1, \theta_2 (= \theta_1 - \Delta\theta_{opt})]$ と最適リード角 $[\beta_1, \beta_2]$ が得られる。各刃のピッチ角とリード角の組み合わせとしては、2 通りが考えられる。それぞれの組み合わせにおけるピッチ角、ピッチ角差と軸方向位置の関係、および $|RF|$ の計算例

を、図 1 および図 2 に示す。なお、軸方向切込みは 24mm、びびり振動周波数は 2000Hz とした。図 1(a) に示す組み合わせはピッチ角を $\{\theta_1, \theta_2, \theta_1, \theta_2\}$ 、リード角を $\{\beta_1, \beta_2, \beta_1, \beta_2\}$ と交互に並べた場合（従来手法）であり、市販の不等リード工具のほとんどがこの組み合わせで設計されている。図 1(a) に示すように切れ刃 1 および 3 と切れ刃 2 および 4 のピッチ角差が変化して再生効果の抑制に寄与するが、切れ刃 1 と 3 および切れ刃 2 と 4 のピッチ角差は常にゼロとなり、再生効果の抑制効果が得られない。すなわち、再生効果に対する設計の自由度を無駄にしている。一方、図 1(b) に示す設計（提案手法）では、 $\{\theta_1, \theta_1, \theta_2, \theta_2\}$ と $\{\beta_1, \beta_2, \beta_1, \beta_2\}$ の組合せであり、ピッチ角差がゼロとなる組合せが存在しない。切れ刃 1 と 3 および切れ刃 2 と 4 のピッチ角差は一定となるため、設定した周波数に対して軸方向切込みに依らずに再生効果を抑制し得ることを意味している。

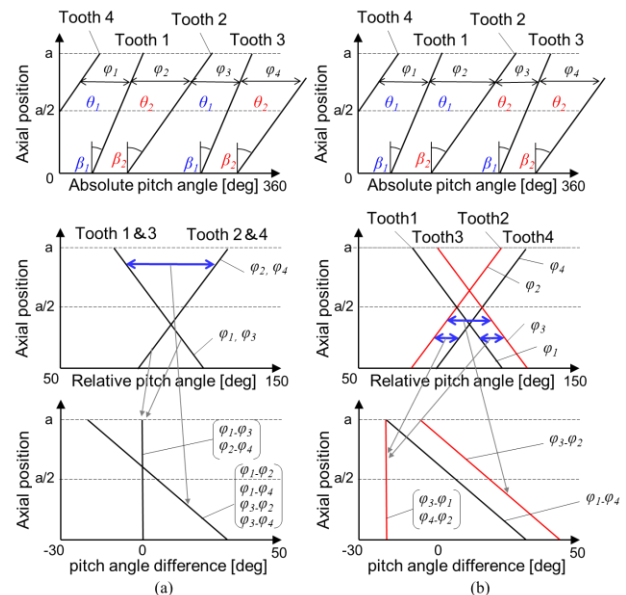


Fig.1 Relations of axial position and pitch angle in each combination

再生数 RF の特性に注目すると、図 2(a) に示す従来手法ではびびり振動周波数の変化に対してロバストに再生効果を抑制し得るが、軸方向切込みが小さい条件において、再生効果を十分に抑制できないことがわかる。一方、図 2(b) に示す提案手法では、びびり振動周波数の変化だけでなく、軸方向切込みに対してロバストに再生効果を抑制できることがわかる。周波数に対してロバストであるという特性は、同時に主軸回転数に対してもロバストであることを意味する。したがって、ピッチ角とリード角の組み合わせを最適化する提案手法により、主軸回転数やびびり振動周波数の変化に対してだけでなく、軸方向切込みの変化に対してもロバストに再生効果を抑制することができる。

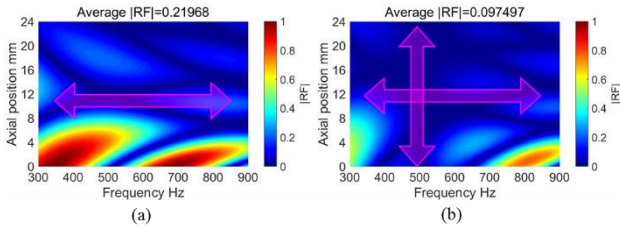


Fig.2 Distribution of RF in each combination

3. リード角差を考慮した安定限界解析

エンドミル加工におけるリード角は、傾斜切削における傾斜角に相当する。このため、傾斜切削理論に基づく、傾斜角から接線方向、および半径方向の比切削抵抗 K_{ct} , K_{cr} を求めることができる。比切削抵抗とリード角の関係を図3に示す。ただし、実験結果に基づき、リード角 45 度において $K_{ct}=2096$ MPa, $K_{cr}=427$ MPa とした。計算結果より、リード角に応じてわずかに比切削抵抗が変化することがわかる。すなわち、不等リード工具を用いる場合には、比切削抵抗のリード角依存性を考慮して安定限界解析を行う必要がある。本研究では、Zero order solution に基づき切削抵抗行列におけるリード角依存性を考慮し、式 (3) に示す特性方程式を解くことで安定限界を推定する。

$$\{f^0\} = \frac{1}{2} a_{lim} \frac{1}{N_a N_f} \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_a} \{K_{ct}(1 - e^{-i\omega_c T_{j,l}})[A^0]\} [G(i\omega_c)] \{f^0\} \quad (3)$$

4. 提案手法の実験検証

汎用マシニングセンタを用いた検証実験を行った。等ピッチ工具 (Tool 1)、ピッチ角とリード角の組み合わせを最適化していない従来不等リード工具 (Tool 2)、最適化した提案不等リード工具 (Tool 3) の 3 種類のエンドミルを用いて、炭素鋼 (S50C) の加工を行った。被削材は他の機械構造に対して突出して低剛性な平行板ばねワーク台に固定した。加工中の振動計測は被削材の裏側に取付けた渦電流変位計と 3 軸加速度計で低剛性方向 (x 方向) の振動変位と xyz 方向の加速度をそれぞれ計測した。また、びびり振動の安定性の評価には渦電流変位計で計測した振動変位を用いた。

図 4 (a)-(c) に Tool 1-3 の実験結果を安定限界線図と重ねてそれぞれ示す。解析においては、予備実験にて同定した比切削抵抗と、低剛性ワーク台のインパルス試験により伝達関数から同定したモデルパラメータを用いた。図中の青点は比切削抵抗を固定して求めた安定限界を示しており、緑点はリード角により比切削抵抗を変化させて求めた安定限界を示している。また、赤色の記号は主軸回転数に同期しない共振周波数付近の振動振幅の大きさに応じて実験結果をプロットしたものである。

図に示す解析結果から、等ピッチ工具に対して不等リード工具を用いる場合、安定性が大幅に向上していることがわかる。Tool 2 と Tool 3 の解析結果を比較すると、提案工具 Tool 3 の方が広い主軸回転数領域で安定性が向上していることがわかる。一方、リード角依存の比切削抵抗に関しては、考慮の有無はびびり振動安定性にあまり影響しない。この結果から、リード角差が大きくない場合、リード角依存の比切削抵抗の変化は、実質的にびびり振動の安定性にはほとんど影響しないと考えられる。

つぎに、実験結果に注目すると、Tool 1 においては解析結果と実験結果は完全には一致していないが傾向は一致しており、軸方向切り込みが 7mm 以上になると回転数に依らずに不安定であることがわかる。Tool 2 と Tool 3 においては、どちらも広い領域で安定性が高くなる実験結果が得られた。安定性が向上するという点で、実験結果の傾向は解析と一致するが、一部の条件では、解析結果と実験結果が一致していない。これは、解析におけるモデル化誤差やパラメータの誤差などが影響していると考えられる。

Tool 2 と Tool 3 の解析結果を比較すると、Tool 2 は不安定領域が点在するのに対し、Tool 3 は広い領域で安定性を向上している。また、実験結果においても Tool 3 の方がやや安定性が高い。以上の結果から提案手法は従来技術に対してさらにロバスト性を向上していると考えられる。

5. 結言

不等リードエンドミルにおいて、振動周波数と軸方向切り込みの両方の変化に対して、ロバストに再生効果を抑制するピッチ角とリード角の組み合わせを提案した。さらに、リード角依存性を考慮した安定限界解析モデルを考案し、提案手法の検証実験を行った。実験結果より不等リード工具は等ピッチ工具に対して大幅に安定性が向上することが明らかとなった。解析結果よりリード角変化がびびり振動安定性に与える影響は小さく、提案手法が振動周波数、軸方向切り込みの両方の変化に対してロバストに再生効果を抑制できることを確認した。

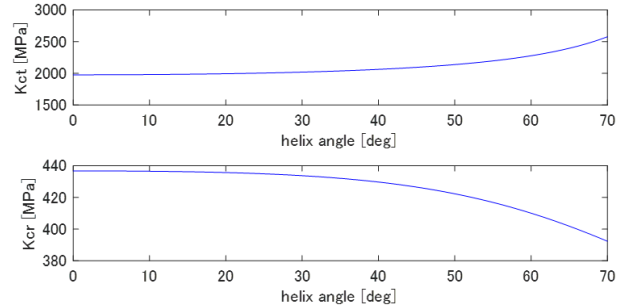


Fig.3 Specific cutting force for helix angle

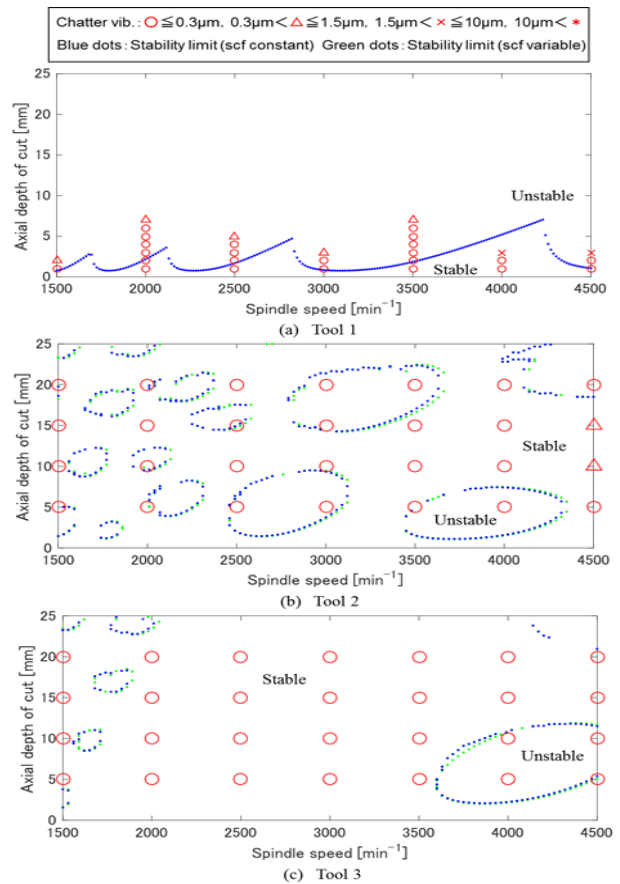


Fig.4 Comparison of analytical chatter stability and experimental results

参考文献

- 1) N. Suzuki, et al., A Novel Design Method of Irregular Pitch Cutters to Attain Simultaneous Suppression of Multi-Mode Regenerations, 2012
- 2) Kojima T. et al., A Novel Design Method of Variable Helix Cutters to Attain robust Regeneration Suppression