

博士学位論文審査要旨

2021年1月19日

論文題目： 車両駆動系トーショナルダンパにおける非線形振動に関する研究

学位申請者： 山梶 喜弘

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 理工学研究科 教授 伊藤 彰人

要 旨：

駆動系の振動騒音低減のために適用例が増してきている広角トーショナルダンパは、アークスプリングや直列ばねを内蔵し、復元力特性として非線形履歴曲線を有するため、それにより引き起こされる非線形振動の解明・改善や制御に用いられるモデル開発が重要である。本論文では、広角トーショナルダンパがもつ履歴特性に対し、十分に調査研究が行われていない駆動系ねじり振動現象の解明および改善、そしてこれらを再現可能な高精度モデルの開発を目的としている。

本論文は全6章で構成されている。第1章では、本研究の背景および目的について述べている。第2章では、これまで研究例のないトーショナルダンパ内部の動的バックラッシのメカニズムを可視化実験によって明らかにするとともに、アークスプリング式ロックアップダンパおよび直列ばね式デュアルマスフライホイールに対し共通の離散化モデルの定式化を示し、Modelica 言語を用いた1D シミュレーションモデルを構築している。第3章では、構築したモデルによって履歴特性の非線形性が駆動系周波数応答に及ぼす影響を明らかにするとともに、離散化数の影響を明らかにしている。さらに、動的バックラッシの発生する実車の運転条件を構築し、実車駆動系シミュレーションによってカオスの挙動および分数調波振動が発生することを明らかにしている。第4章では、台上の駆動系実験を実施し、特に高回転・低エンジントルク変動などによるトーショナルダンパのねじり角振幅が微小な状況においてモデル精度が悪化することを明らかにするとともに、精度改善のために離散化数を増大させると計算コストが増大するという課題を述べている。さらに、実車実験によって動的バックラッシによるカオスの挙動や分数調波振動が実際に発生することを明らかにするとともに、モデルと同等の結果が得られていることを示している。第5章では、不等ピッチ離散化モデルを提案し、従来モデルに対し計算コストをほとんど増大させることなくモデル精度を大幅改善できることを示している。さらに、動的バックラッシの改善手法を提案し、実車評価によってその効果を実証している。第6章では、本研究を総括し、各章で得られた知見を要約して示している。

これらの成果は、トーショナルダンパにおける非線形振動に関し実用上の課題を克服しながらも精度よく解析可能とするモデル化手法のみならず、動的バックラッシによる非線形振動のメカニズム解明および改善手法を確立しており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2021年1月19日

論文題目： 車両駆動系トーションダルダンパにおける非線形振動に関する研究

学位申請者： 山梶 喜弘

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 理工学研究科 教授 伊藤 彰人

要 旨：

本論文の提出者は、2018年4月に同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、Linköping University Electronic Press, Vol.124, pp. 9-14, ISBN 978-91-7685-749-6, ISSN 1650-3686, doi:10.3384/ecp161249, SAE Technical Paper 2019, 2019-01-1556, doi:10.4271/2019-01-1556, 自動車技術会論文集, Vol.51, No.1, pp.90-95, doi:10.11351/jsaeronbun.51.90 に掲載され、十分な評価を受けている。

2020年12月19日午前11時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、本論文の主たる内容に関する英語による論文発表を2件実施するとともに、語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上により、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：車両駆動系トーショナルダンパにおける非線形振動に関する研究

氏名：山梶 喜弘

要旨：

急速な地球温暖化の対応のため、排出ガス削減のために低燃費車の研究が精力的に行われているが、これらの技術はエンジントルク変動を増大させる要因となっており、駆動系の振動騒音低減のためにアークスプリングや直列ばねを内蔵する広角トーショナルダンパの適用例が増してきている。しかし、これらは復元力特性として回転速度性および振幅依存性のある複雑な履歴特性を内包するため、非線形振動を引き起こす可能性がある。そのため、振動・騒音・乗り心地（NVH: Noise, Vibration and Harshness）の観点より、履歴特性に起因する非線形振動のメカニズム解明および改善のための研究開発が重要である。一方、高度な駆動力制御が導入されている昨今の乗用車では、制御フィードバックのために駆動系モデルを車両コンピュータに導入する例が増してきている。しかし、広角トーショナルダンパは複雑な非線形性を有するため、トレードオフの関係にあるモデル精度と計算コストの解決のための研究開発もまた重要である。

そこで、本論文では、アークスプリングおよび直列ばねを内蔵する自動車用の広角トーショナルダンパがもつ履歴特性に対し、十分な調査研究に及んでいない駆動系ねじり振動現象の解明および改善、そしてこれらの非線形振動を再現可能な高精度モデルの開発を目的とした。また、研究対象のトーショナルダンパは、研究例の少ないアークスプリング式ロックアップダンパ（AS-LTD: Arc Spring type Long-Travel lock-up Damper）および直列ばね式デュアルマスフライホイール（IS-DMF: In-Series spring unit type Dual Mass Flywheel）とした。

まず、AS-LTD および IS-DMF に対し共通の離散化モデルを提案し、台上の駆動系周波数応答実験との比較を実施した。その結果、特に高回転・低エンジントルク変動などによるトーショナルダンパのねじり角振幅が微小な状況においてモデル精度が悪化することを明らかにしたとともに、精度改善のために離散化数を増加させると計算コストが増加する課題を示した。さらに、この課題を解決するための不等ピッチ離散化モデルを提案し、従来モデルに対し計算コストをほとんど増加させることなく大幅に精度改善できることを示した。

次に、これまで研究例のないトーショナルダンパ内部の動的バックラッシュによる非線形振動について検討し、カオスの挙動ならびに分数調波振動が発生することを明らかにした。さらに、感度解析によって改善手法を提案した。そして、改善手法を IS-DMF に適用し、実車評価を実施した。その結果、動的バックラッシュによって引き起こされる非線形振動を大幅に低減できることを示した。

本論文は全 6 章から構成されている。提案した技術のうち、離散化モデルの理論構築およびモデル構築、動的バックラッシのメカニズム調査については第 2 章で、離散化モデルを用いたシミュレーションおよびモデル検証、動的バックラッシによる非線形振動については第 3 章から第 4 章で、不等ピッチ離散化モデルおよび動的バックラッシによる非線形振動の改善手法については第 5 章で検討している。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景を示すとともに、本研究に関連する既往の研究についてまとめた。章末には、本研究の構成を示した。

第 2 章「実験的基礎調査およびモデル構築」では、IS-DMF および AS-LTD を対象に、履歴特性の非線形性、動的バックラッシのメカニズム、およびモデル構築手法について論じた。

まず、実験による動的バックラッシ発生メカニズムの検討について述べた。回転時ねじり特性の計測により、IS-DMF および AS-LTD とともに動的バックラッシが発生することを明らかにした。続いて、IS-DMF の可視化実験より、動的バックラッシは弾性体端部が回転速度依存の摩擦力によって固着し、弾性体駆動部品との離合が生じる現象であることを明らかにした。

次に、履歴特性および動的バックラッシを再現可能なモデルの構築について述べた。まず、AS-LTD および IS-DMF が共通の離散化モデルにより定義できることを述べ、定式化を示した。続いて、離散化数を 6 より大きくとる場合は数%の精度の誤差であることを理論的に示した。さらに、動的バックラッシ発生部位の接触剛性および摺動部の摩擦特性を実験同定した。その結果、IS-DMF はストライベックモデル、AS-LTD はハイパボリックモデルが実験値と良く一致することを明らかにした。最後に、得られた知見をもとに、Modelica 言語を用い 1D シミュレーションモデルを構築した。

第 3 章「モデル基礎検証およびシミュレーション」では、構築した離散化モデルを対象に、駆動系周波数応答および動的バックラッシの非線形振動シミュレーションについて論じた。

まず、構築した AS-LTD 離散化モデルを用いた駆動系周波数応答シミュレーションにより、履歴特性の非線形性が駆動系周波数応答に及ぼす影響を検討した。その結果、振幅依存性に起因する漸軟特性により見かけ共振点が低下し、さらに回転速度依存性に起因する減衰特性変化により見かけ共振点が上昇するという、複数の影響が作用することを明らかにした。続いて、高回転速度・低加振振幅などによりトーショナルダンパのねじり角振幅がきわめて小さい状況では、モデル精度に影響を及ぼす部分稼働現象が発生することを明らかにした。これは、離散化要素の一部が回転速度依存の摩擦力により固着し、稼働する離散化要素数が減少する挙動であり、シミュレーションに用いた離散化モデルのうち最も微細な離散化数 16 においても発生した。したがって、理論的検討した離散化数 6 では、実用上精度不足である可能性が示唆された。さらに、離散

化数の増加は、駆動系周波数応答シミュレーションにおいて計算コストを著しく増大させる要因であることを明らかにし、精度・計算コストのトレードオフ課題を提示した。

次に、IS-DMF 離散化モデルを用いた実車駆動系シミュレーションにより、動的バックラッシによる非線形振動について検討した。まず、第 2 章において明らかにした動的バックラッシの発生メカニズムをもとに、実車において発生し得る運転条件を構築した。次に、シミュレーション結果の STFT、分岐図、およびリターンマップによる解析により、動的バックラッシに起因する非線形振動はカオスの挙動を示すことを明らかにした。さらに、特定の相対トルク領域では自然数 n における $1/n$ 次分数調波振動に収れんすること、その収れん条件よりもわずかに小さい相対トルク領域では周期倍分岐が発生すること、相対トルクが大きくなるにつれ n 数が減少することを明らかにした。本現象は、いわゆる歯打ち現象に類似する片当たり接触振動に分類されるが、そのメカニズムは接触剛性による跳躍挙動および摺動挙動が複合しており、履歴特性の形状が 3 段区分線形特性となる複雑な現象であることを明らかにし、カオスの挙動および分数調波振動の発生は、これら二つのメカニズムに起因している可能性が示唆された。

第 4 章「実験検証」では、構築したモデルおよびシミュレーション結果の実験検証について論じた。

まず、低慣性ダイナモを用いた台上実験により、AS-LTD による駆動系周波数応答について検討した。その結果、シミュレーション結果は実験結果を概ね精度良く予測できていることを明らかにした。ただし、第 3 章において明らかにした離散化要素の部分作動挙動が顕著な高回転・低振幅条件においては、離散化数が小さいほど実験結果との乖離が発生した。さらに、この乖離要因は実稼働ねじり特性の比較より、稼働する離散化質量数の減少により発生する、ねじり特性上の多角形数の減少であることを明らかにし、モデル精度改善のためには離散化数の増加が必要であるが、特にアークスプリング端部離散化要素を小さく離散化することが肝要であることを示した。

次に、第 3 章に述べた動的バックラッシの運転操作手順に基づく IS-DMF の実車実験により、シミュレーション結果に現れた非線形振動が実際に発生し得るか調査した。その結果、カオスの挙動や分数調波振動が、シミュレーション結果と同様に発生することを明らかにした。さらに、3 次元リターンマップによる実験結果およびシミュレーション結果の比較より、非線形振動のメカニズムがモデルと一致していることを示した。

第 5 章「実際問題への応用」では、駆動系周波数応答を対象とした離散化モデルの実践的な改善、ならびに IS-DMF を対象とした動的バックラッシに起因する非線形振動の改善について論じた。

まず、AS-LTD に対し、離散化要素の部分作動挙動を改善するために、折り返し等差数列を利用した不等ピッチ離散化手法を提案した。その結果、第 2 章～第 4 章に論じた従来の等ピッチ離散化モデルにおいて精度課題である高回転・低振幅条件に対し、計算コストをほぼ増加することなく大幅に精度改善できることを示した。

次に、IS-DMF に対し、動的バックラッシュによる非線形振動の改善手法を提案した。まず、感度解析により、接触剛性および接触部に作用する離散化質量要素の摩擦トルク低減が、動的バックラッシュによる非線形振動の低減に対し寄与が大きいことを明らかにした。次に、感度解析結果に基づき接触剛性を低減した IS-DMF を試作した。さらに、その実車実験により、カオスの挙動および分数調波振動が大幅に低減できることを示し、感度解析より得られた改善手法の有効性を示した。

第 6 章「結論」では、本研究を総括し、各章で得られた知見を要約して示すとともに、今後の研究課題について提示した。

以上の研究成果より、提案した不等ピッチ離散化モデルおよび動的バックラッシュによる非線形振動の改善手法には画期的な効果があることを示した。これにより、アークスプリングおよび直列ばねを内蔵する広角トーショナルダンパを用いる駆動系ねじり振動の検討のために有効活用することが可能になったのみならず、動的バックラッシュによって引き起こされる非線形振動の改善が可能になった。これらの技術は、車両駆動系の NVH を改善するための設計検討に貢献できる。