

Analyse éléments finis et modèles réduits combinés à des approches flexibles de dynamique multi-corps pour la simulation de transmission par engrenages.

Mots clés : Analyse éléments finis, Erreur de transmission, Défauts micro-géométriques, Dynamique du contact, Dynamique multi-corps déformable, Réduction de modèle.

Ce travail porte sur la résolution efficace du problème de dynamique du contact des engrenages à l'aide des éléments finis. La méthode des éléments finis est souvent combinée à des approches de dynamique multi-corps flexible lorsque les géométries sont complexes et flexibles. Il s'agit d'un problème compliqué à résoudre. En effet, les raisons principales sont :

- Les différentes échelles impliquées dues aux modifications micro-géométriques, le comportement local (déformation de type hertzien) au niveau des dents, et le comportement global de la transmission par engrenage.
- La large gamme d'excitations multifréquences induites par le processus d'engrènement.
- La mécanique non lisse causée par les occurrences de contacts unilatéraux.
- Et le nombre élevé de degrés de liberté résultant d'un maillage fin qui est fondamental pour décrire avec précision les raisons citées précédemment.

Dans cette thèse, une approche est proposée pour surmonter les limites de calcul rencontrées dans le domaine de la dynamique de contact des engrenages en combinant l'analyse par éléments finis avec la dynamique multi-corps flexible et la réduction de modèle. Le travail proposé est appliqué sur les engrenages droits et hélicoïdaux mais aucune hypothèse n'est faite, les méthodologies proposées peuvent être appliquées à tout type d'engrenages. Le présent travail se concentre d'abord sur la définition de géométries d'engrenages 3D précises, capables d'intégrer des modifications micro-géométriques. Ensuite, des méthodologies basées sur l'analyse par éléments finis en condition quasi-statique sont proposées pour calculer les excitations internes qui sont l'erreur statique de transmission et la raideur d'engrènement. Elles sont capables de traiter : une paire d'engrenages avec des modifications micro-géométriques (dépouille de tête, bombé), une transmission par engrenages avec des arbres flexibles et des jantes minces, une paire d'engrenages avec des jantes minces et des trous, ainsi qu'une boîte de vitesses flexible complète (paire d'engrenages, arbres, roulements et boîtier). Une stratégie étendue en 2D est dérivée pour traiter rapidement les engrenages avec des trous. Ensuite, des modèles réduits sont générés. En effet, Les résultats de l'analyse par éléments finis des engrenages dans des conditions de fonctionnement quasi-statiques fournissent les champs de déplacement instantanés et les forces de contact instantanés. La collecte du champ de déplacement permet de générer une base réduite en utilisant la méthode de décomposition orthogonale propre (POD), cette base est enrichie de modes propres libres. La collecte de la force de contact permet la création de sous-espaces de Krylov. Ces modèles réduits sont combinés avec un modèle multi-corps flexible et le schéma d'intégration temporelles de Moreau-Jean (schéma d'intégration numérique) pour calculer la réponse dynamique transitoire.

Finite element method-based analysis and reduced order models combined with flexible multibody dynamics approaches for gear train simulations

Key words: Finite element-based analysis, Gear transmission error, Manufacturing errors, Contact dynamics, Flexible multibody modelling, reduced order modelling

The work is concerned with the efficient solution of gear dynamic contact problem by means of finite element method. Finite element method are often combined with flexible multibody dynamics approaches when geometries are complex and flexible. This is a complicated problem to solve. Indeed, the main reasons are:

- The different scales involved due to micro-geometric modifications, the local behaviour (hertzian-like deformation) at the teeth, and the global behaviour of gear transmission.
- The large range of multi-frequency excitations induced by the meshing process.
- The nonsmooth mechanics caused by occurrences of unilateral contacts.
- And the high number of degrees of freedom arising from a fine mesh which is fundamental to describe accurately the previous cited reasons.

In this dissertation an insight is proposed to overcome the computational limitation experienced in the gear contact dynamics field by combining finite element-based analysis with flexible multibody dynamics and model order reduction. The proposed work is applied on spur and helical gear, but no assumptions are made, proposed methodologies can be applied to any type of gears. The present work focuses firstly on the definition of accurate 3D gear geometries, capable of integrating micro-geometric modifications. Then, methodologies based on finite element analysis in quasi-static condition are proposed to compute the internal excitations which are the static transmission error and the mesh stiffness. They are able to treat gear pair with micro-geometric modifications (tip relief, crowning), gear transmission with flexible shafts and thin rimmed, gear pair with thin rimmed and holes and also a complete flexible gearbox (gear pair, shafts, bearings and the housing). An extended strategy in 2D is derived to deal fast with gear with holes. Next, reduced order models are generated using the methodology cited above. Results of gear finite element analysis in quasi-static operating condition provides snapshots of the displacement field and snapshots of the contact forces. The collection of snapshots of the displacement field enables the generation of a reduced basis using the Proper Orthogonal Decomposition Method (POD), this basis is enhanced with free eigenmodes. The collection of snapshots of the contact force allows the creation of Krylov subspaces. These reduced order models are combined with a flexible multibody framework and the Moreau-jean time-stepping scheme (numerical integration scheme) to compute the dynamic response.