Titre de la thèse :

Stratégies de conception optimale de forme robuste de structures présentant des non-linéarités de frottement et des paramètres incertains

Résumé :

La conception de systèmes mécaniques est un défi pour les industriels, avec des exigences croissantes en performance, en précision, et en temps de calcul. L’optimisation de forme numérique devient de plus en plus utilisée de par son efficacité par rapport à la conception par création et modification séquentielle de la géométrie des pièces mécaniques. Cependant, plusieurs problèmes tels que l’absence de gradient, la non-linéarité, et le coût de calcul des fonctions numériques utilisées pour quantifier la performance, constituent des difficultés majeures. De plus, la présence d’incertitudes géométriques pouvant avoir un impact considérable sur la performance des systèmes mécaniques, celles-ci doivent être prises en compte. Les freins à disque, présents dans de nombreux types de véhicules, sont des systèmes mécaniques complexes qui ont tendance à émettre un bruit de crissement dû à un phénomène complexe d’instabilités vibratoires induites par frottement. La quantification numérique du bruit de crissement pour sa minimisation mène à une fonction de performance sans gradient, coûteuse en temps de calcul et non-linéaire, qui représente fidèlement les principaux défis en conception optimale de systèmes mécaniques. Le travail de thèse présenté introduit de nouvelles approches pour l’optimisation robuste de forme de systèmes mécaniques, en combinant des méthodes numériques modernes, appliquées au cas d’un frein à disque sous critère de minimisation de bruit. En se basant sur la méthode d’Analyse Isogéométrique pour la paramétrisation de la forme et l’analyse du comportement mécanique, deux approches qui permettent de rechercher des conceptions optimales équilibrant performance et robustesse aux incertitudes, sont proposées. La première approche utilise la méthode du Chaos Polynomial creux afin d’obtenir une estimation de la variabilité de la fonction de performance aux incertitudes géométriques, combinée avec un algorithme génétique pour la recherche de solutions optimales. La capacité de cette approche à fournir des conceptions équilibrant performance et robustesse avec un coût de calcul raisonnable et une précision satisfaisante, est démontrée. La deuxième approche utilise la méthode du Krigeage bruité, méthode de méta-modélisation avec la possibilité de prendre en compte du bruit dans ses observations, pour la quantification d’incertitudes, combinée avec une stratégie d’enrichissement inspirée de l’Optimisation Bayésienne. Les résultats obtenus démontrent le grand potentiel de cette approche à réduire le coût de calcul de l’optimisation robuste, bien que des efforts soient nécessaires pour généraliser la méthode proposée en grande dimension, ainsi que pour assurer la fiabilité de l’estimation de robustesse. Généralement, l’étude présentée illustre les difficultés associées à l’optimisation de forme robuste de systèmes mécaniques complexes, dans le cas du frein à disque sous critère de bruit, l’aspect clé étant le compromis entre coût de calcul et précision des solutions obtenues. Les deux approches proposées constituent une contribution significative en optimisation de forme robuste et ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine.

Mots-clés :

optimisation de forme, quantification d’incertitudes, robustesse, conception

mécanique, optimisation multi-objectifs, fonction boîte noire, Analyse Isogéométrique,

Chaos Polynomial, Krigeage, mécanique non-linéaire, frein à disque, bruit de crissement.

Title of the thesis:

Robust optimal shape design strategies for systems with friction-induced instabilities and uncertain parameters

Summary:

The design of mechanical systems is a challenging subject for industrial manufacturers, with ever-increasing demands for high performance, precision, and speed. Numerical shape optimization is becoming more and more popular for design of mechanical systems for its effectiveness when compared to creating and adjusting designs sequentially, but problems such as absence of gradient, nonlinearity, and computational cost of the performance metrics constitute major difficulties. Moreover, geometric uncertainties can have considerable impact on system performance, and must be mitigated to ensure robustness of the proposed solutions. Disc brakes used in various types of vehicles, are complex systems which exhibit squeal noise due to friction-induced instabilities. Numerically quantifying squeal noise leads to gradient-free, nonlinear, and costly performance functions which are characteristic of the overall challenges in industrial design of mechanical systems. The presented PhD research introduces new ways of conducting robust shape optimization for industrial design combining modern numerical tools, applied to the case of a disc brake under squeal noise criterion. Based on the Isogeometric Analysis method for shape parametrization and mechanical analysis, two approaches are proposed to search for optimal designs which balance performance and robustness to uncertainties. The first method uses sparse Polynomial Chaos Expansions to get an estimation of output variability to uncertainties and combines it with a genetic algorithm to search for optimal solutions. This approach is shown to provide solutions which balance performance and robustness at a reasonable computational cost and with satisfactory accuracy. The second method uses a variant of the Kriging surrogate modeling method capable of taking into account noisy observations for uncertainty propagation, combined with a Bayesian Optimization-inspired enrichment strategy. This approach shows potential for great computational cost reduction although more efforts are to be made to increases applicability in high dimensions and accuracy of the associated robustness metric. Overall the conducted research demonstrates the difficulties of carrying out shape optimization of mechanical systems while taking into account the impact of uncertainties, with compromise between computational cost and accuracy being the key aspect. Nonetheless, both proposed methods show great potential and open new perspectives in the current context of industrial design of mechanical systems.

Keywords:

shape optimization, uncertainty quantification, robustness, mechanical design, multi-objective optimization, blackbox functions, Isogeometric Analysis, Polynomial Chaos Expansions, Kriging, nonlinear mechanics, disc brake, squeal noise.