

Performance and Micro-Vibrations in Magnetic Bearings for Space Applications

THIS IS A TEMPORARY TITLE PAGE
It will be replaced for the final print by a version
provided by the registrar's office.

Thèse n. 8425
présentée le 19 mars 2021
à la Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur,
programme doctoral en Robotique, contrôle et systèmes intelligents
École polytechnique fédérale de Lausanne
pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences
par

Guzmán BORQUE GALLEGO



acceptée sur proposition du jury :

Dr. Denis Gillet, président du jury
Prof. Yves Perriard, directeur de thèse
Dr. Douglas Martins Araujo, co-directeur de thèse
Prof. Alireza Karimi, rapporteur
Dr. Olivier Chételat, rapporteur
Prof. Bruno Dehez, rapporteur

Lausanne, EPFL, 2021

Abstract

The development of new space missions with novel high-performance and very sensitive payloads for Earth observation or scientific missions has imposed considerably tougher requirements in terms of the satellite's pointing accuracy and stability, and thus on the maximum allowed on-board micro-vibrations. The main sources of on-board disturbances are any moving or rotating parts in the satellite, such as cryocoolers, momentum or reaction wheels (RWs) and control moment gyroscopes (CMGs). These actuators generate narrow-band harmonic vibrations dependent on the actuator's speed, which are transmitted and amplified through the satellite's structure and reach the sensitive payload such as high-resolution cameras, mirror structures or telescopes.

A very promising alternative to overcome these limitations is the use of magnetic bearings (MBs), as identified by the European Space Agency (ESA), to levitate the rotor during operation, and thus allow a contact- and friction-less operation with virtually infinite life-time. Furthermore, due to the active control of the position of the rotor it is possible to actively suppress any other rotor vibrations such as exported forces due to rotor residual unbalance, creating a very-low disturbance actuator that can satisfy the needs of future high-performance space missions.

In the present dissertation, a study of the main aspects of magnetic bearings for space applications is undertaken, and more specifically of a promising magnetic bearing reaction wheel configuration: a fully active, Lorentz-type, self-bearing, slotless magnetic bearing and permanent magnet synchronous motor. The main goal of this thesis is to identify the key factors and characteristics of a magnetic bearing system, for its use in reaction wheels for attitude control of satellites, in terms of requirements and performance criteria, and undertake the required analysis and modifications in order to address such aspects.

As a result of requirements from in-orbit conditions and on-ground qualification and testing, the key features of magnetic bearings in reaction wheels are: generated micro-vibrations during operation, magnetic bearing and motor efficiency affecting power consumption and heat dissipation, and system complexity linked to the actuator's failure risk and cost.

Regarding micro-vibration generation it is necessary to study its sources, countermeasures and active suppression control techniques, to materialise the advantages of magnetic bear-

Abstract

ings and achieve very-low disturbances. Through the micro-vibration characterisation of the studied magnetic bearing system, the main sources of vibrations are identified and several countermeasures are undertaken: highly-symmetric bearing and motor windings reduce cross-couplings and asymmetries in the bearing and motor forces, and a multi-harmonic force rejection control technique is proposed and successfully implemented, achieving a reduction in the generated vibrations of at least one order of magnitude.

In order to limit in-orbit power consumption and guarantee on-ground testing, a high magnetic bearing and motor efficiency should be sought, minimising thermal and power consumption constraints. For this reason an accurate electromagnetic modelling of the studied slotless magnetic bearings and motor, combined with a general optimisation technique allowing the maximisation of the overall machine efficiency, and resulting in important reductions of power consumption during operation ranging from 30 % to 60 % and its associated losses.

Lastly, system complexity should be addressed for missions in which risk and cost are key drivers for technology selection. A simplification of the studied system is proposed by employing iron-less passive magnetic bearings which can reduce the number of actuators, sensors, power electronics and computational power, and its viability is verified through simulation.

The work and results presented in this dissertation show the great potential of employing magnetic bearings in reaction wheels for attitude control of satellites, due to their very low exported vibrations, through the removal contact between moving parts and the use of multi-harmonic force rejection control. Moreover, the proposed optimisation process for active magnetic bearings and motor shows the great margin of improvement in terms of efficiency that can facilitate the mitigation of thermal and power consumption concerns for space applications, and the addition of iron-less passive magnetic bearing can greatly simplify the overall system complexity and cost if needed.

Keywords: satellite attitude control, reaction wheel, magnetic bearing, micro-vibrations, vibration control, electromagnetic modelling, slotless windings, force and torque models, optimisation.

Résumé

Le développement de nouvelles missions spatiales avec de nouvelles charges utiles très performantes et très sensibles pour l'observation de la Terre ou les missions scientifiques a imposé des exigences considérablement plus strictes en termes de précision de pointage et de stabilité du satellite, et donc sur le niveau maximal autorisé de micro-vibrations. Les sources principales de perturbations à bord du satellite sont tous les actionneurs qui disposent des pièces mobiles ou rotatives, telles que les compresseurs dans des systèmes cryogéniques, les roues de réaction et les actionneurs gyroscopiques faisant partie du système de commande d'attitude et d'orbite (SCAO). Ces actionneurs génèrent des vibrations harmoniques dépendantes de la vitesse de l'actionneur, qui sont transmises et amplifiées par la structure du satellite et atteignent la charge utile, comme caméras de haute résolution, structures de miroirs ou les télescopes.

Une alternative très prometteuse pour éliminer ces limitations est l'utilisation de paliers magnétiques pour soutenir le rotor en lévitation pendant le fonctionnement, et permettre ainsi un fonctionnement sans contact et sans friction avec une durée de vie pratiquement infinie. En outre, grâce au contrôle actif de la position du rotor, il est possible de supprimer activement toute autre vibration du rotor, comme les forces exportées dues au balourd résiduel du rotor, créant ainsi un actionneur à très faible perturbation qui peut satisfaire les besoins des futures missions spatiales à haute performance.

Dans cette thèse, une étude des principaux aspects techniques des paliers magnétiques pour les applications spatiales est entreprise, et plus particulièrement, d'une configuration prometteuse de roue de réaction à paliers magnétiques : un moteur synchrone à aimants permanents et à paliers magnétiques sans fente, entièrement actif et basé sur les forces de Lorentz. L'objectif principal de cette thèse est d'identifier les facteurs et les caractéristiques clés d'un système à paliers magnétiques, pour son utilisation dans les roues de réaction pour le contrôle d'attitude des satellites, en termes d'exigences et de critères de performance, et d'entreprendre l'analyse et les modifications nécessaires afin de traiter ces aspects.

En raison des conditions et des exigences en orbite et sur Terre pour sa qualification, les principales caractéristiques des paliers magnétiques pour des roues de réaction sont les suivantes : les micro-vibrations générées pendant son fonctionnement, le rendement des paliers magnétiques et moteur affectant la consommation de puissance et la dissipation de chaleur,

Résumé

et la complexité du système liée au risque de malfonctionnement de l'actionneur et au coût.

En ce qui concerne la génération de micro-vibrations, il est nécessaire d'étudier ses sources, les contre-mesures et les techniques de régulation pour la suppression active des vibrations. Grâce à la caractérisation des micro-vibrations du système étudié à paliers magnétiques, les principales sources de vibrations sont identifiées et les contre-mesures suivantes sont prises : les bobines symétriques des paliers et des moteurs réduisent les couplages et les asymétries dans les forces des paliers et des moteurs, et une nouvelle technique de régulation est proposée pour rejeter les forces harmoniques, permettant d'obtenir une réduction des vibrations générées d'au moins un ordre de grandeur.

Afin de limiter la consommation d'énergie en orbite et de garantir les essais au sol, une modélisation électromagnétique précise des paliers magnétiques et du moteur sans fente est faite, et combinée avec une technique d'optimisation générale permettant de maximiser le rendement global de la machine, des réductions de consommation de puissance de 30 à 60 % et donc d'augmentation du rendement, sont obtenues.

Pour conclure l'analyse, la complexité du système doit être prise en compte pour les missions dans lesquelles le risque et le coût sont les principaux facteurs de sélection des actionneurs. Une simplification du système étudié est proposée en utilisant des paliers magnétiques passifs sans fer qui peuvent réduire le nombre d'actionneurs, de capteurs, d'éléments dans l'électronique de puissance et la puissance de calcul. La viabilité d'une telle configuration est vérifiée par simulation.

Les travaux et les résultats présentés dans cette thèse montrent le grand potentiel des paliers magnétiques pour son utilisation dans les roues de réaction pour le contrôle d'attitude des satellites, grâce au très faible niveau de vibrations exportées. De plus, le processus d'optimisation proposé pour les paliers magnétiques actifs et le moteur montre la grande marge d'amélioration en termes de rendement permettant la réduction des problèmes thermiques et de consommation de puissance électrique pour les applications spatiales, et l'ajout de paliers magnétiques passifs sans fer peut grandement simplifier la complexité et le coût du système si nécessaire.

Mots-clés : contrôle d'attitude des satellites, roue de réaction, paliers magnétiques, micro-vibrations, contrôle des vibrations, modélisation électromagnétique, bobinage autoportant, modèles de force et de couple, optimisation de machines électriques.