Thèse N. Poujol

Titre : Effets du calage des IGV sur les performances et les instabilités d'un compresseur centrifuge

Résumé :

Cette thèse présente une étude expérimentale et numérique des instabilités aérodynamiques se développant dans le compresseur centrifuge dénommé Turbocel, sur l'ensemble du champ compresseur. Ce compresseur, dessiné et fabriqué par Safran Helicopter Engines, comporte des IGV (Inlet Guide Vanes) à calage variable, un rouet centrifuge, un diffuseur radial et un redresseur axial. Ces travaux suivent ceux de Moënne-Loccoz [1] qui ont identifié deux et trois phénomènes aérodynamiques respectivement dans le rouet et dans le diffuseur radial aux faibles vitesses de rotation (53 % à 83 % Nn) au calage 0° des IGV. Seulement les phénomènes dans le diffuseur radial sont retrouvés lors de l'étude aux vitesses de rotation élevées (88 % à 100 % Nn) au calage 0°.

L'impact du calage des IGV (variant entre 0°, 20° et 40°) sur les performances et la présence des instabilités est alors caractérisé. Les IGV à calage variable apportent deux améliorations : (i) le rendement isentropique est augmenté aux faibles vitesses de rotation (53 % à 79 % Nn), (ii) les plages de fort rendement sont étendues aux vitesses de rotation élevées (88 % à 100 % Nn). De plus, le décalage de la ligne de pompage vers des débits plus faibles inhérent à la fermeture des IGV est utilisé pour accélérer rapidement le turbomoteur sans entraîner le pompage du compresseur.

La variation du calage des IGV ne provoque pas l'apparition de nouvelle instabilité par rapport au calage 0°. L'impact majeur de l’augmentation du calage est la diminution du débit d’apparition des instabilités tournantes en tête de l’inducteur du rouet. Cette diminution s'explique par l'évolution du triangle des vitesses en entrée de rouet. Le développement des instabilités au sein du diffuseur radial n'est globalement pas modifié par l'augmentation du calage. Du point de vue aérodynamique, le gain réalisé sur les performances et la plage d'opération grâce aux IGV à calage variable n'est donc pas contrebalancé par une aggravation des instabilités.

Les simulations stationnaires, réalisées avec le code elsA, ne permettent pas de reproduire correctement les phénomènes observés à part la recirculation établie en tête de rouet. Ces limitations sont en partie dues aux plans de mélanges situés aux interfaces rotor-stator. Des simulations instationnaires sur période machine sont donc réalisées pour l'étude des instabilités.

A 79 % Nn, une étude expérimentale détaillée montre que le décollement alterné, d'abord stationnaire, devient pulsant lorsque le débit diminue. La pulsation du décollement se produit à la fréquence de Helmholtz du banc. Le calage des IGV n'a pas d'impact significatif sur l'amplitude des fluctuations du taux d'alternance mais il influence la fréquence de la pulsation. Un modèle simple bi-dimensionnel de calcul de la fréquence de Helmholtz permet de retrouver les variations de la fréquence de pulsation observées.

Les simulations instationnaires reproduisent correctement l'évolution des performances en fonction du débit et le caractère pulsant du décollement alterné à 79 % Nn. Mais ce dernier ne pulse pas à la même fréquence entre les essais et les simulations. Il est montré que la pulsation numérique se produit avec une réflexion des ondes acoustiques sur les plans d'entrée et de sortie du domaine. Néanmoins, les fréquences expérimentale (11 Hz) et numérique (71 Hz) de pulsation sont situées dans la même gamme de fréquences et permettent l'analyse de la dynamique du décollement à l'aide de la simulation.

Une analyse topologique de l'écoulement moyen sur deux canaux du diffuseur radial montre que le point col (point critique majeur) dans le coin face en dépression/moyeu de l'aube décollée migre vers l'amont en restant dans le coin lorsque le débit diminue. L'aube décollée l'est sur ses deux faces car du fluide issu de ce décollement de coin contourne le bord de fuite et remonte en amont le long de la face en pression.

[1] : Moënne-Loccoz, V., 2019, Analyse Expérimentale Des Instabilités Aérodynamiques Dans Un Compresseur Centrifuge de Nouvelle Génération, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon

Mots-clés : calage des IGV, compresseur centrifuge, décollement alterné, diffuseur aubé, effets système, fréquence de Helmholtz, instabilités tournantes, recirculation, URANS

Title: Effects of the IGV stagger angle on the performance and instabilities of a centrifugal compressor

Abstract:

This thesis consists in experimentally and numerically investigating the aerodynamic instabilities in the centrifugal compressor called Turbocel on the whole compressor map. This compressor stage is designed and manufactured by Safran Helicopter Engines. It includes axial inlet guide vanes (IGV) with variable stagger angle, a backswept splittered impeller, a splittered vaned radial diffuser and axial outlet guide vanes. This thesis pursues the studies Moënne-Loccoz [1] at low rotation speeds (53 % to 83 % Nn) at an IGV stagger angle of 0°. These previous studies report two and three flow topologies in the impeller and in the radial diffuser respectively. Only flow topologies in the radial diffuser occur at high rotation speeds (88 % to 100 % Nn) at an IGV stagger angle of 0°.

The impact of the IGV stagger angle (0°, 20° or 40°) on the performance and the instabilities occurence is investigated. The variable stagger angle introduces two improvements: (i) an increase of the isentropic efficiency at low rotation speeds (53 % to 79 % Nn), (ii) an extension of mass flow range with high efficiency at high rotation speeds (88 % to 100 % Nn). In addition, the shift of the surge line towards lower mass flow rates due to the IGV closure enables a quick acceleration of the turboshaft without leading to the compressor surge.

The change in the IGV stagger angle does not trigger the emergence of new instabilities with respect to the stagger angle 0°. The increase of the stagger angle mainly causes a decrease of the mass flow rate at which rotating instabilities emerge at the tip of the inducer. This decrease is linked to the change in the velocity triangle at the impeller inlet. The occurrence of instabilities in the radial diffuser is broadly not altered by the increase of the IGV stagger angle. From the aerodynamic point of view, the improvements in performance and in the operating range thanks to the variable stagger angle of IGV are not counterbalanced by an aggravation of instabilities.

Steady simulations, performed with the solver elsA, do not accurately replicate the flow topologies observed beyond the established recirculation at the impeller tip. These limitations are partly due to mixing planes located at rotor/stator interfaces. Unsteady simulations on the spatial period of the compressor are thus performed for the analysis of instabilities.

At 79 % Nn, experimental data indicate that the alternate stall is firstly steady and then pulsates if the mass flow decreases. The stall pulsation occurs at the Helmholtz frequency of the test rig. The IGV stagger angles does not impact the amplitude of fluctuations of the alternate rate but the frequency of the fluctuations. A simple 2D modeling of the IGV to calculate the Helmholtz frequency predicts the changes observed in the pulsation frequency.

Unsteady simulations foresee the change in performance according to the mass flow and the pulsating nature of the alternate stall at 79 % Nn. But the pulsation frequency differs between the test and the simulation. The numerical pulsation occurs due to the reflection of acoustic waves on the inlet and outlet planes of the simulated domain. Nevertheless experimental and numerical frequencies (11 Hz and 71 Hz respectively) are in the same frequency range. Therefore the stall pulsation is investigated in details with the unsteady simulation.

A topological analysis of the averaged flow field on two radial diffuser adjacent channels is performed. The saddle point (major critical point) in the corner hub/suction side of the stalled blade migrates upstream while staying in the corner if the mass flow rate decreases. One main blade over two is stalled on both sides because the flow originating from this corner separation circumvents the trailing edge and migrates upstream along the pressure side.

[1] : Moënne-Loccoz, V., 2019, Analyse Expérimentale Des Instabilités Aérodynamiques Dans Un Compresseur Centrifuge de Nouvelle Génération, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon

Keywords: IGV stagger angle, centrifugal compressor, alternate stall, vaned diffuser, system effects, Helmholtz frequency, rotating instabilities, recirculation, URANS