Aeroelastic Investigation of Turbomachinery under Consideration of Aerofoils Manufacturing Geometrical Variability

Abstract:

Probabilistic investigations are increasingly present in the study of turbomachinery, allowing to evaluate the impact of modelling uncertainties on the machine. The geometrical variability is of particular interest when investigating axial compressor aerofoils. Deviations of these components' geometries from the nominal cyclic symmetry affect both the structural dynamics of the components and the flow field. Considering the aeroelastic problem, these uncertainties affect the aerofoils' vibration and therefore also the related high cycle fatigue.

Geometrical deviations from the nominal design are in general introduced on the components already during the manufacturing process. Such deviations are considered as the investigated source of uncertainty for the aeroelastic studies. Optical surface scans are used to measure the aerofoils' real three-dimensional geometries. A digital twin is defined to stochastically describe the geometrical differences from the nominal design. The process is automated to probabilistically characterize the geometry of a high pressure compressor.

The quantities of interest for the study are the aeroelastic forces on a rotor blade integrated disk. The impact of the geometrical deviations on excitation forces and aerodynamic damping is studied numerically, considering two working conditions for the reference test rig. The investigated forces depend on the interaction between the vibrating system and the flow field. The problem is intrinsically unsteady, involving multiple stages and passages of the compressor. Moreover, to represent passage-to-passage geometrical differences, it is necessary to consider the variability of multiple aerofoils. This requires the definition of solution methods for the evaluation of the aeroelastic forces, considering the geometrical variability.

Different methods are developed for the evaluation of the aerodynamic damping and the modal forces, while limiting the geometrical uncertainty space. The results indicate the necessity of including multi-passage effects in the evaluation of the aeroelastic forces. The optimized stochastic modelling of the geometry, combined with the investigation of its impact on sector aerodynamic influence coefficients, allowed to evaluate the aerodynamic damping for a mistuned rotor. Considering the modal forces, the full spectrum of the mistuned excitation could be reconstructed as a linear superposition of disturbances from individual aerofoils' geometrical deviations, allowing the stochastic investigation of the problem. The methods are compatible with aero-mechanic reduced order models to include also the structural mistuning in the investigation of the forced vibration amplitudes.

Key words: Axial Compressors, Aeroelasticity, Geometrical Variability, Digital Twin, Uncertainty Quantification

Aeroelastische Untersuchung von Turbomaschinen unter Berücksichtigung der geometrischen Abweichungen von Kompressorschaukeln

Kurzfassung:

Probabilistische Untersuchungsmethoden bei der Analyse von Turbomaschinen gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie eine Bewertung des Einflusses von Modellierungsunsicherheiten auf die Maschinenleistungsfähigkeit ermöglichen. In Bezug auf Schaufelprofile axialer Kompressoren steht deren geometrische Variabilität im Mittelpunkt des Interesses. Hinsichtlich der aeroelastischen Problemformulierung wirken sich Abweichungen von der nominellen, zyklischen Rotationssymmetrie sowohl auf die Strukturmechanik von Komponenten als auch auf das Strömungsfeld aus, wodurch sich auch eine Beeinflussung der Ermüdung von Rotorschaukeln unter hochzyklischer Belastung ergibt.

Geometrische Abweichungen vom nominellen Design sind in der Regel eine Folge der Fertigung und werden in der vorliegenden Arbeit als maßgebliche Ursache von Unbestimmtheiten im Hinblick auf aeroelastische Analysen adressiert. Zur Beschreibung der komplexen dreidimensionalen Geometrie werden zu diesem Zweck Daten optischer Geometrievermessungen axialer Kompressorschaukeln herangezogen. Auf deren Grundlage wird ein digitaler Zwilling aufgebaut, welcher die Beschreibung von Geometrieabweichungen vom nominellen Design erlaubt. Zur probabilistischen Charakterisierung der Geometrie des Hochdruckverdichters erfolgt eine Prozessautomatisierung.

Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen die Auswirkungen der Abweichungen auf die aeroelastische Kraftwirkung auf ein integrales Laufrad. Der Einfluss der geometrischen Variabilität auf Anregungskräfte und aerodynamische Dämpfungen wird unter Berücksichtigung von zwei Betriebspunkten eines Referenztestprüfstands numerisch analysiert. Die Ausprägung der untersuchten Kräfte hängt von der Wechselwirkung zwischen schwingendem System und Strömungsfeld ab. Diese in sich instationäre Problemstellung umfasst mehrere Kompressorstufen und –passagen. Als besondere Herausforderung bei der Durchführung einer Unbestimmtheitsanalyse bezüglich der wirkenden Kräfte wurden die Modellierung der geometrischen Variabilität und die Lösungsmethoden für deren Berechnung identifiziert.

Es werden verschiedene Methoden für die Berechnung der modalen Kräfte und der aerodynamischen Dämpfung für einen begrenzten Raum der Unsicherheiten entwickelt. Die Ergebnisse belegen die Notwendigkeit einer Berücksichtigung von Mehrpassageneffekten bei der Berechnung der aeroelastischen Kräfte. Die optimierte stochastische Modellierung der Geometrie in Kombination mit ihrem Einfluss auf aerodynamische Sektoreinflusskoeffizienten erlaubt die Berechnung der aerodynamischen Dämpfung eines verstimmtten Laufrads. Im Hinblick auf modale Kräfte konnte das Spektrum der verstimmtten Anregung vollständig anhand einer linearen Superposition der aus den Schaufelgeometrieabweichungen resultierenden Störungen rekonstruiert werden, wodurch eine stochastische Untersuchung des Problems ermöglicht wird. Die Methoden können in reduzierte Modelle der Aeromechanik implementiert werden, welche auch strukturelles Mistuning bei der Analyse erzwungener Schwingungsantwortamplituden zu berücksichtigen vermögen.

Schlagwörter: Axialkompressor, Aeroelastizität, Geometrische Variabilität, Digitaler Zwilling, Quantifizierung der Ungewissheit.