

Zusammenfassung

Neuere Designs von Turbomaschinen, vorallem bei der Fan-Stufe von Flugtriebwerken, senken das Verhältnis von Schaufelmasse zur umliegenden Luft. Bei steigendem Einfluss der aerodynamischen Kräfte im Vergleich zu den Inertialkräften der Struktur kann eine aeroelastische Kopplung nicht mehr ausgeschlossen werden. Üblicherweise werden sogenannte entkoppelte Methoden zur Flatteranalyse verwendet, z.B. die Energiemethode nach Carta, welche allerdings eine nicht-konservative Vorhersage des aeroelastischen Stabilitätslimit liefern.

Das zu betrachtende aeroelastische System zwischen Strukturdynamik und Aerodynamik führt zur aeroelastischen Stabilitätsgleichung, die durch ein generalisiertes Eigenwertproblem abhängig von der aeroelastischen Frequenz beschrieben wird. In der Flatteranalyse von Starrflüglern wurden verschiedene Methoden zur Lösung der Stabilitätsgleichung etabliert. Das heutzutage meistverwendete Verfahren ist die p-k-Methode nach Hassig.

In dieser Arbeit wird die p-k-Methode für Anwendung auf Turbomaschinen angepasst. Dabei wird auf die spezifischen numerischen Aufbauten, insbesondere zyklische Symmetrie und die Veränderung der Struktur-Eigenformen (Modeshapes) und Struktur-Eigenfrequenzen mit der Rotordrehzahl und Drosselungszustand, eingegangen. Unter der Annahme kleiner Auslenkungen beim Einsetzen von Flattern können die Vibrationen mit einem linearisierten Ansatz behandelt werden, der eine Superposition der aerodynamischen Antworten erlaubt. Die instationären aerodynamischen Kräfte durch erzwungene Schwingungen werden deshalb mit einem Frequenzbereichsverfahren ermittelt und können dann für die aeroelastische Frequenz interpoliert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Verifikation und Validierung der angepassten p-k-Methode für die Simulation und Untersuchung von Flattern durch Modenkopplung von Turbomaschinen. Die Ergebnisse werden mit Fluid-Struktur-gekoppelten Zeitschrittverfahren verglichen und zeigen gute Übereinstimmungen. Eingängige Untersuchungen der beeinflussenden Parameter, wie z.B. Massenverhältnis, Frequenzabstand und Schaufelabstand, wird durchgeführt. Die Anwendung des hier entstandenen Prozesses auf eine Fan-Schaukel mit niedrigem Massenverhältnis zeigt, dass sich, im Vergleich zur üblicherweise verwendeten Vorhersage per Energiemethode, der flatterfreie Bereich deutlich verkleinert.

Abstract

With new turbomachinery designs, especially for the fan stage of aero engines, the ratio of blade mass to the surrounding air is significantly reduced. As the aerodynamic forces become relevant in relation to the inertial forces of the structure, aeroelastic coupling cannot be neglected anymore. The classically used decoupled methods for flutter analysis, such as Carta's energy method also known as the work-per-cycle approach, yield a non-conservative statement in predicting the aeroelastic stability boundary.

The resulting aeroelastic system of structural dynamics and aerodynamics leads to the aeroelastic stability equation, which itself is a generalized eigenvalue problem depending on an aeroelastic frequency. In fixed-wing analysis, different methods to solve the stability equation were introduced over the decades. The most prominent technique used nowadays is the p-k method as described by Hassig.

Within this thesis, the p-k method is adapted for the usage in turbomachinery with respect to the specific numeric setups, such as cyclic symmetry, or the change of mode shapes and natural frequencies over rotor speed and throttling state. Assuming small perturbations in the vicinity of flutter onset, vibrations can be handled by a linearized approach so that aerodynamic responses are independent of the amplitude and allow a superposition. Thus, the unsteady aerodynamic forces are gained from a set of frequency domain forced motion simulations and interpolated at the aeroelastic frequency.

The goal of this thesis is to verify and validate the adapted p-k method for coupled-mode flutter in turbomachinery. The results are compared against time-marching fluid/structure-coupled simulations and show good agreement. An intensive investigation of the influencing parameters, i.e. mass ratio, frequency separation and solidity, is performed. Applying the herein established process to a low mass ratio fan blade, it is shown that the flutter-free regime is significantly reduced in comparison to the classical energy method approach.