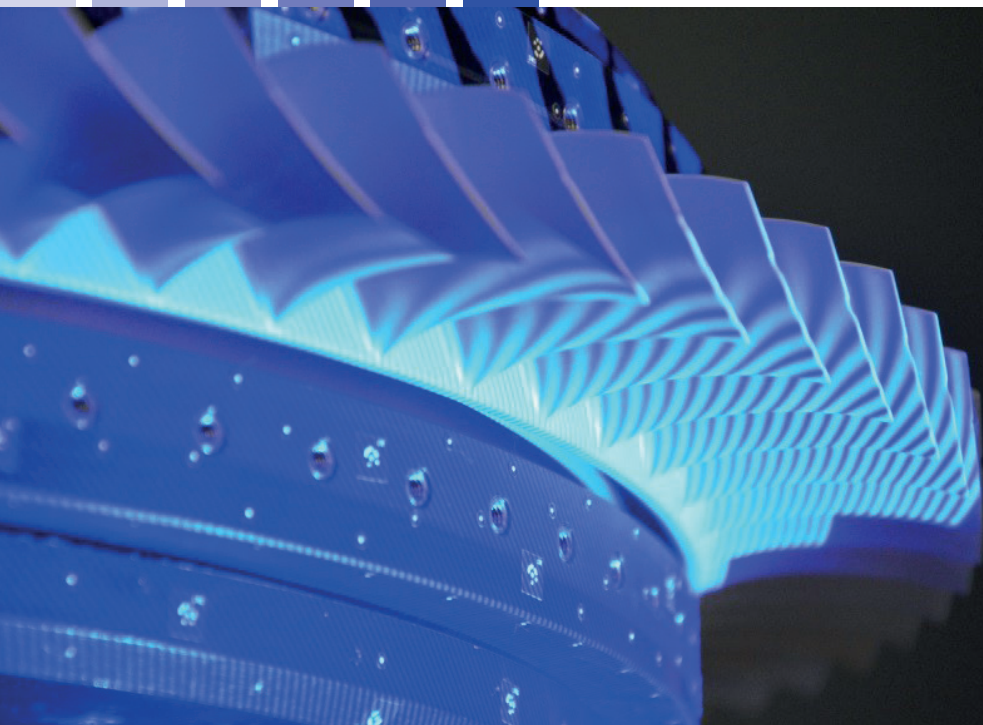


Uncertainty Propagation of Real Geometry Effects on Jet Engine Compressor Blisks

Thomas Backhaus



Uncertainty Propagation of Real Geometry Effects on Jet Engine Compressor Blisks

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Backhaus

geboren am 22. Oktober 1988 in Borna

Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude
Prof. Dr.-Ing. habil. Ronald Mailach
Prof. Dr.-Ing. Stefan Reh
Prof. Dr.-Ing. Klaus Wolf
Prof. Dr.-Ing. Konrad Vogeler

Tag der Einreichung: 28. Juni 2019

Tag der Verteidigung: 29. November 2019

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Thomas Backhaus

**Uncertainty Propagation of Real Geometry Effects
on Jet Engine Compressor Blisks**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7433-8

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Knowledge Workers *have* to manage themselves.
They have to have *autonomy*.

Peter F. Drucker

Abstract

Uncertainty Propagation of Real Geometry Effects on Jet Engine Compressor Blisks

Keywords: Jet Engine, Robust Design, Uncertainty Quantification, BLISK, Reverse Engineering, Compressor Parametrization

The consideration of uncertainties within the design procedures of jet engine components implies the possibility of reducing adjustment procedures in order to increase the robustness of preliminary designs. Here, automated routines for multidisciplinary system evaluations, analysis and optimization were developed within the past decade. These systems imply the ability of combining a various number of fluid and structure descriptive models and provide the design engineer with an enormous advantage during the decreasing time periods in modern development cycles.

Nevertheless, it is still common to use a sequential design strategy to increase the robustness of a preliminary design due to uncertainties within the manufacturing process or the jet engine's life cycle. In order to reduce the time to adjust the design due to an uncertain system behavior, uncertainty needs to be considered within the design process in the first place. Following this, the presented thesis outlines a strategy to make the system's uncertainty available for an automated design process, like multidimensional design analysis or optimization.

It is shown how the deterministic design problem of a high-pressure compressor blisk's vibration behavior can be transformed into a probabilistic design problem considering the geometric uncertainty within the manufacturing process. There it is demonstrated how it is possible to capture the geometric variation of a bladed compressor disk and to process these data sets of surface meshes in order to quantify the geometric uncertainty. These statistic geometry descriptions are used afterwards to produce probabilistically generated compressor airfoils and make them available for CAD-based, multidisciplinary design analysis or optimization routines. The presented algorithms, models and procedures are validated throughout the complete workflow to outline the magnitude of this thesis' contribution to future compressor design procedures.

Kurzfassung

Übertragung von Systemunsicherheiten aus Real-Geometrieeffekten auf Flugtriebwerkverdichter Blinks

Schlüsselwörter: Flugtriebwerk, robustes Design, BLISK, Reverse Engineering, Verdichterparametrisierung, Quantifizierung von Unsicherheiten

Die Betrachtung von Unsicherheiten innerhalb der Designprozesse von Triebwerkskomponenten bietet die Möglichkeit Nacharbeiten zu reduzieren, um die Robustheit von Entwürfen zu erhöhen. Hierfür wurden in den letzten Jahren Routinen für die multidisziplinäre Systembewertung, -analyse und -optimierung entwickelt. Diese Systeme ermöglichen es eine Vielzahl von Strömungs- und Strukturbeschreibenden Modellen zu kombinieren und bieten somit dem Entwicklungsingenieur einen enormen Vorteil in immer kürzer werdenden Produktentwicklungszyklen.

Dennoch ist es nach wie vor üblich, eine sequentielle Designstrategie zu verwenden, um die Robustheit eines Entwurfes gegenüber Unsicherheiten aus dem Herstellungsprozess oder dem Lebenszyklus des Triebwerks zu erhöhen. Um die Überarbeitungszeit aufgrund von unsicherem Systemverhalten zu reduzieren, muss diese Unsicherheit bereits im Designprozess berücksichtigt werden. Aus diesem Grund beschreibt die vorliegende Arbeit eine Strategie, um die Systemunsicherheit einem automatisierten Designprozess, bzw. einer multidimensionalen Designanalyse oder -optimierung, zugänglich zu machen.

Es wird gezeigt, wie die deterministische Beschreibung des Schwingverhaltens einer Verdichterblick in eine probabilistische Problembeschreibung unter Berücksichtigung von geometrischen Produktionsvariationen umgewandelt werden kann. Hierfür wird die Möglichkeit aufgezeigt, diese Variationen zu erfassen und deren oberflächenbeschreibenden Datensätze aufzubereiten, um die geometrischen Unsicherheiten zu quantifizieren. Diese statistischen Geometriebeschreibungen werden anschließend herangezogen, um probabilistisch simulierte Verdichterschaukeln zu generieren und diese für CAD-basierte, multidisziplinäre Designanalysen oder Optimierungsroutinen zur Verfügung zu stellen. Die entwickelten Algorithmen, Modelle und Verfahren werden innerhalb des gesamten Prozessablaufes validiert, um somit den Wert des Forschungsbeitrags dieser Arbeit für zukünftige Verdichterauslegungsverfahren zu erfassen.

Contents

Nomenclature	XIII
Acronyms	XVII
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aspects for a Robust Compressor Design	3
1.3 Structure, Objectives and Contributions of this Thesis	5
2 Introduction to Structural Compressor Design	9
2.1 Blade Integrated Disk Design	9
2.1.1 The Motivation of the Blisk Design	10
2.1.2 Manufacturing Process	12
2.2 Vibration Behavior	13
2.3 Aeroelastic Effects	16
2.4 Mechanical Model Definition	20
2.4.1 Cantilever Beam Model	21
2.4.2 Finite Element Simulation Model	22
2.4.3 Validation of the Simulation	24

3	Introduction to Statistical and Probabilistic Analyses	27
3.1	The Probabilistic Model	28
3.1.1	Principles of Stochastic Theory	28
3.1.2	Definition of the Deterministic Model	29
3.1.3	Transition from a Deterministic to a Probabilistic Model	31
3.2	Description of Random Distributions	32
3.2.1	Continuous Probability Distributions	33
3.2.2	Statistical Description Parameters	34
3.2.3	Parameter Interval Estimation	37
3.3	Simulation Techniques	38
3.4	Regression Methods	41
3.5	Objectives for Uncertainty Quantification	45
3.5.1	Sensitivity Evaluation	45
3.5.2	Probability of Failure Estimations	47
3.5.3	Robust Design Optimization	50
4	Geometric Airfoil Digitizing	53
4.1	3D Geometry Measurement Methods	53
4.1.1	Tactile Methods	53
4.1.2	Optical Methods	54
4.1.3	Digitizing Method Assessment	58
4.2	Blisk Digitizing Setup	59
4.2.1	Introduction to the Digitizing Hardware	59
4.2.2	Measurement Process	60
4.2.3	Introduction of the Data Set	63
4.3	Digitizing Quality Assessment	63
4.3.1	3D Precision Evaluation	64

4.3.2	2D Precision Evaluation	67
4.3.3	Summary of Precision Assessment	70
4.3.4	Accuracy Comparison	71
5	Axial Compressor Airfoil Parameterization	75
5.1	Overview of Parameterization Methods for Axial Compressor Airfoils	75
5.1.1	Decomposition of the Digitized Airfoil Geometry	76
5.1.2	Methods for Airfoil Section Parameterization	78
5.1.3	Method Assessment	80
5.2	Airfoil Parameter Calculation	80
5.2.1	Camber Line Extraction	80
5.2.2	Airfoil Thickness Evaluation	82
5.2.3	Parameter Definition	86
5.2.4	Radial Section Composition	88
5.2.5	Parameterization of the Airfoil Fillet	90
5.3	Parametric 3D Airfoil Build Up	93
5.3.1	Defining the Reference Geometry	93
5.3.2	Profile Distribution Morphing	96
5.3.3	2D Section Definition	101
5.3.4	3D CAD Build Up	102
5.4	Parameterization Quality Assessment	105
6	Vibration Analyses Considering Manufacturing Variability	109
6.1	Overview on Analysis Approaches Considering Geometric Variability	109
6.2	Statistical Evaluation of Digitized HPC Blisks	111
6.2.1	Single Stage Evaluation	111
6.2.2	Drum Evaluation and Comparison	119

6.3	Probabilistic System Definition	123
6.3.1	Radial Airfoil Section Syntheses Definition	123
6.3.2	Probabilistic Simulation of Mistuning Effects	126
6.3.3	Probabilistic Model Quality Assessment	131
6.3.4	Transition from a Deterministic to a Probabilistic Campbell Diagram	132
6.3.5	Fatigue Strength Evaluation	136
6.4	Conclusions for a Robust Design	140
7	Summary and Outlook	141
	List of Figures	145
	List of Tables	153
	Bibliography	155