TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Fachgebiet Computational Mechanics

Uncertainty analysis and robust optimization for low pressure turbine rotors

Giulia Antinori

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Straub

Prüfer der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck
2. Univ.-Prof. Dr. Bruno Sudret, ETH Zürich, Schweiz

Die Dissertation wurde am 20.01.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt am 06.07.2016 angenommen.

Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 5

Giulia Antinori

Uncertainty analysis and robust optimization for low pressure turbine rotors

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2016

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5155-1
ISSN 2193-2700

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

As far as the propositions of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality.

Albert Einstein

Abstract

Jet engine design requires an accurate analysis of uncertainty sources and of their effect on life and integrity of the parts. Fuel consumptions and noise emissions must be strongly reduced while fulfilling safety requirements. In order to comply with both requisites, the dependence of the system on uncertainty must be diminished. This has been achieved, until now, through the use of safety factors. However, the advent of high power computing now allows the usage of probabilistic methods to determine the effect of input variation on output variables.

The aim of this thesis is to develop a new and problem-adapted methodology, based on a combination of appropriate methods for the design and optimization under uncertainty of a low pressure turbine (LPT) rotor. The physical system is described and simulated through finite element methods (FEM).

The proposed approach is discussed via the following investigations: possible sources of aleatoric uncertainty in the design process are identified, for instance in engine-to-engine variations, in the manufacturing process and in ambient conditions. The effect of these variations on the responses is measured through sensitivity analysis and uncertainty quantification. The optimization is performed on a reduced design space, which is obtained from the sensitivity analysis. In order to include robustness in this optimization, different architectures are compared and the most efficient, in terms of computational time, is chosen.

The use of probabilistic methods provides the practitioner with extensive information on the system, which cannot be gained through the use of classical deterministic techniques. An optimal solution, which satisfies the safety requirements and is insensitive to variation in the design parameters, is obtained by including robustness in the optimization. The methods analyzed here are illustrated for two different cases. In the first, the secondary air system as standalone is presented. In the second, a coupled flow-thermomechanical model is analyzed for a steady state condition and a reduced transient mission, enabling the calculation of a probabilistic life prediction.

Zusammenfassung

Die Triebwerksauslegung verlangt eine genaue Analyse der Unsicherheitsquellen und deren Effekt auf die Lebensdauer und Integrität der Bauteile. Kerosinverbrauch und Lärmemissionen müssen stetig reduziert werden unter Berücksichtigung weiterhin hoher Sicherheitsanforderungen. Um all diesen Anforderungen zu genügen, muss die Abhängigkeit des Systems von Unsicherheiten reduziert werden. Bis dato wurden diese über die Verwendung von Sicherheitsfaktoren abgedeckt. Mittlerweile ist es aufgrund von HPC (high performance computing) möglich probabilistische Methoden heranzuziehen, um die Auswirkung von Unsicherheiten der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen zu quantifizieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine speziell auf das Design einer Niederdruckturbine (NDT) zugeschnittene Methode zu entwickeln, die in einer Kombination von Auslegungs- und Optimierungsmethoden, die Unsicherheiten berücksichtigt. Das phyikalische System wird durch FEM-Modelle abgebildet. Potentielle Unsicherheitsquellen innerhalb des Auslegungsprozesses, wie beispielsweise Triebwerk-zu-Triebwerk Variationen, in der Herstellprozesskette und in Umgebungsbedingungen werden identifiziert. Die Auswirkungen der Variationen dieser Parameter auf das System werden anhand von Sensitivitätsanalysen und Quantifizierung der Unsicherheiten gemessen. Die Optimierung wird innerhalb eines reduzierten Auslegungsraumes, der anhand von Sensitivitätsanalysen definiert wird, durchgeführt.

Um Robustheit in der Optimierung zu berücksichtigen, werden verschiedene mögliche Architekturen verglichen und die in Bezug auf Rechenzeit effizienteste Methode schließlich ausgewählt.

Die Verwendung probabilistischer Mehoden stellt umfangreiche Informationen über das System bereit, die nicht anhand von Sicherheitsfaktoren oder sonstiger klassischer deterministischer Techniken gewonnen werden können. Eine optimale Lösung, die sowohl Sicherheitsanforderungen erfüllt als auch unempfindlich auf Variationen der Auslegungsparameter reagiert, wird durch die Berücksichtigung von Robustheit in der Optimierung gewonnen. Die Ergebnisse sind für zwei unterschiedliche Fälle dargestellt: zunächst wird das Sekundarluftsystem (SAS) für sich betrachtet. Anschließend wird ein gekoppeltes SAS-thermomechanisches Modell analysiert - sowohl für einen stationären Fall als auch für eine reduzierten transienten Flugablauf - was die Berechnung einer probabilistischen Lebensdauervorhersage ermöglicht.

Acknowledgements

I would like to thank my supervisor Prof. Dr. Fabian Duddeck for giving me the opportunity of conducting my doctoral studies at his chair in a prestigious university such as the Technische Universität München and for letting me pursue my own research goals. I would like to acknowledge Dr. Andreas Fischersworring-Bunk for the fruitful cooperation within MTU Aero Engines and for helping me in filling the gap between my mathematical knowledge and the engineering world. The confidence he demonstrated in my work was of great support.

I would also like to thank my second supervisor Prof. Dr. Bruno Sudret and his research group at the chair of risk and uncertainty quantification in ETH for welcoming me in Zürich and for the nice discussions on PCE. A very big thank goes to Dr. Stefano Marelli for introducing me to the wonderful world of UQLab and for helping me every time I had problems with the software. Thanks to Christos Lataniotis, Carlos Lamas Fernandez, Dr. Katerina Konakli, Van Chu Mai, Joseph Benjamin Nagel, Roland Schöbi and Margaretha Neuhaus for making me feel home every time I came to visit.

A special thank goes to Ilya Arsenyev for sharing with me the problems and difficulties but also the successes and fun of working on the topic of robust design optimization for low pressure turbines applications. I hope this collaboration will continue beyond our PhDs. My gratitude and esteem goes to Daniel Weigert for teaching me how to ski and to Dr. Erich Wehrle for the chatting and discussions during the many coffee breaks and for proofreading this thesis. I would also like to thank my colleagues at the chair of computational mechanics, Anna Arsenyeva, Stefan Erschen, Lailong Song, Simon Mößner, Simon Hesse, Gesche Fender, Pablo Lozano, Maximilian Zinner, Duo Zeng, Koushyar Komeilizadeh for the nice discussions we had.

My appreciation goes especially to Dave Cloud for the positive attitude and confidence he always showed despite all the difficulties; to Dr. Yannick Muller for initiating me to the secondary air system knowledge and for his never-ending helpfulness; to Nadia Zerelli for explaining me all the secrets of the thermal system, for working side by side on the probabilistic HPC and for cheerfully teaching me the German language; to Stefan Erhard, Dr. Ewald Lutum, Dr. Erhard Reile, Dr. Marc Nagel, Dr. Guido Dhondt, Dr. Martin Becker, Tobias Rössler and all my colleagues in MTU Aero Engines for the continuous help and support they provided and for creating a pleasant and amusing working environment. Thank to them I could widen my knowledge in a field that was totally new for me. Thanks to Frank Vöse, Thomas Petzke and Smajo Hajdinovic for cheering up my day and sharing lunch with me at the MTU canteen.

Finally, I would like to thank my fiancé, Mattia. Knowing that he is always by my side is the greatest source of strength in my life. Thanks to his infinite patience and his support I could complete this work without becoming crazy. Last but not least, my thanks go to my family for having always encouraged and sustained all my new projects and decisions even when these brought me far away from them. I really appreciated it.

Dedicated to my fiancé.

Contents