Anna Arsenyeva

Level-dependent Optimization Methods for Metal and Composite Wingbox Structures

Fachgebiet für Computational Mechanics
Prof. Dr.-Ing. Fabian Duddeck
Technische Universität München

DEPARTMENT OF CIVIL, GEO AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Level-dependent Optimization Methods for Metal and Composite Wingbox Structures

Anna Arsenyeva

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck
2. Prof. Dr. Harvey M. Thompson

Die Dissertation wurde am 22.07.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt am 08.11.2019 angenommen.

I confirm that this is my own work and I have documented all sources and material used.

Munich, 2019 Anna Arsenyeva

Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 10

Anna Arsenyeva

Level-dependent Optimization Methods for Metal and Composite Wingbox Structures

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.: München, 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 978-3-8440-7235-8
ISSN 2193-2700

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

Acknowledgements

My doctoral research is conducted as a part of the Marie Curie Actions, Research Fellowship Programme, 7th Framework Programme (FP7), 'Aerospace Multidisciplinarity Enabling DEsign Optimisation' (AMEDEO) European project. Being an international project, it gave me opportunities to meet and exchange knowledge with a lot of interesting people, visit many research institutes, participate in valuable and very helpful trainings. I am very grateful to my supervisor Prof. Dr. Fabian Duddeck for giving me the opportunity to conduct my doctoral research at the chair of Computational Mechanics of the Technische Universität München, for his help, time, availability, interesting meetings and discussions. Valuable, precise advices and discussions with prof. Duddeck were extremely helpful for my work.

I would like to thank all AMEDEO fellows and supervisors for the amazing working environment and discussions we had. I would like to thank prof. Zafer Gürdal for his inspiring introduction into the steered-fiber composites and prof. Vassili Toropov for the discussions, advices, ideas and very helpful criticism. I would like also to thank Prof. Dr. Harvey Thomson for his helpful comments during the review process. I would like to thank the ALE company for the secondment within nice team, resulting into lots of new ideas. Also TU Delft for helpful courses and possibility to meet other PhD students and professors. Moreover, I would like to thank Juliet Jopson for her help and making the administration part much easier within the project.

I would also like to thank my colleagues at the chair of computational mechanics, Giulia Antinori, Stefan Erschen, Lailong Song, Simon Mößner, Simon Hesse, Gesche Fender, Pablo Lozano, Duo Zeng, Koushyar Komeilizadeh, Mariusz Bujny, Erich Wehrle for nice time, discussions, sharing knowledge and comfortable working atmosphere.

Finally, there are people without whom I would not have reached this point. These are my parents who inspire and supported me from the first day of my life. I would like to thank my husband, Ilya for always being there for me during the good and the bad.

Thanks for supporting and encouraging me to do my best. Most of all, thanks for always believing in me, even when I did not believe in myself. I am so happy to have you. In the last I would like to thank my son, Dmitrij who inspires me every day.

The financial support for the European project Marie Curie Actions, Research Fellowship Programme, 7th Framework Programme (FP7), 'Aerospace Multidisciplinarity Enabling DEsign Optimisation' (AMEDEO) through EU grant reference 316394 is gratefully acknowledged, see also [6] and https://cordis.europa.eu/project/rcn/105135/factsheet/en.

Abstract

This work is focused on further development of optimization approaches for improving the design of civil aircraft wingbox structures. Technological progress in the area of advanced lightweight materials and manufacturing techniques enables today novel wingbox designs, which requires appropriate simulation and design exploration methods. Numerical optimization methods can be used to provide valuable information in various stages of the wingbox design, starting with preliminary general layout search up to detailed subcomponent performance improvement. Employment of optimization could not only provide better optimized designs, but allows also to achieve considerable time saving and reduce human-related errors thanks to the automation of simulation process chains. Several optimization approaches are proposed in this thesis, suitable for global structural optimization of the wingbox layout, shape optimization of wingbox subcomponents and optimal design of steered-fiber composite parts.

A parametric structural model of the wing with internal wingbox structure is developed within this work. The model allows significant changes of the internal components layout and adapts automatically to the given wing outer shape. Combined with structural static and buckling analysis together with simplified aerodynamic simulations, the model allows to use global search methods for preliminary layout of wingbox internal structure. Several optimization studies, presented within this thesis, illustrate how different parametrizations and optimization methods can be applied to efficiently solve various wingbox design tasks. Some attention is also paid to the wing box subcomponents optimization using submodeling. In particular, a special parametrization technique is introduced, which enables topology-like optimization of the planar ribs.

In addition, a novel method for parametrization and optimization of steered-fiber composite parts is proposed within this work. Fiber angle at each point of the design space is defined to be tangential to a passing-through iso-contour line of an artificial surface. Using a set of control points distributed over the design space, the shape of the artificial

surface can be varied, thus also varying the fiber paths. The method is able to accurately handle maximum curvature constraint for multi-layered fiber-steered composites, where the maximum curvature can differ among the layers. The capabilities of the method are illustrated using several test problems, which proved high parametrization flexibility and accurate constraints handling. It was shown, how, depending on the manufacturing constraints, the method is able to switch between different optimal fiber placement patterns, thanks to the global optimization. Finally, improved designs for the wingbox ribs are obtained with the proposed method.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt neue Methoden und Weiterentwicklungen für die Parametrisierung und Optimierung von Tragflügeln (mit Fokus auf der inneren Struktur, der sogenannten Wingbox) von zivilen Flugzeugen vor. Technologische Fortschritte im Bereich von modernen Leichtbauwerkstoffen und Fertigungsverfahren ermöglichen heute neuartige Strukturkonzepte für die Wingbox. Entsprechend sind hier auch neue Entwicklungen von problemspezifischen Simulations- und Entwurfsmethoden gefordert. Numerische Optimierungsverfahren können während verschiedener Entwicklungsphasen, von vorläufiger Auslegung in der frühen Phase bis hin zum detaillierten Teilkomponentendesign, angewendet werden, um auf effiziente Art und Weise funktional angepasste Strukturen abzuleiten. Das führt nicht nur zu verbesserten Designs, sondern kann auch Entwicklungszeit reduzieren und menschliche Fehler vermeiden, dank der zugehörigen Automatisierung der Simulationskette. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierarchisch strukturierte Vorgehensweisen zur Optimierung vorgeschlagen, beginnend von einer gezielten Methodik für eine Identifikation des optimalen Wingbox-Designs als Gesamtstruktur, über die eingebettete Formoptimierung von Teilkomponenten, bis schließlich hin zu einem neuen Ansatz für die Auslegung von Teilstrukturen auf Basis von Faserverbundwerkstoffen (FVW) mit kontrollierter Fasersteuerung.

Für die Auslegung bzw. Optimierung auf oberster Ebene wurde ein parametrisches Modell der Wingbox-Struktur im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt, das signifikante globale Änderungen der Wingbox-Geometrie erlaubt. Gekoppelt hierzu wurde eine weitere Parametrisierung zur internen Komponentenauslegung etabliert. Das parametrische Modell passt sich hier gleichzeitig und automatisch an eine vorgegebene aerodynamische Außenform des Flügels an. Hierdurch wird eine globale Optimierung des Wingbox-Designs bezüglich einer strukturmechanischen und einer vereinfachten aerodynamischen Analyse ermöglicht. Anhand von exemplarischen Optimierungen wird das entwickelte Modell validiert und die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Parametrisierungs- und Optimierungsmethoden

mittels diverser Wingbox-Designaufgaben illustriert. Hierbei wird auch eine spezielle Parametrisierung für Wingbox-Rippen vorgeschlagen, die eine kombinierte Form- und Topologieoptimierung planarer Rippen ermöglicht.

Auf der unteren Hierarchieebene wird eine neuartige Methode zur Parametrisierung und Designoptimierung von FVW-Komponenten mit gesteuerten Fasern vorgestellt. Eine effiziente Parametrisierung der Faserrichtungen in jedem Punkt des Designraums gelingt hier durch die Repräsentation über die Isolinien einer künstlichen Fläche. Diese wird über den 2D Designraum mithilfe von mehreren Kontrollpunkten definiert. Deren Höhe über der Fläche wird dann in der Optimierung variiert, was eine sehr effiziente Methodik darstellt. Die entwickelte Methode kann hierbei Fertigungsnebenbedingungen für maximal erlaubte Faserkrümmungen präzise berücksichtigen, selbst im Fall von Mehrschichtlaminaten. Die Leistungsfähigkeit der Methode wird wieder mit Hilfe einiger Validierungsfälle illustriert; die hohe Flexibilität der Parametrisierung und die präzise Krümmungsbehandlung können dadurch nachgewiesen werden. Abhängig von der maximal erlaubten Krümmung werden so ganz unterschiedliche optimale Faser-Steuerungsmuster identifiziert. Die neue Methodik kann somit verbesserte Designs für FVW-Wingbox-Rippen erzeugen, bei denen die Faserrichtungen variable der Belastung angepasst werden.

Contents

Acknowledgements **iii**

Abstract **v**

Zusammenfassung **vii**

Acronyms **xii**

List of Symbols **xiv**

I. Introduction **1**

1.1. Motivation 1

1.2. Aims of the current work 3

1.3. Thesis outline by chapters 5

II. Wing modeling **6**

2.1. Wing design 6

2.2. Existing parametric wing models 7

2.3. Wing geometry parametrization 10

2.3.1. Parametrization of external wing shapes 11

2.3.2. Parametrization of internal wingbox components 14

2.4. Finite element modeling 19

2.5. Multi-disciplinary analysis for wing designs 23

2.5.1. Wing loads 23

2.5.2. Aerodynamic analysis 24

2.5.3. Structural analysis 31

2.6. Summary 34

III. Wing optimization **35**

3.1. Introduction . . . 35

3.2. Basics of numerical optimization . . . 36

3.2.1. Definition and classification of optimization problems . . . 36

3.2.2. Numerical optimization methods . . . 40

3.2.3. Selected optimization methods . . . 47

3.2.4. Structural optimization . . . 54

3.3. Sensitivity analysis . . . 57

3.3.1. Sensitivity of wingbox parameters . . . 58

3.4. Wingbox Optimization . . . 61

3.4.1. Global wingbox optimization . . . 62

3.4.2. Wingbox subcomponent optimization . . . 74

3.5. Summary . . . 80

IV. Optimization of composite components **82**

4.1. Composites in civil aircraft . . . 82

4.2. Theory of Laminates . . . 83

4.2.1. Laminate materials . . . 84

4.2.2. Classical Laminates Theory . . . 85

4.3. Fiber-steered Laminates . . . 89

4.3.1. Why fiber-steering? . . . 90

4.3.2. Manufacturing of fiber-steered composites . . . 91

4.3.3. State of the art in designing fiber-steered composites . . . 92

4.4. Iso-contour method for fiber placement optimization . . . 100

4.4.1. Motivation . . . 100

4.4.2. Fiber paths parametrization using iso-contours . . . 101

4.4.3. Curvature constraint handling . . . 103

4.4.4. Fiber path optimization using the Iso-contour method . . . 105

4.5. Benchmarking of the Iso-contour method . . . 106

4.5.1. Two loads carrying plate . . . 107

4.5.2. Plate in bending . . . 111

4.5.3. Uni-axial buckling of a cylindrical plate with a hole . . . 117

4.6. Wingbox ribs optimization using Iso-contour method . . . 123

4.7. Summary of fiber-steering optimization results 129

V. Conclusions **131**

5.1. Main contributions 131

5.2. Critical review 132

5.3. Outlook for further research 134

A. Modeling laminates using ANSYS **135**

List of Figures **138**

List of Tables **143**

Bibliography **144**