



Duo Zeng

**Enhanced Hybrid Cellular Automata
Method for Crashworthiness Topology
Optimization of Thin-walled Structures**

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



**Enhanced Hybrid Cellular Automata
Method for Crashworthiness Topology
Optimization of Thin-walled Structures**

Duo Zeng

Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Fabian Duddeck

A thesis presented for the degree of
Doctor of Engineering (Doktor-Ingenieur, Dr.-Ing.)

Chair of Computational Mechanics

Technical University of Munich

Germany, October, 2018

Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 9

Duo Zeng

**Enhanced Hybrid Cellular Automata Method
for Crashworthiness Topology Optimization
of Thin-walled Structures**

Shaker Verlag
Düren 2019

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 2019

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 978-3-8440-6736-1

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

Erweiterte Hybride-Zelluläre-Automaten-Methoden für die Crashoptimierung von Topologien dünnwandiger Strukturen

Abstrakt

Die Optimierung von Strukturen ist von großer Bedeutung für die Aufprallsicherheit von Kraftfahrzeugen, da die Leichtbauweise zu Energieeinsparungen und Emissionsminderungen bei gleichzeitiger Gewährleistung des Sicherheitsniveaus führt. Jedes dieser Optimierungsprobleme ist durch eigene Charakteristika gekennzeichnet. Bei der Optimierung der Aufprallsicherheit resultieren die Schwierigkeiten aus dem hohen Rechenaufwand für die nichtlinearen Simulationen, der fehlenden Verfügbarkeit oder Zuverlässigkeit der Gradienten und der hohen Anzahl von Entwurfsvariablen. Daher ist es schwierig, herkömmliche Gradienten-basierte Optimierungen oder evolutionäre Algorithmen unmittelbar anzuwenden. Selbst Ersatzmodellierungsansätze stoßen an ihre Grenzen, hauptsächlich aufgrund der Diskontinuitäten der Strukturantworten oder der begrenzten Anzahl von Entwurfsvariablen. Hier sind Hybrid Cellular Automata (HCA) aufgrund ihrer verlaufsreichen Designaktualisierung, der schnellen Entwicklung der Struktur und der Fähigkeit, eine große Anzahl von Entwurfsvariablen ohne einen signifikanten Anstieg des Berechnungsaufwands einzubeziehen, eine attraktive Alternative. Daher stellt diese Arbeit eine verbesserte HCA-Methode für die Optimierung der Aufprallsicherheit vor, bei der im Gegensatz zu den meisten existierenden Ansätzen, die jedes finite Element als Zelle betrachten, jeweils ein dünnwandiges Strukturelement eine Einzelzelle darstellt. Zusätzlich zu den algorithmischen Entwicklungen, die Konvergenz und Effizienz verbessern, werden Anpassungen zur Analyse der Auswirkungen von realistischeren Materialmodellen (Plastizität und Versagen) umgesetzt und erste Schritte zu einer Optimierung der Aufprall-Topologie für generative Fertigungsstrukturen aufgezeigt.

Enhanced Hybrid Cellular Automata Method for Crashworthiness Topology Optimization of Thin-walled Structures

Abstract

The optimization of structures is of great importance for automotive crashworthiness because lightweight design leads to energy savings and reduction of emissions together with assured safety levels. Each of these optimization problems has its own characteristics; for crashworthiness optimization, the difficulties lie in high computational costs of the nonlinear simulations, the lack of availability or reliability of the response gradients, and the large number of design variables. Hence, it is difficult to use directly traditional gradient-based optimization or evolutionary algorithms. Even surrogate modeling approaches have their limitations mainly because of non-smoothness of the responses or the restricted number of design variables. Here, Hybrid Cellular Automata (HCA) present an attractive alternative due to their gradient-free design update, fast development of the structure, and ability to handle a large number of design variables without significant increase in numerical effort. Therefore, this thesis proposes an improved HCA for crash optimization regarding each thin wall as a single cell in contrast to most of the existing approaches where each finite element is considered as cell. Besides algorithmic developments improving convergence and efficiency, adaptations are realized to analyze the influence of more realistic material models (plasticity and failure) and first steps towards crash topology optimization for additive manufacturing structures are shown.

Contents

1	Introduction	9
2	Literature review on topology crashworthiness optimization	11
2.1	Crashworthiness optimization	12
2.2	Crashworthiness topology optimization	13
2.3	Hybrid cellular automata	19
2.4	Data flow of hybrid cellular automata	22
2.4.1	HCA without mass or other constraints	22
2.4.2	HCA with target mass fraction	24
2.4.3	HCA with target field variable	25
2.4.4	HCA with one extra constraint	26
2.5	Thin-walled structures	27
2.6	Material model selection	28
2.7	Additive manufacturing	29
2.8	Aims and objectives	32
3	Hybrid cellular automata for thin-walled structures	34
3.1	Optimization statement for HCATWS	35
3.2	Field variables	36
3.3	Outer loop	38
3.4	Inner loop	40
3.5	Mass correction	42
3.6	Discussion of the operators	42
3.6.1	Alternative ideas for the outer loop	42
3.6.2	Necessity of mass correction	44
3.7	Summary	44
4	Validation of the new HCA approach	46
4.1	Correctness validation and efficiency comparison	46
4.2	Efficiency of strict inner loop convergence	52
4.2.1	Static torsion load case	52
4.2.2	3P bending crash case 1	58
4.3	Efficiency of sequential bi-section search within limited length	66
4.3.1	3P bending crash case 2	67
4.3.2	3P bending crash case 3	71
4.4	Summary	76
6	Enhanced Hybrid Cellular Automata Method for Crashworthiness Topology Optimization of Thin-walled Structures	

5	Influence of material model selection	77
5.1	CrachFEM-algorithm	78
5.2	Non-symmetric tension-compression behavior	79
5.2.1	Case A1	81
5.2.2	Case A2	85
5.3	Strain rate dependency	89
5.3.1	Case B1	90
5.3.2	Case B2	91
5.4	Failure	94
5.4.1	Case C	96
5.5	Summary	100
6	HCA optimization considering additive manufacturing constraints	101
6.1	Optimization constraints for additive manufacturing	101
6.2	Implementation of AM constraints in HCATWS	103
6.3	3-point bending static case	105
6.4	Edge-loaded cantilever	109
6.5	Crash load case	112
6.6	Summary and discussion	115
7	Discussion of the developed methods	117
7.1	Multi-criteria case	117
7.2	Matching update directions	118
7.3	Non-matching update directions	121
7.4	Summary	122
8	Conclusions and future work	125
8.1	Main contributions	125
8.1.1	Development of the algorithm	125
8.1.2	Implementation	126
8.1.3	Crashworthiness topology optimization via HCATWS	126
8.1.4	Static topology optimization via HCATWS	127
8.1.5	Influence of the material model selection on the optimized topology	127
8.1.6	Bridging the gap between HCATWS and additive manufacturing	127
8.2	Recommendations for future research	127
8.2.1	Improving flexibility of HCATWS by taking inspiration from other heuristic optimization algorithms	128
8.2.2	Combining level-set methods with HCATWS	128
8.2.3	Topology optimization for composite structures via HCATWS	128
8.2.4	Further application to more complicated structures	129
8.3	Concluding Remarks	129

Reference 137