学校编码：10384　　分类号＿＿＿密级＿＿＿
学　　号：19920081152942　　UDC＿＿＿

厦门大学

硕　士　学　位　论　文

子结构拓扑优化和虚拟样机技术研究及其在装载机结构中的应用

Study on Substructure Topology Optimization and Virtual Prototype Technology and Their Application for Wheel Loader Structure

韩明

指导教师姓名：　吴晓明　副教授
专　业　名　称：　机械设计及理论
论文提交日期：　2011　年　5　月
论文答辩时间：　2011　年　6　月
学位授予日期：　2011　年　　月

答辩委员会主席：＿＿＿＿
评　　阅　　人：＿＿＿＿

2011　年　6　月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（　　）课题（组）的研究成果，获得（　　）课题（组）经费或实验室的资助，在（　　）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：韩明

2011 年 6 月 10 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（　　）1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于　　年　　月　　日解密，解密后适用上述授权。

（　　）2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：　韩明

2011年6月10日

摘 要

大型装备的优化问题是近几十年来学术和工程界研究的热点，根据优化目标的不同，发展出众多优化理论和计算方法。

以结构静力学和动力学为基础，有限元方法为工具的结构优化，特别是结构拓扑优化是近年来结构优化领域中的前沿课题，在计算方法上，子结构理论成为解决大规模和复杂结构有限元计算的有效手段。

结合结构动力学和机构运动学的虚拟样机技术是代替物理样机对产品进行创新设计优化的数字化设计方法，用以缩短产品开发周期、降低成本、改进质量。

装载机是我国工程机械领域生产规模最大的产品。本文结合相关课题，以轮式装载机为研究对象，对装载机机罩进行了基于子结构的有限元分析和拓扑优化；对装载机工作装置进行了运动特性研究和虚拟优化设计。主要内容有：

（1）结合装载机机罩结构轻量化课题，研究了结构优化设计的原理和方法及连续体拓扑优化方法，研究了静态子结构方法基本原理及具体应用。

（2）建立了机罩有限元模型，对其进行了静力和模态分析。针对机罩存在质量大，有开裂现象等问题，以体积和频率为约束，以机罩各工况载荷下结构刚度最大作为目标函数，依据 SIMP 理论，采用带权重的折衷规划法，运用 OptiStruct 对机罩进行了多目标拓扑优化设计，得到机罩的最优结构布局。并依据优化结果，对机罩进行重新设计，给出了优化机罩性能前提下的轻量化结构具体方案。

（3）结合装载机工作装置优化设计课题，研究了虚拟样机在工作装置优化设计中的应用。运用 ADAMS 建立了工作装置的虚拟样机模型，对其进行了运动学仿真，得出工作装置在运动过程中的传动角和传力比变化、最大卸载高度和最小卸载距离、举升平稳性和自动平放性以及收斗角和卸载角等性能参数。根据分析结果，建立了以工作装置举升平稳性为目标函数，其他性能指标为约束函数，各铰点坐标和液压缸行程为设计变量的数学模型，对各变量进行了灵敏度分析，选取了灵敏度大的设计变量进行了虚拟优化设计，并给出了优化结果。

关键词：装载机机罩 子结构 拓扑优化 工作装置 虚拟样机

Abstract

Optimization of the large equipment is the hotspot in academic and engineering fields in recent decades,according to the different optimization objectives,many optimization theories and algorithms has developed.

Based on the kinematics and dynamic,structure optimization,especially topology optimization by Finite Elment Analysis is the advanced report in structural optimize field in recent years, substructure theory has become an effective tool for the calculation algorithm to solve the finite element calculation for complex and repetitive structure.

Virtual Prototype technology is a digital design methods for product innovation design optimization which replace the physical prototype and based on the structural dynamics and agencies kinematics,its purpose is to short product development cycles, reduce costs and improve quality.

Loader has the largest production scale in the engineering machinery fileds in China.This paper used the wheel loader as study object, Finite Elment Analysis and topology optimization has been performed for the loader hood based on substructure theory; dynamic characteristics study and virtual optimum design for the working device has been performed .the mail content includes:

(1) With the structure lightweight of loader hood,we have researched the theory and method of optimum design and topology optimization of continuum structure;the basic principles and application of static substructure technology.

(2) A wheel loader hood finite element model of an enterprise has been established by HyperWorks,modal and static analysis has been performed,and then obtained the modal shape and stiffness parameters of the hood.Multi-objective topology optimization for the loader hood under multiple loading conditions is studied with the maximum stiffness as objective and the volume and frequency as constraints based on the HyperWorks/OptiStruct softwore,based on the solid isotropic material

with penalization (SIMP) theory and weighted compromise programming approach.Then the structure lightweight scheme of the loader hood was given.The results show that the improved design of the hood not only reduces the structural weight but also meets the dynamic and static characteristics requirements.

(3) With the optimum design of working device of wheel loader,the application of virtual prototype study has been performed on working device of wheel loader.Then,the virtual prototype model of working device was established and kinematics simulation was completed in ADAMS, and geted the performent parameter of working device such as translation feature in lifting, bucket angle at carrying position, delivering ratio,drive angle,unloading distance, unloading height, unloading angle and automatic reset,etal.Then the optimum design mathematical model is established, the translation feature in lifting as objective function and the rest performance parameters as constraints of optimization according to the performance parameters of the working process, hinge point coordinates and hydraulic cylinder route as variables. Kinematics sensitivity analysis and virtual optimum design was also performed in ADAMS and obtained the optimum results.

Key Word：laoder hood;substructure;topology optimization;working device;virtual prototype

目 录

第一章 绪论 1

1.1 结构优化设计发展及研究现状 1

1.2 子结构技术概况及研究现状 4

1.3 虚拟样机技术发展概况及其应用 6

1.3.1 虚拟样机技术概况及应用 6

1.3.2 装载机工作装置的研究现状 8

1.4 本文选题背景和研究意义 8

1.5 论文总体结构和本文研究内容 11

第二章 拓扑优化和子结构理论与应用 13

2.1 拓扑优化理论及其应用 13

2.1.1 连续体结构拓扑优化方法 13

2.1.2 拓扑优化方法在机罩中的具体应用 16

2.1.3 连续体结构拓扑优化数值不稳定现象及解决办法 19

2.1.4 装载机机罩的研究现状 19

2.2 子结构基本理论及其应用 22

2.2.1 子结构基本理论 22

2.2.2 数值算例 24

2.2.3 子结构方法在机罩中的具体应用 26

2.3 本章小结 30

第三章 装载机机罩动力学和静力学分析 31

3.1 装载机机罩有限元模型的建立 31

3.1.1 有限单元法简介 31

3.1.2 机罩模型简化 33

3.1.3 焊点模拟 33

3.1.4 单元选取和网格划分 34

3.2 发动机及机罩相关参数 35

3.3 装载机机罩模态分析 36
3.3.1 模态分析基本理论 36
3.3.2 模态求解 37
3.3.3 两代机罩模态结果分析及评价 39
3.4 机罩结构静力学分析 40
3.5 本章小结 41
第四章 装载机机罩拓扑优化设计和结构改进 42
4.1 机罩结构优化目标的确定 42
4.2 机罩拓扑优化数学模型 42
4.2.1 单目标拓扑优化模型 42
4.2.2 多目标拓扑优化模型 43
4.3 装载机机罩多刚度拓扑优化 44
4.4 结构改进 46
4.4.1 改进设计思路 46
4.4.2 改进设计依据 47
4.4.3 改进设计方案 50
4.5 改进结构的重新分析与各方案的比较 51
4.5.1 结构重新分析 51
4.5.2 各方案比较 54
4.6 本章小结 55
第五章 装载机工作装置虚拟样机模型建立和运动学仿真 56
5.1 工作装置工作原理与结构形式 56
5.2 工作装置主要参数和设计要求 57
5.2.1 主要尺寸和性能参数 57
5.2.2 工作装置设计要求 59
5.3 工作装置虚拟样机模型建立 59
5.3.1 反转六杆机构分析模型 59
5.3.2 工作装置典型工况分析 60
5.3.3 建立虚拟样机模型 61
5.3.4 建立液压缸驱动函数 62
5.4 装载机工作装置运动学仿真 64

5.5 本章小结 72
第六章 装载机工作装置虚拟优化设计 73
6.1 工作装置优化设计数学模型的建立 73
6.1.1 确定目标函数 73
6.1.2 确定设计变量 73
6.1.3 确定约束函数 74
6.2 装载机工作装置综合优化设计 76
6.2.1 多体系统运动学灵敏度分析基本理论 76
6.2.2 工作装置灵敏度分析和优化方案选择 77
6.2.3 优化结果分析 79
6.3 本章小结 84
第七章 总结与展望 85
7.1 全文总结 85
7.2 本文的创新点 85
7.3 展望 86
参考文献 87
致谢 91
攻读学位期间发表的论文目录 92

CONTENT

Chapter 1 Introduction.....1

1.1 Development introduction of structure optimization 1

1.2 Development introduction of substructure technology 4

1.3 Development introduction and application of virtual prototype.....6

1.3.1 introduction and application of virtual prototype 6

1.3.2 Research Status of wheel loader working device.....8

1.4 Topic background and significant 8

1.5 Overall structure and research content 11

Chapter 2 Theory and application of topology optimization and substructure..... 13

2.1 Theory and application of topology optimization 13

2.1.1 Methods about topology optimization of continuum structure.....13

2.1.2 Application about topology optimization of continuum structure 16

2.1.3 Unstable phenomenon and solution of topology optimization 19

2.1.4 Research Status of wheel loader hood 19

2.2 Basic theory and application of substructure.....22

2.2.1 Basic theory of substructure.....22

2.2.2 Example 24

2.2.3 Application about substructure on loader hood 26

2.3 Conclusion 30

Chapter 3 Dynamic and static analysis of loader hood..... 31

3.1 Finite Element Analysis model of loader hood 31

3.1.1 Introduction of Finite Element Analysis 31

3.1.2 Simplification of hood model 33

3.1.3 Simulation of joint 33

3.1.4 Unit selection and meshing.....34

3.2 Parameters of engine and loader hood.....35
3.3 Modal analysis of loader hood 36
3.3.1 Theory of modal analysis.....36
3.3.2 modal solution.....37
3.3.3 Analysis and evaluation about modal result of two generations hood.....39
3.4 Static analysis of hood structure.....40
3.5 Conclusion 41

Chapter 4 Topology optimization design and structure improvement of loader hood 42

4.1 Optimization objective of loader hood.....42
4.2 Mathematical model about topology optimization of loader hood.....42
4.2.1 Single-objective topology optimization model.....42
4.2.2 Multi-objective topology optimization model 43
4.3 Topology optimization of loader hood.....44
4.4 Structure improvement.....46
4.4.1 Methods of structure improvement.....46
4.4.2 Basis of structure improvement 47
4.4.3 scheme of structure improvement.....50
4.5 New analysis and scheme comparison of new structure.....51
4.2.1 New analysis of new structure 51
4.2.2 Scheme comparison of new structure 54
4.6 Conclusion 55

Chapter 5 Virtual prototype model and kinematics simulation of wheel loader working device 56

5.1 Basic principle and structure performance of working device.....56
5.2 Main perameters and design requirements of working device.....57
5.2.1 Main measurement and performance requirement 57
5.2.2 Design requirements of working device 59
5.3 Virtual prototype model of working device.....59
5.3.1 Analysis model of reverse six-bar linkage.....59

5.3.2 Typical conditions analysis of working device 60
5.3.3 virtual prototype model 61
5.3.4 Drive function of hydraulic cylinder 62
5.4 Kinematics simulation of working device 64
5.5 Conclusion 72

Chapter 6 Comprehensive optimum design and dynamic simulation of wheel loader working device 73

6.1 Mathematical model about optimum design of working device 73
6.1.1 Objective function 73
6.1.2 Design variables 73
6.1.3 Constraints function 74
6.2 Comprehensive optimum design of wheel loader working device 76
6.2.1 Basic theory of sensitivity analysis about kinematics 76
6.2.2 sensitivity analysis of working device and scheme selection 77
6.2.3 Analysis of optimization results 79
6.3 Conclusion 84

Chapter 7 Conclusion and prospect 85

7. 1 conclusion 85
7.2 Innovation of this paper 85
7.3 Prospect 86

Referance 87

Acknowledgements 91

Achivement 92