博士学位论文

基于CAD/CAE集成技术的开放式参数 化结构形状优化设计平台

An Open Platform of Parameterized Shape Optimization based-on CAD/CAE Integration Technique

作	者	姓	名 :		戴	石石	
学	科、	专	业:		工程	力学	
学		_	号:		1000	1012	
指	导	教	师:	郭英乔	张洪武	关振群	顾元宪
完	成	日	期:		2006	F12 月	

法国兰斯大学

Université de Reims

摘 要

作为计算机辅助工程(Computer Aided Engineering,简称 CAE)技术的一个重要内容,结构优化设计技术经过几十年的发展,在核心算法和数值理论上均取得了丰硕的研究成果,而在工程实际中,结构优化技术的应用仍然存在相当大的差距。商业化的结构优化设计软件尚未达到一定的规模,结构优化设计技术在应用方面还存在一些问题,因而导致工程、设计人员对结构优化设计软件的认识和了解不足,这些都阻碍了结构优化设计技术在工程实际中的应用。

CAD 计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称 CAD)技术在现代工业技术 改造和高新技术发展中具有重要的地位和作用。将 CAE 与 CAD 紧密集成在一起,协同 工作,已经成为支持工程行业和制造企业信息化的重要技术之一,它将 CAE 技术更广 泛和深入地应用于工程实际,并能在提高工程/产品的设计质量、降低研究开发成本、缩 短开发周期等方面发挥重要作用,从而成为实现工程/产品创新的支撑技术。

本文的主要工作就是基于这一背景,将 CAE 的结构有限元分析、优化设计技术与 专业的 CAD 软件工具集成在一起,实现了基于 CAD/CAE 集成的参数化结构形状优化 设计平台 POSHAPE 的开发。从产品设计的角度来说,一方面借助于专业的 CAD 软件 推广结构优化设计技术在现代化工业生产中的应用,解决结构优化设计技术的理论研究 与实际应用差距较大的问题。对于多学科结构优化设计来说,不同学科的分析计算对结 构的几何模型和有限元模型都有不同的要求,通过系统集成,借助于专业的集成建模工 具将能够满足多学科结构优化设计的需求。另一方面,利用结构有限元分析与优化设计 技术为工程和设计人员提供一个实用的、设计分析集成的工具,帮助他们在产品的概念 设计阶段更好、更全面地了解产品的结构性能,从而提高设效率。从结构优化的角度来 说,参数化造型技术能够提供更直观、更便捷的几何模型形状描述和修改手段。

目前大部分现有 CAD/CAE 集成研究主要是各系统在外部相互集成,彼此通过系统 外的数据传递进行通讯。这类集成方法较容易实现,但是效率较低。本文工作的主要内 容是通过集成的手段,将结构优化和分析功能嵌入到 CAD 系统中,结合 CAD 中的参数 化实体造型功能,开发基于参数化实体造型技术的开放式结构参数化形状优化设计平台 PHSHAPE。经过不断的完善,POSHAPE 作为一个通用的结构形状优化设计平台已经可 以实现三维实体结构、空间壳体结构以及材料设计等问题的优化设计。在整个系统中, 集成是程序的核心内容,主要体现在以下几个方面:1)将处理不同物理问题的分析功能 与结构形状优化设计集成到一起,协助更深入地了解结构形状与结构各物理响应之间的 内在关系;2)通过基于边界描述树 (Boundary Representation Tree,简称为 B-Rep 树)的 实体几何模型描述方法,将有限元分析模型与几何模型集成在一起,实现了模型之间的 一体化,借助于 CAD 系统的参数化实体造型技术,提出参数化的有限元建模方法;3) 基于 B-Rep 树和参数化技术,提出了壳体结构的曲面几何模型和三维实体几何模型的集成,籍此实现了壳体结构有限元模型的参数化建模方法;4)将参数化结构形状优化设计方法用于复合材料设计,提出了一种基于单胞形状优化设计的复合材料设计方法。。

本文各章节内容安排如下:

第一章,围绕结构优化设计,首先讲述结构优化研究的主要内容和它们之间的相互 关系,其中着重介绍结构形状优化设计的特点和发展历史。其次,分析结构形状优化设 计存在的问题和导致问题的主要原因,本文的研究工作正是基于这些问题,开发了参数 化结构形状优化设计平台 POSHAPE。接下来,介绍复合材料设计的研究现状。参数化 技术是实现结构参数化优化设计的关键,在这里将对该技术进行简要介绍。最后,对本 文工作的研究意义和框架进行概述。

第二章,本文方法是基于 CAD/CAE 集成开发实现的,在第二部分将主要对 CAD/CAE 集成技术的研究现状进行详细论述。参数化特征造型技术是实现参数化有限 元方法的基本条件,首先对其进行介绍。CAD 与 CAE 系统之间的数据传递方式和集成 框架分别是实现 CAD/CAE 集成的关键内容,其次将根据现有的不同技术手段对它们分 别进行讨论和对比。最后介绍 CAD/CAE 集成应用到的结构优化优化的关键技术,包括 网格剖分算法、灵敏度分析、优化算法。

第三章,主要介绍参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE,由开发平台、开发环 境介绍平台的集成环境;由几何造型数据结构和集成平台的数据库,介绍参数化有限元 模型与几何模型集成,参数化曲面模型与实体模型集成的实现方法。此外,还给出了结 构参数化形状优化设计平台 POSHAPE 的系统集成框架以及在此平台上建立的通用优化 模型。对于该系统中存在的问题也将一并说明。

第四章,POSHAPE 可以对工程中常见的、复杂三维机械零件进行参数化结构形状优化设计。本章介绍三维实体结构参数化形状优化设计的实现方法。通过若干工程实例验证本文方法的实效。

第五章,对于空间壳体结构的参数化和形状优化设计,传统的方法大都是基于自由 曲面建模技术。对比传统方法,详细介绍本文提出的基于参数化实体造型技术的参数化 曲面建模方法,以及此类参数化形状优化设计的实现方法。通过若干算例,验证本文方 法的可行性。

第六章,除了实体和壳体结构形状优化设计,POSHAPE还可以用于复合材料设计。 对于周期性复合材料单胞结构,通过参数化形状优化设计手段可以获取具有指定材料属 性的复合材料。这里将介绍通过形状优化方法实现指定材料属性的复合材料设计过程。 针对两相的蜂窝型骨架单胞结构和空心结构,给出了数值算例。

第七章,对前文工作进行总结和展望。作为通用的参数化结构形状优化设计平台, POSHAPE 不仅可以进行三维实体结构、壳体结构和复合材料单胞结构形状的优化设计, 系统还有良好的可扩展性。在这部分将对系统现有的功能进行总结,并对以后的发展方向和可行进行论述。

附录 A 中列出了参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE 的主要操作和命令。 本文得到了国家自然科学基金(10502013, A020216)的联合资助。

关键词: POSHAPE CAD/CAE 集成 参数化 形状优化 参数化曲面技术 材料设计

An Open Platform of Parameterized Shape Optimization based-on CAD/CAE Integration Technique

Abstract

As an application of Computer Aided Engineering (CAE), structure shape design optimization aims to find the optimum shape of a domain which minimizes or maximizes the given criterions. The problem has been well studied with its theory and algorithms for decades; however its application into manufacturing and engineering industry is still far from what have been achieved in research works. Commercial software for structural shape optimization is still under development.

Some major barriers are not well overcome which may limit using of structure shape design optimization into engineering applications. They are: 1) lack of general and well-suited structure shape description method, which is extremely important for the design variables definition; 2) for the sake of computation of design sensitivity, modification of structure shape is greatly constrained because in the analytical sensitivity analysis, the variance magnitude of design variables are limited; 3) the optimized results are not always applicable and may not be accepted by designers or engineers because the results may often include some unreasonable shape modifications.

Computer Aided Design (CAD) has played important role in modern manufacture industry and high-tech development. It provides powerful computer-based tools which assist engineers, architects and other design professionals in their design activities. Designers almost can hardly set up 3D models and 2D drawings of physical components without CAD tools. CAD tools are widely used throughout the engineering process from conceptual design and layout of products, through strength and dynamic analysis of assemblies to definition of manufacturing methods of components.

Integrated CAE with CAD will popularize the application of CAE into application and CAD/CAE concurrent engineering has gained more and more attentions within development of Manufacturing Industry and Information Technology. CAE techniques such as structural design optimization can help to improve product quality, decrease developing expense and shorten developing period.

The research in the dissertation is to benefit structural shape optimization from CAD parametric geometry modeling by means of integration. From the viewpoint of product design, structural shape optimization can be more applicable into modern Manufacturing and Engineering Industry through integrated within CAD tools. At the same time, structural shape

optimization can help engineer/designer be aware of the structure performance according to its shape and make better design. From the viewpoint of structure shape optimization, parametric geometry modeling techniques in CAD provide parameterized shape description and control method for structural shape optimization which is more effective and intuitional. For multi-disciplinary structural design optimization, parametric geometry modeling within professional CAD tool may be the most fitful method which can feed different requests on modeling from different disciplinary.

The main content in the research is developing an open platform of parameterized shape optimization based-on CAD/CAE integration technique. Through integration, structural analysis and design optimization are seamless combined with parametric geometry modeling and embed into the CAD system. POSHAPE can provide parameterized shape optimization method for 3D solid structure, spatial shell structure and cell structure of composite material. To realize such a general method, integration is the most essential part. In this platform, integration is realized includes: 1) Integrating structure analysis tool of different disciplinary with structure shape optimization. Structure response from different disciplinary will be studied according structure shape. 2) Integrating finite element modeling with parametric geometry modeling. Finite element model is parameterized to be dynamic regenerated during optimization design steps. 3) Parametric solid modeling is extended to realize parameterized surface modeling under integration between surface model definition and solid model. Parameterized finite element modeling of shell structure is also achieved which is similar to that of solid structure.

The research work will be introduced with the following chapters.

In chapter 1, the background, classification and history of structure design optimization is introduced. The problems arise in application of structural shape optimization into engineering is discussed. Parametric design technique is described which is the basic theory of the present research. The research works on composite material design is also given in this chapter. The main work within this research is outlined at last.

In chapter 2, present research on CAD/CAE integration will be summarized firstly. The reason to integrating CAE into CAD system will be given subsequently. Parametric feature modeling is precondition to the integration and will be outlined nextly. Then available data transfer methods and architectures of CAD/CAE integration system are listed and compared. Lastly, some of important techniques used for structure shape optimization are listed.

In chapter 3, development of the platform is described, which includes developing environment and realization of parametric finite element modeling. Some problems exits in the platform are also given. In chapter 4, implementation of parameterized shape optimization for 3D solid structure is illustrated. Numerical examples came from engineering will testify the effectiveness of the present method.

In chapter 5, parameterized surface modeling and parameterized finite element modeling for shell structure based on parametric solid model is introduced. Them implementation of parameterized shape optimization for spatial shell structure is illustrated. Numerical examples are given to show the effectiveness of the present method.

In chapter 6, parameterized shape optimization method is extended to composite material design. For composite material with periodical cell structure, the material property can be improved by means optimization the shape of cell structure. Homogenization method for computing the composite material property is present. Implementation of parameterized shape optimization for cell structure is outlined.

In the last chapter, the main contributions of the dissertation are summarized and the further works are suggested.

In appendix A, functionality and system command of POSHAPE are listed.

The research work of the dissertation is supported by National Science Foundation of China (Grant No. 10502013, A020216).

Key Words: Integration of CAD/CAE, Parameterized Design, Shape Optimization, Parameterized Surface Modeling, Material Design

日 录

摘 要	I			
Abstract	IV			
目 录	VII			
1 绪论				
1.1 引言				
1.2 结构优化设计				
1.2.1 结构优化分类和发展	11			
1.2.2 结构形状优化设计	14			
1.3 参数化设计				
1.4 复合材料设计				
1.5 研究意义				
1.6 研究框架				
1.7 基金资助				
2 CAD/CAE 集成技术研究和结构形状优化设计				
2.1 CAD 几何造型				
2.1.1 特征造型技术(Feature-based Modeling)				
2.1.2 参数化造型设计(Parametric Modeling Design)				
2.2 CAD/CAE 集成平台框架				
2.2.1 CAD 与 CAE 系统之间的数据传递手段				
2.2.2 CAD 与 CAE 系统之间的集成方式				
2.3 结构形状优化设计中的关键技术				
2.3.1 网格剖分算法				
2.3.2 优化算法				
2.3.3 灵敏度分析				
2.4 商业和非商业结构形状优化设计软件				
3 基于参数化实体造型技术的参数化形状优化设计平台 POSHAPE				
3.1 引言				
3.1.1 系统开发平台				
3.1.2 系统开发环境				
3.2 基于几何造型特征信息的参数化有限元建模技术				
3.2.1 几何造型数据结构				

		3.2.2 有限元与几何模型集成的数据库	
		3.2.3 参数化有限元建模实现	
	3.3	POSHAPE 的集成平台框架	
		3.3.1 POSHAPE 的系统开发	
		3.3.2 POSHAPE 的系统集成模块	73
	3.4	参数化结构形状优化设计	74
		3.4.1 优化设计流程	75
		3.4.2 优化模型	
		3.4.3 POSHAPE 的基本操作流程	77
	3.6	小结	
4	三维实	云体参数化结构形状优化设计	
	4.1	引言	
	4.2	三维实体参数化结构形状优化设计系统框架	
	4.3	工程实例	
		4.3.1 机床部件的参数化形状优化设计	
		4.3.2 掘进机械传动的主臂架的参数化形状优化设计	
	4.4	存在的问题	
	4.5	小结	
5	空间壳	至体结构参数化形状优化设计	
	5.1	引言	
	5.2	参数化曲面建模方法	
		5.2.1 自由曲面建模技术	
		5.2.2 基于参数化实体的参数化曲面建模方法	
		5.2.3 参数化壳体有限元建模方法	
	5.3	空间壳体结构参数化形状优化设计方法	
	5.4	算例	
		5.4.1 压力容器的参数化形状优化设计	
		5.4.2 飞行器外壳的参数化形状优化设计	
		5.4.3 汽车的悬挂控制臂的参数化形状优化设计	
	5.5	小结	
6	材料单	⁹ 胞的参数化形状优化设计	
	6.1	引言	

An Open Platform of Parameterized Shape Optimization based-on CAD/CAE Integration	l echnique			
62 研究音义	115			
6.2 材料性质均匀化计算方法	117			
6.21 有个材料 通机 党 教 迟 量 计 質 均 匀 秒 方 注				
6.2.1 复日仍将并住市奴派重付弃场刁亿万亿				
0.2.2 夏日材料燃件性分析的均匀化力法				
6.2.3 复合材料热传导性能分析的均匀化方法				
6.3 材料单胞的参数化形状设计方法				
6.3.1 材料单胞的参数化建模				
6.3.2 材料单胞的参数化形状优化设计				
6.4 算例				
6.4.1 两相蜂窝型骨架复合材料参数化分析				
6.4.2 两相蜂窝型骨架复合材料单胞结构的形状优化设计				
6.4.3 空心材料单胞结构的参数化形状优化设计				
6.5 小结				
7 总结与展望				
7.1 本文工作总结				
7.2 本文工作展望				
参考文献				
附录 A POSHAPE 系统功能				
攻读博士学位期间发表学术论文情况				
致 谢				

An Open Platform of Parameterized Shape Optimization based-on CAD/CAE Integration Technique

1 绪论

1.1 引言

结构优化设计是计算力学的一个分支,它致力于研究系统地和高效率地改进结构设 计的方法,以达到帮助工程设计人员设计出既经济又可靠的工程结构的目的。结构优化 根据研究方法不同分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化,他们之间既有区别又互相联系, 对于结构的不同设计阶段起着不同的作用。在本章第二节中首先概述结构优化的发展过 程,结构优化的研究内容,并对结构形状优化的研究进展进行综述。

复合材料具有良好的力学性能(如高比强度、比刚度、韧性、耐磨性和小热膨率) 和物理性能(导热、导电、隔音、耐腐蚀性等);而且具有良好的可设计性。在本章第 三节将对复合材料设计的研究进展进行介绍。

第四节和第五节将介绍本文工作的研究意义和研究框架。第六节将列出本文工作的 基金项目资助。

1.2 结构优化设计

在传统的结构设计中,人们根据以往积累的经验判断提出和改进设计方案,再通过 试验等辅助手段对设计方案进行分析,校核方案的安全性和可行性。这种传统设计方法 过于依赖设计人员的个人直观判断和经验积累,很难获取对设计方案的较大改进,甚至 有可能导致错误的结果。随着制造业的不断发展和科学技术水平的不断提高,所要设计 的结构越来越复杂,考虑的设计因素也越来越多,传统的设计方法往往很难应付。如果 引入设计最优化(Design Optimization)的理论、方法和软件成果,把设计人员的判断 决策与计算机程序依据某种最优化算法的自动寻找理论上最有设计的功能相结合,能够 帮助设计人员更快速地找到最佳设计。

一个结构的"优"和"劣",总是以某一指标来衡量的,这个指标就是结构优化设 计问题的目标函数[1]。为了使结构设计尽可能的优化,首先要确定结构是可设计的,也 就是结构可以用一定数目的、可变的设计参数来描述,通过调整设计参数可以改变结构 的性能指标。同时,对结构的修改和调整不是无限的,而是受到各种各样的限制,这些 对设计变量的限制统称为约束条件。总而言之,对结构的优化设计实际上是通过对结构 设计变量的调整,在满足约束条件的前提下,追求结构目标函数的最优化。这里设计变 量、约束函数和目标函数统称为结构优化设计的三要素。

对于结构优化问题来说,关键因素之一是设计变量的定义。设计变量是描述结构的 某一类特征的设计参数,优化通过对设计参数的调整以达到结构某一指标的最优化,因 此设计变量的选取对结构优化有着决定性的因素。根据设计变量的选取不同,结构优化 大致可分为**尺寸优化、形状优化**和**拓扑优化**。

1.2.1 结构优化分类和发展

结构优化设计是计算力学研究和应用的一个重要领域,最早的结构优化工作可以追 溯到 1904年,Michell使用解析方法研究在集中荷载作用下同时满足应力约束且重量最 轻的结构形式,最终得到了一个桁架结构。该方法被称为 Michell 准则,满足 Michell 准则的桁架则称之为 Michell 桁架[117]。结构优化设计的大规模研究开始于 60 年代初 [2],主要针对飞机机身、机翼一类由杆、膜和剪力板组成的结构的最小重量设计。设计 变量是单元截面尺寸,如杆的截面积、膜的厚度等,称为尺寸优化问题。尺寸优化的对 象主要是一维的桁架、刚架结构,二维的板壳结构或者它们的组合结构。因为对这类结 构尺寸参数的调整不会影响结构的有限元模型,在优化过程中也就不需要更新结构的网 格模型;并且结构刚度阵和结构响应与尺寸参数之间的显式关系,使得可以用解析的方 法计算灵敏度,因此尺寸优化问题成为结构优化设计问题中最简单的一种,它的研究已 经非常成熟,已经可以实现对复杂实际工程结构的尺寸优化设计。

到了 70 年代,因为针对杆、膜、剪力板组合结构的尺寸优化已经比较成熟,结构 优化的重点转向了连续体结构的形状优化设计[96]。连续体结构由膜、板、壳、块体、 轴对称单元等组成,连续体结构形状优化的设计变量是控制结构边界形状的几何形状参 数。对连续体结构的形状改变必然将对结构的有限元模型产生影响,在优化迭代过程中 必须对网格模型进行调整甚至重新剖分以满足结构边界形状的变化。众所周知,对给定 区域形状和边界条件的微分方程求解问题,只有对很少的特别简单的区域形状才能得到 解析解。因此形状优化的解析求解更加困难,一般情况下只能采用数值方法。到目前为 止,因为应用上的某些限制,并且结构形状优化设计中遇到的一系列问题一时不能很好 地解决。结构形状优化设计方法尚未在工程实际中得到广泛的应用。

无论是结构的尺寸优化还是形状优化,结构的外形轮廓也就是拓扑结构已经是确定 的,只能通过对结构尺寸和形状参数调整来改善结构的性能。90年代起结构拓扑优化的 研究在学术界得到广泛地重视,结构拓扑优化的理论和方法得到了迅速的发展[3]。拓扑 优化,也称为布局优化或广义形状优化,是研究连续体结构在给定的设计域上材料分布 或者开孔问题,通过优化设计给定结构最优的拓扑形式。在拓扑优化研究中,最常用的 方法是以较为规则的结构初始设计域为研究对象,在初始设计域上均布单元作为结构的 有限元模型,以单元的密度或者其他指标为设计变量,通过优化决定每个单元上材料分 到结构的最优拓扑结构。尽管结构的几何外形不断变化,对于结构拓扑优化问题来说, 也不需要在优化迭代过程中对结构的几何和有限元模型进行更新。

结构的尺寸优化、形状优化和拓扑优化三者之间既有明显的区别,又相互紧密联系。 首先它们之间的不同在于,在执行尺寸优化过程中,结构的形状和拓扑均保持不变,只 需要修改结构的特定尺寸参数,因此优化迭代过程中无需更新结构的几何模型或者拓扑 模型;在拓扑优化过程中,结构的形状和拓扑都在不断改变,但是拓扑优化在结构的初 始可行域进行优化设计,设计变量与初始网格的单元相关,在优化迭代过程中也不需要 更新结构的几何和网格模型,只在优化结束后重新提取结构的几何边界;对于形状优化 来说,待求的设计变量是所研究问题的控制微分方程的定义区域,是可动边界问题,也 就是说要在给定拓扑结构的几何模型上建立相应的有限元模型,当形状参数改变时,几 何模型和有限元模型都需要随着更新。如下图 1.1 所示,根据在优化迭代过程中是否需 要对几何模型和有限元模型进行更新,尺寸优化、拓扑优化与形状优化有着很大的区别。 尺寸优化、拓扑优化是在结构的初始有限元模型上进行的,在优化迭代过程中,设计变 量的修改不会对有限元模型产生影响,在迭代过程中不需要更新有限元模型,属于不动边 界问题。而形状优化则不同,优化问题是建立在结构的几何模型之上,在优化迭代过程 中同时要更新几何模型和有限元模型,问题的求解域不断变化,由此为优化迭代带来了 一定的计算困难。



Fig. 1.1 Classification of Structural Design Optimization

对于结构形状优化设计问题来说,一是需要选取适当的形状描述方法能保证形状优化的合理性,在不违反产品设计意图的前提下研究结构的形状与性能之间的关系;同时 这也是产品结构分析与产品设计的一个接口,形状描述方法的选取是否适当决定了这两 方面是否可以实现无缝集成。二是有限元模型的更新,在结构分析过程中前处理的工作 量所占比例最大,如何实现有限元模型在形状优化迭代过程中的动态更新也是一个需要 认真对待的问题。三是优化迭代过程中梯度信息的计算要求有限元模型的拓扑保持不 变,也就是说网格中单元和节点的数目和相互位置关系应固定,这对迭代过程中有限元 模型的反复更新带来了很大的限制。

尺寸/形状/拓扑优化研究的内容不同,但在产品设计过程中,它们不是相互矛盾而 是可以相互互补并集成使用,最大限度地挖掘结构的设计空间。首先对于初始的结构可 行设计域,使用拓扑优化可以获取结构的最优拓扑。通常情况下,拓扑优化设计结果并 不能直接用于产品设计,需要对结构边界进行提取和几何重描述。在此基础上,可以使 用形状优化设计方法对结构几何边界的进一步优化,以获取可以对产品设计有实用价值 的结构形状。对于由杆、膜和剪力板组成的结构还可以使用尺寸优化设计方法,优化结 构的截面几何参数。如下图 1.2 所示。



Fig. 1.2 Flow Chart of Integrated Structural Size/Shape/Topology Optimization [4]

尺寸/形状/拓扑结构一体化优化的流程为:

- → 定义结构的初始设计域,以其有限元模型为研究对象进行拓扑优化设计;
- → 对拓扑优化结果进行边界提取,一般常使用自由曲线、曲面技术重新对结构边 界进行描述,以曲线、曲面的几何控制参数或节点坐标为设计变量进行进一步 的形状优化设计;
- → 对于由杆、膜和剪力板组成的结构,基于形状优化设计结果,以单元的几何参数(如:单元厚度、截面面积等)为设计变量,最后进行尺寸优化设计,并得到最终的优化设计结果。

目前在结构优化设计设计领域有一些应用软件,如德国 Karlsruhe 大学开发的结构 尺寸、形状和拓扑集成优化设计工具 CAOSS(Computer Aided Optimization System

Sauter)[4],以及商业化的结构(优化)设计软件 Altair 公司的 HyperWorks Series®中 OptiStruct®[47]。这类软件在航空、航天领域和汽车工业都取得了非常好的应用成果。 对于航空、航天这类领域的结构设计问题来说,设计人员最关心的是结构的性能,在设 计过程中适合使用拓扑优化或尺寸/形状/拓扑集成优化等手段尽可能地提高结构的性 能。但是对于机械和工程制造业中的结构设计问题来说,除了结构的性能,还决定于造 价、制造技术和审美等要求。对于这一领域存在大量三维实体零部件结构优化设计问题, 结构形状优化是相对比较适合的结构设计手段。因为要满足装配等设计要求,结构的拓 扑结构往往已经限定,只能通过形状优化设计手段进一步改进结构性能;因为造价和可 制造性等条件限制,这类结构的边界大都由常见的二次曲线和曲面描述,可使用形状优 化设计手段在保证设计意图的前提下调整结构边界的几何控制参数,以改进结构的性 能;相比拓扑优化,结构的形状优化针对的是结构的几何形状,在优化迭代过程中施加 在结构外形上的制造要求和造价等条件可以通过适当的约束得到保证。

1.2.2 结构形状优化设计

虽然拓扑优化是三者中最高层次的结构优化设计方法,但是相比较而言,因为问题 求解域的不断改变,形状优化设计则是这三者中最复杂的结构优化设计方法。尽管 80 年代就兴起对形状优化设计方法的研究,可上述问题仍然没有很好地解决,因而至今形 状优化设计方法在工程中的应用也是不尽如人意。对于结构形状优化问题来说,有以下 几个关键问题有待解决:

1) 形状描述

几何模型的形状描述是既是创建结构模型的第一步也是形状优化的关键,选择什么 样的描述手段决定了形状优化的实用性和有效性。Haftka 等人[5]和 Ding[6]对结构形状 优化设计进行了综述,Samareh 等人[91-93]则对形状优化设计中用到的形状参数化描述 方法进行对比分析,在文中提到的若干方法中 Samareh 认为 CAD 几何造型和变形方法 是结构形状优化设计中最有效的形状描述和控制方法。Jamshid 等人提出,参数化形状 描述方法的选择对于结构形状优化来说非常重要,他们在文献[36]中对应用于计算流体 动力学形状优化设计和计算固体力学形状优化设计中应用的几何模型描述与网格生成 技术进行了综述。下面给出几种结构形状优化中常见的形状描述手段。

① 离散方法

最早的结构形状优化设计是在结构的有限元模型上实现的[96],边界网格的节点坐标很自然地用作设计变量,这种设计变量也称为离散的方法。这种方法以结构的有限元模型为研究对象,以结构边界上的节点为设计变量,非常直观、简便,但在使用过程中

存在着很多问题。一是设计变量的数目随着边界上节点的增加而增加,迭代过程中的计 算量也会随此激增;二是无法保证边界节点之间的相容性和边界的光滑,也就是说所得 到的优化结果可能是无法接受的,如图 1.3 右图所示;再就是边界节点位置在不断更新 的过程中,单元的形状也在不断改变,单元质量很难保证有限元分析的正确性。对于工 程设计人员来说,它不能很好地表达结构的装配需求和制造约束,且它的优化结果不够 直观,必须结构几何重构,如图 1.3 所示。



图 1.3 以边界节点为设计变量的形状优化初始设计与最优设计 Fig. 1.3 Initial design and optimum design of shape optimization with node design variables

Altair 公司 OptiStruct 软件使用的就是离散几何设计变量。用户首先要在有限元模型 上定义若干控制点和相应的域实现对结构的几何驱动,优化以控制点为设计变量调整域 的形状和空间位置。根据控制节点的优化结果通常要使用自由曲线、曲面模型对结构的 几何外形重构,通常会得到流线型的几何外形。这类方法在航空、航天结构的形状优化 设计中取得了很好的应用。不过在使用此类方法时,对控制点、域的定义和设计变量上 下限的设定需要非常的小心。控制点、域的定义决定了优化的最终效果,而设计变量上 下限的定义必须要尽可能避免网格变形对计算精度的影响甚至网格奇异。

② 边界的几何描述

使用离散的方法以节点坐标为设计变量的形状优化设计方法,得到的边界结果经常 是离散的如图 1.3 右图所示,不得不提取边界节点信息进行结构边界的几何重构,因此 人们以插值多项式对结构的边界进行描述和几何控制,或者直接引入自由曲线、曲面的 理论[94-95,106]。这种形状描述方式以直线、圆弧、样条曲线、二次参数曲线和二次曲 面、自由曲线和自由曲面来描述连续体结构边界,由直线顶点、圆弧圆心和半径、曲线 及曲面插值点或控制点位置等几何参数决定结构的形状,通过调整控制参数大小、节点 的位置和权重等多项式参数修改边界形状。Falk 等人[107]提出了层次建模概念,将结构 的边界面片划分为独立面片和主面片并建立它们之间的关联,只选取主面片的控制节点 作为设计变量,从而降低设计变量数目。相比离散方法,这种方法可以保证获得具有一 定规则性和光滑性的结构边界形状,也减少了设计变量的数目。但是对于复杂边界形状 来说,高阶插值多项式的数值不稳定性还可能导致边界曲线形状的振荡。采用自由曲线 和自由曲面技术,可避免高阶数值振荡问题。与离散方法类似这种方法较适用于对边界 光顺性要求较高的二维连续体结构和三维连续体结构的形状描述,因此多用于航天、航 空结构和汽车结构外形设计。

③ 计算机辅助设计 (CAD)

作为专业的几何建模工具,CAD 系统的建模功能已经成熟、稳定,广泛应用于工 程和制造业的各个环节并成为工程设计人员不可或缺的应用工具。专业的CAD 系统涵 盖了对线框、曲面和实体结构的建模功能,提供对任意复杂模型的精确几何描述和控制, 目前CAD 系统中的参数化实体建模功能更使得对模型的修改变得非常便利。大多数多 物理场问题的结构几何建模都可以使用专业的CAD 系统来完成[63]。CAD 能够将设计、 装配和制造等要求融入建模过程。这些信息不仅包含与建模过程直接相关的几何信息, 同时也可以包含产品在其生命周期中后续各项操作用到的相关信息,如加工信息、材料 信息等。因此使用CAD 的手段描述结构形状也将有助于实现CAD/CAE/CAM 技术的产 品集成开发一体化系统的实现。将CAD 建模功能用于结构优化设计是必然的发展趋势, 也是推广结构优化技术在工程中广泛应用的必要条件之一[97,104]。将CAD 系统用于结 构优化的建模的难点在于CAD 系统内有限元建模的实现和动态驱动。

④ 变形方法

Samareh[7]将计算机图形学中处理图像变形的算法软体动画(Soft Object Animation, 简称 SOA)用于对结构变形的参数化描述。这种方法使用例如 NURBS 的自由曲线、曲 线或曲线、曲面的控制多边形作为基线描述结构的外轮廓,以基线的控制点为设计变量。 它将结构看作是一个可以扭转、弯曲、压缩、扩展的橡皮,通过 NURBS 控制方程,实 现结构真实外轮廓与基线控制点之间的映射与逆映射。类似的还有自由变形方法(Free Form Deformation,简称 FFD),它是 SOA 方法的一个分支方法。对于一般的工程结构 来说,这类方法中设计变量的选取没有任何物理意义,为实际操作带来一定的困难,无 法广泛推广。这类方法特别适用于飞机、汽车等具有流线型外轮廓的结构,成功运用于 空气动力学的结构形状优化设计问题。Samareh[108]提出了针对空气动力学结构的多学 科形状优化设计的变形方法 MASSOUD,它使用图像处理中的 SOA 方法,对结构的形 状变形而不是形状进行参数化处理,并将结构的变形与空气动力学中研究结构的厚度、 (机翼的)弧高等几何设计参数联系在一起。

⑤ 设计单元方法



图 1.4 结构设计单元模型(左图:模型一;右图:模型二) Fig. 1.4 Structure design element model (Left: Model 1; Right: Model 2)

这个方法最早是由 Imam[8]提出的。在建模过程中首先将结构划分为若干个大的等 参三角形或四边形子域,也可称为映射单元,其中可动边界附近的子域被称作设计单元, 如图 1.4 所示左图中结构被划分为 4 个映射单元,靠近边界的 4 号映射单元即为设计单 元。每个映射单元在边界上都定义了主节点,如图 1.4 左图中圆形节点。设计单元的边 界上则的若干主节点被定义为控制节点,并用作形状优化的设计变量,如图 1.4 左图中 三角形点。在优化过程中,可由控制点和另外一些主节点定义边界移动的方向,通过优 化控制点在指定移动方向上移动的距离来完成结构的最优化设计。在每个迭代设计步 上,设计单元根据控制点的移动使用等参映射的方法更新单元内的网格。

设计单元方法在优化迭代过程中只对靠近可动边界的设计单元进行优化设计,仅以 设计单元的控制节点为设计变量从相当大程度上减少了形状优化设计变量数目;使用映 射剖分算法更新设计单元的网格,在保证网格的拓扑结构不变的同时也满足了灵敏度分 析解析方法的计算要求,因此设计单元方法在二维连续体结构和简单、单连通三维连续 体结构的形状优化设计中得到了相当广泛的应用[105]。Bennett[9]指出这种方法也存在 着一些缺点,包括:在优化设计之前对每一个结构都必须花费大量的时间用于设计单元 的划分,随着结构复杂性的不断增加,设计单元划分将更加困难,如图 1.4 右图所示; 当结构的拓扑发生改变时,比如内部的开孔数目增加的时候就必须对重新对结构划分设 计单元;网格映射算法并不适用于自由网格生成,它对剖分域有着严格的限制;对于三 维连续体结构来说,要将其划分成若干个单连通的映射单元存在相当的困难。

⑥ 以单元为设计变量

在形状优化设计过程中,对于二维模型和简单的三维模型,当结构的几何形状改变 较小时,保持网格模型拓扑不变的有限元模型更新较容易实现,而且灵敏度计算的解析 方法也能够得以保证,但是此类方法的通用性和实用性则很难进一步提高。因此人们引 入结构拓扑优化的思想,使用结构初始设计域的有限元模型为形状优化设计的研究对 象,以结构边界上的单元的描述为设计变量,通过边界上单元的增、减实现对结构几何 形状的描述。

这里有两类常见方法。一类是连续设计变量方法,即设计变量在[0,1]区间取值。如 Kim[10]等人借鉴拓扑优化的变密度方法,使用欧拉网格方法,即用固定的背景网格来 描述连续体结构的几何形状,每个网格都有一个专门唯一的形状密度变量。结构的几何 形状参数将转换成对应边界网格单元的形状密度指标,基于这种转换形状优化设计问题 就变成为参数设计问题。文中还给出了由形状设计速度场推导形状密度变量灵敏度计算 的详细过程,在迭代过程中只需要计算边界单元形状密度的灵敏度系数。使用这种方法 可以避免网格变形过程中产生的单元奇异问题。另一类是离散设计变量方法,设计变量 为二进制数,在0和1之间取值。如Li[11]等人将拓扑优化的进化方法(Evolutionary Structural Optimization, 简称为 ESO) 引入到形状优化设计中,将设计域上的背景网格 设为问题的初始设计,定义单元删除准则,在优化过程中将满足条件的单元不断删除, 直到无满足准则的单元可删除。与拓扑优化中的处理不同,该方法在用于形状优化设计 问题时,只有当前处于边界上的单元才会被删除,也就是当单元至少有一条边不与其他 单元相连时,该单元才可能被删除。变密度法与 ESO 方法因为采用了拓扑优化中的背 景网格描述结构构型,优点是在结构优化过程中不需要更新结构的网格模型且节点位置 固定,因而避免了以往形状优化设计过程中因结构几何改变较大而导致的网格奇异现 象;而且因为设计变量与网格单元和节点相关,可以获取到目标函数和约束条件对设计 变量的灵敏度的解析表达式,使得灵敏度计算更为准确。但是这类方法也存在一定问题, 类似拓扑优化,需要对结构边界进行光顺化处理并提取,不利于此类方法的工程应用: 与网格模型中单元和节点相关的设计变量,其数量不在少数,随着网格的细化,还将不 断增加;单元删除准则的定义没有明确的理论支持,阀值的选取对优化结果有很大影响。

⑦ 虚荷载方法(Fictitious Loads method) / 缩减基方法(Reduced Basis method)

这两种方法都引入了中间变量来建立有限元模型节点坐标与结构形状之间的联系。 Belegundu 等人[109]引入了虚荷载概念,以虚荷载为设计变量,结构在虚荷载作用下的 变形将用作对结构形状的扰动,并在 MSC/NASTRAN 中实现了该方法。该方法首先要 建立虚荷载和边界控制节点之间的相互关系。Kodiyalam 等人[110]则在 MSC/NASTRAN 中实现了基于缩减基方法的结构形状优化设计。这里设计变量是一组预先定义的基向量 的集合,必须能够包含对结构最优形状的描述,基向量的选择对结构形状优化的实施和 优化效果有着至关重要的影响。

对比上述各种方法可以发现,除了将 CAD 系统直接用于结构几何建模,其他各种 方法均需要用户在模型上定义特定的形状描述变量,优化的效果极大地依赖于用户经 验,且对三维复杂结构来说形状描述变量的定义存在相当大的难度。选择适当的结构形 状描述方式是提高形状优化设计方法有效性的基本保证,这里结构形状的参数化描述必 须要满足以下条件:1)准确并保持连续性的几何描述方法;2)能够满足所研究的各物 理场的要求;3)可以实现自动网格生成;4)满足优化算法和灵敏度分析对结构形状描述的要求;5)能够尽量缩短开发周期;6)能够与CAD紧密集成。

本文选择 CAD 系统完成结构形状几何描述,通过 CAD/CAE 无缝集成实现参数化的结构形状优化。集成和协同一直是制造业发展的主旋律,使产品设计阶段中各个应用 工具集成在一起形成一个系统协同工作,将能最大限度提高制造业信息化技术的数字化 水平。现有的 CAD/CAE 集成大都是通过数据文件将 CAD 的几何模型传输到 CAE 工具 进行分析计算。目前已经出现由传统的数据集成逐步往过程集成发展的趋势,相比数据 集成中存在的数据兼容和传输效率问题,过程集成则是需要人工干预最小且效率更高的 无缝集成方式。本文将在后面部分详细介绍基于 CAD 系统、数据共享、过程集成,用 于参数化结构形状优化设计的 CAD/CAE 集成平台。

2) 灵敏度计算对网格更新的要求

灵敏度分析是优化迭代的依据。在结构灵敏度的算法中,不仅要考虑计算效率和精度,而且要考虑如何便于程序实现。在以往的研究工作中,计算精度是普遍最关心的问题,因此大都采用解析、半解析的或基于连续体的物质导数方法计算灵敏度信息。然而对于结构形状优化来说,无论上述哪一种灵敏度计算方法都要求在迭代过程中保持结构网格模型的拓扑不变,也就是单元和节点数目以及相互位置关系不随着结构形状的改变而变化。结构形状优化设计的一个瓶颈在于模型形状改变较大时导致的网格变形奇异。

为了保证网格模型在形状优化迭代过程中保持拓扑不变,主要使用两类网格更新方 法,一类是根据灵敏度计算数值指定网格中节点的移动,比如设计速度场[103],这类方 法比较适用于以有限元模型为研究对象,采用离散设计变量的形状优化设计方法,节点 的移动不受结构外形限制,同时能跟物质导数计算中的设计速度场保持很好的一致性; 另一类比较常用的方法是以映射法为主的网格变形方法[116],结构的几何外形在设计变 量驱动下发生改变后,网格模型的节点将映射到新的几何模型上,这里可以通过参数坐 标等信息,使网格模型的节点在变形前后的几何模型上的相对位置保持不变,进而保证 网格模型的拓扑关系不变,这里使用有限差分方法计算网格更新前后节点位置的灵敏度 信息。但从目前现有的工作来看,保证网格模型的拓扑关系在形状优化迭代过程中保持 不变,无论采用上述哪一种方法都将限制形状优化设计方法在工程实际中的应用。要使 网格模型在变形过程中始终保持一定的单元质量,对于二维结构和简单三维结构的几何 小变形的形状优化设计问题比较容易实现。在迭代过程中,当结构几何变形较大时,就 不得不重新创建新的网格模型,此时当前优化迭代将中止,必须在新的网格模型上重新 定义模型属性,并开始新一轮的迭代。对灵敏度分析解析方法的偏重不可避免对结构形 状描述和形状改变带来种种限制,制约了结构形状优化设计方法在工程实际中的应用。

1.3 参数化设计

传统的设计过程,产品的设计与分析环节相互独立,设计人员只关心产品的几何外 形,不了解产品的结构性能。进入分析阶段的产品模型要进行简化处理,使得在分析过 程中很难反映并保持设计人员的设计意图,因而造成 CAD 系统的效率较低。随着 CAD 和 CAE 技术的发展应用的更加广泛和深入,设计人员对希望在产品的概念设计阶段能 够对产品的结构性能有深入了解,这就需要把产品几何模型中具有共性的东西提取出来 作为参数,同时找出形状约束方程求解方法,以便能以较少的操作来完成新的设计方案。 而参数化设计技术则是实现这一理想的技术基础[12]。

早在 1978 年, Hillyard 与 Braid[118]就提出了一个具有参数化特征的系统。之后 Gossard 和 Light[119]以 Hillyard 的工作为基础,将数学方法引入到几何模型的约束描述 中,使参数化设计技术发展到了一个新的高度。到了 80 年代末期,随着几何造型技术, 尤其是自由曲面造型和实体造型技术的日渐成熟,人们越来越强烈地要求在模型的可修 改性方面有一个质的飞跃,而此时出现的参数化设计的思想正迎合了人们的这一需要。 在这一时期,提出了许多重要方法。

目前,在参数化设计领域有两类主导方法。第一类方法要求模型设计师编写一段程 序来记录创建模型所使用的数据和经历的过程。通过执行程序实现模型的生成;通过修 改程序实现模型的更新;因此这种方法被称之为编程参数化。第二类方法要求造型系统 向设计师提供一种工具,以方便他们在模型建立之后对其进行修改,这种方法被称之为 交互参数化。第一类方法的主要缺点在于它不能以一种友好交互的方式来实现对模型特 征的修改,给设计师造成很多不便。但如果设计师掌握了一些程序设计的技术的话,它 又不失为一种行之有效的参数化建模方法。随着计算机应用领域、使用人群的不断扩张, 智能性和交互性越来越为软件设计师们所重视,同样的现象也发生在参数化设计领域的 研究过程之中。正是基于这样的原因,第一类方法逐渐被人们所遗弃,大部分的研究人 员把精力都投入到了第二类方法的研究之中。

现今比较成熟的参数化方法[13-15]主要有以下几种:

1) 编程参数化方法

这是实现参数化设计的一种最简单的方法,如图 1.5 所示。它的基本思想是先使用 特定的程序设计语言,如 AutoLisp,编写一段程序,记录建模的过程中设计师要求造型 系统执行的操作序列及各个操作的输入数据。然后在造型系统下执行该程序,由造型系 统根据程序的定义完成模型的创建任务。如果编辑程序,改变程序中特定操作的输入数 据(即参数),便可建立类型相同但尺寸各异的模型,这就在一定程度上实现了模型设计 的参数化。由于缺乏适当的控制机制来定义参数间的约束关系避免非法模型的产生,编 程参数化方法有一个明显的缺点:参数的数目和范围受到很大的限制,而且模型一旦建 立完成,它便不能够被修改。改变模型的唯一方法就是再次运行程序,建立新的模型。



Fig. 1.5 Program-based design parameterization

2) 基于历史的参数化设计方法



除编程参数化外,基于历史的参数化设计方法也是目前流行的方法之一。现今许多的商业化造型软件都用一定的方法来追踪建模过程的操作序列。建模过程的任何操作连同与它关联的数据(即操作参数)都将按其发生的顺序被一一记录在操作栈中,如图 1.6 所示。设计师可以改变栈中某一操作的参数,并要求造型系统对模型重新计算。造型系统就根据更新后的操作栈中的内容,履行模型创建的任务建立新的模型,以达到模型修改的目的。该方法在思路上和编程参数化方法极为相似,这也就不可避免地导致了它存

在缺乏适当参数控制机制的问题。但该方法把建模操作历史的管理任务交给了造型系统,使设计师从这方面的劳动中解放出来,在一定程度上提高了系统自动化的水平。

现有很多通过 CAE 系统提供的二次开发手段(如 Ansys 的 APDL 流文件编制, MSC.Patran 的 PCL 语言)实现的参数化有限元方法则是此类参数化技术的应用。

3) 基于变分几何的参数化设计方法



Fig. 1.7 Variational geometry based design parameterization

基于变分几何的参数化设计方法将数学方法引入模型的参数化描述中,使之进入了 一个全新的阶段。其基本思想是将模型划分为若干个特征点,由设计师对每个特征点添 加必要的约束完整地定义模型。之后,再由造型系统将约束集合转化为方程组的形式加 以表达,最后用牛顿迭代法或其它数值方法求解方程组,这样就可得到唯一确定的模型 描述,如图 1.7 所示。基于变分几何的参数化设计法克服了前两种方法缺乏适当参数控 制机制的缺陷,但同时它也带来了一些新的困难。该方法要求设计师准确地添加约束恰 当地定义模型,这无疑将给设计师的工作造成很多不便。而且方法中所涉及的数值计算 需要耗费大量的时间,这将对它的应用领域造成很大限制。对于上述问题,人们又提出 了许多解决的办法,其中最著名的一种就是下面将提到的基于约束谓词的参数化设计方 法。

4) 基于约束谓词的参数化设计方法

基于约束谓词的参数化设计方法源于人工智能和专家系统的引入,如图 1.8 所示。 它采用人工智能中知识的表示方法(谓词)来描述模型的约束信息。认为模型可以由一系 列事实来定义,这些事实描述了组成模型的几何元素及这些元素间的关系(即约束)。设 计师在一个通常称之为草图的概略模型上输入这些用于定义模型的事实,由造型系统根据这些事实中提供的约束信息形成一个规则集,然后将这个规则集输出给推理机,经由 推理最终形成一个符合设计师意图的目标模型。



Fig. 1.8 Rule-based design parameterization

除了上述方法,基于特征的参数化设计则是新一代智能化、集成化 CAD 系统的核 心技术之一,它改变了传统 CAD 系统细节观的设计模式,提出了特征造型和尺寸驱动 的设计概念,极大地方便了模型的设计和修改,显著提高了产品设计的效率和质量。目 前参数化设计在几何造型领域的应用已逐渐走向成熟,大多数的商业化造型软件都引入 了参数化设计的概念,所提供的模块基本覆盖了整个机械产品的设计过程。参数化几何 造型的技术特点包括:

- ① 使用新一代行为建模技术,实现全智能化设计,捕捉设计参数和目标;
- ② 目标驱动设计,用户可以定义要解决的问题,给出动作特征、可重复利用的分析特征,可实现多参数的可行性研究和多标准、多参数优化研究;
- ③ 全关联的、单一的数据结构,具有在系统中做动态修改的能力,使设计、制造的各阶段并行工作,数据修改可自动关联;
- ④ 以功能为基础,用户可使用外壳、填充体等智能化的功能特征进行复杂形体零件的三维造型和参数化设计,并可同时获得二维参数化图形,特别适用系列产品的变量化设计;
- ⑤ 具有强大的装配功能,只需输入简单的命令就能按用户的用途完成产品的装配;
- ⑥ 在基于特征的参数化建模技术上,充分运用关联、特征和参数化功能,具有相当的行为建模功能,它将参数化设计和功能设计联系在一起。

目前在有限元建模领域参数化技术的研究和应用仍处于起步阶段。

1.4 复合材料设计

在一些情况下,结构要求材料具有特定的性能,例如,零膨胀,负泊松比等。一些 航天材料要求以最轻的质量,提供结构足够的剪切模量,而不关心该材料的其他性能, 航空航天领域最常见的蜂窝夹层复合材料就是其中比较典型的一种;卫星天线和电子器 件等处于特殊工作环境中的结构必须具有良好的几何稳定性,这就要求所用的材料对温 度不敏感,即材料的热膨胀系数要足够低,甚至零膨胀率;在某些特定环境中,或者工 程的特殊应用中,往往要求材料各个方向的传热性能不同,如绝热材料,这就需要工程 师对复合材料的传热性能进行设计以满足工程需要。基于均匀化方法的复合材料设计、 材料性能预测与优化、结构分析及优化在航空、航天、交通、建筑、机械制造、运动器 械等领域都取得一些重要的成果。均匀化方法有严格的数学理论基础,随着计算机的飞 速发展,该方法将越来越广泛地应用于预测复合材料的材料物理性能。

基于结构优化理论的材料力学性能优化设计的研究已取得一些重要的成果。 Sigmund 和 Torquato 在文[16]研究了含三相材料的复合材料细观拓扑结构设计优化问题,分别给出了在特定方向具有最大热膨胀、零热膨胀、负热膨胀的材料设计方案。 Kikuchi 等[17]采用固定网格法,讨论了柔顺结构、弹性材料、压电材料的拓扑优化设计问题。Fish 和 Ghouali[18]探讨了复合材料结构响应的多尺度灵敏度分析,计算了材料宏观力学性能、结构位移对细观设计变量的灵敏度。Rodrigues 等[19]提出了一种多层次联合的材料和结构优化设计的方法,包括宏观结构的拓扑和细观的材料性能耦合优化问题。Yuan 和吴长春[20]研究了复合材料杆件在纯扭矩作用下的截面拓扑优化设计问题。 Chen 等[21]综述了微机电系统的优化设计问题,介绍了压电材料和弹性材料性能细观拓扑优化的理论研究和应用。刘书田[22.23]研究了复合材料性能细观结构优化设计问题,给出了骨架形式复合材料零泊松比的设计方案,提出了一种高效的、适合于材料细观形状设计变量灵敏度分析的映射方法。Barbarosie 在文[24]论了一类细观尺度上含有多孔的周期性材料的形状优化问题,分别对材料热传导性能和弹性性能进行了优化设计。 Kaminski 在文[25]研究了纤维增强复合材料力学性能细观尺度的灵敏度分析。

从力学的观点来看,材料设计的目的就是确定由实体组分材料和空心构成的细观结构形式,使材料具有特定的性能。其实质就是确定实体组分材料在一定区域(单胞域)上的形状和拓扑形式。这个目的与连续体结构形状和拓扑优化设计的目的相同。也就是说,材料设计问题与连续体形状和拓扑优化问题具有相类似的问题提法。因此,形状优化或拓扑优化问题的求解算法可以用来求解材料设计问题。

对于复合材料的建模,常用拓扑优化问题中的处理方法,首先将材料均布在问题可 行域中,然后根据数值计算结果删减单元或者调整单元密度指标,以获取最优的材料分 布。Zhu 等人[26]借助于专业的 CAD 软件,开发了一个多相材料 CAD 建模系统,可用于复合材料、功能梯度材料和带有周期性微结构的多相材料的建模。对于给定构型的复合材料,使用该系统可以创建直观的多相材料几何模型并将材料信息与几何信息集成在一起。不同于前一种模型,此类模型可以直接用于生产制造。

1.5 研究意义

本文工作的目的是为了提高结构形状优化设计方法的通用性和实用性。提出了基于 CAD系统实现的CAD/CAE集成设计方法,开发参数化结构形状优化设计平台。该平台 可以对三维实体结构、壳体结构进行形状优化设计,此外,还推广到材料设计领域,用 于对周期性复合材料的单胞结构的优化设计。通过在CAD系统中的集成和基于几何模 型的分析模型定义方式,使得该平台为工程、设计人员提供一个简便、直观、实用的优 化设计工具,可以在产品的概念设计阶段对结构性能进行研究和分析。此外,本文实现 的是一个开放式的、具有一定通用性的设计分析方法,除了现有已实现的功能还可以集 成多场耦合、非线性、若干组合结构的参数化设计分析方法。同时作为CAD/CAE集成 开发方式本文提出的技术路线和系统开发思想也可以在其他CAD平台中实现。

1.6 研究框架

本文研究的关键问题包括建立一个通用的参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE。这个平台建立在专业的 CAD 软件系统中,借助于几何模型的参数化建模手 段,将参数化设计引入结构形状优化设计中。在开发过程中,对 CAD 系统的几何数据 库进行了扩展,实现了有限元模型的参数化和动态更新和有限元模型的参数化动态更新 设计方法。

协同工作是支持工程行业和制造企业信息化的重要技术之一,其中 CAD/CAE 集成 的主要目的是将分析技术用户产品设计阶段实现分析与设计协同工作的基础。本文分析 了目前现有的几种 CAD/CAE 集成方式,并提出了以产品几何模型为对象,在 CAD 系 统中实现的参数化结构形状优化设计方法,并开发出相应的具有一定通用性的结构参数 化形状优化设计平台。并在平台上实现了以下研究内容:首先,平台提供了三维实体结 构的参数化形状优化设计方法,对于工程中常见的机械零部件,可以它的形状尺寸为设 计变量,考虑结构的重量,强度,刚度,自振特性等因素,对结构进行参数化形状优化 设计。相比传统的形状优化设计方法,该系统可处理具有复杂几何特征的三维实体结构。 其次,在参数化三维实体造型的基础上,提出了一种参数化曲面技术,结合相应的有限 元模型定义,可以实现壳体结构的参数化结构形状优化设计方法,对于由常见曲面和二 次曲面构成的组合曲面壳体结构,使用尺寸参数而不是节点坐标就是对结构进行参数化 设计。此外,还将参数化形状优化设计方法应用到材料设计领域,对于周期性复合材料,提出了单胞结构的参数化形状优化设计方法,研究单胞形状对材料参数的影响。

最后,除了上述的工作内容,对基于 CAD 平台的参数化结构形状优化设计方法进行总结,在现有的工作基础上提出了可以对系统进一步扩展的一套切实可行的多学科的结构优化设计方法。

1.7 基金资助

本文工作属于下列基金资助课题中的研究内容并得到相应资助,在此深表感谢:

- 1) 国家自然科学基金,耦合系统的多学科优化设计理论与数值方法,批准号 A020216;
- 2) 国家自然科学基金,热一弹塑性耦合结构参数化形状优化设计方法,批准号 10502013;

2 CAD/CAE 集成技术研究和结构形状优化设计

CAD与CAE是现代设计制造技术和制造业信息化的两个重要组成部分。CAD技术 将计算机高速的数据处理和海量存储能力与人的逻辑判断、综合分析和创造性思维能力 结合起来,对加速新产品开发,缩短设计制造周期,提高产品质量,节约成本,增强市 场竞争能力和企业创新能力发挥了重要作用。目前CAD技术已经成为现代生产制造过 程中不可获缺的设计手段。CAE工具是迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程 科学、工程管理学与现代计算机科学和技术相结合而形成的一种综合性、知识密集型信 息产品。CAE是一种迅速发展的信息技术,提供了实现重大工程和工业产品的计算分析、 模拟仿真与优化设计的工程软件,是支持工程科学家进行创新研究和工程师进行创新设 计的、最重要的工具和手段。

通常一个产品从构思,到设计,经过分析和改进再进入工艺研究,最后到制造要经 过多个环节,包括 CAD,CAE,CAM(计算机辅助制造,Computer Aided Manufacture), 在最后确定设计方案进入制造阶段之前产品数据需要在各个环节之间反复传递、修改。 在传统的机械类产品设计过程中,设计、分析与制造环节是相对独立的,产品方案要在 各个环节之间多次重复,产生了不必要的时间浪费,如图 2.1 所示。要提高整个过程的 工作效率,实现 CAD/CAE/CAM 集成的系统环境有着重要的意义。通过系统集成,在 产品的一体化设计过程中,达到美学、性能、精致制造工艺和性价比等多方面条件的完 美组合。



Fig. 2.1 Improvement for Product Design Flow

本文提出了在 CAD 平台上实现的 CAD/CAE 集成方法,为产品设计提供一个开放 式的、一体化的参数化结构优化设计平台。

对于产品的整个集成化设计平台来说,最基本的也最关键的就是产品的几何数据信息,它也是产品的设计、分析和制造工艺数据信息的集成载体,因此选择适当的结构形

状描述手段是实现高效集成平台的根本。在本章第 2 节中将介绍本文工作中实现 CAD/CAE 一体化的实体造型的核心技术:特征造型和参数化设计技术。在第 3 节中将 介绍 CAD/CAE 集成平台的框架,主要包括 CAD 与 CAE 系统之间的数据传输手段和系 统集成方式,列举和比较现有的传输手段和集成方式,并对相关工作做以概述。对于结 构形状优化问题来说,有限元模型的更新、灵敏度分析和优化算法都是需要解决的关键 问题,在第 4 节中将对这三方面的现有技术进行综述,比较并给出适合 CAD/CAE 集成 平台的应用技术。

2.1 CAD 几何造型

按照系统规模 CAD 分为高端 CAD, 中端 CAD 和低端 CAD。低端 CAD 主要集中 于专业的二维工程制图 CAD 软件系统,如 Autodesk 公司的 AutoCAD 软件。中、高端 CAD 指可提供自由曲面建模和三维实体建模功能的软件系统。较通用的三维中端 CAD 主要有: Solid Edge、Solidworks、MDT/Inventor 和 Cimatron 等。中端 CAD 是微机版的, 面向中小型机械设计用户。这类 CAD 的特点是易学易用,价格低廉,具备三维高端 CAD/CAM/CAE 的大部分功能,在核心设计能力上已经逐步接近高端 CAD 软件的水平, 其功能的覆盖面也迅速扩大。除了少数的总体设计、复杂分析等任务之外,中端 CAD 软件能够满足一般的设计分析的需要。常见的三维高端 CAD/CAM/CAE 软件主要有: UG、PRO/E、CATIA 等。高端 CAD 大都提供服务器版本,能够处理像飞机、汽车、轮 船等大型结构整体以及 CAD/CAE/CAM 一体化设计,同时它们也提供可在微机上使用 的微机版本。下面对常见的 CAD 系统进行简要介绍。

1. Inventor/MDT

MDT 是 Autodesk 公司基于 ACIS 造型平台开发的三维实体造型软件,在二维软件的用户基础上,拥有一定的客户群。Inventor 是基于改进后的 ACIS 造型平台开发的。 主要的区别的是 MDT 基于 AutoCAD 而构建; Inventor 使用全新的自适应技术从低层彻 底构建。此外, MDT 还提供曲面造型能力,并能和来自 MAI 合作伙伴的专业设计、分 析和制造增值软件集成。

2. Pro/E

参数化造型软件的创始。是 PTC 公司的高端 CAD 造型软件。是全参数化的理念, 它是目前在中国用户最多的一个三维软体,这主要是归功于它的严谨性上。Pro/E 的严 谨性同时又成为制约它自己在产品设计修改自由度方面的主要因素。

3. UG

UGS 是 Unigraphics 公司基于 Parasolid 几何造型平台开发的 CAD/CAE/CAM 集成 系统,后来被 GM 选中作为其主流文件,由 GM 下属的子公司 EDS 收购,作为其一个

部门。同时被收购的还有 SDRC 公司的 I-deas, EDS 公司将此两套软件进行整个以生成新一代基于全新知识引擎的 CAD 高端系統—NX(NeXtgeneration)。NX 版集成两大软件的所有优点及操作方式,以知识引擎为核心,为使用者提供下一代的知识创新系统。

4. I-deas

SDRC1967 年建立,从事结构的动力分析,以后增加几何造型功能。该软件系统是 第一个基于变量化产品造型技术的 CAD 软件。与 UGS 同时被 EDS 公司收购。

5. SolidEdge

Solid Edge 是 UGS 公司的中档 CAD 系统。它采用 Parasolid 作为软件核心。

6. CATIA

达索开发的 CATIA 三维曲面造型和数控加工系统是目前市场上的主流高端 CAD/CAE/CAM 系统。CATIA 先后兼并了 CADAM 和 Solidworks。1998 年 12 月通过内 部协商,合并了法国另两家最有名的 CAD 公司产品的经营权,即 Matra 财团的工业设 计和加工软件 Euclid/Styler 和 Machinist,以及 Cisigraph 的 NURBS 曲面工业设计软件 Strim 100 和注塑模设计软件 Strim/Flow。2000 年 7 月收购了 ACIS 几何平台。1998 年 2 月达索与 IBM 合资成立 ENOVIA 公司,从事企业的信息系统集成和第二代产品数据管 理系统的开发,推出了专供生产车间布置生产线用的 DELMIA 软件。

7. SolidWorks:

SolidWorks 继承了 PTC 参数化特征模型的优点,同时充分利用 Windows 潜力,是 世界上在 Windows 环境下第一个较为成功的原创软件。1997 年 6 月被达索收购,成为 DASSAULT 的中端造型软件。

无论高端还是中端 CAD 都离不开参数化/变量化设计和特征造型技术,这些技术满 足了制造业的快速、便捷和精确建模需求,使 CAD 成为设计师必不可少的工具软件, 同时也成为实现 CAD/CAE/CAM/CAPP 一体化的协同设计环境的重要核心技术。下文将 对几何特征造型技术和参数化设计技术分别进行介绍。

2.1.1 特征造型技术(Feature-based Modeling)

几何造型技术是三维产品造型与设计的核心。它的研究国际上始于 20 世纪 60 年代 末,当时主要研究用线框图形和多边形构成三维形体。进入 70 年代后,随着不同领域 CAD 技术的发展,几何造型又分为曲面造型和实体造型。曲面造型主要研究曲线和曲 面的表示、曲面的求交及显示等问体,广泛用于汽车、船舶、飞机的 CAD 设计。除了 上述几个专业领域,在工程制造业中,尤其是机械制造业领域中最常见的还是实体结构。 CAD 的几何造型技术已经发展地非常成熟,使用专业的 CAD 软件能够创建任意复杂工 程实体结构,产品设计已经不再需要人工绘图[27-29]。目前大多数实体建模系统都支持 的建模方法可以分为 4 种。 第一种建模方法是通过检索实现在系统中存储的基本体素(指立方体、圆柱体、球体、环体等二次曲面体以及平移、回转平面轮廓线而产生的二维半形体),赋以适当的尺寸数值来创建简单的实体,这种方法成为体素建模方法(Primitive Creation Functions)。 CAD 软件还提供其他一些辅助功能可以对简单的实体进行进一步操作生成更复杂的实体结构,一是对若干简单实体进行操作,进行添加、求交或切除等操作,称之为布尔运算(Boolean Operation);二是在已存在的实体上进行其他操作从而创建新的实体,比如:倒角、抽壳等操作。这种由实体开始,通过添加和修改操作并由此确定实体内底层元素信息的建模方法也成为自上而下的建模方法。如下图 2.2 一个常见的机械零件可以拆分成若干个简单实体,反过来,这些简单实体通过布尔运算再加上其他实体操作也可以生成一个复杂实体。



图 2.2 基本体素布尔运算过程 Fig. 2.2 Primitive Boolean Operation

这种建模方法使用的数据结构比较简单,所表示的形体的形状比较容易修改,但是 这种建模方法受系统的基本体素类型限制,在建模之前必须对实体进行合理的拆分。因 此这种建模方法已经不是 CAD 建模系统的主流建模方法。

第二种建模方法是通过移动表面来生成实体,如扫描(Sweeping)和蒙皮(Skinning) 都属于这种方法。



图 2.3 蒙皮法创建实体 Fig. 2.3 Skinning for Solid Modeling

扫描操作通过拉伸或旋转一个已定义好的封闭平面区域而建立一个实体。蒙皮方法 可通过创建包围一个空间的蒙皮表面而生成一个实体。如图 2.3 所示,给定扫描轨迹和 若干个实体的截面形状就可以创建一个具有流线型外表的实体结构。这种方法结合自由 曲面技术主要针对于具有流线型外表的实体建模比较有优势,适用面不广。

第三种建模方法是直接操作从实体的底层元素开始,自下而上创建实体,称之为边 界建模方法(Boundary Modeling)或自下而上的建模方法。这种建模方法直接操作实体 顶点,由顶点生成边,再有边生成面,通过拉伸、旋转、放样等操作生成实体模型。如 下图 2.4 是使用边界建模方法创建楔形实体的基本流程。



Fig. 2.4 Boundary Modeling for Sold Modeling

这是目前大多数大型商业 CAE 系统中提供的主要建模方法,从底层几何元素点开始,逐步创建实体。这种建模方法比较简单,但是操作步骤繁琐,模型不易修改。

第四种建模方法是实体几何特征建模方法。<u>几何特征建模方法的核心思想是</u>:基于 几何特征的造型是利用机械零件设计中常用到的且能被常规加工方法所加工的一系列 基本几何体及复合几何体的几何来表示所设计的零件。它包含两方面的含义:一方面, 它是低层几何元素的有机组合,表达了特定的工程含义;另一方面,它可以作为尺寸、 精度、材料、加工信息等非几何信息的载体。这样的模型既有几何信息又有非几何信息, 也就是说特征兼含语义和形状两部分。这是目前大多数参数化 CAD 软件中最常用的, 也是工程设计人员非常熟悉的建模方法。传统的建模方法通过特征概念集成到这种建模 方法中。在建模过程中,设计人员从一开始就采用特征进行设计,特征的概念也贯穿了 整个建模操作过程,如设计者可以使用诸如"在特定位置添加一个指定形状和一定尺寸 的孔"和"在特定位置生成一个特定尺寸和形状的倒角"等命令来创建模型。这样,设 计人员不必关注组成特征的几何细节,只需要考虑特征所具有的工程语义。设计者可以 使用熟悉的形状特征建立实体并添加新的特征,这种建模方法更复合设计人员的操作习 惯。此外,这些特征中包含了实体零件装配和制造特征信息,这为实现零件从设计到制 造过程的一体化和自动化提供了必要条件。

特征造型是 CAD 建模方法的一个里程碑,它是在 CAD/CAM 技术的发展和应用达到一定水平,要求进一步提高生产组织的集成化和自动化程度的历史进程中孕育成长起来的。与以往的几何造型技术相比,它有以下特点:

- 特征技术不仅注重完善产品的几何描述能力,而且可以更好表达产品的完整的 技术和生产管理信息,为建立产品的集成信息模型服务;
- ② 它使得产品设计工作在更高的层次上进行,设计人员的操作对象不再是原始的线条和体素,而是产品的功能要素,像螺纹孔、定位孔、键槽等;
- ③ 它有助于加强产品设计、分析、工艺准备、加工、检验各部门之间的联系,更 好地将产品的设计意图贯彻到各个后续环节并且及时得到后者的一件反馈,为 实现基于产品信息模型的 CAD/CAE/CAM/CAPP 集成平台创前提;
- ④ 它有助于推动行业内的产品设计和工艺方法的规范化、标准化和系列化,使得 在产品设计中及早考虑制造要求,保证产品结构有更好的工艺性;
- ⑤ 它可以推动各行业实践经验的归纳、总结,从中提炼出更多规律性知识,以此 丰富各领域专家系统的规则库和知识库,促进智能 CAD 系统和智能制造系统的 逐步实现。

2.1.2 参数化造型设计(Parametric Modeling Design)

传统的造型方法都只是几何图形元素的简单堆叠,仅描述了产品的可视形状,而不 包含产品的设计思想。这样一来,哪怕是改变模型的一个尺寸,也需要放弃原来的图形, 重新构建一个新的图形,这种简单的重复工作严重影响了设计效率。能否建立起图形几 何尺寸与尺寸数据的关联,通过更改数据实现几何模型的变化呢?答案是肯定的,这就 是参数化设计,新一代的三维造型系统大都支持先进的参数化设计[30-32]。

参数化设计是 80 年代发展起来的先进造型技术,它用约束来表达产品模型的形状 特征,定义一组参数以控制设计结果,从而能够通过调整参数来修改设计模型,并能方 便地创建一系列在形状上或功能上相似的设计方案。产品模型的修改通过尺寸约束实 现。通过它可以大大提高设计效率,并有助于减轻设计人员的工作强度。下面将简要介 绍参数化设计的相关概念。

● 变量化设计的概念

说到参数化设计就不得不提变量化设计,变量化设计是 90 年代提出的实体造型技术,主要应用在 I-deas 和后来发展的 UG-NX 造型系统中。它认为参数化设计中全尺寸约束这一硬性规定干扰和制约着设计者创造力及想象力的发挥,一旦所设计的零件形状过于复杂时,面对满屏幕的尺寸,如何改变这些尺寸以达到所需要的形状就很不直观; 再者,如在设计中关键形体的拓扑关系发生改变,失去了某些约束的几何特征也会造成系统数据混乱。因此,全约束是对设计者的一种硬性规定。这两种技术都属于基于约束的实体造型系统,都强调基于特征的设计、全数据相关,并可实现尺寸驱动设计修改,也都提供方法与手段来解决设计时所必须考虑的几何约束和工程关系等问题。不同之处在于,变量化设计允许欠约束的情况下完成几何建模任务。对于设计师来说,在进行产品之前可能对其最终形状并不明确,在设计过程中借助一步步已知条件确定最优的方案。

对于设计人员来说,相比参数化实体造型技术,变量化技术提供了更大的设计自由度。对于形状优化设计来说,变量化技术则不易驾驭,随着设计变量的改变,结构的拓扑关系可能随时发生变化,不利于有限元模型与几何模型的集成。在后面第三章将详细讨论参数化有限元建模技术,说明参数化设计技术更便于实现 CAD/CAE 集成的数据库共享。

● 参数化设计的概念

参数化设计一般是指设计对象的结构形状比较定型,可以用一组参数来约定尺寸关 系,参数的求解较简单,参数与设计对象的控制尺寸有显式对应关系,设计结果的修改 可由尺寸驱动。制造业中常用的系列化标准件就属于这一类型。目前大部分的 CAD 系 统都支持参数化设计。

从产品设计到制造的整个过程,尤其在产品设计的初步阶段,产品的几何形状和尺 寸不可避免地要反复修改、协调和优化。即使利用 CAD 软件进行非参数化建模,那么 哪怕要修改图形的一个尺寸和结构,也需要修改原模型,甚至重新建模。如果利用参数 化设计技术,就可以使用参数驱动零件和部件的特征尺寸,在进行产品系列修改时,只 需要修改若干数据即可;若要进行重新设计,也可以尽量少地修改几何模型数据。 参数化设计可以大大提高产品设计的效率,同时可以有效保证产品模型的安全可靠 性。尤其对给定构型的零部件,用一组尺寸约束该几何图形的一组尺寸标注,参数与设 计对象的控制尺寸对应显示。当赋予不同的参数序列时,就可驱动原有几何模型达到新 的目标几何图形,从而完成高效地建模和快速地模型修改。

● 参数化设计中的关键技术

1. 几何约束

在参数化建模系统中,设计者通过使用各个元素的几何约束和尺寸约束来建立图形。其中,几何约束描述的是图形中各几何元素之间的相对位置关系,例如:水平(H)、竖直(V)、两条边相互垂直(P)或平行(A)或等长(L)或共线(C),两个圆弧同心(N)或半径相等(R),顶点位置固定(F)等等,如下图。



图 2.5 草图中几何约束示意图 Fig. 2.5 Illustration of Geometry Constraints in Sketch Design

2. 尺寸约束



Fig. 2.6 Illustration of Dimension Constraints in Sketch Design
单纯的几何约束往往不能提供对草图的满约束,还需要定义尺寸约束。尺寸约束不 仅包括标在图形上的尺寸,还包括尺寸的参数化定义和尺寸之间的关系。尺寸标注也可 以数学方程式的形式给出,参数化建模可以通过求解尺寸及尺寸之间关系的数学约束方 程式来描述图形的几何形状。如下图 2.6 所示,d*为系统尺寸参数,其中 d15 是通过代 数表达式描述了尺寸参数之间的相互关系,以满足某种特定设计意图,如装配要求等。

3. 全局设计变量

设计者可以在 CAD 系统中定义全局设计变量,初始化后用于尺寸标注,系统通过 对设计变量的修改可以控制图形的改变。如上图 2.6 中 Dim01 和 Dim02 为参数化定义 的全局设计变量。

4. 尺寸驱动

有了几何约束和尺寸约束就可以实现对实体的满约束设计。在此基础上通过编辑全局设计变量就可以在保证设计意图的前提下驱动实体几何形状的改变。全局设计变量,如上图 2.6 中所示的 Dim01 和 Dim02 可以通过多种方式来编辑。包括: (1)在程序内部编辑;(2)通过外部数据文件编辑;(3)通过外部电子表格编辑;(4)通过二次开发结构提供的专门的函数编辑。



图 2.7 CAD 系统中提供的全局设计变量对话框 Fig. 2.7 Dialogue for Definition of Global Design Variables

● 参数化设计的一般过程

在参数化建模中,通常采用以下的方法构造图形:

- 1) 设计构思,定义用作尺寸参数的全局设计变量,如下图 2.7 所示为 CAD 系统的 设计变量定义对话框;
- 输入二维草图,交互输入几何约束和尺寸约束,这里将事先定义的全局设计变量用于尺寸约束,如上图 2.6 所示;

- 通过扫描、旋转或放样等操作建立一个基本的三维几何特征,如下图 2.8(a)所 示实体特征为图 2.6 所示草图拉伸得到;
- 4) 在已有的三维实体特征上进行倒角、开孔等操作,添加新的几何特征;或重复 第二步到第四步创建新的三维几何特征并与原有三维几何特征进行布尔运算, 创建复杂的三维实体模型。如下图 2.8(b)所示,为实体特征(a)经过抽壳后,添 加通孔的草图设计。最后得到的实体模型如图 2.9 所示;



Fig. 2.8 Illustration of Parametric Solid Modeling



Fig. 2.9 Parameterized Solid Model

当实体创建完毕后,参数化建模系统通过编辑预先定义并施加在实体草图和特征中的全局设计变量来修改实体几何形状,并不直接对实体中的各个几何元素进行修改。因此,设计者可以不必考虑图形元素的细节,而生成多种设计方案,从而能专注于功能方面的设计。如下图 2.10 所示,重新编辑全局设计变量(Dim01-Dim04)后,系统将会自动更新相应实体模型。



图 2.10 修改全局设计变量后更新的实体模型 Fig. 2.10 Regenerated Solid Model with Modified Global Design Variables Values

2.2 CAD/CAE 集成平台框架



Fig. 2.11 Functionality of CAD and CAE Techniques in Integration System

实际上,在近些年,CAE 技术在产品设计中的角色已经不再是单纯的产品失效分析和验证,而是和 CAD 技术一样,成为整个设计过程中不可缺少地一环。这一角色的转换使得 CAD 系统和 CAE 技术的结合变得越来越重要。如图 2.11 所示,实现 CAD 技术 与 CAE 技术的集成将能使产品整体设计水平踏上新的台阶。

有了参数化特征造型技术,对于工程中常见的绝大多数零部件、结构,CAD系统可以帮助设计人员建立其几何模型,并提供参数化控制手段。要将 CAE 技术更好地应用于工程实际,帮助设计人员更好地了解产品的结构性能,提高设计效率,有必要将

CAE 技术集成到设计人员所熟悉的 CAD 设计环境中。CAE 与 CAD 是密不可分的,相 互独立的 CAE 或 CAD 系统势必造成设计资源和信息的重复浪费与不一致性,严重影响 整个设计过程的效率。当产品需要反复重分析时这个问题显得更为突出。参数化产品设 计的有限元分析、结构形状优化设计,只有在 CAD/CAE 一体化集成环境中才能得以圆 满解决。参数化的 CAD/CAE 集成和参数化动态 CAE 建模和分析技术,将为快速响应 设计提供有力的技术工具。

2.2.1 CAD 与 CAE 系统之间的数据传递手段

CAD与CAE之间的数据通讯是实现CAD/CAE集成平台的关键内容之一。由于各CAD系统和CAE工具对产品的几何信息的定义和要求并不完全兼容,因此,在进行CAD系统和CAE工具数据转换和数据映射时,不可避免地遭遇到很多技术难题,包括CAD系统的公差以及细节特征的处理、CAE工具所需的实体拓扑关系的重建以及IGES和STEP等标准格式文件的转换接口匹配。在进行直接的CAD数据转换过程中,往往需要做细节简化和模型修复等必要的拓扑关系重建和几何修补工作。

关于 CAD 与 CAE 系统之间的数据通讯现在常用的方法有以下三种:

第一种方法,通过专用几何模型数据文件传输,比如 IGES 和 STEP 等标准化的结构几何模型数据文件或者 CAD 系统的专用文件格式(如 AutoCAD 的 dwg 文件,Pro/Engineering 的 prt等)都可以用作数据载体,由 CAD 系统输入,被 CAE 系统读入进行后用于分析。该方法是当前相对比较通用的 CAD 和 CAE 之间数据通讯手段。由于存在前面提到的系统公差差异、数据文件格式的版本与各系统的相容性等问题,使用数据文件的方式进行模型信息传递可能会出现图形信息丢失问题,如丢面、尺寸单位不符等,往往需要设计人员对导入的模型进行手工的再加工和处理。此外,数据文件很难在不同系统之间实现几何参数变量的传递和双向数据传递。Gabbert 等人[122]研究了基于 STEP 数据格式的 CAD/CAE 集成,指出尽管 STEP 数据文件包含了结构的完整的模型信息,但对于系统集成来说还存在一定问题。首先,数据格式的工业标准并未实现完全统一,这将影响数据传递的效率并造成信息丢失;其次,基于数据文件的数据传递自一种单向的传递方式。基于应用系统间的,完全的,可以实现双向数据传递的集成方式才是集成技术未来的发展趋势。

第二种方法,在 CAD 系统中通过实体的离散表征,即基于自由曲线和自由曲面技 术利用三角形或四边形面片近似表征 CAD 模型,随后经过模型修补之后,作为结构网 格模型读入 CAE 系统,在此基础上进行定义有限元模型边界条件和属性并计算。这类 方法以牺牲几何模型的精度为代价,达到降低相应算法的开发难度和提高算法的健壮性 和自动性的目的,在某些领域是可行的,但对于模型精度要求很高的领域和方法的通用 性来说,不很适宜。

第三种方法是本文采用的技术方案,利用 CAD 系统的内核数据库在几何模型的基础上通过二次开发的手段定义有限元模型,将有限元模型信息输出到 CAE 系统。相比前两种方法,这种方法可以直接考虑实体的拓扑关系。通过开发手段,可以直接决定数据传输的内容和方式。此类方法对编程有一定要求,且由于 CAD 模型的复杂性、内核标准的不一致性以及 CAE 需求的多样性,开发这样的数据转换接口的难度较大。除了POSHAPE 系统开发和系统前期工作[33-35],目前相关的研究开发工作尚未多见。

本文工作就是在 CAD 系统中的几何模型上创建有限元模型,一方面通过几何建模数据库扩展和系统二次开发实现了有限元模型与几何模型的集成;另一方面 CAD 系统可以直接输出有限元模型文件用于 CAE 系统的分析计算,提高了集成平台之间数据传输效率。

2.2.2 CAD 与 CAE 系统之间的集成方式

CAD/CAE 软件集成是当前 CAE 领域的一项新技术,它可以将 CAD 的先进几何建模技术与 CAE 分析计算能力紧密结合,适应现代产品设计的动态特性,如系列化设计、模型修改与重分析的要求。

要将参数化的造型技术引入到结构有限元分析或者优化设计中,其首要条件是实现 CAD与CAE系统之间的集成。为了实现功能集成化的目的,多个应用软件需用集成在 一个系统内,搭建一个平台以调用各个集成模块实现功能上的集成。在工作过程,系统 分别运行不同的模块完成指定任务。虽然各个模块分工不同但相互之间必须协同工作。 在这个过程之中,各个模块的接口以及模块与模块、模块与系统之间的通讯,对于系统 的自动化程度和执行效率起着决定性作用。而这些问题主要都取决于平台的集成方式。 也就是说,集成平台以什么样的方式构建决定了平台的自动化程度和工作效率。

目前常用的 CAD 与 CAE 的集成方式可大致分为三类。

一类比较常用的是系统通过第三方平台进行 CAD 和 CAE 集成。CAD 与 CAE 之间 的数据交换借助于数据文件的形式,是一种基于外部数据交换的集成方式,CAD 和 CAE 全都以模块的形式集成到平台上。几何模型和有限元模型分别在 CAD 和 CAE 系统中完成,几何模型通过外部数据文件从 CAD 系统传递给 CAE 系统用于创建有限元模型。相 关工作有:纪福森等人[37]通过 VC 开发环境,实现了商业参数化 CAD 软件与 CAE 软件的集成应用。T.T. Chung 等人[38]提出了用于机械开关设计的 CAD/CAE 集成优化系统,该系统中 CAD 与 CAE 系统之间的数据传递依赖于 ACIS 文件。Christof 等人[39] 提出的用于飞行器概念设计阶段的参数化 CAE 方法也同样是基于 CAD/CAE 集成技术,

该方法使用 VBScript 语言将 CATIA 中的几何模型数据输出;使用 APDL 在 ANSYS 中 读入模型数据完成有限元分析和优化化设计任务。黄高文等人[40]实现了基于 CAD/CAE 集成的面天线参数化有限元建模方法,在 Delphi 开发平台上集成了 I-deas 用于结构的几 何建模, Ansys 用于参数化有限元建模和分析计算,以及 SQL Server 2000 用于数据管理。 该工作可以称作是此类参数化实现的典型代表。该系统的具体流程如图 2.12 所示:



Fig. 2.12 Integrated CAD/CAE System Developed based on Delphi Platform

在该系统中引入了 SQL 的数据库对面天线的几何模型进行专门管理。在 CAD 系统 中,利用二次开发手段从几何模型中提取对有限元建模有关的特征参数,包括形状尺寸、 边界约束条件和相关属性数据,输出到中央数据库中。CAE 系统将从中央数据库中读取 几何信息,利用参数化语言 APDL 完成参数化有限元建模和分析工作。与前面提到的类 似工作不同的地方在于,在集成平台上使用专业的数据库系统管理结构的几何信息,避 免直接通过数据文件传输可能引起的数据丢失和不兼容问题。该系统是面天线结构的参 数化有限元建模系统,具有一定的针对性,中央数据库中的存储信息也是针对于面天线 结构特点设计的。要将该方法用于其他类型结构的参数化有限元方法,则必须开发相应 的数据传输模式和存储结构。如果可以直接使用 CAD 系统的数据库完成有限元建模工 作,则整个系统的工作效率将能得到进一步提高。

此外商业结构优化设计平台 iSight®, Optimus®都是基于这种思想解决结构优化设计问题的。对于这类优化设计平台,要求被调用的软件功能满足以下两个条件:一是,被集成软件或软件模块能够提供相应的可执行文件,以批处理的方式被集成平台调用; 二是,被集成软件或软件模块提供明确的、固定的输入、输出数据文件格式,用于系统的数据传递。系统中各模块之间的数据传递全部依赖于数据文件。 另一类是,在 CAE 平台上实现的 CAD/CAE 集成。相比较而言,较容易实现的就 是在 CAE 平台上实现的集成。现有的大型商业 CAE 软件大都带有几何造型功能,能够 "自下而上"地创建基本的二维和三维几何模型。此外,还提供参数定义和流文件式的 二次开发接口。有了这些先决条件,用户可以通过编制特定的流文件,将 CAE 软件中 提供的操作流程化,并将关心的几何数据参数化定义。流文件在自动执行过程中,会根 据参数信息更新几何建模过程并顺序调用分析模块,完成用户指定的任务,从而实现结 构分析或者优化的参数化。类似的工作有国内陈伟等[41]提出了基于结构参数化的有限 元分析方法,利用大型商业有限元分析软件提供的基于参数化语言描述的二次开发接 口,编制可变参数的有限元分析流程文件。杜家政等人[120]在 MSC 上利用系统提供的 二次开发环境 PCL 实现了三心底机结构的形状优化设计。Yang 等人[111,113]利用 MSC/NASTRAN 提供的任务控制语言实现了针对三维实体和壳体结构的形状优化设计 方法。对于结构形状优化的灵敏度分析,通过引入设计单元和设计速度场等概念和参数 定义可以建立有限元模型与形状设计变量之间的对应关系,但在应用过程中这类工作都 局限于网格拓扑不变和结构几何小变形的形状优化设计。



Fig. 2.13 Parametric Design with APDL Procedure

以 Ansys 系统的 APDL 开发语言为例,基于参数化流文件实现的参数化有限元方法 的实现机理如图 2.13 所示。例如要创建一个圆柱体几何模型需要执行的操作包括:读入 定义圆柱体的几何参数(包括:圆心坐标、半径和高度),执行圆柱体建模命令。对于 模型的系列设计和反复修改,使用 APDL 编写参数化流文件,文件中首先记录了创建圆 柱体几何模型的操作步骤,然后对几何信息参数化定义。执行过程中,在修改模型之前 为参数化几何信息赋值,然后系统会自动执行文件中记录的命令流操作。这样就可以实 现不同尺寸圆柱体的参数化自动建模。

相对于前一种方法,在 CAE 平台上通过流文件二次开发形式实现的参数化有限元 方法因为避免了数据在不同系统之间传输引起的时间延迟和数据流失问题,在执行过程 中效率更高。但是 CAE 平台的 CAD 建模能力则不能与专业的 CAD 系统相提并论,而 且流文件是根据修改的设计参数重复执行建模过程完成模型的参数化,因此对模型的参 数化描述和纠错能力较弱,设计参数赋值不当时无法及时发现,对后面的有限元建模和 计算带来不必要的误导。而采用专业的 CAD 系统完成模型的参数化定义和控制是实现 通用、高效的有限元方法参数化方法的重要保障。这类开发手段常见于科学研究中,对 于一般的用户来说必须具备一定的 CAE 系统二次开发经验,且针对不同结构需要部分 或全部更新代码才能应用。

第三类是,在 CAD 平台上实现的 CAD/CAE 集成。CAD 最基本的功能是结构的几 何建模,对于产品设计来说,结构几何模型是根本,是产品开发周期中后续各部分,包 括 CAE, CAM 等的信息载体。也就是说,后续各项工作必须直接或间接的在产品的几何 模型上实施,因此在 CAD 平台上实现系统集成将有助于提高集成系统的整体效率。和 在 CAE 平台上实现的集成有所不同,要在 CAD 平台上引入 CAE 应用程序或功能模块 必须首先解决有限元建模与几何建模的一体化问题;同时,要将参数化引入到结构分析 或者优化设计中,还必须实现有限元建模的参数化。从现有文献看来,类似的研究开发 工作较少提及,只有关振群等人[33-35,42,90]提出了一种考虑结构非线性特征的参数化 形状优化方法,并在参数化实体造型软件 MDT3 上开发了相应的集成系统。本文工作就 是在此基础上,在 MDT6 上开发完成。在第三章中将对本文参数化集成平台的开发进行 详尽介绍。

综合上面提到的三类集成方法,前两类方法主要侧重于系统内各个模块通过数据传 递或数据重组实现集成,开发是针对特定类型结构,相对比较容易完成。但得到的集成 系统在应用上有一定针对性,必须对系统开发有一定的了解才能进行操作。与之不同, 在 CAD 中实现的集成系统可以提供基于专业的参数化几何模型的模型集成技术,在几 何建模系统中实现有限元模型的定义和有限元模型与几何模型的参数化一体化,不需要 花费不必要的时间和效率在几何模型信息传输。这对系统的开发提出了更高的要求,集 成平台开发的难度较大。这类方法实现的集成系统在应用上有一定的普遍性且操作简 便,只要是在 CAD 系统中参数化建模的结构都可以在该系统中进行形状优化设计。

2.3 结构形状优化设计中的关键技术

实现结构分析与优化设计与设计有机结合的优点在于,它可以使工程、设计人员在进入耗时、耗财的制造和物理原型测试之前,更好地了解产品是如何工作的,并尽早发现产品设计中的缺陷和不足。因为在产品研发的后期阶段,投入成本是呈指数增长的,所以在概念设计阶段使用 CAE 分析进行改进和优化,可以大大减少整个产品开发过程的时间和投入。

对于结构形状优化设计问题来说,结构要在优化算法的控制下反复更新结构的几何 与有限元模型并进行重分析直到优化收敛,因此有限元网格网格剖分算法、优化算法和 灵敏度分析都是优化设计中的关键技术。下面分别就目前这三个技术领域的各个主要应 用方法做以简要介绍和比较,并介绍本文工作中使用的方法。

2.3.1 网格剖分算法

不同于尺寸优化和拓扑优化中有限元网格在迭代过程中保持初始状态不会改变,在 结构形状优化设计过程中,结构的几何模型根据设计变量数值的改变在不断变化,因而 有限元模型也需要随着更新。在有限元模型中需要更新的数据包括两部分,一部分是网 格单元信息,另一部分则是附在网格单元上的有限元模型物理信息(比如边界条件、材 料性质等)。这里首当其冲的就是有限元网格模型,因为在迭代过程中,网格模型必须 反复更新,这要求网格剖分算法必须非常健壮,而且支持自由网格生成。

常见的网格剖分算法分为:

1) 通用的结构化有限元网格生成方法

对于简单的单连通域问题,常使用通用的结构化有限元网格生成方法。使用这种方 法生成的有限元网格在每个节点上单元数目是一致的。典型和代表性的算法是映射法, 它既可以用来生成二维问题的结构化四边形网格单元,又可以用来生成三维问题的结构 化六面体网格单元。它的基本步骤是:通过适当的映射函数将待剖分物理域映射到参数 空间形成规则参数域;对规则参数域进行网格剖分;将参数域的网格反向映射回物理空 间,从而得到物理域的有限元网格。

对于比较规则、简单的单连通域问题,使用映射法非常适合,优点是速度快、单元 质量好且密度可控制。结构形状优化设计中用到的设计单元就是使用这种方法进行剖 分,通过映射方法在迭代过程中还可以保证网格的拓扑保持一致,方便灵敏度信息的计 算。但是对于复杂多连通域问题,就需要在剖分之前将结构划分成几何形状规则的可映 射的子域。对于工程中常见的复杂三维结构来说,这种方法在执行上存在较大困难,通 用性较低。

2) 通用的非结构化有限元网格生成方法

通用的非结构化有限元网格生成方法生成的有限元网格在每个节点上的单元数目 并不一定相同。对于二维问题的典型代表是三角形单元网格;对于三维问题的典型代表 是四面体单元网格。常用的剖分算法分为两类:一是映射法;二是直接法。

映射法的基本步骤与结构化有限元网格中的类似,区别在于参数域上划分的单元为 三角形或四面体单元。因为对于复杂连通域问题同样存在子域划分的困难,通用性差, 因此映射法并不常用。与映射法不同,直接法直接在问题的物理域上进行划分,划分过 程中以结构的局部几何信息为参考,因此通用性较高。常见的直接法包括 Delaunay 三 角剖分方法、推进波前法(AFT 方法)和基于栅格方法。其中栅格方法是将一组不相交 的尺寸相同或不同的栅格覆盖在目标区域上,保留目标区域内的栅格,删除区域外的栅 格,对边界上的栅格进行细化处理得到最终的网格模型,对于四边形和六面体单元的网 格模型有着独特的优势。对于任意复杂的三维曲面和实体结构,Delaunay 三角剖分方法 和 AFT 方法则较为实用。根据结构的几何模型信息,这两种方法采取不同的布点策略, 可以实现三角形和四面体单元的结构网格模型全自动生成[43]。

在本文工作中,参数化结构形状优化系统 POSHAPE 分别集成了 Delaunay 三角剖分 方法和推进波前法两种网格剖分算法,提供对任意复杂三维实体结构的有限元网格全自 动剖分功能。

2.3.2 优化算法

结构最优化设计是一种现代设计方法,它根据最优化原理和方法,综合各方面的因 素,使用一定的数值算法,在可行设计域进行搜索,以选出在现有工程条件下的最佳设 计方案。优化算法也可以看作是一种搜索技术,搜索设计域内使结构某一性能达到最优 的设计变量取值情况。可用于结构优化设计的优化算法可分为基于梯度的优化算法和不 基于梯度的优化算法。

● 基于梯度的优化方法

基于梯度的优化算法包括准则法、可行方向法、惩罚法、序列线性/二次规划方法等。 根据结构当前的响应在局部区域内计算使目标函数下降最快的方向和设计变量扰动步 长。

> Min. F(x)Sub.to $g_i(x) \le 0$ j = 1, M $h_k(x) = 0$ k = 1, L $x_i^L \le x_i \le x_i^U$ i = 1, N (2.1)

对于(2.1)式描述的典型优化问题, F(x)是作为优化的目标函数, $g_i(x)$ 和 $h_k(x)$ 是优化的不等式和等式约束, x_i 是设计变量。在基于梯度的优化算法中, 要在当前设计步 m, 由灵敏度信息计算当前设计变量 x_i^m 的扰动方向 α^m 和步长 S^m , 得到新的设计变量取值 x_i^{m+1} , 如下式(2.2)所示, 直到迭代收敛, 获得最优解。

$$x_i^{m+1} = x_i^m + \alpha^m \cdot S^m \tag{2.2}$$

• 不基于梯度的优化方法

不基于梯度的优化算法常见的有遗传算法、响应面方法、模拟退火方法等。对于无 法得到梯度信息的优化问题来说,常用此类方法。这类方法基于枚举技术的引导随机搜 索技术或概率搜索技术对设计域更大空间的搜索,基于一定的数值试验,对若干样本的 计算获取足够的信息,进而找到最优解。这类方法不需要对梯度信息的计算,但是需要 大量的数值试验设计,以样本的计算结果作为搜索最优解的判断依据。目前模拟退火算 法、遗传算法和响应面算法都是此类的流行算法。

这类优化算法相对于基于梯度的优化算法适用面更广,它整个设计域内通过某种策略进行随机搜索,更容易找到结构的最优解,但是在实际应用中也存在一定问题,一是计算量很大,优化迭代是基于数值试验积累的信息来执行的,因此必须进行足够的数值分析才能更快、更好地搜索全局最优解;二是最优解的搜索依赖于数值试验的设计,在实际应用中,如果数值试验样本的选取不适当,将无法找到结构的最优解。总的来说,这类方法比较适用于连续和离散变量组合优化设计问题。

2.3.3 灵敏度分析

灵敏度分析是基于梯度信息的优化算法的基础,通过梯度搜索使目标函数下降最快的方向。在结构灵敏度的算法中,不仅要考虑计算效率和精度,而且要考虑到便于程序 实现。结构灵敏度分析的解析方法,主要可以分为离散型和连续型两大类。此外还有使 用有限差分的数值方法。

● 离散型方法

离散型方法时首先将结构离散化(通常为有限元模型),然后将分析问题的控制代数方程对设计变量求导数,建立灵敏度的计算公式[121]。以结构静力问题为例,有限元控制方程是:

$$KU = P \tag{2.3}$$

其中*K*是结构刚度矩阵, U和*P*分别是位移向量和荷载向量。设 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 设计变量,结构响应的状态变量(亦即优化中的目标函数和约束)R可以用虚荷载向量 Q表示为:

$$R = Q^T U \tag{2.4}$$

将(2.3)式和(2.4)式对设计变量x_i求导数,就可以得到基本的灵敏度计算公式:

$$K\frac{\partial U}{\partial x_{I}} = \frac{\partial P}{\partial x_{i}} - \frac{\partial K}{\partial x_{i}}U$$
(2.5)

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{\partial Q^T}{\partial x_i} U + Q^T \frac{\partial U}{\partial x_i} = \frac{\partial Q^T}{\partial x_i} U + Q^T K^{-1} Q_P$$
(2.6)

其中 $Q_p = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial K}{\partial x_i} U$ 是拟荷载向量。这里要求解结构响应对设计变量的灵敏度,首要问题是要计算拟荷载向量 $Q 和 \partial Q^T / \partial x_i$ 。对于以杆件截面和板壳厚度等为设计变量的结构尺寸优化设计问题来说,单元刚度矩阵和虚荷载的元素与设计变量之间大都可以找到显示的表达关系式,因此可以很容易的得到灵敏度的解析表达式,这就是通常的解析

方法。 对于结构形状优化设计问题来说,设计变量是控制边界形状的任意几何参数,单元 刚度阵同设计变量之间的关系变得很复杂。单元刚度阵的灵敏度 $\partial K_e / \partial x_i$ 的公式推导和 程序编写非常困难,有关应力的状态变量的虚荷载向量灵敏度 $\partial Q^T / \partial x_i$ 也存在同样的问 题。因此解析法在形状灵敏度分析中受到很大限制。针对这一问题 Rickettd 等人[44]提 出在单元一级使用有限差分的方法计算单元刚度阵和荷载的灵敏度:

$$\frac{\partial K_e}{\partial x_i} = \frac{K_e(X_i + \Delta X_i) - K_e(X_i)}{\Delta x_i}$$
(2.7)

上式中下标 e 表示单元号, Δ*X_i* = (0,…,Δ*x_i*,…,0)。继而对于其他的状态变量也可以 采用单元级的有限差分方法计算灵敏度信息。这种基于单元局部差分的灵敏度分析方 法,称作半解析法。顾元宪等人[45,46,88]将通用有限元分析程序 DDJ-W 作为半封闭的 "黑箱",在 MCADS 中使用半解析法计算用于结构形状优化设计的灵敏度信息,并使 用 MCADS 解决了一批工程问题。

● 连续型方法

对于形状优化设计问题来说,很难找到结构响应与形状设计变量之间的显示函数关 系,因此很难用离散的解析方法直接求解结构灵敏度信息。形状优化过程中结构的网格 随着设计变量的改变不断更新,可以通过建立网格节点与设计变量之间的关系来计算灵 敏度信息,这就是连续型方法,而网格节点坐标随设计变量的改变则称为设计速度场 *V*(*x*_r,τ) (2.8)。连续型方法中多是从结构的连续介质出发,将优化问题表示为泛函极值 形式,通过泛函变分或者物质导数的方法得到沿边界积分形式的灵敏度表达式,离散后 数值计算,在程序实现时,可以利用已有的结构分析程序,增加独立的模块来计算这些 边界积分[103]。对于此类方法,设计速度场的计算时关键,Choi等人在[103]文中分析 并比较了四种常用计算方法,它们分别是有限差分方法、等参映射方法、边界位移方法 /虚拟荷载方法,以及等参映射方法和边界位移方法的混合方法。经过算例分析和比较, 文中指出混合方法能较好地满足设计速度场计算在理论和应用上的要求。

$$V(x_{\tau},\tau) = \frac{dx_{\tau}}{d\tau}$$
(2.8)

要实现通用的形状优化设计方法,连续型的灵敏度计算方法也存在着一定的局限 性。首先,有限元计算的边界应力误差较大,这对灵敏度计算精度有影响。而且,边界 荷载和不同单元的边界数值积分,都要适当处理。Hardee 等人[64]也指出,基于节点的 参数坐标计算设计速度场存在着一定的限制,对结构外表面类型有着严格要求,对于非 单连通、中间开孔或剪切曲面在使用映射法更新网格模型时均无法保证节点位置更新与 曲面形状改变的一致性,仅适用于特定类型结构的形状优化设计。此外,为了保证灵敏 度计算的连贯性,要求结构的网格拓扑关系在迭代过程中保持不变,但结构的几何外形 改变较大时,则不得不中断设计或者重新进行网格剖分,开始新一轮优化迭代。

● 有限差分方法

对基于离散型还是连续型的灵敏度计算解析方法来说,尽管它们的数学推导非常漂 亮,计算精度也较高,但是在实际应用中存在一些问题尚未得到很好地解决。这主要是 由形状优化问题的特殊性和解析方法对有限元网格拓扑结构不变要求引起的。在优化迭 代过程中,灵敏度计算需要保持一定的连续性,而此类方法中形状优化设计变量直接或 间接与节点相关,这就要求有限元网格模型的拓扑结构应在迭代过程中保持不变。结构 在形状优化过程中,结构的几何模型和有限元模型都在不断改变。为了达到网格拓扑不 变的要求,常使用映射方法完成有限元网格的生成和更新。而映射法对于结构几何的小 变形可以很好的满足,对于几何大变形情况,则生成的网格质量不能得到保证,容易出 现单元畸形,甚至网格崩溃。以往的结构形状优化设计大都是在结构的小变形范围内实 现的。目前现有的网格生成方法都不能很好地支持基于节点的灵敏度解析方法。在本文系统中将采用有限差分方法计算结构响应对设计变量的灵敏度导数。

有限差分方法的数学基础是等价值理论,它假定被近似的导数函数是连续的。但实际上,这个假定并不是对任意一个函数都能严格满足,在计算过程中设计变量步长的选取会引起数值计算的截断误差和舍入误差。当步长选择较大时,截断误差将严重影响计算结果与解析解的近似程度;而步长选择较小时,系统的计算量将相应增加,导致迭代过程中累计的舍入误差将不可避免。对于有限差分方法,步长的选取是优化迭代过程中一个关键且敏感因素。实际经验表明,在迭代过程中根据当前的灵敏度导数选择不同的设计步长,将有助于有限差分方法获取更接近于真实的灵敏度信息。而由此带来的系统计算量增加对于当前高效的硬件系统来说还是可以接受的。

2.4 商业和非商业结构形状优化设计软件

尺寸优化问题作为结构优化设计问题中最简单的一种,无论从理论还是应用它的研 究已经非常成熟,已经可以实现对复杂实际工程结构的尺寸优化设计。大型的商业 CAE 软件系统大都提供尺寸优化设计功能,如 Altair®的 OptiStruct®[47], ANSYS®, MSC.NASTRAN®[48]等。针对梁、杆、膜、板、壳单元及其组合结构的多学科耦合问 题和复合材料设计问题的尺寸优化设计方法是结构有限元分析和优化设计软件 JIFEX® 的一大特色,解决了很多大规模的工程实际问题[50-57]。相比尺寸优化和形状优化,拓 扑优化是更高一层次的优化设计方法,从 90 年代起开始受到人们的重视,至今仍是研 究的热点问题之一。拓扑优化是一种启发式算法,它在结构拓扑和形状未知的情况下, 由初始设计域,通过对材料的增减得到满足给定功能和性能要求的设计方案。因为问题 的数学模型是定义在设计域的背景网格之上,可以建立结构响应与设计变量的解析表达 式,在软件实施上不存在太大的技术难题。拓扑优化设计方法已经在若干工程领域,如 航空、航天和汽车,得到了认可。其中代表性的拓扑优化商业软件是 OptiStruct®。此 外还有很多非商业化的可用于结构拓扑优化的软件工具,如丹麦技术大学 Rasmussen 等 人开发的结构尺寸、形状和拓扑集成优化设计工具 CAOS(Computer Aided Optimization System)[99-101],和在它的经验基础上开发的结构优化软件 ODESSY (Optimum DESign SYstem)[102]; 德国 Karlsruhe 大学 Mattheck 等人开发的计算机辅助优化设计软件 CAO (Computer Aided Optimization)[58],以及在它基础上扩展开发的结构优化软件 SKO (Soft Kill Option)[59,60].

尽管早于拓扑优化问题的研究,结构形状优化设计相关的技术手段也一直在不断完善,但它在实际工程中的应用远未得到应有的重视。主要还是因为结构形状优化设计方

法与产品 CAD 设计联系不紧密;对结构形状的描述方法不统一;不能很好地处理结构 外形的大幅度改变问题,目前大都局限于结构局部外形改变或小尺度形状变化问题。目前可用于解决结构形状优化设计问题的商业软件有 OptiStruct®, MSC.NASTRAN®, Pro/MECHANICA®[62,89], iSight®, Optimus®。以及非商业化软件 CAOS, Shape200[61]。

下面简要介绍现有结构形状优化设计软件的设计思路。

① Altair®的 OptiStruct®

OptiStruct 可以用来求解一般的形状优化问题如边界移动等。利用 Altair HyperMesh 软件中的 AutoDV 和 HyperMorph 来生成复杂形状的摄动向量,用户需要定义描述形状 改变的控制节点,将节点位置作为设计变量,在优化迭代过程中摄动向量将被不断调整 以改变节点位置,而节点位置的变化将导致结构边界形状的改变。如图 2.14 中 Node73,Node74,Node75 等被定义为控制节点,通过这些控制节点的位置改变可以调整结 构某一尺寸。形状优化结果可通过 OSSmooth 生成几何数据输入到 CAD 系统中。



Fig.2.14 Shape description for optimization in Optistruct

2 MSC.NASTRAN®

NASTRAN 是 MSC 系列软件中用于结构有限元分析的大型通用软件,提供结构形状优化设计功能。在形状优化设计问题中,以结构的有限元模型为研究对象,通过改变单元节点坐标来改变结构的几何外形。在优化迭代过程中,节点根据结构在给定工况下位移场计算结果移动位置。

3 CAO/SKO

CAO 是一个经验化方法,它借鉴了树木和骨骼的生物自适应生长原理,通过形状 设计降低结构的应力峰值,使结构尽可能地达到满应力状态。在优化设计过程中,给定 一个应力水平标准 σ_{ref} ,与当前设计中结构单元节点应力 σ_i 进行比较,应力过高的节 点所在单元生长,应力较低的节点所在单元收缩,生长和收缩的尺度参考由应力差 $(\sigma_{ref} - \sigma_i)$ 计算的各节点虚位移。SKO 则是进一步将生物自适应生长原理用于结构体 内单元生长计算,通过优化过程中单元的删减在结构内挖孔。在实际计算过程中,运用 满应力准则,以单元材料的杨氏模量为设计变量,给需要删减的单元赋以很小的数值。 该软件主要用于解决结构的拓扑优化问题。

④ CAOS

CAOS 是丹麦技术大学 Rasmussen 等人最早于 1989 年开发的,最初的版本主要用 于解决平面板结构在静态荷载作用下的形状优化设计,使用设计单元方法对结构初始几 何模型进行划分,以设计单元的控制节点对结构进行形状描述并用做设计变量。之后 Birker 和 Lund 等人对软件进行扩展,可解决三维结构和考虑热弹性的结构形状优化设 计。

在上述工作的基础上,Lund 等人于 1994 年开发了一套通用的结构优化设计系统 ODESSY,可处理与结构的尺寸、形状和材料相关设计变量的优化设计问题。该系统支 持与商业的 CAD 系统,如 AutoCAD 和 Pro/Engineering 集成用于结构形状优化设计。系 统中将结构的几何描述分为三个层次,第一层次是结构的离散变量,如点、向量等;第 二层次是可对结构的边界进行描述的曲线或曲面;第三层次是可以对整个实体模型进行 描述的几何造型数据结构。这里,系统对后两类几何描述方法的支持使得可以实现与大 多数商业 CAD 系统的集成。在实际计算过程中,CAD 系统将被作为模型翻译器将结构 转换为等价的曲面、曲面模型,传递给 ODESSY 进行结构分析和优化设计。

5 Shape200

Harzheim[61]等人引入图形学中的自由变形控制理论,在优化过程中首先构造结构 的背景控制网格,对于实体结构来说,背景网格由规则的六面体单元组成,覆盖了结构 设计域。根据预先定义的精度,使用类似 Bezier 曲面技术的 Bernstein 多项式,以背景 网格选取足够的节点为控制节点对结构外形进行描述。这里背景网格上的控制节点将用 作形状优化的设计变量,优化结构的几何外形。因为控制节点数目远小于边界上单元节 点的数目,使用这种方法计算量有所节省,但这两种方法都是以点坐标为设计变量。且 对于具有复杂几何外形的结构来说,构造几何外形的 Bernstein 多项式控制方程的难度 可想而知。

6 Pro/MECHANICA®

Pro/Engineering 是大型商业参数化 CAD 造型软件。Pro/Mechanica 则是 Pro/Engineering 软件中用于结构分析和优化设计的模块。作为专业的 CAD 造型系统, 在 Pro/Mechanica 中实现了以结构尺寸参数为设计变量的参数化结构形状优化设计方法 和参数研究方法。在形状优化过程中, 剖分采用了 p-element 方法, 将有限元网格与结 构的几何边界绑定在一起。当结构形状改变时, 单元的精度会相应提高以满足计算精度, 而不是每一个迭代步都进行网格重剖分, 相应的形状设计变量将被限定在相对小幅度范 围内变化。

⑦ 集成优化设计平台 iSight、Optimus

除了专业的结构优化设计平台,商业化的集成设计平台 iSight 和 Optimus 可以通过 仿真分析流程集成自动化实现结构形状优化设计。通过流程集成的程序化设计和格式化 的接口定义实现多个应用系统的过程集成。对于结构形状优化来说,通过反复调用各个 应用系统更新结构的几何和有限元模性。因为是过程集成,优化大都采用不考虑梯度信 息的方法如响应面方法,因此需要辅以一定的数值试验来构造设计搜索空间以寻找最优 解,计算效率和纠错能力相对较差。

在上述软件的结构形状优化设计系统中,大都使用结构的有限元模型描述结构的几 何外形,并以边界上的单元节点作为优化的设计变量。对于那些对产品外形没有太多限 制,允许以自由曲面、曲面描述的结构几何外形,且更关注于产品性能提高的的设计问 题来说,以节点坐标为设计变量的形状优化设计手段有较大优势,如图 2.15 所示。而对 于机械制造业中存在的大量结构设计问题,除了产品的结构性能,还要求产品的设计满 足其他给定的功能性要求、可制造性、装配关系等,这些方法则显得不是很有效。因此 限制了结构形状优化方法在工程中的推广和应用。而使用几何模型为研究对象则可以满 足上面的要求,实现产品设计、分析和制造信息的一体化。基于离散设计变量的形状优 化对于大规模或具有复杂几何边界的结构来说,计算量激增。而对于网格拓扑结构的限 定是的结构形状的变化局限于小范围之内。除了以上问题,Townsend 等人[63]提出,对 于多学科结构优化设计问题来说,也应以结构的几何模型为研究对象,只有几何模型才 能满足各个不同学科对设计模型的不同要求。Hardee 等人[64]也指出基于 CAD 的设计 模型是实现多学科形状优化设计的关键,。该文中给出基于 CAD 模型的参数化实体结 构形状优化设计方法。



图 2.15 以节点坐标为设计变量的结构形状优化设计问题的初始和最优设计 Fig. 2.15 Initial and Optimal Design for Shape Optimization with Node Coordination Design Varaiables

本文提出的参数化形状优化设计方法通过与 CAD 系统的集成,实现以结构的几何 模型为设计对象,以结构的尺寸参数为设计变量,目的就是为产品设计提供简单、方便、 实用的优化设计手段。

3 基于参数化实体造型技术的参数化形状优化设计平台 POSHAPE

3.1 引言

科学计算是继理论和实验之后现代科学家进行科学和技术研究的第三大手段。它可 以帮助科学家揭示用物质实验手段尚不能表现的科学奥秘和科学规律。同时,它也是工 程科学家的研究成果,理论、方法和科学数据的归属之一。科学计算的软件和数据库, 可成为推动工程和社会进步的最新生产力。

开发参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE 的目的就是在专业的 CAD 系统 Mechanical Desktop R6.0(MDT®)上,通过二次开发手段实现结构形状优化数值方法,提供可用于产品概念设计阶段的分析计算工具。在本章第1节对系统开发平台 MDT6 和它 的二次开发环境做以介绍。对于 CAD/CAE 集成技术的研究已有多年,与现有的 CAD/CAE 集成技术有所不同,本文的侧重点是在专业的参数化 CAD 造型系统中实现了 基于 Brep 数据结构的有限元建模与几何模型的无缝集成,并将之用于结构形状优化设计中。在本章第2节将介绍基于参数化实体造型的参数化有限元建模技术。第3节介绍 参数化结构形状优化设计平台的系统架构和流程设计,并通过一个算例给出 POSHAPE 的基本操作流程。最后将对该平台的开发工作进行小结。

3.1.1 系统开发平台

Autodesk 公司将其三大计算机辅助设计软件 AutoCAD、AutoCAD Design 和 AutoSurf 有机的集成为一体得到的 MDT 是面向机械工程设计的专门性软件,集参数化 实体造型技术、面域造型、二维三维双向关联绘图等为一体。主要包括四个功能模块: 实体造型模块 (Part)、曲面造型模块 (Surface)、装配模块 (Assembly)和工程图纸 生成模块 (Drawing) [30, 65]。

MDT 的主要功能特点如下:

- 1. 基于特征的参数化实体造型,可以方便地完成复杂三维实体造型、编辑和修改。
- 2. 基于 NURBS 的曲面造型,可以构造各种各样的复杂曲面,以满足诸如模具设计等对复杂曲面的要求。
- 3. 可以方便地完成几百甚至上千个零件的大型装配。
- 提供完整的模型和绘图的双向联结,把设计与绘图融为一体,缩短设计绘图周期, 最大限度地减少由绘图产生的人为差错。
- 5. 具有标准的 Windows 菜单和对话框,使用方便快捷。同时提供 DWG、STEP、 STL 等 12 种数据交换格式,可以方便地与其它软件系统进行数据交换。

MDT 允许用户使用智能参数化的特征进行造型,参数化特征能够对尺寸进行简单的编辑,例如:当用户改变零件的厚度时,零件内部的特征结构将随着自动调整;而要同时修改几个特征时,只要在全局参数表中简单地改变它们的尺寸,就可以快捷地完成。 它可以为设计人员提供对几何模型最快速、便捷的模型操作和控制方法,是设计人员不可或缺的设计工具。

此外,MDT 还具有良好的开放性。除提供了开放的菜单定义格式、DXF 和 DXB 等文件格式之外,它还为程序设计人员提供了强有力的编程接口 ObjectARX 和 MCAD API。通过该接口,开发者不仅可以扩展 MDT 的菜单系统和命令集,还能直接访问、 修改和扩展 MDT 的数据库系统,与绘图系统交互,这就为系统功能的扩充提供了条件。 开发者可以根据自身的需要对系统进行扩展和改造。

以上就本文采用 MDT 作为参数化几何造型平台的原因。

3.1.2 系统开发环境

目前 CAD/CAE 软件提供的二次开发接口主要分为两类,一类是脚本语言式开发接口,如 AutoCAD 中的 Script 开发接口、Ansys 中 APDL 开发接口、CATIA 中的 VBA/VBScript 和 MSC.Patran 中的 PCL 开发接口等;另一类是非脚本语言式开发接口,如 MDT 中的 ObjectARX/MCAD 开发包、CATIA 中的 VAA、ABAQUS/MARC/ADINA 提供的 Fortran 和 MSC.Nastran 中的 DMAP 开发接口等。其中脚本语言式开发接口是目前比较常用的 CAD/CAE 集成系统的开发手段,这类方法为用户提供了一种类似批处理形式的调用系统内部命令的方式,也称作解释语言。它将指定的若干命令和调用参数按调用顺序,记录并预先写入流文件。在执行过程中,系统将自动读取流文件并顺序执行文件内命令流,完成指定操作。这类方法简便易行,但流文件的针对性较强,每个文件的编写都是针对于某一特定问题,必须预先记录操作流程,通用性不高;此外除了系统命令和系统参数,流文件对系统的访问层次比较低,无法实现更复杂的操作。非脚本式语言的开发难度较高,但是它可以访问更深层次的系统信息,如几何造型数据库,此外还支持实现算法的用户,为在 CAD 系统中开发可实现具有复杂功能的系统平台提供了可能性。

与脚本语言式开发接口不同,ObjectARX (AutoCAD Runtime Extension)[66-68]是 AutoDesk 公司随 AutoCAD R13 及以上版本推出的新一代功能强大的二次开发工具,属 于非脚本语言式开发接口。它以面向对象的方法对 AutoCAD 的系统功能进行了分类、 封装,提供了一套 C++为基础的面向对象的开发环境及其编程界面,允许用户利用编程 工具 Visual C++及其基础类库 MFC 对 AutoCAD 作二次开发,扩充 AutoCAD 的类和协 议,创建新的 AutoCAD 命令。ObjectARX 应用程序本质为一动态库(DLL),用户开发程 序编译后生成的动态库可以共享 AutoCAD 的地址空间,直接访问图形数据库,使用 AutoCAD 的核心数据结构和函数。因此,以 ObjectARX 开发的应用程序在 AutoCAD 中 能以很快的速度运行。Autodesk 公司的机械平台 MDT 也是基于此开发的。此外,MCAD API(Mechanical Application Program Interface)是 MDT 的应用程序接口函数库。它增强并 扩展了 ObjectARX,提供了对参数化特征编辑和高层建模等 MDT 扩展功能的开发支持。

下面分别介绍 ObjectARX 和 MCAD 这两个开发包。

1) ObjectARX API

这部分分别介绍 ObjectARX 的类库和 ARX 应用程序基础。

ObjectARX 的类库

ObjectARX 提供了 6 个主要类库,来实现对 AutoCAD 的访问和控制。AcRx 库为 AutoCAD 运行扩展库,它为 ARX 应用程序的初始化及连接提供了系统级别的支持; AcEd 为 AutoCAD 命令扩展库,用于管理扩展的 AutoCAD 命令; AcDb 为 AutoCAD 数据库访问库,用于访问控制 AutoCAD 数据库对象; AcGe 为 AutoCAD 通用几何库,用 于表示 AutoCAD 数据库对象的几何特性及完成相关的几何计算; AcGi 为 AutoCAD 图 形界面库,用于 AutoCAD 数据库中可见实体的绘制; AcBr 为 AutoCAD 边界描述库,用于描述二维面域和三维实体几何外形与拓扑结构。其中, AcDb、AcGe 和 AcGi 是 ObjectARX 的核心类库。

在本文工作中,AcGe 和 AcBr 两个类库是实现参数化结构形状优化设计平台的关键。通过 AcBr 可以方法实体对象的拓朴信息,而 AcGe 则可以访问与拓朴元素相对应的几何元素的几何信息并支持相应的几何操作。借助于这两个类库,可以获取对象实体的完整几何拓朴信息,并在实体结构的拓朴结构上定义有限元模型。这些都是实现基于参数化有限元建模的必要条件。根据本文的应用重点,下文将对 AcGe 和 AcBr 类库进行详细介绍。

① AcGe库

ObjectARX的 AcGe 类库是包括点、直线、曲线、曲面等诸多几何元素的类的集合。 它为 Autodesk 所有的产品(如 AutoCAD, MDT, Inventor)提供了一个通用的几何元素访 问方法。AcGe 类库是一个纯数学的类库,库中的类不直接与图形或数据库打交道,但 是它们中的大多数却可以被 ObjectARX 的 AcDb 库和 AcGi 库所调用。下图 3.1 给出了 AcGe 类库包含的部分类及其继承关系。

AcGe 类库中不仅包含简单的几何类型,如点、向量、矩阵、二维和三维的线形实体及平面实体类,还包含有复杂的几何类,如曲线类(样条曲线)和曲面类(NURBS 曲面)。 AcGe 类库用 AcGeEntity2d 类(二维几何实体类)和 AcGeEntity3d 类(三维几何实体类), 来定义曲线与曲面的属性和方法。曲线类中的属性除了包含曲线的几何定义外(如直线 段的几何定义为两个端点的坐标),还有方向性、周期性、封闭性、平面度和长度等特 征属性。曲线类中的方法主要包括曲线几何定义的存取函数、曲线参数方程求值与逆向 求值函数、曲线特征属性获取函数,以及各类几何变换函数(如旋转、缩放等)和曲线与 其它几何对象的关系判定函数 (如曲线与曲面的相交性测试,曲线与点的包含性测试、 对面的投影等)等。曲面类的属性和方法与曲线类相似,这里就不再一一赘述。



图 3.1 AcGe 类库层次结构 Fig. 3.1 Hierarchy for the AcGe Library

AcGe 类库中的曲线和曲面都是参数化的,其参数方程可表示为: 曲线参数方程 P(x, y, z) = f(t) $t \in [t_{\perp}, t_{\top}]$ 曲面参数方程 P(x, y, z) = f(u, w) $u \in [u_{\perp}, u_{\top}] w \in [w_{\perp}, w_{\top}]$

② AcBr 库

AutoCAD 自 R13 以来就开始使用 B-rep 作为实体模型的标准表示方法。从 B-rep 的 角度看,实体是一种由面、环、边、点等拓扑元素和曲面、曲线、点等几何元素按一定 方式组织而成层状结构模型。它包含有几何数据和拓扑关系两个方面的信息,图 3.2 给 出了一个实体边界表示的结构示意。



图 3.2 实体建模的边界树表示结构示意图

Fig. 3.2 Structure of Boundary Representation Tree for Solid Modeling

拓扑关系涵盖了组成结构的所有几何拓扑对象,如顶点、边、面、环和体,以及它 们之间的邻接和归属关系。上图中各几何拓扑对象代表的意义如下,

顶点(Vertex):几何造型中的最基本元素;

边(Edge):一维几何拓扑元素,是相邻表面的交集。直线边由两个端点确定,曲线边由一组控制点或者型值点确定;

环(Loop): 由有序、有向边界组成的面的封闭边界,也就是用来界定面的边界, 保证面的有界性的几何拓扑元素。

面(Face): 二维几何拓扑元素,是形体上一个有界、有向的区域。由一个外环 和若干个内环界定面的范围。一个面可以没有内环,但一定有且只有一个外环。面的外 法矢方向定义面定义其正方向。当面的外法矢向外,则此面为正向面,反之为反向面。 壳(Shell):外壳是一些点、边、环、面的集合,其所含的面集有可能围成封闭的 三维区域,从而构成一个实体;外壳还可以表示任意的一张曲面或若干个曲面构成的面 组;外壳还可以是一条边或一个孤立点。

体(Body):三维几何拓扑元素,是由封闭表面围成的空间。

其中顶点、边和面都有相对应的几何数据,可以通过程序访问。大部分几何元素都 是有方向性的,这对于实体的定义和操作有着非常重要的作用。

ObjectARX 中的 AcBr 类库向用户提供了一系列用于获取 AutoCAD 实体的边界表示对象及其几何拓扑信息的类和函数。AcBr 类库包含的类及其继承关系如图 3.3 所示。

AcRxObject (对象类)

- AcBrEntity	(B-rep对象类)		
AcBrBrep	(B-rep中的体类)		
—AcBrFace	(B-rep中的面类)		
AcBrLoop	(B-rep中的环类)		
AcBrEdge	(B-rep中的边类)		
AcBrVertex	κ(B-rep中的顶点类	ž)	
- AcBrTraverser	(穿梭器类)		
AcBrBrepF	aceTraverser	(体-面穿梭器类,	用于遍历体中包含的面)
AcBrFaceL	oopTraverser	(面-环穿梭器类,	用于遍历面中包含的环)
AcBrLoopE	dgeTraverser	(环-边穿梭器类,	用于遍历环中包含的边)
AcBrLoopV	ertexTraverser	·(环-点穿梭器类,	用于遍历环中包含的顶点)
└── AcBrEdgeL	oopTraverser	(边-环穿梭器类,	用于遍历包含边的环)

图 3.3 AcBr 类库常用对象类结构层次图

Fig. 3.3 Hierarchy for the AcBr Library

用 AcBr 类库访问 AutoCAD 实体边界表示对象 (点、线、面、体)的方法主要有以 下两种:

第一种:通过穿梭器(Class Traverser)进行访问

(1) 首先建立一个 AcBrBrep 对象。

(2) 以读的方式打开 AutoCAD 实体,利用 AcBrBrep 类的 set 方法将 AcBrBrep 对象 指针指向该实体,获得实体边界表示顶层对象——体对象。

(3) 建立体一面穿梭器,并用 set 方法将步骤 2 中得到的体对象赋给穿梭器,将其初 始化。

(4) 用步骤 3 建立的该穿梭器遍历体对象中包含的所有下层边界表示对象(面对象)。 用穿梭器的 get 方法获取穿梭器当前指向的面对象,用 next 方法使穿梭器指针后移至体 对象中包含的下一面对象。 (5) 提取面对象的相关信息。如果想要提取是边对象或点对象的信息,可将步骤 2 体对象替换为包含该边或点的面对象或边对象,然后类似地进行 3、4、5 步操作。

第二种:直接在模型中拾取所要访问的边界表示对象

这种方法是通过鼠标在实体模型中直接拾取所要访问的边界表示对象 (如面、边和 顶点等),步骤如下:

(1) 建立一个空的边界对象,例如 AcBrFace、AcBrEdge、AcBrVertex 对象等。

(2) 在实体模型中拾取与边界表示对象类型相容的子实体。例如,当步骤 1 建立了 边对象 AcBrEdge,就在实体模型中选取类型为边的子实体。

(3) 获得在实体模型中所拾取子实体的全路径(AcDbFullSebentPath 对象), 然后通过 setSubentPath 方法将子实体路径赋给步骤 1 建立的边界表示对象, 从而建立该边界表示 对象与实体模型的关联;

(4) 提取边界表示对象的相关信息。

在实际应用中,第一种方法常用来初始化建立集成模型数据库,以定义和存储有限 元模型;第二种方法常用来定义有限元模型的边界条件等信息;此外,还经常需要将上 述两种方法结合起来综合利用。如要访问实体上某一面中各边的信息,可以先通过第 2 种方法得到该面的边界表示对象 AcBrFace,然后根据第 1 种方法创建面一环穿梭器 AcBrFaceLoopTraverser 和环一边穿梭器 AcBrLoopEdgeTraverser 依次访问集成模型数据 库中与该面有关的模型信息。

ObjectARX 的应用程序基础

ARX应用程序是共享 AutoCAD 地址空间并为 AutoCAD 所直接调用的动态链接库。 AutoCAD 通过约定的访问入口点 acrxEntryPoint()执行 ARX 应用程序。acrxEntryPoint() 相当于常规 Windows 程序的 WndProc()函数,其作用不仅在于向 AutoCAD 提供 ARX 应 用程序的访问入口,而且负责向应用程序发送由 AutoCAD 传来的消息并且把程序结果 状态码返回给 AutoCAD。在 acrxEntryPoint()中开发者可以将自定义的功能函数注册到 AutoCAD 系统中,使之与 AutoCAD 的一个内部命令相对应,这样用户就可以通过命令 的方式调用相应的功能。图 3.4 中给出了 ARX 应用程序结构的基本框架。

ARX应用程序的典型结构如下,其中 function1()为用户扩展功能函数。在系统的入口函数注册功能函数,命名相应的系统执行命令 *func1*。用户在 CAD 操作界面中调用该命令时,系统就执行功能函数中的指定动作。

switch(msg) { //msg 代表 AutoCAD 向应用程序发送的消息 case AcRx::kInitAppMsg: //ARX 应用被加载,

```
acedRegCmds->addCommand( "MyFunc CMD", "func1", "func1", \
                  AcRx CMD MODAL, & funtion1);//功能函数注册
     break:
   case AcRx::kUnLoadAppMsg: //ARX 应用被卸载(
     acedRegCmds->removeGroup("MyFunc CMD");//功能函数注销
     break;
    ... ... //其他消息
   default:break;
void function1() // 功能函数
    •••••//函数功能实现
```



图 3.4 ARX 应用程序结构基本框架示意图 Fig. 3.4 Architecture of ARX application

2) MCAD API

}

MCAD API 由一系列 C 风格的接口函数构成,并通过 Object keys 技术与 ARX 类库 进行交互。MCAD API 统一了 API 函数接口,强化了几何抽象,支持几何变更事件,为 参数化模型生成过程提供了统一的集成,并支持属性的创建、定制、附加、查询和编辑 等功能。在对 MDT 对象的访问方面, MCAD API 采用了统一的引用机制,即 Objectkeys 技术。MDT 中各类对象的引用均通过 amiObjectKey 类或其派生类来进行,如几何模型 的引用通过 amiPartKey 来进行;设计参数的引用通过 AmiParamKey 来进行。

下面以几何模型设计参数的提取、更改和模型的重建为例,给出一个使用 MCAD API 进行设计参数操作的核心代码。

几何模型设计参数提取函数的定义:

amiGetPartParams (AmiPartKey* pPartKey, int& size, AmiParamKey**& pParamKeys)

其中, pPartKey 为几何模型的引用标识; size 返回设计参数的数目; pParamKesys 返回几何模型中所有设计参数的引用标识。

```
几何模型设计参数更改函数的定义:
```

amiSetParamValue(AmiParamKey* pParamKey, double value)

其中, pParamKey 为被修改参数的引用标识; value 为被修改参数的新值。

几何模型重建函数的定义:

amiRegenPart(AmiPartKey* pPartKey)

其中, pPartKey 为需要重建的几何模型的引用标识。

已知几何模型 pPart 及其设计参数 param(param 的名称为 param1, 值为 value1)。要 将其设计参数表中第一个几何模型设计参数 param 的值修改为 value2 并重建几何模型, 可通过如下的程序段落完成:

```
int size; // step1: 取得几何模型的设计参数表
AmiPara mKey** pParamKeys;
amiGetPartParams(pPart, size, pParamKeys);
//step2: 在设计参数表中定位 param
for(int I = 0; I < size; I ++){
    char * name;
    amiGetParamName(pParamKeys[i], name);
    if(name == "param1") break;
}//step3: 修改 param 的值
amiSetParamValue(pParamKeys[0], value2);
amiRegenPart(pPart);//step4: 重建几何模型
本文在程序开发过程中所涉及的模型洗择,设计2</pre>
```

本文在程序开发过程中所涉及的模型选择,设计变量提取,模型重建,几何拓扑信息提取,以及大部分的几何操作都是借助 ObjectARX 和 MCADAPI 实现的。

3.2 基于几何造型特征信息的参数化有限元建模技术

对于三维结构形状优化设计问题来说,在迭代过程中有限元模型需要反复更新用于 计算当前设计变量下的结构响应。因此有限元模型的定义方法以及动态自动更新将很大 程度上影响形状优化设计方法的实用性和便捷性。对于传统的连续体结构形状优化方法 来说,需要预先建立形状设计变量和有限元网格节点之间的相互关系。一方面在优化过程中要使用相当数量的节点坐标作为设计变量描述结构形状的改变;另一方面要根据优化后的节点坐标重新提取结构的边界形状。这些要求难免阻碍了结构形状优化设计方法在工程实际中的推广和应用。为了面向工程实际,提供更实用、操作便捷的结构形状优化设计方法,本文在专业的参数化几何造型 CAD 系统上开发实现了开放式的结构参数化形状优化设计平台 POSHAPE。

参数化几何造型系统提供了对几何模型的参数化定义和驱动,要在该系统中实现有限元模型的定义和自动更新,必须要实现有限元模型与几何模型的集成。这样在形状优化设计过程中,有限元模型就可以在几何参数的驱动下随着几何模型动态自动更新。这也是实现有限元计算与 CAD 设计软件一体化,即 CAD/CAE 无缝集成的核心内容。基于参数化实体的有限元建模和网格全自动剖分是实现 CAD/CAE 无缝集成的两个关键因素[97]。

对于 CAD/CAE 集成系统来说,几何模型与有限元模型信息是系统之间数据传递的 主要内容。以往 CAD 与 CAE 系统之间常用的数据传递方式主要是通过数据文件来完成。 而各系统对数据文件的兼容性、数据传递的效率、参数传递和有限元模型边界条件定义 方式等一系列问题使得这一传递方式很难满足有限元模型和几何模型的通用、高效、动 态集成的要求。本文工作中,使用基于 CAD 模型数据结构共享的集成开发方式对 CAD 的几何造型数据库扩展定义,在 CAD 系统的数据库中加入有限元模型的定义,从而可 以实现满足不通学科要求的模型建模一体化集成方法。下面从几何造型数据结构和集成 模型的数据库开发来介绍参数化有限元建模方法。

3.2.1 几何造型数据结构

几何特征的表示方法是与实体建模表示的核心。当创建一个实体模型时,它的所有 数学描述就会被存储在计算机的数据库中,毫无歧异地对实体几何模型进行精确的数学 描述。研究存储实体模型数学描述的几何造型数据结构对实现 CAD/CAE 之间数据共享 的集成有着重要的意义。在本文集成平台的数据库中结构的 CAE 模型信息将通过几何 造型数据结构与 CAD 模型实现无缝集成。

根据所存储的对象进行分类,常见的描述实体数学描述的数据结构有两类。一类是 CSG 数据结构,另一类是 B-Rep 数据结构。下面将分别介绍这两类几何造型数据结构, 并指出 B-Rep 数据结构更适用于实现几何模型与有限元模型的集成。

① CSG 数据结构

将基本体素(指立方体、圆柱体、球体、环体等二次曲面体以及平移、回转平面轮廓线而产生的二维半形体)的布尔运算过程存储在一个树形结构中,这个过程被称为构造实体几何(Constructive Solid Geometry,简称为 CSG)描述。使用 CSG 描述方式,复杂形体可由简单形体通过各种变化处理和组合而构造。它通过描述基本几何形体和他们的集合运算,将简单形体组合成一个复杂形体,如图 2.2 所示。

CSG 表示的优点:

1)数据结构比较简单,数据量比较小,内部数据的管理比较容易;

2)CSG 表示可方便地转换成边界(B-Rep)表示;

3)CSG 方法表示的形体的形状,比较容易修改。

CSG 表示的缺点:

1)对形体的表示受体素的种类和对体素操作的种类的限制,也就是说,CSG 方法表示形体的覆盖域有较大的局限性。

2)对形体的局部操作不易实现,例如,不能对基本体素的交线倒圆角;

3)由于形体的边界几何元素(点、边、面)是隐含地表示在 CSG 中,故显示与绘制 CSG 表示的形体需要较长的时间。

对于有限元模型定义来说,边界条件要施加在结构的边界几何元素上,从而要求几 何造型系统能够提供对边界几何元素的方便、快速访问,对结构几何模型的建模过程和 其基本构成体素没有太大关联。因此几何造型的 CSG 数据描述方式并不适用于实现集 成的有限元建模。

② B-Rep 数据结构

边界表示树(Boundary Representative,简称为 B-Rep)是另一类比较常用的实体模型 信息的数据结构类型,它使用几何信息和拓扑信息确定对实体模型的描述,如图 3.2 所 示。几何信息,包括曲面、曲线和点描述了相关几何元素的位置、形状等几何信息。拓 扑信息则描述了实体中各层次拓扑几何元素之间的相互位置和连接关系。

B-Rep 表示的优点是:

1)表示形体的点、边、面等几何元素是显式表示的,使得绘制 B-Rep 表示的形体的速度较快,而且比较容易确定几何元素间的连接关系;

2)容易支持对物体的各种局部操作,比如进行倒角,我们不必修改形体的整体数据结构,而只需提取被倒角的边和与它相邻两面的有关信息,然后,施加倒角运算就可以了;

3) 便于在数据结构上附加各种非几何信息,如精度、表面粗糙度等。

B-Rep 表示的缺点是:

1)数据结构复杂,需要大量的存储空间,维护内部数据结构的程序比较复杂;

2) B-Rep 表示不一定对应一个有效形体,通常运用欧拉操作来保证 B-Rep 表示形体的有效性、正则性等。

不同的拓扑关系决定了结构外形和功能的差异。在保持结构拓扑不变的情况下,调整结构中各几何元素的尺寸就可以在保证结构功能特性的同时获得结构性能更优的外形设计。如图 3.5 所示为中间开孔的三维实体结构拓扑一致性比较示意图。对于上面两个拓扑不一致的实体来说,尽管外形类似,因为开孔位置与结构外表面的位置关系不同决定了它们的拓扑关系是不同的,它们的实际用途也将各不相同。对于下面三个实体结构来说,尽管中心开孔的外形、走向等有一定差异,但是它们的拓扑关系是相同的。通过参数化形状优化手段,根据结构性能的不同要求,可以获得外形尺寸差异较大的设计结果。



Fig. 3.5 Comparison of Structure Topology Coincidence

由于 B-Rep 表示覆盖域大,原则上能表示所有的形体,而且易于支持形体的特征表示等。有了高性能硬件支持,复杂的数据结构和大量的存储空间已经不再有问题;此外,因为引入 CSG 数据描述方式的长处,避免了 B-Rep 表示的失效问题,B-Rep 表示已成为当前 CAD/CAM 系统的主要表示方法。对于有限元建模问题来说,B-Rep 表示既可以提供完整的结构实体几何信息,也可以提供用于网格模型建立和边界条件定义的边界几何信息。Benett 等人[9]曾提出了一个基于边界信息的二维结构的几何描述和网格生成算法,并在此基础上实现了针对二维结构的形状优化集成系统。

3.2.2 有限元与几何模型集成的数据库

有限元建模是进行有限元分析的前提条件,也是在设计应用过程中的困难最多的环节。经验表明,有限元建模在整个有限元分析的工作量中占70%-80%左右。因此,如何快速、高效、便捷地实现有限元建模和模型修改是有限元应用的一个重要研究领域。在 CAD 建模环境下,通过有限元模型与几何模型的无缝集成就可以借助于几何模型的参数化造型技术实现有限元模型的参数化。Betting 等人[123]对 CAD/CAM/CAE 模型集成的三种实现方法进行了比较分析,包括为被集成模型建立独立的数据结构,通过交叉索引与集成模型相互访问;在集成模型的数据结构上派生出新的类以表示被集成模型;把被集成模型作为属性数据附加在集成模型数据结构上。最后提出以附加属性的方式实现模型信息集成是效率最高的方法。如果要被集成模型的数据结构有子类信息,则这种集成方式的信息访问效率将受到一定影响。



图 3.6 通过数据库集成的 CAD 和 CAE Fig. 3.6 Integrated Modeling Database Structure for Geometry Model and FEM Model

如图 3.6 所示,在本文工作中提出了一种通用、高效的有限元模型与几何模型集成 方法,将有限元模型的网格剖分、边界条件和属性定义等有限元模型的特征信息作为扩 展数据附加到几何模型中相应的几何元素上,所有这些信息都将存储在 CAD 几何造型 数据库的扩展数据库中。通过在数据库级别上实现的紧耦合定义,完成了有限元模型的 参数化定义和控制。在平台的面向对象编程中,定义了一个专门的数据管理类 AFEM_CPDescManager用于管理实体相关的各种工程描述对象,其中就包括了有限元 模型的边界条件和属性数据。该数据管理类将用于创建扩展数据库,其的定义如下:

class AFEM_CPDescManager: public AcDbEntity //实体扩展类: 作为基层数据库类, 主要用于用于存储和管理有限元模型的各种工程描述对象。 在平台初始化时,使用这个类初始化一个对象作为存储有限元模型信息的工程数据 库,所有于有限元模型定义相关的信息都将通过这个工程数据库来存储和管理。在这个 工程数据库中可以执行下面的操作。

- → 扩展数据的持续化函数:用于将对象中的数据存储至 dwg 文件中或从 dwg 文件 中载入对象数据(定义如 AFEM PDManager)
- → 类成员数据的管理函数:添加、删除、获取、查找指定的工程描述,包括边界 条件、荷载、几何与材料性质
- → 对成员数据的其他操作:导出、冻结和激活。

3.2.3 参数化有限元建模实现

传统的有限元建模方法是以网格模型为对象,基于网格模型进行有限元分析乃至优 化设计,因此结构的几何特性、材料特性、荷载和位移边界条件等物理描述都施加在网 格模型上。这种方法有明显的缺点。因为物理描述都是建立在网格模型上,在计算过程 中要求网格模型的拓扑关系不能改变,尤其是与边界相关的节点和单元的增减操作(如 网格自适应加密等)都要求用户必须手动更新边界条件的定义;对于结构形状的改变也 不容易实现,也很难实现物理描述的自适应更新;网格模型中节点和单元没有工程意义, 无法反映出物理描述的工程背景,如指定安装位置的面(固定位移)边界条件、热问题 中的对流边界条件等等。而对于具有实际工程背景的结构分析问题来说,有限元模型的 物理属性大都直接或间接的与结构某以层次的拓扑几何元素相关。



基于几何模型的有限元建模方法则以几何模型为中心,在建模过程中,有限元模型 的定义和生成都是在几何模型上完成的。因为模型的拓扑结构保持不变,因此有限元模 型的定义与几何模型中几何边界元素之间的绑定关系得到了保证。当几何模型被修改之 后,有限元模型的定义将能够根据更新后的几何信息实现自适应修改,重新映射到更新 后的有限元网格模型上。实际上,对于全约束的参数化几何造型系统来说,会引起实体 拓朴结构改变的尺寸驱动是不允许的,这样很可能导致几何干涉乃至模型崩溃。在程序 实现上,Botkin[70]提出了物理描述定义和分派方法,实现了物理描述由几何模型到有 限元模型的自动转换。

如图 3.7 所示,在 CAD 系统中创建的几何模型要经过工程描述定义、网格模型剖 分和设计参数定义才能得到可用于优化设计的、完整的参数化有限元模型。要实现几何 模型与有限元模型的集成有三类数据必须实现模型之间的共享集成,包括:定义有限元 模型的工程描述数据、网格数据和设计参数。在 POSHAPE 开发中,设计参数是在模型 之外存储在设计参数表中被共享。除此之外,有限元模型是通过几何造型数据结构 B-Rep 与几何模型实现无缝集成。



图 3.8 实体结构的拓扑关系分解示意图

Fig. 3.8 Illustration for Structure Topology Decomposition

对于任意一个具体的三维实体结构来说,它都对应一个唯一的 B-Rep 树描述结构中 各几何元素之间的拓扑关系。图 3.8 所示为一个三维实体结构的拓扑关系分解示意图。 由图 3.2 所示的 B-Rep 几何造型数据结构,实体可以分解为体→面→环→边→点的由上 至下的层次结构。如: Volume1 由 Plane1 等 6 个面组成,其中面 Cone1 由一个外环组 成,这个外环又可以分解为 ArcCircle1 等 4 条边等。图 3.9 所示为图 3.8 中实体结构的 拓扑关系的数据链表。



Fig. 3.9 Data Chain of Structure Topology

下面分别介绍有限元模型中网格模型、边界条件和属性数据与几何模型集成的程序实现过程。

1) 有限元网格

在 POSHAPE 平台中,使用的是基于几何模型的自动网格生成算法[34,43,69]。在三 维参数化形状优化设计中,允许结构的几何形状在迭代过程中有较大的改变,基于几何 造型的三维实体有限元网格全自动生成方法[98]是一个关键技术。



图 3.10 网格剖分实现流程 Fig. 3.10 Meshing Flow

基于几何造型的三维实体有限元网格全自动生成,可分解为两个相对独立的过程:基于几何造型的三维组合曲面网格生成和三维实体网格生成。为了满足三维参数化动态有限元建模的要求,基于几何造型的三维组合曲面网格生成,还需做一些改造与扩展。其基本做法是:将剖分过程中生成的节点分为边界节点和内部节点两类。边界节点是对曲面

的边界曲线离散得到的节点,而内部节点是对成员曲面剖分时在曲面内部布置的节点。 对于边界节点只建立节点与边界曲线的对应关系,对于内部节点只建立节点与成员曲面 的对应关系。在几何造型扩展数据库中,对有限元网格的数据是按照结构的 B-Rep 树存 储的。也就是说,根据 B-Rep 树中每一个几何元素都可以给出相应的网格信息。图 3.10 所示为三维实体结构的网格剖分流程。

在剖分过程中,系统同时存储与各拓扑几何元素相关的网格信息,从每个边对应的 2节点线单元到每个面对应的三角形面单元。这样在剖分完成后,系统能够根据指定的 边或面的 ID 迅速从扩展数据库中返回相应的有限元网格信息。



Model (figure below)

有限元网格的剖分参数是定义在结构的几何模型上,与相应的拓扑几何元素绑定并存储在造型扩展数据库中。当结构的几何模型被修改之后,根据存储的剖分参数系统将自动更新有限元网格模型和扩展数据库中与各拓扑几何元素相关的网格信息。有限元网格模型的管理类如下所示:

struct MesherInterface {} //有限元网格模型管理类

当指定实体对象后,可由该对象控制与整个实体或实体上某一或某些边界几何元素 相关的网格剖分;读取剖分信息即单元尺寸、边界上的单元个数;处理剖分结果,包括 读取整个实体网格模型,与某一边界几何元素相关的网格信息等。如其成员函数: getSolidMesh getSurfMesh(int index,Mesh& mesh); //功能是读取剖分结果中某一个 索引号为 Index 的几何边界面的剖分结果;

doSurfmesh(int num,int surfIndexs[]); //功能是仅对 surfIndexs[]列表中的面进行剖分。

2) 位移和荷载边界条件

在有限元计算过程中,边界条件最终要转换成对节点和单元的已知条件。在传统的 有限元模型建模过程中,边界条件条件是直接施加在有限元网格模型上。如图 3.11 上图 所示,传统的建模方法是首先由几何模型生成网格模型,再在网格模型上指定的节点和 单元上施加边界条件。在 POSHAPE 中,边界条件将直接定义在 CAD 的几何模型上, 在优化迭代过程中将被自动映射到有限元网格模型上,如图 3.11 下图所示。

图 3.12 所示为一个机械部件,以荷载边界条件为例,根据定义在所示边界面上的均 布面荷载,在有限元建模过程中将自动转换成施加在该面上网格节点的集中荷载;在优 化迭代过程中,系统能够通过参数化设计手段驱动几何模型更新。



图 3.12 几何模型与有限元模型的双向联动实现机理 Fig. 3.12 Illustration of Automatic Linkage between Geometry Model and FEM Model

3) 属性数据

与边界条件定义相同,属性数据也绑定在相应的拓扑几何元素(一般为体)上并存储在造型扩展数据库中。当几何模型被修改之后,它们都能够自动映射到更新后的有限 元模型上。实体的材料和几何属性都将绑定在体元素上;而板的材料和几何属性将绑定 在面元素上。

所有的边界条件和属性数据都有专门的类进行管理。这些类由下面的基类派生得 到。由管理类初始化的对象将存放在由附加数据库中,通过生成的对象系统完成对有限 元模型属性的读写、激活、描述和绘制等操作。
class AFEM_PDescEntity: public AcDbEntity //工程描述表示基类 例如,由此派生的子类包括位移和荷载边界条件管理类如下所示: *class AFEM_PDLoadEntity: public AFEM_PDescEntity class AFEM_PDBConEntity: public AFEM_PDescEntity*



Fig.3.13 Integrated Finite Element Model with Geometric Model based on B-Rep tree

综上所述,因为使用了基于几何模型的自动网格生成算法和有限元建模方法,有限 元模型将能够与几何模型联动。在几何模型被修改之后,有限元模型将可以自动更新。 相反由参数化几何造型技术提供的尺寸驱动功能,有限元模型根据结构响应计算结果修 改尺寸参数也可以驱动几何模型的更新。在 POSHAPE 平台中,有限元模型与几何模型 真正实现了双向联动的无缝集成。一方面当几何模型在尺寸驱动下发生几何形状改变 时,有限元模型也随之更新;另一方面系统将利用有限元分析计算的结果调整设计变量 取值,根据形状优化设计变量与几何驱动全局变量之间的绑定关系,有限元模型也能够 时间对几何模型的间接驱动。这里,有限元模型与几何模型之间的双向联动的实现离不 开基于 B-Rep 树的几何造型数据扩展描述。图 3.13 所示为在几何造型数据库中基于 B-Rep 数据结构实现的与几何模型集成的有限元模型定义。有限元模型中的网格模型和 边界条件、属性数据作为特征信息存储在几何扩展数据库中附加在指定的拓朴几何元素 上并与之绑定,从而实现有限元模型与几何模型的无缝集成。

3.3 POSHAPE 的集成平台框架

为了保持系统的可继承性和灵活性,POSHAPE 平台是基于组件集成方式开发的。 集成在平台上的不同组件完成各自相应的功能。

3.3.1 POSHAPE 的系统开发



图 3.14 系统组件关系图 Fig. 3.14 Development Articheture of POSHAPE

由图 3.14 所示, POSHAPE 平台的开发包括三种类型的组件。第一类是以 MDT 的 二次开发环境 ObjectARX 开发的系统专用 ARX 动态链接库; 第二类是仅使用 VC 开发 环境创建的 DLL 动态链接库; 第三类是 EXE 可执行程序。下面对这三类组件分别进行 介绍:

第一类,ARX 动态链接库组件。这类组件用来完成与 CAD 系统数据库最直接的访问和数据传递功能,此外,ARX 组件直接内嵌在 CAD 系统中,它实现的功能都可作为 CAD 的内部命令被用户调用。这种组件形式主要用来实现需要直接访问 CAD 系统数据 库的功能。平台中有两个 ARX 组件分别是 DOTOPT 和 AFMSLD。其中,DOTOPT 构 建了平台的主要框架,优化流程也是由此组件控制执行的,其他各个组件主要通过它被 集成;AFMSLD 实现了参数化有限元建模功能。

第二类,DLL 动态链接库组件。这类组件实现的功能不需要直接访问 CAD 系统数 据库,但因为处理的数据量比较大,且为了提高执行效率,被独立开发成 DLL 动态链 接库的形式集成到平台中。这种组件形式主要用来实现无需直接访问 CAD 系统数据库, 但要完成大规模数据处理和执行效率高的功能。这类组件包括 SIFemPreAcadDll 和 JxMesherModel。其中, SIFemPreAcadDll 用来执行网格剖分,这个网格剖分组件是一个 通用的剖分程序,它与与之集成的平台无关。而 JxMesherModel 则是用来完成剖分之前 和之后的数据处理,协助剖分功能与平台之间的数据传递。

第三类,EXE 可执行程序插件。这类组件主要用来实现特定计算功能。包括结构有限元分析组件 JIFEX 和数据格式转换组件 JxFemFileOut。JxFemFileOut 是与有限元分析组件相配套,用来将参数化有限元模型数据文件转换成指定格式的有限元模型数据文件。这种组件形式主要用于实现特定计算功能,如结构有限元分析功能。平台将来可实现的多物理场分析功能都可以此类组件形式集成到平台中。

3.3.2 POSHAPE 的系统集成模块

CAD 软件系统大都没有或仅带有简单的结构分析功能,但是通过系统提供的二次 开发接口,和开放式的数据库操作,可以将各种多学科的 CAE 优化和分析工具集成到 CAD 系统。在 POSHAPE 平台上,通过面向对象的二次开发接口集成了结构分析和优 化设计软件 JIFEX 以及优化器 DOT,它们以内部命令的形式可以在平台上被调用。下 面对结构分析和优化设计软件 JIFEX 和优化器 DOT 做以简要介绍。

1) 结构分析和优化设计软件 JIFEX

JIFEX 是由大连理工大学工程力学系/工程力学研究所、工业装备结构分析国家重点 实验室研制开发的新一代有限元分析与结构优化设计软件系统[71]。它是在多层子结构 有限元分析程序 JIGFEX[72]、微机有限元分析软件 DDJ-W[73]、计算机辅助结构优化设 计软件 MCADS[74]等软件的基础上发展起来的具有新的前后处理界面的集成化软件系 统。

JIFEX 系统的分析功能有:静力分析、自振分析、稳定性/屈曲分析、时程响应分析和热传导分析等。其具有特色的结构优化设计功能有:强度和刚度优化、自振频率优化、动力响应优化、屈曲稳定性优化,以及上述多个目标联合起来的结构多目标优化。设计变量包括:1)尺寸变量,如杆单元的截面积、膜板壳单元的厚度。2)形状设计变量,如离散结构(如桁架或框架的)节点坐标。对于由连续的曲线或曲面描写连续结构,形状设计变量是曲线或曲面的插值参数和控制点位置。

2) 优化器 DOT

DOT 优化器是 Vanderplaats Research & Development, Inc (VR&D)的产品。作为一种 优化工具,它可以解决工程上、商业上、社会科学中、以及其它方面能够用数值方法分 析、估计响应的大量优化问题。它既能在微机上使用,也能应用在巨型机上,提供给用 户实际的源代码,而不是转换后的二进制代码,很容易实现与用户程序的连接。DOT 解决一般问题的方法是:编写一个小的接口程序使应用程序与 DOT 耦合在一起,也就 是用户编写一段简单的程序来调用 DOT。这个接口程序非常简单,任何一个有经验的 程序员都能快速准确的编写出,并且优化器本身就提供了一些可以作为模板的简单程 序,这使得用户的工作更加简单。

作为一个通用的设计优化工具软件包,DOT 能够提供多种优化求解算法,如修正 可行方向法、序列线性规划法和序列二次规划法等。可以方便地与其它软件集成为专业 化的优化系统。为了提高优化过程的稳定性,本文采用 DOT 的修正可行方向法进行优 化求解。

3.4 参数化结构形状优化设计

基于 CAD/CAE 集成技术的开放式参数化结构优化设计平台 POSHAPE 是面向机械 产品设计的参数化结构优化设计平台,对于大多数机械零部件来说,通过参数化造型创 建几何模型之后就可以使用 POSHAPE 进行参数化优化设计,针对用户指定的尺寸参数, 给定上下限,使用优化搜索使结构某项性能最优的设计方案。与传统的优化设计过程不 同,POSHAPE 平台的设计目的是通用的、实效的且面向工程实际的优化设计平台。对 结构形状优化相关技术的选择也是围绕这一宗旨展开的,而不一定只专注于方法的学术 意义。相关技术包括:形状描述手段、网格剖分方法、灵敏度计算方法和优化算法。下 面分别就这几方面分别说明技术实施思想。

1) 参数化几何建模 CAD 系统

对于工程设计人员来说,专业的 CAD 系统是产品开发中必不可少的设计工具,也 是他们非常熟悉的软件工具。因此使用专业的 CAD 系统作为开发平台将有助于在产品 开发过程中推广 CAE 的结构形状优化设计手段的使用。此外,专业的 CAD 系统可以提 供对任意复杂机械零部件的参数化特征造型能力,尤其是对结构几何尺寸的参数化设计 方法。对于结构形状优化设计问题来说,以结构的几何模型为研究对象,使用参数化的 几何尺寸作为优化设计变量一方面可以提供最专业的结构形状控制手段,另一方面也使 得形状优化模型的定义和优化设计结果都能与工程实际直接、紧密联系。Chang 等人[75] 提出了用于飞机转矩管结构的协同设计与制造方法,在该方法中,实现了以结构的几何 模型为研究对象的结构分析优化与辅助制造设计协同化方法。可以看出,要实现 CAD/CAE/CAM 集成的协同设计方法,就要统一各环节的研究对象的模型定义,而 CAD 的几何模型则是最佳的选择。

此外,使用专业的 CAD 建模系统,并实现了有限元模型与几何模型的紧耦合与双 向联动,很大程度上可以满足其他一些多学科耦合问题对结构有限元模型的不同要求。 2) 全自动的网格生成算法

在 POSHAPE 中使用了全自动的网格生成算法,在优化迭代过程中,几何模型修改 之后,有限元模型根据绑定在几何模型上预先定义的物理属性生成新的有限元模型,与 上一轮迭代中的有限元模型的网格拓扑关系没有直接联系。

传统的结构形状优化设计方法中,为了保持灵敏度解析方法的计算一致性,大都使 用网格变形或映射法等手段,使有限元网格模型的拓扑关系在迭代过程中尽量保持不 变。这种网格更新方法是为了追求灵敏度分析的解析方法,但实际上也限制了结构形状 优化方法的实用性。首先,对于结构的大变形来说,网格变形或映射方法很难成功实施, 目前现有的研究工作大都集中于二维问题或三维较简单实体,如单连通域实体结构。且 对于三维复杂实体结构来说,即使是结构小变形也很难保证现有网格变形或映射算法的 成功实施。此外,使用全自动网格生成算法根据给定的网格剖分信息尽可能保证网格模 型的质量,而网格模型的质量又是有限元计算精度的保证。对于前面两种方法来说,网 格在变形后的质量也是一致困扰的问题之一。

3) 全局有限差分方法

从学术的角度来说,追求算法的精度是研究的永恒主题之一。传统的结构形状优化 方法中大都使用离散或连续的灵敏度解析方法判断结构优化的迭代。但对于形状优化问 题来说,不同于尺寸优化和拓扑优化,很难找到结构响应与形状设计变量之间的显示解 析表达式,因此在不同程度上还要使用差分方法参与灵敏度计算。而且,灵敏度解析方 法要求在迭代过程中网格模型的拓扑关系的一致性,限制了形状优化在实际工程中的应 用。只要处理好步长问题,有限差分方法是可以保证灵敏度的计算精度。

4) 基于梯度的优化算法

POSHAPE 中使用了基于梯度的优化算法,在优化过程中通过计算灵敏度搜索结构的最优化设计方案。相比以其他广义的全局搜索算法,基于梯度的优化算法可以节省相当的计算量,对于结构优化问题有着良好的应用背景。

3.4.1 优化设计流程

1) 传统的结构形状优化设计流程是:

- 第一步:建立结构的几何模型
- 第二步:建立结构的有限元模型
- 第三步:在有限元模型上定义优化模型(以节点坐标为设计变量)
- 第四步:结构分析计算
- 第五步:执行结构优化设计

第六步: 使用解析方法计算灵敏度信息

→ 当迭代不收敛时

将初始有限元网格映射到更新后的几何模型上 返回**第四步**继续下一步优化设计

- → 当迭代收敛 获得最优解,根据网格节点位置提取边界的几何模型 退出
- 2) POSHAPE 参数化结构形状优化设计流程是:
- 第一步:建立结构的几何模型
- 第二步: 在几何模型上定义优化模型和有限元模型物理参数
- 第三步:建立结构的有限元模型
- 第四步:结构分析计算
- 第五步:执行结构优化设计
- 第六步: 使用有限差分方法计算灵敏度信息
- → 当迭代不收敛时
 - 更新结构的几何模型
 - 根据几何模型和基于几何模型的物理参数更新有限元模型
 - 返回第四步继续下一步优化设计

→ 当迭代收敛

获得最优解,退出

对比两种结构形状优化方法的设计流程,除了前面提到的不同之处。POSHAPE 的 参数化形状优化设计流程在每次迭代过程中,在有限元模型的物理参数保持一致的情况 下要生成新的有限元模型,并进行结构分析计算。因此优化迭代的中间结果对于工程设 计人员来说也是具有参考价值的。同时,通过每个迭代步上的重剖分和重分析在损失一 定计算效率的基础上,保证了优化迭代的计算精度。

3.4.2 优化模型

POSHAPE 中的参数化结构形状优化设计的通用优化模型如下(3.1)式。POSHAPE 中结构形状优化设计问题是以预先指定的结构几何尺寸作为设计变量。结构优化的设计 结果可以直接应用于产品设计过程。

$$Max / Min \quad F(Dim_{i})$$
s.t. $g_{j}(Dim_{i}) \leq 0 \quad (j = 1,...,m)$

$$Dim_{iL} \leq Dim_{i} \leq Dim_{iU} \quad (i = 1,...,n)$$
(3.1)

3.4.3 POSHAPE 的基本操作流程

下面给出一个参数化实体有限元模型的建模实例,介绍参数化形状优化设计平台 POSHAPE 的基本操作流程。参数化形状优化对象为图 3.14 所示一拉杆结构的有限元模型。在进行优化设计之前需要创建几何模型与有限元模型,在 POSHAPE 中,这一切操 作都在参数化 CAD 系统中完成的,具体的操作步骤包括:



Fig.3.14 Geometrical Model and Finite Element Model of a 3D Structure

创建参数化几何实体模型:首先要在 CAD 系统中定义全局变量,如图 3.14(a)中所示 Dim01,Dim02,在创建结构的参数化几何模型时将全局变量作为尺寸约束赋给设计草 图或者几何特征。这些设计变量将在形状优化过程中用作设计变量。

创建有限元模型:如图 3.14(b)所示,结构的圆柱面 A 和平面 D 为设计曲面。结构 的物理描述定义如下:1) 在平面 E 上施加平行于 x 轴指向 x 正方向的表面拉力 F, F 的 大小为 250MPa; 2) 平面 B 在 x 方向的位移设为自由其余方向均设为固定,平面 C 在 y 方向的位移设为自由其余为固定。这里有限元模型是在参数化几何实体上定义的,包括 载荷和位移边界条件以及属性数据、网格生成。以位移边界条件为例,当执行 addbcon 命令时,系统将提示设定施加边界条件的几何元素的类型(包括:体、面、边)。这里设 定面为施加边界条件的几何元素类型。此时模型将会被激活,提示用户在模型中选择施 加边界的面。用鼠标点击模型的一条边,选中的曲面将会加亮显示。在系统自动弹出的 对话框上填写位移约束信息后,如图 3.15(c),用户可看到所添加的位移约束标志,如图 3.15(b)所示。

选中的曲面 ——	Select Face		(b) Bo	undary Condition
F	■ 边界条件 标识 232	标题		
	ー般 坐标系ID 位移 U	✓ 主节 规格数 0-几何可动 ▼	5点ID 0 指定位移 0	固定的 較接的 自由的
	V W THX THY THZ	0-几何可訪 ▼ 0-几何可訪 ▼ 0-几何可訪 ▼ 0-几何可訪 ▼ 0-几何可訪 ▼	0 0 0 0 0	确定
				取消

(c) Dialogue for Boundary Condition Definition 图 3.15 边界条件添加示意图

Fig. 3.15 Definition of Boundary Condition

荷载边界条件和材料属性、单元几何属性的定义操作与位移边界条件的定义操作类似。

定义优化模型: 当定义有限元模型之后,需要为形状优化设计定义相应的模型,包括: 为驱动尺寸定义尺寸参数和参数上下限,并存入设计变量表中; 定义目标函数、约束信息等;

最后,执行优化设计。

以上除了创建参数化几何实体是利用 CAD 系统自带功能外,其它都是通过二次开 用集成到 CAD 系统上,用于实现参数化形状优化设计的辅助功能。

3.6 小结

本章从开发、数据库和平台框架等几个方面系统地介绍了参数化结构形状优化平台 POSHAPE 的设计思想和技术路线。POSHAPE 平台的设计目的是实现通用的、实效的 且面向工程实际的优化设计平台,因此在开发过程中对相关技术实现路线的选择也是围 绕这一宗旨展开的。目前已经在 POSHAPE 中实现了三维实体、空间壳体和复合材料周 期性结构的参数化结构形状优化设计方法。下面三章中将分别介绍针对不同类型结构, POSHAPE 的 本章所介绍的参数化结构形状优化设计思想是一种通用性的方法,一方面除了现有的功能,POSHAPE 因为具有开放的二次开发接口,且实现了有限元模型与几何模型的紧耦合与双向联动,还可以推导到多学科耦合问题的研究中;另一方面,除了 MDT 也可以推广到其他的参数化 CAD 系统中。

4 三维实体参数化结构形状优化设计

4.1 引言

现有的三维实体结构的形状优化设计方法大都是以结构的局部几何模型的离散设 计变量或者有限元模型为研究对象,如以节点坐标或边界控制描述曲线、曲面的控制节 点为设计变量,通过调整节点的位置改进结构的性能。这种方法得到的优化结果通常需 要使用插值方法对结构边界重构,得到以自由曲线、曲面描述的结构几何外形。对于工 程中常见的以二次曲线、曲面描述几何外形的三维实体结构来说,这种方法存在一定的 不足。本文将 CAD 的参数化实体特征造型技术引入结构形状优化设计问题中,实现了 有限元模型与几何模型的集成,提出了针对三维实体结构的参数化形状优化设计方法。

在本章将针对大型复杂三维机械零部件,详细介绍三维实体的参数化结构形状优化 设计方法。第2节介绍参数化实体结构形状优化设计方法的系统框架和流程,通过描述 系统的操作过程说明本文方法是面向工程设计人员且操作简单、功能实用的结构分析优 化手段。第3节给出几个工程实例展示本文方法的可行性。第4节对该方法目前存在的 问题进行概述。最后一节对这部分工作进行总结。

4.2 三维实体参数化结构形状优化设计系统框架

在形状优化设计中,参数化的目的就是使用设计变量描述结构几何尺寸的变化或控制几何边界节点的移动。在设计过程中可以改变设计变量的取值以改进结构的性能。带有尺寸驱动功能的 CAD 几何特征造型系统为工程设计人员提供了非常便利的参数化设计手段,它能够轻易地捕捉到产品的设计意图。使用 CAD 造型系统,在产品设计过程中,设计人员首先关注于结构的外形设计,并保留一些可供修改的形状尺寸设计变量。在设计后期,可以调整这些尺寸,在改变结构形状尺寸提高结构性能的同时不破坏最初的设计意图。本文提出的方法就是使用专业的 CAD 造型系统,以结构的参数化几何模型为研究对象,将变量化的尺寸参数定义为设计变量,通过形状优化设计改进结构性能。整个系统的框架如下图 4.1 所示。在 POSHAPE 中,通过与 CAD 系统的集成,将参数化设计手段引入到 CAE 的结构形状优化设计中,用于结构几何模型的参数化定义和控制;对 CAD 系统的数据库进行扩展,通过与几何模型集成的有限元建模方法,实现了有限元模型的参数化动态修改;通过面向对象的二次开发接口,将有限元分析工具和优化工具集成到 CAD 系统中;建立并开发适当的系统通讯机制和手段,最终实现了CAD/CAE 集成的参数化结构形状优化设计平台。



图 4.1 POSHAE 上实体结构参数化形状优化设计框架 Fig. 4.1 Architecture of POSHAPE for Solid Parameterized Shape Optimization

由图 4.1 所示,在 POSHAPE 平台中,几何造型中的尺寸参数与形状优化的设计变量绑定在一起,他们是实现几何模型与有限元模型集成的关键。因为实现了几何模型与有限元模型的一体化集成,一方面平台中几何模型的尺寸参数可以直接用作优化的设计变量,优化后的设计变量作为尺寸参数可以驱动几何模型的更新;另一方面在迭代过程中,当设计变量驱动几何模型更新之后,有限元模型将会动态联动,自动生成新的有限元数据传输给分析模块。期间无需用户交互。具体操作流程如下图 4.2 所示,并参照 3.4.3 节所述。

参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE 复杂的机械结构提供了一个 CAE/CAE 协同设计分析环境,它的特点在于:

- 提供适于设计人员操作的 CAD/CAE 集成设计优化平台。因为集成在 CAD 平台上,各分析模块通过二次开发手段,作为插件以内嵌的形式集成在 CAD 平台上,设计人员可以内部命令的形式调用这些分析模块。此外,与几何特征相关的有限元性质参数和边界条件定义也便于设计人员理解和操作;
- ② 无需过多的简化,在 CAD 平台上结构几何模型可以尽可能真实的创建,而 CAD 和 CAE 模型的一体化定义为有限元模型的参数化提供了必要条件,确保形状优化迭代过程中有限元模型与几何模型的动态联动;



Fig. 4.2 Flow Chart of Parameterized Solid Structure Shape Design Optimization

在以 CAD 为平台的 CAD/CAE 协同设计分析环境中,CAE 可以充分的发挥作用, 为设计人员提供仿真分析和优化功能,使在产品概念设计阶段了解产品结构性能,缩短 研发周期。此外平台有着良好的可扩充性,可以进一步实现 CAD 与 CAPP,CAM 的集成, 建立面向产品全生命周期的协同设计支持环境。

4.3 工程实例

下面以三维机械零部件为对象,使用 POSHAPE 进行结构形状优化设计。通过这些 实例可以表明,使用 POSHAPE 平台的参数化结构形状优化设计方法可以实现对复杂三 维实体结构的形状优化设计。

4.3.1 机床部件的参数化形状优化设计

这里首先以 CD6140A 型卧式车床为例,展示结构参数化形状优化设计过程。机床 的可靠性和加工精度在很大程度上取决于机床主要部件,如床身、主轴部件、立柱、进 给机构设计的可靠性和制造精度。因此在设计过程中必须对这些部件进行分析和优化, 如刚度分析、抗振分析等。

在进行车床整体结构分析后,图 4.3 给出了工作载荷作用下结构的位移云图。从图 中可以看出,结构整体的最大变形发生在床身溜板三角形导轨处,在工作状态下,工作 平台在导轨上水平往返运动,因此影响刀具与工作平台上的工件之间的相对位移的大部 分变形来自床身溜板三角形导轨的局部位移。在床身结构整体变形中,对加工精度影响 最大的因素是床身溜板三角形导轨的刚度特性。在后面的部分将对车床的床身三角形导轨(以下简称机床导轨)进行参数化形状优化设计,以提高整体结构性能。



Fig. 4.3 Deformation and Displacement Field of Initial Design

在进行优化设计之前,首先要创建结构的几何模型。MDT6 是一个三维参数化特征 造型系统,它提供特征造型和尺寸驱动技术。特征造型是几何模型技术的自然延伸,它 从工程角度,提供各类几何特征和语义特征用于结构形体造型,使所描述的形体信息更 具有工程意义。根据设计给定的模型数据,在 MDT6 中创建了导轨部分的几何模型,如 图 4.4 所示。



图 4.4 机床导轨部分实体模型及剖视图 Fig.4.4 Bed Slide Model and the Cutaway View

创建机床导轨结构的实体模型共使用了 158 个尺寸约束,这些尺寸约束被用于草图 设计和几何特征定义,通过修改尺寸数值可以调整结构几何模型的形状尺寸。其中有 6

个尺寸定义为 CAD 模型的全局变量并用作形状优化的设计变量,如图 4.5 所示,旁边 带◆的表示该参数同时为优化设计变量。



Fig. 4.5 Sketch Designs of the Bed Slide

分析程序通过访问共享的 CAD 数据库可以读取尺寸参数作为优化的设计变量,也可以修改这些尺寸参数,进而在优化迭代过程中控制结构几何模型的形状尺寸改变。 这6个尺寸参数的初始值和上下限定义请参见表 4.1。

Т	Tab.4.1 Initial Value and Upper/Lower Bounds of Design Variables								
单位:	Thick01	Thick02	Deepth01	Height01	Height02	Thick03			
mm									
初始值	19.0	20.0	20.0	80.0	198.0	13.0			
上限	19.0	20.0	30.0	80.0	198.0	11.0			
下限	11.0	11.0	15.0	40.0	170.0	11.0			

表 4.1 尺寸参数的初始值和上下限定义

1) CASE 1: 结构的静刚度优化

对机床结构的基本要求是刀具与工件之间的相对位移及其变动尽量小,从而保证加工精度。分析表明,在工作载荷作用下,结构处于弹性小变形状态。在 Casel 中将以降低结构的弹性位移为优化目标,通过结构的形状优化设计,提高结构静刚度。



Fig. 4.6 Illustration for Load Condition

结构的材料弹性模量为 1.25×10⁵N/mm², 密度为 7.85×10⁻⁶ kg/mm³, 泊松比为 0.25。 在工作状态下机床导轨部分受到工作平台在导轨上水平往返运

表 4.2 Casel 亻	尤化前后数值比较
---------------	----------

Tab	120	Com	oricon	hatuyaan	Intial	Dagian	and O	ntimal	Design	for	Casa	1
rau.	4.2 0	Comp	alison	Detween	muai	Design	and O	pumai	Design	101	Case .	I

		结构重量	X 向最大位					
	Thick01	Thick02	Deepth01	Height01	Height02	Thick03	(kg)	移(mm)
初始 设计	19.0	20.0	20.0	80.0	198.0	13.0	159.2	0.0254
优化 设计	11.36	20.0	15.0	48.42	170.17	11.0	124.1 ↓ 22.05	0.0249

动产生的荷载,经换算,通过作用在导轨和导轨平台下表面的三个面均布压力 P1, P2 和 P3 来近似,其大小分别为 0.138 MPa, 1.504 MPa, 0.65MPa,如图 4.6 所示。对导 轨结构一端固支约束,另一端对截面内两个自由度方向固支约束,沿轴向方向自由。 Case1 中,目标函数为结构重量最小化,约束为结构的最大 X 向位移不超过 0.03mm, 设计变量参见表 4.1。优化前后结构的设计变量和结构响应比较请参见表 4.2。



图 4.8 设计变量迭代历史 Fig. 4.8 Design Variables Iteration History of Case 1

由表 2 可知,经过对表 1 中所示 6 个几何尺寸优化后,结构的重量下降了 22.05%, 而结构的刚度基本保持不变。目标函数和设计变量迭代历史请参见图 4.7 和图 4.8 所示。 优化前后结构的位移云图如图 4.9 所示。

2) CASE 2: 结构的动刚度优化

由于机床的主轴在很大的转速范围内运转,所以机床构件振动的频率范围也很大。 当振动频率接近构件的自振频率时,容易引起自激振动,因此有必要提高结构的动刚度。 在 Case2 中将以结构的自振频率为优化目标,通过形状优化设计,提高结构的一阶自振频率。



图 4.9 优化前后结构位移云图(左图:优化前) Fig. 4.9 Displacement Fields of Initial Deisgn and Optimal Deisgn of Case1 (Left: Initial Design)

在 Case2 中,以结构一阶自振频率最大化为目标函数,以结构的重量和刚度为约束, 要求结构重量不超过 150kg, x 方向最大位移不超过 0.03mm。

						1	e		
	设计变量	(mm)					一阶自	结构重	X 向最 大 位
	Thick01	Thick02	Deepth01	Height01	Height02	Thick03	派 频 平 (Hz)	量(kg)	移 (mm)
初始 设计	19.00	20.00	20.00	80.00	198.00	13.00	22.78	159.20	0.0254
优化 设计	19.00	19.75	15.00	40.00	170.00	11.00	24.37 ↑ 6.94 %	135.80 ↓ 14.70 %	0.0243

表 4.3 Case2 优化前后数值比较 Tab. 4.3 Comparison between Intial Design and Optimal Design of Case 2

由表 4.3 可知,经过对表 4.1 中所示 6 个几何尺寸优化后,结构的一阶自振频率由 初始的 720.42Hz 上升到 770.45Hz,结构的重量同时下降了 14.70%,结构的刚度基本保 持不变。目标函数和设计变量迭代历史请参见图 4.10、图 4.11 示。

设计人员可以参考 Casel 和 Case2 的优化结果,将优化结果直接应用在产品设计中,以达到满意的结构性能指标。



Fig. 4.11 Design Variables Iteration History of Case 2

机床是一类常见的三维机械部件,它有着复杂的几何内部特征。使用传统的方法进 行此类结构的优化设计需要对结构几何特征进行大肆简化,且优化设计结果无法直接应 用到设计中,造成产品设计与分析的脱节,设计周期延长。针对此类问题,这里使用参 数化结构形状优化设计平台 POSHAPE 对 CA6140A 机床的床身溜板三角形导轨结构进 行优化设计。POSHAPE 是一个自主开发的、建立在 CAD 上的集成平台,通过二次开 发手段,将 CAD 中的参数化实体建模功能应用在结构分析和优化设计中,实现了参数 化有限元模型定义和动态更新,是一种新的 CAD/CAE 协同工作方法。在优化迭代的每 一步,结构的有限元模型都会完全更新,从而使得结构的形状设计变量可以在设计域内 最大限度的自由变化,以获取满意的设计方案。本文提出的协同式的结构优化设计方法 已经应用于工程实际,为 CD6140A 型卧式车床的主要部件的优化设计给出了具有实用 价值的参考依据。

4.3.2 掘进机械传动的主臂架的参数化形状优化设计

这里以某型号掘进机械传动的主力臂架为对象进行参数化形状优化设计。下图 4.12 为掘进机械传动的主臂架的工程图纸,图中给出了主臂架的工作条件。根据给定的图纸 和结构细部特征尺寸创建的三维实体模型,如图 4.13。



图 4.12 掘进机械传力臂工程图 Fig. 4.12 Drawing of the Rocker Arm of a Boring Machine



图 4.13 王宵采的头体模型 Fig. 4.13 Solid Model of the Rocker Arm of a Boring Machine

1) 设计意图

对于主臂架的形状优化设计,工程设计人员给定了以下结构外形修改限制。

包括:一,图 4.14 中,模型中间的圆孔直径不能改变;二,支撑油缸处尺寸要保证,因为主臂架能绕支撑油缸转动,如图 4.15 中所示凹陷部分。此处的凹陷可以变大,不能变小;三,图 4.16 中,两臂间距可大不可小,铰接处的间距也可大不可小。



图 4.14 设计意图 1 Fig. 4.14 Design Intent 1



图 4.15 设计意图 2 Fig. 4.15 Design Intent 2



图 4.16 设计意图 3 Fig. 4.16 Design Intent 3

创建当前模型共用 158 个尺寸约束参数。在优化模型中选取了其中的 5 个尺寸约束 参数作为控制模型扰动的尺寸参数,同时也定义为优化的设计变量。

这5个尺寸参数的定义为:

①尺寸控制参数1

如图 4.17 中上排右图中圆圈所示,该尺寸控制参数是当前扫描草图特征的单向拉伸距离,控制两个工作臂前半段间隙。

当前尺寸参数数值: Des01=65mm

②尺寸控制参数2

如图 4.17 中上排左图中圆圈所示,该尺寸控制参数是当前扫描草图特征的双向拉伸 距离,控制两个工作臂后半段间隙。 当前尺寸参数数值: Des02=240mm

③尺寸控制参数3

如图 4.17 中上排中图中圆圈所示,该尺寸控制参数是当前扫描草图特征的拉伸距 离,控制油缸支撑力作用处两个圆孔之间的间隙。

当前尺寸参数数值: Des03=80mm

④尺寸控制参数4

如图 4.17 中下排右图中圆圈所示,该尺寸控制参数是当前扫描草图特征工作平面的 定位参数,控制支撑油缸平面的凹陷程度。

当前尺寸参数数值: Des04=290mm

⑤尺寸控制参数5

如图 4.17 中下排左图中圆圈所示,该尺寸控制参数是当前扫描草图特征到模型外边 界的距离,控制工作平面附近箱体的立面壁厚。

当前尺寸参数数值: Des05=50mm



图 4.17 主臂架形状优化设计变量描述 Fig. 4.17 Description of Design Variables for Rocker Arm Shape Optimization

这5个优化设计变量的初始值和上下限定义如表 4.4 所示。

	Tab. 4.4 Initial	Value and Upp	er/Lower Bound	l of Design Vari	ables
<i>单位:</i> mm	Des01	Des02	Des03	Des04	Des05
初始值	65	240	80	290	50
上限	65	300	80	290	50
下限	10	240	50	280	20

2) 结构优化模型定义

边界条件:如图 4.12 所示,当前优化模型的边界条件简化为对铰接点出 4 个圆孔固 支约束

荷载工况:根据给定荷载功率和转速,对当前模型进行等价静力荷载计算,在图 4.12 上下两个工作平面上施加大小相等、方向相反的面均布荷载,大小为 3.24MPa

材料属性:

E=2.06*10⁵MPa, v=0.3, $\rho=7.85*10^{-3}$ g/mm³

目标函数:

```
结构重量 weight=9.8t 最小化
```

约束条件:

结构 x 向单元应力<=30Pa

结构初始设计的 x 向应力云图如下图 4.18 所示。



图 4.18 初始设计的 x 向应力云图 Fig. 4.18 x-Displacement Field of Initial Design

3) 优化结果

优化迭代结束时,结构响应远小于给定约束值,因为设计变量均到达给定的上下限, 故优化迭代结束。此时结构减重 0.77t。故当前优化结果,为给定设计方案中的最优结果。 当前设计方案中,设计可行域空间较小,也就是结构可改动的范围较小,所以优化结果 不明显。如果增加设计可行域空间,则可能得到更显著的优化结果。优化前结构最大线 位移为 0.165mm;优化后结构最大线位移为 0.191mm。优化前后数值比较如表 4.5 所示。

表 4.5 优化前后数值比较 Tab. 4.5 Comparison between Intial Design and Optimal Design

	<i>结构</i> <i>重量</i>	Des01	Des02	Des03	Des04	Des05	约束1	约束2
初始值	9.84t	290m m	80mm	65 <i>mm</i>	240mm	50mm	12.15MPa	12.13 MPa
优化结果	9.07t 7.82%↓	280m m	50mm	10mm	300mm	20mm	15.38MPa	15.29MPa

目标和设计变量的迭代历史如下图 4.19 和图 4.20 所示。



4.4 存在的问题

11.11

POSHAPE 平台上实现的参数化结构形状优化设计方法是集成在 CAD 系统上的 CAE 优化设计方法。它直接以 CAD 平台上创建的参数化结构几何模型为研究对象,以 CAD 系统中尺寸参数全局变量作为优化的设计变量。对于工程设计人员来说是一种方 便、实用的优化设计工具。相对于传统的结构形状优化设计方法来说,它能够处理复杂 三维实体结构的形状优化设计问题,如上一节中的两个工程实例,它们的几何模型都相 对比较复杂,具有很多细节几何特征,使用节点坐标很难描述和控制这类结构的几何特 征。



该系统在使用过程中存在一些问题需要注意:

- ① 暂时不能处理与网格模型相关的边界条件定义。在优化设计的每一个迭代步上,有限元网格模型使用全自动网格剖分算法进行更新。采取这样的方法是为了适应复杂实体模型的几何大变形,并保证有限元网格质量乃至有限元计算精度。但是,迭代过程中有限元网格的拓扑关系不能保证一致,因而不能施加网格相关的边界条件定义。对于某些与网格相关的边界条件定义,如集中荷载或局部外载,可以通过在结构局部添加几何小特征(如拉伸特征)来近似表示。
- ② 使用基于有限差分灵敏度方法的优化算法对结构设计域全局搜索能力较弱,无法保证优化迭代收敛到全局最优解。在实际使用过程中可以通过调整差分步长和改变初始解位置来改善这一问题。
- ③ 为了计算结构响应对设计变量的灵敏度,在实际优化过程中有限元分析的调用次数 远多于优化迭代步数,增加了系统的计算量,比如机床部件的参数化结构优化设计 过程,优化迭代 6 步后搜索到最优解,而迭代过程中有限元分析调用 46 次,这与 设计变量的数目相关。

④ 形状优化设计的效果受几何建模思路的影响,不同的建模思路决定了结构在尺寸驱动下形状的改变趋势,因此要求在几何建模过程中恰当地使用几何约束和尺寸约束;此外,基于几何模型的有限元建模方法要求几何模型在优化迭代过程中拓扑保持不变,因此对设计变量上下限的定义要防止几何干涉,避免几何模型拓扑改变。

4.5 小结

本章通过若干工程实例展示 POSHAPE 平台的三维实体参数化结构形状优化设计方法。该方法基于 CAD/CAE 集成,以结构的几何模型为对象,以尺寸参数为设计变量,研究结构形状对性能的影响,通过形状优化的手段改变结构形状尺寸,以提高结构性能。 POSHAPE 以工程设计人员熟悉的参数化几何建模 CAD 系统为平台,实现的结构形状优化设计方法适用于工程中大型三维复杂机械零部件的形状优化设计,方法简单、有效。本章给出工程实例说明本文方法的实用性。

5 空间壳体结构参数化形状优化设计

5.1 引言

壳体结构具有很好的空间传力性能,能以较小的构件厚度形成承载能力高、刚度大的承重结构,能覆盖或围护大跨度的空间而不需中间支柱,能兼承重结构和围护结构的 双重作用,从而节约结构材料。壳体结构可做成各种形状,以适应工程造形的需要,因而 广泛应用于工程结构中,如大跨度建筑物顶盖、中小跨度屋面板、工程结构与衬砌、各 种工业用管道(见管道结构)、压力容器(见容器结构)与冷却塔、反应堆安全壳、无线电 塔、贮液罐等。在以往这类结构的设计中,设计人员往往按固化的标准或规范的要求进 行工作。这些标准和规范通常提出一些做了简化的、规格化的计算方法,相应也选择了 较高的安全系数。随着工业生产的迅速发展,工程结构的规模和工作条件的复杂性越来 越高,如工程中常用的压力容器的尺寸越来越大,操作压力和温度越来越高,结构和形 状也越来越复杂,对安全可靠性的要求越来越严格。这就要求工程设计人员更多更好地 设计出能用于各种各样复杂工作环境的压力容器。依靠以往的规范和标准在实际计算过 程中相对过于保守,不能完全满足,因此有必要提供一种实用、可靠的设计方法,为设 计人员在压力容器设计阶段提供更多、更全面的结构信息。

对于壳体结构来说,结构的外形对整体强度和刚度有着密切关系,使用形状优化设 计手段可以通过对结构外形的设计提高结构整体性能。壳体结构形状优化设计关键问题 之一是要建立适当的曲面模型的参数化形状描述方法。在本章,第2节首先介绍本文提 出的基于参数化实体模型的曲面建模方法以及参数化壳体结构有限元模型的建模方法。 第3节 POSHAPE 中实现的参数化壳体结构形状优化设计方法。第4节给出若干工程实 例介绍方法的有效性和实用性。最后,对本章工作进行小结。

5.2 参数化曲面建模方法

壳体结构是工程中常见的曲面模型,在 CAD 几何造型领域,曲面模型的参数化研 究主要集中在自由曲面技术的发展。自由曲面技术非常适用于具有流线型外形的结构, 它可以描述任意复杂的曲面模型,并且可以很容易地对曲面整体或局部光滑程度等几何 性质进行调整以满足设计需要。但工程中存在相当一部分的壳体结构都属于规则形体, 可由平面、圆柱面、圆环面、锥面、球面等基本的几何形体或者它们的组合模型来描述。 针对这类结构,本文提出一种基于参数化实体模型的建模方法,可以通过直观、有效的 建模方法,使用较少的尺寸参数,实现具有规则形体曲面模型的参数化。

5.2.1 自由曲面建模技术

自由曲面造型技术最早是在 1964 年由美国麻省理工学院的孔斯(Steve Coons)在 MIT 提出了给定的,他提出围成封闭曲线的四条边界就可定义一块曲面,用小块曲面片 表示自由造型曲面,使曲面片边界达到任意高次连续阶的理论,此方法得到了当时工业 界和学术界的极大推崇,称之为孔斯曲面。此外还有非常有名的 Bezier 曲线曲面技术。 在一段之内,曲线曲面的参数化形式成为形状数学描述的标准形式。

到目前位置,常用的曲面建模方法大都使用以 NURBS 为代表的自由曲面技术。这 类方法,通过对一定数目的空间离散点使用插值、拟合或逼近方法获得近似的空间自由 光滑曲面,建立多项式代数有理方程。通过调整离散点坐标及其相关变量就可以修改目 标曲面。

以具有代表性的 NURBS 曲面的有理基函数形式为:

$$p(u,u) = \frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} \omega_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} \omega_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)}$$
(5.1)

上式中, *V_{i,j}*为控制顶点, *N_{i,k}(u)*, *N_{j,j}(v)*分别为 u, v 方向的 k 次和1次 B 样条基函数, *ω_{i,j}*为权因子。自由曲面的参数化控制就通过控制顶点位置和全因子的取值来完成。 对曲面模型来说,基于自由曲面造型技术的参数化控制可以实现对曲面的局部控制能力,但对于工程中常见的规则形体来说参数化控制参数数目较多,且参数的选取缺乏明显的几何意义。

对此,Botkin 等人[115]提出了针对空间平面和二次曲面构成的三维壳体结构的形状 优化设计。通过边界控制点之间的相对位置和夹角描述相邻曲面之间的连接关系。该方 法允许当某一平面在边界上与两个相邻曲面之间夹角发生一定改变时,可导致该平面发 生弯曲,如变成柱面,此时使用网格映射方法更新响应的有限元模型。Gates 等人[114] 提出了由边界移动控制的三维壳体结构的形状优化设计方法。该方法主要针对由空间多 个曲面组合而成的壳体结构,允许各曲面边界在两个垂直方向上移动,并以边界上控制 点为设计变量。这类方法以一种更为直观和数目相对较少的设计变量提供了对某一类三 维壳体结构的参数化形状描述。但是方法的通用性受到了很大的限制,需要用户花费相 当的时间描述几何模型与有限元模型之间的几何描述参数,如边界控制节点信息、变形 参数等等。本文提出一种基于参数化实体模型的参数化曲面建模方法,使用实体的表面 信息表示空间(组合)曲面。可直接使用实体模型的几何尺寸驱动曲面模型的几何改变, 不需要额外的几何描述参数描述空间曲面之间的拼接和缝合关系。

5.2.2 基于参数化实体的参数化曲面建模方法

实体建模技术发展到今天已经非常成熟,其中参数化特征建模技术可以将结构的工 艺制造要求、装配要求等设计意图以特征的形式融入结构的几何模型中。基于参数化特 征建模技术以几何模型为研究对象进行结构优化设计,可以保证在优化设计过程中不破 坏最初的设计意图,而且有利于 CAE 与 CAE 的一体化实现。基于参数化实体建模技术 实现曲面的参数化建模也具有同样的工程实际意义。而且对于具有规则形体的曲面模型 来说,这种方法还可以极大地减少几何模型的控制参数数目。如下图 5.1 所示为一个环 形球面及其控制节点构成的控制多边形网格。移动网格上每一个节点的位置可以改变曲 面在对应区域的外形。



Fig. 5.1 A Toroidal Surface Model with its Control Polygon

对于这一规则曲面模型可以使用本文提出的参数化建模方法,将曲面模型集成在实体模型上。首先建立相应的参数化实体模型;然后用实体模型上的表面或若干表面的集合形式来表示目标曲面。如下图 5.2 所示,使用(a)图中的草图设计,建立旋转特征,所生成的实体,如图(b)所示,的上表面即为环形球面。与自由曲面参数化技术相比,使用实体的参数化尺寸就可以控制曲面的外形改变。这里使用了 3 个尺寸参数就实现了对曲面结构的参数化控制,包括(a)图草图设计中的两个长度尺寸参数和旋转特征的旋转角度参数。这里因为对草图中圆弧和其相邻的两条竖直边施加了相切约束,使得圆环半径始终等于下边的一半。相比图 5.1 中的控制节点数目,使用这种方法能够极大地减少尺寸控制参数数目。在 POSHAPE 中通过有限元模型与曲面模型的集成可以获得曲面模型的参数化建模方法。下面(c)图即为环形曲面的网格模型。



参数化曲面模型建模是通过二次开发的手段,基于实体的几何造型 B-Rep 数据结构 (请参考图 3.2)实现的,如下图 5.3 所示。



图 5.3 基于 B-Rep 数据结构的曲面模型定义 Fig. 5.3 Surface Model Definition based on B-Rep Tree

实体模型 B-Rep 树中一个或若干边界曲面的集合用来表示指定的曲面模型。曲面模型的拓扑信息和几何信息可以通过 B-Rep 数据结构得到。在几何造型数据库中,用来描述曲面模型的实体模型指定边界曲面 ID 将被记录,当实体模型在尺寸驱动下更新时,曲面模型也相应更新。这样就实现了曲面模型的参数化建模。曲面建模的数据流程如下图 5.4 所示。



Fig. 5.4 Data Flow for Surface Modeling

5.2.3 参数化壳体有限元建模方法



Fig. 5.5 Integration of Geometry/FEM Medel of Shell Structure with Solid Model

实现了曲面参数化建模之后,与实体有限元建模类似,壳体结构有限元模型可以通过几何造型数据结构 B-Rep 与曲面几何模型实现无缝集成。如图 5.5 所示。

当修改结构的尺寸参数驱动实体几何模型模型更新时,附加在实体模型上的壳体有限元模型也将同时自动更新。如下图



Fig. 5.6 Automatic Regeneration of Shell FEM Model based on Solid Modeling

这里,将空间壳体结构的几何模型、网格模型、边界条件和属性数据集成到几何造型数据库中,并附加在实体模型的 B-Rep 数据结构中。在实体模型修改之后,无需任何手动修改,系统将能够自动更新相应的壳体结构几何模型与有限元模型。实际上,壳体的几何模型、网格模型、边界条件和属性数据是作为一类新的特征信息定义在几何造型数据库中。如下图 5.7 所示。



Fig. 5.7 Feature Definition of FEM Model Integrated with Geometry Model

对于三维实体结构的有限元模型来说,网格模型作为特征信息定义在整个 B-Rep 树上;有限元模型属性数据,包括材料属性、几何属性作为特征信息定义在体元素上;边界条件作为特征信息可以定义在面元素、边元素和顶点元素上。

对于空间壳体结构的有限元模型来说,它网格模型作为特征信息定义在整个 B-Rep 树上,在执行剖分算法时根据壳体的曲面模型特征信息,仅对指定的面元素进行剖分; 壳体的曲面模型作为特征信息定义在面元素上;此时,壳体结构的有限元属性数据作为 特征信息定义在面元素上;有限元边界条件作为特征信息则定义在边元素上和顶点元素 上。

参数化实体造型 CAD 系统 MDT6 I.用户操作界面 驱动 输出 实体几何模型 尺寸参数/设计变量表 传输 作为螨件以命令形式内聚在 CAD 系统 曲面模型 有限元模型 有限元分析 优化设计 收敛 II. 用户二次开发环境 - ObjectARX 与实体模型集成的参数化曲面/有限元建模 集成: Jifex 集成: DOT

5.3 空间壳体结构参数化形状优化设计方法

图 5.8 POSHAE 上壳体结构参数化形状优化设计框架

Fig. 5.8 Architecture of POSHAPE for Shell Parameterized Shape Optimization

空间壳体结构的参数化形状优化设计方法具体操作流程如图 5.8 所示,主要操作步骤如下:

STEP1: 创建结构的参数化几何模型,为驱动尺寸定义尺寸参数和参数上下限,并 存入设计变量表中;

STEP2: 在实体几何模型上定义曲面几何模型;

STEP3: 在几何模型上定义有限元性质数据和边界条件;

STEP4:执行网格全自动剖分,根据 STEP2 和 STEP3 中定义的数据建立壳体结构有限元模型;

STEP5: 进行结构分析, 系统将自动读取结构响应;

STEP6: 从设计变量表中读取设计变量数据,开始优化迭代;

STEP6: 当系统判断优化未收敛时,则首先将设计变量当前值写回设计变量表中,同时根据新的尺寸参数数值更新几何模型,然后系统返回 STEP4,自动执行上述操作步骤,直到优化收敛为止。

5.4 算例

在各种复杂工作环境下工作的壳体结构,其主要的工作荷载经常是由各种因素直接 或间接引起的内压或外压荷载。在压力过高的情况下,将会导致壳体结构的"失稳"。 壳体"失稳"主要包括三种形式。一是强度失稳,这里需要研究结构在荷载作用下结构 内部所产生的应力与材料需用应力之间的关系;二是刚度失稳,这里需要研究壳体结构 在压力作用下结构的弹性变形,并防止结构因变形过大导致系统无法工作或降低工作效 率;三是稳定失稳,这里研究结构的屈曲失稳系数,防止结构在压力作用下,形状发生 突然改变,进而丧失正常工作能力。这里将给出两个算例说明本文提出方法的有效性。

5.4.1 压力容器的参数化形状优化设计



Fig. 5.9 Parametric solid model and finite element model of initial design

图 5.9 所示为工程中常见的储存液体的压力容器几何模型和有限元模型。在容器的顶端有一个液体注入口,容器的下端有两个支脚,这里仅对压力容器主体进行参数化结构优化设计,不考虑下端的两个圆柱形支脚。

有限元模型的边界条件是压力容器与支脚连接曲线定义固支边界条件,压力容器内部施加内压,大小为 5MPa。杨氏模量为 20GPa, 泊松比 0.3。

实体建模的主要草图设计如图 5.10 所示。实体建模过程中总共使用了 26 个尺寸参数,其中有 5 个定义为全局变量,并将用作优化设计变量。



Fig. 5.10 The sketch design for parametric model of pressured vessel

这5个设计变量分别控制了压力容器两端球壳的半径,注入孔到压力容器一段的距离,注入孔到压力容器中轴线的距离和两个支脚到压力容器两端的距离。设计变量的初始值、上下限和最优设计如表5.1所示。

Tab. 5.1 Design Variables for Case I								
(单位:mm)	Dim01	Dim02	Dim03	Dim04	Dim05			
初始值	100.00	120.00	20.00	60.00	60.00			
设计上限	200.00	120.00	30.00	100.00	100.00			
设计下限	70.00	30.00	0.00	20.00	20.00			
优化设计	169.30	30.00	0.00	20.00	52.68			

表 5.1 算例 1 设计变量表

压力容器优化设计的目标是保证结构重量小于200Kg的同时提高结构在x方向的刚度。优化设计迭代12步后收敛,得到的优化设计如表5.1和表5.2所示。

表 5.2 结构响应的初始和优化设计

Tab. 5.2 Initial Design and Optimal Design of Structural Response

	重量 (kg)	X 向最大线位移 (mm)
初始设计	185.2	8.670
优化设计	182.2	0.409

图 5.11, 5.12 所示为结构优化目标函数和设计变量迭代历史。图 5.13 所示为结构优化前后 X 向位移云图。



图 5.12 设计变量迭代历史 Fig. 5.12 Design Variables Iteration History


由图 5.13,表 5.1 和表 5.2 所示结果可以得知,经过优化设计压力容器两端球壳半 径减小,注入孔移到压力容器中轴线上并靠近压力容器的端头,压力容器下端离注入孔 最近的支脚也同时向压力容器的端头。此时,结构的重量与初始设计相比稍有下降,同 时结构的刚度得到了很大地改进。

5.4.2 飞行器外壳的参数化形状优化设计

算例 2 将对飞行器外壳进行形状优化设计,目的是提高改结构在飞行状态下的屈曲 稳定性。结构的实体模型和草图设计如图 5.13 所示。



图 5.13 飞行器外壳的实体模型和单图设计 Fig.13 The solid model and sketch designs of spacecraft

图 5.14 所示为飞行器外壳的有限元模型, 顶部开孔为飞行器舱口, 外壳环侧上的两个开孔属于飞行器上两个设备舱, 这两个开孔通过图 5.13 中实体模型上的两个拉伸特征添加在飞行器外壳主体模型上。在图 5.13 的草图设计中定义了三个尺寸全局变量, 分别是: Dim03 定义了方形舱口距离飞行器下边沿的高度; Dim04 定义了两个舱口开口法向的夹角; Dim05 定义了方形舱口的倒角半径。这些尺寸参数将用作优化的设计变量, 它们的初始值、上下限和最优设计如表 5.3 所示。



图 5.14 飞行器外壳有限元模型 Fig. 5.14 Finite Element Model of Spacecraft

表 5.3 算例 2 设计变量表

Tab. 5.3 Design Variables for Case 2				
(単位:m)	Dim03	Dim04	Dim05	
初始设计	0.6	60	0.1	
上限	0.7	180	0.15	
下限	0.2	40	0.05	
优化设计	0.26	161.63	0.14	

结构分析考虑飞行器在竖直向下的惯性加速度,大小为-650米/秒²,作用下结构的 屈曲响应,在飞行器的下边沿施加了固支约束。材料的杨氏模量为72GPa,泊松比为0.27。 结构形状优化的目标是临界屈曲系数最大化,约束条件是结构的重量小于150kg和z向 最大位移小于 0.9mm。形状优化迭代了 11 步后收敛。优化前后结构响应如表 5.4 所示。

表 5.4 结构响应的初始和优化设计					
Tab. 5.4 Initial Design and Optimal Design of Structural Response					
	临界屈曲系数	重量 (kg)	Z 向位移 (mm)		
初始设计	8.87	144.0	0.86		
优化设计	13.20 148.82%	144.1	0.71		

主 6 4 法按照应约知经和投资计

图 5.15 所示为优化前后结构的 z 向位移云图。



由表 5.3、表 5.2 和图 5.15 可知,经过形状优化设计,方形舱口的高度降低,更靠 近飞行器的下边沿;且与圆形舱口的夹角增大,几乎移到圆形舱口的背面;方形舱口的 倒角半径增大。此时,结构的临界屈曲系数得到了显著提高,同时结构的重量基本保持 不变,刚度也略有提高。目标函数与设计变量的迭代历史如图 5.16 和 5.17 所示。





5.4.3 汽车的悬挂控制臂的参数化形状优化设计

这个例子是文献[111]和文献[112]上的一个算例。这个结构是汽车上的一个悬挂控制臂,由Yang[111]首先提出,文中提出了在商业化 CAE 软件 MSC/NASTRAN 上实现的三维壳体结构参数化形状优化设计。MSC/NASTRAN 67 中提供了针对结构小变形的有限元网格自动更新技术,因此文[111]中使用半解析方法计算结构响应对设计变量的灵敏度。在优化设计过程中,有限元网格模型只剖分一次,在每个迭代步上根据形状设计变量的改变不断更新网格节点位置,如式 5.2 所示。式中,*Q*_{ik} 描述了新的节点坐标 *x*_i 与形状设计变量 *b*_k 之间的对应关系,这里 *x*^o_i 是当前的节点坐标,*C*_i 是一个常向量,它保证节点的初始位置为 *x*^o_i。

$$x_i = x_i^0 + Q_{ik}b_k + C_i \quad i = 1..3, \quad k = 1..n$$
(5.2)

在优化开始之前,用户需要在 MSC/NASTRAN 的数据卡 DVGRID 中预先定义 Q_{ik} , 由节点坐标对设计变量取导数,可以发现 Q_{ik} 实际上就是定义了节点的速度场。



图 5.18 控制臂的几何尺寸标注图[112] Fig. 5.18 Intial Dimension Figure for the Control Arm[112]

参考图 5.18, 文[111]中算例使用了 6 个形状设计变量和 1 个尺寸设计变量对控制臂的进行优化设计。对于每一个设计变量用户都需要定义响应的 *Q*_{ik} 控制迭代过程中网格更新。

Lindby 等人在文[112]中计算了相同的结构。文中使用离散的解析方法计算结构响 应对设计变量的灵敏度,其中网格节点对设计变量的灵敏度是通过设计速度场来计算 的。网格的节点通过 CAD 系统中提供的曲面上点的参数坐标保证一定的相对位置,即 网格拓扑结构保持一致,并在迭代过程中随着曲面的形状改变进行更新。如图 5.18 所示, 文[112]使用了 13 个形状设计变量和 4 个尺寸设计变量对结构进行形状优化设计。

本文参考文[112]中算例,使用同样的 13 个形状优化设计变量,创建参数化的实体 模型如图 5.19 所示并在实体模型基础上实现三维壳体结构的形状优化设计。



图 5.19 控制臂的初始实体与有限元模型 Fig. 5.19 Initial Solid Model/Finite Element Model of Control Arm

控制臂在前端孔处受到大小为 F_y=-2500 和 F_z=2500 的荷载作用,在后端两侧立板 开孔处施加固支条件。杨氏模量为 200GPa,泊松比为 0.32。设计变量初始值及其上下 限和最优值如表 5.5 所示。

变量名	初始值	上限	下限	最优值
B1	180	240	130	130
B2	250	390	100	264.38
B3	100	200	80	80.34
B4	80	200	80	80.29
B5	90	90	20	70.55
B6	10	10	5	9.96
B7	10	10	5	9.96
B8	60	200	20	40.31
B9	130	200	20	85.96
B10	80	150	20	59.14
B11	60	150	5	48.06
B12	180	200	120	120
B13	90	90	85	85

表 5.5	算例 3	设计变	量表(单位:	mm)
Tab. 5.5 I	Design V	/ariables	of Case 3(u	nit: mm)

优化的目标是降低结构重量,约束为结构最大 Mises 应力小于 28MPa。优化过程经过 11 步达到收敛。优化前后结构响应如表 5.6 所示。

表 5.6 结构响应的初始和最优设计

Tab. 5.6 Initial and Optimal Design of Structural Responses

	结构重量(单位:g)	Mises 应力(单位:MPa)
初始设计	16510	20.16
最有设计	10650	9.20

优化前后结构有限元模型对比如图 5.20 所示。经过优化,结构重量降低了 35.49%,同时最大 Mises 应力也降低了 54.37%,结构的整体性能得到了很大地改进。



图 5.20 优化前后结构有限元模型及其实体模型 Fig. 5.20 Initial and Optimal Finite Element Model with its Solid Model

目标函数和约束的优化迭代历史如图 5.21 和图 5.22 所示。





5.5 小结

本章介绍了在参数化实体行行优化工作基础上,实现的空间壳体结构参数化形状优 化设计方法。对于工程中存在大量的壳体结构具有规则形体,可由平面、圆柱面、圆环 面、锥面、球面等基本的几何元素或者它们的组合模型来描述。对于这类结构,本文提 出了基于参数化实体的参数化曲面建模方法,并在几何特征造型系统中将有限元模型以 特征信息的形式加载到模型中的各类几何元素上,将空间壳体结构有限元模型与几何模 型集成在一起,实现了有限元模型的动态更新。相比基于自由曲面技术的参数化方法, 本文提出参数化曲面建模方法更方便、直观,以相对较少的实体模型的几何尺寸约束作 为曲面的控制参数,保证结构的最初设计意图在优化设计过程中不被破坏。

在 POSHAPE 中建立了壳体结构的参数化形状优化设计方法,最后给出了若干算例 验证了本文方法的有效性。

6 材料单胞的参数化形状优化设计

6.1 引言

复合材料的宏观性质取决于复合材料的细观结构形式。要设计具有特性属性的复合 材料,就必须对复合材料的细观结构形式进行设计。材料细观结构形式的描述包括单胞 的形状参数和单胞域上的材料分布参数。这里提出了一种参数化的形状优化方法,对于 带有周期性细观结构的两相复合材料,根据给定的复合材料细观单胞结构的基本构型, 通过参数化的造型技术,结合均匀化方法,提出了通用的材料单胞形状参数化设计方法, 以获取指定材料性能。本方法在参数化结构形状优化设计 CAD/CAE 集成平台 POSHAPE 上完成程序实现。本章算例给出了两相蜂窝型骨架复合材料和空心复合材料周期性单胞 的零泊松比和指定参数性质的形状优化设计过程,并验证了本方法的有效性。

6.2 研究意义

随着相关理论、技术的不断发展,各类高性能结构材料广泛地应用于航空、航天工 业及核工业等高新技术工程领域。且对于在特定、复杂环境下工作的结构来说,复合材 料比传统材料有着明显的优越性。对于动力机械来说,工作温度愈高,比强度和比刚度 愈高,效率也愈高。从军用发动机的发展驱使看,蜗轮温度和推重比都在逐年提高,要 求材料及冷却技术要不断改进。有资料表明,飞机及航空发动机性能的改进,分别为 2/3 和 1/2 是靠材料性能提高。对于飞行速度更高的卫星和飞船来说,能减重 1kg 就能带来 极高的效益。汽车节油有 37%靠材料的轻量化,40%靠发动机的改进;而绝热发动机(不 需水冷),主要靠材料性能的提高。

复合材料的一个重要特征是具有良好的力学性能(如高比强度、比刚度、韧性、耐磨性和小热膨率)和物理性能(导热、导电、隔音、耐腐蚀性等);它的另一个重要特征是其具有良好的可设计性[22],这也使得获取特定性能材料并取代传统材料成为可能。通过材料设计,可以得到具有特定性能的复合材料。复合材料的设计,包括微结构及结构细观的优化设计、可靠性设计及计算机辅助设计与工程已成为当前复合材料领域的热门课题。

对于材料设计来说,如何精确的确定复合材料的特性是实现材料设计的关键。复合 材料一般由多相材料复合而成,其宏观等效性能取决于各相材料的性能和排列形式,其 微结构的复杂性,如组分材料的材料性能,分布方式,组分材料体分比都直接影响复合 材料的整体材料性能。即使借助于高性能的计算机,解决这种高非线性材料的边界问题 也是非常困难的。通常的做法是用近似材料模型代替真实复合材料,其中一种较常用、 有效的方法是均匀化方法。均匀化方法有严格的数学理论基础[76],适应范围广。近年 来,计算机技术的飞速发展为大规模的科学计算提供了可行性,均匀化方法的应用也随 之广泛起来。

国内外许多学者利用均匀化方法进行了多项研究,如非均匀材料的弹性性能和宏、 细观尺度的力学响应计算等。早在上世纪七十年代,均匀化方法的数学理论就被应用于 确定周期性复合材料的等效材料性能[77]。该理论被广泛的应用于物理和工程领域的规 则非均匀连续介质问题中,如复合材料电磁场问题。实际上,力学和物理学中的连续性 假设就可以理解为一种均匀化假设。均匀化方法的另一个重要运用领域是材料性能的优 化设计[23],即通过对材料细观结构的设计变量的优化设计使其宏观物理性能满足特定 的要求。

均匀化方法是模拟多尺度相关的物理场问题的有效方法。国内外多项相关研究中使 用了均匀化方法。Ghosh 等[78]采用均匀化方法和多边形非协调单元研究了非均匀材料 的弹性性能和宏细观尺度的力学响应。Oden 等[79,80]开展了均匀化方法后验误差分析 方法和自适应算法的研究。Terada 等[81]详细讨论了均匀化方法中特征体元尺寸对计算 结果收敛性的影响。Terada 和 Kikuchi[82]系统介绍了均匀化方法在线弹性和弹塑性问题 的理论研究和数值算法。Kouznetsova 等[83]提出了考虑微观特征体元尺度效应的改进均 匀化方法,其主要思想是在渐进展开时考虑高阶项。国内,曹礼群和崔俊芝[84,85]及其 课题组针对材料多尺度计算结合均匀化方法进行了系统的研究。

改善结构性能的传统方法通常是利用优化技术对结构的尺寸、形状和拓扑进行设计。从力学的观点,材料设计的目的是确定组分材料在一定区域(如单胞域)上的形状和拓朴形式。这个目的与连续体形状和拓朴优化设计的目的相同,因此可以使用形状和拓朴优化问题的求解算法解决材料设计问题。且复合材料具有良好的可设计性特点,通过调整其组分、纤维方向或细观结构的拓扑和形状,可以改善结构性能并设计出具有特定性能的材料。

针对实体的参数化特征造型技术是目前计算机辅助设计系统,也就是 CAD,中通 用的造型方法,它可以提供对描述结构形状的几何模型的参数化设计和尺寸驱动。首先 通过特征这一高层次的设计概念,用户可以更加方便、快速地创建结构几何模型;其次, 造型系统内部提供几何和尺寸约束可以更好地捕捉用户的设计意图,使用参数化的尺寸 参数更可以实现对几何模型的动态驱动和快速修改。将参数化特征造型技术引入结构形 状优化设计,则可以提供参数化的结构形状描述方法以及参数化的模型动态自动更新功 能。相比传统的基于离散设计变量的形状优化设计方法,基于参数化特征造型技术开发 的参数化形状优化设计方法将更为有效和实用。目前参数化特征造型技术已经愈来愈受 到计算机辅助分析(CAE)研究人员的重视,并应用于结构有限元分析和优化设计的研究工作中。

对于带有周期性微结构的多相复合材料设计问题,可以在其单胞尺度上完成,这里 单胞是此类复合材料最小的重复单元。其中两相复合材料一般由材料相和空心相或者两 类不同属性的材料相构成。对于此类复合材料的单胞结构,在结构构型给定的前提下, 可以通过形状优化的手段对材料属性进行优化设计。使用 CAD 系统创建单胞的结构模 型可以使用尽量少的数据准确、形象地描述几何信息,通过开发可以将材料信息与几何 信息集成在一起。

本文以参数化实体造型 CAD 软件为平台,提出了用于材料设计的参数化结构形状 优化设计方法,针对周期性两相复合材料的单胞结构,对其材料分布形状进行优化设计, 以获取具有特定属性的复合材料。该方法利用 CAD 平台上的二次开发接口,对 CAD 平 台的数据库进行扩展定义,实现了单胞结构有限元模型的参数化以及与参数化几何模型 的动态联动。该方法的程序实现是在参数化结构形状优化设计 CAD/CAE 集成平台 POSHAPE 上完成的,在 POSHAPE 中集成了均匀化方法用于复合材料的材料特性计算。

6.2 材料性质均匀化计算方法

均匀化理论的主要思想是,针对非均匀复合材料的微观上周期性分布这一特点,选 取适当的相对于宏观尺度很小并能反映材料组成性质的单胞,建立单胞模型,确定单胞 的描述变量,写出能量表达式(势能或余能等),利用对物理场量的渐近展开和变分原理, 得出基本求解方程,再利用周期性条件和均匀性条件及一定的数学变换,便可以联立求 解,最后通过类比可以得到宏观等效的弹性系数张量、热膨胀系数张量、热弹性常数张 量等一系列等效的材料系数。这里对本文方法中用的均优化方法进行简要描述。

典型的均匀化问题所讨论的模型通常具有规则的周期性。此周期远小于复合材料的 宏观尺寸,具有这样性质最小组成部分称为代表体元。对于周期性复合材料,其材料特 性在宏观尺度上为x的光滑函数,而在细观尺度上为高振荡函数。对于这类材料,需要 从两个尺度上考虑问题,一个是宏观尺度坐标x(也称全局坐标),另一个是细观尺度 坐标^y(也称作局部坐标)。其相应的物理特性(包括几何性质、力学性质、热力性质等) 具有如下性质:

$$F(x + NY) = F(x)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 \\ 0 & n_2 & 0 \\ 0 & 0 & n_3 \end{bmatrix}$$
(6.1)
(6.2)

其中 $X = \{x_1 \ x_2 \ x_3\}^T$ 是物理点的位置向量, N 是一个 3x3 的对角阵, n_1 , $n_2 \pi n_3$ 是任意的整数; $Y = \{Y_1 \ Y_2 \ Y_3\}$, 是一个常数向量,表示结构的周期; F 是关于位置向量 x 的函数,可以是标量、向量或张量。

比如对于一个周期复合材料单胞Y,其力学性能可以表示为:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \tag{6.3}$$

其中的 E_{ijkl} 就是一个关于位置向量 x 的周期函数, 且为张量。因此 E_{ijkl},满足关系式:

$$E_{ijkl}(x + NY) = E_{ijkl}(x)$$
(6.4)

假设细观尺度坐标^{*y*}和宏观尺度坐标*x*的单位长度比值为*ε*,则*ε*必为一个非常小的数,有关系式:

$$\varepsilon y = x \quad or \quad y = x/\varepsilon$$
 (6.5)

对于二维线弹性问题,复合材料的宏观弹性性能由式(6.6)表示的本构关系描述:

$$\overline{\sigma_{ij}} = E^H_{ijkl} \overline{\varepsilon_{kl}}$$
(6.6)

这里, 上划线表示体积平均值。

复合材料的泊松比可由宏观弹性张量的分量表示成如下形式:

$$v_{12}^{H} = \frac{E_{1122}^{H}}{E_{1111}^{H}}, \quad v_{22}^{H} = \frac{E_{1122}^{H}}{E_{2222}^{H}}$$
(6.7)

复合材料的宏观弹性张量 E^H 由均匀化方法确定。

6.2.1 复合材料弹性常数张量计算均匀化方法

下面将简要介绍使用均匀化方法求解材料的宏观弹性常数张量的理论推导过程。 材料的弹性张量可表示为:

$$E_{ijkl}^{\varepsilon} = E_{ijkl}(x, y) \tag{6.8}$$

上标*ε*表示材料的弹性张量与单胞的周期性相关。结构的位移可展开成如下的级数 形式:

$$u_i^{\varepsilon}(x) = u_{0i}(x, y) + \varepsilon u_{1i}(x, y) + \varepsilon^2 u_{2i}(x, y) + \cdots$$
(6.9)

如果求得式(6.9)中的各项位移 $u_{0i}(x,y)$, $u_{1i}(x,y)$, $u_{2i}(x,y)$, 则位移场可完全确定。 这里 $u_{0i}(x,y)$, $u_{1i}(x,y)$, $u_{2i}(x,y)$ 也是细观尺度上的Y周期函数。

考虑一个多孔周期性微结构的弹性问题,如图 6.1 所示。在 R^3 的开子集 Ω 上,宏观 结构受到体力f和外力t的作用,其光滑的边界 Γ 由外力边界 Γ ,和约束边界 Γ_d 构成。



Fig. 6.1 Elasticity Problem in a cellular body

结构的微观单胞结构是一个包含开口v的长方体Y,如图 6.2 所示。开口 v有充分 光滑的边界s,且受到开口内外力^p的作用。



Fig. 6.2 Base cell

这样,应力-应变关系和应变-位移关系可以表示成如下形式:

$$\sigma_{ij}^{\varepsilon} = E_{ijkl}^{\varepsilon} e_{kl}^{\varepsilon}$$

$$e_{kl}^{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{k}^{\varepsilon}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{l}^{\varepsilon}}{\partial x_{k}} \right)$$
(6.10)
(6.11)

虚位移方程可以写成:

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k^{\varepsilon}}{\partial x_l} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega_{\varepsilon}} f_i^{\varepsilon} v_i d\Omega + \int_{\Gamma_l} t_i v_i d\Omega + \int_{S^{\varepsilon}} p_i^{\varepsilon} v_i ds$$
(6.12)

利用双尺度渐近展开,注意到,式(6.12)可写为:

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \left\{ \frac{1}{\varepsilon^{2}} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} + \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} + \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \right] + \left[\left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \left(\frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{2}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} \right] + \varepsilon(\dots) \right\} d\Omega$$
$$= \int_{\Omega_{\varepsilon}} f_{i}^{\varepsilon} v_{i} d\Omega + \int_{\Gamma_{i}} t_{i} v_{i} d\Gamma + \int_{S^{\varepsilon}} p_{i}^{\varepsilon} v_{i} ds$$
(6.13)

这里引入变换公式,对于一个Y周期函数 $\Psi(y)$,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,有:

$$\int_{\Omega_{\varepsilon}} \Psi(\frac{x}{\varepsilon}) d\Omega = \frac{1}{|Y|} \int_{\Omega} \int_{\mathcal{K}} \Psi(y) dY d\Omega$$

$$\int_{S^{\varepsilon}} \Psi(\frac{x}{\varepsilon}) d\Omega = \frac{1}{\varepsilon |Y|} \int_{\Omega} \int_{\mathbb{S}} \Psi(y) ds d\Omega$$
(6.14)
(6.15)

对(2.13)使用变换公式,并假设所有函数光滑当 $\varepsilon \to 0$ 时积分存在,根据 ε 的次数合并同类项,有:

$$\frac{1}{|Y|} \int_{\Omega} \int_{\mathbb{R}} E_{ijkl} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} dY d\Gamma = 0$$

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{|Y|} \int_{K} E_{ijkl} \left[\left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} + \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \right] dY \right\} d\Omega = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_{S} p_{i} v_{i} dS \right) d\Omega$$

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{|Y|} \int_{K} E_{ijkl} \left[\left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \left(\frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{2}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}}{\partial y_{j}} \right] dY \right\} d\Omega$$

$$= \int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_{K} f_{i} v_{i} dY \right) d\Omega + \int_{\Gamma_{i}} t_{i} v_{i} d\Gamma$$

$$(6.18)$$

因为v为任意函数,选取v=v(y),对式(6.17)分部积分,应用散度定理及周期性性质,可以得到:

$$\frac{1}{|Y|} \int_{\Omega} \left\{ \int_{Y} \left[-\frac{\partial}{\partial y_{i}} \left(E_{ijkl} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} \right) \right] v_{i} dY + \int_{S} E_{ijkl} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}} n_{i} v_{i} dS \right\} d\Omega = 0$$
, $\forall v$ (6.19)

由v是任意函数,式(6.19)可以写为:

$$-\frac{\partial}{\partial y_i} \left(E_{ijkl} \frac{\partial u_k^0}{\partial y_l} \right) = 0 , \quad \forall v \in Y$$
(6.20)

$$E_{ijkl} \frac{u_k^0}{\partial y_l} n_j = 0 \tag{6.21}$$

从上式可以得出:

$$u^{0}(x, y) = u^{0}(x)$$
(6.22)

说明,多尺度渐近展开的第一项完全依赖于宏观尺度*而与细观尺度无关。

由于v的任意性,现在选取v为x的函数而与y无关,即v = v(y),则方程式(6.17)可以写为:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_{S} p_{i} dS \right) v_{i}(x) d\Omega = 0$$
(6.23)

即:

$$\int_{\Omega} p_i(x, y) dS = 0 \tag{6.24}$$

表明外力必须是自平衡的。

另外,把式(6.22)带入式(6.17)可以得到:

$$\int_{K} E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}(y)}{\partial y_{j}} dY = \int_{S} p_{i} v_{i} dS$$
(6.25)

对上式分部积分,应用散度定理及Y周期性条件,得:

$$-\int_{K} \frac{\partial}{\partial y_{j}} \left[E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{k}^{0}(x)}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) v_{i} dY \right] + \int_{S} E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{k}^{0}(x)}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) v_{i} n_{j} dS$$

= $\int_{S} p_{i} v_{i} dS$ (6.26)

考虑"的任意性,则:

$$-\frac{\partial}{\partial y_{j}}\left(E_{ijkl}\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial y_{l}}\right) = \frac{\partial}{\partial y_{j}}\left(E_{ijkl}\frac{\partial u_{k}^{0}(x)}{\partial x_{l}}\right), \quad Y \perp$$

$$E_{ijkl}\frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} = -E_{ijkl}\frac{\partial u_{k}^{0}(x)}{\partial x_{l}}n_{j} + p_{i}$$

$$(6.27)$$

由于v的任意性,可以利用该性质得到宏观和细观的平衡方程,选取v=v(x),考虑 方程式(6.18),得到宏观平衡方程:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{|Y|} \int_{K} E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial y_{l}} \right) dY \right] \frac{\partial v_{i}(x)}{\partial x_{j}} d\Omega$$

$$= \int_{\Omega} \left[\frac{1}{|Y|} \left(\int_{K} f_{i} dY \right) v_{i}(x) d\Omega \right] + \int_{\Gamma_{l}} t_{i} v_{i}(x) d\Gamma, \quad \forall v \in V_{\Omega}$$
(6.29)

选取v=v(y),考虑方程式(6.18),得到微观平衡方程:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{|Y|} \int_{K} E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{k}^{1}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial u_{k}^{2}}{\partial y_{l}} \right) \frac{\partial v_{i}(x)}{\partial x_{j}} dY \right] d\Omega$$
$$= \int_{\Omega} \left[\frac{1}{|Y|} \left(\int_{K} f_{i} v_{i}(y) dY \right) d\Omega \right], \quad \forall v \in V_{K}$$
(6.30)

其中, 宏观力学特性由u⁰表征, 而微观力学特性由u¹表征。

为了得到周期性复合材料等效的弹性常量,在宏观尺度建立平衡方程。这些常量不再表示为 ε 的显示函数,考虑方程式(6.25),如 $\chi^{kl} \in V_{K}$ 为方程式的解,则可以得到如下关系式:

$$\int_{K} E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{p}^{kl}}{\partial y_{q}} \frac{\partial v_{i}(y)}{\partial y_{i}} dY = \int_{K} E_{ijkl} \frac{\partial v_{i}(y)}{\partial y_{i}} dY, \quad \forall v \in V_{K}$$
(6.31)

如Ψ∈ V_y 为方程式的解,则:

$$\int_{K} E_{ijkl} \frac{\partial \Psi_{k}}{\partial y_{l}} \frac{\partial v_{i}(y)}{\partial y_{i}} dY = \int_{S} p_{i} v_{i}(y) dY, \quad \forall v \in V_{K}$$
(6.32)

若将x作为变量,则u¹可以写作关于x的函数,

$$u_i^1 = -\chi_i^{kl}(x, y) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} - \Psi_i(x, y) + \widetilde{u}_i^1(x)$$
(6.33)

其中 $\tilde{u}_i^1(x)$ 为任意常量。

把方程式(6.33)带入方程式(6.29),得:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{|Y|} \int_{K} \left(E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{p}^{kl}}{\partial y_{q}} \right) dY \right] \frac{\partial u_{k}^{0}(x)}{\partial x_{l}} \frac{\partial v_{i}(x)}{\partial x_{j}} d\Omega$$

$$= \int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_{K} E_{ijkl} \frac{\partial \Psi_{k}}{\partial y_{l}} dY \right) \frac{\partial v_{i}(x)}{\partial x_{j}} d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_{K} f_{i} dY \right) v_{i}(x) d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_{l}} t_{i} v_{i}(x) d\Gamma \quad \forall v \in V_{\Omega}$$
(6.34)

此时,得到等效弹性张量:

$$E_{ijkl}^{H}(x) = \frac{1}{|Y|} \int_{K} \left(E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{p}^{kl}}{\partial y_{q}} \right) dY$$
(6.35)

这里的广义位移函数 χ^μ 是(6.31)式的周期解。

利用式(6.35)及式(6.31)求出的 χ^{kl} 就可以计算周期性复合材料等效的弹性系数张量。

6.2.2 复合材料热弹性分析的均匀化方法

复合材料在高性能结构中的应用越来越需要对其进行热弹性分析。为了求得复合材料有效热弹性常数及热膨胀系数,对于有周期微结构的系统,考虑热应力问题,写出热弹性分析的控制方程[86]:

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_k^{\varepsilon}}{\partial x_l} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \alpha_{kl}^{\varepsilon} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \Delta T \right) d\Omega - \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega - \int_{\Gamma} t_i v_i dS = 0$$
(6.36)

其中, E_{ijkl}^{ε} 为弹性系数张量, $\alpha_{kl}^{\varepsilon}$ 为热膨胀系数张量, ΔT 为温度变化, $f_i n^{t_i}$ 分别为体积力和面力分量。

微观方程:

$$\int_{Y} E_{ijkl} \frac{\partial \chi_{k}^{pq}}{\partial y_{l}} \frac{\partial \omega_{i}}{\partial y_{j}} dY = \int_{Y} E_{ijpq} \frac{\partial \omega_{i}}{\partial y_{j}} dY$$
(6.37)

$$\int_{Y} E_{ijkl} \frac{\partial \varphi_{k}^{pq}}{\partial y_{l}} \frac{\partial \omega_{i}}{\partial y_{j}} dY = \int_{Y} E_{ijpq} \alpha_{k} \frac{\partial \omega_{i}}{\partial y_{j}} dY$$
(6.38)

宏观方程:

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^{H} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} \frac{\partial w_{i}}{\partial x_{j}} d\Omega = \int_{\Omega} \beta_{ijkl}^{H} \frac{\partial w_{i}}{\partial x_{j}} d\Omega \ \Delta T^{0}$$
(6.39)

$$E_{ijkl}^{H} = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} (E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{p}^{y}}{\partial y_{q}}) dY$$
(6.40)

$$\beta_{ij}^{H} = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} (E_{ijkl} \alpha_{kl} - E_{ijpq} \frac{\partial \varphi_{k}}{\partial y_{l}}) dY$$
(6.41)

$$\alpha^{H} = \left(E^{H}\right)^{-1} \beta^{H} \tag{6.42}$$

其中, E_{ijkl}^{H} 则是材料均匀化等效弹性张量, β_{ijkl}^{H} 是材料均匀化等效单位热应力, 即 热弹性常数张量, α^{H} 即为等效的热膨胀系数张量。

有了以上的推导, 微观位移^{u¹}可以表示为:

$$u_i^1(x,y) = -\chi_i^{pq}(x,y)\frac{\partial u_p^0}{\partial x_q} + \psi_i(x,y) \Delta T^0 + \tilde{u}_i^1(x)$$
(6.43)

其中, $\tilde{u}_i^1(x)$ 为x的任意函数。

 ∂u_k^0

一旦从全局分析中得到应变,微观应变场就可以由局部化给出,如:

$$\varepsilon_{ij}^{0}(x,y) = \left(I_{ij}^{kl} - \frac{\partial \chi_{i}^{kl}}{\partial y_{j}}\right) \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} + \frac{\partial \psi_{i}}{\partial y_{j}} \Delta T^{0}$$
(6.44)

其中, ^{∂x}, 为宏观应变, 使用局部本构关系, 就可以得到微观热应力的表达形式:

$$\sigma_{ij}^{0}(x,y) = \left(E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{p}^{kl}}{\partial y_{q}}\right) \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} - \left(E_{ijkl} \alpha_{lk} - E_{ijkl} \frac{\partial \psi_{k}}{\partial y_{l}}\right) \Delta T^{0}$$
(6.45)

宏观的热应力表达式也可以近似的写为:

$$\sigma_{ij}^{H}(x) = E_{ijkl}^{H} \frac{\partial u_{k}^{0}}{\partial x_{l}} - \beta_{ij}^{H} \Delta T^{0}$$

(6.46)

从式 6.46 中可以得出,均匀化的热应力本构方程表征了材料宏观应力应变之间的关 系,换句话说,材料均匀化的热弹性特性体现了材料的微观尺度信息。

6.2.3 复合材料热传导性能分析的均匀化方法

导热性是材料的重要物理性质,随着复合材料在工业中的广泛应用,复合材料的导 热性预测受到广泛重视[87]。导热性预测可以直接应用于复合材料的热设计,即设计复 合材料的组成结构,使材料的宏观导热性满足工程要求。均匀化方法除了可以预测复合 材料宏观有效的弹性常数张量,对复合材料进行热弹性分析外,还可用于复合材料的导 热性能预测。

对于一维热传导问题,代表体元的控制方程和热平衡方程可以表示为:

$$q^{\varepsilon} = k^{\varepsilon} \frac{dT^{\varepsilon}(x)}{dx}$$

$$\frac{dq^{\varepsilon}}{dx} + f = 0$$
(6.47)
(6.48)

其中, q^{ϵ} 为热流, $T^{\epsilon}(x)$ 为温度函数, k^{ϵ} 为热传导系数。类似弹性问题求解等效弹性矩阵, 对 $T^{\epsilon}(x)$, $q^{\epsilon}(x)$ 做渐近展开, 可得:

$$T^{\varepsilon}(x) = T^{0}(x, y) + \varepsilon T^{1}(x, y) + \varepsilon^{2} T^{2}(x, y) + \dots$$
(6.49)

$$q^{\varepsilon}(x) = q^{0}(x, y) + \varepsilon q^{1}(x, y) + \varepsilon^{2} q^{2}(x, y) + \dots$$
(6.50)

将式 6.49 和 6.50 代入控制方程和热平衡方程 6.47 和 6.48 中,有:

$$q^{0}(x, y) + \varepsilon q^{1}(x, y) + \varepsilon^{2} q^{2}(x, y) + \dots$$

$$= k(y) \left[\frac{dT^{0}}{dx} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{dT^{0}}{dy} + \varepsilon \frac{dT^{1}}{dx} + \frac{dT^{1}}{dy} + \varepsilon^{2} \frac{dT^{2}}{dx} + \varepsilon \frac{dT^{2}}{dy} + \dots \right]$$

$$(6.51)$$

$$\frac{dq^{0}}{dx} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{dq^{0}}{dy} + \varepsilon \frac{dq^{1}}{dx} + \frac{dq^{1}}{dy} + \varepsilon^{2} \frac{dq^{2}}{dx} + \varepsilon \frac{dq^{2}}{dy} + \dots + f(y) = 0$$

$$(6.52)$$

类似的,对上面二式,按照 ε 相同次数的系数相等,分别建立等式,可知,渐近展 开的第一项 T^0 , q^0 只是宏观尺度x的函数,即:

$$q^{0}(x, y) = q^{0}(x) = k(y) \left(\frac{dT^{0}(x)}{dx} + \frac{dT^{1}(x, y)}{dy} \right)$$
(6.53)

对式 6.53 的两端同时除以 $^{k(y)}$ 且在代表体元域作积分,得到:

$$\int_{\Omega} \frac{q^0(x)}{k(y)} d\Omega = \int_{\Omega} \left(\frac{dT^0(x)}{dx} + \frac{dT^1(x,y)}{dy} \right) d\Omega$$
(6.54)

因为,在单胞周期上 $\int_{\Omega} \frac{dT^{1}(x,y)}{dy} d\Omega = 0$,所以 $q^{0}(x)$ 可以表示为:

$$q^{0}(x) = \frac{|\Omega|}{\int_{\Omega} \frac{d\Omega}{k(y)}} \frac{dT^{0}(x)}{dx}$$
(6.55)

则等效的材料热传导系数^{k^(eff)}可以表示为:

$$k^{(eff)} = \frac{\left|\Omega\right|}{\int_{\Omega} \frac{d\Omega}{k(y)}}$$
(6.56)

均匀化的热传导问题可以表述为:

$$\overline{q} = k^{(eff)} \frac{d\overline{T}(x)}{dx}$$
(6.57)

$$\frac{dq}{dx} + f = 0 \tag{6.58}$$

将一维热传导问题扩展到二维,三维热传导问题,即:

$$\overline{q}_{i} = k_{ij}^{(eff)} \frac{d\overline{T}(x)}{dx_{j}}$$
(6.59)

$$\frac{dq_i}{dx_i} + f = 0 \tag{6.60}$$

相应的等效热传导系数为:

$$k_{ij}^{(eff)} = \frac{1}{|\Omega|} \left[\int_{\Omega} k(y) \left(\delta_{ij} + \frac{\delta \chi_j}{\delta y_i} \right) d\Omega \right]$$
(6.61)

其中, $\chi_{j}(y)$ 为如下偏微分方程的解:

$$\frac{\partial}{\partial y_i} \left[\overline{k}(y) \left(\delta_{ij} + \frac{\delta \chi_j}{\delta y_i} \right) \right] = 0, \quad y \in \Omega$$
(6.62)

均匀化方法预测复合材料的导热性能,既是均匀化方法的一个应用,也是复合材料 导热性能预测的一种新方法。对于复杂问题均匀化方法可以结合有限元技术得到导热系 数的数值结果。

6.3 材料单胞的参数化形状设计方法

参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE 是一个建立在 CAD 平台上的, CAD/CAE 集成的结构设计、分析和优化一体化的软件平台。材料单胞的参数化结构形状优化设计 功能就是在这个平台上实现的。平台的框架如图 6.3 所示。



图 6.3 参数化复合材料单胞形状优化设计平台 POSHAPE 框架图 Fig. 6.3 Architecture of POSHAPE for Cell Parameterized Shape Optimization

POSHAPE 在参数化实体造型 CAD 软件平台 MDT6 上,通过 MDT6 提供的二次开 发接口 ObjectARX,将 CAE 程序,包括:有限元网格生成工具 AutoFEM,材料性质计 算模块和优化器 DOT 作为插件以内嵌的方式集成到 CAD 平台上,让设计人员可以在 CAD 的用户操作界面上通过调用内部命令的形式进行结构的 CAE 分析工作。MDT6 的 二次开发接口 ObjectARX 从本质上讲,是一种特定的 C++编程环境,它包括一组动态 链接库(DLL),这些库与 MDT 在同一地址空间运行并能直接利用 MDT 核心数据结

构和代码,库中包含一组通用工具,使得二次开发者可以充分利用 MDT 的开放结构, 直接访问 MDT 数据库结构、图形系统以及 CAD 几何造型核心,以便能在运行期间实 时扩展 MDT 的功能,创建能全面享受 MDT 内在资源的新命令。



图 6.4 单胞参数化形状优化设计的数据传递流程图 Fig. 6.4 Data Flow for Parameterized Cell Shape Optimization

借助于二次开发工具 ObjectARX, 在 POSHAPE 平台中实现了数据库共享和几何与 有限元模型的一体化集成, 如上图 6.4 所示。系统的数据传递包括三部分内容: 首先, 通过二次开发对数据库进行扩展,将有限元模型数据放在扩展数据库中。初始化之后, 有限元模型随着几何模型的更新而自动更新,实现了与几何模型的动态联动。其次, 有 限元模型更新后通过数据文件将模型信息传递给分析程序进行计算;系统将读取结构响 应,进行优化设计。第三,在每个优化迭代步,系统将当前的设计变量取值(即结构的 几何驱动尺寸)写入参数表并更新几何模型。

在 POSHAPE 中,有限元模型的属性数据和边界条件信息可以通过系统的集成数据 库与结构中几何模型元素(如:面、边和点)进行绑定。在几何模型更新后,有限元模 型的属性数据和边界条件信息就可以通过算法直接映射生成有限元模型,最终实现结构 CAD 和 CAE 模型的一体化集成。

在优化迭代过程中,允许设计变量在给定设计域内自由变化,因此使用全局有限差 分方法计算迭代过程中结构响应对设计变量的灵敏度信息。优化算法可使用修改的可行 方向法或序列线性规划、序列二次规划。

6.3.1 材料单胞的参数化建模



图 6.5: 中间带孔的平面模型和带有相同上表面的实体模型 Fig. 6.5 Cell and the Representative Solid Model

两相复合材料的单胞几何模型是通过平面几何模型来表示的,而 CAD 软件中的参数化建模功能是针对三维实体模型的,在 POSHAPE 中,基于实体的边界表示树,即 B-rep,实现了基于三维实体模型的二维模型参数化建模。如上图 5 中左图所示,要建立的目标模型是中间开孔的二维平面模型。在参数化实体造型软件中,可以首先创建一个对应的中间带有通孔的长方实体,如上图 6.5 中右图所示。然后,将目标模型与 B-rep 上的一个边界面绑定,用于生成相应的有限元模型。对于目标模型来说,其几何模型与有限元模型的参数化定义和更新都是通过参数化的实体模型来完成。也就是说,系统通过参数控制实体几何模型的更新,而它们则随着实体的更新而更新。

6.3.2 材料单胞的参数化形状优化设计



图 6.6: POSHAPE 系统复合材料单胞结构参数化形状优化设计流程图 Fig. 6.6 Flow Chart of Parameterized Cell Shape Optimization

POSHAPE 的三维实体结构参数化结构形状优化设计流程图如图 6.6 所示。因为实现了几何模型与有限元模型的一体化集成,一方面平台中几何模型的尺寸参数可以直接用作优化的设计变量,优化后的设计变量作为尺寸参数可以驱动几何模型的更新;另一方面在迭代过程中,当设计变量驱动几何模型更新之后,有限元模型将会动态联动,自动生成新的有限元数据传输给分析模块。期间无需用户交互。具体操作步骤如下:

STEP1: 创建结构的参数化几何模型,为驱动尺寸定义尺寸参数和参数上下限,并 存入设计变量表中;

STEP2: 在几何模型上定义有限元性质数据和边界条件,当执行网格剖分命令后, 这些数据将自动映射到有限元模型上;

STEP3: 均优化方法计算执行后就进行优化设计阶段,根据得到的结构响应和从设 计变量表中读取的数据,开始优化迭代;

STEP4: 当系统判断优化需要进入下一步迭代时,首先将设计变量当前值写回设计 变量表中,同时几何模型根据新的尺寸参数数值进行更新,然后系统返回 STEP2,自动 执行上述操作步骤,直到优化收敛为止。

6.4 算例

在 POSHAPE 中,不仅可以对材料的单胞结构进行参数化形状优化设计,通过二次 开发手段,也可以对结构进行参数研究,确定结构材料特性与形状尺寸之间的关系。在 下面的算例一中,首先对两相蜂窝型骨架复合材料进行参数研究,然后在算例二中根据 给定优化模型进行单参数的材料单胞形状优化设计。在算例三中,将对两相空心复合材 料的单胞结构进行多参数的参数化结构形状优化设计。

6.4.1 两相蜂窝型骨架复合材料参数化分析



两相材料一般指由实体材料和空心构成的复合材料,蜂窝型骨架复合材料则属于典型的周期性分布的两相复合材料,如图 6.7 所示为材料的细观结构和单个完整单胞结构。 当实体材料在单胞域上的拓扑形式给定,可以对单胞的形状控制参数进行优化设计,以 获取特定材料属性。单胞结构材料属性的参数化分析流程如下图 6.8 所示。

首先,完成几何建模,设定要研究的参数尺寸的变化范围和路径;

然后,执行参数研究。系统根据预先设定的参数尺寸变化路径,在每个迭代步 上自动更新几何模型和有限元模型,并调用分析程序进行参数化计算; 最终,根据每个迭代步上尺寸参数和结构响应构造参数化曲线。



Fig.6.8 Flow Chart for Shape Parameter Analysis for Cell

根据周期性边界条件,在实际计算过程中仅对单胞的 1/4 进行参数化实体建模,其 实体模型和相应的草图设计如下图 6.9 所示。在参数化实体造型系统中,单胞几何模型 可以通过 5 个尺寸参数完全控制,如下图 9 中草图设计中标注所示。为了研究蜂窝骨架 结构的边界夹角对复合材料属性的影响,为其定义了全局尺寸参数 Ang01,被研究的尺 寸参数 Ang01 也将用作形状优化的设计变量。

这里参数研究的定义为: Ang01 的上下限定义为[70, 160], 在定义域内参数研究步数定义为 40 步。因此在参数研究过程中,尺寸参数由 70°开始,每步增量为 2.25°,按照给定的参数研究流程,如图 6.8 所示,执行 40 步,以获取尺寸参数与指定材料物理量之间的曲线关系。



Fig. 6.9 Parametric Solid Model of Base Cell of Composit with Honeycomb microstructure

在参数化设计过程中,以 2.5 度为单位,分别研究了蜂窝型骨架结构的边界夹角与 复合材料泊松比、弹性系数和热传导系数之间的关系,其曲线关系分别如下图 6.10,6.11, 6.12 所示。



图 6.10 蜂窝型骨架结构的边界夹角与材料泊松比之间的关系曲线 Fig. 6.10 Relation Curve between Angle and Possion Ratio



图 6.11 蜂窝型骨架结构的边界夹角与材料弹性系数之间的关系曲线 Fig. 6.11 Relation Curve between Angle and Elasticty Coefficient



图 6.12 蜂窝型骨架结构的边界夹角与热传导系数之间的关系曲线 Fig. 6.12 Relation Curve between Angle and Heat Conduction Coefficient

参数化研究不仅揭示了复合材料性质与其单胞结构形状参数之间的变化关系,同时 为复合材料单胞形状优化设计提供了必要的参考信息。

6.4.2 两相蜂窝型骨架复合材料单胞结构的形状优化设计

在算例二中,对算例一中的单胞进行参数化形状优化设计,以蜂窝型骨架结构的边 界夹角为设计变量,根据下面的优化模型搜索最优的单胞形状。

min
$$f(Dim_i) = |v_{12}^H - v_{12}^0|$$

s.t. $Dim_i^L \le Dim_i \le Dim_i^U$, $(i = 1, 2, ..., n)$ (4.1)

这里^{Dim}_i是单胞结构的尺寸参数被用作形状优化的设计变量, $v_{12}^{H} 和 v_{12}^{0} 分别表示泊 松比和给定值。<math>v_{12}^{0}$ 的取值为 0,设计变量为 Ang01,如图中所示。通过优化设计,当 Ang01=89.58 时,泊松比 v_{12}^{H} 趋近于 0,大小为 4.78564E-06。整个优化设计过程共调用 分析程序 38 次,历时 4 分钟。具有零泊松比的蜂窝型骨架结构单胞形状如下图 6.13 所示。优化设计目标函数和设计变量的迭代历史如图 6.14, 6.15 所示。

对比参数研究的曲线可知,形状优化的目标函数的曲线走势和结果是正确的,因此 使用参数化形状优化手段对两相复合材料单胞结构进行优化设计是有效的。







图 6.14 蜂窝型骨架结构单胞的参数化形状优化设计目标函数迭代历史 Fig. 6.14 Objective Iteration History



图 6.15 蜂窝型骨架结构单胞的参数化形状优化设计变量迭代历史 Fig. 6.15 Design Variable Iteration History

6.4.3 空心材料单胞结构的参数化形状优化设计

在算例三中将对空心材料的弹性性能及传热性能进行优化设计。下图 6.16 所示为空 心材料的完整单胞结构及其 1/4 部分的有限元模型。



在图 6.16 的右图中, a, b 分别为中间椭圆孔的长轴和短轴半径; t, h 分别为单胞 各部分的壁厚; 取 h=t/2,则单胞各部分厚度均匀,均为 t。在形状优化设计中取 a, b 和 t 为设计变量,研究设计变量对对材料参数的影响。设计变量的初值和上下限定义, 以及优化模型一和优化模型二的设计变量最优值如下表所示。

Tab. 6.2 Design Variables Table						
设计变量	初始值	上限	下限	优化值一	优化值二	
a	150	180	50	180	100.92	
b	80	180	50	50	100.92	
t	20	30	10	14.31	11.88	

表 6.1: 空心材料形状优化设计变量表

算例二的优化模型一如下所示,目标为单向泊松比最大化:

$$\min f(Dim_i) = \begin{vmatrix} v_{12}^H \\ v_{21}^H \end{vmatrix}$$

$$s.t. \quad Dim_i^L \le Dim_i \le Dim_i^U, \quad (i = 1, 2, ..., n)$$

$$(4.2)$$

表 6.2: 空心材料的泊松比优化前后数值比较



优化设计的目标函数和设计变量迭代历史如图 6.17 和图 6.18 所示。由图 6.17 和表 6.2 所示,当单胞结构的长轴与短轴半径分别达到各自上限和下限时,中心开孔复合材

料的两向泊松比值相差最大。经过参数研究可知,单胞的壁厚与复合材料的泊松比成反比,但相比之下对目标值影响不大。优化后的单胞结构形状如下图 6.19 所示。



算例二的优化模型二如下所示,目标为材料两个方向的热传导系数相等。

min $f(Dim_i) = |K_{11} - K_{22}|$ s.t. $Dim_i^L \le Dim_i \le Dim_i^U$, (i = 1, 2, ..., n) (4.3)

优化设计的目标函数和设计变量迭代历史如图 6.20 和图 6.21 所示。当中心椭圆孔的长、短轴半径相等,且大小为 100.92 时,中心开孔复合材料的两相热传导系数最接近,数值为 K11=K22=3.436e-002,它们之间的差值为 7.86206E-08。单胞的壁厚与材料的热传导系数成反比,且由参数研究可知,当壁厚愈薄则两个方向的热传导系数差值愈小。优化后的单胞结构形状如下图 6.22 所示。







图 6.21 中心开孔材料单胞的两向等热传导系数优化设计设计变量迭代历史 Fig. 6.21 Design Variables Iteration History of Equivalent Heat Conduction Coefficients Optimization



Fig. 6.22 Optimal Design of Equivalent Heat Conduction Coefficients Optimization

6.5 小结

在本文中将参数化实体造型技术引入到形状优化设计中,并结合均优化方法,实现 了两相复合材料单胞结构的参数化形状优化设计方法。通过参数化形状优化设计手段, 调整复合材料周期性单胞的形状,从而设计出具有特定属性的复合材料。本文方法在参 数化结构形状优化设计系统 POSHAPE 基础上开发实现。文中给出的参数化研究和形状 优化设计算例验证了本方法的有效性。

7 总结与展望

7.1 本文工作总结

发达国家的实践表明,一个国家要有自主开发的航空航天、高速列车等高新技术, 必须有自主知识产权的各类重大装备生产能力,必须有自主版权的先进 CAE 软件。构 建先进 CAE 软件平台,是一个国家综合性基础研究实力的体现。本文工作的主要目的 是通过 CAD/CAE 集成,提高结构形状优化设计技术在工程业和制造业的实用性。本文 工作的主要内容是自主开发一个开放式的参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE。该 平台可以用于三维实体结构、空间壳体结构的参数化形状优化设计和复合材料设计。

现有的 CAD/CAE 集成开发大都是通过第三方平台或者在 CAE 上实现的,本文提 出了在 CAD 平台上实现了 CAD/CAE 集成方法。在该方法中,实现了有限元模型与基 于参数化特征造型的几何模型紧密集成,将有限元模型的定义作为分析特征附加到几何 模型上,通过参数化技术实现了有限元模型与几何模型之间的双向联动。这里,有限元 模型能够在几何模型尺寸驱动下实现动态更新,有限元模型的边界条件和属性也能够随 着网格的自动更新而实现自适应更新。

传统的结构形状优化方法因为形状描述、灵敏度计算等因素限制了其在工程中的应用。针对此问题本文提出了一个简单、实用的参数化结构形状优化设计方法,形状优化 在 CAD 环境下,以结构的几何模型为目标,以结构的参数化尺寸参数为设计变量。平 台中首先实现了三维实体结构的参数化形状优化方法。在专业的参数化几何特征造型 CAD 环境下,以几何模型为对象的形状优化设计可以保证附加在优化迭代过程中以特 征信息的形式定义在几何模型上的产品设计意图(如产品的装配要求、制造要求等)不 被破坏。这为最终实现现代产品设计的 CAD/CAE/CAM 一体化集成奠定了基础。

针对工程中常见的具有规则外形的壳体结构,本文提出了一种基于参数化实体的参数化曲面建模方法。不同于基于自由曲面技术的建模方法,使用本文提出的方法可以通过创建相应的参数化实体模型来表示壳体结构的曲面模型,实体模型的控制参数将用于曲面模型的参数化描述和控制,通过集成的方法,将曲面模型定义作为特征信息附加到实体几何模型上,实现了曲面模型与实体模型的动态联动,从而可以使用实体的尺寸参数实现对曲面模型的驱动。壳体结构有限元模型则作为分析特征附加在实体几何模型上。在曲面模型与几何模型的集成和有限元模型与几何模型的集成的基础上,实现了空间壳体结构的参数化结构形状优化设计方法。该方法以参数化实体模型为对象,以实体模型的尺寸参数作为设计变量,基于模型集成,实现了空间壳体结构的参数化优化设计。

除了结构形状优化设计,本文还将基于 CAD/CAE 集成的参数化形状优化设计方法 扩展到材料设计问题中。对于具有周期性单胞结构的复合材料来说,改变单胞的形状可 以改善材料性能。类似空间壳体结构的几何模型定义方法,将单胞中的材料定义域和材 料属性附加到实体模型上,将计算复合材料属性的均优化方法集成到平台上,使用参数 化形状优化设计方法研究给定单胞形状与复合材料属性之间的关系,并使用该方法获得 指定材料属性的单胞形状。

7.2 本文工作展望

本文工作的目的是开发一个通用的参数化结构形状优化设计平台 POSHAPE。目前 已经可以实现对三维实体和空间壳体结构的参数化形状优化,以及用于复合材料设计的 单胞结构参数化形状优化。作为一个要推向工程应用的软件系统,平台的开发工作尚未 完成,在未来将要从以下方面对系统进行扩展。

→ 尺寸和形状集成的优化设计方法

在尺寸优化中,设计变量对结构的几何模型没有直接的影响,可以将尺寸设计变量 定义为结构的特征信息,附加到结构的几何模型上。基于本系统中实现的参数化壳体结 构参数化优化设计,对于板壳结构,还可以实现参数化壳体结构集成的尺寸和形状优化 设计方法。

→ 组合结构的参数化形状优化设计

目前带有组合结构的形状优化设计功能的软件尚未多见,而在工程应用中组合结构 大量存在,尤其是壳体结构,在工程中并不是单纯使用,在局部还会装配有实体结构, 例如压力容器的局部加强部件。目前本文所研究的对象大都是三维实体造型中的零件结 构,下一步将要考虑以部件结构为对象,实现组合结构的参数化形状优化设计。这里如 何处理组成部件的各装配件之间的装配关系将是实现组合结构参数化形状优化设计的 关键。

→ 多学科耦合的结构形状优化设计平台

专业的几何建模方法可以满足多学科分析对模型的不同要求,结合二次开发手段和 系统集成技术,可以将当前系统的应用领域扩展到多学科、非线性和流固耦合问题的研 究中。

本文工作是基于线弹性模型,可以将问题的求解推广到非线性问题的计算,尤其是 对于壳体结构在高温、高压和循环载荷等复杂工作环境下工作导致的塑性失稳问题有重 要的研究意义。 除了结构静力问题,还可以在该平台上实现多学科的参数化结构形状优化设计,只 需提取多学科的有限元建模信息并以特征的形式附加在几何模型上。此外平台支持多学 科分析程序的嵌入。

对于流固耦合问题,可以通过二次开发手段对几何模型进行扩展,区分出流体域和固体域,分别定义其 B-Rep 树描述各区域的拓扑几何关系,使用基于 B-Rep 的全自动网格剖分方法可以尽可能地满足不同问题对有限元模型的不同要求。

→ 组合结构的参数化形状优化设计

梁板壳的组合结构也是工程中使用较广泛的一类结构,将一维单元与实体模型中的 边集成,或者在系统中添加几何辅助线定义,可以在 POSHAPE 中实现某些类型的组合 结构,如板壳加强结构的参数化形状优化设计。

→ 多相、考虑多物理场响应以及三维的材料单胞形状优化设计

POSHAPE 中目前提供两相二维复合材料单胞的形状优化设计,建立与材料单胞材料覆盖域形状相同的草图设计,使用拉伸特征建立相应的参数化实体模型,并在此基础上进行单胞结构的参数化形状优化设计。在将来的工作中可以在一个参数化实体模型中建立多个不同高度的拉伸特征,使用不同的草图设计代表不同材料的覆盖域,就可以在POSHAPE 中实现多相二维复合材料的形状优化设计。

类似的,考虑多物理场响应以及三维单胞结构的复合材料设计也可以通过一定的开发手段在 POSHAPE 中实现。

→ 平台的可移植性;

本平台的整体设计和开发都是以实现通用性和实用性的 CAD/CAE 集成方法为目的,是在 CAD 几何造型数据库中实现的 CAD/CAE 集成方法。除了 MDT 软件,本文所提出的方法还可以在其他专业大型、具有非脚本语言开发接口的 CAD 软件中实现。

参考文献

[1]程耿东. 工程结构优化设计基础. 北京:水利电力出版社. 1984

[2]顾元宪. 计算机辅助设计及其软件设计方法. 北京: 科学普及出版社. 1992

[3] Eschenauer H A, Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review. Appl. Mech. Rev. 2001. 54(4): 331-390

[4] Bakhtiary N. A new approach for sizing, shape and topology optimization. 1996 SAE International Congress and Exposition. Detroit, Michigan USA. Feb. 26-29

[5] Haftka R.T., Grandhi R.V. Structural shape optimization – a survey. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1986. 57: 91-106

[6] Ding Y.L. Shape optimization of structures: a literature survey. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1986. 24(6): 985-1004

[7]Samareh J.A. A novel shape parameterization approach. AIAA. NASA/TM-1999-209116

[8] Imam M.H. Three-dimensional shape optimization. International Journal of Numerical Method in Engineering. 1982. 18: 661-673

[9] Bennett J.A., Botkin M.E. Structural shape optimization with geometric description and adaptive mesh refinement. AIAA. 1985. 23(3):458-464

[10] Kim N H, Chang Y M, Eulerian shape design sensitivity analysis and optimization with a fixed grid, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194: 3291-3314

[11] Li Q, Steven G P, Querin O M et al. Shape and topology design for heat conduction by evolutionary structural optimization. Int. J of Heat and Mass Transfer. 1999. 42: 3361-3371

[12] 王资源.黄力平等.参数化、变量化技术的发展与研究.广西民族学院学报(自然科学版).1999.5(2):116-118

[13] Monedero J.Parametric design: a review and some experiences. Automation in Construction.2000.9: 369-377

[14] Chang K.H., Silva J. Capturing design intents for CAD-based multidisciplinary design optimization.Proceeding of the 4th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization. Dalian. China. 2001:408-409

[15] 陈德人.参数化设计模型与方法. 浙江大学学报(自然科学版). 1995. 29(2): 170-182

[16] Sigmund O, Torquato S. Design of materials with extreme thermal expansion using a three-phase topology optimization method. Journal of the mechanics and physics of solids, 1997, 45(6): 1037-1067.

[17] Kikuchi N, Nishiwaki S, et al. Design optimization method for compliant mechanisms and materials microstructure. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1998, 151: 401-417.

[18] Fish J, Ghouali A. Multisale analytical sensitivity analysis for composite materials. International journal for numerical methods in engineering, 2001, 50: 1501-1520.

[19] Rodrigues H, Guedes JM, Bendsoe MP. Hierarchical optimization of material and structure. Structural and multidisciplinary optimization, 2002, 24: 1-10.

[20] Yuan Z, Wu CC. Homogenization-based topology design for pure torsion of composite shafts. ACTA mechanica sinica, 2003, 19(3): 241-246.
[21] Chen BC, Silva E, Kikuchi N. Advances in computational design and optimization with application to MEMS. International journal for numerical methods in engineering, 2001, 52: 23-62.

[22] 刘书田,郑新广,程耿东.特定弹性性能材料的细观结构设计优化.复合材料学报,2001, 18(2):124-127.

[23] 刘书田, 曹先凡.零膨胀材料设计与模拟验证. 复合材料学报, 2005, 22(1):126-132.

[24] Barbarosie C. Shape optimization of periodic structures. Computational mechanics, 2003, 30: 235-246.

[25] Kaminski M. Sensitivity analysis of homogenized characteristics for some elastic composites. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2003, 192: 1973-2005.

[26] Zhu F, Chen K Z, Feng X A. Development of a CAD modeling system for components made of multi heterogeneous materials. Materials&Design. 2005. 26: 113-126

[27] Lee K.著. 袁清珂等译. CAD/CAM/CAE 系统原理. 北京: 电子工业出版社. 2006

[28] 谭建荣,陆国栋等著. CAD 方法与技术. 北京:科学出版社. 2005

[29] 孙家广编著. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社. 2000

[30]Daniel T. Banach. MDT 4 中文版应用技术.2001. 北京:机械工业出版社

[31] 张冶,洪雪等编著. Unigraphics NX 参数化设计实体教程. 北京:清华大学出版社. 2003

[32] MDT 6.0 User's Help. Autodesk

[33] 戴磊.参数化有限元建模及动态修改:(硕士学位论文).大连:大连理工大学,2000

[34] 隋晓峰.基于几何造型的参数化有限元建模和曲面网格生成方法及实现:(硕士学位论文).大连:大 连理工大学,2002

[35] 杜秀云.考虑结构非线性特征的参数化形状优化方法:(硕士学位论文).大连:大连理工大学,2003

[36] Samareh J. A. Geometry and grid/mesh generation issues for CFD and CSM shape optimization. Optimization and Engineering. 2005. 6(1): 21-32

[37] 纪福森, 吴铁鹰等. 参数化 CAD/CAE 集成与应用. 机电工程技术. 2006. 35(6):86-88

[38] Chung T.T., Lee C.C., et al. Optimum design of a 1×2 mechanical optical switch. Structure Multidisciplinary Optimization. 2006. 31(3): 229 - 240

[39] Ledermann C., Hanske C., et al. Associative parametric CAE methods in the aircraft pre-design. Aerospace Science and Technology. 2005. 9(7):641-651

[40] 黄高文. 基于 CAD/CAE 集成的面天线参数化有限元建模: (硕士学位论文). 西安: 西安电子科 技大学. 2005

[41] 陈伟, 何飞等. 基于结构参数化的有限元分析方法. 机械科学与技术. 2003. 22(6): 948-950

[42] 关振群,杜秀云,张洪武等,考虑结构非线性特征的参数化形状优化方法,机械强度,2003, 25(4),420-425

[43] 宋超.非结构化自适应有限元网格生成的 AFT 方法:(博士学位论文).大连:大连理工大学.2004

[44] Rickettd R.E., Zienkiewicz O.C. New directions in optimum structural design. John Wiley & Sons. 1984: 139-166

[45] 顾元宪,程耿东,有限元一优化-CAD集成一体的微机软件系统 MCADS,计算结构力学及其 应用,1990.7(1):71-81

[46] 顾元宪,程耿东,结构形状优化设计数值方法的研究和应用,计算结构力学及其应用,1993.10(3): 321-335

[47] Altair Computing. OptiStruct User's Guide.

[48] MacNeal Schwendler Corporation. MSC/NASTRAN Design Sensitivity andOptimization, Version 68.1994

[50] 赵国忠, 顾元宪等. 不同截面梁构件的刚度和稳定性优化设计. 工程力学. 2002. 19(3):44-49

[51] 顾元宪,赵国忠等.复合材料层合板屈曲稳定性优化设计及其灵敏度计算方法.复合材料学报. 2002.19(4):81-85

[52] 赵国忠,高剑等. 基于分层设计变量的复合材料层合板优化设计及灵敏度分析. 工程力学. 2003. 20(2):60-65

[53] 顾元宪, 赵红兵等. 热-应力耦合结构灵敏度分析方法. 力学学报. 2001. 33(5): 686-691

[54] 顾元宪, 亢战等. 卫星承力筒复合材料结构的优化设计. 宇航学报. 2003. 24(1): 88-91

[55] Gu Y.X., Zhang H.W. et al. New generation software of structural analysis and design optimization – JIFEX. Int. J. Struct. Eng. Mech. 1999. 7(6): 589-599

[56] 王剑, 刘敬辉等. 新型铁道双层集装箱运输车的车体结构优化. 铁道机车车辆. 2004. 24(2):30-33

[57] 赵国忠,顾元宪等.压电智能桁架的灵敏度分析与优化设计.固体力学学报.2002. 23(2):150-158

[58]Mattheck, C. Design and Growth Rule for Biological Structures and their Application in Engineering. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 1990. 13(5): 535-550.

[59] Baumgartner A., Harzheim, L. et al. SKO (Soft Kill Option): TheBiological Way to Find an Optimum Structure Topology. Int. J. Fatigue. 1990. 14(6): 387-393

[60] Harzheim L., Graf G. Optimization of Engineering Components with the SKOMethod. Proceedings of the Ninth International Conference on Vehicle StructuralMechanics and CAE, 1995 April 4.-6., Troy Michigan: 235-243

[61] Harzheim L., Graf G. Shape200: A Program to Create Basis Vectors for Shape Optimization Using Solution 200 of MSC/NASTRAN. Proceedings of the X InternationalConference on Vehicle Structural Mechanics and CAE, April 8.-10.1997. Troy Michigan

[62] Rasna Corporation. Structure and Thermal User's Guide, Release. 1994

[63] Townsend J.C., Samareh J.A. Integration of a CAD system into an MDO framework. NASA/TM-1998-207672

[64] Hardee E., Chang K.H. et al. A CAD-based design parameterization for shape optimization of elastic solids. Advances in Engineering Software. 1999. 30:185-199

[65] 李晓春.李晗编著. MDT 6.0 三维造型技术与实例精解. 北京:清华大学出版社.2003

[66] Autodesk Inc. ObjectARX Developer's Guide. USA: 1997, 3

[67] 江思敏, 曹默等. AutoCAD2000 开发工具. 北京: 人民邮电出版社. 1999.1

[68] 宋延行, 王川等. ObjectARX 实用指南. 北京: 人民邮电出版社, 1999.1

[69] 宋超. 任意三维实体四面体单元网格自动剖分方法及程序实现: (硕士学位论文). 大连: 大连理 工大学. 2001

[70] Botkin M.E. Shape design modeling using fully automatic three dimension mesh generation. Finite Element in Analysis and Design. 1991. 10: 165-181

[71] Gu Y.X., Zhang H.W., et al. New generation software of structural analysis and design optimization—JIFEX. Structural Engineering and Mechanics. 1999. 7(6):589-599

[72] 钟万勰. 一个多用途的结构分析程序 JIGFEX. 大连理工大学学报. 1977. 16(3): 19-42, 16(4): 14-35

[73] 钟万勰. 计算结构力学微机程序设计. 北京: 水利水电出版社, 1986

[74] 顾元宪. 计算机辅助结构优化设计的研究与 MCADS 系统的开发: (博士学位论文). 大连: 大连 理工大学, 1988

[75] Chang K.H., Bryant IV I.H. Concurrent design and manufacturing of aircraft torque tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2004. 150:151-162

[76] Marcin Kaminski. Homogenized properties of periodic n-component composites. International Journal of Engineering Science. 2000, 38:405-427.

[77] Sanchez-Palencia E. Non-homogenous media and vibration theory. Lect Notes Phys, 1980, 16(1):127-128.

[78] Ghosh S, Lee K, Moorthy S. Multiple scale analysis of heterogeneous elastic structures using homogenization theory and voronoi cell finite element method. International journal of solids and structures, 1995, 32(1):27-62.

[79] Oden JT, Vemaganti K. Adaptive hierarchical modeling of heterogeneous structures. Physica D, 1999, 133: 404-415.

[80] Oden JT, Vemaganti K, Moes N. Hierarchical modeling of heterogeneous solids. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1999, 172: 3-25.

[81] Terada K, Hori M, et al. Simulation of the multi-scale convergence in computational homogenization approaches. International journal of solids and structures, 2000, 37: 2285-2311.

[82] Terada K, Kikuchi N. A class of general algorithms for multi-scale analyses of heterogeneous media. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2001, 190: 5427-5464.

[83] Kouznetsova V, Geers M, et al. Multi-scale constitutive modeling of heterogeneous materials with a gradient-enhanced computational homogenization scheme. International journal for numerical methods in engineering, 2002, 54: 1235-1260.

[84] Cao LQ, Cui JZ, et al. Multiscale finite element method for subdivided periodic eleastic tructures of composite materials. Journal of computational mathematics, 2001, 19(2): 205-212.

[85] 曹礼群. 材料物性的多尺度关联与数值模拟. 世界科技研究与发展, 2002, 24(6): 23-30.

[86] 刘书田. 复合材料热弹性分析及优化设计: (博士学位论文). 大连: 大连理工大学.1996.

[87] Polisevski D. Optimal quasi-periodic design for a heat transfer problem. International Jjournal of Engineering Science. 2000. 38(2):267-274.

[88] 顾元宪,赵国忠等.组合结构屈曲稳定性优化设计与灵敏度分析.宇航学报.2000. 21(3):127-132

[89] Parametric Technology Corporation. Pro/MECHANICA Design Study Reference. Release 17. 1996

[90] 关振群, 顾元宪等. 三维 CAD/CAE 一体化的参数化动态有限元建模. 计算机集成制造系统-CIMS. 2003. 9(12): 1112-1119

[91] Samareh J.A. Geometry and Grid/Mesh Generation Issues for CFD and CSM Shape Optimization. Optimization and Engineering. 2005. 6:21-32

92] Samareh J.A. Status and Future of Geometry Modeling and Grid Generation for Design and Optimization. Journal of Aircraft. 1999. 36(7):97-104

[93] Samareh J.A. Survey of Shape Parameterization Techniques for High-Fidelity Multidisciplinary Shape Optimization. AIAA Journal. 2001. 39(5):877-884

[94] Pedersen P., Laursen C.L. Design for minimum stress concentration by finite elements and linear programming, J. Structural Mech. 1983. 10(4):375-391

[95] Prasad B., Emerson J.F. Optimal structural remodeling of multi-objective systems. Computers & Structures. 1984. 18(4): 619-628

[96] Zienkiewicz O.C., Campbell J.S. Shape optimization and sequential linear programming, in: Gallagher R.H. and Zienkiewicz O.C., eds. Optimal Structrual Design, New York: Wiley. 1973

[97] Kodiyalam S., Kumar V., et al. Constructive solid geometry approach to three-dimensional structural shape optimization. AIAA. 1992. 30(5): 1408-1415

[98] Shephard M.S. Approaches to the automatic generation and control of finite element meshes. Applied Mechanics Review. 1988. 41(4): 169-184

[99] Rasmussen J. Development of the interactive structural shape optimization system CAOS: (Ph.D. Thesis). Danish: Aalborg University. 1989

[100] Rasmussen J. The structural optimization system CAOS. Structural Optimization. 1990. 2: 109-115

[101] Olhoff N., Bendsoe M.P. et al. On CAD-integrated structural topology and design optimization. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1991. 89:259-279

[102] Lund E. Finite element based design sensitivity analysis and optimization: (Ph.D. Thesis). Danish: Aalborg University. 1994

[103] Choi K.K., Chang K.H. A study of design velocity field computation for shape optimal design. Finite Elements in Analysis and Design. 1994. 15:317-341

[104] Finnigan P.M., Kela A. et al. Geometry as a basis for finite element automation. Engineering Computers. 1989. 5:147:160

[105] Kegl M. Shape optimal design of structures: an efficient shape representation concept. Int. J. Numer. Meth. Engng. 2000. 49:1571-1588

[106] Braibant V, Fleury C. Shape optimal design using B-splines. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1984. 44:247-267

[107] Falk A., Barthold F.J., et al. A hierarchical design concept for shape optimization based on the interaction of CAGD and FEM. Structural Optimization. 1999. 18(22-23):12-23

[108] Samareh J.A. Multidisciplinary aerodynamic-structure shape optimization using deformation (MASSOUD). AIAA paper. 2000. Sept. 2000-4911

[109] Belegundu A.D., Rajan S.D. A shape optimization approach based on natural design variables and shape functions. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. 66:87-106

[110] Kodiyalam S., Vanderplaats G.N., et al. Structural shape optimization with MSC/NASTRAN. Computer & Structures. 1991. 40(4):821-829

[111] Yang R.J. Shape sensitivity analysis and optimization using NASTRAN. ,Mechanics of Structure and Machine. 1991. 19(3). 281-300

[112] Lindby T., Santos J.L.T. Shape optimization of three-dimensional shell structures with the shape parametrization of a CAD system. Structural Optimization. 1999. 18:126-133

[113] Yang R.J., Botkin M. E. A Modular Approach for Three-Dimensional Shape Optimization of Structures. AIAA Journal. 1986. 25(3): 492-497

[114] Gates A.A., Accorsi M.L. Automatic shape optimization of three-dimensional shell structures with large shape changes. Computers & Structures. 1993. 49(1):167-178

[115] Botkin M.E., Bennett J.A. Shape optimization of three-dimensional folded-plate structures. AIAA. 1985. 23(11):1804-1810

[116] Lindby T. Santos J.L.T. 2-D and 3-D shape optimization using mesh velocities to integrate analytical sensitivities with associative CAD. Structural Optimization. 1997. 13:213-222

[117] G. M. Michell. The Limits of Economy of Materiala in Frame Structures.Philosophical Magazine, Series 6, 1904, 8(47): 589-597

[118] Hillyard R C, Braid I C. Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design[J].CAD. 1978. 10(3):161-166

[119] Light R, Gossard D C. Variational geometry: a new method for modifying part geometry for finite element analysis. Computer and Structures. 1983. 7: 903-909

[120] 杜家政,隋允康等. 基于 MSC PCL 的三心底结构形状优化设计. 计算机辅助工程. 2006.9(增刊). 15:450-451

[121] Cheng GD. Introduction to Structural Optimization Theory, Methods and Solutions. Technical University of Denmark. 1992.

[122] Gabbert U, Wehner P. The product data model as a pool for CAD-FEA data. Engineering and Computers. 1998. 14:115-122

[123] Betting B, Bapat V. Integrating multiple information representations in a single CAD/CAM/CAE environment. Engineering with Computers. 2006. 22:11-23

附录 A POSHAPE 系统功能

参数化结构形状优化设计系统是在国家自然科学基金项目"耦合系统的多学科优化 设计理论与数值方法,批准号 A020216"的研究内容的一部分,系统的开发同时得到国 家自然科学基金"热一弹塑性耦合结构参数化形状优化设计方法,批准号 10502013"的 支持。

整个系统是商业化的结构有限元分析和优化设计软件 JIFEX 的一部分。整个系统的 开发和本文工作是在关振群教授的指导下完成的。除本文作者以外,参与系统开发的还 有隋晓峰和杜秀云两位硕士和单菊林博士[30-33,65]。其中,隋晓峰实现了系统的基本框 架实现和网格剖分算法;杜秀云负责考虑结构非线性特征的参数化形状优化方法;单菊 林负责网格剖分算法的改进;本人在硕士研究阶段实现了参数化有限元建模及动态修 改,在博士研究阶段完成了整个平台的最终实现、维护和改进,并应用于工程实际问题 的解决,此外对系统的功能进行扩展,提出了基于参数化实体造型技术的空间壳体结构 参数化形状优化设计和复合材料周期性单胞结构的参数化形状设计方法。

该系统已经用于解决以下若干工程实例:

- 1) 航天飞行器的系列法兰的参数化形状优化设计;
- 2) 航天飞行器部件一丝钢座的参数化形状优化设计;
- 3) 掘进机械传动的主臂架的参数化形状优化设计;
- 4) CD6140A 卧式车床导轨部分的参数化形状优化设计;

三维实体的参数化形状优化设计内容包括:

单元类型:四面体块体单元;

边界条件:与实体模型边界上几何元素绑定的荷载与位移边界条件,如面均布压力等,保证边界条件在几何模型更新后能够自动映射到有限元模型上,无需交互处理;

设计变量:实体模型的参数化几何尺寸;

约束条件:

(1) 结构重量约束。

(2) 应力约束:节点修改后的应力,单元应力,梁单元最大正应力。上述应力可以是各个应力分量、各个主应力、最大剪应力、Mises 应力、或者是由用户自己规定(通过修改编程接口模块)的特殊应力分量。

(3) 位移约束:节点线位移分量、转角位移分量。

(4) 固有振动频率约束。

(5) 结构屈曲荷载系数约束。

优化目标:

- (1) 减轻结构重量。
- (2) 降低结构中的应力峰值。
- (3) 提高结构刚度、减少变形或者提高结构的固有频率。
- (4) 增加结构的柔性,降低某阶次固有频率。
- (5) 提高结构屈曲稳定性。

壳体结构的参数化形状优化设计内容包括:

单元类型: 三节点板壳单元;

边界条件:与实体模型边界上几何元素绑定的荷载与位移边界条件,如面均布压力等,保证边界条件在几何模型更新后能够自动映射到有限元模型上,无需交互处理; 设计变量:实体模型的参数化几何尺寸;

约束条件:

(1) 结构重量约束。

(2) 应力约束:节点修改后的应力,单元应力,梁单元最大正应力。上述应力可以是各个应力分量、各个主应力、最大剪应力、Mises 应力、或者是由用户自己规定(通过修改编程接口模块)的特殊应力分量。

- (3) 位移约束: 节点线位移分量、转角位移分量。
- (4) 固有振动频率约束。
- (5) 结构屈曲荷载系数约束。

优化目标:

- (1) 减轻结构重量。
- (2) 降低结构中的应力峰值。
- (3) 提高结构刚度、减少变形或者提高结构的固有频率。
- (4) 增加结构的柔性,降低某阶次固有频率。
- (5) 提高结构屈曲稳定性。

周期性材料单胞参数化形状优化设计内容包括:

设计变量:实体模型的参数化几何尺寸; 优化目标:

- (1) 零泊松比以及负泊松比;
- (2) 最大剪切膜量;

(3) 零膨胀率;

(4) 其他关于材料泊松比、弹性系数、热弹性系数和热传导系数的指定的目标, 如指定材料热弹性系数 K11=2K22。

攻读博士学位期间发表学术论文情况

1. **戴磊**、隋晓峰、关振群、宋超、李华、顾元宪,空间组合曲面的参数化有限元建 模方法,哈尔滨工业大学学报,2001,33(增刊),138-140(第三章)

2. Lei DAI, Yuanxian GU, Guozhong ZHAO, Yingqiao Guo, Structural Shape Optimization based on Parametric Dimension-Driving and CAD Software Integration, 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 30 May - 03 June 2005 (第四章)

3. Lei DAI, Zhenqun GUAN, Yuanxian GU, Yingqiao Guo, An Open Structure Shape Optimization Method for Shell Structure, based on Parametric Solid Modeling, 7th World Congress on Computational Mechanics (WCCM VII), Los Angeles, California, July 16 - 22, 2006 (第五章)

4. Lei DAI, Zhenqun GUAN, Yuanxian GU, Yingqiao GUO, An Open Structure Shape Optimization Method for Parametric Mechanical Components Design, 1st International Conference on enhancement and promotion of computational methods in engineering science and mechanics, Changchun, Jilin, China, 2006 (第六章) (ISTP: BFW38)

5. DEBRAY K., RADJAI R., SUN Z.C., GUO Y.Q., L. DAI, Y.X. GU, "Design and optimization of addendum surfaces in sheet forming process", Numiform'2004, Columbus, USA, June, 2004.

6. **戴磊**, 关振群, 单菊林, 牛聪民, 张洪武, 顾元宪, 机床结构三维参数化形状优化 设计, 机械工程学报(第四章, 已接收)

7. **戴磊**,康健,陈飙松,关振群,张洪武,基于 CAD 的周期性材料单胞结构参数 化形状优化设计,计算力学学报(第七章,已接收)

8. Lei DAI, Zhenqun GUAN, Biaosong CHEN, Hongwu ZHANG, An Open Platform of Shape Design Optimization for Shell Structure based on Parametric Solid Modeling, Structure Multidisciplinary Optimization (第六章,已接收)

致 谢

我求学的路走了很久,并不如最初想像的一帆风顺。但在这条崎岖的道路上却也有 别样的收获和风景。这期间许许多多的人和事,让我非常的感激,他们陪着我一路走来, 让我学到了很多,领悟到更多。

本文工作隶属于大连理工大学和法国兰斯大学校际合作计划,是在大连理工大学顾 元宪教授、张洪武教授和关振群教授以及法国兰斯大学郭英乔教授联合指导下完成的。

这里首先要感谢敬爱的顾元宪教授,谢谢恩师在学习和工作中对学生真诚的关怀。 恩师开怀的心胸、乐观的心态和对事业满怀激情的热爱,乃至在工作生活中点点滴滴的 小事都给学生留下深刻的印象,无时无刻不激励着学生。虽然导师已经离开我们,但导 师的精神将永远留在我们心中!

感谢我法国的导师郭英乔教授,学生有幸在法国跟郭老师工作了三个月,期间郭老师严谨的工作态度和作风,给学生留下了深刻的印象。在法国的三个月期间,生活上受到郭老师和郭师母很多的帮助,还有办公室的李昱明博士,Dr. Batoz, Prof.Fabien等人也给予热心的帮助,在此一并致以深深的谢意。

感谢导师关振群教授和张洪武教授。张老师精湛的理论功底,民主大度的工作作风,都让学生非常敬佩。在学生博士论文后期,张老师给予了鼎力支持,学生将铭记在心! 关老师自学生攻读硕士学位起,指引学生进行 CAD/CAE 集成研究、参数化结构建模直 至形状优化设计领域的研究工作,让学生找到了研究的兴趣所在,很多技术难题的克服 离不开关老师的指点和帮助,关老师在 CAD/CAE 应用领域深厚的专业知识也让学生受 益匪浅,谢谢关老师!

感谢数学系的苏志勋教授,虽然跟苏老师学习和工作的时间仅有短短的一年,但这 一年的时间里学生学到了很多学校里学习不到的东西,并开阔了眼界。在这里向苏老师 以及刘秀萍博士表示深深的感谢。

感谢我的同门师兄陈飙松博士和赵国忠博士,你们既是师兄又是老师,尤其在恩师 离开后在论文方面给予我很多的指导和帮助,谢谢两位师兄!感谢教研室的刘书田教授、 郭旭教授、亢战副教授、李云鹏副教授、王平博士和连志强博士,在学习和工作中你们 所给予的帮助是如此之多,在此致以深深的谢意,我非常荣幸能加入这样一个团结的集 体!

感谢单菊林和康健,在论文工作中与两位师弟有着很好的合作。感谢赵红兵博士、 宋超博士、陈秉智博士和牛聪民、王剑、张虹、李宁等诸位博士,我们同甘共苦一同携 手走过人生中一段黄金时光,留下了许多美好回忆。感谢力学系的曲牡老师、齐朝晖老师、赵广玲老师、陈志娟老师对我的帮助。

最后,感谢我的先生刘成,谢谢你包容,并在我困惑和苦恼的时候给了我最大的精神支持和鼓励!感谢我至亲的父母,你们对我无私的爱是我最宝贵的财富。感谢我勤劳、善良的公公婆婆,谢谢你们默默无闻的奉献。

感谢那些我无法一一提及,却是本人非常珍视的朋友和亲人们,你们是我人生的重 要组成部分。

戴磊

2006年11月15日