

·成果简介·

结构布局优化和动态特性优化的方法及应用

顾元宪^{*} 张洪武 刘书田 亢战

(大连理工大学工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

[关键词] 优化设计, 结构拓扑, 动态特性, 软件

1 结构拓扑优化设计的均匀化方法

基于均匀化方法的连续体结构拓扑优化^[1], 是近年来结构优化领域中最重要研究进展。均匀化方法就是在均质基体材料中引入某种形状的材料或孔洞, 构成周期性密的微结构(如图1), 运用均匀化理论建立宏观等效材料性质的非线性函数, 进而可用通常的方法对具有微结构的宏观等效材料及其结构进行力学分析。优化材料的微结构不仅可以改变材料分布以及结构的拓扑布局, 而且可以设计材料的性能。

本项目首先研究了板壳和三维实体的均匀化微胞单元, 建立了微胞单元的材料密度、弹性模量等与设计变量之间的非线性函数关系。值得注意的是, 微结构通常使材料产生各向异性, 这对结构及材料设计具有特殊意义。引入新的微胞单元以及宏观等效材料性质后, 通常的有限元方法及其程序即可应用。在具有密集分布孔洞的相控阵天线结构研制中, 用板壳微胞单元模型计算了结构的变形和固有振动频率, 计算结果与实验数据十分吻合, 从而验证了微胞单元及均匀化方法的有效性^[2]。

对于新的微胞单元, 研究了位移、应力、频率等的灵敏度计算方法, 特别针对单元应力约束, 以上万阶设计变量的大规模优化问题为背景, 研究实现了灵敏度计算的拟荷载方法; 构造了一种单胞等效应力函数: $\sigma = \sigma_0(1-\alpha)^p$, 其中 α 为设计变量($\alpha=0$ 时无微结构), σ_0 为 $\alpha=0$

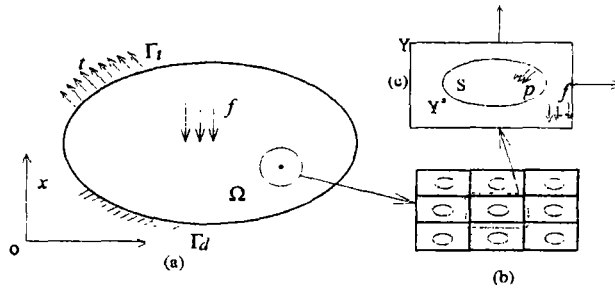


图1 (a) 宏观结构, (b) 微结构及其周期性, (c) 单胞

* 1995年度国家杰出青年科学基金获得者。

国家自然科学基金资助项目, 批准号: 19472014。

本文于1997年10月8日收到。

时的单元应力。本课题进一步研究了拓扑优化的最优准则求解方法, 在只考虑强度条件的结构布局初步设计中, 提出一种改进的满应力法, 对连续体结构拓扑优化结果, 与经典 Michell 理论解一致。参考 DCOC 方法及上述等效应力函数, 推导出均匀化微胞单元结构优化的最优准则求解迭代格式。其中, 应力约束在单元内显式地处理, Lagrange 乘子的求解只与位移和频率等全局性约束有关, 从而能够有效地求解大规模的结构拓扑优化问题。

2 结构动态特性灵敏度分析与优化设计

2.1 结构频域响应的灵敏度计算方法^[3-5]

对于节点载荷与基础加速度运动这两种激振下的简谐振动响应, 研究实现了结构位移响应导数的振型空间直接求解法和振型导数的子空间迭代法。这两种方法都具有编程简单(可利用有限元动力分析的模块), 计算效率高, 精度较好, 适合于重特征值情况的优点。

2.2 大型复杂结构动态特性优化方法

对于大型复杂结构, 特别是对航空和航天复合材料柔性结构, 为解决减轻结构重量和提高固有频率这一关键设计问题, 发展了复合材料层合板和夹层板单元、复合材料铺层设计变量、铰链和铆钉及复合材料薄壁梁等特殊单元和变量, 形成面向设计的大型复合材料结构动态特性优化功能, 并已成功地应用于卫星整星结构、卫星太阳能帆板、运载火箭部件与载人飞船舱段的预研和优化设计研究^[6,7]。

3 新一代有限元分析与优化设计软件的研究开发

结构优化理论与方法在工程中的实际应用, 最终要由实用化的计算机软件系统来实现, 因此软件系统的研究开发是本项目的重要内容。MS Windows/Windows95/Windows NT 已经成为新一代软件开发的标准平台, 奔腾计算机是目前最为普及的硬件平台, 新的工程计算软件必须基于这样的软硬件环境, 同时要与商品化 CAD/CAM 软件系统集成。从这一战略目标出发, 本项目将新一代有限元分析与优化设计软件 JIFEX95 的研究开发作为重点任务, 经近两年努力, 已初见成效^[8]。其技术优势与特点是:

(1) 完全建立在标准的 MS Windows/Windows95/WindowsNT 平台之上, 在统一的图形交互界面下实现了有限元分析、结构优化设计以及数据前后处理的软件集成化。采用 32 位 Visual C/C++ 语言编程, 不仅实现了与 Windows95/NT 的完全兼容和软件可移植性, 而且实现了 PC 机的 32 位大规模数值计算和图形处理。从传统的 DOS 系统和 Fortran 语言编程, 发展到 Windows/NT 平台和 C/C++ 面向对象技术, 标志着有限元软件的更新换代。

(2) 基于 AutoCAD 软件平台的几何造型和有限元建模, 实现了有限元建模的计算机化以及同 CAD 造型设计的集成化^[9,10]。使用 ADS 开发的有限元建模子系统 AutoFEM, 可以利用 AutoCAD 的建模工具人机交互地建立结构几何模型, 自动地剖分有限元网格并可编辑修改, 交互定义有限元属性数据, 最后自动生成有限元模型全部数据, 极大地简化了建立有限元模型的复杂过程。我们已用 AutoFEM 成功地建立了万吨级集装箱船整体结构有限元模型。

(3) MS Windows95/NT 平台的有限元图形处理和实时视算一体化, 具有多窗口环境交互式计算机图形显示, 和消隐、动画、等值线、彩色云图、几何变换、实体剖切、图形打印、图元文件接口等功能, 研究实现了适合有限元模型特点的三维数据场可视化的体绘制和等值

面技术。特别是在动态数据交换 (DDE) 技术支持下, 实现了多进程或多计算机之间的分布式并行计算, 计算与可视化能够实时同步进行。这些技术与功能, 发展了有限元分析及科学计算的可视化。

(4) 在奔腾机上的大规模工程计算和多功能结构分析优化的能力。计算规模达到数万节点、十几万自由度的大型结构强度分析 (包括接触应力计算), 反映了软件的计算能力。JIFEX95 软件具有多层子结构方法、三维多体接触分析、组合结构稳定性分析和优化设计、三维结构形状优化、大型复杂结构动态性能优化设计等重要功能特点和先进实用的方法。

新一代有限元与优化软件 JIFEX95 使本项目研究立足于更加坚实的基础, 为结构优化理论方法研究及其工程应用提供了更有力的支持。目前, JIFEX95 软件的应用和推广工作正在展开, 已纳入大连市 CAD 应用工程重点计划, 并同日、澳、美等外国公司开展合作, 为进一步的研究开发提供了基础。

参 考 文 献

- [1] Bendsoe M P. Optimization of Structural Topology, Shape, and Material, Berlin: Springer, 1995.
- [2] Liu S T, Cheng G D, Gu Y X. Homogenization method for bending analysis of porous plate, Proc. CASCM' 97, 163 - 171.
- [3] Gu Y X, Kang Z, Guan Z Q et al. Dynamic sensitivity analysis and optimum design of aerospace structures. Int. J Struct. Eng. Mech., 1997, 5 (6).
- [4] Gu Y X, Kang Z, Cheng G D. Sensitivity analysis of structural frequency responses and dynamic optimization of space structures, Proc. WCSMO-2, 1997, 89 - 90.
- [5] Gu Y X, Kang Z, Zeng Q G et al. Dynamic design optimization of structures, Proc. APCOM' 96, Seoul, Korea, 1996, 1151 - 1157.
- [6] Gu Y X. Development and applications of structural design optimization package MCADS, in "The Advances in Computational Mechanics". Int. Academic Publishers, 1996, 355 - 366.
- [7] 顾元宪, 亢战, 关振群. MCADS 系统在航天结构动力优化设计中的发展和应用, 计算力学学报, 1997, 14 (增刊): 589 - 594.
- [8] Gu Y X, Zhang H W, Guan Z Q et al. New development and applications of structural analysis/optimization package JIFEX95, Proc. CASCM' 97, 1997, 81 - 90.
- [9] Gu Y X, Guan Z Q, Ma Z Y. Finite element modeling integrated with AutoCAD, in "Computational Methods in Engineering and Science", Proc. EPMESC - VI, Guangzhou, China, 1997, 908 - 912.
- [10] 关振群, 顾元宪, 马正明等. 基于 AutoCAD 的有限元模型自动生成系统 AutoFEM, "现代力学与科学进步", 中国力学学会成立四十周年学术大会论文集, 1997, 946 - 948.

THE METHODS AND APPLICATIONS OF STRUCTURAL LAYOUT AND DYNAMIC DESIGN OPTIMIZATION

Gu Yuanxian Zhang Hongwu Liu Shutian Kang Zhan
 (Dept. of Eng. Mechanics, Dalian University of Technology, State Key Laboratory of
 Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian 116024)

Key words design optimization, structural topology, dynamic property, software