

Structural
Optimization
Method Based on
Simulation

基于仿真的 结构优化方法

毛虎平 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

基于仿真的 结构优化方法

毛虎平 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书全面介绍了机械结构优化方法,包括针对不同动态分析问题谱元法的动态仿真建模方法及其结构动态响应优化方法、考虑所有节点等效静态载荷法的结构动态响应优化方法、将优化要素与结构几何特点及工程要求结合的结构静态优化方法等。本书共 7 章:第 1 章为绪论,第 2 章为基于谱元法的结构动态分析方法,第 3 章为基于时间谱元法的动态响应优化方法,第 4 章为基于面向所有节点等效静态载荷的模式叠加法的结构动态响应优化方法,第 5 章为基于局部特征子结构法的连续结构优化方法,第 6 章为基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化方法,第 7 章为基于节点里兹势能主自由度的结构动态缩减方法。

本书内容丰富,具有较强的前沿性和可操作性,可供从事机械系统或结构分析优化设计的工程师参考,也可作为研究生或高年级本科生机械结构优化课程的参考教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

基于仿真的结构优化方法 / 毛虎平著. —北京:电子工业出版社, 2019.6
ISBN 978-7-121-36572-0

I. ①基… II. ①毛… III. ①机械设计—结构设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 092834 号

策划编辑:米俊萍

责任编辑:米俊萍

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:13.75 字数:198 千字

版 次:2019 年 6 月第 1 版

印 次:2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价:88.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mijp@phei.com.cn, (010) 88254759。

前言

Foreword

人类行为和自然进化均与最优化紧密相关。工程师通过调整各种参数使得产品性能达到最优；制造商则设计不同的加工过程使生产率最高、生产成本最低或产品性能最好；自然系统的进化是优胜劣汰的过程，可使各种生物在最恶劣的条件下最适宜地生存；物理系统会自然地趋于能量最低的状态。

产品建模与仿真优化的最终目的是实现产品的优化设计。仿真优化是指基于系统仿真的参数优化，它针对仿真模型建立优化问题，采用相关的优化搜索算法进行求解，是基于仿真的目标或/和约束的优化问题。基于仿真的优化根据仿真问题的类型分为静态优化和动态优化。基于仿真的动态优化又可分为基于仿真的动态响应优化、基于仿真的动态特性优化和基于仿真的动态疲劳优化。基于仿真的动态优化不仅是仿真优化问题，而且还是动态优化问题。

机械结构几乎都是在动态载荷环境下工作的，其各种性能都是依赖于时间的函数。为了提升机器的动态性能，动态优化非常必要。然而，当前动态优化设计理论与方法难以适应现代化产品设计的需要。传统的机械结构优化几乎都是静态优化，没有考虑由于动态载荷的作用而产生的动态效应，即在静态力作用下，应用经典优化算法优化，难以实现动态载荷作用下机器性能最佳。另外，即便进行动态优化，也只是直接进行优化。由于动态分析的复杂性和高耗时性，直接进行动态优化收敛速度极慢，甚至发散。鉴于此，中北大学于 2007 年将作者派往华中科技大学攻读博士学位，师从动态仿真优化专家陈立平教授和吴义忠教授，重点研究结构在动态载荷作用下的优化理论与方法。本书系统总结了作者自 2007 年以来的研究成果。

本书章节安排如下：第 1 章绪论，主要介绍本书所做研究的目的、意义，以及国内外研究概况；第 2 章基于谱元法的结构动态分析方法，主要介绍任意载荷振动问题分析的 Chebyshev 谱元法、聚集单元谱元法在承受冲击载荷结构动态分析中的应用和非线性振动分析的 Chebyshev 谱元法；第 3 章基于时间谱元法的动态响应优化方法，主要介绍机械结构动态响应优化模型、动态响应优化方法、线性单自由度系统的最优化设计、线性两自由度减振器最优化设计和汽车悬架系统动态响应优化设计；第 4 章基于面向所有节点等效静态载荷的模态叠加法的结构动态响应优化方法，主要介绍模态叠加法、等效静态载荷法和关键时间点集；第 5 章基于局部特征子结构法的连续结构优化方法，主要介绍连续结构优化问题描述和子结构法；第 6 章基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化方法，主要介绍结构动态特性优化问题描述、结构平均单元能量、子结构划分和基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化方法的实施；第 7 章基于节点里兹势能主自由度的结构动态缩减方法，主要介绍节点里兹势能计算及主自由度选择、构造缩减系统和基于节点里兹势能主自由度的结构动态缩减方法的实施。

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目“基于等效体积应变静态载荷的解空间谱元离散关键点方法及其在结构动态响应优化中的应用”（资助号：51275489）和山西省自然科学基金项目“基于能量评价 PDOFs 的多子结构精简等效静态载荷和刚体模态分离解析梯度的复杂结构动态响应优化基础研究”（资助号：201701D121082）的资助，在此表示诚挚的谢意。同时，中北大学机电工程学院的郭保全副教授，中北大学能源动力工程学院的张艳岗副教授、王强副教授、王艳华副教授、王军博士、刘勇博士、赵利华博士、王英博士、郑利峰博士、高鹏飞硕士等为本书的研究提出了许多宝贵建议，硕士生田力、刘鑫等在本书的写作修改方面做了大量工作，在此一并表示衷心感谢！

由于结构优化是一个具有挑战性的研究领域，并且仍处于蓬勃发展阶段，加之作者水平有限，本书难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 本书研究目的和意义	3
1.2 国内外研究概况	4
1.2.1 结构优化研究概况	4
1.2.2 基于仿真的优化研究概况	15
1.3 本书主要研究内容、主要创新点与组织结构	19
1.3.1 主要研究内容	19
1.3.2 主要创新点	21
1.3.3 组织结构	22
第 2 章 基于谱元法的结构动态分析方法	23
2.1 谱元法	24
2.1.1 瞬态和稳态响应分析	26
2.1.2 全部状态变量的全局组装和求解	29
2.2 任意载荷振动问题分析的 Chebyshev 谱元法	30
2.2.1 振动问题及其积分形式	30
2.2.2 时间单元划分	31
2.2.3 振动微分方程离散	31
2.2.4 边界条件施加	34

2.3 聚集单元谱元法在承受冲击载荷结构动态分析中的应用	34
2.3.1 线性结构动态响应方程及其转化形式	36
2.3.2 聚集单元划分	36
2.3.3 单元分析	38
2.3.4 集成总体谱元方程及求解	40
2.4 非线性振动分析的 Chebyshev 谱元法	40
2.5 算例分析	42
2.5.1 任意载荷振动问题分析	42
2.5.2 聚集单元谱元法	52
2.5.3 非线性振动分析	60
2.6 本章小结	65
第 3 章 基于时间谱元法的动态响应优化方法	67
3.1 机械结构动态响应优化模型	69
3.2 动态响应优化方法	70
3.3 线性单自由度系统的最优化设计	70
3.4 线性两自由度减振器最优化设计	79
3.5 汽车悬架系统动态响应优化设计	91
3.5.1 路况一	96
3.5.2 路况二	101
3.6 本章小结	107
第 4 章 基于面向所有节点等效静态载荷的模态叠加法的结构动态	
 响应优化方法	108
4.1 模态叠加法	110
4.2 等效静态载荷法	111
4.3 关键时间点集	113
4.4 方法流程	114

4.5 算例分析	115
4.5.1 124 杆桁架结构尺寸优化	115
4.5.2 18 杆桁架结构尺寸与形状混合优化	121
4.6 本章小结	127
第 5 章 基于局部特征子结构法的连续结构优化方法	129
5.1 连续结构优化问题描述	132
5.2 子结构法	132
5.3 子结构法的实施	134
5.4 基于子结构法的优化迭代	136
5.5 算例分析	138
5.5.1 空腹梁设计	138
5.5.2 柴油机活塞设计	143
5.6 本章小结	152
第 6 章 基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化方法	154
6.1 结构动态特性优化问题描述	156
6.2 结构平均单元能量	157
6.2.1 影响结构动态特性的因素	157
6.2.2 平均单元能量分析	158
6.3 子结构划分	160
6.4 基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化方法的实施	164
6.5 124 杆桁架结构优化设计	165
6.5.1 采用本章所提方法进行优化	165
6.5.2 基于几何特征和经验确定设计变量及其取值范围	172
6.5.3 采用式 (6.3) 的优化模型寻优比较两种方法	174
6.6 本章小结	177

第 7 章 基于节点里兹势能主自由度的结构动态缩减方法	178
7.1 节点里兹势能计算及主自由度选择	180
7.2 构造缩减系统	181
7.3 基于节点里兹势能主自由度的结构动态缩减方法的实施	183
7.4 算例分析	184
7.4.1 圆柱曲板	184
7.4.2 曲轴	188
7.5 本章小结	191
参考文献	193

绪论

产品建模与仿真的最终目的是实现产品的优化设计。仿真优化是指基于系统仿真的参数优化，它是针对仿真模型建立的优化问题。采用相关的优化搜索算法进行求解的一整套技术，是基于仿真的目标或和约束的优化问题。其原理如图 1.1 所示，即基于模型仿真给出的输入关系构造优化模型，通过输出给优化算法得到最佳的输入量。如制造系统、交通系统、电力系统、化工系统等许多工程问题都能归结为基于仿真的优化问题^[1-3]。基于仿真的优化根据仿真问题的类型分为静态优化和动态优化。基于仿真的动态优化又可分为基于仿真的动态响应优化、基于仿真的动态特性优化和基于仿真的动态疲劳优化。基于仿真的动态优化不仅是仿真优化问题，而且是动态优化问题。从狭义上讲，动态响应优化是在动态载荷作用下的结构动态特性的最优化；从广义上讲，动态响应优化是指目标函数优化或约束函数与时间相关、而设计变量与时间无关的优化，当然后者包含前者。

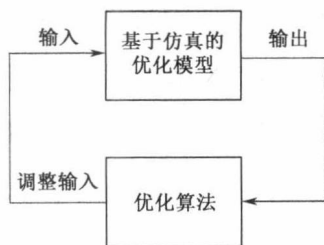


图 1.1 基于仿真模型优化的原理

基于仿真的优化的特点如下：

(1) 系统输入输出的关系有两种，一种是缺少结构信息，不存在解析表达式，仅能通过仿真得到；另一种是虽然存在解析表达式，但是获得解析解比较困难，如微分方程或偏微分方程等，或者采用近似方法获得解析表达式，如结构的运动模型。

(2) 在仿真优化时，一种仿真耗费时间较少，另一种仿真耗费时间则较多，且缺少针对这种情况的仿真优化算法，导致优化过程十分耗时，甚至不可能实现优化。

(3) 对于大型连续结构，优化难度非常大，主要表现在：大型连续结构有限元分析耗时较长，寻优过程效率较低；连续结构参数化比较困难，但对于杆单元、平面单元、梁单元等简单单元来说，常以单元截面积、单元厚度及梁截面积为设计变量，很容易实现参数化。根据子结构方法的优势与优化过程中各个子功能的特点重新思考优化是一种有效的解决方案。

(4) 设计变量及其取值范围的确定是对结构优化问题建立合理优化模型的前提，它们的取值直接决定了优化问题的收敛性与高效性。工程师一般结合经验尽量多取设计变量，尽量扩大设计变量的取值范围，这样做是为了避免漏掉关键设计变量及其包含的重要取值范围，但这样确定设计变量的取值范围没有任何理论依据。

鉴于基于仿真的结构优化工程背景和上述特点，它一直是很多领域，尤其是机械制造和航空航天等领域学者和工程师们共同关注的重要课题。随着计算机技术、人工智能技术和数学分析方法的发展，对基于仿真的结构优化研究更加迫在眉睫。

1.1 本书研究目的和意义

本书研究是在确定性优化的基础上进行的，其目的如下：

(1) 在谱元法的基础上，实现对任意载荷振动问题的 Chebyshev 时间谱元法分析、对承受冲击载荷结构的聚集单元谱元法动态分析和对非线性振动的 Chebyshev 时间谱元法分析。

(2) 研究基于时间谱元法的结构动态响应优化，并将谱元法与模态叠加法相结合应用于结构动态响应优化。

本书研究基于时间谱元法的系统动态响应设计，深入探讨时间域内的离散动态响应，将运动微分方程组转化为代数方程组，精确解出瞬态响应，用 Guass-Lobato-Legendre (GLL) 点法和关键点法处理时间约束；针对瞬态动力学分析的复杂性和等效静态载荷转化的不确定性，提出基于模态叠加的所有节点等效静态载荷法，并将其应用于动态响应优化。从模态叠加原理出发，分析动态响应与各模态的关系，然后通过详细分析等效静态载荷法的原理，给出基于模态响应的所有节点等效静态载荷的计算表达式，最后提出关键时间点集的所有节点等效静态载荷法，采用谱元离散插值且微分获得了时间关键点，并与邻近的 GLL 点组成关键时间点集。

(3) 基于局部特征子结构方法的连续结构优化和基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化。

本书从优化过程的各个子功能和连续结构的几何特征出发，将连续结构划分为参数化子结构、超单元和状态变量子结构，以参数化子结构的几何特征为设计变量，建立连续结构评价的目标函数；以最小的连续结构质量为优化目标，将参数化子结构和状态变量子结构所承载的连续结构应力

应变作为约束条件，建立连续结构评价的最优化数学模型（其中隐含着整体结构局部几何不变而且不包含所需状态变量的局部构造，即超单元）。本书采用基于梯度的序列二次规划法对模型求解，实现一种基于局部特征子结构的连续结构高效优化方法。从建立优化模型出发，结合结构几何特性，将整体结构划分为多个准设计变量子结构，对于桁架结构来说，将每根杆作为一个子结构；对于连续结构而言，将多个单元作为一个子结构，再结合结构平均单元体积应变能及平均单元动能与结构动态响应贡献的关系，将平均单元体积应变能较大的结构单元作为尺寸应该变大的子结构，将平均单元动能较大的结构单元作为单元尺寸应该变小的子结构，从而确定设计变量的合理范围。本书推导了平均单元能量与结构动态响应的关系，构造了结构动态特性优化模型，调用基于梯度的优化器进行迭代寻优，实现了基于子结构平均单元能量的结构动态特性优化。

1.2 国内外研究概况

对基于仿真的结构优化方法的研究涉及结构优化和基于仿真的优化两个方面。

1.2.1 结构优化研究概况

结构优化的研究内容涉及子结构法、结构灵敏度计算、等效静态载荷法、谱元法及结构动态响应优化。

1) 子结构法

结构优化设计是建立在精确的结构数学模型基础上的，而对于大型复

杂结构,其动态响应还是以试验结果为准。对振动试验计算机仿真的研究难度很大,其核心问题是如何得到准确的振动响应。振动响应计算比静力计算、振动特性计算等难度都大得多。当前迫切需要提高大型复杂结构动态响应的计算精度与计算效率,子结构法是最合适的选择。

子结构法充分利用各个子系统的动态特性,以简便的计算过程获得可靠的原系统动力特性参数或动态响应,它是解决大型复杂结构动力分析的有效计算方法。根据采用的边界条件不同,子结构法可分为四大类^[4]:约束子结构法^[5]、自由子结构法^[6]、混合子结构法^[7]和载荷子结构法^[8]。在20世纪60年代初,Hurty^[9]首先提出模态综合法的概念,并建立约束模态综合法的基本框架,半个多世纪以来,模态综合法取得了很大的进展,其方法已定性化并已成为结构动态分析的一种常规方法。2000年,Craig^[5]在Hurty的基础上进行了改进,形成约束子结构法。固定界面模态综合法是指在子结构的全部界面上附加约束,该方法在子结构的对接界面坐标中,不再区分静定约束坐标和赘余约束坐标,这使得固定界面模态综合法得到了广泛应用。自由界面子结构模态综合法是指以子结构的自由界面保留主模态集为其中一个子集,切断界面上的连接,将整体系统划分为空间中毫无关联的若干个子结构,然后利用相邻部件之间的界面位移协调及界面力的平衡条件,将之前完全释放的连接界面连接成一个整体。由于自由界面子结构模态综合法比较符合当前动态测试水平的要求,当需要通过试验来校核解析模型的可靠性时,这种方法很有吸引力。自由界面子结构模态综合法不仅计算精度优于固定界面子结构模态综合法,而且不受子结构界面坐标数目的限制,但是该方法复杂。混合界面子结构模态综合法是为了克服上述两种方法的缺点提出的。载荷子结构法改善了低阶模态的精度,但是随着模态数量的增加,其精度也将下降。以上述方法为基础还发展了很多其他方法,并得到了广泛应用^[10,11]。

子结构法是一种通过对求解模型分块处理来降低仿真计算求解时间的

高级有限元分析方法，只要分块合理并建立模型的子结构数据库，便能极大地提升求解效率。

张焰等人^[12]将子结构法用于对汽车车架的降噪分析，求解效率提升了94%。高鹏飞等人^[13]应用 ANSYS 前处理模块对活塞内冷油腔进行分离，使用子结构法中超级单元的思路对活塞的机械应力及温度分布进行分析，通过与传统计算方案对比，验证了子结构法在活塞结构强度校核及温度分布方面应用的高效性及准确性。高鹏飞等人^[14]为了提升活塞结构优化设计的求解效率，首次将子结构法引入结构的优化设计中，以某增压柴油机活塞为研究对象，研究结果显示，其优化迭代收敛时间减少了 74.14%。在实际问题中，常常需要对模型的某些局部特征进行优化设计，为了克服传统意义上建模和优化效率低、参数化信息易丢失等缺点，刘波等人^[15]充分运用三维 CAD 软件和 CAE 软件的优点，以 Pro/ENGINEER 软件和 ANSYS 自身的脚本语言 APDL 为平台进行模型参数化建立，并提出了三种面向局部特征优化的参数化设计方法。李芸等人^[16]将子结构法运用到大底盘双塔连体结构中，通过对其进行结构静力学分析及模态分析，充分展现了子结构法在大型复杂模型仿真计算应用中的优势。柴国栋等人^[17]应用 ANSYS 中的子结构模块对电子设备箱进行模态分析，并寻求提升整体结构刚度的方法。张明明等人^[18]将子结构法运用到柴油机曲轴的有限元仿真分析中，通过对曲轴进行子结构划分及子结构数据库建立，组合出柴油机曲轴的子结构有限元模型，对其进行结构静力学分析及模态分析，并与传统有限元算法进行对比，发现两种计算方法的误差不超过工程上的误差允许范围，再一次证明了子结构法在结构有限元仿真计算领域的可行性。丁阳等人^[19]将子结构法引入钢框架结构抗倒塌性能的评估中，通过对两个五层钢框架结构的抗倒塌评估可以证明该思路的高效性及准确性。丁晓红等人^[20]在对汽车座椅骨架进行拓扑优化设计时引入了子结构的思想，通过逐步逼近的方法得到了座椅骨架的最优结构，缩小了该座椅骨架的体积。张盛等人^[21]通过对比多重多级子结构法与模态综合法在结构模态分析计算中的精度，证明多

重多级子结构法更加高效准确,在结构的高阶频率计算方面表现良好。张帆等人^[22]在对客车车身进行拓扑优化的过程中引入子结构法,将不参与优化的部分设计成一个子结构,并通过适当的方式与待优化部分进行节点连接,缩减了整体计算模型的矩阵阶数,提升了车身拓扑优化设计的效率。李志刚等人^[23]将高架铁路浮桥进行子结构划分,重组计算后也证明了子结构法的高效性。笔者对模型采用基于梯度的序列二次规划法进行求解,以某柴油机活塞连续结构为例进行分析优化,并从收敛性和高效性方面与传统优化方法进行比较,证明该方法的优越性^[24]。

另外,笔者研究了多领域仿真优化中 SQP 算法的并行处理与调度策略,提出了基于多领域仿真的 SQP 算法并行优化问题中的抽象调度模型,即等式约束离散变量优化模型,并对算法理论的可行性做了深入探讨;采用机群系统构建了并行仿真优化环境,在自主研发的多领域统一建模与仿真平台 MWorks 下实现并行优化模块^[25]。

大型复杂结构动力学分析需要对拥有大量自由度的模型进行计算,在高频激励力作用下,要求计算步长非常小,导致计算耗时指数级增加。为了提高计算效率,可在保证一定精度的情况下,用少自由度模型代替多自由度模型,即模型缩减。所谓模型缩减,是通过一定的变换,将对总体结构动力学分析影响较小的次自由度,用对总体结构动力学分析影响较大的少量自由度表示,以达到减小计算规模的目的,其中少量自由度就是 PDOFs。然而如何从庞大的自由度中选择 PDOFs,目前在结构动力学领域仍属极具挑战的问题。

不过目前学术界提出了一些选择 PDOFs 的原则,最具代表性的有:

①将结构振动方向定为 PDOFs; ②在质量或转动惯量相对较大而刚度相对较小的位置选择 PDOFs; ③在施加力或非零位移的位置选择 PDOFs, 这些原则仅仅是指导思想,具体选择 PDOFs 时,随意性较大。PDOFs 的位置和数目直接影响模态分析的精度。Jeong 等人^[26]提出了一种阻尼系统基于自由