

◎ 毛虎平 著

基于仿真模型

的动态响应 优化方法

Simulation model



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

基于仿真模型的动态 响应优化方法

毛虎平 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了机械结构动态响应优化方法,包括并行优化、基于时间谱元法的机械系统物理模型求解、多元模型自适应与时间谱元法结合的动态响应优化技术、基于 MARS 的动态响应优化算法、基于模糊聚类的全局动态响应优化算法等。

本书内容较为丰富,具有较强的前沿性和可操作性,可供从事机械系统或结构动态响应分析和优化设计方面的工程师参考,也可作为研究生或高年级本科生动态响应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

基于仿真模型的动态响应优化方法/毛虎平著. —北京:电子工业出版社, 2014.3
ISBN 978-7-121-18285-3

I. ①基… II. ①毛… III. ①动态响应—最优化算法 IV. ①O32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037876 号

策划编辑:秦绪军 赵 娜

责任编辑:谭丽莎

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

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:720×1000 1/16 印张:14.25 字数:296 千字

印 次:2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价:42.00 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。

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

服务热线:(010) 88258888。

前 言

机械结构几乎都在动态载荷的环境下工作，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，动态优化是非常必要的，然而当前动态优化设计的理论与方法难以适应现代化产品设计的需要，这点主要表现在以下几个方面：首先，传统的机械结构优化几乎都是静态优化，缺乏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，难以解决动态载荷作用下机器性能最佳的问题；其次，即便进行动态优化，也只是直接进行优化，从而造成因动态分析的复杂性和高耗时性而产生极慢收敛，甚至发散的现象。鉴于此，中北大学能源与动力工程专业从 2007 年将本书作者派往华中科技大学攻读博士学位，师从国内外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。

结构动态响应优化是为实现机械系统或机械结构在动态载荷作用下，其性能或结构动态响应达到最佳或最大响应最小，其目标是实现对机械系统单一或组合的物理模型，或者结构有限元模型进行快速、高效和准确的最优设计。与传统的动态优化不同的是，本书作者从并行优化、机械系统物理模型求解，以及处理与时间相关的约束三个方面出发，并考虑动态响应优化本质，系统地研究了结构动态响应优化，从而快速、高效和准确地实现了机械系统或结构动态响应优化。

产品的动态响应优化是产品建模和仿真的最终目的。动态响应优化是指基于机械系统或结构的仿真的参数优化，对机械系统物理模型或结构的有限元模型，采用相关的优化搜索算法进行求解的一整套方法。基于仿真的动态响应优化最重要的特点是在优化迭代过程中需要通过仿真求解来完成目标函数和约束的估值，而传统的优化算法或启发式算法因需要大量的仿真估值而显得力不从心，加上动态响应仿真分析的复杂性和高耗时性，使得传统的优化方法雪上加霜。

本书章节安排如下：第 1 章对基于仿真的动态响应优化方法及其相关技术进行概述；第 2 章从优化并行化的角度考虑动态响应优化问题；第 3 章介绍基于时间谱元法的动态响应优化方法，包括机械系统物理模型的建立，时间谱元法的模型转化，以及处理与时间相关的约束等；第 4 章介绍多元模型自适应与时间谱元法结合的动态响应优化，包括多元模型自适应优化算法原理、算法实现、如何与时间谱元法混合，以及时间关键点集方法处理与时间相关的约束；第 5 章介绍基于 MARS 的动态响应优化算法，包括 MARS 响应面的建立、移动极限策略，以

及两者的混合、置信域方法；第6章介绍基于模糊聚类的全局动态响应优化算法，包括模糊聚类理论、Kriging元模型的建立及全局动态响应搜索的方法。

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）、山西省基础研究计划——煤层气联合研究基金项目（资助号：2012012003）和煤与煤层气共采山西省重点实验室项目资助，在此表示诚挚的谢意。同时，华中科技大学CAD中心的陈立平教授和吴义忠教授，CAD中心的陶松桥博士（现在武汉交通职业学院）和魏昕博士（现在武汉轻工大学机械工程学院），以及中北大学机电工程学院的郭保全副教授，王艳华副教授，中北大学理学院的李建军副教授，中北大学能源与动力工程的在读博士张艳岗、王悦芳、王军、刘勇、刘晓勇、马福康、奇朝旭、王英，在读硕士魏波、王杰、马浩、刘波等也参与了本书的部分编写工作，在此一并表示衷心的感谢！

动态响应优化是一个较新的研究领域，且仍处于蓬勃的发展阶段，加上作者的水平有限，本书难免存在疏漏之处，欢迎读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究目的和意义	3
1.2	国内外研究概况	5
1.2.1	动态响应优化	6
1.2.2	基于仿真的优化研究概况	7
1.3	本书研究内容、创新点与组织结构	13
1.3.1	本书的主要研究内容	13
1.3.2	主要创新点	14
1.3.3	组织结构	15
第 2 章	动态响应优化问题的并行化处理	17
2.1	动态响应优化算法的并行化	17
2.1.1	SQP 算法的并行化	17
2.1.2	并行调度算法	18
2.1.3	算法分析	22
2.2	动态响应并行优化过程	23
2.2.1	并行平台	23
2.2.2	动态响应并行优化实现	24
2.3	实例分析	27
2.4	本章小结	32
第 3 章	基于时间谱元法的动态响应优化算法	33
3.1	谱元法	33
3.1.1	瞬态和稳态分析	34
3.1.2	全部状态变量的全局组装和求解	36
3.2	逐步时间谱元法	37
3.2.1	线性动力学方程的逐步时间谱元法	38
3.2.2	线性结构动态响应方程及其转化形式	38
3.2.3	时间分段及单元划分	39

3.2.4	单元分析	39
3.2.5	集成总体时间谱元方程及求解	41
3.3	初始条件	41
3.4	基于时间谱元法的动态响应优化	41
3.5	实例分析	42
3.5.1	动态响应分析	42
3.5.2	动态响应优化	47
3.6	本章小结	83
第 4 章	多元模型自适应与时间谱元法结合的动态响应优化	84
4.1	时间谱元法	86
4.1.1	结构动力学方程及其转化形式	87
4.1.2	单元划分	87
4.1.3	单元分析	88
4.1.4	集成总体时间谱元方程并求解	88
4.2	元模型混合自适应方法	89
4.3	处理与时间相关约束的方法	90
4.3.1	关键点集法 (Critical Points Set Method, CPSM)	90
4.3.2	元模型混合自适应优化依赖于时间的约束	91
4.4	算例分析	92
4.4.1	汽车悬架系统动态响应优化设计问题一	92
4.4.2	汽车悬架系统动态响应优化设计问题二	94
4.5	结论	96
4.6	本章小结	97
第 5 章	基于 MARS 的动态响应优化算法	98
5.1	响应面方法	98
5.1.1	多项式	98
5.1.2	MARS	99
5.2	基于 MARS 的优化技术	103
5.2.1	优化问题	103
5.2.2	近似概念	103
5.2.3	基于 MARS 的动态优化策略	104
5.3	实例分析	113
5.3.1	Hesse 函数	113
5.3.2	阶梯悬臂梁截面设计	113

5.3.3 变截面悬臂梁形状优化设计	116
5.3.4 线性两自由度减振器最优设计	120
5.3.5 汽车悬架系统动态响应优化设计	124
5.4 本章小结	130
第 6 章 基于模糊聚类的全局动态响应优化算法	131
6.1 模糊数学方法	131
6.1.1 模糊集的概念	132
6.1.2 模糊分类关系	133
6.1.3 模糊聚类	134
6.2 模糊 C 均值聚类	136
6.3 模糊聚类全局仿真优化算法	137
6.3.1 Kriging 元模型	137
6.3.2 拉丁超立方试验设计	140
6.3.3 算法思想及步骤	140
6.4 实例分析	144
6.5 本章小结	154
附录 A 动态响应优化问题的并行化处理程序	155
附录 B 基于时间谱元法的动态响应优化算法程序	159
附录 C 多元模型自适应与时间谱元法结合的动态优化	177
附录 D MARS 的动态响应优化算法	187
附录 E 基于模糊聚类的全局动态响应优化算法	200
参考文献	210

第1章 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优化问题，并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。许多工程实际问题都能归结为基于仿真的优化问题，如制造系统、交通系统、电力系统、化工系统等^[1~3]。而基于仿真模型的动态响应优化不仅是仿真优化问题，更是动态响应优化问题。从狭义上讲，动态响应优化是在动载荷作用下的结构动态特性的最优化；从广义上讲，动态响应优化是优化目标函数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。

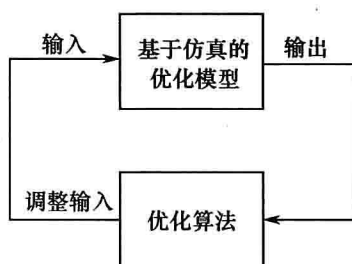


图 1.1 基于仿真模型的优化原理

基于仿真模型的动态响应优化的特点总结如下。

(1) 系统的输入/输出关系有两种情况：一种是缺少结构信息，不存在解析表达式，仅能通过仿真得到近似解；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，或者解析表达式采用近似方法获得，如结构的运动模型。

(2) 不论是哪一种仿真模型都存在不确定因素，仿真一次只能得到对应某一输入的一次性能估计，一般都存在误差。

(3) 在基于仿真的优化中，一种仿真耗费时间较少；另一种仿真耗费时间多，且缺少针对耗费时间多的仿真优化的算法，导致优化过程十分耗时，使人无法容忍甚至是不可能实现的。

(4) 仿真模型与时间有关，这样中间变量多，约束条件多，优化的目标不在一个点而是在一条超曲线或一个超曲面上，因此要在所有时间点上满足约束，这样处理约束极为困难；并且当存在多个极小值时，很难实现全局最优。

如果最优化问题的解不随时间而变，则称为静态最优化（参数最优化）问题，如变截面梁的外形形状设计问题、稳态电网的最优设计问题、阶梯梁截面尺寸设计问题和电机及变压器的最优设计问题等；如果最优化问题的解随时间而变，即状态变量是时间 t 的函数，则是动态响应最优化问题，如桁架结构在动态载荷作

用下的优化设计（如图 1.2 所示）、减振器设计问题（如图 1.3 所示）、汽车悬架系统设计问题、连杆在动态载荷作用下的响应优化问题（如图 1.4 所示）和曲柄滑块机构的动态响应优化设计（如图 1.5 所示）等，在这种情况下，问题的约束要在每一个时间点都满足，如何处理约束是决定优化是否成功的关键；如果在求解最优化问题中仿真耗时较多，则称为计算昂贵的仿真动态响应优化问题，在这种情况下，减少仿真次数显得尤为重要。仿真优化最重要的特点是在优化迭代过程

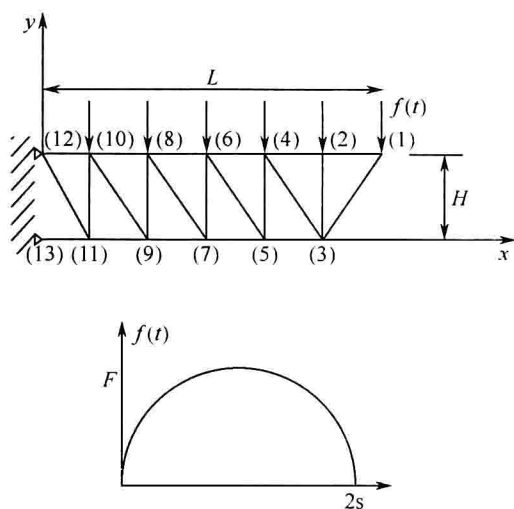


图 1.2 桁架结构和动态载荷

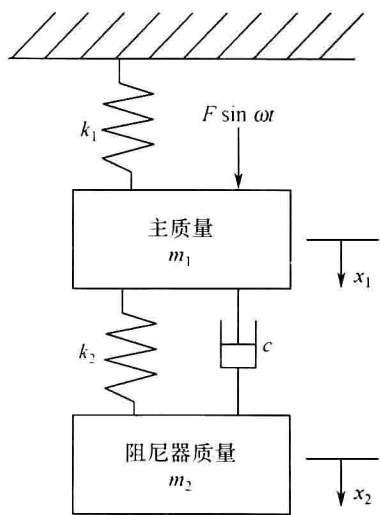


图 1.3 减振器设计问题

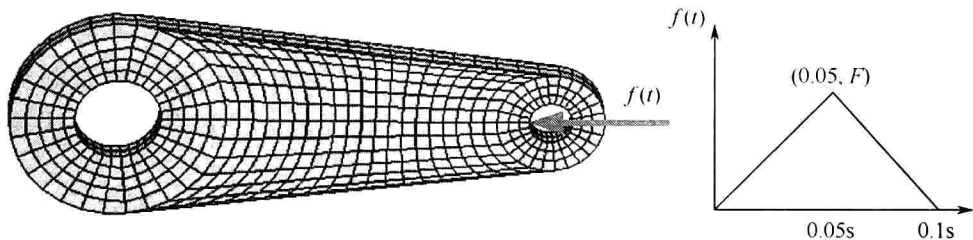


图 1.4 连杆动态响应优化

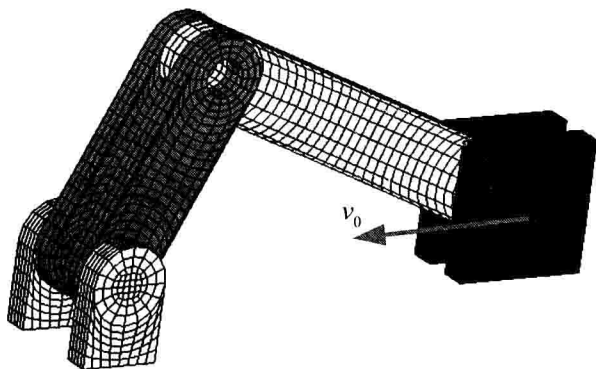


图 1.5 曲柄滑块机构

中需要通过仿真求解来完成目标函数和约束函数的估值,因此无论是解动态响应优化问题还是计算昂贵的仿真动态响应优化问题,传统的优化算法或启发式算法因为需要大量的仿真估值而显得力不从心。

鉴于基于仿真模型的动态响应优化的工程背景和上述难点,它一直是各领域学者和工程师们共同关注的重要课题,尤其是在机械制造和航空航天等领域。随着计算机技术、人工智能和数学分析方法的发展,基于仿真模型的动态响应优化的研究更加显得迫在眉睫。

1.1 研究目的和意义

本书是在确定性优化和随机优化的基础上进行研究的,其目的有如下几点。

1. 在优化库上实现序列二次规划法的仿真动态响应优化的并行化

并行优化可以在一定程度上提高仿真优化的效率,从问题分解的角度解决基于仿真的动态响应优化耗时问题。约束变尺度法又被称为序列二次规划(SQP)算法,具有收敛快、效率高、可靠性与整体收敛性好、适应能力强等一系列优点^[4],并被成功应用于工程优化问题的求解。序列二次规划算法通过求解一系列的二次规划子问题(QP)来获得原问题的最优解,而其二次规划子问题的精度依赖于原问题的目标函数和约束函数梯度值的精度,并对问题的收敛性有较大影响。对于基于多学科仿真的多实例(即多工况或一个系列产品)、多目标仿真优化问题,当采用差分法计算梯度时,由于每次迭代需要进行多次仿真函数评估(评估次数等于设计变量维数的两倍乘以实例数+1),使得优化求解过程很费时。应用 SQP 优化的并行优化可以解决动态响应优化耗时多的问题。

2. 精确求解机械系统动态响应,基于 GLL 点建立近似模型,提出在机械动态响应中,解决所有时间点都必须满足约束的最佳优化方案

机械结构几乎都在动态载荷作用下工作,其性能均是时间的函数。为了提升机器的性能,进行动态响应优化显得尤为重要。对于动态响应优化而言,首先要分析载荷在时间域上的变化,然后求出精确的离散点的响应,并满足与时间相关的约束;为了防止约束在任意两个时间离散点之间失效,可采用小时间步来计算响应。然而,优化器在每一步迭代中,需要重新计算目标函数、约束函数和灵敏度。因此,本书作者采用时间谱元法精确高效地求解响应。

本书采用两种处理与时间相关约束的方法:一种是 GLL 点法;另一种是关键点法。第一种方法将时间离散为尽量多的 GLL 点,因此约束数量较多,且计算量比较大;第二种方法将时间离散为尽量少的 GLL 点,对每一个单元进行高次

Lagrange 插值, 然后通过一维搜索找到单元的极值点, 因此约束数量比较少, 计算开销小。

3. 利用 MARS 的特点, 结合移动极限策略和置信域方法及数据驱动研究适合于基于计算昂贵的黑箱仿真模型的动态响应优化算法

MARS 是一个自适应的回归过程, 适合于解决多维问题。它采用了将高维问题简化为低维高精度模型的被修改的回归分块策略。MLS 是在设计空间确定子区间的位置和大小的方法, 它不仅反映了函数近似质量, 而且反映了优化过程的收敛历史。其目的是减少传统响应面的不利因素, 特别是对于高维非线性问题而言。

数据驱动仿真动态响应优化方法, 将增广拉格朗日方法、有效的数值处理技术和多变量自适应回归样条有机地结合了起来。在本方法中, 只有当最优点在数据库中, 或者有很近的点在数据库中, 才用数据库中的点对应的目标函数和约束函数的值代替最优点的目标函数和约束函数的值, 而不需要再进行计算昂贵的仿真分析, 如果不存在这样的点, 只能通过计算昂贵的仿真分析获得最优点的目标函数和约束函数的值。这样随着优化的进行, 数据库越来越成熟了。将局部 MARS 响应面、数据处理技术与增广拉格朗日结合起来可以减少计算昂贵的仿真分析次数。

4. 研究基于模糊聚类和近似模型的全局动态响应优化方法, 目的是减少计算昂贵的仿真评估次数

对于计算昂贵的仿真优化问题, 研究的重点在于减少仿真函数的评估和计算昂贵分析的次数。这是因为在优化过程中, 需要反复进行目标函数的评估, 而近似模型是数学模型 (如 Kriging 模型), 评估一次近似模型需要的时间很短。无论采用什么方法, 仿真函数还是需要评估的, 可是评估次数要尽量少。当近似模型精度足够高时, 就可以找到仿真函数的局部极值了。然后在局部极值点处构造采样区域并采样, 并构建局部近似模型, 最后进行局部搜索。反复进行此过程直到找到全局最优值为止。

本书的意义在于以下几个方面。

(1) 拓展优化库的应用范围, 提供给多物理建模、仿真及优化更加完善的工具, 并且使得该平台更加实用化; 对于动态响应优化问题的序列二次规划求解, 提供并行化处理的策略, 使得求解动态响应优化问题更有效率。

(2) 针对机械系统动态响应优化问题进行研究, 能够为面向机械系统的仿真动态响应优化提供基础支撑技术。

目前, 求解机械系统运动微分方程或方程组, 最常用的是有限差分法, 而有限差分法在计算与时间相关响应的数值方法中占主导地位。在这种方法中, 以初始条件开始用小时间步长计算与时间相关的微分方程, 直到达到收敛要求为止。时间步的大小决定了计算的稳定性与准确性, 这无疑限制了计算效率。而采用谱

元法, 其将有限元法的处理边界和结构的灵活性与谱方法的快速收敛性结合了起来。在相同精度的情况下, 谱元法能够采用较少的单元来减小计算开销。在一个单元内, 将时间离散为与 GLL 多项式零点相对应的网格点, 状态变量在这些点上进行 Lagrange 插值。从理论上分析, 在一些点上插值, 当这些点是正交多项式的零点时, 获得的插值精度最高, 而且在不增加单元数的前提下, 可以达到谱收敛精度。

(3) 面临目前极具挑战的计算昂贵的仿真动态响应优化问题, 提供可收敛的近似优化解决方案。

由于仿真软件的成功应用, 绝大部分真实物理实验都被仿真软件技术取代, 它不仅快速而且廉价, 这是所有工程技术领域期待已久的; 近似优化技术的实现满足了工程师们最关心的最优设计要求, 仿真软件不仅可以非常真实地反映物理特性, 而且使得仿真时间不再是工程师们头痛的问题。面向仿真函数的响应面技术为仿真优化难题提供了有效合理的解决方案, 基于响应面的仿真优化技术不但能保证获得设计空间的全局最优解, 同时可以大大减少目标和约束仿真函数的估值 (即仿真求解) 次数。

(4) 为计算昂贵的仿真动态响应优化提供一个从数据模糊聚类角度考虑的新思路。

模糊聚类是当涉及事物之间的模糊界限时, 按一定要求对事物进行分类的数学方法。聚类分析是数理统计中的一种多元分析方法, 它用数学方法定量地确定样本的亲疏关系, 从而客观地划分类型。事物之间的界限, 有些是确切的, 有些则是模糊的。当聚类涉及事物之间的模糊界限时, 需运用模糊聚类分析方法。模糊 c 均值聚类方法的目标是使群集数据的差异性最小化。一旦确定聚类数 c , 该方法就自动识别群集中心并且将所有数据分到合适的数据群集里。在本书中, 首先构造一个响应面近似模型, 用采样技术得到一些点集合, 通过仿真近似模型获得一些计算昂贵的函数值; 其次, 将所有函数值从小到大排序, 选择前面 10% 的点, 去掉其他点; 最后, 对前面 10% 的点集合应用模糊 c 均值聚类方法识别可能的最小值点的设计子空间。这样, 我们将模糊聚类技术和全局近似优化有机地结合起来, 为全局优化技术开辟了一条新的思路, 给进一步研究基于仿真模型的动态响应优化奠定了非常重要的基础。

1.2 国内外研究概况

优化方法与计算分析仿真的集成将极大地影响产品设计^[5]。正因为集成, 所以面临诸多挑战, 这些挑战主要是因为问题的高维、计算昂贵的分析仿真、函数的未知特性、仿真与时间相关模型的精度, 以及与时间相关的约束需要在所有时

间点上满足而产生的。这里所说的未知函数就是所谓的黑箱函数；与时间相关的问题就是动态响应优化问题。学术界将高维、昂贵和黑箱（High-dimensional, computationally Expensive, Black-box）问题称为 HEB 问题。

HEB 问题在科学和工程实践中广泛存在。例如，高速民用运输机（HSCT）的机翼设计^[6]，包括 26 个设计变量、4 个目标函数和 4 个工程约束，每执行一次 FLOPS/ENGGEN 和 ALCCA 仿真，大约需要 5 分钟；如果按两个水平的全因子分析，需要 67 108 864 次分析，在 IBM RISC6000 7012 model 320 工作站上计算需要整整 600 年。又如在汽车工业中，每执行一次碰撞分析平均需要 98 小时^[7]，假设有 10 个变量，用两个水平的全因子设计，需要分析 1024 次分析，整整 12 年。

现代分析模型大部分是用商业软件构建的，如有限元分析和计算流体力学等。这些模型除了计算昂贵外，对设计者来说是隐含的和未知的。正是这隐含的函数给设计优化造成了极大的困难^[8]。当设计变量数增加时，计算要求将按指数级增加^[9, 10]。由问题维数引起的困难称为“维数灾难（curse-of-dimensionality）”。

1.2.1 动态响应优化

机械结构大都在随时间变化的动载荷作用下工作，机器的各种动态性能均表现为时间的函数。为了使机器的动态性能指标达到极值，有必要进行动态响应优化，这样一方面需要处理在整个时间区间上的载荷变化，精确求出整个时间区间上的响应，满足与时间相关的约束，而且不漏掉任何一个响应最值；另一方面，需要采用小时间步计算时间响应，防止约束在任意两个时间点之间失效。优化器每迭代一步，目标函数、约束和灵敏度需要重新计算，因此在优化计算时，响应求解必须是高效率的。

有限差分法在计算与时间相关响应的数值方法中占主导地位。在这种方法中，从初始条件开始用小时间步长计算与时间相关的二阶微分方程，直到达到收敛要求为止，时间步的大小决定了计算的稳定性与准确性，这无疑限制了计算效率；而多个瞬态周期以后，有限差分法会达到稳态循环，此时计算周期响应，计算效率会相对比较高。但是当受脉冲激励时，基于频率的方法解决响应快速变化的精度不高。在文献[17]中，对于脉冲激励的动力系统，应用谱元法在半连续附近采用了 h 型精细方案，并且将微分方程或方程组转化为代数方程组，在不增加单元数的前提下，达到了谱收敛精度。

在文献[62]中，提出了将设计变量和位移响应、设计变量和位移响应与速度响应、设计变量和位移响应与速度、加速度响应分别作为优化变量的三种方案，应用有限差分法近似与时间相关的约束，运动微分方程被作为等式约束处理，这

样能用显式表达式给出优化变量的梯度, 获得梯度信息的效率高。可是将一个少变量问题变成高维问题, 不仅求解困难, 而且很难收敛。对于动态响应最大值最小问题, 由于在迭代过程中最大响应是振荡的, 直接处理目标函数很难收敛^[11], 所以 Dong-Hoon Choi 提出了直接处理目标函数的方法, 解决了收敛的困难, 该方法通过预先给定一个全局最大响应的系数 α ($0 < \alpha \leq 1$), 在优化过程中同时使大于预先给定的全局最大值的局部最大值最小。

Chung-Ho Wang^[12]提出了一个新的动态响应优化方法, 即主要部件分析和灰色关联模型的多准则评估方法。这种方法考虑了获得无关部件的多质量特征之间的关系, 且部件的优化因子水平由灰色关联模型决定。在文献[13]中, 动态模型包括一阶常微分方程和代数方程, 且将连续动态响应优化问题转化为大型非线性参数约束优化问题, 并应用序列二次规划法求解。在文献[14]中, 对自由飞行的空中交通运输中的碰撞问题, 即动态响应优化问题, 将其转化为有限维的非线性规划问题, 然后应用内点法求解。

有限元法最大的特点是它将运动微分方程转化为代数方程^[15], 这样就可以获得响应对设计变量的更多显式关系, 有效地计算响应的灵敏度。1984 年, Patera 提出了谱元法^[16], 它兼有有限元法处理边界和结构的灵活性与谱方法的快算收敛性的特性。在一个单元内, 将时间离散为与 GLL (Gauss-Lobatto-Legendre) 多项式零点相对应的网格点, 在这些点上进行 Lagrange 插值, 在整个时间区间上解微分方程, 包括瞬态响应和稳态响应; 当求解脉冲激励响应时, 在整个时间区间上应用谱元法进行离散, 通过在激励突变附近增加插值次数 (p refinement), 或者减少单元尺寸 (h refinement) 体现了其局部灵活性^[17]。

对承受瞬态载荷的结构优化在 1970 年就开始了研究。2006 年, Kang 等^[18]首次把动态响应优化作为优化的一个分支。在其优化中, 设计变量每迭代一次, 时间响应需要计算一次, 同时约束必须在整个时间区间内被满足。处理时间约束有几种方法: 一种是只在响应的全局最大值处满足约束; 另一种更加稳定的方法是在更小时间步长上满足约束, 使中间点处的约束失效不可能发生。在准静态方法中应用这种方法使得多个准静态载荷满足约束而不是动态载荷^[19]。在这些方法中, 约束数大大增加。因为在优化迭代过程中, 要计算这些约束的灵敏度, 所以优化耗费也在增加。一种更加有效的方法是只在响应的局部极值点处处理约束, 这样减少了约束数量和计算约束对设计变量的灵敏度的次数^[20]。

1.2.2 基于仿真的优化研究概况

在仿真优化迭代过程中, 需要调用仿真程序来计算目标函数和约束函数的值。响应面方法是提高仿真优化效率的有效途径。响应面 (Response Surface) 是指输

出响应变量 Y 与一组输入变量 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 之间的函数关系。通常, 响应面反映的是某个计算密集的复杂源模型(如多领域仿真模型、FEA 模型、CFD 模型等)的近似模型。因此, 响应面又称为代理模型(Surrogate)或元模型(Meta-model), 即模型的模型。

响应面方法(Response Surface Method, RSM)是指构造源模型的响应面, 以解决源模型的设计或分析等问题的近似方法。据报道^[7], 福特汽车公司进行一次汽车碰撞模型仿真分析需要的时间大约为 36~160 小时, 要实现该模型的两个变量的设计优化, 假设平均需要 50 次迭代寻优, 而每次迭代需要进行一次仿真计算, 这样获得该优化问题的解大约需要 75 天到 11 个月。同样, 要实现 FEA 模型或 CFD 模型的设计优化可能需要更长的时间, 这在实践中几乎是不可接受的。因此, 在过去的 20 年中, 响应面方法应运而生, 而且得到了快速发展。该方法能够减少优化迭代过程中原模型的仿真次数, 而且响应面都是基于采样点数据构造的, 而采样点估值计算都是彼此独立的(传统的优化迭代过程是序列估值的), 可以方便地通过并行计算来获得, 因此, 该方法可以大大提高复杂分析模型的设计优化效率。

根据文献[21], RSM 的作用包括以下 4 个方面。

(1) 模型近似: 这是 RSM 的基本功能。建立一个复杂源模型在其全局定义域内的响应面近似模型, 可以利用该近似模型实现新的未知设计点的快速估值。

(2) 设计空间探索: 建立的响应面模型可以帮助工程师或设计人员进行参数实验、灵敏度分析, 以及将响应变量与输入参数之间的函数关系可视化, 从而帮助工程师更好地理解源模型的特性。

(3) 优化问题的准确表达: 基于对响应面模型的设计空间探索, 特别是灵敏度分析, 可以帮助设计人员构造更加准确的设计优化问题。例如, 可以从设计变量集合中剔除那些非敏感的参数, 从而减少设计变量的维数。根据参数试验也可以缩减搜索区间, 从而减小采样区间, 进而减少优化迭代次数。同样的, 通过分析, 一个多目标设计优化的问题可能被简化成单目标优化问题, 而原以为是一个简单的单目标设计优化问题通过设计空间探索, 发现可能需要建立多目标设计优化问题才能得到解决。

(4) 优化方法的支持: 这是目前 RSM 的主要应用领域。利用建立的响应面模型可以辅助完成各种涉及源模型仿真的设计优化问题, 如全局优化、多领域仿真优化、多目标优化、多学科设计优化, 以及概率设计优化(包括可靠性优化、稳健优化等)。

响应面方法的一个重要环节是构造响应面模型。响应面模型的种类较多, 分别适合不同的需求。常用的有多项式回归模型(Polynomial Regression Surrogate, PRS)、Kriging 插值模型、径向基函数(Radial Basis Functions, RBF)模型、支

持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 模型、神经网络 (Neural Network, NN) 模型, 以及基于 RBF 和 NN 混合的 RBNN 模型; 还有基于样条的多元自适应回归样条 (Multivariate Adaptive Regression Spline, MARS) 模型、BMARS (B 样条 MARS) 及 NURBs 模型, 其他的还有归纳学习 (Inductive Learning) 模型、最小插值多项式 (Least Interpolating Polynomial, LIP) 模型等。

要构造一个响应面模型, 第一步是在设计空间内采点, 形成设计点集 S ; 再进行仿真计算 (也称“昂贵”计算, Expensive Calculation) 获得响应数据集 Y ; 最后是根据不同的算法由 S 和 Y 构造不同的响应面模型。计算机试验设计方法提供了各种采点的策略, 主要包括两大类: 边缘分布型和全空间分布型。边缘分布型也称经典采样方法, 利用该方法采样, 其采样点主要分布在设计域的边界处附近, 典型的边缘分布型采样方法有全因子/部分因子试验 (Full/Fractional Factorial Design)、中心复合试验 (Center Composite Design, CCD)、Box-Behnken 等, 还有 Taguchi、D-Optimal、Plackett-Burman 方法等。全空间分布型 (Space Filling) 是指采样点布满整个设计域, 该类型的采样方法有简单网格、拉丁超立方设计 (Latin Hypercube Design)、正交表 (Orthogonal Array), 以及随机采样、一致设计 (Uniform Design)、混杂网络 (Scrambled nets)、蒙特卡罗仿真和 Hammersley 序列设计等。

一般的, 一次采样构造一个响应面模型是不合适的, 原因在于: 如果采样点过多, 则构造过程费时而且可能影响使用; 如果采样点过少, 则构造的响应面不够准确, 难以满足应用需求; 另外, 由于源模型的性态未知, 难以确定合适的采样方法。解决此问题的方法是基于序列自适应采样以构造序列响应面。序列自适应采样的主要思想是根据近似值与真实值之间的误差大小来确定采样点的疏密, 序列探索试验设计 (Sequential Exploratory Experiment Design, SEED)^[22]方法是此类试验设计方法的代表, 而 i-Sight 软件中使用了模拟退火算法来进行自适应采样。

当使用响应面近似方法解决实际工程问题时, 应综合考虑如下 5 个方面的因素。

(1) 响应面的精确度。毫无疑问, 响应面模型的精确度是近似的基本要求。

(2) 源模型的仿真估值次数, 即构造响应面所需的总的采样点数目。由于每次估算的计算费用较高, 所以需要限制源模型的仿真次数。在相同精度情况下, 源模型仿真估值次数越少, 该响应面模型的构造效率越高。

(3) 构建和优化响应面的时间。如前所述, 响应面的构造往往是一个逐步精细的过程, 自适应序列采样构造逐步精细的响应面模型是目前响应面方法的一个研究热点, 特别是在采样点逐步增多的情况下, 如何快速更新响应面以实现响应面的增量构造算法是各种响应面方法值得探索的课题。