

吴义忠 陈立平 编著

多领域物理系统的 仿真优化方法

数字设计从系列书

 科学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了多领域物理系统的仿真优化方法,包括建模技术、支撑技术以及求解技术等。本书共分7章:第1章对多领域物理系统仿真优化方法及其相关技术进行概述;第2章介绍多领域物理系统仿真优化的建模方法,重点阐述多领域物理系统仿真优化混合模型的表达以及启发式建模;第3章介绍多领域物理系统仿真优化支撑技术,包括变动参数集下的仿真求解算法、仿真优化的并行处理以及基于知识的约束推理求解等;第4章介绍面向Modelica模型的仿真优化求解算法,重点阐述多领域物理系统动态优化算法、混合离散问题的优化策略以及多目标优化方法;第5章介绍面向多领域物理系统仿真优化的响应面方法,重点分析几种常用的响应面技术及其增量算法,并介绍细分多项式响应面算法;第6章介绍多领域物理系统全局仿真优化算法,重点介绍基于响应面的多领域物理系统仿真优化方法;第7章介绍多领域物理系统仿真优化系统平台MWorks以及若干工程应用。

本书内容较为丰富,具有较强的前沿性和可操作性,可供从事多领域、多学科系统设计与分析的工程师参考,也可作为研究生或高年级本科生系统建模与仿真课程的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

多领域物理系统的仿真优化方法 / 吴义忠,陈立平编著. —北京:科学出版社,2011

(数字化设计系列丛书 / 陈立平主编)

ISBN 978-7-03-029865-2

I. ①多… II. ①吴…②陈… III. ①物理学-计算机仿真 IV. ①04-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 264019 号

责任编辑:刘宝莉 孙伯元 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—3 000 字数:420 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

产品设计是约束满足下的性能优化问题,同时现代复杂产品设计又是多领域、多学科耦合的系统设计。然而当前的数字化设计理论与方法难以适应现代复杂产品设计的需要。首先传统的 CAD 系统具有重结构、轻性能,以及多几何设计、少功能设计的特点,难以解决基于性能分析的约束满足与设计优化问题;同时,现有的 CAE 系统多是单一领域或学科的分析工具,缺乏在统一环境下的系统综合能力;另外,面向 CAx 的产品数据管理具有强信息集成、弱模型集成的特点,缺少对仿真模型以及分析数据的管理能力。鉴于此,华中科技大学 CAD 中心的研发重点从 21 世纪初就开始由 C3P(CAD/CAM/CAE/PDM)向 M3P 即多体系统动力学(multi-body dynamics)、多领域物理系统建模与仿真(modeling and simulation for multi-domain physical system)、多学科设计优化(multi-disciplinary design optimization)以及产品全生命周期管理(product life-cycle management)等方向转变。特别是近 5 年来,在国家 863 计划和国家自然科学基金等项目资助下,华中科技大学 CAD 中心对基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模、仿真与优化理论与方法进行了深入研究,取得了诸多成果,开发了具有自主知识产权的多领域物理系统建模、仿真与优化综合平台 MWorks2.0,并在汽车、飞机、电机等行业得到了成功应用。

多领域物理系统建模与仿真是为实现复杂系统的协同仿真而出现的建模与仿真技术,其目标是将机械、电子、液压、控制等不同学科领域的模型集成于一体,以实现协同设计、分析和仿真。与传统的基于接口的多学科建模方式不同的是,基于统一语言的多领域物理系统建模方法能够在一个集成环境下实现不同领域不同学科的建模,真正做到复杂产品的多领域零部件在同一环境下无缝集成,并可方便实现多领域物理系统建模、仿真、优化与后处理等过程一体化。基于统一语言的多领域物理系统建模与仿真在系统层面上实现复杂系统的集成建模与分析,特别适合产品概念设计或初步设计阶段,从而为产品的创新设计提供强有力的支持。

产品建模与仿真的最终目的是实现产品的优化设计。多领域物理系统仿真优化是指基于多领域系统仿真的参数优化,它是针对多领域物理系统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的一整套方法。多领域物理系统仿真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函数的估值,因此传统的优化算法或启发式算法由于需要大量的仿真估值而显得力不从心。并行优化可以在一定程度上提高仿真优化的效率,但不能从根本上

解决仿真优化的问题。面向“黑箱”函数的响应面技术为多领域物理系统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函数估值(即仿真求解)次数。

本书章节安排如下:第1章对多领域物理系统仿真优化方法及其相关技术进行概述;第2章介绍多领域物理系统仿真优化的建模方法,重点阐述多领域物理系统仿真优化混合模型的表达以及启发式建模;第3章介绍多领域物理系统仿真优化支撑技术,包括变动参数集下的仿真求解算法、仿真优化的并行处理以及基于知识的约束推理求解等;第4章介绍面向 Modelica 模型的仿真优化求解算法,重点阐述多领域动态优化算法、混合离散问题的优化策略以及多目标优化方法;第5章介绍面向多领域物理系统仿真优化的响应面方法,重点分析几种常用的响应面技术及其增量算法,并介绍细分多项式响应面算法;第6章介绍多领域物理系统全局仿真优化算法,重点介绍基于响应面的多领域物理系统仿真优化方法;第7章介绍多领域物理系统仿真优化系统平台 MWorks 以及若干工程应用。

本书涉及的研究工作得到了国家 863 计划项目“复杂产品多领域统一建模、分析与优化技术研究”(资助号:2006AA04Z121)和国家自然科学基金项目“多物理系统递阶混合建模及多学科协同优化研究”(资助号:50775084)的资助,在此表示诚挚的谢意。同时,对为本书研究提供多领域物理系统建模与仿真平台 MWorks 的苏州同元软控公司的各位同仁,包括周凡利博士、赵建军博士和龚雄博士等;为本书做了很多研究工作的华中科技大学 CAD 中心已毕业博士丁建完(现为华中科技大学 CAD 中心副教授)和蒋占四(现为桂林电子科技大学副教授);为本书提出许多宝贵意见的加拿大维多利亚大学机械系主任董佐民教授、CAD 中心的王启富教授和王书亭教授;为本书研究提供相关资料的湖南大学汽车碰撞国家重点实验室的顾纪超博士;以及 CAD 中心在读博士生毛虎平、魏昕、唐俊杰,已毕业硕士龚云波、王璐、宋黔、王岳,在读硕士生邹林君、初众、贾云峰、艾依斯等,在此一并表示衷心的感谢!

由于多领域物理系统仿真优化方法是一个较新的研究领域,且仍处于蓬勃的发展阶段。加之作者的水平有限,本书难免存在疏漏之处,欢迎读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多领域物理系统的仿真优化方法概述	2
1.1.1 多领域物理系统建模与仿真技术	2
1.1.2 多领域物理系统的仿真优化方法	9
1.2 多领域物理系统仿真优化相关技术进展.....	12
1.2.1 多领域物理系统仿真求解技术	12
1.2.2 多学科设计优化方法	15
1.2.3 多领域物理系统仿真优化算法	18
1.3 多领域物理系统仿真优化方法展望.....	23
参考文献	25
第 2 章 多领域物理系统仿真优化建模技术	30
2.1 多领域系统仿真优化问题一般模型.....	30
2.2 多领域物理系统仿真建模.....	31
2.2.1 文本建模.....	31
2.2.2 可视化建模	32
2.2.3 自顶向下建模	37
2.2.4 知识建模.....	44
2.2.5 外部接口建模	48
2.3 多领域物理系统仿真优化建模.....	54
2.3.1 基于多领域物理系统仿真求解器的优化建模	55
2.3.2 多实例、多目标优化问题的启发式建模	57
2.3.3 多领域物理系统仿真优化递阶混合建模	61
2.4 仿真优化模型的 Modelica 表达	63
参考文献	65
第 3 章 多领域物理系统仿真优化支撑技术	67
3.1 多领域物理系统仿真求解技术.....	67
3.1.1 方程系统的结构关联矩阵.....	67
3.1.2 结构关联矩阵的二部图表示与最大匹配	68
3.1.3 方程系统的匹配方阵与有向图表示	69

3.1.4	有向图强连通分量搜索	70
3.1.5	拓扑排序	72
3.2	面向仿真优化的最小求解策略	74
3.2.1	最小求解图	74
3.2.2	算例分析	77
3.3	敏度分析技术与模型实验	80
3.3.1	拟梯度法	80
3.3.2	复步微分法	81
3.3.3	自动微分法	82
3.3.4	模型实验	88
3.4	优化过程的并行处理	91
3.4.1	SQP 算法的并行化	92
3.4.2	并行调度算法	94
3.4.3	SQP 并行优化过程	98
3.4.4	实例分析	102
3.5	多领域知识模型的推理求解	106
3.5.1	多领域系统变型模板	107
3.5.2	多领域系统中的知识约束	108
3.5.3	模板模型的推理求解	109
3.5.4	结构确定	109
3.5.5	参数确定	115
3.5.6	运行实例	116
3.6	模型集成接口	118
	参考文献	123
第 4 章	面向 Modelica 模型的仿真优化求解算法	125
4.1	多领域物理系统仿真优化流程及常用算法实现	125
4.1.1	多领域物理系统仿真优化求解流程	125
4.1.2	多领域物理系统仿真平台的常用优化算法实现	127
4.1.3	多领域物理系统仿真优化问题的规划求解与协同优化	132
4.2	多领域物理系统的多目标优化方法	134
4.2.1	Pareto 适应度函数	135
4.2.2	基于 Pareto 适应度函数和序列近似模型的多目标优化	137
4.2.3	基于 Pareto 适应度函数的多目标粒子群优化	144
4.3	多领域物理系统动态响应优化	150
4.3.1	问题的提出	150

4.3.2	谱元法	151
4.3.3	基于谱元法的动态响应优化	155
4.3.4	算例分析	155
4.4	多领域物理系统混合离散优化方法	162
4.4.1	混合离散变量优化问题特点	163
4.4.2	混合离散变量优化相对敏度法	164
	参考文献	174
第 5 章	面向多领域物理系统仿真优化的响应面方法	176
5.1	概述	176
5.2	常用试验设计方法	179
5.2.1	经典试验设计方法	179
5.2.2	全空间分布采样	182
5.2.3	自适应序列试验设计法	183
5.3	常用响应面模型	190
5.3.1	多项式回归模型	190
5.3.2	Kriging 模型	191
5.3.3	径向基函数模型	194
5.3.4	支持向量回归模型	196
5.3.5	其他常规响应面模型	199
5.4	样条响应面与 B 样条响应面模型	202
5.4.1	MARS 响应面方法	202
5.4.2	Fast MARS 算法	206
5.4.3	BMARS 响应面	210
5.4.4	B 样条响应面	212
5.5	增量响应面算法	217
5.6	自适应细分 RSM 模型	221
5.7	各响应面模型测试	232
	参考文献	244
第 6 章	多领域物理系统全局仿真优化算法	248
6.1	概述	248
6.2	启发式直接搜索算法	250
6.2.1	细分矩形算法	250
6.2.2	模式追踪采样算法	251
6.3	区域缩减方法	253
6.3.1	变量筛选	253

6.3.2	阈值方法	255
6.3.3	粗糙集方法	257
6.3.4	移动指标策略法	263
6.3.5	信任域方法	266
6.3.6	其他区域缩减方法	272
6.4	基于单响应面的全局优化算法	277
6.4.1	基于 PRS 的全局优化方法	277
6.4.2	基于 Kriging 模型的全局优化方法	281
6.4.3	基于 RBF 模型的全局优化方法	286
6.4.4	基于 SVR 模型的全局优化方法	290
6.5	基于混合多响应面的全局优化方法	292
6.5.1	基于 MARS 与 PRS 组合方法	292
6.5.2	HAM 算法	293
6.5.3	MSGO 算法	295
6.6	全局仿真优化实例	297
6.6.1	标准全局优化函数测试	297
6.6.2	全局仿真优化实例	303
	参考文献	307
第 7 章	多领域物理系统仿真优化平台及工程应用	310
7.1	多领域物理系统仿真优化平台	310
7.2	应用实例	324
	参考文献	333

第 1 章 绪 论

近年来,系统建模与仿真领域从不同的角度出现了几种“多物理系统建模与仿真”方法,包括多体系统动力学建模与仿真、多物理场建模与仿真、多学科建模与设计优化、多领域物理系统建模与仿真,其提法不一,涵义也大相径庭。在此,对这几种不同建模方法做简要描述:

1) 多体系统建模与仿真^[1]

多体系统是指由多个物体通过运动副连接构成的复杂机械系统。多体系统建模与仿真是通过施加力元或运动于多体系统上,应用计算机技术进行机械系统的动力学分析与仿真。在数学上,多体系统仿真问题是微分代数方程组求解问题。目前具有代表性的多体系统建模与仿真工具有 ADAMS^[2]和 DADS^[3]等。

2) 多物理场建模与仿真

多物理场系统是指在多种物理场(包括流体流动、热量传输、结构力学、电场磁场、化学反应等)耦合作用下的物理系统。多场系统建模与仿真是通过定义不同物理场的载荷条件、边界条件以及求解参数,通过仿真求解获得系统在多场作用下的相关时间、空间特性。在数学上,多物理场系统仿真问题是偏微分方程组耦合求解问题。目前市场上出现的多物理场建模与仿真工具有 ANSYS^[4]、COMSOL^[5]和 ALGOR^[6]等。

3) 多学科建模与设计优化

多学科建模是在一个平台环境下实现不同学科专业(不同分析工具)的框架集成。多学科设计优化是在多学科模型基础上,通过搜索算法驱动集成模型联合仿真以获得最优的设计参数。多学科设计优化技术关键在于不同学科专业工具之间的联合仿真,以及高效的全局寻优算法。目前具有代表性的多学科设计优化工具有 iSIGHT^[7]和 ModelCenter^[8]等。

4) 多领域物理系统建模与仿真

多领域物理系统(简称多领域系统)是指在一个集成环境中,直接通过对各个不同领域的组件建模而形成的耦合系统。多领域物理系统仿真则是将多领域模型平坦化为大规模的微分代数方程(differential algebraic equation DAE)组,进而对该 DAE 进行求解。因此,在数学上多领域物理系统仿真问题是 DAE 方程求解问题。目前有代表性的多领域物理系统建模与仿真工具有 SimulationX^[9]、Dymola^[10]、Matlab/Simscape^[11]、MapleSim^[12]、AMESim^[13]以及国产软件 MWorks^[14]等。其中,Dymola 和 MWorks 是基于统一建模语言 Modelica^[15]的多领域物理系

统仿真软件,SimulationX 和 MapleSim 则全面支持 Modelica。

近十多年来,基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模理论与方法取得了飞速的发展,并在工业界取得了诸多成功应用。因此,Modelica 被誉为工业领域的 JAVA,在欧美得到工业界的广泛认可。2006 年 6 月,法国达索系统宣布了其基于 Modelica 的嵌入式系统开发策略,在欧洲信息技术组织 ITEA2 的框架下,欧洲航空、航天、汽车等重要工业领域着手联合构筑基于 Modelica 的欧洲系统库(Eurosyslib/Modelica)。该方法旨在使整个工程领域以统一的方式对多领域耦合复杂产品(机、电、液、气、热、控……)的功能、行为、性能提供统一建模机制,克服了不同分析平台集成带来的诸多问题。

本书将面向 Modelica 语言*的多领域物理系统建模与仿真平台,系统地阐述多领域物理系统的仿真优化方法。因此,本书的内容是对多领域物理系统建模与仿真技术的扩展。

1.1 多领域物理系统的仿真优化方法概述

1.1.1 多领域物理系统建模与仿真技术

顾名思义,多领域物理系统建模就是将机械、电子、液压、控制等不同学科领域的模型组装成为一个可以协同仿真的系统模型^[16]。模型具有树型层次化结构,最高层的模型对应于整个物理系统,最低层的模型对应于物理系统的底层零件或元件,中间层的模型对应于物理系统的中间层次上的部件。在实际应用中,多领域物理系统建模可能是将不同领域的零件模型组装成部件模型,也可能是将不同领域的部件模型组装成子系统模型,还可能将不同领域的子系统模型组装成为系统模型。那么,如何将元件组装成部件、或将部件组装成系统呢?通常有如下几种方法。

1. 基于接口的多领域物理系统建模方法

最简单、最直接的多领域物理系统建模方法是基于接口的方法,即利用不同领域商用仿真软件建立该领域的子模型,再开发不同领域商用仿真软件之间的接口,以实现多领域物理系统建模。在仿真的时候,由总控程序来协调各领域商用仿真软件之间的仿真步长与数据交换,实现不同领域模型之间的协同仿真,即各模型在仿真离散时间点,通过进程间通讯等方法进行相互的信息交换,然后利用各自的求解器进行求解,以实现整个系统的仿真^[17],如图 1.1 所示。

* 有关 Modelica 语言的规范和详细介绍请从网站 <http://www.modelica-china.com/index.asp> 下载。

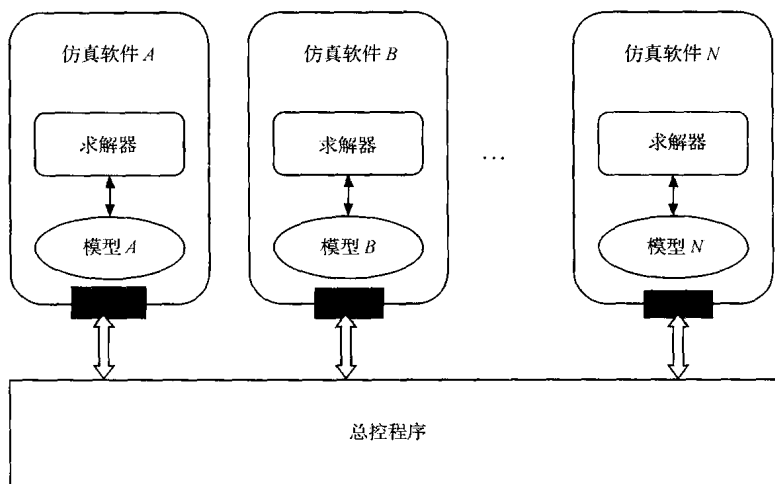


图 1.1 基于接口的协同仿真

系统总控程序可以利用领域仿真软件之间的接口,建立多领域物理系统模型,并实现协同仿真功能。有些仿真软件提供对口的专门接口程序以实现联合仿真,典型的如机械多体动力学仿真软件 ADAMS、提供与控制系统仿真软件 MATLAB/Simulink、MATRIXx 的接口,通过该接口可以实现机械多体动力与控制系统的多领域物理系统建模,同时利用它们提供的协同仿真功能,可以实现机械多体动力学模型和控制系统模型的协同仿真。例如,福特公司在开发车辆姿态控制系统 VAC 时就利用了 ADAMS 和 Xmath 软件协同仿真^[18],Visteon 公司在开发转矩控制器时利用了 ADAMS 和 MATLAB 软件协同仿真^[19]。此外,在航空航天飞行器、汽车 ABS 系统、列车主动式悬架系统^[20]等产品的设计中也应用了基于商用软件的多领域协同仿真。

基于商用软件的多领域物理系统建模与协同仿真方法可以实现不同领域子系统在一个框架下集成仿真,但是该方法存在自身的诸多不足,主要体现在:

(1) 仿真软件必须提供相互之间的接口以实现多领域物理系统建模。如果某个软件没有提供与其他仿真软件的接口,那它们就不能实现多领域物理系统建模。

(2) 需要人为地割裂不同领域子系统之间的耦合关系,在不同的子系统接口处分析其输入、输出,并建立其耦合关系。

(3) 用以实现多领域物理系统建模的接口,往往为某些商业公司所私有,它们不具有标准性、开放性,而且扩充困难。

2. 基于高层体系结构(HLA)的多领域物理系统建模方法

1995 年 10 月,美国国防部建模与仿真办公室制定了建模与仿真主计划,在国

防部范围内建立一个通用的仿真技术框架以保证国防部范围内各种仿真应用之间的互操作性。该技术框架的核心就是高层体系结构(high level of architecture, HLA)^[21],旨在解决异构仿真系统的集成问题,为构造大规模仿真应用提供一种应用集成框架与方法。HLA 在 1996 年 8 月完成基础定义,随后为北约各国采纳,并于 2000 年 9 月被 IEEE 接受为标准。HLA 联盟系统结构如图 1.2 所示。

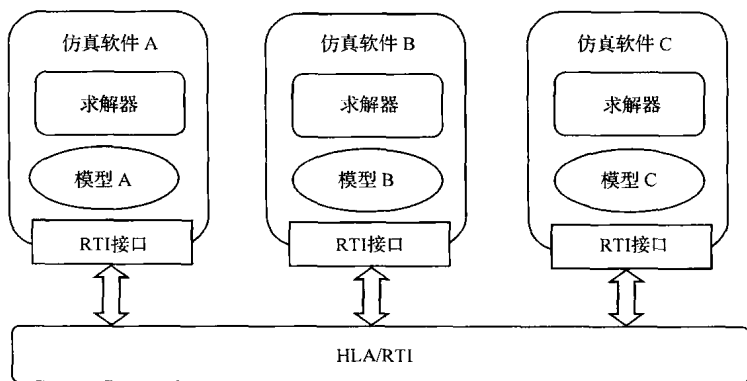
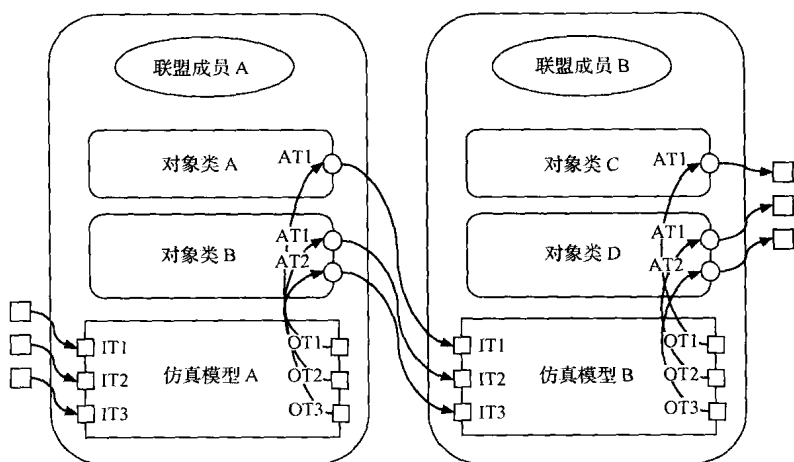


图 1.2 HLA 联盟系统结构

与 CAD 系统之间的中性文件接口方法相似,HLA 方法将每个参与协同仿真的软件工具封装一个标准的接口,这些标准接口之间可以直接与系统总控接口连接形成星型结构。HLA 将实现某种特定仿真目的的仿真系统称为联盟(federation)。联盟由联盟对象模型、若干联盟成员(可以是真实的实体仿真系统、虚拟仿真系统或一些辅助性的仿真应用,如联盟运行管理控制器、数据收集器等)和运行时间支撑系统(run-time infrastructure, RTI)构成,如图 1.2 所示。其中,联盟是个层次概念,它可以是更复杂系统的一个联盟成员。因此,HLA 定义的联盟系统是一个开放性的分布式仿真系统,具有系统可扩展性。根据 HLA 的规则,联盟成员之间的数据通信必须通过 RTI,RTI 提供了一系列服务来处理联盟运行时成员间的互操作和管理联盟的运行。在这种结构中,RTI 从某种程度上来说是一种“软总线”,联盟成员可以在联盟运行过程中随时“插入”。

基于 HLA 的多领域物理系统建模方法,同基于接口的多领域物理系统建模方法一样,建模人员首先利用不同领域商用仿真软件完成该领域组件的建模,获得相应模型;但不同的是,各领域仿真模型不是采用商用仿真软件之间的接口将一个模型的输出变量映射到另一个模型的输入变量上,而是采用基于 HLA 的方法将一个模型的输出变量映射到另一个模型的输入变量上,如图 1.3 所示。基于 HLA 的多领域物理系统建模过程一般可划分为如下几个步骤^[22]:

- (1) 利用不同领域商用仿真工具完成该领域子系统建模。
- (2) 将利用不同领域商用仿真软件开发的子系统模型划分成不同的联盟成

图 1.3 HLA 模型输入与输出变量之间的映射^[16]

员,并确定每个联盟成员可发布的对象类以及相应的对象类属性。

(3) 将子系统模型的每个输入、输出变量同某个联盟成员的某个可发布对象类属性进行一一映射,以实现一个子系统模型的某个输出变量和另一个子系统模型的某个输入变量的一一映射。即采用基于 HLA 的方法将一个模型的输出变量映射到另一个模型的输入变量上,从而实现不同领域模型的集成。

(4) 为模型的每个输出变量发布与之相映射的对象类属性,为模型的每个输入变量订购与之相映射的对象类属性,以实现仿真运行时不同领域模型之间的动态信息交换。

我国在这方面的研究比较活跃,清华大学、中国航天机电集团二院、北京航空航天大学等单位在基于 HLA 的多领域物理系统建模方法、协同仿真平台及其相关技术等方面进行了研究,取得了大量成果^[22~26]。

基于 HLA 的方法虽然克服了基于接口方法的诸多缺陷,较好地实现了多领域系统的仿真建模,但仍然需要得到各领域商用仿真工具的支持与合作,并且需要人为地割裂不同领域子系统之间的耦合关系,实质上是一种子系统层次上的集成方法,而且实现起来较为困难。另外,该方法需要针对不同的仿真应用配置模型接口、编写集成代码,在多个求解器步长协调方面存在技术困难。

3. 基于统一建模语言的多领域物理系统建模方法

早在 1978 年,欧洲仿真界就出现了面向对象的物理系统建模语言 Dymola (dynamic modeling language)^[27]。Dymola 继承早期的面向对象语言 Simula 特点,引入了“类”的概念,并针对物理系统的特殊性作了“方程”的扩展。Dymola 采

用符号公式操作和图论相结合的方法,将 DAE 问题转化为 ODE 问题,通过求解 ODE 问题实现系统仿真。20 世纪 80 年代到 90 年代,随着计算机硬件、软件和数值技术的发展,先后涌现了其他一系列面向对象和基于方程的物理建模语言。如 Omola、ASCEND、gPROMS、ObjectMath、NMF、Smile、ALLEN 和 U. L. M 等。

上述众多的建模语言各有优缺点,鉴于多种建模语言并存的混乱局面,以及由此而引起的模型兼容性问题,1996 年 9 月,欧洲仿真界的一群专家学者开始致力于物理系统建模语言的标准化工作,在归纳和统一多种建模语言的基础上,于 1997 年提出了一种全新的基于方程的多领域统一建模语言 Modelica。Modelica 继承了先前多种建模语言的优秀特性,具有面向对象建模、非因果建模、多领域统一建模、陈述式物理建模和连续离散混合建模能力。Modelica 语言还提供了强大的开放的领域模型库,如机械、电子、控制等,用户可以直接从模型库中获取所需的标准模型组件构建自己的模型,也可以向模型库中加入定制模型以备重用。

Modelica 语言已经成为事实上的物理系统统一建模语言标准。基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模方法,就是采用 Modelica 语言基于数学方程描述不同领域子系统的物理规律和现象,根据物理系统的拓扑结构基于组件连接机制实现模型构成和多领域集成,通过求解微分代数方程系统实现仿真运行^[28~30]。该方法彻底地实现了不同领域模型的无缝集成,可以为任何能够用微分方程或代数方程描述的问题实现建模和仿真,因而能够实现完全意义上的多领域统一建模。基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模方法主要有如下优点^[16]:

(1) 建模方便。互相兼容的多领域模型库能实现对复杂综合系统的高置信度建模,支持面向对象建模、非因果建模、多领域统一建模、陈述式物理建模和连续离散混合建模。

(2) 模型重用性高。非因果关系的基于方程的模型可用于仿真多种不同的问题,或者稍加修改即可用于描述类似的系统。

(3) 无需符号处理。基于方程的建模可以将用户从将方程转换为因果赋值形式或方块图的繁琐工作中解脱出来,使模型变得更加有效和健壮。

(4) 开放的模型库。用户可以很容易地开发自己的模型或采用已有的模型来满足自己的独特需求,也可以将定制模型加入库中以备重用。

(5) 建模与仿真相对独立。用户只需关注于模型的陈述,即怎样通过数学方程表述仿真对象的行为,而不必考虑模型求解的详细实现。

鉴于基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模方法的优势,该方法已在汽车与电动汽车^[31~33]、机械多体系统^[34]、热动力系统^[35]、电力系统^[36]、机电系统^[37]、化学系统^[38]、硬件在环仿真^[39]和离散事件系统^[40]等系统或过程的仿真中得到了广泛应用。我国也随之开始了基于 Modelica 语言的仿真应用。例如对燃气涡轮^[41]、开关磁阻电机^[42]、同步电机^[43]、热机^[44]、发动机^[45]、机械传动箱^[46]和涡扇

发动机^[47]的多领域物理系统建模与仿真分析。

另外,基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模仿真工具也相继出现。其中,较为成熟的商用建模仿真工具有 5 个,如表 1.1 所示。

表 1.1 基于 Modelica 语言的多领域物理系统建模与仿真系统

序号	软件	公司/研究所	国家	类型	状态
1	Dymola	Dynasim	瑞典	环境	完整
2	SimulationX	ITI	德国	环境	完整
3	MathModelica	MathCore	瑞典	环境	开发中
4	OpenModelica	PELAB	瑞典	环境	开发中
5	MWorks	华中科技大学 CAD 中心	中国	环境	试用

Dymola^[48]由瑞典 Dynasim AB 公司设计开发,是第一个支持 Modelica 语言的建模仿真工具。Dymola 的历史可以追溯到 1978 年,Elmqvist 在其博士论文^[3]中提出了采用非因果方程实现基于组件的建模思想,并设计了一种小型建模语言 Dymola。但由于当时计算机的计算能力有限和内存容量太小而无法将这一思想用于解决大多数现实仿真问题。随后,计算机硬件、软件和数值技术均得到快速发展。1992 年,Elmqvist 成立了 Dynasim AB 公司,并组织开发出了建模仿真软件 Dymola。在 Modelica 语言推出后不久,Dymola 软件便采用 Modelica 语言取代 Dymola 语言作为底层建模语言。Dymola 提供图形化建模环境,支持基于图标的拖放式图形建模。Dymola 也提供文本建模环境,支持具有 Modelica 语言的文本建模。Dymola 具有功能强大的符号处理引擎,集成了多个数值求解包,可实现较大规模的多领域物理系统建模仿真。目前,基于 Modelica 语言的建模应用大多是采用 Dymola 实现的。

SimulationX^[9]由德国 ITI 公司开发,全面兼容基于 Modelica 语言的多领域系统模型。SimulationX 作为多学科领域复杂系统高级建模和仿真主流平台,具有车辆工程所涉及的各个学科领域的基础模型库:控制、机械、液压、气动、电、磁以及热。此外,还具有与车辆各大系统直接对应的专用模块库,包括发动机系统、动力传动系统、悬架系统、转向系统、制动系统、及空气调节系统等。这些基础库加上专用模型使得 SimulationX 成为了国际上新车开发时建模和仿真的标准平台。

MathModelica^[49]由瑞典 LinköPing 大学 PELAB 实验室设计开发,它通过集成 Microsoft Visio、Mathmatica 和 Dymola 仿真引擎开发而成。其中,Microsoft Visio 用于实现图形建模,Dymola 仿真引擎用于模型转化和求解,Mathmatica 的 notebook 用于文本建模和仿真后处理。MathModelica 拥有和 Dymola 一样的图形和文本建模能力。与 Dymola 不同的是,MathModelica 的各组成模块没有集成在同一个框架界面中,在建模仿真过程常常需要反复激活和切换操作界面。

OpenModelica^[50]是瑞典 PELAB 实验室推出的具有开放式源代码的多领域物理系统建模与仿真工具,目前还在开发完善中。OpenModelica 系统具有近期目标和长期目标:近期目标是建立一个基于 Modelica 语言的交互式计算环境,以及实现支持语言特性的功能;长期的研究目标是关于 OpenModelica 开放式源代码的执行问题,包括对 Modelica 语言的扩展,如模型诊断、结构分析、系统辨识等,以及改进的实现技术,如提高代码性能、易用性、可视化和动画技术等。

MWorks^[14]是华中科技大学 CAD 中心经八年倾力打造的新一代多领域物理系统建模与仿真平台,完全支持国际多领域统一建模标准语言 Modelica,提供了从可视化建模、编译求解到结果后处理的完整功能,并支持基于 Modelica 模型的多学科多目标优化。基于 Modelica, MWorks 支持面向对象建模、陈述式非因果建模、连续-离散混合建模以及多领域统一建模,具有大量可重用领域库,可以广泛地满足机械、电子、控制、液压、气压、热力学、电磁、流体、能源、车辆、航空、航天等领域的产品分析与知识积累需求。

需要指出的是, MATLAB/Simscape^[11]是近年来推出的基于统一建模语言 Simscape 的多领域物理系统建模工具。由于它与 MATLAB/Simulink 的无缝集成,借助 MATLAB 强大的计算能力,因而具有很好的应用基础和前景。但是,就目前的发展状况看, MATLAB/Simscape 相对于基于 Modelica 的仿真平台来说存在以下不足:

(1) 系统开放性差。Modelica 语言具有开放的体系结构,所有的基础类库都提供开放式源代码,且可以方便的实现与外部工具的集成;而 Simscape 只是一种建模脚本,其元件库代码一般都是不可见的,体系结构的开放性依赖 Simulink。

(2) 建模功能弱。Modelica 语言具有明晰的语法规文规范,用户可以方便地建立层次型复杂产品库;而 Simscape 是近几年推出的一种脚本语言,只能建立简单的元件。

(3) 可用的公开库少。基于 Modelica 语言的标准库越来越庞大,内容越来越丰富;而 Simscape 语言标准库只提供了少量的基础库。

(4) 后处理功能有限。基于 Modelica 语言的仿真系统不但实现了二维图线显示,同时实现了三维动画后处理;而 Simscape 在这方面还比较弱,其后处理还只能利用 Matlab 作一些图线显示。

(5) 没有支持的系统。由 Modelica 网站^[15]支持 Modelica 语言的建模环境有 10 来种,而且越来越多;而 Simscape 语言只有 Matlab 支持。

(6) 模块的独立性差。基于 Modelica 的仿真平台一般都是独立的应用系统,而 Simscape 则需要 Matlab 和 Simulink 等支持,也就是说,要使用多领域物理系统建模工具 Simscape,首先得购买 Matlab 和 Simulink 基础模块及相关支撑模块(如 StateFlow)。

1.1.2 多领域物理系统的仿真优化方法

1. 仿真优化方法

仿真优化是在系列仿真中寻求一组模型输入参数(因素)使得仿真模型的某个(或某些)输出性能(响应)达到最优。在实验设计领域,输入参数或与仿真模型相关结构假设称为因素;性能输出称为响应。我们知道,优化模型具有三个要素:设计变量、约束函数和目标函数。通常,约束函数和目标函数是设计变量的显式函数。但对于仿真优化问题,约束函数和目标函数均表现为响应,即对应仿真模型的某项性能。它们没有对设计变量的显式函数关系,成为“黑箱”,即只有当仿真模型执行一次仿真后才能获得其响应值。仿真优化过程如图 1.4 所示。

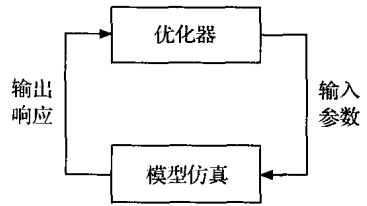


图 1.4 仿真优化过程

仿真优化方法可归纳为基于梯度的方法、随机优化方法、响应曲面方法、启发式方法和统计方法等五类以及这些方法的混合^[51,52],如图 1.5 所示。

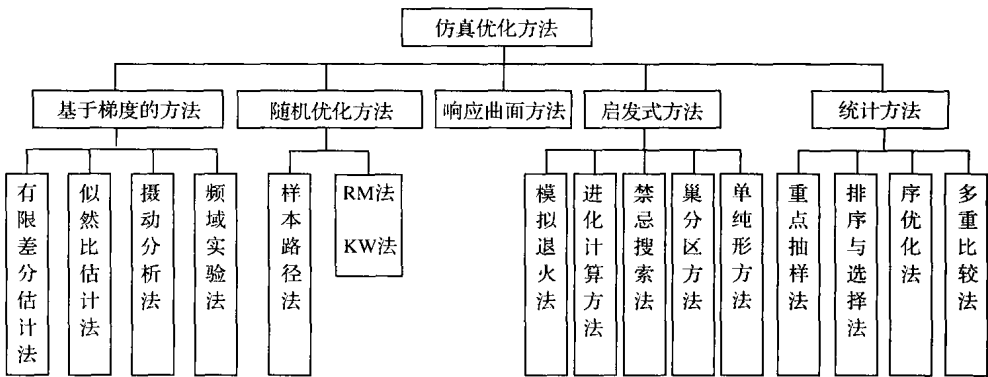


图 1.5 仿真优化方法分类^[52]

1) 基于梯度的方法

此类方法通过估计优化目标的梯度来判定改进目标的方向,进而采用基于确定的数学规划方法进行求解。基于梯度的方法主要包括有限差分估计、似然比估计、摄动分析和频域实验法,其应用依赖于梯度估计的可靠性和高效性。

有限差分估计法是最原始的梯度估计法,实现对梯度的估计需要多次进行仿真估值,运行成本大;似然比估计法分析系统样本路径的概率测度对随机变量分布函数的依赖关系,通过测度变换获得似然比来构造性能测度的估计量,仿真估值次