



普通高等教育规划教材

能量系统 建模与优化

NENGLIANG XITONG JIANMO YU YOUHUA

殷亮 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

能量系统建模与优化

殷 亮 编著



机械工业出版社

本书集成了高等热力学理论和最新的系统建模的技术成果,并在多年研究生教学实践的基础上编著而成,注重吸收前沿的技术理念,并落脚于知识体系的实际应用。

本书充实并强化了基本原理的论述,力求严谨深入、由浅入深,强调数学公式的过程推导和概念来源的诠释,特别突出了技术应用,使得理论能通过信息技术运用于工程实际中。在理论知识编写方面注重热力学定律与“能”“熵”“焓”三个核心概念的融合,并选择了湿空气、水蒸气、制冷剂的热力循环作为分析对象,加强知识与应用的结合。在技术吸收方面,完整地介绍了 Modelica 建模语言,剖析典型能量系统的代码,分析和讨论了在建模方面的所遇数值问题的解决方案,并对直接优化技术和以梯度为基础的优化技术分别进行了阐述,在具体案例中对这两类技术进行应用,还运用自编的焓分析库展示了能量系统的动态焓分析。本书取材广泛,对传统的理论进行拓展,着意反映最新的建模对理论知识的吸纳和应用,强化叙述了通过信息技术实现能量系统的知识与工程应用的对接。

本书可作为供暖通风、热能与动力工程、空调制冷、建筑智能化、新能源以及工程热物理专业的教学参考书,也可供有关工程技术人员及技术决策人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能量系统建模与优化 / 殷亮编著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 10
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-58016-4

I. ①能… II. ①殷… III. ①热能-系统建模-高等学校-教材 IV. ①TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 227979 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王玉鑫 责任编辑: 王玉鑫

责任校对: 王 延 封面设计: 马精明

责任印制: 李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017 年 11 月第 1 版 第 1 次印刷

185mm×260mm·15.5 印张·408 千字

0001—1000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58016-4

定价: 43.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

Preface 前言

当今是一个信息爆炸的时代，物联网技术方兴未艾，互联网和计算机的技术已经较好地解决了信息的传递和计算能力的问题，但要想从互联网向物联网世界进行转变，仅仅是信息的交换和处理是不够的，因为在互联网时代人作为信息交换的主体，既是信息的索取者和贡献者，也是信息的处理者，因此很好地完成了整个网络的闭环。人是将互联网作为他的思维和行为的延伸，因此作为网络中的真正主体不仅要能接受、处理和贡献数据，还必须具备真正的认知和协同工作的能力，能作为更大系统的一部分，支持并行的工作。这就像生物的细胞一样，每个细胞都包含了遗传信息，而在物联网中模型就是它的遗传信息，大数据的核心不是数据本身，而是现实世界的信息中包含的模型。它包含了数据、结构、规律等有序的信息，描述它们用单纯的数据库是不够的，物联网需要的是能够连接过去、现在和将来的完整图景。当联网结点能在满足人类要求的条件下成为独立运转的系统时，我们的生产力水平才能得到有效地提高，从而将人置于更高的位置，从事那些不可重复的创造性的行为。以目前的技术和实施条件，物联网的序幕才刚刚拉开，即使是那些网络巨头所大谈的人工智能、自动学习技术，它们也仅仅是获取现实世界信息技术的冰山一角。本书所关注的能量系统的建模和优化，也必然是这一进程的重要部分。任何现实的系统必定是要消耗能量的，能量系统的模型是对其信息的映射，但仅有模型是没有用的，只有在现实中运行模型，并展示其动态特征，即把系统置于多维坐标上，运用系统的完整的图景构建物联网的有效结点，才能让现在的设备不再成为网络上的“意识孤立体”。因此，构建它们的信息模型，让其有自知和认知的能力，并根据外部的环境进行构架和行为的调整，从根本上具备了表达信息的大脑，基于模型的信息技术将是构建物联网的基础。

能量系统作为现实世界的一个重要方面，它的规律也是现实系统能够运行的基础。信息技术与能量系统的有机结合，为人类社会的可持续发展和环境保护提供了坚实的技术基础。能量系统的建模和优化就是要提取能量系统的信息，通过对信息的处理，在满足人类需求的情况下实现对能量和资源索取的最小化。在这个过程中，用能的最小化本质上是烟损的最小化，烟分析将会起到主导的作用，烟经济学更是把该技术带进了现实工程领域，烟分析成为衔接能量、环境和可持续发展的重要工具。

现实世界有多么复杂，能量系统就有多么复杂，传统的建模工具难以对它们进行方便、有效的描述。对物理系统描述最自然的描述语言是数学方程，而 Modelica 语言是面向方程、面向组件的。虽然该语言的兴起时间较短，但它代表了建模语言的发展方向，并由于其开源性，事实上已经成为建模语言标准。本书详尽阐述了 Modelica 语言的语法，一方面让读者建立起坚实的语言基础，另一方面去领略该语言设计的精妙特征，希望能引导我国的技术人员在此基础上做进一步的拓展。设计语言的目的是更好、更方便地描述现实世界的系统，或是能充分表达现实世界的信息。与此同时，我们要意识到，成功的应用是语言设计、编译器、建模技术及数值特征共同作用的结果，因此这对语言的使用者提出了很高的要求。

本书运用当今前沿的技术和分析视角阐述能量系统的模拟与优化，为在校研究生、工程技

术人员及技术决策人员提供全面而严谨的能量系统理论、建模及优化方法。本书的内容是自包含的，完全可以用于课程教学或自学使用。

本书的第2、5、6章阐述了相关热力学理论及热经济学方法，读者可以通过回顾这些理论确立起能量系统热力分析的基础。第1章是对系统概念的总述，它奠定了本书的基础理念。第3章主要讲解 Modelica 语言的语法、相关的编译和优化技术及基于模型的在线优化控制的理论，这些都是当今建模、模拟和优化方面的前沿技术，它们是进行能量系统分析的工具，透彻地掌握和消化这些前沿技术是成功编制、编译、运行模型代码的必要条件，也是将能量系统的知识转化为实际可用模型的必由之路。第4章为读者剖析了当前主流的几个 Modelica 的能量系统包，它们在不同的应用领域各有自己的优势，它们展示的技术和技巧为 Modelica 语言走向实用化铺平了道路。第4章还简要地介绍了编者自编的焓分析的代码，有兴趣的读者可以向我们索取。第7章就具体的能量系统分析了它们的建模、模拟和优化方法。第一个应用是空气调节系统的动态焓分析，并尝试使用 GenOpt 进行优化；第二个应用是热泵工质的热力循环的动态分析，侧重于分析控制对系统的影响；第三个应用是电厂蒸汽循环的应用，侧重于初始化和建模讨论，第四个应用是制冷机组的水系统分析，展示使用 Optimica 语言在能量系统中进行优化的技术。

殷 亮

Contents 目录

前言

第1章 简介 1

- 1.1 系统建模与模拟 1
 - 1.1.1 什么是系统 1
 - 1.1.2 系统的组成与特性 2
 - 1.1.3 实验研究方法 2
 - 1.1.4 什么是模型 3
 - 1.1.5 如何建立模型 4
 - 1.1.6 模型的局限性 5
 - 1.1.7 敏感性分析 6
 - 1.1.8 模型基础的诊断 6
 - 1.1.9 基于模型的优化 6
 - 1.1.10 数值模拟 7
 - 1.1.11 数值模拟的优缺点 7
- 1.2 能量系统优化 8
 - 1.2.1 能量系统简介 8
 - 1.2.2 能量系统优化简介 8

第2章 热力学的基础 9

- 2.1 热力学基本术语 9
 - 2.1.1 热力学系统 9
 - 2.1.2 边界与环境 9
 - 2.1.3 简单与复合系统 10
 - 2.1.4 平衡状态 10
 - 2.1.5 状态变量 11
 - 2.1.6 相与纯物质 11
 - 2.1.7 状态方程 12
 - 2.1.8 热力学过程 12
 - 2.1.9 温度和压力的标准条件 12
- 2.2 热力学定律 13

- 2.2.1 功的传递 13
- 2.2.2 热量传递 14
- 2.2.3 热力学第一定律 14
- 2.2.4 热力学第二定律 18
- 2.3 均相系统 35
 - 2.3.1 平衡条件 35
 - 2.3.2 基本关系式 37
 - 2.3.3 热力学关系式 42

第3章 系统仿真语言 54

- 3.1 面向对象的系统仿真语言
Modelica 54
 - 3.1.1 Modelica 技术 54
 - 3.1.2 Modelica 的特征 54
 - 3.1.3 Modelica 的优势 55
- 3.2 代数微分方程 55
 - 3.2.1 代数微分方程简介 55
 - 3.2.2 代数微分方程与常微分方程 55
 - 3.2.3 DAE 的指标 56
 - 3.2.4 特别的 DAE 形式 57
 - 3.2.5 DAE 的数值求解 57
 - 3.2.6 Modelica 的微分代数方程的
表达 58
- 3.3 Modelica 语法 59
 - 3.3.1 词法结构、操作符和
表达式 59
 - 3.3.2 类、类型、声明 66
 - 3.3.3 平衡模型 70
 - 3.3.4 预定义的类 72

3.3.5	域、名字查找、扁平化	75
3.3.6	接口或类型的关系	77
3.3.7	继承、修改和重声明	81
3.3.8	方程	84
3.3.9	连接器和连接	90
3.3.10	数组	93
3.3.11	算法段和语句	99
3.3.12	函数	101
3.3.13	库包	115
3.3.14	注释	117
3.4	Modelica 编译器	119
3.5	直接优化技术	128
3.5.1	直接优化技术的概念	128
3.5.2	GenOpt 直接优化工具	129
3.5.3	优化问题的分类	129
3.5.4	优化算法	130
3.5.5	因变量的约束条件	133
3.5.6	GenOpt 的配置文件	134
3.6	基于模型为基础的预测	
	控制	134
3.6.1	基于模型为基础的控制技术	
	的特点	134
3.6.2	MPC 的原理	135
3.6.3	模型辨别	136

第4章 能量系统的 Modelica

	建模	138
4.1	模型的层次	138
4.2	建模的基本方法	139
4.3	Modelica 标准流体库	140
4.3.1	Modelica 的 Thermal 库	140
4.3.2	Modelica 的工质库	140
4.3.3	Modelica 的流体库	146
4.4	Buildings 库	149
4.4.1	Buildings 库的 Fluid 包	150
4.4.2	Fluid. Interfaces 包	150
4.4.3	Fluid. Actuators 包	151

4.4.4	Fluid. Boilers 包	152
4.4.5	Fluid. HeatExchangers 包	152
4.4.6	Fluid. Movers 包	154
4.4.7	Fluid. Storage 包	154
4.5	ThermoPower 库	155
4.5.1	管流模型	155
4.5.2	锅筒模型	156
4.6	ThermoCycle 库	157
4.6.1	管道模型	157
4.6.2	库的结构	158
4.6.3	膨胀和压缩设备包	158
4.6.4	热交换器包	158
4.7	ClaRa 库	159
4.7.1	ClaRa 库的结构	159
4.7.2	TILMedia-Library	160
4.8	Exergy 焓分析库	160
4.9	数值颤振和流动反	
	向性	161
4.10	能量系统库的未来发展	
	趋势	163

第5章 能量系统的焓分析

5.1	能量、熵、焓的关系	164
5.1.1	能量	165
5.1.2	熵	167
5.1.3	焓	168
5.1.4	焓与能	170
5.1.5	焓的多领域本质	170
5.2	环境和死态	171
5.2.1	环境	171
5.2.2	死态	173
5.3	热力焓	173
5.4	化学焓	175
5.5	焓损与传递过程的	
	关系	179
5.6	焓效率	180

第 6 章 能量系统的热经济分析	182
6.1 热经济分析和评估	182
6.1.1 工程经济的基本概念	182
6.1.2 热经济分析	184
6.1.3 热经济评估	188
6.2 热经济优化	188
第 7 章 能量系统模拟与优化的应用	190
7.1 空气调节系统的应用	190
7.1.1 湿空气的基本属性	190
7.1.2 湿空气的焓	191
7.1.3 液态水的焓	196
7.1.4 案例研究	197
7.2 热泵热力循环系统的分析	213
7.2.1 热泵系统	213
7.2.2 热泵热力循环系统的描述	214
7.2.3 计算结果及分析	215
7.2.4 热泵热力循环系统的焓分析	218
7.2.5 热泵系统膨胀阀的 PID 调节	220
7.3 电厂蒸汽动力循环系统的分析	221
7.3.1 水蒸气的焓图	221
7.3.2 模型的建立	221
7.3.3 计算结果和分析	222
7.4 制冷机组水系统的优化分析	226
7.4.1 制冷机组水系统	226
7.4.2 不连续源的处理	226
7.4.3 模型描述	227
7.4.4 定流量求解	227
7.4.5 优化求解	229
7.4.6 有内热源的优化问题	232
附录 符号表	235
参考文献	237

第1章 简介

1.1 系统建模与模拟

1.1.1 什么是系统

要进行能量系统的分析和研究,首先要理解什么是系统。19世纪法国物理学家、热力学创始人之一萨迪·卡诺(Sadi Carnot)首次将“系统”的概念运用于自然科学领域。1824年他在研究蒸汽机做功能力时,将蒸汽机的工质,即水蒸气,作为系统,分析它与锅炉、冷源、活塞等设备的相互作用。同时代的另一位热力学创始人、德国物理学家鲁道夫·克劳修斯(Rudolf Clausius)于1850年使用“工作体”的术语来指代“系统”,并引入环境的概念,将卡诺的描述进一步通用化。到了20世纪,“系统”的概念进一步发展,最具深远意义的是路德维希·冯·贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy)创立的一般系统论。在他的理论中,系统是相互联系相互作用的诸元素的综合体,并且系统具有与其组件的类型、特征、组件间的相互关系都无关的模型、原则和规律。运用数学理论对“系统”进行研究的是美国应用数学家、控制论的创始人诺伯特·维纳(Norbert Wiener)和英国科学家罗斯·艾什比(Ross Ashby)。维纳强调信息的重要性,并将信息、物质、能量并列为组成系统的三个要素。艾什比认为,由于系统的状态量相互依赖和关联,因此存在对给定系统进行控制所需要的最少的必要状态数。随后,科南特(Conant)于1970年发表了“调节原则”,他指出,每个好的调节器必定包含所需调节系统的模型。美国圣菲研究所的约翰·亨利·霍兰德(John Henry Holland)等人由进化现象衍生出复杂适应性系统的概念,他本人还提出了遗传算法。

从“系统”概念的发展看,它已经从一个单纯工程领域的概念拓展为以控制事物结构及其行为的规则为研究对象的一门学科。系统概念的定义和其特征的描述目前尚无统一规范的定论。广义地说,我们所关注的任何事物或事物的集合都可视为系统。这里的事物可以是具体物质性的,也可以是抽象概念性的。另一种被普遍认可的系统定义是由钱学森提出的,他认为,系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。不管系统的定义如何,最为重要的是,系统的某些属性对我们有用,我们想要去研究它们。例如,卡诺研究热机是为了能弄清热机的极限效率,后来的学者研究控制系统是为了实现更好的控制,而对复杂系统的研究也来源于对它们的调节及要弄清复杂系统的演变规律。

何为系统,系统由哪些部分组成,其关键还在于我们的需要或意图,即要用系统做什么。这个需要可以是来自工程方面的,也可能纯粹来自于人类对自然的好奇心。我们要有选择性地根据意图来定义系统,直接指定事物本身就是系统是毫无意义的。任何存在的客观事物都包含无穷多的变量,也可看作由无穷多个系统组成。例如,自由落体的铅球,其不仅包含了质量和速度,还有几何外形、温度、内应力、电导率、纯度、表面光线反射率、吸收率、弹性系数、比热容、内部晶格结构、晶格振动、电子分布等方面。包罗万象地研究该事物所有的客观存在

是不现实、不可能的，也不是我们的意图所在。我们所要做的是选取和研究与我们的意图或关注点相关的客观事实。这些经过高度选择后的客观存在成为系统。

1.1.2 系统的组成与特性

事物具有某些我们关注的属性并经由我们选择后成为系统。若系统不随时间变化，则称为稳态系统。若随时间变化，则称为动态系统。系统中存在的相互作用致使系统发生了变化。术语“实体”定义为系统中的事物，术语“属性”代表事物的性质，实体所具有的功能称为行为。例如，教室作为系统，实体是学生，认知能力是学生的属性，学习则为他们的行为。水箱作为系统，则水为实体，水位为该实体的性质，充水和放水为它的行为。这样，用状态来定义在任何时刻描述系统所需的变量集合，用事件来定义会改变系统行为的瞬态过程。实体由属性描述，实体的属性对应于状态变量，因此状态变量代表着实体的性质，而事件由离散变量进行描述，事件的始末构成了行为，因此事件代表着实体的行为。从这种意义上说，对系统的描述是由状态变量和离散变量共同组成的。

物质世界的事物都具有时空性质，若要讨论所有空间，则意味着把整个物质世界看作一个系统，而实际我们关注的都是局部的空间，如房间的温度、锅炉的压力、管道的阻力，因此我们需要定义边界来界定系统。边界里的实体构成了系统，边界外的部分构成该系统的环境。我们把对系统的研究称为系统分析。从系统与环境的相互作用看，系统有两个基本性质：输入和输出。环境本身也可视为一个系统，环境向系统的输入实际上是属于环境的状态变量，它们与其他的环境状态变量的不同之处在于它们可能会影响系统的状态和行为。系统向环境的输出实际上是属于系统的状态变量，它们有可能影响环境。由此衍生出系统的两个重要性质：可观测性和可控性。可观测性源于对系统输出的观测，某些输出可能是人为设置的，以便于测量。可控性源自通过输入对系统的控制，特别是那些我们能控制的输入。它们的共同之处在于作为主体的人的介入，它们都属于与人或人的创造物进行相互作用的输入和输出。

输入和输出的概念源自物理上信号或变量的传递，一般而言，输入变量需要经过一段时间才能反映它们对输出的影响。然而，对相互作用的变量进行输入和输出的划分并不绝对，如有些变量对系统而言既是输出量又是输入量。最常见的是控制系统的反馈量，它属于系统的输出，同时又影响着系统的输入。多体系统也是如此，事物受力发生位移，受力可为输入量，位移可为输出量，但同时位移又会影响到受力，那么此时受力成为输出量。这类作用机制中，变量间的相互作用不具有确定的因果方向，称为无因果的行为，也称同步行为。同步一方面表明同时性，即无时间上的先后次序，另一方面也表明变量间的关联无相互次序，对于这种关联最天然的描述方法是等式方程，这种变量间的关联的背后的机制在于该类变量的同源性，即它们体现了同一事物的不同方面。在此，谁是输出，谁是输入，取决于研究者的兴趣，而非系统本身的性质。

1.1.3 实验研究方法

对系统进行分析的过程中，通常将独立变量作为输入或原因，非独立变量作为输出或结果，调查后者如何依赖于前者，并对该依赖性做出解释。当然与前文对输入和输出的讨论一样，选择哪个是独立变量，哪个是非独立变量，实际上取决于研究者。那么如何才能获得不同输入条件下的输出数据呢？我们控制输入来运行系统，并观察系统输出，并把这一过程称为实验。一般而言，要想获得系统变量间的相互作用规律，需要大量的比较性实验研究。因此，实验研究作为科学研究的一个重要环节，具有其他环节所不可替代的作用，特别是系统变量间的作用机理尚不明确的情况下，或者即使基本作用机理已知，但还缺乏有效的求解手段的情况下，它成为我们获取知识的唯一手段。它的可操控性、可观测性及可重复性，为理论的建立和验证提供

了基础。但是,作为一种研究方法,实验研究也有其不利的方面。

1) 要进行实验,系统必须是可观测的和可操控的。然而,我们并不能完全控制系统所处的环境,则必然存在系统的某些输入是不可介入的,或不可控的,这些输入称为扰动输入。同样,系统的某些输出也是测量技术无法获取的,我们把这些变量称为系统的内部状态变量。

2) 由于人工性,实验系统不能完全代表实际系统。一方面,实验条件的限制使得实验室的行为在空间和时间上都是有限的。另一方面,多数实验是在实验室环境下进行的,该环境与实际系统存在的环境条件可能有偏离,这会导致实验行为与实际行为也发生偏离,从而难以将实验研究的成果直接运用到实际中去。

3) 进行实验还会碰到一些与现实相关的问题。实验费用可能会很高,如为了调查汽车的安全性,要将汽车进行碰撞实验。再者某些实验是危险的,如将核反应堆置入危险状态,来训练核电站操作人员的处理能力,是不可取的。还有一种情况是,实验系统还不存在,还处于设计或试制阶段,如在电站的初始设计阶段,通过建模来测试和调试控制系统。

如此,实验是科学研究的必不可少的环节,但针对其缺点,促使我们要进行模型研究。只要模型有效,我们就可通过模型研究,回答对应实际系统的问题,发现变量的变化规律。这种研究方法在学术界和工程界也已得到认可,目前发达国家的科学研究中,70%的资源用于模型的研究,30%的资源用于实验研究。实验研究主要用于原创性发现及模型的验证上,实验研究的成果用于模型的开发,实验的验证也促进了模型的工程应用,实现知识价值的最大化,因此实验和模型研究是相辅的。

另外,容易让人产生误导的观点认为,物质作用的基本规律已经掌握,剩下的事情就是计算,已经没有新的、有价值的发现了。实际上,这种错误观点在于对系统概念的认识不足,系统的组件规律已知,并不代表系统的规律已知。比如,流体力学的基本方程已经存在数百年了,但湍流的作用机理直到现在还没有一个完善的理论进行解释,并且即使是现在,科学家还不断从实验和数值模拟中发现新的湍流构型和作用机制,也许只有等到能对湍流完全解密的那天,我们才可以制造出完全可控的飞机,才可以获得完全可信的天气预报。同样,随着人造系统的复杂程度的提高,其规律性可能会完全脱离组件本身的规律,体现为一种在更高层次上的属性关联,这种关联在许多情况下是我们未知的,需要通过对现有数据进行细致分析,寻找主导变量及匹配的关联式。而数据的获取一种是通过实验数据,另一种可以通过对组件进行建模,搭建系统模型,获得模拟结果。

1.1.4 什么是模型

模型与现实系统相对应,但它不是现实世界,而仅仅是一种人类的构建物,它用于帮助我们更好地认识现实的系统。在认识论上,我们认为物质世界必定有我们能够认知的客观规律存在,该规律可以称为终极规律,人类的目标在于永无止境地对该规律的追求,并且不断地在逼近,但似乎永远难以到达。模型是对已知规律的表达,模型预测的失败只是表明我们认知的不足,并不能否定客观规律或终极规律的存在性,此时我们要做的就是修正我们的认知,浅层的修正是在现有数理框架内去寻找更合适的匹配项,深层的修正在于数理框架的修正,需要去建立新的数理逻辑理论。

模型本质上也是系统,选择什么作为模型也一样是根据我们的意图来确定。人类建立模型的意图主要有两个,一个是纯粹的求知欲望的驱使;另一个是想通过模型来回答对应实际系统的相关问题,如何种控制方案是合理的、参数取何值系统运行是最优的、设备如何选取才是最为匹配的等这类技术经济性的工程问题,以满足人类利益的最大化。

模型在原理上如同计算机,它包含了信息的输入、处理和输出。好的模型必然是对现实系

统的映射,是对现实系统结构的充分表达,它本身也是系统,只不过该系统是通过人类抽象建出的。这样,我们可以对构建出的模型进行实验,来回答有关现实系统的问题。通常这里所说的结构包括以下几个方面:

(1) 系统的构架 包括三个部分:组成系统的内部实体,或称组件;与系统相连的外部环境;实现内部组件和外部环境的相互联系连接。

(2) 系统的空间结构 包括两个部分:系统本身相对于参考坐标的位置,即外部几何;内部部件和构造的几何关系,即内部几何。

(3) 系统的时间结构 指定系统组件间相互作用的关系,描述系统的状态变量的演变规律。它有两种表达方法,一种是以显式时间的函数进行表达和描述,另一种是通过描述相互作用规律的微分方程、代数方程或算法来表达变化。

不提及与模型相对应的实际系统和对模型要进行的实验,纯粹说模型的有效性是毫无意义的。评价模型的任何方法都必须指明对应的实际系统和模型实验的条件。也只有在对实际系统的结构和对模型的局限性进行充分认知的前提下,我们才能正确地建立和运用模型。在某种程度上,模型就相当于我们的认知,所谓科学,就在于不断地根据现实来修改我们的模型,以使模型更符合对现实的描述。

1.1.5 如何建立模型

由于对模型的需求不同,即使是同一实际系统,我们也会根据需要开发不同复杂性的模型。模型开发首先要处理以下几个关键点:

1) 出于对实际系统复杂性的考虑,系统的某些方面需要做出简化假设,以抓住主要问题。比如,在对空调的水系统进行建模分析时,由于该应用领域,参数变化的范围并不大,可以采用不可压缩的水模型,即假设水的密度是不变的,这样在降低求解的难度、提高计算速度的同时,对工程问题也不会带来很大的误差。在制冷循环中,管道模型可以采用静态的动量方程,换热器模型中压力可以设为常数,毕竟热系统的特征是我们关注的重点。在对锅炉建模时,可以采用气液平衡态的模型进行简化,也可以采用略微复杂的模型,考虑气液间的热质传递,但这些模型都是以均匀参数描述状态,即气体和液体都是均质的,不考虑气体或液体内部性质的不均匀性。

2) 确定模型的边界和初始条件。边界和初始条件是模型求解的重要组成部分。支配现实世界的规律虽然是不变的,但由于边界和初始条件不同,使得现实世界呈现出纷繁复杂性。能否建立起与实际系统相对应的边界和初始条件也就成为模型成败的关键之处。由于不同系统的模型在结构上的巨大差异,它们的初始化的难易程度也不相同,如机械系统的初始化就较容易,只要给出合适的位移和速度即可。但热流体系统的初始化就不容易,由于变量间的复杂非线性关系,获得一致性的初始化条件本身就是一个挑战。

3) 理解模型的应用范围。没有理论能够包含现实世界所有的规律,也不存在能够适用于一切系统的模型。任何模型都会有它的适用范围。在建立模型时,就必须框定模型的应用范围。尽管我们可以建立某些通用的模型,但那仅是通过编程技巧,减少重复代码,而不会扩大模型的适用范围。比如,我们已经拥有单相流和两相流的模型,通过合理的组建代码,可以建立一套同时支持单相流和两相流的模型代码,但若要将它用于计算化学反应流就不可能了。

在确认了模型开发的关键问题之后,我们根据模型功能的不同,可以将模型划分如下几个层次:

1) 概念性模型。概念性模型是定性的模型,用于强调实际系统中的重要联系,是对现实世界中复杂系统的关键特征的表达,此为开发复杂模型的第一步。这类模型建立起我们的认知与复杂现实世界系统的联系。

2) 数学模型。此模型是使用数学方程来描述系统。数学模型分为两大类:有封闭形式的解

的分析模型,即描述系统的方程的解以数学分析函数的形式进行表达;数值模型,即通过数值算法获得模型的动态行为,其解以数列表达。

3) 统计模型。此模型是使用统计量如平均、模态、方差、回归系数等统计量来描述或特化系统。统计模型的数据源可以来自于数学模型的求解,也可以来自于实际系统的测量,或者来自两者混合的数据源。统计模型有助于辨别模式及确定数据集背后的关系。统计模型的结果可以用于实际系统的实时分析、诊断和优化。

4) 可视化模型。此模型让我们能更清晰地认识到系统是如何工作的。可视化模型建立起数据表达与图像模型的联系,从而把系统属性转化为可视化的形式,如三维的图形表达、地图、动画、图像分析和操作。它是建立在数学模型和统计模型之上,给予我们的将是对量化数据更为形象的表达,有助于在我们的认知中建立起更为直观的系统图景。

如前所述,要建立数学模型,首先要认识系统,有两个与系统相关的知识来源:来自于科学和技术领域的通用的定理和定律,如守恒定律及各领域的本构方程;来自系统本身,即基于对系统的观察。除了系统相关的知识外,建模还需要掌握模型应用领域的知识及模型创建的技术。

1) 即使是基本原理相同,但由于应用的方向、专业不同,对模型的需求也是千差万别的。因此,针对模型应用领域相关的事实,掌握应用领域的特性,包括这些专业的背景、规范及原理。

2) 掌握现代的建模技术,如面向对象、面向组件的建模理论、方法和技术实践。

3) 在创建模型的过程中,需要我们不断地运用分析和综合,其一般性的步骤如下:首先辨别系统中的主要部件及它们的相互作用,将每个部件分解为子部件,直到子部件在现有的软件库中有现成的模型,或者我们能有的适合的自然定律或关系来描述组件的行为,然后我们阐述组件的边界,对组件的相互作用建立数学表达。

4) 某些组件可能有未知的或部分未知的模型参数或系数,则可以通过现实系统的实验数据,使用系统辨别的方法,来匹配数学模型,如通过曲线拟合和回归分析方法。若建模技术足够成熟,高层次的识别系统能从基本的模型结构中自动构建数学模型。

5) 模型要针对需要进行方案的取舍,并不是每个模型都要深入到基础定律来建立,即通常所说的白箱模型,整个内部结构都可观测;有时根据需要,我们建立黑箱模型,即数据驱动,完全依赖于输入和输出,内部结构未知;或灰箱模型,即内部结构部分可知,未知部分需要假设模型结构、搜集数据、进行参数识别,如各类计算图表和经验公式。事实上在热流体系统中,由于完全求解湍流是不可能的,所以许多模型都属于灰箱模型。

1.1.6 模型的局限性

由于模型是对系统的表达,这种表达或转换是近似的,因此模型包含固有的不精确性,如对实际系统的数学描述可能是不完美的、对现象的认识可能是不完整的、模型中代表实际进程的数学参数会带有不确定性、模型中的初始和边界条件也许不完全可知。尽管如此,模型依然是表达现实世界的强有力的工具,在有些情况下模型是我们分析大尺度或预测未来的唯一方法。由于其重要性,我们要通过校正和验证模型来评估模型的精度。模型校正是对描述系统的模型参数进行调整,以获得模型输出值和实际系统观测值的一致,合理的调整是在参数不确定性以内进行的,超出范围的调整需要审视模型本身的有效性。

若模型没有得到充分的验证,运用模型具有很大的风险性。那么我们如何避开这些风险,即如何辨别模型的有效性,或如何验证模型是好的、可靠的、对我们的使用来说是有效的?这个问题很难回答,实际上也没有完美的答案。然而有一些与模型验证相关的有用技术:

1) 严格地审查模型的假设和近似条件,特别是它们的适用范围。

2) 如果有简单工况的分析解,将模拟与分析解进行对比。

3) 与公开资料的标准案例做比较,这不但能验证有效性,还能进一步验证模型的精确性。

4) 如果有实验结果,将模拟与实验结果进行对比。

5) 敏感性分析,如果模拟结果对模型参数具有很大的敏感性,我们此时有理由怀疑模型的有效性。

总之,模型验证是很费时费力的工作,建议建立某些自动流程来完成这类工作,如使用脚本语言实现模型自动的比较和验证分析,并且对于复杂的模型,要先对组件进行逐个的验证,在建模过程中,也要优先使用这些经过验证了的模型。

1.1.7 敏感性分析

分析模型对输入、初始条件、参数值的变化如何进行响应具有重要的意义。参量变化对模型状态量影响的大小称为敏感性测试。通常,这有助于辨别促使模型状态最大变化的模型参数,因为对这些参数控制得越好,系统越稳定。相反,对模型输出影响小的参数可以减小对它们的控制,而不会影响系统状态的稳定。如果模拟结果对模型参数具有很大的敏感性,我们此时有理由怀疑模型的有效性。因为,此时模型参数的微小的随机变化会导致系统大的随机变化。当然,除非现实系统确实具有此特性,即对此参数特别敏感,此时敏感性特性要在模型中加以阐述,以加强对其重视程度。通常,对系统参数微小变化的控制需要付出高的代价,比如若系统对几何外形参数敏感,则需要有高的加工精度,以保证误差最小化。因此好的系统应当对模型参数的微小变化不是很敏感,这个特性称为行为的健壮性。

1.1.8 模型基础的诊断

以模型为基础的诊断在于寻找某些行为的缘由,特别是错误行为的缘由。比如,一种比较简单的处理是,规范状态变量在正常工作区域的变化范围,倘若变量超出该范围,则表明所属组件或相关组件发生错误。当然,由于实际的工况比较复杂,单个变量容许变化范围就很宽,要更为准确的诊断,首先可以根据模型进行正常工况下变量的相关性分析,如果测量数据不能满足正常工况的关联关系,则表明错误发生。比如管道的压力差增加,流量理应增加的,但测量发现没有增加,或增加的比例不够,这时则表明错误发生。在制冷循环中,制冷负荷增加,低压和高压都会上升,吸气温度和排气温度也会上升,过冷度会减小,若状态变量没有类似的变化规律,则需要诊断。

1.1.9 基于模型的优化

实际系统具有多样化的复杂性,如运行条件的改变、用户需求的改变、不可预知的影响。这就需要系统的设计和建造者设计出能实时重配置的系统,以应对此类复杂性的挑战。而要能实时地做决断,需要一整套的解决方案,包括对系统的建模和模拟、监测系统的行为、估算系统的性能,进而优化系统,这种解决方案称为基于模型的优化。优化的结果是得到优化的模型,并把其映射到现实中去。在该方案中设计空间的定义尤为重要,它包括:要进行优化参数或变量;允许结构变形集(如任务的重分配、硬件资源的重调整);目标及受限函数;优化算法及其设定。现实中的参量不总是确定的,有的需要借助于统计模型获得它们的不确定性,并用于需要优化的目标函数。

数据挖掘和分析是当今物联网发展的关键技术,即大数据。大数据的核心并不是数据本身而是数据背后的模型,是相关领域的数学模型,数据是模型的表象或一个反映而已,模型才是根本,拥有模型才可以预测、判断。但即使是简单的模型,由于关联参数的非线性,也会呈现为无序的混沌状态,整个系统包含随机变化,系统具有初始参数的敏感性,几乎不可能进行长时间的预测,只能通过实时测量,不断进行模型的初始化,并在一定时间段进行预测,因此时长既依赖于系统的精度,也依赖于实际系统的特性。

1.1.10 数值模拟

模型的种类很多,我们仅讨论以数学模型或计算机程序形式体现的模型。模型最主要的用途是进行实验,即数值模拟。我们通过模拟,探索模型在各个工况下的行为,目的是提高系统性能,实现优化。

对系统的研究方法,主要是对系统做实验或对系统建立模型进行分析和模拟。通过分析方法获得模型的分析解,直接显现变量的图景,简洁明了,但以目前的数学工具,只能处理简单的应用,如简单的几何分析、简单的边界条件,对于实际系统的模型无能为力,从而数值模拟成为唯一的研究手段。许多情况下,需要将模拟研究与分析技术相结合。事实上,分析技术已经大量地运用于模型模拟的研究,一来数值求解离不开数学分析,特别是数值分析技术;二来计算机的建模不可能纯粹是数据的堆积,它需要利用分析技术进行综合,也需要运用分析技术进行高层的抽象和梳理,只有建立在充分数学分析技术上的模拟才能堪称完整和有序的模拟。另外,以完善数学分析为基础的技术才能充分体现人的构建价值,此种对科学审美的要求也成为建模和模拟技术发展的驱动力。

模拟是对模型的实验,仿真也是,但它们是有区别的。仿真是联合软硬件资源再造一套系统,该系统具有类似于原系统的操作条件,而模拟是通过数学对现实世界的映射。仿真也是模拟的一种,是模拟的子集。具体地说模拟用另一个系统来表达现实世界系统的经选择过的某些行为,而仿真则要更严格一些,是指用一套数据处理系统来全部或部分模拟原系统,以至于所建立的仿真系统能像原系统一样接受同样的数据,执行同样的功能,获得同样的结果。

1.1.11 数值模拟的优缺点

我们之所以要进行数值模拟,除了实验研究方法本身的不足,模拟研究还有诸多的好处,具体包括以下几个方面:

1) 如实验研究方法的缺点所述,实验较昂贵,有时还比较危险,有时对应的实验系统难以建立或根本无法建立。

2) 模拟的时间和空间尺度不同于真实系统,我们可以压缩时间尺度,如模型可以快速地调查实际系统可能要花费数年才能显现的效应。模拟也不受限于空间尺度,只要计算机的容量足够大,能够存储足够多的状态,再大的空间尺度都不是问题。

3) 模拟中的所有变量都是可以获取的,所有的变量也都是可以控制的,而不像现实世界中受到很多约束。比如在现实中,某些条件是危险的,轻易尝试可能会产生严重的后果;某些变量是很难操控的,目前的技术条件无法限定它们。这时通过模型就可以获得超出正常操作条件的系统行为。

4) 模拟可以让设计人员对系统进行不同抽象层次的研究。比如,通过顶层的抽象,我们更容易理解系统顶层部件的行为和相互作用的规律,从而,整个系统就可以建立在由上到下的技术基础上,让设计者不必局限于底层的细节。该方法也称为层级分解,这对我们进行复杂系统的研究和设计相当重要,可以克服系统的复杂性。

尽管模拟会给我们带来很多好处,但模拟的便利性也很容易让人忘记其缺陷,特别是忘记模拟所使用的条件和限制,从而得到错误的结论。因此,我们总需要不断地让实际系统的测量数据与模拟结果做比较和验证。进行模拟时特别要防止以下的意识倾向:

1) 过于迷信模型。过于热衷模型,而忘记模型的局限性,没有认识到模型仅仅是代表了某些条件下的现实世界,并不是完全代表实际系统。比如用模型对现实世界进行预测,一定要考察所对应的实际条件,特别是未发生的系统总有超出模型条件框架的概率,那时模型就无效了。

2) 强迫现实服从于模型的条件框架。如上一条所说,在实际系统的条件超出模型条件框架

时,仍然忽略实际条件,而人为地改变现实的描述以符合模型的条件,这是不理智的。

3) 忘记了模型的精确性。所有的模型都有简化的假设,在解释结果时我们必须时刻意识到这一点。

1.2 能量系统优化

1.2.1 能量系统简介

若我们关注系统与环境间功和热的相互作用,这样的系统称为能量系统。所谓热的相互作用包括了传热、冷热流体流动及反应流。几乎人类生产、生活的方方面面都会涉及能量系统,它广泛存在于工业、民用领域,如发电、化工、制冷、空调等。这类系统通过管道相互连接形成网络,管道中携带着通常是气体或液体的工质。由于系统是可以通过层级划分的,能量系统也是,根据研究的需要,可划为系统和组件,若组件复杂,它也可能是子系统。

当今世界,化石燃料仍然是能量的主要来源,我国大力倡导节能减排,化石燃料的使用效率已经得到很大的提高,但与一些发达国家相比,单位产品的能耗还是较高,仍然具有提升的空间。若要保持我国在全球市场的竞争力,还需要对能量系统的设计和运行提出更高的要求。

在工业领域,能量是重要的生产元素及费用消耗,因此有效地使用能源会提高产品的竞争力。另外,随着环保要求的日益提高,废料、废水的处理需要额外的处理费用,系统的效率越高,废弃的副产品就越少,废物处理就少,对环境的影响也越小。因此,高效能量系统的相关技术能有效地提高我国的长期竞争力。正是基于对高效能量系统的展望,本书中强调热力学第二定律的重要性,即焓分析方法。

现实过程中能量系统效率的提高是一个连续、迭代的过程,它随着信息、控制技术的提高逐步进化,就像现今互联网对传统行业的影响一样,我们需要不断地利用和融合当今已有的技术条件去提高能量系统的效率。

1.2.2 能量系统优化简介

能量系统的优化是多方面的,可以是整体系统的优化,也可以是组件的优化,可以是设计阶段的参数优化,也可以是运行阶段的动态优化。不管何种类型的优化,都要包含两个基本的元素:限定条件和优化目标。限定条件除了基本的物理定律外,还包括了人为指定的要求,如空调系统中要求房间的温度在 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$ 之间变化,动力系统中蒸汽的压力限定在一定的范围内。满足限定条件的系统组成了可行性的系统集,优化则意味着从此集中选择最好的。实际上由于系统的复杂性和系统信息的不确定性,通常不可能确定真正的最优化的系统。因此,我们只能根据现有的条件得到一个相对的优化的系统,也称近似优化的系统。比如在做空调系统分析时,室外环境是随时间变化的,当前的优化是以假设的室外条件为前提的,即使是获得的最优的方案在实际系统中由于室温条件的不同,也未必是最优的解决方案。另外,在做技术经济性分析时这一点也尤为明显,设备的费用数据是不确定的,是一个范围,年平均的燃料费用计算需要预测未来的燃料费用,而它随市场是不断变化的。这些都会增加问题的复杂性。而且典型的能量系统包含了多个组件的相互作用,单独组件的优化并不能保证整体系统的优化,某一工况的优化也不能保证整个运行期间的优化。另一个有关技术上的难题是优化算法,目前的优化算法是将问题域转化为数学表达,采用数学上的优化理论进行分析和求解,多数的处理需要计算导数,这就需要问题域的变量是连续可导的,但实际的问题包含了离散的变量,用于切换方案或行为,而这些要求是传统的优化算法难以支持的。也就是说,不管数学表达如何严格,数学算法如何精确,它只能针对特定的连续行为,因此这就需要以统计为基础的算法的介入,以解决离散变量的问题。

第2章 热力学的基础

2.1 热力学基本术语

2.1.1 热力学系统

前文阐述了系统及系统中的实体,并表明它们的定义与我们的意图相关。在进行热力分析时,我们关注物质的热力学状态及能流状况,因此,将空间中选择的区域或物质的集合定义为热力学系统。这一步看似简单,但容易被忽视。通常我们讨论问题时,我们总是下意识地假设所研究的系统不言自明,而忽略对所研究的系统进行定义。然而,在许多场合下这种意识会造成分歧。比如,我们经常会遇到,在解决同一问题时好像存在不同的答案,只有在仔细辨别后,才发现所讨论的并不是同一个对象,即问题归属的系统实际上是不一样的。这种意识还会发生在对问题做等价处理时,我们有时会想当然地认为变换了的问题与原问题是等价的,而实际上两个问题的前提条件不同,即系统的定义不同,从而造成了求解和理解上的分歧。因此,在热力学系统分析中,需要精确的系统定义,一方面可以避免分歧,另一方面在焓分析中才能准确地确定不可逆发生的位置和大小。

2.1.2 边界与环境

定义系统也同时意味着定义环境,环境是研究对象之外的系统或空间区域。将系统与环境分割的表面称为边界,边界可以是真实的面,也可以是虚拟的面,但它不是一个系统,在分析上边界的厚度为零,边界不能占有空间,也不能包含物质,因此边界没有质量和体积。明确边界才不至于在系统定义时产生混淆和分歧。在边界表面上系统与环境相互接触,边界上所测的属性值必定是为系统和环境所共有的,因此边界处的属性值是唯一的。指定边界,实际上是指定了环境,如指定边界压力为恒定,相当于指定了相对应的环境是压力池库,这里“池库”特指某些状态变量不变的系统。边界属性的唯一性不代表属性必须连续,只不过不连续的边界属性有时会给分析带来麻烦,如会致使无法辨别不可逆发生的位置。此时有三种处理方法,一种是将此处划归系统,另一种是将此处划归环境,还有一种将此处另立一个系统,最不可取的方法是将边界分为两边,并取不同的值,这会导致无法辨别不可逆发生源,从而会造成分析失败。

热力学系统以边界与环境作用的方式进行分类。边界特性包括质量传递特性、热传递特性和做功特性。按边界是否允许物质通过,分为开式和闭式系统,也称为控制体积和控制质量。开式系统不仅会有热和功的传递,还会有质量的传递,因此开式系统有允许物质通过的开口或端口。闭式系统中质量不允许通过边界传递,但能量可以通过边界传递,因此闭式系统中物质是守恒不变的。边界允许热流通过,则为传热边界,不允许则为绝热边界。可运动或可变形的边界则会产生边界功,无边界功的边界则为刚性边界。除了边界功外,做功还能以轴功、电磁功、外力场等形式直接与系统或经过边界与系统进行能量传递。这三种属性的组合实现了系统的类型的划分。比如无传热、有质量传递,则可称为绝热开式系统;与环境没有质量、热、功传递的系统称为孤立系统。