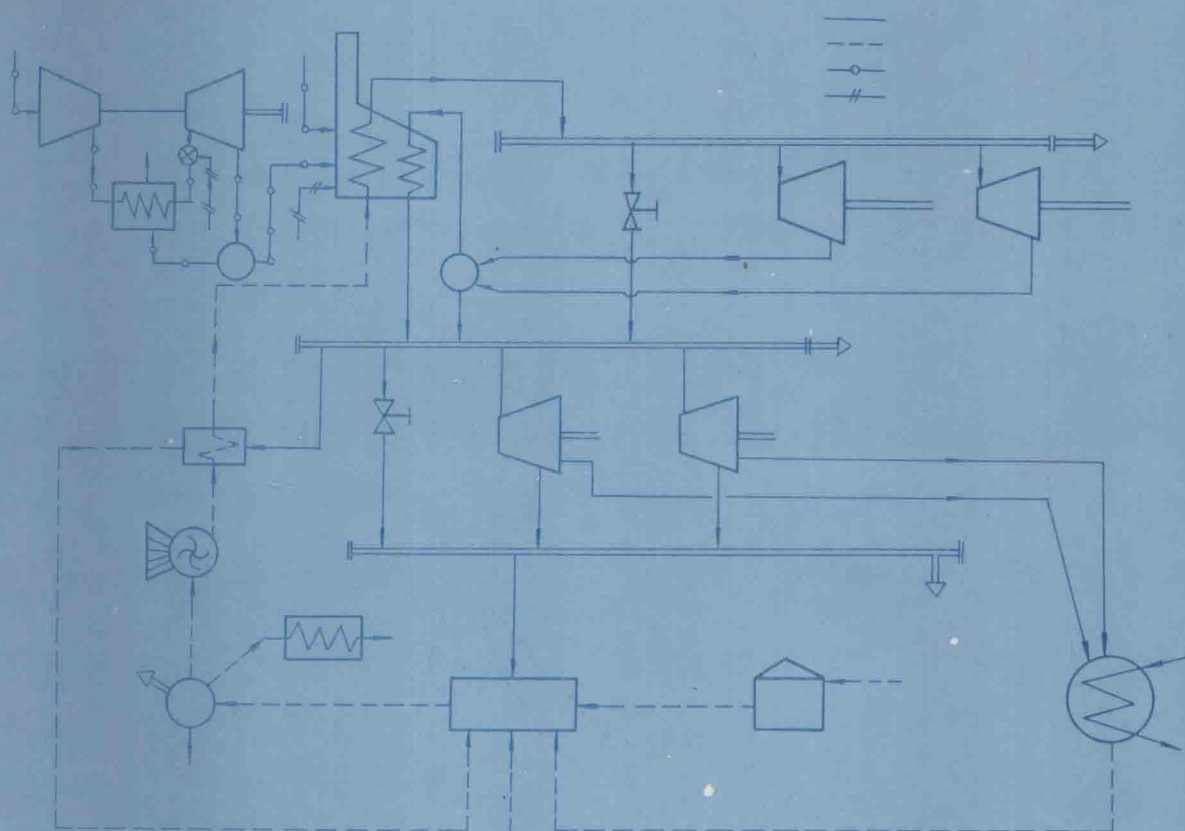


热能系统分析与最优综合

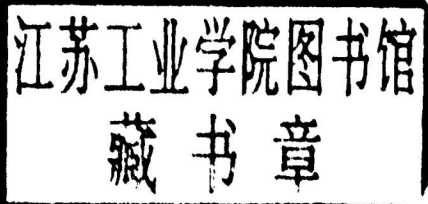
崔 峨 尹洪超 编著



大连理工大学出版社

热能系统分析与最优综合

崔峨 尹洪超 编著



大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

图书在版编目(CIP)数据

热能系统分析与最优综合/崔峨,尹洪超编著. —大连:大连理工大学出版社, 1994. 7

ISBN 7-5611-0881-8

I. 热… II. ①崔…②尹… III. 热能-系统分析-最优化-综合
IV. TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 04234 号

热能系统分析与最优综合

Renengxitong Fenxi Yu Zuiyouzonghe

崔峨 尹洪超 编著

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(邮政编码 116024)

东北财经大学印刷厂印刷

* * *

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 19 字数: 440 千字

1994 年 7 月第 1 版 1994 年 7 月第 1 次印刷

印数 0001—2000 册

* * *

责任编辑: 韩露 责任校对: 寸土

封面设计: 姜严军

* * *

ISBN 7-5611-0881-8 定价: 9.80 元
TK · 17

序

我国的能源供应不足，长期紧张，能源的利用效率又低，束缚了我国国民经济的正常发展速度，制约着工农业生产的提高和人民生活环境的改善。我国能源消费构成中，煤占 73%，而我国煤资源的分布极不平衡，北煤南运，造成交通运输的负担奇重，还引起环境污染问题。解决能源的合理开发和节约利用，已成为我国推进现代化经济建设的战略重点之一，也是影响社会经济发展的全球性问题之一。因此，应当为学习“热能工程”(热工)专业者积极宣传我国为缓解能源供应紧张局面制定的“开发与节约并重”的能源总方针，适当讲授热工设备和热力系统与供热及用热系统优化综合的一些基本知识。为此，1992 年 5 月在常州召开的全国高校热能工程专业协作会议上，正式拟定“热系统分析与优化”作为本科生的——门必修课。

本书取名《热能系统分析与最优综合》，是作者崔峨教授和尹洪超同志根据他们多年来从事科研实践和开设“热系统分析与优化”课程的心得体会，在原有讲义的基础上反复推敲、提炼而成。本书以有限的篇幅介绍系统工程基本方法论和运用数学规划与计算机工具于热系统的分析和综合，使热系统整体实现最优规划、最优设计、最优运行控制，或者最具经济效益的改造。自然，这种热系统分析也不能离开热力学完善性的考虑。全书内容丰富，可兼作了解现代跨学科的“热能系统工程学”形成与发展的入门教材。本书的出版，无疑将有助于高等学校“热能工程”专业的教材建设。

在全稿即将付印之际，谨为之简介如上。作为新的尝试，书中难免会有某些欠缺和疏漏之处，这可在使用过程中汲取读者建议，在再版时充实提高，以更好地发挥作用。

王补宣

1993 年 11 月于北京清华园

前 言

热能系统分析与最优综合作为热能系统工程的核心内容,是一门新兴的学科分支。它是系统工程、数学规划、计算方法及计算机技术在热能工程领域中的综合应用。

根据1992年5月全国高等工科院校热能工程专业协作委员会会议讨论拟定的教学计划(讨论稿),设置“热系统分析与优化设计”作为通用型热能工程专业必修课。为了加快热能工程专业的教材建设,适应教学需要,作者在1986年以来讲授“热力系统分析与优化”课程的基础上,结合多年来的科研成果和国内外的最新文献资料,编写了这本教材。在取材上试图突出以下几个原则:

新颖实用 由于热能系统分析与综合是一门正在迅速发展的学科分支,新材料层出不穷。在取材上着重介绍一些反映当前最新成果的新颖实用的方法和技术,而对那些尚不成熟的前沿问题作为开扩视野的次要内容。

深入浅出 既能使读者对这个领域有较深入的了解,又要尽量避免繁杂的理论推导。这样不仅可以满足热能工程专业本科生和研究生的教学需要,同时也照顾相近专业以及广大工程技术人员的学习参考。

与计算机应用相结合 这门课程相当于计算机在热能工程领域中应用的理论基础,因此书中不仅介绍了有关概念和算法,还给出了某些计算机程序或框图。通过上机来提高学生利用计算机解决实际问题的能力。

本书按50~60学时教学计划编写。内容共分七章,在介绍热能系统工程的基本概念、必要的数学方法和热力参数计算的基础上,着重对热能系统的热力学分析、稳态模拟、最优化和系统综合的理论与方法进行讨论,附录中还介绍了有关计算机程序。根据各学校的情况,讲授内容可适当增删(目录中带*的章节可作为高学时拓宽内容或研究生选用),但该课程应当安排课程论文或大作业的教学环节,上机不应少于15小时。

本书由崔峨主持编写和统一修改定稿,并编写第三章;尹洪超编写第一、二、四、六、七章和附录;张爱友编写第五章。在编写过程中袁一教授和姚平经教授给予了热情的指导和帮助,提供了他们的研究成果和大量的文献资料;袁一教授对本书进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵意见;最后又承蒙清华大学王补宣教授作序和沈幼庭教授的指教,及全国高校热能工程专业协作委员会的审议并推荐作为本专业的试用教材;大连理工大学研究生院和教务处对本书的出版给予了大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于在这个新的学科领域中类似的教材和专著尚不多见,加之作者经验不足,知识水平有限,时间也比较仓促,书中有错误和不妥之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

作 者

1993年5月

目 录

第一章 热能系统工程与计算技术概论	1
第一节 热能系统与热能系统工程的基本概念.....	1
一、热能系统的基本概念及特点	1
二、热能系统工程的基本概念	2
第二节 热能系统分析与综合的主要内容和步骤.....	3
一、热能系统分析与综合的主要内容	3
二、热能系统分析与综合的步骤	4
第三节 热能系统分析与综合的方法与手段.....	6
一、热力学分析方法	6
二、数学规划方法	6
三、计算机的应用	6
第四节 几种常用的数值计算技术.....	7
一、代数方程迭代算法	7
二、最小二乘法曲线拟合.....	11
第二章 介质热力参数的计算	15
第一节 介质热力参数的计算方法	16
一、介质热力参数计算的计算机方法.....	16
二、介质参数计算的热力学方法.....	17
第二节 水与水蒸气热力参数的计算	26
一、工业用 IFC 公式	26
二、适用于中低参数的 BTH 公式	27
三、水与水蒸气参数的 AE 公式	31
第三节 燃气热力参数的计算	34
一、燃气的焓与熵的低阶近似计算公式.....	34
二、燃气热力参数的分段拟合五阶多项式.....	35
三、燃气热力参数的高阶拟合多项式.....	37
第四节 计算机上的物性系统数据库	39
一、物性系统数据库概述.....	39
二、物性系统数据库的建立基础.....	40
三、物性系统数据库的实现.....	40
第三章 热能系统的热力学分析	42
第一节 焓的基本概念及主要表达式	42
一、热量焓与冷量焓	43
二、封闭系统的内能焓	45
三、稳定流动系统的焓焓	48

四、有化学反应系统的熵	50
第二节 热力过程的熵效率与熵损失系数	54
一、热力过程的熵效率	54
二、热力过程的熵损失系数	55
三、热力过程性质与熵效率的关系	55
四、稳定流动过程的熵效率与熵损失	55
五、几种典型不可逆过程的熵损失计算式	61
第三节 热力过程的熵平衡及熵平衡方程式	66
一、封闭系统热力过程的熵平衡方程式	66
二、开口系统中稳定流动过程的熵平衡方程式	67
三、循环过程的熵平衡方程式	71
第四节 典型热能系统的熵分析与应用算例	73
一、热交换系统的熵分析与计算	73
二、锅炉装置的熵分析与计算	79
第四章 热能系统的稳态模拟	85
第一节 热能系统模拟的基本概念	85
一、热能系统模拟的定义	85
二、数学模型的类型与建立	86
三、热能系统模拟的任务和类型	88
第二节 系统模拟的数学模型解算方法	90
一、序贯模块法	90
二、联立方程法	91
三、联立模块法	91
第三节 热能系统的单元模型与模拟	92
一、流股模型与自由度分析	92
二、单元模型的本质与类型	93
三、典型单元模型的建立	95
四、换热器的模拟*	100
第四节 热能系统的结构模型与系统分解	106
一、系统结构模型的表示	106
二、信息流图与流程描述	108
三、系统结构模型的分解	109
第五节 序贯模块法的断裂和收敛方法	112
一、断裂及其准则	113
二、最优断裂流股的确定*	114
三、断裂流股的加速收敛	115
第六节 联立方程法中非线性方程组的求解*	116
一、联立方程的建立及其稀疏性	116

二、大型稀疏非线性方程组的分隔降阶解法	118
三、非线性方程组求解的牛顿-拉夫森迭代法	121
第七节 蒸汽动力系统的模拟实例	124
一、序贯模块法蒸汽动力系统的模拟	125
二、联立方程法蒸汽动力系统的模拟*	127
第五章 热能系统的最优化	131
第一节 数学规划的基本概念	131
一、数学规划问题	131
二、凸集和凸函数	133
三、极值存在的条件	134
四、Kuhn-Tucker 条件	136
第二节 线性规划	137
一、线性规划的基本理论	137
二、单纯形法	138
三、改进单纯形法	141
四、对偶线性规划	142
第三节 无约束非线性规划*	143
一、一维最优化	144
二、最速下降法	144
三、牛顿法	144
四、共轭梯度法	145
五、变尺度法	145
六、Hooke-Jeeves 方法	146
七、Rosenbrock 方法	147
八、Powell 方法	148
九、单纯形法	148
第四节 有约束非线性规划*	150
一、线性规划逼近法	151
二、SUMT 内外点法	151
三、乘子法	153
四、可行方向法	154
五、复形法	157
第五节 整数线性规划	158
一、松弛与分解	159
二、分枝限界法	160
三、割平面法	160
四、MILP 程序简介	162
第六节 热能系统最优化设计的数学模型	163

一、最优化设计数学模型	163
二、相关变量和独立变量的确定	164
三、目标函数和约束函数的建立	166
四、热能系统的最优化策略	167
第七节 热能系统最优化应用实例	169
一、热工状态参数最优设计	169
二、设备设计参数最优设计	173
三、混合型参数最优设计	174
第六章 换热器网络系统综合	177
第一节 换热器网络及其综合方法简述	177
一、换热器网络及问题表述	177
二、换热器网络的综合方法	180
第二节 换热器网络综合的直观推断-调优法	181
一、换热器网络综合中的直观推断规则	182
二、换热器网络的调优规则	182
第三节 换热器网络的夹点及最小公用工程消耗	183
一、复合 $T-H$ 曲线与夹点	184
二、最小公用工程消耗及问题表格算法	186
三、夹点的特性——最低能耗原则	188
第四节 换热网络综合的夹点设计法	190
一、夹点匹配的可行性规则	190
二、物流间匹配换热的经验规则	193
三、夹点设计法	194
第五节 夹点技术的网络调优	195
一、最少换热设备台数	195
二、能量消耗与投资费用的权衡	198
第六节 夹点技术的门槛、分流与网络改造问题	202
一、非夹点问题——门槛问题	203
二、流股的分流	203
三、夹点技术的换热网络改造	205
第七节 换热网络中的热功集成	209
一、公用工程的选择	209
二、换热网络中的热功集成	211
三、热功集成的热负荷和温位限制	215
第七章 热能系统最优综合	217
第一节 系统综合的基本概念和方法	217
一、系统设计与系统综合	217
二、系统综合的步骤和问题	218

三、系统综合的基本方法	219
四、结构参数法的超结构与 MIP 解法	220
第二节 公用工程系统的最优综合	223
一、MIP 模型的建立与线性化	223
二、公用工程系统的最优综合模型	225
三、应用算例	229
第三节 换热器网络系统综合的结构优化法*	231
一、转运模型	232
二、最小公用工程费用问题	233
三、最少换热设备台数问题	235
四、系统集成的转运模型	236
五、换热器网络最优综合的步骤	236
第四节 生产过程系统综合与总体系统综合的联合优化策略*	238
一、生产过程系统的 MILP 模型的建立	239
二、总体系统综合的联合优化策略	240
第五节 柔性系统问题与柔性已知的系统综合	242
一、热能系统的柔性问题	242
二、柔性系统的多阶段最优综合	245
三、已知不确定性范围的柔性系统综合*	247
第六节 最优柔性系统综合*	251
一、柔性指数与最优柔性综合问题	251
二、角点检验法	253
三、换热网络柔性分析实例	254
四、系统柔性改造最优综合策略	258
附录 I 水蒸气性质计算的 IFC 程序	260
附录 II 各种物质定压摩尔热容、摩尔焓和摩尔熵的温度多项式及常数	270
附录 III 混合整数线性规划(MILP)程序	276
参考文献	293

第一章 热能系统工程与计算技术概论

能源是人类文明和社会进步的强大推动力，是发展社会经济和提高人民生活水平的重要物质基础。能源问题已成为当今的“全球性问题”之一，具有超越国界的普遍性和国际性，也具有跨越时空的综合性和长期性，它已渗透到各国的国民经济和社会生活的各个方面。对于正在致力于经济建设的我国来说，能源一直是制约经济发展的重要因素，解决能源问题已成为我国现代化经济建设的战略重点之一。在我国能源十分紧张，能源利用水平较低的情况下，大力提高和改善各种用能系统中能量利用的有效性，使有限的能源产生更大的经济效益，成为当前的迫切任务。这对我们热能工作者是一种严峻的挑战，也是一种不可多得的机遇。

目前，在能源利用过程中，大约有 90% 左右的能源是以热能的形式被直接利用，或者经过热能这个重要环节而转化为其他形式的能量再使用的。因此，分析研究热能的产生、转换与利用系统的性质及用能特点，对有效利用能量具有十分重要的意义。

第一节 热能系统与热能系统工程的基本概念

一、热能系统的基本概念及特点

热能工程的主要任务就是研究如何合理有效地利用热能，包括热能的产生、转换、输送、使用和回收等几个环节。各环节又是由一些基本的单元热工设备或热力过程构成的。所谓热能系统就是指由若干个相互作用和相互依赖的热能单元（热工设备或热力过程）按一定规律组合而成，并具有特定功能的有机整体。热能系统与其他系统一样，具有以下几个特征：

一是热能系统是由许多单元按照一定的方式组合起来的，即所谓系统的“集合性”。例如，电厂蒸汽动力系统是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵及各种加热器等单元组成的；工厂能量利用系统是由锅炉、工业透平、热交换设备、热力管网和各种用能设备组成的；余热回收系统是由各种换热器、余热锅炉、热机热泵等单元组成的。随着科学技术和社会生产的发展，热能系统越来越复杂，其单元数目也越来越多，例如现代化大型合成氨生产装置中，蒸汽动力和能量回收系统的单元设备有数百台。

二是热能系统的各个组成部分之间是相互联系和相互制约的，即所谓系统的“关联性”。这种关联性是具有一定规律的，就是系统中各单元设备不是随意的组合或无序的堆积，而是按照其性能上的特点和规律匹配联结起来的。

三是热能系统总是具有其特定的功能，即所谓系统的“目的性”。按照功能的不同，可分为热能的产生、转换、输送、利用或回收系统，可以供应生产和生活所需要的电力、动力、热量、冷量、工艺蒸汽、煤气或软化水等，也可以回收生产过程中的余热或工质。因此，它们可以是由少数几个设备构成的单功能的简单系统，也可以是由许多单元组成的多功

能复杂系统。例如锅炉房与热力管网系统用于供热，凝汽式电厂热力系统用于发电，热电站用于热电联供，以煤为燃料的三联供系统用于产生热、电和煤气，工厂的公用工程系统需要满足生产所需要的各种能量和载能工质。热能系统的目的就是要合理有效地转换和利用能量，满足不同的能量需要。

四是热能系统总是存在并活动于一个特定的环境之中，与环境不断地进行物质和能量的交换，即所谓系统的“环境适应性”。热能系统都有输入和输出。外界环境向系统提供物料和能量，这些物料和能量在系统中流动，形成物流和能流，并不断受到加工、转换、处理或利用。同时，系统也要向环境输出物料和能量。在热电联产系统中，外界向系统提供燃料的化学能，系统通过锅炉先将燃料的化学能转化为蒸汽的热能，再通过汽轮机将蒸汽的部分热能转化为机械能，并进一步通过发电机转化为电能输出；此外汽轮机的排汽或抽汽同时向外界供热。系统和环境不仅有输入和输出的相互作用，而且系统在进行能量转换的整个过程中总是受到环境条件的制约。正是由于系统与环境之间的相互作用和制约，以及系统内部能量的转化和转移过程，才确定了系统的特殊功能。

另外，系统和单元之间具有相对性。一般说来，一个系统总是另一个更大系统的一部分，或称为大系统的子系统；而子系统又是由更小的子系统所构成的，即所谓系统的“层次性”。对于工程目的而言，通常将热能系统划分为单元设备或单元过程为止就足够了。因此，任何一个热能系统都可以看成是由一系列单元热工设备或单元热力过程按一定的联结方式组成的网络。当然，为完成同样的功能，系统可以有不同的组成单元和结构。

热能系统除了具有以上一般系统的特征之外，还具有它自己的特点，可以归结为单元过程特点和再循环结构特点：

单元过程特点 对于热能系统，在设备空间中所发生的基本过程，不外乎是物质的传递、热量的传递、动量的传递、能量的转换及燃烧反应等现象。这些现象，连同设备的结构，进出设备的物料以及所传输的能量一起，就确定了设备空间中所形成的“状态”和进行的“过程”。我们所期望的，就是通过这些状态和过程而达到某种特定的目的。按照这些特定的目的，可以将单元过程划分为：传热过程、流动过程、燃烧过程、热功转换过程等有限的几种。这对于建立单元过程的数学模型，进而进行热能系统的分析与综合是十分有益的。

再循环结构特点 如果系统中没有物流或能流的反馈，这样的系统结构称为“树”结构；如果系统中有物流或能流的反馈，这样的系统结构称为“再循环”结构。树结构的研究比较容易，而再循环结构则比较复杂。在热能系统中，随着有效合理地利用能源越来越为人们所重视，广泛采用能量回收与综合利用以及联合循环等技术，使得再循环结构非常普遍。再循环结构中的反馈对系统的性能具有十分有利的影响，在系统设计中经常有意识地运用这种反馈。这就要求我们在分析计算具有再循环结构的复杂的热能系统时，必须采用相应的技术手段来处理。

二、热能系统工程的基本概念

“热能系统工程”作为热能工程的一个组成部分，是新近发展起来的一门尚未十分成熟的学科。简单地说，将系统工程的理论和方法应用于热能工程领域就形成了热能系统

工程。或者说,热能系统工程就是利用系统工程的原理和方法,包括它特有的概念、原则、思路以及一些定量分析的工具,来解决热能工程的实际问题。

目前,系统工程的应用已十分广泛,但人们对系统工程的理解还不尽相同,对系统工程的学科体系范围还没有统一的想法。这是因为系统工程的理论和方法,是在对工程设计规划、生产管理和控制工程等方面的技术向纵深发展和相互渗透中所产生的一些具有共性的问题的研究中形成和发展起来的,对于从事不同专业的人对系统工程具有不同的理解。另一方面,系统工程是一门正在发展的新兴交叉学科,要综合使用各种新的科学技术理论和方法,因此学科间的界限也很难划分。有许多人强调的是对复杂系统进行有效的最优管理和最优控制,因而认为系统工程就是现代管理科学;也有许多人着眼于工程系统的规划、设计和改造,因而认为系统工程主要是探求未知工程系统或对现有系统实施改造,使之最优化的一种综合性技术。尽管人们对系统工程的理解因侧重面不同而有所差异,但从本质上讲,可以认为系统工程的基本思想是:从系统整体的观念出发,周密考虑系统内各个组成部分相互间的制约关系,研究系统整体的最优策略。

系统工程是跨越各专业领域,研究各行各业中系统的开发和运用的科学方法。从广义上讲,以系统科学为代表的新的理论综合,产生了现代组织论系统论的世界图景和思维方式,因此它是现代科学理论中的具有普遍意义的方法性学科。系统工程研究和处理问题时所遵从的原则一般有整体性原则、综合性原则和科学性原则。其主要理论基础有运筹学、控制论、信息论、系统理论和应用数学。其主要技术手段则是电子计算机。因此,系统工程可以认为就是一种立足整体、统筹全局、使整体与局部辩证地统一、将分析和综合有机地结合、运用数学方法和电子计算机工具,来认识和处理系统的科学方法。

当把系统工程方法应用于各个不同的社会系统或工程系统时,就形成了具有各部门特点的系统工程学。当把系统工程与能源工程或化工过程结合起来就形成了能源系统工程或化工系统工程。热能系统工程也不例外,它是一门关于热能工程决策方法论的技术学科,这种方法论应当为热能工程领域中任何类型的单元设备、热工过程以及能量转换与利用系统本身指出如何规划、如何设计、如何运行、如何改进和如何控制。其基本方法就是系统的分析和综合。本书仅限于讨论以热工过程和能量转换与利用为主要环节的热能系统的工程决策方法,即主要研究热能系统分析与综合,而不涉及能源规划和能源管理等方面的宏观问题。但许多分析研究方法都是可以通用的。

第二节 热能系统分析与综合的主要内容和步骤

一、热能系统分析与综合的主要内容

热能系统工程的主要任务就是利用系统工程的思想和方法,在一定的限制条件下,根据输入条件和输出要求,寻求整体性能最优的热能系统。为了实现这一任务,需要做以下几个方面的工作:

1. 对于系统结构及各个子系统或单元均为已知的系统进行系统分析(System Analysis)。即研究反映各个子系统或单元特性的数学模型,并由系统的结构特点和给定的输入条件和约束,推测系统的特性或系统所能提供的结果。

2. 对于有待设计或改造的系统进行系统综合(System Synthesis), 也称为系统合成。系统综合是热能系统工程的核心内容之一。在哲学上, 综合是指将各部分或各种因素结合在一起, 构成较为完善的观念或体系。系统综合就是按照预定的系统特性, 寻求为实现该特性所需要的系统结构及各子系统或单元的性能, 并使系统最优化。或者说, 系统综合就是选择已知的各种单元构成一个整体系统, 使由给定的输入条件达到最优的输出结果。

3. 系统的最优化(System Optimizing), 它包括系统设计参数的最优化和系统的最优控制。为了保证系统的某个或某几个指标最优, 例如效率最高、成本最低或能耗最小, 不仅需要通过系统综合确定系统的构成方式, 还要确定系统的最优设计参数。由于外界环境在不断地变化, 系统本身的某些部分也随之不断地变化, 因此还需通过改变控制变量或决策变量的方法使系统的运行状态达到最优。

此外, 往往需要考察当系统的外界条件发生变化时对系统的性能有何影响, 这就需要对系统进行所谓“柔性分析”(Flexibility Analysis), 也就是要考察系统对外界的适应能力。当外界条件的变化对系统性能的影响不能忽略时, 都要进行柔性分析。目前使用较多的“灵敏度分析”就是其中的一种。柔性分析实际上应贯穿于系统分析、系统优化和系统综合的各个阶段。另外, 还有为改善系统柔性的所谓最优柔性系统综合。本书主要讨论热能系统的分析与综合方法, 对最优控制问题不作专门讨论。

二、热能系统分析与综合的步骤

应用系统工程方法对一个热能系统进行分析与综合的一般步骤如下:

1. 确定系统的目的要求

对于给定的系统对象, 首先要划定系统与环境的关系, 确定系统的边界条件; 明确系统的目的、功能和要求; 搞清哪些是状态变量和决策变量。还要分析和确定系统性能的评价指标, 看是单目标问题还是多目标问题, 并弄清各项评价指标之间的结构关系。

2. 系统分析

在进行系统分析时, 一般可分为 3 个阶段:

(1) 将系统逐级分解成一系列子系统, 一般要分解到能明确写出描述子系统特性的数学模型为止。在热能系统分析中通常分解到单元过程或单元设备。在分解时还要考虑应使各个子系统间的相互关系明确、简单和子系统的数目尽可能少, 以便于解算, 因而系统的分解应考虑或确定系统的解算方法或解算顺序。

(2) 建立系统的数学模型, 实质上就是用一组简化的数学方程组及其边界条件来描述系统各主要参变量之间的关系, 这包括单元过程或单元设备的物料与能量衡算模型, 以及系统的结构模型, 进而构成系统的总体模型。这往往是最为困难的一步, 要善于抓住主要因素, 忽略某些影响较小的次要因素, 将那些变化不大的参数作为常数处理, 以减少变量和方程式的数目。模型可能不只一个, 还要根据情况选择最为合适的。

(3) 选择适当的解算方法, 编制计算机程序, 将各单元的特性按照系统的结构特点或各单元之间的相互关系进行数学处理和计算机分析解算, 从而对整个系统进行数学模拟, 表达出系统及各单元的特性。最后还要对计算结果进行分析和核对, 或改变某些参数或部分模型重新解算, 以修正模型或了解在各种不同条件下系统的性能。系统的模拟

分析包括稳态模拟、动态模拟以及可靠性与柔性分析等。本书在第四章中主要讨论热能系统的稳态模拟。

3. 系统综合

系统综合的主要任务就是要拟定为达到系统的目标而可能采取的各种策略与方案,即针对给定的条件和任务,确定构成系统的各个单元及它们之间的结合方式,产生各种可以达到预定目的的替代方案,并从中选择结构最优的系统方案。这种系统方案的拟定和优选,过去完全是靠工程师的经验,提出少数几种方案逐一比较,这只能在个别问题上可以将某些方案建立数学模型,进行局部优化。而现在正发展一些系统综合的理论和方法,由计算机自动生成并优化系统方案,使系统设计由经验上升为科学。热能系统综合的一般步骤:

(1) 根据系统的目的、特性要求和外部环境,进行热能系统的规划,选择各子系统或单元,并将它们组合成各种可能的系统方案。

(2) 将系统的功能划分到各个子系统,从而将问题转变为各个子系统的综合问题。

(3) 对系统可能的方案进行结构优化设计,确定系统的最优结构。

4. 系统的最优化

通常所说的最优化不外乎三者之一,即最优设计、最优控制和最优管理。但本书仅限于讨论最优化设计问题。最优化设计包括设计参数最优化和结构参数最优化。前述的最优综合就是要从各种可能的系统方案中通过确定系统的结构参数选出结构最优的方案。为了达到这个目标,就必须把各个可能的方案放在同一基准上来比较,也就是必须首先使各个可能方案本身最优化。这就是对结构基本上已知的可能方案进行设计参数优化的过程。对于稳态热能系统的最优化设计问题,其求解步骤:

(1) 确定热能系统方案,即确定所研究的最优化问题的范围,明确系统的功能和目标。

(2) 建立反映这一系统实际过程的数学模型。这就要求对所求解的热能系统的结构、物理性能及内部过程有充分的了解,并正确选择变量和参量,只有这样才能构造出反映系统基本属性的目标函数和约束条件。

(3) 应用相应的数学规划方法,通过计算机来实现对这个系统方案的决策参数的最优化。

5. 评价与决策

在明确各个可能方案的性能后,可以根据评价准则对每种方案进行综合评价,选出最优的方案。大多数情况下,往往选出的方案是“较优的方案”或“满意解”,而不一定是“最优”的。实际上,由于受到某些信息不全或其它约束等限制,甚至受到一些社会、心理等因素的影响,很难达到所谓“最优”。即使这样做,往往既耗费精力而又未必能实现。

综上所述,系统分析与系统综合是两类不同的问题,但是它们之间有着紧密的关系。系统综合是以系统分析为基础,通过对可能方案的分析、模拟和计算,可以获得系统综合所必需的信息;同时在综合过程中发现问题,反过来对系统分析提出新的要求。而系统分析与综合问题的核心目的在于系统的最优化。因此,最优化方法应当看成是本课程数学基础,而电子计算机是进行系统分析与最优综合的主要工具和手段。这就要求

必须掌握有关的数学规划和数值分析的算法；掌握相应的热力学分析和建立系统与单元数学模型的方法。概括地说，热能系统的模拟分析、系统最优化及系统综合构成了热能系统工程的主要内容，也是本书的核心；而热力学分析方法、数学规划方法及计算机应用是热能系统分析与综合必不可少的方法和手段。

第三节 热能系统分析与综合的方法与手段

一、热力学分析方法

对热能系统进行分析与综合，除了运用系统工程的方法以外，还必须掌握热力学分析方法，因为热能系统的性质和规律完全遵循热力学的基本定律。而热力学的基本理论和分析方法也在不断地发展和完善。根据热能系统单元过程的特点，一般都包含有传热、传质、流动、燃烧反应及能量的转换与利用等过程。这些过程只能在热力学第一定律和第二定律所限定的范围内进行。因此，热力学分析方法是热能系统分析与综合的重要理论基础。

所谓热力学分析方法，就是热力学第一、二定律相结合的焓分析法。通过热力学分析，可以揭示出能量系统中焓的转换、传递、利用和损失的情况，确定出系统的焓效率。其突出特点是不仅从能量量的角度，而且从能量质的角度来考察热能系统的性能。本书在第三章中将介绍热力学分析的基本理论和方法。

二、数学规划方法

前已叙及，热能系统分析与综合的核心目的是系统的最优化。也就是说，系统分析与综合的过程可以归结为一个相应的数学规划问题的求解过程。在系统分析中，利用最优化技术对已知的系统寻求最优的系统参数或运行控制参数；在系统综合中，则利用最优化技术寻求最优的系统结构。因此，寻求数学模型最优解的数学规划法是进行系统分析与综合的主要手段，也是系统工程的基础。

数学规划作为一个领域，已发展成为一个独立的数学分支。简单地说，数学规划所涉及的通常是有约束的极值问题，它包括线性规划、非线性规划、整数规划、二次规划、几何规划及动态规划等。在进行系统分析与综合中，要寻求系统在某一规定的最佳目标下的一组决策变量值，就需要寻求或掌握行之有效的优化计算方法。这不仅要了解数学规划的基本理论和基本概念有所了解，还要很好地理解一些常用的具体算法，并用来解决热能工程的实际问题。但由于数学规划内容十分丰富，教科书种类繁多，加之本书的篇幅所限，不可能全面地介绍，只在第五章及其它有关章节中介绍数学规划在热能系统分析与综合中的应用方法。对数学规划的基本理论和算法，读者可以参考有关的书籍。

三、计算机的应用

由于热能系统日趋复杂，方案众多，而每一方案中总是包含有大量的变量。因此无论是系统分析、参数优化，还是系统综合，都必须在高速计算机上才能得以实现。从这种意义上说，热能系统分析与综合相当于计算机在热能工程领域中应用的理论基础，这门学科的诞生和发展与计算机的出现密切相关。计算机是进行系统分析与综合的主要计算工具和手段，可以说离开计算机就无法掌握、研究和发展热能系统工程。这就要求我们不

仅要熟悉计算机的软硬件系统，还应当具有计算机程序的设计能力，同时还要熟悉一些适合于计算机的数学方法和数值计算技术。

第四节 几种常用的数值计算技术

系统工程所研究的系统其组成单元的数目庞大，相互关系复杂，模型的求解常会遇到一些复杂的数学问题，而热能系统模型往往又具有非线性。因此这门学科与计算技术密切相关。利用电子计算机对热能系统进行定量分析计算，除了数学规划中的算法以外，还需要其它一些适合于计算机的数值计算技术。本节首先介绍在系统模型解算中常用的几种数值计算方法，即代数方程迭代算法和公式拟合方法。对于系统模拟中常用的大型稀疏非线性代数方程组的数值解法，将在第四章中介绍。

一、代数方程迭代算法

在利用计算机进行热能系统计算及一般工程计算中，经常遇到各种隐式代数方程的求解问题。例如对于隐式代数方程

$$x = e^x + c \quad (c \text{ 为常数})$$

不能直接求出 x 值。更一般地，对于下列形式的隐式方程

$$x = f(x) \tag{1-1}$$

需要进行迭代求解 x 值。即先假定一个根 x ，然后代入到上式右端，通过计算后得到的 x 值用 xC 表示，即 $xC=f(x)$ ，然后将事先假定的 x 值与计算得到的 xC 值相比较后，重新确定一个 x 值进行反复迭代，直至两者差别小于容许范围即可得到方程(1-1)的近似解或称数值解，其几何意义如图 1-1 所示。函数 $f(x)$ 的曲线与 $xC=x$ 的直线的交点就是所求的解。迭代法是求解代数方程和超越方程常用的数值方法。以下简单介绍几种常用的迭代算法。

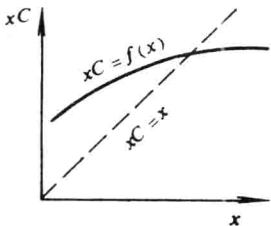


图 1-1 $f(x)=x$ 图解

1. 直接迭代法(Direct Iteration)

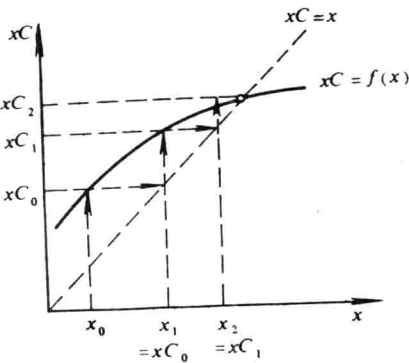


图 1-2 直接迭代过程

直接迭代法又称为试差法，是最简单的求解方法。基本算法是先估计一个根 x_0 作为初始点，求出 xC_0 ；比较估计值 x_0 与计算值 xC_0 之间是否满足精度要求；若不满足，则以 xC_0 为新的估计值 x_1 ，再求出 xC_1 ；如此继续下去，得到一系列越来越接近于解的点，直至满足精度要求为止。这个迭代过程可由图(1-2)直观地显示出来。该迭代法的程序框图如图 1-3 所示。

热能系统计算中的数学模型一般都很复杂，可能是由大量方程(其中包含有非线性方程)组成的方程组。例如，对下列形式的一组方程