

序

能源是人类文明进步的重要物质基础和动力，攸关国计民生和国家安全。国家发展和改革委员会、国家能源局于 2022 年发布的《“十四五”现代能源体系规划》提出了“加快构建现代能源体系、推动能源高质量发展的总体蓝图和行动纲领”。随着技术水平和经济性的大幅提升，可再生能源实现了跃升发展，多元化能源供给与需求特性对电力系统的承载力和灵活性等方面提出了新的挑战。构建多能融合的综合能源系统，是增强能源系统运行灵活性、提升可再生能源消纳能力的有效途径。电能、热能作为人类活动应用最广泛的两种能源代表，其相互耦合、综合管理在社会生产、民生保障、环境保护、国防安全等领域均具有重要意义。

该书作者依托工程热物理与电气工程的学科背景，针对电力、热力系统传统研究方法差异过大所带来的学科交叉难题，全面突破了以部件特性为核心、以工质流动为纽带的热力系统传统建模方法，原创性地提出了热力系统的热量流模型。该模型从网络视角对热力系统进行整体分析，实现了与电力系统潮流模型等在物理与数学上的同构与统一分析。目前，热量流方法自雏形提出以来，历经十余年的发展，在物理概念、数学深度、应用广度等方面均得到了长足的拓展与深化。当前所形成的规范化理论体系具有较高的成熟度，展现出鲜明的原理性和实践性，有望在电-热综合能源领域乃至更广阔的能源科学研究中形成突出特色。

基于热量流法的电-热综合能源系统统一分析方法，是热学与电学交叉融合所创新发展出的新方法。它并非对原有传统方法的简单叠加，而是对原有学科的概念内涵进行扩展，将差异化的研究方法相互交融，深入挖掘其中的共性规律，从而形成了学科知识的新增长点与科学前沿。期待这一方向未来能引发更多学者的关注与兴趣关注，提出学术批评和改进意见，共同推动能源科学研究和能源行业的持续发展。

史增立

2025 年 8 月于清华园

前 言

“双碳”背景下，建设新型能源体系是保障我国能源安全的重要内容。在以能源清洁低碳高效利用为导向的新型能源体系中，可再生能源的高比例化发展成为主要特征。国家能源局发布《2025 年可再生能源并网运行情况》显示，截至 2025 年底，我国可再生能源装机容量达 23.4 亿 kW(年新增装机 4.52 亿 kW，同比增长 21%)，占全国发电总装机容量的 60%，根据国际能源署和国际可再生能源署发布的数据，2025 年全球可再生能源新增装机约 6.92 亿 kW(同比增长 15.5%)，全球可再生能源总装机约 51.4 亿 kW。我国可再生能源装机占全球总装机比重超过 45%，占全球新增装机比重约 65%。然而，以风、光为主体的可再生能源发电通常伴有较大的波动性和不确定性，其大规模并网会严重影响能源系统的稳定安全运行，使能源供需平衡的灵活调节需求成为日益增长的难题。

电力、热力系统作为两类应用最广泛的能源系统，将其相互集成构建电-热综合能源系统，能够通过挖掘电、热两种不同形式能量在传输、存储、转换等环节的协同互补潜力，提升能源供用的灵活性，促进风、光等间歇性可再生能源消纳，提高能源的整体利用效率，已成为能源领域的重要发展方向之一。然而，电、热两种能量的物理属性与传输特性存在较大差异，学者们在研究过程中逐渐形成了电学、热学这两门研究范式迥异的学科。以电-热综合能源系统为整体进行理论研究时离不开对两门学科的集成应用，但二者间的交叉融合具有一定难度。

电力系统的主要研究通常以元件及其相互连接关系为基础构建电路网络，结合描述元件特性的欧姆定律等及描述网络约束的基尔霍夫电压、电流定律等，刻画电压、电流在系统网络中的整体分布特性；而热力系统的主要研究则基于热力学和传热学，分别从能量转换和输运的视角研究部件/环节中发生的局部热性质状态变化规律，再结合部件/环节间的工质流动联系实现对系统的全局热分析。此时，对电力、热力系统的研究方法进行直接集成时，后者以局部特性与工质流为核心的传统分析方法难以满足综合能源系统整体建模、性能分析和协调调度的实际需求，从而限制了调节灵活性和能源利用效率的进一步提升。

因此，改变热力系统的传统分析思路是实现综合能源系统整体研究的关键，也是促进学科之间深度交叉融合的必要环节。本书从热量输运与电能传输的共性与差异性角度出发，提出热力系统中稳态、动态过程的热量流建模方法，使其与电力系统潮流模型具有同构化形式，进而研究电-热综合能源系统中多能流的整体

分析模型与协调优化调度方法。围绕上述主旨，本书分为7章进行详细论述。

第1章首先介绍电能、热量传输和转换过程的物理机制，梳理对各类物理现象的基本认识，并阐明不同过程的动态响应特征时间。在本书所涉及的电力调峰时间尺度下，不考虑电力系统的暂态过程，进而对其现有的静态分析方法进行介绍。同时理清热力系统的性能分析方法，包括对热量自身的传递过程、伴随工质流动的迁移过程及热功转换等过程的不同描述，指出现有方法侧重于换热过程/设备的局部分析，缺乏对热量输运与转换整体规律的详细刻画和深刻认识。最后，总结了电-热综合能源系统的现有集成研究方法，指出已有方法难以在完整考虑电、热传输和转换特性的前提下实现协调调度，需要提出热力系统的新研究视角，从一致性的角度建立电力与热力系统的同构化模型，以实现电-热综合能源系统中多能流传输、存储、转换过程的整体分析与优化。

第2章提出热力系统的热量流建模理论。针对热力系统的热量传递、热量迁移、热功转换等不同典型过程，在考虑工质为常物性和变物性的前提下，分别建立稳态、动态热量流模型。通过定义热阻、热容、热动势等类电化元件，对传热过程进行特性分离，所建立的规范化网络模型具有等效电路特征，能够实现与电力系统潮流模型的同构化。将热量流模型与流动过程的动力-阻力平衡模型相结合，并补充工质的物性约束、循环工质充灌量等约束条件，构建了热力系统的完整物理约束，并以实际系统中的单压朗肯循环为例，对热力系统整体模型的规范化构建框架与物理特征进行详细分析。

第3章基于图论和矩阵运算，提出热力系统热量流模型的自适应生成方法。该方法针对换热器、单股流加热、流动分离/混合等典型热过程，建立热量传输过程的统一矩阵化表述，对热力系统中热量输运过程的拓扑特征及输运特性进行数学描述。同时，对所建立的矩阵化数学模型采用矩阵分析方法，推导系统的定解条件，对数学模型解的完备性进行论证。最后，针对多回路换热系统，应用矩阵化热量流模型的自适应生成算法，并与基于物理分析的热量流建模方法进行对比，阐明两类方法在数学和物理角度建模上的差异性和统一性。

第4章介绍热量流模型的“分层-分治”求解算法。基于热力系统热量流模型中拓扑、元件、物性等约束在数学特性上的差异，提出适用于该模型的“分层-分治”求解算法，并结合燃气-蒸汽联合循环发电系统分析，从准确性、时间复杂度和鲁棒性等角度对所提算法与传统算法进行量化对比。通过开发数据采集与特性参数辨识、热量流建模与求解、系统运行性能优化等模块，构建燃气-蒸汽联合循环发电机组的实时运行优化平台，并介绍工程示范应用效果，从而阐明热量流建模与分析理论的工程应用价值。

第5章进行电-热综合能源系统的多能流整体分析。在电力调峰的时间尺度下，

将热力系统的热量流建模方法与电力系统的潮流建模方法相结合,研究电-热综合能源系统的统一潮流建模方法,考虑电能与热能传输与转换过程的整体动态特性,并提出相应的联合仿真方法。通过分析电能、热能传输与转换过程的互补机理,揭示不同电热运行模式对可再生能源消纳的影响规律。并且,对管网、建筑的储热能力进行量化评估,研究考虑热网储能电-热综合能源系统运行优化策略,分析管网、建筑储能对系统灵活性提升的影响机制。

第6章研究多主体电-热综合能源系统的分解-协调优化调度。针对两主体和三主体电-热综合能源系统,研究分解-协调优化运行方法的应用方式,介绍不同主体子问题、边界变量可行域与最优函数等的求解方法,并考虑热力参数不确定性对分解-协调调度优化的影响。从而,在多主体电-热综合能源系统中,实现不同独立主体间的协调运行,充分发挥该系统在实现能源优化配置方面的协同效应。

第7章介绍基于能效与灵活性协同的分解-协调优化调度。考虑电、热能量的传输及转换特性,建立能够反映热电联产系统动态运行能效与调节灵活性的联产运行模型,形成兼顾能效和灵活性的电-热综合能源系统分解-协调调度方法在此基础上,开发电-热分解-协调调度系统,并在辽宁电网电力调度中心进行工程实施应用,以调和热力系统能量转换效率和电力系统灵活性之间的冲突。

本书付梓之际,谨向导师过增元教授致以诚挚的谢意。过老师的学者风度和大家风范始终是我敬仰的典范,引领我步入别开生面的学术领域,激励我在科研道路上不断探赜求新。在写作过程中,本书主要参考了作者指导的郝俊红、王怡飞、赵思玉、赵甜、胡康、姜拓、付荣桓、贺克伦、陈曦、苟星、李霞、马欢、辛永琳等的博士学位论文以及孙清晗、梁正等的研究工作。各位老师与同学为电-热综合能源系统能量输运模型与多能协调调度研究做出的重要贡献。没有他们倾注心血所取得的创造性学术成果,本书难以顺利编撰付梓。

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金委员会和国家科学技术学术著作出版基金委员会的大力支持,获得了国家杰出青年科学基金项目(No. 52125604)和国家科学技术学术著作出版基金项目的资助。在此表示衷心的感谢!

本书尽力呈现作者研究所得,若能让读者朋友从中得到一点收获,作者将不胜欣慰。囿于学力所限,书中难免存在不足之处,敬请各位读者批评指正。

作者

2025年5月于清华园

目 录

序

前言

第 1 章	电力、热力系统的传统模型及分析方法	1
1.1	电能、热量传输和转换的物理机制	1
1.2	电力系统的静态(稳态)分析方法	5
1.2.1	电力系统的潮流建模方法	5
1.2.2	电力系统的模型求解方法	6
1.3	热力系统的性能分析方法	6
1.3.1	换热器的热量传递模型	7
1.3.2	管道的热量迁移模型	9
1.3.3	热功转换部件的能量转换模型	10
1.3.4	热力系统传统模型的求解方法	10
1.4	电-热综合能源系统的整体分析方法	14
1.4.1	部件外特性的能量路由器模型	15
1.4.2	传统机理模型的简化集成	15
1.5	综合能源系统的电、热协调调度	16
1.6	本章小结	17
第 2 章	热力系统的热量流模型	19
2.1	换热器的稳态热量流模型(工质物性不变)	19
2.2	流体混合与分流过程的稳态热量流模型	25
2.3	换热器的稳态热量流模型(工质物性变化)	26
2.4	热量迁移过程的动态热量流模型	31
2.5	热功转换过程的稳态热量流模型	36
2.6	热力系统整体热量流模型的规范化构建方法	37
2.7	流动过程的动力-阻力平衡模型	40
2.8	换热器的动态热量流模型	41
2.9	单压朗肯循环的整体模型	45
2.9.1	热量传递与转换的热量流模型(热量流视角)	46
2.9.2	工质流动的动力-阻力平衡模型(工质流视角)	55
2.9.3	工质的物性约束	56

2.9.4 循环工质充灌量约束·····	57
2.9.5 热力系统整体模型的规范化构建框架与物理特征·····	60
2.10 本章小结·····	62
第3章 基于图论和矩阵的热量流模型自适应生成方法 ·····	63
3.1 热过程的矩阵化描述·····	63
3.1.1 热量流模型的矩阵化描述·····	63
3.1.2 流动分离过程·····	64
3.1.3 流体混合过程·····	64
3.1.4 单股流体被加热过程·····	65
3.1.5 换热器中的换热过程·····	65
3.2 换热系统的矩阵化描述·····	67
3.2.1 系统的整体热量传输方程·····	67
3.2.2 整体热量传输方程的定解条件·····	71
3.2.3 矩阵化建模方法的验证和物理含义·····	73
3.3 本章小结·····	74
第4章 热量流模型的“分层-分治”求解算法 ·····	75
4.1 燃气-蒸汽联合循环发电系统·····	75
4.1.1 发电系统的流程结构·····	75
4.1.2 发电系统的热量流模型·····	76
4.1.3 系统的工质流模型·····	87
4.1.4 工质物性·····	89
4.2 热量流模型的数学性质及“分层-分治”求解算法·····	90
4.2.1 热量流模型的数学性质·····	90
4.2.2 热量流模型的“分层-分治”求解算法·····	91
4.3 “分层-分治”求解算法的性能分析·····	95
4.3.1 准确性·····	95
4.3.2 时间复杂度·····	98
4.3.3 鲁棒性·····	100
4.4 燃气冷-热-汽-电多联供系统的运行优化和试验验证·····	101
4.4.1 系统流程及主要装置·····	101
4.4.2 系统的热量流模型·····	103
4.4.3 多能联供系统运行性能实时优化平台·····	105
4.5 本章小结·····	113
第5章 电-热综合能源系统的多能流整体分析 ·····	115
5.1 电-热综合能源系统的多能流同构化模型·····	115
5.1.1 电-热综合能源系统的拓扑结构·····	115

5.1.2	建筑围护结构的热量流模型	116
5.1.3	供热系统的动态热量流模型	118
5.1.4	电-热统一潮流模型	124
5.2	电-热综合能源系统的联合仿真方法	124
5.3	电-热综合能源系统的能效提升机制	125
5.3.1	电、热能量属性的互补机理	125
5.3.2	电-热综合能源系统的多能互补特性	126
5.3.3	管网、建筑储热能力量化评估方法	132
5.4	考虑热网储能的电-热综合能源系统运行优化	135
5.4.1	优化模型	135
5.4.2	优化结果及影响规律分析	138
5.5	本章小结	148
第 6 章	多主体电-热综合能源系统的分解-协调优化调度	150
6.1	电-热分解-协调调度的必要性及基本原则	150
6.2	基于边界变量投影的两主体分解-协调优化调度	151
6.2.1	两主体电-热综合能源系统的优化调度模型	152
6.2.2	基于边界变量的分解-协调优化调度方法	158
6.2.3	边界变量可行域与最优函数的求解方法	162
6.2.4	算例分析	168
6.3	三主体电-热综合能源系统的分解-协调优化调度	185
6.3.1	系统描述与优化调度模型	186
6.3.2	三主体电-热综合能源系统的分解-协调优化调度方法	192
6.3.3	分解-协调优化调度方法中各个子问题的求解方法	196
6.3.4	算例分析	200
6.4	计及不确定性多主体电-热综合能源系统的分解-协调优化调度	204
6.4.1	计及热力参数不确定性的能量-备用联合调度模型	205
6.4.2	计及不确定性的分解-协调优化运行方法	210
6.4.3	分解-协调优化运行方法中各个子问题的求解方法	215
6.4.4	计及不确定性的多主体电-热综合能源系统分解-协调优化算例分析	217
6.5	本章小结	221
第 7 章	基于能效与灵活性协同的分解-协调优化调度	223
7.1	电-热综合能源系统的整体模型	223
7.1.1	电-热综合能源系统构成	223
7.1.2	供热系统的热量流模型	225
7.1.3	不同类型 CHP 机组的能量转换特性建模	228
7.1.4	电网潮流等电力系统运行约束	232

7.2 基于能效和灵活性协同的分解-协调调度方法·····	233
7.2.1 考虑多机组运行耦合的最优能效特性·····	235
7.2.2 考虑多机组运行耦合的灵活性特性·····	236
7.2.3 综合能源系统中能效和灵活性整体协同·····	239
7.2.4 算例分析·····	239
7.3 电-热综合能源系统的分解-协调调度系统·····	249
7.3.1 系统整体架构·····	249
7.3.2 “日前-滚动-实时”多时间尺度协调调度流程·····	250
7.3.3 电-热分解-协调调度系统运行结果·····	251
7.4 本章小结·····	254
主要参考文献·····	255
后记·····	263

第1章 电力、热力系统的传统模型及分析方法

电力和热力系统是两类重要的能源系统。以往，二者通常为单独设计、互为边界、独立运行，彼此协调程度较低。实际上，电力和热力系统联系紧密、互相影响，如图 1.1 所示。将二者中彼此耦合的“源-网-荷-储”四类环节组合在一起，构建电-热综合能源系统，可依托火电、水电、风电、光伏等机组和热电联产机组、锅炉等热源，结合热电联产机组、电热泵(制冷)、电加热等热(冷)电耦合装置，以满足用户的用电和用热(冷)需求。并且，充分考虑两个系统之间的交互影响，在规划、设计、运行等不同层面对两个系统进行协调和优化，有助于实现能源系统的安全、低碳、高效的发展目标。

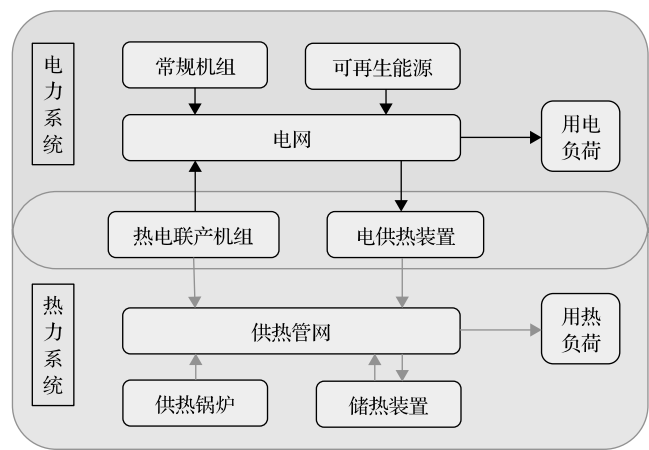


图 1.1 电-热综合能源系统架构示意图

1.1 电能、热量传输和转换的物理机制

电-热综合能源系统包含了多种不同类型的物理过程，根据能量类型可分为电能传输过程、热能输运过程以及电-热耦合(转换)过程三大类。

电能传输过程以电磁波为载体，传播速度为光速。在直流电网中，支路两端的电压差遵循欧姆定律产生电流，实现电能的传输；在交流电网中，支路两端电压的相角差遵循相量形式的欧姆定律产生电流，实现电能的传输。

热能输运通常由热量传递和热能迁移两类过程共同实现。其中，热量传递是

在温差驱动下的自发输运现象, 包含热传导、热对流、热辐射三种基本方式。此外, 为了实现热能在不同热力设备间的传递或转换, 需借助载热工质的流动来驱动热能的迁移。以图 1.2 所示的集中供热系统(热电联产机组为热源)为例, 热量传递过程主要通过热电联产机组中的供热首站(蒸汽与一次网水)、用户侧的换热站(一次网水与二次网水)以及热用户的供暖设备(二次网水与室内空气)将热量从高温工质传递给低温工质, 同时产生热量的品位损失; 热能迁移过程主要依靠一次、二次管网中的工质流动实现热能的空间迁移, 忽略管道漏热时, 迁移过程中载热工质温度基本保持不变, 因此不会造成热能的品位损失。此外, 受载热工质流速的限制, 热能的传输速度远小于电能(电磁波)的传输速度。因此, 相对于电能的易传输性, 热能难以实现远距离传输。然而, 由于物质具有天然的热容属性, 相较于电能的难存储特性, 热能易存储的物理特性较为突出。例如, 供热用户的建筑围护结构具有较大的热能存储能力, 能够平抑外界环境温度波动, 维持室温稳定性; 供热管网中的工质在不同空间位置吸、放热并对热能进行迁移, 当各处吸、放热净功率之和不为零时, 管网工质整体也会表现出一定的储热能力, 从而导致工质平均温度发生变化。

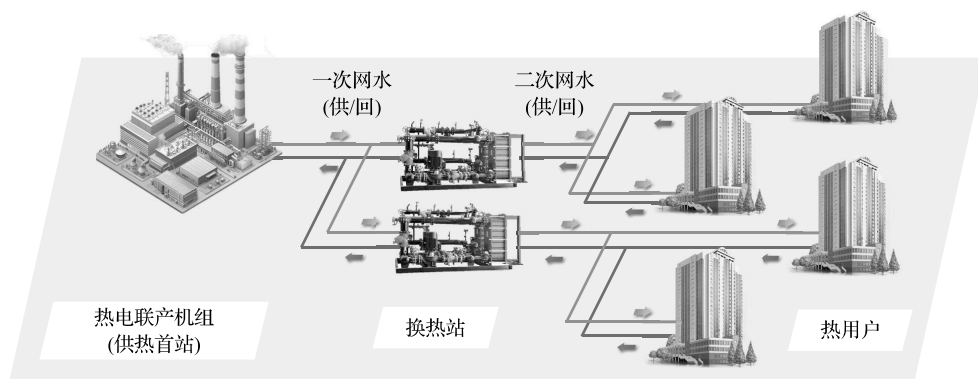


图 1.2 典型区域供热系统示意图

电-热耦合(转换)过程可以分为热-电转换(正循环)和电-热转换(逆循环)两类。在煤电、气电及核电等常规热-电转换系统中, 燃料燃烧/核反应首先将化学能/核能转换为热能, 再通过朗肯循环等动力循环将热能转换为机械能/电能。以图 1.3 所示的朗肯循环为例, 液态水进入蒸汽发生器加热, 出口的高温高压蒸汽进入汽轮机膨胀做功发电, 之后进入凝汽器放热, 凝结水经水泵升压后再次进入蒸汽发生器, 最终实现整个热力循环。从热力学第一定律的角度看, 蒸汽发生器中输入的热量一部分在汽轮机中转换为机械能, 另一部分通过凝汽器向环境散热, 因此朗肯循环的热效率小于 1。为了提高机组的能量利用效率, 可以将汽轮机中做过功的蒸汽(抽气或背压排汽)用于供热, 实现热电联产。从热力学第二定律的角度

看, 热电联产实现了热量“温度对口、梯级利用”, 将做功能力较强(品位较高)的高、中温蒸汽用于发电, 将做功能力较弱(品位较低)的低温蒸汽用于供热, 有效提升了热力系统的总能效。

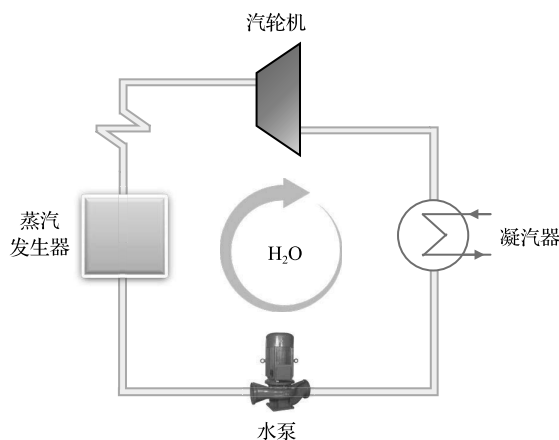


图 1.3 朗肯循环工作原理图

对于电-热转换, 蒸汽压缩制冷(热泵)循环是一种应用广泛且高效的能量转换系统, 其工作原理如图 1.4 所示。压缩机消耗机械功产生高温高压蒸汽, 压缩后的蒸汽进入冷凝器冷凝放热, 经过节流装置降压、降温, 然后在蒸发器中蒸发吸热后返回压缩机, 最终将电能转换为热能。对于电热泵, 冷凝器中释放的热量等于压缩机消耗的机械能及蒸发器中吸收的热量之和, 因此电热泵电-热转换的性能系数必然大于 1。除了电热泵之外, 电加热是一种基于焦耳热效应将电能直接耗散为热能的方法, 通常可分为电阻加热、电弧加热、感应加热、红外加热等。其中,

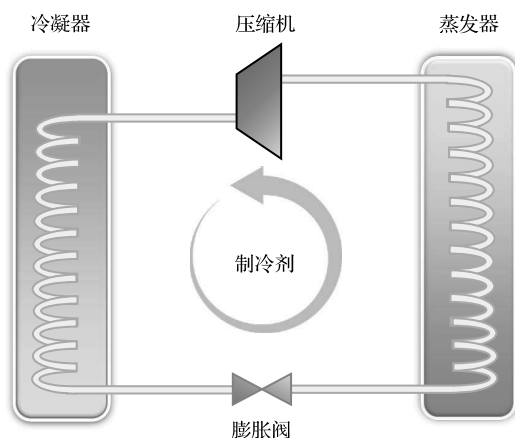


图 1.4 电热泵的工作原理图

电阻加热直接利用电流在电阻上通过时的焦耳效应；电弧加热利用电极间气体放电产生的大电流；感应加热利用交变电场所产生的感应电流的焦耳效应。这类方法利用自由电子在电场驱动下的定向运动与金属晶格间发生的碰撞，将电子运动的电能耗散为晶格热运动的动能，产生宏观下的热能。而红外加热则是在电阻加热的基础上利用电阻的热辐射效应进行传热。基于热力学第一定律，在电能不可逆地耗散为热能的过程中，电-热转换效率始终等于 1，即耗散的电能必定全部转换为热能。考虑到电加热设备一般存在漏热现象，因此电加热设备的整体效率略小于 1。

由于电能、热能传输和转换的物理机制存在差异，电-热综合能源系统包含多个不同的特征时间，如图 1.5 所示：①在电能传输过程中，与电感、电容动态过程相关的电磁暂态分析的特征时间通常为毫秒级；由于发电机和电动机磁转矩的变化引起的电机转子机械运动的变化过程，称为机电暂态，其特征时间为秒级；电力系统中负荷功率变化需要通过调整发电机出力实现平衡，这种潮流调度控制的特征时间为分钟级。②对于热能输运过程，载热工质受阀门控制产生的压力/流速变化以压力波的方式传播，速度为 km/s 量级，其特征时间通常为毫秒至秒量级；载热工质的流动速度(热量迁移的速度)通常为 m/s 量级，供热管网中热量迁移过程的特征时间通常为分钟至小时量级。在换热器中，由于载热工质流速以及换热器热容的影响，换热器中热量传递过程的特征时间通常在秒到分钟级等。对于热能存储过程，由于换热特性与储热特性的差异，主动储热和被动储热过程也呈现不同的特征时间。为了提高储、释热功率，主动储热装置具有较好的换热特性，因此其特征时间为分钟到小时量级；而对于建筑围护结构等被动蓄热环节，由于其隔热特性较好(换热特性较差)，其特征时间会达到小时到日量级。③对于电-

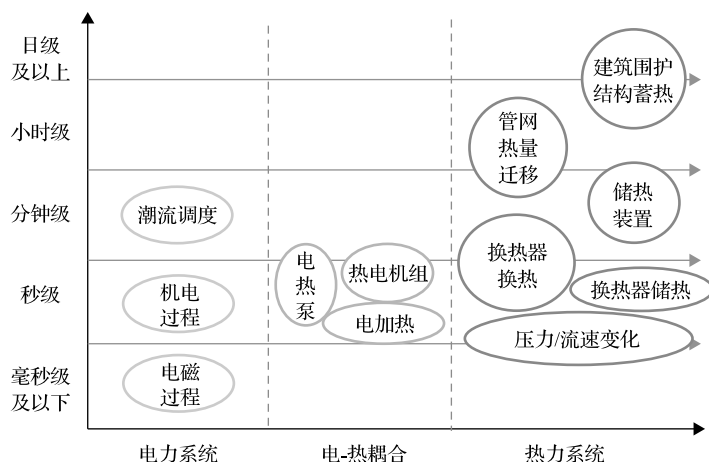


图 1.5 电-热综合能源系统中不同物理过程的时间尺度分析

热耦合过程, 发电机组和电热泵是由众多热量迁移、传递及热功转换过程构成, 因此其特征时间通常为秒到分钟量级。此外, 电加热装置利用焦耳效应快速产热, 加热电阻的热容一般较小, 热功率变化的动态响应特征时间通常在毫秒至秒量级。

可见, 电力系统动态过程的特征时间为毫秒量级到秒量级。热力系统的特征时间横跨毫秒级到日级。对电-热综合能源系统进行整体研究时, 如果对所有过程的动态特性都进行建模, 将会显著增加分析复杂度。此时, 可以根据研究场景的时间尺度来确定各个过程的建模原则。本书主要涉及电-热综合能源系统的经济调度(调峰)问题, 场景的时间尺度为分钟量级。此时, 特征时间大于日级的动态过程, 可以认为是准静态; 特征时间在分钟到日级的热量传输和存储等动态过程, 需要建立动态模型; 特征时间小于分钟级的动态过程, 采用静态(稳态)模型, 例如电力系统的潮流模型。

1.2 电力系统的静态(稳态)分析方法

在电路理论中, 功率是电压和电流的乘积, 因此电压和电流是传输电能的两个核心要素。对于交流电力系统, 电压、电流以相量形式表示。由于电网中电感、电容等元件的存在, 系统中存在电磁暂态过程, 电压、电流的关系需用微分方程描述。但电磁暂态过程的特征时间一般在毫秒级及以下, 在研究经济调度问题时, 通常可以忽略电磁暂态过程, 此时电压、电流的关系直接用代数方程描述, 这就是电力系统的潮流模型。

1.2.1 电力系统的潮流建模方法

潮流模型是电力系统中描述电能在网络中输运特性的基本模型。在考虑元件特性约束和网络拓扑约束的基础上, 基于电学基本定律, 形成网络矩阵, 导出描述电压和电流之间关系的网络方程。最常用的节点导纳矩阵网络方程为

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU} \quad (1-1)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为节点注入电流向量; $\mathbf{U}$ 为节点电压向量; $\mathbf{Y}$ 为节点导纳矩阵。在静态潮流计算时, 根据不同类型节点给定的运行变量的属性不同, 将节点分为 PQ (有功-无功)、 PV (有功-电压) 和 $V\theta$ (电压-相角) 三种类型。

根据给定的运行变量将式(1-1)进行变形即可导出潮流模型。例如, 对于 PQ 节点, 给定量是节点注入功率, 则对应的潮流模型为

$$P_i + jQ_i = U_i I_i^* = U_i \sum_j (Y_{ij} U_j)^* \quad (1-2)$$

式中, $P_i + jQ_i$ 为节点 i 注入的复功率。

1.2.2 电力系统的模型求解方法

电力系统潮流模型是一个非线性代数方程组, 基本数学形式为

$$f(\mathbf{x}) = 0 \quad (1-3)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为潮流方程中的待求解变量构成的向量, 主要表示节点电压幅值、相角等。潮流方程只能采用数值方法求解, 目前比较常用的方法有牛顿-拉弗森法以及基于该方法改进的 P-Q 分解法等。

1.3 热力系统的性能分析方法

如图 1.6 所示, 热力系统传统分析方法首先将系统“拆分”为部件, 分别构建每个部件中不同物理、化学过程的数学模型, 然后将上述模型直接集成, 获得整个热力系统的数学模型。同时, 按照部件模型的构建方式, 可分为机理模型和数据驱动模型。前者由过程所遵循的物理、化学原理推导而得, 后者则由数据归纳而成。为了增强模型的通用性, 应尽可能构建机理模型来反映不同类型过程进行的内在机制。当然, 考虑到过程复杂性等限制, 在机组模型构建过程中不可避免会引入前提假设。随着人工智能技术的快速发展, 也可以通过分析数据中隐含的约束关系来构建机理和数据相结合的混合模型, 进一步提升模型的精确性, 满足不同场景下的工程应用需求。热力系统的流程结构复杂多变, 并且包含了热源(锅炉、电加热、电热泵等)、换热器(顺流/逆流/叉流、单相/两相等)、热功转换装置(涡轮、压缩机等)、管道、泵、阀等多种不同类型的部件。下文将针对热力系统的典型部件, 介绍相应的传统机理模型。

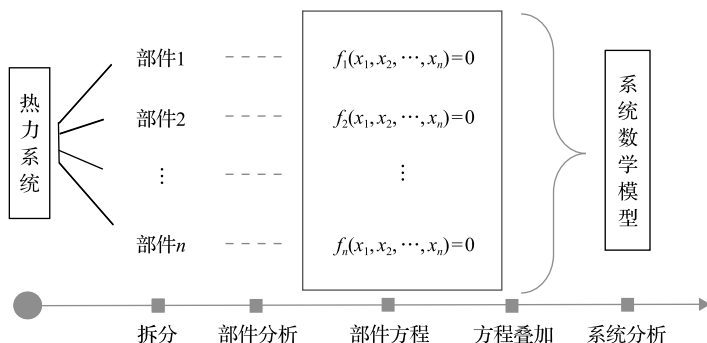


图 1.6 热力系统的传统建模思路

1.3.1 换热器的热量传递模型

换热器是热力系统中的基本部件，它实现了热量在不同工质间传递。在换热器的稳态性能分析中，通常需要进行两种情况下的热计算：①根据设定的流体出口温度或换热量需求确定所需的换热面积，称为设计计算；②对已有换热器，在非设计工况条件下确定其能够达到的换热量，称为校核计算。针对两种热计算需求，存在两种常用的求解方法：对数平均温差 (LMTD) 法与效能-传热单元数 (ε -NTU) 法。这两种方法都以工质为对象，通过描述工质的温度变化来研究换热器性能。

1. 常物性工况下的换热器传热模型

根据牛顿冷却定律，LMTD 法首先将换热器热导 (KA ，换热系数 K 与换热面积 A 的乘积) 的倒数定义为换热器热阻，并以此为前提推导出换热过程的对数平均温差 (冷、热流体进、出口温度的非线性组合) 来作为换热器中热量传递的驱动力，即

$$R_m = \frac{1}{KA} = \frac{\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min})}}{Q} \quad (1-4)$$

式中， R_m 为传统方式定义的换热器热阻； K 为换热器的总传热系数； A 为换热面积； $\Delta T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\min}$ 分别为换热器两侧温差的最大值和最小值； Q 为换热量。

如式 (1-4) 所示，基于对数平均温差定义的热阻只考虑了换热器的总传热系数和换热面积，即结构参数对换热器性能的影响，而将流体质量流量对换热器性能的影响隐含在对数平均温差中。若要体现流体质量流量对换热器性能的影响，需将流体的能量守恒方程与式 (1-4) 联立，采用迭代的方式进行求解。换言之，该热阻并不能直接体现流体质量流量对换热性能的影响，使换热器性能与结构、运行参数之间缺乏明确的显式关系。另外，由于对数平均温差是冷、热流体进、出口温度的非线性组合，当流体的出口温度未知时，对数平均温差也是未知的，这使得换热器的设计需求与结构、运行参数之间缺乏明确的显式关系。当流体的进、出口温度都已知时，结合能量守恒方程和传热方程，应用对数平均温差可获得传热系数、面积和换热量之间的显式关系。当流体的出口温度未知时，由于其受到结构参数和运行参数的影响，通常需通过迭代求解来获得换热过程的具体参数。

在效能-传热单元数 (ε -NTU) 法中，需要引入换热器效能 ε 和传热单元数 NTU 两个无量纲参数来设计和校核不同类型换热器的热性能。其中， ε 为实际传热速率和理论可能的最大传热速率之比，NTU 由热流体和冷流体的温度、质量流量、

等压比热容以及传热系数和面积等因素计算获得。Shah 等对比分析了 LMTD 和 ε -NTU 两种方法的优缺点,指出 LMTD 法能够较为直观地计算换热面积,但校核问题求解始终需要迭代; ε -NTU 法容易判断进口温度对换热性能的影响,但应用中需要判断两股流体热容量流的大小。由此可见,换热器换热性能的传统方法各有侧重,但都是以流体工质为对象,通过描述流体的温度变化来研究换热器性能。

2. 变物性工况下的换热器传热模型

在核能利用、超导冷却、航天航空等领域,存在蒸发器/冷凝器内的工质相变换热过程,同时,在超/跨临界系统中,存在超临界工质的吸/放热过程。在这些换热过程中,工质的导热系数和比热容等物性将发生变化。物性变化将改变换热量,而换热量变化又使流体温度发生变化,进而影响流体的物性。因此,变物性流体的物性、温度和换热量间存在相互耦合关系,使其流动特征和换热规律与常物性流体相比更加复杂,这增加了换热器性能分析和设计的难度。

针对变物性工质,主要有常物性假设法、分段法和有限容积法等换热器性能分析方法。常物性假设法基于 LMTD 法或 ε -NTU 法等常物性工况下换热器的计算模型,以变物性流体进、出口温度的算术平均值为定性温度,来确定变物性流体在整个换热过程中的平均定压比热容。并且,利用平均对流传热系数经验关联式计算整个换热器的平均传热系数。可见,常物性假设法侧重于分析换热器的整体换热性能,计算较为简便,只需针对定性温度、整体换热参数及总换热量之间的相互影响做迭代计算,就可以对变物性工况下的换热器进行性能分析和设计。然而,常物性假设法忽略了物性参数及传热系数分布规律的影响,难以体现换热器中的局部换热特性,所以很难反映出局部换热“恶化”或“强化”现象。并且,由于流体的对流传热系数分布规律受运行条件的影响显著,平均对流传热系数的经验关联式的适用范围通常较小,在计算时需要选择特定的经验关联式,否则结果的准确性不高。例如,针对低温氦制冷系统,Soyars、Oonk 等研究了常物性假设对换热计算造成的误差及其对制冷系统整体性能计算结果的影响,指出氦在低温区间(4~20K)的物性变化对换热器效能影响较大,常物性假设下得到的系统制冷量与实际结果的偏差大于 30%。

分段法考虑了流体物性以及流动和换热参数在换热器中的分布特性,其解决思路是将换热器合理划分为多个换热单元,以换热单元中流体的平均温度作为定性温度来确定物性,利用局部对流传热系数的经验关联式计算各个换热单元的传热系数,并基于常物性换热器的研究方法获得每个换热单元的控制方程组,并将这些控制方程组联立获得变物性工况下换热器的整个数学模型。

此外,分段法可细分为分相区法和分单元法。分相区法适用于蒸发器、冷凝器等含有相变过程的换热器,它按照过冷段、相变段和过热段对换热器进行划

分。该方法分段数较少,可直接将流体的相变参数作为每个单元的计算条件,适用于单相状态时物性变化较小的低压工况。然而,应用这种方法需要事先确定流体在换热器中的具体相变过程,否则需要多次试算。分单元法针对流体物性参数随温度和压力连续变化的换热过程,以每个单元的换热量或换热面积相等为分段原则,将每个单元内的流体视为常物性,并利用 LMTD 法或 ε -NTU 法建立各单元的控制方程。当分段数足够多时,也可采用算术平均温差计算单元换热量。分段法建立的计算模型较为准确,但是引入了大量中间温度,且每个换热单元都涉及定性温度、物性、传热系数及换热量的相互影响关系,所以计算过程较为复杂。

有限容积法则将研究对象分割成更小的微元体,建立各微元体的控制方程,包括质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程,并对上述控制方程进行离散来完成数值求解。这种方法不依赖于传热系数经验关联式,可以对不同复杂结构的换热器进行三维数值模拟,也可以反映工况改变时换热器的动态响应特性。然而,该方法对流动及传热过程的数值求解依赖于确定的初始条件与边界条件。当换热器作为热系统的某个部件时,上述条件将作为待设计参数,此时难以应用该方法对热系统进行整体设计和优化。

综上,常物性假设法侧重于研究物性变化对换热器整体性能的影响,难以准确描述物性变化对换热器局部性能的影响;分段法将换热器划分为多个常物性换热单元,引入大量中间变量来分析每个换热单元,增加了换热器性能分析的复杂度;有限容积法则通过数值求解换热过程的微分控制方程,可以反映各参数间的耦合关系,但难以应用于复杂热力系统的整体分析。

1.3.2 管道的热量迁移模型

管道是连接不同热力部件的必要环节,通过载热流体的流动实现热量的迁移。当管道较短时,可以忽略管道中的热量迁移过程,将管道的进出口合并为同一个温度节点;当管道较长时,管内流体向环境漏热现象显著,同时由于管内流体的流动速度有限,管道的入口温度需要经历一段时间后才能对出口温度产生影响,进、出口温度间存在延迟响应现象,因此,需要建立反映上述特性的管道内热量迁移模型。

以供热管网中的热量迁移过程为例,已有研究考虑埋管深度、供回水管道间距、多层管壁、结构蓄热等因素,分别提出了稳态、动态传热模型来计算流体向环境的漏热。例如, Kouhia 等利用供、回水温度差异的时序平均值来反映管网的整体漏热特性,建立了回水平均温度受入口焓流及漏热热流影响的热平衡方程。该方法将管道视为一个水温均匀的水箱,忽略了热量迁移过程引起的沿程温度分布与延迟响应效应。Benonysson 等和周守军分别对管道中的流体流动过程进行时间和空间离散,并通过能量守恒约束计算管道出口温度。这类方法将有限容积法

分别在拉格朗日坐标系和欧拉坐标系下进行差分应用,因此导出的离散模型精度较高,但计算复杂度较大。此外,部分研究在假定流体流速和环境温度不变的前提下,结合稳态漏热过程的简化线性模型,利用流动延迟时间对环境、入口、出口温度节点进行时间平移来考虑温差漏热和流动延迟的共同影响。然而,这类方法只是将上述两种效应独立分析,简单叠加,没有有效考虑二者之间的耦合影响。

1.3.3 热功转换部件的能量转换模型

依据能量转换的方向,热功转换可以分为涡轮(热转功)和压缩机(功转热)两个大类,并且根据工质的差别又可以细分为汽轮机、燃气轮机等。以汽轮机中进行的热功转换过程为例,考虑蒸汽在汽轮机级间不断膨胀、压力逐渐降低的过程,在集总分析时,常采用弗留格尔公式建立汽轮机流量与级组前后参数的非线性约束模型,实现汽轮机的变工况运行特性分析。徐大懋等提出了特征通流面积概念,反映了汽轮机级段几何特征对通流能力的影响,实现了汽轮机通流模型的高精度改进,并被应用于汽轮机的运行诊断。同时,汽轮机能量转换过程中的能量损失受进排气损失、轴封损失、机械损失等不同因素综合影响,通常采用相对内效率、机械效率等汽轮机效率进行整体描述。通过考虑汽轮机效率的变化,相关研究建立了以热耗率、热经济性等为指标的外特性模型,为机组的能量转换特性分析提供了理论依据。

1.3.4 热力系统传统模型的求解方法

热力系统中包含燃气轮机、蒸汽轮机、压缩机、换热器、泵、阀等众多部件,各部件中存在工质流动、热量传输和热功转换等多类非线性物理、化学过程。理论上,将每个部件/环节的数学模型相互叠加,就可以获得描述系统整体性能与决策变量间制约关系的热力系统整体数学模型,在给定边界条件下,求解上述数学模型即可分析系统在不同工况下的性能,进而研究决策变量对系统性能的影响规律,从而实现决策变量的优化设计。

随着热力系统向大型化、集成化和多能协同化发展,存在多部件集成、多过程耦合、多参数叠加和强非线性等特征,传统建模方法需要引入众多的中间参数来描述系统中相互耦合的物理过程。并且,获得的数学模型既包含了质量守恒、能量守恒等线性方程,也包含了描述部件过程特征的非线性方程,在这些非线性方程中,既包含类似通流方程的多项式方程,又包含类似传热方程的超越方程,各控制方程中的未知变量通常难以表示为决策变量和边界条件的显式函数。此外,实际热力系统运行常常还要受到各种设计边界和安全条件等的限制。因此,从数学性质看,传统数学模型是一个高维非线性隐式方程组,其求解是一个含约