

“微电网与智慧能源丛书”序

微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统，是具备自我控制和能量管理能力的自治系统，既可以与外部电网并网运行，也可以独立运行，可用于有效解决海岛、高原等偏远地区供电问题，也可以克服大规模分布式能源接入对电网运行造成的不利影响，是我国未来新型电力系统建设的重要组成部分。同时，随着人工智能时代的到来，互联网、信息技术将与能源系统高度融合，大幅提高能源系统智慧化水平，这将为能源转型发展带来新的契机。

在 973 计划、863 计划和国家重点研发计划等支持下，近十年我国微电网和智慧能源技术迅猛发展。为推动技术落地，《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》和《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》等文件相继发布，通过相关支持政策的制订，推动了微电网和智慧能源技术的广泛应用，已成功建成一批适应各种场景需求的微电网和智慧能源系统实际工程。

在技术发展与工程实施过程中，一些大学、科研单位和企业取得了大量研究成果，部分技术已经走在了国际前列。为促进微电网和智慧能源领域技术研究和应用的持续发展，推动相关领域优秀科研成果与技术的广泛应用，我们策划并组织了“微电网与智慧能源丛书”。值得欣慰的是，这一丛书还入选了科学出版社 2021 年度重大出版项目。

丛书围绕微电网与智慧能源的基础理论和关键技术，结合已经完成或正在实施的相关领域国家重大研究项目前沿课题，以一线科研人员的优秀成果为依托，分成微电网技术基础、规划设计、保护控制、能量管理、经济运行与智慧能源等部分，力求反映我国微电网与智慧能源领域最新的研究成果，突出科研工作的自主创新性，旨在为学科发展和人才培养贡献力量。

相信丛书的出版将为我国大规模分布式能源的智慧化应用发挥积极的推动作用，助力科研工作更好地为国家能源战略需求服务。



2022 年 4 月 12 日

前 言

能源是人类社会赖以生存和发展的基础,能源系统负责社会所需能源的生产、传输、分配、存储、转化和使用,是现代社会最为重要的基础设施。在全球各国越来越关注能源利用效率、能源系统对环境的影响越来越大以及能源系统自身可持续发展的背景下,不同能源系统的耦合日渐紧密,由此催生了综合能源系统概念。而作为综合能源系统的重要组成部分,用户侧综合能源系统受到越来越多的关注,这是因为一方面,众多变革性的创新技术在该领域不断涌现,在促使用户侧综合能源系统自身不断提升发展的同时,也在深刻改变着整个人类社会的用能方式;另一方面,用户侧拥有大量的灵活调控资源,将其有效挖掘、利用和释放后,将可能彻底改变社会能源系统传统“源随荷动”的运行控制模式,从而促进整个社会能源系统的变革发展。在此背景下,本书对用户侧综合能源系统的多能分析、系统规划、运行调控、市场交易等方面的一些基本概念、理论和方法进行梳理,以期引起读者对该领域研究工作的关注,并希望读者通过本书对用户侧综合能源系统有一个基本认知。

作者所在课题组的诸多研究生,包括卫文婷、王伟亮、王明军、王明深、王萧宇、王梓博、王晗、王越、王慧媛、卢一涵、刘开欣、刘柳、刘晓楠、刘维康、李杭、李卓阳、李承霖、李思源、李晓萌、何哲、张风晓、张涛、张雅青、陈沼宇、林威、周航、周承翰、孟赫、赵宁远、贾超宇、黄德裕、曹严、戚冯宇、戚艳、戚野白、葛路琨、雷云凯、雷杨等的科研工作构成了本书的主要内容,对他们的辛勤工作以及对本书的贡献表示衷心的感谢。在本书撰写过程中,天津大学的穆云飞、穆朝旭、侯恺、王丹、徐宪东、靳小龙、肖迁、徐弢、高爽、金昱、吴昊、王珂、刘泽宇等老师以及河北工业大学的董晓红老师给予了大力支持和帮助;本书初稿承蒙天津大学余贻鑫教授和王成山教授审阅,他们提出了很多宝贵意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

本书相关内容获得国家重点研发计划项目“高耗能工业用户节能与供需互动技术”(2023YFB2407300),国家自然科学基金项目“综合能源系统的稳定性与运行优化”(51625702)、“多元主体博弈下的用户侧综合能源优化理论与方法研究”(U1766210)、“新型电力系统弹性评估与提升基础理论和方法研究”(U23B6006)和“基于多元博弈的用户侧能源产消聚合商电碳交易策略研究”(52277116),973计划前期研究专项项目“节能减排和新能源探索基础研究”(2010CB234600),863

计划项目“智能用电与综合能源利用技术”(2015AA050400)的共同资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2025 年 6 月

目 录

“微电网与智慧能源丛书”序

前言

第 1 章 用户侧综合能源系统概述	1
1.1 能源领域的变革发展催生综合能源系统	1
1.1.1 人类社会主要一次能源的演变	1
1.1.2 社会能源系统及其演变	4
1.1.3 综合能源系统的产生	7
1.2 综合能源系统有助于人类社会可持续发展	8
1.2.1 综合能源系统有助于人类社会实现能源的可持续供应	9
1.2.2 综合能源系统有助于提升人类社会用能安全	10
1.2.3 综合能源系统有助于构建节约型社会	10
1.3 综合能源系统领域的一些关注	11
1.3.1 能源生产环节	11
1.3.2 能源传输环节	13
1.3.3 能源消费环节	14
1.4 用户侧综合能源系统是未来能源系统的关键	15
1.5 本书章节安排	18
第 2 章 用户侧综合能源系统多能流分析	19
2.1 用户侧综合能源系统多能流分析概述	19
2.2 电力子系统的潮流分析模型	22
2.2.1 配电网潮流分析模型	22
2.2.2 几点说明	24
2.3 燃气子系统的能流分析模型	25
2.3.1 不含压缩机的 kn 段管道模型	25
2.3.2 压缩机对应的 mn 段管道模型	27
2.3.3 燃气子系统的能流方程	27
2.4 热力子系统的能流分析模型	28
2.4.1 热力子系统能流分析的基本原理	28
2.4.2 水力方程	30

2.4.3	热力方程	32
2.4.4	多能流分析方程	34
2.5	电/气/热系统耦合环节模型	34
2.5.1	基于能源集线器的耦合模型	34
2.5.2	关于耦合模型的几点补充说明	36
2.6	用户侧综合能源系统多能流分析	38
2.6.1	联立求解	38
2.6.2	分立求解	40
2.6.3	算法选择的几点说明	41
2.7	用户侧综合能源系统多能流分析示意	42
2.7.1	算例一	43
2.7.2	算例二	51
2.8	本章小结	63
第3章	用户侧综合能源系统的多能流优化及最优运行	64
3.1	综合能源系统的多能流优化计算概述	64
3.2	综合能源系统多能流优化的基本模型	65
3.2.1	电力系统最优潮流	65
3.2.2	综合能源系统的最优能流模型	66
3.2.3	几点说明	70
3.3	综合能源系统的日前优化调度	72
3.3.1	电力系统的日前优化调度模型	72
3.3.2	综合能源系统的日前优化调度模型	74
3.3.3	算例分析	77
3.4	考虑不确定性因素的综合能源系统多能流优化	84
3.4.1	综合能源系统的不确定性因素	84
3.4.2	考虑不确定性因素的综合能源系统日前优化调度	86
3.4.3	算例分析	89
3.5	本章小结	94
第4章	用户侧综合能源系统的优化规划	95
4.1	园区综合能源系统规划概述	95
4.2	适于规划的园区综合能源系统模型	96
4.2.1	园区综合能源系统的公共母线结构	96
4.2.2	园区综合能源系统设备模型	97
4.2.3	园区综合能源系统的母线模型	104

4.3 新建园区综合能源系统规划	105
4.3.1 CIES 多阶段规划模型框架	105
4.3.2 CIES 的规划模型	107
4.3.3 算例	111
4.4 既有园区综合能源系统的改造规划	120
4.4.1 升级改造后的 CIES 设备模型	121
4.4.2 CIES 升级改造优化规划模型	122
4.4.3 算例	129
4.5 本章小结	141
第 5 章 用户侧综合能源系统的可靠性及分析方法	142
5.1 可靠性基本概念	142
5.2 电力系统及配电系统可靠性	144
5.3 CIES 可靠性模型及基本分析方法	146
5.3.1 CIES 的可靠性基本模型	146
5.3.2 CIES 可靠性指标的基本计算方法	148
5.3.3 CIES 负荷削减量计算方法	152
5.4 考虑热负荷动态的 CIES 可靠性评估	153
5.4.1 CIES 耦合环节的能源集线器描述及热负荷模型	154
5.4.2 基于分层解耦框架的负荷削减量计算方法	155
5.4.3 计及热负荷特性的用户侧综合能源系统可靠性评估	157
5.4.4 算例分析	159
5.4.5 小结	164
5.5 基于影响增量的可靠性快速评估方法	164
5.5.1 基于影响增量的改进状态枚举法	165
5.5.2 基于影响增量的高阶故障状态消去法	167
5.5.3 考虑负荷水平的可靠性指标计算	168
5.5.4 基于影响增量的可靠性计算流程	169
5.5.5 算例分析	171
5.6 本章小结	174
第 6 章 用户侧综合能源系统韧性	175
6.1 韧性概念及模型	175
6.2 极端事件模型	177
6.2.1 台风模型	178
6.2.2 地震模型	182

6.2.3	冰灾模型	188
6.3	考虑台风影响的系统韧性评估与增强	196
6.3.1	单一台风场景下的系统韧性评估	196
6.3.2	考虑不确定性的多台风场景下系统韧性评估	199
6.3.3	多台风场景下系统薄弱环节识别和韧性增强	202
6.3.4	算例分析	209
6.4	考虑冰灾影响的系统韧性评估与增强	222
6.4.1	冰灾韧性分析模型	222
6.4.2	冰灾韧性薄弱环节定位	222
6.4.3	冰灾期间系统韧性增强	223
6.4.4	算例分析	225
6.5	考虑多灾害场景下的系统韧性评估与增强	236
6.5.1	多类型灾害建模	236
6.5.2	多类型灾害场景下的系统韧性分析	237
6.5.3	算例分析	238
6.6	本章小结	245
第 7 章	用户侧综合能源系统灵活调控资源挖掘	246
7.1	电热泵及其聚合调控	246
7.1.1	单体电热泵模型	246
7.1.2	电热泵集群调控模型	249
7.1.3	电热泵集群调控策略	251
7.1.4	算例分析	253
7.2	楼宇建筑及其聚合调控	257
7.2.1	考虑围护结构的建筑楼宇热动态模型	257
7.2.2	考虑制热分区的建筑楼宇热阻-热容网络模型	258
7.2.3	考虑制热分区的建筑楼宇聚合调控	263
7.2.4	算例分析	265
7.3	电动汽车及其聚合调控	272
7.3.1	电动汽车及充电桩模型	272
7.3.2	电动汽车的可控域	274
7.3.3	电动汽车集群调控框架	275
7.3.4	电动汽车集群调控策略	276
7.3.5	算例分析	281
7.4	多类型用户侧资源的聚合调控	285

7.4.1	频率协调控制策略实现框架	285
7.4.2	系统频率协调控制策略相关参数	286
7.4.3	频率协调控制策略	287
7.4.4	算例分析	291
7.5	本章小结	296
第 8 章	城镇社区微网系统的端对端能量交易	298
8.1	概述	298
8.1.1	P2P 能量交易原理	299
8.1.2	P2P 能量交易形式	301
8.2	P2P 能量交易基本框架	302
8.2.1	UCMS 及传统运营模式	302
8.2.2	UCMS 的 P2P 能量交易框架	304
8.2.3	UCMS 的 P2P 能量交易模型	306
8.2.4	UCMS 集中式 P2P 能量交易示例	309
8.3	分布式 P2P 能量交易	317
8.3.1	产消者自主优化模型	317
8.3.2	分布式 P2P 能量交易框架	319
8.3.3	算例	327
8.4	P2P 能量交易中的能量平衡服务商	343
8.4.1	包含能量平衡服务商的 P2P 能量交易市场	344
8.4.2	EBSP 的交易策略模型	346
8.4.3	算例分析	349
8.5	本章小结	357
第 9 章	综合能源系统集成方法和技术	358
9.1	系统集成概念	358
9.2	基于集成价值的系统集成框架	359
9.2.1	系统集成框架的基本约定	360
9.2.2	集成过程及对象优选	365
9.2.3	系统集成整体框架	368
9.2.4	关于系统集成框架的几点说明	370
9.2.5	系统集成框架应用示例	372
9.3	基于集成框架的园区综合能源系统规划	377

9.3.1 CIES 及设备模型	377
9.3.2 规划模型与方法	380
9.3.3 算例	387
9.4 基于集成框架的园区综合能源系统优化调度	395
9.4.1 基于集成框架的 CIES 优化调度模型	396
9.4.2 CIES 调度涉及的优化模型	402
9.4.3 算例	408
9.5 本章小结	412
第 10 章 总结与展望	413
参考文献	415

现代社会能源系统的发展催生了综合能源系统的概念，其中用户侧综合能源系统作为其重要的组成部分，受到业界越来越多的关注。本章首先简单回顾能源系统的发展历程，探讨构建综合能源系统的历史演进过程，以及综合能源系统面临的挑战，进一步引出用户侧综合能源系统的概念，并介绍本书涉及的内容和构架。

1.1 能源领域的变革发展催生综合能源系统

中文的能量、能源两词均与英文中的 energy 一词密切相关，前者作为一个物理量，重在描述物体所蕴含的做功能力，后者则更关注物体能量的来源与类型。维基百科信息^[1]显示，energy 一词来源于希腊语 ἐνέργεια，最早出现在公元前四世纪希腊哲学家亚里士多德的著作中^[2]，结合当时希腊已具有多座相当规模的大型城市，我们有理由相信，在当时希腊已非常关注、重视与能量、能源相关的问题。现代意义上的能量概念，来自德国科学家莱布尼茨(Leibniz)提出的“生活力”(拉丁文: vis viva)的概念，与后期物理学中的动能概念类似。英文 energy 一词则由英国科学家托马斯·杨(Thomas Young)最早使用，见于其 1802 年发表的演讲。现今，能量和能源作为一个最基本的要素，已贯穿于现代物理学的方方面面。在本书后续章节中，将不再对能量与能源两词进行区分，在不引起歧义的情况下将统一采用能源一词进行表述。

能源是人类社会赖以生存和发展的基础，能源系统负责社会所需能源的生产、传输、分配、存储、转化和使用，是人类社会最为重要的基础设施。在人类社会越来越关注能源利用效率、能源系统对环境的影响越来越大以及能源系统自身可持续发展的背景下，不同能源系统的耦合日渐紧密，由此催生出综合能源系统的概念。

1.1.1 人类社会主要一次能源的演变

在刀耕火种的原始社会，人类逐渐学会了使用火来驱赶野兽、烹饪食品、打造工具，利用风驱动帆船，使用水车进行田地灌溉和食品加工等，使人们逐渐认识到自然赋予能源所蕴含的价值，自此能源逐渐成为人类社会不可或缺的重要组

成部分。但早期人类社会的自然科学知识和技术方面的积累有限，直到第一次工业革命之前，人类社会生产生活所依靠的动力主要来自人力、畜力、水力、风力等。相较于现代社会对能源的高度依赖，当时的社会则更为关注人口、牲畜以及粮秣(用于供养人与牲畜)，因为这些因素往往决定一个国家的强盛与否。

第一次工业革命出现于 18 世纪 60 年代，延续至 19 世纪 40 年代，以煤炭驱动的蒸汽机代替传统的手力或畜力，进而形成大规模的工厂生产为主要标志，因此也被称为蒸汽机革命。第一次工业革命使得社会生产效率大大提升，铁路、航海等领域的技术进步使得各类商品可以在更广阔的范围内进行流通和交易，反过来又促进了社会工业化的发展进程。第一次工业革命的产生，尽管有着极其深刻的社会、历史、科技、经济等原因，但毫无疑问，能源变革在其背后起到了重要的推动作用。第一次工业革命发源地为英国中北部，其有着非常丰富的浅层煤矿，但缺乏木材资源，因此用煤炭替代传统的木材作为稳定的燃料供应(蒸汽机最初由木材驱动，后被品质更优的煤炭替代)，就成为蒸汽机这一重大发明的鲜明标志。为维系日益庞大的工业化生产，必然需要稳定的社会能源供应，因此第一次工业革命推进的过程，也是现代社会能源供应系统逐步建立的过程。

第二次工业革命始于 19 世纪 70 年代，延续至第一次世界大战开战的 1914 年，以电能逐渐渗透至工业领域为重要标志。在这一时期，在钢铁、化学品、电气等领域产生了大量技术创新，并被迅速应用于工业领域，对后世产生了深远影响。在钢铁领域形成的“贝塞麦炼钢法”“西门子-马丁平炉炼钢法”“吉尔克里斯特-托马斯炼钢法”等新技术先后被应用于钢铁行业，大大提升了钢铁产量并降低了生产成本，有力支撑了诸多社会产业的工业化进程，时至今日，钢铁产能仍是分析评估一个国家工业化程度高低的一项重要指标。化学和电气领域的诸多创新，则对后世的生产和生活产生了极其深远的影响。这一时期发明的以煤气、汽油和柴油为燃料的内燃机技术，直接造就了汽车、轮船、飞机等新型产业，并逐渐构建起现代化交通体系；同样，始于这一时期的化学领域的技术创新，使得天然气和石油由最初的辅助能源(主要用于照明)，逐渐演变为当今社会最重要的能源供应方式和工业原料，深刻影响着现代社会的格局。电气领域的创新则主要围绕着电力和通信两个方向展开，前者逐渐造就了日益复杂的电力网络，使得电能成为当今社会最重要的二次能源；后者则从最初的电话、电报等通信方式创新开始，逐渐使人类社会进入信息化时代。

从第一次工业革命后期开始，煤炭就逐渐成为人类社会最重要的一次能源。蒸汽机及其后出现的内燃机、高效电机等技术，在矿业、交通、航运等领域广泛应用，大大提升了煤炭的规模化开发和远距离运输能力，有力支撑了两次工业革命的实现，以及第二次世界大战后全球范围内社会经济与科技的快速发展，时至今日，煤炭仍是很多国家最重要的一种能源供应。图 1-1 来自美国能源信息署

(Energy Information Administration, EIA), 是在 1775~2023 年, 美国年度能源消费的主要来源及占比变化情况^[3]。图中 Btu^①为英文 British thermal unit 的缩写, 为国际上一个常用的能量计量单位。可以看到: 在 1885 年, 煤炭首次超越木炭成为美国最重要的社会能源供应形式; 其后直至 20 世纪末, 煤炭始终是美国重要的一类能源供应形式; 只是到了 21 世纪, 煤炭在其整个社会能源消费中的占比才逐渐降低, 即使如此, 在 2023 年, 煤炭在美国的能源供应来源中的占比仍约为 11%。众所周知, 我国受自然资源及禀赋所影响, 煤炭在社会能源供应中的占比更高, 且在未来很长一段时期内煤炭仍将是我国最重要的一种能源供应方式。石油和天然气尽管很早就被人类发现, 但直到第二次工业革命结束, 它们仍处于从属位置; 其后, 随着两次世界大战以及战后科技的飞速发展, 两者才逐渐成为现代社会最重要的能源形式。从图 1-1 中可以看到, 石油和天然气直到 1950 年后, 占比才先后超越煤炭, 成为美国社会最重要的能源供应来源, 并一直持续到现在。美国这种用能方式的改变, 在世界其他发达国家也可以观察到。

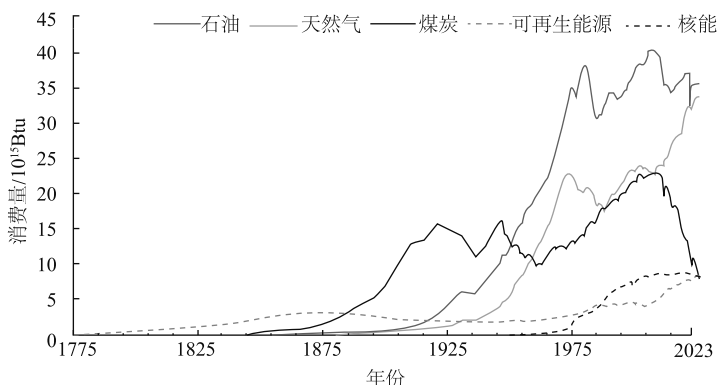


图 1-1 美国 1775~2023 年年度能源消费构成数据

自 20 世纪 70 年代开始, 全球经历了多次化石能源价格高企引发的能源危机, 使得人类社会逐渐认识到过度依赖化石能源的危险, 自此风光等“新型”可再生能源^②受到日益关注。此外, 化石能源属不可再生能源, 终有一天会被耗尽; 过度

① $1\text{Btu}=1.05506\times 10^3\text{J}$ 。

② 风光主要指风力发电和光伏发电, 之所以称其为“新型”可再生能源, 主要基于如下考虑: 第一, 这类新能源很早就存在, 但以往在社会能源系统中的占比很小或只在一些特殊领域应用, 如光伏发电技术在航天领域的应用。只是随着它们在社会能源系统中渗透率的不断提高, 其固有的难预测、强随机、难调控等特征才受到日益广泛的关注, 并成为“新型”可再生能源的一种重要标签。第二, 水能也属于一类重要的可再生能源, 但因其在很多国家得到很好的开发利用, 且与光伏、风电等可再生能源相比, 其可预测性和可调控性更优, 因此一般语境中的可再生能源往往并不包含水能。故采用“新型”可再生能源一词, 目的在于与水能等“传统”可再生能源形式, 以及光伏、风电大规模开发利用前的技术加以区分。为简单起见, 在后续章节中用到的可再生能源, 不加特别强调均指风光等“新型”可再生能源。

使用化石能源引发的环境污染和全球温升等问题,使人类社会寻求可替代能源和实现人类社会能源永续发展问题日益受到世界各国关注。自 20 世纪 80 年代开始,联合国就持续在全球范围内推进可持续发展理念^[4],能源与环境的可持续发展成为其中最重要的议题。其后一系列国际公约和文件的签署,如《联合国气候变化框架公约》(1992 年)、《京都议定书》(1997 年)、“巴厘路线图”(2007 年)、“哥本哈根协议”(2009 年)、《巴黎协定》(2015 年)、“阿联酋共识”(2023 年)等,在推动全球应对气候变化的同时,不断助推全球范围内风光等可再生能源的发展。目前,全球已有百余个国家先后公布了其净零排放路线图^[5],我国已承诺力争在 2030 年和 2060 年之前实现“碳达峰”和“碳中和”。在此过程中,风光等可再生能源必将逐步取代传统的煤炭、石油、天然气等化石能源,成为社会最主要的能源形式。中国工程院项目“我国碳达峰、碳中和战略及路径研究”曾对我国 2020~2060 年各类电源装机进行预测^[6],结果显示:到 2030 年和 2060 年,我国非化石能源发电装机占比也需由 2020 年的 46%分别提高至 64%和 89%,相应的发电量需由 2020 年的占比 36%分别提升至 51%和 92%,毫无疑问,届时风光等可再生能源将成为社会的主导能源形式。

能源是推进人类社会发展的基石,煤炭、石油、天然气等化石能源,逐渐被风光等可再生能源替代的过程,也是人类文明进步和可持续发展能力不断提升的过程。由于风光等可再生能源固有的随机性、难以预测和难以调控特性,其占比在不断提高的过程中,必然给人类社会能源系统带来诸多挑战。

1.1.2 社会能源系统及其演变

如前所述,现代意义的 energy 一词诞生于 1802 年。能源系统(energy system)的概念出现的时间则更晚,一般认为是伴随着社会能源需求的激增,在能源工业规模不断扩大、复杂性不断增加的过程中,人们逐渐意识到需要从系统角度来审视社会能源在开采、传输、分配、使用等过程中的相关问题时,能源系统的概念才逐渐清晰。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)对能源系统的定义为: All components related to the production, conversion, delivery, and use of energy^[7],可译为“能源系统是能源生产、转化、传输、分配和使用过程中,涉及的一切设备和环节的总称”。伴随着人类社会能源供应来源和方式的变化,社会能源系统也经历了从不同环节相对独立发展到不断耦合和集成优化的发展过程。

1. 社会一次能源系统的演变与发展

至第二次工业革命结束时,煤炭成为社会最主要的一次能源供应源,石油和天然气的用量还相对较少。煤炭作为一种固体燃料易于存储,其大规模和远距离的输运主要依靠公路、铁路、海运等交通工具。当时的社会一次能源系统可看作

以煤炭为主要载体,由煤炭的规模化开采、输运、分配和使用等环节构成,能源系统主要关注自身各环节(如煤炭的开采、转运、存储、消费及交易等)之间的有机衔接,外部耦合主要来自交通运输系统,因为煤炭需经由各类交通工具实现快捷和低成本的输运和分配。

两次世界大战及战后的全球经济快速发展,使得石油和天然气成为世界范围内最重要的一次能源。石油、天然气的输运方式较煤炭更为灵活,一方面,它们可借助传统的交通工具进行输运,此时天然气一般需压缩为液化天然气(liquefied natural gas, LNG);另一方面,它们还可以借助更为便利的管线输运,而后者具有可远距离、低成本、大容量输送的优势。因此,自20世纪中叶之后,随着石油和天然气成为欧美主要发达国家最重要的一次能源供应来源,多数发达国家建立起了石油和天然气的管网输运系统。考虑到在当今社会,石油作为燃料主要用于交通运输业,剩余部分则主要作为工业原料用于工业生产,如美国2023年石油消费的70%用于交通运输业,24%用于工业生产,两者占据主要部分^[3];无论是生产、传输还是分配环节,石油与其他能源系统的耦合都相对较少;石油和天然气在通过网络传输以及在终端环节使用时,具有很多相似的特征,因此,在本书后续章节中,仅以天然气系统为例进行讨论,而不再对两者进行区分。在欧美发达国家,天然气在社会终端用能中占比较高,因此其已构建起非常复杂的燃气输配管网系统^[8]。即使在天然气占比相对较低的我国,目前大中城市也构建了燃气供应管网,负责为居民和工业用户提供稳定的燃气供应。随着我国“双碳”目标的推进,天然气在一次能源中的占比不断提高,我国燃气管网的覆盖范围也会不断增加。在这一发展过程中,由能源网络作为核心骨架的能源系统的概念越发清晰。

随着世界各国净零排放时间表的确定和相关工作的不断推进,以风光为代表的可再生能源在人类社会能源中的占比将不断提升。这类能源具有分布范围广但能量密度低的特点,一般需要将其转化为电、热、化学燃料等二次能源,以实现大规模开发、传输和利用。不难预见,在可再生能源主导的未来,二次能源网络及二次能源系统的重要性将更为凸显。

早期,人类主要使用通过开采获得的天然气,而随着技术的进步,现已可以通过一定技术生产人工合成天然气,如通过电转气(power to gas, P2G)和再甲烷化技术,利用电能和捕捉的二氧化碳生成人工合成天然气。为便于描述,本书后续章节将统一采用燃气一词来表述,不特别说明时,将不再区分天然气和人工合成天然气。

2. 社会二次能源系统的演变与发展

二次能源一般指由一次能源经转化后形成,并被人类社会利用的能源形式,常见的二次能源包括电能、热能、氢能、化学能(各类化学品燃料)。二次能源网络负责这些能源的传输和分配,目前最常见的两类二次能源网络是电网和热力网。

从历史的角度来看,二次能源系统及相关技术出现得略晚一些,有据可查的电网和热力网最早出现于 19 世纪 70~80 年代,而输油管线最早出现于 19 世纪 60 年代,故可近似认为二次能源网络和一次能源网络是同时建设和发展的。

与电网相对应的电力系统,现已成为全球最重要的二次能源系统。众所周知,第二次工业革命开启了人类社会电气化时代,此后电能作为清洁便利的二次能源,在社会用能中的占比不断提高。社会电气化推进的过程,也是日益庞大、复杂和互联电力系统建立的过程。美国于 20 世纪 60 年代实现了东部和西部两大交流电网的互联,目前整个北美电网由东、西部两大交流电网以及阿拉斯加、得克萨斯和魁北克三个小型交流电网互联而成,服务人口约 4 亿人,是世界上最大的互联电网之一。欧洲互联电网(European Network of Transmission System Operators for Electricity, ENTSO-E)是随着欧盟的建立与发展,逐渐建成的世界上另一个大规模互联电力系统,目前已有包含欧盟在内的 30 多个国家接入,服务人口超过 5 亿人。我国在新中国成立之后,逐步形成了东北、华北、华中、华东、西北、南方等区域电网,于 2000 年前后初步实现全国电网互联。此后,随着超/特高压交流和直流输电技术的进步、发展和大量应用,我国的电力系统已成为世界上最大和最为复杂的互联电网之一,服务人口超过 14 亿人。电力系统不断发展和壮大的原因,一方面,在于电能作为清洁的二次能源,易于远距离、大容量输送,且非常容易转化为其他能源形式,使其在社会终端用能中的占比不断提升。人类社会的很多用能环节,刚开始采用其他能源形式,后逐渐被电能所替代,即所谓的电气化,如照明设备先后采用过燃油、燃气,后逐渐被电灯所替代;铁路机车最早采用木炭、煤炭、石油驱动,也已逐渐被电力机车所替代;交通工具中的汽车、舰船、飞机等,正在经历从化石能源向电力驱动的过渡,等等。另一方面,在于很多一次能源只有借助电力系统,才能实现更大规模的开发利用和更广范围的配置,风光等可再生能源即属于这类情况。因此,随着电能在社会用能中占比的不断提高,在大容量低成本电力储能技术问题尚未完全解决的情况下,构建日益复杂的电力系统就成为一种必然选择。

热力网主要表现形式是图 1-2 所示的城镇集中供热(district heating)系统,它是另一类常见的二次能源系统^[9]。尽管早在 14 世纪,就有利用地热能作为房屋供应热水的记载,可视为集中供热系统的雏形,但商业运行的集中供热系统,国际上公认出现于 19 世纪 70 年代后期的美国纽约^[10]。与电网和燃气网不同,供热系统无论采用热水还是蒸汽作为媒介,都需要供水管和回水管完成媒介的传输;此外,供热系统存在很多换热装置,以保证热力管网的运行安全和实现热能的灵活传递,如图 1-2 所示。至今集中供热技术已历经五代,发展趋势在于尽量减少供热过程中的热量损失(如降低媒介与环境之间的温差,从而降低输送过程中的热量损耗)和减少温室气体排放(如采用可再生能源供能)。由于各国所处地理位置、发展水

平、居住用能习惯不同，城镇集中供热在全球范围内的应用状况不尽相同。欧洲是集中供热应用较为广泛的地区，自 20 世纪 50 年代开始就积极推动集中供热技术的应用，并与热电联产(combined heat and power, CHP)等技术相结合，以提高一次能源利用效率和减少温室气体排放。此外，欧盟还在积极探讨供冷、供热市场机制的建设，希望通过市场化手段促进该领域的技术进步和成本降低。欧洲高纬度国家的集中供热普及率高于低纬度国家，如偏北的冰岛、丹麦、爱沙尼亚等，50%以上的建筑采用了集中供热；而南部的希腊、意大利等地则主要在一些大型城市中采用了集中供热系统。北美地区受居民居住习惯的影响，北部大型城市多构建了集中供热系统；除此之外，在一些居民相对集中的社区，也构建了相对独立的社区集中供热系统。中国与北美地区类似，在秦岭-淮河以北地区，城市区域内基本普及了集中供热，秦岭-淮河地区仅有少量社区自建了社区级的集中供热系统，而其南部则较少采用集中供热。

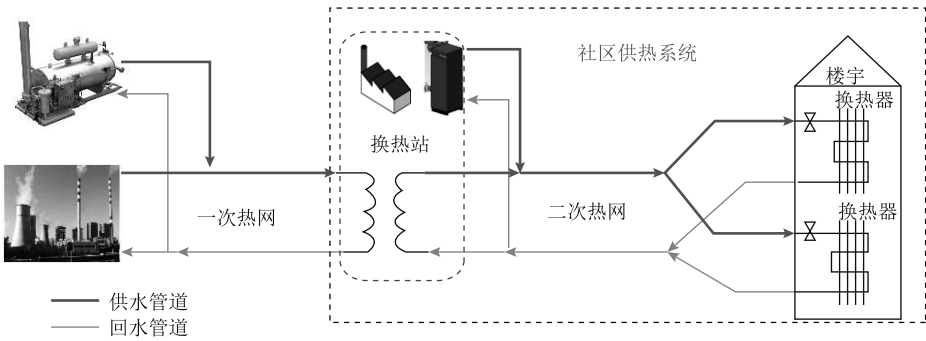


图 1-2 集中供热系统示意图

氢气作为一种重要的工业原料和中间产品，现已广泛用于众多工业生产过程；同时，它作为一种清洁的二次能源，在燃烧过程中不产生温室气体，越来越受到社会各界关注。目前，学术界和工业界都在寻求通过可再生能源实现的高效氢制备技术，氢气在未来社会二次能源中必然承担更为重要的角色。与燃气类似，氢气可通过管网进行方便的传输，但到目前为止，全球在运的纯氢气传输管网仅约 3000km^[11]，且目前氢气仍主要用于工业领域，在社会二次能源中所占比重仍较小^[12]。此外，一些国家正在尝试将一定比例的氢气直接混入燃气系统，然后通过燃气管网进行输送，或者将可再生能源产生的氢气，通过再甲烷化后形成人工合成天然气，再进行传输和利用，因此，在本书中的二次网络中将暂不讨论纯氢气的传输网络。

1.1.3 综合能源系统的产生

回顾人类社会一次能源系统和二次能源系统演变的过程，可以发现，不同能源

系统间的耦合和联系日渐紧密^[13]，最终将形成图 1-3 所示的综合能源系统。

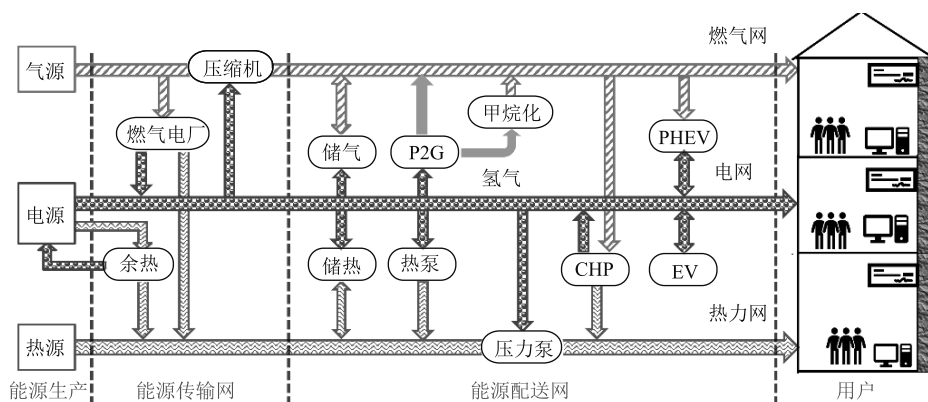


图 1-3 综合能源系统示意图

EV-电动汽车；PHEV-插电式混合动力汽车

无论是一次能源系统，还是二次能源系统，在其早期的建设、运营和管理过程中，不同部分均相对独立。但随着系统规模的不断扩大、需求的不断提高和技术的不断进步，不同能源环节之间的耦合越来越多、越来越普遍。煤炭的开采和运输，最初主要依赖于人工或畜力；其后，以煤炭为燃料的蒸汽机，被广泛应用于其生产和运输过程；到如今，煤炭开采多数采用电力驱动的机械，运输则常用电力或燃油驱动的机车、汽车或货船。石油和天然气的开采和输运，由最初的独立运行（如燃气管网内的压缩机最初多用燃气驱动，现今很多已采用电力驱动），到如今电能几乎已深入其生产、输运、转换和使用的每个环节。电、热二次能源系统，从其出现时就与一次能源系统存在紧密联系——系统始端的各类能源变换设备，将它们与一次能源系统紧密耦合在一起，能量的最初流向是由一次能源系统流向二次能源系统。随着技术的发展进步，现在已出现了一些新型能源转换技术，使得能量由二次能源系统向一次能源系统流动成为可能，如 P2G 技术，可将电网中富余电能，通过化工过程形成人工合成天然气，实现能量由二次能源系统向一次能源系统的转移。尽管该技术目前仍处在研究和实验阶段，距离广泛的商业化应用尚需时日，但因其在生产过程中会采用碳捕捉技术，可有效减少温室气体排放而被寄予厚望。总之，随着技术的进步，一二次能源系统间的耦合会更为紧密，最终形成如图 1-3 所示的综合能源系统是一个不争的事实。

1.2 综合能源系统有助于人类社会可持续发展

众所周知，能源是人类赖以生存和发展的基础，是国民经济的命脉，如何确

保人类社会能源的可持续供应，同时减少用能过程中的环境污染，是当今世界各国共同关注的热点。考虑到煤炭、石油、天然气等传统化石能源不可再生，终将走向枯竭，因此，提高能源利用效率、发掘新能源、实现可再生能源的规模化开发，就成为解决人类社会发展中日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间矛盾的必然选择。而打破原有各供能系统单独规划、单独设计和独立运行的既有模式，进行社会能源系统的一体化规划设计和运行优化，并最终构建统一的综合能源系统，则成为适应人类社会能源领域变革，确保人类社会用能安全和长治久安的必由之路。

1.2.1 综合能源系统有助于人类社会实现能源的可持续供应

综合能源系统及相关技术受到越来越多关注的一个根本原因在于，它有助于传统一次能源利用效率的提升，有助于可再生能源的安全经济消纳，有助于社会能源的可持续发展。众所周知，气候变化和环境污染是当代人类社会共同面对的最严峻挑战，而一次化石能源的过度开发利用是其重要诱因，因此提高一次能源利用效率和实现可再生能源的规模化开发利用，就成为世界各国应对上述问题的不二选择。而无论是一次能源利用效率的提升，还是可再生能源的规模化开发利用，都离不开综合能源系统和相关技术的支持。

首先，从提高能源利用效率的角度考虑，无论是常规一次能源还是可再生能源，进行能源梯阶利用无疑是提高其综合利用率的一种有效途径。例如，基于燃气或煤炭的 CHP 技术，利用高品位能量发电，低品位能量供热或供冷，用能效率可达 80% 以上；聚合了光电和光热的改进太阳能利用技术的太阳能综合利用率可达 50% 以上，远高于单纯的光伏发电和太阳能集热应用。而能源梯阶利用的过程，就是多种能源协同工作的过程，因此欲实现各类能源的梯阶式开发，最大限度地提高其利用效率，无疑需要各供能系统的协调配合。

其次，可再生能源的规模化开发利用，更离不开综合能源系统及相关技术的支持。考虑到多数可再生能源（如风能、太阳能等）具有能流密度低、分散性和间歇性强等特点，同时考虑到冷热能难以进行长距离传输，在进行风能、太阳能等可再生能源规模化开发时，首先需依托电网实现高品位能源的远距离输送，较低品位能源则需实现就地消纳。在这一过程中，一方面，需要电力系统在规划、设计及运行过程中充分考虑可再生能源发电并网运行的要求；另一方面，间歇式可再生能源发电并网后引起电力系统的一系列问题，也希望通过不同能源系统间的有机协调，实现低成本的解决，如利用电力需求侧响应技术来协调大量电加热、储冷、储热设备，为电网提供灵活调控资源，以抵消可再生能源发电波动的影响，而这一过程就是多种能源协同工作的过程。

综合能源系统相关技术有利于提高一次能源利用效率，有利于可再生能源的规

模化开发利用,有利于减少温室气体及污染物排放,有助于人类社会能源的可持续发展。对于我国而言,它还有助于我国降低能源对外依存度,提高能源供应安全,有助于我国“双碳”目标的实现,助力我国社会经济健康、和谐和可持续发展。

1.2.2 综合能源系统有助于提升人类社会用能安全

综合能源系统及相关技术有利于提高社会供能系统的安全性和自愈能力,有利于增强人类社会抵御自然灾害的能力,对保证国家安全也有重大意义。传统的社会能源供应系统,如供电、供气、供热、供冷等系统,往往单独规划、单独设计、独立运行,彼此缺乏协调,可能造成社会供能系统整体安全性低、自愈能力差。在2008年初我国南方的低温雨雪冰冻灾害中,起初的电力故障引发了多米诺骨牌效应,不仅殃及其他供能系统,还引发交通、通信、金融、环境等多个要害部门瘫痪,造成难以估量的社会经济损失,还危及国家和社会安全。这次灾难揭示出供电系统的一个致命隐患,即在大电网瓦解的极端情况下不具备足够的自愈能力,而电力供应是其他供能系统正常运行的前提,供电系统的这一缺陷直接导致社会供能系统整体安全性和自愈能力低下。而相关研究已清楚表明,单纯通过加大某一供能系统(如供电系统)的投入来提高社会供能系统整体安全性和自愈能力,会面临难以承受的资金投入压力,并会造成社会资源的极大浪费。

未来社会供能系统整体安全性和灵活性的提升,离不开彼此间的协调配合,离不开综合能源系统相关技术的支持。一种被寄予厚望的解决方案,是将分布式微型能源系统(即小型综合能源单元,也常被称为微网或微电网)与传统的社会供能系统协同配合,实现用户分区分片的灵活供电和供能,通过合理规划和设计,在灾难性事件发生并导致电网瓦解时,利用局部可获得的能源(可再生能源、燃气等),保证对重要负荷供电以利于大电网快速恢复,同时减小对其他社会供能系统的影响,进而降低大电网停电造成的社会经济损失。此外,分布式微型能源系统还可利用燃气、冷能、热能易于在用户侧存储的优点,与电网互为配合,实现电能为用户侧分布式替代存储,从而间接解决电能无法大容量存储这一人类社会难题,在提高电网运行安全性和灵活性的同时,也增强了社会供能系统的整体安全性和自愈能力。

1.2.3 综合能源系统有助于构建节约型社会

综合能源系统及相关技术有利于提高社会供能系统基础设施的利用率,有利于提高社会资金利用率,有利于节约型社会的构建。社会各能源供应系统,如供电、供气、供热、供冷等系统的负荷需求均存在明显的峰谷交错现象,但以往各个系统单独规划、单独设计、单独建设、独立运行,各自只能按各自高峰负荷来设计建造,由此造成设备利用率极为低下。例如,美国的统计结果显示,其供电