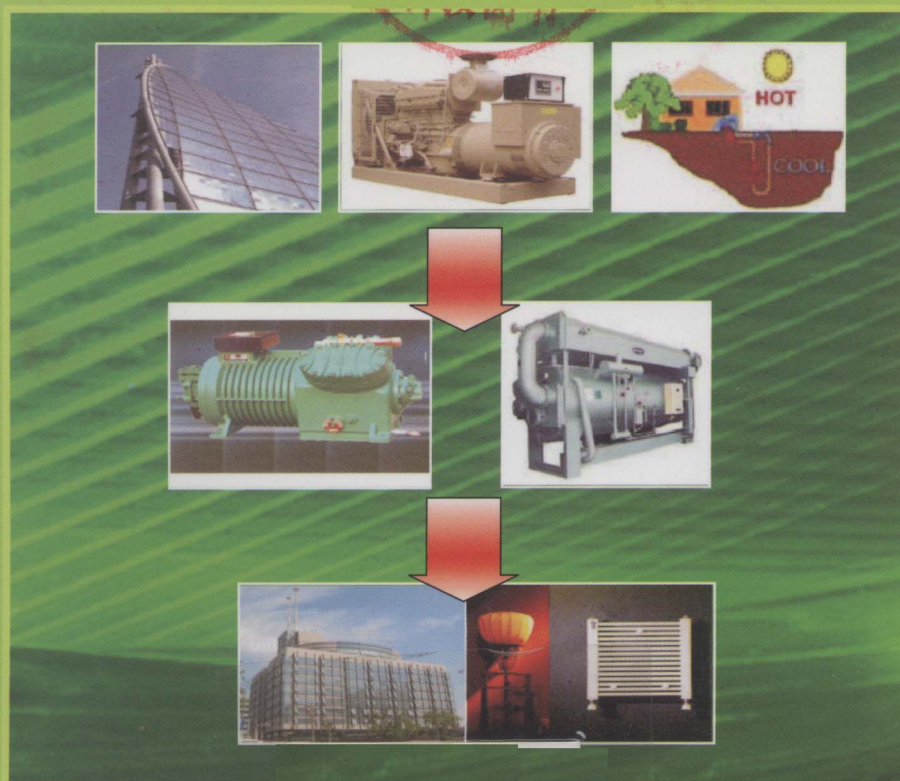


节电技术应用实践丛书

分布式冷热电联产系统 装置及应用

金红光 郑丹星 徐建中 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

分布式冷热电联产系统 装置及应用

金红光 郑丹星 徐建中 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

从国家的长远发展来看,必须大力推进节能和科学用能。分布式冷热电联产系统在科学用能和能的梯级利用原理指导下,可以实现能源的更高效利用,完全符合建设节约型社会的要求,是解决我国能源与环境问题的重要技术途径,是构建新一代能源系统的关键技术。

本书的核心内容是编著人员多年从事分布式冷热电联产系统研究成果的归纳和总结,同时也尽可能介绍最新的相关信息。第一章介绍了分布式冷热电联产系统的概念、应用领域、产生背景及政策等问题。第二章介绍了负荷指标、负荷动态以及系统负荷变化与系统性能的关系。第三章是本书的核心,即分布式冷热电联产系统集成技术。在介绍联产系统的多种构成的基础上,提出了系统设计工况和全工况条件下的联产系统集成原则,同时给出了系统性能评价指标,构思了可再生能源与化石能源互补的冷热电联产系统。第四章则介绍联产系统的核心技术,即动力技术,对燃气轮机、内燃机以及燃料电池技术进行了系统介绍。第五章和第六章从实现冷热电联产和解决动力装置中低温余热利用的角度,介绍了当前最为先进可行的技术方法,包括吸收式制冷、吸收式热泵、吸收式除湿和蓄冷技术等。第七章则详细介绍了国内外若干分布式冷热电联产系统的工程实例。

本书不仅希望有益于读者对分布式冷热电联产技术的了解,更希望有益于同行对类似工程项目工作进行比较与参考。希望本书能对相关领域的技术管理、设计和科研人员有所启发。

图书在版编目(CIP)数据

分布式冷热电联产系统装置及应用 / 金红光, 郑丹星, 徐建中
编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6747-7

I. 分… II. ①金…②郑…③徐… III. 热电厂—热能—综合利用—装置 IV. TM611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018029 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 486 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

分布式冷热电联产系统是集小型燃气轮机、内燃机、吸收式冷热水机、能源综合控制等高新技术和设备为一体的先进高环保型能源系统。分布式冷热电联产系统在科学用能和能的梯级利用原理指导下,能源利用率可以达到70%~90%,与分产系统相比,节能率可以达到20%~40%,实现大幅度节能,减少环境污染,符合建设节约型社会的要求。近年来,分布式冷热电联产系统在国际上得到快速发展,在国内也引起了广泛关注。从国家的长远发展来看,为了解决能源这一国民经济和社会发展的瓶颈问题,必须大力推进节能和科学用能,这在国家中长期科技规划战略研究中是能源界已达成的共识。分布式冷热电联产系统是解决我国能源与环境问题的重要技术途径,是构建未来新一代能源系统的关键技术。

本书的目的是从科技层面对分布式冷热电联产系统进行全面阐述。本书的核心内容是编著人员多年从事分布式冷热电联产系统研究的归纳和总结,同时也尽可能介绍最新的技术发展动态和信息。

本书第一章从介绍科学用能与能量梯级利用的基本原理开始,阐述了分布式冷热电联产系统的概念和应用领域,介绍了技术产生和发展的国际、国内背景,并讨论了在我国发展所面临的技术、政策等方面的问题。针对采用冷热电联产系统的用户应该如何切实做好负荷需求分析的问题,第二章从负荷指标、负荷动态以及冷热电联产系统负荷变化与系统性能的关系,进行了较详细的阐述。第三章是本书的核心——分布式冷热电联产系统集成技术。在介绍联产系统的多种构成形式的基础上,从系统层面提出了设计工况和全工况条件下的联产系统集成原则,同时提出了热力学性能、变工况性能等系统性能评价指标。作为典型示例,构思了可再生能源与化石能源互补的冷热电联产系统。第四章、第五章和第六章是分布式冷热电联产系统涉及的主要技术。其中,第四章介绍联产系统的核心技术——动力技术,对主要采用的燃气轮机、内燃机以及燃料电池技术进行了系统介绍。第五章和第六章从实现冷热电联产和解决动力装置中低温余热利用的角度,介绍当前先进可行的技术方法,包括吸收式制冷、吸收式热泵、吸收式除湿和蓄冷技术等。第七章详细介绍了国内外多个分布式冷热电联产系统的工程实例,不仅希望有益于读者对分布式冷热电联产技术的了解,而且希望有益于读者在开展类似工作时进行比较与参考。

本书由中国科学院工程热物理研究所金红光、徐建中、隋军、冯志兵,北京化工大学郑丹星以及东莞理工大学杨敏林六位同志编著。其中,第一、三章由金红光研究员执笔,第二、四章由隋军副研究员执笔,第五、六章由郑丹星教授执笔,第七章由杨敏林副教授和冯志兵博士执笔,蔡睿贤院士担任顾问。

感谢国家自然科学基金委员会为本书提供的支持。在本书的编写过程中,得到了崔平、黄纯浩、张国强、宿建峰和吴卉等同志的各种帮助,在此一并表示感谢。本书可供冷热电联产技术相关领域的技术管理、设计和科研人员使用,也希望本书能对建筑、园区和工业过程

供能、可燃气回收利用、工业节能等领域的技术人员有所启发。

限于作者理论水平和实践经验，本书不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

金红光 郑丹星 徐建中

于北京

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 科学用能与能的梯级利用	1
一、科学用能	1
二、能的梯级利用原理与技术	4
第二节 冷热电联产系统与分布式能源系统	7
第三节 国外冷热电联产系统发展与应用	10
第四节 我国冷热电联产系统发展概况	13
一、我国冷热电联产系统应用进展	13
二、我国冷热电联产系统发展中面临的问题与解决途径	15
第二章 用户冷热电负荷	17
第一节 计算负荷的指标法与静态负荷	18
一、电力负荷的指标法	18
二、热负荷的指标法	19
三、冷负荷的指标法	21
四、负荷计算指标法的缺陷	22
第二节 冷热电联产系统动态负荷与计算方法	23
一、动态电负荷计算方法	25
二、动态热负荷计算方法	27
三、动态冷负荷计算方法	30
第三节 负荷动态变化与冷热电联产系统的关系	34
一、冷热电联产系统负荷动态特征	34
二、动态负荷变化与冷热电联产系统耦合	34
第三章 冷热电联产系统集成	46
第一节 冷热电联产系统的分类与典型流程	46
一、系统分类	46
二、典型流程	49
第二节 冷热电联产系统的集成原则	55
一、化学能和物理能的综合梯级利用	55
二、热的梯级利用	56
三、正循环和逆循环的耦合	59
四、多种动力系统的耦合	61
五、系统深度集成	62
六、多能源互补系统	64
七、系统配置与调控优化的全工况系统集成	66
八、主动蓄能的全工况系统集成	68
第三节 冷热电联产系统性能	70
一、热力学性能	70
二、系统节能特性评价	72
三、变工况性能	75
四、环保性能指标	76
五、安全可靠性能	77
六、经济性	78
第四节 可再生能源与化石能源互补的冷热电联产系统	80
一、系统特色	81
二、系统概述	82
三、系统技术经济分析	85
第四章 动力系统及主要部件	90
第一节 概述	90
第二节 燃气轮机	92
一、概述	92
二、压气机	94
三、燃烧室	98
四、燃气透平	103
五、燃气轮机热力循环原理	105

六、燃气轮机全工况特性	108
七、微型燃气轮机	110
八、燃气轮机与冷热电联产	112
第三节 内燃机	115
一、概述	115
二、内燃机的构造与工作原理	117
三、内燃机的性能指标	123
四、内燃机的工况与特性	128
五、燃料	132
六、内燃机与冷热电联产	133
第四节 燃料电池	135
一、概述	135
二、磷酸型燃料电池 (PAFC)	140
三、熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)	143
四、固体氧化物燃料电池 (SOFC)	145
五、燃料电池与冷热电联产系统	147
第五章 制冷与热泵	149
第一节 概述	149
一、制冷机与热泵的分类	150
二、工作方式	151
三、性能系数	153
四、升温幅度	154
第二节 机械压缩式制冷	154
一、蒸汽压缩式制冷循环的原理	154
二、制冷工质	157
三、活塞式、螺杆式和离心式的冷水机组	159
四、压缩式制冷循环的变工况特性	163
第三节 吸收式制冷	166
一、吸收式制冷循环的原理	166
二、溴化锂吸收式制冷机的分类	169
三、溴化锂吸收式机组的变工况特性	174
四、氨吸收式制冷机	181
五、其他热制冷方式	188
第四节 热泵	191

一、机械压缩式热泵	191
二、吸收式热泵	193
三、利用环境热源的热泵系统	196
第六章 蓄热/蓄冷与除湿	200
第一节 蓄热技术与蓄热材料概述	200
一、显热式蓄热	201
二、相变蓄热	202
三、热化学过程蓄热	205
第二节 水蓄冷空调系统	206
一、概述	206
二、自然分层水蓄冷系统	207
三、水蓄冷槽蓄冷量和体积的确定	208
第三节 冰蓄冷空调系统	209
一、概述	209
二、完全冻结式冰蓄冷空调系统	210
三、密封件式冰蓄冷空调系统	212
第四节 共晶盐蓄冷空调系统	213
一、共晶盐蓄冷系统布置形式	214
二、共晶盐蓄冷系统流程	214
三、共晶盐蓄冷系统的蓄冷和释冷特性	215
第五节 低温送风系统	216
一、概述	216
二、低温送风系统的构成形式	217
三、冰蓄冷应用	218
第六节 除湿	220
一、概述	220
二、除湿基础	221
三、冷却除湿	224
四、液体吸收式除湿	225
五、固体吸附除湿与转轮除湿	232
第七章 冷热电联产系统的应用案例	237
第一节 成都美好花园分布式冷热电联产系统	237
一、项目背景	237
二、系统概况	237
三、系统的运行和经济性	239

四、简评	239
第二节 东莞信泰光学工业园区能源中心	240
一、项目背景	240
二、园区能源需求与系统集成的总体思路	240
三、能源中心冷热电联产系统	240
四、简评	243
第三节 奥斯汀区域能源项目	243
一、项目背景	243
二、项目流程	243
三、主要部件性能参数	244
四、项目实施与运行情况	244
五、简评	245
第四节 Beloit Memorial 医院联产系统	246
一、项目背景	246
二、系统概况	246
三、系统的运行和经济性	247
四、其他方面的考虑	251
五、简评	252
第五节 New Belgium 酿酒厂联产系统	252
一、项目背景	252
二、系统概况	253
三、系统的运行和经济性	254
四、经验和教训	255
五、简评	256
第六节 伊利诺斯大学联产系统	256
一、项目背景	256
二、东校区联产系统	256
三、西校区联产系统	264
四、简评	265

第七节 达科他天然气液化储备中心联产系统	266
一、项目背景	266
二、系统概况	266
三、其他	267
四、简评	268
第八节 巴塞罗那文化论坛项目	268
一、项目背景	268
二、系统概况	268
三、项目实施与运行	269
四、简评	270
第九节 马德里机场冷热电联产系统	270
一、项目背景	270
二、系统概况	270
三、系统的运行	272
四、简评	272
第十节 NTT 武藏野研究开发中心本馆的冷热电联产系统	272
一、项目背景	272
二、系统特征	273
三、运行实效	276
四、简评	276
第十一节 惠比寿地区区域冷热电联产系统	277
一、项目背景	277
二、系统概况	277
三、运行实效	279
四、简评	280

附录	281
----------	-----

参考文献	299
------------	-----

第一章 概述

第一节 科学用能与能的梯级利用

一、科学用能

能源是当前国内外高度关注的重大战略问题。未来世界能源的发展趋势呈现三个特点：①人类对能源的需求仍呈不断上升之势。预计2020年全球能源需求总量比2000年将增长50%以上，2050年再增长1倍以上，能源供应形势紧张，并且在一段相当长的时间内，化石能源仍是主要的一次能源。世界一次能源消费结构及发展趋势如图1-1所示；②环境保护对能源结构的影响日趋增强。对化石燃料的长期依赖和过度开发，已经造成地

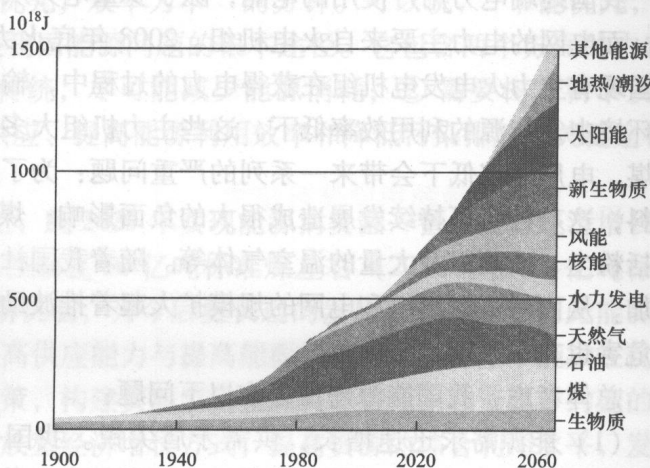


图1-1 世界一次能源消费结构及发展趋势

球环境的严重恶化。未来的能源结构将更多的受环境保护的影响，逐步建立可持续发展的能源体系；③高新技术对能源技术发展的影响也将日益增强。以燃料多元化、设备小型化、网络化、智能化、环境友好为特征的新一代能源系统是未来能源技术发展的趋势。

我国的社会经济持续快速发展，小康目标初步实现，人民生活水平显著改善，国际地位日益提高。但是，由于人口众多，人均资源相对匮乏，能源、资源及环境问题突出。中国经济自2003年进入新一轮快速增长周期以来，煤、电、油等能源出现紧缺，经济社会发展受到能源瓶颈的严重制约，未来中国石油对海外资源过度依赖和国际能源市场不可预测性产生的能源安全问题，也给中国经济的可持续发展敲响警钟。同时，环境压力要求中国逐渐降低煤在整个能源体系中的比重，利用全球油、气资源加快对煤的替代，同时加大可再生能源的开发，使能源结构向有利于环境的方向转变。

目前，中国能源利用率只有约33%，比国外先进水平低10个百分点左右，相当于每年多消耗4~5个大庆油田的原油产量。根据人均GDP为1万美元时人均能耗的统计指标，美国在20世纪60年代达到这一指标时人均消耗8t多标准煤。到20世纪70年代，英国也达到这一水平，人均消耗标准煤降到6t多。20世纪80年代，日本人均GDP达到1万美元时，人均消耗标准煤4.1t，20世纪90年代末韩国实现这一目标时，人均能耗3.9t标准煤。我国

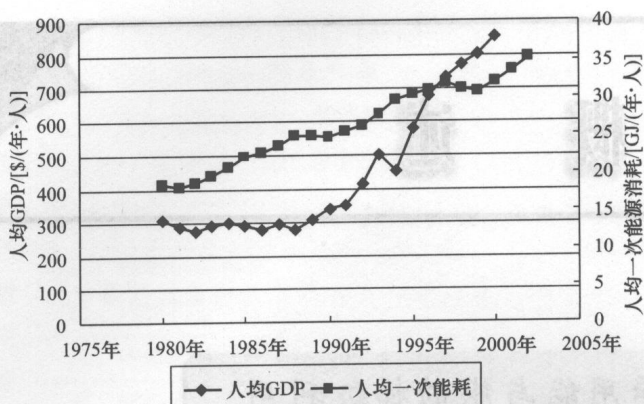


图 1-2 我国历年人均 GDP 与人均一次能源消耗

历年人均 GDP 与人均一次能源消耗如图 1-2 所示。根据预测，到 2050 年，我国人口达到 16 亿，人均 GDP 将达到 1 万美元，即使按照传统工业化国家的最低标准，人均能耗 4t 标准煤计算，那么，总能耗将达到 64 亿吨标准煤，这是无论如何难以实现的。解决经济发展和能源之间的矛盾，我们必须走新型工业化国家的路子，即人均能耗应控制在 2.5 ~ 3t 标准煤之间，这样的话，总能耗为 40 亿 ~ 48 亿 t 标

准煤，才有可能实现。

我国终端电力用户使用的电能，除了少量电力从自备发电机组获得外，几乎全部来自电网，而电网的电力主要来自火电机组。2008 年底火力发电量占我国全部发电量的 82.86%。我国现有主力火电发电机组在获得电力的过程中，输入能量的大多数未被有效利用即被释放到环境中，能源的利用效率低下。这些主力机组大多数采用蒸汽朗肯循环，使用的燃料主要为煤。电厂效率低下会带来一系列的严重问题：为了满足用户的电力需求需要消耗更多化石燃料，这对社会可持续发展造成很大的负面影响；煤的直接燃烧会带来严重环境污染问题，包括粉尘、酸雨以及大量的温室气体等。随着我国社会、经济的快速发展，用电需求将大幅增加，从而对火电机组和电网的规模扩大起着推波助澜的作用，与此同时电网事故带来的潜在危害也在不断增加。

总体考虑，我国能源建设存在以下问题：

- (1) 能源需求迅速增长，供需矛盾尖锐。我国化石能源资源不丰富，人均占有量低，随着经济和社会的迅速发展，供需缺口不断扩大，能源供应紧张问题将日益突出。
- (2) 能源结构不合理，优质清洁能源所占比例低。
- (3) 能源利用效率低，浪费惊人。我国能源利用率比国际水平低约 10%。
- (4) 环境污染更加严重。减排治污、保护生态刻不容缓。
- (5) 国际竞争逐年加剧，能源安全问题突出，全球化战略势在必行。

可以说，能源问题是制约我国经济和社会发展的长期“瓶颈”，是必须始终高度重视的重大问题。

“节能”包括“节约”和“科学用能”两个层面的含义。节约是指通过倡导“勤俭节约”等宣传教育手段，以及减少跑冒滴漏、制定“节能规范”等管理手段，提高人的自觉性和节能管理水平，以达到节能的目的。节能的另一个层面是科学用能。科学用能从能的梯级利用、清洁生产、资源再循环等基本科学原理出发，寻求用能系统的合理配置，深入研究用能过程中物质与能量转化的规律及应用，达到提高能源利用率和减少污染，最终减少能源消耗的目的。科学用能强调依靠科学技术来节能和提高能源利用率，旨在全面、切实地推进循环经济的发展，是实现节能的根本途径，是能源科技发展的必然结果。

“科学用能”主要包含三个层面的含义：① 通过“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”的方式，不断提高能源及各种资源的综合利用效率，降低环境和资源代价；② 通过解决能源与环境的协调相容问题，把能源转换过程与物质转换过程紧密结合在一起，

特别注重控制废弃物与污染物的形成、迁移与转化,将能源转换利用过程与分离污染物的过程有机地结合在一起,降低甚至避免分离过程额外的能量消耗,实现在能源利用的同时,分离、回收污染物;③转变传统的能源利用模式,发展资源、能源、环境一体化模式,实现资源再循环,最大限度地减少“废物”和“废能”。

科学用能强调“科学技术是第一生产力”,既强化包括能量和物质转化规律、能量转换技术和新型能源系统等在内的能源科学基础研究,又从系统科学角度,对用能的全过程和各个环节进行分析、研究,综合得出结论,进而采用高新技术实现能源与资源的科学利用,通过梯级利用原理实现能源的科学配置。建立“能源需求侧管理”、“合同能源管理”、“能源服务公司”、“综合资源规划”以及环境排放和资源利用的各种交易机制等多种符合市场经济规则的管理运营机制,实现能源的科学管理。最终有效突破中国发展中的能源与环境瓶颈,实现社会和经济的可持续发展目标。

因此,科学用能应作为我国能源战略的核心。在已经拟定的《国家能源中长期发展规划(2004~2020)》中,提出了“节能优先,效率为本”的方针。可以说,“节能优先,效率为本”是规划的核心内容,也是解决我国能源问题的根本途径。它包含两个方面的内容:①需要继续保持发扬勤俭节约的优良传统,尽可能减少能源消耗;②需要树立科学发展观,“科学用能”,这是保证能源持续供应、提高能源利用效率和降低污染排放的关键途径,是建设资源节约型社会的重要保障。

我国政府计划,在2005年的基础上,到2020年实现能源消费翻一番、支持经济增长翻两番的目标。另外,一次能源需求争取控制在30亿吨标准煤左右(2010年在21亿吨标准煤左右),初步形成能源可持续发展的新机制,为今后更长远的发展奠定基础。因此能源政策重点将由注重供应保障能力,转向提高供应能力与提高能源效率联动,并把节能放在优先地位。将节约资源作为新时期的基本国策,构建资源节约型国民经济体系和资源节约型的生活方式。尽快改变高消耗、高污染的粗放型经济增长方式,提高资源的综合利用水平,发展循环经济。节能降耗被认为是中国提高经济增长质量和效益的重要途径。2004年国务院通过的《国家能源中长期发展规划纲要(2004~2020)》(草案)把节约能源放在首位,要求实行全面、严格地节约能源制度和措施,显著提高能源利用效率。2006年3月中国政府公布了国民经济和社会发展第十一个五年(2006~2010)规划纲要,明确提出经济发展和能源环保两个方面的重要目标:①“十一五”期间国内生产总值年均增长7.5%,这个目标是建立在优化结构、提高效益和降低消耗基础上的;②提出了“十一五”期间单位国内生产总值能源消耗降低20%左右、主要污染物排放总量减少10%等目标。这是针对资源环境压力日益加大的突出问题提出来的,具有明确的政策导向,显示了我国在节能与环保方面的决心。

目前,国际上能源技术取得了诸多重大进展。其中,分布式能源系统、可再生能源和资源综合利用等新技术,都具有降低能源输送环节损耗,扩大能源梯级利用范围,适应能源需求变化调节的特点。此外,还有大量的新兴能源利用技术可以有效提高能源利用效率、减少环境污染。例如:新型可再生能源技术,可以减少我们对化石能源的依靠,也为建筑节能提供了有效的技术手段;煤炭的综合利用技术,实现液体燃料、化工产品和能源动力的多联产可以更洁净高效地利用化石能源;固态照明技术将大大减少照明用电,引发新的照明技术革命;新型精确供能技术可以更加有效地实现节能等。与此同时,在用能管理方面涌现了大量新方法、新机制、新模式,与之相关的法律、政策等也日益发展完善。

为了从长远上解决我国的能源问题,推动我国节能工作的深入进行,必须实施全社会的科学用能战略。包括开展节能和科学用能的宣传和教育,制定并完善市场经济条件下有关节能和科学用能的法律、法规和政策,并对我国的能源利用情况进行详细、可靠的调研,分析、总结节能的现状和科学用能的主要方向,清理、筛选、集成和推广现有的节能和科学用能的有效方法、技术和措施,制定产品的能耗标准,强制执行,并实行严格的惩罚制度和建立有效的管理机制等。更主要的是依靠科学技术,按照科学发展观,抓住重点领域和部门,对高耗能产业进行深入分析和研究,针对共性科技问题,加强基础性研究,提出科学用能的新思路、新理论、新机制、新方法和新技术;同时,注意引进国外先进的节能技术,尽早消化、吸收和国产化,并进一步发展提高。

充分实施科学用能,预计经过15年左右的不懈努力,我国的能源利用水平将会有明显的提高。在2020年,达到传统工业化国家在同样GDP下的先进水平,为全面建设小康社会提供能源保障。按照前面对人均GDP和对应人均能耗的分析,在目前发达国家的能源利用水平基础上,2050年我国年能耗将达到64亿吨标准煤。因此需要我们再用二三十年的时间,在21世纪中期,使我国的能耗进一步降低,实现年节能约20亿吨标准煤,控制在30亿~38亿吨标准煤,达到届时的国际先进水平。从而,为实现我国“可持续发展”,并尽快达到“中等发达”国家水平作出贡献。

二、能的梯级利用原理与技术

自然界中能源的存在形式多种多样,例如燃料的化学能以及太阳能、风能、核能等。虽然可以概括地说,能仅以热和功形式被转换,但功的形式有很多,能源需要通过转换而被人类利用,对于不同存在形式的能源和不同的转换目标,能的转换方式也不尽相同。能的主要转换方式是化石燃料向热和电力的转换。在转换和利用各种形式的能源时,人们通常更多关心能量的平衡问题,即能的数量问题。例如:对于锅炉供热,人们关心燃料燃烧释放的化学能是否尽可能多地转换为热。对于电站,人们关心燃料是否尽可能多地转换成电。对于制冷机,人们则关心输入一份电可以输出几份的冷等。虽然热力学的解释“能量既有数量又有品质的差别”不易理解,但明显的是,等量的电比热更“好用”(电可以方便地、100%地转变成各种温位的热),等量的1000℃热能比300℃热能可以作更多的功。功被认为是能的完美形式,其品质是最高的。无论多高温度的热也不可能全部转变为功,所以热的品质依其温度而定。能量可以转变为功的最大做功能力称为焓。显然,各种能的形式品质高低,依其含有焓的多少而定。

只有综合考虑能量的数量和品质两方面的属性,才能够科学地判定能量是否得到了充分的利用。实际上凡是以一定方向和一定限度进行的过程,比较过程前后状态可以发现,能量品质发生了下降。这一能量品质的“贬值”称为过程的不可逆损失。衡量贬值的量是过程前后状态焓的减少值,又称为焓损失。能的梯级利用原理就是针对如何减小这种品质“贬值”的能量利用指导原则。所谓“梯”,即热力学第二定律所指出的,能量品质存在高低差异,是呈梯次的;而“级”则指出,只有逐级地利用或转化能量,并尽量缩小两级之间的差异,才能够实现能量的有效利用。

能的梯级利用原理大致经历了两个发展阶段:第一阶段以物理能的梯级利用为核心,其经典表述为“温度对口、梯级利用”;第二阶段以化学能与物理能的综合梯级利用为核心,可以表述为“品位对口,梯级利用”。在《国家中长期科学技术发展规划纲要》中,

第一个优先领域为“能源”，在其第一项优先主题“工业节能”中将“能源梯级综合利用技术”作为重点研究方向。能的梯级利用原理及技术已经在我国能源科技发展中发挥重要作用。

1. 物理能的梯级利用原理

20 世纪 80 年代，吴仲华先生首次将物理能的梯级利用原理形象地阐述为“温度对口、梯级利用”，奠定了总能系统的集成理论基础。根据这一表述，热力循环的发展也可以分为两个阶段。

第一阶段的核心问题是依靠提高循环初参数来提高效率，如蒸汽 Rankine 循环从常规亚临界蒸汽循环发展到超临界循环。燃气轮机 Brayton 循环从最初的循环初温 800°C 发展到当前超过 1400°C 的 H 级机组。Rankine 循环和 Brayton 循环的 $T-S$ 图分别如图 1-3 (a) 和图 1-3 (b) 所示。虽然循环初参数的提高可以在一定程度上提高循环效率，但是，随着循环初参数的不断提高，在高温区（温度超过 1200°C 时）卡诺循环效率随温度上升的趋势逐渐平缓，上升空间变窄。这种特性造成的结果是：一方面，由于受到材料等技术困难的限制，循环初温的提高越来越难以实现，每提高一点都要付出高昂的投资代价；另一方面，循环初温提高带来循环效率的提升却愈加不明显。显然，简单通过提高循环初参数来提升循环性能的技术手段已经很难取得突破性的进展。

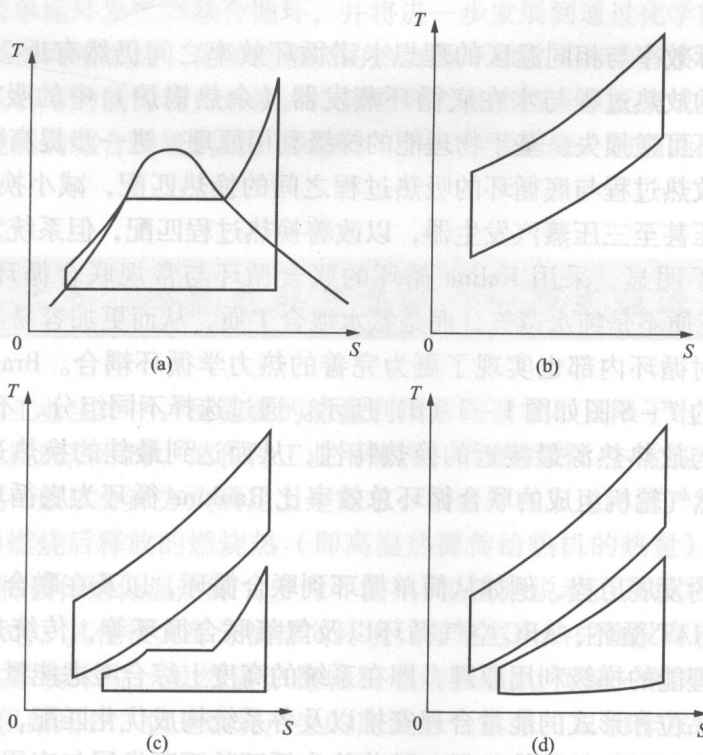


图 1-3 循环的 $T-S$ 图

(a) Rankine 循环；(b) Brayton 循环；

(c) Brayton 循环和 Rankine 循环组成的联合循环的 $T-S$ 图；

(d) Brayton 循环和 Kalina 循环组成的联合循环

如图 1-3 (a) 所示，简单常规蒸汽循环的工作温区在 $30 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。根据卡诺定理，工作在此温区内的循环效率上限为 63% 左右。而由于受到循环工质热力学特性的限制，实际

蒸汽循环的热转功效率通常在 45% 以下, 即使最为先进的超临界机组也无法突破 50%。另一方面, 如图 1-3 (b) 所示, 目前先进的通用 H 级燃气轮机简单循环的工作温区为 590 ~ 1400℃, 其热转功效率上限为 48%, 实际循环效率则接近 40%。可见, 无论简单蒸汽循环或是简单燃气轮机循环, 其热转功效率均无力突破 50%。

热力循环的第二个发展阶段, 也是更重要的阶段, 即循环复合化的发展。按照物理能梯级利用原理, 热力循环效率的提高已经不再单纯依靠提高循环初参数来实现, 而是侧重于不同循环的有机联合来扩大循环工作温区, 并减少排热损失。

上述简单蒸汽循环与简单燃气轮机循环的工作温区恰好可以用构成二者的联合循环, 实现能的梯级利用。蒸汽循环主要位于中低温区, 而燃气轮机循环主要位于高温区, 二者具备实现梯级利用的必要条件。联合循环的本质即是简单蒸汽循环与简单燃气轮机循环结合起来, 利用燃气轮机循环 (顶循环) 高初温的优势, 由燃气轮机将高品位的烟气热先转化为一部分功输出; 同时, 利用燃气轮机的排烟产生蒸汽, 驱动蒸汽轮机做功, 从而充分发挥了蒸汽循环 (底循环) 高压比、低排热温度的优势。图 1-3 (c) 为 Brayton 循环和 Rankine 循环组成联合循环的 $T-S$ 图。联合循环通过燃气轮机与蒸汽轮机的组合, 联合循环的工作温区扩大到 30 ~ 1400℃, 相应的卡诺循环效率提高到 81%, 而实际联合循环的热转功效率已经接近 60%。显然, 物理能 (热) 的梯级利用是复合循环相对于简单循环取得性能飞跃的根本原因。

联合循环的实际效率与相同温区的理想卡诺循环效率之间仍然有近 20% 的差距。主要原因是顶循环排烟的放热过程与水在底循环蒸发器 (余热锅炉) 中的吸热过程匹配不好, 从而造成了较大的不可逆损失。基于物理能的梯级利用原理, 进一步提高联合循环性能的重点是完善顶循环的放热过程与底循环的吸热过程之间的换热匹配, 减小换热过程的品位差。联合循环改进为双压甚至三压蒸汽发生器, 以改善换热过程匹配, 但系统复杂程度与投资也随之增加, 效果却不明显。采用 Kalina 循环的联合循环与常规联合循环的本质区别在于 Kalina 循环的循环工质不是纯水蒸气, 而是氨水混合工质, 从而更加容易与顶循环热源的放热过程相匹配; 同时循环内部也实现了更为完善的热力学循环耦合。Brayton 循环和 Kalina 循环组成联合循环的 $T-S$ 图如图 1-3 (d) 所示。通过选择不同组分、不同浓度的混合物, 吸热工质可以具有与放热热源最接近的换热特性, 从而达到最佳的换热过程匹配。研究表明: Kalina 循环与燃气轮机组成的联合循环总效率比 Rankine 循环为底循环的联合循环效率提高 5% 以上。

纵观热力循环的发展历程, 例如从简单循环到联合循环, 以及在联合循环基础上发展起来的 Kalina 循环、HAT 循环、ABC 空气循环以及氢氧联合循环等, 传统热力循环的开拓与创新无不围绕着物理能的梯级利用原理, 即在系统的高度上综合考虑能量转换过程中物理能的梯级利用, 不同品位和形式的能量合理安排以及各系统构成优化匹配, 总体合理利用不同品位的物理能, 以获得最好的整体效果。随着热力循环的不断发展与应用, 物理能的梯级利用原理在系统节能方面的作用越来越显著。

2. 化学能与物理能的综合梯级利用原理

长期以来, 热力循环的研究大多仅仅关注物理能范畴内的热功转换过程。随着以物理能梯级利用为核心的热力循环研究不断进步, 物理能的利用潜力逐渐发挥, 系统性能提升空间也随之减小。分析大多数热力系统发现, 能量品位损失最大之处并非发生在物理能的传递与转化过程, 而是发生在燃料化学能转化为物理能的燃烧过程 (或者说燃料的化学能释放过

程), 因此在涉及化学反应的能量转换和利用的场合, 有必要将物质的化学能与物理能区别开来。然而, 化学能的转化过程已超出了传统热力循环所研究的范畴, 仍然依靠物理能梯级利用原理将无法解决这一问题, 需要用化学能与物理能的综合梯级利用原理来指导能源系统开拓与创新。

在能源动力系统中, 物质化学能通过化学反应实现其能量转化。因此, 物质化学能的转化势必与其发生化学反应的作功能力 (吉布斯自由能变化 ΔG) 和物理能的最大作功能力紧密相关。化学能与物理能梯级利用原理是指在物理能梯级利用基础上, 综合考虑物质化学能、化学反应吉布斯自由能变化与物理能的最大作功能力之间的关联性, 及其品位的量化关系, 将物质化学反应的作功能力与物理能作功能力一并纳入能的综合梯级利用框架内, 实现化学能与物理能的综合梯级利用。

化学能与物理能梯级利用方法与传统直接燃烧方式不同。例如燃料先经过一个吸热反应过程, 转变为合成燃料, 吸收的反应热来自低品位的物理能——热能, 然后再通过一个放热反应释放出高品位热能。总的效果是提高了燃料的热值, 提升了反应热的品位, 同时也相对直接燃烧过程减少了损失。

化学能与物理能综合梯级利用原理为研究新型燃烧过程、开拓化工-动力多联产等能源与环境相容的新一代系统提供了广阔的空间。随着科学技术的进步, 能源动力系统由实现物理能梯级利用的简单循环发展到联合循环, 并将进一步发展到通过化学能品位和物理能品位有机结合的清洁燃料间接燃烧、化学链燃烧的热力循环和化工与动力多联产等实现燃料化学能的品位综合梯级利用的能源动力系统。冷热电联产系统随着系统集成程度的提高, 也可以实现化学能与物理能的综合梯级利用, 如集成了燃料间接燃烧、物理能的化学储存等过程的冷热电联产系统。



第二节 冷热电联产系统与分布式能源系统

在日常生活和工业生产中, 所需要的能量利用形式通常不只限于电力 (功), 往往还存在大量的、不同温度的热和冷, 如各种工业用蒸汽、供暖用热、生活热水、空调用冷等。

传统能源系统一般以分产方式满足上述需求, 因而存在下述问题。对发电系统来说, 热机只能把化石燃料燃烧后释放的燃烧热 (即高温热源传给热机的热量) 中的一部分转化为电 (功), 其余的将被传给低温热源 (多为环境), 也就是说动力系统将燃料释放燃烧热量的 $1/3$ 左右转化为电, 其他很大部分被排向环境, 即发电余热往往没有合理利用, 而被浪费掉了。对传统供热系统来说, 虽然锅炉将燃料燃烧热量的 $70\% \sim 90\%$ 转换为有用的热能 (蒸汽或热水) 提供给用户, 但是燃烧产生的高温烟气本来可以用作发电 (产功), 直接被用作加热较低温度的蒸汽或热水, 做功能力损失很大。在制冷方面, 电厂为了满足夏季空调带来的高峰电负荷, 扩大电力生产, 而产生大量过剩的余热无法利用, 造成能源的极大浪费。单独的吸收式制冷, 又由于距离热源远或冷量无法长距离输送, 而使应用受到限制, 即便是燃气直燃型吸收式制冷机也一定程度存在类似锅炉的高温热用于低温目的的做功能力损失。此外, 先污染后治理的能源利用模式更是造成能源与环境难以协调的根本原因。

分布式能源系统 (Distributed Energy System) 是一种新型的能源系统, 它一般建于用户附近, 减少了输配系统投资和能量损失, 是更高效、更可靠和更加环保的能源系统。分布式

能源系统包括高效热电联产、就地式可再生能源系统以及能量循环系统（包括利用废气、余热和压差来就地发电），同时这些发电系统能在或靠近消费的地点提供电力，而不论其项目大小、燃料种类或技术，也不论该系统是否与电网联网与否。分布式能源系统形式多样，如微型或小型燃气动力装置发电、风力发电、光伏发电、太阳能高温集热发电、燃料电池等独立电源技术，燃料电池-燃气轮机联合循环以及分布式冷热电联产系统等。国际分布式能源联盟于2002年成立，并提出了上述界定。

从供电层面，分布式能源系统相对于传统的集中式供电，将发电系统以小规模（千瓦至兆瓦级小型模块式）、分散式的方式布置在用户附近。当今的分布式能源系统主要是指用液体或气体燃料的内燃机、微型或小型燃气轮机（Microturbine）和其他小型动力装置，如燃料电池等为核心组成的总能系统。因其具有良好的环保性能，分布式能源系统与“小机组”已不是同一概念。与集中供电电站相比，分布式供电具有以下优势：① 没有或很低输配电损耗；② 无需建设配电站，可避免或延缓增加的输配电成本；③ 适合多种热电比的变化，可使系统根据热或电的需求进行调节，从而增加设备年利用小时；④ 土建和安装成本低；⑤ 各电站相互独立，用户可自行控制，不会发生大规模供电事故，供电的可靠性高；⑥ 可进行遥控和监测区域电力质量和性能。非常适合对乡村、牧区、山区、发展中区域以及商业区和居民区的电力供应。大幅度减轻环保压力。

20世纪初以来电力行业流行的观点是：发电机组容量越大效率越高，单位千瓦投资越低、发电成本也越低。所以随着能源产业的发展，电力工业发展方向是“大机组、大电厂和大电网”。但是，在许多情况下，分布式能源系统是集中供电不可缺少的重要补充，二者的有机结合是未来能源系统的重要发展方向。主要体现在如下几方面。

（1）分布式能源系统为能源的综合梯级利用提供了可能。常规集中供能方式的能量形式相对单一，当用户不仅仅需要电力，而且需要其他形式的能量供应，如供热，尤其是供冷和生活热水时，仅通过电力来满足上述需要时难以实现能量的综合梯级利用。而分布式能源系统以其规模小、灵活性强等特点，通过不同循环的有机整合，可以在满足用户需求的同时，克服冷能和热能无法远距离传输的困难，实现能量的综合梯级利用。

（2）分布式能源系统为可再生能源的利用开辟了新的方向。相对于化石能源而言，可再生能源的能量密度较低、分散，而且目前的可再生能源利用系统规模小、能源利用率低，作为集中供电手段难度很大，而分布式供电方式便于利用可再生能源。我国的可再生能源资源丰富，发展可再生能源是21世纪减少环境污染和温室气体排放以及替代化石能源的必然要求。因此利用可再生能源发电，方便安全地向偏僻、少能源地区供电，建设可再生能源分布式供电得到日益关注。

（3）分布式能源系统可以弥补大电网在安全稳定性方面的不足。在世界上大型火电厂建设的趋势有增无减之时，电网的急速膨胀对供电安全与稳定性带来很大威胁，而各种形式的小型分布式供电系统，使国民经济、国家安全至关重要的纽带——大电网，获得有益的补充，从而更为灵活；直接安置在用户近旁的分布式能源系统与大电网配合，可以大大地提高供电可靠性，在电网崩溃和意外灾害（例如地震、暴风雪、人为破坏、战争）情况下，维持重要用户的供电，尤其是应对类似2008年我国南方冰雪灾害和汶川地震等突发事件，更显其必要性。

（4）分布式能源系统可以满足特殊场合的需求。例如：不适宜铺设电网的西部等偏远地区或散布的用户，对供电安全稳定性要求较高的特殊用户如医院、银行等，能源需求较为

多样化的用户，需要电力的同时还需要热或冷能的供应。此外，在废弃资源现场，因地制宜地就地利用转换余热、余压以及可燃性废弃气体，也有重要意义。我国每年数以千计的矿工因瓦斯爆炸失去生命，如果以分布式能源技术就地抽放瓦斯发电，不仅可以挽救矿工的生命，还可以节约大量资源，同时能够大量减少温室气体排放。除了矿井瓦斯以外，煤层气、炼焦炼钢废气、采油伴生气、城市废弃物等大量资源如果加以利用，不仅可以增加电力、热力供应，节省大量煤炭资源，还能有效减少环境污染。

冷热电联产系统（CCHP, Combined Cooling, Heating and Power）是分布式能源系统中前景最为明朗，也是最具实用性和发展活力的系统。冷热电联产系统是在热电联产系统基础上发展起来的一种总能系统，直接面向用户，按用户需求供电、供冷、供热、生活热水等。冷热电联产系统概念如图 1-4 所示。分布式冷热电联产系统集成燃气轮机、燃气内燃机、蒸汽轮机、吸收式冷热水机、压缩式冷热水机、热泵、吸收式除湿机和能源综合控制体系等高新技术和设备为一体，对输入能量及内部能流根据热能品位进行综合梯级利用，来达到更高能源利用率，减少二氧化碳及有害气体排放等。

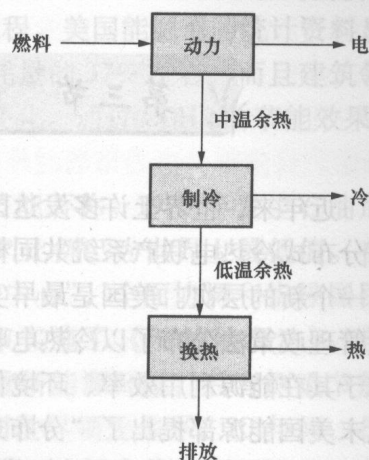


图 1-4 冷热电联产系统概念

冷热电联产系统按照其应用规模可以分为区域式和楼宇式系统。例如一个典型的楼宇式分布式能源系统，采用微型燃气轮机与吸收式制冷机联合，燃料燃烧产生 1000°C 以上的高温烟气先通过燃气轮机做功、发电， $300 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 的烟气夏季用于驱动吸收式双效溴化锂蒸汽型机组，对外提供 7°C 的冷水。冬季通过换热器提供 65°C 的热水，实现能的梯级利用。

分布式冷热电联产系统具有分布式能源系统的所有特点，如：① 分散在用户端，能量输送过程简化，输送损失降低；② 与用户具体需求紧密结合，系统规模小，灵活性大，便于调节，全工况性能有所改善。联产系统性能的提高将导致消耗燃料量降低，燃料消耗量减少会使污染物的排放绝对量有所下降；此外，由于主要使用天然气或燃料油等清洁燃料，而且联产系统所采用的能源技术本身相对传统能源技术污染物排放量较低，同时更易于与可再生能源结合，因此对环境的负面影响将显著下降。

冷热电联产系统可独立于电网运行，也可与电网构成一个电力供应联合体。二者相辅相成，将大大增强用户电力供给的安全性和可靠性。夏季制冷负荷引起的电网峰谷差值增大，不利于电网的安全、高效运行。冷热电联产系统在夏季提供制冷量，从而减小了对制冷用电负荷的需求；同时，这种系统还可以提供一定量的电力，因此其应用将有助于电网峰谷差的减小，对电网的运行有一定的帮助。冷热电联产系统的广泛使用可以增大夏季对天然气的需求，以及对热能的需求，减少天然气网的季度峰谷差和工业生产余热的有效利用，对天然气网和电力及其他工业企业的运行也有帮助。

冷热电联产系统不仅应用于建筑领域，还可以应用于工业能源领域。上述领域的能量需求种类繁多且不同用户在能源需求种类、结构、总量等方面有很大差异，如不同功能的建筑能源需求形式中电力、制冷、供暖、生活热水等所占比例差别大，有的还有除湿、蒸汽、游泳池水加温等特殊负荷，冷热电联产系统集成技术针对不同需要，可以为用户制定个性化方案，随着人民生活水平的提高以及新型能源技术的出现，还会不断有新技术在建筑能源领域