



能的综合梯级利用与 燃气轮机总能系统

金红光 林汝谋◎著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

能的综合梯级利用 与燃气轮机总能系统

金红光 林汝谋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部系统论述能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统的专著,全面系统地展示了基于能的综合梯级利用的总能系统工作原理与集成理论、特性规律以及典型系统实例与应用等。首先,论述基础理论问题,侧重论述总能系统概念及能的综合梯级利用与总能系统集成理论,重视新理念、机理及方法;然后,概述不同功能和不同能源的典型总能系统,侧重总结相关的科研成果,注重理论联系工程实际。为可持续发展的能源动力系统集成与创新以及有关的研究提供科学用能的理论基础和分析方法。

本书可作为能源动力及其相关专业的本科和研究生参考用书,也可供从事能源动力领域的科研、管理、设计、运行等工作人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统/金红光,林汝谋著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020366-3

I. 能… II. ①金… ②林… III. ①能源-综合利用 ②燃气轮机-总能-利用 IV. TK01 TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031073 号

责任编辑:鄢德平 张 静 于宏丽/责任校对:刘小梅

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 7 月第一次印刷 印张:49 1/4

印数:1—1 800 字数:1 163 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

1980 年, 吴仲华先生在中共中央书记处举办的科学技术知识讲座报告“中国的能源问题及其依靠科学技术解决的途径”中, 倡导“能的梯级利用与总能系统”的科学用能思想。为了全面深入研究总能系统, 他组建联合循环课题组(我和两位作者有幸相继担任组长), 经过 20 多年努力, 取得了许多具有国际水平的成果, 即将出版的《能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统》一书, 就是对这些研究成果的总结, 也是一份纪念吴先生的礼物。

展现在我们面前的百万字著作, 是一部从系统层面全面论述能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统的专著, 也是作者所在研究集体长期从事相关研究的学术积淀(300 多篇学术文章和 30 多份研究生学位论文)。该书重视新的思路、原理、方法以及新的系统开拓, 具有鲜明的系统性、前瞻性、创新性等特点, 而且学术观点的独创性、科学性与系统性都较强, 具有重要的理论意义和实用价值。如果说, 1988 年吴先生主编《能的梯级利用与燃气轮机总能系统》一书时, “能的梯级利用和总能系统”概念才刚刚提出, 相关研究刚刚起步, 只是反映当时初步研究成果, 还没有形成系统理论。那么, 该书则在大量研究成果基础上, 有了很大的进展: 把系统集成理论的核心科学问题从“温度对口、梯级利用”的单纯物理能梯级利用扩展到不同品质化学能与物理能的综合梯级利用; 把能源动力系统从单一的热工功能与领域扩展到热工与各种化工以及环境等多功能综合与多领域渗透; 把单一能源利用系统扩展到更多样化的能源综合互补利用系统, 以及对更多总能系统进行了更深入更全面的研究等。这样, 该书不仅对能的综合梯级利用思想与燃气轮机总能系统做了系统的诠释, 而且对多能源互补和多功能综合的系统集成理论、系统建模与分析方法、系统特性规律以及新系统开拓等方面研究进展做了更加全面的总结, 是一部近期最为全面深入阐述燃气轮机总能系统及其集成理论的专著。

该书两位作者是我早年学生和长期共事的合作者, 他们既有理论基础的功底, 又有丰富的工程实践经验, 并有出书经历。由他们精心组织总结有关研究成果、撰写该书, 是件很有意义的事。另外, 我相信该书会受到燃气轮机及相关能源动力专业同行的欢迎, 对他们的科研、教学与学习等将有所帮助。

中国科学院院士

蔡睿贤

2007 年 8 月

前 言

从我国著名的科学家吴仲华教授倡导“能的梯级利用与总能系统”概念至今，已有 20 多年，在这期间世界能源动力系统开拓发展正是沿着这个思路蓬勃展开。现在，总能系统已成为当代能源科学的一个重要分支和发展主流，而以燃气轮机为核心的总能系统则是应用最多、最具发展潜力的能源动力系统，它对科学用能和社会经济的可持续发展都有重大影响。

作者的研究集体正是 20 多年前吴仲华教授组建的联合循环课题组，专门从事能源动力系统基础性研究和相关高科技创新，一直承担许多国家科研项目，并取得了一系列重要成果。现在，基于相关的研究成果(主要包括 300 多篇学术文章和 30 多份研究生学位论文)，撰写这部全面论述能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统的专著，从系统层面阐述相关理论与方法，包括总能系统科学用能概念、基于能的综合梯级利用原理的集成理论、系统建模与分析方法、系统特性规律以及新系统开拓和典型系统实例与应用等方面展开论述。

本书共两大部分内容，12 章。第一部分从系统层面论述总能系统基本概念和系统集成开拓的基础理论问题，重视新理念、机理及方法，突出系统性、完整性、科学性、前瞻性、创新性，学术观点独立。内容包括总能系统概论、能的综合梯级利用与系统集成理论、系统建模、系统分析方法与评价准则以及系统全息特性等五章。第 1 章介绍吴仲华先生提出的狭义总能系统及其理解，然后论述在其基础上拓展的广义总能系统基本概念、过程和形式，比较分析了两代总能系统的演变与差异、主要科学技术问题以及发展概况等。第 2 章论述基于能的综合梯级利用原理与总能系统集成理论，包括热能的梯级利用原理、化学能与物理能综合梯级利用原理，以及能源转化与温室气体(CO₂)控制一体化原理等。系统集成理论对总能系统的设计优化、新系统开拓以及应用发展等都是至关重要的。而第 3、4 章分别概述总能系统建模和分析方法与评价准则的基础问题。系统集成开拓和设计优化时都要对系统进行相关的分析，系统建模则是系统分析的基础，而热力学分析方法的开拓又与新的评价准则紧密相连。随着能源动力系统不断向大型化、复杂化发展，传统的建模与分析方法及评价准则等面临着新的挑战，这些系统集成理论体系的重要组成部分都成为能源动力领域研究的热点和前沿课题。第 5 章论述总能系统的全息特性。总能系统总是在偏离设计基准的变工况运行，且具有多能源互补和多功能综合的特点，全息特性规律是系统进行设计优化和优化运行等分析研究的基础，也是系统开拓集成的核心问题之一。第二部分概述不同功能和不同能源的典型总能系统，重视新概念、新方法及新系统，注重理论联系工程实际。包括联合循环发电与功热并供系统、分布式能源系统、燃煤联合循环系统、化工动力多联产系统、多能源综合互补的多功能系统、太阳能与核能总能系统以及控制 CO₂ 排放的能源动力系统等七章。它们不是某类系统实例的简单汇总与概述，而是以能的综合梯级利用的科学用能思路 and 新的系统集成

理论为主线来论述与分析各种类型的总能系统,突出可持续发展特征的能源动力系统的集成开拓、系统节能本质和特性规律的揭示,侧重介绍典型系统的流程概念性设计和集成优化思路与措施、系统模拟以及过程与系统关联规律等。

本书先由两位作者分别执笔各章(金红光执笔第2、4、7、9、10、12章,林汝谋执笔第1、3、5、6、8、11章),然后两位作者相互校阅和统稿,最后由蔡睿贤院士审定。实际上,蔡睿贤院士应是作者之一,是他根据吴先生的思路对狭义的总能系统做了比较明确的定义与阐述,他在常规联合循环若干理论问题(如联合循环最佳压比、余热锅炉的节点温差与补燃问题)、系统分析方法(如复杂循环比较法、变工况特性解析解法)以及综合评价准则等方面都有国际水平的创新成果,这些成果将在本书第1、4章部分内容扼要地予以介绍。作者在撰写初稿时,曾请一些助手和学生帮助,如洪慧、韩巍、高林、隋军,还有徐玉杰、张筱松、徐钢以及崔平副研究员等,他们按照作者拟定的提纲框架与有关资料,帮助编写部分草稿和校对各个校次的书稿。

作者希望通过本书能使读者对能的综合梯级利用与总能系统有一个全面的认识,能促进能的综合梯级利用的科学用能思想和燃气轮机总能系统在我国进一步发展应用。本书可作为燃气轮机及相关能源动力专业院校师生的参考用书,也可供从事能源动力环境领域的科研、管理、设计、运行等工作人员阅读参考。

本书在撰写过程中,曾得到徐建中院士,还有张娜研究员,冯志兵、孙士恩、王宝群、邵艳军、林湖、陈斌、袁建丽、李洪强、李冰瑜等同学的各种帮忙,在此一并表示感谢。

本书及其有关的科研项目都得到国家自然科学基金委员会和国家科技部的大力支持,特此深表谢意。

由于作者的理论水平和实践经验有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

金红光 林汝谋
2007年8月于北京中关村

主要符号表

A	能的品位	P_L	负载消耗功率
a	常系数	P_t	透平输出功率
B	①燃料消耗量/(kg/h, kg/s, t/h) ②化学反应品位 ③技术系数 ④功热价格比 $B=Y_w/Y_q$	P_c	压气机压缩耗功
b	①常系数 ②燃料耗率	P_m	轴承摩擦等机械损失耗功
c	①速度/(m/s) ②常系数	p	压力(一般指总压)/(Pa, kPa, MPa, bar, N/m ²)
C	价格, 单位价格	Q	热量/kJ
X_c	物质的含碳量	Q_M	甲醇生产能耗
c_p	定压比热(容)/[kJ/(kg·K)]	q	①热量/(kJ/s) ②单位能耗/(kJ/kg)
COP	制冷系数或工作性能系数	q_p	热耗率/(kW/kW)
Di	组分 i 的扩散系数	R	①气体常数/[8.3143 kJ/(kmol·K)] ②比率
d_p	粒径	R_{cp}	化动比
E	总焓/kJ	R_{CR}	气化炉碳气化率(转化率)
e	比焓/(kJ/kg)	R_{pr}	功热比
E_M	甲醇产品焓	R_u	循环倍率
ESR(或 PES)	系统相对节能率(节能率)	r	①气化潜热 ②反应速率
f	燃料空气比 G_f/G_c /(kg/kg)	s	比熵/[kJ/(kg·K)]
G	①质量流量/(kg/s) ②吉布斯自由能	T	①温度(一般指总温)/K ②牵引力/N
H	总焓/kJ	t	温度(一般指总温)/℃
h	比焓/(kJ/kg)	V	①容积流量/(m ³ /s) ②速度
H_u	燃料净比能(低热值)/(kJ/kg)	w	比功(单位工质流量的功率输出)/(kW·s/kg)
I_{**}	指数	X	系数
K	传热系数/[kJ/(m ² ·s·K)]	X_{gl}	冷却漏气系数
k	比热(容)比	X	变量
k	化学反应速率常数	X_{CO_2}	CO ₂ 回收率
L	理论空气量	X_{as}	整体空分系数
M	扭矩/(N·m)	X_{gn}	氮气回注系数
m	比热比系数($k-1$)/ k	x	转化率
n	转速/(r/min)	η_{exM}	甲醇合成子系统的焓效率
n_L	负载(发电机)转速	η_{exp}	热力循环子系统的焓效率
$P(W \text{ 或 } P_c)$	功率或有效功率/kW	y	函数
		α	①过量空气系数 ②对流传热系数/[kJ/(m ² ·s·K)]

③压气机进口导叶(IGV)安装角	col	太阳能集热器
④气体组分浓度	ng	天然气
og 焦炉煤气	D	分产系统
X_n 燃气轮机负荷系数= P_{gt}/P_{gt}	e	有效(净)的
β 燃料系数即燃料空气比 f 的倒数	ea	能量接收者
ε 压比(压气机)	ed	能量释放者
ϕ 压力保持系数 p_1/p_2	ehp	电压缩式热泵
η 效率	ets	总能系统
η_e 系统厂用电耗率	ex	烟(或当量烟)
η_{EC} (或 θ) 经济烟效率	f	燃料
η_l 冷煤气效率	g	燃气
η_R 热煤气效率	G	发电机
π 膨胀比(透平)	gt	燃气轮机
ρ 密度/(m^3/kg)	h	高压
σ 回热度	HRSG	余热锅炉
τ ①循环温比 T_3/T_1 ②时间/(s, min, h)	I	理想, 或理想条件下
③质迁因子	in	流程或部件的进口
ω 角速度/(rad/s)	L	负载
ξ 压力损失系数 $\Delta p/p$	l	低压
ζ 流量泄漏损失系数	lo	体系对外损失
Φ 压力保持系数	m	①机械耗功或效率 ②中压
ΔT_p 节点温差	max	最大值
ΔT_a 接近点温差	min	最小值
下标符号	n	多变过程
0 初始状态、设计工况或基准工况点	out	流程或部件的出口
a 大气环境或空气	opt	最佳值
ac 吸收式制冷	optic	光学的
ad 吸收式除湿	pt	动力透平
ASU(asu) 空分装置	R	热利用, 热能
b 燃烧室	r	再热, 热
c ①压气机, ②煤炭	ref	参比系统
cl 冷却空气	s	①蒸汽 ②等熵过程
corr 按基准条件修正后的值(或 c)	sol	太阳能
calc 计算值	st	汽轮机
cc 联合循环	t	①透平 ②实验测量值
CHP 热电联产	IES	总能系统
cg 合成煤气	th	热
cog 联产系统	w	水

目 录

序

前言

主要符号表

第 1 章 总能系统概论	1
1.1 概述	1
1.2 狭义总能系统	2
1.2.1 基本概念	2
1.2.2 主要的应用方式	9
1.3 广义总能系统	13
1.3.1 基本概念	13
1.3.2 主要的科技问题	16
1.3.3 能源动力系统的发展概况	18
1.4 总能系统的基本过程	24
1.4.1 基本过程概述	24
1.4.2 总能系统中的热力过程	25
1.4.3 总能系统中的能源转化物理化学过程	28
1.5 总能系统的基本形式	37
1.5.1 基本形式概述	37
1.5.2 不同功能总能系统的基本形式	37
1.5.3 不同能源总能系统的基本形式	45
第 2 章 能的综合梯级利用与总能系统集成理论	63
2.1 系统集成理论概述	63
2.2 热能的梯级利用原理	69
2.2.1 热能梯级利用概述	69
2.2.2 不同热力循环联合的热能梯级利用	70
2.2.3 不同用能系统整合的热能梯级利用	76
2.2.4 中低温热能的梯级利用	80
2.2.5 燃煤联合循环中热能梯级利用	82
2.3 化学能与物理能综合梯级利用原理	84
2.3.1 化学能与物理能综合梯级利用新原理	84
2.3.2 化工-动力联产系统中能的梯级利用原理	96
2.3.3 多能源互补系统的集成机理	106
2.4 能源转化与温室气体(CO ₂)控制一体化原理	112

2.4.1	CO ₂ 分离过程理论能耗	112
2.4.2	不同 CO ₂ 分离方式的能耗对比	114
2.4.3	燃烧和分离一体化机理	116
第 3 章	燃气轮机总能系统建模	128
3.1	系统建模概述	128
3.2	典型单元模型	129
3.2.1	概述	129
3.2.2	压气机通用模型	130
3.2.3	燃气透平特性模型	134
3.2.4	燃烧室模型	138
3.2.5	联合循环中的余热锅炉模型	139
3.2.6	联合循环中的蒸汽透平模型	148
3.3	系统模型与建模方法	151
3.3.1	概述	151
3.3.2	系统网络连接方程模型	153
3.3.3	系统超结构模型	160
3.4	模型的通用性和精细性	162
3.4.1	概述	162
3.4.2	增强模型通用性的途径与方法	162
3.4.3	增强模型精细性的途径与方法	165
3.5	简化建模	171
3.5.1	概述	171
3.5.2	偏差法简化建模	173
3.5.3	比较法简化建模	178
3.6	模型求解方法	181
3.6.1	概述	181
3.6.2	序贯模块法	181
3.6.3	联立方程法	181
3.6.4	联立模块法	182
第 4 章	总能系统的分析方法与评价准则	189
4.1	总能系统的分析方法概述	189
4.2	总能系统的评价准则	190
4.2.1	评价准则概述	190
4.2.2	单目标评价准则	191
4.2.3	多目标统一量化的评价准则	196
4.3	几种系统的性能分析方法	201
4.3.1	系统性能的简捷分析法	201
4.3.2	复杂循环比较法	204

4.3.3 系统特性的解析解法	210
4.4 总能系统设计优化理论与方法	214
4.4.1 系统设计优化概述	214
4.4.2 系统全工况设计优化方法	217
4.4.3 有无约束条件下的系统设计优化方法	222
4.4.4 热力系统设计优化的精细化	228
4.5 总能系统的焓分析方法	232
4.5.1 焓的概念及其基准体系	232
4.5.2 三种典型的系统焓分析方法	234
4.5.3 新型能的品位关联法	240
4.5.4 几种焓分析方法的比较	242
第 5 章 总能系统的全息特性	247
5.1 全息特性概述	247
5.2 总能系统中热力系统的全息特性	261
5.2.1 总能系统中燃气轮机的全息特性	261
5.2.2 总能系统中蒸汽循环的全工况特性	277
5.2.3 总能系统中联合循环的全工况特性	281
5.2.4 总能系统中功热并供系统的变工况特性	286
5.3 集成过程与系统性能的关联规律	289
5.3.1 燃气轮机与系统性能的关联规律	289
5.3.2 蒸汽循环与系统性能的关联规律	291
5.3.3 联合循环与集成部件的统计关联规律	295
5.3.4 其他过程与系统性能的关联规律	296
5.4 总能系统的多功能特性	299
5.4.1 基于多目标评价准则的系统特性规律	299
5.4.2 化工动力联产系统的多功能特性	310
5.4.3 多能源互补联产系统的多功能特性	313
第 6 章 联合循环发电与功热并供系统	317
6.1 概述	317
6.2 联合循环系统的优化集成	319
6.3 常规联合循环系统	331
6.3.1 常规联合循环系统概述	331
6.3.2 无补燃的余热锅炉型联合循环	334
6.3.3 补燃的余热锅炉型联合循环	342
6.3.4 排气全燃型联合循环	345
6.3.5 增压锅炉型联合循环	348
6.3.6 给水加热型联合循环	350
6.4 新型联合循环系统	354

6.4.1	新型联合循环概述	354
6.4.2	注蒸汽燃气轮机循环(STIG)	355
6.4.3	湿空气透平(HAT)联合循环	359
6.4.4	氢氧联合循环	363
6.5	功热并供系统	367
6.5.1	功热并供概述	367
6.5.2	燃气轮机功热并供系统	368
6.5.3	联合循环功热并供系统	378
第 7 章	分布式能源系统	392
7.1	分布式能源系统概述	392
7.2	冷热电联产系统的集成优化原则与思路	397
7.3	常规分布式联产系统	409
7.3.1	常规分布式联产系统的分类及典型流程	409
7.3.2	简单循环燃气轮机-余热吸收型分布式联产系统	417
7.3.3	回热循环燃气轮机-余热吸收型分布式联产系统	424
7.3.4	变工况调节的分布式联产系统	428
7.4	与环境资源整合的分布式联产系统	435
7.4.1	典型系统的概念设计与优化集成	435
7.4.2	典型系统案例与热力分析	440
7.5	生态工业园分布式联产系统	446
7.5.1	生态工业园联产系统概述	446
7.5.2	典型生态工业园分布式联产系统	449
第 8 章	燃煤联合循环系统	457
8.1	燃煤联合循环概述	457
8.2	CFCC 系统集成的思路与优化	460
8.3	整体煤气化联合循环	467
8.3.1	IGCC 概述	467
8.3.2	典型整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)	469
8.3.3	新型 IGCC 系统的概念性设计实例	488
8.4	流化床燃煤联合循环	492
8.4.1	FBCC 概述	492
8.4.2	增压流化床联合循环系统(PFBCC)	494
8.4.3	常压流化床联合循环系统(AFBCC)	502
8.4.4	三种 CFCC 系统特性比较	505
8.5	内外直接燃煤联合循环系统	507
8.5.1	直接燃煤燃气轮机联合循环	507
8.5.2	外燃式燃煤联合循环	510

第 9 章 化工-动力多联产系统	520
9.1 多联产概述	520
9.2 煤基并联型多联产系统	525
9.2.1 煤基并联型甲醇-动力多联产系统	525
9.2.2 煤基并联型合成氨-动力多联产系统	533
9.2.3 并联型焦炭-动力联产系统	538
9.2.4 并联型多联产系统的特点	544
9.3 煤基串联型多联产系统	544
9.3.1 煤基串联型甲醇-动力多联产系统	544
9.3.2 煤基串联型二甲醚-动力多联产系统	554
9.3.3 串联型多联产系统的特点	562
9.4 天然气基串联型多联产系统	562
9.4.1 天然气基串联型甲醇-动力多联产系统	562
9.4.2 天然气基合成氨-动力多联产系统	566
9.5 多联产系统集成的理论	573
9.5.1 多联产系统集成的原则性思路	573
9.5.2 多联产系统组分转化与能量转换利用集成机理	575
9.5.3 各种多联产系统的集成特征与节能效果	582
第 10 章 多能源综合互补的多功能系统	585
10.1 多能源综合互补系统概述	585
10.2 天然气-煤重整互补的机理	587
10.3 天然气-煤互补的多功能(MES)系统	596
10.3.1 天然气-煤重整互补的发电系统	596
10.3.2 天然气-煤互补的甲醇-电联产系统	605
10.3.3 天然气-煤互补的氢-电联产系统	615
10.3.4 系统集成设计的主要思路与措施	619
10.4 双气头整合的多功能系统	620
10.4.1 双气头甲醇-动力多联产系统	621
10.4.2 双气头炼焦热和甲醇-动力多联产系统	626
10.5 能源资源综合利用的多功能系统	630
第 11 章 太阳能与核能总能系统	637
11.1 太阳能与核能的系统概述	637
11.2 中温太阳能热化学反应的总能系统	639
11.2.1 基于太阳能热化学反应的系统概述	639
11.2.2 新一代中温太阳能甲醇裂解的发电系统	640
11.2.3 新颖的太阳能-天然气化学链燃烧发电系统	644
11.2.4 中低温太阳能热化学制氢-发电联产系统	649
11.3 一体化的中低温太阳能吸收-反应器	657

11.3.1	中温太阳能热化学反应器的设计原则	658
11.3.2	一体化中温太阳能接收-反应器	659
11.3.3	中温太阳热能裂解甲醇的典型试验	661
11.3.4	中温太阳热能品位提升的能量转换机理试验验证	666
11.3.5	中温太阳热能甲醇重整制氢典型试验	668
11.4	核能燃气轮机总能系统	674
11.4.1	核能高温 Brayton 循环概述	674
11.4.2	核能 Brayton 闭式循环及功热并供系统	676
11.4.3	氦气蒸汽透平闭式联合循环(HTSTCC)及功热并供系统	681
11.4.4	核能湿氦气透平闭式循环系统(HHTCC)	688
11.4.5	常规核电站联合循环更新改造系统	693
第 12 章	控制 CO ₂ 排放的能源动力系统	701
12.1	概述	701
12.2	控制 CO ₂ 排放的一体化原理和系统	706
12.3	控制 CO ₂ 排放的多联产系统	712
12.3.1	控制 CO ₂ 排放的煤基甲醇多联产系统	712
12.3.2	零能耗回收 CO ₂ 的双燃料制氢多功能系统	720
12.4	控制 CO ₂ 排放的 IGCC 能源动力系统	727
12.4.1	内外燃煤一体化联合循环发电系统	727
12.4.2	控制 CO ₂ 排放的双循环 IGCC 系统	733
12.5	零能耗分离 CO ₂ 的化学链燃烧动力系统	736
12.5.1	系统的集成思路与关键问题	736
12.5.2	化学链燃烧湿空气透平热力循环	737
12.5.3	新型整体煤气化化学链湿空气透平动力系统	741
12.5.4	新颖氢基化学链燃烧热力循环	743
12.6	化学链燃烧试验	746
参考文献		765
后记		772

第 1 章 总能系统概论

1.1 概 述

能源与动力是社会进步和经济发展的基础，是人类从事各种活动的原动力。能源是可以直接或经转换提供给人类所需的光、热、电、动力等任一种形式能量的载能体资源。能源是人类取得能量的来源，它包括已开采出来可供使用的自然资源和经过加工或转换的能量的来源。能源使用的实质是能量形式的转化过程，包括同种能量的转化和不同种能量的转化，也包括能量的直接转化和间接转化。人类利用能量主要有两种方式，一是转换为热能直接应用于生产和生活；另一种是转换为机械能或电能用作动力。机械能多是借助热机把燃料的化学能转变为热能，再由热能转变而来。因此，以热机为核心的能源动力系统是人类利用能源最主要的手段。

历史经验表明，每一次能源科学技术的突破，都会带来生产力的飞跃和社会的发展。世界能源环境科学技术研究正趋向于取代 20 世纪的传统能源技术，这将在能源和环境交叉方面带来革命性的突破。同时，大量使用化石能源也给地球环境造成了严重危害，使人类赖以生存的地球空间受到了空前的威胁。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，解决上述问题是我国国民经济发展的重大需求和能源、环境科学技术发展的战略重点。从工程热力学与能源利用学科本身的发展角度看，有下列四个特点(蔡睿贤等，2001)：① 学科的交叉、综合已成为当代能源科学发展的一个基本趋势与特征。能源科学的各分支学科之间，以及能源科学与不同学科之间，例如，与化学、物理学、生物学、数学、材料科学、计算机科学以及信息科学等都在不断地交叉与综合。② 随着经济与社会对能源科技的需求愈来愈高，能源与社会、经济与环境等领域的渗透与综合已成为能源科学发展的另一个主要趋势。③ 对能源转化利用规律的探索还在不断深化，一方面不断拓宽或突破原有界限与假定；另一方面则不断采用新理论、新方法和新手段。④ 能源科学是能源高技术创新的源泉和先导，两者紧密相连、相互促进，当代能源技术发展在很大程度上引导着能源科学发展的趋势。

从能源科技发展的角度看，能源动力系统的发展可分为三个阶段或层面。第一代基本上是在简单循环的热机层面，即多采用由若干热力过程组成的正向循环来实现把热能转化为机械功(或含有效热输出)的简单循环系统形式。其特点是以热力学第一定律为基础，追求更高的总能利用率。第二代的特点是基于第二定律，注意到能量的品位差别与梯级利用，开始提出热力循环组合的总能系统。不过那时的系统概念还仅局限于热工领域，因而只是实现一种或多种热工功能的能量系统，为狭义的总能系统。由于它们是基于“温度对口、梯级利用”原理集成的能量转换利用系统，在实现一种或多种热工功能目标时，可以达到更高的能源利用率，但还不注重环保性能，对大幅度减少 CO_2 排放常常是无能为力的。第三代则是在可持续发展的大背景下全面发展的广义总能系统，是

与环境相容协调的总能系统,即多领域学科交叉渗透、多能源与多输出一体化的广义总能系统,是新世纪能源动力系统发展的主流方向和前沿。

总能系统(integrated energy system, IES)是近年来提倡的高效合理的能源利用系统,它是一种根据工程热力学原理,提高能源利用水平的概念或方法及其相应的能量系统。目前还没有世界公认的定义,比较普遍的一种说法是:“按照能量品位高低进行梯级利用,从总体上安排好功、热(冷)与物料热力学能等各种能量之间的匹配关系与转换使用,在系统高度上总体地综合利用好各种能源,以取得更好的总效果,而不仅是着眼于单一生产设备或工艺的能的能源利用率或其他性能指标的提高”。总能系统是借助于不同设备或元件的合理搭配,组成一个整体系统,以达到节省能源的目的。它强调的是系统集成与功能,有时尽管这些设备与元件本身并无技术上的改进,但组合得当,也会节能。而系统集成的核心问题在于能的综合梯级利用,即“合理”,要合乎工程热力学的基本原理,尤其是热力学第二定律。按照热力学第二定律所决定的能量品位与温度的高低进行梯级利用,做到“物尽其用”,避免“大材小用”。以燃气轮机(姜伟等, 2002; Herb et al., 2001)为核心的总能系统称为燃气轮机总能系统(gas turbine integrated energy system, GTIES),它是应用最多,又是最具发展潜力的总能系统。

从 20 世纪 80 年代初我国著名的科学家吴仲华先生倡导总能系统概念,至今已有 20 多年。吴先生倡导的能的梯级利用原理,奠定了传统燃气轮机总能系统的集成理论基础。但是,随着能源动力系统不断突出的领域渗透和学科交叉的发展趋势与特点,传统的物理能梯级利用原理已不足以解决超出热力循环范围的科学问题。为此,本研究集体将能的梯级利用原理从热能扩展到化学能或化学能与物理能的综合梯级利用范畴,全面阐述化工动力耦合联产、不同能源互补、与环境相容等多功能系统基本概念,率先提出相关系统的集成优化思路与途径,研究开拓许多新颖的能源动力系统,从而使总能系统的研究获得突破性进展。现在,能的综合梯级利用原理已成为能源动力系统集成开拓的关键核心科学问题,总能系统已成为能源科学发展的主流思想,对能源科学技术和能源学科、乃至国民经济发展都产生了巨大而深远的影响。世界能源动力系统开拓发展正是按照这个思路蓬勃展开,而我国许多科学和技术发展规划中能源领域的具体内容与发展思路,都可看到这个科学用能思想影响的痕迹和烙印。

本章侧重概述与总能系统相关的研究进展与成果,阐述基于能的综合梯级利用的总能系统,论述两代总能系统的基本概念及其演变与差异、主要科学技术问题以及发展概况,论述总能系统的基本过程和基本形式等。

1.2 狭义总能系统

1.2.1 基本概念

狭义总能系统是指热工领域的能源动力系统,即传统的总能系统,如传统的发电系统、热电联产系统以及冷热电多联产系统等。吴仲华教授(1988)对能源的品质和能量的品位概念与梯级利用,以及传统的总能系统概念等都作过深入浅出的阐述。

1. 能源品质与“合理分配、对口供应，做到各得其所”原理

1980年，吴仲华教授在中共中央书记处举办的科学技术知识讲座报告“中国的能源问题及其依靠科学技术解决的途径”中，提出各种不同品质的能源要合理分配、对口供应，做到各得其所，提倡按照“温度对口、梯级利用”原则，大力发展各种联合循环、热电并供与余能利用等总能系统。各种能源品质有高有低，对这些品质要有个综合的评价，以便选择各种适宜的能源来满足国民经济各部门发展的需要。

图1-1表示各种能源经过各种设备转化为各种不同形式的能来使用的情况。图的上边是各种能源，下边是各种使用形式，中间是各种转化过程。从左往右看：天然气、石油、煤、有机物(如薪炭、农作物秸秆)都是常规能源，水力和风力也算是常规能源，但也有把它们与海洋能、地热、太阳能等称为可再生能源，而它们和核能(包括核裂变与核聚变)也有称为新能源。水力、风力只需经过一种机械装置(水轮机、风车)就能直接转化为机械能。水轮机的效率可以超过90%，能源利用率很高。天然气、石油、煤等可作为常规的化工原料，也可以作为动力系统的能源。后者一般要通过热装置，如燃烧炉、燃烧室、锅炉等，与空气一起燃烧，成为高温气体，或直接使用、或产生蒸汽在工业上和生活上(取暖)使用，这些都是热利用。如果要把热转换成机械能就要经过热机。机械能可做功，也可先经过发电机转化为电能后输送到使用部门去，再经过电动机得到机械能做功。太阳能是新能源，它可以通过光电池或太阳能热功转换变成电能，但现在的主要问题是转化效率低，价格比较贵；当然它也可以直接产生蒸汽用于生产或取暖。其他被称作新能源的还有海洋能、地热能、核裂变或聚变能等。

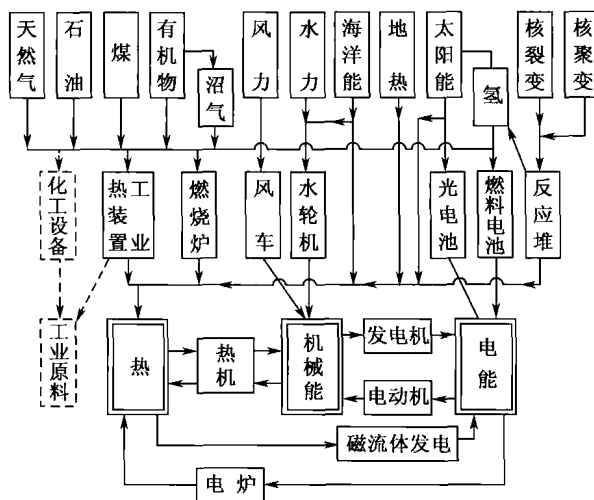


图 1-1 能源及其转化和利用示意图

后者一般要通过热装置，如燃烧炉、燃烧室、锅炉等，与空气一起燃烧，成为高温气体，或直接使用、或产生蒸汽在工业上和生活上(取暖)使用，这些都是热利用。如果要把热转换成机械能就要经过热机。机械能可做功，也可先经过发电机转化为电能后输送到使用部门去，再经过电动机得到机械能做功。太阳能是新能源，它可以通过光电池或太阳能热功转换变成电能，但现在的主要问题是转化效率低，价格比较贵；当然它也可以直接产生蒸汽用于生产或取暖。其他被称作新能源的还有海洋能、地热能、核裂变或聚变能等。

因此，能源有很多种，且各有优缺点。而评价能源品质的指标主要：① 能流的密度。这是指在一定空间或一定面积内能源可提供的功率。显然，如果能流密度很小，则很难用作主力能源。按照目前的技术水平，太阳能的能流密度很小，要通过反射镜集中到一定的地方才可产生高温的蒸汽，因而需要很大的面积。所以能流密度小是太阳能的一个缺点。原子能的能流密度十分大，这是它的优点。除风力外，各种常规能源的能流密度都比较大。② 开发能源的费用和设备价格，也就是所需要的投资。太阳能、风能由大自然提供，不需什么开发费，但目前设备较贵。各种化石燃料与核燃料，从勘探、开采，到加工、运输都需要人力和物力的投资，这些都要考虑进去，才能对每种能源作出全面的比较。根据目前的技术水平，太阳能、风能、海洋能等发电设备的价格为每千瓦上万