

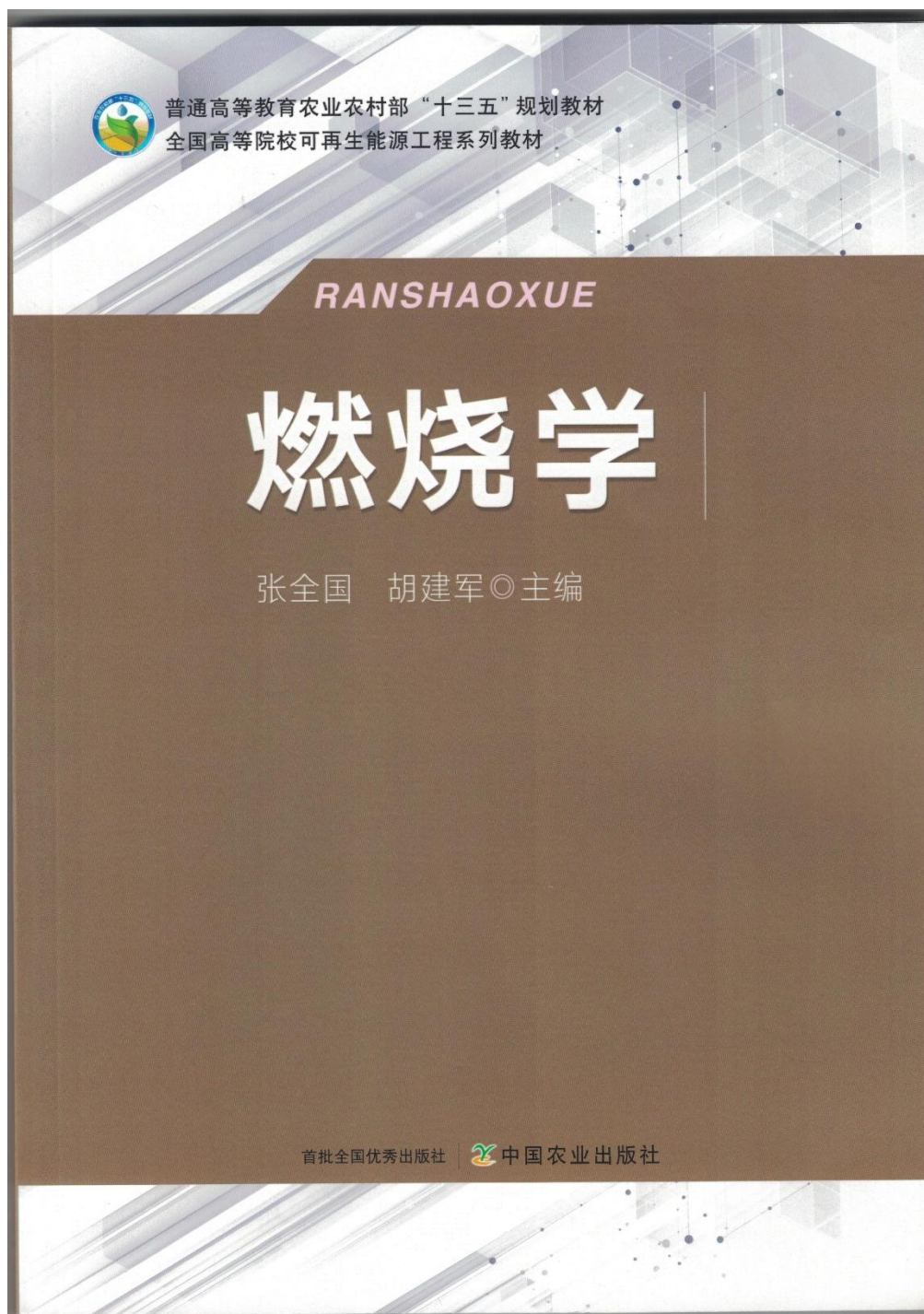
河南省本科高等教育教学成果等级评定
附件材料
教材类成果

目录

七、教材成果.....	1
1 中国农业出版社：燃烧学	1
2 化学工业出版社：热力发电厂	8
3 化学工业出版社：沼气技术及其应用	18
5 中国水利水电出版社：新能源技术经济学	37

七、教材成果

1 中国农业出版社：燃烧学



图书在版编目 (CIP) 数据

燃烧学 / 张全国, 胡建军主编. —北京: 中国农业出版社, 2023. 12

普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材. 全国高等院校可再生能源工程系列教材

ISBN 978-7-109-26287-4

I. ①燃… II. ①张… ②胡… III. ①燃烧学—高等学校—教材 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 284332 号

燃烧学

RANSHAOXUE

中国农业出版社出版

地址: 北京市朝阳区麦子店街 18 号楼

邮编: 100125

责任编辑: 马颀晨 文字编辑: 李兴旺

版式设计: 杨婧 责任校对: 吴丽婷

印刷: 中农印务有限公司

版次: 2023 年 12 月第 1 版

印次: 2023 年 12 月北京第 1 次印刷

发行: 新华书店北京发行所

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 18

字数: 438 千字

定价: 48.00 元

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书, 如有印装质量问题, 我社负责调换。

服务电话: 010-59195115 010-59194918

主 编 张全国 胡建军

副主编 孙 勇 荆艳艳 贺 超 张志萍

编 者 (按姓氏笔画排序)

王 毅 (河南农业大学)

王艳锦 (黄河科技学院)

刘庆玉 (沈阳农业大学)

孙 勇 (东北农业大学)

李 刚 (河南农业大学)

李 松 (吉林农业大学)

李志合 (山东理工大学)

李继红 (华北电力大学)

李期斌 (重庆大学)

张全国 (黄河科技学院)

张会岩 (东南大学)

张志萍 (河南农业大学)

荆艳艳 (河南农业大学)

胡建军 (河南农业大学)

贺 超 (河南农业大学)

晏水平 (华中农业大学)

蒋丹萍 (河南农业大学)

审 稿 易维明 (山东理工大学)

周劲松 (浙江大学)

赵广播 (哈尔滨工业大学)

前 言

燃烧是一门十分古老的技术和科学，广泛存在于自然界当中。燃烧是物质发生剧烈氧化反应同时伴随着发光和发热的现象，是涉及化学、热力学、传热传质学和流体力学等问题的复杂过程，也是主要的能源利用形式之一。燃烧技术被广泛应用于动力、冶金、化工、建材、交通和日常生活当中，全世界 85% 的能源都来自燃烧，燃烧现象无处不在。2013 年中国农业出版社出版的《燃烧学》受到了广大读者尤其是农林院校师生的一致好评，被评为全国高等农业院校优秀教材。

随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高，对能源需求量日益增多，世界性的能源问题、环境污染问题、安全问题成为社会稳定和发展的关键，加强燃烧科学的理论研究和提高燃烧技术水平已成为当务之急。同时生物柴油、燃料乙醇、生物质气化气、沼气等新能源的基础理论和工程技术应用程度也在不断加大，新型清洁燃烧技术和燃烧测试诊断方法，对了解燃料燃烧过程、燃烧流场和燃烧产物的内在特性至关重要。因此，本书在普通高等教育农业部“十二五”规划教材、全国高等院校可再生能源工程系列教材《燃烧学》的基础上，针对读者提出的意见和建议进行了较大幅度的增补和修订工作。

本书重点阐述各类燃料燃烧的一般现象和规律，分析影响燃烧的各种化学及物理因素，介绍燃烧基本理论在能源利用工程及环境工程中的应用，并探索提高燃料利用率和燃烧技术水平的途径。同时结合能源发展和利用现状，增补了燃料乙醇、生物柴油、天然气和沼气等燃料的特性及燃料的燃烧理论与技术；针对燃烧学的研究方法和研究技术进步，主要增添了燃烧流场的诊断和测量方法、燃烧过程数值模拟的内容；而且结合燃烧污染物排放及影响，在燃烧污染及防治中增添并丰富了烟尘的污染与防治。此外，对 2013 年出版的《燃烧学》中部分陈旧的内容进行了修订和完善。

本书共 11 章，由张全国、胡建军任主编，孙勇、荆艳艳、贺超、张志萍任副主编。其中第一章由张全国和王艳锦编写，第二章由张全国和王毅编写，第三章由胡建军和刘庆玉编写，第四章由贺超和李志合编写，第五章由张志萍和蒋丹萍编写，第六章由荆艳艳和张志萍编写，第七章由李松和李继红编写，第八章由张全国和荆艳艳编写，第九章由孙勇和晏水平编写，第十章由张会岩和李期斌编写，第十一章由胡建军和李刚编写。

本书素材的积累和正文的编著得到了著名燃烧科学家、中国科学院院士庄逢辰教授和中国工程院院士陈勇研究员的指导和帮助。在撰写过程中，得到了中国高等教育学会工程热物理研究会理事长、大连理工大学沈胜强教授、河南省科学院雷廷宙研究员的指导和帮助，并提供了许多相关资料。另外，河南农业大学刘圣勇、焦有宙、徐桂转、黄黎、岳建芝、郭前辉等老师以及李亚猛、张甜、岳田、张学婷、金鹏等研究生也为本书的编写付出了辛勤的劳动，谨此一并表示衷心的感谢。由于书中内容涉及面广，编者水平有限，难免存在疏漏或不足之处，敬请读者和同行专家批评指正。

编者

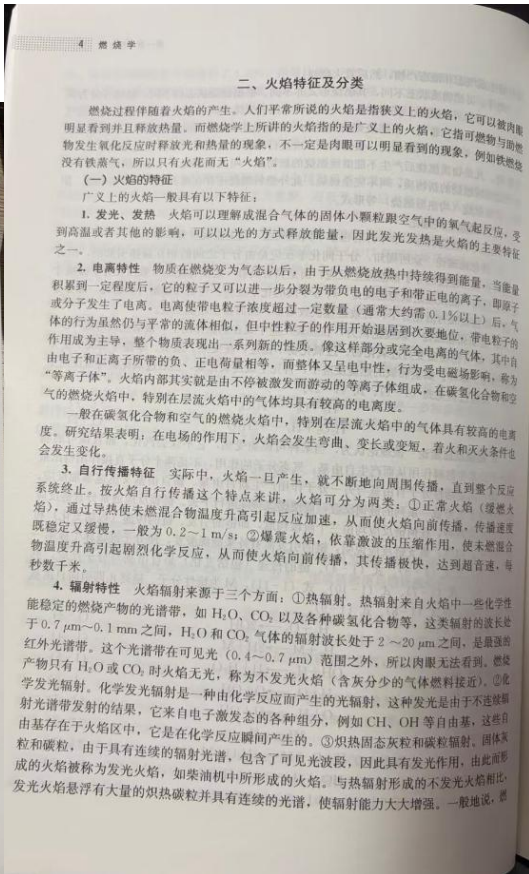
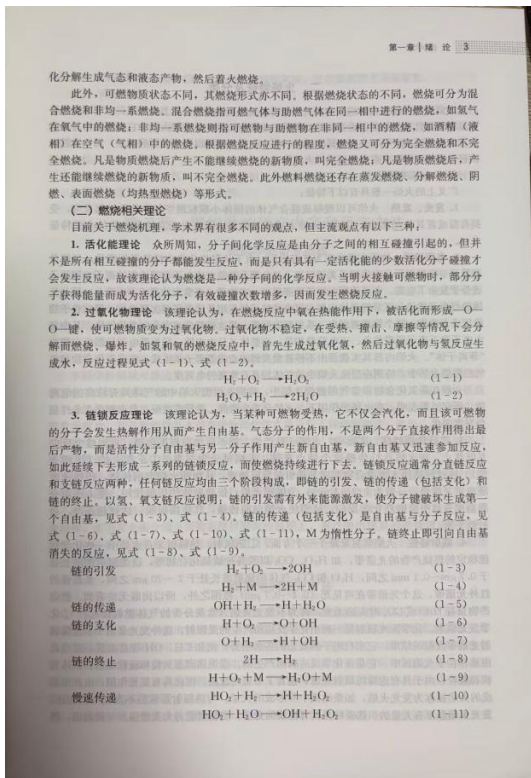
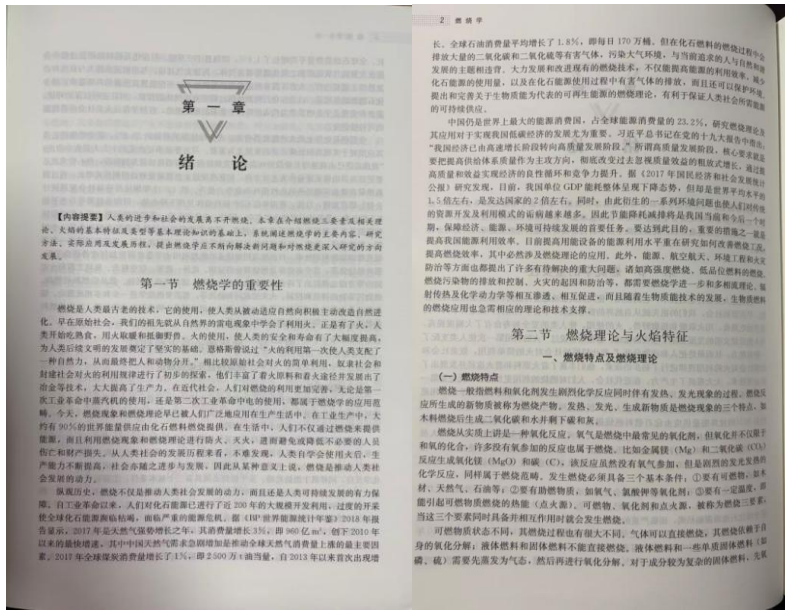
2023 年 6 月

目 录

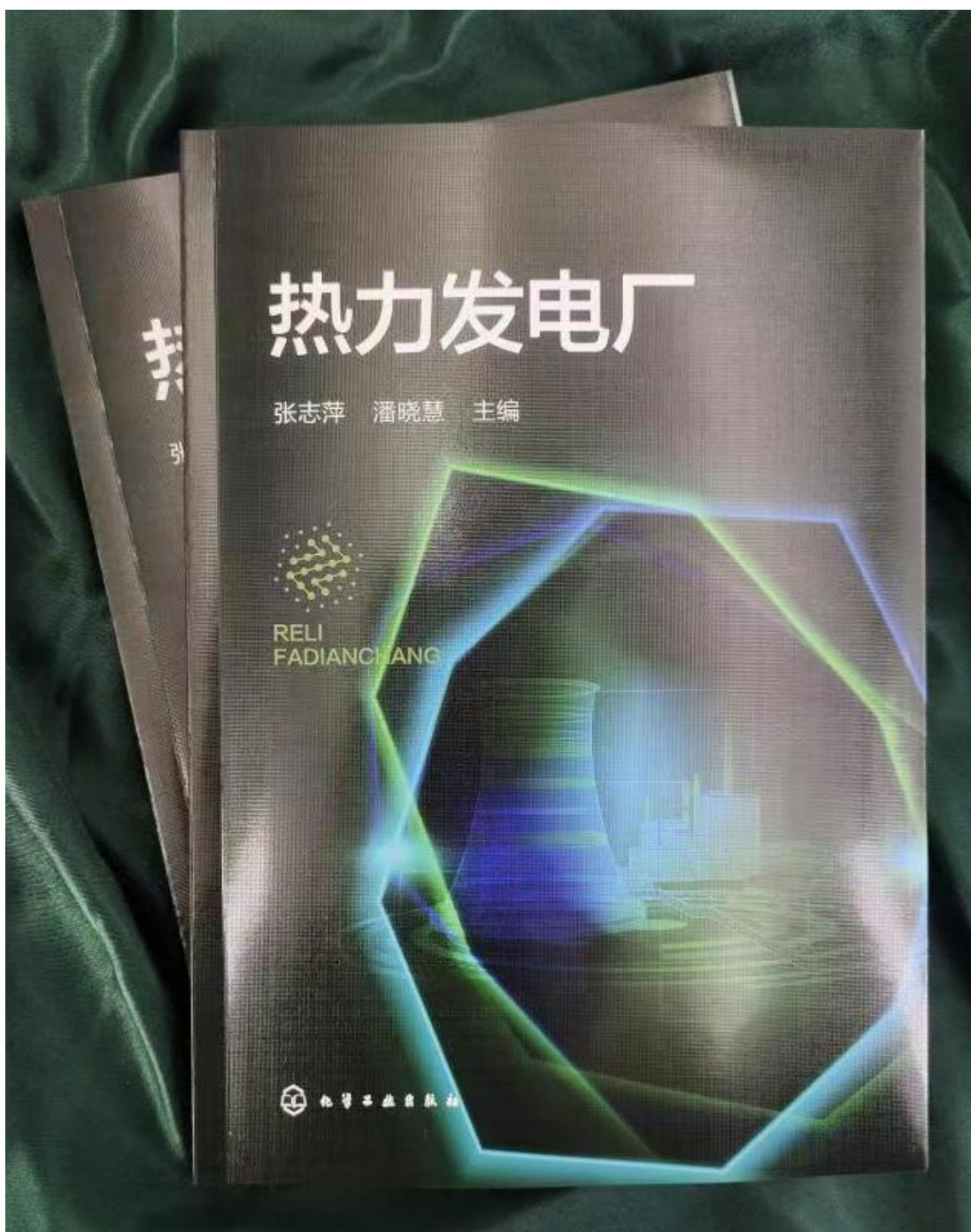
前言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 燃烧学的重要性	1
第二节 燃烧理论与火焰特征	2
一、燃烧特点及燃烧理论	2
二、火焰特征及分类	4
第三节 燃烧学的研究内容和研究方法	5
一、燃烧学的研究内容	5
二、燃烧学的研究方法	5
三、燃烧学的应用	6
第四节 燃烧学的发展简史	6
复习思考题	8
第二章 燃料	9
第一节 燃料的分类及化学组成	9
一、燃料的定义及用途	9
二、燃料的分类	10
三、燃料的化学组成及表示方法	11
第二节 燃料的发热量	16
第三节 固体燃料	18
一、煤	18
二、生物质燃料	22
第四节 液体燃料	28
一、石油	28
二、燃料乙醇	31
三、生物柴油	32
第五节 气体燃料	34
一、天然气	35
二、沼气	36
三、其他气体燃料	38



2 化学工业出版社：热力发电厂



内容简介

《热力发电厂》基于常规热力发电厂的发展方向和新能源热力发电的技术现状，在概述我国电力工业发展及热力发电厂特性等的基础上，系统介绍了发电厂动力循环及其热经济性、热电联产及其供热系统、热力发电厂原则性和全面性热力系统，并阐述了太阳能热发电系统及核能、生物质能、地热能等新能源热力发电系统。

本书可供能源动力等相关专业及大型热力发电厂的有关工程技术人员参考，也可作为高等学校能源与动力工程相关专业热力发电厂课程的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

热力发电厂/张志萍, 潘晓慧主编. —北京: 化学工业出版社, 2024. 2

ISBN 978-7-122-44582-7

I. ①热… II. ①张… ②潘 III. ①热电厂-高等学校-教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2023) 第 241507 号

责任编辑: 孙高洁
责任校对: 李雨函

文字编辑: 陈立璞
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社
(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京科印技术咨询服务有限公司数码印刷分部
710mm×1000mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 168 千字
2024 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 80.00 元 版权所有 违者必究

编审人员名单

主 编 张志萍 潘晓慧
编写人员 张志萍 潘晓慧 青春耀
李亚猛 张 甜 刘 亮
主 审 张全国

前言

随着社会经济的迅速发展，电能逐渐成为利用最多的能源形式之一。目前，热力发电是主要发电形式之一，热力发电厂也成为能源与动力工程专业本科生的一门必修课。为适应我国电力工业飞速发展的趋势，助力我国碳达峰、碳中和目标的实现，以及满足高等学校能源与动力工程专业教学和工程应用的实际需求，尤其是兼顾农林类院校等新工科新农科融合特色，编写了这部内容精简、新能源发电比重较大的图书。

希望通过阅读本书，读者能够掌握热力发电厂基本系统的构成，熟悉热力发电厂热经济性的评价方法及其评价指标，清楚热力发电厂动力循环的过程，进行热力发电厂的热经济性分析，掌握热力发电厂主要热力系统的构成及原理，重点掌握回热加热系统、供热系统、输煤系统和供水系统、除尘除灰系统的构成及基本原理，对热力发电厂整体进行经济性评价，初步了解热力发电厂的原则性热力系统和全面性热力系统布置。同时，本书介绍了多种新能源热力发电系统，帮助读者熟悉新能源热力发电系统的原理和关键技术，这将为碳中和专业人才的培养提供重要支持。

本书由河南农业大学张全国教授主审，河南农业大学张志萍和潘晓慧主编并统稿。第1章和第4章由李亚猛编写，第2章由潘晓慧编写，第3章由张志萍编写，第5章由青春耀编写，第6章由青春耀、李亚猛、张甜和刘亮共同编写。农业农村部可再生能源新材料与装备重点实验室的研究生焦映钢、杨旭东、艾福轲等也为本书的编写付出了辛勤劳动，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者指正。

编者

2023年12月

目录

第 1 章 绪论	001
1.1 中国电力工业的发展	001
1.2 认识火力发电厂	004
1.2.1 火力发电厂概述	004
1.2.2 热经济指标	005
1.2.3 运行特性	006
第 2 章 发电厂动力循环及其经济性	007
2.1 火力发电厂的热经济性评价方法	007
2.1.1 热经济性评价的主要方法	007
2.1.2 两种热经济性评价方法的比较	014
2.2 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	014
2.3 发电厂的动力循环	019
2.3.1 朗肯循环及其热经济性	019
2.3.2 蒸汽初终参数对发电厂热经济性的影响	020
2.3.3 中间再热对发电厂热经济性的影响	024
2.3.4 回热对发电厂热经济性的影响	027
第 3 章 热电联产及其供热系统	034
3.1 热负荷及其载热质	034
3.1.1 热负荷的分类和计算	034
3.1.2 供热载热质及其选择	038
3.2 热电联产及热电厂总热耗量的分配	039
3.2.1 热电分产与热电联产的特点	039
3.2.2 热电厂总热耗量的分配	040
3.3 热电联产的评价指标及其综合效益	042

3.3.1	热电联产系统	043
3.3.2	热电分产系统	045
3.3.3	当量发电效率	046
3.3.4	品质指数	046
3.3.5	节能减排性能评价指标	047
3.3.6	国内热电联产综合效益	047
3.4	热电厂的热化系数	048
3.4.1	热化系数的确定	048
3.4.2	影响热化系数的因素	049
3.5	供热式机组的选型	051
3.5.1	热电厂供热运行方式概述	051
3.5.2	机组运行方式设计	053
3.6	热电厂的对外供热系统	056
3.6.1	供热热网的特点	056
3.6.2	汽网的供汽系统及其设备	056
3.6.3	水网的供热设备及其系统	058
第4章 热力发电厂原则性热力系统		060
4.1	回热加热系统	060
4.1.1	回热加热器的类型及结构	060
4.1.2	表面式加热器疏水系统及其热经济性分析	065
4.1.3	疏水冷却段(器)及其热经济性	067
4.1.4	回热加热系统的蒸汽冷却器及自动旁路保护	068
4.2	给水除氧系统	073
4.2.1	给水除氧的必要性	073
4.2.2	给水除氧方法	074
4.2.3	热力除氧原理	075
4.2.4	除氧器的类型以及构成	076
4.2.5	除氧器的热平衡及自生沸腾	080
4.2.6	除氧器的运行方式及其热经济性评价	081
4.3	热电厂的工质损失及补充	084
4.3.1	汽水损失的原因及数量	085
4.3.2	减少汽水损失的措施	085
4.3.3	汽水损失的补充方法	086
4.3.4	化学补充水的热力系统	087
4.3.5	蒸发设备补充水及其热力系统	087
4.4	认识热力发电厂原则性热力系统	088

6.4	地热能热力发电系统	136
6.4.1	各国地热能热力发展现状	137
6.4.2	地热能发电系统	138
6.4.3	地热能发电关键技术	139
6.4.4	我国地热能利用现状	140
6.4.5	我国地热能发展机遇	144
6.4.6	我国地热未来发展趋势	145
参考文献		146

4.4.1	热电厂“热力系统”的概念及分类	088
4.4.2	热力系统与原则性热力系统、全面性热力系统的联系与区别	089
第5章 火力发电厂全面性热力系统		092
5.1	主蒸汽系统	092
5.1.1	主蒸汽系统的类型与选择	092
5.1.2	主蒸汽系统设计时应注意的问题	095
5.2	再热式机组的旁路系统	098
5.2.1	旁路机组及其作用	098
5.2.2	旁路系统的类型	100
5.3	回热抽汽及其疏水管道系统	102
5.3.1	回热抽汽隔离阀和止回阀	102
5.3.2	回热加热抽汽的疏水管道系统	103
5.4	主凝结水管道系统及设备	106
5.5	除氧器全面性热力系统	108
5.5.1	除氧器的安全运行	108
5.5.2	除氧器全面性热力系统的分类	109
5.6	给水管道系统	111
5.6.1	单母管制给水系统	111
5.6.2	切换母管制给水系统	111
5.6.3	单元制给水系统	112
5.7	热电厂的疏放水系统	113
5.7.1	疏放水来源及疏水的重要性	113
5.7.2	输水系统及其组成	114
5.7.3	疏放水系统及其组成	116
第6章 新能源热力发电系统		118
6.1	太阳能热发电系统	118
6.1.1	太阳能热发电系统基本构成	118
6.1.2	典型太阳能热发电系统	121
6.2	核能热力发电系统	128
6.2.1	核能发展简史	128
6.2.2	核能发电原理	129
6.2.3	核电厂的主要设备	130
6.2.4	核电发展面临的主要问题	133
6.3	生物质能热力发电系统	134

第1章 绪论

1.1 中国电力工业的发展

电力工业通过发电设施将化石能源（煤炭、石油、天然气）和非化石能源（水能、海洋能、风能、太阳能、生物质能、核能）等一次能源转换成电能，再通过输电、变电与配电系统供给用户。作为能源的工业部门，包括发电、输电、变电、配电等环节。电能的生产过程和消费过程是同时进行的，其不能中断，也不能储存，需要统一调度和分配。电力工业为国民经济其他部门提供基本动力，是国民经济发展的先行部门。

改革开放以来，我国电力工业进入了高速发展的时代。经过几十年的发展，我国的电力工业行业规模“从小到大”，电力工业行业实力“从弱到强”，能源供给结构日渐完善，供电能力稳步增强，创造了世界电力工业历史上空前的“中国奇迹”。

21世纪前20年，是我国电力发展的关键时期，也是中国电力发展规模最大的时期。20世纪50—60年代，我国平均每年新增装机容量在1.1GW左右，到了70年代上升为4.1GW，80年代上升为7.2GW，90年代上升为10GW，几乎每年翻一番。在1990年底，我国发电装机容量仅为美国的20.3%，而到2015年，我国发电装机容量达到了145.4GW，超越美国，跃居世界第一；同时发电量也超过了美国，达到5.42万亿千瓦时。

中国装机容量和发电量都超过了美国，达到5.42万亿千瓦时，跃居世界第一。改革开放初期，中国只有为数不多的300MW火电机组。而到2007年底，我国300MW、600MW及以上机组已分别占总装机容量的50.15%和31.23%。目前，300MW、600MW及以上大型发电机组已成为电网的主力机组，并逐步向世界先进水平看齐。截至2020年底，

中国已拥有超过百万千瓦级超临界机组，大机组的广泛应用使得我国电力的发电效率大大提高，我国热电厂供电煤耗从1978年的471g/(kW·h)下降到了2019年的306g/(kW·h)，同时，中国的电力结构也在不断优化。在2020年22亿千瓦的装机容量中，火电装机容量为134517万千瓦，水电为37016万千瓦，核电为4589万千瓦，并网的风电为28155万千瓦，并网的太阳能发电为21343万千瓦，可见火电仍然在其主体，份额约占54.5%，其次为水电，占16.8%，风电约占12.4%，太阳能发电约占11.3%，核电最少，只占2.27%左右。2020年，我国发电量达到7.42万亿千瓦时，其中，火力发电量为5.28万亿千瓦时，同比增长1.2%，占全国发电量的71.16%；水力发电量同比增长5.3%，总量提升至2.218万亿千瓦时，占比约为16.36%，仍是我国第二大发电类型，火力发电量排在第二，同比增长10.5%，达到了4145亿千瓦时，占全国发电量的比例为5.4%；第四是核电，发电量为3682.5亿千瓦时，同比增长3.1%，占比为4.9%；最后是太阳能发电，发电量达到了1421亿千瓦时，同比增长8.5%，但占全国发电量的比例只有1.95%。不过风电和太阳能发电这两类可再生能源发电的装机容量增长很快，2020年两者装机容量均增加了34.6%，太阳能发电增加了24.1%，也正是因此这两类装机容量的高速增加，使得2020年火电的装机容量增加量首次降到了50%以下。截至2023年7月底，全国累计发电装机容量约27.4亿千瓦，同比增长11.5%，其中，太阳能发电装机容量约4.9亿千瓦，同比增长42.9%；风电装机容量约5.9亿千瓦，同比增长14.3%。整体来看，虽然清洁能源的占比在2020年就被获得了提升，但我国电力市场依然高度依赖“以燃煤发电为主的大火电”，能源清洁化道路依然漫长。

我国在注重研究火电装机容量的飞速增长，也开始重视电力的节能环保问题。自1990年起，我国先后对《火电厂大气污染物排放标准》进行修订，对燃煤锅炉二氧化碳、氮氧化物的排放进行了更严格的限制。目前火电厂参考的标准《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)是2012年1月1日实施的。该标准规定了火电厂大气污染物排放限值、监测和监控要求，以及标准的实施与监督等。该标准适用于现有火电厂的大气污染物排放管理以及火电厂建设项目的环境影响评价、环境保护设施设计、竣工环境保护验收及其投产后的大气污染物排放管理。还适用于使用单台出力65t/h以上层燃炉、煤粉炉以外的燃煤发电锅炉，各种容量的循环流化床锅炉，单台出力45t/h以上层燃炉、燃气发电锅炉；各种容量的燃气轮机组的火电厂；单台出力80t/h以上采用煤矸石、生物质、油页岩、石油焦等燃料的发电锅炉；参照标准中循环流

化煤火力发电锅炉的污染物排放控制要求执行。整体电气化联合循环发电的燃气轮机执行该标准中燃天然气的燃气轮机排放限值。但该标准不适用于各种容量的生活垃圾焚烧、危险废物焚烧的火电厂。为贯彻《中华人民共和国环境保护法》，改善环境质量，落实排污许可制度，加快环境技术管理建设，推动污染防治技术进步，环境保护部批准《火电厂污染防治可行技术规范》为国家环境保护标准，并于2017年6月1日实施。随着相应法律法规的实行，我国常规的火电节能减排逐步进入正轨，整体技术水平接近世界前列。

改革开放以来，我国电力设备制造取得了显著的成绩，但在相当长的一段时间内，300MW及以下机组是我国发电设备的主流。2000年，上海电气成功制造出我国第一套600MW超临界火电机组。2006年，上海电气成功制造出我国第一套百万千瓦超临界火电机组。同年，哈尔滨电气自行开发研制出国内首套600MW超临界汽轮机，成为我国发电设备发展史上的里程碑。2007年12月，由哈尔滨电气集团研制的三大主机设备的江苏泰州电厂100万千瓦超临界发电机组，经鉴定研究所和上级鉴定设备成套设计研究院对其性能进行测试，其热耗约为126kJ/kWh，供电煤耗为285g/kWh，达到了国际先进水平。到2010年底，国内三大电站设备制造集团承接的超临界火电机组的订单就已经达到了200余台，有300多台设备已经投运，超临界火电机组已经投运最多的国家之一。在火电之外，我国核电也在稳步发展。我国核电起步于20世纪80年代中期，1985年自行设计与建造的首座300MW的压水堆核电站——秦山核电站，起到了开拓者的重要作用。而目前我国已经拥有了1000MW及以上功率的压水堆核电站的设计和建造技术，建设并运行了全球首套AP1000技术的核电机组——三门核电1号机。在核电的生产运营方面，截至2020年末，我国共有16座核电站投入运行，运行核电机组达49台，总装机容量达51027.16MW，全国累计发电量为74170.40亿千瓦时，运行核电机组累计发电量为3662.43亿千瓦时，占全国累计发电量的4.74%。截至目前，我国在建核电机组24台，总装机容量2981万千瓦，继续保持全球第一。商运核电机组54台，总装机容量5682万千瓦，位列全球第三。

自《中华人民共和国可再生能源法》实施以来，我国进入了可再生能源快速发展时期，市场规模不断扩大。可再生能源开发利用取得明显成效，水电、风电、光伏发电等能源装机规模均居世界前列。可再生能源在能源结构中的占比不断扩大，能源结构朝着清洁化、优质化方向发展，为我国经济快

速发展提供了重要保障。2023年前三季度，全国可再生能源新增装机1.72亿千瓦，同比增长93%，占新增装机74%。其中，水电新增装机768万千瓦，风电新增装机3141万千瓦，光伏发电新增装机13294万千瓦，生物质发电新增装机207万千瓦。截至2023年9月底，全国可再生能源装机容量约为13.84亿千瓦，同比增长20%，装机容量占我国总装机容量49.4%，其中，水电装机4.19亿千瓦，风电装机4.27亿千瓦，光伏发电装机5.21亿千瓦，生物质发电装机0.43亿千瓦。可再生能源装机规模不断突破新纪录，装机规模已超过火电，可再生能源发展稳步提升。

近年来，在可再生能源发电技术迅猛发展的同时，我国高效、清洁、低碳、高品质的电力发电技术不断创新，相关技术研究和实际运用达到了国际领先水平。未来短期内火电将继续占据我国发电行业的主导地位。但是从长期发展来看，以化石能源为主的传统能源发展方式难以持续，必须走清洁低碳发展的道路，尽快实现发电方式的转变，助力我国碳达峰、碳中和目标的实现。用清洁性能替代化石能源，但在此过程中，还需要火电机组提供支撑，弥补可再生能源发电过程中出现的发电不足等问题，保证电力的供应充足。因此，为服务国家“双碳”目标，以及“双碳”战略部署后电力行业的长远发展需要，未来火电行业相关企业应积极转变，积极融入能源新形态电力市场建设，加快推进火力发电机组的升级改造，综合考虑节能改造、调峰、调压和备用功能，积极发挥其在能源服务市场上的“托底保供”的作用。

1.2 认识热力发电厂

1.2.1 热力发电厂概述

热力发电厂是指在发电的同时，还利用汽轮机的抽汽或排气为用户供热，简称热电厂。其主要工作原理是将发电后的余热再次加热后供暖。热电厂运行过程中，燃料在锅炉内燃烧，将锅炉里的水加热成高温高压蒸汽，然后经一定温度、压力的蒸汽主汽阀和调节阀进入汽轮机缸内，依次经过一系列环形安装的喷嘴和动叶栅做功，将其热能转换成汽轮机转子旋转的机械能，通过联轴器驱动发电机发电。做功后的蒸汽由汽轮机排汽部分排出，排汽至凝汽器凝结成水，凝结水再送至加热器，加热后的凝结水送回水

注锅炉加热成蒸汽，蒸汽重新进入汽轮机做功，如此形成一个循环，也就是说蒸汽的热能先在喷嘴中转变为动能，然后在动叶栅中转变为机械能。

热电厂（与发电厂不同，主要是为热用户供热，在保证供热的基础上多余蒸汽用以发电）由于客观事实不可能与大型发电厂在同等超临界上“竞价上网”，其装机容量受热负荷大小、性质等制约，机组规模要远小于大型火电机组。热电厂由于既发电又供热，锅炉容量大于同规模发电厂，并且处理能力也大，为了满足供热要求，热电厂必须靠近热负荷中心，而热负荷中心往往又是人口密集区的城镇中心，其用水、征地、拆迁、环保要求等均大大高于同容量发电厂，同时还必须在发电的基础上建设合理的供热管网。

一般发电厂都采用蒸汽轮机，只生产电能向用户供电，工业生产和日常生活用热则由特设的工业锅炉及采暖锅炉单独供应。这种能源生产方式称为热电厂。在热电厂中采用供热式汽轮机，除了供应电能以外，同时还利用做功（即发电）的汽轮机抽汽或排汽来满足生产和生活所需的热量。这种能源生产方式称为热电联产。在热电联产中，燃料的化学能先转换为高位热能用来发电，然后做功过的低位热能向用户供热，这符合使用价值和综合能效的差别。所以热电厂的特点是，一次能源利用得比较合理，减少了供电损失，梯级利用，能尽其用，节约了地区整个能源供应系统的能源。

一个庞大而又复杂的热电厂主要由五个系统组成：燃料系统、燃烧系统、汽水系统、电气系统和控制系统。在这些系统中，最主要的设备是锅炉、汽轮机、发电机。锅炉的主要任务是通过使燃料燃烧将化学能转化为热能，并且以此热能加热水，使其成为一定数量和压力（压力和温度）的蒸汽，供汽轮机发电；汽轮机是完成蒸汽热能转化为机械能的汽轮机组的基本部分，发电机是将机械能转化为电能的电气设备。除此之外，一个热电厂的运行也需要别的系统进行辅助，如供水系统、燃料储运系统、除灰系统、水处理系统、厂用电系统以及变电所等。

1.2.2 热经济指标

热电厂的热经济指标相比蒸汽式电厂和供热锅炉房要复杂得多，前者同时生产形式不同、质量不等的两种产品——热能和电能；而后者只生产单一产品。所以反映热电厂的热经济性，除了用总的热经济指标以外，还必须有生产热、电两种产品的分项指标。

3 化学工业出版社：沼气技术及其应用



沼气技术 及其应用

第五版

● Biogas Technology
● and Application

张全国

张志萍

主编



化学工业出版社

· 北京 ·

内容简介

本书以生态循环农业为核心,结合近几年沼气技术领域的新技术与新发展,在第四版的基础上进行了修订和完善,系统补充了最新的数据和资料,详细介绍了沼气技术基础,户用沼气池的设计、施工及运行管理,沼气工程的设计与施工及运行管理,沼气能源化利用的基本原理,沼气发电技术以及其他沼气综合利用技术,沼液加工利用技术和沼渣综合利用技术以及以沼气为组带的生态农业模式。

本书适合广大农业技术人员,从事现代农业建设和美丽乡村建设的组织管理人员和基层沼气建设工作者参阅,可作为农业工程、生态农业、可再生能源工程和农业环境工程等领域科技工作者的参考资料,亦可作为高等院校相关专业师生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沼气技术及其应用 / 张全国, 张志萍主编. —5 版

—北京: 化学工业出版社, 2024.2

ISBN 978-7-122-44380-9

I. ①沼… II. ①张… ②张… III. ①沼气-技术
IV. ①S216.4

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 209289 号

责任编辑: 刘 军 孙高洁
责任校对: 刘 一

文字编辑: 李娇娇
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 24% 字数 437 千字 2024 年 2 月北京第 5 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编：张全国 张志萍

副主编：张 洋 张 寰 李亚猛

编写人员：（按姓名汉语拼音排序）

蒋丹萍 荆艳艳 李亚猛 路朝阳

岳建芝 张 寰 张 甜 张全国

张 洋 张志萍 朱胜楠

前言

“十四五”开局之年，我们迎来了碳达峰、碳中和的“双碳”时代，加快发展生物质能源开发利用技术对实现“双碳”目标至关重要。沼气工程作为一种环境友好的废弃物资源化利用的零（负）碳新能源技术，具有低碳环保、适用范围广、社会经济效益显著等特点。推广应用沼气工程技术是有效改善农村生态环境状况、提高农民生活质量和健康水平的重要手段，也是生态文明建设时代发展循环经济、生态农业、零碳能源的必由之路。《沼气技术及其应用》自 2005 年第一版、2008 年第二版、2013 年第三版以及 2017 年第四版出版以来，受到广大读者尤其是沼气行业读者的广泛好评，本书于 2007 年荣获第九届中国石油和化学工业科技图书一等奖，2009 年获得“中国书刊发行业协会全行业优秀图书畅销品种”。

近年来，我国沼气基础理论不断完善，沼气工程技术逐步优化，沼气工程装备更新换代，沼气产业快速发展，沼气科学技术与工程应用领域的研究进展日新月异，许多读者希望本书尽可能多地反映沼气科学技术与工程应用的最新研究成果，并建议对本书进行修订再版。为此，根据化学工业出版社的修订计划，在本书第四版的基础上进行了部分增补和修订工作。

本书系统地介绍了沼气技术的发展及其在“双碳”目标实现中的作用，沼气技术基础，户用沼气池的设计、施工及运行管理，沼气工程的设计与施工及运行管理，沼气资源化利用的基本原理、沼气发电技术以及其他沼气综合利用技术，沼液加工利用技术，沼渣综合利用技术和以沼气为纽带的生态农业模式，充分反映了沼气技术的国内外最新进展。

本书的第五版由张全国、张志萍担任主编，张洋、张寰、李亚猛担任副主编，其中第一章由张全国和张志萍修编，第二章由李亚猛和蒋丹萍修编，第三章由张洋和岳建芝修编，第四章由张洋和张甜修编，第五章由路朝阳和李亚猛修编，第

第六章由张寰和张洋修编，第七章由李亚猛和张寰修编，第八章由荆艳艳和朱港修编，全书最后由张全国、张志萍统稿。本书第五版的修编工作得到了化学工业出版社的帮助和大力支持，农业农村部可再生能源新材料与装备重点实验室的研究生们也为本书第五版的修编工作付出了辛勤的劳动，在此一并致以衷心的感谢。虽然本书的第五版内容注意吸收了沼气技术发展的最新成果，参考引用了沼气同行们的技术资料，但因编写人员学术水平和实践经验所限，书中还可能有一些疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2023年5月

目录

第 1 章 绪论	001
1.1 沼气技术发展历程	001
1.2 沼气技术在“双碳”时代的作用	005
1.2.1 缓解我国化石能源供应压力	005
1.2.2 改善农民生活环境及卫生条件	005
1.2.3 控制局部地区环境污染	006
1.2.4 促进农业生态环境的改善	007
1.2.5 促进新农村建设	008
1.2.6 助力“双碳”目标实现	009
参考文献	010
第 2 章 沼气技术基础	011
2.1 沼气发酵微生物	011
2.1.1 沼气发酵微生物种类	011
2.1.2 沼气发酵微生物之间的关系	012
2.1.3 微生物沼气发酵基本原理	012
2.2 沼气发酵生化过程及其工艺调控	014
2.2.1 沼气发酵原料	014
2.2.2 沼气发酵原料的产气特性	016
2.2.3 沼气发酵原料的前处理	019
2.2.4 沼气发酵工艺及控制条件	027
2.3 沼气干发酵	054

录目

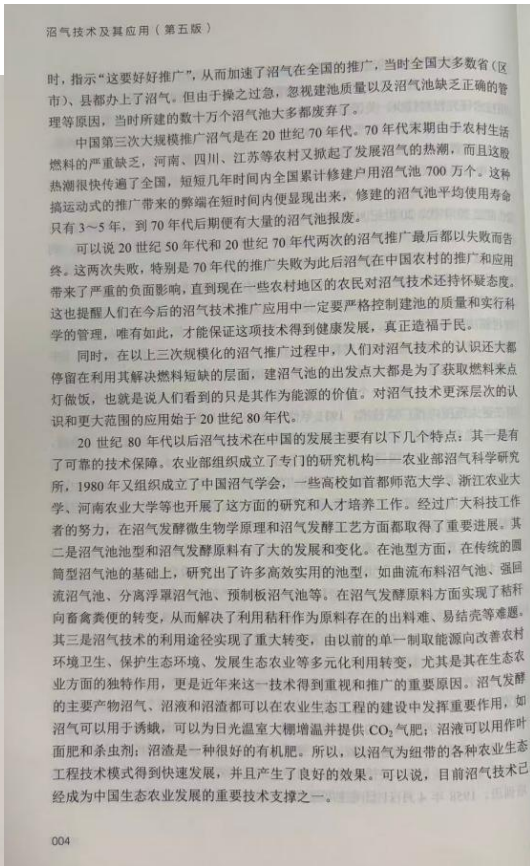
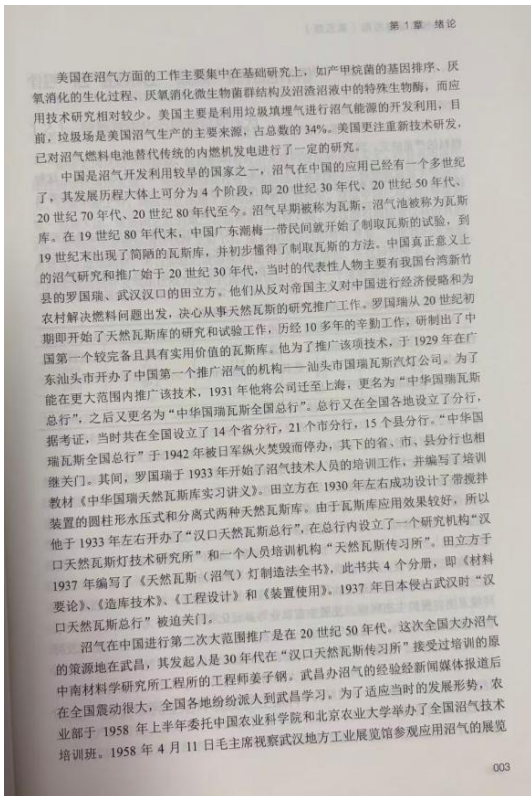
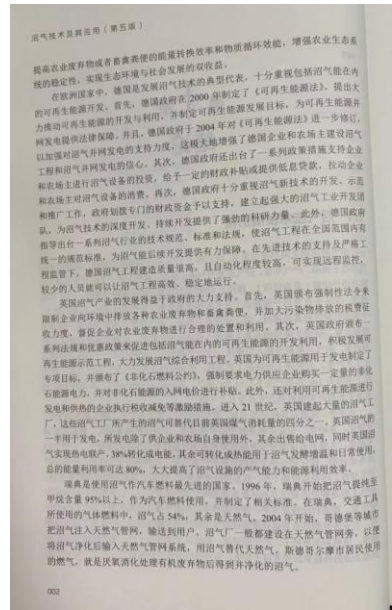
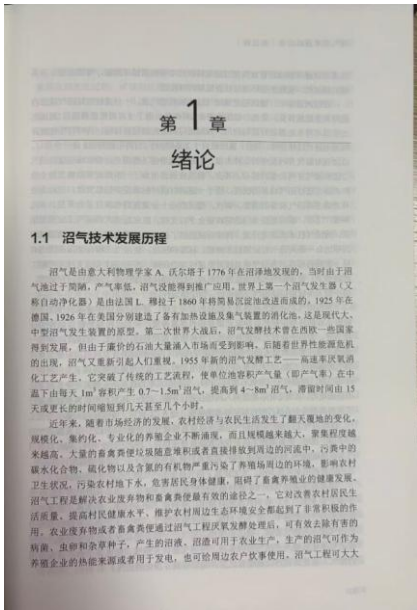
2.3.1	沼气干发酵机制	054
2.3.2	沼气干发酵工艺类型	055
2.3.3	沼气干发酵工艺条件控制	056
2.3.4	发酵过程管理	059
2.4	沼气发酵潜力的动力学特性	060
2.4.1	沼气发酵反应的吉布斯自由能变化	060
2.4.2	氢分压对挥发性脂肪酸降解的影响	062
2.4.3	沼气发酵动力学	065
2.5	沼气提纯技术	072
2.5.1	沼气脱水工艺及装置	073
2.5.2	沼气脱硫工艺及装置	075
2.5.3	沼气脱二氧化碳工艺及装置	087
2.6	纯化沼气应用技术	090
2.6.1	纯化沼气并入燃气管网作为燃气方面的应用	091
2.6.2	纯化沼气在车用燃料方面的应用	091
2.6.3	纯化沼气在沼气燃料电池方面的应用	092
	参考文献	093
第3章	户用沼气池的设计、施工及运行管理	095
3.1	户用沼气池的设计	095
3.1.1	沼气池设计原则	095
3.1.2	户用沼气池的常用池形及其特点	095
3.1.3	沼气池设计参数的确定	099
3.1.4	沼气池设计计算	100
3.2	户用沼气池施工工艺	101
3.2.1	建池时间的选择	101
3.2.2	池形选择	102
3.2.3	建池地址的选择	102
3.2.4	施工工艺的选择	103
3.2.5	建筑材料的选择	103
3.2.6	土方工程	105

3.2.7	施工标准及其操作要点	107
3.2.8	沼气池的验收	110
3.3	输气管道的安装	110
3.3.1	输气管道管材的选择	111
3.3.2	管径的选择	111
3.3.3	管件的选用	111
3.3.4	输气管路的安装要求	112
3.3.5	输气管路的安装方法	112
3.3.6	输气管路中疏水瓶的安装	113
3.3.7	输气管路的气密性检查	114
3.3.8	输气管路安装过程中的注意事项	114
3.4	户用沼气池的启动	114
3.4.1	发酵原料的处理与配料	114
3.4.2	投料	115
3.4.3	酸碱度的调整	115
3.4.4	封池	115
3.4.5	放气试火	115
3.4.6	户用沼气池启动过程中常见故障分析	116
3.5	户用沼气池的运行管理	117
3.5.1	沼气池的进出料管理	117
3.5.2	池内搅拌	117
3.5.3	发酵料液的酸碱度调节	117
3.5.4	冬季的保温增温管理	118
3.5.5	夏季防止沼气外溢	119
3.6	沼气池的安全管理	119
3.6.1	防火防爆	119
3.6.2	水压间防止人畜跌入	119
3.6.3	沼气池大出料及维修期间防止人员窒息	119
	参考文献	120
第4章 沼气工程的设计与施工及运行管理		121
4.1	沼气工程的分类	121

4.2	中小型沼气工程的设计计算	122
4.2.1	基本参数的确定	122
4.2.2	池容的确定	125
4.2.3	结构设计	128
4.2.4	选址规划及施工准备	134
4.2.5	土方及基础工程施工	135
4.3	辅热集箱式沼气工程技术	144
4.3.1	养殖场规模与沼气原料量的确定	144
4.3.2	辅热集箱式沼气工程的设计	147
4.3.3	辅热集箱式沼气工程施工工艺	154
4.3.4	辅热集箱式沼气工程技术特性及其应用	159
4.4	温室隧道式沼气工程技术	160
4.4.1	设计要求及设计原则	160
4.4.2	厌氧发酵系统的设计	162
4.4.3	温室隧道式沼气和气肥联产成套设备	166
4.5	罐池组合式沼气工程技术	170
4.5.1	罐池组合式气肥联产工艺	170
4.5.2	罐池组合式气肥联产设备	175
4.6	多能互补式沼气工程技术	182
4.6.1	多能互补型生物质沼气发酵热能流动理论	182
4.6.2	多能互补型生物质沼气发酵池设计	190
4.7	大中型沼气工程的设计、施工及运行管理	191
4.7.1	大中型沼气工程的设计要点	191
4.7.2	大中型沼气工程主要设备及设计	193
4.7.3	大中型沼气工程的施工与运行管理	209
4.7.4	大中型沼气工程的维护和故障处理	218
4.7.5	大中型沼气工程实例	221
	参考文献	228
第5章 沼气利用技术		230
5.1	沼气的成分和燃烧特性	230

5.1.1	沼气的成分和物理性质	230
5.1.2	沼气的燃烧特性	233
5.2	沼气的能源化利用途径	239
5.2.1	沼气的燃烧理论	239
5.2.2	沼气燃烧器	240
5.2.3	常用沼气燃烧装置的种类与使用	243
5.2.4	沼气发电技术	249
5.3	沼气综合利用技术	266
5.3.1	沼气应用于蔬菜大棚	267
5.3.2	沼气储粮	267
5.3.3	沼气保鲜贮藏	268
5.3.4	沼气烘干粮食	270
5.3.5	沼气灯育雏	270
	参考文献	271
第 6 章	沼液加工利用技术	274
6.1	沼液的主要组成和特性	274
6.2	沼液肥效及其增效技术	278
6.2.1	沼液肥效	278
6.2.2	厌氧发酵液的增效技术	280
6.3	沼液抗病虫害作用及其应用技术	280
6.3.1	沼液的抗病虫害作用分析	280
6.3.2	沼液抗病虫害技术的应用	284
6.4	沼液植物培养技术	285
6.4.1	沼液浸种和催芽技术	286
6.4.2	沼液无土栽培技术	288
6.5	沼液动物养殖技术	289
6.5.1	沼液养猪	289
6.5.2	沼液用于其他养殖	290
6.6	生态型沼液产品加工工艺	291
	参考文献	292

第 7 章 沼渣综合利用技术		295
7.1 沼渣的定义与基本特性		295
7.1.1 沼渣的定义		295
7.1.2 沼渣的基本特性		296
7.2 沼渣的肥料作用与技术应用		296
7.2.1 沼渣肥料的基本特性		296
7.2.2 农村沼肥应用技术		298
7.2.3 工业沼肥生产技术		299
7.3 沼渣的饲料作用与技术应用		299
7.3.1 沼渣饲料的技术分析		299
7.3.2 沼渣饲料技术应用		300
7.4 沼渣实用技术		301
7.4.1 沼渣在种植业的应用		301
7.4.2 沼渣在养殖业的应用		303
参考文献		307
第 8 章 以沼气为纽带的生态农业模式		309
8.1 农业发展模式		309
8.1.1 生态农业模式的基本原理		310
8.1.2 以沼气为纽带的生态温室模式		310
8.1.3 以沼气为纽带的生态果园模式		330
8.1.4 以沼气为纽带的生态农场模式		350
8.1.5 以沼气为纽带的气肥联产应用模式		353
8.2 以沼气为纽带的循环农业模式		362
8.2.1 循环农业模式基本原理		362
8.2.2 以沼气为纽带的三化协同循环农业模式		363
8.2.3 以沼气为纽带的冷热电联供农场模式		364
参考文献		366



4 中国水利水电出版社：新能源技术经济学



全国高等院校新能源专业规划教材
全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

新能源技术经济学

XINNENGYUAN JISHU JINGJIXUE

主 编 杨 晴

副主编 王丽丽 钟淋涓 岳建芝 李佳硕



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是为新能源类本科生专业课程编写的教材。全书由绪论、经济评价的基本要素、经济评价的基本方法、不确定性与风险分析、基于热力学定律的能源有效利用的分析方法、新能源建设项目可行性研究、新能源系统全生命周期分析方法、能源可持续发展与项目后评价和新能源技术经济预测等9章构成，其内容符合新能源类本科生能源经济学教学的基本要求。

本书取材新颖，内容丰富，既可作为普通高等院校专业学生的教材，亦适合于能源及其相关行业的从业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

新能源技术经济学 / 杨晴主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2018.1(2024.4重印)
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6145-8

I. ①新… II. ①杨… III. ①新能源—能源经济学—高等学校—教材 IV. ①F407.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第324342号

书 名	全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 新能源技术经济学 XINNENGYUAN JISHU JINGJIXUE
作 者	主 编 杨 晴 副主编 王丽丽 钟淋涓 岳建芝 李佳硕
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@mwr.gov.cn 电话: (010) 68545888 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售有限公司 电话: (010) 68545874、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.75印张 415千字
版 次	2018年1月第1版 2024年4月第2次印刷
印 数	3001—4500册
定 价	54.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

目 录

丛书前言	
本书前言	
第1章 绪论	1
1.1 技术与经济的关系	1
1.2 技术经济学的含义及主要内容	4
1.3 技术经济分析的一般过程	5
1.4 新能源技术与项目进行经济评价的重要意义	6
思考题	6
参考文献	7
第2章 经济评价的基本要素	8
2.1 经济效果	8
2.2 现金流量	11
2.3 投资与资产	14
2.4 固定资产折旧	15
2.5 成本	17
2.6 税金与税收	19
2.7 销售收入、利润和利润率	21
2.8 资金时间价值及其等值计算	22
思考题	27
参考文献	29
第3章 经济评价的基本方法	30
3.1 经济评价方法和指标的分类	30
3.2 投资回收期法	31
3.3 净现值法	33
3.4 内部收益率法	35
3.5 其他效率型指标	37
3.6 经济评价指标和方法的选择	39

思考题	43
参考文献	44
第4章 不确定性与风险分析	44
4.1 不确定性与投资风险概述	44
4.2 盈亏平衡分析	45
4.3 敏感性分析	50
4.4 概率分析	54
思考题	55
参考文献	57
第5章 基于热力学定律的能源有效利用的分析方法	58
5.1 基于热力学第一定律的能源有效利用分析方法	58
5.2 基于热力学第二定律的焓分析法	58
思考题	71
参考文献	71
第6章 新能源建设项目可行性研究	72
6.1 项目可行性研究概述	72
6.2 市场预测与项目建设规模	77
6.3 原材料、能源及公用设施分析	80
6.4 厂址选择	81
6.5 工艺设备和技术的选择	84
6.6 环境影响评价	85
6.7 投资估算与资金筹措	85
6.8 建设项目财务评价	87
6.9 国民经济评价	89
6.10 新能源工程项目可行性研究案例	90
思考题	144
参考文献	145
第7章 新能源系统全生命周期分析方法	145
7.1 全生命周期分析方法概述	145
7.2 评价目标和评价范围的确定	149
7.3 生命周期清单分析	150
7.4 生命周期影响评价	152
7.5 生命周期影响评价结果解释	154
7.6 LCA 在新能源系统中的应用	155
思考题	176

参考文献	177
第 8 章 能源可持续发展与项目后评价	180
8.1 可持续发展的内涵与项目可持续发展	180
8.2 项目可持续发展评价	182
8.3 项目后评价	203
思考题	216
参考文献	219
第 9 章 新能源技术经济预测	220
9.1 技术经济预测概述	220
9.2 新能源技术经济预测的方法及应用	227
思考题	270
参考文献	270

第1章 绪论

新能源技术经济学是一门利用经济学理论及分析方法,研究新能源技术规划方案、技术政策和技术措施等经济效果,新能源技术与经济相互促进以及新能源技术创新与经济增长之间的相互关系,从而实现新能源技术在资源中的最佳分配,促进新能源技术与经济协调发展的一门学科。在资源约束、环境恶化的经济发展条件下,能源与环境问题愈发突出,新能源技术经济学的研究需要围绕如何在有限的投资约束下实现能源与环境协调发展的目标展开。在此之前,需先了解技术与经济的关系、技术经济学的含义及主要内容、技术经济分析的一般过程以及技术经济分析的程序。

1.1 技术与经济的关系

1.1.1 技术与经济的概念及相互关系

1.1.1.1 技术与经济的概念

1. 技术的概念

技术发展的历史,就是人类社会发展的历史。在古希腊,亚里士多德曾把技术看作人们在生产活动中的技艺或能力。18世纪末,法国科学家狄德罗指出:“技术是为某一目的共同协作组成的各种工具和规则体系”。这些定义的要点是:①技术是“有目的的”;②技术实现是通过广泛“社会协作”完成的;③技术存在两种表现形式,即“工具”或“硬件”,“规则”或“软件”;④技术是成套的“知识体系”。到20世纪90年代,关于技术的简单界定,已经更复杂、涵盖各种不同要素的理解所代替,今天技术更多地被定义为硬件、软件、组件(organization-ware)、件件(human-ware)以及其他无形资产之间相互作用的结果。

狭义的技术一般是指劳动工具的总称或指人们从事某种活动的技能。广义的技术是指把科学知识、技术能力和物质手段等要素结合起来所形成的一个能够改造自然的运动系统,是在解决特定问题中体现的有机整体。由此,技术是人类在认识自然和改造自然的实践中,按照科学原理及一定的经验需要和社会目的而发展起来的、用以改造自然的劳动手段、知识、经验和技巧。它包括实验技术、生产技术、服务技术、管理技术,具体表现为硬技术与软技术的统一所组成的多层次、多领域的复杂体系。

硬技术即物质形态的技术,或称物化的科学技术,主要指机器、设备、基础设施等生产条件和工作条件,泛指人们在劳动过程中用以改变或影响劳动对象的一切物质资料,其

1

1.1 技术与经济的关系

化和区域集团化,使世界走向了多极化,新的政治和经济格局的形成主要取决于各国的综合国力。当前,世界经济正从工业经济向信息经济转变,世界经济格局变化的周期在加快,以前经济落后的国家,有更多的经济起飞的机遇,事实证明:通过科学技术的革新,一两个相对处于劣势的国家短期内“跃进式”高速发展经济并超过某些先进国家是完全可能的。

3. 技术与经济关系的表现形式

(1) 不同的经济概念与技术关系的不同表现形式。技术和经济是相互促进相互影响的。由于对经济的概念有不同的理解,因此,技术与经济的关系亦可表现为不同的形式。

1) 将“经济”理解为“国民经济”时,技术与经济的关系表现为科技进步与经济发展的关系。

2) 将“经济”理解为“经济基础”时,技术与经济的关系表现为生产力与生产关系的关系。这种关系在政治经济学中有专门的论述。

3) 将“经济”理解为“节省、节约”时,技术与经济的关系表现为科技活动与经济发展的关系。

科学技术活动的直接任务是产生知识或科技成果,其首要特征是探索性与创新性。新现象的发现,新规律的揭示,新概念的建立,新事物的发明,新产品、新工艺的研制及其商品化,不断提高着人们认识自然与改造自然的能力,并成为创造社会财富的工具与手段。但是科技活动既是科技成果的发明创造过程,又是生产要素组合的投入产出过程,必须投入相应的人力、物力和财力,才能保证科技活动的正常进行,而且其所需要的投入随技术研究、开发、应用的进程而不断增大。据统计分析,科学理论研究、技术开发到产品研制和发展这三个阶段的投资比值为1:10:100。高新技术的研究更需要投入巨额资金。一方面,当国家经济落后、企业资金不足时,就缺乏财力支撑科技发展,企业也缺乏对科技的需求拉力。另一方面,从经济角度看,经济活动的基本任务是发展生产,保证供给,其首要特征是讲求经济效益,投入的可行性和产出的效益性是筹划经济活动首要考虑的问题。经济持续稳定地发展,必须以经济效益为中心,以科技进步为动力,以不断增强综合国力和改善人民生活为目的,实行注重效益、优化结构、提高质量、稳定增长的发展战略。对企业来说,其基本任务是向市场提供适销对路的产品以满足社会不断增长的物质文化生活的需求,并以此获得利润。作为自主经营、自负盈亏、自我发展、自我约束的经济实体,在采用新技术时,客观上必然要求技术先进性与经济合理性的统一。具备投资能力是企业应用科技成果的重要条件,提高经济效益是企业采用先进技术的动因和目的。

(2) 相互制约和矛盾。由于科技与经济的不同特性,使它们在一定的背景下,又具有相互制约和矛盾的一面,具体表现在:

1) 技术研究、开发、应用与经济可行性的矛盾。缺乏足够的资金,就不能进行重大领域的科学研究或引进消化他人的先进技术。直观理解这是经济对技术的制约,从后果分析,将使技术与经济陷入双重落后的困境。

2) 技术先进性与适用性的矛盾。技术的先进性反映其水平和创新程度,这是科研部门所追求的;技术的适用性则表示技术适应生产与市场需要的程度,这是企业所要求的。

3

第1章 绪论

基础与核心是劳动工具。

软技术指知识形态的技术,体现为工艺流程、制造方法与技术、生产程序、资料与信息、经验、技巧、生产组织和管理能力等。没有先进的软技术,硬技术便不可能发挥应有的作用。软、硬技术融为一体,相辅相成地配合发展,才能推动技术进步和加速经济发展。

2. 经济的概念

经济是一个多义词,在中国古代,经济作“经世济民”理解,其含义是治理国家。由于使用的角度不同,现代社会对经济作不同的理解。其一,用作“国民经济”时,是指社会再生产的整个过程,包括生产、交换、分配、消费等经济活动;或作国民经济的简称理解,如农业经济、工业经济等。其二,用作“经济基础”时,是指生产关系总和,是政治、思想意识等上层建筑赖以建立起来的经济基础。其三,用作“经济不景气”时,是指节约或节省,含效益之意。依其活动范畴与运行机制,经济又可划分为宏观经济与微观经济,也可进一步划分为宏观经济、中观经济(准宏观经济)及微观经济三个层次。

1.1.1.2 技术与经济的相互关系

1. 技术与科学的关系

技术与科学是相互区别而又相互联系的,技术既是人类有目的地改造自然的手段,又是改造自然的产物,在本质上反映着人对自然的能动关系,它与科学不属于同一概念。科学是关于自然、社会和思维的知识体系,科学的任务是认识客观世界;技术的任务是改造客观世界。科学回答的是“是什么”“为什么”,技术回答的是“做什么”“怎样做”,科学提供物化的可能,技术提供物化的现实;科学是发现,技术是发明;科学是创造知识的行为,技术是综合应用知识与需要的活动。

2. 科学技术与经济的关系

当前“科学技术是第一生产力”这一论点已被世界各国所接受,并得到高度重视。科技因素在现代经济增长中已经比劳动、资本两大传统要素更为重要。科学技术的发展不仅改变了生产力的水平、规模和结构,也是经济发展的强大推动力量。科学技术提高了劳动生产率,改革了生产工艺、提高了生产设备的技术水平和生产经营管理水平,为经济提供了可能性,西方国家战后经济迅速发展的推动力以及德国、日本从废墟中重新崛起的力量,都是不断进步的科学技术。改革开放后我国经济的腾飞,也得益于大力开发和引进科学技术,毫无疑问,现代科学技术已成为影响经济增长速度的决定性因素。

经济学家丹尼森、肯德里克等认为科技进步的内容取决于知识进展、要素质量、结构转变、规模经济和其他不规则因素等五个因素。很多经济学家深入研究后一致认为:科技进步对经济增长的贡献率可达66%。此外,科学技术的进步提高了劳动生产率和生产专业化与大型化,生产规模扩大,从而推动世界各大型企业的自动化、精密化、高质量。

科学技术的发展使世界经济形成了多极化的格局,一些经济学家经过长期研究论证,一个国家的经济越发展,其依靠科技进步提高劳动生产率的程度越明显。20世纪,发达国家依靠科技进步提高劳动生产率提高了5%~20%,而目前已达60%~80%。经济一

2

第1章 绪论

先进的技术不一定适用,适用的技术不一定最先进,人们固然希望技术越先进越好,但它只有在对使用者适用、被使用者掌握、具有增值价值的使用价值时,才会受到青睐。否则不可能发挥其先进性的作用,并将在闲置中随科技进步与经济环境的变化而贬值,特别是在市场经济条件下,技术成为商品,如果技术研究与应用脱离了市场需求,不可能实现其自身价值与使用价值。

3) 技术效益的滞后性及潜在性与应用者渴望现实盈利的矛盾。技术成果的应用会带来超额利润,但其应用有一个吸收、消化、创新的过程,不一定立竿见影地带来效益;而投资者期望尽快得到资金回报,可能另辟蹊径将资金另作他用,从而使技术得不到应用。投资者当然也可能由于舍弃先进技术的应用而造成机会成本的损失。

4) 技术研究开发应用效益与风险的矛盾。技术研究开发应用的效益与风险是并存的。研究开发应用一旦成功,就会因掌握了技术与市场的领先优势而赢得超额利润。但研究开发应用过程也充满风险,包括技术选择失败、开发失败、时机滞后、技术供求关系变化、竞争失利、技术应用达不到预期效益等,有时人们因限于风险而放弃新技术的开发应用,也可能因此而失去创新发展的机遇。

5) 技术研究开发应用成本与新增效益的矛盾。技术越先进,往往支付的代价越高,从而出现支付成本与预期效益的矛盾,先进技术开发应用的成本一定要低于预期效益,否则再先进的技术也难以推广应用。

从技术与经济的关系可以看出,技术与经济实际上是矛盾的关系,技术与经济之间,既互相促进、互相依赖,又互相制约,而且,随着条件的变化,其关系处于不断地变化和运动之中。技术与经济的这种矛盾关系,正是技术经济学的研究对象。

1.2 技术经济学的含义及主要内容

技术经济学是研究技术与经济相互关系的一门科学,也是研究技术与经济最佳统一律及其实现形式和方法的科学。具体来说,它是专门研究技术方案(技术方案是指以技术为基础,由人力、物力、财力、运力、自然力和财力组成的,为达到某种目的和满足某种需要的一种有机组合)经济效益和经济效率问题的科学。技术经济分析是对不同技术方案的经济效果进行计算、分析、评价,并在多种方案的比较中选择最优方案(包括计划方案、设计方案、技术措施和技术政策)。因此,技术经济分析的结果可以作为选择方案进行决策的依据。

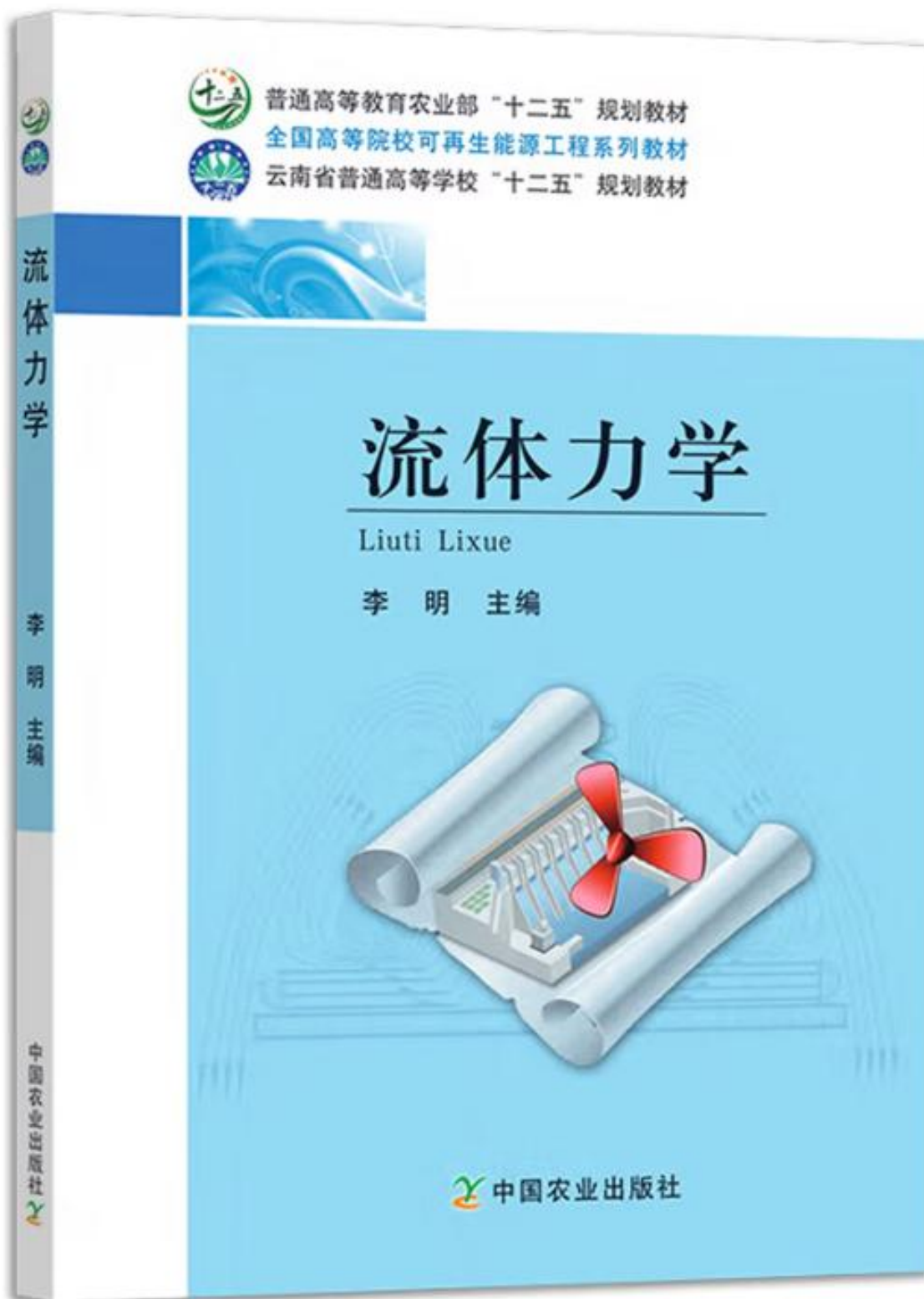
技术经济学的研究范围很广,既有涉及整个国民经济的带有全局性的经济效果的研究,又有对某一企业、某一工程或某一科研项目的经济效果的研究。技术经济学的研究任务是正确地认识和处理技术和经济之间的关系,寻找技术经济的客观规律,探索技术与经济之间的合理关系,包括最佳关系和协调关系,具体包括以下三个部分:

(1) 研究技术经济评价和综合评价理论和方法,具体包括以下三个部分:

其二是针对不同技术,研究不同的评价理论和方法。其一是研究共同的评价理论和方法;其二是研究共同的评价理论和方法。这两种研究相互促进,相辅相成,解决了理论和方法,规划设计、生产运行和经济管理等部门就能够根据各种具体情况来解决各种具体的技术经济问题。

4

5 中国水利水电出版社：新能源技术经济学



主编 李明

副主编 高文峰 柏雪源 钟浩

编者 (按姓名笔画排序)

李明 (云南师范大学)

岳建芝 (河南农业大学)

李岩 (东北农业大学)

王琪 (沈阳农业大学)

钟浩 (云南师范大学)

翟莲 (吉林建筑工程学院)

柏雪源 (山东理工大学)

高文峰 (云南师范大学)

审稿 刘建禹 (东北农业大学)

(东北农业大学) 刘建禹

(东北农业大学) 李

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

(东北农业大学) 林

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/李明主编. —北京: 中国农业出版社,
2018. 11
普通高等教育农业部“十二五”规划教材 全国高等
院校可再生能源工程系列教材 云南省普通高等学校
“十二五”规划教材
ISBN 978-7-109-23214-3

I. ①流… II. ①李… III. ①流体力学-高等学校-
教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 182142 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 马颀晨

文字编辑 李兴旺

北京万友印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 15.25

字数: 362 千字

定价: 36.50 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

目 录

前言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的研究内容、对象、方法及课程特点	1
一、流体力学的研究内容、对象	1
二、流体力学的研究方法	1
三、流体力学课程的特点	2
第二节 流体力学发展简史	2
第三节 流体的物理性质	4
一、流体的定义和特征	4
二、流体连续介质假设	4
三、流体的主要物理性质	5
四、流体的黏性	8
五、表面张力和毛细现象	11
习题	13
第二章 流体静力学	16
第一节 作用在流体上的力	16
一、表面力	16
二、质量力	17
第二节 流体静压强	17
一、静压强的定义	17
二、静压强的特性	18
第三节 流体平衡微分方程	19
一、流体平衡微分方程	19
二、平衡微分方程的全微分式和质量力的势函数	20
三、等压面	21
第四节 重力场中流体的平衡	22
一、流体静力学基本方程式	22
二、流体静力学基本方程式的意义	23
三、静压强的分布规律	24
第五节 流体压强的测量	24

• 1 •

一、压强的计算标准	24
二、压强的计量单位	25
三、流体静压强的测量	25
第六节 液体的相对平衡	28
一、匀速直线运动容器中液体的平衡	29
二、水平直线等加速运动容器中液体的平衡	29
三、等角速旋转容器中液体的相对平衡	30
第七节 静止流体对平面的作用力	33
一、总压力的大小和方向	33
二、总压力的作用点	34
第八节 静止流体对曲面的作用力	36
一、总压力的大小	36
二、总压力的作用方向	37
三、总压力的作用点	37
四、压力体	37
习题	40
第三章 流体运动学基础	43
第一节 研究流体运动的方法	43
一、流场的概念	43
二、研究流体运动的方法	43
三、流体质点导数的表达式	44
第二节 流体运动基本概念	47
一、迹线	47
二、流线	47
三、流面	48
四、流管、流束	48
五、过流断面、湿周、水力半径、当量直径	48
六、流量、断面平均流速	49
七、一元(一维)、二元(二维)、三元(三维)流动	50
八、定常流动和非定常流动	50
第三节 理想流体的运动微分方程	51
习题	54
第四章 流体动力学基础	56
第一节 系统、控制体和输运公式	56
第二节 流体的动力学的积分型方程	58
一、连续方程	58
二、动量方程与动量矩方程	59
三、能量方程	64
第三节 伯努利方程及其应用	65

目 录

一、理想流体微元流束的伯努利方程	65
二、实际流体微元流束的伯努利方程	67
三、实际流体总流的伯努利方程	67
四、伯努利方程的应用	68
第四节 微分形式的守恒方程	71
一、微分形式的质量守恒方程——连续性方程	71
二、微分形式的动量守恒方程——纳维-斯托克斯方程	72
三、基本微分方程组的定解条件	76
第五节 定常欧拉运动微分方程的积分求解	77
一、兰姆运动微分方程	77
二、欧拉运动微分方程可积的条件	78
三、欧拉运动微分方程的积分求解	78
习题	80
第五章 相似理论和量纲分析	84
第一节 流动相似的概念	84
一、几何相似	85
二、运动相似	85
三、动力相似	86
四、初始条件和边界条件的相似	86
第二节 相似准则	87
一、雷诺准则（黏性力相似准则）	88
二、重力相似准则（弗劳德相似准则）	89
三、压力相似准则（欧拉相似准则）	89
四、表面张力准则（韦伯准则）	90
五、弹性力准则（柯西准则）	90
第三节 流动相似条件	91
第四节 近似模型实验	92
一、模型律的选择	92
二、模型的设计	93
第五节 量纲分析与π定理	96
一、量纲和单位	96
二、无量纲量	98
三、量纲和谐原理	98
四、量纲分析法	99
习题	104
第六章 流动阻力和水头损失	106
第一节 流动阻力和水头损失的分类	106
一、流动阻力和水头损失的分类	106
二、水头损失的计算	107

第二节 黏性流体的两种流态	107
一、雷诺实验	108
二、沿程水头损失与流速的关系	108
三、流态的判别——临界雷诺数	109
第三节 沿程水头损失与切应力的关系	110
一、均匀流基本方程	110
二、切应力的分布	111
第四节 圆管中的层流运动	112
一、圆管层流的流动特性	112
二、圆管层流的速度分布	112
三、圆管层流沿程水头损失的计算	113
第五节 紊流运动	115
一、紊流的形成	115
二、紊流运动的特征和时均法	116
三、紊流的切应力和普朗特混合长度理论	118
四、紊流的流速分布	119
五、黏性底层及紊流壁面的类型	121
第六节 紊流的沿程水头损失	123
一、尼古拉兹实验	123
二、紊流沿程损失系数的半经验公式	125
三、穆迪图	125
四、紊流沿程损失系数的经验公式	127
第七节 局部水头损失	130
一、局部水头损失的一般分析	130
二、几种典型的局部损失系数	131
三、局部阻力之间的相互干扰	133
第八节 边界层概念与绕流阻力	134
一、边界层的基本概念	134
二、边界层的分离	135
三、物体的绕流阻力	136
习题	138
第七章 孔口、管嘴出流和有压管流	141
第一节 孔口出流	141
一、孔口出流的分类	141
二、薄壁锐缘小孔口恒定自由出流	142
三、孔口淹没出流	144
四、孔口非恒定出流	145
第二节 管嘴出流	146
一、圆柱形外管嘴恒定出流	147
二、收缩断面的真空	148
三、空化、空蚀现象与圆柱形外管嘴正常工作条件	148

四、其他形式的管嘴	149
第三节 短管的水力计算	151
一、有压管道水力计算原理	151
二、短管恒定出流的设计和水利计算实例	153
第四节 长管的水力计算	159
一、简单管路	159
二、复杂管路	163
第五节 有压管道中的水击	168
一、水击发生的原因	168
二、水击压强的计算	170
三、水击波的传播速度	171
四、水击危害的预防措施	172
习题	174
第八章 离心式泵与风机原理及应用	178
第一节 离心式泵与风机的工作原理及基本构造	178
一、离心式泵与风机的工作原理	178
二、离心式泵的基本构造	179
三、离心式风机的基本构造	183
第二节 离心式泵与风机的性能参数	184
一、流量 Q	184
二、泵的扬程 H 和风机的全压 p 及静压 p_j	184
三、功率及效率	185
四、转速 n	186
第三节 离心式泵与风机的基本方程	186
一、流体在叶轮中的运动	186
二、欧拉方程	188
三、叶片片数有限对欧拉方程之修正	188
第四节 叶形及其对性能的影响	189
第五节 泵与风机的性能曲线	190
一、泵与风机的理论性能曲线	190
二、泵与风机的实际性能曲线	192
第六节 相似律与比转数	195
一、相似条件	195
二、相似律	196
三、同台泵或风机不同工况（工况调节）的参数换算	197
四、比转数	198
第七节 离心式泵的气蚀与安装高度	199
一、泵的气蚀现象	199
二、泵的吸水高度 H_g	199
三、按气蚀余量确定泵的吸水高度 H_g	201

四、离心式泵的安装与运行技术要求	204
习题	204
第九章 气体动力学基础	206
第一节 理想气体一元恒定流动运动方程	206
一、气体一元定容流动	207
二、气体一元等温流动	207
三、气体一元绝热流动	207
第二节 声速、滞止参数、马赫数	209
一、声速	209
二、滞止参数	211
三、马赫数	211
第三节 气体一元恒定流动的连续性方程	212
一、连续性微分方程	212
二、气体速度与断面之间的关系	212
第四节 正激波	214
一、激波现象	214
二、正激波基本方程	216
三、静止正激波	216
四、运动正激波	219
第五节 等温管路中的流动	221
一、气体管路运动微分方程	221
二、管中等温流动	221
三、等温管流的特征	222
第六节 绝热管路中的流动	224
一、绝热管路运动方程	224
二、绝热管流的特性	224
习题	225
主要参考文献	227

绪论

第一节 流体力学的研究内容、对象、方法及课程特点

一、流体力学的研究内容、对象

流体力学是一门基础性和应用性广的学科，是力学的一个重要分支。流体力学研究流体的平衡、运动规律及其工程应用，包括流体的传热和传质规律，它的研究对象是流体，包括液体和气体。

流体力学在许多工业部门中都有广泛的应用。目前在水利工程、动力工程、能源工程、航空工程、化学工程、建筑工程、机械工程等领域日益广泛地应用着流体力学。同时也正是由于流体力学的研究工作不断取得进展，才促进了这些领域的大力发展。

流体力学的基础理论由三部分组成，一是流体处于平衡状态时，各种作用在流体上的力之间的关系理论，称为流体静力学；二是流体处于流动状态时，作用在流体上的力和流动之间关系的理论，称为流体动力学；三是气体处于高速流动状态时，气体的运动规律的理论，称为气体动力学。流体力学的研究范畴是将流体运动作为宏观机械运动进行研究，而不是研究流体的微观分子运动，因而在流体力学部分主要研究流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒及转换等基本规律。

二、流体力学的研究方法

流体力学的研究方法，概括起来有理论分析、实验研究和数值计算三种。三种方法研究问题的基本思路如下所述：

- 1. 理论分析的一般步骤：基本假设—数学模型—解析法。
 - 2. 实验研究的一般步骤：模型实验—测量数据—换算到原型。
 - 3. 数值计算的一般步骤：数学模型—数值模型—数值解。
- 理论分析、实验研究和数值计算三种研究方法各有利弊，相辅相成，各自的优点与局限见表 1-1。理论分析指导实验研究和数值计算，使研究工作方便且准确，并可把实验结果推广应用于同一类相似运动中；实验研究可验证理论分析和数值计算结果的准确性，提供建立理论模型和研究流动规律的依据；数值计算可弥补理论分析和实验研究的局限，对复杂流体力学问题可进行既快捷又省的计算分析，这三种方法相互结合，互相补充和验证，但又不能互相取代。

研究方法	优点	局限
理论分析	对原理理解透彻，且能定量计算	受条件限制较多，少数情况下有局限性
实验研究	直接测量流动参数，得到定性规律	成本高，可测参数不多，不易实现工程、生产上的模拟
数值计算	扩大范围求解问题，精度高，易于重复工作	受边界条件和数值模型限制，程序开发复杂

三、流体力学课程的特点

- 流体力学的学科性质，以液体为主要研究对象是实现力学的一个分支。
- 液体（气体和液体）区别于固体的主要物理特性是易于流动，不能保持一定的形状。
- 气体和液体的物理特性在以下几方面有所区别：①有无固定的体积；②能否形成自由表面；③是否容易压缩。
- 流体力学的主要研究内容，液体在外力作用下静止与运动的规律；液体与边界的相互作用。
- 课程地位：流体力学是一门重要的专业基础课程，它是连接前期基础课程和后续专业课程的重要桥梁，课程的学习将有助于数学、力学基础知识的巩固与提高，培养分析、解决问题的能力，为专业课程的学习打下坚实基础。
- 流体力学的研究方法，理论分析、实验研究和数值计算相结合。三个方面是相辅相成和验证，但又不能互相取代的关系。

第二节 流体力学发展简史

流体力学作为一门独立的学科，同其他自然科学一样是人类为了满足自身生活和生产需要，在认识与改造自然的斗争中，随着实践的不断发展，技术与知识水平的不断提高才形成和发展起来的。其发展依赖于科学实验和生产实践，又受到许多社会因素的影响。早在几千年前，随着农业、航海事业的发展，人们逐渐认识了一些水流运动规律，如古代早在春秋战国时期就已经修建了都江堰、郑国渠和灵渠。埃及、巴比伦、古希腊人民为了发展农业和航运事业，也修建了大堤和河；古罗马人为城市供水修建了大输水管道系统。但是，真正从事流体力学现象研究并使之成为科学的学者是古希腊哲学家阿基米德（Archimedes），公元前 250 年他撰写了《论浮力》的论文，奠定了流体静力学基础。此后千余年间，流体力学有了重大进展。

15—17 世纪，在欧洲由于封建制度崩溃，资本主义开辟萌芽，生产有了显著发展，造船和机械工业发展都推动了流体力学，逐步形成近代自然科学。流体力学也相应地得到了发展。意大利著名物理学家、艺术家达·芬奇（Vinci, L. da）用实验方法于 1512 年绘制了孔口出流、物体和流体的阻力以及管道、明渠中水流等问题。1643 年托里拆利（Torricelli, E.）给出了孔口流体的公式；1650 年帕斯卡（Pascal, B.）

流体力学

流体力学等。一般来说，这些新的分支或交叉学科所研究的现象或问题都比较复杂，要较好地解决它们，实际上是对流体力学研究人员的一次大挑战。现有的流体力学运动方程能完全准确地描述这些现象和新问题，试图用现有的方程组和理论计算的方法去解决总是相当困难的。唯一可行的道路是采用既实验或实验与计算相结合的方法。近年来在分支或交叉学科（如多相流等）中采用这种方法，获得了较好的效果。大大推动了实验的发展。

第三节 流体的物理性质

一、流体的定义和特征

物质常见的存在状态是固态、液态和气态，处在三种状态下的物质分别称为固体、液体和气体。通常说能流动的物质为流体，液体和气体易流动，我们把液体和气体称为流体。但这样说是不严格的，严格地说应该用流体力学的语言来叙述：在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质，称为流体。根据上述定义，流体显然不能保持一定的形状，即有流动性，但流体在静止时不能承受切向力，这显然与固体不同。固体在静止时能承受切向力，发生微小变形以抗拒外力，直到达到平衡。只要作用力保持不变，固体的变形就不变化。

流体和固体具有上述不同性质是由于分子间的作用力不同造成的。在相同体积的固相流体中，流体所含的分子数目比固体少得多，分子间的空隙就大得多，因此流体分子间的作用力小，分子运动强烈，从而决定了流体具有流动性和不能保持一定形状的特性。

流体中所包括的液体和气体除具有上述共同特性外，还具有如下不同特性：液体的分子间的有效直径差不多是相等的，当对液体加压时，只要分子间距稍有缩小，分子间的作用力就会增大以抵抗外压力。所以，液体的分子间距很难缩小，即液体很不易被压缩，以致一质量的液体具有一定的体积，液体的形状取决于容器的形状，并且由于分子间吸引力的作用，液体不能充满容器，故在重力的作用下，液体总保持一个自由表面（或称自由液面）。通常液体为水平面。气体的分子间距比液体的大，约在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m (101 325 Pa) 下，气体的平均分子间距约为 3.35×10^{-7} cm，其分子平均直径约为 2.5×10^{-8} cm，分子间距比分子平均直径约大 13 倍。因此，只有当分子间距很小时，分子间才会出现斥力。可见，气体具有很大的压缩性。此外，因其分子间距与分子平均直径相比很大，以致分子间的吸引力微小，分子热运动而不能形成自由表面。

二、流体连续介质假设

从微观角度看，流体和其他物体一样，都是由大量不连续分布的分子组成的。分子间有间隙。但是流体力学所要研究的并不是个别分子的微观运动，而是研究由大量分子组成的宏观物体在外力作用下的宏观运动。因此，在流体力学中，取流体微团来作为研究流体的对象。所谓流体微团，是一块体积为无穷小的微量流体。由于流体微团的尺寸极其微小，故可将其作为流体质点看待。这样，流体可看成由无限多连续分布的流体微团组成的连续介质，这种