

能源科学与管理论丛

The Series of Energy Science and Management

主编 雷仲敏

Energy engineering

能源 工程学

何燕 王泽鹏 张斌 编著

山西出版传媒集团

山西经济出版社

1/20
130

能源科学与管理论丛



Energy engineering



能源 工程学

何燕 王泽鹏 张斌 编著

山西出版传媒集团

山西经济出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

能源工程学 / 何燕, 王泽鹏, 张斌编著. —太原: 山西经济出版社, 2016. 6

(能源科学与管理论丛 / 雷仲敏主编)

ISBN 978-7-80767-931-8

I. ①能… II. ①何…②王…③张… III. ①能源—研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 202195 号

能源工程学

编 著: 何 燕 王泽鹏 张 斌

出 版 人: 孙志勇

责任编辑: 李慧平 吴欣彦

装帧设计: 赵 娜

出 版 者: 山西出版传媒集团·山西经济出版社

地 址: 太原市建设南路 21 号

邮 编: 030012

电 话: 0351-4922133 (发行中心)

0351-4922085 (综合办)

E-mail: scb@sxjjcb.com (市场部)

zbs@sxjjcb.com (总编室)

网 址: www.sxjjcb.com

经 销 者: 山西出版传媒集团·山西经济出版社

承 印 者: 山西人民印刷有限责任公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 23.25

字 数: 403 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2016 年 6 月 第 1 版

印 次: 2016 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-80767-931-8

定 价: 62.00 元

《能源科学与管理论丛》

The Series of Energy Science and Management

论丛总序: 杜祥琬 (中国工程院 院士)

学术顾问: 谢克昌 (中国工程院 院士)

论丛编委会

主任委员: 周大地 (国家发展改革委能源研究所 研究员 中国能源研究会常务副理事长)

副主任委员: 马连湘 (青岛科技大学 教授 博士生导师)

副主任委员: 简又新 (台湾永续能源研究会 理事长)

大陆编委 (按姓氏笔画排序)

史 丹 (中国社会科学院 研究员 博士生导师)

吴钟湖 (国家发展改革委能源研究所 研究员)

李庆领 (青岛科技大学 教授 博士生导师)

张有生 (国家发展改革委能源研究所 研究员)

范 英 (中国科学院 研究员 博士生导师)

胡兆光 (国家电网能源经济研究院 研究员 博士生导师)

黄素逸 (华中科技大学 教授 博士生导师)

雷 明 (北京大学 教授 博士生导师)

台湾编委 (按姓氏笔画排序)

马小康 (台湾大学机械所/教授)

李育明 (台北大学资环所/教授)

张四立 (台北大学自然资源与环境管理研究所/教授)

张宏展 (台湾科技大学电机系/教授)

陈家荣 (台湾成功大学资源工程系/教授)

顾 洋 (台湾科技大学化学工程系/教授)

黄宗煌 (台湾综合研究院/副院长)

廖惠珠 (淡江大学经济系/教授)

主 编: 雷仲敏 (青岛科技大学 教授 博士生导师)

总 序

当青岛科技大学雷仲敏教授主编的《能源科学与管理论丛》这样一套巨著摆在我面前时，我只能当学生了。虽然花了不少时间阅读，但感觉还是没有学透。

首先，作者们三年耕耘的认真治学态度和《论丛》涉猎内容的广度与深度均令我十分感动。其次，这套《论丛》有一个视野广阔的顶层设计，从已读到的《能源系统工程学》《能源工程学》《能源经济学》《能源环境学》《能源政策学》《能源管理学》和《能源法学》等，便可看到其内容的丰富和重要的参考价值。

能源是一个应用领域，也是一个综合性交叉学科。它既涉及科学、技术、工程与产业实践，又横跨自然科学、社会科学和哲学，并深度交叉于经济学、管理学、环境学、政策学与法学等各个方面。科学地规划和把握能源的发展，这些方面的知识真是一样都不能少。

在世界各国面临的能源问题中，恐怕中国的能源问题是最复杂、最费思索的。我们既面对着全球能源向绿色、低碳、高效转型的共同机遇，又需直面中国能源结构的高碳天然禀赋、资源环境制约、气候容量有限等严峻挑战。中国的能源工作者有责任深入研究我国能源问题的各个方面，推动能源革命、重塑能源发展路径、建设创新中国，

实现中国的可持续发展。这条中国特色新型道路的创新将是中国对人类做出的最重要贡献。从这个意义上说，这套丛书作为宝贵的教材，对各行各业均是十分有益的参考书。

是为序。

杜祥琬

2016年元月6日

低碳时代能源科学研究的若干思考

(论丛前言)

人类社会发展的历史表明，人类关于社会与自然发展的科学认识，都是建立在特定历史时期人类关于自身与可感知的自然世界水平之上的。人类对其生存所依附生态环境的认识水平、价值观念、道德伦理等，必然会对包括能源科学在内的科学理论产生深远而又广泛的影响。当前，以全球碳失衡为主要标志而引发的低碳研究热潮，必将引发一系列新的产业革命，并进而有可能推动能源科学的历史性变革。

一、碳失衡与当代能源科学的历史使命

自人类社会诞生以来，人类的社会生产和生活方式大体经历了狩猎、农耕、前工业社会、后工业社会等四个阶段，目前正在向信息化社会过渡。在不同的经济发展阶段，人类社会面临的困难和矛盾也各不相同，因而能源科学研究也有其所不相同的历史任务。从不同时代人类社会经济增长的主要制约因素看，人类先后经历了体能约束和资源约束，目前正面临着以全球碳失衡为主要标志的生态约束挑战；从人类与自然生态的关系看，在不同社会生产生活方式下，人类对自然生态的扰动程度和扰动模式也不尽相同，并相应建立起与自然生态所不相同的关系，即由被动接受型、盲目破坏型到协调共存型。

在狩猎生活方式下，人类的生存是建立在大自然形成的自然生物环链基础之上的，人类对自然生态没有选择的余地，只能被动地接受大自然的恩赐。人类作为自然界的一个物种，其活动能力、活动范围还十分有限，特别是工具的使用还十分简陋，人类所面临的主要任务是如何克服体能的不足，在现实自然条件下，实现自身的生存发展。因此，对自然生态几乎没有任何扰动。

在农耕生活方式下，人类为了满足自身日益增长的需求，开始以耕作的方式对自然界的土地资源施加人类的影响，以种植、养殖的方式开始对自然物种进行选择，形成了以人类为中心的对自然界生物群进行选择淘汰的过程，优选

并扩大了在既定生产生活方式下对人类社会生活有用的生物物种，而尽力淘汰或消灭对人类有害的物种。人类社会所面临的主要任务是如何扩展自身的活动空间，开拓更多的可赖以生存的土地。但此时，人类的社会生产活动仍停留在以自然界可再生资源为劳动对象的阶段，社会生产活动的规模较小且相对稳定。

18 世纪发端于英国的产业革命，使人类社会的生产和生活方式发生了第一次革命性变迁。工业文明的诞生使人类开始步入前工业社会生活的新阶段。以能源变革为核心的现代科学技术由于极大地解放了人类的四肢，完成了人类的体能革命，因而也大大拓展了人类的资源选择空间，并进一步丰富了人类的社会生活内容。在现代科学技术的帮助下，人类不仅开始对自然界的各种不可再生矿产资源进行了史无前例的大规模开发，而且对各类生物资源也进行了掠夺性的利用。

20 世纪 50 年代以来，第三次技术革命的出现，使人类社会的生产、生活方式开始了第三次大变迁。航天技术使人类实现了对宇宙空间的探索，自动化技术使人类体能和智能得到进一步的解放，机器体系不仅普遍地运用于各产业的生产，其在人们生活过程中的使用也日益普遍化，煤、石油、天然气等不可再生资源已成为人类特定生产和生活方式维系的战略资源。人类占统治地位的文化价值取向是对高品质生活的追求，是消费较多数量且经过深度加工的产品，而社会生产规模的急剧膨胀，全球经济一体化格局的形成，地球数十亿年所沉积的化学物质在人类无节制的使用下，其物质循环的生态平衡逐渐被打破，人类社会面临的全球性生态环境问题日益严重。

可见，人类文明总是伴随着能源的变革而不断进步，而人类文明的进步也对能源变革提出新的更高水平的要求。当前，随着新一轮能源科技革命的快速演进，全球能源科技创新进入高度活跃期，呈现多点突破、加速应用、影响深远等特点。而以资源枯竭和全球碳失衡为标志，以绿色低碳为理念的生态文明发展观必将引发新一轮产业革命，并进而再一次推动人类生产生活方式的变革，这无疑将对能源科学研究产生深远而广泛的影响。

二、低碳时代经济发展表现出的新特点

当前，尽管人们还难以看到以绿色低碳为核心价值的新经济体系的全貌，对其认识和分析也仅仅停留在感性阶段，还难以对其给予人类未来社会生活的影响做出理性的科学判断。然而，它的出现无疑将会给我们传统的思维方式、社会生活、经济结构、管理模式等带来巨大的震撼，进而将会使人类社会的生

产、生活方式发生更为深刻的第五次大变革。

（一）低碳经济时代的基本特征

1. 主导产业的绿色化。绿色化是以某个产业绿色化程度以及所提供的绿色产品或服务的数量多少为标志的，即当某一产业所提供的绿色产品和劳务形成一定数量规模时，可以认为是形成了绿色产业。绿色产品分为绿色用品和绿色食品两大类。绿色用品是指在使用过程中不产生或较少产生对环境或人有害的废弃物的产品；绿色食品是指无公害、无污染的安全、优质营养类食品的统称。绿色企业就是采用绿色技术、进行绿色管理、生产绿色产品、实行绿色包装、通过绿色认证并获得绿色标志的企业。只有生产过程和产品都符合绿色标准时，企业才是绿色企业。

2. 资源利用的循环化。资源循环利用是在不断提升物质重复利用水平的基础上实现发展经济的目的。与传统工业社会的经济单向流动的线性经济，即“资源→产品→废弃物”相比，循环经济的增长模式是发展路径和模式的根本变革。循环经济通过生产、流通和消费等过程中的减量化、再利用、资源化活动，实现资源节约和保护环境，最终达到以较小发展成本获取较大的经济效益、社会效益和环境效益的目标。

3. 消费选择的理性化。随着消费者生态价值观的演变和经济生活的个性化，经济活动的各方面主体行为在消费选择上更加理性，绿色低碳的理念将贯彻于设计、生产、流通、消费等各个环节，工业革命时代高耗能、高污染的大批量、标准化生产和销售模式，将被极具理性思维的消费主体所主宰。

4. 市场主体的低碳化。全球生态失衡所构造的低碳发展平台将成为社会经济活动的重要舞台，在这一舞台上，人们将构建起一系列新的经济运行理念，制定出新的游戏规则，建立起与传统经济生活相对应的各类经济机构，包括低碳产品生产企业、低碳服务组织，甚至包括低碳政府，从事包括低碳设计、低碳生产、低碳交易、低碳营销、低碳消费等在内的一系列经济活动。低碳经济活动在整个社会生产和生活中所占的比重越来越大，低碳行为所创造的社会财富越来越多，为人们开创出一个全新的经济世界。

5. 生态约束的全球化。碳失衡所产生的全球性生态灾难使得生态影响呈现出人人不能幸免的特征，生态约束成为一种不受时间、空间局限的全天候持续影响。随着人类发展空间的不拓展，未来有可能将外空间联结为一个整体，全球乃至外空间范围内的生态问题将会呈现，生态影响把整个世界变成了“地球村”，生态影响越来越趋向薄平化、网状化、墨迹化、立体化和跨代际化，不

同区域空间的生态依存性将大大提高，一个动态开放、不断变化的生态经济命运体将会应运而生。

6. 贸易规则的道德化。随着生态约束的日益刚性化，其对市场分工和全球贸易格局必然产生多方面的影响，世界经济的不平衡和利益的不一致将会进一步被拉大。因此，有必要在全球低碳生态价值共识基础上形成具有普世价值的生态道德贸易规范，即要求企业在生产商品赚取利润的同时，承担起全球生态失衡的历史责任和社会责任。

（二）低碳经济体系的基本规律

1. 交易原则不同。传统经济是以物质所表现、以商品为载体的能量交换型经济，自然界客观存在着的不可再生资源的有限性，使其交易通行“物以稀为贵”的原则，商品价格对供求变化的刚性较大，资源匮乏是导致经济运行受阻的根本原因。低碳经济是以生态价值所表现、以生态道德为载体的质量型经济，人类全球生态保护意识的增强，使其交易通行“碳耗越少，价值越大”的原则，在这一原则下，其商品价格可最大限度地接近严格反映生态价值供求关系变化的市场价格，买卖双方可实现互动协商、互利双赢的结局。

2. 经济运行的表现形态不同。传统经济运行表现出一定的周期性波动，其很难摆脱高增长、高通胀的发展怪圈；低碳经济则表现出一定的持续性，在一定程度上可实现“两高一低”（高增长、高就业、低通胀）的目标，并使经济运行的周期性波动幅度明显减缓。

3. 经济运行的规律不同。低碳经济运行主要受三大规律所支配：一是低碳技术功能价格比法则，此法则决定了低碳经济快速发展的动力根源；二是全球政府间合作机制及其各自公共政策的约束法则，此法则决定了低碳市场的供需数量；三是全球经济活动中优劣势反差的马太效应法则，低碳信息不对称使得交易双方处于不平等的地位，为信息优势者站在道德高地提供了操纵控制信息弱势者的现实可能。

三、低碳时代能源科学研究的新课题

建立在生态文明价值观基础之上的低碳经济时代的出现，使建立在化石能源开发利用基础之上的传统能源科学理论面临着一场新的革命。尽管目前还难以对低碳经济时代的能源科学理论框架进行勾画，但至少可以从以下几方面提出新的理论命题：

（一）能源科学研究的基本使命——维护人与自然界碳生态系统的动态平衡
传统能源科学理论最基本的特征是关注人及其周围的物质世界，是建立在

自然人能源需求保障这一最基本的命题之上的。低碳研究则把目光转向人类及其生存所需的碳生态世界,将理性生态人及其生存所维系的碳动态平衡确定为人类社会发展的基本经济问题。以此为基点,将人类对全球碳属性资源的开发利用、全球碳生态演变的基本规律、不同主体的碳生态经济行为、不同低碳干预方式的生态经济绩效、碳生态均衡的全球合作等问题,作为能源科学理论研究的基本使命。

(二) 能源科学研究的基本逻辑起点——人类与自然界碳生态系统共存的理性生态人、碳权公平与责任对等的前提假设

以这一前提为逻辑起点作为构建能源科学研究的理论基础。以低碳价值为核心的生态加权价值论,即低碳价值及其产生的规律、价值基本构成、价值实现途径及其评估等成为能源科学体系推演的基本逻辑。

(三) 能源科学研究的新领域——低碳生态伦理约束

在传统能源科学理论中,科技要素被认为是价值中立的,属于事实判断;而在低碳研究理论中,所有的生产要素均被赋予了生态学意义上的伦理道德属性,因而属于价值判断。这便为能源科学理论研究开拓出新的领域,使生态伦理学在这一背景下获得新的成长空间。

(四) 能源经济研究的主要内容——低碳资源的横向优化配置与纵向可持续均衡

由于全球自然生态基础、经济社会发展水平和低碳资源控制等方面所存在的严重不对称,再加上不同国家体制、文化背景、经济发展阶段所存在的差距,使得低碳资源在全球的配置不仅存在一个横向的公平问题,更面临一个纵向代际之间的可持续均衡。这便使得以低碳资源横向公平配置和代际可持续均衡为基本使命的低碳经济学研究,必须把“应该怎么样”或“应该是”的问题放在更为优先考虑的位置上。缓解全球低碳资源不对称将成为各国政府的重要职责之一,低碳生态价值的道德约束使规范分析成为具有更重要主导地位的分析方法。

(五) 能源管理研究的新焦点——低碳价值管理体系

低碳领域中的全球合作及其法规约束体系创造出全新的低碳市场需求,并由此而诞生了新的贸易规则和市场体系,进而使厂商的组织行为和经营方式也发生新的衍变。碳收支、碳成本、碳标识、碳绩效、碳核算、碳价值等一系列新的管理理念将会伴随着企业核心价值观的转变而流行。在全球低碳监测技术及其信息日益清晰的状况下,低碳价值将会明显提升企业产品和服务的附加价

值，并改写现有的会计准则，进而将使传统的产权理论面临着新的挑战。低碳价值将成为一种新的对经济运行过程产生重大影响的制约因素。企业竞争的重点也将会从传统的质量、成本、服务、技术等生产要素，转移到低碳价值的挖掘和维护上。

（六）能源法学研究的新内容——低碳权利识别及其维护规律占主导地位
的规律体系

低碳权利识别及其维护规律将与经济领域、社会领域、自然领域等共同组成法学研究的四个部分。其中，低碳权利识别及其维护规律将占据支配地位。

（七）能源行为分析的基本着力点——低碳行为的无边界分析

低碳时代在对人的社会活动行为分析时，更注重分析的是人类作为一个物种，其个体生存和自然界碳生态系统整体之间均衡的生态行为。在进行宏观分析时，更注重国家之间的全球合作与共识，更注重协调不同发展阶段、不同发展水平的国家权益的维护。可见，在科学技术高度发展和全球化背景下，任何个人、组织和国家的经济行为都将会突破其所生存的空间边界。因此，能源科学中关于经济行为的研究事实上是一种无边界分析，其对微观及宏观经济行为的分析，建立在对个人、组织生态经济行为进行理性把握和分析的前提条件之下。



2015年9月28日于青岛

前 言

能源是人类社会发展重要的物质基础，人类发展的历史进程与能源密切相关。能源工程的发展在国民经济中具有重要的战略地位，是我国在可持续发展中面临的重大问题。

在中国，目前对于能源工程的研究和发展还相对比较薄弱，很少有系统化地研究能源工程中所涉及的能源基础理论、设备、施工、工艺和环境等工程问题。因此，在对现有研究成果进行概括和总结的基础上，向社会推出一本系统介绍能源工程科学的著作，有助于人们进一步了解能源工程的系统结构和所涉及的整个过程，进而对能源工程所涉及的理论、技术、设备、方法、环境等问题进行科学的指导。

在此背景下，《能源科学与管理论丛》编委会经过认真研究，将能源工程学作为本论丛中的一部，希望通过本书的研究，一方面在总结国内外最新成果的基础上，从工程的视角，对能源开采、储运、加工转化和转换利用中所涉及的原理、设备、工艺方法等进行探讨，另一方面也通过对能源工程中基本理论、方法及设备的总结，为当前科学界和工业界所关心的新能源和节能减排中所涉及的工程问题提供科学的理论方法和工程实践的指导，也为政府部门的能源决策提供理论支持。

能源工程学是一个涉及基础理论、工程实践，为人类经济社会发展提供服务的科学体系，是一套基础知识与发展前沿相结合的工程实践科学理论，内容丰富，涉猎面广。全书共分九章。

第一章是绪论部分，围绕能源需求及能源技术对能源工程发展的影响，分析了能源工程的发展历程，提出了能源工程学的研究内容和研究方法，为

后续章节系统地开展研究工作奠定了基础。

第二章是能源工程基本原理。从阐述能源的分类、能量的基本性质及能源与能量、环境的关系出发,重点研究热量传递的三种基本方式、能量转化的基本过程和基本原理,为后续开展能源工程的研究奠定了理论基础。

第三章是能源开采工程。本章重点对煤炭、石油、天然气、水能资源及非常规能源在开采中所涉及的开发方法、工艺、设备及其对环境的影响等几方面进行系统的阐述和研究。

第四章是能源储运工程。本章主要探讨煤炭、石油、天然气、热能和电能五种能源在输送和储运中所涉及的交通道路、管道、施工、安全控制等方面的工程问题。

第五章是能源加工转化工程。本章主要探讨了煤炭、石油和天然气三大常规能源在加工转化过程中所涉及的设备、加工转化方法、工艺等及其与环境的关系。

第六章是能源转换利用工程。本章对能源转换利用过程中所涉及的电能电力工程进行分析和研究,探讨了电能的分配与利用及电能质量的控制和评价方法,在对热能利用方法进行探讨的基础上对能源利用系统进行了科学分类和阐述。

第七章是新能源工程。对太阳能、风能、海洋能、生物质能及其他新能源的类型和特性进行了分析,并对其在开发和利用过程中所涉及的工程问题进行了科学探讨。

第八章是节能减排工程。本章围绕工业节能、建筑节能和交通节能等三个节能环节所涉及的方法、技术等问题进行分析和研究。并对废气、废水和固体废弃物等三废的处理所涉及的工程问题进行了探讨。

第九章是未来能源工程学发展。本章着眼于当前能源的热点问题,围绕能源互联网、智能能源网、反物质能源的探索、发电技术的进步四个方面,讨论了能源工程学的未来发展问题。

全书从工程学的基本概念和特征出发,科学地阐述了能源工程的本质。紧紧围绕能源工程这条主线,较全面地对能源在开采、加工、储运、利用转

化和新能源的开发及节能减排工程中所涉及的基础理论、工艺方法、设备、施工、控制、安全及环境等几方面进行科学分析和系统评价，具有较强的科学性、实践性和前瞻性。本书既可以作为高等院校能源、环境、化工等专业师生的教材，也可供相关专业技术人员、管理人员和政府部门管理人员参考使用。当然，作为一部探索之作，也由于受各方面条件的限制，书中或许还存在不少缺点、不足和值得商榷的地方，敬请广大读者批评指正。

何 燕

2015年9月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 能源工程学概述	1
第二节 能源工程学的形成与发展	3
第三节 能源工程学的研究内容、方法及特点	6
第二章 能源工程基本原理	9
第一节 概述	9
第二节 能量传递基本原理	18
第三节 能量的转换及有效利用	24
第三章 能源开采工程	36
第一节 煤炭开采工程	36
第二节 石油开采工程	54
第三节 天然气开采工程	74
第四节 水能开发工程	85
第五节 非常规能源开采工程	97
第四章 能源储运工程	115
第一节 煤炭的储运工程	115
第二节 石油的储运工程	123
第三节 天然气的储运工程	132
第四节 热能储运工程	139
第五节 电能的储运工程	153
第五章 能源加工转化工程	171
第一节 煤炭的加工转化工程	171

第二节 石油的加工转化工程	210
第三节 天然气的加工转化工程	218
第六章 能源转换利用工程	224
第一节 电能与电力工程	224
第二节 热能工程	248
第七章 新能源工程	260
第一节 太阳能开发及利用工程	260
第二节 风能开发及利用工程	271
第三节 海洋能开发及利用工程	278
第四节 生物质能开发及利用工程	284
第五节 其他清洁能源利用工程	299
第八章 节能减排工程	304
第一节 节能工程	304
第二节 减排工程	310
第九章 未来能源工程学发展	330
第一节 “反物质”能源的探索	330
第二节 发电技术的进步	331
第三节 能源互联网	334
第四节 未来的智能能源网	339
参考文献	341
后记	356