



普通高等教育“十二五”规划教材

# 核能发电 原理与技术

周乃君 乔旭斌 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 核能发电 原理与技术

编著 周乃君 乔旭斌

主审 刘 亮 罗必雄



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书为满足核电人才培养需求而编写，体系完整，内容深入浅出，密切联系实际，引用资料新颖。全书共分八章，主要包括核反应堆的物理基础、核电厂主要堆型及其原料制备、核能发电系统组成原理与工作过程、压水堆核电厂的主要系统与设备、核电厂的监控与保护系统、核安全管理、核电技术的发展前景等内容。

本书可作为能源动力类专业的教学用书，也可作为从事核电厂设计、制造、运行、管理的工程技术人员及管理人士的培训和参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

核能发电原理与技术/周乃君, 乔旭斌编著. —北京: 中国电力出版社, 2014. 3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5222-3

I. ①核… II. ①周… ②乔… III. ①核能发电-高等学校-教材 IV. ①TM613

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 280352 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http: //www. cepp. sgcc. com. cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 274 千字

定价 25.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

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

能源与环境是当今社会面临的两大热点问题。随着全球经济的发展和人们生活水平的提高,世界对能源的需求正在加速增长,使得各种化石能源面临紧缺和日渐枯竭;与此同时,大量化石能源的开采利用产生大量的污染物排放,造成了大气污染、酸雨、全球气候变暖、大气臭氧层损毁等环境恶化问题。因此,寻求清洁高效的能源来替代常规化石能源的工作一直受到重视。核能就是能大规模替代常规化石能源的新能源。

人类对核能的认识可追溯到 20 世纪初期。早期针对铀核分裂的研究发现,在铀核分裂的过程中会释放出比相同质量的化学反应放出的能量大几百万倍的能量,由此开创了核能利用的历史。后来又发现,以氢核同位素发生的聚变反应能释放比核裂变能更大的能量。

核能最早用于制造原子弹和氢弹等核武器。核能的和平利用始于 20 世纪 50 年代,并主要用于发电。随着技术的不断进步,工业发达国家在 20 世纪中叶以后掀起了发展核能发电的高潮。核能作为最晚发现的一种能量形式,已在世界能源供应中占有十分重要的地位,而新一代核电技术也正在发展之中,且已显现出光明前景。

核电具有资源相对充足,使用清洁、安全的特点。核电作为高效清洁能源,在世界范围内广受重视。我国自 20 世纪 80 年代起,通过引进消化,已具备自主设计建造核电厂的能力,并取得了丰富的运行经验。进入 21 世纪以来,我国核电建设步入发展快车道,预期即将进入大发展时期,对专业人才的需求将会不断增加。

本书是为满足核电人才培养需求而编写的,在编写过程中,根据作者多年来从事教学和核电厂设计的工作经验,力求反映从事核电厂的研究、设计、运行、管理所需知识的全貌,体系完整,内容深入浅出,密切联系实际,引用资料新颖。

全书共分八章,主要包括核反应堆的物理基础、核电厂主要堆型及其原料制备、核能发电系统组成原理与工作过程、压水堆核电厂的主要系统与设备、核电厂的监控与保护系统、核安全管理、核电技术的发展前景等内容。本书可作为能源动力类专业的教学用书,也可作为从事核电厂设计、建造、运行、管理的工程技术人员及管理人員的培训和参考用书。

本书第 5、6 章由乔旭斌撰写,其余章节由周乃君撰写。刘亮教授、罗必雄教授级高工审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚感谢。

由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正!

编 者

2013 年 5 月



# 目 录

## 前言

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第1章 概述              | 1  |
| 1.1 常规能源的现状         | 1  |
| 1.1.1 能源的分类         | 1  |
| 1.1.2 世界能源的发展与现状    | 2  |
| 1.2 核能的发现           | 6  |
| 1.2.1 放射性现象的发现      | 6  |
| 1.2.2 原子模型的诞生       | 7  |
| 1.2.3 核裂变现象与核裂变能的发现 | 7  |
| 1.2.4 核聚变能的发现       | 9  |
| 1.3 核能发电的优越性        | 10 |
| 1.4 核电发展的历史与现状      | 13 |
| 1.5 发展核电的必要性        | 16 |
| 1.5.1 我国能源状况        | 16 |
| 1.5.2 我国能源战略与节能减排目标 | 17 |
| 1.5.3 核电发展计划        | 17 |
| 复习与思考               | 18 |
| 第2章 核反应堆的物理基础       | 19 |
| 2.1 原子核与核能          | 19 |
| 2.1.1 原子核           | 19 |
| 2.1.2 中子            | 19 |
| 2.1.3 同位素           | 19 |
| 2.1.4 核力            | 20 |
| 2.1.5 核的结合能         | 20 |
| 2.2 放射性             | 21 |
| 2.2.1 放射性衰变         | 21 |
| 2.2.2 放射性类型         | 22 |
| 2.2.3 放射性衰变规律       | 22 |
| 2.3 核反应             | 23 |
| 2.3.1 核反应与化学反应的区别   | 23 |
| 2.3.2 核反应的分类        | 24 |
| 2.4 中子与原子核的反应       | 24 |
| 2.4.1 中子与原子核的相互作用   | 24 |
| 2.4.2 中子截面与核反应率     | 25 |

|            |                            |           |
|------------|----------------------------|-----------|
| 2.4.3      | 截面随中子能量的变化 .....           | 27        |
| 2.4.4      | 共振吸收 .....                 | 27        |
| 2.5        | 核裂变反应 .....                | 28        |
| 2.5.1      | 核裂变反应机理 .....              | 28        |
| 2.5.2      | 易裂变核燃料 .....               | 29        |
| 2.5.3      | 裂变能量 .....                 | 29        |
| 2.5.4      | 链式裂变反应 .....               | 30        |
| 2.5.5      | 核裂变反应类型 .....              | 31        |
| 2.6        | 反应堆物理 .....                | 32        |
| 2.6.1      | 反应堆临界 .....                | 32        |
| 2.6.2      | 反应堆控制 .....                | 32        |
| 2.6.3      | 反应堆物理设计 .....              | 33        |
| 2.6.4      | 反应堆动态方程 .....              | 33        |
| 2.6.5      | 反应性系数 .....                | 34        |
| 2.6.6      | 中毒效应 .....                 | 35        |
| 2.6.7      | 核燃料的燃耗 .....               | 36        |
| 2.6.8      | 核燃料的转换和增殖 .....            | 36        |
|            | 复习与思考 .....                | 36        |
| <b>第3章</b> | <b>核反应堆堆型及原料制备 .....</b>   | <b>38</b> |
| 3.1        | 核反应堆堆型概述 .....             | 38        |
| 3.2        | 压水堆 .....                  | 39        |
| 3.2.1      | 发展历程 .....                 | 39        |
| 3.2.2      | 系统结构与参数 .....              | 39        |
| 3.3        | 沸水堆 .....                  | 41        |
| 3.3.1      | 系统概述 .....                 | 42        |
| 3.3.2      | 沸水堆的构造及特点 .....            | 42        |
| 3.3.3      | 沸水堆核电厂的主要系统 .....          | 43        |
| 3.3.4      | 沸水堆与压水堆的比较 .....           | 44        |
| 3.3.5      | 沸水堆技术参数 .....              | 44        |
| 3.4        | 重水堆 .....                  | 45        |
| 3.4.1      | 重水慢化—重水冷却堆 .....           | 46        |
| 3.4.2      | 重水慢化—沸腾轻水冷却堆 .....         | 46        |
| 3.4.3      | CANDU型重水堆核电厂 .....         | 46        |
| 3.5        | 石墨堆 .....                  | 49        |
| 3.5.1      | 石墨水冷堆 .....                | 49        |
| 3.5.2      | 石墨气冷堆 .....                | 50        |
| 3.6        | 核燃料的生产制备 .....             | 52        |
| 3.6.1      | 铀氧化物的制备 .....              | 53        |
| 3.6.2      | $^{235}\text{U}$ 的提纯 ..... | 54        |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 3.7 燃料元件的结构与制备            | 55 |
| 3.7.1 燃料元件                | 55 |
| 3.7.2 燃料元件的制造             | 55 |
| 3.7.3 燃料棒包壳材料             | 56 |
| 3.7.4 燃料棒的近期发展            | 58 |
| 3.8 冷却剂与慢化剂               | 58 |
| 3.8.1 冷却剂                 | 58 |
| 3.8.2 慢化剂                 | 59 |
| 3.8.3 重水的特点及制备            | 60 |
| 3.8.4 石墨的特点及制备            | 60 |
| 复习与思考                     | 62 |
| <b>第4章 核电厂热工基础与工作过程</b>   | 63 |
| 4.1 热力过程与热力循环             | 63 |
| 4.1.1 状态参数与热力过程           | 63 |
| 4.1.2 朗肯循环及其改进            | 64 |
| 4.1.3 循环热效率的计算            | 65 |
| 4.2 核能发电系统的组成             | 67 |
| 4.2.1 核电厂的组成              | 67 |
| 4.2.2 核电厂的能量转换与传输         | 68 |
| 4.3 核反应堆内传热与流动            | 69 |
| 4.3.1 反应堆释热               | 69 |
| 4.3.2 反应堆传热               | 70 |
| 4.3.3 反应堆流体流动             | 72 |
| 4.3.4 反应堆热工水力设计           | 73 |
| 4.4 核电厂工作过程               | 73 |
| 4.4.1 核电厂运行特点             | 73 |
| 4.4.2 核电厂运行方式             | 74 |
| 4.4.3 反应堆启动过程             | 74 |
| 4.4.4 负荷调节与停堆过程           | 78 |
| 4.4.5 换料操作                | 79 |
| 复习与思考                     | 79 |
| <b>第5章 压水堆核电厂的主要系统与设备</b> | 80 |
| 5.1 概述                    | 80 |
| 5.2 一回路系统                 | 81 |
| 5.2.1 系统功能                | 81 |
| 5.2.2 系统组成                | 81 |
| 5.3 一回路系统主要设备             | 83 |
| 5.3.1 反应堆压力容器(堆芯)         | 83 |
| 5.3.2 蒸汽发生器               | 84 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 5.3.3 | 冷却剂泵 .....        | 86  |
| 5.3.4 | 稳压器 .....         | 87  |
| 5.3.5 | 控制棒驱动机构 .....     | 88  |
| 5.4   | 一回路辅助系统 .....     | 89  |
| 5.4.1 | 化学和容积控制系统 .....   | 90  |
| 5.4.2 | 余热排出系统 .....      | 90  |
| 5.4.3 | 设备冷却水系统 .....     | 91  |
| 5.5   | 二回路系统 .....       | 92  |
| 5.5.1 | 二回路系统的组成 .....    | 92  |
| 5.5.2 | 二回路系统的特点与构造 ..... | 93  |
| 5.6   | 常规岛主要设备 .....     | 94  |
| 5.6.1 | 核汽轮机 .....        | 94  |
| 5.6.2 | 发电机 .....         | 98  |
| 5.6.3 | 凝汽器 .....         | 100 |
| 5.6.4 | 汽水分离再热器 .....     | 101 |
| 5.7   | 专设安全设施系统 .....    | 102 |
| 5.7.1 | 安全壳注射系统 .....     | 102 |
| 5.7.2 | 安全壳喷淋系统 .....     | 104 |
| 5.7.3 | 安全壳隔离系统 .....     | 105 |
|       | 复习与思考 .....       | 106 |

## 第6章 核电厂的监控与保护系统 .....

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 6.1   | 核电厂监控系统概述 .....    | 108 |
| 6.2   | 核蒸汽供应系统的控制 .....   | 109 |
| 6.2.1 | 系统功能与原理 .....      | 109 |
| 6.2.2 | 控制系统应满足的要求 .....   | 110 |
| 6.2.3 | 控制系统的控制变量 .....    | 111 |
| 6.2.4 | 反应堆功率调节系统 .....    | 111 |
| 6.2.5 | 稳压器压力和水位控制系统 ..... | 113 |
| 6.2.6 | 蒸汽发生器水位控制系统 .....  | 114 |
| 6.2.7 | 蒸汽排放控制系统 .....     | 115 |
| 6.2.8 | 棒控和棒位监测系统 .....    | 116 |
| 6.3   | 反应堆保护系统 .....      | 118 |
| 6.3.1 | 系统范围 .....         | 118 |
| 6.3.2 | 系统功能 .....         | 119 |
| 6.3.3 | 保护参数 .....         | 120 |
| 6.3.4 | 启动和正常停堆 .....      | 120 |
| 6.3.5 | ATWS缓解系统 .....     | 121 |
| 6.4   | 反应堆核测量系统 .....     | 122 |
| 6.4.1 | 堆外核测量系统 .....      | 122 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.4.2 堆芯核测量系统            | 123 |
| 6.4.3 事故后监测系统            | 124 |
| 6.5 核电厂控制室               | 124 |
| 6.5.1 主控制室               | 124 |
| 6.5.2 辅助控制室              | 126 |
| 6.5.3 安全盘系统              | 126 |
| 复习与思考                    | 128 |
| <b>第7章 核安全管理</b>         | 130 |
| 7.1 核安全的基本原则             | 130 |
| 7.1.1 核反应堆的安全设计          | 130 |
| 7.1.2 核安全文化              | 131 |
| 7.1.3 核电厂的实体保卫系统         | 132 |
| 7.1.4 核反应堆安全分析方法         | 133 |
| 7.2 核安全事故分析              | 134 |
| 7.2.1 核反应堆运行工况与事故分类      | 134 |
| 7.2.2 核事故的分级             | 134 |
| 7.2.3 严重事故案例             | 136 |
| 7.3 核辐射的监测               | 139 |
| 7.3.1 辐射监测的对象            | 139 |
| 7.3.2 辐射监测系统的组成与功能       | 140 |
| 7.3.3 事故后的辐射监测           | 142 |
| 7.4 核电厂“三废”处理            | 142 |
| 7.4.1 放射性废物的来源与分类        | 142 |
| 7.4.2 核废物的管理             | 144 |
| 7.4.3 放射性废气的净化、浓缩        | 144 |
| 7.4.4 放射性废液的净化、浓缩        | 145 |
| 7.4.5 放射性固体废物的压缩、焚烧      | 146 |
| 7.4.6 放射性废物的处置           | 147 |
| 复习与思考                    | 147 |
| <b>第8章 核电技术的发展与展望</b>    | 149 |
| 8.1 世界核电技术发展概况           | 149 |
| 8.2 第三代核电技术              | 150 |
| 8.2.1 先进压水堆核电厂           | 150 |
| 8.2.2 先进沸水堆核电厂           | 154 |
| 8.2.3 先进坎度型重水堆 (ACR) 核电厂 | 155 |
| 8.3 第四代核反应堆技术            | 155 |
| 8.3.1 快中子反应堆概述           | 156 |
| 8.3.2 钠冷快中子反应堆系统 (SFR)   | 158 |
| 8.3.3 气冷快中子反应堆系统 (GFR)   | 160 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 8.3.4 | 铅冷快中子反应堆系统 (LFR)   | 161 |
| 8.3.5 | 超临界水冷反应堆系统 (SCWR)  | 163 |
| 8.3.6 | 超高温气冷反应堆系统 (VHTGR) | 164 |
| 8.3.7 | 熔盐反应堆系统 (MSR)      | 165 |
| 8.3.8 | 第四代核能系统小结          | 167 |
| 8.4   | 可控核聚变技术            | 168 |
| 8.4.1 | 核聚变反应与聚变能          | 168 |
| 8.4.2 | 实现可控核聚变的条件         | 169 |
| 8.4.3 | 实现受控热核反应的方法        | 169 |
| 8.4.4 | 受控核聚变的研究进展         | 171 |
| 8.4.5 | 核聚变能利用的前景展望        | 172 |
|       | 复习与思考              | 174 |
|       | 参考文献               | 175 |

## 第1章 概述

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。经过适当的转换,从能源中可以获得人们所需的各种形式能量来为生产或生活服务。核能是被人类发现比较晚的一种能量形式,但已在世界能源供应中占有十分重要的地位。本章将从常规能源的现状入手,分析新能源开发利用的紧迫性,继而重点介绍核能的发现与优点,以及国内外核电发展的历史与现状。

### 1.1 常规能源的现状

#### 1.1.1 能源的分类

能源是指能够直接或经过转换而获取某种能量的自然资源。在《现代汉语词典》中,对能源的注解是“能产生能量的物质,如燃料、水力、风力等”。而《大英百科全书》对能源的解释为“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类采用适当的转换手段,给人类自己提供所需的能量”。此外,在各种有关能源的书籍中还有一些其他的描述,但不论何种描述其内涵都是相同的,即能源就是能量的来源,是提供能量的资源。

在自然界里,有一些自然资源拥有某种形式的能量,它们在一定条件下能够转换成人们所需要的能量形式,这种自然资源称为一次能源,如煤炭、石油、天然气、植物燃料、核燃料、太阳能、风能、水力能、地热能、海洋能、潮汐能等。但在生产和生活中,由于工作需要或便于输送和使用等原因,常将上述一次能源经过加工、转换,使之成为更符合使用条件的能源,如煤气、焦炭、汽油、煤油、柴油、蒸汽、热水、电力、沼气、酒精、氢气、激光等,被称作二次能源。

根据能源被使用的广泛性和技术成熟程度,又可将能源分成常规能源和新能源两类。其中,已被人类广泛利用并在人类生活和生产中起重要作用的能量资源,称为常规能源,通常是指煤炭、石油、天然气、水力能等。而开发利用较晚、有待于进一步研究发展的能量资源称为新能源。相对于常规能源而言,在不同的历史时期和科技水平下,新能源有不同的内容。在我国,新能源通常指核能、太阳能、风能、地热能、氢能等,但在发达国家,核能已被大规模利用,被视为常规能源。表1-1给出了我国对能源的分类。从能源的来源来看,又可分为三类。

第一类能源是来自地球以外天体的能量,主要是太阳辐射能,还有其他恒星或天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量。太阳辐射能是地球上能量的最主要来源,它除了直接向地球提供光和热外,还是其他一次能源的来源。例如,光合作用促使植物生长,形成植物燃料;煤炭、石油、天然气、油页岩等矿物燃料(又称化石燃料)都是古代生物接受太阳能后生长,又长久沉积在地下形成的;另外,水力能、风能、海洋能等,归根到底也都源于太阳辐射能。

表 1-1 能 源 分 类

| 类别   |       | 第一类                                       |                                                         | 第二类                    | 第三类 |
|------|-------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|-----|
|      |       | 常规能源                                      | 新能源                                                     |                        |     |
| 一次能源 | 再生能源  | 水能<br>植物燃料                                | 太阳辐射能<br>风能<br>生物质能<br>海水温差能<br>海洋波浪能<br>海水动力能<br>(雷电能) | 地热能<br>(火山能)<br>(地震能)  | 潮汐能 |
|      | 非再生能源 | 煤炭<br>石油<br>天然气                           | 油页岩                                                     | 核燃料——<br>铀、钍、钷、<br>氡、氙 |     |
| 二次能源 |       | 焦炭、煤气、<br>汽油、柴油<br>煤油、<br>石油液化气、<br>电能、蒸汽 | 酒精<br>沼气<br>氢能                                          |                        |     |

第二类能源是地球自身蕴藏的能量，主要有地热能和核能。地热能是地球内部以热能形式存在的能源，包括地下热水、地下蒸汽和热岩层，以及尚无法利用的火山爆发能、地震能等。核能是地壳内和海洋中的核裂变燃料（铀、钍）和核聚变燃料（氘、氚）等发生核反应时释放的能量。

第三类能源来自地球与其他天体间的相互作用。例如，太阳和月球对地球表面海水的吸引作用而产生的潮汐能就属此类。

在自然界中可以不断再生并有规律地得到补充的能源，称为可再生能源，如太阳能、水力能、风能、潮汐能、生物质能等。它们都可以循环再生，不会因长期使用而减少。经过亿万年形成的、短期内无法恢复的能源，称为非再生能源，如煤炭、石油、天然气以及核裂变燃料等，它们随着大规模的开采和使用将会逐渐减少，最后枯竭。

1.1.2 世界能源的发展与现状

历史上，伴随着新的化石能源的发现和大规模开采与应用，世界的能源消费结构经历了数次变革。18 世纪以前，人类所使用的主要能源是柴薪；到 19 世纪中叶煤炭已逐渐占主导地位；20 世纪 20 年代，随着石油资源的发现与石油工业的发展，世界能源结构发生了第二次转变，即从煤炭转向石油与天然气；到 20 世纪 60 年代，石油与天然气逐渐成为主导能源。但是，20 世纪 70 年代以来，两次石油危机的爆发，动摇了石油在能源中的支配地位。当前世界能源供应处于所谓“多能互补”时期，即由石油、煤炭、天然气、核电、水电等共同构成人类社会能源生产与消费的主体。表 1-2 为世界主要能源生产国一次能源储量，表 1-3 为世界主要国家的能源消费结构，图 1-1 所示为世界能源的消费趋势。

表 1-2

世界主要能源生产国一次能源储量 (2012 年)

| 石 油      |             |           |            | 天 然 气    |                            |           |            | 煤      |             |           |            |
|----------|-------------|-----------|------------|----------|----------------------------|-----------|------------|--------|-------------|-----------|------------|
| 国 家      | 储量<br>(亿 t) | 占比<br>(%) | 储采比<br>(年) | 国 家      | 储量<br>(万亿 m <sup>3</sup> ) | 占比<br>(%) | 储采比<br>(年) | 国 家    | 储量<br>(亿 t) | 占比<br>(%) | 储采比<br>(年) |
| 委内瑞拉     | 464.6       | 17.8      | 332.5      | 伊 朗      | 33.6                       | 18.0      | 209.5      | 美 国    | 2373.0      | 27.6      | 257.4      |
| 沙特阿拉伯    | 365.2       | 15.9      | 66.8       | 俄罗斯      | 32.9                       | 17.6      | 55.6       | 俄罗斯    | 1570.1      | 18.2      | 442.5      |
| 加拿大      | 280.2       | 10.4      | 153.5      | 卡塔尔      | 25.1                       | 13.4      | 159.6      | 中国（内地） | 1145.0      | 13.3      | 31.4       |
| 伊朗       | 215.7       | 9.4       | 123.3      | 土库曼斯坦    | 17.5                       | 9.3       | 271.9      | 澳大利亚   | 764.0       | 8.9       | 177.2      |
| 伊拉克      | 202.4       | 9.0       | 132.8      | 美 国      | 8.5                        | 4.5       | 12.5       | 印度     | 606.0       | 7.0       | 100.0      |
| 科威特      | 139.8       | 6.1       | 91.7       | 沙特阿拉伯    | 8.2                        | 4.4       | 80.1       | 德国     | 407.0       | 4.7       | 207.5      |
| 阿拉伯联合酋长国 | 129.8       | 5.9       | 84.2       | 阿拉伯联合酋长国 | 6.1                        | 3.3       | 117.9      | 乌克兰    | 338.7       | 3.9       | 384.0      |
| 俄罗斯      | 119.5       | 5.2       | 22.7       | 委内瑞拉     | 5.6                        | 3.0       | 169.6      | 哈萨克斯坦  | 336.0       | 3.9       | 288.7      |
| 利比亚      | 62.5        | 2.9       | 88.0       | 尼日利亚     | 5.2                        | 2.8       | 119.3      | 南非     | 301.6       | 3.5       | 116.0      |
| 尼日利亚     | 50.2        | 2.2       | 43.2       | 阿尔及利亚    | 4.5                        | 2.4       | 55.3       | 哥伦比亚   | 67.5        | 0.8       | 75.6       |
| 美国       | 42.1        | 2.1       | 10.7       | 澳大利亚     | 3.8                        | 2.0       | 76.6       | 加拿大    | 65.8        | 0.8       | 98.4       |
| 哈萨克斯坦    | 39.3        | 1.8       | 48.4       | 伊拉克      | 3.6                        | 1.9       | 4484.7     | 波兰     | 57.1        | 0.7       | 39.6       |
| 卡塔尔      | 24.6        | 1.4       | 29.5       | 中国（内地）   | 3.1                        | 1.7       | 28.9       | 印度尼西亚  | 55.3        | 0.6       | 14.3       |
| 中国（内地）   | 23.6        | 1.0       | 11.4       | 印度尼西亚    | 2.9                        | 1.6       | 41.2       | 巴西     | 45.6        | 0.5       | 791.3      |
| 巴西       | 22.3        | 0.9       | 19.8       | 挪 威      | 2.1                        | 1.1       | 18.2       | 希腊     | 30.2        | 0.4       | 50.0       |
| 世界总计     | 2357.6      | 100.0     | 57.2       | 世界总计     | 187.3                      | 100.0     | 55.7       | 世界总计   | 8609.4      | 100.0     | 109.5      |

注 资料来源为 BP 能源统计报告 (2013 年)。

世界主要国家的能源消费结构 (2012 年)

表 1-3

| 国家      | 能源消费总量            |                     | 石 油    |                     | 天 然 气            |                     | 煤 炭    |                     | 其 他    |                     | CO <sub>2</sub> 排放量 |                     |
|---------|-------------------|---------------------|--------|---------------------|------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
|         | Mtoe <sup>①</sup> | 占比 <sup>②</sup> (%) | Mtoe   | 占比 <sup>③</sup> (%) | 亿 m <sup>3</sup> | 占比 <sup>③</sup> (%) | Mt 原煤  | 占比 <sup>③</sup> (%) | Mtoe   | 占比 <sup>③</sup> (%) | MtCO <sub>2</sub>   | 占比 <sup>②</sup> (%) |
| 中国 (内地) | 2735.2            | 21.9                | 483.7  | 17.68               | 1438.4           | 4.73                | 3746.6 | 68.49               | 248.7  | 9.09                | 9208.1              | 26.72               |
| 美国      | 2208.8            | 17.7                | 819.9  | 37.12               | 7221.4           | 29.42               | 875.5  | 19.82               | 301.3  | 13.64               | 5786.1              | 16.79               |
| 俄罗斯     | 694.2             | 5.6                 | 147.5  | 21.24               | 4162.4           | 53.96               | 187.8  | 13.52               | 78.2   | 11.27               | 1704.3              | 4.94                |
| 印度      | 563.5             | 4.5                 | 171.6  | 30.45               | 545.6            | 8.71                | 596.5  | 52.93               | 44.5   | 7.90                | 1823.2              | 5.29                |
| 日本      | 478.2             | 3.8                 | 218.2  | 45.63               | 1167.4           | 21.97               | 248.8  | 26.01               | 30.5   | 6.39                | 1409.0              | 4.09                |
| 加拿大     | 328.8             | 2.6                 | 104.3  | 31.72               | 1007.1           | 27.56               | 43.7   | 6.65                | 112.0  | 34.07               | 619.6               | 1.80                |
| 德国      | 311.7             | 2.5                 | 111.5  | 35.77               | 752.4            | 21.72               | 158.4  | 25.41               | 53.3   | 17.10               | 815.0               | 2.36                |
| 巴西      | 274.7             | 2.2                 | 125.6  | 45.73               | 291.7            | 9.56                | 26.9   | 4.90                | 109.4  | 39.81               | 500.5               | 1.45                |
| 韩国      | 271.1             | 2.2                 | 108.8  | 40.11               | 500.3            | 16.61               | 163.7  | 30.18               | 35.5   | 13.10               | 763.7               | 2.22                |
| 法国      | 245.4             | 2.0                 | 80.9   | 32.97               | 424.9            | 15.58               | 22.8   | 4.65                | 114.9  | 46.80               | 383.4               | 1.11                |
| 伊朗      | 234.2             | 1.9                 | 89.6   | 38.25               | 1560.9           | 59.99               | 1.8    | 0.38                | 3.2    | 1.38                | 608.3               | 1.76                |
| 沙特阿拉伯   | 222.2             | 1.8                 | 129.7  | 58.36               | 1028             | 41.64               | 0.0    | 0.00                | 0.0    | 0.00                | 615.3               | 1.79                |
| 英国      | 203.6             | 1.6                 | 68.5   | 33.63               | 782.8            | 34.61               | 78.2   | 19.21               | 25.5   | 12.55               | 530.5               | 1.54                |
| 墨西哥     | 187.7             | 1.5                 | 92.6   | 49.32               | 836.6            | 40.10               | 17.7   | 4.71                | 11.0   | 5.87                | 496.0               | 1.44                |
| 意大利     | 162.5             | 1.3                 | 64.2   | 39.50               | 686.8            | 38.04               | 32.4   | 9.97                | 20.3   | 12.49               | 406.3               | 1.18                |
| 世界总计    | 12476.6           | 100.0               | 4130.5 | 33.11               | 33144.0          | 23.91               | 7460.2 | 29.90               | 1633.1 | 13.09               | 34466.1             | 100.0               |

注 资料来源为 BP 能源统计报告 (2013 年)。  
① 指百万吨石油当量。  
② 指在世界能源消费总量 (或碳排放总量) 中所占的比例。  
③ 指在本国能源消费总量中所占的比例。

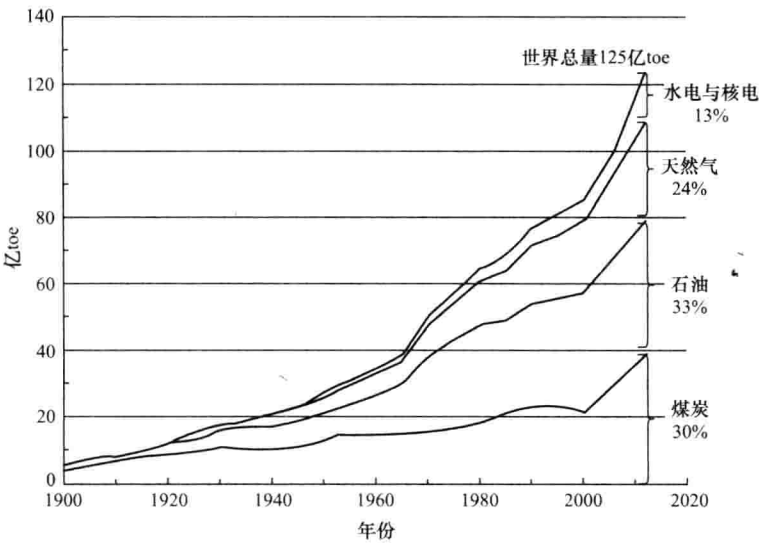


图 1-1 世界能源的消费趋势

由表 1-1~表 1-3 和图 1-1 可知，世界能源消费量呈加速上升趋势，世界总的能源消费已超过 120 亿 toe，其中石油约占 33%，天然气约占 24%，煤炭约占 30%，其他能源（核电、水电、风电、太阳能等）占 13%。

世界各国常规能源的资源量和储采比差别很大。世界范围来看，以现有开采速度，石油还可供开采约 57 年，天然气可供开采约 56 年，煤炭可供开采 110 年。而我国这三种主要化石能源的可开采年限，分别只有 11 年、29 年和 31 年，可见化石能源正在面临枯竭。

与此同时，大量化石能源的开采利用产生大量的污染排放，是造成大气污染、酸雨、全球气候变暖、大气臭氧层损毁等环境问题的主要原因。因此，寻求替代常规化石能源的工作一直受到重视，目前看来，核能是唯一能大规模替代常规化石能源的新能源。

核能在工业上主要用于发电。表 1-4 为世界主要国家发电量及发电能源的构成。

表 1-4 世界主要国家发电量及发电能源的构成（2012 年）

| 国 家    | 年发电量<br>(TWh) | 占比<br>(%) | 化石燃料<br>(%) | 核电<br>(%) | 水电<br>(%) | 太阳能<br>(%) | 风电<br>(%) | 地热与生<br>物质 (%) |
|--------|---------------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------------|
| 中国（内地） | 4937.8        | 21.94     | 77.84       | 1.87      | 17.44     | 0.09       | 2.03      | 0.73           |
| 美国     | 4256.1        | 18.91     | 70.15       | 18.02     | 6.56      | 0.10       | 3.32      | 1.84           |
| 日本     | 1101.5        | 4.89      | 87.83       | 1.55      | 7.35      | 0.56       | 0.41      | 2.30           |
| 俄罗斯    | 1066.4        | 4.74      | 68.46       | 15.83     | 15.66     | —          | —         | 0.05           |
| 印度     | 1053.9        | 4.68      | 81.49       | 2.98      | 10.98     | 0.03       | 2.96      | 1.57           |
| 德国     | 617.6         | 2.74      | 62.71       | 15.26     | 3.43      | 4.53       | 7.45      | 6.62           |
| 加拿大    | 610.2         | 2.71      | 19.69       | 14.87     | 62.32     | 0.11       | 1.91      | 1.11           |
| 法国     | 560.5         | 2.49      | 13.45       | 71.89     | 10.39     | 0.71       | 2.54      | 1.02           |
| 巴西     | 553.7         | 2.46      | 12.85       | 2.75      | 75.43     | —          | 0.89      | 8.08           |
| 韩国     | 522.3         | 2.32      | 71.47       | 27.26     | 0.60      | 0.22       | 0.19      | 0.25           |

续表

| 国 家  | 年发电量<br>(TWh) | 占比<br>(%) | 化石燃料<br>(%) | 核电<br>(%) | 水电<br>(%) | 太阳能<br>(%) | 风电<br>(%) | 地热与生<br>物质 (%) |
|------|---------------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------------|
| 英国   | 363.2         | 1.61      | 69.94       | 18.36     | 1.44      | 0.37       | 5.70      | 4.19           |
| 西班牙  | 297.1         | 1.32      | 51.32       | 19.56     | 6.90      | 4.01       | 16.54     | 1.67           |
| 意大利  | 295.7         | 1.31      | 69.67       | —         | 14.02     | 6.27       | 4.47      | 5.56           |
| 墨西哥  | 291.4         | 1.29      | 83.44       | 2.85      | 10.72     | 0.02       | 0.67      | 2.29           |
| 南非   | 257.9         | 1.15      | 93.92       | 5.22      | 0.75      | —          | —         | 0.12           |
| 世界总计 | 22504.3       | 100.0     | 68.59       | 10.42     | 16.32     | 0.41       | 2.32      | 1.93           |

注 资料来源为 BP 能源统计报告（2013 年）。

由表 1-4 可知，我国发电总量已居世界首位，其中化石燃料发电量占比 78%，在世界各国中占比最高；水电约占 17%，核电只占 1.9%，太阳能、风能以及其他可再生能源加起来约占 3%。而其他国家各有特点。水电方面，巴西占比最高，达 75%；核电方面是法国占比最高，达 72%；而太阳能和其他可再生能源发电，占比较高的是西班牙、德国和意大利。

1.2 核 能 的 发 现

人类对核能的认识可追溯到 19 世纪末至 20 世纪初期近代物理学的辉煌时期。下面简要介绍核能的发现过程。

1.2.1 放射性现象的发现

(1) X 射线的发现。1895 年 11 月，德国物理学家伦琴将阴极射线管放在一个黑纸袋中，关闭了实验室灯源，他发现当开启放射线管电源时，一块涂有荧光材料的硬纸板会发出绿色的荧光。用一本厚书、木头或硬橡胶，甚至许多不太厚的金、银、铜等金属，插在射线管和硬纸板之间，仍能看到荧光。伦琴当时无法说明这种未知的射线，就用代数上常用来求未知数的“X”来表示，把它命名为 X 射线。后来知道，X 射线是由阴极射线打在阳极靶上而产生的。1895 年 12 月 22 日，伦琴和夫人拍下了第一张 X 射线照片。冲洗出来的底片清楚地呈现出伦琴夫人的手骨结构。

(2) 天然放射性的发现。1896 年，亨利·贝克勒耳用一种学名叫硫酸钾铀的荧光物质，想研究伦琴发现的 X 射线到底与荧光有没有关系。他知道，太阳光可以激发荧光物质产生荧光，于是把荧光物质放在一块用黑纸包起来的照相底片上面，让它们受太阳光的照射。由于太阳光是不能穿透黑纸的，因此太阳光本身是不会使黑纸里面的照相底片感光的。如果被太阳光激发的荧光中含有 X 射线，就会穿透黑纸而使照相底片感光。

可是，一连几天是阴沉沉的天气，使贝克勒耳无法做实验。他只好把那块已经准备好的硫酸钾铀和用黑纸包裹着的照相底片一同放进暗橱，无意中还将一把钥匙搁在了上面。几天之后，当他取出照相底片，却意外地发现，底片强烈地感光了，在底片上出现了硫酸钾铀很黑的痕迹，还留有钥匙的影子。可是照相底片并没有离开过暗橱，没有外来光线；硫酸钾铀未曾受光线照射，也谈不上荧光，更谈不上含有 X 射线。因此他只能推测这一定是硫酸钾

铀本身的性质造成的。

硫酸钾铀这种化合物，含有硫原子、氧原子、钾原子、铀原子。通过比较和鉴别，后来发现，在硫酸钾铀中，硫、氧、钾原子是稳定的，只有其中的铀原子能够放出一种肉眼看不见的射线，使照相底片感光。

这种神秘的射线，似乎是无限地进行着，强度不见衰减。发出 X 射线还需要阴极射线管和高压电源，而铀盐无需任何外界作用却能长久地放射着一种神秘的射线。

贝克勒耳虽然没有完成他预想的实验，却意外地发现了一种新的射线。后来，人们把物质这种自发发出射线的性质称为放射性，把具有放射性的物质称为放射性物质。这就是天然放射性的发现过程。

(3) 人工放射性的发现。1898 年，居里夫妇就贝克勒耳发现的放射性现象进行研究。通过大量的实验，发现含有铀或钍的物质，都会有放射性。而且有一种铀沥青矿石的放射性，比其中依照铀的含量计算出来的应有放射性大得多。居里夫人认为在这种矿石中，一定含有一种放射性比铀或钍强得多的新元素。后来在 1902 年从沥青矿渣中提炼出了现代物理化学中最重要的放射性元素——镭，从而揭开了原子时代的序幕，成为现代科学史上一项伟大的发现。

有“核子科学之父”尊称的卢瑟福，终生从事原子结构和放射性的研究。1899 年，卢瑟福发现了镭的两种辐射。

第一种辐射，不能贯穿比 1/50mm 还厚的铝片，但能产生显著的电效应。第二种辐射，能贯穿约 0.5mm 厚的铝片，然后强度减少一半，并且能穿过包装纸使照相底片感光。卢瑟福把前者命名为  $\alpha$  射线，后者命名为  $\beta$  射线。这些射线后来常用于轰击其他原子，从而发现了原子世界的许多重要特性。后来的研究表明， $\alpha$  射线实际上是氦原子 ( ${}^4_2\text{He}$ )，而  $\beta$  射线是电子流 (正电子或负电子)。

1934 年，居里夫人的女婿和女儿约里奥夫妇用射线打击镁、硼、铝，发现在停止打击后，这些元素还不断地放出  $\beta$  射线。这些射线的强度逐渐减小，并遵守天然放射元素的衰变规律。进一步用化学方法研究证明，铝受  $\alpha$  射线打击后放出中子，自身变成磷。这种磷是人工放射性元素，半衰期为 2.5min，它逐渐蜕变为稳定的硅核。

人工放射性的发现，为人类开辟了一个新领域。从此，科学家不必只依靠自然界的天然放射性物质来从事科学研究，这也大大推动了核物理学的发展。

### 1.2.2 原子模型的诞生

1911 年，卢瑟福完成了著名的  $\alpha$  粒子散射实验，证实了原子核的存在，并建立了原子核模型，实验原理如图 1-2 所示。通过实验、观察和计算，一副崭新的原子模型被提了出来：原子具有很小的、坚硬的、很重的并且带正电的中心核，卢瑟福把这个核称为原子核。而原子核的外围由若干电子所环绕，原子核本身则由带正电的质子 (用符号 p 表示) 和不带电的中子 (用符号 n 表示) 等基本粒子构成，如图 1-3 所示。

### 1.2.3 核裂变现象与核裂变能的发现

在用中子轰击周期表中许多元素的实验中，原子核都在吸收了一个中子之后失去了稳定状态而放出射线。当原子核放出质子后，就变成了周期表中下一位置元素的原子核。费米等人证实，用中子轰击铀，可得到原子序数为 93、94 的人造元素。可是所获得的都是一些令人迷惑、无法精确分析的放射性物质。德国的诺达克夫妇认为，在中子轰击铀核时，铀核被