工业系统概论

（第4版）

汤　彬　叶　桐　杨建新
周　晋　王晓强　卢达溶

编　著

清華大學出版社
北　京

内 容 简 介

本书针对当代强劲的科技综合化趋势和全球经济一体化大潮，以及各类人员在当前形势下提高素质、拓宽视野、加强沟通的新要求，将工程技术与经济管理加以综合，从正面对工业系统进行介绍。通过对能源、冶金、化工、机械、汽车、电子、轻工及建筑 8 个主要工业领域的介绍，深入浅出地展示了这些领域的生产过程，并从中提炼出系统观、结构性、社会化、产业政策、管理沟通、市场开拓、文化传统和可持续发展等基本概念，使读者对整个工业体系从技术过程到产业发展形成一个比较全面的认识，以建立实践性的认识方法和思维方式。本书作为清华大学文化素质教育核心课程的教材，经过多年教学实践，在加强学生通识教育方面取得了很好的教学成果。本书也可作为干部培训教材、各类人员的继续教育教材及了解工业知识的科普读物。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目（CIP）数据

工业系统概论 / 汤彬等编著. -- 4 版. -- 北京 ：清华大学出版社，2026. 9.

ISBN 978-7-302-67569-3

Ⅰ. F402

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024G7Y522 号

责任编辑：苗庆波

封面设计：常雪影

责任校对：王淑云

责任印制：张子璇

出版发行：清华大学出版社

网　　址：https://www.tup.com.cn，https://www.wqxuetang.com

地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　**邮　　编**：100084

社 总 机：010-83470000　　**邮　　购**：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市君旺印务有限公司

经　　销：全国新华书店

开　　本：185mm×260mm　　**印　张**：19.5　　**字　　数**：471 千字

版　　次：1999 年 11 月第 1 版　2026 年 9 月第 4 版　　**印　　次**：2026 年 9 月第1 次印刷

定　　价：59.80 元

产品编号：105346-01

前言

PREFACE

世界在演进，社会在进步，工业在发展。

当今更加多元的世界格局使我们在矛盾与冲突中探求共存与发展。经历3年新冠疫情之后复苏的中国经济，在促进消费、关注生成式人工智能、互联网电商的秩序塑造、化解城投债和地产行业负债的方方面面，面临机遇与挑战。从2023年起，学生报考方向、就业方向似乎从金融、贸易、地产类等“热门”领域开始向机械、电子、信息等工程领域转移。无论是从就业还是对世界的认知角度，也许，到了我们再次关注工业的时候了；也许，我们从产业角度认识的工业经济的整体规律和产业特征，是成为通识的时候了；也许，面向文科的工程教育是扬帆起航的时候了。

近年来，我国对职业教育发展寄予厚望，也加大了关注和投入，国家卓越工程师计划的启动，使产学研结合的高等工程教育有了更贴近产业实践的中国路线，中国产业发展全面迈向新阶段，工商管理、工程管理也都需要产业分析能力的基础培养。风潮之间，我辈当乘风顺流，会当水击三千里，正是人才辈出时！

过去几年，本书的读者群不断扩大，应用的课程也在增多，从清华大学走向更多兄弟院校，从经管类走向文科通识，从本科基础走向各院校各类专业硕士的课堂。我们试图将更多对产业的观察、教学中收集的反馈融入本次改版中。一方面，全书章节仍然保持“导论—资源—制造—建造—结语”的布局；另一方面，也对轻工业、汽车、水资源、化工、信息产业、建筑工业化、建筑文化等章节做了合并、删除、更新、扩充等调整。原来的尾声章节，也更名为“工业文明与社会发展”，并做了调整和补充。

本次修订中，根据当前课程授课和编写经验进行分工，既引入课程团队新成员，也请前辈师友审校把关，竭力达到精品标准。第4版的参编人员职责分工如下：

汤彬（清华大学教授）　　负责第2～4章内容的编写，统筹组织编写

叶桐（湖北省产业教授）　　负责第1、6、8、9章内容的编写，全书规划

杨建新（清华大学副教授）　　负责第5章内容的编写

周晋（清华大学副教授）　　负责第7章内容的编写

另外，卢达溶（清华大学教授）和王晓强（中国标准化研究院副研究员）均参与第2章内容的编写工作，并负责全书的通读审校。

在此，全体参与编审的人员期待本书的更新出版能够助力中国工程教育、通识教育、职业教育的发展，使产业通识、工程思维、工业认知由课本向课堂、由课堂向实践拓展。

本书可以用作工程、工商管理、工程管理、金融等专业的研究生基础课程、产业分析课程教材，也可以用作经济、管理、工程、社科等专业的本科通识课程教材，亦可为产业分析、产业研究的入门研究者提供辅助参考。

我们衷心感谢过去几年各界专家、师友的批评和建议，也欢迎广大读者、专家对第 4 版继续关心和指正。

编　者

2026 年 6 月于清华园

目录

CONTENTS

第 1 章　导论：工业系统 …… 1

1.1　工业系统的基本概念与分类 …… 1
1.1.1　工业与工业系统 …… 1
1.1.2　工业系统的结构 …… 2
1.1.3　工业与其他产业的关系 …… 5
1.2　系统与系统观简介 …… 6
1.3　工业系统的发展历程 …… 7
1.3.1　工业史发展脉络 …… 7
1.3.2　现代工业系统特征 …… 8
1.3.3　工业系统的未来 …… 9
1.4　本书框架 …… 11

第 2 章　资源：从自然物到原料 …… 14

2.1　矿产与采矿 …… 15
2.1.1　地质勘探和开发 …… 15
2.1.2　地质开发的区域布局 …… 17
2.1.3　有色金属的开采 …… 20
2.1.4　有色金属生产布局 …… 24
2.1.5　硅料、锂矿、稀土的开发 …… 25
2.2　煤炭工业 …… 26
2.2.1　煤炭生产 …… 26
2.2.2　煤炭的开采 …… 27
2.2.3　煤炭生产新观念——洁净煤技术 …… 32
2.2.4　煤炭生产的系统观 …… 33
2.3　电力工业 …… 37
2.3.1　火力发电 …… 38
2.3.2　水力发电 …… 47

2.3.3 核能发电 …… 50
2.3.4 风力发电 …… 52
2.3.5 太阳能发电 …… 55
2.3.6 生物质能 …… 57
2.3.7 氢能 …… 58
2.3.8 电力系统 …… 60
2.4 开源节流，走可持续发展之路 …… 66
2.4.1 发展是硬道理 …… 66
2.4.2 中国能源的发展必须走上良性循环之路 …… 67
2.4.3 依靠改革开放和科技进步，加速能源开发 …… 68
2.4.4 “双碳”背景下的能源开发 …… 70

第 3 章 资源：从原料到材料（上） …… 71

3.1 石油工业 …… 71
3.1.1 石油资源 …… 71
3.1.2 石油的开采 …… 73
3.1.3 石油的运输 …… 75
3.1.4 石油的加工 …… 76
3.1.5 非常规石油的生产 …… 80
3.1.6 油田伴生气的生产 …… 80
3.1.7 石油工业生产的经济观 …… 81
3.2 化学工业 …… 84
3.2.1 概述 …… 84
3.2.2 化工生产的基本原理和特点 …… 87
3.2.3 基本无机化工原料生产 …… 94
3.2.4 化肥工业 …… 98
3.2.5 典型的化工工艺 …… 108
3.2.6 微化工技术 …… 113
3.2.7 现代化工的发展前景 …… 118

第 4 章 资源：从原料到材料（下） …… 121

4.1 概述 …… 121
4.1.1 原材料工业 …… 121
4.1.2 冶金工业在国民经济发展中的地位和作用 …… 122
4.1.3 我国冶金工业的发展 …… 123
4.1.4 冶金工业的一般生产过程及典型生产部门 …… 124
4.1.5 钢铁企业生产流程的变迁 …… 125
4.2 炼铁生产 …… 127
4.2.1 原料准备 …… 127

4.2.2 高炉炼铁…… 129
4.3 炼钢生产 …… 133
4.3.1 炼钢的目的…… 133
4.3.2 炼钢工艺流程…… 134
4.3.3 氧气顶吹转炉炼钢…… 135
4.3.4 铸锭与连续铸坯…… 137
4.3.5 炼钢生产技术的发展…… 138
4.4 钢材的生产 …… 140
4.4.1 钢材的品种…… 140
4.4.2 轧钢设备…… 141
4.4.3 轧钢的两种加工类型…… 142
4.4.4 钢材轧制工艺过程…… 142
4.4.5 轧钢生产技术的发展…… 143
4.5 钢铁工业与其他部门的联系 …… 144
4.5.1 上游产业…… 145
4.5.2 下游产业…… 146
4.5.3 思考…… 147
4.6 钢铁生产中的结构问题 …… 148
4.6.1 钢厂内部结构…… 148
4.6.2 钢厂空间布局结构…… 148
4.6.3 钢铁市场结构…… 149
4.6.4 钢铁产品结构…… 150
4.6.5 中国承接钢铁工业转移…… 150
4.7 钢铁工业的发展前景及制约 …… 151
4.7.1 钢铁工业的前景…… 151
4.7.2 发展我国钢铁工业的主要支撑条件和制约环节…… 152
4.8 钢铁生产的能源利用与环境保护 …… 155
4.8.1 钢铁生产的能源利用…… 155
4.8.2 钢铁生产的环境保护…… 156

第 5 章 制造：从材料到机器 …… 159

5.1 概述 …… 159
5.1.1 机械制造业…… 159
5.1.2 机械制造业的起源和发展…… 160
5.1.3 机械制造业在国民经济中的地位和作用…… 161
5.2 机械产品的生产过程 …… 162
5.2.1 机械制造业的工作范围…… 162
5.2.2 机械产品的设计…… 163
5.2.3 机械产品的制造…… 165

5.2.4 机械制造业生产的组织…… 167
5.2.5 机械制造企业的成本构成…… 169
5.3 机械制造的加工工艺 …… 170
5.3.1 加工的基本方法…… 170
5.3.2 加工设备和工艺装备…… 171
5.3.3 机械零件的公差、配合与技术测量 …… 172
5.3.4 产品的质量控制…… 173
5.3.5 不同生产类型的工艺特点和要求…… 175
5.3.6 设计、工艺安排和制造成本之间的相互关系 …… 176
5.3.7 工艺水平…… 177
5.4 机械制造业生产方式的变革和生产的社会化 …… 179
5.4.1 从作坊式的单件生产到大量生产…… 179
5.4.2 机械制造业的专业化方向…… 181
5.4.3 从大批量生产到大规模定制生产…… 184
5.4.4 机械制造业中技术与管理的融合…… 186
5.4.5 加强机械制造工业基础…… 187
5.5 机械制造业的数字化转型 …… 189
5.5.1 机械制造业的信息化…… 189
5.5.2 智能制造…… 190
5.5.3 智能制造系统…… 191
5.5.4 我国发展智能制造的路径…… 191

第 6 章 制造：从零件到机器 …… 193

6.1 概述 …… 193
6.2 汽车的基本生产过程 …… 196
6.2.1 汽车的结构和设计…… 196
6.2.2 汽车制造的基本生产过程…… 200
6.2.3 汽车生产的特点…… 201
6.3 汽车工业的规模生产 …… 202
6.4 汽车产业的生产管理 …… 204
6.4.1 大规模生产与科学管理…… 205
6.4.2 科层制的有效控制…… 206
6.4.3 现代管理体制的诞生…… 206
6.4.4 精益生产方式与日本的崛起…… 207
6.4.5 美国汽车工业的反思和赶超措施…… 210
6.4.6 汽车大规模定制生产…… 212
6.5 新能源车与智慧交通 …… 213
6.5.1 汽车工业的未来…… 213
6.5.2 新能源汽车…… 215

6.5.3 智慧交通…… 217

第 7 章 新兴科技产业…… 220

7.1 大数据产业 …… 220
7.1.1 概述…… 220
7.1.2 大数据技术基础…… 228
7.1.3 大数据产业的关键技术…… 231
7.1.4 大数据产业生态系统…… 234
7.1.5 大数据产业的应用领域…… 235
7.1.6 大数据产业的发展战略与政策…… 237
7.2 人工智能产业 …… 240
7.2.1 人工智能技术的发展历程…… 241
7.2.2 人工智能产业的核心技术…… 244
7.2.3 人工智能产业的应用领域…… 247
7.2.4 人工智能产业生态系统…… 253
7.2.5 人工智能产业的挑战与治理…… 254

第 8 章 建造：从人到社会…… 258

8.1 建筑业与房地产业 …… 258
8.1.1 行业标准的分类…… 258
8.1.2 知识分类…… 262
8.1.3 学科分类…… 264
8.1.4 小结…… 265
8.2 基本建设与固定资产投资 …… 267
8.2.1 我国基本建设的流程…… 267
8.2.2 项目管理…… 269
8.3 工程行业与产业分工 …… 272
8.3.1 “大工程”行业概述…… 272
8.3.2 “大工程”的国际分工…… 274
8.3.3 路桥工程的产业成就…… 280
8.4 建筑工业化 …… 286
8.4.1 建筑与工业化的进程…… 286
8.4.2 建筑工业化的概念拓展…… 288
8.4.3 装配式建筑：建筑工业化的逐步推广 …… 289

第 9 章 工业文明与社会发展…… 293

参考文献…… 300



导论：工业系统

工业生产是当代社会的一个重要组成部分，也是当代世界上最普遍的一种经济系统。工业（狭义所指的制造业）以及包含采矿业、建筑业在内的第二产业部门是现代社会物质形态的直接生产部门。19 世纪以来，制造业的影响波及多个方面，形成了全世界最重要的产业文明。在其推动下，工业、工厂的工作节奏推动了以集中居住为代表的城市生活，城镇化在世界各国加速，农村人口比例下降。直到 21 世纪，无论互联网的影响力多么巨大，无论社会是否已经进入或完成了又一次产业结构的转型，第三产业的快速发展都是以制造业为基础的。

本书旨在通过讲述工业系统来提供一个产业观察的视角和方法，从工业系统的角度来剖析生产系统的构建逻辑，从对不同产业环节的观察分析中体现产业逻辑——在《工业讲义：工业文明与工程文化》一书中考察、辨析从经济系统到文化、政治的整个社会系统的工业文明。

理解“工业系统”，就是从实践和运行中体会经济的运转，也是了解实体经济特征的重要途径。本书虽然不覆盖农业、服务业和其他非经济部门，甚至现有的篇幅已经不能将所有工业部门一一介绍，但是，“伤其十指不如断其一指”，抓住“工业系统”的基础视角是本书的主要目的。

1.1 工业系统的基本概念与分类

1.1.1 工业与工业系统

工业是社会分工发展的产物。18 世纪的工业革命使原来以手工技术为基础的工场手工业逐步转变为机器大工业、工厂工业，由此工业成为一个独立的物质生产部门。工业迅速崛起，并随着技术的发展和应用，经历多次深刻变革，改变了人们的生活方式和生存环境。工业与我们的日常生活息息相关，但我们对于工业的理解通常是感性的。要想真正认识工业，就需要从工业系统的角度进行观察。

我国制造业产值在 2010 年达到 1.955 万亿美元，全球占比 19.8%，超过了同年美国的 1.952 万亿美元，成为世界制造业第一大国，中美两国的制造业贡献占全球约 40%。2012—2021 年，我国工业增加值由 20.9 万亿元增长到 37.3 万亿元，其中制造业增加值由 16.98 万亿元

增长到31.4万亿元。工业在当代经济中的地位十分重要，而制造业又是工业中最主要的部分。

工业系统是指在一定的时间和空间内，从事工业生产的产业部门及其资源、产品组成的集合，是产业和资源、产品之间及不同产业之间通过各种工业过程构成的统一整体，具有一定的产业结构和系统功能。整个工业系统包括能源提供、加工过程、产品销售、残值回收等，各工业部门相互影响、相互制约。图1-1所示是从物质循环的角度对工业系统的简单描述，也是本书展开讲述工业系统各部门的基本线索。

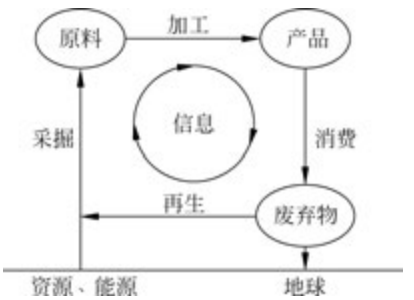


图1-1 工业系统的物质循环示意图

实际上，现代工业系统是一个非常复杂的系统。在市场经济体制下，工业生产是以企业为基本组织单位的，一个完整的工业生产系统包括许多具有复杂交互作用的子系统，如产品开发、生产控制、市场销售、财务等，这些子系统依靠信息流、物料流和资金流联系在一起。工业系统的复杂性还表现在随着科学技术的快速发展和消费者需求的变化，工业生产系统处于不断变化之中，即使生产同样的工业产品，比如我们熟悉的手机，其生产模式也在不断变化。本书主要介绍相对成熟的基础工业部门，并选择有代表性的部门展开论述。

工业部门结构是指在工业的再生产过程中形成并建立起来的技术经济联系，既包括工业部门相互之间的横向联系，又包括工业再生产过程的纵向联系；既有不同部门之间的物质交换问题，又有不同部门之间的价值补偿问题；每个工业部门既是其他部门存在和发展的条件，其自身的发展也要受到其他部门的制约。

因此，在分析现代工业系统时，需要通过对其静态的结构、部门的关联、联动的形式（包括正向的和负向的）等整体的运行进行把握，必要时还应结合工业系统演化发展的过程来关注其特征，以及与其他文化、制度系统的互动影响。

1.1.2 工业系统的结构

工业系统的结构是本书勾画的基本图景，用产业链串起一个网络，以多个工程与经济实际问题穿插其间。

1. 产业分类的图景

为了研究的方便和适应不同的研究目的，人们可以按不同的标准对工业进行分类，比较常见的主要有以下分类方法。

1）三次产业分类法

根据英国经济学家及统计学家克拉克的三次产业分类法，我国把全部经济活动划分为第一产业、第二产业、第三产业。第一产业是指农、林、牧、渔业（不含农、林、牧、渔专业及辅助性活动）；第二产业是指采矿业（不含开采专业及辅助性活动），制造业（不含金属制品、机械和设备修理业），电力、热力、燃气及水生产和供应业，建筑业；第三产业是服务业，是指除第一产业，第二产业以外的其他行业（剔除国际组织）。

2）标准产业分类法

为了统一国民经济的统计口径，1971年，联合国颁布了《全部经济活动的国际标准产业分类体系》（ISIC），将全部经济活动划分为十大项：①农业、狩猎业、林业和渔业；②矿业和采石业；③制造业；④电力、煤气、供水业；⑤建筑业；⑥批发与零售业、餐饮与旅店业；

⑦运输业、仓储业和邮电业；⑧金融业、不动产业、保险业及商业性服务业；⑨社会团体、社会及个人的服务；⑩不能分类的其他活动。

其中制造业又包含：①食品、饮料、烟草；②纺织服装、制革；③木材与木制品；④造纸与纸制品、印刷与出版；⑤化工产品和药品、石油加工、煤炭加工、塑料制品、橡胶制品；⑥非金属矿产品(除石油、煤炭加工产品以外)；⑦冶金工业；⑧金属制品、机械和工业设备；⑨其他制造业。

我国结合自身的产业实践和统计传统，参考 ISIC 分类方法制定了《国民经济行业分类》的国家标准，其最新的版本(GB/T 4754—2017，2019 年第 1 号修改单)将国民经济划分为 20 个门类(见表 1-1)，每个门类又划分了大类、中类、小类。

表 1-1　国民经济行业分类门类

门类	类别名称	门类	类别名称
A	农、林、牧、渔业	K	房地产业
B	采矿业	L	租赁和商务服务业
C	制造业	M	科学研究和技术服务业
D	电力、热力、燃气及水生产和供应业	N	水利、环境和公共设施管理业
E	建筑业	O	居民服务、修理和其他服务业
F	批发和零售业	P	教育
G	交通运输、仓储和邮政业	Q	卫生和社会工作
H	住宿和餐饮业	R	文化、体育和娱乐业
I	信息传输、软件和信息技术服务业	S	公共管理、社会保障和社会组织
J	金融业	T	国际组织

其中制造业门类又分为 31 个大类，见表 1-2。

表 1-2　国民经济行业分类的制造业门类分类

大类代码	名　称	大类代码	名　称
13	农副食品加工业	29	橡胶和塑料制品业
14	食品制造业	30	非金属矿物制品业
15	酒、饮料和精制茶制造业	31	黑色金属冶炼和压延加工业
16	烟草制品业	32	有色金属冶炼和压延加工业
17	纺织业	33	金属制品业
18	纺织服装、服饰业	34	通用设备制造业
19	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	35	专用设备制造业
20	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	36	汽车制造业
21	家具制造业	37	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业
22	造纸和纸制品业	38	电气机械和器材制造业
23	印刷和记录媒介复制业	39	计算机、通信和其他电子设备制造业
24	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	40	仪器仪表制造业
25	石油、煤炭及其他燃料加工业	41	其他制造业
26	化学原料和化学制品制造业	42	废弃资源综合利用业
27	医药制造业	43	金属制品、机械和设备修理业
28	化学纤维制造业		

本书借鉴上述两种分类方法，并考虑我国工业部门的管理体制，将采矿业和建筑业也纳入讨论范围，按照逻辑顺序重点介绍采矿业、煤炭工业、电力工业、石油化工工业、钢铁工业、机械工业、汽车工业、电子信息产业及建筑业等。这是一个工业系统以制造业为主线的产业链的逻辑，如图 1-2 所示。

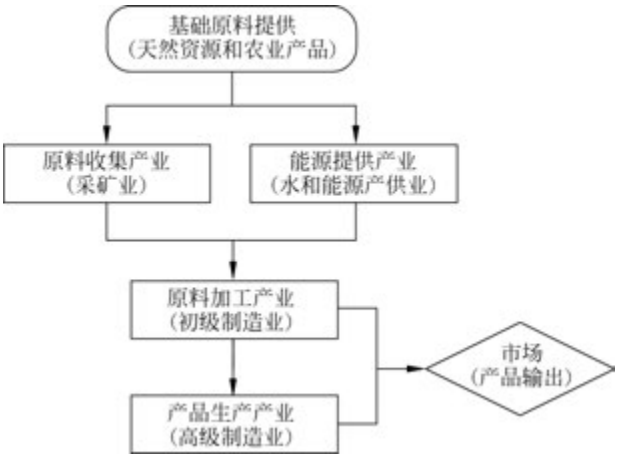


图 1-2　工业系统产业链示意图

现代工业是由许多工业部门组成的有机体系，各个工业部门在再生产过程中是紧密联系的。由于生产专业化的发展和生产社会化程度的提高，工业部门之间的联系日益复杂。现在的每一种工业产品，几乎都是几个或更多的部门共同劳动的成果。例如，制造汽车需要的各种专用或通用的机械设备要由工业设备部门提供，需要的基本原材料则要由冶金工业提供，汽车轮胎由材料工业提供，而汽车生产过程中消耗的动力又是由能源工业提供的……因此，对工业系统的认知需要有一个总体的产业链框架，才能将复杂的关系形成一个产业关系的网络。无论哪种产业分类，都是将庞杂的工业系统绘制成一幅图、一张网，其中的产业链则是提纲挈领的线索。

2. 工业结构问题

我国是全世界唯一拥有联合国产业分类中所列全部工业门类的国家，其中 220 多种工业产品的产量居世界第一位。任何一个国家或地区的工业发展不仅体现为规模的扩张，更体现在结构的变迁上。从总量到关系再到结构，有了全面的认知理解后，再探讨机理，归纳规律，甚至探究因果关系，便可从静态图景中寻找“动力”问题。

1）技术和产品结构问题

我国是制造大国，但还不是制造强国，我国的工业技术水平与发达国家相比尚有差距。我国工业企业具有自主知识产权的产品虽然已经不少，整体产业链的制造能力也较为完备，但很多产业的核心技术对外依存度仍然较高，产业发展需要的高端设备、元器件、关键零部件和关键材料等部分仍依赖进口。要在激烈的国际竞争中抢占技术和市场的制高点，突破更多领域的技术，就必须重视工业技术创新，在大量的工程实践和市场反馈中提升综合制造能力。2021 年，我国制造业产业结构加快升级，高技术制造业、装备制造业增加值分别增长了 18.2%、12.9%，对规模以上工业增长的贡献率分别达 28.6%、45.0%。

2）投资和消费结构问题

投资持续高涨和消费低迷是影响中国工业结构调整的主要因素。20世纪90年代中后期，由于加大了投资力度，我国工业生产总量处于供求基本平衡，一般工业生产能力一度呈现相对过剩的状态；2016年之后又有很多行业出现技术工人不足等劳动力缺乏现象；从资金来源看，20世纪末外商投资活跃，21世纪初民营投资增速较快，2018年之后在国内外经济面临的“三重压力”之下，国有投资比例再次提高。

从居民消费结构看，21世纪初的十几年，随着城镇化率超过60%，城乡居民消费需求以满足吃穿用为主转向了住房和汽车消费，带动了钢铁、建材、电子、机械、化工等工业产品的发展。最近，虽然基础设施建设投资持续高速增长，但房地产开发投资放缓，过剩产能收缩需要较长的周期，导致工业产出增长持续放缓；互联网经济的兴起推动智能交通、新材料、生物医药、半导体等行业成为工业系统新的增长点。

3）产业组织结构问题

在企业兼并重组的推动下，我国重点行业集中度不断提高，产业组织结构逐步优化。大多数行业依托市场机制，形成数家大企业或大企业集团，多数行业初步形成一批大、中、小企业各就其位的企业群体。2014年以来，我国排名前10的汽车生产企业全年累计销量占全行业的比例达到85%以上(2019年超过90%)，造船完工量排名前20的企业的产业集中度为71.6%，电解铝产量排名前10的企业的产业集中度达到77%。企业所有制结构朝着多元化方向发展，股份制成为现代工业企业发展的重要组织形式。21世纪初还呈现过一批企业“出海”、跨境并购欧美制造业标的企业的国际化趋势。除油气、电信、电网等少数基础设施行业外，更多行业开放竞争，资本结构多元化。

4）资源利用效率结构问题

工业是资源和能源的消耗大户，资源利用效率的高低直接决定了工业经济效益的好坏和环境保护工作的好坏，也决定了工业能否可持续发展。多年来，我国坚持可持续发展的总体战略方向，尤其是21世纪以来在多个环境保护攻坚战的作用下，对蓝天、土壤、水体的保护都取得了阶段性进展。太阳能、核能、风能等新能源的持续发展和大规模投入，使我国的能源结构也得到持续优化，煤炭、火电的比例持续下降。2021年，规模以上工业单位增加值能耗同比下降5.6%。资源利用效率的结构正在不断优化，但是产业层面的供需关系、价格机制等很多方面仍然存在深化调整的空间。

1.1.3　工业与其他产业的关系

工业不是一个独立的产业部门，而是与其他产业相互联系的。我们学习工业系统，不能仅仅考察工业系统的内部结构，还要了解工业系统的外部环境，了解工业关联产业。

1. 工业基础设施与城市基础设施

工业活动与城市有着密不可分的关系，且在很大程度上形成了对城市的依赖。工业基础设施与城市基础设施关系十分密切，实际上，后者已经完全涵盖了前者。城市基础设施通常包括交通运输、供水与排水、能源、通信、环境卫生、防灾六大系统在内的城市技术性基础设施，而工业基础设施是直接为工业生产进行配套服务的相关设施。与其他产业部门相比，工业基础设施具有自然垄断性、规模经济性、网络性、公共性等特征。完善的工业基础设施是吸引民间资本、外资企业进行投资的重要指标。我们研究和考察工业系统时，决不能忽视

相关基础设施的具体情况。在宏观视角下，一个国家的工业化程度与城市化程度的相互协调性也是较为重要的。

2. 工业与农业

作为国民经济的两大物质生产部门，工业与农业具有不同的经济特征和功能。在人类社会经济发展的历程中，农业曾经长期扮演着主角，在技术革命的推动下，世界范围内产业结构不断演进，工业的支配性地位早已稳固，现代农业在某种程度上也带有工业化的部分特征。发展经济学家将农业对工业发展的作用概括为产品贡献、市场贡献、要素贡献和外汇贡献4个方面。工业与农业的关系具有相对独立性、关联性和竞争性等特征。目前我们特别关注工业和农业的关系，是因为我国现阶段面临比较突出的农业发展、农民增收和农村稳定问题。解决“三农”问题，需要我国在迈向新型工业化道路的过程中，通过制度创新，实现工业和农业的协调发展。

3. 工业与服务业

按照传统思维，工业属于第二产业，生产实物并创造价值，而服务业属于第三产业，不生产实物，仅参与价值的转移和交换。然而，这种认识正在改变。互联网思维助推传统工业企业进行流程改造和营销创新，工业与服务业的融合日趋明显。许多著名制造业公司调整战略，将竞争重点从产品制造转向客户服务，以提高制造业的获利能力。例如，通用电气实行由制造型企业转变为服务型企业的战略调整后，以制造业为基石，将业务范围拓展到金融、医疗、企业和家庭解决方案等众多生产性服务业领域。工业向服务业的转移并不意味着工业的削弱，而是表明价值创造过程发生了根本性变化，即与工业相关的服务在价值创造中的比重越来越大。

1.2 系统与系统观简介

系统科学，是以统计、演化和系统的观点，综合考察系统、要素和环境之间的相互关联及系统结构、功能和涨落（不平衡状态）之间的互动关系，将要素、层次、系统与环境统一于一个动态、开放又相互联系的整体之中，观察其非线性的演化特征。系统科学的思想主要取自生命系统、工程系统、经济系统等多个方面与层次的研究成果，反过来又被运用到各个学科的研究之中。

系统科学的兴起始于20世纪30—50年代，系统论、控制论、信息论先后被提出：贝塔朗菲引领了一般系统论，为多种具体学科的定量研究推波助澜；维纳发展了控制论，用基于反馈系统的研究让人们获得了设计稳定系统和分析复杂系统的能力；香农提出了信息论，引发了信息时代革命，通信、网络、智能化随之而来。系统论揭示了系统的一般规律，控制论让人们认识到系统是如何演变的，信息论则给出了控制的实现方法（即传递信息）。

本书中，我们从系统论、系统科学、系统观在工业分析、工业系统认知方面的应用归纳了5种重要的观念方法：结构功能观、层次转化观、差异协同观、自组织涌现观、整体优化观。

结构功能观、层次转化观、差异协同观是我们认识系统的切入点。首先，系统都具有一定的结构和功能，结构决定了功能，功能反作用于结构。系统要想生存发展，就必须不断地调整结构，以使其功能适应环境，只有合理的结构才能够保障系统的良性发展。其次，随着系统由低级层次向高级层次发展，在空间上系统内部会形成不同层次的子系统，在时间上则

会形成不同层次的系统形态。层次间的转化既有跨越式的发展，又有螺旋式的上升，这也是人类认知发展的规律。我们只有了解系统的各部分结构和各级层次，才能把握整个系统。最后，系统的各部分结构和各级层次在时空上的展开产生了差异，这种差异便是系统发展的内生动力。差异是通过协同作用转化为推动系统发展的动力的，而协同又是以差异为前提存在的。我们只有理解了差异协同观，才能对事物的发展历程产生原理性认识。自组织涌现观揭示了系统演化的动态原理。在不受外界干预的情况下，系统会自组织地发展、变化，并涌现出新质，从而产生自我优化的结果。然而，无论外界如何干预，系统总是按照本征属性进行自我运动，或进化，或消亡。整体优化观为我们优化系统指明了方向。我们在优化系统时，应当从全局出发，充分考虑整体效应。在整体优化的过程中，必然包含着某些方面的劣化，合理的扬弃是系统优化的必经之路。

1.3　工业系统的发展历程

现代工业的产生和发展经历了长达数百年的发展，通过大量的工程经验积累和总结，不断探索，不断将技术与经济需求、市场实际、劳动操作相结合，尤其是现代科学融入工程知识的理论化，兴起了大量工程科学、应用科学学科，大幅促进了工程知识的系统建设与传承。为适应社会需求及商贸市场的发展，工业系统便应运而生。

1.3.1　工业史发展脉络

工业革命在19世纪最早由恩格斯提出，经过历史学家汤因比在著作中的使用，便被社会各界广泛应用于描述从18世纪中期到19世纪欧洲经历的产业和技术变迁。这场革命改变了欧洲资本主义经济的技术基础，实现了从手工业到机器工业的转变，其标志是蒸汽机作为动力机被广泛使用。这一次技术革命和与之相关的社会关系的变革，被称为第一次工业革命或者产业革命。18世纪60年代，珍妮纺纱机的发明和应用是工业革命开始的标志。瓦特先后三次改良的蒸汽机将人类带入了“蒸汽时代”。

19世纪后半叶到20世纪初，随着资本主义自由竞争向垄断的过渡，工业化从以轻工业为主导转向以重工业为主导，新的能源动力成为亟须满足的社会需求，并成为电力技术革命兴起的基本动力。在这场被称为“第二次动力革命”的技术革命中，美德两国替代老牌工业国英法等国，成为电力革命的中心。当时，科学技术的突出发展主要表现在4个方面，即电力的广泛应用、内燃机和新交通工具的创制、新通信手段的发明和化学工业的建立。其中，欧洲（包括英国、德国、法国、荷兰、比利时、丹麦）和美国及1870年后的日本工业得到飞速发展。第二次工业革命以电力的大规模应用为代表，以电灯的发明为标志。

关于第三次工业革命、第四次工业革命的定义，无论是学术界还是产业界都有着多种意见，且随着新技术方向和领域的拓展而不断变化。自2014年德国汉诺威工业博览会对第四次工业革命进行讨论以来，加上德国自2006年开始研究的“工业4.0”战略，当前影响较大的时代分段一般是将计算机和互联网的应用作为第三次工业革命的特征，而把第四次工业革命的特征定义为绿色工业和智能化制造。这一分类方式由于德、美、法、英、中等国家都提出了工业战略升级计划而在当前成为主流的界定方式。

仅从产业本身而言，除振兴制造业的政治经济战略意义外，可以认为以计算机和互联网

技术为中心的第三次工业革命时代仍未过去。从更全面的经济产业视角来看，工业革命的时代划分都只处于一个技术维度之内，很难全面描述经济体的发展规律，毕竟人口和资本的要素至少是同等重要的。本书希望读者能够重视技术问题本身引发的产业现象和产业内部逻辑，而不是停留在“技术要素改变—产出经济成果”这样简单的线性逻辑上来认识技术产业问题。

1.3.2 现代工业系统特征

“工业革命”带来了生产模式的变化，单一产品大规模生产转变为多样化产品的差异化生产，既满足个性化需要，又获得大规模生产的成本优势。时至今日，人类工业生产模式经历了一系列演变过程。了解这一发展逻辑，有助于我们加深对工业系统的认识。

人类社会早期，手工制造、单件生产，涉及用木材、黏土及金属等材料制造产品，主要依靠手工劳动，使用简单工具，对手工艺人的技能要求高，生产效率较低。生产的产品包括饰品、炊具、餐具、武器，这些产品的需求量小，即使生产完全相同的产品，人们也只能逐个制作。

随着社会需求的增加，标准化工艺出现并逐步扩展，其中，可互换零件的设计生产至关重要。砖块是最常见的可互换零件，砖块生产者可以从标准化中受益，中国的木构建筑形成了模数制，有了这些标准，建筑工人们也能够更高效地建造房屋。欧洲造船业从 1500 年开始保持了近一个世纪的领先地位，可互换零件生产是关键因素。第一次工业革命促进了金属切削等生产技术的改进，标准设计和标准模型在服装等新兴消费行业也迅速发展，标准化生产达到更加成熟的阶段。19 世纪，欧洲化学工业的兴起，还强化了“流”的概念和生产工艺思想。

大批量标准化生产首先出现在 20 世纪初的汽车制造领域，结合标准化设计和生产工艺流程，采用了高效的“流水线”生产方式，这是工业系统模式的一次重要改进。福特公司建造了世界上第一个大规模汽车生产工厂，依靠流水生产线生产汽车，大幅提高了生产效率，降低了产品价格。然而，大批量标准化生产以牺牲产品的多样性为代价，生产线的初始投入大，建设周期长，难以适应变化越来越快的市场需求。日益突出的资源和环境问题也对大批量标准化生产提出了挑战。

始于 1980 年的大规模定制结合了定制生产和大批量生产这两种生产方式的优势，在满足顾客个性化需求的同时，能够实现较低的生产成本和较短的交货期。大规模定制流程首先应用于汽车制造，丰田公司是其典型代表。据估算，丰田公司每年生产的 860 万辆汽车中包含上万种细分车型，每一个基础车型通过变化关键部件（如发动机和驱动系统）、音响设备功能特性甚至最基本的外观颜色，便能衍生出无数种细分车型。丰田公司的产品多样化战略也被其他制造企业采用。计算机制造企业戴尔公司通过按订单装配的大规模定制生产模式，利用现代化网络技术将批量生产的低成本优势与个性化定制生产的高附加值优势结合起来，生产出物美价廉的产品，大幅提高了顾客的满意度。21 世纪初以来，这一生产方式结合广泛应用的互联网和计算机技术，实现了更精细的设计多元化和制造多元化，指明了“智能制造”的方向。

现代工业系统以技术为外部特征，以管理方式为核心。现代工业系统的内部特征集中表现在创新性、集聚性、开放性等几个方面。这是市场运行和地理分布的结合，是经济分工

要求的结果，而在其背后推动的工业系统产业逻辑也正是我们希望在本书中探讨的。

创新性是现代工业体系的动力特征，创新是发展现代工业体系的第一推动力。现代工业体系的创新不是在一个孤立封闭的系统中完成的，创新一方面同具体的产业状态息息相关，另一方面又要受到相关的支持系统发展情况的制约。以客户为中心的产品制造体系利用工业互联网、电子商务平台等媒介和技术，形成对客户需求的快速接收和响应，将消费者和生产者之间的“距离”缩短。

集聚性是现代工业系统的空间特征。现代工业体系的形成过程就是工业空间结构的不断调整、工业集聚化，最终形成工业集群的过程。从世界市场的竞争来看，那些具有国际竞争力的产品，其产业内的企业往往是群居在一起的，而不是分散的。工业集群具有节约运输成本、便捷信息沟通等优势。同时，由于同一产业的集中，有利于引入资本投资，一些园区开发建设主体本身也同时投资于入园企业，形成基础设施配套与产业运营深度组合的产业资本。

开放性是现代工业系统的效能特征，也是经济全球化和区域经济一体化的内在要求。目前各国之间形成了相互依赖的整体，产业内分工使区域间的产业体系联结的紧密度大幅提高。

1.3.3　工业系统的未来

无论工业革命、工业系统、工业产业现在走到第几代，这些分类都是主观性的历史看法，更有实践意义的是对工业未来发展的研究和指导。基于中国当前的经济社会技术现状和世界外部环境，各方各界都提出了未来的规划和意见，并且随着情况的变化也在不断调整和更新。

未来，工业仍然是经济系统的一个重要组成部分，为满足社会需求不断组织生产、创造价值。而工业系统为了适应工业的功能要求，在战略方向上不断适应，在技术方面不断积累和改进。世界各国在工业系统的问题上面临着相似的局面，都在寻求更精细、可持续的发展模式，仅以我国近年来的探索方向为例，略述如下。

1. 未来工业的可持续发展

现代工业体系通过科学技术改造传统产业，调整和优化产业结构，体现了循环经济的概念。高质量、高效益和低消耗、低污染是现代工业体系可持续发展的必然要求。工业发展必须强调与生态环境的协调，在加快发展现代工业的同时，力争做到产品全生命周期少污染和无污染、资源消耗低及可回收和循环利用，用最小的资源和环境代价来保持经济的快速发展。

循环经济也称为资源闭环利用型经济，在保持生产扩大和经济增长的同时，通过建立“资源—生产—产品—消费—废弃物再资源化”的物质清洁闭环流动模式，提高人民的生活水平，同时避免对地球掠夺式开发所导致的自然生态破坏。循环经济把清洁生产、资源综合利用、可再生能源开发、产品的生态设计和生态消费等融为一体，通过对生态学的研究推动人类社会的平衡发展。

生态工业是依据生态经济学原理，以节约资源、清洁生产和废弃物多层次循环利用等为特征，以现代科学技术为依托，运用生态规律、经济规律和系统工程的方法经营和管理的一种综合工业发展模式。

发展循环经济与生态工业是走新型工业化道路的有效途径，可持续发展的经济政策是

新型工业化道路的制度保障。实施新型工业化是一个长期的系统工程，只有在资源利用、环境保护和工业税收、价格等方面制定一系列相关法律和政策，才能达到预期效果。

2. 信息化、数字化、智能化

信息技术对工业的渗透和嵌入，是20世纪下半叶以来工业的一个重要特征。随着自动化水平的提升，数字技术越来越多地被应用于自动控制以外的工业领域。随着技术的不断进步和信息化的不断发展，工业和信息化融合互动的程度将会更深、范围将会更广、层次将会更高。随着数字孪生、电子商务、工业互联网等新技术的出现和广泛应用，工业系统整体进入数字化阶段，并且满足更多消费用户的定制需求，行为计算、机器学习等基于大数据、云存储等基础设施的技术向工业系统提出了智能化的要求。从生产流程工艺的自动控制，到车载系统的辅助驾驶、自动驾驶，再到工程设备的远程操作、高温等危险环境的无人机械控制，以及城市管理中的交通优化等，都是工业系统智能化应用的成果。

3. 工业产业结构优化升级

工业产业结构优化升级是优化工业系统的主要途径。2010年3月，时任工业和信息化部部长李毅中在《求是》杂志上发表署名文章，提出了有关产业结构升级的指导性内容：

工业结构调整和转型升级的主要目标是：从主要依靠规模扩张、过度消耗能源资源的粗放发展向注重效率、注重发展质量和效益的可持续发展方向转变，促进我国工业良性循环，加快走中国特色新型工业化道路的步伐。

促进工业平稳较快发展，为推进结构调整和转型升级打好基础。当前，要坚持把改善供给结构、促进扩大内需作为保持工业平稳较快发展的根本途径，着眼于完善促进消费各项政策，增强消费需求对工业增长的带动作用。抓住3G发展、三网融合等新机遇，开拓新型消费领域。促进出口产品结构调整，稳定劳动密集型产品出口，扩大传统优势产品和自主品牌产品出口，实现内外需均衡发展。

抓住当前战略性机遇，加快工业结构调整。一是调整工业产业结构。根据工业化进程和消费结构升级要求，调整轻重工业结构，推动协调发展；推动制造业与服务业结合，推动劳动密集型与资金密集型、技术密集型产业协调发展。二是改善产业组织结构。按照市场竞争、规模经济、专业分工、产业配套的原则，提高产业集中度，形成以产业链为纽带，以骨干企业为龙头，大中小企业协作配套、产业链上下游企业共同发展的产业组织结构。三是优化技术和产品结构。开发生产各具优势和特色的产品，引导消费、扩大消费。四是优化工业区域布局。坚持工业区域功能化、差异化发展，形成与地区资源、能源及环境容量相适应、主导产业特色优势突出的区域协调新发展格局。建立产业区域协调互动机制，引导沿海地区与内陆产业有序转移。

我国拥有世界上最完整的产业体系，制造业规模占全球的比例约为30%，连续13年位居世界首位。中央经济工作会议在部署2023年工作时强调，“加快建设现代化产业体系，建设现代化产业体系，关键是振兴制造业。”2022年以来，我国重大装备、重要基础零部件、新材料等关键领域产业链攻关再上新台阶。更多服务平台牵手中小企业，在加快智能转型中增添发展动力。数据显示，截至2022年，我国已培育出1700余家引领行业发展的数字化车间或智能工厂，及5500余家区域领军企业。中央经济工作会议提出，围绕制造业重点产业链，找准关键核心技术和零部件薄弱环节，集中优质资源合力攻关，保证产业体系自主可控和安全可靠，确保国民经济循环畅通。未来中国工业的发展在供应链稳健安全的基础上，还

要关注高端化制造、智能化升级、绿色价值的构建等元素。

4. 培育战略性新兴产业

战略性新兴产业是2009年我国政府提出的一项科技发展战略，也是我国工业系统的发展方向。

大力发展战略性新兴产业，是调整经济结构的迫切需要，是转变发展方式的重要抓手，是推进新型工业化的战略举措。发展战略性新兴产业已成为世界主要国家抢占新一轮经济和科技发展制高点的重大战略。我国要在未来的国际竞争中占据有利地位，就必须加快培育战略性新兴产业，掌握关键核心技术与主导设计话语权，增强战略性新兴产业的核心竞争力。

2010年9月8日，国务院常务会议原则通过《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，会议指出：

战略性新兴产业是以重大技术突破和重大发展需求为基础，对经济社会全局和长远发展具有重大引领带动作用，知识技术密集、物质资源消耗少、成长潜力大、综合效益好的产业。根据战略性新兴产业的特征，立足我国国情和科技、产业基础，现阶段重点培育和发展节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等产业。

5.“专精特新”与中小企业的阶梯发展体系

一个国家的工业系统，并不是只有大型企业，技术的进步本身就需要广泛的、适当的竞争环境才能形成自组织的涌现，才能有所创新。我国近年来在促进产业领军者做大做强的同时，开始着力关注中小企业，力图形成一个阶梯发展的良性工业企业生态，不断提供创新和可持续的发展动力。

所谓“专精特新”，即专业化、精细化、特色化、新颖化，以专注铸专长、以配套强产业、以创新赢市场。据《光明日报》报道，作为一家“专精特新‘小巨人’”企业，武大吉奥信息技术有限公司攻克了时空大数据高效处理和智能服务关键技术，支撑了探月工程三期、全球测图等重大工程项目；甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司研发的循环换热分离器攻克了抗堵塞高效传热与分离等多项世界性技术难题。

中小企业是国民经济和社会发展的生力军，是扩大就业、改善民生、促进创新创业的重要力量。未来，中小企业，尤其是“专精特新”企业的高质量发展成为我国工业系统的重点，逐渐形成企业梯度培育的体系，不断提升企业创新能力和专业化水平。

1.4 本书框架

本书对工业系统的框架认识主要基于三次产业分类法，这一方法蕴含人类社会从以农业为主的经济系统到以工业为主的经济系统的变迁过程，这同样是本书对历史变迁的看法。对图1-2做了更进一步细化的产业链系统示意图如图1-3所示。

本书第1章作为导论，从总体层面引用我国当前各方面的政策和指引，给出了一个工业系统的概念、历程和前瞻的参考框架，并介绍了全书的逻辑框架。

第2～4章以“资源”为题，第5～7章以“制造”为题，第8章以“建造”为题。

资源篇的3章，主要介绍工业系统面向自然资源的发现与转化。第2章分别介绍有色金属采矿业（以铜的开采为例）、煤炭工业、电力工业（火电、水电、电力系统），从矿产和能源

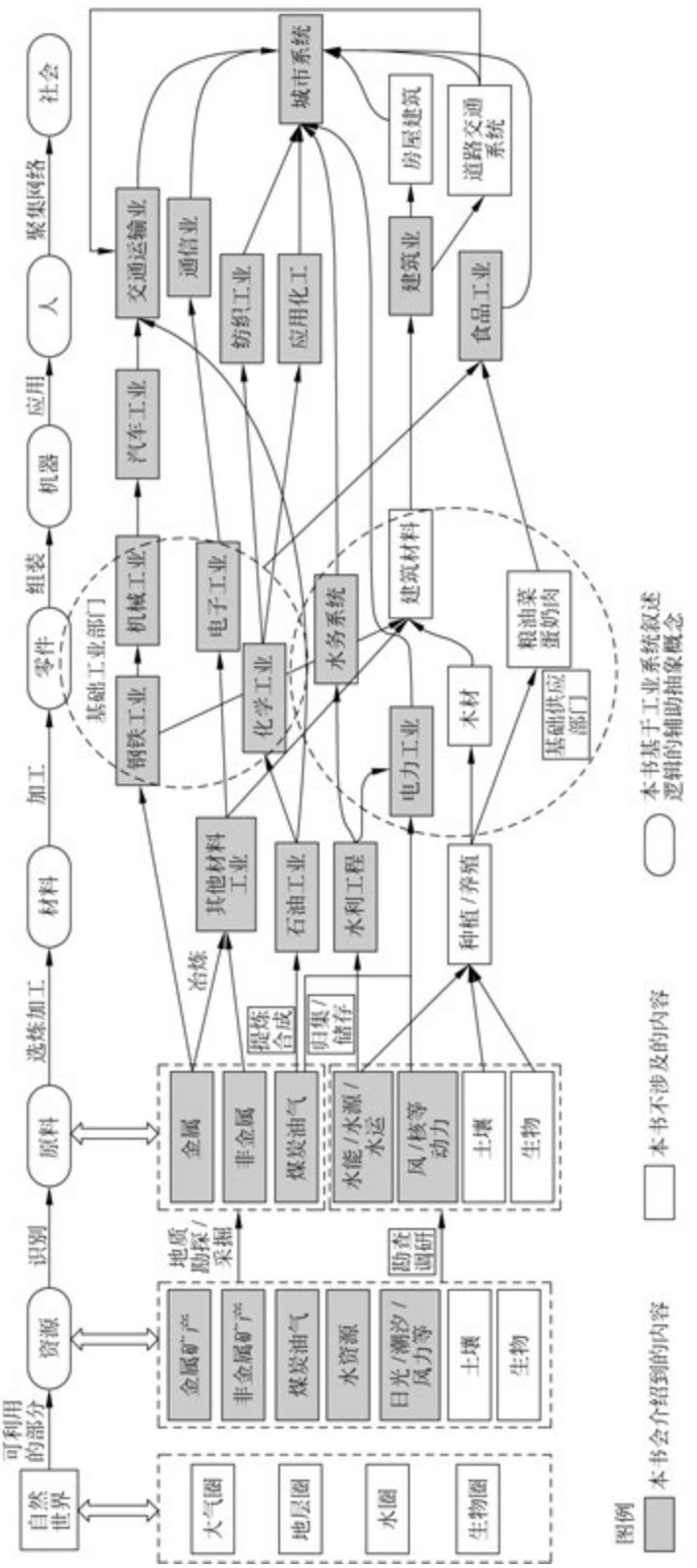


图 1-3　本书所涉主要产业部类和概念关系思维导图

的角度介绍可获取的基本自然资源类型及相应的工业系统。第 3 章以石油工业和过程工业为例，介绍了化学工业这一重要基础工业生产体系，包括从石油炼化出的各种有机合成物和高聚物原料，无机化工及合成工业。其中，介绍了以“流”为核心概念的过程工程原理。同时，介绍了环境保护、污染处理等重要工业问题，以及化学工业与社会的适应、协调。第 4 章以钢铁工业为例，从炼铁、炼钢、制成钢材等环节将冶金生产的过程做了典型介绍，还谈及钢铁生产中的结构问题。这 3 章将从基础的自然资源到现代工业系统的化工、钢铁两大基础材料体系的架构搭建起来。

制造篇的 3 章，主要介绍工业系统利用基础工业部门提供的钢铁、塑料、橡胶、有色金属等材料及各类能源进行产品的生产。现代工业以机器大生产为最主要特征，因此，用机器制造机器是最直观的表现。这背后的关键逻辑就是标准化和规模化，前者更偏向于技术问题，后者更偏向于管理/经济问题，但二者又高度相关。机械制造的过程，是把钢铁等材料用机器制造成一定规格的零件，再由零件组成部件，最后由部件组成系统或直接构成产品。有些产品则较为复杂，是机器制造出的机器，最典型的就是汽车，复杂而数量大，是现代工业最具代表性的产品，这些机器产品（汽车之外还包括船舶、航空航天器、武器、机械加工设备等）的生产行业就是所谓的“重工业”，在本书第 5、6 章介绍。其中，第 5 章的机械工业突出“标准化”的工业系统特征，相对重点在“材料到机器”；第 6 章的汽车工业突出“规模化”的工业系统特征，相对重点在“零件到机器”；第 7 章介绍电子信息、数字化等新兴行业、新兴制造领域，相对重点在“从机器到人”。这 3 章的侧重点各有不同，但副标题并不是对这几类工业做了绝对的区分，每一个制造业的工业部类都包含着从材料到产品、从设计到实施的完整制造过程，上述 3 个方面的要素不可或缺。本书的写法一方面是找侧重点更突出的工业部门来介绍，另一方面也是通过不同的例子来介绍尽可能多的产业部类以展现制造业的面貌和更多的产业情况。

建造篇仅有一章，篇幅也是相对较短的，主要介绍建筑、水利等基本建设领域。其实，从本书逻辑来看，就对材料的利用以满足社会需求而言，也可以把第 8 章看作制造篇的一部分，只是生产的空间和方式是现场制造而不是工厂化制造（至少目前还不普遍），在这一点上与一般制造有所区别。同时，标准化程度相对不高的建造产品也给艺术创作留下了机会。

第 9 章作为一个短暂的尾声，把“工业文明”的概念提出来，和其他一些文化概念的抽象问题一起进行初步辨析思考，启发读者对更多的工业问题进行历史的反思和认知。

需要强调的是：

（1）本书提出的“资源”“制造/建造”等概念均是辅助理解工业系统的概念，并不是理论概念，因此每个章节对应的内容和概念的联系性并不是高度相关的。

（2）不同产业部类在逻辑上有着本身的技术经济逻辑，每个章节所涉及的产业不同，编排上也随着各自的内容组合，因此，在总体的阅读上还是建议参考图 1-3 来进行总体把握。

（3）本书的出发点不是构建当前社会的完整产业体系，也不是直接探讨历史上产业系统的演化，因此，本书所涉的产业体系不是完全的，而是将最具工业系统特点的产业作为重点进行介绍和举例列出，以便读者理解。

第2章

资源：从自然物到原料

在展开工业逻辑的第一个环节，我们要从对自然的认识开始。当然，从经济的角度，工业会把可利用的自然物视为可开发的资源。这个“资源”的概念可分为两个方向来理解：一是如何利用，在更新的生产技术、生产能力的推动下，“可利用”的范围在扩大，这既是需求的导向，也是能力的提升所致；二是对自然物的开发，这意味着所识别的自然物通常并不是能够直接应用的，而是需要通过一个初步筛选的加工过程。譬如铁矿石，是人们对铁元素需求带来的可利用的自然物。因为下游的行业需要钢铁产品来制造零件、机器，但铁矿石并非在勘探完成后就可直接用于机械生产，而是需要经过采掘的规划、开采、破碎、运输、初加工，才能成为原料，而这些铁矿石原料要经过化学方法、物理方法等方法进一步处理才能成为达到一定工业标准的钢铁材料。

资源，既是一个判别、识别的过程，更是一个操作、整合的过程，本书第2～4章就此展开，介绍从自然物到原料再到材料的工业系统过程。同时，展现各自产业环节的内容。

人类向自然环境索取资源由来已久，包括维持生命最基本的阳光、空气、水，以及动物、植物及木石等可直接利用的资源。随着利用能力的提高，资源的范围进一步扩大到需要加工劳动或利用工具设备才可转化的间接利用资源，如矿产冶炼、木材煤炭燃烧、水能利用。18—20世纪的工业时代，人类对资源的利用能力再次飞跃，出现了电力工业、大型化学工业、大型机械工业，能源的格局和物质制造的社会体系逐步重构。正是工业文明的经济产业逻辑不断演化和全面展开，才有了工业时代的整个局面。

能源，亦称能量资源或能源资源，是人类生存和发展生产、改善人民生活的基础。人类文明的一切都离不开能源。下面介绍能源的分类。

1. 按能源的形成和来源分类

（1）来自太阳辐射的能量，如太阳能、煤、石油、天然气、风能、生物能等。

（2）来自地球内部的能量，如核能、地热能等。

（3）天体引力能，如潮汐能等。

2. 按能源的开发利用状况分类

（1）常规能源，如煤、石油、天然气、水能、生物能等。

（2）新能源，如核能、地热能、海洋能、太阳能、沼气能、风能等。

3. 按能源的属性分类

（1）可再生能源，如太阳能、地热能、水能、风能、生物能、海洋能等。

（2）非可再生能源，如煤、石油、天然气、核能、油页岩、沥青砂等。

4. 按能源的转换传递过程分类

（1）一次能源，即直接来自自然界的能源，如煤、石油、天然气、水能、风能、核能、海洋能、生物能等。

（2）二次能源，如沼气、汽油、柴油、焦炭、煤气、蒸汽、电能（火电、水电、核电、太阳能发电、潮汐发电、波浪发电）等。

2.1　矿产与采矿

对地层中特定元素及矿物的需求使得人类对矿产的开发利用能力不断演进，工业技术和这一时代的其他物理化学成果被大量引入采矿业。矿产的种类多样，主要包括金、银、铜、铁、铝等金属矿产，煤炭、油、气等能源矿产，石英、石膏、石灰石等非金属地下水、矿泉水、二氧化碳气等水气四大类型。有了矿产作为最上游资源，以钢铁为基础的机械工业体系、以石油为基础的化学工业体系才能建立，有了这两大支柱才能建立整个工业文明的产业大厦。其中，石油作为一种重要的能源资源，具有特殊的特性，亦可作为化学工业的主要原材料，故本书在第 3 章对其详述。

2.1.1　地质勘探和开发

1. 地质勘探的作用和意义

地质勘探是根据经济建设、国防建设和科学技术发展的需要，对一定地区内的岩石、地层构造、矿产、地下水、地貌等地质情况进行不同程度的调查研究工作。按不同的目的，可以分为不同的地质勘探工作，例如：以寻找和评价矿产为主要目的的矿产地质勘探；以寻找和开发地下水为主要目的的水文地质勘探；以查明铁路、桥梁、水库、坝址等工程地区地质条件为目的的工程地质勘探。地质勘探还包括各种比例尺的区域地质调查、海洋地质调查、地热调查与地热田勘探、地震地质调查和环境地质调查等。地质勘探以地质观察研究为基础，根据任务要求，选用必要的技术手段或方法，如测绘、地球物理勘探、地球化学探矿、钻探、坑探、采样测试、地质遥感等。这些方法或手段的使用或施工过程也属于地质勘探的范围。

地质勘探是对矿产普查中发现的有工业意义的矿床查明矿产的质和量，以及开采利用的技术条件，提供矿山建设设计所需要的矿产储量和地质资料，是矿产开采生产的前提和基础。新中国成立以来，我国地质勘探工作取得了巨大成就，在经济建设和社会发展中发挥了先行作用和重要的基础支撑作用。特别是改革开放以来，地质勘探工作得到了较快发展。

（1）基础地质调查与研究程度全面提高，为经济社会发展提供了重要的基础数据。目前，我国实现了陆域中比例尺区域地质调查全覆盖。获取了海量的区域地球物理和地球化学数据，为矿产开发、农业、交通、水利、电力和城镇化建设等提供了有力的基础支撑。

（2）矿产勘探获得了丰富的资源储量，为国家经济建设提供了矿产资源保障。根据《中国矿产资源报告（2024）》显示，截至 2023 年年底，全国已发现 173 种矿产，其中，能源矿产

13种，金属矿产59种、非金属矿产59种、水气矿产6种。矿产地20多万处，已查明的矿产资源总量和20多种矿产的探明储量居世界前列。2025年我国10种有色金属产量达8175万t，全球占比超50%。相继发现和勘探了一批大型油气田、煤田、金属和非金属矿产基地，为经济建设提供了矿产资源保障。地下水勘探为生产生活提供了丰富的水资源。大洋海底多金属结核和我国管辖海域天然气水合物勘探取得了重要进展。

（3）地质灾害调查、监测与预警工作，为预防和减轻地质灾害奠定了重要基础。我国相继开展了国家级和省级地质灾害预报预警工作，初步建立了重点地区地质灾害专业监测和群测群防的监测预警体系。其中，三峡库区地质灾害专业监测网已建成运行。

2. 地质勘探工作面临的挑战

在工业化、城镇化、全球化的背景下，我国正处于并将长期处于资源持续高消耗阶段。经济的快速发展，使能源和矿产资源的需求高速增长。2016—2023年，我国主要有色金属的消费量逐年增加，化石能源消费峰值可能出现在2030—2035年。我国是一个有14亿多人口的大国，在实现工业化过程中对能源和其他重要矿产资源的巨大需求是刚性的。随着资源对外依赖种类的增多、对外依赖程度的增加，我国利用境外资源的风险急剧加大。我国对能源和矿产资源的需求将持续处于高位，地质勘探工作的主要任务是寻找矿产，同时要充分重视和解决日益严重的生态环境问题。

我国能源及非能源重要矿产资源供需形势严峻。矿产勘探工作滞后，相当一批资源的可供性下降，可供开发的后备基地严重不足。石油对外依存度较高，石油、天然气供不应求的矛盾将长期存在。特别是铁、锰、铜、钾盐等大宗矿产供需缺口近年将持续扩大，后备储量严重不足，对外依存度高；曾经为经济建设作出重大贡献的一大批老矿山资源形势严峻，可采储量和矿石品位急剧下降。矿产资源供需矛盾突出，但我国的石油、天然气、煤炭、煤层气、铀、铁、铜、铝、锰、铅、锌、镍、钨、锡、金等重要矿产都有较大的资源潜力，特别是西部新区和中、东部隐伏矿床的勘探潜力巨大，迫切需要加强资源勘探。

我国拥有约473万平方千米海域，至今尚未开展系统的海洋区域地质调查，海洋油气勘探尚处于初期阶段。我国海域具有较大的油气资源潜力和较为丰富的天然气水合物等资源潜力，需要全面系统地开展海洋地质调查、重点海区的油气资源调查。这既是开发和利用我国海洋资源的必然要求，也是维护我国海洋权益的需要。

3. 地质勘探信息系统

地质资料是地质勘探工作服务社会的主要载体，是国家投入巨额勘探资金获得的特有信息资源。地质资料是指在地质工作中形成的文字、图表、影像、电磁介质等形式的原始地质资料、地质成果资料和岩矿心、各类标本、光薄片、样品等实物材料。地质资料既可以提供与国民经济发展密切相关的、经过分析和预测的矿产资源供求信息，也可以根据国民经济发展趋势，依据现有的地质资料，加强矿产资源形势分析和战略研究，作为国家进行经济发展、宏观决策的重要参考信息。当前，在WTO体系下，利用国际、国内“两种资源、两个市场”，地质资料社会化服务在保障我国矿业经济发展，促进探矿权、采矿权市场对外开放，引进国外先进技术和资金方面起到了重大作用。同时，以地质资料为基础的地质信息系统可以广泛服务于基础设施建设、地球科学研究、国家重点工程建设、农业经济、国防建设、生态环境保护等国民经济的方方面面。

地质资料是公共信息的组成部分，主要源于公益性地质工作，其中国土资源大调查是最

重要、形成地质资料最多的一项地质工作。1999 年，我国设立专项资金实施了新一轮国土资源大调查，历时 12 年，由国土资源部具体组织实施，取得了一批重要成果。国土资源调查初步建立了土地利用动态监测体系和地价动态监测体系，进行了 1∶200000 图幅的绘制，完成了主要城市的地质调查项目。

2006 年，国务院发布的《国务院关于加强地质工作的决定》明确提出了建立健全地质资料信息共享和社会化服务体系，加快利用现代信息技术，建设国家地质资料数据中心和全球矿产资源勘查开采投资环境信息服务系统的要求，推动了地质资料相关工作的开展。

目前，我国致力于建立实用、高效的地质资料采集、加工、处理、存储机制，完善国家地质资料数据资源的建设管理，实现全国地质资料数据的统一、协调和规范，搭建现代化的存储、管理软件和硬件支撑环境。我国正在加快图文地质资料的数字化，加强 1∶50000 区域地质调查成果的数字化和数字地质图空间数据库建设，建立国家 1∶250000 地质图数据库。同时，开展重要钻孔资料数据库建设。建立矿产资源勘查开采投资环境信息数据库，为企业提供地质信息服务。

通过对地质资料进行深度开发，盘活各类地质资料，能够大幅提高地质资料的社会化利用水平和利用效益，为社会经济发展提供广泛的服务。我国着重开展了重点成矿区带、油气盆地和含煤盆地、重点经济区、生态环境脆弱区、重大工程建设区和重大地质问题区等的基础地质、矿产地质、环境地质等各类地质资料的深度开发利用，总结地质规律，为区域经济发展、资源勘查开发、工程建设选址和生态环境保护建设等提供科学依据。

2.1.2　地质开发的区域布局

根据国家区域发展战略和社会经济发展水平，在我国地质特点与资源禀赋条件的基础上进行地质开发的区域布局统筹工作。矿产资源作为国土资源的重要组成部分，通过合理区域布局，促进矿产资源深度开发和集约利用，实现矿产资源在国内和区域内的有效配置，从而可以有效地减弱矿产资源短缺对经济社会发展的制约。

能源矿产中的煤炭在地域分布上呈现西多东少、北多南少的格局，以大兴安岭—太行山—雪峰山为界，以西地区查明资源储量约占全国储量的 87%，以昆仑山—秦岭—大别山为界，以北地区查明资源储量约占全国储量的 91%。石油、天然气的富集受沉积岩和沉积盆地的控制，根据我国大地构造位置的特征，主要的含油气区分为北部、中部、南方、西南和海域 5 个部分。金属矿产中铁矿和铜矿主要分布于华北地台北缘铁矿带、长江中下游铁矿带、川西滇东铁矿带、华南沉积型铁矿区、东疆甘西北铁矿带、金川—白银铜矿区、西藏昌都铜矿区等。铝土矿主要分布于晋中—晋北区、豫西—晋南区、黔北—黔中区和桂西—滇东区。铅锌矿集中分布于南岭地区。非金属矿产资源中的钾盐 97%以上的资源储量分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊地区。磷矿主要分布在昆仑山—秦岭—大别山以南地区，其查明的可利用资源储量占全国储量的 82%。

1. 西部地区

对西部地区进行地质勘探开发是在贯彻国家新时代西部大开发战略的基础上，加强西部基础设施建设、推进生态环境保护、发展特色优势产业的要求。

1）晋陕蒙鄂尔多斯盆地能源开发区

晋陕蒙鄂尔多斯盆地能源开发区包括山西、陕西、内蒙古相邻的鄂尔多斯盆地区，是我

国煤炭、油气等能源资源最富集的地区，煤炭基础储量约占全国储量的61.4%，石油累计可采储量约占全国储量的12.5%，天然气累积可采储量约占全国储量的35.5%，居全国各盆地的第一位。此外，山西的煤层气资源具有广阔的前景，该区还是我国稀土资源最富集的地区，是我国目前能源重点开发区，对支持京津都市经济区及全国的发展具有重要的意义。能源开发中应重视煤炭资源的深加工及油气资源的开发与输送，注重优化产业结构与布局及加强环境污染治理。

2）川滇黔及“三江”能源资源开发区

川滇黔及“三江”能源资源开发区包括四川、云南、贵州、重庆四省、市相邻地区，青海南部，西藏东部，是我国西南地区重要的煤炭、油气、金属矿产资源及化工矿产富集区，煤炭基础储量约占全国储量的10%。四川盆地石油储量丰富，天然气剩余可采储量约占全国储量的30%。铁矿以四川最丰富，基础储量约占全国储量的15%。云南和西藏的铜矿基础储量占全国储量的17%。云南的铅锌矿、贵州的铝土矿储量均居全国首位，云南的硫铁矿基础储量占全国储量的30%，云南的磷矿基础储量占全国储量的48%。区内强大的资源优势是推动川渝人口-产业集聚区经济社会发展的重要动力。西南“三江”地区是我国有色金属原材料的重要后备基地，应重点加强对“三江”地区的矿产资源勘查，通过加快交通建设促进优势矿产资源的转化，注重加强治理矿业活动对环境的污染，预防地质灾害。

3）青甘蒙相邻资源开发区

青甘蒙相邻资源开发区包括甘肃西北部、内蒙古西部、青海大部等，矿产以金、铜、铅、锌、镍等为主，其中金矿基础储量丰富，铜矿基础储量约占全国储量的20%，铅矿约占20%，锌矿约占15%，而镍矿占全国储量的近90%。开发区内柴达木盆地的油气资源也相当丰富，钾盐基础储量占全国储量的90%。开发区内矿产资源的开发对地方经济发展具有重要作用，特别是钾盐资源的开发可以满足当前国内需求。要将该区建成我国钾盐等盐化工原料和有色金属基地就需要加强勘查与规划工作，并解决交通运输等问题。

4）新疆能源资源开发区

新疆能源资源开发区包括新疆区域内的准噶尔盆地、塔里木盆地、吐哈盆地，阿尔泰山山脉、天山山脉、阿尔金山脉和昆仑山脉等。新疆是我国重要的成矿远景地区和资源战略接替基地之一。三大盆地石油累计探明地质储量占全国储量的12%，剩余可采储量占全国储量的16%，天然气累计探明地质储量约占全国储量的19%。阿勒泰是我国重要的有色金属、稀有金属、贵金属资源区，主要矿产有金、铜、镍、铅、锌等。东西天山和西昆仑山也是我国重要的黑色金属、有色金属和贵金属远景区。新疆资源区为我国西气东输工程提供了重要的资源保障，对国家资源安全具有重要的战略意义，也是促进西北经济区乃至全国经济社会发展的重要矿产资源开发区。区工作重点是加强地质勘查与开发工作，注重引进人才和加强交通建设。

2. 东北地区

对东北地区进行地质勘查开发要根据国家振兴东北老工业基地的战略方针，服务于加快产业结构调整，支持资源枯竭型城市经济转型。

1）蒙黑东部兴安岭资源开发区

蒙黑东部兴安岭资源开发区包括内蒙古呼伦贝尔市、兴安盟，黑龙江北部大兴安岭与小兴安岭地区。大兴安岭西坡为铅锌-银成矿带，主峰为锡-铅锌-铜铁成矿带，大兴安岭东坡及

小兴安岭是以铜为主的多金属成矿带，两侧盆地中有可地浸砂岩型铀矿，因此本区成矿地质条件优越，找矿潜力巨大，可以作为我国有色金属矿产资源的战略接替及开发基地。从区域上看，该区连接华北、东北两大经济圈，对我国东部经济带具有最直接的辐射作用，区位优势和地域优势十分显著，同时因比邻俄罗斯、蒙古，战略位置极为重要，通过重点矿产资源的开发可以带动区域经济的发展，进而以此为基地，加强与周边国家的矿业合作，形成统一的矿业大市场。

2）松辽盆地能源开发区

松辽盆地能源开发区包括松嫩平原、辽河平原及三江平原等。区内松辽盆地及伊通地堑石油累计探明地质储量占全国储量的20.5%，剩余可采储量占全国储量的18.2%。天然气储量丰富。煤炭基础储量占全国储量的10%左右。在非常规能源中吉林油页岩探明资源储量占全国储量的55%，辽宁煤层气资源的开发利用已走在全国前列。此外，辽中南地区的铁矿资源丰富，其基础储量占全国储量的近30%，且钢铁工业发达。该区对于辽中南地区和东北三省人口-产业集聚区的发展具有重要的支撑作用，区内的重点工作是加强老油田与老矿山的外围与深部找矿，优化产业结构，加强能源资源的国际合作与环境污染治理。

3．中部地区

对中部地区进行地质勘探开发应依据国家促进中部地区崛起的战略要求，围绕推动工业化和城镇化建设、巩固和发展高效农业，开展基础地质和地质环境调查及重要矿产资源勘查。

1）鄂豫陕秦岭资源开发区

鄂豫陕秦岭资源开发区包括湖北、河南、陕西及相邻的秦岭山区等。区内河南的煤炭资源基础储量丰富，位于其境内的南襄盆地也是我国重要的油气资源富集区，其西南部是重要的金属、非金属矿产集中分布区，探明储量居全国前列的矿种有钼、钨、金、化工灰岩等。鄂西北除重要的金属矿产外，还有大型的变质磷矿。陕东南有色及贵金属资源丰富，特别是钼、汞、金的储量居我国前列，铅锌为优质矿产，铝土矿基础储量约占全国储量的30%。该区地处中原与关中人口-产业集聚区，交通相对便利，辐射地区广，重点矿产资源勘查与开发对促进产业结构调整、加强中西部联系具有重要的意义。

2）鄂赣皖长江中下游资源开发区

鄂赣皖长江中下游资源开发区包括湖北、江西、安徽境内的长江流域。本区是铁、铜、金等重要成矿带，有湖北大冶铁矿、铜绿山铜矿，安徽铜陵铜矿、铜官山铜矿，江西德兴铜矿等。区内铜矿基础储量占全国储量的45%；铁矿基础储量约占全国储量的10%，且大多为富矿；金矿基础储量占全国储量的8%。此外，江汉盆地也是重要的油气资源区。作为我国最重要的铜业基地，对促进长江中下游经济带的发展具有重要的支撑作用。该区今后的工作重点是加强有色金属的勘查与开发，提高矿产资源的利用率，减少矿业活动对环境的污染。

3）湘南赣南南岭资源开发区

湘南赣南南岭资源开发区包括湖南南部、江西南部及南岭地区，是我国南方有色金属、稀有金属、贵金属的重要资源地和产区，同时也是国内有色金属生产和加工的重要产业基地。据粗略统计，区内主要矿种占全国保有储量的比例为钨15%、锡35%、铅33%、锌28%、硫48%，有大型矿床50余处，其中世界级特大型矿床2处或3处。由于特有的矿产资源优势，矿业成为区内的产业支柱，已形成以湘南、赣南、桂西、粤北为代表的矿业集中区。

该区应注重提高资源利用水平和调整产业结构，加强矿业秩序的整顿，使区内钨、锡等矿产在国际市场上保持优势。

4. 东部地区

对东部地区进行地质勘探开发应按照国家鼓励东部地区率先发展的战略，围绕加强生态环境保护与增强可持续发展能力，满足服务于城市群和重要经济区建设的要求。

1）环渤海能源资源开发区

环渤海能源资源开发区包括北京、天津、河北及山东等环渤海地区。环渤海湾盆地石油、天然气资源丰富，在已有油气勘探开发的12个盆地中位居第1，煤炭和铁矿资源主要分布在冀东、冀中、鲁西和鲁中南，煤炭基础储量占全国储量的5.6%，铁矿基础储量占全国储量的24.7%。胶东是我国金矿最为富集的地区，其金矿基础储量占全国储量的20%。该区内能源和重要资源的开发利用对京津都市经济区的发展具有重要的支撑作用，未来的发展方向应侧重于海上油气资源的勘探，煤炭和铁矿资源的高效清洁利用，并注重钢铁产业的结构调整。

2）东海陆架盆地能源开发区

东海陆架盆地能源开发区包括东海陆架盆地。东海陆架盆地是我国海上重要的油气资源区，目前储量探明率很低。现已发现了平湖、春晓、天外天、残雪、断桥、宝云亭、武云亭和孔雀亭8个油气田，此外还发现了玉泉、龙井等若干个含油气构造。东海天然气的大规模开发利用促进了我国华东沿海各省（市）的能源结构调整，使城市空气净化，创造良好的生态环境，促进经济的可持续发展。区内的重点工作是坚持油气勘探和开发，维护我国的领海主权和海洋权益。

3）珠江三角洲及毗邻海域能源开发区

珠江三角洲及毗邻海域能源开发区包括珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地和北部湾盆地等，是我国海上最有远景的石油天然气开发区。陆续勘探和开发的有惠州、陆丰、西江、流花、崖城、东方、乐东等油气田。区内油气资源的开发对保障华南经济区和珠江三角洲都市经济区的能源需求具有重要作用，应重点加强油气精细勘探工作，维护我国的领海主权和海洋权益。

4）闽西粤东武夷山资源开发区

闽西粤东武夷山资源开发区包括福建西部、广东东部的武夷山市，是我国东南沿海重要的矿产资源富集区，已发现110种矿产，探明储量的矿产有60多种，探明储量居全国前5位的矿种有21种，其中金属矿产主要有铁、锰、铜、铅、锌、钨、金等，该区同时也是我国铀矿的重要勘探与开发地区。矿产资源的开发可以加快该地区及其邻区的工业化进程，促进电力、交通、冶金及第三产业的发展，有利于推进矿业城镇的形成和规模集聚，提高城镇化水平，对缩小该区与沿海地区的经济差距具有特殊意义。区内的重点工作是加强地质勘查投资，改变矿产资源的利用方式，减少矿业开发造成的环境污染和地质灾害。

2.1.3 有色金属的开采

1. 有色金属的分类及用途

一般来说，材料可以分为非金属材料和金属材料两大类。非金属材料又分为有机非金属材料、无机非金属材料和复合材料三大类。其中有机非金属材料包括合成塑料、合成橡

胶、合成纤维；无机非金属材料包括陶瓷材料、玻璃材料、石墨及碳、木材、水泥、混凝土等；复合材料包括树脂基复合材料、金属基复合材料、非金属基复合材料。而金属材料可以分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属指的是铁、锰、铬及它们的合金。锰和铬主要用于制作合金钢，而钢铁表面常覆盖一层黑色的四氧化三铁，所以把铁、锰、铬及它们的合金叫作黑色金属。这样分类，主要是从钢铁在国民经济中占有极重要的地位这一角度出发的。有色金属指的是除黑色金属以外的其他金属。

有色金属也称非铁金属，包括除铁、锰、铬以外的所有金属。按其物理和化学性质及其在地壳中的分布情况可分为四大类：轻有色金属（相对密度小于 4.5），如铝、镁、钛、钠、钾。重有色金属（相对密度大于 4.5），如铜、镍、铅、锌、钴、锡、锑、汞、镉等。贵金属，如金、银及铂族金属（铂、钯、钌、铑、铱、锇）。稀有金属，按其物理和化学性质不同又可分为轻稀有金属，如锂、铍等；稀有高熔点金属，如钨、钼、钽、铌、锆、钒、铪、铼等；稀散金属（在地壳中很分散，大多数没有形成单独的矿物和矿床），如镓、铟、铊等；稀土金属，如钪、钇、镧及镧系元素；放射性金属，如镭及锕系元素（钍、镤、铀等）。

有色金属具有各种各样的性能，其中有些还具有独特的优良性能。有色金属与人类社会的进步和发展有着不解之缘，今天更是国防建设和国民经济各部门中不可缺少的材料。人类使用铜已有 8000 年的历史，到近代更显示出其重要性。纯净的铜是电力工业的支柱；铜合金在造船业和机床业中的应用十分广泛。虽然铝成为工业金属还不到 100 年，但其产量和消耗量已仅次于铁而居第 2 位，除在许多场合替代其他金属外，作为轻金属，铝还有很多独特的优点。镁的相对密度仅为 1.75，是最轻的重要工业金属。钛则集中了强度高、质量轻、抗蚀性好等优点。这些金属已成为航空航天及汽车工业的理想材料。稀有金属性能各异，用途不一，或为纯金属，或用作炼钢合金，或用作化工反应的催化剂，在钢铁、化工、石油、电子、原子能等工业中广泛应用。工业生产和科学研究设备正向着大型化、高参数的方向发展，更需要各种有色金属和稀有金属，以生产各种具有耐高温、耐高压、耐磨蚀、耐低温、轻质、高强度、高导电、高导热性等特殊性能的新型合金材料。因此，有色金属工业同样是具有战略意义的部门。

有色金属种类繁多，发现及应用早晚不一，发展速度各不相同。例如，古老的金属铜、铅、锌产量逐年稳步上升；铝、镁、钛等由于航空和宇航空间技术的需要而获得突飞猛进的发展，铝在 20 世纪 50 年代中期的产量已超过铜，跃居有色金属之首。稀有金属一般发现得较晚，现处于发展扩大应用阶段。

目前，全世界有色金属的总产量相当于钢产量的 5%左右。各国有色金属消耗量与钢铁生产量比例为：美国 6%～7%，日本 4%，德国 6%，俄罗斯 4%，中国 4%。这个比值是一个很复杂的工业各部门结构比例的表现，也是有计划地安排生产和市场供应的重要参考数值。各国的具体情况是不同的，同一国家在经济发展的不同阶段的情况也是不同的。要根据自身资源情况安排适合本国国情的产品结构和消费结构，如根据本国各种有色金属矿藏资源的多寡，确定自己的合金钢系列。我国的铬、镍稀缺，就要注意发展以我国资源比较丰富的锰、钼为主要合金元素的合金钢，进口一定量的铬、镍用于制造必需品，消费方面就要限制炊具、餐具等非必需品大量使用不锈钢。又如铝，在美国大量用于建筑业和航空工业，在我国目前则大量用于日用品的制造。随着我国生产的发展，这一情况是会发生改变的。

我国有色金属产量在“九五”期间（1996—2000 年）快速增长，10 种常用有色金属（包括

精炼铜、电解铝、铅、锌、镍、锡、锑、汞、镁、钛）总产量3199万t，年均增长率达9.3%，改变了长期短缺的状况；“十五”期间（2001—2005年）10种常用有色金属总产量达到6186万t，且连续4年位列世界第1，成为有色金属采掘生产量最多的国家。2010年，10种常用有色金属总产量3121万t，表观消费量约3430万t，“十一五”期间（2006—2010年）年均分别增长13.7%和15.5%。在产量持续高增长的同时，以电解铝为代表的有色金属行业出现了项目上马草率、整体产能过剩、高耗能、高污染等一系列问题。2015年，我国10种常用有色金属总产量达到5156万t，表观消费量约5560万t，“十二五”期间（2011—2015年）年均分别增长10.4%和10.0%。“十三五”期间（2016—2020年），我国10种常用有色金属总产量保持平稳增长的态势，年均增长3.6%。2020年，我国10种常用有色金属总产量首次突破6000万t大关，达到6168万t。2021年，我国10种常用有色金属的总产量为6454.3万t，实现了“十四五”良好开局，2022年继续保持平稳增长，10种常用有色金属总产量为6774.3万t。2023年，我国10种常用有色金属总产量为7469.8万t，首次突破7000万t大关。2024年，我国10种常用有色金属总产量为7919万t。2025年，我国10种常用有色金属总产量为8175万t，首次突破8000万t大关。目前，除铜受资源条件限制仍需进口外，铝供需基本平衡，铅、锌、镁自给有余，钨、锡、锑、钼、稀土等传统出口产品仍保持一定的出口规模，有色金属冶炼产品已由净进口转变为净出口。

2. 有色金属矿山开采及其特点

1）有色金属矿床矿石的品位大多较低

品位指的是矿石（矿体）所含有用成分的百分率，也有用g/t（贵金属）或g/m^3（矿砂）表示的。按品位高低，矿石可分为富矿、中品位矿和贫矿。矿石品位低于某一限度，在工业上已没有利用价值时，即称为最低工业品位，亦称临界品位。临界品位由矿床地质条件，国民经济需要，采矿、选矿、冶炼的生产技术和管理水平等因素所决定，故其数值会发生变化。我国几种有色金属矿目前的临界品位和一般工业品位见表2-1。

表2-1 我国开采有色金属矿的品位

矿　种	临界品位	工业品位
铜	0.3%	0.5%
锡	0.1%	0.2%
汞	0.04%	0.08%～0.10%
镍	0.2%	0.3%
钨	0.08%～0.10%	0.15%～0.20%
锌	0.5%～0.8%	1%～2%
钼	0.02%～0.03%	0.04%～0.06%
金	3g/t	5g/t

由表2-1可见，有色金属在矿石中的含量比铁低得多。因此，虽然钢的产量是有色金属产量的20倍，但从总的采掘矿量来看，有色金属矿却超过了铁矿。有色金属生产中选矿富集的工作量比钢铁生产大得多，对能源和运输的压力也很大。

应注意，表2-1是最近20多年的数据。以前的值都比临界品位要高，如美国开采铜矿的品位，1909年为1.60%～1.99%，1965年为0.7%，20世纪70年代后低于0.5%。究其原因，主要是：富矿枯竭了，而选矿冶炼技术发展了。生产不得不适应环境条件，人类也在

积极能动地创造条件，发展生产。这是人类社会发展的一个很基本的逻辑。

2）有色金属矿床通常是多金属共生矿

有色金属矿床多为共生矿，尤其是稀有金属，其矿石种类繁多，很少有单独的矿床；还有的要从各种废渣、废气、废水中回收，而这些金属冶炼产品的使用价值又往往与其纯净度关系极为密切。因此，这些金属的生产方法比钢铁的生产方法复杂得多，通常要将好几种冶炼方法配合使用。稀土金属的提取和分离还要采用溶剂萃取或离子交换法。

除了上述两个主要特点，有色金属矿山还有以下特点：有色金属矿床蕴藏的形态比其他矿床不规则，不易勘探；有色金属矿山生产中常会遇到有害和放射性物质；有色金属矿山大多地处偏僻的山区，交通不便，所需投资多，建设周期长。

3. 有色金属生产中水、电的消耗

低品位的矿石直接进行冶炼，技术上有困难，经济上不合算。为了满足冶炼要求，有色金属矿石都要进行富集，以获得精矿。这是水、电耗费很大的工序。选矿前要先经过破碎、磨细，然后再用不同的方法进行分离富集。例如选矿中使用较多的浮选法，是利用矿物表面的物理化学特性，加入选矿药剂，进行机械搅拌，使石头下沉，矿物附着在选矿药剂产生的气泡上，再将气泡刮下来达到富集矿物的目的。这样处理 1t 矿石要消耗 5t 左右的水。当然水可以循环使用，否则生产 1t 铜，仅选矿就要消耗上千吨水。选得的精矿再经过熔炼、精炼、提纯，直到加工成材，每一道工序都要消耗大量的煤、焦炭、燃油和电力。我国几种主要有色金属的生产吨材综合能耗（标准煤）分别约为铅 1.6t、铜 5t、铝 10t。2020 年，我国有色金属产量首次突破 6000 万 t，生产和消费均居世界第 1。2020 年，有色金属行业总能源消耗 2.5 亿 t 标准煤，其中，铜、铝、铅、锌重点有色金属品种的能耗和碳排放量均占有色金属行业的 90％以上。有色金属的精炼多采用电解法，这是名副其实的“电老虎”。几种主要有色金属生产的耗电量见表 2-2。这个耗电量很少有其他工业能与之相比，因此，在有色金属生产布局上，一定要注意水、电的供应。建成 1t 铝的生产能力，相应地必须有 2kW 的发电能力与之相配套，即要建一座年产 10 万 t 的铝厂，就要有一座 20 万 kW 的电站与之相适应。因此，有色金属冶炼厂多建于电力供应比较充足的地区。

表 2-2　有色金属生产的耗电量

产品	每吨产品耗电量/(kW·h)	产品	每吨产品耗电量/(kW·h)
铜	14000	钛	60000～70000
锌	3200	锡	13000
铝	18000～20000	锰	15000
镁	20000～30000		

4. 有色金属生产中的环境污染问题

一般来说，有色金属生产对环境的影响极大，如处理不当，会造成很大的危害。仅以矿山开采为例，无论是露天开采还是地下开采，都要剥离或挖掘大量废石。露天开采，每采 1t 铜矿石要剥离 5～10t 废石，加上选矿后的尾矿，生产 1t 铜，要排出 400t 左右的废石和尾矿。这不仅大规模地破坏了地表，还要占用大量土地来堆放废石。而且不但废石堆会发生自燃、爆炸和严重的滑坡事故，而且这些矿业固体废物长期受风雨侵蚀，其中分解出的有害物质渗入地下会造成地下水和附近河流的污染。据统计，矿业及相关行业排放的废渣累计已达

58亿t。全国采矿业破坏的土地面积为1.4万～2万km^2，并以每年200km^2的速度增加。其他酸性矿坑水和冶炼尾气都会使环境污染问题更加严重，有的甚至到了不能继续维持生产的地步。今后必须通过科技投入，开发推广矿产资源综合利用技术，降低矿产资源开发对环境的污染和破坏程度。

2.1.4 有色金属生产布局

以上提及的特点，都是有色金属生产本身特有的问题，要发展生产，就必须予以解决。这涉及从决策、布局到科研、生产、使用的各个环节，同样有比例结构问题。下面以铜的生产为例，对布局结构略加介绍。要理解布局的原则，必须具体了解其生产过程，这是布局的基础。

1. 铜矿的开采

铜矿石大致可分为三大类：天然铜矿、硫化铜矿及氧化铜矿。硫化铜矿中的主要矿物是黄铜矿。黄铜矿类型的硫化铜矿约占世界铜矿的2/3，是炼铜最重要的天然原料。铜矿石按品位可分为富矿（含铜量大于2%）、中等矿（含铜量1%～2%）、贫矿（含铜量小于1%）。目前含铜量低至0.3%～0.5%的铜矿床也有开采。铜矿的主要开采方法有露天开采和地下开采两种。铜矿石多数是矿物成分复杂、金属品位低、杂质含量高的贫矿，又往往是铜、铅、锌等金属的共生矿。经过选矿去掉铜矿石中大量无用的脉石，铜、铅、锌等金属矿物富集起来成为铜精矿、铅精矿和锌精矿后，才能作为冶炼的原料。

2. 铜的冶炼

铜的冶炼方法主要有火法和水法两种。目前以火法冶炼为主。此方法包括鼓风炉熔炼、反射炉熔炼及电炉熔炼，其中以反射炉熔炼为主。反射炉熔炼的生产流程是先对铜精矿进行氧化焙烧，除去一部分硫，以利于熔炼时铜的富集，然后采用火法炼铜，得到含有铜和贵金属的冰铜。冰铜是中间产品，在转炉内吹炼，除去其中的铁和硫等即可获得粗铜。粗铜经过火法精炼，进一步除去有害杂质，并富集金、银等贵金属，再经过电解精炼便可得到更高纯度的铜。铜冶炼厂有以粗铜为主的粗铜厂，有采用电解法的精炼厂，也有包括粗炼工艺和精炼工艺的炼铜厂。电炉熔炼耗电较多，一般在电力资源丰富的地区或处理难熔矿石时采用。

3. 铜生产的合理布局

表2-3给出了决定铜生产布局的基本情况。

表2-3 铜生产布局的基本情况

工序流程	采矿→选矿→熔炼冰铜→粗铜→精铜→电解铜→铜材→用户						
工作场所	采矿场	选矿厂	熔炼厂		精炼厂	轧厂储运	
含铜量/%	0.5	25	35～50	98～99	99.3～99.6	99.95	
原料指数		50	2	2	1	1	1
指向	←←←—— 强原料指向		←—— 原料指向		——→ 能源指向	——→→→ 强消费指向	

由表2-3可以看出，选矿厂的原料指数（一座工厂生产1t产品所需的原料吨数）为50，原料地指向性极强，故选矿厂和采矿场不能离得太远，否则运输成本高。熔炼厂的原料指数为2，原料地指向已不十分强烈。而精炼厂与选矿厂的情况截然不同，精炼厂的原料指数为

1，由原料到成品的损耗已极小，但能耗上升为主要矛盾，故应向能源基地靠拢。由于消费地十分分散，成材后又不便运输，故而表现出很强的消费地指向。此时，应将铜材轧厂设在消费地附近。为了综合利用炼铜过程中产生的 SO_2，往往在炼铜厂中附设硫酸车间。硫酸不便运输，还应开发以硫酸为基本原料的综合利用。

这个例子说明，各个工业部门的生产过程有其内在的客观规律性，进而制约布局；另外，产、供、销条件，资本利润条件同时也制约着布局。布局是否合理，应综合自然条件、经济社会条件统一考虑。

2.1.5　硅料、锂矿、稀土的开发

硅是地壳中含量仅次于氧的第二大元素，通常以化合物的形式广泛存在于岩石、沙砾中。硅是一种半导体材料，是太阳能电池板的主要原材料，亦可用于制作半导体器件和集成电路。硅石是硅的重要载体之一，其主要成分是 SiO_2。我国硅石资源丰富，分布广泛又相对集中，江西、安徽等地储量较多。硅石按用途可划分为玻璃用硅石、冶金用硅石及水泥用硅石，工业硅属于冶金范畴。开采出来的硅石要经过工业硅—多晶硅—单晶硅一步步提炼才能应用于芯片、光伏产业。相关市场主要有工业硅、单晶硅、多晶硅、硅片、硅精圆等。工业硅的下游包括多晶硅、铝合金和有机硅。如今多晶硅在光伏、半导体领域中已成为关键材料，铝合金广泛应用于汽车、建筑行业，有机硅在日常生活中更为常见，硅油、硅橡胶及硅树脂可用于生产润滑剂、密封胶、绝缘材料等多种物品。硅的广泛多样的用途带来了可观的需求量，加之其丰富的自然储量，决定了硅产业必然拥有广阔的发展前景。

锂是一种银白色的金属元素，质软，是密度最小的金属。锂是金属活动性较强的金属，可以用于原子反应堆、制轻合金及电池等，在自然界中，锂主要存在于锂矿石、盐湖卤水和锂云母中。现在工业提取锂金属主要有矿石提取和盐湖卤水提取两种方法，其中矿石提取又分为锂辉石矿提取和锂云母矿提取两种方法。锂辉石提取锂的技术较为成熟，主要采用硫酸焙烧法，目前难以解决成本高、环境污染严重等问题。与锂辉石相比，锂云母在提取过程中主要面临杂质较多的问题。盐湖卤水提取锂的技术，会根据盐湖卤水的禀赋不同而有所不同。根据盐湖卤水的资源禀赋，可将盐湖卤水提取锂的技术分为高镁锂比盐湖卤水提取锂技术和低镁锂比盐湖卤水提取锂技术。目前已被工业化开发的盐湖大都是低镁锂比盐湖，因此工业上常用的提锂手段包括沉淀法和太阳池法。而高镁锂比盐湖卤水提取锂技术正在趋于成熟，目前比较成功的提取锂的方法有吸附法、膜法、萃取法、煅烧浸取法及电渗析法等。最初锂仅仅在玻璃、陶瓷和润滑剂等材料中应用，由于锂离子电池是高能储能器件，随着新能源产业的高速发展，锂离子电池被广泛应用，从而带动了锂矿、碳酸锂等业务的蓬勃发展。

稀土是元素周期表中第三副族的 21 号元素钪(Sc)、39 号元素钇(Y)和原子序数 57～71 的镧系元素的统称。稀土在钢、铁、有色金属、机械制造、石油化工、玻璃、陶瓷和农林牧业等传统产业方面用途广泛，用量虽小，效果显著，发挥着现代工业“维生素”的作用，产生出巨大的社会经济效益。当前传统的稀土开采方式依旧是露天开采，包括表土剥离、开挖山体、采掘矿石、破碎加工、化学溶解、除杂精制。该方法对山体的破坏性强，加工过程中使用大量的酸、碱，环境污染严重。此外，原地浸出工艺，主要经历池浸、堆浸和原地浸出 3 个阶段，将离子吸附型稀土矿中的稀土离子用其他离子置换出来。这在根本上改变了矿山开采

的理念，具有划时代的意义。我国未来着重发展的高端装备制造产业、新能源产业、新材料产业、新能源汽车产业等重点制造领域都与稀土有着密切关系，因此稀土是我国高度重视的战略性矿产资源。

2.2 煤炭工业

2.2.1 煤炭生产

中国一次能源消费以煤为主，以2022年为例，煤炭消费占总消费量的56.2%。煤炭在我国能源消费中的比例一度在70%左右，而且这种格局短期内不会发生根本改变。据有关专家预测，到2050年，煤炭在能源中的比例仍会占50%左右。可见，在相当长的时期内，煤炭在中国一次能源结构中将占据不可替代的重要地位。

1）煤的品种、质量和工业分类

在远古的成煤年代，植物遗体由于水、沙的覆盖与空气隔绝而不至于全部分解，大部分被保留下来形成了泥炭。由于水、沙、压力和温度的作用，含碳物质相对富集便形成了褐煤层。长期的高温高压作用，又使褐煤变成了烟煤。烟煤的含碳量进一步增加、变化，就形成了无烟煤。不同种类的煤，在灰分、挥发分、发热量、胶质层厚度及硫分和磷分等主要技术指标上差别很大。为了充分合理地利用煤炭资源，必须对煤进行工业分类，如按大类可分为无烟煤、烟煤和褐煤。其中烟煤又可分为贫煤、瘦煤、肥煤、焦煤、气煤、弱黏煤、不黏煤、长焰煤等。根据煤炭的不同质量和品种即可以确定不同地区煤炭资源利用的方向，以便在国民经济的各个时期，根据不同的需要，确定其开发次序，经济合理地利用煤炭资源。

2）我国煤炭的储量、产量和用量

我国煤炭资源总量丰富，但人均剩余探明可采资源储量少。据统计，截至2022年底，全国煤炭保有探明资源储量为11800亿t，其中基础储量3260亿t，资源量8540亿t。我国的煤炭储量主要分布于华北地区和西北地区，内蒙古、山西、新疆、陕西和贵州5省（区）保有探明资源储量为9561亿t，占全国总量的81%。尽管我国的煤炭探明资源储量居世界第3位，但是由于人口众多，人均剩余可采储量仅为134t。

煤炭的用途十分广泛，可以根据其使用目的分为两类：动力煤和炼焦煤。动力煤主要用于发电、建材、供暖和日常生活，炼焦煤的主要用途是炼焦炭。

总体来说，在煤炭消费市场上，下游企业主要分布在四大行业，分别是电力、冶金、建材、煤化工行业。以2022年为例，这四大行业的煤炭消费量分别是：火电占比55%，钢铁占比18%，建材占比12%，煤化工占比8%。

世界发电、冶金及其他工业对能源的需求增长很快，而节约措施和其他能源的开发尚未完全跟上，因此对一次能源的需求体量一直很大，我国更是如此。近些年，随着我国经济的发展，每年煤炭消耗量接近30亿t标准煤，约占世界煤炭消耗量的50%，如图2-1所示。

我国的煤炭近80%是直接用作燃料，其中3/4是在分散、低效的设备中燃用的，故综合利用程度低。全国所产煤总量中有35%～50%可以炼焦，但实际用于炼焦的只有10%，其余可炼焦的煤均被作为其他用途。黏结性强的炼焦煤是优质煤，是冶金工业的必需品，而且没有代用品，出口价格高，所以作为一般煤烧掉非常可惜。

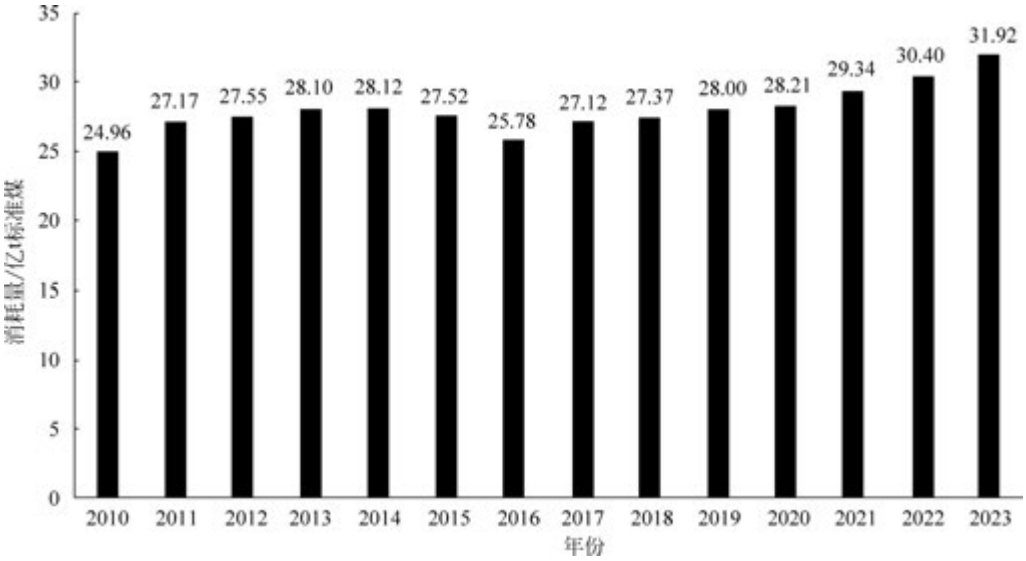


图 2-1　2010—2023 年我国的煤炭消耗量

今后短时期内我们对煤的需求量依然巨大，还需要妥善解决开采、运输、转化、环境保护及有关这些项目的布局、投资等一系列问题。

2.2.2　煤炭的开采

1. 煤田和井田

1）煤田

煤田是指处于地壳沉积岩层中的大面积含煤地带。一般含煤面积在几十平方千米到上千平方千米，煤的储量在亿吨以上。评价煤田的指标主要有煤层厚度、层数、埋藏深度、煤层倾角等地质条件。煤层厚、层次多、储量集中的煤田有利于煤炭的开采和提高矿井利用率。煤的埋藏深度直接关系到开采方法。煤层倾角对于煤炭开采也有很大的影响，倾角过大，容易滑动，建井困难，不易开采。此外，还有围岩（顶板、底板）、涌水量和瓦斯量等开采技术条件。

煤田所在地的地理环境对煤炭工业的发展也有很重要的影响。某些煤田地质条件、自然条件、煤炭质量虽不太好，但其所处地理位置优越，接近大城市或工业中心，交通方便，往往也会被优先开发，并且达到相当大的规模，如北京的京西煤田、山东的新汶煤田。

2）井田（矿田）

为了合理、经济地开发煤田，通常将一个煤田划分为若干部分，由若干矿井开采，而划给一个矿井开采的部分叫作井田或矿田。矿井是煤田开发的基层单位。井田开发时应预先确定的主要指标是井田的储量和矿井的生产能力。

综上所述，煤炭资源和自然条件为煤炭工业发展与矿区规模、矿井布置提供了物质基础。而煤炭工业的规模、速度和开采次序还要由国民经济各部门的发展规模及其结构具体确定。

2. 煤田的采掘方式

1）露天开采法

对于那些埋藏不深、厚度比较大的煤层，先把覆盖在煤层上面的土石全部挖去，再进行

采煤的方法叫作露天开采法。露天煤矿一般都低于地面，呈凹陷状，从上到下，分成许多台阶，一层一层地往下开采，每个台阶约有 10m 高。如我国抚顺的露天煤矿，整个矿场像一个巨大的体育场，东西长为 6500m，南北宽为 1500m，深度现已超过 200m。图 2-2 所示为内蒙古胜利煤田第二号矿现场。

露天矿一边挖掘土石方，一边开采煤炭。煤层上面的岩石往往比较坚硬，为了剥离它，首先需要打孔爆破，把岩石炸松碎，接着进行采装、运输等工序。图 2-3 所示为某露天采煤现场。运送土石和煤炭的工具，目前广泛采用的是汽车和电机车。汽车灵活，爬坡能力强，有利于深凹露天矿的运输；火车常用于大、中型露天矿的运输。



图 2-2　内蒙古胜利煤田第二号矿



图 2-3　露天采煤现场

露天矿回采率高，可达 80%～90%，开采成本低，而井下采煤量只占总开采量的 1/10～1/5，生产安全，建设周期短。为了充分发挥投资效益，迅速增加煤产量，可采取优先发展、集中开发露天优质煤矿的策略。

2）地下采煤法

对埋藏较深的煤层，不宜采用露天开采法。为了打开通路到达煤层，首先要从地面向下打井，再在井下开凿许多巷道，然后由井下将煤采出。这些井叫作井筒，它们是联系井下和地面的“咽喉”。人员、材料、设备和新鲜空气都要经过井筒送往地下，开采出来的煤也要经过它们送往地面。一般矿井至少要有两个井筒：一个用来输送从地下采出来的煤，叫作主井，它也用来进风，又叫进风井；另一个用来向地下运送材料、设备和上下人员，叫作副井，它也用来出风，又叫出风井。

当井筒开凿到一定深度后，在井筒底部还要开凿一个巨大的车场——井底车场，它是井下调度车辆集中运输煤炭、矸石、材料、设备及输送人员的场所，如同一个火车站。井底车场有许多硐室，在里面分别设置变电所、水泵房、水仓、煤仓、炸药库、调度室、等候室、医疗室等。井筒和井底车场开凿好以后，就沿着通达煤层的方向开凿巷道。纵横交错的巷道分割围起一块块的煤层，这就是采煤“车间”。开采时，对每块被分割的煤层分别开采，一般是从靠近井底的地方开始，沿煤层的走向开采。进行采煤作业的那一面叫作采煤工作面。图 2-4 所示为采煤机地下采煤的场景。

3. 井田开拓

1）井田的划分

为了有计划地对煤田进行开采，要先将井田划分成条条、块块，再依次进行开采。在开采倾斜煤层时，通常沿煤层倾斜方向，按一定的标高将井田划分为若干长条形的部分，每个



图 2-4　采煤机地下采煤场景

长条部分都称为阶段；阶段与阶段之间是以水平面为界的，这个分界面称为水平。当阶段的倾斜程度和井田的走向程度都较大时，全阶段部署工作面会给开采带来困难。在这种情况下，阶段内应采用分区部署的方式，即沿走向再将阶段划分为若干采区，且有独立的通风和运输系统。

2）开拓系统

由巷道组成的生产系统叫作开拓系统。这些巷道按其倾角不同分别称为垂直巷道、水平巷道和倾斜巷道。按其功能和服务范围可分为以下 3 个层次：

（1）开拓巷道，是为全矿井或采区服务的巷道，如井筒、井底车场、运输及回风大巷等。开拓巷道在矿井内的布置方式叫作开拓方式。由于煤田范围、储量、煤层数目、倾角、厚度和地质构造等不同，开拓方式亦不同，常用的有斜井、立井和平硐 3 种类型。

（2）准备巷道，是为一个采区服务的巷道。

（3）回采巷道，是仅为某个回采工作面服务的运输平巷和回风平巷。

3）井田开拓的原则

矿井开拓方式是煤矿建设和生产中的重要问题。开拓方式决定了全矿生产系统的总体布局，对资源利用、设备配置、基建投资、开采成本等有很大的影响。开拓方式一经确定，并按设计进行施工后，就很难改变。开拓方式既影响矿井建设时期的技术经济指标，又将长期影响矿井的生产技术面貌和经济效益，因此必须从技术、经济方面认真研究比较，力求做到：

（1）具有合理集中的开拓布局和完整良好的生产系统，以确保矿井正常、均衡生产。

（2）井巷工程、地面建筑工程和机电安装工程量小，基建投资少，提升、运输、通风、排水和巷道维护费用低，生产经营管理费用也低，可以降低吨煤生产成本。

（3）工程建设周期短，出煤快。

（4）切实保证施工和生产安全。

（5）合理利用煤炭资源，减少煤炭损失。

（6）少占耕地，不占良田。

4. 采煤方法

采煤是煤矿井下生产活动的核心。先进合理的采煤方法对整个矿井的各项经济技术指

标具有极其重要的影响。随着技术的进步，采煤方法经历了不同的技术阶段，总的趋势是向综合机械化采煤方向发展，但又受到地质条件及经济、规模等条件的限制。

1）煤矿非机采型

在回采工作面的回采工艺过程中，落煤、装煤、运煤3道主要工序没有或没有完全实现机械作业。落煤多用炮采，生产率较低，安全性较差。

2）煤矿机采型

机械化采煤用于煤层比较稳定，地质构造不太复杂的回采工作面。一般采用滚筒采煤机或刨煤机，落煤用可弯曲刮板运输机输送，用金属支架、液压支架和金属铰接顶梁进行采空区顶板支护，安全性和生产效率都能得到很大提高。这些方法进一步综合，就出现了综合机械化采煤技术。它将采煤、装煤、运煤及顶板管理的机械和电气设备结合起来，由采煤机、液压支架、工作面刮板输送机、转载机、电气设备和照明等共同组成了一个庞大的综合机械化采煤机组。采煤机在前面采煤，后面的液压支架随即跟进支护顶板，工作面输送机将采出的煤运至转载机，由皮带输送机运抵井下车场，再从竖井提升到地面，至此完成了采煤的全部机械化过程。

综合机械化采煤的优势在厚煤层开采中尤为明显。我国21世纪初研制成功的以大功率、电牵引、多电动机横向布置和大截深为特征的新一代采煤机，使综合机械化采煤成套设备的日产能力达到1500～2000t的先进水平，这些新型综合机械化采煤设备正在全国各重点矿区推广应用。在发展工作面核心设备的同时，还开发完善了工作面后配套的长距离带式输送机运输系统、运人运料的高效辅助运输系统、地质保障系统、煤巷快速掘进与锚杆支护系统和安全生产监测系统，有效保证了综合机械化采煤的高产高效。我国从1993年起开始向美国出口液压支架，向印度、土耳其、俄罗斯等国出口成套综合机械化采煤设备，并取得了良好的使用效果。

随着我国综合机械化采煤技术及装备的快速发展，国内出现了一大批年产千万吨的安全高效矿井，极大地改善了我国煤矿综合机械化开采的状况。2021年，全国安全高效矿井已达1146处，其中特级925处、一级186处、二级35处。这些矿井产量占全国总产量的70％以上，百万吨死亡率下降到0.00069，达到世界先进水平。据统计，我国千万吨级矿井数量由2012年的33处增加至2022年的79处，产能由4.5亿t/年增长到12.8亿t/年。千万吨矿井总体经济技术指标达到国际领先水平，并在综合机械化采煤工作面单产、工效、掘进进尺指标等方面突破多项世界纪录。

“十五”“十一五”期间，我国煤矿综合机械化开采技术与装备水平显著提升，自主研发并成功采用了3.5～7.0m厚煤层大采高综采技术、20m特厚煤层大采高综放开采技术，使工作面开采技术指标得以大幅度提高。同时，我国煤机装备制造业取得了长足发展，开采装备能力及设备可靠性均大幅度提高，在电牵引采煤机，系列化液压支架，大型刮板输送机及大运量、大运距胶带输送机等关键设备的开发上均取得了突破。

无论采用哪种采煤方法，都要实行回采工作面作业循环，做好落煤、装煤、运煤、支护、采空区处理等工序的配合。对作业循环要实行科学管理，即运用科学的方法确定工种、人员、时间、工艺、产量、效益、消耗及安全等具体定额，组织作业循环，并使每个循环之间保持不间断、周而复始。正规循环作业的组织系统可借助计算机，通过循环作业图、劳动组织表、工作面状况图表和所完成的各项指标数据等加以调整和控制。

由于先进综合采煤设备的广泛应用，许多大型煤矿的生产效率和安全水平有了很大的提升。到21世纪初，全国已建成不同类型的高产高效矿井超过100处，综合机械化采煤工作面平均年产97.86万t，是国有重点煤矿平均水平的3.34倍，生产人员效率达9.835t/工，是平均水平的4.36倍。一台综合采煤设备由100多名矿工操作，年生产原煤可达100万～200万t。兖矿集团东滩煤矿综合机械化采煤放顶煤工作面年产突破500万t，使我国综合开采技术达到国际领先水平。现在我国已具备制造全套综合采煤设备的能力，今后可以更多地装备煤矿，更有力地推进煤炭工业的技术改造。

“十一五”期间，国家科技支撑项目“煤炭资源高效采选关键技术与装备研发”研制成功国内首台EML340连续采煤机及后配套连续运输系统，填补了国内连续采煤机制造的空白。此外，我国针对短长壁工作面开采需求，自主研发了单滚筒电牵引短壁采煤机。在整机功率相同的情况下，单滚筒采煤机比双滚筒采煤机更适宜于工作面长度小于90m的短壁工作面的开采。由于只有单个滚筒，滚筒的截割功率更高，生产效率也更高。再如，我国针对急倾斜薄煤层复杂的开采条件，自主研发了急倾斜薄煤层走向长壁综合机械化采煤法及配套的全部开采装备。

5. 矿井安全生产及环境保护

1）防瓦斯

矿井瓦斯是井下煤层和围岩中各种有害气体的总称，其主要成分是沼气（甲烷）。瓦斯具有燃烧与爆炸性，对生产的威胁很大。在矿井内引起瓦斯爆炸的主要原因有：一是瓦斯达到一定的浓度；二是有高温火源；三是空气中含有足够的氧气。由此可知，预防瓦斯爆炸的主要措施是防止瓦斯积聚（控制瓦斯含量低于5%）和防止井下出现明火。因此，矿井必须采取有效的通风措施，严禁吸烟，电机和电气设备应符合防爆规程要求，并加强放炮、瓦斯检查等安全生产制度，建立健全的防火、防爆设施等。同时还要采取措施提高煤炭生产过程中释放出的甲烷的利用率。

我国已明确要大力发展煤层气产业，实行地面开发和地下抽放并举的煤层气开发方针。“十一五”期间，我国煤层气开发从零起步，施工煤层气井5400余口，形成产能31亿m^3。2012—2021年，全国煤层气总产量708.71亿m^3，年均产量70.87亿m^3，复合增长率达到了12.57%。其中，2021年煤层气产量最高，达到了104.73亿m^3。

2）防尘

矿尘是指生产过程中所产生的煤尘和岩尘。矿尘不但危害身体，易引起硅肺等职业病，而且煤尘浓度增加到一定程度，遇火可引起燃烧爆炸。因此矿井必须遵守国家规定的安全标准，将矿尘控制在安全范围内。同时，应采取加强通风、放炮喷雾、装岩洒水、冲洗岩带、佩戴口罩等措施预防职业病。

3）防火

当矿井下有外源火种，如烟头、电火花、爆炸等时，会引起火灾。另外，煤炭还会发生自燃。防火措施主要有：正确选择开拓开采方法；用密闭墙将易发生火灾的采区隔绝；主要巷道与硐室采用不燃性材料，并设灭火用具、消防水管系统；严格贯彻井下防爆、防火安全等规定。

4）防水

矿井水灾发生的原因较多，如地面洪水灌入井下、断层或裂缝将河流或含水层与井下接

通、采掘过程中遇到积水等。防水措施主要有：井口高于当地历年最高洪水水位，地面修筑防洪堤坝或排水沟，在水体下采煤时应有专门的技术措施。当掘进巷道接近水区时，要先探后掘，先将水放出来；应设防水煤柱，使水与采区隔离等。

矿井开采时，排出的矿井水的矿化度、酸性、悬浮物浓度均较高，有的还含有放射性元素。这些废水的排放对环境造成了污染。另外，我国大量矿区严重缺水，因此最大限度地处理和净化矿井水，使之资源化，提高复用率，实现达标排放，对保护矿区环境，缓解矿区及周边缺水地区用水紧张问题都有积极的作用。因此，应对矿井水、生活用水进行处理，实现外排水达标率100%。2010年，全国煤矿矿井水排放量达到61亿m^3，利用量达到36亿m^3，利用率达到59%。按照《矿井水利用发展规划》，2015年，全国煤矿矿井水排放量达到71亿m^3，利用量达到54亿m^3，利用率为76%。2020年的矿井水综合利用率比2015年提高了11.2%。

5）通风

矿井通风一方面是把地面新鲜的空气不断送入井下，另一方面是把井下的瓦斯和污浊空气不断排出。矿井通风系统是矿井的生命线，出现问题往往会导致灾难性后果，所以一定要安全可靠，通常要设立备用系统。

6）矸石管理和采空区防塌陷

在煤矿区开采过程中，要挖出相当多的废碎石，还要排出大量矸石（约占采煤量的1/10），不但占用土地，而且会堵塞河道、污染环境。矸石中的硫化物可缓慢氧化发热，如散热不良或未隔绝空气就会自燃，甚至爆炸。目前有9%的矸石堆正在自燃，释放出CO_2、SO_2及其他有害物质。矸石淋溶水又对周围地表水和地下水造成污染。《贵州省“十四五”大宗工业固体废物综合利用规划》中明确，以煤矸石充填、生产建筑材料、发电为重点，鼓励延伸产业链，配套建设煤矸石再洗选系统，对煤矸石分级、分质综合利用，提高无热值煤矸石、低热值煤矸石、高热值煤矸石的利用量。山西省印发的《关于促进全省煤炭绿色开采的意见》中也提出，进一步提升煤矸石综合利用或无害化处理能力。2021年，我国煤矸石产量为7.43亿t，综合利用量为5.43亿t，综合利用率为73.1%。

此外，采空区会引起地表塌陷（平原区每吨煤引起的采空塌陷面积约0.2m^2），我国煤矿累计采空塌陷面积约百万公顷，相关损失近千亿元。采动影响还会不同程度地影响岩坡、水系、地上地下建筑物的稳定和安全。产煤区土建施工时，经常会遇到先期采煤挖开的小坑道，需要填埋补救。这些影响长远的问题均需及早加强管理。

2.2.3 煤炭生产新观念——洁净煤技术

煤炭作为能源在国民经济发展中作出重大贡献的同时，在其开发与利用过程中也带来了一系列环境污染问题，被称为“肮脏的能源”。人类已不能再无视这些负面影响。因此，煤炭生产的完整概念决不能仅仅是将煤采出满足一时之需。在技术政策上，针对使用煤炭对环境造成的污染，提出了洁净煤技术的新概念，即在使煤作为一种能源达到最大限度利用的同时，实现释放污染物最少的目标。洁净煤技术是指从煤炭开发到利用过程中旨在减少污染排放和提高利用效率的加工、燃烧、转化及污染控制等新技术。洁净煤技术包括两个方面：一个是直接烧煤洁净技术，另一个是煤转化为洁净燃料技术。

1. 直接烧煤洁净技术

直接烧煤洁净技术是指在直接烧煤的情况下，需要采取以下技术措施：

(1) 燃烧前的净化加工技术，主要包括洗选、型煤加工和水煤浆技术。原煤洗选采用筛分、物理选煤、化学选煤和细菌脱硫方法，可以除去或减少灰分、矸石、硫等杂质；型煤加工是把散煤加工成型煤，由于成型时加入石灰固硫剂，既可减少二氧化硫的排放，减少烟尘，还可节煤；水煤浆是先用优质低灰原煤制成的，可以代替石油。

(2) 燃烧中的净化燃烧技术，主要是流化床燃烧技术和先进燃烧器技术。流化床又叫沸腾床，有鼓泡床和循环床两种。由于燃烧温度低可减少氮氧化物的排放，煤中添加石灰可减少二氧化硫的排放，炉渣可以综合利用，能烧劣质煤，这些都是流化床燃烧技术的优点。先进燃烧器技术是指改进锅炉、窑炉结构与燃烧技术，减少二氧化硫和氮氧化物排放的技术。

(3) 燃烧后的净化处理技术，主要是消烟除尘和脱硫脱硝技术。消烟除尘的技术很多，电厂一般都采用静电除尘器，效率最高，可达 99%以上。脱硫方法有干法和湿法两种。干法脱硫是用浆状石灰喷雾与烟气中的二氧化硫反应，生成干燥颗粒硫酸钙，再用集尘器收集；湿法脱硫是用石灰水淋洗烟尘，生成浆状的亚硫酸钙进行排放。两种方法的脱硫效率均可达 90%。

2. 煤转化为洁净燃料技术

煤转化为洁净燃料的技术主要有以下 4 种：

(1) 煤的气化技术，它是在常压或加压条件下，保持一定的温度，通过气化剂(空气、氧气和蒸汽)与煤炭反应生成煤气的技术，分为常压气化和加压气化两种。煤气的主要成分是一氧化碳、氢气、甲烷等可燃气体。用空气和蒸汽做气化剂，煤气热值低；用氧气做气化剂，煤气热值高。煤在气化中可脱硫脱氮，排去灰渣，因此，煤气就是洁净燃料了。

(2) 煤的液化技术，分为间接液化和直接液化两种。间接液化是先将煤气化，然后再把煤气液化，如煤制甲醇，可替代汽油，我国已有应用。直接液化是把煤直接转化成液体燃料，如直接加氢将煤转化成液体燃料，或煤炭与渣油混合成油煤浆反应生成液体燃料，该技术在我国已开展研究。

(3) 煤气化联合循环发电技术，是先把煤制成煤气，再用燃气轮机发电，排出高温废气烧锅炉，再用蒸汽轮机发电，整个发电效率可达 45%，我国正在开发研究该技术。

(4) 燃煤磁流体发电技术，当燃煤受到高温等离子气体高速切割强磁场的作用，就会直接产生直流电，然后把直流电转换成交流电，发电效率可达 50%～60%。

2.2.4　煤炭生产的系统观

煤炭生产是关系国计民生的大事，资源保护和合理利用不但关系到现在的“四化”建设，而且关系到子孙后代。煤炭的稳定生产受到从前期工程、矿山建设、采掘计划，到铁路运输、设备配套等诸方面因素的制约，必须用整体的观点去认识它。

1. 科学地确定矿井储量和设计规模

每一座矿井的井田范围大小、矿井年产量及服务年限的确定，是建设矿井首先必须解决的关键问题。

井田内埋藏的煤炭总量，叫作井田地质储量。地质储量中，在技术经济指标和质量指标

方面都符合工业要求，并在目前技术条件下可以开采的储量，叫作平衡表内储量。平衡表内储量中，不但在可采厚度和质量指标方面，而且在勘探可靠程度方面完全符合开采技术和工业要求的部分，叫作工业储量。其中，可实际采出地面的部分，叫作可采储量；不能采出的，称为煤炭损失。煤炭损失包括两个方面：一方面是煤柱损失，如井田边界煤柱，井筒及地下地上建筑物的保护煤柱，以及大断层、湖泊等的安全煤柱等；另一方面是开采损失，如巷道保护煤柱、工作面丢失、运输损失等。可采储量与工业储量的百分比，即煤炭回收率，是煤炭生产建设中的重要指标。

规划矿井的生产能力，必须考虑到井田的可采储量和井田的寿命。年产量大的矿井所需的地面建筑物和机械设备都比较大，基本建设投资较多，井巷工程量大，建井时间也较长。如果矿藏储量不够，则矿井服务年限太短，使这些设施在充分发挥其应有效果之前就过早地失去了使用价值，于是造成巨大的浪费。与此同时，为了均衡地供应国家煤炭，又必须建新井来接替它的产量，使得建井工作频繁。反之，当矿井可采储量丰富而设计能力偏小时，又不能充分利用煤炭资源来及时满足国家对煤炭的迫切需要，也是不合理的。为了充分发挥工程设施和投资的作用，保证煤炭生产的均衡和持续，井田的可采储量、年产量和矿井寿命这三个量在设计时应取最优配合。

除煤矿的地质构造外，矿井规模大小对经济效益的影响也很大。按常规建设，大型（>60 万 t/年）、中型（30 万～60 万 t/年）、小型（9 万～30 万 t/年）矿井的吨煤总投资比约为 78∶88∶100。小型矿井因管理分散，资源采收率和矿井寿命低，产量衰减较快。所以，一般来说，开发大型矿井比较合算。但大型矿井从勘探至投产需要十几年，建矿工期需 5～6 年，且综合机械化对煤层要求较严格，不是任何煤层都可以采用的；而中、小型矿井建矿只需 4 年或更短时间，对煤层要求也低，不仅能够较早出煤，还易发挥地方人、财、物的优势。目前，以中小煤矿为主的地方煤炭工业已成为我国煤炭供应的“一条腿”，正发挥着积极的作用。但是在建设时应当注意协调国家总体布局和相关政策，因地制宜，合理规划。

年产量的确定是以可靠的前期工程为基础的。地质勘探的精确性是取得较好经济效果的前提。此外，还应根据具体矿井的开拓方式、通风方式、机械化水平，以及提升、运输各环节的能力综合计算，全面平衡。

煤炭生产中一定要认真贯彻《中华人民共和国矿产资源法》。要从整个国民经济和全社会的综合效益出发来考虑问题。小煤窑的生产范围一定要限制在不宜建立大煤矿的地区，或利用大煤矿开采后的剩余资源，要以不破坏大煤矿的科学开采为原则。近年来，煤炭企业超能力生产，使资源遭到严重破坏，矿井寿命急剧缩短时间，这是必须依法整治的。

2. 矿井“三量”平衡是保证稳产的基本条件

衡量矿井采掘关系的重要指标，是矿井“三量”及与其相对应的三个可采期。矿井“三量”是指矿井的开拓煤量、准备煤量和回采煤量，它们分别由开拓巷道、准备巷道和回采巷道所控制，由所圈定的可采煤量构成。这三个量的数值反映了开拓掘进的成果，而其可采期还反映了矿井采掘平衡的情况。对于各类矿井，“三量”可采期的一般要求是：开拓煤量不少于 3～5 年，准备煤量不少于 12 个月，回采煤量不少于 4～6 个月。

在矿井的整个开采期间，随着回采工作的进行，必须持续不断地进行巷道掘进，以便获得新的工作面、采区或阶段，接替将要结束的工作面、采区或阶段，否则就不能保证矿井的持续生产。因此，在采掘关系上，必须有计划、按比例地进行，切实贯彻“采掘并举、掘进先行、

以掘保采”的方针。充分重视开拓掘进工作，经常保持采掘平衡是矿井正常生产和稳产高产的一个关键环节。

一座矿井的储量不是无限的，随着浅部及就近资源的耗尽，勘探和开采难度也会越来越大。煤层深、斜、薄，以及流沙、地下水、煤层气多的矿井生产过程更加复杂，建井时甚至需要采用冻结法克服流沙和水。投产后井下运输量、采空区支护量也会大幅增加。这些因素在计划时都要考虑进去。

3. 煤炭生产与运输能力要平衡

煤炭产量与运输能力的平衡是生产中必须考虑的又一个问题。煤采出后必须及时运输给用户，才能发挥效益，这对大型矿井来说尤其不能忽视。大型矿井的采、储、运设施是配套建设的。如果运力不足，煤挖出来，煤仓装不下，就只能扔在一边，成为落地煤。落地煤由于无法再使用配套的运载机械，即使以后运力缓解，运出去的难度也大幅增加。结果往往是放在那里自然风化，不仅浪费资源，还会引起自燃甚至爆炸，对环境造成污染和危害。

铁路运输是我国煤炭的主要运输方式，而煤炭历来也是我国铁路运输的主要货物。《2018—2020年货运增量行动方案》提出，到2020年，全国铁路煤炭运输量要达到28.1亿t，铁路运输煤炭要占全国煤炭产量的75%。2022年，我国煤炭产量45.6亿t，通过铁路运输煤炭26.8亿t，占全国煤炭产量的58.8%，距75%的目标还有一定的差距。

煤的运输成本很高，长途运输费用往往超过了煤在产地的售价。我国铁路的运输价格为0.08～0.60元/(t·km)，另外，铁路运输还有0.1%的沿途损失。公路运输的运输价格，根据山西省和内蒙古鄂尔多斯地区的统计数据，在0.45～0.60元/(t·km)。虽然汽车运输价格略高，但短距离运输总体成本可控，起运地煤炭价格低，中间环节少，仍有运销优势。从成本核算的角度看，公路运输煤炭的经济运距应该在400km以内。另外，我国煤炭运输还包括海运和内河运输。近年来，由于各地港口和运输船队建设已经实施市场化运作，我国煤炭海运能力和港口建设增长迅猛，港口运力较为平衡。由于运输量大，运煤的车站、港口须有专用设施，如储煤场、快装设备等。专用煤码头吨位和水深较大，宜以专线连接矿区，用专用重载列车运输。储煤场地也要防止煤炭自燃和煤尘污染。

20世纪后期开始发展的较新的运煤方式是长距离煤浆管道运输。直径为960mm的输煤管道的年运输量约2500万t。管道输煤是一种很有前途的方法，但也还有一些技术、经济问题须进一步解决。我国目前使用的还较少。

在煤产地建坑口电站，用劣质煤发电，然后以高压输电的方式把能量输出，是一种非常好的办法。尤其是热值较低的煤更宜就地消化，煤矸石也有可能在沸腾炉中利用。坑口电站需要耗费大量的水，水煤比为8左右(100万kW的电站每秒需1.5～2.0m^3的水)，但煤矿地区往往缺水，难以供应，决策时应加以注意。

我国煤炭资源天然分布的不均衡性决定了北煤南运、西煤东运的局面，煤炭平均运距接近500km。每年几亿吨煤炭及时运出，绝非易事。我国煤炭运输占铁路运输量的1/3、公路运输量的1/4、直属水运量的1/5，占京广、京沈、京沪、沈大、陇海五大铁路干线运输量的50%～70%。我国铁路交通发展本来就不够平衡，山西、内蒙古、陕西等地煤炭工业兴起，更加剧了运输能力的紧张状况。

因此，煤炭开发，必须同时考虑交通运输问题。交通运输的紧张状况不改变，势必影响能源工业发展的速度和规模。由此也可看出煤炭洗选、加工、转换的重要性。

4. 煤炭工业技术进步的特殊性

煤炭生产有着悠久的历史，但是煤炭科学技术一直发展缓慢，生产面貌落后，体力劳动繁重，安全状况不好，生产效率和单产提高得很慢。全世界煤炭产量的60%是地下矿井开采的，矿井工作环境、开采条件比地面恶劣得多。机械设备安装、搬运困难，采煤、运输都受到空间的限制，在地下搞机械化、自动化则有其特殊要求。井下环境的各种类型设备、仪表比地面环境的技术指标要高得多、难得多、复杂得多。一般常规的监测仪表，在地面使用时效果好，而在井下就必须防爆、防震、防潮、防尘。一个普通的电源开关，在通常情况下很简单，但矿井中有水、煤尘、瓦斯，就得密封起来。矿井中电源开关质量有几十千克，结构也复杂得多。矿井中工作空间有限，有的地方煤层很薄，在这样小的空间中，要使用大功率采煤机，其机电配件都是特殊的。因此，煤炭生产技术进步有很大的滞后性，有赖于冶金、材料、机械和电子等工业技术的发展和配合。

5. 煤炭工业基地的综合发展

煤炭工业基地不仅是一个单纯采煤的地方，随着现代工业的发展，应该根据各自的资源条件，在采煤的基础上逐步形成综合性工业基地，以利于煤炭的就地加工和综合利用。

在煤炭加工利用方面，着重于电力和化工。化学工业是煤炭综合利用与工业综合发展的重要内容；大型煤电基地也是现代煤炭工业发展的趋势，如德国莱茵褐煤矿区，是世界上最大的电力中心。

如果某些地区煤炭资源丰富，煤种适宜，矿区周围拥有石灰石和耐火材料等资源，附近又有铁矿或者能较方便地得到外来铁矿石，在煤炭基地发展钢铁工业也是合理的。在煤矿基地配置煤矿机械厂，产品能就近供应用户，对改进产品质量和进行试验研究都很便利。煤炭工业排出的煤矸石数量巨大，我国多数矿区矸石堆积如山，占用土地，污染环境，应充分研究开发，变废为宝，如用于制砖、砌块、水泥配料，或用作沸腾锅炉的燃料等。

综上所述，我们可以形成有关煤炭生产的完整概念。煤炭是我国的主要能源，煤炭工业是支持经济发展和保障人们生活的基础产业，煤炭生产量、消费量均占全国能源总产量、总消费量的70%以上。煤炭是工业的“粮食”，生产量大、运输距离长、占用的运力多。在相当长的时期内，这种能源构成状况不会发生大的变化。但煤炭将更多地转化为电力和煤气，甚至转化为水煤浆和液化油等液体燃料，为社会提供更清洁的能源。煤炭的开发和生产是一个带有全局性、长远性的战略问题，要从煤炭工业的特点出发，把煤炭勘查、基建、生产、利用等各个环节科学地组织起来，搞好查、建、产、运、销、用的综合平衡。从资源状况、工业布局、市场、内部条件与外部条件、基本环节与中间环节等诸多方面出发，综合考虑煤炭生产、建设和运输的效益，发挥多能互补作用，使整个社会生产协调发展，使国民经济能够获得最好的经济效益。

【典型煤炭公司案例】

在中国迅速崛起的资源型城市中，鄂尔多斯市是一个典型的代表。鄂尔多斯市地处内蒙古西南部、黄河“几”字弯内，坐落于鄂尔多斯高原，境内地下有储量丰富的能源矿产资源。目前，已经发现的具有工业开采价值的重要矿产资源有12类、35种。已探明天然气储量占中国总储量的1/3，已探明稀土、高岭土储量占中国总储量的1/2。除此之外，全市已探明煤炭储量1496亿t，约占全国总储量的1/6。如果计算到地下1500m处，总储量约1万亿t。在

全市87000多平方千米的土地上，70%的地表下皆埋藏着煤。

近年来，鄂尔多斯市依靠丰富的资源储量，经济突飞猛进，人均GDP于2010年超越香港居全国第1。而在鄂尔多斯市，神华集团神东煤炭公司是规模最大的资源型企业。神东煤炭公司是中国神华能源股份有限公司的核心煤炭生产企业，2009年5月20日在神东矿区四公司的基础上整合成立，地跨陕、蒙、晋三省(区)。神东矿区是我国建成的第一个2亿t煤炭生产基地，共有17个煤矿，在1000km^{2}内密集分布，世界少有。基地目前产能2亿t，约占全国总产能的6.4%，全国重点煤矿产能的12%。神华集团资产1300多亿元，年利润500多亿元，而神东煤炭公司的年利润就高达300多亿元，利润占2/3，处于整个神华集团的核心地位。

神东煤炭公司紧紧抓住国家西部大开发、能源战略西移的历史机遇，认真贯彻产业政策，在地方各级党委、政府和社会各界的大力支持下，依托神华“矿电路港”一体化、“产运销”一条龙的运营模式，坚持“高起点、高技术、高质量、高效率、高效益”的建设方针，依靠技术和管理创新，形成了以“生产规模化、技术现代化、服务专业化、管理信息化”为基本特征的新型集约化生产模式。神东煤炭公司认真履行中央企业的“政治、社会、经济”三大责任；注重资源回收，推动可持续发展；加强环境保护，建成绿色生态矿区；坚持互利共赢，促进了区域经济和社会发展。

2.3　电力工业

电力与石油、煤炭等一次能源的性质有所不同，它是由一次能源转换而得到的二次能源。电力是一种现代化的能源，在合理开发、运输、分配和使用能源方面起着特殊的作用。有的一次能源只有转换为电力才能大规模开发利用，如原子能和水力资源；有些能源以其原有形式输送分配是不合理的，如劣质的燃料，只有就地发电再输送分配，经济上才合算。电能极其灵活，在供应时，既便于集中又便于分散，而且由电能转换为其他形式的能也十分便利。电还可提供脉冲信号，便于进行控制。因此，电能被称为能的“万能形式”。电力的广泛应用对于促进社会生产力的提高起着重要的作用，它不但推动了传统工业(如钢铁、采煤等)部门生产工艺的重大变革，而且是自动化、无线电电子学等新技术的基础。电气化是各个生产部门提高劳动生产率的主要途径，也是提高人民生活水平的一个重要方式。各国的发展都已证明，在能源消费中，用电比例越大，能源使用的效率就越高。因此，电力工业是国民经济的先行官、现代社会的支撑。在制定发展战略时，应将电力工业作为先导产业优先发展，使电力的发展速度高于国民经济的发展速度，电力总消费的增长速度高于一次能源总消费的增长速度。

近年来，我国电力生产与消费快速增长，各项主要指标在高位运行，电力供需形势依然紧张。图2-5所示为我国近4年的社会用电量情况，可以看出，近年来电力消费随着经济的发展呈上升趋势。2022年，全国水电、火电、核电、风电、光伏的装机容量分别新增2387万kW、4471万kW、227万kW、3763万kW和8741万kW，合计19589万kW。截至2022年末，全国发电装机容量256405万kW。其中，火电装机容量133239万kW，水电装机容量41350万kW，核电装机容量5553万kW，并网风电装机容量36544万kW，并网太阳能发电装机容量39261万kW，并网生物质发电装机容量458kW。

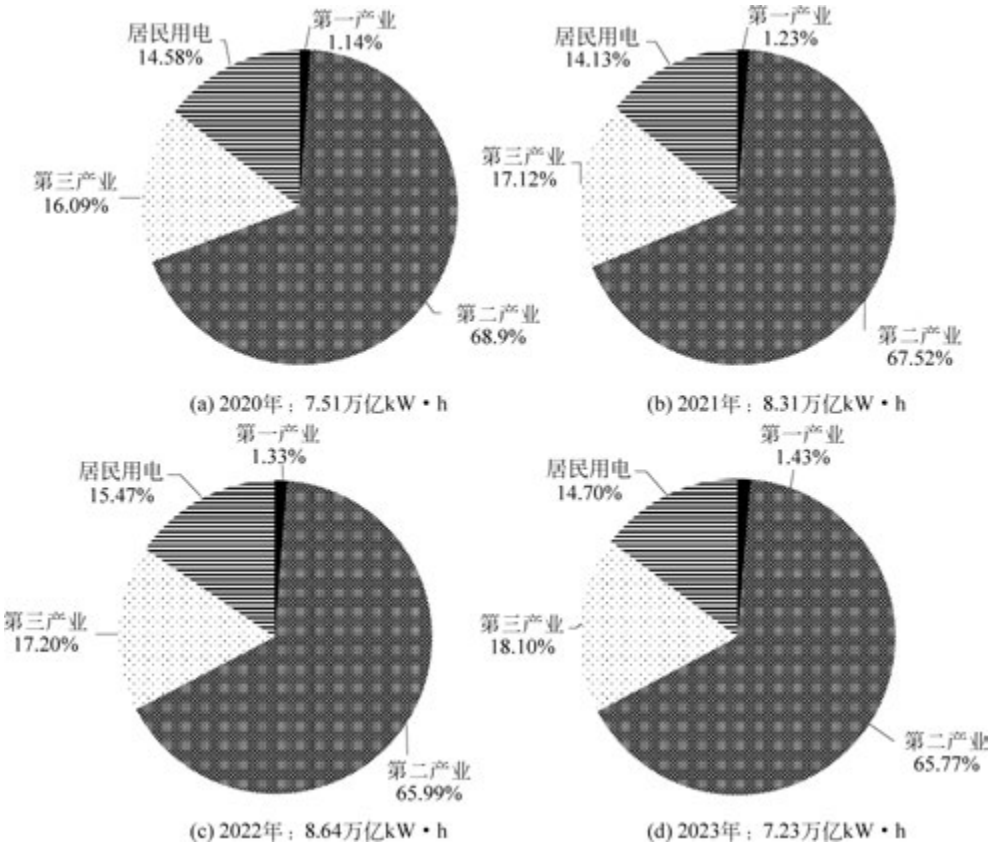


图 2-5　我国近 4 年的社会用电量情况

2.3.1　火力发电

火力发电是电力发展史上最早实际应用的发电技术，并在发展中不断创新。火力发电厂是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能的工厂，基本生产过程是：燃料在锅炉中燃烧加热水生成蒸汽，将燃料的化学能转变成热能；蒸汽达到一定的压力则推动汽轮机旋转，将热能转换成机械能；汽轮机带动发电机旋转，将机械能转变成电能。火力发电的类型很多，按照不同的热力原动机类型可分为蒸汽动力、内燃机、燃气轮机和联合循环 4 种发电方式；按燃料不同可分为燃煤、燃油和燃气 3 种发电方式。此外还有垃圾发电、利用工业企业余热余压发电及既供电又供热的热电联产等。

图 2-6 所示是近 5 年来我国各种发电类型的发电量比重，可以看出，火电是现阶段我国电力最重要的来源，约占我国发电总量的 70％。

1. 火力发电厂的基本生产过程

火力发电厂的主要生产系统可概括为汽水系统、燃料及燃烧系统和发电及输配电系统，通常称为电厂三大系统。

1）汽水系统

水是火电生产过程中的工质。水在锅炉中被加热后蒸发，并由过热器进一步加热成为过热蒸汽，然后经管道送入汽轮机。在汽轮机中，蒸汽由于不断膨胀而高速流动，推动汽轮

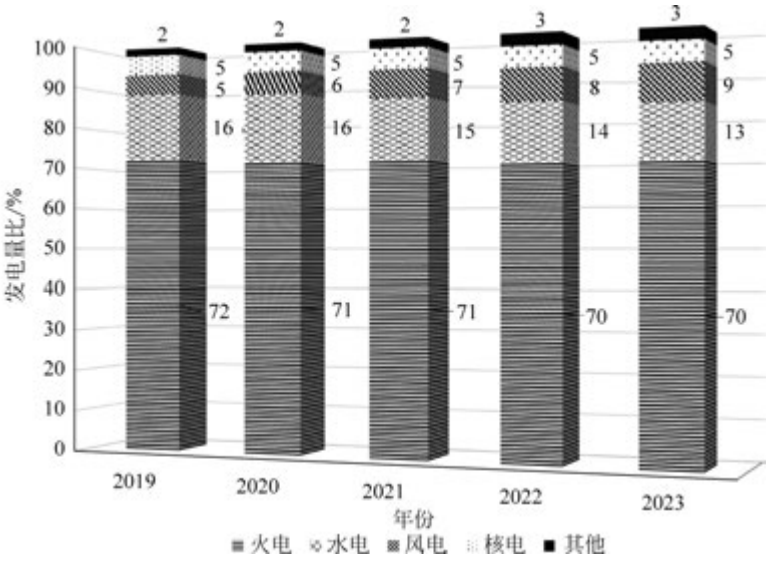


图 2-6　我国近 5 年各种类型的发电量比重

机转子转动，带动发电机发电。在膨胀过程中，蒸汽的压力和温度不断降低，最后乏汽排入凝汽器。由热力学定律可知，工作蒸汽和乏汽之间的温差越大，对外做功越多。因此，在凝汽器中，要用大量的冷却水将乏汽强制冷却成凝结水，然后由凝结水泵抽出来送到除氧器中把溶解在水中的氧气除掉（避免锅炉水管内壁氧化生锈而引起腐蚀），再经给水泵升高压力，达到锅炉蒸汽系统规定的压力标准后打回到锅炉中重新加热蒸发。这样，工质经过锅炉—汽轮机—凝汽器—除氧器—水泵这条线路不断流动便构成了火力发电厂的汽水循环系统。这个系统中用的水必须经过沉降、过滤、软化（除盐）等水处理设备去除有害杂质。运行中损耗的水要及时补充。

2）燃料及燃烧系统

燃煤电厂需设立煤场和灰场。煤从煤场由皮带机输送到锅炉房后进入磨煤机磨成很细的煤粉，再和通过空气预热器预热的空气混合，由喷嘴进入炉膛燃烧。高温烟气在锅炉中把热量传给水和蒸汽后，经过除尘器、引风机，最后经烟囱排入大气。炉渣和除尘器下部的细灰通常由灰渣泵排至灰场。

3）发电及输配电系统

发电机由汽轮机驱动发电，所发出的电能中电厂自用约 10%，其余均由输配电系统输出。小型发电厂往往采用发电机电压（3.15kV、6.3kV 或 10.5kV）输电，输电距离为 1.5～5.0km，故厂址一般都靠近用户。大型骨干电厂的供电范围一般都较大，这就要由主变压器升高电压后，经高压输配电装置和输电线路并入电网。电厂自用部分通常由厂内变压器降低电压后，经配电装置和电缆供厂内各种辅机及照明等用电。

火力发电厂是一个巨大的机电系统，除锅炉、汽轮机、发电机三大主机外，还要有供水、输煤、除灰、水处理、厂用电、仪表和控制等辅助生产系统。

火力发电厂的生产组织往往按设备分成若干分厂并各负其责：燃料分厂设有燃料运输、装卸、转运等机械设备及燃料储存场地；锅炉分厂装有锅炉、煤斗、燃料加工、通风和除

灰等设备；汽机分厂装有汽轮发电机组、冷凝器、循环水泵和冷却塔；电气分厂装有变压器配电设备、继电保护装置、自动化和远距离控制装置及电气仪表等；化学分厂管理水处理设备及化学分析工作；热工分厂管理全厂的热工测量仪表及自动控制装置；修配分厂负责全厂设备部件的修配保养。

2. 火电厂的运行

1）机组的启动和停止运行

火电厂机组的启动包括锅炉点火、升压、并入汽轮机供汽母管（当锅炉压力接近母管压力时，开启锅炉出口阀门，即并入母管）、汽轮机暖管、暖机（汽轮机在启动后必须在锅炉蒸汽温度下运行20～40min，使汽轮机温度逐渐升高）、升速、发电机与电力系统并网、带负荷等一系列过程。由于锅炉与汽轮机体积大、部件重，且结构复杂、精密，因此启动和停机不能太快，以保证各个部件的温度均匀变化，防止因膨胀或收缩不均而发生变形、弯曲、连接部位松动、动静部分之间摩擦等不良后果。

2）火电厂的安全运行

火电厂生产过程复杂，主、辅设备较多，任何一台设备发生事故，都会不同程度地影响安全运行。为了保证电厂安全运行，要特别注意防止各种恶性事故的发生，例如：由于结垢、腐蚀、磨损和超温造成炉管爆炸事故；锅炉灭火后处理不当，造成炉膛爆炸事故；由于自动调节失灵和判断、操作错误，造成锅炉缺水、满水事故；由于调速系统和危急保安器同时失灵，致使汽轮机因严重超速而损坏；由于长期低频率、过负荷运行或严重腐蚀等造成汽轮机叶片断裂事故；由于润滑油系统故障等原因，造成轴瓦烧坏或火灾事故；长期过负荷、超温运行，使绝缘材料加速老化，造成发电机或主变压器烧坏事故；由于用电中断，造成局部或全厂停电事故；由于带负荷拉隔离开关等误操作，造成人身伤亡事故、设备损坏或停电事故等。

3. 提高火力发电厂效率的途径

发电的过程实质上是能量转化和传递的过程。电力工业的产业特性决定了电力工业的技术进步是一种生产过程的技术进步，其结果主要体现在生产效率的改进方面。具体到火电，则是从燃料取热，以热换电，其过程必然受到热力学基本定律的支配。热力学第一定律（即能量守恒定律）阐明：能量具有多种形式，它们可以互相转化，但不能无中生有，也不会消失。在系统总体中，其总量维持不变，因而不同的能量可以相加减。这个定律规定了能量转化的数量关系，但没有指明转化的方向性。其实，各种形式的能量彼此转化是有可否、难易之分的。能量转化的方向性由热力学第二定律阐明：在热机系统中，热能只能有一部分转变为机械能（或电能），余下的热能要传给系统中温度低于热源的其他物体，热源与该物体之间的温度差异越大，热机的出力（即输出的机械能或电能）就越大。热效率：$\eta=W/Q_1=(Q_1-Q_2)/Q_1=1-Q_2/Q_1=1-T_2/T_1$。当然，这是假设为理想热机的理想热效率。实际热机中，传热往往不是在等温条件下进行的，再加上摩擦、漏气、散热等各种各样的热损失，实际热效率比理想热效率要低得多。尽管如此，热力学基本定律仍为提高火电厂效率指明了方向。

1）主力电厂宜发展大功率、高参数发电装置

主力电厂一般都是凝汽式电厂，以单纯发电为目的。燃煤取得的热主要用于工质（水）汽化所需增加的汽化热（单位质量的液体在温度保持不变的情况下转化为气体时所吸收的

热量)。蒸汽推动汽轮机做功后压力降低,体积膨胀,已经不能再做功,但须经凝汽器将乏汽中仍潜在的汽化热(每千克乏汽含汽化热 2×10^6J 以上)用冷却水带走,才能使其再变成水而实现工作循环。这便构成了发电过程热损失的最大一部分,约占总损失的一半(见表 2-4)。加大热机热端与冷端的温差,可以提高热机的出力。提高蒸汽压力,还可以大大降低水的汽化热,同时提高蒸汽温度。例如,水在 1.0×10^5Pa 下,于 100℃沸腾,转化为蒸汽需汽化热 2.27×10^6J/kg;而在 1.0×10^7Pa 下,沸点提高至 310℃,汽化热仅需 1.33×10^6J/kg;若压力能达到 2.25×10^7Pa,沸点则达到 374℃,汽化热降至 0,此压力称为临界压力(见表 2-5)。提高进入汽轮机的蒸汽参数(温度、压力),意味着所需付出的汽化热减少而蒸汽所含能量提高,但此时末端排气潜热损失增加得不是很多。因此,转变成机械能的热量就相对增加,从而提高了发电效率。提高蒸汽参数的另一项措施是采用蒸汽中间再热。中间再热就是把在汽轮机内已经部分膨胀后降低了汽压、汽温的蒸汽引入锅炉内的中间再热器中重新加热,使汽温提高到初始蒸汽温度,然后再引入汽轮机的中、低压部分继续做功,中间再热可提高效率 5%～6%,同时可以降低汽轮机低压部分蒸汽的汽温,有利于安全生产和经济运行。

表 2-4　火电厂的各项损失与发电效率

项　　目	中温中压电厂	高温高压电厂	超高压电 厂	亚临界压力电厂	说　　明
锅炉热损失/%	11.0	10.0	9.0	8.0	这四项损失主要与机组容量有关,较大的机组损失比较小,表中所列数据为粗略的平均值
汽轮机的机械损失/%	1.0	0.5	0.5	0.5	
发电机损失/%	1.0	0.5	0.5	0.5	
管道系统损失/%	1.0	1.0	0.5	0.5	
汽轮机排汽热损失/%	61.5	57.5	52.5	50.5	主要决定于蒸汽参数
总损失/%	75.5	69.5	63.0	60.0	
发电效率/%	24.5	30.5	37.0	40.0	

表 2-5　不同压力下水的汽化热

压力/Pa	沸点/℃	汽化热/(J/kg)	备　　注
1.0×10^5	100	2.27×10^6	
1.0×10^7	310	1.33×10^6	
2.25×10^7	374	0	此压力称为临界压力

实际上,汽轮机输出的功还需扣除风机、水泵、除尘、消除污染等装置的自身耗功才能得到净输出功。单机容量增大、蒸汽初温增高、输出功大、自耗功相对减少,装置效率亦可提高。这可由耗费的蒸汽量间接说明(见表 2-6)。

表 2-6　不同容量机组耗用的蒸汽量比较

机组容量/kW	蒸汽温度/℃	蒸汽压力/10^5Pa	耗汽量/(t/h)
1.0×10^5	540	100	400
2.0×10^5	540	140	670

初步估算,仅提高我国现有汽轮机效率的 1%,每年就可多发电 500 亿 kW·h 以上。

“大机组、大电网、高电压”成为现代电力系统的特征,60 万 kW、120 万 kW 机组成为主力机组。但是,近几年世界各国的经验表明,这个趋势不会再向前发展。因为种种研究表

明，机组的单机容量已达到饱和，最终将由电网的可靠性决定极限。

2）发展热电厂宜采用热电联供

为了提高蒸汽轮机电厂的燃料利用率，人们采取了许多措施，如将燃烧后的烟道气多次热利用、改进蒸汽热力循环（蒸汽重热、抽汽回热给水）等，系统也越来越复杂。即便如此，以发电为单一目的的凝汽式电厂的发电效率最多也只能达到40.0%（见表2-4）。于是人们将思路转向提高燃料利用率，即改变电厂单一发电的经营方向，实现电热并供。火电厂既供电，又供附近工厂生产和居民生活所需的蒸汽、热水和取暖用热，这些蒸汽的温度低于300℃，完全可以由电厂蒸汽轮机抽汽或排汽供应，取代原先零星分散的中、小型供热锅炉。不供热的火电厂凝汽器则用大量冷却水，约带走燃料产生热量的一半。排水热量虽可用于农业、渔业，但需另外投资；若不加以利用直接排入江河，则会造成热污染。热电联供同时解决了上述两个问题。热电联供的思路同样依据热力学定律。由于现在技术上不可能将蒸汽轮机的冷端降到绝对零度（－273℃），因此热效率就不可能很高。但是，汽轮机排汽中仍蕴藏着巨大的潜能。常压下将1g水加热到沸腾需热量420J，但驱动汽轮机后的乏汽保持着气态，其内部蕴藏的汽化热仍有2500多焦。实现联合供电供热后，由于热电厂供热的热量是由凝汽电厂排汽部分获得，所以将原本提供这部分热量的用煤扣除后，“纯”发电所需能耗就会大幅度下降。燃料总利用率可以提高到60%以上。例如，芬兰在发展火电站时做了联合供电供热的安排，电热并供电厂的发电量接近全部发电量的1/3，节约的能源可达全国能耗的7%。

3）发展全能利用系统

热电联供可获得很好的经济和环境效益，但是实施起来受到城建的限制（主要是供热管网的铺设）。问题的解决往往不止一条途径，但要通过对规律认识的进一步深化开辟道路。我们通常将能够得到较高温度热源的能源称为高品位能源，较低温度热源的能源称为低品位能源。人们已经注意到，应该合理利用不同品位的能源，使之物尽其用。例如，地热，温度大多在20℃以下，是低品位能源，用来发电不可能有高的热效率，但用于取暖就比较合适。反过来，若用高品位能源来取暖，那就是大材小用了。我国目前取暖供热的主力能源是煤。煤的品位是比较高的，这样利用不尽合理，但这又是由我国的资源情况和目前的能源结构所决定的。短时间内不可能用太阳能、地热能等新能源代替。对于这样的两难问题，如果将思路改变一下，就会发现大有潜力可挖。在能源利用中，不仅应考虑能量，还应考虑能质。目前通用的水暖锅炉燃烧的是可超过1000℃的高热值燃料，这其实是将高品位能源当作低品位能源使用了，能差未被利用。有效能损失是一种极大的浪费。如果把高热值部分首先抽出来生产高级能源电力，再把排出的“废物”（汽或水）用于采暖，按照能量梯级利用的原则，就可在满足采暖需求的同时得到大量廉价的电力，即挖掘出能质的潜力。全面利用就是综合考虑能质和能量两个方面的利用，即根据实际需要和能源潜力，实行优化组合，高值高用，低值低用，让每克宝贵的燃料尽可能产生最大的效益。

如前所述，热电联产是提高能源利用率的重要措施。过去我国建的大多是大型电厂，但热电联产并不是只有大才会效率高。结合我国的具体特点，采用热电综合利用、小区集中供热也是实现能源梯级利用，提高能源利用率的有效途径。具体来说，在我国北方地区冬季需要暖气供暖，按目前的供热成本，国家均要补贴。而采用热电联产，使单纯供暖的锅炉房变成既能发电又能供热的综合系统，即锅炉的过热蒸汽带动汽轮发电机组发电，将凝汽式汽轮

发电机组尾汽的冷却水通往楼内的热交换器用来取暖(按供暖要求确定冷却水的温度)。采暖后的废热还可用于温室大棚种植蔬菜和发展温室养殖业,如养鱼育苗等。这样就可以充分合理地利用能源了。每千克燃煤既发电又供暖,比单纯发电或供暖效率可提高1倍以上,通常能源利用率能达到70%,发电和供暖成本也会大大降低。这个方案已取得了很好的实际效果。例如,清华大学开发了区域锅炉房小区热电联产集中供热系统,利用大修的机会改造了一个供热锅炉房,供热面积$1.6\times10^4 m^2$,发电装机容量1500kW。一个冬季发电500多万kW·h。由于发电要求稳定,所以供热质量也高于往年,用供暖余热开发的温室的经济效益也很好。

这种全能利用系统同样适用于需要用热、用汽的工矿企业,如造纸、橡胶、纺织、印染、化工等工厂,均可一厂或数厂联合,搞热电联产,不仅能满足工艺过程对热的需要,还能补充生产所需的电力。例如,辽宁丹东化纤厂建成了2台1.2万kW供热机组,不仅保证了厂内用汽、用电的需要,还有盈利。鸭绿江边的一家大型造纸厂采用热电联产后,往外送电送热,一年就可增收上千万元。在南方炎热地区,还可采用冷电联产系统,首先利用汽轮机发电,其排汽用于制冷,制冷过程中通过热介质交换得到的热水又可以用来洗澡等。这个系统对乡镇也有现实意义。现在全国有3万多个乡镇,城市化步伐加快。如果乡镇合理组织,发展集中供热和热电联产,不仅能改善总体能耗结构,保证居民和乡镇企业的用热、用电,废热还可促进种植业、养殖业的发展,生态环境也可大为改观。

4) 结合城市建设和改造综合考虑,发挥规模效益

能量利用系统是一种聪明的系统优化思想,并不局限于燃煤的供热系统。但是,上述做法又是在城市未做集中供热安排的情况下的补救措施,几十吨的小锅炉效率是不可能很高的。所以应结合老城改造考虑城市能源战略的转换,增设输热管网,尽量建立大容量、高参数的热电联产电厂,在原动机和燃料梯级利用上做文章,发挥规模效益。对新建城市,则应作好规划,不失时机地加以采用。

4. 火力生产的综合观

火力发电厂的生产不但内部需要严格配合协调,而且外部与自然条件、自然资源及地区建设计划、动力系统规划等也都有密切的关系。因此,要综合燃料供应、水源、交通运输、电力和热力负荷、除灰、出线、地质、地震、地形、水文、气象和综合利用等条件,予以全盘考虑。

1) 火电生产与水

发电厂的用水主要是供给汽轮机凝汽器的循环水和发电机润滑油的冷却用水,消耗量视汽轮机的容量及型式而定。例如,40万kW凝汽式电厂的冷却水每小时需6万～8万t。这么多水若直接排放,不仅会造成极大的浪费,还会造成热污染。因此,必须循环使用。对于非热电厂,冷却水热了以后,必须冷却才能再用,因此必须设立大型冷却塔。在这里,冷却水的蒸发量也是惊人的,每秒数以吨计。随着技术的升级,出现了风冷式冷却塔,使发电厂对水的依赖程度也得到了较大缓解。

保证发电厂用水是很重要的。大、中容量电厂的供水水源必须落实可靠,水源不充分的地方不能建电厂,很多地方的发展因此受到制约。在确定水源的供水能力时,应充分掌握当地的农业、工业和生活用水情况,在规划部门统一安排下,合理分配用水,并应考虑水利规划对水源变化的影响和水利资源的综合利用。在地表水最小流量(天然或调节)的保证率为97%时,地下水在枯水年时,都应采取特别措施保证发电厂满负荷运行所需的水量。依托河

湖直流供水的发电厂应尽量靠近水源。

2）火力发电与燃料供应

火力发电厂所用的燃料主要是煤、油和天然气3种。目前全世界的情况是燃煤和燃油、燃气的电厂约各占一半，我国已明确今后以燃煤为主。使用不同燃料的锅炉结构、辅助设施和工艺过程均不相同，因此在规划时就要确定好燃料类型。如果以后再改，不但近乎重建，浪费极大，而且可能因场地布局的限制，使改造无法实施。

燃煤电厂的耗煤量是巨大的。以每千瓦时发电煤耗380g标准煤计，燃用发热量为2.1×10^7J/kg的煤，10万kW机组日耗煤量近1400t，即近一列普通火车的载重量；100万kW装机的年耗煤量为300万t，相当于一座特大型矿井的年产量。如用劣质煤（发热量$9\times10^6\sim1.7\times10^7$J/kg），则耗煤量更多。这样巨量的煤耗，不仅宏观上要考虑煤炭的生产和运输，电厂也必须建立相应的配套工程。

（1）装卸

10万kW电厂的用煤若用人工装卸，须设200人的专业装卸队。用翻车机可实现不解列卸煤，但只限于安装有旋转挂钩的专用煤车。使用底开门的列车，减速至0.8～5km/h可自卸，煤场及卸煤线都应与之配套。

（2）煤场

大型火电厂的煤场占地面积很大。煤场中的铁路线，包括卸煤线、空车停放线和调车线，总长超过20km，还需配置各种机车、装卸机械。

（3）除灰

火力发电厂的灰量是极大的。10万kW电厂日产灰量200～250t，年产灰量7万～8万t，灰场占地按堆高5m计，年占地1.3～2.0hm^2；100万kW电厂日产灰量1000～1200t，年产灰量40万～50万t，灰场年占地达6～10hm^2。储灰场可分期建设，应能存放10～20年按规划容量计算的灰渣量。电厂灰渣可用来制砖和水泥，应开展综合利用。如采用水力运灰，在运距小于2km时，每吨灰需用水15～16t，用电15～20kW·h。

因此，大型燃煤的凝汽式发电厂应尽量靠近煤矿。电厂燃用高发热量燃料时，厂址靠近电力负荷地区是合理的。一般燃用低发热量燃料（褐煤、泥煤、劣质煤、页岩等）的电厂，厂址以靠近燃料产地为宜，通常称为坑口电站，力求做到煤通过皮带运输机直接输送。

3）火力发电与环境保护

生态的破坏和环境的污染是现代工业社会一个极其严重而又普遍的问题，并且与人类能量消耗的增加有直接关系。人们很长一段时间内只看到能源生产给社会发展带来的好处，但对其给社会、经济、生态带来的长期影响未多加注意。近几十年来，世界能耗量剧增，而且集中在人口较密集的工业区，经年累月就出现了比较严重的长远性影响。能源中的污染源进入空气、水体和食物链，造成了人类和生物急、慢性病变和变异；柴草林木的过量采伐引起了生态破坏；等等，这些对几代人都将产生影响。我们应该看到，这是一个全球性的问题。一个国家排放的污染物、生态的破坏会影响到其他国家。现阶段，全世界的电厂仍以燃煤为主。我国的电力构成中约70%是煤电，而这个构成在短期内不可能改变，因此治理燃煤产生的污染已成为电力工业所面临的极重要的问题。我国政府已将发展洁净煤技术列为电力科技发展的战略目标之一。造成环境污染和生态平衡破坏的原因和形式很多，这里就火电生产过程中，原料的开采、加工、运输和利用等环节与环境的关系来讨论这个问题（见图2-7），其他部门的生产过程也要注意从这个角度加以考虑，这里不再赘述。

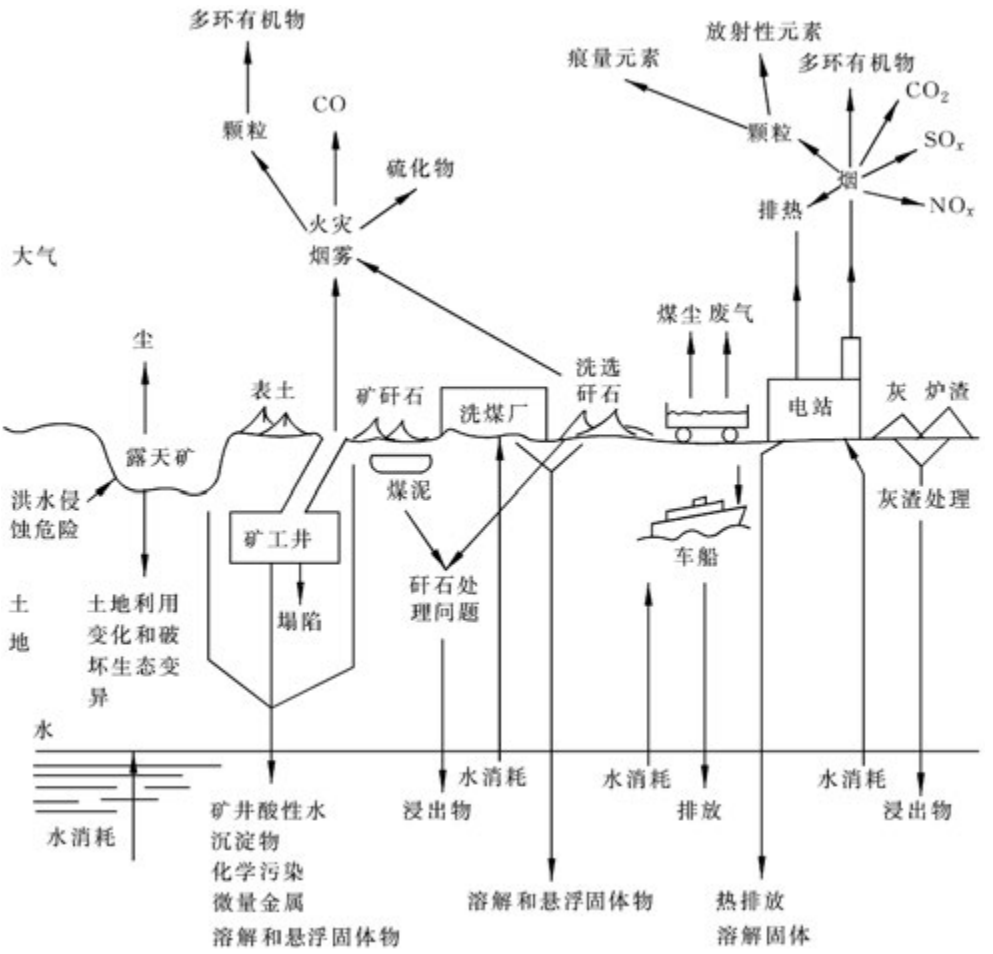


图 2-7　火电生产中煤对生态环境的污染

(1) 燃料开采过程中的环境影响

采煤过程的社会环境影响包括两个方面的内容，即开采过程的事故与职业性伤亡，以及地面或地下生态系统的破坏。前者以井下采煤最为严重，后者以露天采煤最为明显。煤矿的事故率和职业病危害比较严重，主要有火灾、爆炸、崩塌、下沉、涌水、噪声、黑肺病、矽损害等。煤矿井中空气含尘量如能小于 $2mg/m^3$，可不发生黑肺病，但这个标准一般很难达到。构成噪声污染的标准为白天高于 70dB，夜间高于 55dB，而煤矿中的噪声可达 90～100dB。长期遭受噪声不仅会对人耳造成伤害，还会导致高血压、心血管病、神经衰弱和内分泌紊乱等疾病的产生。

此外，煤矿废水的影响也不容小觑。煤层渗水必须排出。井下为了除尘、防尘、洗矿，每吨煤需水 100～150kg。洗矿水不应排放入江河以免造成污染，宜沉淀回用，使之形成闭路循环，或用石灰、烧碱等处理后再排放。美国阿巴拉契亚地区 1.7 万 km 河流，有 1 万 km 已被井下和露天矿的矿坑水所污染，致使水生生物减少甚至灭绝。原油开采过程中的井喷和溢油，不仅会造成原油损失、人员伤亡，如发生在海上油田，还会破坏大片海域的生态平衡，对环境的影响亦不能忽视。

（2）燃料运输过程中的环境影响

煤炭运输不但会占用大量运力，消耗大量能源，而且在堆存和装卸中还会扬尘和浸水，从而造成煤的损失和大气与水体的污染。但比较起来，目前石油的运输对环境的影响更为严重。随着石油海运量的增加，因油船事故和油船外排压舱水、洗舱水而进入海洋的石油量已显著增加，每年竟达数十万吨。油浮于水面随风及海流扩散的同时挥发出一部分烃类，还有一部分低分子烃类则溶解在水体中，不仅鱼、鸟、植物深受其害，还会污染海岸和港口。清除海上溢油的费用很高，约需1000美元/桶。

（3）燃料利用过程中的环境影响

① 污染物排放。火力发电厂废气、废渣、废水的排放量是惊人的。一座240万kW的火电厂，如不加以控制，每小时排放的SO_2达7～12t、灰尘70～80t、废渣150t、各类废水100t。

② 温室效应。目前大多数火力发电厂是直接将燃煤燃油转化为电能、热能供人们使用。燃料燃烧还引起了一些影响面更大的问题。在燃烧中碳转变为CO_2进入大气，CO_2是一种长寿命物质，寿命在200年以上，一旦产生，就会持续影响数代人。近百年来，燃料用量的激增和森林的大量破坏，已使地球每天产生的CO_2与海洋及绿色植物这两大CO_2转化站的调节功能失衡，大气中的CO_2浓度日渐增加。这一改变使大气层更多地吸收红外辐射，并将其反射回地面，从而干扰地球的热平衡并使平均气温升高。换言之，这种现象具有与玻璃暖房相似的作用，所以称为温室效应。由于我们对其认识尚不深入，而其结果又较难预测，所以，在处理这类问题上，要更加谨慎，更加重视自然界给我们的启示。

③ 热污染。火电厂运行中耗用能源的热能仅有1/3被有效利用，其余均成为“废热”。目前许多火电厂通过冷却水把“废热”排入河流、湖泊或海洋。这种废热进入水域时，其温度比水域的温度平均高出7～8℃，因此，水中的鱼类会因升温或电厂事故时突然降温而死亡。此外，由于水域周围环境的温度升高，栖息在该地区的昆虫将提前苏醒，而远离该地区的本应先苏醒的昆虫仍处于休眠状态。昆虫的这种苏醒次序错乱会造成有关生态系统中食物链的中断，使提前苏醒的昆虫大批死亡，甚至灭绝。这是一般热污染共有的对环境的不良影响。

④ 酸雨。化石燃料燃烧时排出的气体废物中，以硫氧化物数量最多，其次是氮氧化物和氯氧化物，它们可随风扩散。这些物质在一定条件下通过化学反应生成硫酸、硝酸和盐酸，并附在水滴、雪花、微粒物上随降水落下，形成酸雨（降水的pH＜5.6的都称为酸雨），有的地区酸雨的pH值已到3以下。酸雨对环境和人类的危害是多方面的，已成为十分严重的问题。例如，改变土壤的酸碱性，危害作物或森林生态系统；改变湖泊、水库的酸碱性，并使某些湖泊底泥中铝的溶解量增加，不利于鱼类及其他水生生物的生存；对钢铁构件和建筑物有极大的腐蚀作用；空气的酸度增大会造成雾量增加，甚至改变地区的气候；此外，酸雨渗入土壤时还能将重金属带入蓄水层，污染地下水，从而危及人类健康。以化石燃料作为主要能源，在最近几十年不会有根本的改变，而大气污染的范围又不受国界的约束。因此，为了扭转酸雨公害的局面，一方面要求有关国家各自行动起来采取必要的措施，另一方面则必须进行国际的协作。

（4）煤炭高效、洁净燃烧及污染排放控制

煤炭高效、洁净燃烧与发电是洁净煤技术的核心，采用先进的燃烧器改进电站锅炉的设计和燃烧技术，减少污染物排放并提高效率，是改造传统设备的重要方法。这方面已取得一

些进展，如我国开发的先进的层燃锅炉，热效率可提高 10%，排尘浓度可降低 60%，SO_2 可减排 40%。流化床燃烧技术是将煤与吸附剂（石灰石）加入燃烧室的床层，自炉底鼓风使煤悬浮进行流化燃烧，提高燃烧效率并以石灰石固硫来减少 SO_2 的排放。最令人瞩目的发展当数整体煤气化-蒸汽联合循环技术，它是高效的联合循环和洁净燃烧技术相结合的一种先进发电技术。煤气化后依次通过燃料电池发电、燃气轮机发电、汽轮机发电，实现能量梯级利用，大幅度地提高燃煤电厂的热效率并使污染问题得到解决。采用此方法有可能是 21 世纪的主要发电方式。洁净煤技术是一项多层次、多学科的技术，包括常规技术、高新技术和某些尖端技术。其开发也是一项跨部门的系统工程，技术难度大，投入多，开发周期长，只有全面规划、通力合作才能取得进展。《“十四五”现代能源体系规划》中也指出，工业污染防治水平要提高，逐步从生产末端治理转到源头和生产全过程的控制，把分散治理与集中控制结合起来，把浓度控制和总量控制结合起来，并把燃煤所造成的污染防治放在突出位置。

2.3.2　水力发电

水力发电的基本原理是利用水位落差，配合水轮发电机产生电力，也就是利用水的势能转变为水轮机的机械能，再以机械能推动发电机而得到电力。科学家们利用水位落差的天然条件，有效地利用水力工程及机械物理原理等，精心设计生产出供人们使用的廉价又无污染的电力。而低位水通过吸收太阳能进行水循环分布在地球各处，从而恢复高位水源。水电厂类型繁多，按集中水头的方式分类，可以分为堤坝式水电厂、引水式水电厂、混合式水电厂、潮汐水电站和抽水蓄能电站；按径流调节的程度可分为无调节水电厂和有调节水电厂；按照水源的性质，一般分为常规水电站（即利用天然河流、湖泊等水源发电）、潮汐水电站和抽水蓄能电站；按水电站利用水头的大小，可分为高水头（70m 以上）、中水头（15～70m）和低水头（低于 15m）水电站；按水电站装机容量的大小，可分为大型、中型和小型水电站。一般将装机容量在 5000kW 以下的称为小型水电站，5000～10 万 kW 的称为中型水电站，1 万 kW 或以上的称为大型水电站或巨型水电站。

目前我国水电可开发量为 6.87 亿 kW，其中西南地区占全国的 69.3%。未来我国水电开发的“主战场”将转移至高边坡、高海拔、大温差等高山深谷区域，开发难度和成本也将更高。截至 2021 年底，全国水电总装机容量约 3.9 亿 kW，同比增长 5.6%，年发电量 13401 亿 kW·h，居世界第一位。截至 2022 年底，全国水电总装机容量约 4.1 亿 kW，同比增长 5.8%。《“十四五”现代能源体系规划》中提出，因地制宜开发水电，实施小水电清理整改，推进绿色改造和现代化提升；预计到 2025 年，常规水电装机容量将达到 3.8 亿 kW 左右。

在普通水电站的基础上加装水泵水轮机就形成了抽水蓄能电站。抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的电能将水抽至上水库，在电力负荷高峰期再放水至下水库发电。作为目前技术成熟、经济性高、环保无污染的大规模储能方式，抽水蓄能可以将电网负荷低时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能，已成为我国占比最高、应用最广泛的储能类型，也是解决新能源消纳最为成熟的储能方式。

近年来，中国抽水蓄能装机规模稳健增长（见图 2-8）。2021 年，国家能源局印发《抽水蓄能中长期发展规划（2021—2035 年）》，为抽水蓄能产业发展、建设与运行提出了清晰的时间表、任务书和路线图，是指导抽水蓄能行业发展的纲领性文件，对推进我国抽水蓄能高质量发展具有重要意义。截至 2023 年底，我国抽水蓄能累计已投运规模达到 5046 万 kW，约

占全球抽水蓄能装机的28.1%，位列全球首位。抽水蓄能产业已经成为我国新能源基础设施网络的重要组成部分。

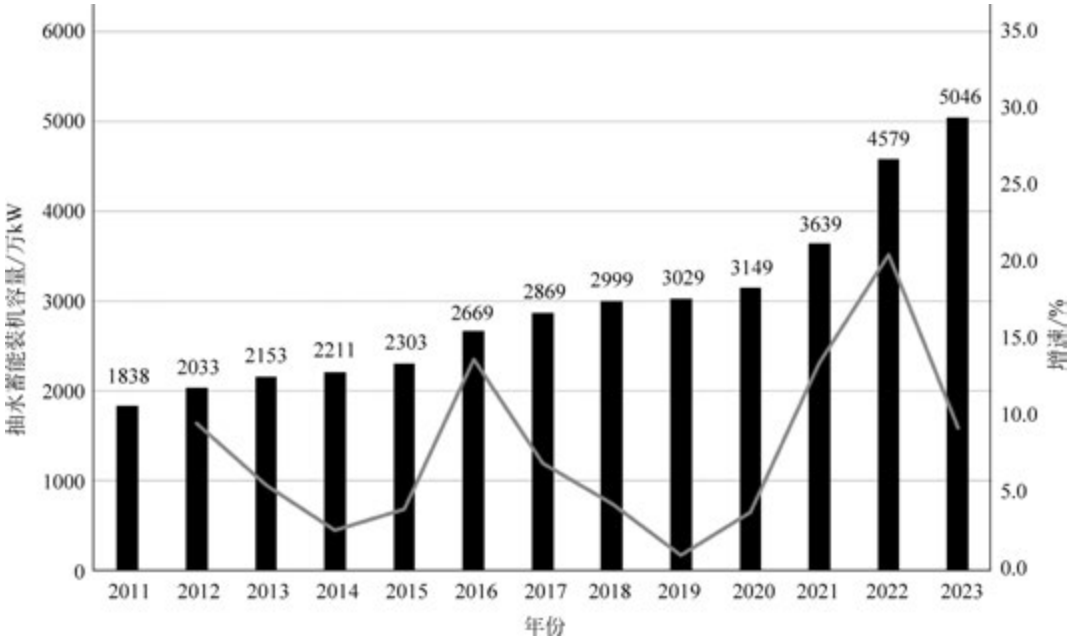


图2-8　2011—2023年中国抽水蓄能装机容量

1. 水力发电的基本生产过程

水力发电是利用江河水流在高处与低处之间存在的势能差进行发电，将一次能源开发和二次能源转换同时进行，也可以说它是一种“特殊的采掘工业”。构成水能的基本条件是河水的流量和落差。流量是河流中指定地点每秒内流过的水量；落差是河段中水流降落的高度，也叫水位差或水头。流量和落差的大小决定了水能的大小，水电站的发电功率(kW)约为利用流量(m^3/s)与利用水头(m)乘积的8倍。水力发电的基本生产过程大体可划分为4个阶段：

第一阶段为集中能量阶段，即取得河川的径流(指陆地接受降水后，从地表或地下排泄的水流)。河川径流是由集水面积、降水量及其他影响径流的因素综合决定的。集水面积不是地理面积，而是能源，相当于火电站的采煤和运煤。所以集水面积内一切变化，如各取水用水部门的情况、径流量及流量的变化等，都很重要。水电站除了不可改变的流量损失外(如水库的蒸发、水库及坝的渗漏等)，应尽量设法减少其他流量损失，以提高流量利用效率。

第二阶段为输入能量阶段，即集中水头和流量，并输送水能至水电站。由于水流通过一系列的水工建筑物——壅水坝、进水口、水工闸门、输水建筑物等，把水能送至水电站机组，沿途各种水压和流量的损失使水电站机组净得的输入能量减少，因此水工建筑物对水电站运行的经济性有极大的影响，是电站运行生产过程中的主要水能问题之一。

第三阶段为变换能量阶段，即将水能转变为电能。厂房和动力设备是第三阶段的主要组成部分。水能通过水轮机转换为机械能，而后驱动发电机发出电能。

第四阶段为输出能量阶段，即将电能的参数变换后送到用户。这一阶段包括从发电机

发出的电能经过输电站、变电站、配电站后送出的整个过程。

水电站的建筑必须因地制宜。水工建筑物的形式必须与河流的自然条件相适应，常见的有堤坝式、引水式、混合式等形式。水电站坝址地形、地质条件对水电站建设的形式、工期和造价有决定性的影响，因此前期工程十分重要。有些工程的勘测论证需要 5～10 年的时间，耗费占工程总投资的 2%～3%。

水电站的造价现在有所上升，但比火电站、核电站投资上涨幅度相对较小。而且火电、核电对环保要求高，燃料涨价多，还要考虑煤矿、油田、核燃料等一次能源开发和运输的投资。所以建造水电站合算不合算，要从整个生产过程来看。

水电站既有水利和水产方面的综合效益，也有淹地、阻航和生态方面的影响。船舶航运和鱼类洄游产卵须有专门的渠道、闸门。水库还存在水体缺氧、渗漏、淤沙等问题，对下游水量也有影响，生态也会随之变化。大型水库还对地震、滑坡有诱发作用。在大型工程建设项目中，如三峡水利枢纽工程的巨型边坡开挖、大型地下厂房的修建等，都要考虑该地区现在作用着的地应力。在移走现存的岩石以后，这些地应力将发生什么变化？这些地球动力学问题也是工程技术人员应该关注的。

所以，建设水电站一定要考虑洪水管理、航运、水库综合利用、生态环境等一系列问题。水电站开发周期长、投资大，必须慎重规划，积极运作。过去我国电力行业在水、火投资比例上长期存在争论，由于资金短缺，水电建设速度不够理想。其实，我国目前水电建设投资按容量比大约是火电投资的 1 倍，但加上煤矿、运输等因素，无论是投资还是建设周期，二者都相差无几；而在发电成本、环境保护、综合利用等方面，水电明显优于火电。所以，优先开发水电，特别是建设离负荷中心较近的大、中型“富矿”河段的水电站，应是电力工业发展的优先选择。

2. 发展小水电

根据 2021 年公布的第七次人口普查数据，我国居住在乡村的人口约为 5 亿，而农业电气化水平也在逐年提高。尤其是近十几年农村城镇化进程加快，非农产业崛起，对能源的需求更为迫切。如不能自行消化，靠与大电网争电，不仅国民经济的骨干企业会受到影响，乡镇企业的发展也会受到限制。偏远山区用电分散，若由大电网供电，架设输电线路的费用会成为主要矛盾。因此，农村小水电具有格外重要的地位。

我国的小水电资源分布很广，在全国 2000 多个县(市)中，有 1500 多个县可开发的小水电资源，其中可开发量在 1 万 kW 以上的县有 1100 多个。发展小水电可以充分利用我国许多分散的水力资源，这对改变大电网难以到达的偏远山区的落后面貌，对发展农村和地方经济，全面改善我国农村能源紧缺的状况，都有显著的效果。

2021 年，有 254 座水电站被评为“绿色小水电示范电站”。2022 年，有 134 座水电站被评为“绿色小水电示范电站”。2023 年，全国新增 130 座绿色小水电示范电站。但是，我国农村小水电资源的利用还是不够的。在小水电的建设方面还存在一些亟待解决的问题，主要有：

(1) 产业定位不准，其公益性和社会性地位没有得到确认。

(2) 管理体制不顺，部门职能交叉、职责不明、分工不清。

(3) 自身条件限制，需要建设、生产成本，存在丰枯矛盾、技术和管理不足。

(4) 大小电网的协调不足，受到大电网的挤压、电量限制、压低电价等。

(5) 激励机制缺乏，未被列入可再生能源范畴，不能享受优惠电价等。

(6) 国家投入不足，未被列入各级财政预算和计划，获得的资金支持有限。

2.3.3 核能发电

核能是由原子核发生变化释放出来的能量，分为聚变能和裂变能。核能发电是利用核反应堆中核裂变所释放出的热能进行发电，是实现低碳发电的一种重要方式。目前商业运转中的核能发电厂都是利用核裂变反应来发电。截至2025年底，中国核电装机容积累计达到6248万kW，中国大陆运行核电机组共59台，累计发电量为4852亿kW·h，占全国累计发电量的4.6%。中国核能发电进展较快，2021年发电量居全球第2位，但发电量占比远低于世界平均水平，更远低于法国(69.33%)、美国(18.59%)。

1. 核能发电的基本生产过程

核能发电主要是将原子核裂变反应产生的原子能转变为热能，将一回路工质(轻水、重水、氦气、钠等)加热，一回路和二回路换热后加热二回路工质，然后同一般火力发电厂一样，推动汽轮机，带动发电机发电。原子能发电厂与火电厂在构成上最主要的区别是前者用核蒸汽发生系统(反应堆压力容器、蒸汽发生器、泵及管道等)代替了后者的锅炉。反应堆的核心部分是堆芯，由燃料组件和控制棒组件构成。燃料组件中的核裂变燃料根据设计要求可以是不同丰度的低浓缩铀或其化合物，外表用耐热耐蚀的锆壳密封。控制棒由驱动机构进行升降，调整能够吸收中子的特定吸收剂材料的插入深度，以控制核燃料链式裂变反应的速率，达到开堆、停堆和调整反应堆功率的目的。反应堆中常以水、重水或石墨作为中子慢化剂，以水、重水或氦气作为载热剂，分别组成所谓的沸水堆、压水堆、重水堆、高温气冷堆等各种类型的反应堆。在核电站厂区布置上一般分为核岛和常规岛，核岛又称一回路系统，其核心是一个封装在钢壁厚200mm压力壳中的反应堆。主泵将高压主冷却剂(一回路水)送入反应堆，带出核燃料释放的热能；被加热了的冷却剂由反应堆进入蒸发器，将热量传递给管外的二回路水，使之沸腾变为蒸汽，同时使冷却剂冷却，再由主泵送回反应堆循环使用。上述部件全部安装在内衬钢板的预应力钢筋混凝土厚墙厂房(安全壳)中。二回路系统即为常规岛，包括汽轮机、发电机、凝汽器、给水泵及冷却水系统。还有一些电站，如钠冷快堆，采用的是三级回路系统。

2. 核电站的安全性

核电站在正常运行时，会有少量放射性物质随废气、废水排入环境，但是受到严格的控制。国际放射防护委员会把天然本底和医疗照射以外的辐射剂量限制在每人每年1mSv以下，这是国际公认的安全标准。但一般在设计核电站时，把排放废气、废水中的放射性物质容许浓度规定为使任何居民接受的年剂量不超过0.1mSv，即国际标准的1/10。现在运行的核电站周围的居民实际接受的年剂量为1～2μSv，相当于天然本底的1/100，大大低于火电厂。

由于反应堆的元件用的是低富集铀，又是分散布置且不可能像原子弹的装料那样能聚拢压紧达到临界质量，堆芯还有吸引中子能力很强的控制棒，所以反应堆不可能发生核爆炸。此外，反应堆在设计时要求具有“负温度反应系数”，即当核能释放过快或载热剂未能起到足够的冷却作用致使堆芯温度上升太高时，链式裂变反应将自行减弱。核电站开始运行后，反应堆内就积累起大量的放射性物质。在100万kW的核电站反应堆内，约有150亿居里，相当于15000t镭的放射性。这是潜在危险。在正常运行时，它是泄漏不出来的。为防止发生意外事故时放射性物质大量泄漏，现代核电站设计中采取了纵深防御、多重防护的原