

序

以 ChatGPT、智能计算为代表的人工智能（artificial intelligence, AI）的快速发展推动着全球计算能力的规模化高功率部署，并引发智算中心“快速激增的电力消耗需求”、“严峻的高密度散热挑战”以及“沉重的碳排放压力”。同时，以新能源为主体的新型能源系统的快速发展需要更多的灵活性资源以应对新能源的波动性，这为智算中心的可持续发展提供了新的机遇。

新型能源系统下，数据中心将不再是一个传统意义上的能源消费者，能源生产者的灵活性身份也赋予数据中心节能减碳的新面貌。不同于数据中心在供电侧、信息技术（IT）侧以及制冷侧的单一节能技术，实现智能计算算力底座与能源系统的协同发展和互补共赢，成为当前全球及我国智算中心可持续发展的迫切需求。

打通智算中心在上游绿色供电、中游智能计算和下游制冷供热的全要素灵活性资源，需要全链条统筹协调智算中心绿色电力消纳、算力负荷时空匹配以及中低温余热利用，实现智算中心电力、算力、热力的协同。如此，将对信息与能源系统规划优化及运行调控产生巨大的反哺作用，促进算力比特与能源瓦特的全要素生产率的提高。

为给算力-电力-热力协同领域的广大从业者提供一个基础参考，特别是给热衷于研究数据中心能源资源管理、电力系统规划调度以及散热制冷的学者、学生和政策决策者提供一些最新素材，《数据中心能量管理：电力-算力-热力协同》在作者团队的《算力-电力-热力协同：数据中心综合能源技术发展白皮书》的基础上应运而生。

本书宏观、介观与微观相结合，努力全面地展示当前国内外算力-电力-热力协同交叉下数据中心能量管理的背景意义、内涵外延、关键技术和发展趋势。不得不承认，本书是作者团队对能源与动力、电力系统自动化以及能源环境等领域的有限知识的整合，也尽可能地结合了相关学者的宝贵观点，但难免挂一漏万。

算力-电力-热力协同的“三人舞”，具有客观的节能减排潜力，但是仍处于初级阶段，只有广大从业者进行广泛而深入的学科交叉和合作交流，方能推动系统化协同的高质量发展。

王永真

2025 年 4 月

前 言

数据作为新型生产要素，正在深刻改变着人类社会的生产方式、生活方式和社会治理方式，以大模型为代表的数字技术的快速发展带来了数字经济的蓬勃，并推动人类迈入智能化社会。算力作为数字经济时代的关键基础，是集信息计算力、网络运载力、数据存储力于一体的新型生产力，数据中心成为重要的新型基础设施之一，并在国家“东数西算”等工程战略指引下快速发展。

人工智能的快速发展引发了数据中心等算力基础设施巨大的电力消耗危机，带来了沉重的碳排放压力。同时，以数据中心为代表的算力基础设施具有单体能耗大、灵活性好、余热量多的特征，具备与新型电力系统形成良好源荷互动的巨大潜力。预计到 2035 年，中国数据中心和第五代移动通信技术（fifth generation of mobile communications technology, 5G）总用电量将超过 8000 亿 kW·h，预计占中国全社会用电量的 4%—6%，超越四大高耗能行业的用电水平，数字基础设施将成为影响电力系统能量供需平衡的重要负荷。2035 年中国数据中心和 5G 的碳排放总量预计达到 3 亿 t，约占中国碳排放量的 3%。可见，数字基础设施的碳排放将成为中国实现碳达峰以及进一步碳中和的重要挑战。

因此，“以什么能源及其适配方式来满足数据中心的能耗”已成为数据中心可持续发展的热点问题。随着《“十四五”数字经济发展规划》等政策文件的出台，国家明确提出要构建全国一体化大数据中心体系，加强算力基础设施建设，提升算力供给质量和服务水平。在此基础上，国家进一步提出了“东数西算”战略，要求优化数据中心布局，加快构建全国一体化算力网。2024 年 7 月印发的《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》与《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》，均提出要统筹数据中心发展需求和新能源资源禀赋，科学优化资源配置，提升算力与电力协同运行水平，加强数据中心余热资源回收利用等新要求。

新型电力系统及智算的快速发展，给数据中心的节能减排带来了新的挑战和机遇，原有数据中心算力与能源在规划运行上相割裂的现状值得思考与变革。一方面，随着新一代信息技术的快速发展，数据资源存储、计算和应用需求大幅提升，传统数据中心正加速与网络、云计算融合发展，加快向新型数据中心演进，“东数西算”、新型算力体系给数据中心内部及其能源系统的协同互动带来无限可能；另一方面，基于梯级利用、多能互补、源网荷储的综合智慧能源理念、技术

和模式的发展，驱动数据中心“算力网”与邻域“电力网”“热力网”深度融合，打造面向数据中心的算力综合能源，实现数据中心集群节能降耗、绿色高质量可持续发展。因此，全链条统筹协调智算中心绿色电力消纳、算力负荷时空匹配以及中低温余热利用，实现智算中心电力、算力、热力的协同，将对信息与能源系统规划优化及运行调控产生巨大的正向作用，将促进全要素生产率的提高。

立足上述背景，本书分析了数据中心“算力网”、“电力网”和“热力网”协同规划与调度的可行性，提出算力-电力-热力协同数据中心算力综合能源新方案。首先论述中国能源电力的演变现状和能源转型的大背景，揭示当下构建算力综合能源的驱动力和必要性。其次采用知识图谱文献计量的方式，在计量数据中心“算力+能源”科研与产业发展的基础上，初步给出算力综合能源的概念和架构。同时就算力综合能源在“算力与电力”“算力与热力”方面的关键技术进行系统性的刻画，论述其原理模式、研究现状和未来挑战。最后从“算力网”与“电力网”和“热力网”友好互动的视角，对算力综合能源的关键技术进行展望，并提出相关建议。

本书撰写过程中得到了韩俊涛、韩艺博、林嘉瑜、罗昊、宋阔、高伊彤、彭靖杰、李子贤、张哲等学生的帮助，再次表示感谢。算力-电力-热力协同仍在快速发展之中，本书相关内容仅是其中的一个缩影。因作者水平有限，本书难免存在一些局限的认识或者问题，也恳请读者多提意见。

编 者

2024 年 11 月

目 录

第 1 章 人类社会的基础：能源与信息	1
导读	1
1.1 物质、能源与信息概述	1
1.2 信息的核心要素：算力	9
参考文献	14
第 2 章 全球算力的电耗与算效演变	16
导读	16
2.1 全球算力基础设施能耗概述	16
2.2 服务器功耗与算力发展	20
2.3 电效的演变	21
2.4 算效的演变	22
参考文献	28
第 3 章 中国算力的能耗及算效测算	30
导读	30
3.1 中国数据中心的能耗现状	30
3.2 大模型及其能源资源消耗	35
3.3 大模型算力的电耗计算	39
3.4 中国数据中心能耗预测	41
参考文献	44
第 4 章 全球数据中心绿色低碳行动与对比	46
导读	46
4.1 全球温室气体及碳排放现状	46
4.2 国内外数据中心碳排放对比	47
4.3 数据中心减排的方式	49
参考文献	57
第 5 章 新型能源系统的发展与挑战	58
导读	58
5.1 电能的清洁化	58
5.2 新型电力系统：灵活性资源	62

5.3 新型能源系统：热能的清洁化	69
参考文献	76
第6章 数据中心分类及典型节能技术	77
导读	77
6.1 全球数据中心发展历程	77
6.2 数据中心等级划分分类	78
6.3 数据中心基本结构及能源形式	81
6.4 数据中心的典型节能技术	84
参考文献	88
第7章 数据中心节能技术发展趋势	90
导读	90
7.1 数据中心能效优化研究知识图谱	90
7.2 算力-电力-热力协同的发展趋势	92
7.3 性能和能耗的协同控制	95
7.4 工作负载均衡调度技术	96
7.5 云计算服务	96
7.6 算力调度	97
参考文献	99
第8章 算力-能源协同发展的必然性	100
导读	100
8.1 数据中心的用能特征	100
8.2 构建算力综合能源的必要性	102
8.3 能源视角下数据中心的发展趋势	107
参考文献	112
第9章 算力-电力-热力协同的内涵与外延	113
导读	113
9.1 算力综合能源的内涵与理念	113
9.2 算力综合能源的分类	115
9.3 算力综合能源的互动方式	117
9.4 算力综合能源的规划设计	118
9.5 算力综合能源的评价指标	120
参考文献	126
第10章 算力-电力互动：原理、现状与挑战	128
导读	128
10.1 算力-电力互动的原理与模式	128

10.2 算力-电力互动现状	135
10.3 算力-电力互动挑战	138
参考文献	140
第 11 章 算力-热力耦合：原理、现状与挑战	141
导读	141
11.1 算力-热力耦合的原理与模式	141
11.2 算力-热力耦合的基础	142
11.3 算力-热力耦合的现状	145
11.4 算力-热力耦合的挑战	147
参考文献	148
第 12 章 数据中心算力综合能源的规划	150
导读	150
12.1 数据中心低碳综合能源系统简介	150
12.2 数据中心综合能源系统的能值评价	151
12.3 数据中心综合能源系统的优化求解	152
12.4 优化结果分析	158
第 13 章 算力-电力-热力协同关键技术与建议	165
导读	165
13.1 关键技术	165
13.2 发展建议	167
第 14 章 结语	169
附录 1 中国算力-能源协同典型事件（部分）	172
附录 2 算力-能源协同相关标准（部分）	178
附录 3 不同电网的 CO₂ 排放因子	180
附录 4 各种能源折标准煤参考系数	182
附录 5 数据中心算力-能源协同相关政策	184
附录 6 专家话算力-电力-热力协同	192

第 1 章 人类社会的基础：能源与信息

导 读

(1) 2015 年以来，全球能源发展取得了历史性成就，特别是中国，基本形成了煤、油、气、电、核、新能源和可再生能源多轮驱动的能源生产体系。

(2) 以中国为代表的发展中国家与以美国为代表的发达国家相比，发展中国家人均生活用电量和人均用电量均少于发达国家。

(3) 信息及算力已成为大部分国家相互竞争的要素。未来，信息和算力将呈现快速增长趋势，全球多国都在布局相关基础设施。

1.1 物质、能源与信息概述

物质、能源、信息是支撑人类社会发展的三大资源。世界由物质组成，能源是一切物质运动的动力，信息是人类了解自然及人类社会的凭据。纵观人类社会发展历程，农业社会的核心资源是物质，工业社会的核心资源是能源，信息时代的核心资源是信息。信息资源由于具有不受时间、空间、语言和行业制约的特点，广泛应用于经济、社会各个领域和部门。从一定意义上说，信息资源是人类活动的最高级财富，现代市场经济一定程度上就是信息经济，体现信息资源集聚、交流、竞争、转化的过程；同时，信息资源能够提高人们的认识及素质，是促进社会进步的重要精神力量，让人们站在更高的观点上认识世界。

1.1.1 能源及其终端消费

能源，又称能量资源或能源资源，是指自然界中能为人类提供某种形式能量或可做功的物质资源。能源是可以直接或经转换成为人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源。随着社会的发展，生产力越高，人类对能源的依赖程度越高。能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。如图 1-1 所示，纵观人类社会发展的历史，人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。人类的进化发展离不开对能源的开发利用。远古时代人类学会了用火燃烧树枝来烹饪、取暖、照明等，能源利用进入了柴草时代。一直到 17 世纪，煤的开采和利

用开始改变人类的生活。18 世纪中叶，蒸汽机的发明标志着煤炭时代的到来。19 世纪中期，世界第一口油井让人类步入石油时代。经过 100 年的开发，内燃机和电力的使用使石油的全球消耗量在 20 世纪 60 年代超过了煤炭。虽然石油需求至今仍然在上升，但是它作为传统化石能源造成了严重的环境污染，并且面临着枯竭的危机。

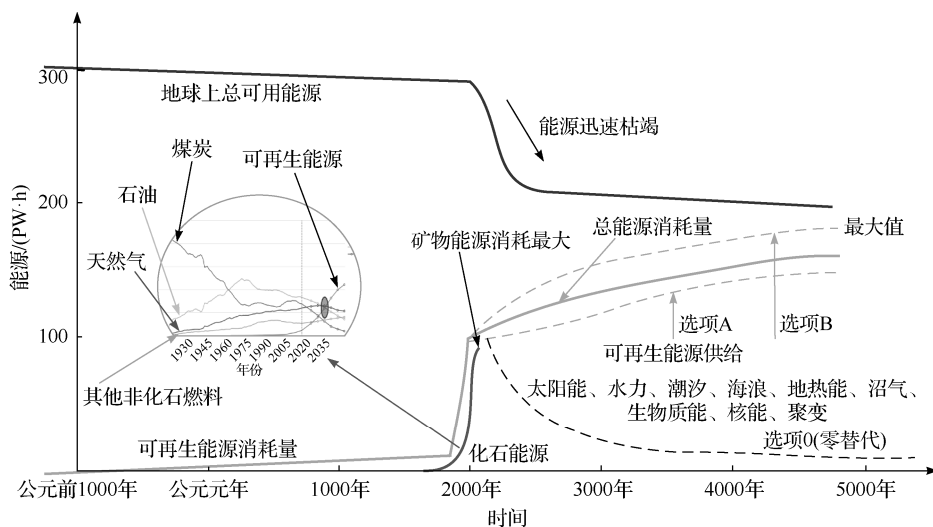


图 1-1 人类社会发展中能源的更替

资料来源：BP global (2020)

熵的视角揭示了一个重要的现实，即封闭的社会（没有外部输入的社会）内部问题会逐渐增多，最终导致社会被取代，但社会又是一个开放的组织及系统，与外界不停地发生着物质、能源和信息的交换。当前，全球使用与消费的能源，也正在从传统“黑色”的化石能源变为“绿色”的可再生能源。

能源是人类文明进步的基础和动力，攸关国计民生和国家安全，关系人类生存和发展，对于促进经济社会发展、增进人民福祉至关重要。在能源革命的推动下，近十年中国能源发展取得了历史性成就，基本形成了煤、油、气、电、核、新能源和可再生能源多轮驱动的能源生产体系（中华人民共和国国务院办公厅，2020）。其中，可再生能源开发利用规模快速扩大，水电、风电、光伏发电累计装机容量均居世界首位。可再生能源装机作为中国发电新增装机，主体地位进一步夯实，保障能源供应和推动清洁低碳转型的作用越来越突出。

随着信息时代的到来，人类对能源的需求日益强烈。对一次能源消耗量的统计如图 1-2 所示，使用替代法（substitution method）来统计从 1965 年到 2023 年的一次能源消耗量变化，其中，由于一次能源中传统生物质能源难以准确统计且

影响较小，因此做简易处理将其忽略。由图 1-2 可知，从 1965 年到 2023 年，全球一次能源消耗量整体呈上升趋势。相对而言，在 1965 年至 1980 年，全球一次能源消耗量整体上升较缓。1980 年以后，特别是进入 21 世纪后，随着经济和科技的快速发展，全球一次能源消耗量快速增长。从 1965 年开始，尽管每一年上升的幅度并不大，但截至 2023 年，全球一次能源消耗量达到了约 170 000 TW·h，相对于 1965 年上升了约 300%。这个数据反映了全球经济活动和人类生活对能源的广泛依赖。能源消耗的种类包括化石燃料（如石油、天然气和煤炭）、核能以及可再生能源（如风能、太阳能、水能）。各国家和地区的能源消耗模式因其经济结构、工业发展水平和地理位置而异。带动能源消耗快速增长的是快速发展的经济和科技，美国这一类发达国家的能源消耗量几乎不再大幅度增长。快速发展的发展中国家 20 世纪时大力发展工业，到 21 世纪进入信息化时代对能源的消耗大幅增加。科技的进步不仅带来了经济的发展，也使全球能源面临更为严峻的挑战。

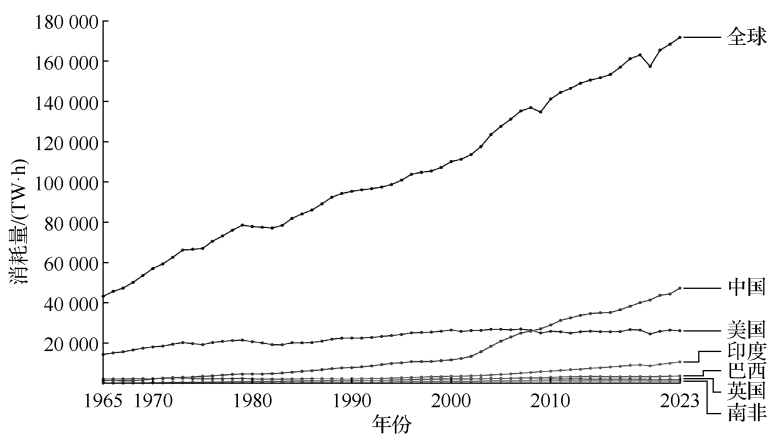


图 1-2 一次能源消耗量

资料来源：Our World in Data（2023a）

随着能源需求的增长、能源供给的多样化、全球气候的变化和人们的环境保护意识的增强，世界能源消费结构正在发生转变。虽然各国的进展和具体情况可能有所不同，但总体上，能源消费结构的转变体现为从传统化石燃料向可再生能源和核能过渡。这种转变的主要驱动力是对减少温室气体排放、应对气候变化、提高空气质量和增强能源安全的日益重视。比如，中国的能源消费结构正在经历显著的转变，由于对清洁、低碳能源的需求日益增长，以及需要缓解严重的环境污染问题和履行国际气候承诺，各项能源消费占比也在不断变化。根据国家能源局的数据，2022 年中国各项能源消费情况为：煤炭消费量占能源消费总量的 56.2%，比上年上升 0.3 个百分点；规模以上工业原油消费量 20 467 万 t，比上年

增长 2.9%，2016 年以来首次回升至 2 亿 t 以上；天然气、水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源消费量占能源消费总量的 25.9%，上升 0.4 个百分点。2023 年全社会能源消费总量比上年增长 5.7%。随着能源消费绿色低碳转型进程的加快，非化石能源消费量占能源消费总量的比重稳步提升。可以看出，煤炭和石油仍然是中国主要的能源来源，而可再生能源的占比也在逐渐提升。中国能源消费结构的具体转变体现在以下几个方面：减少煤炭消费、开发应用清洁能源、注重能源高效利用、大力发展核能、推动电动化交通。这些能源消费形式的转变旨在减少环境污染、应对气候变化，并促进能源消费的可持续发展。同时，中国还将积极推动能源多样化和优化能源供需结构，以实现经济发展与环境保护的良性循环（共研产业研究院，2023）。

图 1-3 展示了 1990 年至 2025 年全球电力需求的变化趋势。从图 1-3（a）中可以看出，全球电力需求在这段时间内呈现出稳步增长的趋势。从 1990 年到 2025 年，按地区划分的全球电力需求呈现出显著的增长趋势。其中，中国的电力需求增长最为迅速，从 1990 年的约 600 TW·h 增长到 2025 年的 10 000 TW·h 左右。亚洲其他国家、非洲和其他国家的电力需求也显示出明显的增长趋势，美国 and 欧洲始终保持其领先地位。中国和亚洲其他国家的电力需求显著增长，主要是由于这些地区的经济快速增长。随着工业化和城市化的推进，这些国家的制造业、服务业和居民生活用电需求大幅上升。从图 1-3（b）可以看出，从 1990 年到 2025 年，美国 and 欧洲的电力需求份额呈现出波动的趋势。1990 年和 2000 年，这两个地区的电力需求份额约为 50%，但随后有所下降。到 2025 年，这两个地区的电力需求份额降至 30% 以下。与此同时，中国和亚洲其他国家的电力需求份额则持续上升，

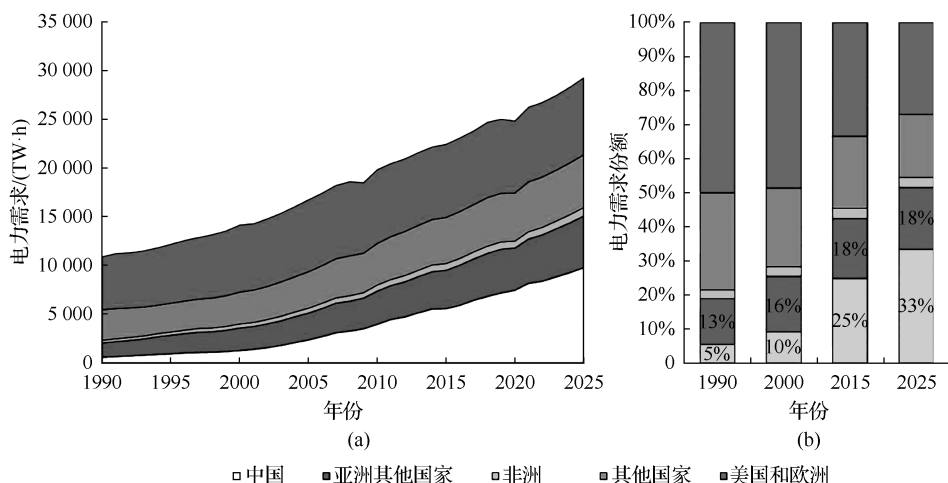


图 1-3 全球电力需求的演变

资料来源：国际能源署（2023）

到 2025 年分别达到 33%和 18%。非洲的电力需求份额也有所增加，到 2025 年达到约 3%。

2021 年，中国全社会用电量 83 128 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 10.3%，较 2019 年同期增长 14.7%，两年平均增长 7.1%。分产业看，第一产业用电量 1023 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 16.4%；第二产业用电量 56 131 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 9.1%；第三产业用电量 14 231 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 17.8%；城乡居民生活用电量 11 743 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 7.3%。2022 年，全社会用电量 86 372 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 3.6%。按产业分类，第一产业用电量 1146 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 10.4%；第二产业用电量 57 001 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 1.2%；第三产业用电量 14 859 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 4.4%；城乡居民生活用电量 13 366 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 13.8%（国家能源局，2022；国家能源局，2023）。根据中国人口计算，2021 年和 2022 年中国的人均社会用电量为 5885 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 6118 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，中国人均生活用电量为 831 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 947 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

如图 1-4 和图 1-5 所示，在人均用电方面，中国和美国仍然有显著差距，反映了经济和发展水平的不同。比如，1965 年之后，美国的人均能源消耗量远高于其他国家，这是其更发达的工业基础、更高的生活水平以及更广泛的能源利用需求所致。近几年美国人均能源消耗量变化趋于平缓，美国作为发达经济体，其每年的能源消耗量在世界范围内占据重要位置，尤其是在化石燃料（如石油、天然气、煤炭）的使用上。另外，从人均社会用电量的角度来看，美国的人均社会用电量普遍较高且上升缓慢，约 12 000 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，而中国的人均社会用电量约 6000 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，美国的人均社会用电量是中国的 2 倍。这反映了高度发达的电力基础设施和独特的电力消费习惯。美国的人均社会用电量在很大程度上取决于现代化的生活方式和高效的经济活动。生活用电上，中国作为发展中国家与美国存在较大差距。这在一定程度上体现了美国生活设施的电力需求较大。同时，城市居民的生活用电需求通常高于农村居民，这也会影响到整体的人均生活用电量。美国作为一个发达国家，其城市化率高于我们。近几年来美国人均生活用电量已经接近高峰，上升较为缓慢，随着技术的进步和能效的提高，人均生活用电量可能

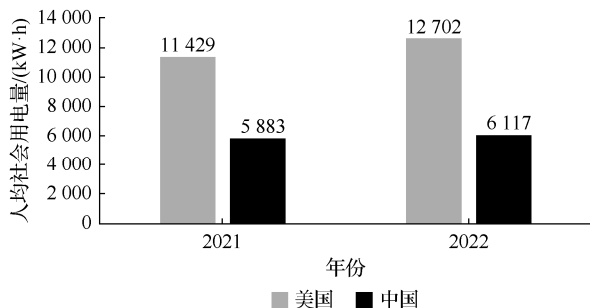


图 1-4 2021—2022 年中国和美国的人均社会用电量

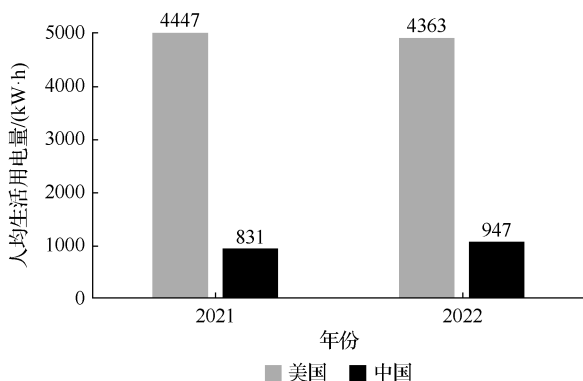


图 1-5 2021—2022 年中国和美国的人均生活用电量

会有所变化，比如，采用更高效的电器设备或可再生能源技术，可能会使人均生活用电量下降。中国正处于发展阶段，面临着一些挑战，随着经济增长和科技进步的持续推进，发展中国家面临着平衡经济发展与可持续能源利用的挑战，需要通过创新和可持续发展战略，逐步缩小与发达国家在能源消耗方面的差距。综上所述，人均用电量是一个复杂的指标，反映了国家经济结构、能源利用和技术发展水平。

1.1.2 信息及其数字经济

信息，通常指的是能够通过某种方式被传递、处理 and 解释的数据。在现代社会，信息是一种极其重要的资源，它可以帮助人们认识世界、做出决策和开展有效的社会活动。信息可以是数字、文字、图片、声音等形式的，它通过媒介（如书籍、电视、互联网等）进行传播。在信息时代，信息带来了巨大的生产力，用信息技术手段能够提高生产效率和创造物质财富的能力。信息生产力强调知识和智力资源的重要性，与传统的以物质资源为主的生产力有所不同，它能够快速、高效地处理大量信息，提高决策的速度和准确性。信息生产力是现代社会生产力的重要组成部分，促进社会经济的发展。

在信息时代，自然资源和一般劳动力资源的作用相对下降，而知识、信息等无形资源作为重要的战略资源被嵌入了经济结构的核心，各国抢占发展主导权的主要手段之一就是算力。据预测，到 21 世纪中叶，知识、信息对经济增长的贡献率将由 20 世纪末的 30%—60% 上升到 90% 以上。现在衡量一个国家的综合实力和竞争力，不仅要看其物质和能源的拥有量，更要看其信息资源拥有量以及信息资源价值转化的水平。从一定意义上说，谁掌握了信息优势，谁就能在国际竞争中占领主动地位，人类社会正在进入以信息生产力为标志的新阶段。信息生产力是由信息劳动者、信息技术和信息网络以及适应生产与生活需要的信息资源形成

的新型社会化的生产能力，是当代最活跃、最重要、更加社会化的核心生产力。与传统工业生产力相比，信息生产力具有更优的技术基础，能更好地满足人的现实需求，更顺应人类文明的发展趋势。

当前，全球正以前所未有的速度迈向数字化。全球数据呈现指数级快速增长趋势，互联网流量仅在 2018—2022 年即增长了 3 倍，这种指数式增长迫使数据计量单位越变越大。全球互联网用户和设备也不断增加，截至 2024 年底，全球互联网用户数约为 55 亿人，约占全球总人口的 68%；而在 2001 年这一数字仅为 5 亿。全球移动互联网用户快速增长，并在 2017 年突破了 40 亿大关；全球移动电话的用户数量更是达到了惊人的 77 亿，比全球总人口还多。受益于物联网（internet of things, IoT）技术的发展，互联网设备（智能手表、智能家用电器、智能汽车等）数量爆发式增长，2020 年互联网设备的数量增加到 200 亿台以上。互联网产业发展日新月异，智能终端、传感器等设备智慧化、移动化方兴未艾，人们纷纷跳出信息被动接收者的角色，不断提高自己参加社会活动的广度和深度，变成了信息的主宰者、创造者。据统计，全球每分钟有 1620 万条信息、2.31 亿封电子邮件在发送，5 亿条推特被推送。谷歌每天需要处理 24 PB（petabyte，千万亿字节）的数据，其网站每分钟都会产生 900 万次搜索，使用者每个月通过移动互联网发送和接收的数据高达 1.3 EB（exabyte，百亿亿字节）（清华大学互联网产业研究院，2022）。

图 1-6 形象地展示了全球数据量及算力规模的发展，并对 2024 年和 2025 年的数据量进行了模拟和预测。从数据量的角度来看，从 2011 年的 5 ZB（zettabyte，十万亿亿字节）增长到 2023 年的 120 ZB，增长了 115 ZB。这表明全球数据量快速增长，尤其是近几年来，增长速度明显加快。从 2011 年到 2020 年，全球数据量呈现稳定上升趋势，从 5 ZB 增长到 64 ZB。全球数据量在逐年增加，为算力规模的扩大提供了基础。社会的快速发展也带来了大量需要处理的数据。从 2016 年到 2023 年，全球算力规模（以 EFLOPS^①为单位）呈现出快速增长的趋势，数值从 140 增长到 1369。这可能与大数据、云计算、AI 等技术的快速发展有关，这些技术需要较高的计算能力来处理和分析数据。

全球数据量和算力规模的快速增长是多种因素共同作用的结果。随着科技的不断发展，全球对算力的需求也在不断增加。未来，随着更多新技术的应用和数据的爆炸式增长，算力规模还将继续扩大。因此对未来全球数据量和算力规模进行预测，其中 2025 年的数据是根据上几年的数据以及 23% 的复合年增长率预测的（Statista，2020）。另有组织预测，全球 2024 年将生成 159.57 ZB 数据，2028 年将增加一倍以上，达到 384.6 ZB，复合增长率为 24.4%（IDC，2024）。

^① FLOPS 即 floating point operations per second（每秒浮点运算次数），EFLOPS 即 exaFLOPS（每秒百亿亿次浮点运算次数）。

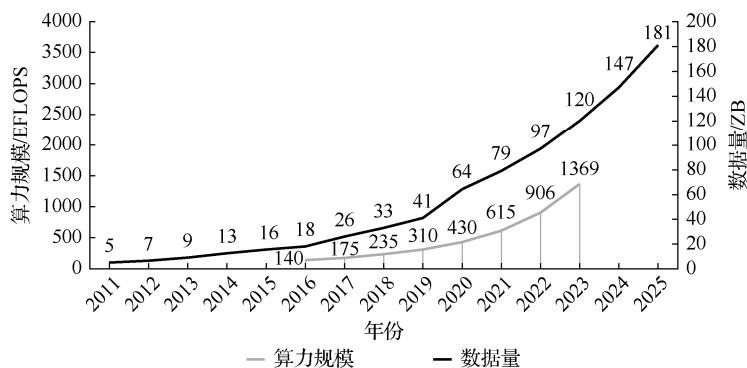


图 1-6 全球数据量及算力规模

资料来源：中国信息通信研究院，《中国算力发展指数白皮书》，Statista 数据库

信息生产力发展不仅表现为生产效率提高，能生产出更多的产品，而且体现为整个社会在一种信息共享的更大前提下，实现整个社会效益的提高。信息生产力对社会经济的影响极其深刻，如图 1-7 所示。计算表明：资本投入增长 1%，将使 GDP 增长 0.725%；劳动投入增长 1%，将使 GDP 增长 0.253%；信息化投入增长 1%，将使 GDP 增长 1.139%。三种要素中，信息化投入对经济增长的贡献率最大，是资本投入贡献率的 1.6 倍，是劳动投入贡献率的 4.5 倍。

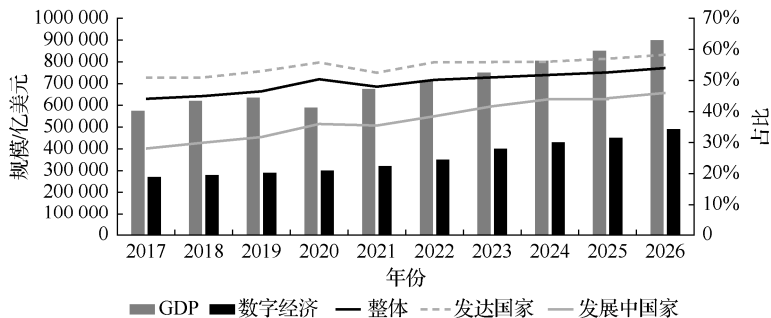


图 1-7 2017—2026 年数字经济规模及占 GDP 比重

资料来源：清华大学全球产业研究院等（2023）

当前，信息产业已成为全球发展速度最快、从业人员最多、规模扩展最为迅速、创造财富最多的产业，成为全球经济新的增长点。21 世纪初，西方发达国家的信息产业增加值已占国内生产总值的一半或一半以上。美国拥有世界上最强大的信息产业，自 2000 年以来，其信息产业规模每年以 30% 左右的速度扩大，远远超过了汽车、建筑等传统产业，成为美国规模最大的支柱产业。20 多年来，中国信息产业年产值平均增长率均在 25% 以上，2013 年，中国仅电子信息产业销售收入就达 12.4 万亿元，占 GDP 的 1/5 以上，成为国民经济的重要支柱。信息产

业具有带动性强、影响力大、渗透性广的特点，对整个产业链都有着直接或间接的影响。信息化既是现代农业的关键所在，也是工业化升级的根本。

未来随着新型基础设施建设的加快，以及云计算、大数据、AI 等技术创新和融合应用的进一步发展，实体经济数字化转型将迎来新的发展时期，数字经济发展规模将进一步扩大。根据中国信息通信研究院预测，到 2025 年中国数字经济规模将达到 60 万亿元左右，数字经济将成为经济高质量发展的新动能。

全球范围内的数据中心规模近年来一直以惊人的速度扩张，迅速变成数字经济快速发展的基础底座。以亚洲地区为例，中国、印度和日本等国家在数据中心建设方面取得了巨大的突破，成为全球领先的数据中心建设与运营者。同时，欧洲地区也在数据中心业务领域持续发展，英国、德国和荷兰等国家的数据中心规模持续扩大，为欧洲的数字经济发展提供了强有力的支撑。

1.2 信息的核心要素：算力

1.2.1 全球的算力

数据、算力和算法是促进数字经济发展的核心三要素，其中，算力已经成为衡量经济和社会发展水平的重要指标之一，是数字经济发展的关键基础设施。《2022—2023 全球计算力指数评估报告》显示，计算力与经济增长紧密相关。15 个样本国家的计算力指数平均每提高 1 个百分点，国家的数字经济和 GDP 将分别增长 3.6‰和 1.7‰（清华大学全球产业研究院等，2023）。着眼全球计算力指数，2021 年，美国以 77 分位列国家计算力指数排名第一，中国获得 70 分位列第二，中国在智能算力方面的全球优势较为突出（清华大学全球产业研究院等，2022）。虽然数据中心近年来一直被视为耗电大户，但不可忽视的是：占我国全社会用电量约 2%的数据中心，支撑了占全国 GDP 约 36.2%的数字经济规模，对提升全社会生产效率和全要素生产率作用巨大^①。根据国家发展改革委统计，每消耗 1 tce，能够为数据中心直接贡献产值 1.1 万元，并可贡献 88.8 万元的数字产业化增加值，同时还可带动各行业数字化转型，间接产生 360.5 万元的产业数字化市场（华东和高洪达，2022）。

2022 年全球 51 个国家的数字经济增加值规模达到 41.4 万亿美元，占 GDP 的比重为 46.1%，数字经济显示出强劲的增长势头。全球数字经济增加值规模在 2022 年相较于上一年增长了 2.9 万亿美元，51 个主要经济体数字经济增加值规模

^① 《“碳达峰、碳中和”目标下应三管齐下 有效发挥数据中心集群化阶乘化降耗效应》，https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202106/t20210602_1282418.html，2025-06-09。

同比名义增长 7.4%，高于同期 GDP 名义增速 4.2 个百分点。2023 年，美国、中国、德国、日本、韩国等 5 个国家数字经济总量超过 33 万亿美元，同比增长超 8%；数字经济占 GDP 的比重为 60%，较 2019 年提升约 8 个百分点。产业数字化占数字经济的比重为 86.8%，较 2019 年提升 1.3 个百分点。2019—2023 年，美国、中国数字经济实现快速增长，德国、日本、韩国数字经济持续稳定发展，预计 2024—2025 年全球数字产业收入增速回升（中国信息通信研究院，2022a）。

2022 年全球主要国家计算力指数排名中，如图 1-8 所示，美国和中国分列前两位，同处于领跑者位置；追赶者包括日本、德国、新加坡、英国、法国、印度、加拿大、韩国、爱尔兰和澳大利亚；起步者包括意大利、巴西和南非。领跑者在计算能力和基础设施支持两大方面比其他梯队国家有显著优势，其中由于超大规模互联网企业算力投入的大幅增长，美国计算力指数从 2021 年的 77 分增长到 2022 年 82 分；中国 2022 年算力投入增长有所放缓，计算力指数从 70 分增长到 71 分。

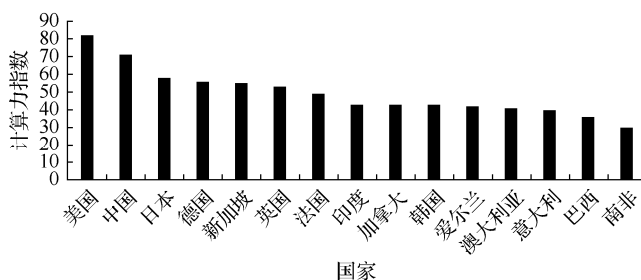


图 1-8 全球主要国家计算力指数

1.2.2 中国的算力

于当今数字浪潮奔涌之际，建设数字中国宛如在时代长河中扬起的一面鲜明旗帜，是驱动中国式现代化巨轮破浪前行的澎湃引擎，也是我国在全球竞技场上锻造独特优势的坚固基石。它快速渗透进入人类生产、分配、流通、消费以及社会服务管理等各个环节，深刻改变着经济社会的运行模式。2022 年，中国数字经济规模达到 50.2 万亿元，总量稳居世界第二，同比增长 10.3%，占 GDP 的比重提升至 41.5%。同时，在数字经济的大时代背景下，经典物理模型的因果分析正在走向以大模型为代表的相关分析，全球对数据的生产和需求呈现指数级增长趋势。据预测，2025 年全球数据量将达到 181 ZB，是 2016 年的 10 倍。其中，2022 年中国数据产量达 8.1 ZB，同比增长 22.7%，全球占比达 10.5%，位居世界第二（国家互联网信息办公室，2023）。

中国算力规模持续高位增长。从计算设备供给侧看，中国算力规模持续增长，