



中国四代核电工程中的人才队伍组建模式研究

谷昭逸, 李侠*

上海交通大学 科学史与科学文化研究院, 上海 200240

摘要: 核电是保障中国能源安全与高质量发展的核心领域, 其发展高度依赖专业扎实的人才队伍。面对全球核电技术向四代跨越及人工智能兴起的机遇与挑战, 本文通过梳理中国核电发展历程, 对功勋人物进行社会学分析, 构建理想人才架构模型, 并明确未来培养方向。研究发现, 顶尖人才普遍接受过顶尖高等教育, 专业与岗位高度匹配, 且受益于完善的激励机制。科学的“金字塔形”人才结构是支撑行业可持续发展的最优选择。面向未来, 中国核电人才培养需聚焦两大战略方向: 一是培养匹配四代核电技术的专业人才, 攻克“从0到1”的关键技术; 二是通过“高校-企业”联合培养模式, 培育“人工智能+核电”复合型人才, 确保核电事业在智能化时代的安全与领先。

关键词: 四代核电; 人才队伍; 金字塔人才架构; 人工智能+核电; 校企联合培养

中图分类号: G316; TL48

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)04-0482-16

引言

人工智能时代的加速到来, 使其发展的关键制约因素发生转变——从数据、算法到算力的组合中, 电力供应问题已被学术界与产业界普遍视为人工智能发展的决定性因素。这一趋势推动能源成为全球资本市场的焦点, 在日常生活层面则体现为电力成为核心资产。本·马斯登 (Ben Marsden) 在《工程帝国》中指出, 近现代经济实力乃至最终政治力量的基础, 正

是依靠能源来支撑生产与创造财富^[1]。根据国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 预测, 到 2050 年, 全球能源需求将增至目前的 2.5 倍。在众多能源选项中, 核电因其较低的发电成本与稳定的绿色电力输出, 被视为未来人类社会最具潜力的能源之一。截至 2024 年底, 中国大陆在运核电机组共 58 台, 总装机容量达 6088.094 万 kW, 机组数量仅次于美国的 94 台, 位居世界第二。我国在运核电站以压水堆为主力堆型, 其中近 95% 的机组为压水

收稿日期: 2026-06-01; **修回日期:** 2026-07-10

基金项目: 国家社会科学基金项目: 强化现代化建设科技人才支撑的实现路径与对策研究(23AZD040)

作者简介: 谷昭逸 (1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为科学社会学、科技政策。E-mail: issacgzy@sjtu.edu.cn

*李侠 (1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为科学社会学、科学哲学。E-mail: lixia001@sjtu.edu.cn (通讯作者)

引用格式: 谷昭逸, 李侠. 中国四代核电工程中的人才队伍组建模式研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(4): 482-497. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260081. CSTR: 32282.14.JES.20260081

GU Z Y, LI X Research on the Talent Team Construction Mode of China's Four Generations Nuclear Power Projects[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(4): 482-497. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260081. CSTR: 32282.14.JES.20260081

堆; 仅秦山第三核电站1号、2号机组采用重水堆, 而石岛湾核电站1号机组则运用了第四代核电技术的高温气冷堆。回顾中国核电四十年发展历程, 核电事业的高质量发展与可持续运行, 离不开专业扎实、结构合理、组织严密的人才队伍作为支撑。因此, 本文将梳理中国核电从一代核电到四代核电的发展脉络, 对发展进程中的代表性人才进行社会学分析, 并在此基础上构建符合中国核电需求的理想人才架构模型, 明确当前第四代核电背景下人才培育的重点方向, 以期为我国四代核电工程的人才队伍建设提供参考思路与框架。

1 全球核电技术迭代历程与产业发展逻辑

全球范围内和平利用核能的尝试始于20世纪40~50年代。从一定程度上说, 核电可被视为军转民技术的代表, 因为核电机组的技术基础通常源于军用核反应堆或核潜艇技术。目前, 国际通行的核电技术划分标准将其分为一代核电、二代核电、三代核电和四代核电。

1.1 一代核电: 核能发电可行性验证阶段

第一代核电的开发与建造始于20世纪40年代。1942年, 在恩里克·费米(Enrico Fermi)的领导下, 芝加哥大学的49名科学家设计建造了芝加哥一号堆(Chicago Pile-1), 首次实现了自持、可控的核链式反应, 证明了人类具备了控制核能释放的能力^[2]。1953年12月, 时任美国总统的艾森豪威尔(Dwight David Eisenhower)在联合国大会第470次全体会议上发表题为*Atom for Peace*的演讲, 推动可裂变材料被分配用于人类的和平事业, 提出了“服务于和平的原子能”倡议, 并促进了商用反应堆的设计与发展^[3]。1954年, 苏联建造了奥布涅斯克(Obninsk)实验性核反应堆, 其功率为5000 kW, 验证了核能发电的可行性。在芝加哥一号堆和奥布涅斯克实验堆将科学理论转化为工程现实之后, 全球第一座商用核电站——建于1954年的美国宾夕法尼亚州希平港核电站(Shippingport Atomic Power Station)——彻底开启了人类利用核能的大门。中国一代核电的技术源头, 可追溯至中国核潜艇研发过程中的陆上模式堆。1949年, 陶孟和在政治协商会议上曾指出: “我们用原子

核能为动力的时候, 我们还停留在蒸汽、电力的阶段, 我们依然是落在人后”^[4]。1965年, 中国在第一颗原子弹试爆成功后, 中央在四川山区建造了代号为“909”的工程基地, 开始研发核潜艇陆上模式堆。直至1970年8月30日, 彭士禄向周恩来总理报告: “中国第一艘核潜艇陆上模式堆实现满功率运行, 发出了中国第一度核电”。当中国掌握了陆上模式堆的技术后, 日后作为“军转民”产物的核电站就近在咫尺了。概括而言, 一代核电的核心目标是为进一步推广核能发电进行可靠性论证, 一代核电都为实验堆和原型堆^[5]。

1.2 二代核电: 标准化商业化核电体系成型

一代核电主要用于验证核能发电的可行性与安全性, 二代核电则是在此基础上实现了商业化。目前, 全球在运核电机组中数量最多的堆型即为二代核电, 其峰值时占比接近九成。二代核电主要包括压水堆、沸水堆和重水堆三种堆型。其中, 压水堆和沸水堆均属于轻水堆, 以普通水作为冷却剂和慢化剂, 造价相对经济。而重水堆则使用含氢同位素氘的重水作为冷却剂, 慢化性能更优, 但造价也更高。相较于一代的实验堆和原型堆, 无论是轻水堆还是重水堆, 二代核电均具备良好的经济性, 其标准化、系统化、批量化的特点使其足以与火电、水电及风电展开竞争。二代核电的主要堆型包括美国西屋电气公司(Westinghouse Electric Corporation)的Model 212压水堆及其衍生系列、苏联的VVER轻水堆核电机型、法国阿海珐公司(AREVA)的M310压水堆型, 以及加拿大的CANDU重水堆型等。

1.3 三代核电: 高安全性能压水堆技术自主化发展

在二代核电基础上改良优化而来的三代核电, 其主要设计理念在于杜绝类似切尔诺贝利核电站的堆芯熔毁事故, 并特别强调了安全性的强化。三代核电可分为能动与非能动两类, 其判别的硬性标准是必须符合美国核电用户要求文件(URD)和欧洲核电用户要求文件(EUR)的安全规范。根据URD的安全准则, 三代核电站发生严重事故的概率较第二代至少降低一个数量级——例如, 堆芯熔化的概率从第二代机组的 10^{-4} /堆年, 降至第三代机组的不大于 10^{-5} /堆年。

三代核电的堆型仍以压水堆、沸水堆和重水堆为主, 代表型号包括美国的 AP1000、法国的 EPR、中国的“华龙一号”及“国和一号”。其中最具代表性的是美国 AP1000 核电机组, 它由西屋公司 (Westinghouse Electric Corporation) 与 ABB-CE 联合开发, 基于已获美国核管会批准的 AP600 与 System 80+ 设计而成, 属于先进非能动压水堆。通过艰苦的“引入-转化-吸收”技术路径, 中国核电技术已实现追赶, 目前在全球三代核电领域处于第一梯队。由中核集团、中广核集团研发的“华龙一号”, 以及由国家电投打造的“国和一号”, 均具备完整自主知识产权。随着二代机组陆续到期退役, 全球在建核电机组普遍采用三代技术, 三代核电正逐步成为世界核电的主力机型。

1.4 四代核电: 颠覆性先进核能系统变革赛道

四代核电系统是未来新一代先进核能系统的总称, 超出了一代核电、二代核电、三代核电的常规技术迭代的范畴。这一概念最早于 1999 年由美国能源部提出, 并在 2001 年由美国联合九国共同发起成立了第四代核能系统国际论坛 (Generation IV International Forum, GIF)。四代核电泛指所有摒弃传统沸水堆和压水堆的新型核反应堆。经过科学设想与系统论证, 最具发展前景的四代核电反应堆主要有六种: 气冷快堆 (GFR)、铅冷快堆 (LFR)、熔盐堆 (MSR)、钠冷快堆 (SFR)、超临界水冷堆 (SCWR) 和超高温气冷堆 (VHTR)。除了以上 6 种堆型外, 近年来随着磁约束前沿领域——如托卡马克 (Tokamak) 和仿星器 (Stellarator)——取得突破, 核聚变的可行性也被纳入四代核电的考量范围。目前, 中国拥有全球首座投入商业运行的四代核电机组, 即位于山东石岛湾的高温气冷堆核电站。

1.5 我国核电产业发展特征与人才支撑需求

核电事业的发展对中国实现高质量发展具有深远意义。随着经济社会的发展, 未来全球能源需求将持续增长。发展清洁、高效的核电, 不仅是为了顺应世界能源利用的新趋势, 更是作为传统能源的重要替代选择。1 kg 铀-235 原子核全部裂变所释放的能量, 相当于 2700 tce (吨标准煤当量) 完全燃烧产生的能量。

核电凭借其高效特性, 能够优化我国现有能源供应结构, 有力保障国家能源安全, 并显著改善大气环境。

通过梳理从一代到四代核电的发展历程, 可以看出全球核电产业已趋于成熟, 目前主力堆型呈现二代与三代并存的格局, 每一代技术均具备公认的标准与鲜明的技术特征。在经历了一代至三代的线性迭代后, 四代核电另辟蹊径, 跳出了原有技术路径, 标志着核电技术进入重要变革期。在这一关键节点, 谁能率先验证、设计、建造并维护可靠的第四代核电技术, 谁就将主导未来核电市场的格局。核电产业遵循“赢家通吃”的马太效应, 不存在先行者吃亏、后来者瓜分成果的局面; 领先者凭借知识产权与原创经验, 将显著提升其在行业中的话语权与定价权。就现状而言, 中国已在此轮竞争中处于前列。回顾全球核电早期发展, 从首座军用反应堆建成到首座核电站投运, 美国用时 12 年, 法国 8 年, 英国 6 年, 苏联 2 年, 而中国则用了 25 年^[6]。自第三代核电技术起, 无论是引进、消化、吸收美国的 AP1000 技术, 还是自主研发具有自主知识产权的“国和一号”与“华龙一号”三代核电机组, 乃至在全球率先实现第四代核电机组的商业运行, 中国核电事业均体现出起步较晚、初期进展平缓, 但加速迅猛、后劲充足的特征。这一发展态势的背后, 不仅得益于我国坚实的物质基础支撑, 也离不开核电人才队伍整体素质的持续提升。

2 中国核电功勋人才成长特征的社会学实证分析

2.1 样本选取与研究说明

2020 年正值中国核工业创建 65 周年。在创建 65 周年之际, 中核集团决定 (含追认) 授予于敏等 71 名代表人物“核工业功勋榜”上榜人员称号。该榜旨在嘉奖为中国核事业作出不可磨灭贡献的功勋人物, 评选范围覆盖中国核工业全产业链, 贯穿上游核物理理论前沿突破、中游“两弹一星”与核电工程、下游乏燃料处理及特种材料研发等环节。71 人榜单分为特别上榜人员 14 人与上榜人员 57 人两类; 特别上榜者包括“中国氢弹之父”于敏、中国科学院资深院士

王淦昌、“两弹元勋”邓稼先等杰出科学家。此榜可视为官方对中国核工业人才的一次集中表彰与认可，具有高度权威性和广泛的社会认同度。

在任何行业的起步阶段，都会面临技术路线不明、社会认知不足、配套体系缺失等困境，而破解这些困境往往需要依靠杰出人才的个人能力。本研究聚焦于核工业的人才组建模式，旨在深入探讨这一模式的内涵。所谓组建模式，既涵盖不同层次人才的特

征，也包括整体人才队伍培养、成长与发展的方式和机制。首先，本研究关注核电工程领域中最高层次人才的特征，这些特征可以通过社会学视角的分析得以揭示。简而言之，这些共性特征是成为顶尖人才的必要不充分条件，可为杰出人才的培养提供参考。为此，笔者选取了与核电事业、核电工程密切相关的20位核电功勋人物作为研究对象（表1），其基本社会学特征分析如下。

表1 与核电事业、核电工程密切相关的20位核电功勋人物基本情况
Table 1 Basic information of twenty meritorious figures in the nuclear power industry and nuclear power engineering

姓名	主要教育背景	主要工作单位	主要贡献	最高荣誉
于俊崇 (1940.12—)	南京工学院 (现东南大学)	中国核动力研究设计院	研制成功新一代核动力装置	2009年当选中国工程院院士
马福邦 (1934.07— 2004.05)	清华大学电机系	中国核工业集团公司	推动我国第一座重水实验堆的建造、消化吸收和改进	1994年当选中国工程院院士
叶奇蓁 (1934.09—)	上海交通大学电力工程系； 莫斯科动力学院	中国核工业集团公司	以我为主，中外合作，自主设计建成我国首座大型商用核电站	2003年当选中国工程院院士
阮可强 (1932.12— 2017.04)	清华大学； 苏联莫斯科化工机械学院化工机械系； 莫斯科动力研究学院	中国原子能科学研究院	作为物理设计负责人，主持研制成功微型反应堆	1995年当选中国工程院院士
孙玉发 (1937.05—)	哈尔滨工业大学反应堆工程	中国核动力研究设计院	我国反应堆工程设计研发领域学科带头人	1999年当选中国工程院院士
张同星 (1933—1983)	浙江大学冶金铸造	核工业部燃料厂	创造了我国铀金属铸造的独特工艺，是把骨灰撒在大漠戈壁的一线科研工作者	
汪家鼎 (1919.10— 2009.07)	西南联合大学化学工程系； 美国麻省理工学院	清华大学	为我国第一座核燃料后处理厂建设提供了设计基础和运行依据	1980年当选中国科学院学部委员
李冠兴 (1940.01— 2020.12)	清华大学工程物理系	中核北方核燃料元件有限公司	我国新型特种材料研发及应用的奠基人	1999年当选中国工程院院士
陈念念 (1941.10— 2021.12)	清华大学工程物理系	中核集团公司 核工业理化工程研究院	主持研制成功我国第一代具有自主知识产权的先进专用设备	2005年当选中国工程院院士
欧阳予 (1927.07—)	武汉大学工学院电机系； 莫斯科动力学院	中国核工程公司	我国第一座自行设计建成的秦山核电站的总设计师	1991年当选中国科学院学部委员
周永茂 (1931.05—)	交通大学； 莫斯科动力学院	中国中原对外工程有限公司	领导了民用微堆的开发、利用	1995年当选中国工程院院士
周邦新 (1935.12—)	北京钢铁学院	中国科学院； 上海大学	我国核材料和核燃料元件领域著名的科学家和学科带头人之一	1995年当选中国工程院院士
赵仁恺 (1923.02— 2010.07)	国立中央大学(1949年8月8日，更名为“国立南京大学”，1950年定名“南京大学”)	中国核工业集团公司	我国核动力科学与工程研究设计的奠基人和开拓者之一	1991年当选中国科学院学部委员； 1994年当选中国工程院院士

续表

姓名	主要教育背景	主要工作单位	主要贡献	最高荣誉
蒋云龙 (1934.09—)	北京大学物理系	中国广东核电集团	我国核电事业发展的主要推动者和参与者之一	
徐铎 (1937.04— 2023.01)	清华大学工程物理系	中国原子能科学研究院	我国快堆事业的开拓者和奠基人之一	2011年当选中国工程院院士
黄劭显 (1914.07— 1989.08)	西南联合大学地质物理气象系	核工业部第三研究所	我国铀矿地质事业的创建人之一	1980年当选中国科学院学部委员
曹本熹 (1915.02— 1983.12)	西南联合大学化学系; 英国伦敦帝国学院	清华大学; 机械工业部燃料局	有效推动我国核燃料化工生产的工程建设、顺利投产和技术改造	1980年当选中国科学院学部委员
蒋心雄 (1931.07—)	南开大学机械工程系	核工业部	在核工业产业结构调整改革和核电建设及走出去方面作出重要贡献	
潘自强 (1936.06— 2022.01)	北京大学	中国原子能研究院	奠定了我国放射性废物安全管理的基础	1997年当选中国工程院院士
戴传曾 (1921.12— 1990.11)	西南联合大学; 英国利物浦大学	中国科学院原子能所	为建立我国核电安全研究体系作出突出贡献	1980年当选中国科学院学部委员

2.2 顶尖核电人才共性成长要素解析

2.2.1 完整顶尖理工科高等教育背景, 专业高度匹配岗位 关注表1中20位核电功勋的主要受教育经历, 他们都接受了完整的高等教育, 且所学专业均与核电工程的某一关键环节密切相关, 以工程、物理和电机专业为主。考虑到这些核电功勋大多出生于20世纪20~30年代, 参照常规的个人成长路径, 他们接受高等教育的时间应在20世纪40~50年代。在那个动荡不安、百废待兴的年代, 能够接受正规高等教育实属不易, 他们可被视为同代人中最优秀的个体。

进一步考察这些人物接受高等教育的院校, 几乎均为顶尖的理工科高校, 如清华大学、东南大学、交通大学等。这些学校即使在艰难时期也保持着优良的师资条件和学术氛围, 更是早期杰出科学家的汇聚之地, 在此求学为他们后续的职业生涯奠定了坚实基础。良好的教育背景也从侧面反映出参与核电事业具有较高的技术门槛, 包括学术大师的指导与熏陶、优质的学习环境、系统的专业知识储备以及较高的个人素养。

2.2.2 沿海优渥成长环境奠定早期教育基础 进一步梳理了这些人物的出生地后, 发现其中多数人出生于东部沿海地区, 如浙江省、江苏省、上海市及广东省等。知识社会学中有一经典命题: “社会存在决定社

会意识。” 通常而言, 东部沿海地区往往具备更好的经济条件, 优越的家庭背景能为个体提供稳定的经济支持与良好的教育环境, 这类支持在人才成长的早期阶段作用尤为显著^[7]。

2.2.3 海外留学经历拓宽前沿技术视野 从表中人物的海外求学经历可见: 有3人分别前往英国利物浦大学、美国麻省理工学院和英国伦敦帝国学院求学; 另有4人曾赴莫斯科动力学院深造。前往英美两国深造的核电功勋人物, 所学专业多为化学相关方向, 例如汪家鼎院士于1944年在麻省理工学院化学系深造, 曹本熹院士在1943—1946年间于英国伦敦帝国学院化工系学习。而前往莫斯科动力学院深造的求学经历, 大多发生在新中国成立之后, 所学专业也更贴近核电工程的核心知识体系, 例如叶奇蓁院士获莫斯科动力学院电力系统专业副博士学位, 欧阳予院士曾在该校热工系热工控制与自动化专业学习。1957年, 中苏两国签署了《关于生产新式武器和军事技术装备以及在中国建立综合性原子能工业的协定》(简称中苏《国防新技术协定》), 其中对核援助的具体安排作出了约定。正是在中苏友好外交关系的推动下, 中国得以在早期选派人才赴苏联学习核电相关技术。莫斯科动力学院与中国在人才培养方面保持着密切合作, 国务院前总理李鹏、“核潜艇之父”彭士禄等人都曾受党组织派遣前往该校留学。据统计, 毕业于莫斯科动力学院的

中国科学院与中国工程院院士共达15人,涵盖航天、土木、核能等多个高新领域,该校也因此被视为早期中国高层次人才培养的重要孵化地。

2.2.4 国家统筹分配,实现专业与岗位精准适配 进一步观察表中20人的工作经历可见,早期接受过高等教育的专业人才具有高度稀缺性,他们普遍一毕业便被分配至与所学专业紧密相关的单位。这种人力资源配置模式,不仅大大缓解了因专业不对口带来的不适感,也避免了知识的沉没与折损。同时,单位中的同事往往就是自己的同学或高几届的前辈。相近的知识背景与同事的帮扶,使他们能更快融入核电事业的实际工作。例如,欧阳予院士在苏联留学期间,因国家原子能事业需要,经中国驻苏大使馆参赞告知,决定转向核技术领域。学成归国后,他随即加入二机部新成立的北京核工程研究设计院。鉴于新中国成立初期核事业的特殊性,所有核电相关工作均由国家统一集中管理。国家的统筹与深度参与,保障了核电人才能够在具备物质支持和学术声望的研究机构或政府部门工作。这种有保障的环境不仅促进个人职业发展,也加强了与同领域优秀科学家的合作交流。在个人专业与工作高度匹配的条件下,具备真才实学的青年科研工作者得以迅速崭露头角,最终成长为推动核电事业发展的中坚力量。

2.2.5 完善学术荣誉激励体系,助推长期深耕 这20位核电功勋几乎都曾多次获得过国家科学技术进步奖和被评选为院士。著名科学社会学家默顿(Robert King Merton)曾指出:“对科学家所取得的独创性成就的认可是一种原动力,这种原动力很大程度上来源于制度的强调。”^[8]对于科学家与技术专家而言,当选中国科学院或中国工程院院士,是对其毕生贡献的高度肯定。表1所列20人中,有17人被评为两院院士,平均当选年龄约64岁,包括12位工程院院士与6位科学院学部委员,其中赵仁恺院士同时为中国科学院学部委员和工程院院士。这17位院士中有13位于2000年前当选,恰逢中国核电首轮发展的高潮期——1991年12月15日秦山核电站成功并网发电,1994年中法合作的大亚湾核电站投入商业运行,标志着中国大陆正式迈入核电时代。在此期间,早期核电功勋陆续获评院士称号。笔者认为,院士称号不仅是一种荣誉,更是对

过往成就的集中认可;同时作为一种社会建制,亦体现了国家意志。授予核电功勋以院士称号,也意味着国家对其贡献与核电事业发展的正式肯定。除上述17位院士外,张同星、咎云龙与蒋心雄三位功勋并未获此称号,这并非因其贡献不足,而是源于个人选择与工作重心的转移。张同星同志毕业后长期扎根西北参与核试验工作,因积劳成疾,不幸因胃癌早逝,享年50岁,成为表1中最早离世的功勋,过早的离世使其与院士评选失之交臂。咎云龙同志曾任中国广东核电有限公司董事长兼党组书记,全面负责大亚湾与岭澳核电站的建设运营,推动大亚湾项目成为中外高科技合作的典范;蒋心雄同志则先后担任核工业部部长、中国核工业总公司总经理,承担统筹规划中国核电发展蓝图的重任。二人虽未居科研一线,却在管理岗位上为中国核电事业的推进作出了重要贡献。

2.3 功勋人才成长规律对行业育才的启示

通过对这20位核电功勋人物的社会学分析,可以总结出核电行业杰出人才的共性特征,这为培养行业杰出人才提供了一条潜在路径。具体而言,青年时期需接受专业而先进的科学教育,筑牢知识根基;职业生涯初期应做到人尽其才、岗尽其用,使人才在最适合的岗位上充分发挥专业水平;在整个职业生涯中,需营造开放包容、崇尚科学的社会氛围,并对科学家取得的重要成就给予恰当的科学奖励——完善的科学奖励制度正是产生更多独创性科学知识的关键制度动力与保障^[9]。依循这样的路径培养人才,将显著提升人才的成才率。

3 基于中国核电发展历程构建理想的核电人才架构模型

党的二十大报告提出“深入实施人才强国战略”,坚持科技是第一生产力、人才是第一资源。培养造就大批德才兼备的高素质人才,是国家和民族长远发展的大计^[10]。为了实现我国核电事业的高质量发展、强化能源安全保障,组建一支成规模的、专业性强的核电人才队伍是必由之路。

3.1 金字塔形人才结构的理论依据与实践价值

笔者曾撰文指出,依据社会分层的基本原则,任何领域的人才队伍结构都应呈现金字塔形^[11]。该结构将人才由高至低分为三类:塔尖级人才、塔身级人才与塔基级人才。这一模型充分体现了生态学中的资源最佳分布原则,也符合管理学中的最优资源调配逻辑。具体来说,塔尖级人才居于顶端,数量极少,主要包括院士、政策制定者、行业领军者及头部企业掌舵者;塔身级人才位于中部,数量适中,多为学科带头人、高级技术专家与中层管理人员;塔基级人才处于底层,数量众多,主要负责具体活动的执行。这种自下而上逐级收窄的金字塔结构,契合整体人才队伍在知识、资源与权力上的分布形态,既有利于知识的传递与扩散,也有助于平衡创新意识与经典保守范式之间的矛盾。

金字塔形人才架构模型在历史上已被多次证明是合理且有效的。科学史上不乏此类案例:例如,作为塔尖人才的爱因斯坦(Albert Einstein)在1915年提出的广义相对论中预言“光线会弯曲”;为验证这一假说,便需塔身级科学家设计实验方案与验证程序——英国科学家爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)正扮演了这一角色;而塔基级的众多人才则具体执行实验方案与流程,如坚定完成爱丁顿规划的远征行程、观测点布置及结果计算等。试想若无大量中、基层科学家的参与,仅凭爱因斯坦一人之力,实难验证其预言。技术史上,美国的曼哈顿计划与中国的“两弹一星”工程,亦是在金字塔形人才架构下方得以顺利推进。在曼哈顿工程中,塔尖人物包括总负责人莱斯利·格罗夫斯将军(Leslie Richard Groves Jr.)、主要策划者万内瓦·布什(Vannevar Bush)以及奥本海默(J. Robert Oppenheimer)、费米(Enrico Fermi)等全球顶尖核科学家;塔身则由洛斯阿拉莫斯实验室(Los Alamos Laboratory)、橡树岭工厂(Oak Ridge)、劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory)、埃姆斯实验室(Ames Laboratory)的科学家与美政界、军界负责人组成,为计划提供技术与

物资保障;而塔基部分参与落实的各类人员总数近十万人。中国“两弹一星”工程亦然:离不开党中央的战略决策和远见卓识,离不开处于塔尖位置的杰出人才如王淦昌、赵九章、钱学森、邓稼先、朱光亚、于敏等23位“两弹一星功勋奖章”获得者的理论支撑,也离不开全国数万名身处塔基的普通科技人员义无反顾的集体付出。

金字塔形的人才结构在中国核电事业的发展历程中同样适用。1970年周恩来总理在国务院有关会议上就上海地区缺电问题进行批示:“国内外都在搞核电站,你们回去研究一下、写个报告上来,我支持你们。”同时表达了对二机部的支持:“二机部不能光是爆炸部,要和平利用核能,搞核电站。”^[12]在发展核电的主基调下,“728工程”上马^①,但在选择堆型设计方案时陷入了“熔盐堆”和“压水堆”的抉择之争。面对“压水堆”和“熔盐堆”的选择困境,我国核潜艇首任总设计师彭士禄思考后指出,“熔盐堆技术不成熟,一旦出现问题,堆芯凝固,再也没法启动了。”^[13]同时彭士禄认为因为中国核潜艇采用的是压水堆技术,有了相关的设计和运行经验,核电站的建设应该利用这个经验,放弃熔盐堆,采用压水堆。在确定了压水堆的堆型选择后,上海市“728工程”设计队正式成立,成为中国早期核电设计建设的中坚力量。根据中国核电发展初期的这段历史来看,位于塔尖的周恩来总理定下了中国未来要发展核电的主基调,同样位于塔尖的彭士禄确立了压水堆作为核电发展的技术路线;“728工程”设计队的核心技术骨干,如欧阳予,作为塔身的中坚力量参与了具体的论证与设计工作;其余技术人员与工程人员则构成塔基的重要组成部分,共同推动核电站的建设。

基于四代核电事业的发展历程,中国核电事业要实现高质量发展,必须构建合理的金字塔形人才结构。具体而言,塔尖应由能源领域的学术精英(如两院院士)以及核能主管部门的决策者组成,他们负责设计中国核电事业的发展规划,并抉择核电技术的发展路线;位于塔身的人才应包括核电领域的专家教授、涉核机关的主要负责人,以及央国企二级单位的

① 1970年2月8日,周恩来总理作出重要指示:“从长远来看,要解决上海和华东地区用电问题,要靠核电”。为纪念这一历史性时刻,中国首座核电站工程被命名为“728工程”。

领导层, 由他们负责分解宏观规划的具体步骤, 组织论证技术路线的可操作性、安全性与商业性; 塔基的人才群体则主要承担具体工程的执行与操作任务。

3.2 中国核电人才的教育培养体系

核电作为复杂的现代工程, 具有天然的技术密集型特征。作为现代能源工程的典型代表, 核电站对涉核科学知识、施工建设、核安全监管、乏燃料处理等全链条各环节均有严格标准。历史经验表明, 唯有专业技术出众、本领过硬的人才队伍, 方能确保清洁、安全、经济的核电服务于社会公众。那么, 现有教育体系中涉核专业具有哪些特点?

对核相关学科进行梳理分析可发现, 其整体呈现如下特征: 核相关专业在高等院校、公立科研机构、涉核企业及职业技术学院中均有分布, 且各主体的培养侧重点存在差异。其中, 高等院校与公立科研机构以本科及研究生学历教育为基础, 同时聚焦核科学前沿领域的研究与探索; 涉核企业和职业技术学院则是侧重于结合实际操作场景开展专业技能培训。

3.2.1 高校核学科本硕博系统化理论育人体系 新中国成立后, 中国在高等教育阶段逐步开辟了核技术人才的培养路径。最早的核学科均设立于理工科传统强校, 例如清华大学、上海交通大学、西安交通大学、哈尔滨工程大学、兰州大学等。历经多年发展, 这些学科已形成一定规模, 并具备了相当的学术影响力。

根据教育部门户网站发布的《普通高等学校本科专业目录(2025年)》^[14]与《研究生教育学科专业目录(2022年)》^[15], 表2和表3整理了中国本科及研究生教育中核相关专业的开设情况。

根据表2信息, 在本科教育中, 除二级学科代码为070203的核物理属于理学大类外, 其余涉核学科均分布于能源动力类、自动化类及核工程类等工学门类之下, 这一设置强化了核学科的现实应用导向。尽管同属070203学科代码, 各高校核物理专业的强项与优势亦不尽相同。例如, 清华大学物理系核物理专业依托顶尖生源与雄厚师资, 研究覆盖原子核结构、相对论重离子碰撞与强相互作用体系、重离子核反应、核子间短程关联、强子夸克结构等基础前沿方向; 而南华大学核物理系则聚焦核聚变与等离子体物

表2 中国本科教育中核相关专业开设情况

Table 2 The offering of nuclear-related majors in Chinese undergraduate education

学科门类代码及名称	一级学科代码及名称	二级学科代码及名称
07 理学	0702 物理学类	070203 核物理
08 工学	0805 能源动力类	080501 能源与动力工程
		080503T 新能源科学与工程
08 工学	0808 自动化类	080805T 核电技术与控制工程
08 工学	0822 核工程类	082201 核工程与核技术
		082202 辐射防护与核安全
		082203 工程物理
		082204 核化工与核燃料工程

表3 中国研究生教育中核相关专业开设情况

Table 3 The offering of nuclear-related majors in Chinese graduate education

学科门类代码及名称	一级学科代码及名称	二级学科代码及名称
07 理学	0702 物理学类	070202 粒子物理与原子核物理
08 工学	0827 核科学与技术	082701 核能科学与工程
		082702 核燃料循环与材料
		082703 核技术及应用
		082704 辐射防护及环境保护

理、核工程与核技术、辐射防护与核安全等基础与应用并重的研究方向。相同代码下, 不同高校的内容设置各有侧重, 有效避免了人才培养的方向同质化。至于工科门类下的核学科, 则更注重工程人才的培养。上海交通大学机械与动力学院核工程与核技术专业旨在培养能胜任核科学与技术领域科研、设计、管理和运行工作的高级人才; 华北电力大学核科学与工程学院则依托“核动力工程全范围虚拟仿真实验教学中心”“国家级核电工程实践教育中心”等实践平台, 以“订单+联合”模式为中国核电企业输送“即插即用”型优秀人才。

在研究生教育阶段, 涉核课程仍主要分布于理学和工学两大类(表3)。其中, 理学仅设有070202粒子物理与原子核物理一门课程, 其余四门均归属于0827核科学与技术一级学科之下。相较于本科教育,

研究生教育更注重知识的深度及其对现实问题的解决能力,因此在课程设置上,作为理学学科的粒子物理与原子核物理专业,其研究方向进一步向更深奥、更前沿的粒子理论领域拓展。而在工学方面,课程则更侧重于核燃料、核工程、核辐射防护等具有明确实际应用前景的前沿实践领域。

3.2.2 国家实验室依托大科学装置培育高端前沿人才 作为体现国家意志、实现国家使命、代表国家水平的新型科研机构,国家实验室是高层次、少而精、突破型、引领型、平台型一体化的大型综合性研究基地。其中,国家同步辐射实验室、兰州重离子加速器国家实验室等已成为培养高层次核技术人才的重要阵地。

国家同步辐射实验室于1983年4月经原国家计委批准,成为我国首个国家级实验室,近十年来已培养研究生超过500人。在2016年第四轮学科评估中,其“核科学与技术”学科获评A⁺。依托“合肥光源”和“合肥先进光源”两大科学装置,该实验室的“核技术及应用”专业以带电粒子束与加速器理论为核心,逐步发展了束流操控、粒子源与电子枪以及粒子加速等关键技术,并在此基础上建成多种用途的粒子加速器^[16]。兰州重离子加速器实验室同样由原国家计委于1991年8月批准成立。该实验室自1978年破土动工,历时十年建成,总投资1.3亿RMB^[17],这笔科研投资在当时堪称巨额。实验室主要致力于重离子物理前沿与应用研究,涵盖原子核物理、核天体物理等领域。其核心装置——兰州重离子研究装置(HIRFL)是我国规模最大、能将氢至铀的全粒子加速至高能的重离子研究装置,由国家“一五”“七五”“九五”期间的三大科学工程组成^[18]。依托兰州重离子加速器这一大科学装置,以及中国科学院近代物理研究所几代科研人员的持续努力,我国在重离子物理及相关交叉学科领域已步入世界前列,取得了以新核素合成、原子核质量精确测量、重离子治癌为代表的一系列重要成果^[19]。基于HIRFL,甘再国研究员团队于2025年6月首次成功合成镆的同位素镆-210,相关成果发表在《自然·通讯》上^[20]。

国家实验室作为国家战略力量的重要组成部分,其核心科研资源是大科学装置。大科学装置具有造价

高、占地广、运行维护成本高等客观限制,因而成为稀缺资源。与此同时,大科学装置也是探索科学前沿的重要工具和人才培养的特区。国家实验室能否最大限度地发挥大科学装置的工具属性与教育属性,将成为其能否成功满足国家重大研究需求的关键。仅就核学科设置而言,中国高校已建立起完善的核教育体系,在本科阶段兼顾了核学科的理论教学与实践应用需求。进入研究生阶段,学生进一步深化理论素养,并在技术能力上实现精进。此外,即便学科代码相同,各高校也能依托自身学科渊源与师资力量,发展出独具特色的优势方向,从而避免培养同质化人才。博士学位作为最高学历,是培养塔尖型与塔身型人才的关键阶段。目前,我国拥有“核科学与技术”一级学科博士点的高校已达12所,其中包括清华大学、中国科学技术大学等顶尖院校,足以满足当前对高端核学科人才的培养需求。

3.2.3 科研院所与涉核央企产业型技术人才孵化平台 在中国科学院系统内,核能人才培养主要依托高能物理研究所、上海应用物理研究所和近代物理研究所,每年可为核事业输送研究生百余名。其中,上海应用物理研究所的主要研究方向涵盖钍基熔盐堆核能系统与高效能源存储。该所承担着中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”,并于2025年11月实现了钍铀核燃料转换的关键突破,已成为我国推动第四代核电技术发展的核心基地之一。

在涉核中央企业中,规模最大、历史最悠久的培养体系当属中国核工业集团公司旗下的中国原子能科学研究院(简称401院)。该院成立于1950年,是我国核科学技术的发源地,也是国防核科研、核能开发及核基础研究的重要创新基地^[21]。1999年9月18日,中共中央、国务院、中央军委在北京表彰为“两弹一星”事业作出突出贡献的科技专家,荣获“两弹一星”功勋奖章的于敏、王淦昌、邓稼先、朱光亚、陈芳允、钱三强、彭桓武等人都曾在此工作。中核集团还下设中国核动力研究设计院、核工业西南物理研究院等单位。同为涉核央企的中广核集团和国家电投集团也拥有各自的核电人才培养平台,例如中广核研究院、国家电投中央研究院以及上海核工程研究设计院

等。其中, 上海核工程研究设计院又称 728 院, 曾独立自主研发设计我国大陆第一座核电站, 并总包设计中国首个出口核电站, 在业内具有很高声誉。

大环境由若干子环境构成, 子环境的基本特征受大环境投射影响。这意味着, 要在整个核电领域形成金字塔形的人才结构, 就必须先在构成核电事业的各环节中实现同样的人才结构。通过查阅核电上市企业的年度财务报告, 笔者发现以下情况: 根据中国核电电力股份有限公司 2025 年年度报告, 公司研发人员共 4146 名, 其中博士研究生 108 名, 硕士研究生 901 名, 本科毕业生 3052 名, 专科及高中以下学历者 85 名, 占比分别为 2.6%、21.7%、73.6% 和 2%。中国核工业建设股份有限公司 2025 年报显示, 公司研发人员 8080 名, 其中博士研究生 11 名、硕士研究生 309 名、本科 6432 名、专科 1328 名, 分别占 0.14%、3.82%、79.6% 和 16.43%。从现有数据看, 随着高等教育在中国的普及, 作为塔基层的人才学历下限已显著提高, 普遍达到本科或专科以上。然而, 塔身级与塔尖级人才的比例仍待进一步优化。近年来, 研究生教育持续扩招, 国家亦日益重视人才培养, 未来塔身级人才的比例有望进一步提升。

3.2.4 职业技术院校核电运维技能人才供给渠道 职业教育在核电人才培养体系中发挥着不可或缺的作用, 能为核电工程补充大量具备专业技能的运维人才。此类涉核职业技术教育通常具有鲜明的地域性特征。以三门核电站所在地为例, 三门技师学院依托区位优势, 面向核电及关联产业开设相关专业方向, 已累计向全国 20 余家企业输送人才 1200 余名, 成为国内核电技能人才培养的典范^[22]。同时, 基于核电站常规选址特点, 核电站多建于人口相对稀少的县镇, 而这些地区往往就业岗位有限。核电站运行周期长、厂区规模大、日常维护需求高, 恰恰能够提供大量优质就业机会。因此, 立足科学教育与职业引导的使命, 在本地高等院校和职业技校开设对口的核技术专业, 有助于培养当地青年投身核电事业。

4 面向四代核电转型的人才战略培育路径

核电人才的培养不仅要解决当前的技术缺口, 更

需具备前瞻性与战略性; 既要顺应行业发展趋势, 也要满足国家重大战略需求。在国际形势复杂多变的今天, 西方国家日益常态化的技术封锁, 使得我们必须将核电等核心技术牢牢掌握在自己手中, 这也让核电人才的优化培养显得尤为迫切。面对人工智能时代的新趋势, 当前核电人才培养应重点聚焦于四代核电技术及“人工智能+核电”复合型人才方向。

4.1 培养匹配先进四代核电技术的人才

与所有高新产业的发展路径相似, 核电产业在成熟后也会迎来技术发生巨大变革的窗口期。从一代核电到二代、三代核电, 大体遵循着线性的技术迭代路径, 正如布莱恩·阿瑟 (W. Brian Arthur) 在《技术的本质》^[23]中所揭示的——通过局部创新推动整体进步。而四代核电则跳出了这种迭代式发展路径, 摒弃了原有的压水堆、重水堆、轻水堆等概念, 走上了一条全新的赛道。这意味着, 尽管核能发电的底层原理保持不变, 但四代核电与前三代在实现发电的技术手段上已完全不同。四代核电技术的发展往往需实现“从 0 到 1”的突破, 步入技术“无人区”, 在全球范围内并无先例可循。因此, 在人才培养环节必须跳出传统范式的束缚, 将批判精神与开放思维融入技术创新进程。唯有如此, 培养链条终端所产出的人才才能真正具备解决问题的能力。不难预见, 未来必将聚焦于四代核电技术的堵点, 培养能够攻克难关的专业人才。

早在 2006 年 2 月, 中国就在《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020)》中对于快堆、高温气冷堆的研发工作明确部署, 提出“建成 65 MW 实验快堆, 实现临界及并网发电”的目标, 并将高温气冷堆核电站确立为国家重点支持的重大专项^[24]。随后,《能源发展“十二五”规划》明确将 200 MW 级模块式高温气冷堆核电示范工程和快堆示范工程列为“十二五”时期能源示范工程的重点任务^[25]。同样, 美国能源部在 2017 年发布的《先进核反应堆开发与部署远景与策略》中指出, 到 21 世纪 30 年代初, 至少应有 2 种非轻水冷却的第四代核电技术趋于成熟, 其安全性和经济性得到验证, 核管会完成许可证申请审查, 并具备启动建设的条件^[26]。先进核电

技术的开发并非一蹴而就, 正如高温气冷堆的发展历程所示: 该堆型于1986年被列入国家“863计划”, 成为中国重点发展的先进反应堆之一; 2000年建成10 MW高温气冷实验堆; 2006年被纳入国家科技重大专项; 2012年石岛湾高温气冷堆开工建设, 直至2023年12月才实现商业运行, 前后历时37年。技术的前瞻性要求教育体系必须相应调整人才培养体系, 否则新理念的推进与实践的落地, 皆会因人才短缺而难以顺利实施。高温气冷堆从实验室走向商业应用耗时23年, 人才匮乏正是其中的关键原因。这一切都要求我们切实弥合产学研之间的隔阂, 加快人才培养模式的转型。

在顺利实现了高温气冷堆的商业运行后, 钍基熔盐堆被视为下一个最有潜力实现的四代核电技术。钍基熔盐堆的概念虽然在20世纪50~60年代就曾提出过并在美国橡树岭国家实验室中进行过实验, 但项目搁置后只有201份技术文档公开, 几乎没有可以借鉴的成熟经验。在钍基熔盐堆的技术发展路径上, 高温熔盐腐蚀是最为棘手的难题——熔盐如氟化锂等在700℃的环境下对金属材料的腐蚀速率可达传统核反应堆的10倍以上, 现运行的核电站的常规合金材料仅能耐受1~2年, 但频繁更换合金外壳既不安全也不具备现实操作性。其次, 中子辐照损伤的影响也难以避免, 熔盐堆中的中子通量密度极高, 导致材料晶格结构畸变进而影响钢材的强度。这种明确堵点的技术难题更像是对于专业人才的“命题作文”, 如何针对这类“命题作文”培养专业技术人才将是整个核电教育体系共同面对的问题。

综上所述, 随着三代核电技术日趋成熟, 未来核电发展的重心必将转向四代核电。然而, 四代核电技术要实现显著突破, 绝非一蹴而就, 而需在反复试错中曲折前行。在“从0到1”的早期探索阶段, 可借鉴中国科学院上海应用物理研究所在研发钍基熔盐堆初期采用的“专业归队、就近转行、以老带新、边干边学”的人才组建思路^[27]。这一方式在对口人才极度匮乏的初期被证明实用且高效。当研发进入常规阶段、技术堵点明确后, 则需强调有的放矢地开展人才培养与资源协调。

4.2 培养“人工智能+核电”复合型人才

先进核电技术的发展不仅限于核技术本身, 还需融合其他新兴技术。从当前行业趋势来看, “人工智能+核电”正成为重点领域。国际原子能机构2024年发布的《核电AI应用白皮书》指出, 全球70%在运核电站已部署至少一项AI创新应用。美国能源部在2024年发布的《科学、安全与技术领域人工智能前沿》计划路线图提出, 将通过其17个国家实验室与科学界、工业界合作, 构建全球最强大的综合科学人工智能体系, 以推动能源技术突破、增强国家能源安全^[28]。随着智能电厂理念的兴起, 数字孪生技术已在核电厂开展试点应用。该技术通过数字化方式构建物理实体的虚拟模型, 利用数据模拟实体在现实中的行为, 借助虚实交互反馈、数据融合分析与决策迭代优化, 为物理实体增添或拓展新功能^[29]。基于数字孪生技术, 可精准模拟核电运行状态, 推动其从“被动处置”向“主动预判”转变。

“人工智能+核电”复合型人才在核安全监管领域同样具有重要的实践价值与意义。习近平总书记强调, 核工业是高科技战略产业, 是国家安全重要基石, 要坚持安全发展、创新发展^[30]。从预测不确定性的角度来看, 工程的负效应在一定程度上具有必然性, 即工程风险难以完全消除, 只能尽力规避^[31]。核能发展客观伴随风险, 但通过一系列有效的技术与管理手段实施纵深防御, 安全是能够保障的。当前, 我国正处于从核大国向核强国转型迈进的关键时期, 必须始终将核安全置于最高优先级, 以扎实有力的措施确保核安全万无一失。在核电安全监管中, 人工智能的赋能不可或缺。美国科技巨头微软与英伟达曾合作开展人工智能赋能核电的实践, 实现了核电站许可、设计、建设与运营全流程的优化。同时, 人工智能在大数据运算方面具备天然优势, 能够对海量、多源的传感器数据进行实时并行处理与深度解析, 从而显著提升对设备异常状态和潜在安全风险的早期预警与诊断能力^[32]。回顾历史上多次重大核事故, 造成不可逆转的惨痛后果的根本原因, 归根结底在于人性在重大关头的脆弱性与利己性。由此可见, 核安全问题的核心仍是涉核人才的教育与培训; 若再辅以人工

智能, 核安全必将展现出全新格局。

然而在现实场景中, 既掌握核电技术又熟悉 AI 算法的复合型人才极为稀缺, 要培养这类人才需双管齐下。第一条路径是加强高校与涉核企业的校企互动。近年来, 人工智能专业在高校中较为普及, 具备人工智能素养的学生多具有理工科背景, 他们可被视为“人工智能+核电”的储备人才。涉核企业与高校涉核专业通常已具备紧密的人才供需与技术合作关系, 可进一步推动涉核企业参与到有志于核电事业的人工智能人才培养计划中, 在高等教育阶段以交叉学科与校企联合并行的模式, 实现“人工智能+核电”的复合型培养。第二条路径则面向已有的涉核企业人才队伍, 通过技术培训与企业设立的人工智能人才认证体系, 推动应用型人才的培养^[33]。在此双轨并行的模式下, 既能提升作为“存量”的现有核电人才队伍, 又能从高等教育中获得持续不断的人才“增量”。

5 结论

核电作为我国实现高质量发展、保障国家能源安全的核心关键领域, 其长期稳健发展高度依赖一支专业功底扎实、队伍结构合理的高素质人才队伍。当前, 全球核电技术正处于从三代核电向四代核电转型升级的关键变革期, 人工智能等新兴技术的兴起也为行业发展带来全新的机遇与挑战。在此背景下, 本文系统梳理我国核电产业的发展历程, 通过对核电领域功勋人物开展社会学分析, 构建契合新时代发展需求的理想核电人才架构模型, 并明确未来核电人才培养的核心方向。研究结论如下:

(1) 对我国核电功勋人物的社会学分析显示, 行业杰出人才的成长路径存在显著共性特征。该群体普遍接受了国内顶尖高校的完整高等教育, 所学专业与工作岗位高度匹配, 且得益于完善的科学奖励机制的认可与激励。这表明, 系统化的严谨学科训练、专业对口的工作岗位以及有效的激励机制, 是培养顶尖核

电人才的关键外部条件。

(2) 科学合理的“金字塔形”人才结构是支撑核电事业可持续发展的最优选择。“塔尖”由能源领域学术精英与行业主管部门决策者构成, 主要负责制定核电产业宏观发展规划与技术路线;“塔身”由核电领域专家教授、涉核机构负责人及企业中层管理者构成, 主要负责将宏观规划分解为可落地执行的具体步骤并开展科学论证;“塔基”由大量承担具体工程执行与操作任务的专业技术人才构成, 是核电工程落地实施的坚实基础。

(3) 我国已建立起涵盖高等院校、公立科研机构、涉核中央企业及职业技术学院的多元化核电人才培养体系。该体系在本科及研究生培养阶段兼顾了理论深度与应用导向, 并依托国家实验室等大科学装置开展前沿领域尖端人才培养, 为行业发展提供了稳定的人才供给。

面向未来, 我国核电人才培养需聚焦两大战略方向, 以应对技术变革与国际竞争。(1) 培养适配四代核电技术的专业人才: 四代核电技术突破传统技术路径, 进入技术探索“无人区”, 人才培养需打破传统范式, 侧重培养具备批判性思维与原始创新能力的专业人才, 攻克“从0到1”的关键技术难题。(2) 培养“人工智能+核电”的复合型人才: 随着相关技术的推广应用, 人工智能已成为提升核电运行安全性与运营效率的核心驱动力, 未来需通过“高校-企业”联合培养、在职人员技能升级的双向路径, 培养兼具核电核心技术与人工智能算法能力的复合型人才, 为核电相关工作赋能, 保障核电事业在智能化时代安全发展与技术领先。

本研究主要基于历史数据与现有公开资料开展分析, 对核电功勋人物社会学特征的归纳可能未能完全覆盖所有个体差异。同时, 针对“人工智能+核电”这一新兴交叉领域的人才培养模式, 目前仍缺乏大规模、长周期的实践数据验证其实际成效, 相关探讨更多属于基于行业发展趋势的前瞻性分析。针对这些局限性, 我们期待今后有更加深入的实证研究。

参考文献

- [1] 本·马斯登, 克罗斯比·史密斯. 工程帝国: 19世纪英国技术文化史[M]. 王唯滢, 郭帅, 等, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 2024.

- Marsden B, Smith C. *Engineering Empires: A Cultural History of Technology in Nineteenth-Century Britain*[M]. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2005.
- [2] Argonne National Laboratory. Reactors designed by Argonne National Laboratory[EB/OL]. (2023-07-20)[2026-05-25]. <https://www.ne.anl.gov/About/reactors/early-reactors.shtml>.
- [3] Atoms for Peace Speech[EB/OL]. (2013-12-06)[2026-05-26]. <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>.
- [4] 中国人民政治协商会议第一届全体会议 各单位代表主要发言[N]. 人民日报, 1949-09-24(002).
The First Plenary Session of the Chinese People's Political Consultative Conference. Main Speeches by Delegates from All Sectors[N]. People's Daily, 1949-09-24(002).
- [5] 赵天宇. 四代核电技术都有哪些特点?[N]. 北京科技报, 2022-10-17(009).
Zhao T Y. What are the characteristics of four generations of nuclear power technologies[N]. Beijing Science and Technology News, 2022-10-17(009).
- [6] 马驰. 中国核电发展的历史与政策[J]. 管理世界, 1991(3): 218.
Ma C. History and policies of China's nuclear power development[J]. Management World, 1991(3): 218.
- [7] 王珂, 李侠. 一项关于“科技创新人物”获得者的社会学分析: 以2018年科技创新人物为例[J]. 自然辩证法研究, 2021, 37(11): 81-86.
Wang K, Li X. A sociological analysis of the winners of "scientific and technological innovation figures": A case study of tech innovators in 2018[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2021, 37(11): 81-86.
- [8] Merton R K. *The Sociology of Science*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1977: 293.
- [9] 徐飞, 赵明. 杰出科学家的国家认可机制探索: 以中国科学院院士制度与国家自然科学奖励制度关联性为例[J]. 科技导报, 2012, 30(11): 15-20.
Xu F, Zhao M. Exploration on the National Accreditation Mechanism of Outstanding Scientists: Taking the correlation between the academicians system of China Academy of Sciences and the national natural science award system as an example[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(11): 15-20.
- [10] 吴江. 深入实施人才强国战略[J]. 红旗文稿, 2023(3): 22-25.
Wu J. Deeply implement the strategy of strengthening the country through talents[J]. Red Flag Manuscript, 2023(3): 22-25.
- [11] 李侠, 谷昭逸, 成素梅. 上海科创建设面临的人才发展瓶颈与对策[J]. 科技中国, 2024(4): 80-85.
Li X, Gu Z Y, Cheng S M. The bottleneck of talent development faced by Shanghai science and technology innovation construction and its countermeasures[J]. Science and Technology in China, 2024(4): 80-85.
- [12] 石岩. 我国核电领域的先区: 记上海核工院专家委员会名誉主席欧阳予院士[J]. 中国科技成果, 2009(17): F0003.
Shi Y. A pioneer in China's nuclear power field: A record of Academician Ouyang Yu, honorary chairman of the Expert Committee of Shanghai Institute of Nuclear Technology[J]. China Science and Technology Achievements, 2009(17): F0003.
- [13] 吕娜. 核动力道路上的垦荒牛: 彭士禄传[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 90.
Lyu N. Cattle Reclaimed on Nuclear Power Road: Biography of Peng Shilu[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 90.
- [14] 教育部. 教育部关于公布 2024 年度普通高等学校本科专业备案和审批结果及《普通高等学校本科专业目录(2025 年)》的通知[EB/OL]. (2025-04-01) [2026-05-26]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_1034/s4930/202504/t20250422_1188239.html [IsRedirectHit=1112621809](#).
Ministry of Education of the People's Republic of China. Circular on announcing the filing and approval results of undergraduate majors of general higher education institutions for the 2024 academic year and issuing the Catalogue of Undergraduate Majors in General Higher Education Institutions (2025 Edition) [EB/OL]. (2025-04-01) [2026-05-26]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_1034/s4930/202504/t20250422_1188239.html [IsRedirectHit=1112621809](#).
- [15] 政府网. 国务院学位委员会 教育部关于印发《研究生教育学科专业目录(2022 年)》《研究生教育学科专业目录管理办法》的通知 [EB/OL]. (2022-09-13)[2026-05-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/14/content_5709785.htm [eqid=9643dbe800019dea00000003645de6cd](#).
Gov.cn. Circular on issuing the Catalogue of Disciplines and Majors for Postgraduate Education (2022 Edition) and the Administrative Measures for the Catalogue of Disciplines and Majors for Postgraduate Education[EB/OL]. (2022-09-13)[2026-05-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/14/content_5709785.htm [eqid=9643dbe800019dea00000003645de6cd](#).
- [16] 国家同步辐射实验室. 招生培养[EB/OL]. [2026-05-21]. <https://www.nsl.ustc.edu.cn/10914/list.htm>.

- National Synchrotron Radiation Laboratory. Enrollment and Training[EB/OL]. [2026-05-21]. <https://www.nslr.ustc.edu.cn/10914/list.htm>.
- [17] 魏宝文. 兰州重离子加速器国家实验室(NLHIAL)的今天与明天[J]. 核物理动态, 1993, 10(3): 2-6.
- Wei B W. Today and tomorrow of the national laboratory of heavy ion accelerator in Lanzhou(NLHIAL)[J]. Nuclear Physics Review, 1993, 10(3): 2-6.
- [18] 兰州重离子加速器国家实验室. 简介[EB/OL]. [2026-05-21]. <https://imp.cas.cn/hirfl/gjsys/jj/>.
- National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou. Brief introduction[EB/OL]. [2026-05-21]. <https://imp.cas.cn/hirfl/gjsys/jj/>.
- [19] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置HIRFL[J]. 科学通报, 2016, 61(S1): 467-477.
- Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. Heavy ions research facility in Lanzhou(HIRFL)[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(S1): 467-477.
- [20] Zhang M M, Wang J G, Ma L, et al. Discovery of the α -emitting isotope ^{210}Pa [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 5003.
- [21] 杨军, 杨章灿, 黄晓宏. 复兴与挑战: 全球核科技人才教育培养体系与竞争力评价[C]//国际清洁能源论坛(澳门). 全球核能产业发展报告(2017). 北京: 世界知识出版社, 2017: 390-422+499-500.
- Yang J, Yang Z C, Huang X H. Revival and challenges: Education & training system and competitiveness evaluation of global nuclear science and technology talents[C]//International Forum for Clean Energy (Macao). Global Nuclear Industry Development Report (2017). Beijing: World Affairs Press, 2017: 390-422+499-500.
- [22] 罗文, 吕计燕, 余贤相. 工学一体化赋能核电技能人才培养: 三门技师学院核电专业群实践探索[J]. 职业, 2026(3): 17-19.
- Luo W, Lyu J Y, Yu X X. Work-study integration empowering nuclear power talents training: Practice and exploration of nuclear power specialty group in Sanmen technician college[J]. Occupation, 2026(3): 17-19.
- [23] Arthur W B. The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves[M]. New York: Simon & Schuster, 2009.
- [24] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于实施科技规划纲要增强自主创新能力的决定[M]. 北京: 人民出版社, 2006: 51, 57-58.
- CPC Central Committee and State Council. Decision of the CPC Central Committee and the State Council on Implementing the Outline of Science and Technology Development Plans and Enhancing the Capacity for Independent Innovation[M]. Beijing: People's Publishing House, 2006: 51, 57-58.
- [25] 国家发展和改革委员会. "十二五" 国家级专项规划汇编: 第 3 辑[G]. 北京: 人民出版社, 2014: 186.
- National Development and Reform Commission. Collection of national special plans for the 12th five-year plan period (Volume 3)[G]. Beijing: People's Publishing House, 2014: 186.
- [26] 刘渊, 蔡莉. 美部署第四代核电技术[J]. 中国核工业, 2018(2): 33.
- Liu Y, Cai L. The United States deploys the fourth generation nuclear power technology[J]. China Nuclear Industry, 2018(2): 33.
- [27] 张双虎. 挺进核能 "无人区" 筑梦钍基熔盐堆[N]. 中国科学报, 2026-05-26(01).
- Zhang S H. Marching into the "uncharted territory" of nuclear energy, building dreams for thorium molten salt reactor (TMSR)[N]. China Science Daily, 2026-05-26(01).
- [28] 张倬, 刘佳, 曾未未, 等. 面向核电产业链的人工智能技术应用总体架构研究[J]. 中国能源, 2024, 46(9): 54-63.
- Zhang Z, Liu J, Zeng W W, et al. Research on the overall architecture of artificial intelligence technology application in nuclear power industrial chain[J]. Energy of China, 2024, 46(9): 54-63.
- [29] 潘保林, 邹金强, 毛志新, 等. 数字孪生技术在核电站的应用分析[J]. 中国核电, 2020, 13(5): 587-591.
- Pan B L, Zou J Q, Mao Z X, et al. Application of digital twin technology in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2020, 13(5): 587-591.
- [30] 工业和信息化部. 习近平李克强就我国核工业创建 60 周年作出重要指示批示[EB/OL]. (2015-01-16)[2026-05-26]. https://www.miit.gov.cn/xwdt/szyw/art/2020/art_e22937226ad84c96b7f3e1840e6bacf7.html.
- Ministry of Industry and Information Technology. Xi Jinping and Li Keqiang deliver important instructions on the 60th anniversary of the founding of China's nuclear industry[EB/OL]. (2015-01-16) [2026-05-26]. https://www.miit.gov.cn/xwdt/szyw/art/2020/art_e22937226ad84c96b7f3e1840e6bacf7.html.
- [31] 殷瑞钰, 李伯聪, 汪应洛. 工程哲学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- Yin R Y, Li B C, Wang Y L. Philosophy of Engineering[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2022.
- [32] 孙莹. 人工智能促进核电高质量发展研究[J]. 数字经济, 2025(11): 86-88, 90.
- Sun Y. Research on artificial intelligence promoting high-quality development of nuclear power[J]. Digital Economy, 2025(11): 86-88, 90.
- [33] 谭思超, 李桐, 刘永超, 等. 关于人工智能在核能领域应用的若干思考[J]. 核动力工程, 2023, 44(2): 1-8.

Tan S C, Li T, Liu Y C, et al. Thoughts on the application of artificial intelligence in nuclear energy field[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(2): 1-8.

Research on the Talent Team Construction Mode of China's Four Generations Nuclear Power Projects

GU Zhaoyi, LI Xia*

School of History of Science and Scientific Culture, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Highlights

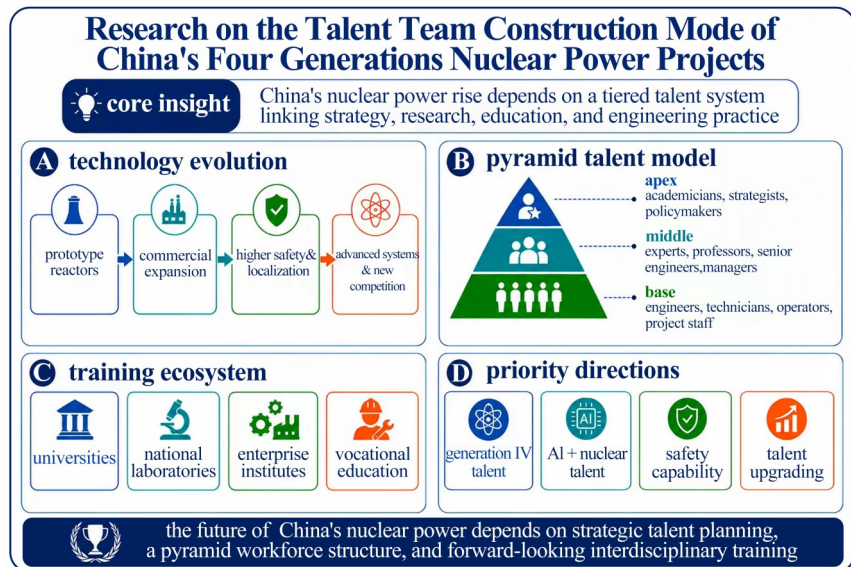
This paper analyzes the sociological characteristics and commonalities of the meritorious figures who contributed to the early development of nuclear power projects in China.

This paper puts forward a pyramid-type talent framework tailored to the development of China's nuclear power sector.

This paper summarizes the education and training system for nuclear power talents in China and its characteristics.

This paper puts forward the key directions for nuclear power talent training in the future.

Graphical Abstract



Abstract: With the rapid arrival of the artificial intelligence (AI) era, the bottlenecks constraining industrial development have fundamentally transformed. This trend has made the energy sector a focal point of global capital markets. According to projections by the International Atomic Energy Agency (IAEA), global energy demand will surge to 2.5 times its current level by 2050. Among various energy sources, nuclear power is emerging as the most promising option for future human society, owing to its low generation costs and stable, green power output. This study examines the organizational structure and operational arrangements of China's nuclear power talent system. Guided by the objective laws of nuclear power development, the high-quality advancement and sustainable operation of the nuclear power industry depend enduringly on a professional, appropriately scaled, and tightly organized talent workforce.

First, a review of the global evolution of nuclear power technology reveals a standardized international classification system that divides nuclear reactors into four generations. The first generation was developed to verify the feasibility and safety of nuclear power generation, while the second achieved commercial viability based on the feasibility and safety validated by its predecessor. The third generation represents an optimized and upgraded version of the second, with its core design philosophy focused on preventing core meltdown accidents and significantly enhancing operational safety. The fourth generation refers to advanced next-generation nuclear energy systems, encompassing all innovative reactor designs that move beyond traditional boiling water and pressurized water reactors. An analysis of the evolutionary path from the first to the fourth generation shows that the global nuclear power industry has entered a mature stage, with each generation exhibiting widely recognized industrial standards and distinct technical characteristics.

Second, emerging industries typically face inherent dilemmas in their early developmental stages, such as ambiguous technical

pathways, limited public awareness, and incomplete supporting systems. Resolving these challenges largely depends on the capabilities of outstanding talents. This study focuses on exploring the talent development model in the nuclear industry. Through sociological approaches, the characteristics of top-tier talents in nuclear power engineering can be identified, revealing the common attributes of industry pioneers. These attributes offer a viable cultivation path for outstanding nuclear power professionals. Specifically, exceptional talents should receive rigorous, advanced scientific education in their youth to establish a solid theoretical foundation. In the early stages of their careers, they should be placed in suitable positions to fully apply their professional expertise. Throughout their careers, an open, inclusive, and science-oriented social atmosphere should be fostered. Appropriate incentives for researchers' major achievements are essential, as a sound scientific reward system serves as a crucial institutional driver and guarantee for generating original scientific innovations.

Third, in accordance with the basic principles of social stratification, the talent structure in any field presents a pyramid shape, categorizing talents into three hierarchical levels: top-tier, middle-tier, and grassroots-tier. Based on the evolutionary process of four generations of nuclear power technologies, the high-quality development of China's nuclear power industry depends on a well-structured pyramid talent system. At the top of the pyramid are academic elites in the energy sector and decision-makers in nuclear energy administrative authorities, responsible for formulating national nuclear power development strategies and determining core technical routes. The middle tier consists of nuclear power experts, professors, leading administrators of nuclear-related institutions, and senior management of secondary subsidiaries of central state-owned enterprises. Their core responsibilities include refining macroscopic development plans and demonstrating the feasibility, safety, and economic viability of technical routes. The grassroots tier undertakes the specific implementation and operational work of nuclear power projects.

As a sophisticated modern engineering system, nuclear power is inherently technology-intensive. Historical experience indicates that only a highly professional and competent workforce can ensure the widespread adoption of clean, safe, and cost-effective nuclear power. A systematic review of nuclear-related disciplines reveals a diverse distribution with distinct functional orientations across universities, public research institutions, nuclear enterprises, and vocational colleges. Universities and public research institutions primarily focus on undergraduate and postgraduate education, as well as cutting-edge nuclear scientific research and technological exploration. In contrast, nuclear enterprises and vocational colleges place greater emphasis on vocational skill training tailored to practical engineering scenarios.

Lastly, the focus will be on the current training of nuclear power professionals. Consistent with the development patterns of all high-tech industries, the nuclear power sector enters a window of major technological transformation upon reaching maturity. The first three generations of nuclear power technologies adhered to a linear iterative development model, achieving overall industrial progress through partial technological innovations. Breaking this iterative paradigm, fourth-generation nuclear power technology abandons the technical frameworks of traditional pressurized water reactors, heavy water reactors, and light water reactors. Although the fundamental principle of nuclear power generation remains unchanged, fourth-generation technologies employ completely different power generation mechanisms compared to their predecessors. The research and development of fourth-generation nuclear power represent zero-to-one technological breakthroughs in an uncharted technical field with no global precedent. This necessitates a fundamental reform of traditional talent cultivation paradigms, integrating critical thinking and open innovation into technological research and development. It is foreseeable that future talent cultivation will focus on training specialized professionals to tackle the core technical bottlenecks of fourth-generation nuclear power.

Artificial intelligence and nuclear power talent are of equal importance. At present, in practical industrial scenarios, interdisciplinary talents who are proficient in both nuclear power technology and AI algorithms are extremely scarce. To address this talent shortage, a dual-track cultivation strategy is proposed. The first track involves strengthening university-enterprise cooperation between higher education institutions and nuclear enterprises. An interdisciplinary and industry-university joint cultivation model can be adopted in higher education to nurture compound talents skilled in both AI and nuclear power technologies. The second track focuses on the existing talent pool of nuclear enterprises, promoting the cultivation of applied interdisciplinary talents through professional technical training and enterprise-specific AI talent certification systems.

The talent development and training models adopted by China's nuclear power industry are applicable across all industries.

Keywords: fourth-generation nuclear power; talent team; pyramid talent structure; artificial intelligence+nuclear power; university-enterprise joint training