

如何把倾斜的地平线拉平？

——特高压这样回答

■张一龙

这是一条必须“拉平”的地平线。

如果从沙盘模型上看，我国地势呈西高东低台阶型分布。这不仅是一条山川走向倾斜的地平线，也是人口密度、经济热度“倾斜”的地平线，更是能源资源供给与需求“倾斜”的地平线。

全国一盘棋。如何在禀赋各异的东西部之间搭起“鹊桥”，通过能源资源优化配置推动经济社会高质量发展，特高压输电给出了回答。

■折叠时空 一段跨越山海的奔赴

2025年，全国社会用电量首次突破10万亿千瓦时，该用电量相当于美国全年用电量的两倍多，超过欧盟、俄罗斯、印度、日本四个经济体的年用电量总和，约占全球用电总量的30%以上。

这么多的电，用在了哪里？2025年，中国国内生产总值已高达140万亿元，而且连续保持5%的增长速度。这意味着，即便是偏远山区也能稳定用上大功率电器。这种“用不完的电”像空气一样存在，支撑着工业机器人的动作、空调的运转、电动车的行驶、手机的刷新和夜市的烟火气。

这么多的电，来自哪里？来自西部脱硫除尘的火电、高山峡谷的水电、广袤原野山岭中成千上万的光伏板和旋转风机，当然还有清洁核电、潮汐发电、地热发电、生物质能发电等等。截至今年5月底，中国发电装机容量已突破40亿千瓦，这个数字背后，意味着中国的电力装机容量已经超过G7国家的总和。“去中国避暑，实现‘空调自由’”，酷热的2026夏季，一条推文冲上热搜，其实，“空调自由”和“发电自由”之间，正是千万条输电线路编织成的坚韧网络，成就了14亿人口生产与生活的“用电自由”。

时光回溯二十载。2006年8月19日，山西省长治市长子县，中国第一条特高压交流输变电工程——1000千伏晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程正式奠基。从那一刻起，标志着全国电力发展开启了特高压新征程。

特高压电网是指1000千伏及以上交流电网或±800千伏及以上直流电网，具有远距离、大容量、低损耗、占用地少等特点，被称为“电力高速公路”。

为什么要建特高压？

本世纪初，我国能源发展多重结构性矛盾持续凸显：能源资源与负荷中心逆向分布格局长期固化，中东部城市群电力季节性缺口逐年扩大，西部、北方综合能源基地煤炭储量丰厚、风光资源富集，但本地用电市场狭小，消纳空间严重不足；碳排放与大气污染治理压力持续加大，让振翅欲飞的经济社会发展束手缚足、踟蹰难行。立足能源安全长远布局，我国大力发展特高压输电的重大战略决策。彼时，很少有人能够预见，这条从南太行山直扑中原大地的银线，一举拉开中国特高压自主设计、自主制造、自主建设、自主运维的壮阔征程。

从此，特高压大幅压低远距离输电综合成本，倒逼全国产业开发布局优化调整；东部地区严控新增煤电规模，腾出宝贵土地资源发展高新技术、现代服务业，西部煤炭富集区域集约化布局大型煤电基地，同步配套风光新能源，电力就地清洁转化后通过“空中走廊”输送东部，形成东西部产业错位协同、优势互补的良性格局。

仅以雁淮直流为例，自2017年投运至2025年底，山西累计向江苏输送电量突破3000亿千瓦时，供电总量可满足1亿户家庭全年生活用电。

物尽其用，各畅其流。特高压交直流通道如同贯通全国的能源“大动脉”，实现了人类历史上首次超远空间、超大规模的电力能源“搬运”。特高压已经重塑了中国能源地理版图。

■攀登险峰 一次突破藩篱的出击

科技兴则民族兴，科技强则国家强。

纵观全球电力工业发展史，百万伏特高压输电长期被视为难以逾越的“技术珠峰”。从科技创新维度回望，长治试验示范工程是我国特高压技术从零突破的决定性一战。

工程开工建设之初，国内并无成套设计理论、统

一标准规范、国产化核心主设备，更无成熟工程建设与成套运维体系。国家电网牵头集结全国100余家高校、科研院所、输变电制造龙头组建联合攻关专班，历时数年集中攻坚180余项核心技术难题，在电压标准制定、交直流过电压抑制等六大核心领域取得原创性重大突破，彻底打破国外技术垄断、摆脱设备“卡脖子”困境。

从产业变革维度看，特高压工程带动国内百万伏电工装备全产业链迭代升级，培育形成覆盖变压器、换流阀、复合绝缘子、输电杆塔、控制保护系统的完整产业链，彻底击碎国外高端输变电设备长期垄断格局。二十年间，我国特高压成套装备不仅全面满足国内大规模建设需求，更实现技术、标准、成套设备同步出海，稳固确立全球电力装备产业竞争新优势。

依托特高压工程运行数据，我国牵头编制全球首套特高压交直流全系列国家、行业标准，覆盖规划设计、设备制造、施工建设、运维检修、试验检测全流程百余项规范。在此基础上，我国主导制定20余项特高压国际标准，自立自强的全链条科技创新体系全面成型，真正实现“中国技术、中国标准、全球共享”。

一根根银线似彩带，一座座站所如丰碑，技术创新始终是特高压发展的内生动力。从新疆到安徽的世界最长线路，到川渝的“地狱难度”工程，再到白鹤滩的智能混塔方案，每一项突破都让“电力天路”含金量更高。从运行成效来看，特高压直流相较于传统500千伏超高压线路，特高压通道输电损耗降低2/3，输电走廊占地节省一半以上。

如今，中国特高压电网柔性直流技术、核心装备、海拔适应性、数智化运维日益成熟，已在西部高海拔基地外送、东部负荷中心受端接入、复杂环境施工与运维等典型技术应用场景分布上成功实践。

■更绿更强 一场照耀梦想的远征

于群峰之上，更觉长风浩荡。

从环境保护硬约束到“算力的尽头是电力”，从AI大模型、人工智能、电算协同、零碳园区、绿电直连等国家级战略到电动汽车、分布式新能源、智慧型微电

网、车网互动等新型民生“底盘”，一个崭新的时代已经扑面而来，而新型能源体系、新型电力系统和新型电网应运而生。

新型能源体系的核心使命，是在牢牢守住能源安全底线前提下，同步实现非化石能源大规模替代、化石能源清洁高效利用、多能互补协同发展。二十年来，全国以特高压骨干网架为核心的电力高速网，系统性破解新能源空间错配、出力波动、安全失稳、消纳受限等痛点，成为新型能源体系核心骨架、新型电力系统刚性支撑，为能源结构深度转型提供不可或缺的基础设施保障。

1000千伏交流特高压擅长区域电网互联，实现省间错峰、水火互济；±800千伏及以上直流特高压适配点对点超长距离送电，将西部能源基地电力直送东部负荷中心，两类线路功能互补、分层布局，搭建起全域互联互通的立体网架。

山河阻隔曾是古人无奈的天堑，如今已成为毫秒级抵达的彼岸。

据统计，全国特高压通道配套各类调节资源占比已超40%。截至2026年，全国特高压通道支撑沙戈荒风光大基地总装机超2亿千瓦，每年通过特高压跨区外送新能源电量超4000亿千瓦时，彻底打破地域消纳容量上限，让戈壁荒漠间的风光资源转化为全国共享的绿色动能，为新型能源体系持续注入清洁电力增量。

新型能源体系离不开全国统一、竞争有序、灵活高效的电力市场支撑。特高压交直流网架打通省域、区域市场壁垒，构筑起全域优化调配格局。

截至2026年6月30日，全国累计建成46项国家级特高压工程，成功搭建起“西电东送、北电南供、水火互济、风光互补”的全国统一能源骨干网架，建设规模、核心技术、安全运行水平全方位领跑全球。

从长远规划来看，“十五五”时期全国特高压建设持续提速。预计到2030年，全国跨区特高压综合输电能力突破4.2亿千瓦，支撑全国新能源发电量占比提升至30%以上，持续夯实新型电力系统物理底座。

中国特高压经过二十年筚路蓝缕、砥砺前行，终成强健之体、蓬勃之势。

阿坝—成都东1000千伏特高压交流工程全线贯通

本报讯 8月26日，在四川阿坝藏族自治州理县施工现场，随着最后一段输电导线牵引展放到位，阿坝—成都东1000千伏特高压交流工程全线贯通，为年底投入试运行打下了坚实基础。

这条电力大通道从新建的阿坝1000千伏变电站出发，一路延伸到成都东1000千伏变电站，全长734.8公里，沿途新建铁塔1400余基。超半数线路穿行在高海拔山区，山高坡陡、沟谷纵横，还要跨越多条交通干线和电力通道，导线展放难度极大。

工程在放线施工中采用数智化管控模式，全线布设“天网”监控系统，实现作业现场视频全覆盖。在跨越西成客专、沪蓉高速等关键点位时，建设团队应用可视化牵张设备，全程盯牢放线过程，同时借助数字化管理平台提升放线精度，有力确保施工安全与质量。

面对高原地区大风、覆冰等复杂气象条件，工程

在海拔3000米以上区段应用了十分裂导线。相较于传统的四分裂、八分裂导线，十分裂导线由10根子导线组成，能更有效地降低输电噪声，保护生态环境，提高输电效率和稳定性。

“我们负责的川西段，近1/3区域海拔超3000米，地形复杂。再加上雨雾天气多，能见度低，给施工推进带来很大阻碍。”工程川西段负责人马青表示，项目团队持续优化施工工艺，运用直升机吊运、无人机勘察等作业方式，保障了工程安全高效推进。

据悉，工程全线贯通后，将有序开展线路附件安装、变电站电气安装以及消缺调试、验收等工作，预计将于今年年底投入试运行。届时，川西丰富的水电资源将源源不断地送往成渝地区，每年可输送清洁电量超150亿千瓦时，为成渝地区双城经济圈高质量发展提供充足稳定的绿色电力保障。

（谢春艳 高珩瑞）



在四川省阿坝藏族自治州理县，阿坝—成都东1000千伏特高压交流工程作业人员在安装间隔棒。

国网四川建设公司/供图

解锁关键指标——

煤电深度调峰有望再攀新高

■本报记者 全晓波



山西省晋城市阳城县的大唐阳城发电项目现场，无烟煤宽负荷燃烧发电与氮氧化物控制关键技术及工程示范将于今年10月启动低负荷稳燃试运行工作。

近日，一项题为“无烟煤宽负荷燃烧发电与氮氧化物控制关键技术及工程示范”的国家重点研发计划项目课题——“无烟煤逆喷式多级预热煤粉燃烧技术”中期项目成果通过权威机构鉴定。鉴定结果显示，位于陕西省神木市的一处无烟煤煤发电试验装置，采用课题组开发的耦合多级预热煤粉稳燃器搭建高效燃烧系统，经煤粉富集输送装置在线深度提浓后，达成核心指标要求，将炉内煤粉固气比（煤粉浓度）稳定提升至5倍以上，远超行业目前仅能提升1倍的水平。

上述核心指标的成功达成，为下一步技术应用于电厂燃煤锅炉，解决无烟煤在25%负荷下主煤粉气流的着火和稳燃问题奠定了扎实基础。

■攻克无烟煤机组低负荷稳燃瓶颈

无烟煤挥发分含量低、着火难，用作动力煤燃料，特别是当机组处于低负荷运行工况时，因燃料量减少导致炉膛温度显著降低，极大制约炉内无烟煤粉的稳燃性能，进而影响机组调峰能力的发挥。在当前新能源大规模并网、火电深度调峰背景下，不能满足新型电力系统建设的需求。

“无烟煤粉在锅炉低负荷条件下着火晚、稳燃难，主要由于煤粉气流着火需热与供给热量不匹配等复杂因素所致，亟须研发能够提供稳定热源的着火稳燃技术，升级传统燃烧系统。”该课题负责人、中国煤科首席科学家、天地融创科技发展部副主任牛芳在接受《中国能源报》记者采访时介绍。

为此，天地融创将其自主开发的工业锅炉清洁高效燃烧技术创新应用于电站锅炉，攻克电站锅炉在深度调峰时的低活性燃料稳燃技术瓶颈，成功实现为无烟煤主煤粉气流着火提供稳定热源，并以此打造出一套面向新一代煤电的深度调峰“逆喷式多级预热高效燃烧技术”解决方案。

“区别于市面上所有的燃烧技术，逆喷式多级预热稳燃技术一方面实现煤粉深度富集与输送，可将煤粉浓度提升至5倍以上，从而解决了煤粉的快速引燃问题；另一方面改变传统燃烧器的直吹式进料方式，重构预燃路径将煤粉逆向给人，并通过三级预燃延长煤粉在燃烧器的停留时间，解决了低负荷下主煤粉气流的着火、稳燃以及燃尽差等痛点，同时有效抑制氮氧化物的生成。”牛芳介绍，与40%左右的负荷工况相

比，氮氧化物排放可降低10%—20%。

■示范项目稳步推进

记者从中国大唐集团科学技术研究总院有限公司（以下简称“大唐科研总院”）华北电力试验研究院了解到，上述国家重点研发计划重点专项“无烟煤宽负荷燃烧发电与氮氧化物控制关键技术及工程示范”项目由大唐科研总院牵头承担，联合哈尔滨工业大学、大连理工大学、华中科技大学、天地融创，以及清华大学、浙江大学、华北电力大学、大唐阳城发电、东方电气集团等10家单位，组建联合攻关团队，重点攻克在300兆瓦级及以上煤粉锅炉机组全负荷燃用纯无烟煤，无外部助燃情况下实现25%最低负荷稳燃、烟囱出口污染物排放满足超低排放标准，且不降低锅炉运行经济性。

据悉，自项目启动以来，研发团队聚焦无烟煤W火焰锅炉宽负荷稳燃与深度降氮的行业共性难题，目前已在0.5兆瓦燃烧实验台成功实现25%—100%全负荷区间100%无烟煤稳定燃烧，并将炉膛出口氮氧化物排放浓度稳定控制在550毫克/立方米以内，为电站锅炉实现宽负荷运行提供了扎实的理论支撑。项目已于今年7月底顺利通过国家自然科学基金委员会高技术研究发展中心在北京组织的中期考核。

项目配套示范工程以大唐阳城发电一台600兆瓦在运无烟煤发电机组为主要实验对象，目标是实现锅炉全负荷燃用100%无烟煤的受热面壁温、结渣、腐蚀安全可控，使锅炉最低稳燃负荷（无外来热源稳定燃烧）从40%降至25%，锅炉原始氮氧化物排放从每立方米900毫克降至550毫克以下，且烟囱出口污染物排放满足超低排放标准。

截至目前，该机组已完成全部改造施工，顺利并网并实现带满负荷稳定运行，后续将全面开展精细化热态燃烧调整工作。预计将于今年10月开始低负荷稳燃试运行。

■向“零碳机组”再进阶

截至目前，该面向新一代煤电深度调峰的“逆喷式多级预热高效燃烧技术”已获授权专利近20项。其配套核心创新成果，逆喷式多级预热高效燃烧装备——电站煤粉锅炉灵活深度调峰无助燃点火稳燃装备，于2025年9月入选国家能源局公布的第五批能源领域首台（套）重大技术装备名单。

今年1月，内蒙古京科发电有限公司（以下简称“京科发电”）运行的1台350兆瓦机组采用该技术方案改造后，经第三方测试显示，锅炉以褐煤为燃料，平均稳燃负荷低至18.8%（62.03兆瓦），最低稳燃负荷更下探至15.8%（51.96兆瓦），在机组纯凝工况下实现连续运行6小时以上，突破高水分、高灰燃料稳燃技术瓶颈，较行业常规降低57%。

测算显示，京科发电上述机组在现货市场电价为-50元/兆瓦时的工况下运行6小时，可为电厂节省燃煤350吨，减少负电价发电量31.2万千瓦时。以京科电厂年负电价运行1200小时测算，每年可节省标准煤6.46万吨。

经实际工程验证，相较于传统的等离子体与微油助燃技术，该技术方案可将氮氧化物排放降低20%以上，运行成本降低80%，经济、环保优势显著。

值得一提的是，这一技术理念先前已在工业锅炉领域充分验证了其可靠、高效与超低排放性能，适用燃料覆盖从煤炭到兰炭，以及煤炭与天然气掺烧、生物质等。

“接下来，一方面在规模上，我们的目标是将应用场景进一步拓展至千兆瓦级机组；另一方面我们也正计划进一步探索在氨煤、生物质掺烧等低碳燃料、零碳燃料方面的适用性，助力电厂加快低碳，乃至零碳转型。”天地融创党总支委员、副总经理纪任山介绍，目前，大唐马头电厂300兆瓦煤电机组改造项目已预留氨煤掺烧接口，未来有望平滑升级至“零碳燃料”路线。