

# 19项 世界第一

作为世界级工程，昆柳龙工程创造了19项世界第一，包括世界上第一个±800千伏特高压柔性直流输电工程，世界单站容量最大的换流站，世界首次具备架空线路故障自清除及再启动能力等。



乌东德水电站送电广东广西特高压多端柔性直流示范工程线路全长1452公里，途经云南、贵州、广西、广东四省(区)。何剑峰摄

## 乌东德水电站送电广东广西示范工程建成投产 特高压输电技术进入柔性直流新时代

◎本报记者 瞿剑

2020年12月27日10时许，随着国家能源局局长章建华下达启动投产指令，国家西电东送重点工程——乌东德水电站送电广东、广西特高压

多端柔性直流示范工程正式建成投产。作为世界上第一条±800千伏特高压多端柔性直流输电工程，其建成投产几乎登上了年度能源新闻排行榜前列，被认为“我国在世界上率先系统掌握了特高压多端混合柔性直流技术体系”，并“引领世界特高压技术进入柔性直流新时代”。

2020年7月底云南至广东柔性直流双极低端阶段投产以来，没有出现一起“闭锁”。但是柔性直流作为一种新技术，以往工程最高电压做到500千伏，送电量、送电效率还不够高。此次则提升到800千伏，送电量也达到全球最高的800万千瓦。浙江大学教授、国际电气电子工程师学会(IEEE)会士徐政展望：“这是一个开路工程。此后，远距离、大容量送电工程，都会首选柔性直流技术。”

2020年7月底云南至广东柔性直流双极低端阶段投产以来，没有出现一起“闭锁”。但是柔性直流作为一种新技术，以往工程最高电压做到500千伏，送电量、送电效率还不够高。此次则提升到800千伏，送电量也达到全球最高的800万千瓦。浙江大学教授、国际电气电子工程师学会(IEEE)会士徐政展望：“这是一个开路工程。此后，远距离、大容量送电工程，都会首选柔性直流技术。”

### 19项第一解决了一批世界性难题

作为世界级工程，昆柳龙工程创造了19项世界第一，包括世界上第一个±800千伏特高压柔性直流输电工程，世界单站容量最大的换流站，世界首次具备架空线路故障自清除及再启动能力等。“每项世界第一都可以写一篇文章。”李立涅如是说。

采用混合直流技术，大大增加了研发和建设难度；而创造19项世界第一，每一项都是输电技术领域“无人区”的重要突破。“我们并非为了世界第一而第一。”饶宏表示，柔性直流技术对电网运行可控性的提高经过了充分论证，柔直技术让复杂的电网变得更加可靠，支持西电东送直流输电持续实施。

李立涅表示，中国人实现了柔性直流技术在多端、特高压、柔直电网等工程中的应用，中国发展柔性直流技术将有可为。南方电网公司通过在主电网应用、掌握特高压多端柔性直流技

术，推动了柔性直流技术的进步，将在未来电网技术发展中起到核心作用。

19项世界第一的背后，是成套设备从无到有研制出来，大量前所未有运行方式从0到1逐一破解。在输电技术领域“无人区”，南方电网公司牵头，整合国内科研、高校、设计、制造等单位，围绕特高压柔性直流拓扑结构、控制保护系统以及绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、柔性直流变压器等关键设备和核心技术，展开了为时数年的大攻关，解决了“单一模块故障导致系统闭锁”、系统运行方式优化等一批世界级难题。

柔性直流换流阀这一关键设备被称为工程的“心脏”，如今世界首个能承受±800千伏特高压的国产“心脏”已在龙门换流站稳定“跳动”。其中一些先进技术将被应用到即将建设的海上柔性直流项目，并将被国外厂家借鉴；IGBT关键芯片更是打破了国外少数厂家的垄断。

此外，还包括柔直变压器、桥臂电抗器等多个关键设备、器件，而这些以往都受制于人，实现从无到有，维护了特高压直流技术全产业链安全。

据不完全统计，工程有效带动了包括原材料、电力设备、电力电子器件、设计、施工、监理、检测等在内的产业链上下游众多企业复工复产达产，仅换流站的物资供应商就达166家，拉动社会投资约780亿元，在保产业链供应链稳定方面亦发挥了重要作用。

### 延伸阅读

#### 又一惊人业绩：主设备自主化率100%

除19项世界第一之外，主要设备自主化率100%，是昆柳龙工程创造的又一惊人业绩。

“工程推动了中国柔性直流输电技术保持国际领先地位，并通过需求拉动，大大加快了能源电力产业链上下游企业创新能力提升、产品升级换代步伐。”中国工程院院士、南京南瑞继保电气有限公司董事长沈国荣表示。

南方电网超高压公司副总经理李庆江介绍，实现自主化率100%的主设备中，除IGBT关键芯

片外，还包括柔直变压器、桥臂电抗器等多个关键设备、器件，而这些以往都受制于人，实现从无到有，维护了特高压直流技术全产业链安全。

据不完全统计，工程有效带动了包括原材料、电力设备、电力电子器件、设计、施工、监理、检测等在内的产业链上下游众多企业复工复产达产，仅换流站的物资供应商就达166家，拉动社会投资约780亿元，在保产业链供应链稳定方面亦发挥了重要作用。

龙源电力安徽公司党委书记、副总经理王芳表示，二期工程建设让风电场真正变得智能了。在这次建设中，每台风电机组都在塔基、机舱等位置安装了智能摄像头和功能复杂的传感器，并与后台的软件共同构成智能分析预警系统。摄像头能够支持监控中心随时查看机组运行情况，传感器能够对机组齿轮箱、发电机、叶片等重点位置的振动、噪音等各类信号进行监测、分析，提前判断机组故障，并向监控中心发送预警信息。

“这一系统建设完成的当年，就为风电场运行立了大功。”陈峰说，2019年，系统通过对风电机组叶片振动频率的对比分析，判断出一叶片可能出现裂纹，并立刻向监控中心发送预警提醒。

经过运维人员38小时的紧急处理，故障最终转入日常检修环节，处理过程有惊无险。这一故障如果放在以前，直接维修成本会达到数十万元，更不要说非计划停机带来的发电量损失，以及巨大安全风险。

西负荷中心，预计每年送电330亿千瓦时，相当于海南省一年的全社会用电量；可每年减少煤炭消耗950万吨、减排二氧化碳2500万吨，将使粤港澳大湾区天更蓝、地更绿、水更清，为我国力争在2030年前二氧化碳排放达峰、2060年前为实现碳中和出一份力。

这样一个定位于清洁能源输送的超级工程，还将使云南水能利用率从2017年的88%提升至2020年的99%以上，基本实现全额消纳，同时对风、光等新能源的大规模开发利用起到推动作用。

### 输送清洁能源的超级工程

“作为乌东德水电站电力送出的‘主动脉’，该工程额定输送容量约占其总装机容量容量的80%。”南方电网公司总经理曹志安介绍，工程总投资242.49亿元，线路起于云南昆北换流站，落在广西柳北换流站和广东龙门换流站，全长1452公里，简称昆柳龙直流工程；工程于2018年3月29日由国家发改委核准，采用±800千伏特高压三端混合直流系统，输送容量800万千瓦。

工程把世界第七大水电站——乌东德水电站丰沛的水电源源不断送抵粤港澳大湾区和广

### 采用特高压多端混合直流系统

“这是一个领跑世界的超级工程，它标志着我国特高压直流输电技术提升到空前水平，开创出新的输电模式。”中国工程院院士、南方电网公司专家委员会主任委员李立涅表示。

此前，世界主流输电模式都是“直流送电、交流组网”。南方电网公司首席技术专家、南网科研院院长饶宏介绍，这缘于交直流输电本身的技术特性：常规直流主要用于点对点、远距离、大容量电源外送，而不能组网；交流输电则可以满足常规电源送出和电网互联需求，且成本低。但这一基本模式却面临一个“原理性障碍”，即所谓“多直流馈入”问题。他解释，大流量的常规直流汇入电网，就像一条大河流入一个水库，一旦常规直流线路“闭锁”，就像河水突然截停，会导致水库缺水。

然而柔性直流改变了这一切。柔性直流(flexible)是20世纪90年代兴起的新一代“电压源

型”直流输电技术。和传统“电流源型”直流相比，它对电压、频率的控制更加灵活，就像一个完全可控的水泵，能够精准控制水流的方向、速度和流量，使水库更加平稳，河流被截停的几率也大幅下降。“这就是其柔性的主要体现。”饶宏表示。

昆柳龙工程在世界上首次采用特高压多端混合直流系统，送端云南昆北是常规直流，广西柳北、广东龙门两个受端是柔性直流。“这种方案既经济，技术上又先进。”李立涅解释，把西部水电送到用电需求大的广东、广西，距离近1500公里，远距离大容量输电用特高压直流最经济高效；但常规直流并网后，因其换相失败现象难以避免等固有特性，会对受端电网安全稳定带来一定冲击。“柔性直流能解决这些问题，它调控更加灵活，还能在关键时刻支持系统安全稳定运行。”

工程的已有实践，也印证了这一结论：自

## 智能化建设让风电场更“风光”

◎伍梦尧 本报记者 陆成宽



视觉中国供图

很长一段时间以来，风电场的日常运维都是一件大工程。风电场多建设在人迹罕至的荒郊野岭，相隔数百米的风电机组，叶轮机舱高达几十米，一旦出现问题就要花费巨大的人力物力，部分大部件的更换作业甚至需要花费上百万元。恶劣的环境、高昂的检修成本，一度让风电行业的精益化发展成为不小的难题。

2020年12月29日，记者从国家能源投资集团有限责任公司获悉，该集团在龙源电力集团股份有限公司(以下简称龙源电力)安徽公司开展智能风电场样板试点，通过三期项目建设，大力推动生产数字化转型，目前这一现代化智能风电场建设已初见成效。

### 智能化让野外风电场不再是信息孤岛

伴随我国能源转型升级的日渐深入，风电规模飞速提升，如何实现风电机组的高效稳定运行，如何在日常维护方面降本增效，成为风电产业实现新一轮腾飞前必须解决的问题。

面对发展挑战，龙源电力选择以推动新能源场站信息化、自动化、可视化、智能化管理为目标，利用3年时间启动三期智能化建设，实现新能源生产数字化转型。

风电场信息管理平台成为了这场变革的有力法宝。龙源电力安徽公司龙湖风电场场长陈

峰介绍，通过风电场信息管理平台及配套App，在巡检过程中，巡检人员就可实时更新巡检记录、缺陷记录、维护记录等信息，并同步上传至信息管理平台，参与运行数据统计分析。将所有风电场运营数据统一接入集中监控中心的“省级监控、区域运维”模式有效整合了风电场运营数据，风电机组工作现场与升压站不再是信息孤岛。

借助全覆盖的机组环网光纤和无线网络，作业现场的巡检人员可以通过智能安全帽上配备的摄像头和通讯设备进行“场外求助”，让巡检人员成为监控中心技术人员的“眼睛”，实现对巡检现场的实时查看和远程故障诊断。

陈峰说，现在只需要轻轻点击鼠标，从实时发电情况、运行状态监测，到功率预测、绩效配置，风电场的运行状态都能在监控中心的大屏幕上一览无余。一些曾经需要耗费工作人员很多时间、精力的工作，现在足不出户就可快速完成，场站运营效率大大提升，运维成本显著降低，为风电场的智能化建设奠定重要基础。

### 会思考的“大脑”为风电场立大功

风电场巡检实现智能化以后，龙源电力安徽公司智能化建设2019年又实施了二期工程。这一次，建设的任务是让风电场真正拥有能思考、会分析的“大脑”。

### 新看点

## 世界首例高位布置汽轮发电机组 2020年实现年内双投

科技日报讯(贺海鹏 记者陆成宽)2020年12月31日晚21点整，国家能源集团国华电力锦界电厂三期工程(以下简称锦界三期)6号机组一次通过168小时连续满负荷试运行，正式投产发电。这是该厂继5号机组2020年12月23日高标准投产后又一重要成果，标志着我国自主研发建造的、应用了世界首例汽轮机高位布置技术的2台660MW超超临界燃煤发电机组实现年内、年内“双投”，全部转入商业运行，开创了我国电站设计、制造、建设发展的新模式。

中国工程院院士、稳定性理论与电力系统自动化专家薛禹胜评价道：“锦界三期工程汽轮发电机组高位布置的成套自主创新能力，为我国构建清洁低碳、安全高效的电力生产探索了新的技术方案，将有效提升我国电力行业国际竞争实力，对落实‘3060’双碳目标，构建国内国际双循环相互促进的新发展格局具有重要意义。”

在工程现场亲历了世界首例高位布置工程的顺利投产后，电力规划院副院长、全国工程勘察设计大师孙锐表示，锦界三期项目空冷汽轮发电机组高位布置创新设计首例工程的成功实践，为火电机组更高效、更经济开创了新途径，必将对我国电力行业的创新发展起到很好的促进作用。

锦界三期扩建工程5、6号机组自2018年5月28日正式开工建设以来，全体参建人员坚持“争创国家优质工程金奖”的建设目标，以“功成不必在我，工程必定有我”的责任担当和“越是艰难越向前”的巨大勇气，咬定年内双机投运目标不动摇。特别是2020年以来，该厂党委扎实推进“一防三保”工作，全力克服两个冬季施工和新冠肺炎疫情影响工期7.5个月的困难局面，实现了年内双投，超额完成上级下达的年内工程建设目标任务，为扎实做好“六稳”工作、全面落实“六保”任务作出了积极贡献。

## 我国示范快堆工程 2号机组开工建设

科技日报讯(记者陈瑜)中核集团示范快堆工程2号机组于2020年12月27日正式开工建设。在“十三五”收官之际，中核集团如期实现2号机组FCD目标，开创了示范快堆工程双机组同步建设新局面，为我国核能战略“十四五”高质量发展新格局注入了“快堆力量”。

示范快堆工程2号机组开工建设，对我国加快构建先进核燃料闭式循环体系、促进核能可持续发展和快堆技术全面自主发展、推动地方经济建设具有重要意义。

2019年12月28日，示范快堆工程2号机组正式启动负控施工。一年时间里，各参建单位面对工程量大、工期紧、施工难度大等不利条件，确保了“示范快堆工程2号机组2020年开工建设”里程碑节点目标按期实现。

我国核能发展采取“三步走”战略——热中子反应堆、快中子增殖堆、受控核聚变堆。目前，我国已形成世界上少数国家才有的完整的核燃料循环体系，压水堆、快堆匹配发展，与先进后处理技术形成闭式燃料循环体系，是我国核能可持续发展的保障。示范快堆建设意义重大。

快堆是第四代先进核能系统主力堆型，它可将天然铀资源利用率从目前的约1%提高到60%以上，并实现放射性废物最小化，能一举解决铀矿资源枯竭、核材料利用率低和核废料难以处理等问题。

中国是世界上第八个拥有快堆技术的国家。2011年7月，中核集团自主设计、建造的中国实验快堆成功并网发电，2012年5月通过科技部验收。

2014年10月，示范快堆工程项目总体规划方案获得国家批准，2015年7月31日，该工程正控施工启动。2017年12月29日，中核集团在福建省霞浦县宣布示范快堆工程土建开工。示范快堆工程采用单机容量60万千瓦的快中子反应堆，计划于2023年建成投产。

## 充电仅用30秒 广州有轨电车有了超级电容

科技日报讯(记者矫阳)2020年12月28日，目前国内技术最成熟、性能最可靠的超级电容有轨电车——广州黄埔区有轨电车1号线开通运营。1号线全长14.4公里，是广州市黄埔区的首条有轨电车线路，也是广州开发区智慧交通路网建设示范线。

中国铁建22局项目负责人胡文涛介绍，这条线路采用“超级电容”供电装置技术，线路系统超级电容单体容量达9500法拉，为目前国内技术最为成熟、性能最为可靠的超级电容。车辆到达站点时，在乘客上下车间隙，车辆就自动完成充电，用时不到30秒，同时该工程运用综合交通智能控制系统，确保行车定点准时、快速通过。

专家表示，这辆超级电容有轨电车能实现车辆能耗和补给动态平衡，确保车辆全程不间断运行，告别传统接触网充电，极大减少了城市空中“蜘蛛网”。



受访者供图