

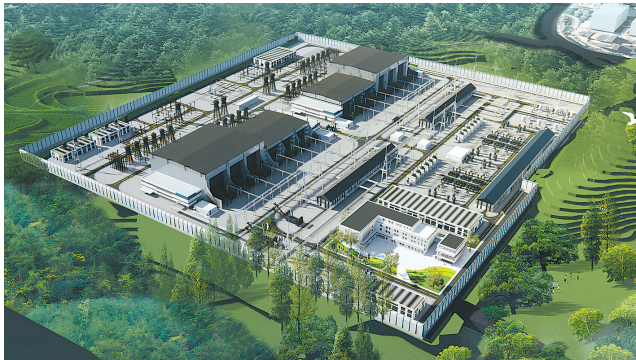
西藏昌都换流站鸟瞰示意图



西藏林芝察隅换流站鸟瞰示意图



广州小迳换流站鸟瞰示意图



深圳中部换流站鸟瞰示意图

▲工程在送端西藏昌都、林芝及受端广东广州、深圳共建设四座±800千伏特高压换流站。送端两个换流站共汇集超过2000万千瓦清洁能源，受端两个换流站分散落点两大负荷中心

2681公里！藏粤直流工程开建 是绿色天路也是金色动脉

文/羊城晚报记者 董鹏程 陈泽云 程行欢 通讯员 黄勇华 图/受访者提供

跨越五千里，世界屋脊与世界级湾区实现“牵手”。9月16日，藏东南至粤港澳大湾区±800千伏特高压直流输电工程（以下简称“藏粤直流工程”）建设动员大会举行，备受瞩目的藏粤直流工程正式启动建设。这条长达2681公里的“电力天路”预计2029年全面投运。届时，来自青藏高原源源不断的清洁能源，将从西藏察瓦龙出发，翻山越岭，送达粤港澳大湾区。此项工程为何被称为世界级工程？又是如何穿越技术“无人区”的？将给粤藏两地乃至全国能源结构带来哪些变化？

为什么是“世界之最”？

作为柔性直流输电领域发展全新的里程碑，藏粤直流工程并非单一维度的领先，而是一个在规模、技术、环境、模式等多维度上全面突破的综合性世界级工程。

首先，它的输电能力是世界“最强”的。它的额定容量达到1000万千瓦，是目前全球输电能力最大的柔性直流工程。建成后，预计每年可为粤港澳大湾区输送清洁电能超过430亿千瓦时——这相当于三峡电站年发电量的一半，而且全部来自清洁能源。

其次，这也是我国首个跨过青藏高原、云贵高原和华南丘陵三级地理阶梯的特高压工程。全线近90%为山地，30%为高山大岭，直流输电线路需穿越

197公里超高海拔区、高寒冻土、地震断裂带和37公里无人区，建设环境极其艰险，在世界范围内都属罕见。

中国南方电网有限责任公司工程建设部副总经理、广东藏粤直流电力运营有限公司董事长董言乐表示，工程将采用我国自主研发、国际领先的特高压柔性直流输电技术，额定电压±800千伏，额定输电容量1000万千瓦，建成之后，将是世界上输电能力最强、技术水平最先进、投资规模最大的柔性直流输电工程。

如何闯关“无人区”？

作为跨越地理天堑的超级工程，藏粤直流工程在建设面临着两个“无人区”的挑战：一是地理环境上的无人区，二是技术创新的无人区。

面对线路穿越的大量少人区、无人区，工程在设计和建设之初就前瞻性地布局数字化和智能化，旨在探索少维护、免维护设计，并在建设运维全过程全面推广“机器人”。通过深化数字孪生等技术的应用，拟实现数字工程与实体工程同步设计、同步建设、同步移交，目标是将藏粤直流工程打造为国际一流的数字化标杆，从根本上解决无人区运维难的世界性挑战。

而在技术突围上，正如中国工程院院士、中国南方电网有限责任公司首席科学家饶宏所言，要以科技创新引领藏

粤直流工程建设，占领特大型电网和特高压直流新技术的制高点。

科研团队利用位于东莞的中国散裂中子源这一国家大科学装置，对IGBT等核心功率器件进行大气中子加速辐照试验，快速模拟其在西藏高海拔环境下（宇宙射线中子通量为平原20倍以上）的运行状态。试验成功验证了高海拔大气中子导致的功率器件随机失效率增加的现象，为藏粤直流工程中高海拔柔性直流换流阀设计提供了宝贵数据和重要指导。“就好像是特高压直流输电技术的一座珠穆朗玛峰。”南网科研院团队骨干赵晓斌评价道。

将为粤藏带来什么？

这一工程还深刻诠释甚至“重新定义”了区域协同发展。

我国能源资源与需求呈现出明显的逆向分布特点，能源输送总体维持自西向东、自北向南的基本格局。西藏是我国重要的清洁能源基地，拥有丰富的水电资源和新能源。粤港澳大湾区则是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一，同时也是重要的用电负荷中心。此前，“西电东送”是双方合作的主要模式之一。

此次藏粤直流工程起于西藏昌都换流站，途经察隅换流站，通往广州小迳换流站，最终到达深圳中部换流站。

亮点速览

【世界之最】

藏粤直流工程总长2681公里，总投资532亿元，是世界规模最大的清洁能源基地直流送出工程，也是目前世界上输电能力最强、技术水平最先进、投资规模最大的柔性直流输电工程

【跨越山川】

我国首个跨过青藏高原、云贵高原和华南丘陵三级地理阶梯的特高压工程，输电线路自西向东跨越西藏、云南、广西、广东四省区，全线近90%为山地、30%为高山大岭

【绿电支撑】

2029年全面投运后，预计每年向粤港澳大湾区输送超430亿千瓦时，约为三峡电站年发电量的一半，且100%为清洁能源；每年可替代标煤消耗约1200万吨，减少二氧化碳排放约3300万吨

羊晚快评

“9毫秒闪送” 意义远不止快

□李妹妍

仅需9毫秒，世界屋脊的雪山融水发出的电能便能闪送千里之外，化作粤港澳大湾区的璀璨灯火。9月16日启动建设的藏粤直流输电工程，用“9毫秒闪送”的速度，将高原的“绿电”与大湾区的“活力”紧紧相连。可以说，这不仅是技术突破的“试验场”，更是区域协同的“连心桥”，向我们展开了一幅以创新驱动、绿色发展实现共同富裕的壮阔图景。

这一工程的意义，远不止“快”。9毫秒，是人类感知之外的瞬间，却是中国电力推进高水平科技自立自强的又一里程碑。工程要跨过青藏高原、云贵高原和华南丘陵三级地理阶梯，全线近90%为山地、30%为高山大岭，还要面临4300米超高海拔直流输电新技术研发、2000万千瓦级新能源并入弱电网与直流送出核心技术攻关等世界级挑战。但这些“拦路虎”，都成了中国电力科技的“练兵场”；从自主研发适用于超高海拔工程的大功率半导体器件到带动产业链上下游企业协同创新，从建设运行全过程全面推广“机器人”到发展应用全状态感知、数字孪生和人工智能等新技术、新装备，藏粤直流工程通过系列科技攻关，进一步巩固扩大我国在国际电力工业领域的领先优势。

这条线路，是能源资源“全国一盘棋”的关键落子。工程跳出了“西电东送”的简单模式，构建起区域协同发展的新模式。对西藏而言，其水能、风能、太阳能等清洁能源丰富，却长期受制于开发难度和送出瓶颈。这项工程将其独特的资源优势转化为经济优势，预计将带动直接就业10万余人，有力促进西藏经济社会发展。而对经济大省广东而言，用电量长年稳居全国第一，需要更大规模引入外省电力。工程全面投运后，预计每年为粤港澳大湾区提供的超430亿千瓦时清洁电能，不仅是“再造一个新广东”的能源保障，更是经济高质量发展的绿色引擎。这种互补共赢的模式，打破了地域壁垒，实现了资源与市场、保护与发展的精准对接，把区域差异变成协同增量，堪称区域协同发展的优秀样本。

山海虽远，科技可平；发展之路，协同为要。从青藏高原到南海之滨，9毫秒的电能闪送，不仅是物理意义上跨越千山万水的能量旅程，更凝结着无数建设者的智慧汗水，传递着绿色发展理念，连接着区域协同发展的愿景。此刻，沿着这条跨越2681公里的“电力天路”，中国正以更坚实的步伐，走向绿色、共享、共赢的未来。

技术攻坚

更“高”更“柔”，硬核技术突破“不可能”

藏粤直流工程跨越三级地理阶梯，将创造多项“世界之最”，也面临电力科技的世界级挑战。记者16日采访了解到，中国南方电网有限责任公司与国家电网有限公司强强联合，探索大规模新能源送出技术“无人区”，为藏粤直流工程建设提供强大的技术支撑。在这条即将问世的“电力天路”背后，科研团队的攻坚故事格外动人。

百般试验识电场“脾气”

2023年大年初一，云南省迪庆藏族自治州香格里拉市红坡村，3400米的高海拔让这里的空气氧含量不足14%。一群科研工作者们正紧盯屏幕上的放电曲线和放电图像，期待捕捉关键试验数据。

高压电力设备之间的空气间隙在超高电压下可能会被电流“击穿”，形成类似闪电的导电通道，影响电力设备安全。因此，为支撑藏粤直流工程建设，亟需开展3000米以上海拔的长空气间隙放电真型试验，摸清电场的“脾气”，掌握换流站中高压设备在高海拔特高压直流运行电压下的安全距离底线。

三年探索造坚强“心脏”

柔性直流换流阀堪称柔性直流输

电系统的“心脏”，然而，它有时会遇到“能量爆棚”的麻烦——受端交流电网发生短路故障时，大量盈余能量会不断进入换流阀功率模块，导致直流系统因过电压闭锁，威胁电网安全稳定运行。这类问题在输电容量达到1000万千瓦、输电距离超过2600公里的藏粤直流工程中尤为明显。

“打个比方，当道路上突然发生严重车祸时，大量车流就会瞬间拥堵，交通压力急剧升高，导致交通瘫痪。这时我们就需要开一条支路，帮助纾解这种压力。”南网科研院团队骨干赵晓斌说。

传统的柔直系统普遍采用集中式直流耗能装置，虽然也能实现受端电网交流故障穿越，但存在占地面积大、成本高等问题，不利于大规模新能源经济高效送出。

为适应发展需求，南方电网联合科研单位、国内高校、设备厂商联合攻关，共同踏上了自主研发之路。团队首次提出全新的能量自平衡柔性直流换流阀拓扑结构——在现有的换流阀功率模块中，增加一个包含电子开关和电阻的能量自平衡支路，为柔性直流输电系统打造一颗坚强“心脏”。如果系统故障，盈余功率导致功率模块

电压抬升时，该支路开关就会闭合，盈余功率通过电阻得到泄放，功率模块电压降低，保障系统安全。

但是，需要什么样的开关和电阻？“那段时间，我们就像在迷宫里找出口。”团队骨干周月宾回忆说，“我们想出个‘笨办法’：把上百种可能出现的电网故障情况全都输入电脑，用仿真软件一遍又一遍模拟”。有时候仿真真要“跑”上一整天，团队成员就守在电脑前，盯着屏幕上跳动的数据，困了就轮流趴在桌上眯一会儿。

无数次尝试后，他们摸清了开关和电阻的使用边界和设计原则，提出了开关和电阻的参数选型及投退策略，为能量自平衡换流阀装备研制打下基础。

历时三年，团队攻克了特高压超长距离和新能源接入柔性直流输电系统的能量快速平衡关键技术难题，研发出世界首套能量自平衡柔直换流阀，以更紧凑、更经济、更安全的方式实现受端交流电网故障全穿越。

科学家精神，正闪耀雪域高原之巅，照亮这条“电力天路”的前行方向。

羊城晚报记者 董鹏程
通讯员 金南汐 黄勇华 辛镇瀚



在云南红坡村，南方电网科研人员开展放电试验 受访者供图



在工程云南段，南方电网技术人员深入无人区开展线路踏勘 受访者供图