

输变电工程与技术装备

30年来，通过引进、消化吸收国外先进的产品设计和制造技术并进行再创新，我国在输变电设备制造领域取得了巨大的成就，缩短了与国外的差距，为进一步发展打下了基础。

1998年以后，依托三峡水电站送出工程、西北750kV交流输变电示范工程，我国在输变电设备制造领域全面掌握了 $\pm 500\text{kV}$ 交直流和750kV交流输变电关键设备制造技术，使国内输变电设备的设计、制造和试验能力大幅度提升；依托1000kV特高压交流输电试验示范工程和 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程，成功研制了具有自主知识产权的1000kV特高压交流和 $\pm 800\text{kV}$ 直流输变电成套设备，实现了我国特高压输电装备的跨越式发展，确立了我国在世界特高压输电领域的领先地位。

一、±500kV高压直流输电工程和技术装备

直流输电工程在我国起步较晚，20世纪八九十年代建成的二个±500kV高压直流输电工程的设备和技术全部依赖进口。“九五”期间，根据三峡工程输电的需求，依托三峡—常州±500kV直流输电工程开展研究，消化、吸收国外±500kV直流输电成套设备技术。

我国通过三峡—常州、三峡—广东、贵州—广东、三峡—上海等±500kV直流输电工程的建设，国内直流输电装备制造企业的自主创新能力和产品制造能力逐步提升。

1. 三峡—常州±500kV直流输电工程中，国内制造企业重在参与，引进了技术，组装和制造了部分设备，国产化率为30%。

2. 在三峡—广州和贵州—广东±500kV直流输电工程中，国内制造企业采取联合设计、独立制造的方法，自主制造了换流变压器、平波电抗器和大功率晶闸管元件，国产化率达到50%。

3. 在三峡—上海±500kV直流输电工程中，国内制造企业采取联合设计、联合投标和独立制造的方式，使国产化率达到70%；并自“灵宝背靠背”工程开始，实现了100%的国产化。特别是在大功率晶闸管、换流阀制造的国产化和换流站成套设备与设计技术方面取得了重大的突破，为±800kV特高压直流输电成套设备的开发打下坚实的基础。

在三峡输变电主体工程的规划和建设过程中，国内研制单位逐步掌握了核心技术，彻底改变了高压直流输电设备依赖进口的历史，确保了三峡电力“送得出、落得下、用得上”。

二、750kV交流输变电工程和技术装备

鉴于我国西北地区黄河上游梯级水电站的开发，进行与之相适应的750kV电压等级交流输变电工程建设已成为发挥西北资源优势、加快西北电力发展的迫切需要和合理选择。

（一）公伯峡水电站送出官亭—兰州东750kV交流输变电示范工程成套设备

公伯峡水电站送出官亭—兰州东750kV交流输变电工程是西北电网“西电东送”的重要通道之一，是我国首个750kV交流输变电示范工程。

该示范工程的成套设备顺利通过了满负荷试验，运行安全可靠，实现了“一次性制造成功、一次性安装成功、一次性投运成功”的预期目标。

由国内众多单位共同参与完成的“750kV交流输变电关键技术研究、设备研制及工程应用”科技成果项目，荣获2007年度“国家科学技术进步奖一等奖”。在后续建设的750kV工程中被广泛应用。目前，750kV交流输电线路已成为西北电网的主网架，并为我国1000kV特高压交流输电试验示范工程设备的研制打下了坚实的基础。

（二）特高压大容量实验室试验系统技术改造建设

2003年8月，依托西北750kV交流输变电工程的建设，国家批复了西高院提出的特高压800kV断路器大容量实验室试验系统技术改造建设方案，并于2005年自主建设完成，整个系统可满足1000kV/63kA的试验能力，三相直接试验能力达

到14.5kV/100kA。与国际同类实验室相比，具有试验容量大、试验电压高和技术方案先进的特点，在大容量合成试验技术和试验能力方面进入了国际先进行列，其中自主开发研制的1000kV触发电装置性能达到了国际先进水平。图1是西高院的特高压绝缘试验室，图2是西高院的特高压绝缘试验，图3是西高院合成回路厅。



图1 西高院的特高压绝缘试验室



图2 西高院的特高压绝缘试验



图3 西高院合成回路厅

该实验室完成技术改造建设后，能够满足国内超（特）高压断路器大容量试验要求的试验回路，800~1100kV GIS、断路器隔离开关等试验，不仅改变了我国超（特）高压断路器大容量试验需在国外进行的困局，为国内制造企业突破国外技术封锁做出了贡献。

三、特高压输电工程和技术装备

特高压输电技术通常是指直流电压 $\pm 800\text{kV}$ 、交流电压 1000kV 及以上的输电技术。一回特高压交流线路可输送电力500万kW，是500kV交流线路输送能力的5倍；一回特高压直流线路可输送电力640万kW，是 $\pm 500\text{kV}$ 级直流线路输送能力的2倍，输电距离可达2500km。

（一）1000kV特高压交流输电试验示范工程及技术装备

晋东南—南阳—荆门1000kV特高压交流输电试验示范工程是我国目前第一个投入运行的示范线，共包括三站二线，起自山西省长治市晋东南变电站，经河南省南阳市南阳开关站，止于湖北省荆门市荆门变电站，线路全长645km，自然功率500万kW。一期工程于2009年1月投运，二期工程于2011年投运。

通过试验示范工程的建设，我国特高压交流输电设备的自主创新取得了重大突破，主要产品的的设计、制造和试验达到了世界领先水平，创造了多项世界第一，主要有：

1.在世界上首次研制成功额定电压1000kV、额定容量 $1000\text{MV}\cdot\text{A}$ （单柱容量 $334\text{MV}\cdot\text{A}$ ）的单体式单相变压器，性能指标国际领先。图4是保定变压器厂（以下简称保变）生产的晋东南变电站1000kV特高压变压器。

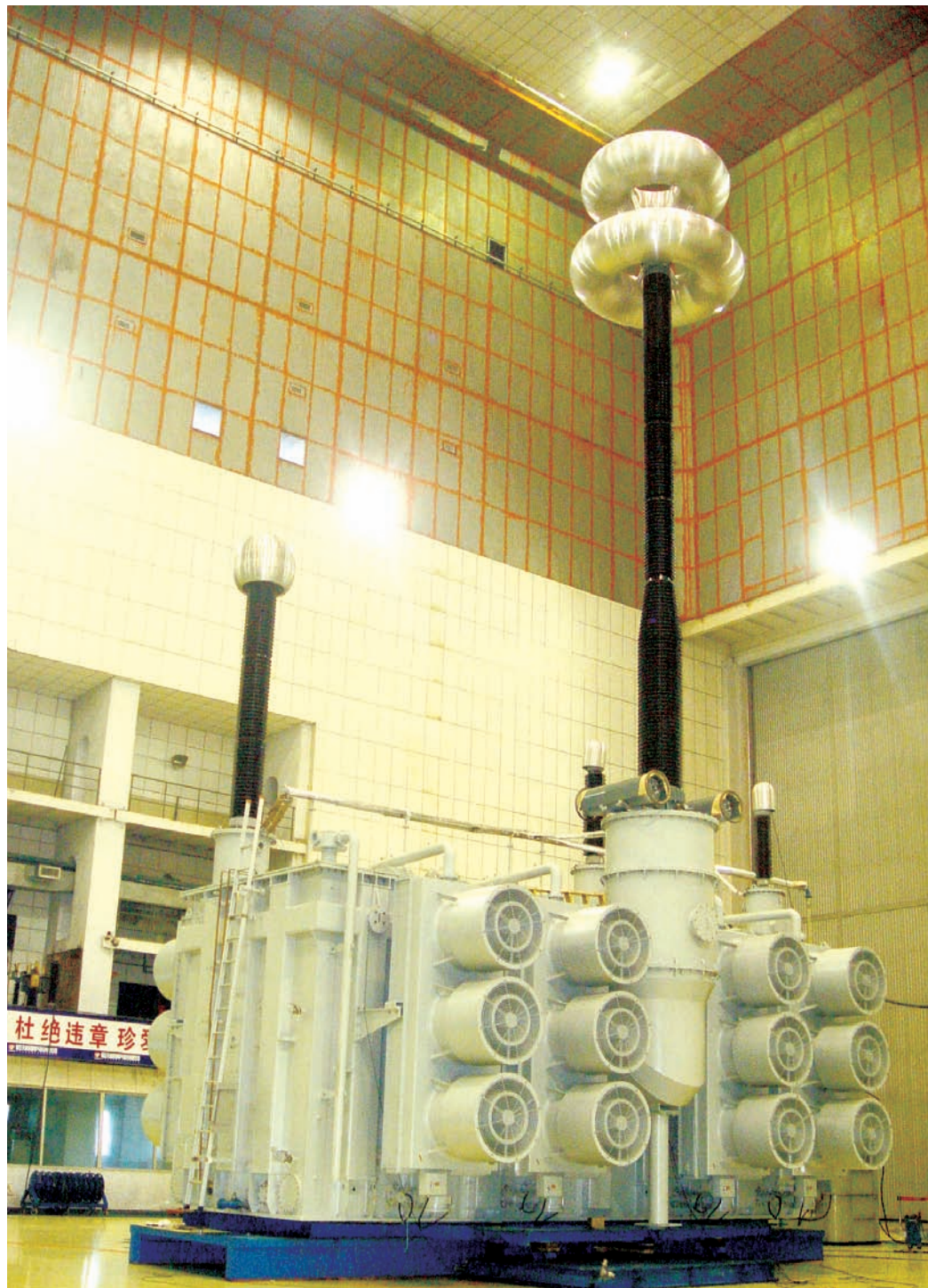


图4 保变生产的晋东南变电站1000kV特高压变压器

2. 在世界上首次研制成功额定电压1100kV、额定容量320Mvar高压并联电抗器，性能指标国际领先。图5是西安西电变压器有限责任公司（以下简称西变公司）生产的1000kV 320Mvar并联电抗器通过试验。

3. 成功研制了额定电压1100kV、额定电流6300A、额定开断电流50kA（时间常数120ms）的气体绝缘金属封闭组合电器，代表了世界同类产品的领先水平。图6是西安西电开关电气有限公司（以下简称西开）生产的1100kV气体绝缘金属封闭开关设备（DS、ES、母线、出线套管）试验场景。

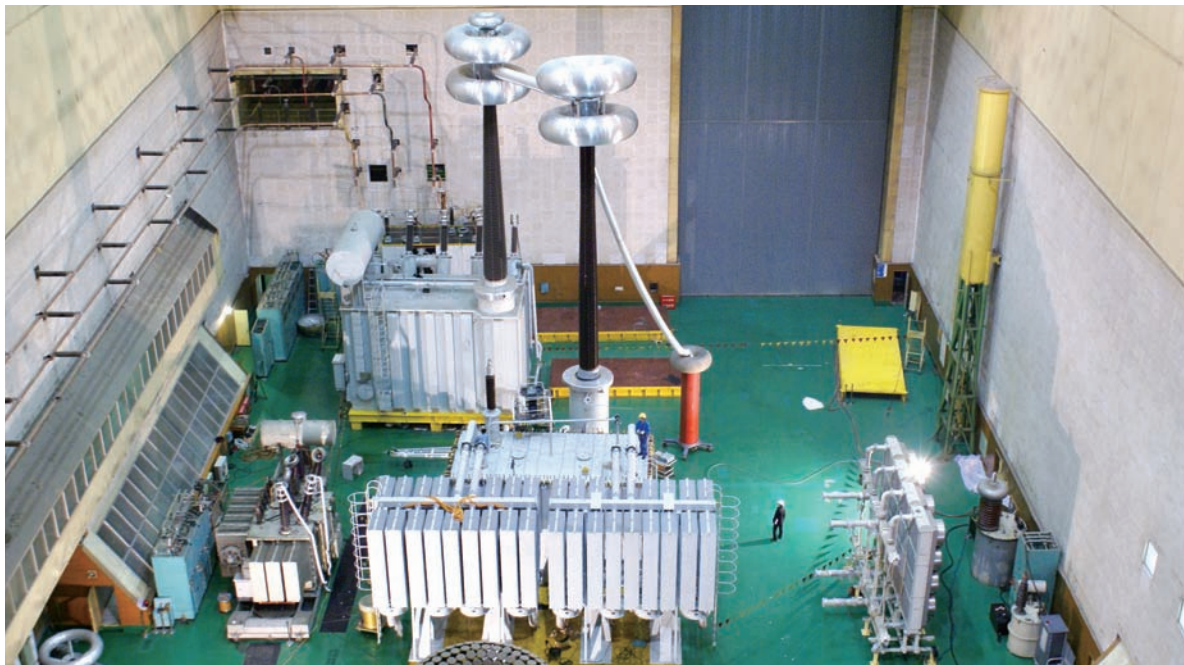


图5 西变公司生产的1000kV 320Mvar并联电抗器通过试验



图6 西开生产的1100kV气体绝缘金属封闭开关设备（DS、ES、母线、出线套管）试验场景

4. 在世界上首次研制成功特高压瓷外套避雷器，性能指标国际领先。

5. 在世界上首次研制成功特高压棒形悬式复合绝缘子、复合空心绝缘子及套管，用于中等和重污秽地区的特高压支柱绝缘子、电容式电压互感器、接地开关（敞开式）及油纸绝缘瓷套管，性能指标国际领先。其中开关设备全部采用气体绝缘全封闭组合电器，是高压开关技术的制高点。图7是南通神马电力科技有限公

司（以下简称南通神马）生产的1100kV GIS出线套管用空心复合绝缘子。

6. 在世界上首次研制成功特高压工程用全套数字型控制保护系统，性能指标国际领先。

7. 建成了世界一流的特高压交流输电试验基地和高电压强电流试验检测中心，综合研究试验能力已跃居国际同行前列，为进一步推进特高压设备的应用和提高基础研究水平奠定了坚实的基础。

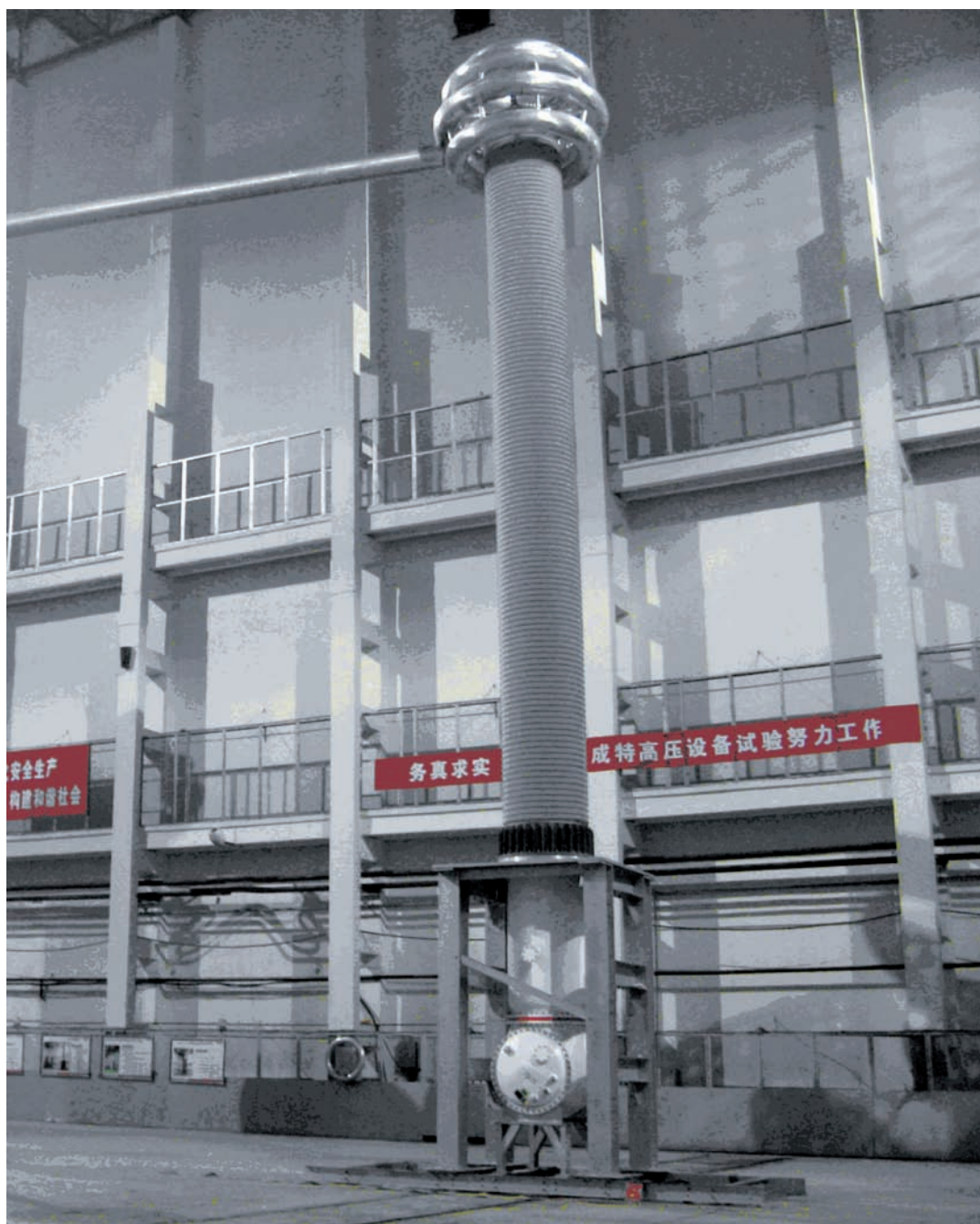


图7 南通神马生产的 1100kV GIS 出线套管用空心复合绝缘子

特高压交流输电试验示范工程成套设备的研制采用以我为主、与国外合作和自主创新的技术路线，实现了自主开发、设计、制造、试验和安装调试，全面掌握了特高压交流输变电设备的核心技术，形成了完整的技术标准和试验规范，具有自主知识产权，工程设备综合国产化率达到90%。

(二) ± 800 kV特高压直流输电示范工程及技术装备

我国特高压直流输电工程的起步虽然较晚，但进展较快，近几年间，已拥有国际上最先进的直流输电技术和最高的直流输电容量。到目前为止，国内已建成 ± 800 kV特高压直流示范工程三个。

1. 云南—广东 ± 800 kV特高压直流输电示范工程，汇集云南小湾、金安桥等水电站的电力输送广东；额定电压 ± 800 kV，双极额定输电容量500万kW，输电距离1438km；送端换流站选定在

云南楚雄州禄丰县，受端选定在广州市增城市，线路经云南、广西至广东；于2009年12月单极建成投产，2010年6月双极建成投产。图8~图10是用于该示范工程的换流变压器、平波电抗器和穗东换流站阀厅，分别由西变公司、北京电力设备厂和许继集团有限公司（以下简称许继集团）生产，图11是该示范工程云南楚雄换流站全景。



图8 西变公司生产的云南—广东 ± 800 kV特高压直流输电示范工程换流变压器



图9 北京电力设备厂生产的 ± 800 kV云南—广东特高压直流输电示范工程平波电抗器

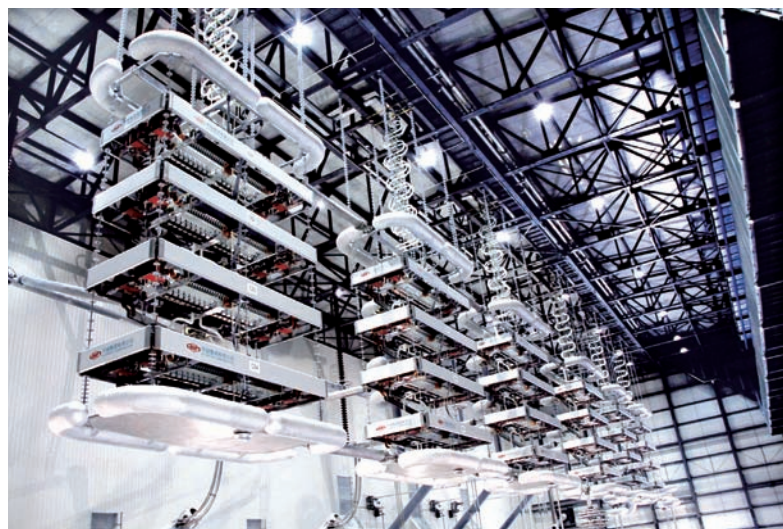


图10 许继集团生产的 ± 800 kV云南—广东特高压直流输电示范工程穗东换流站阀厅



图11 云南楚雄±800 kV特高压直流输电示范工程换流站全景

2. 向家坝—上海±800 kV特高压直流输电示范工程，起点四川复龙换流站，落点上海奉贤换流站；额定输送功率640万 kW，最大输送功率700 万kW；途经四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏和上海八省市，全长约2071km；于2011年7月双极建成投产。图12~图14是用于该示范工程的换流变压器、平波电抗器、电控换流阀和奉贤换流站阀厅，分别由西变公司、北京电力设备厂、西安整流器厂（以下简称西整）和许继集团生产。



图12 西变公司生产的向家坝—上海±800 kV特高压直流输电示范工程换流变压器



图13 北京电力设备厂生产的向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程平波电抗器



图14 西整生产的向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程电控换流阀



图15 许继集团生产的向家坝—上海±800kV特高压直流输电示范工程奉贤换流站阀厅

3. 锦屏—苏南±800 kV特高压直流输电工程，起点四川西昌欲龙换流站，落点江苏苏州同里换流站；最大输送功率720 万kW，全长2095km；直流输电线路采用900mm²大截面导线，与传统630mm²导线相比，按照每年损耗小时数为3000h计算，每年每千米线路可节电

约4.32万kW·h。该工程于2012年12月建成。图16～图19是用于该工程的换流变压器、电控换流阀、15.24cm（6英寸）焊接型晶闸管和同里换流站阀厅，分别由西变公司、西整、西安电力电子技术研究所（以下简称西安电子所）和许继集团生产。



图16 西变公司生产的锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程换流变压器



图17 西整生产的锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程电控换流阀



图18 西安电子所生产的锦屏—苏南±800 kV特高压直流输电工程的15.24cm（6英寸）焊接型晶闸管



图19 许继集团生产的锦屏—苏南±800kV特高压直流输电工程同里换流站阀厅

承担特高压 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电示范工程设备研制和供货的西电集团、保定天威、特变电工、许继集团、桂容、北京电力设备厂等单位与业主密切配合，坚持自主创新，在世界上首次完成了 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程的系统研究、成套设计和工程设计；确定了工程主接线、主设备型式、绝缘水平、无功配置等技术参数和方案；制定了特高压直流输电的功能规范和设备规范；首次编制了具有自主知识产权的特高压直流输电技术标准；在工程建设与设备研制中创造了电压等级 $\pm 800\text{kV}$ 、额定输送功率640万kW、最大输送功率700万kW，额定电流4000A，首次使用电触发15.24cm（6英寸）晶闸管，输送距离2000km，换流器容量175万kW，换流变单台容量321MV·A，干式平波电抗器通流容量4292A，接地极通流能力、单位走廊输送能力超过84MW/m等多项世界第一。

由于 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电在世界上还没有成熟的技术，该示范工程主设备除部分高端换流变压器和直流场设备外，其余如低端换流变压器、 $\pm 800\text{kV}$ 干式平波电抗器、换流阀、15.24cm（6英寸）大功率晶闸管、控制保护、大界面电缆、避雷器和绝缘子等设备全部由国内制造，目前设备国产化率达到65%以上。