Newton
[http://www.kxsj.com]
科学世界
2014.2
来自中国科学院的权威科普杂志

特高压输电

特别策划 远距离、大容量、低损耗、少占地的“电力高速路”

盘点2013年科技大事

“玉兔”成长记

马年说马

长羽毛的霸王龙

非得输液才算治疗吗?

定价: 18.00元
ISSN 1003-1162
02
9 771003 116142

特高压，引领中国能源战略转型

我国能源资源和负荷中心呈逆向分布，70%以上的能源需求集中在东中部经济较发达地区，而76%的煤炭资源分布在北部和西北部，80%的水能资源分布在西南部，陆上风电的80%分布在西北、华北、东北地区，太阳能资源也集中分布在西北地区及西藏、内蒙古，能源基地与负荷中心的距离长达1000～3000公里。由于电力输送容量和输送距离的限制，在过去很长一段时间，我们采用了“就地平衡”的发展方式，在负荷中心建设了大量电厂，使得东部沿海沿江经济发达地区竖立起了一座又一座的烟囱与冷却塔。随着我国经济的持续高速发展，东部地区的“工业血脉”——电力供应逐年吃紧。2011年以来，我国东部沿海经济发达地区的电力紧张状况不断加剧。与此同时，北煤南运、西煤东运的格局导致了煤电运输能力紧张、煤电价格循环上涨、环境污染等一系列问题。未来，我国能源需求总量仍将持续增长，由此导致的能源供需矛盾和环境压力将进一步凸显，迫切需要转变“过度依赖输煤”的能源配置方式和“就地平衡”的电力发展方式，建设可以大容量、远距离、低损耗输电的特高压电网，让“电从远方来”，实现能源资源在全国范围内的优化配置。

2004年底，在深入分析我国经济社会发展需要和能源资源禀赋特征等基本国情的基础上，国家电网公司提出了发展特高压输电的战略构想。随后，我国就发展特高压输电的必要性、可行性、经济性和实施方案展开了全面论证，取得了广泛共识。2006年，国家核准建设1000kV晋东南–南阳–荆门特高压交流试验示范工程和±800千伏向家坝–上海特高压直流示范工程。发展特高压，也先后列入了国家的多项重大规划之中。

自2006年我国第一条特高压输电线路开工建设至今，国家电网已建成投运“两交两直”四条特高压输电线路（1000kV晋东南–南阳–荆门特高压交流试验示范工程，向家坝–上海±800kV特高压直流输电示范工程，锦屏–苏南±800kV特高压直流输电工程，1000kV淮南–上海特高压交流输电示范工程）。四条线路累计输电里程近6000公里，输电能力2860万千瓦，这相当于在中东部负荷中心地区少建设了近30座百万千瓦等级的火电厂，每年减少运煤超过7000万吨（相当于直接节约火车运力超过110万节车皮）、减少二氧化碳排放超过7200万吨、减少二氧化硫排放19万吨。在2013年夏季持续极端高温天气的情况下，电力供需形势仍然能够保持总体平稳，究其原因，特高压工程和跨区电网在其中发挥了重要作用。自西南水电基地直达华东负荷中心的两条特高压直流输电工程（向家坝–上海、锦屏–苏南）送出的电力，约占华东区外受电的一半，占四川最大外送电力的71%，特高压电网远距离、大容量优化配置资源作用已经凸显。

特高压输电代表了国际高压输电的最高水平。20世纪60～90年代，苏联、美国、日本、意大利等国家曾开展过特高压输电试验研究，但因为远距离、大容量的输电需求不明显，最终并没有形成成熟适用的技术和设备，也没有现成的捷径可供我国电力业界参考和借鉴。面对巨大创新压力和挑战，国家电网公司组织国内科研、设计、制造、高校等100余家单位，产学研联合攻关，自主创新，在特高压理论创新、技术攻关、工程实践等方面取得了全面突破，在世界上率先掌握了特高压大容量输电系统集成、大电网运行控制等技术，建立了完整的特高压输电技术标准体系，使我国成为世界上第一个、也是惟一一个成功掌握并实际运用这项尖端技术的国家，实现了“中国创造”和“中国引领”。特高压输电的研发成功，也带动了我国输变电装备制造业的全面升级，大幅提升了我国在国际电工领域的影响力和话语权。目前，俄罗斯、印度、巴西等国已将特高压输电作为能源电力发展的重要方向，并积极寻求与我国的技术合作。

在未来，“以电力为中心转变能源发展方式、推动新能源的大规模开发利用”已成为全球能源发展的战略方向。今后的能源变革，将紧紧围绕着“更清洁更经济的发电”、“更安全更高效的配置”、“更便捷更可靠的用电”这几个方面展开。发展特高压，实施“以电代煤、以电代油、电从远方来”，不仅是解决我国能源和电力发展存在的深层次矛盾的治本之策，可以满足各类大型能源基地和新能源大规模发展的迫切需要，更是加快建设智能电网、牢牢占据新一轮能源变革制高点的战略重点。现在，积极推进以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网建设，对于推动我国能源安全、清洁、环保、友好发展，全面建成小康社会，实现中华民族伟大复兴的中国梦，具有十分重要的意义。

特高压输电

远距离、大容量、低损耗、少占地的“电力高速路”

撰文/曾惠娟

电网，就像人体的血液循环系统，把能量输送到社会的各个角落。但现在，高压输电乃至超高压输电，都已经无法满足我国经济发展对能源的巨大需求，特高压输电应运而生。

特高压输电技术并无先例可循，是电力科技界的“珠穆朗玛峰”。但就在短短几年间，我国已建起了数条通联南北、横贯东西的特高压交流和直流输电线路，在世界电网领域首次实现了“中国创造”和“中国引领”，由此引起了广泛的国际关注。

那么，我国为什么要选择特高压输电？它究竟难在哪里，发挥了怎样的作用？未来，它还会有什么样的发展？如果你也有这些疑问，就请跟着我们来看个究竟吧！

经济发展导致能源需求激增

改革开放 30 多年来，我国经济一直保持着持续快速增长的势头。1980 年，我国的国民生产总值（GDP）为 0.45 万亿元，到 2012 年则飞跃至 51.9 万亿元，经济总量稳居世界第二，仅次于美国。

GDP 的增长，是以巨量能源的消耗为基础的。1980 年，我国一次能源消费总量为 6.0 亿吨标准煤，到了 2012 年，这个数字也相应剧增至 36.2 亿吨标准煤。

显而易见，经济越是快速发展，能源需求就会越大。根据国内外相关机构的预测，我国经济持续增长的势头仍将保持相当长的一段时间。综合判断，2020 年时，我国一次能源消费总量将达到 48 亿～ 52 亿吨标准煤（相当于 2012 年的 1.3 ～ 1.4 倍，下同），2030 年为 57 亿～ 62 亿吨（1.6 ～ 1.7 倍），2050 年为 70 亿～ 77 亿吨（1.9 ～ 2.1 倍）。

从这个意义上讲，如果不能及时提供足够的能源，我国的经济发展就会受到严重的影响。因此，能源的供应就变成了一个非常重要的问题。

一次能源与标准煤

一次能源（primary energy），是指自然界中以原有形式存在的、未经加工转换的能量资源，又称天然能源。它包括化石燃料（原煤、石油、原油、天然气等）、核燃料、生物质能、水能、风能、太阳能、地热能、海洋能、潮汐能等，又分为可再生能源（太阳能、风能、水能、生物质能等）和不可再生能源（原煤、石油、原油、天然气、核燃料等）两大类。与之相对，转化的能源称为二次能源，比如燃煤发电获得的电能，就是二次能源。

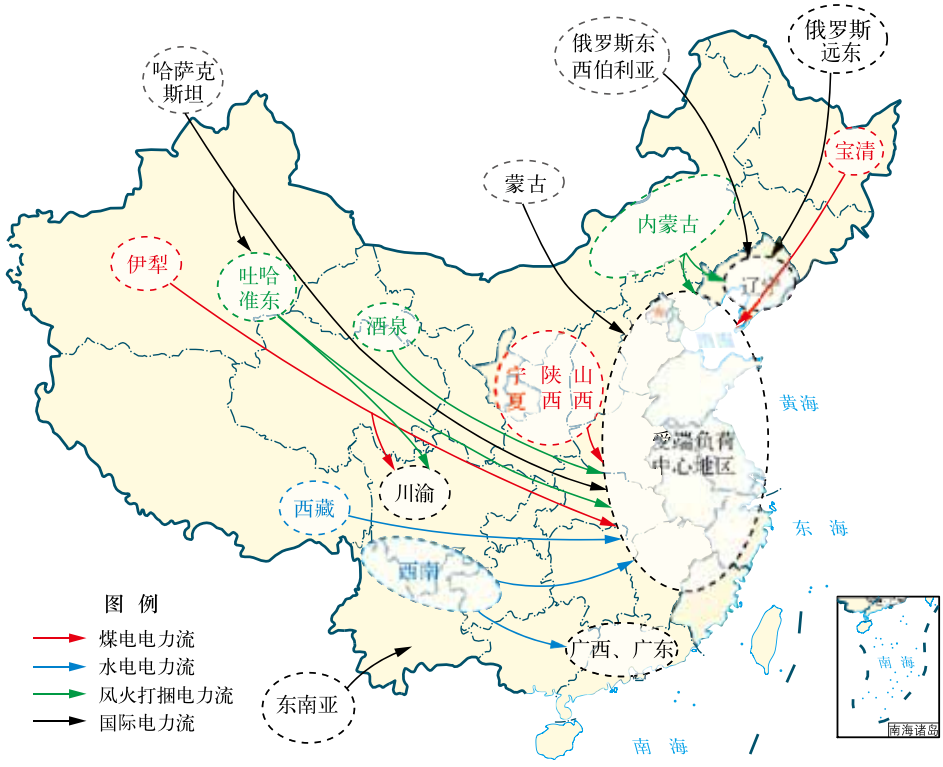
标准煤（即标煤或煤当量），是各种能源平均热值的折算标准。按照我国规定，每千克标准煤的热值为 7000 千卡（1 卡 =4.1816 焦耳）。据此，可以将不同种类的能源（比如热能或电能）按各自不同的热值，统一折算成标准煤后再进行对比。另外，在统计能源总量时，使用标准煤也比较方便。

2010 年东、中、西部地区能源资源及电力消费比重图

我国东西部地区能源资源与装机比重

项目	东部	西部
水电（技术可开发量）比重	7.3	81.5
煤炭基础储量比重	10.5	51.3
电力装机比重	46.0	31.3
火电装机比重	52.4	24.5
电力消费量比重	57.1	23.6
一次能源消费量比重	53.5	24.8
GDP 比重	61.7	18.6

能源需求与资源逆向分布



未来我国电力流总体格局

要供应能源，首先要有能够产生能量的特定资源（包括煤炭、水能、风能、太阳能等），也就是能源资源。但在我国，对这些能源资源的利用，会受到“两个不均衡”的制约。

首先，这些能源资源在我国国土上的分布（即“能源禀赋”）很不均衡，有的地区（如东部地区[注]）很稀少，有的地区（如西部地区）却很丰富，彼此之间差异很大。其次，各地区的经济发展也不均衡，东部地区经济相对发达，对能源的需求量较大；西部地区经济总量较小，对能源的需求量也相对较小。

能源资源分布不均衡、经济发展状态不平衡，单独看都不是大问题，叠加起来却会形成最不利的组合——最需要能源的地区缺乏能源资源，而能源资源充沛的地区又用不了那么多能源。这就是所谓的“能源需求与资源逆向分布”，也是我国解决能源问题时所必须面对的一个根本性的前提条件。

随着我国经济的继续发展，东部等经济发达地区对能源的需求必将进一步加大，对各种能源资源（包括西部地区的能源资源）的开发利用也必将不断深化。这将使我国能源生产的重心逐步西移，由此导致的“能源生产区域和消费区域越来越远”的现象也将变得更加明显。

总之，“我国能源需求与资源逆向分布”这一特殊国情，决定了“我国能源的大规模、远距离运输和大范围的优化配置”已经无可避免。根据经济发展和资源分布的现实情况，未来我国能源的总体流向将呈现为“北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送”的宏大格局，这对我国的能源运输能力提出了新的、更高的要求。

注 东部地区包括黑、吉、辽、冀、京、津、鲁、苏、沪、浙、闽、粤、琼等 13 省（直辖市）；西部地区包括新、藏、内蒙古、青、甘、宁、陕、川、渝、滇、黔、桂等 12 省（自治区、直辖市）；中部地区包括晋、豫、鄂、皖、湘、赣等 6 省。

输煤输电并举，实现能源的大范围远距离输送

大规模、远距离地运输能源，已经是现实而紧迫的需求。那么，该采用哪些方式来运输这些能源呢？

在我国，能源运输的主要对象是煤炭、石油、天然气和电能（水能、核能、风能和规模化开发的太阳能，都可以转换为电能）。其中，煤炭主要通过铁路、公路、水路运输；石油和天然气主要通过管道、铁路、公路、水路运输；电能则通过电网传输。

现在，我国已是世界上最大的能源消费国。那么，大家不妨来猜一猜，哪种能源会是其中的主力呢？

可能有很多人想不到，貌不惊人、黑乎乎、好像还有点土兮兮的煤炭，竟然是支撑我国能源结构的“擎天柱”。实际上，在我国一次能源的消费结构中，煤炭的比重一直徘徊在 70% 左右，远超过其他所有能源的总和。换句话说，我国消耗的所有能源中，10 份里有 7 份都来自煤炭。我们知道，煤炭能够点燃，可以用来供暖，也能用作原料生产多种化工产品（煤化工），但是它最主要的用途其实还是燃烧后发电。作为世界第一大煤炭生产国和第一大煤炭消费国，我国煤炭消费量的一半以上都拿来发电了，这些煤炭就是所谓的“电煤”。有了这些电煤，我国的经济发展才得到了强有力的能源支撑。

但是，与我国能源资源分布不均衡相一致，我国的煤炭资源的分布也极不均衡，产区大部分位于西部和北部地区，而消费中心则主要集中在东中部地区。因此，从产区到消费中心的远距离电煤运输，也就成为了满足能源要求的重要保障手段。

在这些远距离运输的电煤中，铁路运了一半，水路和公路合起来运了另一半（在实际运输中，常常是几种方式接力联运的）。把这么多、这么重的煤运送到千里之外的消费中心，不仅要耗费大量能量（公路、水路运输更不合算，相当于耗费石油等高级能源，去运送煤炭这样的低级能源），还会大大加重运力紧张的局面（表现为铁路车皮紧缺、港口煤炭积存、卡车在公路上长期拥堵等现象），这些都严重制约着煤炭的远距离、大范围调配。

既然如此，如果能在煤炭产地建设火电厂（即“坑口电厂”），就地发电后，再通过电网将电力输送到需求地区，上述弊病不就都可以迎刃而解了吗？

但是，问题并不那么简单。过去，我国经济还不够发达，对能源的需求远没有现在迫切，多年来的煤电调配策略一直是“分省分区、就地平衡”。而在本省本区的小范围、短距离内，直接运煤比输电更加合算，电网的发展因而相对较慢；大范围、远距离的情况下虽然输电比运煤合算，却又没有那么大的能源需求。现在，经济快速发展导致能源需求急剧增长，既有的输电能力却远远不足。例如在 2009 年，煤炭的大产区——“三西”地区[注]（含宁东），它的输煤与输电比就高达 20 ： 1。

在越来越大的能源需求压力下，要想更好地实现煤炭能源的大范围、远距离运输，“就地发电再输电”就成为了一种非常合算的选择。将部分电煤改用输电的方式外运，就可以极大地缓解传统运输方式运力不足的窘境。这就是“输煤输电并举”，它已经成为我国应对未来电煤运输问题的一项重要举措。

不止如此。沿用“就地发电、电网输电”这个思路，不光是电煤，包括水能、风能、太阳能等广泛分布在我国西部地区的清洁能源，也同样可以实现跨区远距离的输送和调配。更妙的是，当地能源需求较小，而这些能源既不能储存，又无法通过铁路、公路、水路运输，如果不转换为电能的话，只有被白白地浪费掉，成为弃水、弃风、弃光。只有当它们被转换为电能后，才能找到真正的用武之地。

注：“三西”地区，是指山西、陕西、内蒙古西部。

“电从远方来”，未来能源消费的新模式

在我国，大量消耗煤炭还带来了严峻的大气污染问题。研究表明，我国城市 PM2.5 的重要来源就是燃煤和燃油，其中 50% ~ 60% 来自燃煤排放，20% 左右来自机动车排放。如果在终端能源消费环节实施电能替代，把工业锅炉、工业煤窑炉、居民取暖厨炊等由用煤改为用电，大力发展电动汽车、电气化轨道交通、农业电力灌溉等，不仅可以减少煤炭直接燃烧带来的污染物排放，还可以减少对石油的依赖。因此，进入新世纪以来，电能替代（以电代煤、以电代油）成为能源发展的重要趋势。

电能替代之所以有效，是因为电能作为二次能源，在终端应用环节不产生污染排放（当然，火力发电仍需燃烧煤炭，也会排放污染物，但通过技术措施集中处理后，无论是污染物排放的强度和治理成本都大大低于传统的分散燃烧方式）。此外，近年来可再生能源迅速得到开发利用，清洁能源发电量占全社会发电量的比重也在逐年提高，这就进一步提高了电能的清洁性。

因此，在能源终端消费环节实施“以电代煤、以电代油”，既能让西部的能源发挥更大效益，改善当地经济，也有助于缓解东部人口、产业密集地区的能源压力和环境污染，因而成为解决东中部地区能源消费瓶颈问题，保障我国能源安全可靠供应的必然选择。随着能源消费终端电气化水平的提高，更大规模的跨省跨区电力输送势在必行，“电从远方来”将成为未来电能消费构成中的主流。

因此，我国经济社会的快速发展，迫切需要解决大容量、远距离、低损耗的电力输送问题。在电力界，公认的最佳选项就是“特高压输电”，而这正是本期专辑的主题。

那么，什么是特高压输电呢?

特高压输电

电从发电厂通过电线送入千家万户

所谓发电，就是通过电磁感应把机械能转换为电能，分为直流和交流两种形式。在需要电力传输的场合，大都采用交流发电形式（后面会看到，使用交流输电时升压和降压也比较容易实现），交流发电机发出的电流极性是反复变化的，频率一般为 50 赫兹或 60 赫兹。由于发电厂发出的电力是三相交流电，所以输电大都也采用三相交流输电方式。

不光是厂矿、企业和生活设施要用电，我们家里照明和家用电器也都要用电，家庭是电力的终端用户之一。我们国家使用的终端电压是 220 伏（也有终端电压是 110 伏等其他电压的，如美国），这是指相电压，即火线与零线之间的电压，而相应的三相火线之间的线电压是 380 伏。所谓电压就是电位差，导体两端有了电位差，电流才能在导体中流动。

国内外输电网电压等级

输电网电压等级一般分为高压、超高压和特高压。国际上对于交流输电网，高压通常指 35 千伏及以上、220 千伏及以下的电压等级；超高压通常指 330 千伏及以上、1000 千伏以下的电压等级；特高压指 1000 千伏及以上的电压等级。对于直流输电，超高压通常指 ±500（±400）、±660 千伏等电压等级；特高压通常指 ±800 千伏及以上电压等级。

目前，我国已形成了 1000/500/220/110（66）/35/10/0.4 千伏和 750/330（220）/110/35/10/0.4 千伏两个交流电压等级序列，以及 ±500（±400）、±660、±800 千伏直流输电电压等级。在我国，“高压电网”是指 110 千伏和 220 千伏电网；“超高压电网”是指 330、500 千伏和 750 千伏电网；“特高压电网”是指以 1000 千伏交流为骨干网架，特高压直流系统直接或分层接入 1000/500 千伏的输电网。我国已建成 1000 千伏特高压交流和 ±800 千伏特高压直流输电工程（后面会详细介绍），正在研发 ±1100 千伏直流输电技术，其中 1000 千伏交流电压已成为国际标称电压。

电力做功的能力是由电压和电流决定的，如我们所知，电功率等于电流和电压的乘积。也就是说，电压越高，电力做功的本领就越大；同样，电流越大，电力做功的能力就越强。发电机的作用就是用来提高导体两端的电位差的，就像把水头（水压）提高一样。高电压不仅意味着做功能力强，也有利于电力的输送，从原理上来说，输电电压越高，输送的距离越远，可输送的电功率（容量）就越大。发电厂发出来的电是通过一条条导线组成的电网把电力送到千家万户的用户端，不过在这个过程中，发电机发出的电力并不是直接输送到用电器的，中间要经过升压和降压。输送电力的电网，也可相应分为高压的输电网和较低电压的配电网。

改变电压是通过变压器实现的，依据的原理同样是电磁感应，无论是升压还是降压，电功率是不变的。电压高的一端电流小，电压低的一端电流大，二者的乘积是相等的。发电厂发出的电力由于设备的限制电压一般较低，约为 6.3 ~ 20 千伏，难以输送到较远的地方，需经过升压变电器升压，进入输电的主干线（输电网），经过长距离输送后，再逐级降压进入配电网，最后到达用户端。

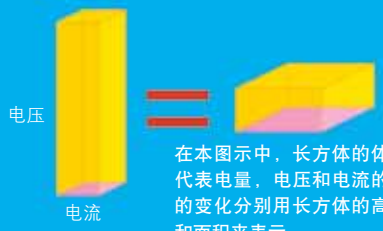
原则上选用什么电压都可以实现输电，但在实际操作时，要综合平衡各种因素（如输电材料、技术水平、输送距离、经济性等）来确定合理的输电电压数值。除了交流输电以外，在远距离输电的场合还会选用直流输电的方式，但在配电网中一般都用交流方式传输。

输电网络示意图

高电压输电之前，先要把低电压变为高电压

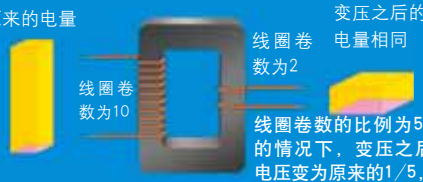
输电时，电压先要升高，可以使表现为热量的电量损耗减少。在我们用电时，如果直接用输电的高电压是非常危险的，只有把它变压成低电压才可以使用。交流电的变压比较容易实现。现在我们所用的电，大部分都是用交流输电。

电量（长方体的体积）相同



在本图示中，长方体的体积代表电量，电压和电流的值的变化分别用长方体的高度和面积来表示。

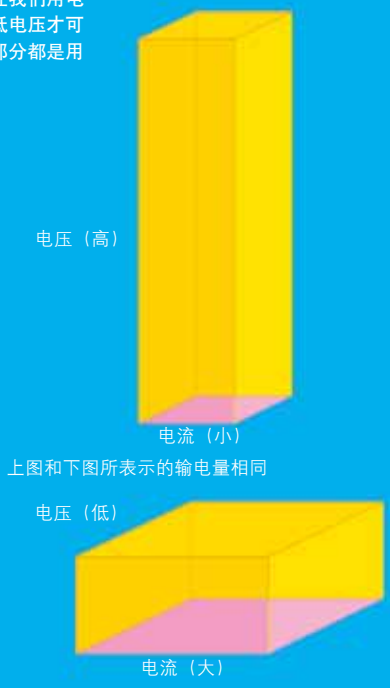
变压的机制



线圈卷数的比例为5：1的情况下，变压之后，电压变为原来的1/5，电流变为原来的5倍。

左侧的线圈卷数为10，右边的线圈卷数为2。交流电从左边的500V、1A，通过电磁感应现象，变成右边的100V、5A。在这个过程中，电量是不变的，只是电压和电流的值发生了变化。

电压的大小和电量损耗之间的关系



电线

在输送的电量相同的情况下比较，当电压升高时，电流减小，变为热量的能量损耗也就越小。

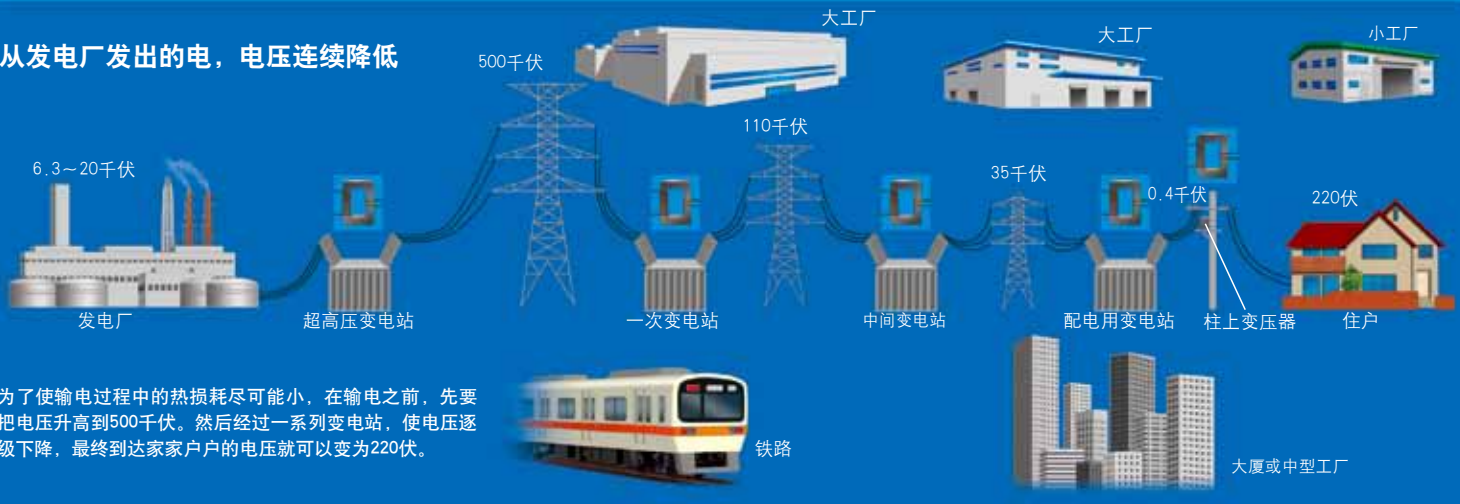
变为热量的电量少

电线

电压降低时，电流变大，变为热量的能量损耗也就越大。

变为热量的电量多

从发电厂发出的电，电压连续降低



为了使输电过程中的热损耗尽可能小，在输电之前，先要把电压升高到500千伏。然后经过一系列变电站，使电压逐级下降，最终到达家家户户的电压就可以变为220伏。

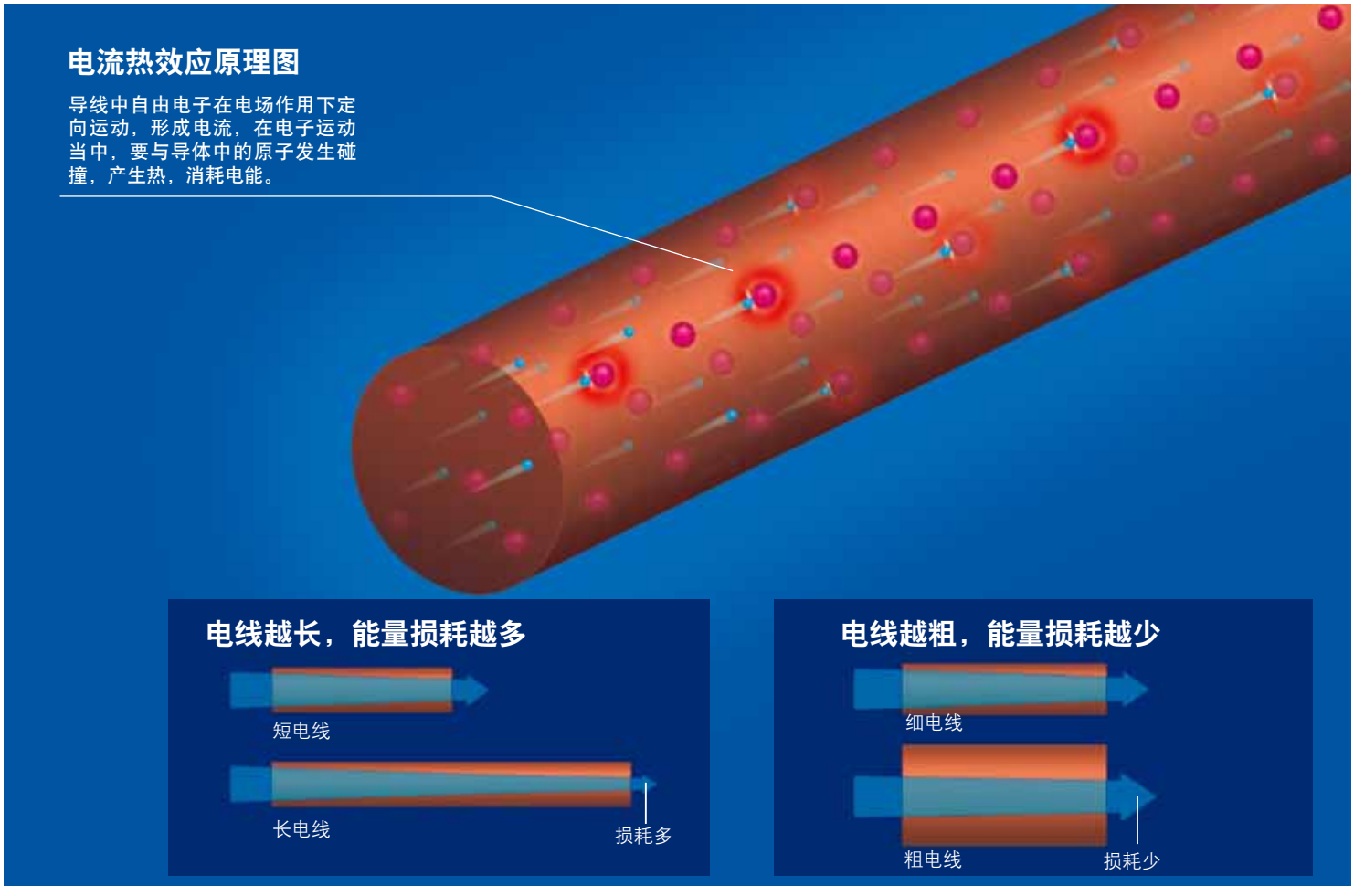
注：本示意图最高电压为500千伏，属于超高压输电范畴。

大容量远距离输电，特高压最合算

从基本原理我们可以得知，在线路输送电流相同的条件下，输电电压越高，输电容量（功率）就越大。输电功率与电压的平方成正比，与阻抗成反比。也就是说，电压提高到 2 倍，输电功率提高到 4 倍。由此可见，提高电压是提高输电容量的关键。如果把 500 千伏的超高压输电电压提高到 1000 千伏的特高压，输电功率就可以提高到原来的 4 倍。一般情况下特高压输电线路的阻抗也会减小，实际上 1000 千伏的特高压输电容量是 500 千伏线路的 4 ～ 5 倍，±800 千伏特高压直流输电线路的容量是 ±500 千伏超高压直流的 2 ～ 3 倍。

提高输电电压不仅可以扩展单条线路的输电能力，还可以降低输电损耗。导线都是有电阻的，电阻值的大小与导线的截面积和长度成比例。当有电流流过时，线路的电阻就要消耗能量，以热能的形式损失掉，这种损耗与电流的平方成正比，与线路的电阻成正比。因此，在导线总截面、输送容量均相同的情况下，1000 千伏特高压交流线路的电流是 500 千伏的 1/2，能量损耗是 500 千伏的 1/4。而且，1000 千伏特高压导线的电阻值通常是 500 千伏的约 25%，所以，在输送相同功率的情况下，1000 千伏输电线的功率损耗为 500 千伏的 1/16 左右。当然，输电损耗不仅仅是导线的损耗，还包括变压器等输电设备的电热损耗，电压越高，变压器及辅助设备损耗越多，但综合起来，1000 千伏线路的输电效率（输出功率与输入功率之比）还是远比 500 千伏线路高。

要知道，一个 100 万千瓦的电力系统（相当于一座常规发电厂）的线损率若降低 1%，每年就可以多供电量 3000 万～4000 万千瓦时（1 千瓦时是 1 度电），这些电可供约 4 万个家庭使用。由此可见，如果线路损耗过大，再加上输电线路的成本，在经济上自然很不划算。如果用较低电压输电，就不如就近建设发电厂。经过综合测算，500 千伏超高压输电线路的经济输送



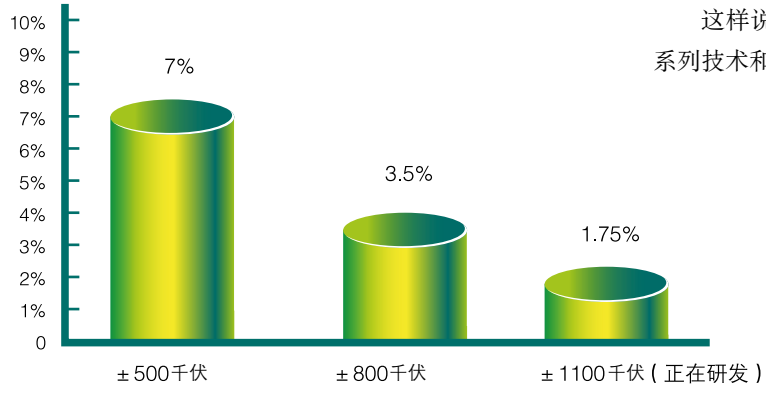
距离一般为 600 ～ 800 公里，而 1000 千伏特高压交流的经济输电距离可达 1500 公里以上。同样道理，±800 千伏特高压直流的经济输电距离可达 2000 公里以上。

特高压输电不仅输电效率高，而且占地面积也小。建设输电线路要占用土地，工程上叫“线路走廊”。建 1 条 1000 千伏特高压交流输电线路能顶 5 条 500 千伏超高压输电线路，而线路走廊所占用的土地只相当于 2 条 500 千伏输电线路，相当于节省了 60% 的土地资源。±800 千伏特高压直流占地比起 ±500 千伏直流而言，也要节约 25% 以上的土地资源。所以相对来说，建特高压输电线路能少占土地，这对土地资源稀缺的中东部地区来说尤其有利。

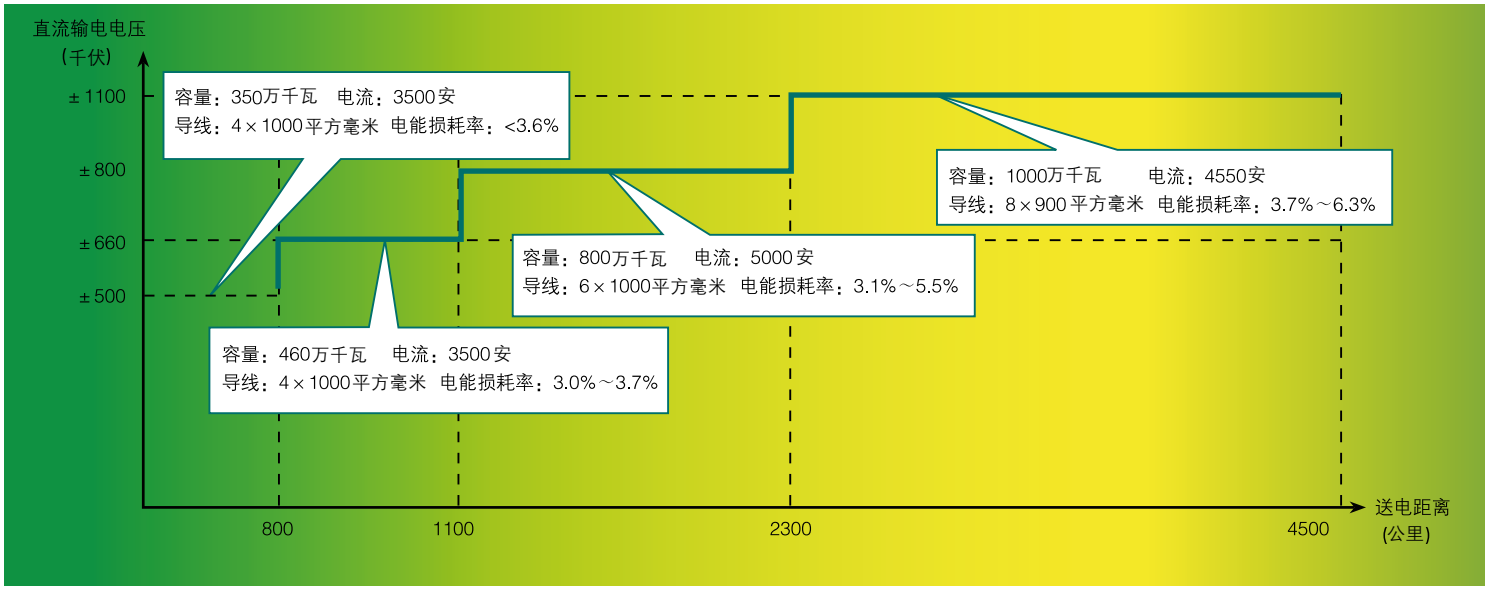
根据我国能源的分布特点，当不得不使用大容量、远距离输电时，在不同的输电方案中，输电成本的高低就成为决定性因素。1000 千伏特高压输电明显优于 500 千伏超高压，特高压成为必然的选择。特高压不仅经济上具有优势，同时提高了电网运行的灵活性和可靠性。电力专家将 1000 千伏的特高压比作高速公路，将传统的 500 千伏和 200 千伏电网比作国道、省道，而低压的配电网则被比作是县道、乡道，这样就构成了一个高低有序、平稳运行的电力网络。

这样说来，是不是电压越高越好呢？更高的电压会带来一系列技术和材料的问题，有些是难以克服的。

每千公里损耗率



随着电压等级的提高，直流输电功损耗率呈递减趋势。



随着电压的提高，经济输送距离不断增大。图中标出了不同的距离区间适用的输电电压等级。

我国特高压发展之路

特高压输电包括特高压交流输电和特高压直流输电，二者的功能和特点各不相同。特高压交流输电用于电网主网架构建和大容量、远距离输电，类似于输电线路中的“高速公路”；交流电可以使用变压器直接升压或降压，线路中间可以随地落点，电力的接入、传输和消纳十分灵活。特高压直流输电的杆塔结构简单、单位输送容量线路走廊窄、造价低、损耗小、输送能力强，用于超远距离、超大容量“点对点”输电；但两端的换流站和逆变站构造较为复杂，成本高，中间不易落点，类似于“直达航班”。

相比于交流输电，直流输电虽然所占的输电容量份额较少，但由于直流输电独特的优点，使电网建设出现了交直流输电相辅相成、共同发展的局面。基于我国能源与需求逆向分布的国情，为了满足更大容量、更远距离的电力传输，发展特高压交直流混合电网成为我国电网发展的战略方向。

在交流输电技术方面，我国从1986年起就开展了“特高压交流输电前期研究”项目，20世纪90年代，又相继开展了“远距离输电方式和电压等级论证”、“特高压输电前期论证”和“采用交流百万伏特高压输电的可行性”等研究，

特高压输电线路

对特高压输电有了初步认识。

2004 年起，国家电网公司启动了特高压输电关键技术研究和工程实践。依托示范工程建设，我国特高压交流输电研究项目取得了大量的第一手研究成果，解决了建设特高压试验示范工程的全部关键问题，基本掌握了特高压交流输变电的技术特点和特高压电网的基本特性。特高压电磁环境限值、过电压水平、无功配置、绝缘配合、防雷等关键技术研究取得了初步成果，为工程初步设计提供了大量可靠、详实的数据。

特高压输电是一项繁杂的系统工程，必须先以试验示范工程的方式开展。2005 年，我国完成了试验示范工程的优选和可行性研究工作，初步明确了特高压输电试验示范工程方案为晋东南－南阳－荆门。这一工程最终于 2009 年初正式投运，其扩建工程于 2011 年 12 月完成，实现了单回线路稳定输送 500 万千瓦的目标。2013 年 9 月，世界上首个同塔双回路特高压交流输电工程——皖电东送淮南－上海 1000 千伏特高压交流输电示范工程成功建成投运，标志着我国特高压交流输电技术开始规模化应用。

在直流输电技术方面，我国从 20 世纪 50 年代末开始跟踪世界直流输电技术发展，陆续建设了一系列试验工程，并于 1990 年建成投运了首个大容量、远距离直流输电工程——葛洲坝－上海 ±500 千伏高压直流输电工程。经过十几年的积累，我国高压直流输电技术及其工程应用得到了飞速发展，常规高压直流输电工程设备已实现国产化。截至 2009 年底，我国投运的超高压及以下直流输电工程有 18 项，总容量 3357 万千瓦，直流输电线路总长 11841 公里，我国成为名副其实的直流输电大国。

伴随着一系列直流输电工程和设备的研发、创新，我国从 2004 年开始对 ±800 千伏特高压直流输电工程技术进行研究，并将研究成果直接应用于 ±800 千伏工程建设。从 2004 年到 2010 年 7 月，通过五年多的自主研究和建设，我国建成了当时世界上电压等级最高、输电容量最大、输电距离最长、技术最先进的特高压直流工程——向家坝－上海 ±800kV 特高压直流输电示范工程，工程于 2010 年全部投运，额定功率为 640 万千瓦，直流线路长 1907 公里。

在总结向上工程成功经验的基础上，我国于 2012 年建成投运了锦屏－苏南 ±800kV 特高压直流输电工程。锦苏工程额定电压 ±800 千伏，额定功率 720 万千瓦，直流线路长 2059 公里。目前，在建的哈密南－郑州、溪洛渡左岸－浙江金华 ±800kV 特高压直流输电工程已将输送容量进一步提升到 800 万千瓦。

国外为什么没能大规模发展特高压？

特高压输电代表了国际高压输电的最高水平，研发工作极具挑战性。特高压交流输电技术的研究始于 20 世纪 60 年代末。美国、苏联、意大利、加拿大、德国、日本、瑞典等国家均根据本国的经济增长和电力需求制定了发展特高压的计划。美国、苏联、日本、意大利还建设了特高压试验站和试验线段，专门研究特高压输变电技术及相关输变电设备。

大容量、远距离的电力输送，是推动特高压输电技术发展的主要动力，在这一点上，其他国家与我国的国情是不同的。在苏联、日本等国的研发后期，由于用电负荷增长缓慢，对大容量、远距离输电的需求减弱，从而导致特高压输电工程暂时搁置或延期，或是降压运行；而美国和意大利等国进行的特高压研究，则多是为了技术储备，而不是为了满足实际负荷的迫切需要。

除此以外，特高压的技术难度极高，也是非常凶猛的“拦路虎”。多年来，各国开展的一系列关键技术和设备研发工作，为特高压输电技术的后续发展和应用奠定了一定的基础。但是，特高压所需的技术极为复杂，一些关键器件和材料的指标和参数要求极高，以当时的原材料、工艺和技术手段，是难以甚至无法解决的。

因此，各国最终未能实现特高压输电线路的正常商业运营，其实并不奇怪。

电压升高带来一系列技术问题

电压升高后，在导线和变压器等输电设备周围的电场强度也会随之升高。随之而来的，就是特高压线路电晕效应损失加大、对绝缘要求提高、电磁场及其影响增强等等，这在技术操作上就要面临一系列难题。

电晕效应是在高电压场合下的电磁效应，在特高压的导线周围（表面）电场强度很高，会使附近的空气分子电离，形成正、负带电粒子，正、负粒子的碰撞和复合过程产生光子，并产生噼噼啪啪的电晕放电，尤其是在雨天等不好的天气条件下这种现象更为明显。电晕放电不仅产生电晕功率损耗，还可产生可听噪声，并对无线电、电视信号产生干扰。对于 500 千伏及以下的电力系统，这个问题尚不严重，而对于 1000 千伏及以上的电力系统这就成为重要的问题。要降低导线表面电场强度和可听噪声，采用比 500 千伏的导线分裂（多股导线按一定的空间分布并行）数更多、子导线截面更大的方法是可行的方法之一。

通常我们使用不导电的物质（如橡胶、瓷瓶等）或者空气把带电的导线分离开（绝缘），以免发生短路或放电。在 1000 千伏特高压的情况下，电场强度极高，一般绝缘物质都会被击穿（导电），就是在空气中，导线与导线、导线与其他导体或

1000kV 淮南 — 上海特高压交流输电工程是我国首个同塔双回特高压交流输电线路工程，也是我国后续特高压交流输电线路建设的示范工程。

户外冲击试验场

接地物体之间也要隔开足够远的距离。使用空气作为绝缘介质（称为空气间隙）是最常用的绝缘方法，但是在导线与悬挂导线架构之间（比如导线与塔杆之间）则要采用特制的绝缘子来绝缘。1000 千伏的工作电压对于绝缘要求来说就足够高了，但是在输电线路中还会出现“过电压”的情况，有时电压会远高于 1000 千伏。短路以及断路器（开关）的各种操作会产生工频过电压和操作过电压，遭到雷击时还会产生雷电过电压，这些过电压叠加在工作电压上，就对绝缘提出了更高的要求。

特高压输电的线路及变电站设备等都处在高电压状态，导线或设备上的电荷必然在周围产生电场，导线内的电流也要产生磁场。人处在强电场和磁场中，可能会感觉到体内有电流流过或出现火花放电。可以通过架高输电线的方法降低到线下的电场和磁场强度，但在变电站内，设备附近一般都有较高的电场和磁场，需要将其控制在安全水平，以免对人或其他生物造成伤害。

特高压输电不仅仅要面对电压升高带来的一系列理论和技术问题，还要应对输电容量增大对设备的特殊要求，制造起来非常困难。不仅如此，造出来以后，有些超大超重设备的运输也是大问题，甚至需要专门修路才能运到指定地点。

尽管国外对于特高压输电有过一些研究，但是系统的研究还不充分，一些关键设备还达不到要求。鉴于此，我国先后建立起多个特高压试验基地，有特高压交流试验基地、特高压直流试验基地、特高压杆塔试验基地、西藏高海拔试验基地、大容量试验室等，进行一系列的线路、电晕、电磁环境、7500 千伏冲击、绝缘子、污秽及环境、避雷器、杆塔等试验，建立了完整的体系和标准。经过几年的努力，我国终于全面掌握了特高压核心技术，研制成功了全套特高压设备，形成了完善的特高压输电标准体系，形成专利技术 431 项（其中发明专利 185 项），彻底扭转了我国电力工业长期跟随西方发达国家发展的被动局面，首次在世界电网科技领域实现了“中国创造”和“中国引领”，引起国际广泛关注。

特高压直流试验线段

7500 千伏户外冲击试验场

稳定电压以保障电网安全运行

我们家里使用的220伏电压非常稳定，否则会对电器造成损害，这有赖于电网各级电压的控制。在特高压的输电线路中，控制电压的稳定是一个首先要解决的问题。所谓电压控制，就是让电压乖乖地待在电网额定电压范围内，既不太高也不太低，更关键的是，还不能让它瞬间“发脾气”。

在输电的过程中不可避免地要出现内部故障、开关操作和遭受雷击等，由此可能造成短路、断路和电流剧烈波动现象。根据电磁感应定律，电流的剧烈变化必然引起电压的大幅波动，这就造成电力系统的过电压现象。瞬时或持续时间较长的高于电网额定允许电压并可能导致电气装置损坏。另外，输电导线和电气设备是有电感和电容的，如一个大导体，导体越大，电容就越大。电感和电容除了产生无功功率[注]之外，对输电电压也有较大影响。1000千伏特高压输电线路的电容较大，其充电功率（电容产生的无功功率）约为500千伏输电线路的4～5倍，对电压影响较大。特高压输电线路沿线电压分布因此更不均匀，分布特性与特高压输送功率水平紧密相关。当特高压输送功率较大时，变电站母线电压随输送功率的变化也较大。

所以，输电电压控制包括稳态电压控制和瞬态过电压抑制两个方面。稳态电压控制的目标是，在正常情况下使特高压系统电压运行在额定电压范围内；在瞬态过电压抑制方面，要尽可能压低过电压峰值，减小过电压对设备损坏的风险。受到绝缘材料本身特性的限制，设备内的绝缘水平进一步提高难度很大。因此，特高压系统的过电压限制比超高压系统更为严格，难度也更大。

鉴于特高压输电线路存在较大的电容充电电流，通常必须在输电线路两端装设并联电抗器（电感）以补偿电容电流，控制工频过电压。并联电抗器会影响输电能力，再使用串联电容器的方法进一步大幅度提高其输电能力。这样采用容抗、感抗相结合控制无功功率的方法，实现了稳态电压的优化控制；再使用高性能避雷器、高压电抗器及断路器合闸电阻等有机组合的过电压深度抑制方法，实现了瞬态过电压的深度抑制。电压控制项目研究最终完成了这一几乎不可能完成的任务。

通过一系列稳压措施，以及优化高抗中性点接地电抗器参数等，特高压交流工程实现了0.7秒内快速重合闸，为特高压输电的安全、平稳运行提供了基础保障。

注：在交流电路中，电感或电容是不消耗电能的，它们与电源之间只有能量的互换，而不对外做功，在电工领域中，这种能量交换被称为无功功率。但是这种无功功率也要在导线中流动，会在导线的电阻上产生热损耗，从而消耗电能。

GIS 型特高压避雷器

输电线路中的过电压是影响电压稳定的关键因素，而雷电造成的突发性的过电压有时会达到数千千伏以上，不但影响正常的输电，还有损坏输电设备的风险。为了把雷击风险降到最低，除了在特高压输电线路的杆塔最上方架设避雷线之外，变电及换流站都必须安装适当的避雷装置。左图为变电站等输电设施使用的避雷装置。

瓷外套型特高压避雷器

110kV 无功补偿装置

绝缘技术改进与电磁环境控制

良好的绝缘是安全的保障

包括电器设备在内，整个输电线路全部带电，大部分都处在高电压状态，为了不发生放电、漏电、短路等现象，必须把带电体隔离开，以达到安全输电的目。同时也必须确保特高压电线不会对周围的人和物放电，使其成为一条安全的线路。

空气间隙和绝缘子是特高压交流线路高压导线与杆塔钢架之间外绝缘的基本手段。导线必须离开杆塔和地面足够长的距离，留出足够宽的空气间隙；导线与杆塔的连接要使用特殊制造的绝缘子。空气间隙的大小对杆塔的高度、宽度等有一定的要求，绝缘子质量和性能也会直接影响杆塔的体积和重量。杆塔设计过大，会提高杆塔成本，而设计偏小，又会使高压导线对杆塔放电，提高线路运行故障率。所以，科研人员通过试验和理论分析相结合，提出合理尺度的外绝缘配置，在保证运行安全的前提下，尽量降低建设成本。

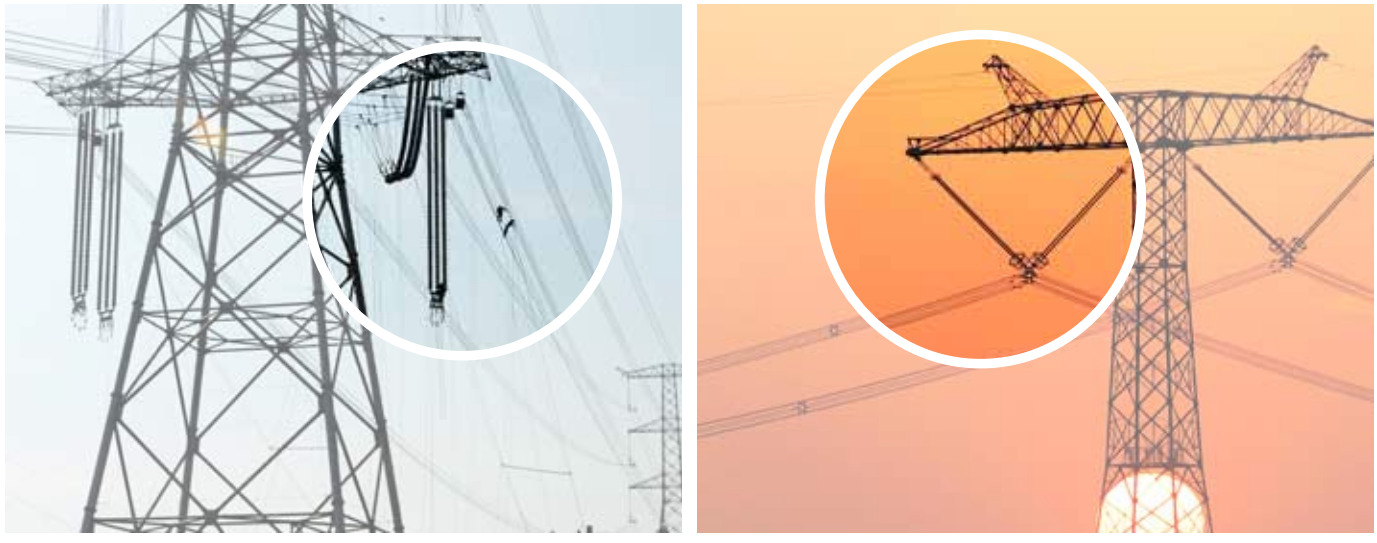
在这项技术研究中，由于特高压线路电压等级高，运行电压和设备操作产生的脉冲过电压幅值，比超高压线路显著提升，需要绝缘间隙变大。而且，受到工程沿线不同海拔、大气污染、雷电活动规律不一、杆塔结构差异等因素的影响，外绝缘特性进一步复杂化，难以掌握其总体规律。

针对外绝缘配置的难题，我国开展了外绝缘特性试验研究，首次获得了全系列真型试验数据，建立了长空气间隙放电过程的数学模型，掌握了大尺度外绝缘的非线性放电特性；提出了基于长波前冲击试验的过电压绝缘配合方法、大吨位复合绝缘子配置方案，攻克了重污秽条件下特高压交、直流外绝缘配置难题；提出了基于雷电活动、地形、地貌特征的差异化雷电防护方法，解决了雷电绕击的突出难题。

杆塔放电试验

通过以上创新，我国在世界上首次实现了复杂环境下特高压系统外绝缘优化配置。以特高压交流输电为例，线路铁塔重量比最初的设计降低了 64%、造价降低了 60%。

以绝缘子为例，在特高压工程建设前，国内绝缘子厂家技术基础还比较薄弱，只能生产 330 千伏及以下的瓷绝缘子，500 千伏及以上的产品全部依赖进口，完全受制于国外。在 1000 千伏特高压复合绝缘子研制出来前，国外企业一支绝缘子产品开价 1000 万元。我国成功开发出来后，他们不得已降价到 200 万



绝缘子串 I 形和 V 形

元一支。可是，即便如此，这个价格还要高于国内生产的 60 万元一支的价格。而且，从试验和运行的效果看，国内产品的性能十分优异。

电磁环境控制在安全合理的水平

所谓电磁环境控制，就是让特高压成为“环保使者”，产生的电场、磁场对环境完全无害。

有了电荷，就会产生电压，有了电压就会产生电场。电荷如果定向移动，就会产生电流，就会产生磁场。特高压复杂多导体系统是指线路和变电站架构尺度大、结构复杂，构成了多导体系统。这种带电导体表面及附近空间的电场强度显著增大，容易引发强烈电晕放电。

对于复杂多导体系统工频电场，研究难度极大。针对电磁环境控制难题，我国首次开展了全场域电场分析，掌握了导体表面和空间的电场分布规律；提出了导线布置方案、金具电晕控制方法，有效控制带电导体表面和附近空间的电场强度；采用了低噪音设备、研发高性能隔声屏障以及优化噪声源布置等措施，成功解决了变电站、换流站可听噪声控制难题。

通过以上创新，我国特高压交、直流工程的电磁环境控制水平均与常规 500 千伏工程相当，特高压交、直流示范工程电磁环境实测值均满足国家环保要求。其中，线路走廊边沿实测工频电场强度小于 4 千伏 / 米，严于世界卫生组织推荐的国际标准。

绝缘子串吊装

极低频电磁场生态影响长期观测基地

研发成套设备，创造多项世界之最

交流输电设备

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施，它是连接发电厂、电网和电力用户的中间环节，同时通过变压器将各级电压的电网联系起来。变电站内起变换电压作用的设备是变压器，而用以同电力系统连接的变压器称为主变压器。

输电容量增加会导致变压器内外尺寸增大，而受运输条件限制，其运输尺寸必须加以控制。因此，在特高压大容量变压器研制过程中，必须将变压器尺寸、运输、绝缘设计、漏磁控制、温升控制等问题结合起来综合考虑。依托特高压交流试验示范工程，我国成功研制出了世界首台额定电压 1000 千伏、额定容量 100 万千伏安的单体式特高压变压器，其单柱绕组的电压达到 1000 千伏、容量达到 33.4 万千伏安，创造了世界纪录。与常规 500 千伏变压器相比，特高压变压器的电压提高了 1 倍、容量提高了 2 倍，但本体宽度和高度没有增加，长度仅增加了 50%。

功率的单位

功率的基本单位是“瓦”（W）。电功率等于电压乘以电流，基本单位也是瓦。但在电工学中，有功功率才是真实的功率，为了区分有功功率、无功功率和自然功率，规定有功功率单位是“瓦”或“千瓦”（kW）；无功功率单位是“乏”（var）或“千乏”（kvar）；自然功率单位是“伏安”（VA）或“千伏安”（kVA）。它们的量纲是一样的。

连接在电网上，向电网注入或从电网吸收无功功率的装置，常称为无功补偿装置。就无功补偿装置接入电网的方式而言，有并联补偿装置（如并联电容器、并联电抗器），还有串联补偿装置（如串联电容器）。由于电网上有很多电气设备，包括变压器、电动机等都需要无功功率，这些无功功率均需要发电机发出的无功功率通过输电线路输送

额定电压 1000 千伏、额定容量 32 万千乏的特高压并联电抗器，是世界上单相容量最大的并联电抗器。

自主研制成功全套特高压交流设备

1. 世界首台额定电压 1000 千伏、额定容量 100 万千伏安的特高压变压器。
2. 世界最大单项容量的特高压并联电抗器。
3. 目前世界上运行电压最高的气体绝缘金属封闭开关设备（GIS/HGIS）。
4. 用于中等和重污秽地区的特高压避雷器、电容式电压互感器、特高压绝缘子以及特高压系统用低压无功补偿设备。
5. 特高压系统用二次设备（包括继电保护与控制装置、计算机监控系统、计量系统、站内直流系统等）。

来满足其需要。但输电线路在输送无功功率的过程中要引起电力损耗，装设无功补偿装置的目的就是减少线路损耗和提高功率因数。

并联电抗器可以降低电网的工频过电压和操作过电压，它既可以单独使用，也可与并联电容器一起使用，用于电网调相和无功补偿。依托特高压交流试验示范工程，我国解决了高电压、大容量下并联电抗器的漏磁和温升控制、噪声及振动控制等技术难题，成功研制出了世界上最大单相容量的并联电抗器，其单体额定容量达 32 万千乏。

额定电压 1000 千伏、额定容量 100 万千伏安的单体式特高压变压器。

直流输电设备

直流输电方式与交流输电方式有较大的不同，对设备的功能、规格也有不同的要求。采用直流输电必须进行交、直流电的相互转换，即在送端将交流电转换成直流电（称为整流），而在受端又将直流电转换为交流电（称为逆变），才能将电能从电源端送到负荷端。送端进行整流的场所称为整流站，受端进行逆变的场所称为逆变站，二者统称为换流站。实现整流和逆变变换的装置分别称为整流器和逆变器，统称为换流器。

换流器是直流输电实现交直流换流的核心部件。目前，高压和特高压直流输电使用的换流器，通常是由以晶闸管（整流元件）器件为基础构成的换流阀和提供换相电压的换流变压器组成的。晶闸管元件是具有承受电压高、通流能力强且技术成熟的电力电子器件。直流系统输送容量不断提升的需求，促进了晶闸管技术的发展，其电压和电流参数不断提高。

我国近年兴建的 ±500 千伏常规直流工程基本都采用基于 5 英寸晶闸管的换流阀。结合特高压换流阀设备规范要求和大功率电力电子制造技术的发展水平，我国在世界上率先确定了 6 英寸晶闸管主要的研制参数，通过研发特殊的单晶硅预处理工艺，解决了晶闸管芯片尺寸扩大至 6 英寸带来的一系列关键技术难题，实现了用 6 英寸大尺寸单晶硅材料制造大电流、高阻断电压晶闸管的目标，并同步优化了换流阀与 6 英寸晶闸管器件的参数配合，保证了晶闸管器件及换流阀性能的充分利用与发挥。

换流阀

整流站（四川复龙换流站）

换流变压器用于连接交流系统和换流阀，实现交、直流侧的电压匹配和电气隔离，并可限制短路电流。与常规交流变电器承受应力不同，换流变压器阀侧绕组所承受的电压为直流电压叠加交流电压，并且两侧绕组中均有一系列的谐波电流，还要承受极性反转的应力。我国 ±800 千伏特高压直流示范工程所采用的换流变压器最高阀侧电压 800 千伏（直流）、网侧电压 500 千伏（交流），耐压水平高，电、磁、热、力各方面问题复杂，外形

6 英寸晶闸管

逆变站（上海奉贤换流站）

换流变压器

尺寸受到运输条件的严格限制，绝缘结构工艺设计难度大，是对电工技术、材料技术和高压试验技术极限的挑战。

特高压直流系统主要采用两端直流系统，考虑到 ±800 千伏级直流系统输送容量大大提升，换流变压器制造和运输困难，我国特高压直流系统采用了每端每极由 2 个直流电压相同的 12 脉动换流器串联构成的方案，每个 12 脉动换流器拥有自己单独的阀厅，采用双重阀结构。这种方案不仅将直流电压提高到需要的水平，增大了输送容量，减小了损耗，而且便于任何换流器退出运行时，剩余的换流器仍能匹配运行，大大提高了可靠性。

特高压直流输电系统换流站设备研制

1. 6 英寸晶闸管元件及换流阀研制
2. ±800 千伏直流输电系统用换流变压器研制
3. ±800 千伏直流输电系统用干式平波电抗器研制
4. ±800 千伏直流输电系统用直流场设备及交流场设备研制
5. ±800 千伏直流输电系统用控制保护设备研制

第一条特高压交流输电线路：晋东南－南阳

表 1. 1000kV 晋东南－南阳－荆门特高压交流试验示范工程	
建设目的	对特高压输电技术和设备进行试验验证，确保特高压输电技术在成熟的基础上推广应用
线路起点	长治变电站（山西省长治市长子县石哲镇）
线路途经	南阳开关站（河南省南阳市方城县赵河镇）
线路终点	荆门变电站（湖北省荆门市沙洋县沈集镇）
线路长度	640 公里
途径省市	3 个（山西、河南、湖北）
过江跨越	2 个（黄河、汉江）
额定电压	1050/525/110 千伏
变电容量	600 万千伏安（扩建后为 1800 万千伏安）
导线截面	8×500 平方毫米
平均塔高	77 米
平均塔重	71 吨
代表技术	特高压换流阀
开工时间	2006 年 8 月 9 日（2010 年 12 月 29 日扩建工程开工）
投运时间	2009 年 1 月 6 日（2011 年 12 月扩建工程投运）
验收时间	2011 年 10 月 31 日（扩建工程通过验收）
累计送电	512.92 亿千瓦时（截至 2013 年 11 月底）
特殊意义	我国第一个特高压输电工程、第一个特高压交流输电工程

表 2. 1000kV 晋东南－南阳－荆门特高压交流试验示范工程的意义及效果
· 系我国首条特高压线路，完成了从特高压理论、实验到实际工程的重大飞跃。
· 湖北、河南省间电网联系更加紧密，华中电网安全可靠水平进一步提高。
· 投运 5 年来，系统经受住了恶劣天候和各种操作及运行方式的考验，运行稳定，状态正常。
· 全面验证了特高压交流输电的技术可行性、安全可靠性、环境友好性和经济合理性。
· 充分发挥了大电网资源共享、事故支援的优势。
· 已成为我国南北方向的一条重要的能源输送通道。

表 3. 特高压交流输电技术优势及特点
· 输电损耗低：以一期工程为例，大负荷运行状态下实测损耗仅 1.7%，约为 500 千伏的 1/3。
· 输送容量大：累计已向华中地区输送火电 374.86 亿千瓦时，极大缓解了该地区严重缺电的局面。
· 环境友好：工程实测电磁环境指标满足国家标准，与 500 千伏工程相当。
· 资源配置能力强：已实现了“水火互济、南北互供”。
· 节约运力：如建设同等规模火电厂，需运煤 2400 万吨（相当于 60 吨普通车厢 40 多万节，或 100 吨重载车厢 24 万节）。
· 因为电压电流恒久不变，要求设备及线材耐久性好。

– 荆门

（山西）长治变电站

（河南）南阳开关站

（湖北）荆门变电站

第一条特高压直流输电线路：向家坝 – 上海

表 4. 向家坝 – 上海直流特高压线路的意义
· 使我国成为继瑞典、德国之后第 3 个掌握特高压换流阀核心技术的国家，改变了国际直流市场格局。
· 实现“中国制造到中国创造”、“学习追赶到超越引领”、“直流大国到直流强国”的三个转变。
· 整体可靠性指标优于常规 ±500 千伏直流工程。
· 协助四川水电外送，“西电东送”战略的具体工程之一。
· 缓解华东电网的供电压力。

表 5. 直流特高压优势及特点
· 点对点直达。
· 大容量。
· 单向输送。
· 换流站成本高，线路成本低。
· 没有无功损耗。
· 电磁干扰小。
· 因为电压电流恒久不变，要求设备及线材耐久性好。

（安徽安庆）长江大跨越

（上海）奉贤换流站滤波场设备

表 6. 向家坝 – 上海 ±800kV 特高压直流输电示范工程	
建设目的	满足金沙江下游向家坝、溪洛渡等水电站外送需要，实施西电东送战略的具体工程项目
线路起点	复龙换流站（四川省宜宾市宜宾县复龙镇）
线路终点	奉贤换流站（上海市奉贤区四团镇）
线路长度	1907 公里
途径省市	8 个（四川、重庆、湖北、湖南、安徽、江苏、浙江、上海）
过江跨越	4 个（长江）
额定电压	±800 千伏（直流）
额定电流	4000 安
输送容量	640 万千瓦，最大连续输送功率 700 万千瓦
导线截面	6×720 平方毫米
平均塔高	65 米
平均塔重	62 吨
代表技术	特高压换流阀
开工时间	2007 年 4 月 26 日
投运时间	2010 年 7 月 8 日
验收时间	2013 年 10 月 9 日
累计送电	560.12 亿千瓦时（截至 2013 年 11 月底）
特殊意义	我国第一个特高压直流输电工程

其他特高压线路

表 7．锦屏 – 苏南 ±800kV 特高压直流输电工程	
线路起点	锦屏（裕隆）换流站（四川省）
线路终点	苏州（同里）换流站（江苏省）
线路长度	2059 公里
途径省市	8 个（四川、云南、重庆、湖南、湖北、浙江、安徽、江苏）
额定电压	±800 千伏
输电性质	水电
输送容量	720 万千瓦（最大连续输送功率 760 万千瓦）
年输电量	360 亿千瓦时
折合运煤	1680 万吨
减排二氧化碳	3240 万吨
投运时间	2012 年 12 月 12 日
特殊意义	输电距离首次突破 2000 公里；“西电东送”工程之一。

表 8．1000kV 淮南 – 上海特高压交流输电示范工程	
线路起点	淮南变电站（安徽省）
线路途经	芜湖变电站（安徽省）、安吉变电站（浙江省）
线路终点	练塘变电站（上海市）
线路长度	649×2 公里
途径省市	4 个（安徽、浙江、江苏、上海）
标称电压	1000 千伏（最高 1100 千伏）
输电性质	火电
变电容量	2100 万千伏安
投运时间	2013 年 9 月
特殊意义	“皖电东送”工程之一，首创“点对网”的构架方式及“同塔双回”的架线方式。

表 9．哈密南 – 郑州 ±800kV 特高压直流工程	
线路起点	哈密南换流站（新疆自治区）
线路终点	郑州换流站（河南省）
线路长度	2192 公里
途径省市	6 个（新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南）
额定电压	±800 千伏
输电性质	风电、光伏发电、火电“打捆”外送
输送容量	800 万千瓦
年输电量	480 亿千瓦时
折合运煤	2210 万吨
减排二氧化硫	4800 万吨
减排氮氧化物	27 万吨
投运时间	2014 年 1 月（预计）
特殊意义	“疆电外送”工程之一，首创“风火打捆”特高压外送模式。

表 10．溪洛渡左岸 – 浙江金华 ±800kV 特高压直流输电工程	
线路起点	双龙换流站（四川省）
线路终点	金华换流站（浙江省）
线路长度	1680 公里
途径省市	5 个（四川、贵州、江西、湖南、浙江）
额定电压	±800 千伏
输电性质	水电
输送容量	800 万千瓦
年输电量	约 400 亿千瓦时
折合运煤	1228 万吨
减排二氧化碳	4000 万吨
投运时间	2014 年 6 月（预计）

表 11．浙北 – 福州 1000kV 特高压交流输变电工程	
线路起点	浙北变电站（浙江省）
线路途经	浙中变电站（浙江省）、浙南变电站（浙江省）
线路终点	福州变电站（福建省）
线路长度	603×2 公里
途径省市	2 个（浙江、福建）
标称电压	1000 千伏
输电性质	火电
变电容量	1800 万千伏安
投运时间	2015 年（预计）

电容器塔

锦屏 – 苏南特高压工程跨江塔

第5部分 特高压的今天与明天

特高压的综合效益

经济效益

替代输煤

特高压输电，可以明显缓解铁路和公路的运输压力。1 条 1000 千伏特高压交流输电线路，每年可从“空中”输送原煤 1500 万吨，相当于 750 ～ 1000 趟万吨重载列车或 70 万辆重载卡车的运煤量。1 条 ±800 千伏特高压直流输电线路，每年则可从空中输送原煤 2000 万吨，相当于 1000 ～ 2000 趟万吨重载列车或 100 万辆重载卡车运煤量。

在特高压线路实际建成投运后，“运煤困局”果然开始发生了一些变化。目前已投运的 4 条特高压线路（晋东南－南阳－荆门、向家坝－上海、锦屏－苏南、淮南－上海），输电总里程近 6000 公里，输电能力超过 2800 万千瓦。这相当于从资源富集的西部、北部地区向用电集中的东中部地区年输送超过 7000 万吨煤炭。按每节车厢载重 60 吨计算，这些煤足够装满 110 万节火车车皮。

换言之，上百万车皮的煤，就这样化身为强大电流，跨越千山万水，直接送到了最需要它们的地方。

拉动经济

输电，不仅仅是为运力不足找出另一条通道。事实上，它在经济上更加合算。经测算，到 2020 年，依靠特高压输电，我国中东部地区的电力供应成本将直接下降约 560 亿元。

不仅如此。数据显示，输电对经济的拉动作用更大。输电与输煤，对山西这个产煤大省的国民生产总值的贡献率的比值是 6 ：1，就业拉动效应则是 2 ：1。换言之，用煤发电后输电，比单纯输煤产生的效益要大得多。借助特高压，山西省 2007 年到 2009 年输煤与输电的比例一路下行，从 26 ：1 到 23 ：1，再到 16 ：1，未来还会更低，直到 4 ：1 的理想比例。

节约土地

急需能源的经济发达地区寸土寸金，但是在当地大量兴建大型发电厂及配套设施，会造成大量高价值土地的无谓消耗。由于特高压比传统电网更高效，特高压输电工程提高输电效率、降低能耗、节约土地资源的规模之大，其本身被誉为世界最大环保工程。数据显示，一座 2×100 万千瓦电厂占地约 49 公顷，一座 ±800 千伏、760 万千瓦直流换流站占地约 20 公顷，一座 4×300 万千伏安特高压交流变电站占地约 15 公顷。按相同电力规模考虑，本地建设煤电，其占地是接受区外电力的 9 ～ 12 倍。预计到“十二五”末，特高压电网可支撑中东部地区受入电力流约 2 亿千瓦，相当于节约当地土地资源 3400 公顷。

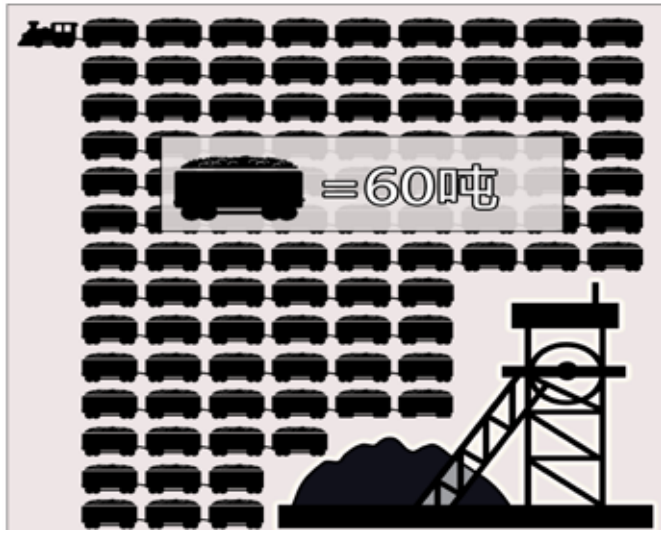
煤，难以运载的重负

我国能源的支柱是煤。为了运煤，铁路、公路和水路都早已不堪重负。

多年来，铁路运力的 50% 以上都用来运煤，各种物资都在为煤让路，2010 年初，铁道部甚至将关系国计民生的重要物资——棉花由一级运输物资降为二级运输物资，以此集中运力，优先保证煤炭运输。即便如此，连年飞速增长着的铁路运力，仍然无法满足全国的用煤需求。

公路方面，京藏公路等运煤干线堵车几十公里已不是新闻，而在煤炭产区，动辄几千辆卡车、首尾上百公里、长达个把月的大堵车，更是令人心焦而无奈。这并不是个别现象，在很多地方，公路的运力都已经被煤撑到了极限。

至于水路，运煤船只的拥堵更是屡见不鲜。



过去每年需要 110 万节车皮运送煤炭，现在只要 4 条特高压线路。

输电效益

湖北省的河湖众多，但煤炭资源却比较贫乏，这使得它的“能源特色”也非常鲜明。一方面，在湖北省内发出的电中，3 度里就有近 2 度是水电（占总发电量的 61.4%）；另一方面，在湖北烧掉的电煤中，100 吨里却有 98 吨都是从外省买来的。这样的能源资源结构，使得湖北的电力供应情况与季节关系极大。水量丰沛的夏季，电力相对充足，一旦进入枯水期的冬季，水电发电量立刻骤降，此时如果电煤再无法保障，全省的电力供应就会变得非常困窘。

这种情况并不是危言耸听。2009 年年底、2010 年年初，在多种因素（枯水期、煤价高涨、运力紧张、产区限煤外运、取暖需求大增、煤矿放假、春运挤压货运等）的联合作用下，湖北迎来了“有史以来用电最困难”的严冬，当年 12 月 12 日起，湖北全省发布了“用电红色预警”，被迫实施计划用电。当时，湖北各电厂千方百计出省购煤，有的甚至将厂内空空如也的储煤场里的地皮铲下，送进发电机组的炉膛里以榨取最后一点点电力。就在这样的状况下，当年刚刚竣工并投运的“1000kV 晋东南 – 南阳 – 荆门特高压交流试验示范工程”立竿见影地发挥了电力生命线的作用，每天为湖北送来近 2000 万千瓦时的宝贵电力。以湖北省经信委电力处处长刘文忠的话说，特高压为湖北“解决了大问题”。

之后的 2010 年冬季，湖北省的电力再次紧张起来，特高压工程也再次为湖北输电近 10 亿千瓦时。前后合计，这条宝贵的动力线共给湖北输电 133 亿千瓦时，相当于运送了 600 万吨原煤。为了进一步发挥大容量输电优势，晋东南 – 南阳 – 荆门特高压工程进行了扩建，输电容量随之增加了一倍。2011 年年底前，在湖北省再次入冬的关键时点，扩建工程正式投运，宝贵的电力源源不绝地流入了湖北的山山水水。在冬季的严寒中送来温暖和能量，在最需要的时候送来最需要的电力，特高压之于湖北，堪称现实版的“雪中送炭”。

而这还只是“水火互济”中的“火济”。如前所述，湖北本身并不是不能发电，只是发电的主要途径——水电——受季节的限制很大。在水量丰沛的年份，湖北的水电不仅自供有余，多余的部分还可以输出到其他地方。不过，这些多余的水电如果不输出的话也无法保存，只能白白丢弃掉，称为“弃水电量”。显然，将这些水电设法输出到能够使用的地方，才是最合算的。

而晋东南 – 南阳 – 荆门特高压线路，恰恰就是这样一条双向的“车道”，它不仅可以在冬季为湖北运来急需的火电，也可以在夏季为河南、山西送去充沛的水电，当地也就不必燃烧过多的煤，由此减少了污染物的排放，这就是所谓的“水济”。

在湖北接受“火济”的 2009 ~ 2011 年，同样也向华北地区“水济”了 92 亿千瓦时的电量。对湖北来说，这相当于减少了 55 亿千瓦时的弃水电量，是白捡的便宜；而对河南和山西来说，则相当于节约了 300 万吨煤，并减排了 800 万吨二氧化碳。

水火互济，就这样让各参与方都成了受益方。

1000kV 晋东南 – 南阳 – 荆门特高压交流试验示范工程实现了“水火互济”。

环保效益

风电、水电等清洁能源助力经济发展

进入 21 世纪以来，发展可再生能源，已成为世界各国应对环境污染、控制温室气体排放的共同选择。中国工程院副院长、中国工程院院士谢克昌认为，对于我国这样一个过度依赖煤炭等化石能源的国家而言，“如果不对煤炭比例加以控制，到 2017 年，煤炭消费还将增长 5 亿吨左右，大气污染防控形势将更加严峻”。原国家能源局原局长张国宝也分析称，降低煤炭占比不可能是发展单一的替代能源，核电、水电、天然气和新能源等都是很好的替代备选能源。

特高压，是清洁能源大发展的必要支撑。到 2020 年，包括风电、水电在内的清洁能源的发电总量，将占到全国总发电量的 26%。但是，我国水电主要分布在西南地区，风电、太阳能发电主要分布在西部、北部，与东中部负荷中心之间的距离达到了 1000 ~ 3000 公里，已经超出传统超高压输电线路的经济输送距离。因此，只有选择特高压，才能够解决清洁能源大规模输送和大范围消纳的问题。

风电：新疆与内蒙古

风，每天都在不停地吹着。与水能一样，风能取之不尽、用之不竭，没有污染，是非常理想的新型清洁能源。

在内蒙古，可开发的风能容量超过了 1.5 亿千瓦，是国家规划的“风电三峡”基地之一。近几年，内蒙古的风电装机呈现为“裂变式增长”，2012 年已占到全自治区发电总装机的 21.6%。但是，这个喜讯却让人发愁。因为本地市场有限，加上电网调峰能力不足，已经建成的大片风电机组被迫弃风限产。

无独有偶。在新疆，陆上风能资源占到全国的 40%。作为“疆电外送”的桥头堡，哈密不仅坐拥丰富的煤炭资源，更有着令人艳羡的大片风区。在荒凉的戈壁滩上，成片的风机拔地而起。根据规划，哈密东南部风区装机规模 200 万千瓦、三塘湖 – 淖毛湖风区 300 万千瓦、十三间房风区 100 万千瓦，加起来是 600 万千瓦。但是，尽管规划装机规模惊人，可是到 2012 年夏天为止，实际装机容量却只有 190 万千瓦。原来，这些风电场位置偏远，如果接入现有的新疆主网，距离会很长，如果输电电压比较低的话，线损就会很大，经济上很不合算。例如，哈密马莲泉风电场接入的是 110 千伏线路，距离 100 多公里，线损率就已经达到了 10% 以上（而晋东南 – 南阳 – 荆门特高压线路的线损率仅有 1.7%）。不光是线损率高，“谁用电”也是个问题。由于人口数量少、经济相对不发达，全自治区的年用电量，仅与长三角的一个城市相当。那么，大型风电基地建设好以后，谁用这些电呢？

特高压是新能源的“绿色通道”

这个“窝电”的问题，困扰的不仅是内蒙古和新疆。据测算，如果仅在各省区内部自行消纳的话，到 2020 年全国可开发的风电规模约 1 亿千瓦。但是，如果通过远距离跨区联网输送来扩大清洁能源的消纳能力的话，全国风电开发规模可以翻一倍，达到 2 亿千瓦以上。

现在有了特高压，这些风区的输电问题迎刃而解。随着千里之外的清洁能源大量输入消费中心，供电地区、受电地区的双赢也就实现了。未来，哈密北 – 重庆特高压直流工程建成后，哈密几大风区的风电可通过特高压工程直接外送，而内蒙古的风电也被纳入了国家特高压骨干电网的发展规划之中。

在无垠荒漠上呼啸而过的狂风，终将驱动城市发展车轮滚滚向前。

水电：四川

2012 年，有“水电王国”之称的四川，正面临着消纳水电的巨大压力。当年夏季，长江来水比 2011 年偏多近一半，外送水电创纪录地接近了 1110 万千瓦，约占全省发电能力的一半。到了 10 月，已是传统意义上的枯水期，但水势依然汹涌，水电仍在大发。很显然，如果要让这些清洁的水电不浪费、不窝电，就得将它们导引到千里之外、求电若渴的华东和华北。

在向上工程投运前，上海每年的用电量中，已有 100 多亿千瓦时来自三峡水电。加上向上工程，上海一半以上的用电量都来自清洁能源。东方明珠，现已成为世界上使用清洁能源最多的“绿电”城市。

这样庞大的工程，受益方当然不仅仅是一个上海市。早在 2009 年夏天，晋东南 – 南阳 – 荆门特高压交流试验示范工程才刚“半岁”的时候，四川的清洁水电就从这条大通道送入了华北电网，缓解了山东等地的缺电问题。现在，通向浙江的另一条特高压工程（±800 千伏溪洛渡左岸—金华特高压直流输电工程），正在积极建设中。等它建成以后，加上向上工程、锦苏工程，这 3 条特高压直流输电工程的输电总容量将达到 2160 万千瓦。这意味着，将有更多的水电被运出四川，直送华东。

减排：华东

我国华东地区对能源的需求极大，多年来建设了大量的发电厂，但即便如此，仍然供不应求。纵观长江沿岸整个华东地区，两个电厂之间的平均距离是 30 公里，但从南京到镇江这一段，每 10 公里就有一个电厂。按这个密度，当地生态环境已经无法承受这样的排放水平。

对此，中国工程院院士薛禹胜不无担忧。“到目前为止，华东地区二氧化硫的排放量是全国平均排放量的 20 倍。在长三角，我们还能承受更多的电厂吗？”薛院士反问道。

现在，随着向家坝－上海、锦屏－苏南和淮南－上海 3 条特高压线路陆续投运，减排效益已经开始呈现。至今，华东地区已经接收电能 855 亿千瓦时，相当于燃烧了 2800 万吨标准煤，或者说相当于减排了二氧化碳 7200 万吨、二氧化硫 20 万吨。清洁电能的到来，正在为东部地区继续高速发展提供着源源不绝的动力。

产业效益

有了特高压的理论和技术以后，如何将它们变成蔚为壮观的工程？这就需要建立完备的技术标准体系，用来指导设计、测试、生产、运输、装配、调试、运营等方方面面的工作。

依托特高压输电技术研发与工程实践，我国在世界上率先建立了完整的特高压交直流标准体系，包含 200 余项标准，涵盖了系统规划、工程设计、设备制造、施工安装、调试试验和运行维护等各技术领域，为特高压输电技术产业化奠定了坚实基础。我国特高压交流输电标准电压已成为国际标准。

特高压工程给中国带来的，不仅仅是技术的飞跃、体系的完善，也不仅仅是能源调配能力的大幅提高，它还为我国电工装备制造业的产业整体升级，提供了巨大的牵引力。

有了特高压工程，对各种特型装备、异型装备和高指标装备的需求骤然急迫起来。我国电工装备制造企业迎难而上，仅仅用了 4 年的时间，就达到了苏联和日本等国用了 15 ～ 20 年才达到的技术高度，并进而实现了全面超越，不仅研制成功了代表世界最高水平的特高压输电全套设备，而且创造了一大批世界纪录，设备的国产化率也超过了 90%。这意味着，中国的特高压是自己干出来的，而不是从外国买回来的。

依托特高压工程的牵引，目前国内电工设备制造企业对众多的电工设备（如特高压输变电设备，如 1000 千伏变压器、电抗器／可控电抗器、罐式断路器、继电保护和安全自动装置、导线、金具等特高压交流主设备，以及换流变压器、直流滤波器、直流控制保护、金具等特高压直流主设备）均具备了国产化的研制基础和生产能力。通过集成创新和引进消化再创新，重点攻克了 1000 千伏气体绝缘金属封闭组合电器（GIS）、6 英寸晶闸管、特高压直流换流阀、平波电抗器等核心关键技术，在此基础上，逐步实现特高压输变电设备的全面国产化。

目前，我国特高压设备研发设计、制造工艺和试验检测能力均达到国际领先水平。

向家坝－上海特高压直流工程（湖北黄石）

特高压：中国的新名片

特高压，究竟是一个什么水准的科技创新呢?

2013 年 1 月 18 日，“特高压交流输电关键技术、成套设备及工程应用”项目荣获国家科学技术进步奖特等奖。这个奖项，是国家对科技成就的最高褒奖，充分说明了特高压的地位和分量。

在科学界，很多人将它与航天、高铁技术相提并论，称它们为“我国三大现代高科技技术”。

特高压工程的成功建设，不仅拿下了国内最高科技奖项，在国际上，同样得到了各权威组织的高度评价。在电网界，极具影响力的国际权威组织 CIGRE（国际大电网委员会）、IEC（国际电工委员会）和 IEEE（国际电气和电子工程师学会），分别对中国特高压工程做出了自己独特的评价。

CIGRE 的专题报告指出：“特高压关键技术和关键设备取得的重要成果突破性成果，对推动特高压输电技术在世界范围内的研究和应用具有重大意义；是一个伟大的技术成就，是世界电力工业发展史上的重要里程碑。”

在 2013 年国际智能电网论坛上，IEC 主席克劳斯 · 乌赫勒表示：“中国的特高压输电技术在世界上处于领先水平，作为国际标准电压，中国的特高压交流电压标准将向世界推广……中国能源分布不均的问题在其他国家同样存在，这就需要特高压输电技术，这种能够减少长距离输电损耗的技术在世界其他地区也将有广泛的应用前景。”

截至目前，国际大电网委员会（CIGRE）成立了 6 个工作组，负责总结提炼特高压输电技术成果；国际电气和电子工程师学会（IEEE）专门成立了工作组，由我国专家担任主席，负责制定 3 项特高压国际标准；国际电工委员会（IEC）专门成立了高压直流输电技术委员会（TC115）和特高压交流输电系统技术委员会（TC122），都由我国专家主导。

由此，中国在国际电工领域的话语权和影响力大大增强。

“特高压交流输电关键技术、成套设备及工程应用”获得“国家科学技术进步奖特等奖”。2013年1月18日，在国家科学技术奖励大会上，习近平给项目第一完成人、国家电网公司总经理刘振亚颁奖。

近年来的国家科学技术进步奖特等奖获奖项目

2006 年：歼十飞机工程

2007 年：9409 工程

2008 年：青藏铁路工程

2009 年：绕月探测工程

2010 年：大庆油田高含水后期 4000 万吨以上持续稳产高效勘探开发技术

2011 年：青藏高原地质理论创新与找矿重大突破

2012 年：嫦娥二号工程

特高压交流输电关键技术、成套设备及工程应用

特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用

本书从电网发展的历程、现状和趋势入手，指出电网在现代能源供应体系中发挥着不可替代的作用，建设以特高压电网骨干网架的坚强智能电网是解决能源和电力发展深层次矛盾的治本之策，是满足各类大型能源基地和新能源大规模发展的迫切需要。本书首先详细分析了特高压电网发展的历程，论述了交直流输电的技术特点及特高压交直流输电系统的优势；然后在此基础上提出了中国特高压交直流电网构建设想及其论证分析，分专业阐述了中国特高压输电技术的科技创新和工程实践成果；最后总结了特高压工程技术应用经验和技术标准。

特高压已经成为了中国科技的新名片。图为夜幕下的南阳开关站。

特高压支撑未来智能电网

从2009年“特高压元年”开始，无论是交流还是直流，特高压电网都已经开始发挥出了其“远距离水火互济”、“大范围优化配置资源”的作用，获得了明显的社会和经济效益。但是，我国的特高压事业还只是刚刚开始，更令人心潮澎湃的大发展尚在后面。

根据国家电网公司的规划，发展特高压已经被列为了重中之重，位居“一特四大”（特高压、大水电、大煤电、大核电、大可再生能源基地）战略之首。在“十二五”期间，我国的特高压电网将迎来重要的发展战略机遇期。预期将要建设“三纵三横”特高压交流电网和15回特高压直流电工程，由此形成交直流协调发展的格局。根据计划，从2013～2020年，国家电网公司将先后走出特高压发展的三大步。

第一步，计划在2015年建成“两纵两横”。

其中的“两纵”，即东纵（锡盟－南京）、西纵（蒙西－长沙）；“两横”，即北横（靖边－潍坊）、南横（雅安－皖南）。

第二步，计划在2017年建成“三纵三横”。

其中的“三纵”，即东纵（锡盟－南京）、中纵（张北到南昌）、西纵（蒙西－长沙）；“三横”，即北横（靖边－潍坊）、中横（陇彬－连云港）、南横（雅安－上海）。

第三步，计划在2020年建成“五纵五横”特高压“三华”同步电网。

其中的“五纵”，即东1纵（锡盟－南京）、东2纵（潍坊－厦门）、中纵（张北－赣州）、西1纵（蒙西－湘南）、西2纵（靖边－长寿）；“五横”，即北1横（陇彬－连云港）、北2横（靖边－潍坊）、中横（陕南－泰州）、南1横（雅安－皖南）、南2横（乐山－浙南）；“三华”，即华北、华中、华东。此外，再建成27回特高压直流工程。

如果规划中的特高压骨干电网能够顺利核准开建，只需数年，我国“三西”煤电基地、内蒙古和河北风电基地、西南水电基地的电力，就能“打包”批量送往京津冀鲁、华东、华中的负荷中心。如果特高压输电能力超过5000万千瓦，每年就能输送电量3000亿千瓦时，相当于运输煤炭1.5亿吨，这将大大缓解中东部的缺电局面。

到2020年，东中部地区受入电力流将达到3.5亿千瓦，每年输送电量将达到1.6万亿千瓦时，占当地用电量的37%左右，中东部的缺电局面将得到彻底缓解。

仍在不断延伸着的中国特高压工程线路

以特高压铺就的“电力高速路”，为我国智能电网的发展提供了坚实有力的支撑。

特高压已经呈现出的突飞猛进的发展态势，恰好又迎上了智能电网的时代大潮。

从本世纪初开始，基于新能源技术、分布式发电技术、大规模储能技术、超远距离超大规模输电技术、信息网络技术和智能控制技术的快速发展，世界电网进入“智能电网”的全新发展阶段。未来的智能电网，将全面推动能源配置方式的变革。它基于超远距离、超大规模输电技术，能源配置范围更广、能力更强，能够实现这些能源基地的大规模开发，从“就地平衡”向“大范围优化配置、更大范围统筹平衡”转变。

随着智能电网的作用日益凸显，以特高压为代表的超远距离、超大规模输电技术的应用前景，也将越来越广阔。在全球的宏大范围内，进行资源的超远程优化配置，在某种意义上也已经成为可能。2012 年 5 月，国家电网公司首次提出“构建洲际能源输送大通道”的构想。按照这个战略构想，中国新疆、哈萨克斯坦、俄罗斯西伯利亚等地的清洁能源，将可以被远距离输送到欧洲的负荷中心，有效解决欧洲能源供应和电力保障问题，并优化能源结构、促进低碳发展。此外，特高压技术还可应用于亚洲、美洲、欧洲、非洲等洲内和洲际能源资源的优化配置。对此，CIGRE 主席梅林指出：“利用特高压技术进行欧亚洲际联网，是欧洲电网进一步发展并解决相关能源问题的很好的方案，对世界能源格局和能源发展方式将产生重大而深远的影响，值得电力行业同行共同研究和实践。”

结语

特高压既是一种高端的电工技术，同时也是带有重大战略意义的科技飞跃。它不仅是解决能源和电力发展深层次矛盾的治本之策，还能满足各种大型能源基地和新能源大规模发展的迫切需要，更是保障我国未来长期经济发展的动力输送之基。

从这个意义上看，特高压不只是新时代当之无愧的“国之重器”，更是中国科技的光荣和骄傲。

责任编辑／唐云江　赵燕枫