

1000kV交流特高压试验示范线路的设计

Design of 1000kV AC UHV Test and Demonstration Line

李勇伟¹, 袁骏², 赵全江³, 曹玉杰⁴, 陈海波²

1. 中国电力工程顾问集团公司 2. 国家电网公司 3. 中南电力设计院 4. 华北电力设计院工程有限公司

摘要1000kV交流特高压输电是目前电压等级最高、技术最先进、建设难度最大的交流输电技术。在我国1000kV线路设计没有直接可供采用的设计原则和设计标准。为满足工程建设需要,合理确定技术原则和建设标准,需要全面研究和分析与工程建设有关的关键技术和设计方案。

本文结合1000kV晋东南~南阳~荆门特高压交流试验示范工程的建设,介绍我国第一条单回路特高压交流架空输电线路的主要设计原则和特点,如导线选择、地线选择、绝缘子串片数、杆塔空气间隙、导线对地高度及交叉跨越距离、导线排列方式和铁塔荷载等。本文也将特高压输电线路的主要技术及经济指标与其他电压等级线路进行了比较和分析。

通过我国第一条特高压交流输电线路科研、设计、施工和运行的实践,证明交流特高压线路在技术上是可行的,经济上是合理的。

关键词 1000kV 交流 特高压 试验示范 线路 设计

0 引言

1000kV晋东南~南阳~荆门特高压交流试验示范工程,北起山西省长治市晋东南变电站,经河南省南阳市南阳开关站,南至湖北省荆门市荆门变电站,线路全长639.847km,是国际上电压等级最高,唯一正在商业运行的特高压输变电工程。该工程的开工建设和成功投运,填补了我国1000kV电压等级特高压输变电技术的空白。线路沿线地形包括平原、丘陵和山地,海拔在0~1400m之间。线路在河南省和湖北省境内分别跨越黄河和汉江。

国家电网公司是本工程的业主单位,中国电力工程顾问集团公司及其六大直属设计院是工程的设计单位。工程前期的基础研究工作由国网电力科学研究院(原武汉高压研究院)、中国电力科学研究院、中国电力工程顾问集团公司和一些全国著名的高等院校共同完成。

试验示范工程2005年2月正式启动前期工作,2006年8月获得国家核准,2006年12月正式开工,2008年12月工程全面竣工并顺利完成各项系统调试,2009年1

月6日投入正式运行，至今系统运行正常，线路未发生任何故障。

1 设计风速和机械荷载

根据沿线气象台站的统计资料及同地区500kV线路设计和运行经验，通过分析线路可靠性和工程造价的关系，最终确定了如下的气象条件和机械荷载。

风荷载计算风速按百年一遇离地10米高及10分钟平均风速确定，且设计风速最小值不低于27米/秒，该值略高于现有500kV线路的最低设计风速值。

考虑到特高压输电线路工程的重要性，其杆塔结构可靠度应高于现有500kV输电线路，因此计算铁塔正常工况时考虑增加一个1.1倍的杆塔结构重要性系数。

基于上述原则，特高压线路铁塔的结构可靠度目标值可达到 $\beta \geq 3.7$ ，约比现有500kV线路（ $\beta \geq 3.2$ ）高一级。

设计对铁塔荷载条件和荷载组合进行了深入研究，详细分析了不同荷载条件和荷载组合对铁塔重量和工程造价的影响，提出了兼顾安全性和经济性的技术方案，有关结论已纳入《1000kV交流架空输电线路设计暂行技术规定》^[1]。

2 导线选择

输电线路的导线选择需计及各种技术经济指标的要求，如正常及事故条件下的输送功率、电阻损耗、导线允许温升、机械性能要求和工程造价等。对于超高压和特高压线路来说，导线电晕是造成环境影响的敏感因素。电晕放电可能会导致一种或多种电晕效应现象，如无线电干扰和电视干扰、可听噪声和电晕损耗等。相较超高压线路，特高压导线电晕特性更成为导线选择的一个关键因素。

经对现有国内外500-1150kV线路设计及运行经验的分析，1000kV特高压导线电晕性能的限值确定为：

离地2m高距边相导线水平距离20m处，测量频率为0.5MHz的好天气无线电干扰值不大于55dB。边相导线水平距离20m处，湿导体情况下L50可听噪声值不大于55dB(A)。上述限值与我国现有的500kV和750kV线路限值基本相当。

根据以上限值，对多种导线直径和分裂根数以及不同相导线排列方案进行了计算分析。计算结果表明，为将无线电干扰和可听噪声限制到可接受的水平，相导线分裂根数应在8以上，子导线截面应在500mm²以上。通过综合分析工程投资、能量损耗和运行费用等因素，最终导线方案为每相8根直径为30mm的LGJ-500/35钢芯铝绞线。表2-1给出了工程用导线方案下的无线电干扰双80%值和可听噪声湿导线计算值。

表2-1 无线电干扰和可听噪声计算值

项目	分裂间距 (mm)	水平排列 IVI串	三角排列 IVI串

无线电干扰, dB	400	55.40	53.60
可听噪声, dB(A)	400	52.67	51.76

采用相同导线方案的特高压试验线段于2007年2月13日在国网武汉高压研究院投入运行,现场测试结果表明,阴天时无线电干扰值在53.6-55.1dB之间,可听噪声在42.1-44.2dB(A)之间,雨天时无线电干扰值在62.5-67.5dB之间,可听噪声在52-53.1dB(A)之间。这一结果与预估值基本吻合。

2009年1月6日工程正式投运前后,有关单位对线路进行了严格的无线电干扰和可听噪声现场测试,测试结果符合设计预期值和国家环保总局批复的限值。

按环保批文要求,线路通过河南国家级猕猴自然保护区时可听噪声应满足0类地区要求,该段线路采用8×LGJ-630/45导线方案。

3 地线选择

地线应满足机械特性、短路热容量、耐雷击性能以及电力系统通信等方面的技术要求。对于1000kV特高压交流线路而言,因相导线感应电压而产生的地线电晕也应予以控制。另外在地线材质选择时,还需考虑防腐、耐振性能等问题。

通过对各种因素的综合比较,选择具有良好性能的铝包钢绞线作为普通地线。在选择地线截面时,对上述各种要求进行全面分析发现,电晕限制条件是地线直径选择的控制因素。对各种外径的地线表面场强(E_m)和临界电晕场强(E_0)进行了计算,为使电晕更加难以产生,采用了较相导线更严格的控制标准:即 $E_m/E_0 \leq 0.75$ 。并对影响地线表面场强的各种因素以及所花费的成本进行了分析,最终采用直径为17mm(截面约为 170mm^2)的JLB20A-170 20%IACS铝包钢绞线,考虑到雷击断股问题,要求单丝直径不小于3mm。为满足系统通信要求,另一根采用具有类似特性的OPGW。

塔高限制区受铁塔全高的控制,设计方案大幅压缩了导线间的垂直距离,为满足地线起晕要求,地线采用JLB30-400铝包钢绞线和相应直径的OPGW。

通过对地线的感应电压、电流及电能损耗等的计算分析,确定采用普通地线分段绝缘单点接地、OPGW逐基接地的运行方式。当耐张段长度大于6km时普通地线中间接地,小于6km时一端接地。对于地线的绝缘间隙,进行了最大感应电压、潜供电流计算分析,再结合恢复电压条件,确定地线绝缘间隙取20~25mm。

4 绝缘子型式及片数选择

绝缘子型式及片数应使线路能在工作电压、操作过电压和雷电过电压等各种条件下安全可靠地运行。

本线路工程设计,对沿线的污秽情况进行了详细调查,进行了绝缘子串污耐压试验研究,按爬电比距法和污耐压法确定绝缘子片数,并进行操作冲击、雷电

冲击校核。

4.1 污秽调查及污区划分

线路所经过的山西地区煤、电厂矿较多，大气污染十分严重；河南、湖北地区主要是自然污秽，伴有炼钢厂、水泥厂、采石场等重点污染源。为确定沿线污秽分布的详细情况，设计、科研、试验单位和有关电力公司对沿线的污秽情况进行了详细调查，并开展了主要污秽物的化学成分分析、所在地区污湿特征分析和沿线附近运行线路的现场污秽度测量。根据调研结果，对全线统计分析，确定污区划分结果如表4-1所示：

表4-1 全线污区划分

污 区	盐密 (mg/cm^2)	线路长度 (百分比)
II级	0.06-0.10	223km (34.8%)
III级	0.10-0.25	323km (50.5%)
IV级	>0.25	94km (14.7%)

4.2 绝缘子型式

尽管我国已有数万千米330~750kV超高压线路长期运行，大量的各类绝缘子在不同地区积累了丰富的运行经验，但特高压线路输送容量大，可靠性要求高，对绝缘子也提出了更高的要求，因此，仍需对绝缘子的使用进行详细研究。

在航片选线的基础上截取断面并进行优化排位，对杆塔的使用条件进行统计分析可知，悬垂串绝缘子的机械强度一般在300~500kN之间，耐张串需要3×400kN或2×550kN绝缘子。为简化绝缘子的型号，本工程采用300kN、400kN和550kN三种强度的绝缘子。

对普通型、双伞型、三伞型及玻璃盘式绝缘子，科研单位进行了不同盐密下的污闪性能比较^[2]。三伞型瓷绝缘子（爬距635mm）的闪络电压高，且海拔升高时污闪电压不显著降低。双伞型绝缘子（爬距485mm）的污闪电压较高，沿单位爬距的50%闪络电压最高，即爬距的利用率最好，海拔升高时污闪电压也不显著降低，且这种绝缘子在我国已大量使用，积累了丰富的运行经验，在II级污秽区大量采用了此种绝缘子。本工程未选用普通盘型绝缘子。

在III级及以上重污秽地区，采用了具有良好耐污闪性能的复合绝缘子。有关生产厂家研制了两段组装和整只两种复合绝缘子，并进行了试验，最终选用污闪电压高、爬/长比较大的整只复合绝缘子。科研单位进行了复合绝缘子不同伞型（一大一小、一大二小等伞型）的污闪性能比较，对绝缘子的伞型提出了改进、优化建议。

本工程耐张串采用了双联550kN盘型瓷和玻璃绝缘子。

4.3 绝缘子片数

原国网武汉高压研究院对主要型式的绝缘子（CA590-EZ、CA887-EZ、FC300/195等）进行了污耐压试验。为了研究绝缘子串长度与污耐压的关系，将SDD和NSDD分别固定为0.06和0.5mg/cm²，对不同的片数按相同的程序进行试验。CA590-EZ绝缘子串的试验结果如图4-1所示，长串绝缘子的污闪特性略呈非线性。而中国电力科学研究院的研究结果表明：当ESDD和NSDD分别是0.05和1.0mg/cm²时，闪络电压与与绝缘子串长基本呈线性关系，如图4-2所示。

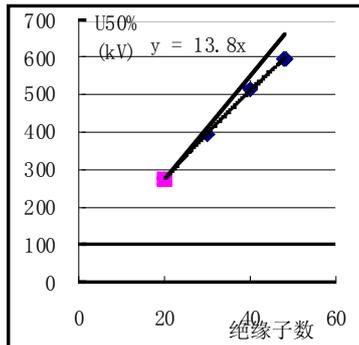


图4-1. 绝缘子串长度与闪络电压的关系（武高院）

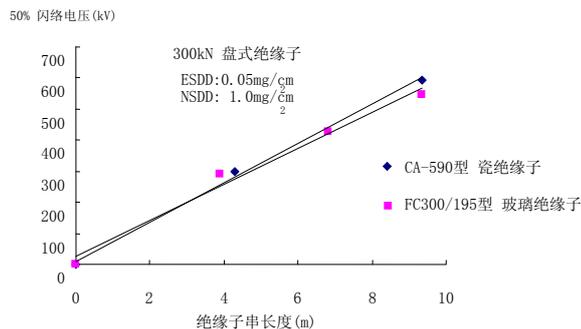


图4-2 绝缘子串长度与闪络电压的关系（电科院）

国网武汉高压研究院对不同绝缘子、不同串型进行的污耐压试验表明：在SDD/NSDD为0.1/0.5mg/cm²条件下，采用300kN单I串瓷绝缘子时，双伞型的污耐压比普通型高约5%；双联I串绝缘子比单联I串的污耐压值低，但当联间距在600mm及以上时，邻近效应基本消除；V型串的污耐压比I串要高，不同的SDD/NSDD值、不同的绝缘子型式提高的程度差别较大，从5%~20%不等。

基于沿线的污秽调查、污区划分和科研单位的污耐压试验结果，本工程采用了两种方法（即污耐压法和爬电比距法）确定绝缘子片数。考虑到双伞绝缘子具有开放式爬距，风可以清理底部的污秽，常常使ESDD和NSDD仅为普通绝缘子的一半，在II级污区每联采用54片300kN双伞型瓷绝缘子。在III级污区可采用54片三伞型瓷绝缘子，但最终在III、IV级污区均采用了合成绝缘子。300kN悬垂串的绝缘子片数如表4-2所示。

表4-2 1000m及以下地区绝缘子型式及片数

污区	绝缘子型式	爬电距离 (mm)	结构长度 (mm)	片数
II级	双伞	485	195	54
III级	复合	28864	10.53	1
IV级	复合	30300	10.53	1

工程中，双联I串、V型串采用了与单I串相同的片数，双联串的联间距取600mm。

经校核，上述绝缘子片数（长度）满足统计操作过电压和耐雷水平（跳闸率）的要求。

5 绝缘子串及金具

相间距离受电磁环境指标控制，因此，直线塔悬垂串采用IVI串布置方式，根据不同荷载的要求，包括单、双I串和V串。悬垂串绝缘子机械强度分为300kN和400kN，210kN绝缘子用于悬垂跳线串。

8×LGJ-500/35导线耐张塔采用双联550kN水平布置的瓷或玻璃绝缘子串，8×LGJ-630/45导线耐张塔采用三联550kN水平布置的瓷绝缘子串。绝缘子串三联水平布置的目的是增强运行中雨和风的自然清洗效果，提高耐污能力。

为了改善沿绝缘子串的电位分布、限制金具起晕，西安交通大学、中国电力科学研究院等单位进行了细致的三维数字分析，分析计及了杆塔结构的影响。工程用典型绝缘子金具串型如图5-1所示。

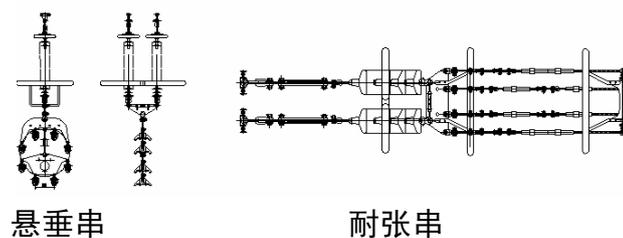
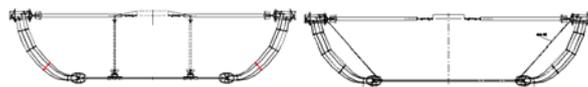


图 5-1 典型绝缘子串金具图

双联及多联绝缘子串联间距由绝缘子串电气和机械特性确定，需在机械性能满足安全运行的前提下，根据双联结构的污闪电压基本不低于单联结构的污闪电压的要求确定。推荐悬垂绝缘子串及耐张绝缘子串联间距为600mm。

由于悬垂绝缘子串未加装屏蔽环，所有导线悬垂线夹需满足防晕要求。

为提高空气间隙可靠性和减轻耐张塔重量，设计采用刚性跳线。根据不同不同安装位置，采用安装跳线串和使用斜爬梯两种铝管式刚性跳线，典型的铝管式刚性跳线如图5-2所示。



安装跳线串 使用斜爬梯

5-2 典型刚性跳线

6 杆塔空气间隙

1000kV交流特高压线路工作电压和操作过电压的杆塔空气间隙，通过分析实际最高工作电压、操作过电压并利用空气间隙临界放电电压特性确定。

设计单位、中国电力科学研究院、原国网武汉高压研究院都对此进行了研究^{[2]. [3]. [4]}，所采用的绝缘配合方法有《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T620-1997)推荐的方法、日本和前苏联的绝缘设计方法。

按日本方法，工频过电压取一相接地引起健全相的电位升高，最大值不超过相电压的1.1倍。工频间隙应满足下式要求。

$$U_{50\%} = \frac{U_m k_0}{\sqrt{3}(1-3\sigma)} \quad (1)$$

式中： U_m 为最高运行电压(kV)， k_0 为高海拔电压降低修正系数， σ 为标准偏差。对于操作冲击间隙，式(1)中的 U_m 应为统计操作过电压 U_s ， $U_{50\%}$ 、 k_0 和 σ 为操作冲击时的50%放电电压、修正系数和标准偏差。

按前苏联的方法，单个间隙的50%放电电压配合值 $U_{50.1.c}$ 按式(2)计算。式中 $(1-Z\sigma_1^*)$ 是考虑多间隙并联对放电电压的影响， $(1-3\sigma_m^*)$ 是考虑放电的分散性的影响。对于目标电压 U ，工频过电压时 $U=U_n \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}$ ，操作过电压时 $U=U_s$ 。 σ_m^* 和 σ_1^* 分别为并联多间隙和单间隙的放电电压变异系数。

$$U_{50.1.c} = \frac{U}{(1-Z\sigma_1^*)(1-3\sigma_m^*)} \quad (2)$$

由于各研究单位采用的方法、放电曲线、间隙修正方法不同，所得结果也不同。在真型塔空气间隙放电特性验证试验^[5]完成后，经多次研究分析，最终采用的塔头空气间隙如表6-1所示。

表6-1 塔头空气间隙 (m)

海拔 (m)		500	1000	1500
工频电压 (边相I串)		2.7	2.9	3.1
操作过电压	边相I串	5.6	6.0	6.4
	中相V型串	6.7(7.9)	7.2(8.0)	7.7(8.1)
带电作业	边相I串	5.6	6.0	6.4

	中相V型串	6.2	6.7	7.2
注：1. 操作过电压倍数1.70p. u. 2. 括号内数值为对上横担的最小间隙值				

为使工程具有合理的造价，带电作业仅为校验工况，其间隙不作为杆塔尺寸的控制条件。同时，带电作业时，不考虑合闸空载线路操作，并退出重合闸。带电作业校验时，对操作停留部位，表中间隙尚需考虑人体活动范围0.5m。

对于单回交流特高压线路来说，雷电过电压不是塔头设计的控制条件，因此，不对雷电过电压间隙作具体规定，按实际塔型进行防雷性能计算研究^{[6]、[7]}，提出防雷保护的综合性措施。

7 导线对地距离及交叉跨越距离

1000kV输电线路导线的对地及交叉跨越最小距离，和超高压线路一样，也是根据电场强度限值、操作过电压下的电气绝缘强度以及电力部门与其他行业的技术协议确定的。有所不同的是，由于电压的升高，原来一些由电气绝缘强度确定的间隙变为电场强度控制，或需要进行电场强度校验予以确认。

8.1 场强限值及操作过电压间隙

在1000kV交流特高压试验示范线路设计中，对国内外电场强度影响研究情况及场强限值情况进行了分析，考虑到1000kV交流特高压线路的电场效应与超高压线路是一致的，超高压线路所采用的场强限值同样适用于1000kV交流线路，即：非居民区按10kV/m、居民区按7kV/m、邻近民房按4kV/m控制。对铁路轨顶和公路路面等，取居民区的场强限值（7kV/m）。

由电气绝缘强度确定最小距离时（如对山坡、峭壁、电力线和桅杆顶等），主要是考虑操作过电压间隙另加一定裕度。结合《1000kV特高压交流输电线路过电压与绝缘配合》研究成果，操作过电压间隙取7m。

值得说明的是，在确定某些交叉跨越最小距离时（如对通信线、电力线杆顶、林木及果树等），进行了电场强度估算，同时，也对不同的被跨物、场强效应所涉及对象等因素进行分别考虑，从而确定其最小限值，必要时还需通过分析其他电压等级线路的相关数据确定最小距离。

8.2 对地及交叉跨越最小距离

按照上述场强限值，对示范试验线路的典型塔型（中相V串猫头塔和中相V串酒杯塔）进行计算，确定导线对地最小距离如下表7-1所示，为便于比较，表中将500kV^[8]、750kV^[9]线路采用值一并列出。

表7-1 对地最小距离 (m)

电压 (kV)	500	750	1000
线路经过地区			
非居民区	10.5(11)	15.5	22

居民区	14	19.5	27
步行可以到达的山坡	8.5	11	13
步行不能到达的山坡、峭壁	6.5	8.5	10

被交叉跨越物包括铁路、公路、电力线、通信线等。确定的主要交叉跨越最小距离值如表7-2所示。

表7-2 交叉跨越最小距离 (m)

被跨越物		电压 (kV)		
		500	750	1000
铁路	轨顶	14	19.5	27
	电气化铁路接触线	6	10	16
公路路面		14	19.5	27
电力线	档距中央	6	7	10
	杆塔顶	8.5	12	16
通信线		8.5	12	18
无人居住的房屋		9	11.5	15.5
林木		7.0	8.5	14
果树		7.0	8.5	16

8 铁塔选型

工程采用自立式铁塔。虽然拉线塔可以大大减轻塔重,但拉线占地面积较大,而且影响机械化耕种,目前已很少在我国输电线路上采用,尤其是人口稠密地区。

杆塔系列的确定主要基于工程的经济性。沿线地形分析表明,本工程平地占33.43%,泥沼占7.81%,丘陵占25.8%,一般山地占19.13%,高山大岭占13.83%。另外结合沿线气象条件的分析归纳,最终采用三大系列铁塔方案,包括平地ZMP、丘陵ZMQ系列猫头型和山区ZBS系列酒杯型直线塔,为解决塔高限制区和采空区的问题,特殊规划了门型塔和分体耐张塔系列。各塔型的设计水平档距和垂直档距利用输电线路优化排位软件以及航测数据统计分析确定。为了满足塔位的环境保护要求,丘陵和山区铁塔采用了全方位长短腿设计方案。

图9-1示意了几种工程主要塔型。ZMP2-60和ZMQ2-60均是导线三角形排列、地线保护角小于5度的直线塔,其水平档距和垂直档距分别为530m和650m,呼称高51至69m,ZMP2塔型主要用于平地,ZMQ2塔型主要用于丘陵。ZBS1-69是导线水平排列、地线保护角控制在-5度的直线塔,主要用于山区地段,其水平档距和垂直档距分别为460m和650m,呼称高45至69m。ZMX1-38是导线水平排列、正保护角的门型直线塔,铁塔全高42.5m,主要用于塔高限制区。JTF1分体耐张塔,主要用于煤矿采空区线路,便于运行维护检修,铁塔设计条件根据具体情况确定。

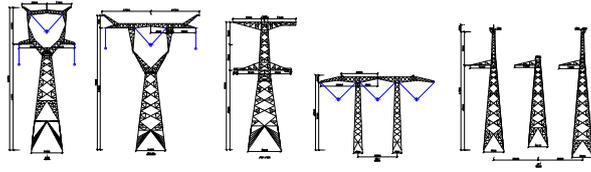


图 9-1 典型塔型

9 基础选型

综合考虑工程地形及地质特点、经济指标和环境保护等因素，工程采用了如下的主要基础型式。

粘性土地基基础在山地及丘陵区域优先选择原状土掏挖基础，在平地及施工场地开阔的塔位选用柔性斜柱基础，并因地制宜采用刚性基础、直柱平板基础和人工挖孔桩等特殊基础。

碎石土地基基础优先采用柔性斜柱基础，因地制宜采用刚性基础和人工挖孔桩基础。

岩石地基基础结合基础作用力和塔位地质条件因地制宜采用嵌固式岩石基础，少量采用了锚杆基础。

软土、红粘地基基础，基础作用力较大的塔位采用钻孔灌注桩基础；基础作用力较小的塔位，根据塔位地质特点，及大板基础与钻孔灌注桩基础的技术经济比较选择合适的基础型式。

对采动影响区内的塔位开展三维物探勘查和塔基变形专项研究，主要采用大板基础、地基灌浆等措施解决塔基稳定问题。

采用基础立柱加高、生态植被护坡和改善排水等措施，加强环境保护和水土保持。

10 走廊宽度

线路设计时定义走廊宽度的目的用于确定房屋拆迁范围。确定房屋拆迁范围通常基于两个原则，就1000kV线路而言，第一是边相导线外7m（对应500kV 线路为5m，750kV线路为6m）以内的有人住房屋应该拆除，第二是极边相导线外场强超过4kV/m处的有人住房屋应该拆除。对应上述两条原则，可将线路走廊定义为核心区和缓冲区两类，两类走廊宽度如表10-1和图10-1所示。

表 10-1 线路走廊宽度

	两边相距离, m	核心区, m	缓冲区, m
三角型	31	45	72
水平型	51	65	92

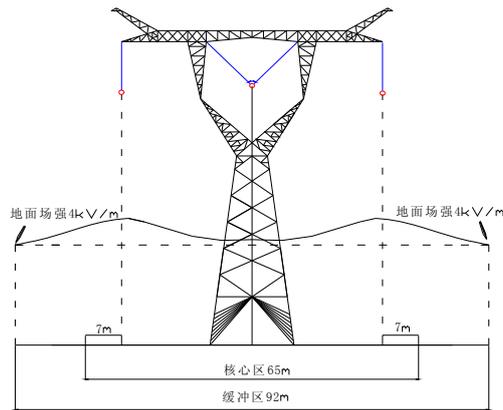


图 10-1 线路走廊示意图

11 大跨越设计

本工程有两个大跨越段，分别为西化工黄河和沿山头汉江大跨越，各跨越点的主要技术特征如表11-1所示。

大跨越段的导线选型按导线发热条件下的输送功率以及机械特性确定，并通过无线电干扰、可听噪声和合成场强等技术条件进行校核。最终确定的导线为6×ACSR/EST-500/230特强钢芯高强铝合金绞线。一根地线采用JLB20B-240铝包钢绞线，另一根采用相似特性的OPGW-256光纤复合地线。

大跨越段采用一般段线路相同的绝缘配合原则，只是跨越塔悬垂串绝缘子片数应根据高杆塔雷击跳闸率指标做进一步校核。单直线跨越塔绝缘子采用I形布置的瓷绝缘子以提高可靠性和提高

绝缘子的强度利用率。表11-1也列出了各大跨越的绝缘子串形式。

表 11-1 各大跨越段主要技术特征

跨越点	西化工黄河	沿山头汉江
耐张段长度 (m)	3651	2956
档距 (m)	450-1220-995-986	706-1650-600
跨越方式	耐-直-直-直-耐	耐-直-直-耐
跨越塔全高 (m)	122.8	181.8
运行电压间隙 (m)	2.7	2.7
操作过电压间隙 (m)	5.6 (6.2)	5.6 (6.2)
大气过电压间隙 (m)	7.5	8.2
悬垂绝缘子串	4×420kN	4×550kN
耐张绝缘子串	6×550kN	6×550kN

根据经济比较结果，直线塔采用酒杯型钢管塔，耐张塔采用干字型角钢塔。为保证大跨越段线路比一般线路拥有更高的可靠性，设计风速约比一般线路高10%，导线覆冰厚度较相邻的陆上线路增加5mm。

12 煤矿采动区的综合技术措施

特高压交流线路受国家级猕猴保护区、城镇和煤矿开采等客观条件限制，线路必须穿越晋城和洛阳偃师附近的煤矿采动影响区。

为解决采动影响区地表变形造成的线路安全隐患，在进行多项专题研究的基础上，在输电线路煤矿采空区开创性地采用了三维物探勘察、塔基变形预测、杆塔倾斜监测等手段，研究提出了基础加固、大板基础、分体耐张塔等综合措施，有效地解决了塔基的不均匀沉降，加强了塔基的稳定性，确保线路能长期安全稳定运行。

13 与地理金属管道平行接近

特高压交流线路受国家级猕猴保护区、公路等客观条件限制，与西气东输管线发生三次交叉跨越或平行接近，平行接近总长度约20km，两者最近距离为270m。

交流输电线路对地理油气管道的电磁影响主要包括交流输电线路正常运行和故障状态下的人身安全电压、管道绝缘层安全电压、管道阴极保护设备正常工作电压、管道交流腐蚀影响等。经计算分析研究，并多次组织专家研讨，本工程与西气东输管道电磁影响确定如下控制指标：

管道交流腐蚀以电流密度作为控制物理量，管道金属层任一点的对地泄漏电流密度限值为 $3\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

交流输电线路正常运行时的人体安全电压限值为33V。

为降低特高压交流线路运行后在埋地输气管道上引起的电磁影响，实施了相应的排流保护措施。经测试表明，保护措施达到了预期效果，基本满足保护方案实施的预期目标。

14 与其它电压等级线路的比较

我国西北地区输电线路的电压等级由110、330 和750kV组成，而其他地区则为110、220 和500kV。1000kV试验示范工程和典型330-750kV单回路导线水平排列线路的主要特性比较如下所示：

当330、500、750 和 1000kV线路的导线分别为 $2\times 400\text{mm}^2$ 、 $4\times 400\text{mm}^2$ 、 $6\times 400\text{mm}^2$ 和 $8\times 500\text{mm}^2$ 时，线路波阻抗对应为302，259，241和 245 欧姆，电流密度将由0.829，0.733，0.787变为0.620。1000kV线路的自然功率是500kV线路的约5倍，并且特高压线路因电晕效应对导线选择起控制作用而使电流密度进一步减小。

对应2.2、2.0、1.8 和 1.7p.u 的过电压倍数，330 ~1000kV输电线路的操作过电压空气间隙分别为1.95、2.7、4.65 和7.2m。1000kV输电线路的操作间隙

呈现出一定的饱和现象。

330~1000kV线路的主要指标对比如下：每千米塔重分别为22, 38, 73和140吨、每千米基础混凝土量分别为40, 60, 110, 230m³，每千米造价0.85, 1.50, 2.50 和 4.20 百万。由此可以看出，1000kV线路每千米造价约为500kV的2.8倍。当1000kV线路和500kV线路自然功率分别按5000MW和1000MW计时，1000kV线路输送单位自然功率的投资仅为500kV的56%。

330~1000kV线路的走廊宽度，对应核心区分别为20、35、47和65m，缓冲区分别为20、50、70和96m。分别对应核心区和缓冲区，1000kV特高压线路输送单位自然功率的走廊宽度仅为500kV线路的40%和38%。

15 结论

本文1000kV晋东南~南阳~荆门特高压交流试验示范工程的设计，介绍了单回路特高压架空输电线路的研究成果和工程设计原则。文中主要结论得到了实际工程的验证。工程2009年1月6日正式投产至今已运行半年，未发生任何故障。结果表明1000kV特高压线路在技术上是可行的，经济上是合理的。

参考文献

[1] Q/GDW 178-2008《1000kV交流架空输电线路设计暂行技术规定》，国家电网公司，2008

[2]《交流特高压试验示范工程晋东南~南阳~荆门1000kV输电线路工程初步设计》，中国电力工程顾问集团公司，北京，2006

[3]《1000kV级交流输变电工程绝缘子选型研究》，中国电力科学研究院，北京，2006

[4]《1100kV电力系统绝缘配合》，国网武汉高压研究院，武汉，2006

[5]《1000kV交流输电线路猫头塔空气间隙放电特性验证试验研究报告》国网武汉高压研究院，武汉，2007

[6]《1000 kV交流特高压输电线路的防雷保护》，中国电力科学研究院，北京，2007

[7]《特高压线路雷电性能研究》，国网武汉高压研究院，武汉，2007

[8] DL/T 5092-1999《110-500kV架空输电线路设计技术规程》，中国电力出版社，1999

[9] Q/GDW 102-2003《750kV架空输电线路设计暂行技术规定》，中国电力出版社，2003

作者简介：

李勇伟 1960年出生，1982年毕业于浙江大学和取得学士学位。教授级高工，副总工程师，长期从事架空输电线路的设计和研究工作。

袁骏 1971年出生，1997年毕业于华中理工大学，获硕士学位。高级工程师，副处长，从事架空输电线路的设计和输变电工程建设管理工作。

赵全江 1957年出生，1982年毕业于华北电力学院，学士学位。教授级高工，主任工程师，长期从事架空输电线路的设计和研究工作。

曹玉杰 1971年出生，1994年毕业于重庆大学和取得学士学位。高级工程师，。现任职于北京国电华北电力工程有限公司，从事架空输电线路电气设计工作

陈海波 陈海波 1976年出生，2000年毕业于东南大学，工学硕士，高级工程师，长期从事架空输电线路结构设计与研究工作

1000kV交流特高压试验示范线路的设计

作者: 李勇伟, 袁骏, 赵全江, 曹玉杰, 陈海波

作者单位: 李勇伟(中国电力工程顾问集团公司), 袁骏, 陈海波(国家电网公司), 赵全江(中南电力设计院), 曹玉杰(华北电力设计院工程有限公司)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_7277459.aspx