

大跨越杆塔与基础设计

1 概述

高压送电线路的建设不可避免地要跨过大江大河或海峡港湾。由于跨越宽阔水面的送电线路档距大，许多河流或海峡还有通航要求。一般而言，跨距在 1000m 以上，直线跨越塔塔高 100m 以上，有通航要求，需特殊设计的送电线路称为大跨越送电线路。

在新的《特高压架空输电线路大跨越设计技术导则》中对特高压大跨越线路定义为由四项因素组成：①特殊的跨越点、②档距 1000 米以上或塔全高 150 米以上、③导线选型或塔的设计需予以特殊考虑、④事故时严重影响航运、交通或修复特别困难。

1.1 大跨越线路的特点

设计预期寿命 50 年

设计气象条件比一般线路严酷

对安全的要求比一般线路高

自成一个耐张段

高投资

工程量大

施工周期长

1.2 大跨越线路布置方式

大跨越均自成一个耐张段，跨越方式根据跨越位置的地形地貌、水文地质、施工运输条件等进行综合技术经济比较后确定。

传统的大跨越布置方式为：耐-直-直-耐，即主跨档跨越河流，两端

为耐张塔（锚塔），自成耐张段。还有：

少直方式——即跨越段只有一个直线塔（称为：耐—直—耐方式）
或没有直线塔（称为：耐—耐方式）
多直方式——即跨越段多于两个直线塔（如耐—直—直—直—耐方式）

1.3 大跨越塔型

1.3.1 直线跨越塔

单回路塔——杯型塔
双回路塔——垂直排列——三层横担
——四层横担
——三角排列——二层横担
——三层横担

1.3.2 耐张塔

单回路塔——单柱塔、干字塔、共字塔
双回路塔——伞形塔、鼓形塔

1.4 大跨越塔材料

1.4.1 钢筋混凝土塔（塔身部为钢筋混凝土结构）

1.4.2 型钢塔——自立塔、拉线塔

直角角钢组合
60 度角钢组合
焊接十字型钢组合

1.4.3 钢管塔——中、高强度钢管

无缝或焊接薄壁钢管

1.5 大跨越的附属设施

大跨越线路由于跨越塔高，线路重要，一般要求有以下附属设施：

1.5.1 障碍物标志：

色彩标志（如：整塔分段喷涂红白相间的警航标志漆）

灯光标志（一般在塔顶最高处和与弧垂最低点相平部位塔身安装警航障碍灯）

航空标志球（一般沿跨越档地线安装）

1.5.2 登塔设施

登塔脚钉（铁塔主材及通往结点的斜材或横材必须设置）

电梯（目前采用的形式为：井筒式电梯、齿条式电梯、自动攀爬机）

爬梯（包括：旋转爬梯或塔身斜爬梯、横担直爬梯等）

走道及平台（包括：导地线横担的通长走道及护栏，塔身、塔头休息平台及围栏）

1.5.3 维护站

固定维护站一般设在塔基附近以便随时对大跨越线路进行监测、检查、维修。

2 大跨越塔概览

以下是已建成并投入运行的各型材料的大跨越塔。



220kV 公安长江跨越（拉线角钢塔）



500kV 葛南线宜昌长江跨越（自立式角钢塔）



500kV 金口长江跨越 (钢筋混凝土塔)



500kV 杭兰线钱塘江跨越 (蒲壁钢管离心混凝土塔)



500kV 徐上线五峰山长江跨越（角钢四组合塔）



500kV 杨斗线江阴长江跨越（焊接十字型钢四组合主材）



1000kV 特高压黄河跨越（钢管塔）



1000kV 特高压淮河跨越（效果图）

对大跨越线路工程来说各型塔都有它独特的优缺点。

2.1 钢管塔：

优点：

- 1) 结构风阻力系数小，断面特性好；
- 2) 铁塔重量较轻，基础工程量较小；
- 3) 部件数量少，装配工作量小。

缺点：

- 1) 有隐蔽面，内壁镀锌质量不易检查和保证；
- 2) 管壁厚度方向受力，耐振性能较差；
- 3) 管径达 3 米左右，需要添置大型加工设备；
- 4) 焊接工作量大；
- 5) 细长构件容易发生微风振动。

2.2 角钢塔

优点：

- 1) 没有隐蔽面，有专业加工流水线，质量容易保证；
- 2) 单个部件重量轻，便于运输和装配；
- 3) 主要采用螺栓连接，抗振性能较好。

缺点：

- 1) 结构体型系数大，铁塔耗材量稍大；
- 2) 构件和螺栓数量多，装配工作量大；
- 3) 焊接十字构件有一定的焊接工作量。

2.3 钢筋混凝土塔方案

优点：

- 1) 主要为混凝土结构，机械加工的工作量少；

- 2) 使用钢筋、水泥、石子等建材，备料比较容易；
- 3) 设置电梯等设施比较方便，不增加结构风荷载。

缺点：

- 1) 混凝土结构筒体和基础工程量浩大；
- 2) 抗震性能较差；
- 3) 塔位地质条件较差，容易发生不均匀沉降；
- 4) 施工周期较长；

3 大跨越塔设计

2006 年我院设计了 1000kV 晋东南—南阳试验示范工程的黄河大跨越，采用的是耐-直-直-直耐的跨越方式，跨越耐张段长度为 3.651km；设计条件为：最大设计风速 31m/s, 覆冰厚度 15mm。大跨越直线塔采用单回路酒杯型钢管塔，呼称高为 112m，塔全高 122.8m；导线横担宽度 71.0m。锚塔选用塔身矩形截面的干字型组合角钢塔，呼称高 38m，塔头高 30m，铁塔全高 68m；下导线横担挂点宽度 38.0m。

2008 年又设计了皖电东送淮南至上海特高压交流输电示范工程的淮河大跨越，采用的是耐-直-直耐的跨越方式，跨越耐张段长度为 2.43km；设计条件为：最大设计风速 30m/s, 覆冰厚度导线 15mm、地线 20mm。大跨越直线塔采用双回路伞型钢管塔，呼称高为 131m，塔全高 197.5m；下导线横担宽度 42.2m。锚塔选用塔身矩形截面的干字型单回路钢管塔，呼称高 40m，塔头高 30m，铁塔全高 70m；下导线横担挂点宽度 38.0m。

黄河大跨越已于 2008 年投入运行，淮河大跨越正在建设中。我们以淮河大跨越的工程实例介绍杆塔选型及基础设计过程。

3.1 淮河跨越设计方案

- 3.1.1 电压等级：按 1000kV 设计，降压至 500kV 运行；
 - 3.1.2 回路数：同塔双回路；
 - 3.1.3 跨河点：淮南市区东北方向，尹沟闸北约 600m 处；
 - 3.1.4 跨越方式：耐—直—直—耐；
 - 3.1.5 直线跨越塔塔位：依据防洪评估的要求，直线跨越塔位于现状淮河左岸、右岸行洪堤背水侧行洪区内立塔；规划淮河左岸及右岸一般堤迎水侧滩地立塔。
 - 3.6.6 档距分布：530m-1300m-600m。
 - 3.7.7 跨越段长度：2.43km
 - 3.8.8 气象条件：基准设计风速 30m/s(历年大风季节平均最低水位以上 10m 高处)、导线覆冰 15mm、地线覆冰 20mm。
 - 3.9.9 导线类型和型号：6×AACSR/EST-640/290 特高强钢芯铝合金绞线，按照逆相序布置。
 - 3.1.10 地线型号：两根 24 芯型号为 OPGW - 3S 1/24B1 (353-415.3)复合架空光缆，接地运行。
- ### 3.2 淮河跨越点的有关要求
- 1) 跨越塔塔位必须满足防洪评估要求，即：距现有堤防被水侧堤角 350m(塔位中心)；
 - 2) 跨越段锚塔塔位距规划堤防堤角被水侧大于 100m；
 - 3) 淮河为Ⅲ级通航河道，最大驳船为 1000 吨级，最大通航桅杆高度 16m；
 - 4) 最高通航水位 23.9m；
 - 5) 百年洪水位：24.42m；
 - 6) 绝缘子串长按 17m 计算；
 - 7) 导线与船桅杆顶端电气间隙 12m；

- 8) 通航浪高 : 2m ;
- 9) 通航桅杆高度 : 16m。

3.3 跨越塔塔头布置

淮河大跨越为双回路交流输电线路，导线按垂直排列，I串塔头型式选择布置。

3.3.1 按大跨越设计技术规定计算

根据大跨越设计技术规定(8.0.3-1)公式提出，水平线距可按下式计算：

$$D = 0.4L_K + U/110 + K\sqrt{f}$$

式中 K 为系数，取 0.8 ~ 1.0(取 1)。

按推荐方案，电压 $U=1000\text{kV}$ ，跨越档距 1300m ，最高线温时弧垂 f 为 79.6m ，绝缘子串长 $L_K=17\text{m}$ ，当 $K=1$ 时， $D=24.81\text{m}$ 。因此，水平线间距离最小取 25m 。

3.3.2 日本经验公式

日本资料(“电气计算”36卷节6号)在统计世界上电压 220kV 以上的 14 个大跨越的基础上，提出水平线距上限计算公式 $D=0.005S+10\text{m}$ ，式中 S 为跨距。由此式按推荐方案跨距 1300m 计算，水平线距为 16.5m 。

3.3.3 运行经验

根据以往 500kV 大跨越的统计，(跨距在 1000m 以上)水平线间距离约是档距的 $0.9\% \sim 1.0\%$ ，考虑 1000kV 电压比 500kV 电压高的因素，应在 $0.9\% \sim 1.0\%$ 的基础增加 $5 \sim 8\text{m}$ ，据此，水平线距 D 值为 $16.7 \sim 21\text{m}$ 。

3.3.4 根据电气间隙圆计算

根据铁塔间隙圆，布置直线塔塔头尺寸，三相采用 I 串时，相间

垂直距离为 32.5m , 上横担的两相导线受铁塔的间隙控制。

3.3.5 导地线水平位移

按照《架空送电线路大跨越设计技术规定》(试行)中 8.0.4 条的规定 500kV 大跨越线路 , 若覆冰厚度按照 15mm 设计 , 则导地线之间的位移不能小于 3m , 本跨越的导线采用垂直排列方式 , 地线和上层导线之间的垂直距离为 32m 以上 , 其位移受保护角的控制为 4.5m , 完全可以满足以上的要求 , 故推荐了导地线之间的水平位移按照不小于 1.5m 设计 , 地线保护角按照不大于 0° 设计 (保护角计算按照最下相导线的最外侧子导线计算) 。

3.3.6 结 论

综合以上各限制条件 , 考虑跨越塔上层横担两相导线水平线间距离受电气间隙控制其距离为 36.2m, 两层横担之间的距离取 29m 。

3.4 塔高的确定

3.4.1 直线跨越塔高度

- 1) 淮河III 级通航。
- 2) 最高通航水位 23.9m。
- 3) 百年洪水位 : 24.42m。
- 4) 塔基高程 : 17.95m 和 20.00m , 基础顶面高程取 25m。
- 5) 绝缘子串长按 17m 计算。
- 6) 导线与船桅顶端电气间隙 12m。
- 7) 通航浪高 : 2m。
- 8) 通航桅杆高度 : 16m
- 9) 施工、测量误差 : 4m。
- 10) 导线最高线温(90°C)时弧垂 79.6m。

由此 , 得到跨越塔呼高为 130.6m , 取 131m 。

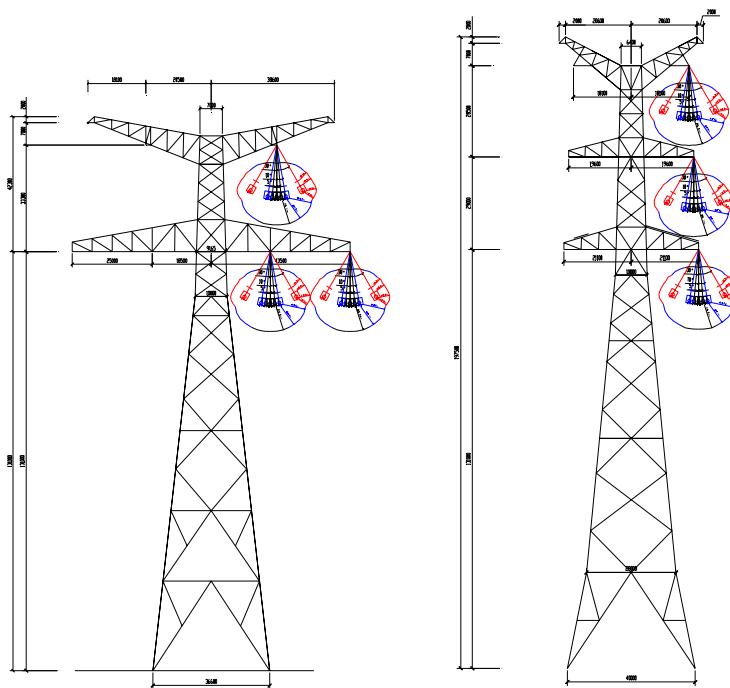
3.4.2 耐张锚塔高度

耐张锚塔采用千字型，锚塔所在位置为非居民区，对地距离为21m，锚塔的跳线串长度约为13m，这样计算锚塔的最低呼高应为 $21+13=34m$ ，考虑工程实施中的其他问题，适当增加一些裕度，锚塔呼高均取40米，塔头高30米，全高70m。

3.5 塔型选择

3.5.1 直线塔

根据塔头布置和塔高的确定，直线跨越塔型考虑了三角形排列和垂直排列两种形势，三角形排列地线保护角+5度，垂直排列地线保护角-1度。两种排列方式的塔型选择如下图所示。



三角形和垂直排列直线塔选型图

两种铁塔型式均有优缺点：三角形排列铁塔的优点在于全塔的

高度比较低，线路的防雷性能比较好，缺点在于下横担长受力后变形比较大，要求下横担有很高的强度才能满足要求，并且下横担的节点设计难度很大；垂直排列的优点在于铁塔的横担比较短，横担受力情况比较好变形也小，与塔身的连接简单，缺点在于整个铁塔的高度比较高导致线路的绕击率比较高。

两种导线排列方式塔型的计算情况：三角形排列的跨越塔重 1203t，垂直排列的跨越塔重 1275t。从塔重上看三角形排列有明显优势，关于下横担较长的问题，通过调研国内 500kV 类似大跨越的设计及运行经验，并进行了专门的变形计算分析，认为通过合理的设计是可以做到安全可靠的，且线路的防雷性能比较好。

从铁塔重量和防雷性能上看三角排列比垂直排列有优势。但由于大跨越线路具有重要性高、投资大、且具有单一性的特点，直线跨越塔选型关系到整个工程设计的经济合理性，要找出最佳方案必须结合跨越点的地形地貌进行综合分析。

淮河大堤的跨越点存在房屋拆迁问题，三角形排列方式（横担宽度 87m）的房屋拆迁量比垂直排列（横担宽度 42.2m）的要大，将此因素列入后两种排列方式的经济比较结果如下表：

三角形排列和垂直排列经济比较

排列方式		三角形排列	垂直排列	差值
拆迁宽度(m)		94	69	25
房屋拆迁量	房 屋(m ²)	2004	1377	627
	院 子(m ²)	505	264	241

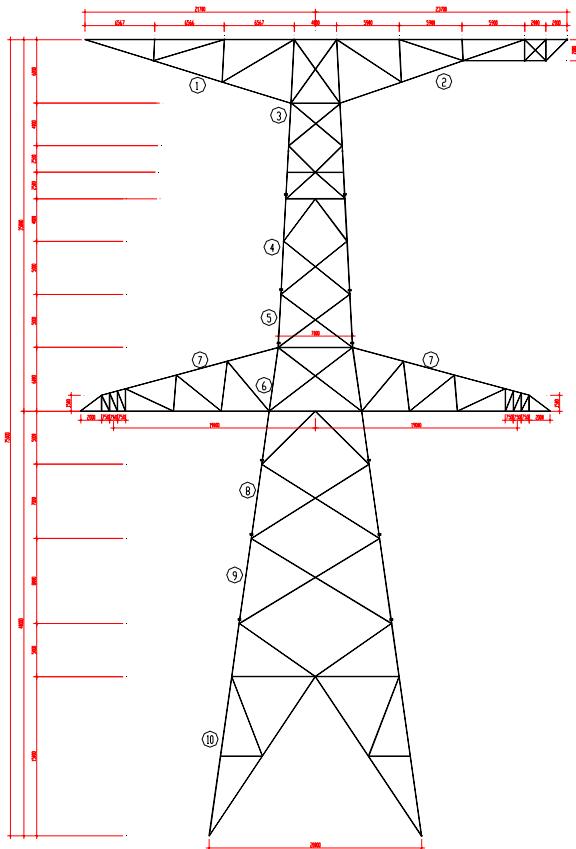
塔重差异(t)	0	144	-144
投资差异(万元)	0	36	-36

由表可见垂直排列塔型（横担宽度 42.2m）的投资比三角型排列（横担宽度 87m）多 36 万元（按 2 基跨越塔计算），对于整个跨越工程的投资来说所占比例并不大。

众所周知，现阶段输电线路工程的难点是现场协议和拆迁工作，且上表的计算是根据现行定额来的，当地的实际占地和拆迁费用远远大于此。从施工周期、临时占地等综合因素看选择走廊宽度小的塔型应该比较经济；从结构设计角度来说选择垂直排列，导线横担较短变形小，与塔身连接等节点好处理。

所以淮河大跨越的直线塔选定为导线垂直排列、呼称高 131m、全高 198m、下横担宽度 42.2m、地线对最下层导线保护角-1 度的伞形塔。

3.5.2 耐张塔



耐张锚塔选形图

大跨越锚塔的主要受力特点是纵向张力非常大，且永久作用，所以一般采用单回路或分回路设计。通常采用的形式有：母线架式、三相各自立式和三相共杆(塔)式，前两种方式占地面积较大，跳线布置复杂，因此淮跨就直接选择了三相共杆(塔)式且呈三角形排列的干字型塔。干字型塔具有整塔受力清晰，占地面积小现场布置塔位比较容易，正侧面根开调整灵活，基础平面尺寸好调整容易满足设计和施工要求等优点，且有成熟的运行经验。

由于塔头各部尺寸和塔高已定所以锚塔选型比较简单，只做了方形塔身和矩形塔身的计算比较，确定了在淮跨负荷条件下矩形塔身正侧面根开比为1:1.4，塔身坡度正面为28%侧面为37%最为经济。所以淮河大跨越的锚塔选定为导线三角排列、呼称高40m、全高

75m、下横担宽度 38.0m、地线对下导线保护角不小于-4 度的干字型塔。

3.5.3 铁塔杆件布置应注意的问题

大跨越由于其负荷大、高度高、重要性强，为了便于安装检修需要在塔上装设附属设施，这在塔的选型和杆件布置过程中必须预先考虑到。例如淮河大跨越直线塔需设置自动攀爬机、塔身斜爬梯、导线横担水平走道、地线架斜爬梯、休息平台、太阳能接收板与电池柜、航空障碍灯等。

3.5.3.1 塔身隔面

大跨越塔身隔面设置除了满足构造要求外还有三个重要作用，一要作为自动攀爬机与塔身的连接点承受其水平及垂直负荷；二要起到斜爬梯转向的作用；三要方便安装两种攀爬方式的休息平台。因此其设置位置尤为重要，综合考虑上述因素淮河跨越直线塔在 131m 高度内设置了五个隔面，最大的隔面跨距为 34m。

3.5.3.2 塔身斜材

斜爬梯是依附塔身斜材安装的，所以斜材与水平的夹角除了尽量满足最佳传力还要考虑到人员攀爬的舒适度。另外由于塔身一侧安装了自动攀爬机使得斜爬梯只能沿三面塔身外侧设置，所以斜材布置要考虑各节间爬梯的衔接和转向位置。

3.5.3.3 塔头隔面

塔头隔面位置一般与横担上下平面相对应，与下平面对应的隔面型式选择要便于自动攀爬机的连接与下机平台及安全围栏的安装。另外还要考虑到与横担水平走道的衔接，因为无论通过斜爬梯或攀爬机上塔人员都要从此转向水平走道。

选择某一个隔面预留太阳能电池板及电池柜的安装位置，并且

在隔材布置时应预先考虑装设方法。

3.5.3.4 横担斜材

横担下平面斜材布置要考虑到水平走道与护栏的安装；正面斜材要顾及水平安全辅杆的设置与连接，因此斜材节间不宜过大或采取增加辅助材以缩小安装间距。

3.6 杆塔荷载

大跨越线路比一般线路重要系数高，所以杆塔荷载也比一般线路杆塔荷载大，需要考虑的方面多。淮河跨越塔的设计荷载是按以下原则取用的。

(1) 导地线风荷载调整系数取 $\beta_c=1.20$ 。

对 1000kV 大跨越线路，设计风速已比一般线路有所提高，设计最小风速为 30m/s，折算为 20m 高的风速为 33.5m/s，按 DL/T5092-1999 规程，导地线风荷载调整系数取 $\beta_c=1.20$ 。

(2) 铁塔结构重要性系数取 1.2。

1000kV 大跨越线路与 1000kV 一般线路的风速重现期均采用 100 年一遇，1000kV 一般线路的杆塔结构重要性系数取 1.1，考虑大跨越线路的重要性，同时为了防冰灾对大跨越线路的破坏，因此推荐 1000kV 大跨越线路的杆塔结构重要性系数取 1.2。

(3) 直线塔导地线起吊安装按 1.5 倍起吊设计。

(4) 直线塔导线断线张力取一相导线最大使用张力的 60%，地线断线张力取一根地线最大使用张力的 100%。

(5) 临时拉线平衡力，对导线、地线分别取 40kN、10kN。

(6) 导线、地线、跳线安装附加荷重分别取 12kN、6kN、3kN。

(7) 正常覆冰、无风情况下，考虑导地线同时有不平衡张力，导线

不平衡张力为相导线最大使用张力的 15%，地线不平衡张力为地线最大使用张力的 25%。

(8) 钢管塔的风载体型系数 μ_s 按 0.85 取用。

(9) 风振系数 β_z 取值：150m 以下与普通线路相同，150m 以上参照同济大学《淮河大跨越风振响应计算技术报告》取值，三层导线横担分别按 2.4、2.7、2.9 取值。按上述取值原则，跨越塔全塔风振系数的加权平均值为 2.5。

(10) 自动攀爬机对塔身的附加垂直荷重，按与塔身安装点节间取为：(1)节间 9000N；(3)节间 6000N；(6)节间 9000N；(9)节间 8000N；(11)节间 5000N；(12)节间 5000N；(16)节间 8000N；(20)节间 8000N。

对塔身的附加风荷载 0~100m 取 80kg/m；100~150m 取 90kg/m；150~200m 取 90kg/m。

(11) 斜爬梯垂直附加荷重按节间长短取 1.0~1.2t；水平附加风荷载 110kg/m。

(12) 直爬梯垂直附加荷重每节间取 0.4t；水平附加风荷载 67kg/m。

(13) 横担水平走道垂直附加荷重每节间取 0.4t；水平纵向附加风荷载 95kg/m。

3.7 杆塔计算

3.7.1 直线跨越塔荷载组合

淮河大跨越直线塔荷载组合是参照《架空送电线路大跨越设计技术规定》(试行)与《1000kV 线路杆塔荷载研究》制定的。

直线塔在下述各种情况的荷载中，均应计及导线、地线由于高差及各档距不等造成的纵向荷载及塔身各设施的附加荷载。

直线跨越塔负荷组合工况

设计工况		说 明
运 行情况	正 常 大风	风向:90°、60°、45°、0°
	正 常 覆冰	风向:90° 相应风速。导地线同时有不平衡张力，导线不平衡张力为相导线最大使用张力的 15%，地线不平衡张力为地线最大使用张力的 25%。
安 装情况	1.5 倍 起吊	风向:90°。导线附加荷重 12000N，地线附加荷重 6000N。
断 线情况	断 2 相导线	地线未断, 无风、无冰；导线的断线张力取 1 相导线最大使用张力的 60%。
	断 2 根地线	导线未断, 无风、无冰；地线的断线张力取 1 相地线最大使用张力的 100%。
	断 1 根地线及 1 根导线	无风、无冰；导线的断线张力取 1 相导线最大使用张力的 60%。地线的断线张力取 1 相地线最大使用张力的 100%。
验 算情况	验 算 大风	风向:90°、60°、45°、0°
	验 算 覆冰	风向:90°

设计工况	说 明
验 算 脱 冰	<p>(1) 无风、未断线、脱冰档内的脱冰重不小于计算覆冰重的 50%。</p> <p>(2) 脱冰组合(在同一档内脱)</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 二相导线同时脱冰，地线未脱冰； ② 三相导线同时脱冰，地线未脱冰； ③ 一相地线线脱冰，导线未脱冰； ④ 二相地线线脱冰，导线未脱冰。
地 震 情 况	<p>风向 90°、30%的设计风速、未断线。</p> <p>本工程的地震设计烈度，按提高一度设防。当地震设计烈度在七度及以上时，对铁塔基础应考虑抗震验算，并考虑地基的稳定及液化问题。</p> <p>对铁塔本身仅当设计烈度达到九级时，才考虑抗震验算。</p>
风 激 振 动	风向 90°、15m/s 风、未断线。

3.7.2 耐张塔荷载组合

淮河大跨越耐张塔荷载组合是参照《架空送电线路大跨越设计技术规定》(试行)与《1000kV 线路杆塔荷载研究》制定的。

耐张塔负荷组合工况

设计工况	说 明
运 行 情 况	正常大风
	风向:90°、45°、0°
	正常覆冰
	风向:90°
	最低气温
	无风、无冰

设计工况		说 明
安装情况		风向:90°、0°。 导线附加荷重 12000N , 地线附加荷重 6000N , 跳线 4000N。
断线情况	断 1 相导线 或同一档 内 断 2 相导 线	地线未断, 无风、无冰 ; 导线张力取导线最大使用张力的 70% ; 地线张力取地线最大使用张力的 80%。
	断 1 相地线	导线未断, 无风、无冰 ; 导线张力取导线最大使用张力的 70%。 地线张力取地线最大使用张力的 80%。
验算情况	验算大风	风向:90°、45°、0°
	验算覆冰	风向:90°
	验算脱冰	(1) 无风、未断线、脱冰档内的脱冰重不小于计算覆冰重的 50%。 (2) 脱冰组合(在同一档内脱) ①二相导线及一相地线同时脱冰 ; ②三相导线二相地线同时脱冰。
	地震情况	风向 90°、30%的设计风速、未断线。 本工程的地震设计烈度 ,按提高一度设防。当地震设计烈度在七度及以上时 ,对铁塔基础应考虑抗震验算 ,并考虑地基的稳定及液化问题。对铁塔本身仅当设计烈度达到九级时 ,才考虑抗震验算。

3.7.3 杆塔计算

淮河大跨越的铁塔计算采用我院自行编制的铁塔计算程序 ZTT-53c (081110) 版本计算。经计算比较，直线塔与锚塔都选用了钢管塔，材质为 Q235B 与 Q345B，连接螺栓为 8.8 级。

4 大跨越基础设计

大跨越基础设计是一个集选型、比较、优化等大量细致的工作过程。而水文地质情况及基础作用力则是基础选型与设计的必要条件，它们制约着基础形式的选择与基础设计的合理性。要做到因地制宜经济合理的设计首先要了解这些必要条件的控制点和作用。

水文情况

- ① 设计洪水位（根据规程要求或审查会议研究批准的条文取值如：220kV 为 30 年一遇、500kV 为 50 年一遇、特高压按 100 年一遇取值等），一般基础顶面应高于设计洪水位。
- ② 洪水流速，流速与河床土粒径是计算冲刷深度的必要条件。
- ③ 塔位冲刷情况（冲刷由两部分组成：自然冲刷和局部冲刷）冲刷后的高程与设计洪水高程确定了基础计算的悬臂高度。
- ④ 漂浮物情况，掌握漂浮物种类及大小，用最大的漂浮物质量和流速计算出其对桩基的撞击力。根据漂浮物情况确定是否采取防撞措施。

地质情况

- ① 地形地貌，塔位地形地貌是塔型和基型选择的重要参考条件，它决定着材料的运输、施工机械的运转、施工方法的采取等实施的可能性。
- ② 地层岩性，各分层地质的物理力学指标是计算基础的依据。
- ③ 地下水，其埋藏深度是基型选择和基础计算的重要参数；其性质（孔隙水，上层滞水，有无腐蚀性）决定着基型的选择和采取的

措施。

④ 地震参数，根据地震烈度判断地基是否会产生液化影响基础安全，并根据液化深度采取措施。

基础作用力

作用力的大小和特点直接影响基础型式的选用，当作用力大到一定程度选用再大的独立基础也难满足要求。另外作用力的特点确定了基础受力性质，如：直线塔拉压腿是不确定因素，所有基础都须满足同一组上拔下压及相应水平力的要求；而终端塔则有可能出现两拉两压、一拉一压两中性等情况。

大跨越锚塔基础的特点是跨越侧两个基础永久受压，一般线路侧两个基础永久受拉。

以下是淮河大跨越线路铁塔基础的选型设计与优化设计过程实例。

4.1 水文情况

淮河大跨越自北向南依次经过：淮河北大堤（左堤）、汤渔湖行洪区，汤渔湖保障堤、淮河主行洪区，淮河右岸洛河洼保障堤、洛河洼行洪区、淮河南大堤（右堤）。

淮河大堤防洪标准均为 100 年一遇

4.1.1 设计洪水位

主跨越塔位分别位于汤渔湖和洛河洼现状保障堤的背水侧，根据《淮河干流行蓄洪区调整规划》，现状汤渔湖保障堤规划要向北退 700m，洛河洼保障堤要向南退 800m，在此规划退堤条件下，淮河主跨越塔将分别位于淮河左右滩地上，在漫滩洪水时属水中立塔。

1) 主槽洪水位

根据《淮河流域防洪规划》和鲁台子水文站实测最大洪水资料，计算得到淮河大跨越段各设计频率洪水位如下：

100 年一遇 : 24. 42m ;

50 年一遇 : 24. 42m ;

20 年一遇 : 23. 90m ;

10 年一遇 : 23. 32m ;

5 年一遇 : 22. 5m。

由于淮河大堤的防洪标准是通过上游分蓄洪区的联合运用下来实现的 , 所以退堤前后的水位设计标准不变 , 其 100 年一遇洪水位均为 24. 42m。

跨越断面所在地区全年 3、4 月份为大风季节 , 其中以 3 月份为最大 , 据 1960 年 ~2000 年实测枯水位资料并推算至跨越断面 ,3 月份多年平均最低水位为 15. 67m。

2) 汤渔湖洪水位

在设计标准下 , 汤渔湖行洪区行洪流量由人为控制 , 退堤前设计行洪流量 $4300\text{m}^3/\text{s}$, 设计行洪水位 24. 25m ; 向北退堤 700m 后 , 减少了行洪流量 , 保持行洪区内的行洪水位 24. 25m 不变。

在 100 年一遇洪水位时 , 超过了保障堤的防洪标准 , 此时汤渔湖行洪区已不受人为控制 , 其 100 年一遇洪水位与主槽相同 , 为 24. 42m。

由于淮河大洪水期间汤渔湖内涝水位较高 , 淮河边居住群众撤退困难等因素 , 汤渔湖行洪区自建成后仅蓄过内水 , 没有行过洪。为了保护泥黑河附近潘集矿井的安全 , 曾于 1963 年、其中 1991 年两次滞蓄黑泥河的内涝洪水。据调查 1991 年行洪区内涝洪水淹没水深 2m 左右 , 蓄洪历时 15 天左右。

3) 洛河洼洪水位

在设计标准下 , 洛河洼行洪区行洪流量由人为控制 , 退堤前设计行洪流量 $600\text{m}^3/\text{s}$, 退堤后通过减少行洪流量保持原设计水位不变 , 退堤

前后的设计行洪水位均为 22.50m。据统计，行洪区 1960 年建成以来已运用 8 次，运用机率约 5 年一遇。

在 100 年一遇洪水位时，超过了保障堤的防洪标准，此时洛河洼行洪区已不受人为控制，其 100 年一遇洪水位与主槽相同，为 24.42m。

淮河跨越塔位 100 年一遇洪水情况下各塔位淹没情况详见表下表。

100 年一遇洪水情况下淮河跨越塔位淹没情况表

塔位	100 年一遇洪水水位 (m)	塔位高程 (m)	淹没水深 (m)	淹没历时 (d)	备注
N1#	24.42	17.24	7.18	40	左岸锚塔
N2#	24.42	17.95	6.47	40	左岸主跨越塔
N3#	24.42	20.00	4.42	40	右岸主跨越塔
N4#	24.42	18.88	5.54	40	右岸锚塔

4.1.2 河床演变及塔位冲刷深度

根据以上主槽、滩地及河势历史变迁分析，跨越段所在的淮北河段，在现状水沙条件下河势基本稳定，主槽左岸向左最大变动范围约 220m，右岸向右最大变动范围约 250m。拟立塔位处位于现状保障堤的背水侧，其中左岸跨越塔距主河槽岸边约 650m，右岸跨越塔距主河槽岸边约 450m，在河道自然变迁范围之外，不受河道变迁的影响，塔位处的稳定较好。

在现状堤防条件下，主跨越塔分别位于汤渔湖行洪区和洛河洼行洪区现状行洪区内，由于洪水从主河道向行洪区分洪后，行洪区内的流速低于主河道内的流速，水流的挟沙能力降低，呈现出淤积水情，行洪区内的塔位不具备一般冲刷和自然冲的条件，同时由于塔位处流速较小（经计算，小于 0.1m/s），塔基处也不会形成局部冲刷。

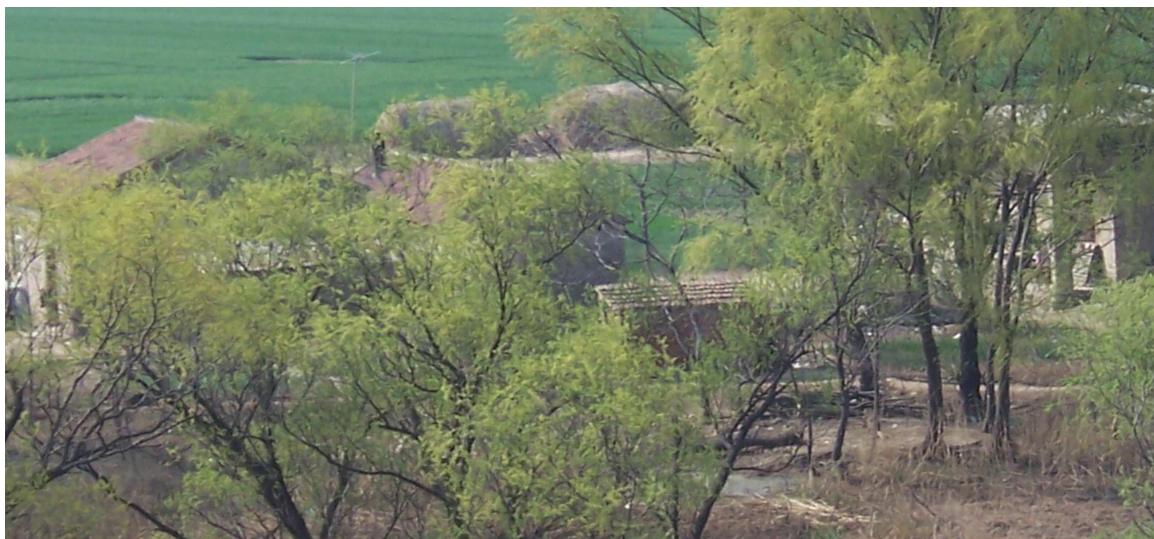
在规划条件下，按照规划的汤渔湖行洪区和洛河洼行洪区保障堤退堤方案，跨越塔将位于淮河左右滩地上，其中左岸跨越塔塔位处行洪流

速 0.51m/s ,一般冲刷深度 0.6m ,局部冲刷深度 0.78m ,总冲刷深度 1.38m 。右岸跨越塔位处行洪流速 0.44m/s ,一般冲刷深度为 0m ,局部冲刷深度 0.65m ,总冲刷深度 0.65m 。

4.1.3 其它水文条件

4.1.3.1 漂浮物

汤渔湖行洪区农舍及树桩情况见下图：



汤渔湖行洪区农舍及树桩情况图

淮河左右岸行洪区内均有居民居住,居民院中有直径 $20\sim40\text{cm}$ 的树干等建筑材料,在洪水期会成为漂浮物。

4.1.3.2 淹没历时及冰情

淮河洪水一般发生在夏秋季,1956年洪水有4个月发生了洪水上滩。冬季滩地上没有积水,所以不需考虑冰对塔基安全的影响。

在分洪应用情况下,汤渔湖行洪区和洛河洼行洪区内的行洪洪水持续时间,不超过30天。2007年7月淮河大洪水,约为20年一遇,于7月11日启用了洛河行洪区,至7月30日,行洪区内的水基本退完,共历时20天左右。

行洪区内的水在入冬之前均能退完,不会滞留至冬季,所以行洪区

内的塔位也无需考虑冰情影响。

4. 1. 3. 3 通航水位

汤渔湖行洪区和洛河洼行洪区内没有行船要求，由于是人工调度下的有序分洪，在分洪之前均实现人员的安全撤离，所以也没有抗洪抢险船只通航要求。

据淮南市海事局港航科提供，淮河为Ⅲ级通航河道，最大驳船为1000吨级。最高通航水位为淮河20年一遇水位23.90m，加安全净空16m，即跨河处最高通航高度为39.90m。

4. 2 地质情况

4. 2. 1 地形地貌

跨越段在地形地貌上属于淮河冲积平原区，北岸为汤渔湖行洪区，最宽处约7km；南岸为洛河洼行洪区，最宽处约4.5km；以上两个行洪区地形平坦开阔，现为农田，局部见鱼塘。参见下图：



汤渔湖行洪区



洛河洼行洪区

4. 2. 2 跨越段地层岩性

根据参考资料钻探成果（参见地质资料附图1~7），揭露淮河南北两

岸地层是：上部覆盖层为第四系河流相冲积、湖相沉积以及残积行成的粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘土、粉土以及中砂、细砂等，覆盖层厚度约45~60m。下部基岩三叠系砂岩、砾岩和泥岩。

4.2.3 跨越段地基方案

淮河大跨越杆塔对地基强度、抗拔能力以及塔基允许变形要求较高，跨越段浅部地层主要为淮河近期冲积物，工程性质较差，并且存在液化问题，天然地基不能满足塔基对地基的要求，需采用桩基础，地质专业建议采用钻孔灌注桩。

淮河左岸跨越段桩基设计参数表

跨越塔					锚塔				
地层 编号	岩性 名称	极限侧 阻力标 准值 q_s (kPa)	极限端 阻力标 准值 q_{pk} (kPa)	饱和单 轴抗压 强度 (MPa)	地层 编号	岩性 名称	极限侧 阻力标 准值 q_s (kPa)	极限端 阻力标 准值 q_{pk} (kPa)	饱和单 轴抗压 强度 (MPa)
①	粉质粘土	40			①	粉质粘土	40		
②	淤泥质粉 质粘土	22			②1	粉土	30		
③	粉细砂	40			②2	淤泥质粉 质粘土	22		
④1	粉质粘土	75	800		③	粉细砂	25		
④2	粉质粘土	48	500		④	粉质粘土	55	700	
⑤	细砂	60	1200		⑤1	粉砂	50	900	
⑥	粉质粘土	65	900		⑤2	细砂	70	1300	
⑦	泥质砂岩		2200		⑥	粉质粘土	75	900	
					⑦1	粉砂岩		1900	0.26
					⑦2	泥岩		1500	
					⑦3	含砾泥质 砂岩			

淮河右岸跨越段桩基设计参数表

跨越塔					锚塔				
地层 编号	岩性 名称	极限侧 阻力标 准值 qsk (kPa)	极限端 阻力标 准值 qpk (kPa)	饱和单 轴抗压 强度 (MPa)	地层 编号	岩性 名称	极限侧 阻力标 准值 qsk (kPa)	极限端 阻力标 准值 qpk (kPa)	饱和单 轴抗压 强度 (MPa)
①	粉土	40			①	粉质粘土	35		
②	粉质粘土	64			②	淤泥质粉 质粘土	22		
③1	粉质粘土	78	800		③	粉质粘土	78		
③2	粉质粘土	40	550		④	粉细砂	30		
④	细砂	50	1000		⑤	粉质粘土	78	800	
⑤	粉质粘土	65	900		⑥	细砂	70	1300	
⑥	含砾泥质 砂岩		1500		⑦	粉质粘土	80	900	
⑦	泥质砂岩		2100		⑧	泥岩		1500	
					⑨	砂岩		2100	

4.2.4 地下水

跨越段地下水类型为孔隙潜水，主要受淮河侧向补给，地下水位埋深 1.00m~1.50m，水位随季节不同变化较大。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)，场地条件类别为Ⅱ类，按干湿交替考虑，跨越段地下水对混凝土结构无腐蚀性，对钢筋混凝土中的钢筋具弱腐蚀性，对钢结构具弱腐蚀性。

4.2.5 地震动参数和地震液化问题

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)，该跨越段地震动峰值加速度为 0.10g，相应的地震基本烈度为VII度。

本工程按 7 度判定时，跨越段场地存在液化问题，液化层主要是粉土层，相应的各层厚约 2~3m，液化等级为中等。

4.3 基础设计原则及依据

4.3.1 大跨越基础设计原则

目前 1000kV 特高压大跨越铁塔基础设计的计算原则没有现成的规程规范可依，而国内 500kV 及其以下电压等级输电线路工程大跨越有着成熟的设计经验，其设计理论和计算方法都得到了长期运行的考验。我院设计的晋东南-南阳-荆门 1000kV 黄河大跨越工程，在基础设计方面也积累了一定的经验值得很好的借鉴。单从结构上分析，特高压大跨越与超高压大跨越两个电压等级在铁塔基础设计上的不同之处是前者基础作用力大、重要性系数高。因此对 1000kV 特高压大跨越铁塔基础总体的设计思路和计算原则是按照《架空送电线路大跨越设计技术规定》（试行）进行，并相应考虑特高压大跨越的重要性，适当提高基础的安全性。

- ① 河道两岸塔位基础设计洪水位按百年一遇考虑即 24.42m，与线路整体设计气象条件的重现期取得一致。
- ② 结构重要性系数 1.2，与铁塔结构设计统一。
- ③ 基础稳定、基础承载力采用荷载的设计值进行计算；地基的不均匀沉降、基础位移等采用荷载的标准值进行计算。
- ④ 当基础设置在河床内、堤外（迎水面）滩地时，应考虑冲刷影响、流水压力、漂流物的作用等。必要时，应采取防护措施，尚应考虑冻融期的拥冰堆积作用。此时荷载组合宜取下列情况进行计算：
 - a) 最大风荷载和相应的冲刷深度（宜取最大冲刷深度的 50% ~ 70%），荷载系数为 1.0；
 - b) 最大冲刷深度和相应的风荷载（根据工程重要性及不同的地区取用不同的数值，但一般不宜小于最大风荷载的 50%），荷载系数为 1.0；
 - c) 最大冲刷深度和相应的风荷载并考虑漂流物及水流的作用，所有荷载系数均取 0.75。

⑤地震基本烈度为VII度，基础设计按VII度设防。

4.3.2 大跨越基础设计参考的规程、规范

《架空送电线路大跨越设计技术规定》（试行）；

《架空送电线路基础设计设计技术规定》DL/T5219-2005；

《1000kV 交流架空输电线路设计暂行技术规定》（Q/GDW178-2008）；

《110~750kV 架空输电线路设计技术规定》（Q/GDW179-2008）；

《建筑桩基技术规范》JGJ94-94；

《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2002）；

《混凝土结构设计规范》（GB50010-2002）；

《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025-2004）；

《建筑抗震设计规范》（GB50011-2001）。

4.4 基础型式选择

淮河大跨越铁塔基础型式选择是遵循安全可靠、经济合理的原则进行的。在选择基础型式时结合各塔型荷载情况，根据各塔位工程地质、水文条件、施工可能性进行技术经济综合比较。为了保证大跨越工程铁塔基础设计的安全性与合理性，各有关专业在以往的大跨越工程中都作了大量的研究论证工作，为大跨越基础设计提供了可靠依据。本阶段基础型式选择是根据对推荐方案的各塔位具体地形地貌条件、工程地质及水文情况综合考虑进行的。

4.4.1 输电线路杆塔基础的受力特点

输电线路杆塔基础在受力方面与其它建筑物基础有所不同，由于杆塔为空间桁架结构，具有较大的高宽比且自重较轻。铁塔与基础点状连接，同一个基础即受上拔又受下压力作用，同时还伴有两个方向的水平力，即具有上拔、下压的不确定性。而一般建筑物结构的自重大，基础只受下压力，不出现上拔力。因此要求同一个铁塔基础既能满足上拔

又能满足下压力的要求。特别是当某种原因要求基础顶面抬高时（如洪水冲刷），水平力会造成基础倾覆，设计中为了抵抗这一强大的力矩往往使基础底盘非常大。所以在选择基础型式时就要充分考虑这一因素，要充分发挥和利用地基本身强度和土抗力，力求使所选基型即合理又经济。

4.4.2 基础方案选择

根据推荐的跨河方案，按规划条件，锚塔位于淮河北岸的汤鱼湖行洪区和南岸的洛河洼行洪区内，不存在冲刷问题；跨越塔位于淮河南北滩地上，其中北岸行洪流速 0.51m/s ，总冲刷深度 1.38m ，南岸行洪流速 0.44m/s ，总冲刷深度 0.65m ，考虑百年洪水南北两岸跨越塔最大地面淹没深度分别为 6.47m 和 4.42m 。综合以上两方面，南北两岸的跨越塔需分别按悬臂 9.1m 和 5.3m 设计，此时基础外露部分均应考虑动水压力作用。

地质报告表明：两岸地层上部主要为第四系河流相冲积、湖相冲积以及残积形成的粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粉土、中砂以及细砂层，覆盖层厚度约为 $45\text{--}60\text{m}$ ，下部基岩三叠系砂岩、砾岩和泥岩。地面以下 $0\text{m}\sim 20\text{m}$ 内存在不同厚度的液化层，液化层主要为粉土，相应的各层厚度约为 $2\text{--}3\text{m}$ ，液化等级为中等。

对跨越塔基础影响最大的主要是以下几方面因素：一是基础负荷大，二是冲刷深度，三是地质液化问题，四是基础有可能常年浸泡在水中。

淮河跨越塔基础作用力 : $T=11619\text{kN}$ $T_x=1980\text{ kN}$ $T_y=2188\text{ kN}$ $N=20412\text{ kN}$ $N_x=3748\text{ kN}$ $N_y=3977\text{ kN}$ 。由于基础的悬臂高，当考虑洪水冲刷、动水压力和漂浮物的撞击同时作用时水平荷载对基础产生的附加弯矩非常大，北岸塔位冲刷线最大弯矩达 $49730\text{kN}\cdot\text{m}$ 。要求所选择的基础型式必须在满足竖向承载力的同时具有足够的抗弯和抗倾覆能力。在众多铁塔基础型式中桩基础具有满足这个特定要求的明显优势。由于桩基础有特殊的施工工艺，其埋置深度不受限制容易克服液化问题，而且有承载力高、稳定性好、成本适中、沉降量小而均匀、便于机械化施工、适应性强等特点，国内外多条大跨越输电线路中河道内立塔都采用了不同组合方式的桩基，并且有长期的运行经验。在我院承担设计的晋东南-南阳-荆门 1000kV 输电线路的黄河大跨越段也采用了组合桩基(灌注桩和挖孔桩)，从设计到施工整个过程顺利。因此，淮河大跨越段的基础型式选择采用桩基型式。

下图为黄河大跨越工程所用基础型式，直线跨越塔灌注桩基础：桩径 1.4m 、桩长 48m 、每腿 16 根、承台 $16\text{m}\times 16\text{m}$ 、承台厚度 2.1m ；锚塔挖孔桩基础：桩径 1.8m 、桩长 27m 、每腿 4 根、承台 $9.2\text{m}\times 9.2\text{m}$ 、承台厚度 2.5m 。



1000kV 输电线路黄河大跨越直线塔灌注桩基础



1000kV 输电线路黄河大跨越直线塔灌注桩基础施工中



1000kV 输电线路黄河大跨越锚塔挖孔桩基础施工中

4. 4. 4 桩基类型确定

常用的桩基按照材料类型可以划分为两大类：钢筋混凝土桩和钢桩。钢桩主要应用于深厚的饱和淤泥质土、粉土以及沿海地区高含水量和高压缩性的海淤泥质土，一般采取打入方式，施工方便，但其造价比钢筋混凝土桩高许多，桩基防腐也是一个较难解决的问题，线程工程中很少采用。因此本着安全可靠、经济节约的原则，淮跨不考虑采用钢桩，仅对钢筋混凝土桩进行分析比较。

钢筋混凝土桩有钻孔灌注桩、挖孔灌注桩、预应力高强度混凝土管桩（一般称 PHC 桩）和混凝土预制桩（方桩）。由于混凝土预制桩主要用于电厂、变电所等大面积的地基处理和单纯承受竖向的重力荷载，其单桩承载力相对较低，并且接桩质量不易保证，接头处对于基础抵抗上拔的可靠性较低。因此，混凝土预制桩不适用于淮跨。

目前国内外大跨越工程多采用钢筋混凝土桩基础，常用的基础形式有钻孔灌注桩、高强度预应力管桩、预应力方桩等几类。由于大跨越塔的基础作用力大，混凝土预制桩一般桩径较小埋置深度浅，很难满足承载力要求；由于地质条件限制（主要是地下水位影响）又不适宜采用挖孔桩。因此我们仅对采用钻孔灌注桩和 PHC 管桩作比较，以确定合适的

桩型。

两种桩基型式的优劣及使用情况如下表：

灌注桩与 PHC 桩特性对比

桩型	优 点	缺 点
灌注桩	1、施工机械设备简单 ,工艺简单成熟 ,在线路工程中应用广泛。 2、桩径在 0.6 ~ 1.8m 内自由选择 ,单桩承载力较高。 3、桩身为连续性结构 ,上拔承载可靠性强。 4、成孔时遇砂层或碎石层施工难度较小。 5、成孔时可对桩位地质进行验证 ,可及时发现问题并做适当调整。 6、桩与承台的连接可靠。	1、对于成孔的质量和浇注混凝土的质量控制要求较高。 2、由于采用先成孔后浇注方式施工 ,因此存在养护期较长 ,施工工期较长的缺点。 3、砂石、水泥等的堆放、成孔时采用的泥浆护壁、排放的泥浆对周围的环境影响较大。 4、由于存在超灌量等因素 ,基础混凝土耗量较高。 5、桩身质量不宜检测。

PHC 桩 工。	1、是建设部科技成果推广项目，在发 电、变电工程中应用较广泛（抗压承 载力较高）	1、施工工艺较复杂，桩锤的选择，单 锤的打入深度设计必须与地质、桩型、 入土深度等进行分析计算。
	2、在工厂中预制，可以大批量生产， 周期较短，桩身质量容易控制，产品 质量容易保证。	2、桩径一般 $0.3 \sim 0.8m$ ，规格较少， 选择余地小。
	3、施工机械设备简单，适合大面积施 工。	3、桩身采用分段焊接，整体性较差， 焊接质量及接头的防腐对桩承载力影 响较大（尤其是桩抗拔时，可靠性较 差）。
	4、单桩打入速度快，施工工期较短。	4、桩与承台的连接较差。
	5、预制桩无需进行养护，仅需打入后 适当静置即可，节约工期。	5、桩打入时受地质影响大，锤击时易 引起粉土等饱和土的液化、承载力的 丧失，噪声较大。
	6、由于是管桩，中心为空心结构，基 础混凝土的耗量较小。	
	7、无泥浆排放，对塔位周围环境影响 较小。	

由上表可以看出，两种型式的桩基各有优缺点，但工程中具体采用哪一种型式的桩基更合理还要因地制宜进行对比，很大程度上决定于地质情况、工期与施工条件和对周围环境的影响等因素。

PHC 管桩若采用静压方案沉桩，需要大型施工设备，设备进场很困
难。若采用打入方式，跨越点在村庄内，会产生很大的噪声，对附近居

民的生产生活有一定影响，因此可能会影响施工进度。

基于上述诸因素，淮河大跨越选择了施工工艺成熟、可靠性较高的灌注桩基础型式。

钻孔灌注桩能适应地下水位浅的地质条件，是国内外大跨越线路工程最常用的基础型式之一，在各个电压等级的输电线路工程中从设计到施工都具有成熟的经验，且运行安全施工工艺比较简单。该基型广泛地应用于建筑、隧道、桥梁、市政、水利、港口等工程中。近年来中南院、浙江院、华东院等兄弟单位在 500kV 线路跨长江、黄河、淮河等大跨越工程中多采用了钻孔灌注桩基础。

淮河大跨越由于地形、地质条件限制也适于采用钻孔桩的施工方式。

4.5 桩基优化

桩基的优化过程是使所选用的基型达到即安全又经济的效果。根据线路工程设计经验，当基础外力较小且地质情况相对较好时选择单桩是比较经济的，而且单桩加连梁更可以使水平力相互传递，减小桩顶位移，达到减小桩径的效果。这对于低电压等级的铁塔桩基优化是最直接也是经常采用的办法。而要满足 1000kV 双回路跨越塔基础作用力的要求采用单桩加连梁的办法进行优化是远远不够的。根据淮河大跨越基础外负荷与水文地质条件要求首先确定必须采用组合式桩基，而基础优化范围应

包括桩径、桩长、桩数、承台截面大小、高桩低桩选择及承台摆放形式等。淮跨设计中分别对跨越塔和锚塔选取不同的桩基组合方案进行了技术经济比较。

4.5.1 跨越塔桩基方案

1) 地质条件

地层 编号	岩性名称	层埋深(m)	天然重度 (kN/m ³)	内摩擦 角(°)	粘聚力 (kPa)	压缩模量 EsMPa	极限侧阻 力标准值 qsk (kPa)	极限端阻 力标准值 qpk (kPa)	承载力特 征值 fak (kPa)
	粉质粘土	0.0~4.6	18.5	10	14	4	30		100~130
	淤泥质粉 质粘土	4.6~6.6	18	4	25	4	22		80~90
	粉 土	6.6~17.1	19	25	5	8	40		150~180
	粉质粘土	17.1~26.3	19	12	30	5.5	70	800	190~210
	中 砂	26.3~49.6	18	25	0	8	60	1700	200~250
	粉质粘土	49.6~54.9	20	18	55	12	85	1600	250~300
1	砂 岩	54.9~57.0	25	35		30	120	2200	300~400
2	砂 岩		25						450~600

2) 水文条件

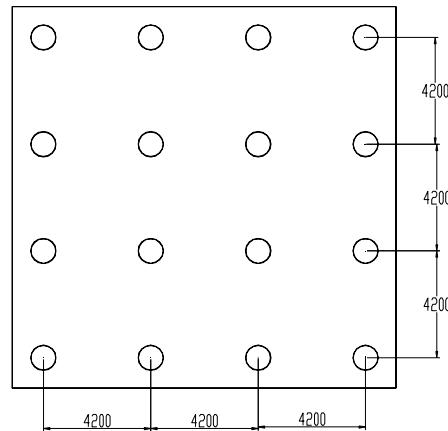
设计洪水位 24.42m；行洪流速 0.51m/s；总冲刷深度 1.38m。

3) 跨越塔基础作用力(设计值)

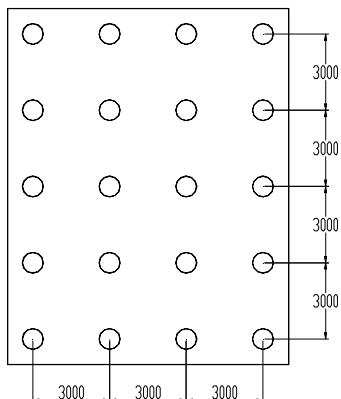
上拔力 (kN)	TX=1979. 8
	TY=2188. 0
	T=11618. 9
下压力 (kN)	NX=3748. 2
	NY=3976. 5
	N=20411. 7

4) 跨越塔桩基组合方案比较

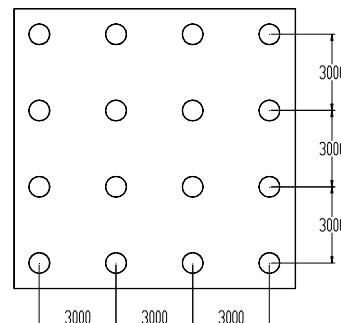
针对淮跨特定的基础作用力与水文地质条件，选择了以下五种桩基布置行式和高桩承台、低桩承台组合方案对直线跨越塔进行了比较计算，结果如下：



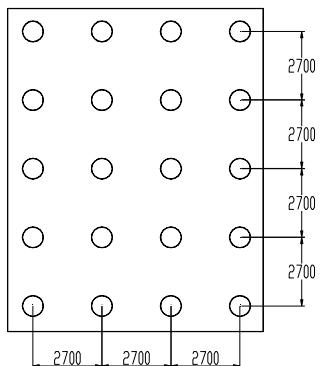
方案一



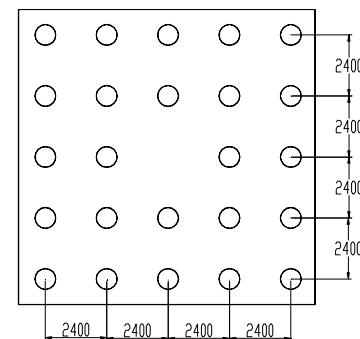
方案二



方案三



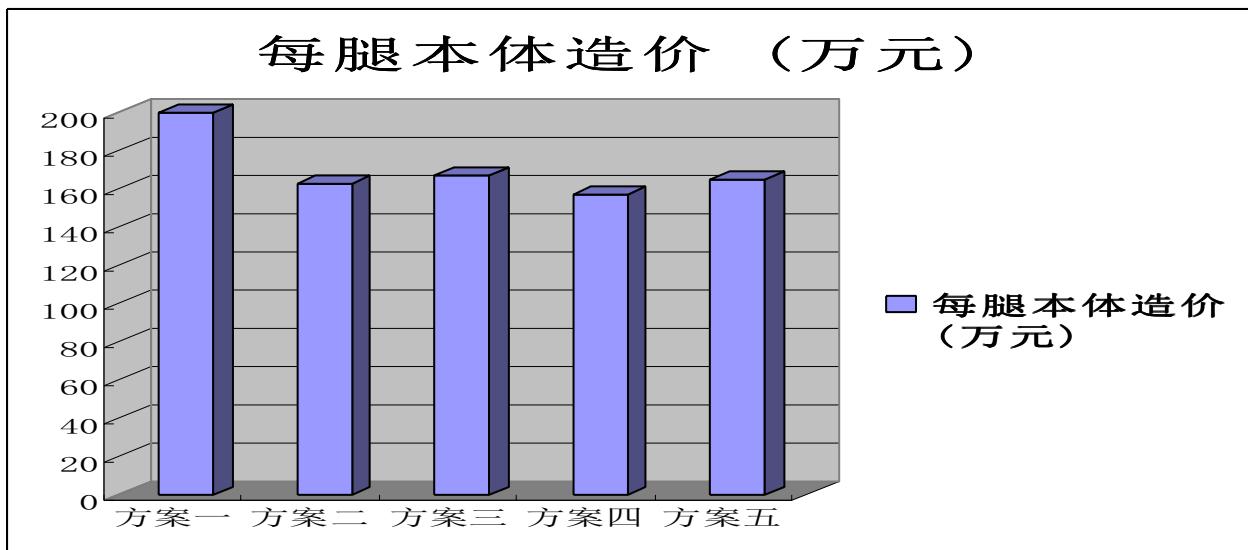
方案四



方案五

计算结果比较（对应一个塔腿）

方案	桩径 D(m)	埋深 (m)	每腿桩 根数	桩间距 (m)		每腿基础材料量		承台方 式	每腿本体 造价 (万元)
				x	y	混凝土 (m ³)	钢材(t)		
一	1.4	34	16	4.2	4.2	1407.7	132.5	高桩	200
二	1	33	20	3	3	906.7	106	高桩	163
三	1	40	16	3	3	936	117	低桩	167
四	0.9	34	20	2.7	2.7	809	106	低桩	157
五	0.8	33	25	2.4	2.4	823	101	低桩	165



从以上图表可以看出，在相同荷载、相同水文地质条件下，选用不同的桩基排列组合型式对桩径和入土深度影响较大，单腿本体造价最大与最小方案相差 1.27 倍。

5) 优化结果

淮河大跨越直线塔选用了：桩径 0.9m 桩长 35m 每腿 20 根桩的低桩承台且成 45 度摆放的组合式灌注桩。选用理由：

以上几种方案均满足技术要求，方案二至方案五混凝土量差别较大而本体造价却相差不多，这是因为概算专业对钻孔桩基础的取费计算有行业规定，所以在选择桩基时也要考虑这方面的因素。

桩径选择：概算专业对钻孔价格取费标准分为：桩径 1.0m 以下按同一价格、1.0m 以上按 1.2m 、1.4m 、1.6m ……阶梯式增高。所以在满足技术条件范围内宜选择小直径桩。比较方案中方案二至方案五都在可选范围，而方案四混凝土量最小。

桩长选择：同上述理由，在相同的取费档内（如 1.0m 以下）宜选择累加长度最短的桩长。比较方案中方案二至方案五的单腿累加桩长依次为 660m、640m、680m、825m，方案五最长不作比较，方案四随比方案二、三长但价格上升不明显，从桩径和混凝土量上统一考虑仍选择方案四。

高低承台选择：按照设计条件可以有三种选择①承台底面高出百年洪水位，桩顶以上结构不受洪水冲刷；②基础主柱高出百年洪水位，承台受洪水冲刷及动水压力作用；③承台埋入自然地面以下，主柱与承台都受洪水冲刷及动水压力作用。根据工程设计经验，当在主河道上立塔，洪水流速快，冲刷深度大时宜采用高桩承台①。淮河大跨越有几个特点：
1. 塔位在滩地，基础不受长期洪水冲刷；2. 洪水流速较慢 0.51m/s，对基础的动水压力小；3. 冲刷深度浅 1.38m，承台底面可座入冲刷线以下，

桩顶位移小；4. 地面以下土质为粉土或粘土，开挖成形施工条件好。因此选择低桩承台③是最为合理的。

承台方位选择：同时承受水平力和上拔力是送电线路铁塔基础区别于一般建筑物基础的最大特点。由于两方向较大水平力作用使得承台下部每根桩基受力分配不均匀，设计上往往选用受力最大的桩基进行统一配筋，造成浪费。所以对多桩承台基础的设计优化也包括承台方位布置选择，通过调整承台方位使各桩基受力尽可能均匀，使受力最大的承台边缘桩基根数增多，以达到减小桩长节约材料的目的。设计中我们针对承台传统型垂直摆放与 45 度摆放进行了计算比较。结果如下：

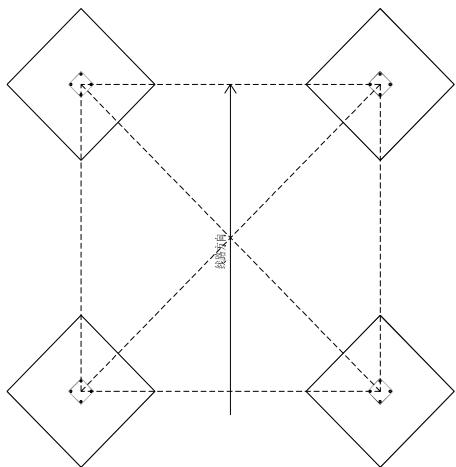


图 A

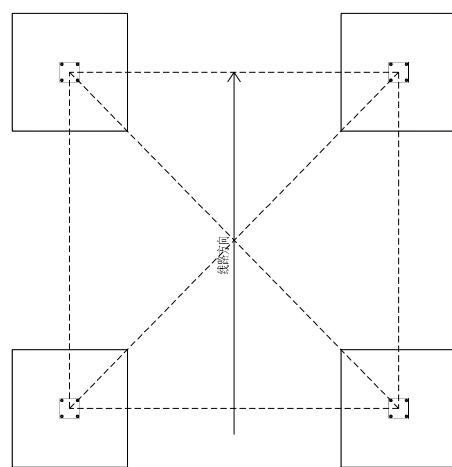


图 B

承台平面布置图

图 A：45°摆放型，内侧的两根桩受力最小，外侧的两根桩受力最大，

单桩桩顶所承受的最大轴向力：

$$N_{\max} = \frac{\pm N_0 + Q_t}{4} \pm \frac{M_x}{\sqrt{2Y}} \quad \text{或} \quad N_{\max} = \frac{\pm N_0 + Q_t}{4} \pm \frac{M_y}{\sqrt{2X}}$$

图 B：传统型，各桩受力最不均匀，顺对角线的两根桩外侧受力最大、内侧最小。按《技规》9.1 公式单桩桩顶所承受的最大轴向力：

$$N_{\max} = \frac{\pm N_0 + Q_t}{4} \pm \frac{M_x}{2Y} \pm \frac{M_y}{2X}$$

上面两种桩径摆放形式的计算结果如下表：

不同摆放形式的计算结果

方 案	桩径 D(m)	埋深 (m)	桩间距(m)		每基基础材料量		每腿造价 (万元)
			x	y	混凝土(m ³)	钢材(t)	
传统型	1.0	28.0	3.0	3.0	5254.6	473.2	798
45°摆放型	1.0	27.0	3.0	3.0	5175.6	409.7	760

从表中可以看出 A 型桩基摆放方式比 B 型摆放方式桩基埋深减少了 1 米，混凝土方量和钢材重量分别减少了 1.5% 和 15.5%，总造价相应降低了 5%。因此淮河跨越塔基础承台采用了 45 度摆放。

6) 基础附属设施

由于跨越塔基础选择了承台埋入地下主柱高出百年洪水位方案，自然地面与柱顶高差约 7 米，设计必须考虑施工组裝和检修维护用附属设施。淮跨直线塔基础主柱增设了柱身爬梯（带锁门）、柱顶围栏、接地焊接预埋铁等，并且在方形主柱四角预埋了 L200X20 角钢作为一般防撞

措施。

4.5.2 锚塔桩基方案

对于锚塔桩基方案的选择与优化，是在直线跨越塔的思路基础上进行的，主要优化过程为：

1) 地质条件

地层年代	岩性名称	天然重度 (kN/m³)	内摩擦角 (°)	粘聚力 (kPa)	压缩模量 Es 0.1 ~ 0.2 (MPa)	地基承载力特征值 fak (kPa)
Q4al	粉土	17~19	18~25	8~12	6~8	120~130
	淤泥质粉质粘土	17.0~17.5	4	13~15	3.5~4.5	80~90
	粉质粘土	18~20	10~15	25~35	5~6	130~150
	粘土	19~20	12~18	30~35	5~7	140~160
	粉细砂	18~19	20~25	0	6~7	180~200
Q3al	粉质粘土	18~19	10~12	25~30	5.5	190~210
	粉砂	17.5~18	20~25	0	6~8	200~220
	中细砂	17.5~18.5	22~28	0	6~8	200~250

2) 水文条件

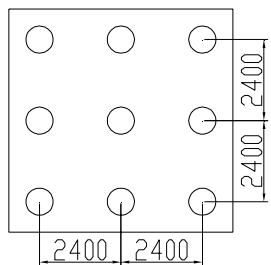
设计淹没水位 24.42m；冲刷深度 0.0m；淹没历时 30 天。

3) 锚塔基础作用力(设计值)

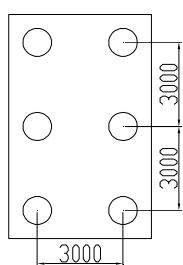
上拔力 (kN)	TX=972.53
	TY=1526.82
	T=6938.0
下压力 (kN)	NX=1059.8
	NY=1791.1
	N=8158.5

4) 锚塔桩基组合方案比较 :

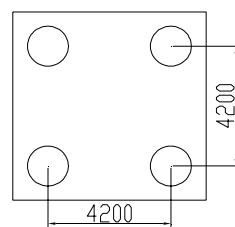
对相同的基础作用力与水文地质条件 , 选择以下三种桩基布置方案进行了比较计算 , 结果如下 :



方案一



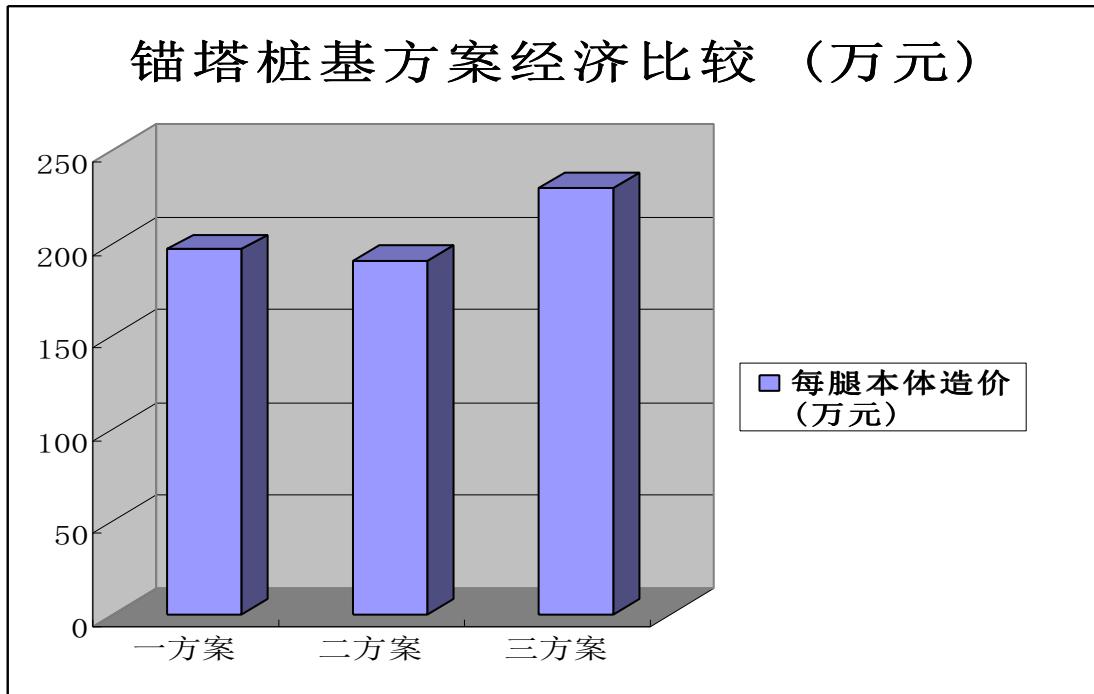
方案二



方案三

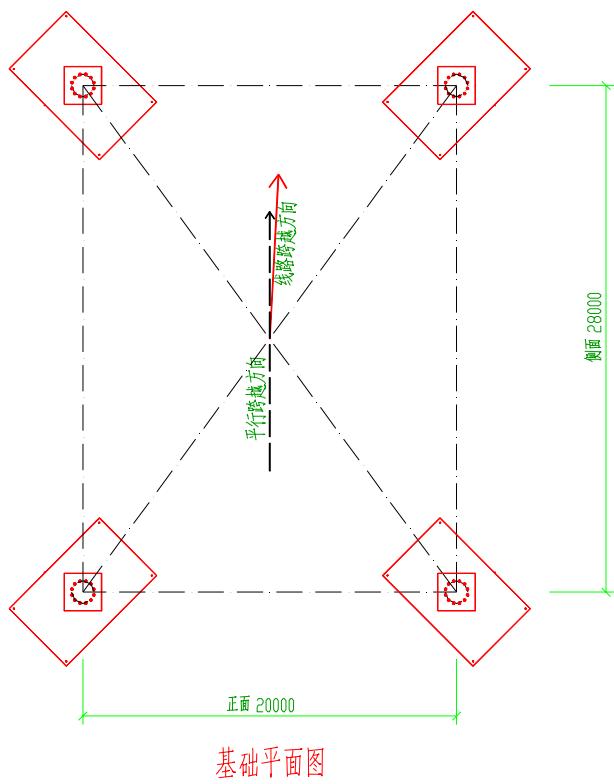
计算结果比较

方案	桩径 D(m)	埋深 (m)	每腿桩根数	桩间距(m)		每基基础材料量		每腿本体 造价 (万元)
				x	y	混凝土(m ³)	钢材(t)	
一	0.8	30	9	2.4	2.4	1108.1	145.2	197
二	1.0	36	6	3	3	1117.4	132.4	191
三	1.4	38	4	4.2	4.2	1469.2	138.1	230



从上面图表可以看出：方案三造价最高，比方案二高 20%左右不参加比较。方案一、二造价基本相当，方案一为 9 根桩/每腿，方案二为 6 根桩/每腿；桩径都在 1.0m 范围内；混凝土量相差不大。参照价格进行比较，方案二略优于方案一；方案一的单腿累加桩长为 270m，方案二的单腿累加桩长为 216m。从桩长和造价上看方案二较优，所以锚塔选用方案二桩基组合型式。

对于锚塔桩基，如果采用将承台旋转 45 度角的方案，并且将承台的长边与基础根开对角线平行布置（如下图），对承台和桩的受力有明显的减小，而且也降低了工程的综合造价。



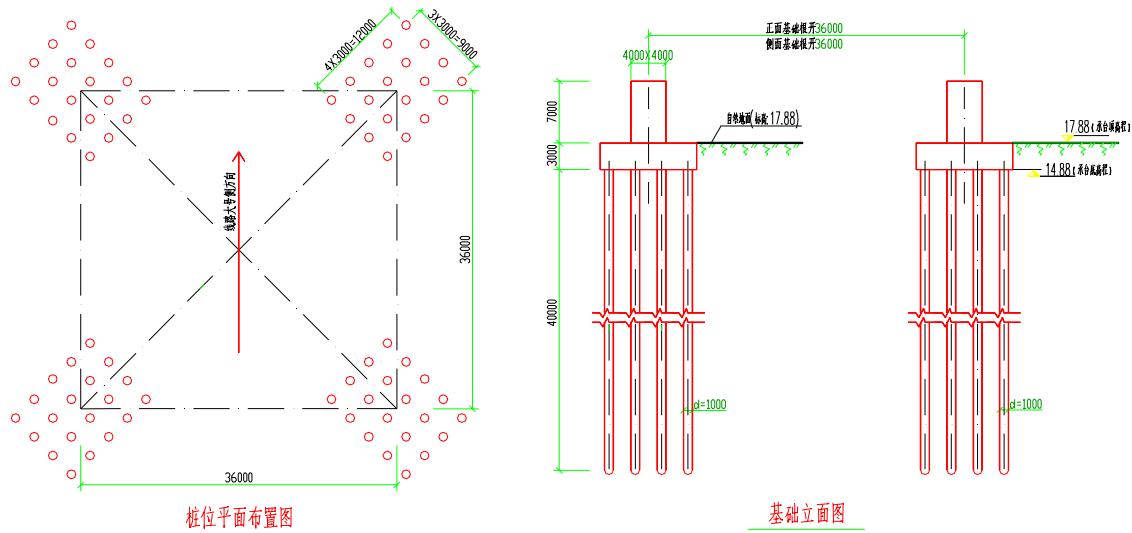
方 案	桩径 D(m)	埋深 (m)	每腿桩 根数	桩间距 (m)		每腿基础材料量		本体造价 (万元)
				x	y	混凝土 (m3)	钢材 (t)	
45°摆放型	1.0	36	6	3	3	1091.7	111.7	178
传统型	1.0	39	6	3	3	1129.4	130.4	191

上表表明：锚塔桩基承台成 45 度摆放比传统型摆放混凝土方量和钢材重量分别减少了 3.5% 和 16.7%，单腿造价降低了 7.3%。因此锚塔基础承台也应采用 45 度摆放。

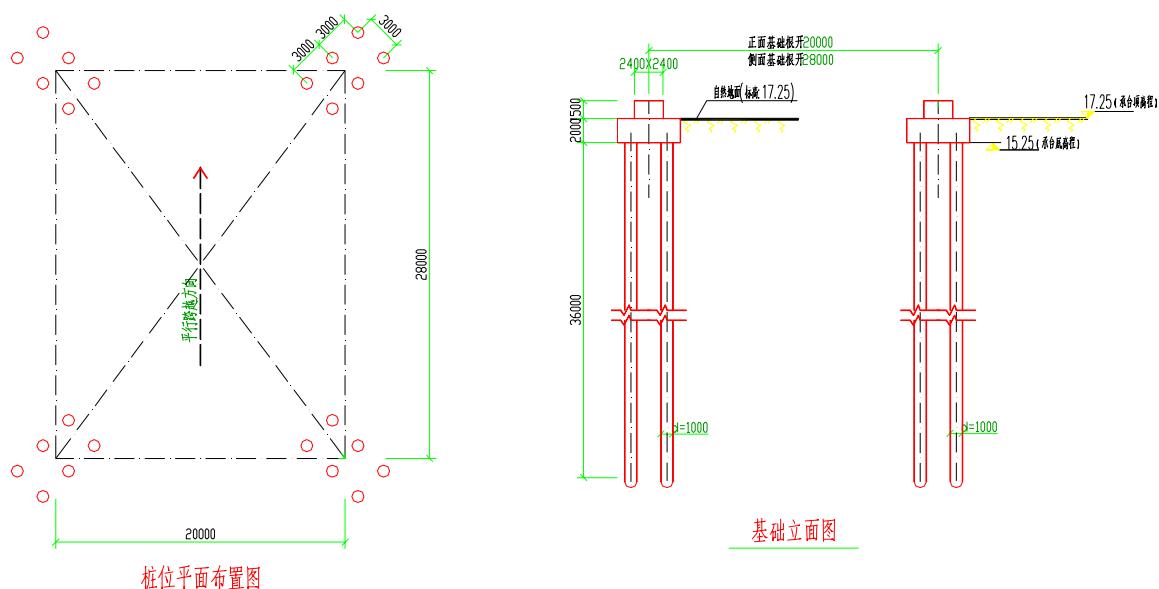
5) 优化结果

淮河大跨越锚塔选用了：桩径 1.0m 桩长 36m 每腿 6 根基桩低桩承台成 45 度摆放的组合式灌注桩。

淮河大跨越直线塔与锚塔配置使用的基础如下图。



直线跨越塔基础



锚塔基础

5 结语

以上依据淮跨工程对大跨越杆塔选型设计及基础选型设计过程进行了总结。与普通线路相比大跨越的特点就是重要系数高、投资大，所以要求设计过程更加严谨细致，杆塔或基础都要做多方案的技术经济比较。随着电力建设的发展，业主对设计行业的要求会越来越高，我们必须随着工程设计实践不断总结、学习、提高，以适应发展的需要。

