

主设人培训专题
架空送电线路基础选型及优化设计

1 基础受力特点分析

与民用建筑相比，输电线路杆塔基础在设计、施工与试验检测等方面都具有明显的行业特点，主要表现在以下几个方面：

(1) 输电线路距离长，跨越区域广，沿线地形、水文地质条件和地基土物理力学性质差异大，基础设计和施工时需要考虑的因素较多。

(2) 杆塔基础所承受的荷载特性复杂，基础在承受拉力和压力相互变化荷载作用的同时，也承受较大的水平荷载作用(水平荷载约占竖向荷载的 15%左右)。荷载特性，如荷载的大小、分布和偏心程度以及出现频率等都决定着基础受力状态，而荷载分布、地基土或岩土的工程特性、基础材料特性等决定了基础的工作特性。

(3) 输电线路杆塔基础施工现场具有分散性，受地形、地质、运输条件等限制和影响。如在山丘地区，大型施工设备和机具难以进入塔位施工现场，基础原材料运输困难。因此，基础设计时需考虑施工的实际情况。

(4) 输电线路基础呈点、线分布，地形地貌及地质情况复杂，传统建筑地基基础的检测方法与手段会受到不同程度的限制，采用何种基础检测方法也是设计中应考虑的问题。

在输电线路基础设计时既要满足抗拔承载力和下压承载力的要求，还需满足侧向稳定性的要求，而建筑等其它行业基础下压稳定性往往才是其设计的控制条件，两者有较大差异。另外，杆塔基础设计时，既要

利用地基土的承载力承受下压荷载，又要利用土的剪切强度(或重力)抵抗上拔力，只有充分发挥岩土的工程特性，设计的基础才是最优的。

2 基础型式选择和优化的基本原则

- 基础选型及优化研究的意义

- (1) 控制工程造价的要求

基础工程是输电线路工程体系的重要组成部分，它的造价、工期和劳动消耗量在整个线路工程中占很大比重。根据统计：输电线路基础工程施工工期约占整个工期的 50%，运输工程量约占整个工程的 80%，费用约占工程本体造价的 15%—20%。选择合适的方案并进行优化设计，将有效降低特高压直流输电线路的工程投资。

- (2) 线路安全运行的要求

送电线路基础设计的优劣关系整条线路的运行安全，一旦某个铁塔基础出现塌陷、滑坡、拔出等安全事故，整条线路运行将面临瘫痪。因此针对不同的基础负荷、地质及地形条件因地制宜选择基础型式，对保障线路的安全运行更是至关重要。

- (3) 环境保护的要求

不同的基础型式具有不同的特点，承载能力、材料耗量、土石方量以及对环境的影响等各不相同。对输电线路而言，各个塔位的微地形复杂且不尽相同，而工程建设会加剧自然环境破坏，因此需要根据塔位不同的地质、地形及周边环境因地制宜选择基础型式，充分利用每个基础的优点，减少土石方量，将工程对环境的影响程度降至最低。

- 杆塔基础设计的基本内容

杆塔基础的主要设计荷载包括竖向力(即上拔力和下压力)、横向水平力、纵向水平力以及由此产生的弯矩等。一般情况下杆塔基础设计内容包括上拔稳定性、下压稳定性、倾覆稳定性和基础自身强度等。

(1) 上拔稳定性

基础上拔稳定性就是计算杆塔基础抵抗上拔荷载的能力,工程上主要采用两种方法:土重法和剪切法。土重法主要依靠基础及基础底板上部土体的自重来抵抗上拔力的作用,其原理简单,计算简便。而剪切法不但考虑了基础的自重,而且充分利用了土体的抗剪切性状,在理论分析上较土重法合理。由于土体本身抗拔机理的复杂性,至今尚未完整地理论上对这一方法加以解决。

(2) 下压稳定性

基础下压稳定性就是计算杆塔基础承受下压荷载的能力。基础承受最大下压设计荷载作用时,要求基础底板下的地基应力不超过地基允许承载力,限制地基应力可保证地基土不会发生剪切破坏而失去稳定。计算地基在下压荷载作用范围内的地基应力及其变形,从而鉴定是否影响上部杆塔的正常使用寿命,以及是否需要改变基础的类型。

(3) 倾覆稳定性

基础倾覆稳定性就是计算基础抵抗倾覆荷载作用的能力。受水平荷载作用时,在地基受影响范围内,要求由基础被动区土体抗力产生的平衡力矩大于实际的倾覆力矩,保持基础的水平向稳定。

(4) 基础本体强度

基础本体强度是保证外荷载能有效通过基础传递至地基的必要条件。计算基础本体强度是以基础本身作为结构件进行的,它和一般构筑物(如钢结构、钢筋混凝土结构)的计算类似,可参照建筑结构规范进行

计算，并使得基础本体各个截面和部位以及与杆塔的连接强度都能满足要求。

● 影响杆塔基础设计的因素

基础设计是一个自始至终综合其适用性、经济性、环保性和施工可行性的过程，而影响基础设计的因素主要有：(1)地形地貌及水文地质条件；(2)基础荷载特性；(3)地基承载特性；(4)基础承载特性；(5)施工方法。

(1) 地形地貌及水文地质条件

地形地貌及水文地质条件是杆塔基础设计的前提，主要包括塔位处的地形地貌、有无不良地质作用及危害程度、地层结构及其均匀性、地基土层的物理力学性质、地下水埋藏及变化规律以及施工时地基土(岩)的变化特性等。地基土(岩)的工程评价是进行杆塔基础设计的关键。

(2) 基础荷载特性

基础设计时，荷载的主要变量不仅是其大小、加载的快慢和出现的频率，还要考虑荷载的分布和偏心程度等。因此，设计中不同类型的荷载需采用不同的分项系数或可靠性指标。

(3) 地基承载特性

地基土(岩)的承载特性直接取决于它们在不同荷载条件(如转角塔或直线塔)下的强度和变形特性。通常情况下，地基对持续荷载和短时荷载(包括施工荷载和检修荷载)的反应不同，例如：粘土在持续荷载作用下，将处于排水状态，而在短时荷载作用下则处于不排水状态。地基土参数是确定地基土(岩)的承载特性的主要依据，因此，如何测定和选

取土体参数，是保证基础设计合理可靠的前提条件。

(4) 基础承载特性

地基和杆塔基础是相互作用共同承载体。不同的荷载特性、地基土(岩)的承载特性(如有无软弱夹层或潜在破坏面)、基础材料等，都将影响基础的承载特性以及向地基传递荷载的方式。合理分析基础的承载特性对基础选型及优化是十分必要的。

(5) 施工方法

施工方法也是杆塔基础设计中需要考虑的一个重要因素，它直接影响基础的极限承载能力。随着对土体结构性的研究，人们逐渐认识到大多数土体由于在沉积过程中受到物理化学等成岩作用而具有一定的结构强度。合适的施工方法可以避免或减少对土体结构性的破坏，从而可以充分利用地基土体的承载能力；反之，如果施工方法不当，则会降低地基土的承载力。

● 基础型式选择的基本原则

杆塔基础设计的基本要求是确保基础的稳定性、安全性和经济性。基础设计包括两部分内容：

“设”一是综合地形地貌、水文、地质条件和基础受力性能等外部因素，对基础类型进行规划的过程；

“计”一是对规划的基础型式进行细化和量化的过程，也是对基础选型合理性的验证过程。

因此，在基础方案选择时，应遵循以下原则：

(1) 结合工程地形、地质特点及运输条件，综合分析比较，充分发挥各种基础型式的特点，选择适宜的基础型式；

(2) 在安全、可靠的前提下，重视环境保护和可持续发展战略，

基础型式的选择做到经济、环保，减少施工对环境的破坏；

(3) 对特殊地基条件，选用合适的基础型式和相应的处理措施；

(4) 基础选型应注重施工的可操作性和质量的可控制性；

(5) 结合沿线的地质水文条件，积极开展新型基础的研究。

● 基础优化的基本原则

基础优化是对规划的基础型式进行细化和量化。对选定的基础型式，通过经济性、环保性和耐久性等多方面的分析，在基础埋深、基础尺寸、与铁塔的连接方式、施工工艺、承载力计算模式等方面进行优化，优选出适合具体塔型、地形地貌及地基土（岩）的基础型式。

在基础优化时，遵循下面的原则：

(1) 充分考虑各种地形地貌、水文条件和地基土特性，优化基础埋深、底板和立柱尺寸等；

(2) 针对基础受力特点，采取立柱倾斜、地脚螺栓预偏心等有效措施，减少水平荷载对基础产生的弯矩，改善基础受力状态；

(3) 考虑到各塔位的微地形、水文地质条件的差异性和离散性，分别采取针对性措施，降低基础的工程量和工程投资。

3 基础型式选择

输电线路的基础型式总体可分为：开挖回填基础(阶梯型刚性基础、柔性平板基础等)、掏挖式基础、岩石基础等、桩基础等。各种基础型式都有其特点和优势，需要结合具体的工程地质、交通等情况来选择确定。

1) 开挖类基础

主要包括现浇钢筋混凝土类基础和装配式类基础。

装配式类基础一般使用在缺水及砂石采集较困难的地区，鉴于要考虑单个运输构件的最大重量和最大尺寸，设计前需做综合经济比较。由于构造限制，不能承受较大荷载。

现浇钢筋混凝土类基础是目前适用最广泛的基础，该类基础适用于线路一般地质情况下较差的塔位，施工难度较小。现浇钢筋混凝土类基础一般由主柱和底板组成，主柱分直柱和斜柱，底板分配筋和不配筋两种，组合成以下几种类型的基础：

- a. 直柱台阶式基础=直柱 + 不配筋的台阶式底板
- b. 直柱板式基础=直柱 + 配筋的台阶式底板
- c. 直柱扩展基础=直柱 + 配筋的连续变截面底板
- d. 斜柱板式基础=斜柱 + 配筋的台阶式底板
- e. 斜柱台阶式基础=斜柱 + 不配筋的台阶式底板
- f. 斜柱扩展基础=斜柱 + 配筋的连续变截面底板

以上六种为最常用的开挖现浇钢筋混凝土类基础,其中 a、b、d 为规范所列的基础类型，也是最常见的基础型式，c、d、f 是最近几年发展起来的基础型式，已在推广应用。

这类基础施工方法简便，是目前工程设计中最为常用的基础型式。但是存在很多不足，1) 土体扰动较大，回填土虽经夯实后亦难恢复到原状土结构强度，就抗拔性能而言不是理想的基础型式。2) 开挖量大、弃土易造成滑坡，影响基础稳定。3) 植被破坏和水土流失严重，塔位环境易破坏，从而影响基础稳定。4) 在山区斜坡地面处的塔基位置往往形成人工高边坡，容易崩塌滑坡造成基础滑移。

2) 掏挖类基础

主要包括掏挖基础（直掏挖、斜掏挖等）、人工挖孔桩基础。该类基础主要适用于无地下水的硬塑、可塑性粘土及强风化岩石的地质条件。该基础充分利用了原状土承载力高、变形小的优点，施工过程中避免了大量的土方开挖，减少了对环境的破坏。当基础埋深较大时，施工时往往需要护壁。

这类基础的特点是：1) 充分利用了原状土承载力高、变形小的特性；2) “以土代模”，土石方开挖量小、弃土少，施工方便，节省材料；3) 消除了回填土质量不可靠带来的安全隐患。存在的不足是：1) 对土质条件有一定的要求。2) 为了适应山区地形条件需要，有时需要抬高基础主柱高度，此时基础的抗倾覆稳定性往往难以满足，为此需增加基础埋深，扩大基础主柱直径；3) 掏挖对施工工艺要求高，施工安全性较差。

3) 岩石基础

岩石基础主要包括岩石锚杆基础（直锚式、承台式、斜锚式等）、岩石嵌固基础。岩石基础充分利用了岩石的力学性能，具有较好的抗拔性能，特别是上拔和下压地基的变形比其它类基础都小，在运输困难的山区更具有明显的经济效益。岩石基础对山区岩体和植被的完整性破坏较小，有效减小水土流失，能较好的保护生态环境。

这类基础的特点是：1) 施工工艺相对比较简便。2) 充分发挥了岩石力学性能，具有较好的抗拔性能，地基变形比其它类型都小。3) 以水泥砂浆或细石混凝土和锚筋灌注于钻凿成型，大量降低了基础材料耗用量，特别是运输困难的高山地区更具有明显的经济效益。存在的不足是：采用岩石基础须逐基鉴定岩体稳定性、覆盖层厚度、岩石坚固性及风化程度等情况，岩石地基的工程地质鉴定方面比较复杂。

4) 机械钻孔类基础（灌注桩）

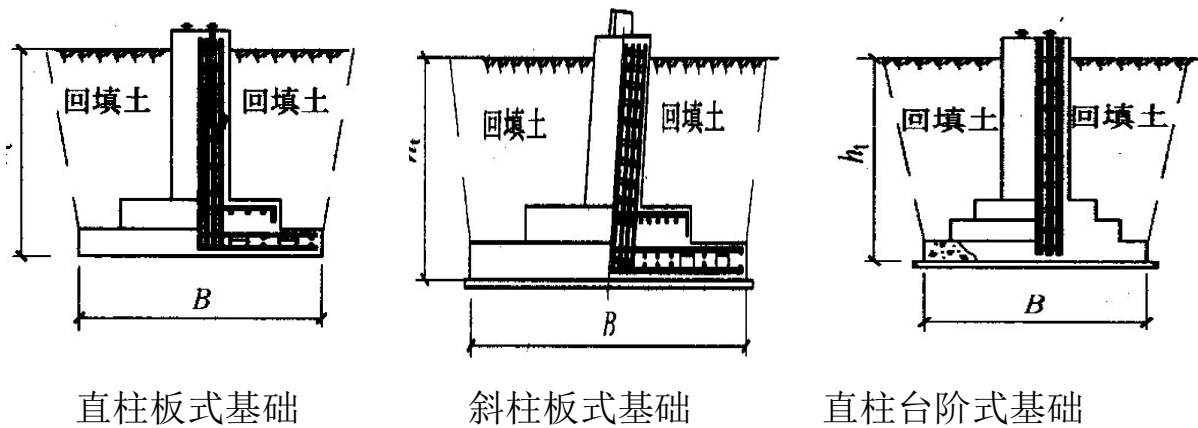
机械钻孔灌注桩以其适应性强、后期质量稳定、能承受较大荷载等优点广泛地应用于电网建设行业。该基础型式可以避免人工开挖时造成大面积的基坑塌方对周边农田的影响，避免人工开挖由于进度慢对地基扰动造成基础不均匀下沉。但是施工灌注桩的机具进出场费用高，综合造价高。

这类基础的特点是：1) 适用于地下水位高、地质条件较差、降水困难、浅基础无法满足要求的塔位，也广范用于跨河塔位。2) 在结构布置形式可分为单桩和群桩，在埋置方式上可分为低桩和高桩基础，可供设计选择的型式较多。存在的不足是：1) 施工需要大型机具，施工工艺要求较高、施工难度大；2) 施工费用较高。

4 各种基础形式的特点

4.1 开挖类基础型式

开挖类基础是指埋置于预先挖好的基坑内并用回填土夯实的基础。它以扰动后的回填土作为抗拔土体保持基础的上拔稳定，基坑采取“开挖一回填”的施工方式，基坑的土石方开挖量较大，对植被的破坏较原状土基础严重。但由于原状土基础使用的局限性，开挖回填类基础目前仍是输电线路基础中最常用的一种基础型式，一般地质条件均能使用。这种基础型式在各种电压等级的输电线路中已广泛应用，设计及施工经验非常成熟。目前国内使用较多的开挖回填类基础型式主要有下图所示几种。



1) 直柱板式基础

直柱板式基础是输电线路工程中使用较多的一种基础型式，当地基承载力较低时，通过加大底板面积来减小基底的附加应力，使基础满足下压承载力要求。

该基础型式往往通过地脚螺栓与杆塔连接，为减少水平荷载对基础产生的基底弯矩，可预先给地脚螺栓设置一定的偏心值，使下压或上拔力产生的弯矩抵消一部分水平力产生的弯矩，以改善基底受力，从而降低基础混凝土用量和钢材用量。

地脚螺栓偏心值的设置应根据水平力与上拔或下压力的比值、基础埋深及基础露头高度综合考虑，以免基底产生反向弯矩，即下压或上拔力产生的基底弯矩大于水平力产生的弯矩（ $FE > H(h + h_1)$ ）。

对于直柱板式基础，虽然通过地脚螺栓偏心设置这一措施，可以部分抵消水平力产生的弯矩，但地脚螺栓偏心设置时一般需要增加基础主柱宽度，相应的混凝土量也会增加。当基础作用力较小、基础主柱尺寸较小时不宜采用地脚螺栓偏心设置。

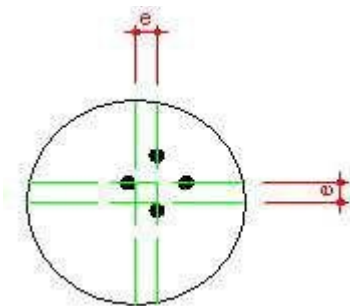


图 5.1—4 地脚螺栓偏心

2) 直柱台阶式基础

直柱台阶式基础立柱配置钢筋，底板不配钢筋。为满足刚性角要求（台阶的宽高比均不大于 1.0），通过增加台阶数和台阶高度来增加底板宽度。刚性台阶基础与扩展斜柱板式基础相比，施工简单、周期短和耗钢量小，但其混凝土用量比板式基础明显偏高，相应运输成本较大，综合造价较高。

3) 斜柱板式基础

对于土质较软，不能掏挖成型地段，采用斜插式柔性基础。将塔腿主材直接伸入基础最底部，且令基础主柱与铁塔主材在顺线路和垂直线路方向的坡度一致，从结构受力分析，由于立柱与塔腿主材坡度一致，铁塔对基础作用轴向力可以沿立柱方向直传底板中心，从而减少了作用于柱顶的水平力，也相应地减少了主柱弯矩。由于塔腿主材伸入基底将主材产生的水平力直接传给最下层底板，由底板与地基之间的摩擦力和底板侧面的土抗力抵消掉，这样就大大减小了基础顶面的水平力，使基础主柱的混凝土截面很小、主柱配筋非常经济；同时也减小了基础底板的边缘应力，可使底板设计得很薄而抗弯钢筋的配筋量不大。

4) 斜柱台阶式基础

斜柱台阶式基础的特点是基础主柱与铁塔主材坡度相同，基底是多层素混凝土台阶，这种基础型式的优点基本同插入板式基础，但基础底板不需要钢筋绑扎，施工工序比插入式基础要简单一些，钢筋加工、绑

扎的工作量也比插入式基础少，但混凝土浇筑量相对较大，同样要支模板并进行人工养护，施工工期长。适用于基础荷载不大，地下水比较丰富，施工周期要求短的工程。

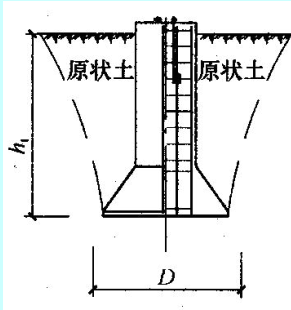
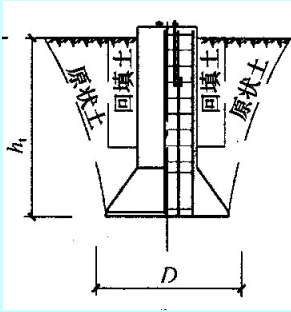
4.2 掏挖类基础型式

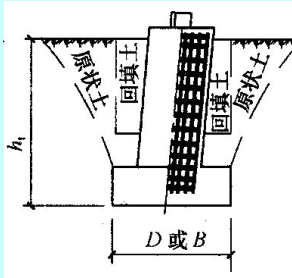
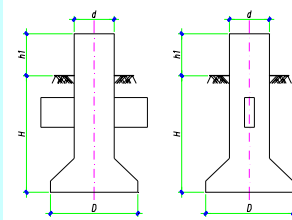
掏挖类基础主要包括掏挖基础（直掏挖、斜掏挖等）、人工挖孔桩基础。

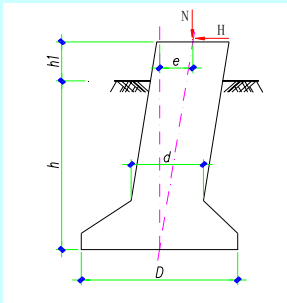
掏挖基础主要适用于无地下水的硬塑、可塑性粘土及强风化岩石的地质条件。基础施工时以土代模，直接将钢筋骨架和混凝土浇入掏挖成形的土胎内，充分利用了原状土承载力高、变形小的优点。施工过程中避免了大量的土方开挖，减少了对环境的破坏，同时避免了对土体的过分扰动，能充分发挥地基土的承载性能，大幅度节约基础材料和施工费用。

掏挖基础常用的有直柱全掏挖基础、直柱半掏挖基础、斜柱半掏挖基础。上述三种基础为规范所列的掏挖基础型式，近几年掏挖基础又发展出斜柱全掏挖基础和带挡板掏挖基础。上述各类基础型式的特点及其适用范围见下表。

掏挖类基础常用基础型式及其特点一览表

基础型式	基础简图	基础组成	受 力 特 点	适用情况
直柱全掏挖基础		配筋直柱+不配筋的圆台底板	1) 以天然土构成的抗拔土体与基础自重相互作用而保持基础的上拔稳定，最大限度地利用了天然原状土的强度，具有良好的抗拔性能和较大的横向承载力。2) 由于原状土基础可考虑侧向土对基础的对有利影响，相同基础尺寸时，立柱及基础底板的弯矩均小于开挖回填基础，从而减少了立柱的钢筋配置，改善了基底受力。	1) 各类掏挖基础适用的地质条件基本相同：地下水不高且开挖时易成形不坍塌的土质。 2) 直柱全掏挖基础是使用最广泛的基础型式，也是最早使用的基础型式。
直柱半掏挖基础		配筋直柱+不配筋的圆台底板	1) 是针对大荷载作用下全掏挖基础的一种改进型式。当基础作用力较大时，全掏挖基础主要受下压强度控制。需要较大底板尺寸，而增大底板就会导致立柱尺寸随之增大。采用立柱部分开挖回填方式，可以通过增设台阶的方式底板尺寸	3) 当下压荷载较大时，需要扩大底板，半掏挖基础

基础型式	基础简图	基础组成	受 力 特 点	适用情况
			加大。有效解决底板的正截面承载力问题。 2) 采用半掏挖，原状土的抵抗力未被充分利用。	解决了下压荷载较大的问题，基础立柱
斜柱半掏挖基础		配筋斜柱+不配筋的圆台底板	1) 具有直柱半掏挖基础的特点，基础立柱尺寸可不受底板尺寸的限制，直柱改斜柱后垂直轴线的水平力减少 80%以上，而轴向作用力仅增大 1%~2%，大大改善了立柱、底板的受力状况，降低了混凝土及配筋用量。 2) 采用半掏挖，原状土的抵抗力未被充分利用。	尺寸可不受底板尺寸的限制。 4) 在基础立柱加高处，为使侧向稳定满足倾覆稳定性采用带挡板直柱掏挖基础。
带挡板直柱掏挖基础		配筋直柱+柱侧挡板+不配筋的圆台底板	其基坑仍然采用掏挖成型的施工方法，保留了掏挖式基础的各项优点，并针对掏挖式基础当荷载加大、立柱加高时侧向稳定不能满足倾覆稳定性的特点，设置侧向挡板，利用侧面原状土的土抗力，抵消水平力产生的倾覆弯矩，从而减小了基础	5) 斜柱全掏挖基础综合了斜柱基础和掏挖基础的优点。是掏挖基础

基础型式	基础简图	基础组成	受 力 特 点	适用情况
			柱身的弯距和基础底部的偏心应力，提高了基础的侧向稳定性和承载能力。	的最新发展方向。
斜柱全掏挖基础		配筋斜柱+不配筋的圆台底板	1) 具有斜柱基础的优点： 垂直斜柱轴线的水平力减少 80%以上，而轴向作用力仅增大 1%~2%，大大改善了立柱、底板的受力状况，降低了混凝土量配筋量。 2) 具有全掏挖基础的优点。	

1) 掏挖类基础与开挖类基础的比较

与开挖回填基础相比，掏挖式基础具有以下优缺点：

- a) 最大限度地利用了天然原状土的强度承受上拨、下压及水平力。
- b) 大大减少基础的土石方开挖量，由于底板不配筋，因此也节省了钢筋的用量。
- c) 施工方便，机械搬运量少，节省了模板，免除了回填土的工序。
- d) 对原状土和基面植被破坏较少，减少了水土流失。
- e) 地质条件要求较高，适用于地质条件较好、地下水低且开挖时易成形不坍塌的土质。

使用受荷载条件限制，荷载较大时，基础混凝土用量较大。在大荷载作用下（特别是转角塔），掏挖式基础混凝土用量明显大于直柱板式基础，经济性不如后者。

2) 带挡板的直柱掏挖式基础

山区、丘陵等地区线路一般采用不等高基础与铁塔长短腿的配合使

用，这种情况下，需要将基础立柱加高，在原地面直接开挖。随着基础立柱的加高，基础的侧向稳定性就成为直柱掏挖式基础的控制因素，为满足倾覆稳定性的要求，往往需增大基础埋深及立柱直径，导致混凝土量大大增加。

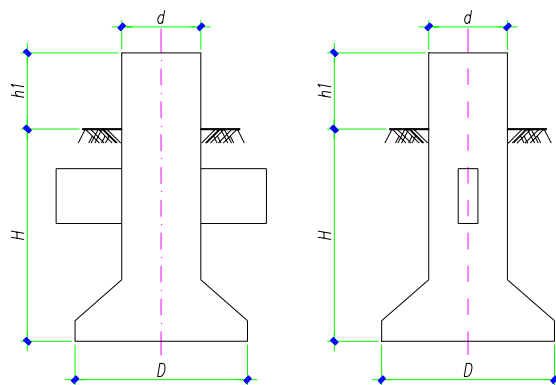


图 5.2-1 带挡板掏挖基础示意图

针对这种情况考虑设计一种新型带挡板的掏挖式基础，如上图所示。其基坑仍然采用掏挖成型的施工方法，保留了掏挖式基础的各项优点，并针对掏挖式基础当荷载加大、立柱加高时侧向稳定不能满足倾覆稳定性的特点，设置侧向挡板，利用侧面原状土的土抗力，抵消水平力产生的倾覆弯距，从而减小了基础柱身的弯距和基础底部的偏心应力，提高了基础的侧向稳定性和承载能力。

挡板的使用同时也限制了该基础型式的使用条件，使用时对地形有较高的要求，一般只能用于地形对主柱露头有要求、同时塔基不是很陡有条件设置挡板的地区。

3) 斜掏挖基础

斜掏挖基础具有斜柱基础的优点：垂直斜柱轴线的水平力减少 80% 以上，而轴向作用力仅增大 1%~2%。相对直掏挖基础而言，斜掏挖基础节省混凝土量 3%~5%，节省钢筋量 30% 左右，基础本体造价节省 4%~8%，具有较好的经济性。但是，斜掏挖基础开挖深度较大，施工困难，容易

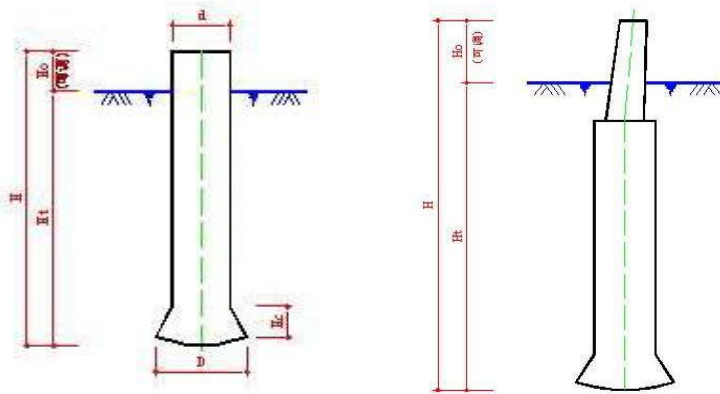
塌孔，存在安全隐患。

4) 直柱掏挖基础采用地脚螺栓偏心设置

当采用直柱掏挖基础时，地脚螺栓采用偏心设置，其原理与开挖类直柱基础采用地脚螺栓偏心设置类似。

5) 人工挖孔桩基础

人工挖孔桩基础属于深基础，在场地狭窄、高差较大，杆塔减腿不足需要加高基础主柱，基础外负荷较大的塔位使用时具有明显的优势，另外该基础施工开挖量较少，施工对环境的破坏小，能有效保护塔基周围的自然地貌。以往人工挖孔桩由于基坑开挖需增设护壁，施工技术要求较高，人员施工难度较大等因素，在常规 500kV 输电线路中较少采用，但随着近几年施工设备的改进、施工工艺的提高，施工人员的安全保障措施不断完善，从一定程度上弥补了该型基础施工上的不足。值得提出的是深基础的受力特性与土质有较大的关系，有必要结合具有代表性的土质进行这类基础的真型试验，以便为设计提供更完善的指导。



参照国外经验，可将人工挖孔桩基础优化为上图所示的斜柱人工挖孔桩基础，其上部采用斜立柱型式，下部采用扩底直柱型式。上部斜立柱既可解决塔位表层浮土侧向抵抗力低的问题，又可具备斜柱基础的结构特点；下部可充分发挥原状土的优势，利用埋深有效提高基础的上拔和下压稳定。该基础型式与直柱挖孔桩基础相比，可降低 20%混凝土，综合费用节约 15%，具有较好的经济性，特别是交通运输不便时，施工

更显效益。但是在斜柱与桩顶的连接处，会出现应力集中现象，在基础设计时应对这个部位进行验算及加强。

4.3 岩石基础型式

对微风化、中风化岩石，过去常采用放炮先把岩石炸松后，再进行人工开挖，由于放炮后，岩石整体性被破坏，在基础设计时只是利用了岩石良好的地耐力，而对抗上拔力只是利用了岩石的重力，造成了在岩石十分好的山区，基础尺寸也减少不多，混凝土方量仍然很大的现象。另一方面，采用放炮后，对周围的环境有影响，对山体稳定也有较大的破坏。

因此，岩石地基最好的基础型式就是采用岩石基础。这类基础以水泥砂浆或细石混凝土和锚筋灌注于钻凿成型的岩孔内的锚桩或墩基础。它具有较好的抗拔性能，特别是上拔和下压地基的变形比其它类基础都小。这类基础由于充分发挥了岩石的力学性能，从而大量的降低了基础材料的耗用量，特别在运输困难的高山地区更具有明显的经济效益。

采用岩石基础必须逐基鉴定岩体的稳定性、覆盖层厚度、岩石的坚固性及岩石风化程度等情况，需要地质人员密切配合。

1) 岩石锚杆基础

岩石锚杆基础其原理是将钢制锚杆埋入岩石孔中粘结形成的基础型式，通过压力二次灌浆将混凝土压入预先钻孔后锚杆定位好的岩孔中，适用在微风化及中等风化且岩体完整的硬质岩地层。对于砂性土和碎石土根据实际成孔条件，也可以有选择地使用锚杆基础。岩石锚杆基础充分利用了岩石自身的强度，具有挖方和弃土量少，材料运输量小，施工简单，施工周期短，钢材和混凝土用量少，节省投资，不破坏山区岩体和植被的完整性，防止水土流失，较好的保护生态环境等特点。相对于岩石嵌固基础，其材料量可降低 $1/2 \sim 1/3$ 。

2) 岩石嵌固基础

岩石嵌固基础是使基础底部嵌固于基岩中，充分利用岩石的剪切能力，以达到提高基础抗拔能力的目的，主要用于软质岩石、强～中风化及有覆盖层的岩石地区，特别适用于抗剪强度小于 30kN/m^2 的岩石地基。由于基础主柱高度可调性较大，能填补杆塔长短腿与自然地形、地貌之间的差距，可以做到不平整施工场地而直接开挖，对保护塔基环境起到良好作用。

岩石锚杆基础、岩石嵌固基础在山区线路工程中已大量使用，具有成熟的设计、施工、运行经验。

4.4 平原河网地区、跨河地区的基础型式

平原河网地区、跨河地区，地下水埋深较浅，地基承载力不高，尤其可能会在土层中夹有淤泥质粉质粘土，呈软塑～流塑状态，有的地方还会出现流沙坑、泥水坑，在基础开挖时易塌方，难以成形。

在以往 500kV 输电线路工程中，为了降低工程造价，常采用浅埋式的平板基础。在基础开挖时，施工单位一般从经济利益出发，不采取任何边坡保护措施，这样常会造成四个基础连成一片，形成很大的开挖面积，土方量与混凝土之比往往超过常规的 6:1 达到 10:1 以上，对农田和周边环境造成较大的影响。这样开挖带来二个问题，一是容易造成基础偏移；二是容易对持力层产生扰动，造成基础不均匀沉降。

1) 钻孔灌注桩基础

钻孔灌注桩以其适应性强、后期质量稳定、承载力大等优点广泛地应用于电网建设行业。钻孔灌注桩可以避免人工开挖时造成大面积的基坑塌方对周边农田的影响，避免人工开挖由于进度慢对地基扰动造成基础不均匀下沉。但是施工灌注桩的机具进出场费用高，而人工费用低，综合造价高。对于淤泥层比较厚，地基承载力低的地质情况钻孔灌注桩是最好的选择，灌注桩基础不需要开挖，土方量与混凝土之可以控制在 1.25:1，灌注桩基础施工时处理好泥浆就不会对环境和农田造成影响。

钻孔灌注桩有单桩、双桩承台、多桩承台和四桩连梁等多种形式，在实际设计上要根据地质情况和基础作用力做方案比较，以取得经济性和安全合理性的最佳结合。

由于桩基础大部分都是受下压力和水平力控制，设计中可以采取基础主柱地脚螺栓偏心布置或承台柱偏心布置的方式。在国外的工程设计中，常见到承台斜柱灌注桩基础型式，用插入角钢方式连接。这样水平力可以直接传到承台上，承台柱只需受拉压，同时减少桩的弯矩。

2) 复合式沉井基础

沉井基础在桥梁工程中应用较多。沉井的特点是能防止地下水和地表水浸入基坑，特别是能阻挡流沙的流动，保证基坑成型，减少对软土地基的扰动。

复合式沉井基础属于刚性基础，由上、下两部分组成，上部分为方形二台阶，下部是薄壁钢筋混凝土圆形沉井，沉井顶端露出的钢筋伸入上部台阶底板与之相连，构成一个不同于桩基又不同于阶梯式基础的复合式基础。其工作机理介于桩基与阶梯式基础之间的状态，其上拔稳定由基础自重、台阶上的土重、井内填土重和沉井外壁与土壤间的摩阻力来平衡。下压稳定由沉井底面和上部台阶底板(沉井面积除外)的反力以及沉井外壁与土壤间的摩阻力来平衡。倾覆力矩由基础自重产生的抗倾覆力矩来达到规定的稳定安全要求。

复合式沉井基础外形如下：

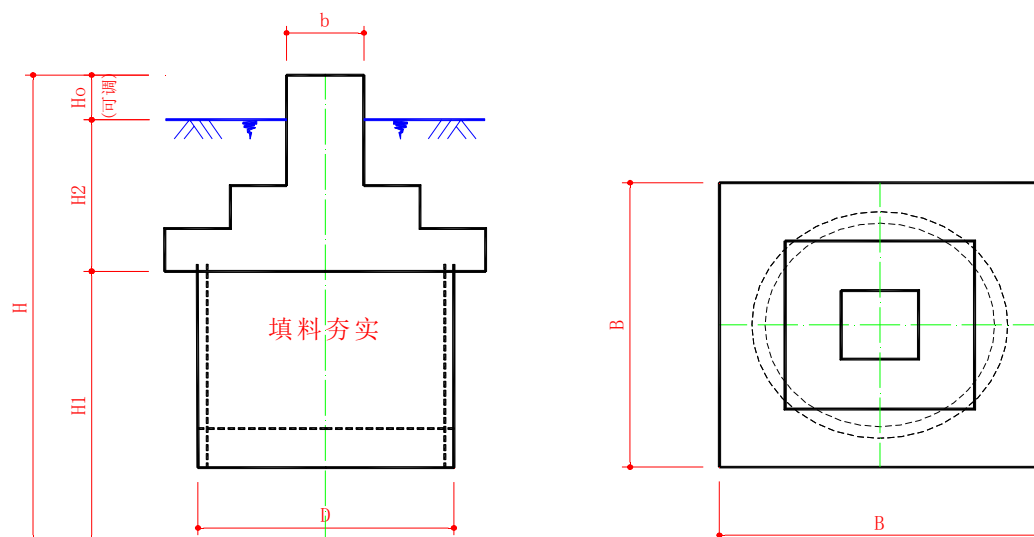


图 5-4.3 复合沉井基础

由于复合式沉井基础现场工作量大，施工难度大，因此，工程中不建议大规模采用复合沉井基础。

5 基础设计优化

5.1 基础尺寸优化

(1) 基础经济埋深

参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002) 对基础埋置深度的要求，影响线路基础埋深的因素主要有：①地基持力层选择；②基础承载力、变形和稳定性要求；③地下水位等。综合各影响因素，结合各个塔位的施工条件及各种基础型式的临界埋深，我们可以确定出基础的最小埋深和最大埋深，然后在这范围内通过下压强度、上拔稳定两个控制条件，求解出一组符合条件的埋深和底板宽度 (H_i , B_i)。

根据求出的各 (H_i , B_i) 组合，通过比较基础混凝土、钢筋等材料用量和土石方量，可优化出综合造价最省的一组 (H , B)，从而得出基础的最优经济埋深和相应的底板宽度。

（2）基础底板尺寸

基础底板尺寸包括底板的宽度和厚度。基础底板宽度应与基础埋深综合考虑，由上述方法综合确定一组最优基础埋深和底板宽度。

底板厚度的取值主要考虑冲切承载力要求和构造要求。冲切承载力要求按《基础规定》第 9.3.3 条计算，构造要求是指符合《基础规定》第 9.3.1 条的要求，即底板的宽高比不大于 2.5。一般为减少基础混凝土量，先取宽高比为 2.5，进行冲切承载力验算，求出最优的底板厚度。

（3）基础立柱断面尺寸

一般情况下，基础立柱高度较高，基础立柱断面尺寸的选择对基础的经济指标也有较大影响。在满足构造要求的前提下，应尽量减小立柱断面尺寸，以达到减少混凝土量和立柱配筋量的目的。

基础与铁塔采用不同的连接方式，立柱的构造要求也不同。

对塔脚板式连接方式，立柱的最小宽度主要由以下三个条件控制：

（1）塔脚板大小：塔脚板边缘至基础边缘的距离不应小于 100mm。

（2）地脚螺栓间距及型式：地脚螺栓中心至基础边缘的距离不应小于 4 倍地脚螺栓直径，且不应小于 150mm。地脚螺栓下部带锚板的还需校核锚板与立柱主筋间的净距（一般不应小于 50mm）。

（3）地脚螺栓偏心：地脚螺栓偏心的基础，在上述考虑的前提下还应加上地脚螺栓偏心值。

对插入角钢式连接方式，立柱断面尺寸基本不受构造控制，主要是对锚固深度有一定要求。

5.2 地脚螺栓预偏心设置

对于采用地脚螺栓与铁塔连接的直柱基础，为减少水平荷载对基础产生的基底弯矩，可预先给地脚螺栓设置一定的偏心值，使下压或上拔力产生的弯矩抵消一部分水平力产生的弯矩，改善立柱及基底受力，从而降低基础混凝土量和钢筋量。

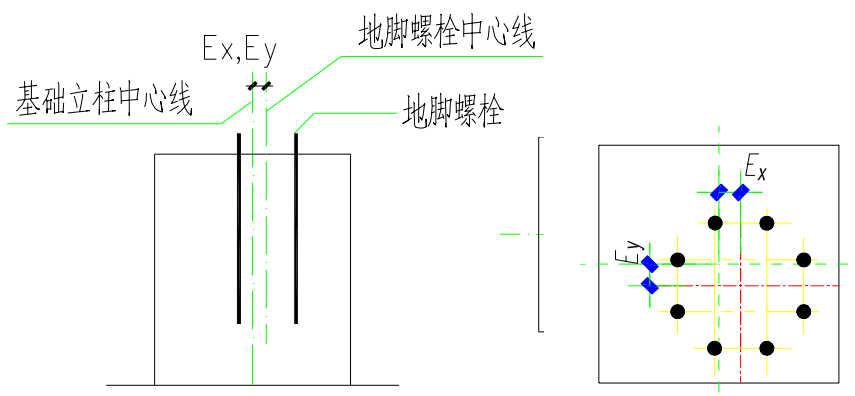


图 5.2-1 地脚螺栓预偏心设置示意图

对开挖回填基础，地脚螺栓设置偏心值后，基底的最大压应力可按下列公式计算：

$$P_{\max} = \frac{F + \gamma_G G}{A} + \frac{M_x}{W_y} + \frac{M_y}{W_x}$$

$$M_x = H_y (h + h_1) - F E_x$$

$$M_y = H_x (h + h_1) - F E_y$$

其中： H_x ， H_y ， E_x ， E_y 为基础立柱顶面的水平力和地脚螺栓的偏心值， h 为基础埋深， h_1 为基础露头高度。

5.3 基础立柱倾斜

输电线路铁塔基础除承受较大的竖向下压或上拔荷载外，还同时承受着较大的水平荷载（水平力占上拔力或下压力的 20% 左右）。为满足基础的下压和上拔稳定性，基础底板较宽，埋深也较大，水平荷载对基础产生较大的倾覆力矩。为减少水平荷载的影响，改善基础受力状态，除采用地脚螺栓预偏心外，倾斜基础立柱则是另一种常用手段。

立柱倾斜时，一般控制斜柱基础中心的斜率与铁塔塔身坡度相同，使基础水平荷载对基础底板的影响降至最低。经计算分析和过往相关工程经验，在相同荷载情况下，基础采用斜柱式后，一般与基础轴线垂直的水平力减少 50% 以上（多则可减少 70%~80%），而轴向基础作用力仅增大 1%~2%，从而大大改善了基础立柱、底板的受力状况，基础的侧

向稳定性得到显著提高，同时也较大地降低了混凝土和钢筋用量。

5.4 铁塔与基础连接方式

线路工程中铁塔与基础的连接方式主要有塔脚板式和插入式，两种连接方式各有利弊。

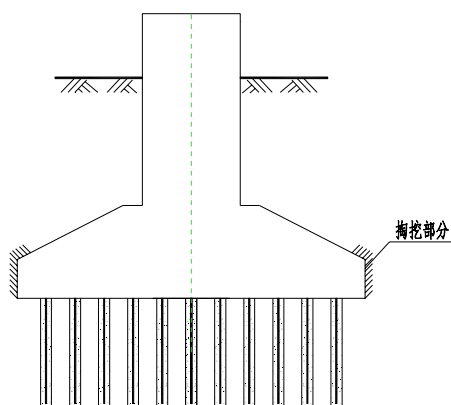
采用塔脚板式连接方式，施工精度容易满足，施工技术也比较成熟，但对一些大的输电线路，塔脚板厚度较大，焊接难度及工作量较大，同时基础水平力对基础立柱断面大小、配筋都有较大影响。

采用插入式连接方式，杆塔荷载通过插入角钢传入基础，结构简单，传力直接，但插入角钢的加工必须与基础施工同步，同时施工精度要求较高。从传力原理和经济性角度而言，插入式连接方式具有一定的优势。

5.5 岩石锚杆基础的优化

对位于岩性较完整的微风化、中风化岩质地基上的杆塔，即使采用岩石锚杆基础，也需有承台和埋深才能满足基础下压、上拔和侧向稳定性的要求。岩石锚杆基础的立柱及承台一般采用开挖方式施工，放炮后岩石整体性被破坏，基础利用岩石力学性能有限，不利于基础尺寸的优化。

实际上，基础承台可分区域采取不同施工方法成形。对于锚杆施工范围内的承台，由于锚杆施工要求必须开挖成形；但对于承台根部，则可采用人工掏挖方式施工，这样可避免对地基岩层造成过多的破坏和扰动，从而达到充分利用地基岩层承载特性的目的。

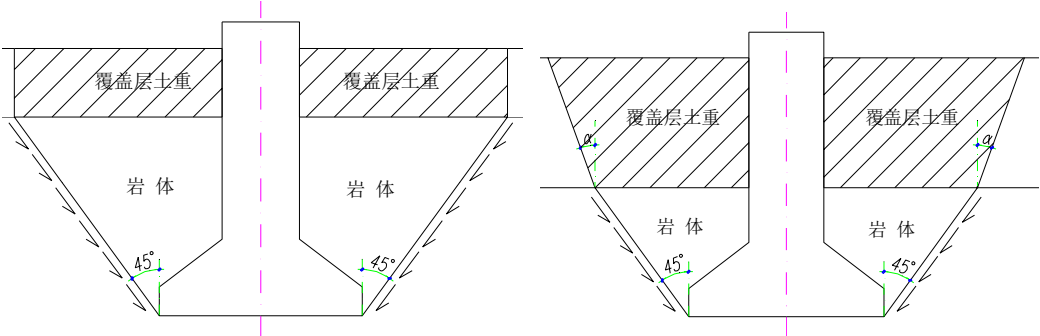


岩石锚杆基础承台根部采用掏挖成形示意图

采用此种施工工艺后，由于根部承台与地基岩层嵌固作用的有利影响，可有效减小水平荷载对基础的影响，改善整个基础底部的受力性能，使基础底板及锚杆基本处于轴心拉压的状态，降低岩石锚杆基础的材料耗量。

5.6 岩石嵌固式基础抗拔计算模式的优化

对于强风化岩石地基，采用岩石嵌固基础。在计算其抗拔承载力时，通常假定岩石中破裂面为 45° 倒锥体，以均匀分布于倒圆锥体表面的等代极限剪切应力的垂直分量之和来抵抗大部分基础上拔力，而对覆盖层仅考虑破裂面上方竖直圆柱体内的自重，如图中的阴影部分。



(a) 常规方法 (b) 覆盖土层按掏挖式基础模式计算

岩石嵌固基础上拔承载力计算模式的优化

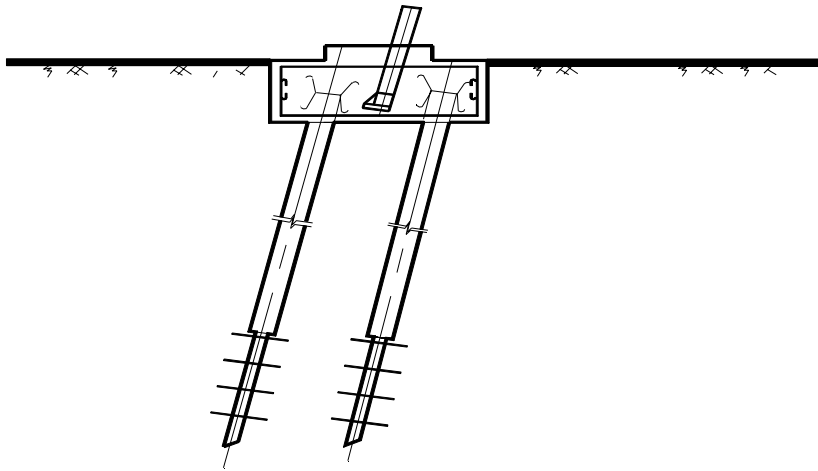
强风化基岩面之上分布有 5m 以上厚度的粉质粘土和粉质粘土混碎石层，其工程力学性状较好，地基承载力达 $f_{ak}=160\sim220\text{kPa}$ 。对于这类区域塔位，在计算岩石嵌固基础上拔承载力时，基础上半部土中部分按掏挖式基础考虑，而基础下半部仍按岩石嵌固基础公式计算。基础上、下两部分各自承担的上拔力，则由覆盖土层和岩体在基础有效埋深内的厚度比例确定。上拔承载力计算模式如图 (b) 所示。

对比两种抗拔承载力计算模式可知，当上覆土层不厚且土质较差时，由于覆盖层承担的上拔力有限，两种计算模式所得结果差别不大。但当上覆土层较厚、工程力学性质较好，而基岩浅层风化程度又较高时，

覆盖土层将承担相当一部分上拔力，上覆土层的抗拔作用按掏挖式基础模式计算将更为合理。按此模式计算时，可进一步减少基础的整体埋深和缩小底板尺寸，以达到降低基础投资的目的。

6 特殊的基础形式

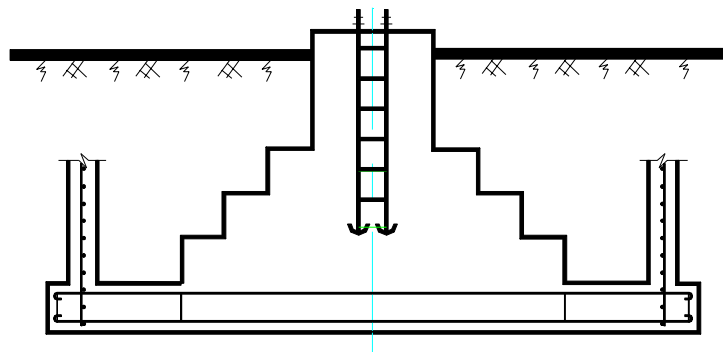
6.1 旋锚桩基础



旋锚桩基础示意图

旋锚桩是由主钢管与螺旋叶片焊接而成。使用专用机械拧入地下，再通过桩顶承台与塔脚连接组成旋锚桩基础来承受铁塔负荷，根据基础负荷大小旋锚桩可以由单桩或多根桩组成。这种基础的优点是不用开挖基坑，施工速度快。在接近流塑状态的淤泥土质中一般需大开挖施工的基础型式很难施工，而灌注桩基础由于自重大，在侧壁摩阻力和桩端承载力很小的淤泥土质中就显得不经济。旋锚桩设计可以根据土壤的软弱程度对在土中起支撑作用的螺旋片直径和间距进行优化设计，使桩侧的界面摩阻转化为沿螺旋片外边缘土壤的剪切破坏，这样能较大地提高旋锚桩的承载能力。我院在国内外均做过旋锚桩基础试验，在孟加拉国 230kV 双回线路工程和国内 500kV 昌安二回工程中实施应用，有一定的设计和使用经验。

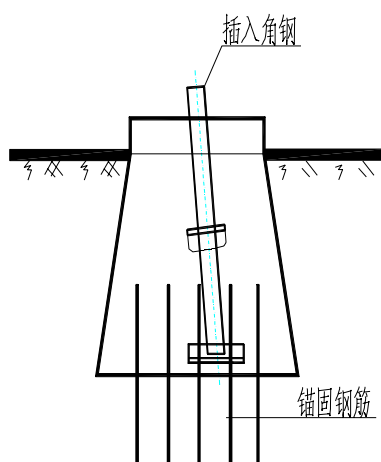
6.2 半沉井基础



半沉井式基础示意图

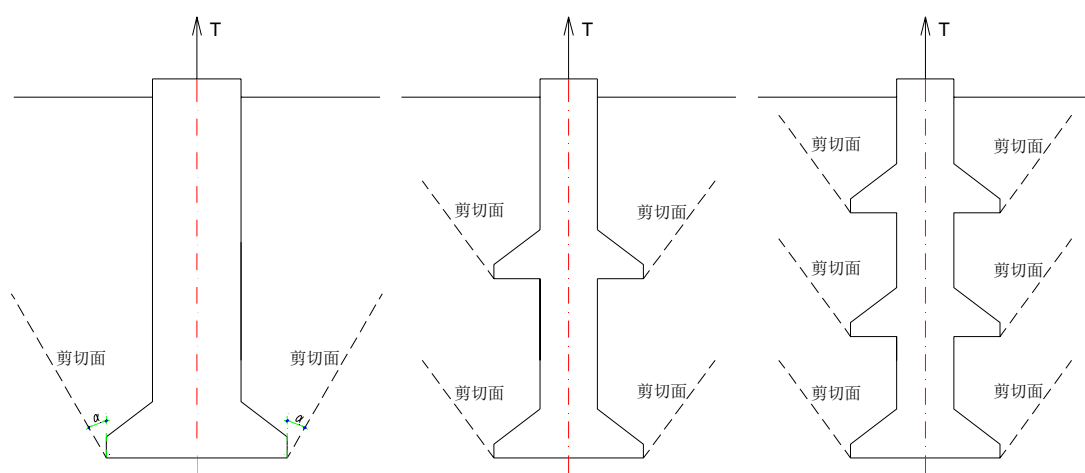
半沉井式基础就是首先在塔位地面上预制混凝土档土圈，然后在圈内开挖，当档土圈下沉到基础设计深度后通过预置在档土圈内的钢筋与基础底板及主柱联为一体。这种基础型式的特点是使档土圈首先在基坑开挖过程中挡住泥砂塌方使基坑顺利成型，且保证施工人员安全，然后又作为整个基础的一部分参加抵抗外负荷工作，既方便了施工又节约了材料。在地下水扰动的粉土地质或淤泥、流砂地质做大开挖基础克服基坑大面积塌方是施工中的一大难题，在以往工程中发生过因个别塔位基础施工难度大而拖延工期和基坑塌方造成人身事故的事例。我院在昌～房 500kV 紧凑型线路和天津盘滨 500kV 线路中流砂地质的大负荷转角塔采用了这种基础型式，总体效果很好，而且我们在设计和施工方面都总结了比较成熟的经验。半沉井式基础可作为基坑开挖极为困难时的改型基础。

6.3 岩石锚筋基础



随着环保概念的日益提高，山区基础要求做到尽量符合地形地貌，不能破坏山体及周边环境，但山体表面往往岩石破碎，下面 2-3 米才能见到完整的岩石，这种基础型式能充分适应这种要求，岩石条件破碎的部位采用掏挖形式，下面岩石完整时，采用凿岩机（山区岩石开挖普遍的机械，优点是体积小，重量轻，搬运方便）环状成孔，孔径 0.06 米左右，孔深 1.0 米左右，埋入钢筋，灌入混凝土。采用插入角钢与铁塔连接的方式，减少基顶水平力，必要时钢筋可加长，提高混凝土的抗拉能力。这种基础型式能充分适应实际的地质条件，节省基坑开挖量，且施工简单易行。

6.4 多扩头掏挖式基础

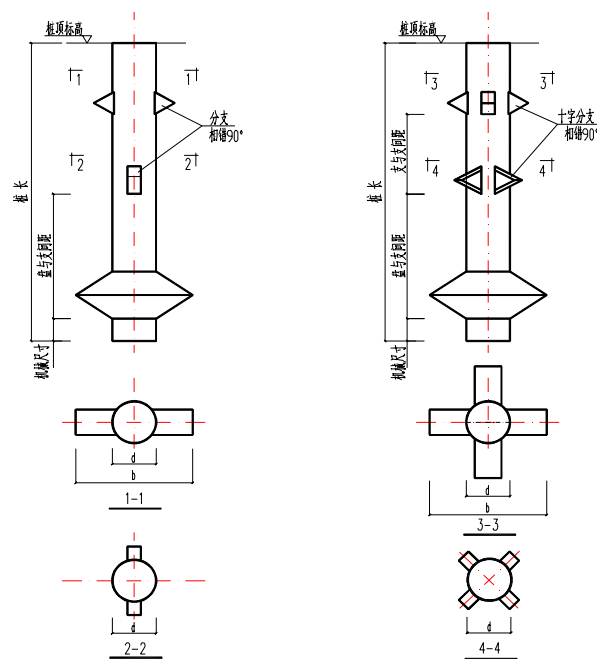


由于掏挖式基础主要靠人工掏挖成孔，为保证施工人员的安全性同时兼顾经济性，常用掏挖式基础尺寸一般不大，基础立柱直径在 3m 以

内，埋深在 8~10m 以内，底板扩展尺寸也不宜超过 1.5m，承载力按刚性短桩模式计算。但对输电线路部分荷载较大铁塔，若仍采用常规的掏挖式基础，为满足刚性短桩的要求，立柱直径和底板尺寸势必要大幅增加。

针对这一问题，可采用多扩头掏挖式基础这一新型基础型式。从理论上讲，多扩头掏挖式基础由于扩头数量增加，扩头与其周围原状土体的咬合面也相应增加，在基础承受上拔或下压等竖向荷载作用时，扩头周围土体能提供更多的剪切面以承担较大比例的竖向荷载，同时各扩头底部原状地基土的承载性能也能得到较好的利用，从而增大基础的抗拔和抗压承载力。在基础承受水平荷载作用时，上部扩头也能利用其周围地基土承担一部分倾覆力矩，提高基础的侧向稳定性。相对而言，多扩头掏挖式基础通过增加扩头的手段，更大程度地发挥立柱周边原状土的承载性能，避免了单纯地增大立柱和底板直径、增加埋深的常规手段来达到提高基础的承载力，在一定程度上可降低基础的材料耗量。

6.5 挤扩支盘桩基础



挤扩支. 盘桩示意图

挤扩支盘桩基础(全称“挤扩支盘灌注桩基础”)是由普通钻孔灌注桩发展而来的一种变径桩，成孔工艺与普通钻孔灌注桩相同，成孔后利用特制的支盘器沿桩身在不同部位设置支撑挤扩造支或造盘(如上图所示)。从成孔方式分类，挤扩支盘桩属于钻孔灌注桩形式的一种；从其承载特性分类，属于摩擦型端承桩；从桩身直径分类是一种变直径桩；从承载功能分类，它是一种可靠的抗压桩，同时也是一种理想的抗拔桩。

挤扩支盘桩可根据承载力的需要充分利用较好的土层，采取增设分支和承力盘数量以提高单桩承载力。突破了传统桩型为提高承载力而必须找到坚硬岩土层的限制，通过机械方式在较稳定的土层形成承力盘，而提高桩基的承载力。

挤扩支盘桩的施工工艺相对简单，施工速度快，机械化程度高，且无振动和噪音，对周围环境和相邻建筑物影响小。

挤扩支盘桩的各承力盘与持力层土体相互嵌固，使挤扩支盘桩竖向抗压承载力、抗拔承载力，抗水平推力都得到相应的提高。对承受动荷载、抗震均有良好的作用。

挤扩支盘桩与相同直径、长度的等直径灌注桩相比，混凝土用量略有增加，但其承载力则可大幅度地提高。多项工程实践证明每立方米段完成的承载力可以提高 50%以上。在承受相同荷载的情况下，可比普通等直径灌注桩缩短桩长，减小桩径，减少桩数。通过合理的设计，可以改变桩基的组成结构，从而能达到工期短、质量好、节约原材料、保护环境的目的。