

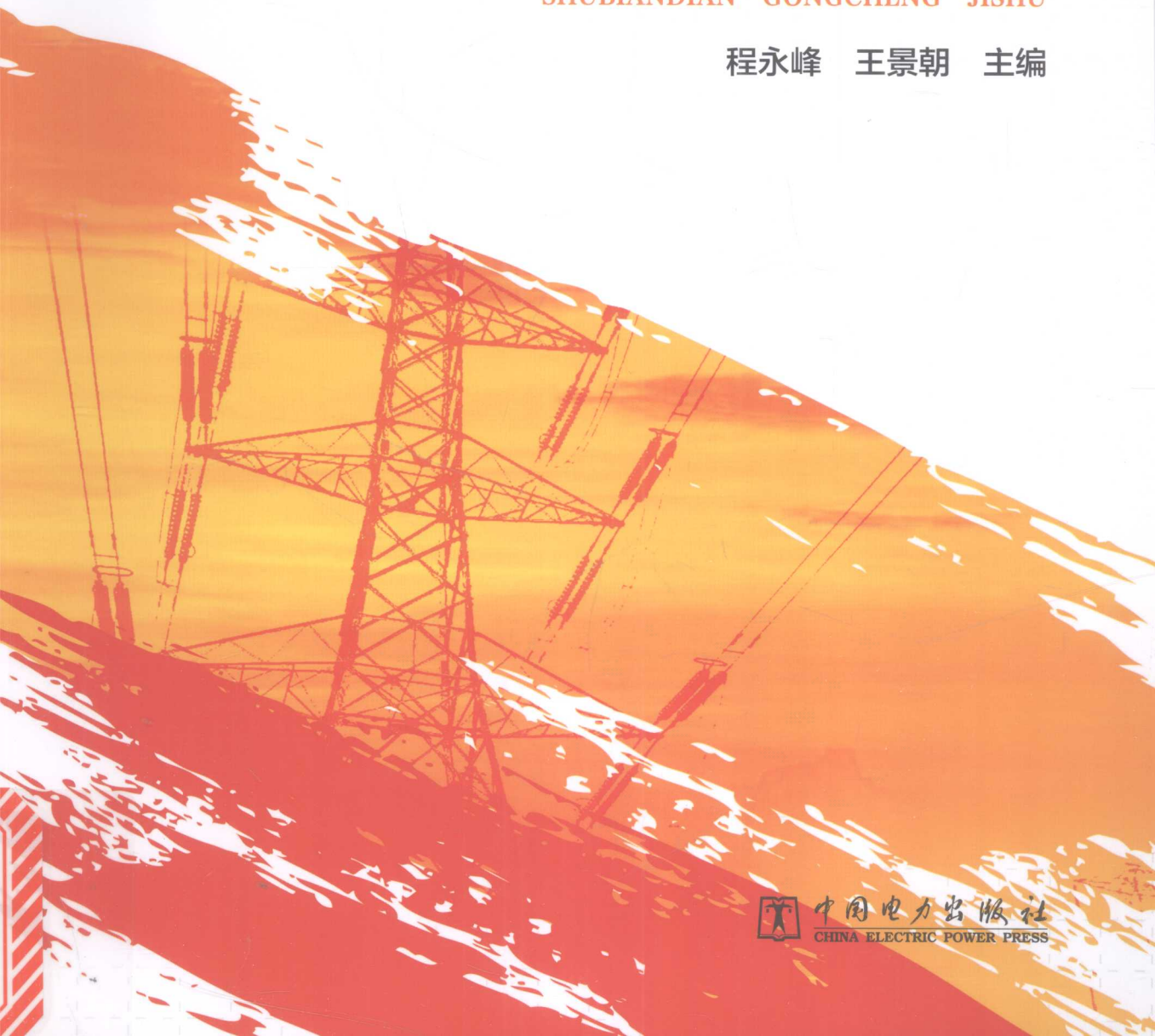


电网**新技术**丛书

输变电工程技术

SHUBIANDIAN GONGCHENG JISHU

程永峰 王景朝 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电网新技术丛书

中国电力科学研究院
出版基金资助

输变电工程技术

SHUBIANDIAN GONGCHENG JISHU

程永峰 王景朝 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为了更好、更快地培养输变电工程建设的优秀人才,中国电力科学研究院组织编写了《电网新技术丛书》,本书是其中一册。本书系统总结了近年来研发的输变电工程建设技术成果和经验,对输变电工程基础、变电电气设备抗震、杆塔结构、导线金具、导线防振防舞、施工技术及装备、输电线路在线监测、通用设计等进行了比较详细的描述,力图给读者展示电网建设的新技术全貌。

本书既可作为高校输变电工程相关专业的参考教材,又可作为从事输变电工程理论研究、科研试验、工程建设、运行和维护等工作的技术人员的培训教材,还可供关心我国输变电工程建设的各界人士借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

输变电工程技术/程永峰,王景朝主编. —北京:中国电力出版社,2016.11

(电网新技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8430-9

I. ①输… II. ①程… ②王… III. ①输电—电力工程 ②变电所—电力工程 IV. ①TM7 ②TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第243243号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年11月第一版 2016年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 241千字

定价 36.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

我国是一个幅员辽阔、资源匮乏的发展中国家。为了推动我国现代化事业全面协调、持续科学的发展,建设生态文明、节约能源和保护生态的产业结构、增长方式、消费模式,进一步提高人民生活水平,将“提高能源利用效率,保护环境”的理念贯穿于电网规划、设计、建设和运行全过程中,对建设“资源节约型、环境友好型”的电网有着重大的意义。

国家电网肩负着将能源基地的电力输送到负荷中心的重任。建设“安全可靠、节能环保”的国家电网是电力安全供应、国民经济安全高效运行的重要保证,同时也是电网智能化的重要内容。

建设“安全可靠、节能环保”的国家电网,需要一套适合于各种地质条件的基础型式,减少施工作业土方开挖量和弃土,减少建设期对环境的扰动,最大限度保护生态环境,满足安全和环境保护的要求。

建设“安全可靠、节能环保”的国家电网,需要一系列的杆塔结构优化设计技术,包括角钢塔、钢管塔、多回路塔等,适用于平原、丘陵、高山等地形的运输、安装、运行和维护,节约工程造价。

建设“安全可靠、节能环保”的国家电网,需要系列导线和配套的金具技术,满足各种电压等级、地形条件、气象条件的使用要求,降低全寿命周期内的成本,降低运行损耗。

建设“安全可靠、节能环保”的国家电网,需要先进的施工技术,满足平原、丘陵、高山等地形条件下的施工要求,提高施工安全、质量和效率。

高烈度地震会对电网(尤其是变电站/换流站)安全运行造成严重损害,进而造成国民经济损失。为了提高国家电网运行的可靠度,需要提升变电站/换流站的抗震能力。

自然环境中,风冰等外力会经常作用在输电线路,导致导线发生微风振动、舞动等现象,有损于导线的使用寿命,造成相间闪络甚至断线等事故,需要在架空输电线路建设中充分考虑导线振动问题。

架空输电线路运行中的状态和各种重要参数的量值是运行、维护工作人员关心的数据,是保持电网安全、稳定运行和开展状态检修的基本参数,因

此在电网建设中还要同时设计并安装在线监测装置，以满足运行、维护的需要。

近年来，电网建设的开工和竣工量一再创新高，建设工期一再缩短，客观需要实施标准化建设，遵循“安全可靠、技术先进、标准统一、环保节约”的原则，实现电网标准化建设目标。

近年来，我国国民经济和人民生活水平得到了持续提高，在可以预见的未来还将继续快速发展，对电力的需求也必将达到一个更高水平。我国电网建设顺应社会发展趋势，以特高压电网为引导，各级电网协调发展的电网建设工作如火如荼，需要大量的优秀工作者投入输变电建设工程之中。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者指正。

作 者

2016年10月



目 录

前言	1
第一章 基础	1
第一节 基础概述	1
第二节 基础结构型式	3
第三节 基础与杆塔结构的连接方式	9
第四节 基础试验技术	11
第五节 输电线路杆塔基础设计软件	14
第二章 变电电气设备抗震	18
第一节 变电电气设备抗震概述	18
第二节 变电电气设备抗震技术	18
第三节 变电电气设备减震、隔震技术	24
第四节 变电电气设备抗震试验技术	30
第三章 杆塔结构	34
第一节 杆塔及其结构概述	34
第二节 杆塔选型	35
第三节 杆塔结构设计	39
第四节 杆塔结构优化	41
第五节 杆塔结构试验	51
第四章 导线及金具	54
第一节 导线及金具概述	54
第二节 架空导线	54
第三节 金具	64
第四节 试验检测技术	71
第五章 导线防振、防舞	82
第一节 导线防振、防舞概述	82
第二节 输电线路防振技术	83
第三节 输电线路防舞技术	92
第六章 施工技术及设备	101
第一节 施工技术及设备概述	101
第二节 输电线路施工技术及设备	102

第三节 变电施工技术及其装备	119
第七章 输电线路在线监测	127
第一节 输电线路在线监测概述	127
第二节 在线监测装置及其功能	128
第三节 在线监测设备试验技术	144
第四节 在线监测技术的发展趋势	148
第八章 通用设计	150
第一节 通用设计概述	150
第二节 变电站（换流站）通用设计	151
第三节 输电线路通用设计	156

第一章

基 础

第一节 基础概述

输变电工程中的基础包括输电线路杆塔基础与变电站设备基础。

输电线路杆塔基础是为了将杆塔结构固定在土或岩石中而埋设于地下的一种结构，并与杆塔底部相连接，稳定承受所作用的杆塔荷载并将荷载传递于地基土或岩石中。杆塔基础通常用混凝土、钢材或其他材料做成。杆塔基础型式应根据杆塔结构型式、线路沿线地形及地貌特点、塔位处地基的地质条件以及施工运输条件等因素综合确定。

变电站是改变电压的场所，主要设备包括开关和变压器等，变电站建（构）筑物的地基基础与常规建筑物的基础类似。变电站设备基础主要指大体积混凝土基础。

一、杆塔基础的行业特点

杆塔基础作为输电线路的一个重要组成部分，其造价、工期和劳动消耗量在整个线路工程中占很大比例。据有关资料统计，输电线路基础工程施工工期约占整个工期的50%，运输量约占整个工程的60%，费用占整个工程本体造价的25%~35%，在特殊工程条件下的线路工程建设中甚至超过总费用50%。

输电线路与一般土木工程结构不同，是由多跨导线、多级杆塔和基础组成的连续柔性体系，杆塔基础设计的优劣关系整条线路的安全运行，一旦某个杆塔基础出现塌陷、滑坡或拔出等安全事故，整条线路运行将面临瘫痪，直接影响电网的安全、稳定运行。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，不仅能降低工程成本，而且为线路和电网的安全运行提供必要的保障。

随着我国电网建设的快速发展，线路走廊及沿线岩土体工程条件越来越复杂，输电线路工程建设中的环境保护问题越来越受到重视。不同的基础型式具有不同的特点，其承载能力、材料耗量、土石方量以及对环境的影响等各不相同。输电线路各级塔位的微地形一般相当复杂，预测环境因素变化过程中岩土体的工程性质变化规律及其对杆塔基础稳定性的影响，采取设计对策减少大规模电网工程建设对环境的破坏作用已突显重要性。设计中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,将工程对环境的影响减小到最小程度。

因此,就输电线路建设工程造价、安全稳定性以及环境保护和水土保持等方面而言,输电线路杆塔基础具有明显的行业特点:

(1) 输电线路距离长,跨越区域广,沿途地形与地质条件复杂,地基土物理力学性质差异性大,设计和施工中需要考虑的影响因素多。

(2) 杆塔基础所承受的荷载特性复杂,随外界条件的变化,杆塔基础承受拉/压交变荷载作用的同时,承受着较大的水平荷载作用。抗拔和抗倾覆稳定通常是杆塔基础的设计控制条件。而对于建筑、交通等行业的基础而言,抗压稳定性才是其设计控制条件,这与杆塔基础差异较大。

(3) 架空输电线路基础呈点、线分布,地形、地貌情况复杂,施工现场具有分散性,基础施工往往受地形、地质、运输条件等的限制和影响。

二、杆塔基础的设计要求

地基土或岩石的复杂工程特性决定了对杆塔基础设计必须做出一定简化。目前,常规线路设计中均将地基、基础和上部结构三者作为彼此独立的结构单元进行分析。

(1) 假定基础为绝对刚性(即基础不存在差异沉降),将上部结构分离出来,根据给定荷载采用结构力学或弹性力学的方法进行结构设计。

(2) 将上部结构分析得到的支座反力反作用于基础上,并假定地基反力按某一种规定方式分布,求得基础各截面的内力和变形。

(3) 根据地基反力分布特征,用土力学方法计算出地基各点的位移。

实际工程实践中,地基—基础—上部结构是一个相互作用、共同承载的统一整体,应满足变形协调条件。地基特性、基础刚度和上部结构都会影响地基反力的分布,而且地基的不均匀沉降必然会引起上部结构内力重分布。综合考虑三者间的相互作用规律是工程设计中迫切需要解决的问题,也是常规设计的难题。

输电线路基础设计中需要考虑许多因素,但其中最富变化和最难于定量分析的是地基问题,地基条件直接影响着杆塔定位和杆塔结构,并决定着基础选型与设计。地基特性参数是基础设计的重要依据,但它与取样过程、试验的准确性和随机性有关。线路杆塔基础分布“点多面广”,在地质资料勘测方面表现为测点多而分散,造成沿线地基勘测资料比较粗浅,精度和详细程度都难以做到建筑物地基那样精确、可靠。此外,同一条线路上可以使用多种基本相同的杆塔类型,而这些杆塔基础的工作特性因土质条件的不同而存在差异。因此,特高压输电线路杆塔基础设计也须对线路基础设计方法做出一定的简化。

输电线路杆塔基础必须满足:

(1) 稳定性要求。杆塔基础必须是稳定的,且具有适当的安全裕度,即使在异常情况下也应具有一定的可靠性水平。

(2) 变形要求。在外荷载作用下,杆塔基础不能产生太大的、可能造成杆塔承载力严重下降的绝对变形或相对不均匀变形。

(3) 经济性要求。杆塔基础造价必须是经济的, 或者对于某些杆塔基础来说至少造价是低的。

从国内外输电线路杆塔基础工程实践看, 杆塔基础选型和设计目标就是在保证工程安全与可靠性要求下使基础工程造价最低。根据输电线路结构的重要程度要求, 当前输电线路杆塔基础的可靠度指标一般大于 3.9。

杆塔基础的主要设计荷载包括竖向上拔力和下压力、横向水平力及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、倾覆稳定性和基础本体强度等。

(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。工程上多采用两种方法: 土重法和剪切法。土重法主要依靠基础及基础底板上方土体的自重来抵抗上拔力的作用, 其原理简单, 计算简便, 在设计中得到了广泛的采用。剪切法不但考虑了土体和基础的自重, 而且充分利用了土体自身的抗拔作用, 在理论分析上比土重法合理。

(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。计算松软地基在下压荷载作用范围内的地基应力, 并据此计算出地基的变形值, 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杆塔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, 要求基础两侧的被动土抗力产生的平衡力矩能够保持基础的倾覆稳定, 并达到规定的抗倾覆稳定安全系数。

(4) 基础本体强度。基础本体强度是保证外荷载通过基础传递至地基的必要条件。基础本体各个截面和部位以及与杆塔的连接强度都必须可靠。计算基础本体强度是以基础本身作为结构件进行的, 它和一般构筑物类似, 可参照建筑结构规范进行, 并保证达到规定的安全性要求。

第二节 基础结构型式

根据输电线路沿线地貌、地形、地质条件的不同, 传统的输电线路杆塔基础可分为大开挖基础、掏挖基础、岩石基础、桩基础、装配式基础及其他新型环保型基础。变电站设备基础主要指大体积混凝土基础。

一、大开挖基础

大开挖基础是在预先挖好的基坑内支模、浇注混凝土结构, 拆模后进行土体回填并将回填土夯实。此类基础以扰动后的回填土作为抗拔土体以保持基础上拔稳定。回填土虽经夯实, 但难以恢复到原状土的结构强度, 就其抗拔性能而言, 这类基础不是理想的型式。根据基础结构特征, 大开挖基础又可以分为如下基础型式:

1. 台阶式基础

台阶式基础是传统的基础型式，适用各类斜坡地质和各种塔型条件，其特点是大开挖，采用模板浇制，成形后再回填土，利用土体与混凝土重量抗拔，基础底板刚性抗压，不配钢筋。基础底板的台阶高宽比不小于 1.0，其示意图见图 1-1。

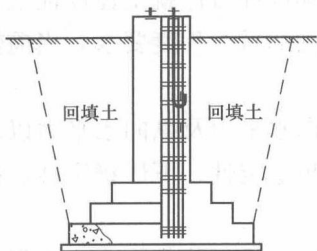


图 1-1 台阶式基础

由于台阶式基础的混凝土量较大，埋置较深，在易塌方的不稳定斜坡地质条件下难以达到设计深度且开方量大，因此工程中应尽量少用。

2. 直柱大板式基础

直柱大板式基础的主要特点是：底板大、埋深浅、底板较薄，底板双向配筋与台阶式基础相比，其埋深浅，易开挖成形，混凝土量能适当减少，但钢筋量增加较多，其示意图见图 1-2。

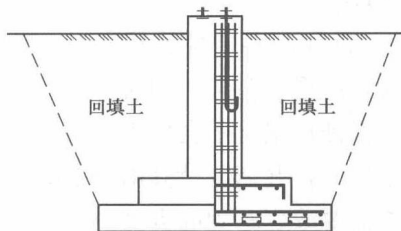


图 1-2 直柱钢筋混凝土板式基础

直柱板式基础施工方便。设计时，对底板的高厚比应进行一定的控制（悬臂长度：底板厚度 $< 2.5 : 1$ ），不足时可在主柱下增加台阶，以减少板的悬臂长度和底板厚度；为了减小混凝土量，主柱中心与底板中心可设置偏心，抵消水平弯矩，达到减小底板及配筋的效果。设计时，应控制沉降及不均匀沉降，对转角塔及荷载较大的直线塔需进行地基沉降变形验算，施工时应尽量减少地基土扰动，清除开挖的全部浮土并做好垫层，必要时使用块石灌浆。

3. 斜柱板式基础

斜柱板式基础的主要特点是基础主柱坡度与塔腿主材坡度一致，塔腿主材角钢直接插入基础混凝土中，使基础水平力对基础底板的影响降至最低。在正常条件下，基础土体上拔稳定、下压稳定和基础强度计算可忽略水平力的影响。与直柱大板式基础相比，其由于偏心弯矩大大减小，下压稳定控制的基础底板尺寸可相应减小，从而减少了混凝土量和底板配筋量，其示意图见图 1-3。

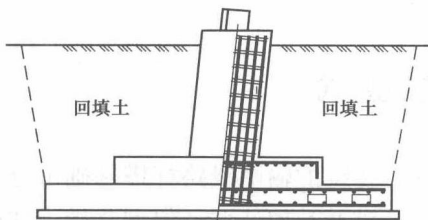


图 1-3 斜柱板式基础

斜柱板式基础在平原、河网地区使用较多，其最大优点是节省基础材料，施工较为方便。其缺点是施工精度要求高。对于高压缩性软弱土地

区，其基础底面地基处理一定要重视基础垫层和基坑排水，并应严格按照有关规定执行。

二、掏挖基础

掏挖基础是指以混凝土和钢筋骨架灌注于以机械或人工掏挖成的土胎内的基础。它

以天然原状土构成的抗拔土体保持基础上拔稳定，适用于在施工中掏挖和浇筑混凝土时无水渗入基坑的黏性土体和强风化岩石地基。这类基础因能充分发挥原状土承载力高变形小的工程特性，不仅具有良好的抗拔性能，而且具有较大的水平承载力。掏挖基础具有节省材料、取消支模及回填土工序，加快工程施工进度、降低工程造价等优点，其示意图见图 1-4。

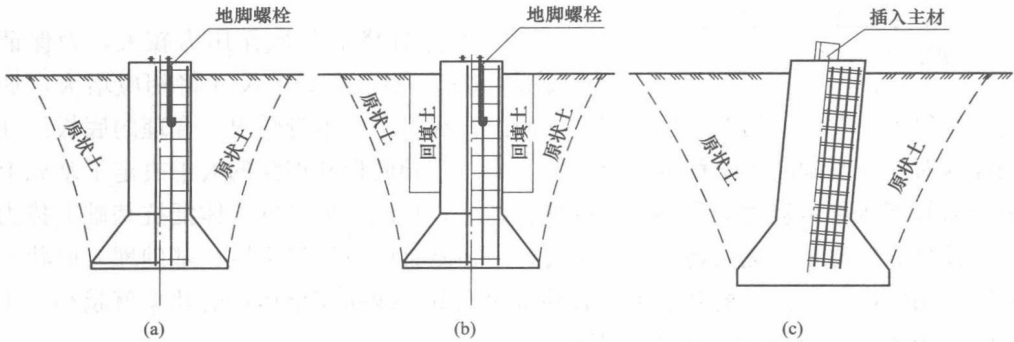


图 1-4 常用掏挖基础

(a) 直柱全掏挖基础型式；(b) 直柱半掏挖基础型式；(c) 斜柱全掏挖基础型式；

掏挖基础分全掏挖和半掏挖两种。在基坑施工可成形的情况下，开挖基坑时基本不扰动原状土，避免了大开挖后再填土对原状土体的扰动。基础承受上拔荷载时，原状土的内摩擦角和凝聚力得以充分发挥作用。这种基础型式也显示了较高的经济效益和环境效益，根据以往工程的统计，采用全掏挖基础比用台阶式基础节约钢材和混凝土分别为 3%~7%、8%~20%。掏挖基础有直柱式和斜插式两种形式。斜插式掏挖基础的主柱坡度与塔腿主材坡度相同，减小了基础水平力产生的偏心弯矩，还可省去地脚螺栓。

三、岩石基础

1. 岩石锚杆基础

该基础适用于中等风化以上的整体性好的硬质岩，其示意图见图 1-5。

该基础是在岩石中直接钻孔、插入锚杆，然后灌浆，使锚杆与岩石紧密黏结，充分利用了岩石的强度，从而大大减少了基础混凝土量和钢材量，但需逐基鉴定岩石的完整性。

2. 岩石嵌固基础

该基础适用于覆盖层较浅或无覆盖层的强风化岩石地基，其特点是底板不配筋，基坑全部掏

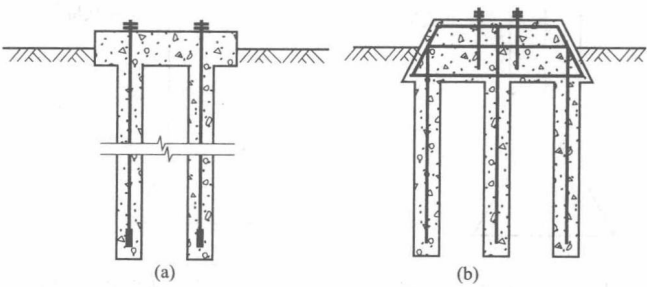


图 1-5 岩石锚杆基础

(a) 直锚式；(b) 承台式



挖,具有较强的抗拔承载能力,其示意图见图1-6。由于该基础型式充分利用了岩石本身的抗剪强度,混凝土和钢筋的用量都较小,同时减少了基坑土石方量,浇制混凝土不需要模板,施工费用较低。

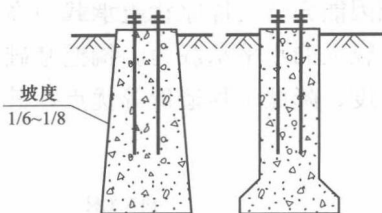


图1-6 岩石嵌固基础

四、桩基础

当输电线路杆塔的基础作用力较大,为保证基础承载力和变形要求,基础尺寸将相应增大,加之铁塔根开很大,对塔位的要求也就很高,而山区线路塔位本身受限,合理的底板尺寸和基础埋深对保证基础的安全稳定显得尤为重要。基础底板和埋深的大小决定了基础上拔稳定能力和下压稳定能力的大小,基础埋置越深,越能充分发挥土体抵抗基础上拔力的效力,并且深度修正可提高地基的地耐力,增强基础的下压稳定性;基础埋入原状土越深,对于山区塔位来说,塔基发生浅表性垮塌而危及线路安全运行的几率就越小。工程中通常采用图1-7所示的深挖孔桩基础。

此外,工程中亦可采取图1-8所示的斜坡地形深挖孔桩斜立柱基础,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技术难题,又可具备斜柱基础的结构特点,同时方便采用塔腿主材直接插入基础的连接方式;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稳定和下压稳定。

工程设计中,既要保证输电线路杆塔基础在倾覆荷载作用下地基基础体系的稳定性要求,又要保证基础顶部水平位移在上部结构所允许的范围内。但实际工程中常因输电线路基础荷载大、基础露头高而出现地基基础体系强度稳定性和基顶位移不能满足要求的情况。此时,通过在基础立柱一定埋深处设置合适尺寸的翼板,形成图1-9所示的带翼板高露头挖孔桩基础,由于基础立柱翼板的存在增加了土抗力承压面积,从而提高其水平承载性能。

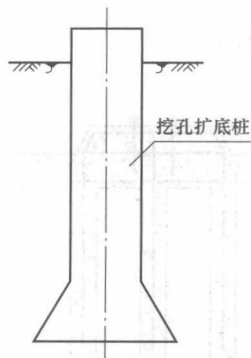
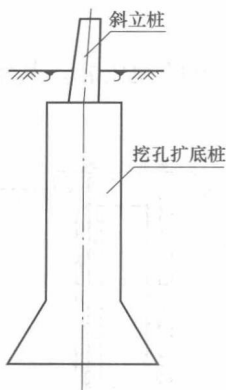
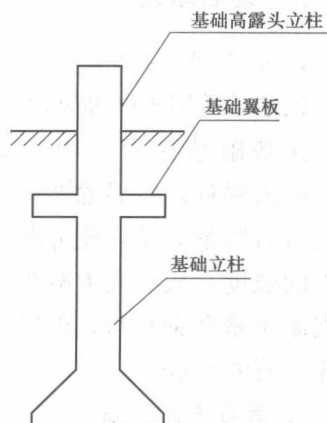


图1-7 深挖孔桩基础

图1-8 斜坡地形深挖孔桩
斜立柱基础图1-9 带翼板高露头
挖孔桩基础

微型桩是在树根桩基础上发展起来的一种新型小直径钻孔灌注桩，直径通常为 $0.25\sim 0.40\text{m}$ ，但可以达到较大的深度。微型桩施工机具轻便、施工工艺简单、受力合理，是一种能够适应输电线路基础受力特点和软土地基承载特性的新型基础型式。

与其他杆塔基础相比，微型桩基础具有以下良好的工程特性：

- (1) 压力注浆可明显改善桩周土体的工程力学特性，提高地基基础承载力。
- (2) 同样承载力要求下，微型桩基础的工作量较小。
- (3) 微型桩群桩基础的布桩方式灵活：在工程实践中，微型桩常被做成网状结构（复合式微型桩），如图 1-10 所示。
- (4) 微型桩施工机具简单，对环境和场地适应性强，施工成本低。

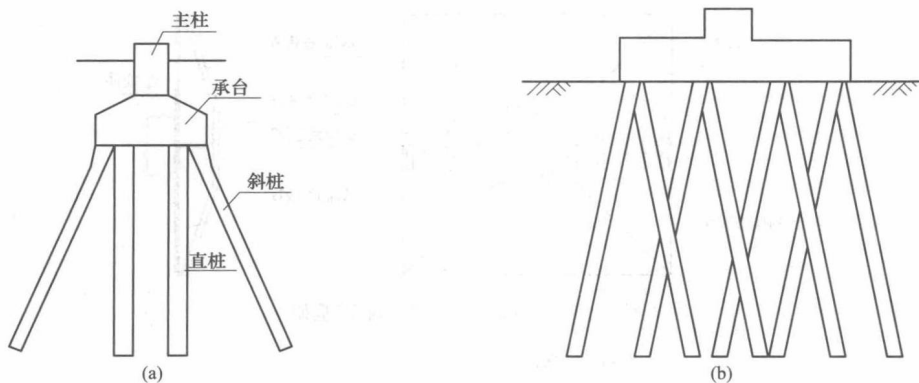


图 1-10 复合式微型桩基础
(a) 常规型式；(b) 网状结构型式

五、装配式基础

装配式基础一般是采用两个及两个以上金属或混凝土预制构件拼装组合而成的基础。在缺水、砂石采集困难的地区，采用现场浇筑混凝土基础的方法往往较为困难，此时因地制宜地采用装配式基础显得比较经济。装配式基础能够实现基础结构工厂化预制生产，提高机械化作业程度，减少现场工人的作业量和作业工序，提高施工效率，有效保证施工工期。

图 1-11 和图 1-12 分别给出了一种混凝土装配式基础以及由混凝土板条和金属支架组合而成的装配式结构示意图。此外，装配式基础还可以应用于山区斜坡地形输电线路的工程抢险工作中。

六、其他新型环保型杆塔基础

随着我国电网建设的快速发展，近些年来，输电线路杆塔结构越来越趋向于大型化，因地制宜地优化基础设计，合理利用地层受力特性，选择锚杆基础与其他类型基础相配合使用的复合型基础（见图 1-13 和图 1-14），能够显著减少基础埋深，减小基础材料耗量，降低基础工程造价，还提高了基础整体的承载力特性。

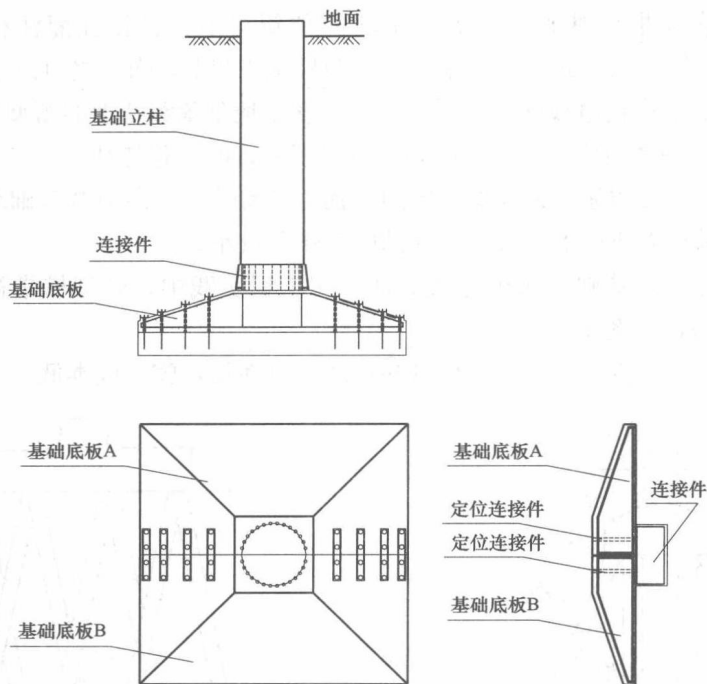


图 1-11 混凝土结构装配式基础

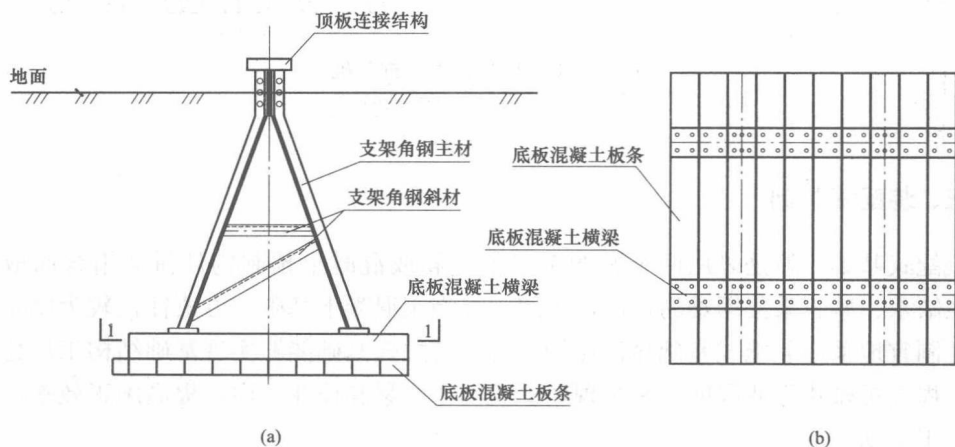


图 1-12 由混凝土板条和金属支架组合而成的装配式基础

(a) 基础组装图；(b) 1—1 剖面图

七、变电站设备大体积混凝土

输变电工程变电站的设备体积庞大，其基础一般采用混凝土浇筑，此类设备基础混凝土很多属于大体积混凝土范畴。

大体积混凝土指混凝土结构物实体最小几何尺寸不小于 1m，或预计会因水泥水化热引起内外温差过大而导致有害裂缝产生的混凝土。变电站设备的大体积混凝土施工控制主要包括裂缝与内外温差。

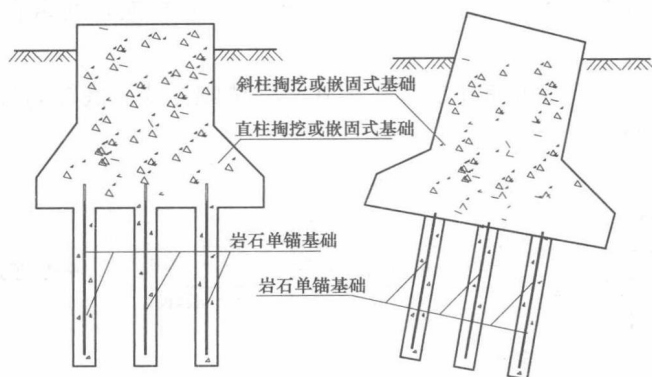


图 1-13 岩石锚杆与掏挖或嵌固式基础联合使用的新型环保型基础

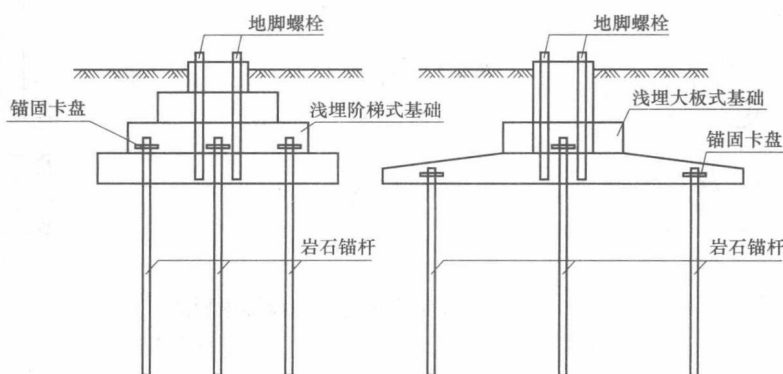


图 1-14 岩石锚杆与开挖类基础联合使用的新型环保型基础

第三节 基础与杆塔结构的连接方式

基础与上部结构之间的连接将影响荷载传递和基础的受力特性，也直接影响到基础的稳定性。目前，输电线路铁塔基础与上部结构之间的连接方式主要有地脚螺栓连接和斜柱基础主材直接插入式连接两种。斜柱基础主材直接插入式连接根据基础插入主材的不同，又可分为角钢插入式连接和钢管插入式连接两种方式。输电线路工程设计应该根据基础荷载特性和上部杆塔结构形式的不同，因地制宜地合理确定基础与杆塔结构的连接方式。

一、地脚螺栓连接

传统输电线路杆塔基础主要为直柱式钢筋混凝土基础（基础主柱与基础底垂直），杆塔基本上是通过地脚螺栓与基础相连的。但对于一般格构式杆塔而言，其塔腿结构均有一定的坡度，塔腿无法直接与地脚螺栓相连，需利用塔脚板将两者连接。基础采用直立柱结构，在基础立柱中预埋地脚螺栓，地脚螺栓通过塔脚板与上部杆塔结构相连接的

地脚螺栓连接是最普遍的方式。为增强地脚螺栓的锚固性能，通常在锚栓底端增加锚固件。

输电线路地脚螺栓的锚栓常用底锚弯钩式、底锚螺栓式和底锚肋板式三种底端锚固形式，如图 1-15 所示。

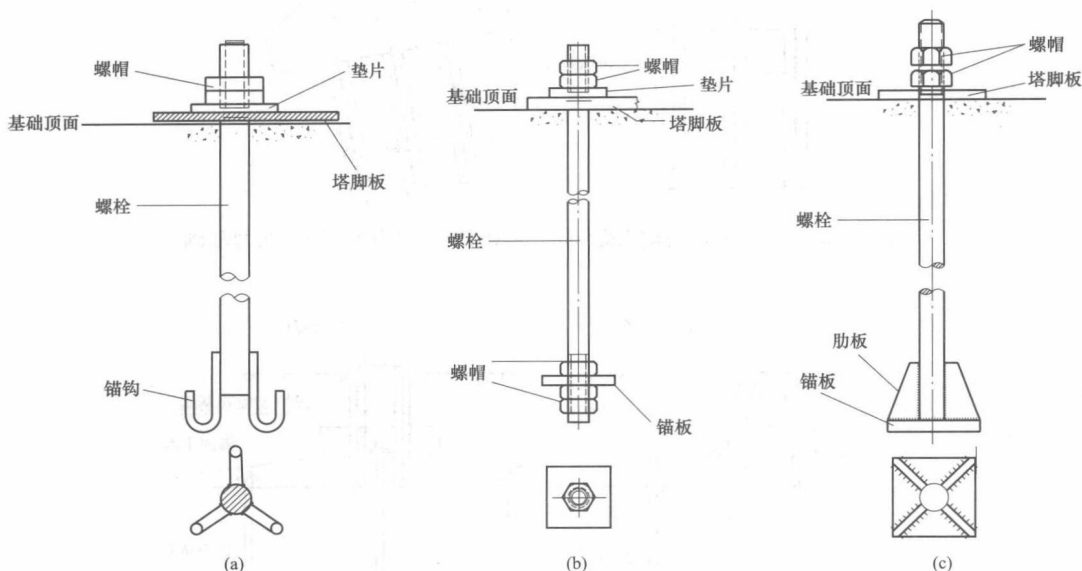


图 1-15 输电线路常用地脚螺栓锚固形式

(a) 底锚弯钩式；(b) 底锚螺栓式；(c) 底锚肋板式

二、斜柱基础主材直接插入式连接

斜柱基础主材直接插入式连接是基础采用一定坡度的斜柱结构，将与上部结构塔腿相同材料规格的主材按照基础立柱坡度直接斜插入基础内，该基础主材与上部塔身最下一根斜材采用对接或搭接的方式连接。这种连接方式不用塔脚板和地脚螺栓，上部结构传递给基础的外力也不需通过焊缝、塔脚板和地脚螺栓等中间构件，基础作用力直接通过基础主材传递与混凝土之间的黏着作用或者通过锚板和承剪连接件等部件的挤压作用传入基础混凝土中。但外荷载从基础插入主材传递到混凝土基础中是一个十分复杂的过程，承载力影响因素较多。

1. 角钢插入式连接

基础插入式角钢的锚固方式可分为端锚肋板方式、端锚角钢方式以及端锚螺栓方式三种，如图 1-16 所示。

2. 钢管插入式连接

根据钢管锚固件设置情况的不同以及设计考虑因素的不同，输电线路工程中钢管插入式基础应用的锚固形式多种多样，图 1-17 所示为一种典型的输电线路钢管插入式基础结构。