

送变电 带电作业技术

胡 毅 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

26
3

送变电 带电作业技术

胡 毅 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为适应当前送电线路的发展及变电设备带电作业的发展要求,特编写此书。本书主要介绍送变电带电作业技术及操作方法。主要内容包括带电作业基本原理、送变电带电作业工具及防护工具、带电作业人员的安全防护、直流线路带电作业、500kV紧凑型线路带电作业、500kV同塔双回线路带电作业、500kV线路加装保护间隙的带电作业、送变电设备带电作业技术要求、变电站带电作业。

本书可供送变电带电作业技术人员、工人、管理人员、安全生产人员使用,也可供带电设备制造厂家技术人员、大中专院校师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

送变电带电作业技术/胡毅编著. —北京:中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-1969-9

I. 送... II. 胡... III. 输配电线路-带电作业-电工技术 IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 018890 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2004 年 6 月第一版、2004 年 6 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 7.5 印张 198 千字

印数 0001—4100 册 定价 15.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



前言

随着我国电网的发展，一批直流线路、紧凑型线路、同塔双回线路相继投入运行。为提高供电可靠性，这些线路需进行带电作业。另外变电设备的带电作业也需要推广和发展。为了满足当前的生产需要，促进送变电带电作业的广泛开展，特编写此书，以飨读者。

本书结合当前送电线路的发展，主要介绍送变电带电作业技术及操作方法。在送电带电作业部分介绍了直流带电作业、紧凑型线路带电作业、同塔双回线路带电作业、加装保护间隙的带电作业，其中很大一部分内容属最近的研究成果。在变电带电作业部分，较系统地介绍了变电设备带电作业。另外，结合生产需要，编制了送变电带电作业操作规程和技术要求，并介绍了作业项目的步骤及方法。

本书的编写目的是为送变电带电作业技术人员及管理人员、送变电带电作业工人、安全生产及管理人员提供一本送变电带电作业的参考书。

本书由胡毅编著。另外，还有王力农、郑传广、邹伟、徐莹、徐金云等同志也参与编写了部分内容。由于时间所限，本书在编写中难免有遗漏和错误，敬请读者指正。

编者

2004年1月



目 录

前言

第一章 带电作业的基本原理及作业方法	1
第一节 带电作业的基本原理	1
第二节 送电线路与过电压	8
第三节 送电线路安全距离和组合间隙	24
第二章 送变电带电作业工具及防护用具	32
第一节 选材原则	32
第二节 绝缘工具	36
第三节 承力工具 (金属工具)	53
第四节 屏蔽用具	67
第三章 送变电带电作业人员的安全防护	71
第一节 电场的防护	71
第二节 电流的防护	79
第三节 静电感应的防护	82
第四章 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路带电作业	86
第一节 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路带电作业安全间隙的研究	86
第二节 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路带电作业的安全	

防护研究	92
第三节 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路带电作业用绝缘工具的研究	104
第五章 500kV 紧凑型线路带电作业	113
第一节 500kV 紧凑型线路带电作业安全距离研究	113
第二节 作业人员的安全防护	123
第三节 500kV 紧凑型线路带电作业操作方法	124
第六章 500kV 同塔双回线路带电作业	132
第一节 500kV 同塔双回线路的带电作业安全性试验研究	132
第二节 500kV 同塔双回线路的等电位带电作业研究	139
第三节 塔上地电位作业人员的体表场强测量及安全防护	144
第四节 感应电压的计算及安全检修方式	150
第七章 500kV 线路加装保护间隙的带电作业	157
第一节 带电作业保护间隙的研究	158
第二节 不同作业间隙下的绝缘配合试验	164
第三节 加装保护间隙后作业间隙的危险率计算及间隙值的设定	172
第四节 保护范围的计算及校核	175
第五节 保护间隙的安装要求	175
第八章 送变电设备带电作业技术要求	177
第一节 送变电带电作业操作要求	177
第二节 送电线路带电作业技术要求	197
第三节 变电站带电作业	205
本书引用标准	234



第一章

带电作业的基本原理及 作业方法

第一节 带电作业的基本原理

带电作业是指在带电的情况下，对送变电设备进行测试、维护和更换部件的作业。

电对人体的危害作用有两种：一种是人体的不同部位同时接触有电位差的带电体，电流通过人体时发生的；另一种是在带电设备附近工作时，尽管人体并未接触带电体，但却有风吹、针刺、蠕动等不适之感，这是由空间电场引起的。为什么带电作业人员可以在运行的电气设备上安全工作，甚至直接接触高达几十万伏电压的带电体而不遭受触电伤害呢？这就需要了解并掌握带电作业的工作原理。

一、带电作业方式的划分

1. 按人与带电体的相对位置来划分

带电作业方式根据作业人员与带电体的位置分为间接作业与直接作业两种方式。

间接作业是作业人员不直接接触带电体，保持一定的安全距离，利用绝缘工具操作高压带电部件的作业。从操作方法来看，地电位作业、中间电位作业、带电水冲洗和带电气吹清扫绝缘子等都属于间接作业。间接作业也称为距离作业。

直接作业是作业人员直接接触带电体进行的作业，在送电线路带电作业中，直接作业也称为等电位作业，在国外也称为徒手作业或自由作业。作业人员穿戴全套屏蔽防护用具，借助绝缘工具进入带电体，人体与带电设备处于同一电位的作业。

2. 按作业人员的人体电位来划分

按作业人员的自身电位来划分，可分为地电位作业、中间电位作业、等电位作业三种方式。

地电位作业是作业人员保持人体与大地（或杆塔）同一电位，通过绝缘工具接触带电体的作业。这时人体与带电体的关系是：大地（杆塔）人→绝缘工具→带电体。

中间电位作业是在地电位法和等电位法不便采用的情况下，介于两者之间的一种作业方法。此时人体的电位是介于地电位和带电体电位之间的某一悬浮电位，它要求作业人员既要保持对带电体有一定的距离，又要保持对地有一定的距离。这时，人体与带电体的关系是：大地（杆塔）→绝缘体→人体→绝缘工具→带电体。

等电位作业是作业人员保持与带电体（导线）同一电位的作业，此时，人体与带电体的关系是：带电体（人体）→绝缘体→大地（杆塔）。三种作业方式的区别及特点见图 1-1。

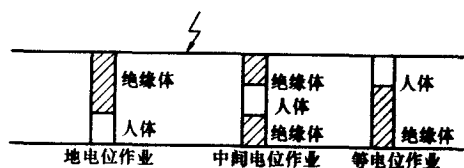


图 1-1 三种作业方式的区别及特点

二、带电作业工作原理

1. 地电位作业工作原理

地电位作业的位置示意图及等效电路如图 1-2 所示。

作业人员位于地面或杆塔上，人体电位与大地（杆塔）保持

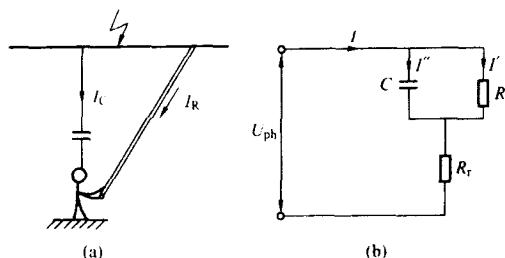


图 1-2 地电位作业的位置示意图及等效电路

(a) 位置示意图; (b) 等效电路图

C 、 I_C —人体与导线间的电容及电容电流; R 、 I_R —绝缘工具的电阻及流过它的绝缘电流; R_T —人体电阻; U_{ph} —相电压

同一电位。此时通过人体的电流有两条通道：一是带电体→绝缘操作杆（或其他工具）→人体→大地，构成电阻通道；二是带电体→空气间隙→人体→大地，构成电容电流回路，这两个回路电流都经过人体流入大地（杆塔）。严格地说，不仅在工作相导线与人体之间存在电容电流，另两相导线与人体之间也存在电容电流。但电容电流与空气间隙的大小有关，距离越远，电容电流越小，所以在分析中可以忽略另两相导线的作用，或者把电容电流作为一个等效的参数来考虑。

由于人体电阻远小于绝缘工具的电阻，即 $R_T \ll R$ ，人体电阻 R_T 也远远小于人体与导线之间的容抗，即 $R_T \ll X_C$ ，因此在分析流入人体的电流时，人体电阻可忽略不计。设 I' 为流过绝缘杆的泄漏电流， I'' 为电容电流，那么流过人体总电流是上述两个电流分量的矢量和，即

$$\dot{I} = \dot{I}' + \dot{I}''$$

带电作业所用的环氧树脂类绝缘材料的电阻率很高，如 3640 绝缘管材的体积电阻率在常态下均大于 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。制作成的工具，其绝缘电阻均在 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ 以上。

间接作业时，当人体与带电体保持安全距离时，人与带电体

之间的电容约为 $2.2 \sim 4.4 \times 10^{-12} \text{F}$, 表达式为

$$X_C = 1 / (\omega C) = 1 / (2\pi fC) \approx (0.72 \sim 1.44) \times 10^9 \Omega$$

间接作业时, 人体电容电流也是微安级, 故 $I' + I''$ 的矢量和也是微安级, 远远小于人体电流的感知值 1mA 。

以上分析计算说明, 在应用地电位作业方式时, 只要人体与带电体保持足够的安全距离, 且采用绝缘性能良好的工具, 通过人体的泄漏电流和电容电流都非常小 (微安级), 这样小的电流对人体毫无影响, 因此, 足以保证作业人员的安全。

但是必须指出的是, 绝缘工具的性能直接关系到作业人员的安全, 如果绝缘工具表面脏污, 或者内外表面受潮, 泄漏电流将急剧增加。当增加到人体的感知电流以上时, 就会出现麻电甚至触电事故。因此在使用时应保持工具表面干燥清洁, 并注意妥善保管防止受潮。

2. 中间电位工作原理

中间电位作业的位置示意图及等效电路图 1-3 所示。

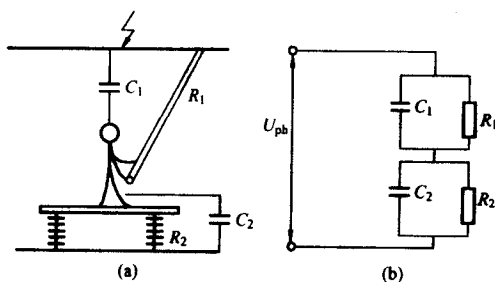


图 1-3 中间电位作业的位置
示意图及等效电路

(a) 位置示意图; (b) 等效电路图

当作业人员站在绝缘梯上或绝缘平台上, 用绝缘杆进行的作业即属中间电位作业, 此时人体电位是低于导体电位、高于地电位的某一悬浮的中间电位。

采用中间电位法作业时, 人体与导线之间构成一个电容 C_1 ,

人体与地（杆塔）之间构成另一个电容 C_2 ，绝缘杆的电阻为 R_1 ，绝缘平台的绝缘电阻为 R_2 。

作业人员通过两部分绝缘体分别与接地体和带电体隔开，这两部分绝缘体共同起着限制流经人体电流的作用，同时人体还要通过组合间隙来防止带电体通过对人体和接地体发生放电。组合间隙由两段空气间隙组成。

一般来说，只要绝缘操作工具和绝缘平台的绝缘水平满足规定，由 R_1 和 R_2 组成的绝缘体即可将泄漏电流限制到微安级水平。只要两段空气间隙达到规定的作业间隙，由 C_1 和 C_2 组成的电容回路也可将通过人体的电容电流限制到微安级水平。

需要指出的是，在采用中间电位法作业时，带电体对地电压由组合间隙共同承受，人体电位是一悬浮电位，与带电体和接地体是有电位差的，在作业过程中：

(1) 地面作业人员是不允许直接用手向中间电位作业人员传递物品的。一是若直接接触或传递金属工具，由于二者之间的电位差，将可能出现静电电击现象；二是若地面作业人员直接接触中间电位人员，相当于短接了绝缘平台，使绝缘平台的电阻 R_2 和人与地之间的电容 C_2 趋于零，不仅可能使泄漏电流急剧增大，而且因组合间隙变为单间隙，有可能发生空气间隙击穿，导致作业人员电击伤亡。

(2) 当系统电压较高时，空间场强较高，中间电位作业人员应穿屏蔽服，避免因场强过大引起人的不适感。

(3) 绝缘平台和绝缘杆应定期检验，保持良好的绝缘性能，其有效绝缘长度应满足相应电压等级规定的要求，其组合间隙一般应比相应电压等级的单间隙大 20% 左右。

3. 等电位作业工作原理

由电造成人体有麻电感甚至死亡的原因，不在于人体所处电位的高低，而取决于流经人体的电流的大小。根据欧姆定律，当人体不同时接触有电位差的物体时，人体中就没有电流通过。从理论上讲，与带电体等电位的作业人员全身是同一电位，流经人

体的电流为零，所以等电位作业是安全的。

当人体与带电体等电位后，假如两手（或两足）同时接触带电导线，且两手间的距离为 1.0m，那么作用在人体上的电位差即该段导线上的电压降。假如导线为 LGJ-150 型号，该段电阻为 0.00021Ω ，当负荷电流为 200A 时，那么该电位差为 0.042V。设人体电阻为 1000Ω ，那么通过人体的电流为 $42\mu\text{A}$ ，远小于人的感知电流 $1000\mu\text{A}$ ，人体无任何不适感。如果作业人员是穿屏蔽服作业，屏蔽服有旁路电流的作用，那么，流过人体的电流将更小。

在等电位作业中，最重要的是进入或脱离等电位过程中的安全防护。我们知道，在带电导线周围的空间中存在着电场，一般来说，距带电导线的距离越近，空间场强越高。当把一个导体置于电场之中时，在靠近高压带电体的一面将感应出与带电体极性相反的电荷。当作业人员沿绝缘体进入等电位时，由于绝缘体本身的绝缘电阻足够大，通过人体的泄漏电流将很小。但随着人与带电体的逐步靠近，感应作用越来越强烈，人体与导线之间的局部电场越来越高。

当人体与带电体之间距离减小到场强足以使空气发生游离时，带电体与人体之间将发生放电。当人手接近带电导线时，就会看见电弧发生并产生啪啪的放电声，这是正负电荷中和过程中电能转化成声、光、热能的缘故。当人体完全接触带电体后，中和过程完成，人体与带电体达到同一电位。在实现等电位的过程中，将发生较大的暂态电容放电电流，其等值电路见图 1-4 (a)。

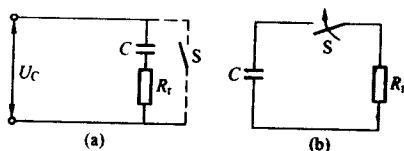


图 1-4 等电位作业等值电路及放电回路

(a) 等值电路；(b) 过渡过程中的放电回路

U_C 为人体与带电体之间的电位差，这一电位差作用在人体与带电体所形成的电容 C 上，在等电位的过渡过程中，形成一个放电回路，放电瞬间相当于开关 S 接通瞬间，此时限制电流的只有人体电阻 R_r ，冲击电流初始值可由欧姆定律求得

$$I_{ch} = U_C / R_r$$

对于 110kV 或更高等级的输电线路，冲击电流初始值一般约为十几安至数十安。由此可见，冲击电流的初始值较大，因此作业人员必须身穿全套屏蔽服，通过导电手套或等电位转移线（棒）去接触导线。如果直接徒手接触导线，则会对人体产生强烈的刺激，有可能导致电气烧伤或引发二次事故。当然，由于冲击电流是一种脉冲放电电流，持续时间短，衰减快，通过屏蔽服可起到良好的旁路效果，使直接流入人体的冲击电流非常小，而且屏蔽服的持续通流容量较大，暂态冲击电流也不会对屏蔽服造成任何损坏。一般来说，采用导电手套接触带电导线，由于身穿屏蔽服的人体相对距带电导线较近，相当于电容器的两个极板较近，感应电荷增多，因此其冲击电流也较大。如果作业人员用电位转移线（棒）搭接，人体可以对导线保持较大的距离，使感应电荷减小，冲击电流也减小，从而避免等电位瞬间冲击电流对人体的影响。

在作业人员脱离高电位时，即人与带电体分开并有一空气间隙时，相当于出现了电容器的两个极板，静电感应现象同时出现，电容器复被充电。当这一间隙小到使场强高到足以使空气发生游离时，带电体与人体之间又将发生放电，就会出现电弧并发出啪啪的放电声。所以每次移动作业位置时，若人体没有与带电体保持同电位的话，都要出现充电和放电的过程。当等电位作业人员靠近导线时，如果动作迟缓并与导线保持在空气间隙易被击穿的临界距离，那么空气绝缘时而击穿，时而恢复，就会发生电容 C 与系统之间的能量反复交换。这些能量部分转化为热能，有可能使导电手套的部分金属丝烧断，因此，进入等电位和脱离

等电位都应动作迅速。

等电位过渡的时间是非常短的，当人手与导线握紧之后，大约经过零点几微秒，冲击电流就衰减到最大值的 1% 以下，等电位进入稳态阶段。当人体与带电体等电位后，就好像鸟儿停落在单根导线上一样，即使人体有两点与该带电导线接触，由于两点之间的电压降很小，流过人体的电流是微安级的水平，人体无任何不适感。从以上作业原理的分析来看，等电位作业是安全的，但在等电位的过程中，应注意以下几点：

(1) 作业人员借助某一绝缘工具（硬梯、软梯、吊篮、吊杆等）进入高电位时，该绝缘工具性能应良好且保持与相应电压等级相适应的有效绝缘长度，使通过人体的泄露电流控制在微安级的水平。

(2) 其组合间隙的长度必须满足相关规程及标准的规定，使放电概率控制在 10^{-5} 以下。

(3) 在进入或脱离等电位时，要防止暂态冲击电流对人体的影响。因此，在等电位作业中，作业人员必须穿戴全套屏蔽用具，实施安全防护。

第二节 送电线路与过电压

一、送电线路的主要组成部分

架空送电线路的组成部分有基础、杆塔、导线、绝缘子、金具、防雷保护装置（包括架空避雷线、避雷器等）及接地装置。

1. 基础

架空送电线路的基础主要分为电杆（混凝土电杆及钢杆等）基础、铁塔基础两种。

(1) 电杆（混凝土电杆及钢脚）基础。电杆基础分为承受电杆本体下压的电杆本体基础（底盘）和起重稳定电杆作用的拉线基础（拉盘或重力式拉线基础）及卡盘等。

1) 电杆本体基础。一般 110 ~ 220kV 线路的底盘规格分为 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \sim 2.2\text{m} \times 2.2\text{m}$ (每 0.2m 为一级) 8 个规格, 可以根据上部承载荷重和土质的地耐力选用。如遇土质较差, 还可选用 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 或 $3.0\text{m} \times 3.0\text{m}$ 及以上的大底盘。它是以底层钢筋网用 C20 级混凝土浇注成的预制构件 (大底盘则是在杆位旁浇注)。如遇杆位位于岩石地带, 可在岩石上凿出基面, 再凿一个圆洞而代替 (称岩石基础)。

2) 拉线基础。拉线基础起着稳定电杆和平衡导线张力的作用。它分为拉盘基础、重力式拉线基础和锚杆 (岩石) 拉线基础三种。

a. 一般 110 ~ 220kV 线路的拉盘规格分为 $1.0\text{m} \times 0.5\text{m} \sim 2.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ (每 0.2m 为一级) 7 个规格。它是以上层钢筋网用 C20 级混凝土浇注成的预制构件。

b. 重力式拉线基础。当遇较差的土质, 而且最大一级的拉盘也满足不了所要求的抗上拔力时, 就必须选用重力式拉线基础。它主要是一条 $\phi 30\text{mm}$ 拉环用 C15 级混凝土浇注而成的无筋基础。

c. 锚杆 (岩石) 拉线基础。一般用于微风化或中风化的岩石处, 它是将拉线棒同水泥砂浆或细石混凝土直接锚在拉线棒岩空内而成。

3) 卡盘。卡盘起着稳定电杆的作用, 一般用于 35 ~ 110kV 不带拉线的混凝土电杆基础上。

(2) 铁塔基础。铁塔基础根据铁塔类型、地形地质、承受的外负荷及施工条件的不同, 一般采用的有以下几种类型。

1) 现浇混凝土铁塔基础。现浇混凝土铁塔基础又可分为钢筋混凝土基础和无筋混凝土基础两种, 这两种基础中又可分为塔腿下段主材直接插入式和通过预先浇制在混凝土内的地脚螺栓与塔座连接式两种。设计时可根据铁塔的外负荷情况和地质、地形情况进行选用。一般多用 C15 级或 C20 级混凝土浇制而成。

无筋混凝土基础多用于铁塔的上拔腿, 它借助混凝土的重力

来抵消塔腿的上拔力。无筋基础因其体积大，采用一定措施可掺入大块岩石而节约混凝土。

2) 装配式铁塔基础。装配式铁塔基础多用于山区土质较好，无地下水的直线塔基上。它是用角铁设计成格构式的基础，铁塔主材的下段也是基础的一部分。基坑底层浇制 C10 级混凝土垫层，镀锌用铁格构式基础装配于其上，再回填土夯实即成。

3) 桩式铁塔基础。桩式铁塔基础主要是钢筋混凝土灌注桩式基础，桩的直径有 0.6、0.8、1.0m 和 1.2m 等多种，这种基础多用于河滩及地基为弱土层和淤泥地带的塔基及跨河高塔的基础。它分为桩体和承台两部分。

如果按支承形态对桩体进行分类，大致可分为摩擦桩、支承桩及摩擦支承桩。在一般情况下，系指桩尖已经到达良好的持力层（岩层），以桩的端承力承担大部分垂直荷载的桩，称为支承桩（或端承桩）。桩尖未到达力层的桩，只依靠桩的侧摩擦阻力支承垂直荷载的桩，称为摩擦桩。介于这上两者之间的桩，称为摩擦支承桩。桩长一般可达 15~30m。承台是用 C20 级钢筋混凝土浇制而成的。

4) 锚杆（岩石）基础。锚杆（岩石）基础适用于山区岩石地带，它是利用岩石的整体性和坚固性做成的基础，有直锚式、承台式、嵌固式及掏挖式四种。

a. 直锚式岩石基础一般用于裸露或覆盖层薄的未风化或微风化的Ⅰ类硬质岩石中，它是将铁塔地脚螺栓用水泥砂浆（或细石混凝土）直接锚入用钻机钻成的岩石孔中，顶部浇以不小于塔脚底板尺寸的混凝土承台。

b. 承台式岩石基础一般用于覆盖层稍厚的轻风化或中风化的Ⅱ、Ⅲ类岩石中，它是将群锚型锚筋锚固在下部基岩中，作为基础底盘。承台即为基础的立柱，地脚螺栓安装在浇制的承台中，锚桩用砂浆或细石混凝土锚固，承台用钢筋混凝土浇成。

c. 嵌固式和掏挖式岩石基础一般用于中风化或强风化的Ⅲ、

Ⅳ类岩石地区，采用人工开挖或放小炮开挖成型，安装地脚螺栓和钢筋后进行浇制。

2. 杆塔

杆塔的作用主要是支持导线、避雷线，使导线保持对地面以及其他设施（如建筑物、公路、铁路、船桅、管道、电力线、通信线等）应有的安全距离；它承受着导线、避雷线、其他部件和本身的重力以及冰雪、侧面风的压力等。转角、终端承力杆塔还要承受导、地线角度张力和不平衡张力，因此对杆塔的要求必须有足够的机械强度。

（1）杆塔分类。架空送电线路的杆塔外形主要取决于电压等级、线路回数、地形、地质情况及使用条件等，在满足上述要求下，根据综合技术经济比较择优选用。目前各级电压的送电线路常用的有钢筋混凝土电杆和铁塔两种。

（2）钢筋混凝土常用杆型。

1) 35~110kV 单回路直线杆。此类电杆由于其承受的荷载较小，一般设计成单杆，导线呈三角形排列，主杆一般用 $\phi 150 \sim \phi 190\text{mm}$ 的拔梢杆（圆锥度为 $1/75$ 的环形钢筋混凝土杆）或 $\phi 300\text{mm}$ 等径环形钢筋混凝土电杆，全长 $15 \sim 18\text{m}$ 或 21m 。

当杆塔荷载较大（如大截面导线、大档距等）或较高时，35~110kV 单回路直线杆采用带拉线单杆或双杆。

2) 220~330kV 单回路直线杆。由于这一电压等级的杆塔荷载较大，目前大多采用带横梁或叉梁并带拉线的双杆和带拉线的八字型杆，目前这种杆多采用 $\phi 400\text{mm}$ 等径环形钢筋混凝土杆段焊接而成，全长 24m 及以上。

3) 35~110kV 双回路直线杆。这种杆多用于 A 字形双杆，主杆采用拔梢杆段，荷载较大时还可设置外拉线或采用带拉线门型双杆，主杆采用 $\phi 300\text{mm}$ 等径杆段焊接而成。

4) 35~110kV 单回路直线杆。35~110kV 单回路直线杆是指直线耐张杆、转角杆、终端杆，它所承受的荷载较大。当采用钢筋混凝土电杆时，一般均需设置拉线，以平衡导、地线的张力，