

全国电力职业教育规划教材

# 超高压输电线路 运行与检修实用教程

陈淑刚 主 编  
常忠池 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

全国电力职业教育规划教材

# 超高压输电线路 运行与检修实用教程

主 编 陈淑刚  
副主编 常忠池  
编 写 尹正来 舒先民 敖德胜  
王 胜 闫旭东  
主 审 鲁铁成



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书由国网湖北省电力公司检修公司组织编写,内容上符合现行国家和电力行业标准、规范和《电力行业职业技能鉴定规范》以及超高压输电线路现场操作技术规范,并结合编者二十多年的超高压输电线路运行与检修的实际工作经验。本书从超高压输电线路运行检修和线路现场工作出发,具有理论结合实际、实践范例丰富、便于掌握、附表格式全、易于查找等特点。

本书可作为超高压输电线路运行与检修人员的现场培训教材,还可作为电力工作者及电力工程类大、中专学生的技术参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

超高压输电线路运行与检修实用教程/陈淑刚主编. —北京:  
中国电力出版社, 2014. 6

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-5428-9

I. ①超… II. ①陈… III. ①超高压输电线路-电力系统运行  
②超高压输电线路-检修 IV. ①TM726. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 002993 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 6 月第一版 2014 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 407 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

## 编 委 会

主 任 曹宗振

副主任 温先卫 汪寿斌 涂 明

委 员 徐天勇 李晓峰 李端满 陈 文

曾 雪 陈淑刚 常忠池 尹正来

舒先民 敖德胜 王 胜 吴向东

阎旭东

## 前言

超高压输电线路是我国电网的骨干网架，其安全可靠运行直接关系到国家电力工业的发展，其地位不言而喻。为进一步提高超高压输电线路运行水平，以及超高压输电线路工人的操作技能和专业人员的管理水平，确保国家骨干网架的稳定，国网湖北省电力公司检修公司组织多位从事超高压输电线路运行检修实践二十多年的高技能操作能手和高级专业技术人员，积二十多年运行管理经验，沥数年心血，根据现行国家、行业标准和规范的要求，结合超高压输电线路运行检修的实际工作经验编写了本书。

本书的特点是从超高压输电线路运行检修和线路工人的实际出发，理论结合实际，文字精练，通俗易懂，内容全面，利于培训；实践范例多，便于掌握；附表格式全，易于查找。对于新建超高压输电线路运行单位或已经投运单位都不失为一本好的实用培训教材。

本书共分七章，第一章由敖德胜编写，第二章由王胜编写，第三章、第四章由常忠池同志编写，第五章由尹正来编写，第六章由舒先民编写，第七章由吴向东编写，附录由陈淑刚和阎旭东编写。武汉大学电气工程学院教授鲁铁成担任本书主审，涂明、徐天勇、杜勇、向文祥、沈晓龙、李荣超、王国满、石毅、陈文对本书进行了审阅。

限于编者的水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者指正。

编者

2014年5月

# 目 录

## 前言

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>第一章 架空输电线路基础知识 .....</b>     | <b>1</b>  |
| 第一节 架空输电线路结构知识 .....            | 1         |
| 第二节 架空输电线路电气知识 .....            | 9         |
| 第三节 线路力学基础知识 .....              | 23        |
| <b>第二章 超高压输电线路运行基础 .....</b>    | <b>32</b> |
| 第一节 超高压输电线路的基础管理 .....          | 32        |
| 第二节 线路各元件的技术标准及要求 .....         | 34        |
| 第三节 输电线路施工检修常用工器具简介 .....       | 37        |
| <b>第三章 超高压输电线路运行维护与管理 .....</b> | <b>44</b> |
| 第一节 超高压输电线路运行特点和基本要求及运行管理 ..... | 44        |
| 第二节 超高压输电线路的巡视与检查 .....         | 45        |
| 第三节 超高压输电线路缺陷管理 .....           | 50        |
| 第四节 超高压输电线路的设备管理 .....          | 54        |
| 第五节 超高压输电线路技术资料与台账 .....        | 63        |
| 第六节 超高压输电线路运行分析与总结 .....        | 65        |
| 第七节 超高压输电线路的常见故障与预防 .....       | 66        |
| 第八节 超高压输电线路生产班组与管理 .....        | 84        |
| 第九节 电力安全现代化管理 .....             | 93        |
| <b>第四章 超高压输电线路的检修与管理 .....</b>  | <b>97</b> |
| 第一节 超高压输电线路检修的基本要求 .....        | 97        |
| 第二节 超高压输电线路检修分类及安全要求 .....      | 98        |
| 第三节 超高压输电线路的“两项工程”管理 .....      | 104       |
| 第四节 超高压输电线路的状态检修 .....          | 107       |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| <b>第五章 带电检修技术</b> .....                     | 111 |
| 第一节 带电作业的基本原理 .....                         | 111 |
| 第二节 高压电场及其防护 .....                          | 116 |
| 第三节 带电作业安全距离 .....                          | 122 |
| 第四节 带电作业用绝缘工具及有效绝缘长度 .....                  | 126 |
| 第五节 带电作业工器具的检查及试验 .....                     | 131 |
| 第六节 带电作业安全规定的基本内容 .....                     | 137 |
| 第七节 带电作业工器具性能介绍及带电工具管理 .....                | 142 |
| 第八节 超高压线路带电作业典型操作方法 .....                   | 144 |
| <b>第六章 线路工程施工</b> .....                     | 163 |
| 第一节 基础施工简介 .....                            | 163 |
| 第二节 组塔立塔施工简介 .....                          | 167 |
| 第三节 架线简介 .....                              | 170 |
| 第四节 附件安装简介 .....                            | 177 |
| 第五节 工程质量检查与竣工验收 .....                       | 179 |
| 第六节 电力线路施工起重知识简介 .....                      | 181 |
| <b>第七章 输电线路测量</b> .....                     | 191 |
| 第一节 测量仪操作及其应用 .....                         | 191 |
| 第二节 运行线路测试 .....                            | 197 |
| <b>附录 A 《湖北超高压输变电公司带电作业用工具库房管理规定》</b> ..... | 202 |
| <b>附录 B 《电力法》和《电力设施保护条例》部分条款</b> .....      | 208 |
| <b>附录 C 超高压输电线路相关标准</b> .....               | 210 |
| <b>附录 D 超高压输电线路相关报表格式</b> .....             | 231 |
| <b>参考文献</b> .....                           | 259 |

## 架空输电线路基础知识

### 第一节 架空输电线路结构知识

#### 一、电力系统的基本概念

电力系统是由发电、变电、输电、配电、用电（发、变、输、配、用）等设备和相应的监视、控制、保护、电力通信（监、控、护、通）等系统按规定的技术和经济要求组成的，将一次能源转换为电能，并输送和分配到电力用户的一个统一系统，即由发电厂、电力网、用电设备及其辅助系统组成的，将一次能源转换为电能并输送和分配到用户使用的系统称为电力系统。

电力系统从某种意义上讲，是一个从生产到消费电能的系统，一般要经过发、变、输、配、用电五个环节。其中发电是指由发电厂或发电基地把一次能源转换为电能。生产电能的主要方式有火力发电（通过石化燃料，如煤、油、天然气，将化学能转化为热能，再利用动力机械转换成机械能来驱动发电机发电）、水力发电（通过水能驱动发电机发电）、核能发电（通过原子核裂变能驱动发电机发电）三种。除此之外，还有利用风力、地热、太阳能、潮汐能等发电。

#### 二、电力网的基本概念

电力网（以下简称电网）由电力线路和变电站组成。它是连接发电厂和用户之间的电力线路和变电站所组成的输电、变电、配电装置，是电力系统中的主要组成部分，是发电厂与用户之间不可缺少的中间环节。目前，电网存在两种形式，一是将发电厂或发电基地（包括若干电厂）发出的电力输送到消费电能的地区，又称负荷中心；二是将一个电网的电力输送到另一个电网，实现电网互联，构成互联电网。

电网按其作用可分为输电网和配电网。按其结构方式可分为开式、闭式两种。开式是指用户只能从单方向得到电能；闭式是指用户可以从两个及以上方向同时得到电能，俗称环形输电网。其按电压等级高低，一般可分为低压、高压、超高压和特高压四种。1kV 以下为低压网，1~220kV 为高压网，330~750kV 交流及±500kV 直流为超高压网，1000kV 交流及±800kV 直流为特高压网。其按输送区域可分为地方电网（一般电压不超过 110kV，供电半径小于 15~30km）和区域电网（220kV 及以上，供电跨区域，包括孤立的输电系统和具有多个发电厂的电网）。

电网的基本功能是输电、配电，即输配电能。电能与其他能源不同，其主要特点是：

不能大规模储存,发电、输电、配电和用电在同一瞬间完成;发电和用电之间必须实时保持供需平衡,如果不能保持实时平衡,将危及用电的安全性和持续性。

输电的功能由输电网完成,即由升压变电站、降压变电站及其相连的输电线路完成。配电的功能是在消费电能的地区接受输电网受端的电力,然后进行再分配,输送到城市、郊区、乡镇和农村,并进一步分配和供应给工业、农业、商业、居民以及特殊需要的用电部门。由此可见,把输电网和配电网连接起来就构成了电力网。

在这里主要介绍一下输电网。输电网由输电和变电设备构成,输电设备主要有输电线、杆塔、绝缘子串、架空地线等,变电设备主要有一次设备、二次设备。变电设备主要集中在变电站内。变电站的作用有两个:一是变压(因发电厂的发电机和用户设备的额定电压都较低,为了减少输送过程中的电能损耗,必须在始端先升压,再经过数次降压,才能成为用户使用电压);二是通过各变电站起集中、分配、控制电力流向和调整电压的作用。

变电站按其构造可分为屋外、屋内、地下和箱式等多种,按在系统中的作用可分为枢纽(区域)变电站;地区(地方)变电站和用户(终端)变电站;变电站的规模一般用电压等级、变压器容量和出线回路数来表示。

变电站内的主要组成是一次、二次设备、主接线及配电装置四大部分。其中一次设备是指直接汇集、传输、分配电能的设备,包括变压器、开关电器、母线、绝缘子、电缆、消弧线圈、电抗器、互感器、避雷器和接地装置;二次设备是指对一次设备进行测量、监察、保护、操作和控制的设备,包括测量仪表、监察装置、信号装置、继电保护、自动装置和直流电流;主接线是指输送和分配电能的电路,它是用规定的文字和图形符号将各种一次设备按照它们的实际连接顺序绘制成电气主接线图。

配电装置是按主接线的要求,由开关设备、保护测量电器、母线和必要的构筑物组成的综合装置。它的功能是在正常时用来接受和分配电能,在系统故障时迅速切除故障部分,恢复正常运行。

对于直流输电来说,它的输电功能是由直流输电线路的换流站的各种换流设备,包括一次、二次设备来实现。输电网中线路和一次、二次设备的协调配合,实现电力系统安全、稳定运行,避免连锁事故发生,防止大面积停电。

电网的发展主要是指输电网的发展,输电网的发展除数量增加外,主要是指更高电压等级的输电网的发展。为什么这么说,有以下四个原因。

(1) 随着我国国民经济的健康持续发展与需求,我国电力工业也必须同步发展,目前已进入大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。

(2) 遵循欧姆定律( $I = \frac{U}{R}$ )。电力技术的进步和满足用户供电需求,有两条主要途径:一是降低输电线路电阻,因此超导技术在电力系统的广泛应用将会是重大的技术革命,但仍需较长时间去实现;二是提高输电线路电压,我们已建设了超高压电网,近期在加紧特高压输电网的规划与研究,有较成熟经验。

(3) 理论上,输电线路输电能力与输电电压成正比,输电电压提高一倍,输送功率的能力将提高4倍。在选择更高一级电压时,通常使两个相邻输电电压等级之比等于2或大

于 2, 这样可以使输电网的输送能力提升 4 倍以上。实践证明, 以这样的电压级差构成的电网才可能经济合理, 并适合于电网的发展和服务区域范围的扩大。

(4) 由于我国的能源资源和负荷中心相距很远。我国能源资源以煤炭、石油、水、天然气为主, 且大部分集中在西北地区, 而需要大量能源的用户却集中在我国沿海、京津唐和中部地区。为了减少输电损耗和输电走廊占地面积, 西电东送、南北互供的远距离大容量输电模式又势在必行, 这就必须实行远距离输电。而远距离输电线路的输电能力与电网电压的平方成正比, 与线路的阻抗成反比, 输电线路阻抗随线路距离增加而增加, 因此输电能力可大致认为与输电线路的长度成反比, 即输电线路越长, 输电能力越小。要想大幅度提高线路的输电能力, 必须提高电网的电压等级。采用输电能力强, 输电损耗低的特、超高压交流或直流输电网。

### 三、架空输电线路及基本概念

输电线路是联系发电厂、变电站与用电设备的一种传送电能的装置, 目前它分为架空线路和电缆线路两种。一般长距离、高电压送电采用架空线路, 因为它与电缆线路相比, 前者造价较低, 易于发现事故及进行检修、维修, 技术及参数上可以满足要求。下面仅论述架空线路的内容。

#### 1. 输电线路类型

输电线路可分为输电与配电两种, 就其作用讲是输送电能。目前我国按电压等级可将输电线路分为特高压 ( $\pm 800 \sim 1000\text{kV}$ )、超高压 ( $330 \sim 750\text{kV}$  及  $\pm 500\text{kV}$  直流)、高压 ( $1 \sim 220\text{kV}$ ) 以及低压 ( $1\text{kV}$  以下) 等四种线路。

按杆塔上的回路数可将输电线路分为单回线路 (杆塔上只有三相导线及架空地线)、双回线路 (杆塔上有两回三相导线及架空地线, 也包括双回路分杆塔并行的线路) 和多回路线路 (杆塔上有三回及以上的三相导线和架空地线)。

按杆塔材料可分为铁塔线路、混凝土杆线路、木杆线路、轻型钢杆线路、锥形钢管单杆线路以及混合式杆塔线路等六种输电线路。目前我国普遍采用的是铁塔线路和铁塔、混凝土杆混合式线路。

#### 2. 输电线路各种档距

(1) 一般档距。两基相邻杆塔导线悬点间的水平距离, 称为这两基杆塔的一般档距, 用  $L$  表示, 单位是  $\text{m}$  (见图 1-1)。

(2) 水平档距。两相邻档距的平均值, 称为水平档距。用它来计算杆塔水平荷重, 其值为  $L_P = \frac{1}{2}(L_1 + L_2)$  (见图 1-2)。

(3) 垂直档距。两相邻档距中导线弛度最低点间的水平距离, 称为垂直档距。主要用它来计算中间这基杆塔的垂直荷重, 其值为  $L_U = m_1 + m_2$  (见图 1-2)。

(4) 耐张段距 (长度)。线路正常运行时承受水平拉力的两相邻承力杆塔 (称耐张塔) 之间的水平距离, 称为耐张段距。一个耐张段距可能由一个或多个档距组成。主要用于累计线路长度和计算代表档距, 其值为  $\sum L = L_1 + L_2 + \cdots + L_{n-1} + L_n$  (见图 1-3)。

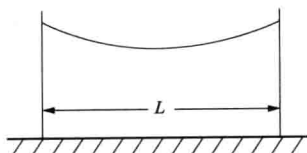


图 1-1 一般档距示意图

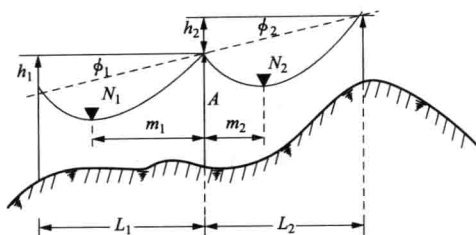


图 1-2 杆塔 A 的水平档距示意图

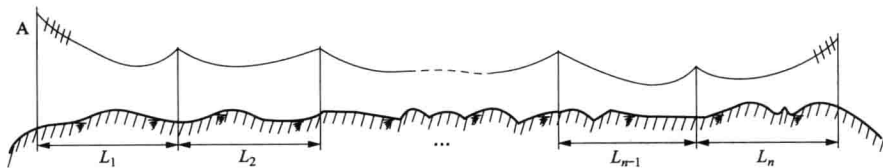


图 1-3 耐张段长度示意图

(5) 代表档距。代表档距又称规律档距，它是指在一个具有若干个悬挂悬垂绝缘子串的直线杆塔的连续档的耐张段中，能够代表水平应力变化的一种悬挂点等高的孤立档的档距，称为该耐张段的代表档距，用  $L_{db}$  表示，其值分两种情况：

1) 当一个耐张段中各档的悬挂点高差比较大时

$$L_{db} = \sqrt{\frac{\sum L^3 \cos \phi}{\sum \frac{L_n}{\cos \phi}}};$$

式中：\$\phi\$ 为耐张段各档架空线悬挂点高差角，\$\phi = \arctan \frac{h}{L}\$，\$h\$ 为两相邻塔悬挂之高差，单位为 m。

2) 当一个耐张段中连续各档的悬挂点高差角 \$\phi\$ 都很小时（平原或小丘陵地段），可不考虑高差的影响时有

$$L_{db} = \sqrt{\frac{\sum L^3}{\sum L_n}}$$

设计部门在线路施工设计中，在具有若干个悬垂绝缘子串的直线杆塔的连贯耐张段中，各档导线水平应力 \$\sigma\_0\$ 是指同一值架设的。但当气象条件变化时，由于各档的档距线长及高差不一定相同，其 \$\sigma\_0\$ 变化就会不完全相同。从而使直线杆塔上出现不平衡张力差，致使悬垂绝缘子串产生偏斜，偏斜结果又使各档 \$\sigma\_0\$ 趋于基本相同的某一数值上。人们将这个应力称为该耐张段内的代表应力。而代表应力 \$\sigma\_0\$ 是用该耐张段内的所谓“代表档距” \$L\_{db}\$ 代入导线状态方程式中求出的。可见代表档距的作用主要是用来计算代表应力的。

(6) 临界档距。导线的最大应力可能产生在最大荷重处，也可能产生在最低温度时（档距小，温度影响大；档距大，荷重影响大）。若档距等于某一适当值时，则导线的最大荷重的应力与最低温度时的应力恰好相等，那么这个档距就称为临界档距，主要用在线路设计中。

(7) 标准档距。经过技术经济比较后，得出的最经济的档距，称为标准档距，主要用

于在设计中排定杆塔位。

(8) 最大允许档距。由线间距离控制的最大档距称为最大允许档距，它不仅受控于线间距离，同时还取决于杆塔的设计条件，线间距离最小值是在某一数值的档距内，在导线摆动最大值时，导线的最低点不发生闪络。

### 3. 架空输电线路的弧垂（弛度）和限距（安全距离）

(1) 弧垂（弛度）。导线的悬挂点等高时，连接两个悬挂点的水平线与导线最低点的垂直距离，称为架空输电线路的弧垂  $f$ ，如图 1-4 (a) 所示。

导线的悬挂点不等高时，其弧垂可以分为两个，即导线的两个不同高度的悬垂点至导线最低点的两个垂直距离  $f_1$ 、 $f_2$ ，如图 1-4 (b) 所示。

图 1-4 (b) 中  $f_\phi$  为架空线两悬挂点连线中点的垂度（即平行四边形 ABCD 切点的垂度），即施工时的观测弧垂值。

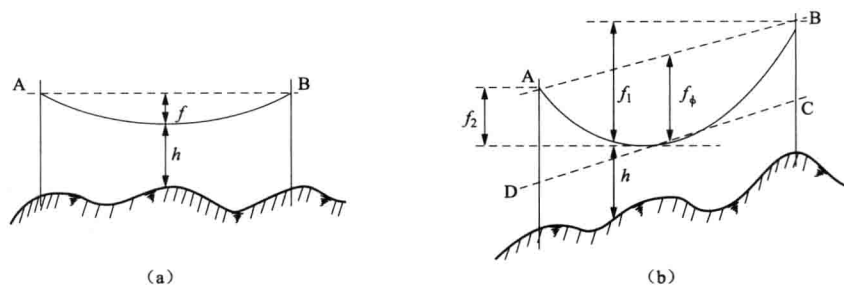


图 1-4 弧垂示意图

(2) 限距（安全距离）。导线各点对地及其他设施（包括地面、最高水面、建筑物、电力线、通信线、树木等）之间的安全距离、水平距离及导线对杆塔本体的最小距离，称为限距。其中 500kV 规定限距分别应不小于表 1-1 中所列数值。

表 1-1

500kV 规定限距值

| 项 目           | 内 容               | 数值 (m)     | 备 注                                                                                                 |
|---------------|-------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 带电体与杆塔构件的最小间隙 | 外过电压 (kV)         | 3.3 (3.7)  | (1) 杆塔构件包括拉线、脚钉等<br>(2) 括号内数字为 V 型绝缘子串数值                                                            |
|               | 内过电压 (kV)         | 2.5 (3.1)  |                                                                                                     |
|               | 运行电压 (kV)         | 1.15 (1.3) |                                                                                                     |
|               | 带电作业电压 (kV)       | 3.8        |                                                                                                     |
| 导线对地最小允许距离    | 居民区               | 14         | (1) 居民区是指工业企业地区、港口、码头、车站、城镇区等人口密集区<br>(2) 非居民区是指虽经常有人，有车辆到达，但未建房屋或房屋稀少的地区<br>(3) 车辆、农机不能到达的地区为主要困难区 |
|               | 非居民区、一般农业区        | 11         |                                                                                                     |
|               | 交通困难或仅步行可到达的地区    | 9          |                                                                                                     |
|               | 步行不能到达的山坡、岩石、峭壁   | 6.5        |                                                                                                     |
|               | 对建筑物              | 垂直距离       |                                                                                                     |
|               |                   | 水平或净空距离    |                                                                                                     |
|               | 对树木               | 垂直距离       |                                                                                                     |
|               |                   | 净空距离 (绿化区) |                                                                                                     |
|               | 对果树、经济作物、城市路树垂直距离 | 6          |                                                                                                     |

续表

| 项 目              | 内 容   |             | 数值 (m) | 备 注               |
|------------------|-------|-------------|--------|-------------------|
| 导线对各种被跨越物的最小垂直距离 | 公路    | 等级公路路面      | 14     | 上述距离是指导线已完成初伸长的数值 |
|                  |       | 非等级公路路面     | 12     |                   |
|                  | 铁路    | 公用铁路轨顶      | 14     |                   |
|                  |       | 非公用铁路轨顶     | 13     |                   |
|                  |       | 承力索或接触线     | 6.5    |                   |
|                  | 通航河流  | 五年一遇洪水位     | 10     |                   |
|                  |       | 船桅杆顶        | 6      |                   |
|                  | 不通航河流 | 百年一遇洪水位     | 7      |                   |
|                  | 电力线   | 至导地线        | 6      |                   |
|                  |       | 至杆塔顶        | 8.5    |                   |
|                  |       | I ~ III级通信线 | 8.5    |                   |
|                  |       | 特殊管道        | 7.5    |                   |
|                  |       | 索道          | 6.5    |                   |

#### 4. 架空输电线路的主要组成部分

(1) 杆塔基础。杆塔基础是为了将杆塔结构固定于土或岩石中而埋设在地下的一种结构，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至地基土或岩石中。杆塔基础型式是根据塔型、沿线地形、塔位地质条件以及施工和运输等因素综合确定的，而其安全性、经济性和施工难易程度，是主要考虑点，我国目前采用的杆塔类型概括起来可分为五类。

1) 开挖回填类基础。其包括现浇钢筋混凝土基础和装配式预制基础。这类基础主要是以扰动后的回填土作为抗拔土体保持基础上拔稳定。此类基础施工简便，但造价较高。例如直柱混凝土台阶式、直柱钢筋混凝土板式、斜柱钢筋混凝土板式、平放式、预制板线基础、斜放式预制板线基础、直柱固定型、铰接型、主材直插型、支架型、锥壳型等基础，都属于开挖回填类基础。

2) 掏挖扩底类原状土基础。它是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。以天然原状土构成抗拔土体保持基础上拔稳定，同时具有较大的水平承载力。此类基础的优点是节省材料，取消支模、拆模、人工养护及回填土工序，从而可加快工程施工进度，降低了工程造价，但它只适用于无水渗入基坑的黏性土体中。例如，其种类有直柱全掏挖式、直柱半掏挖式、斜柱全（半）掏挖式基础。

3) 岩石锚桩类基础。它是以水泥砂浆或细石混凝土和锚筋灌注于钻凿成型的岩石孔内的锚桩或墩基础。这类基础由于充分发挥了岩石的力学性能，因此具有较好的抗拔性能，上拔、下压变形比其他类型都小，材料消耗也少，特别适用于运输困难的高山地区。但采用该类基础时必须逐基鉴定岩体的稳定性、覆盖层厚度、坚固性及风化程度等情况。岩石锚桩类基础包括直锚式、水台式、嵌固式、斜锚式等基础。

4) 钻孔灌注桩类基础。它是用专门的机具钻（冲）成较深的孔，以水头压力或水头压力和泥浆护壁，放入钢筋骨架并在水下浇筑混凝土的桩基。这类基础是一种深基础型式，适用于地下水位高的黏性土和砂土等地基，特别是大跨越的塔位。这类基础按其结构可分为单桩和多桩基础，按理论特点可分为低桩和高桩基础。

5) 其他类型基础。例如根据杆塔基础工程特性和地基特点,如在大荷载、地基承载能力差的条件下采用联合基础;在施工难度大的流砂和软弱地层中采用复合式沉井基础等。

另外,当前我国国土资源日趋紧张,环境保护日益得到重视,所以就要求合理设计塔位施工基面,做到少开塔位施工基面,减少弃土和边坡的防护,降低工程造价,在山区、丘陵地段首选高低腿基础。

总之,不论采用何种杆塔基础,都必须保证它的上拔稳定性(土重)、下压稳定性(地基土质)、倾覆稳定性(四周土抗力)及基础本体强度(施工质量)。

(2) 杆塔。杆塔是支承架空输电线路导线和地线并使它们之间以及与大地之间的距离在各种可能的大气环境下,符合绝缘电气安全和工频电磁场限制的杆型、塔型构筑物。通常将木结构、钢筋砼结构和钢柱式结构的杆型结构称为杆,将钢的塔型结构称为塔。

杆塔的塔头结构、尺寸及塔高需满足以下要求:①必须满足在规定风速下悬垂绝缘子串或跳线风偏后,在工频电压、操作过电压、雷电过电压作用下带电体与塔结构的间隙距离要求;②必须满足导线与地线间安全距离要求;③必须满足档距中央导线相间最小距离要求;④必须满足导线在最大弧垂或最大风偏时对地、高跨越物之间的距离要求;⑤必须满足带电作业时的安全空气间隙并考虑到工频电磁场的影响。

1) 塔型分类。输电线路杆塔按不同用途和功能可划分为直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔、换位杆塔和跨越杆塔六种。所谓直线杆塔,仅在线路中起悬挂导地线的作用,导线、地线不开断,正常运行时只承受下压力、不承受导线张力。耐张杆塔是控制线路持续档长度、便于施工与维修、合理选择路径、控制线路纵向可能发生串倒的范围,导地线开断、承受导线张力。转角杆塔是支承导、地线张力,改变线路走向,导地线不开断,为悬垂转向杆塔。终端杆塔是线路起始或终止处的杆塔,其一侧承受导地线张力,另一侧不架线或以小张力与门型构架相连。换位杆塔是改变线路中三相导线相互位置,减小电力系统正常运行时电流和电压的不对称,导线不断开称为直线换位杆塔,导线断开称为耐张或转角换位杆塔。跨越杆塔是支承导线、地线跨越江河、湖泊、海峡等,杆塔高,荷载大,多采用直线跨越杆塔。

另外,输电线路杆塔按塔型可分为拉线塔、自立塔两种基本型式。具体有拉V塔、拉门塔、拉猫塔、猫头塔、酒杯塔、干字型塔。在双回线路中,有鼓型塔、伞型塔、倒伞型塔等。

总之,杆塔塔型除取决于使用条件外,还与电压等级、线路回数、地形、地质条件有关,需进行综合技术经济比较,择优选用。例如,拉线塔具有结构受力清晰的特点,主柱只承受压力,风荷主要由高强度拉线承受,单基用材少,较经济,但占地面积大,且只能在地势平坦地区使用。在同等使用条件下,猫头塔要比酒杯塔重,但猫头塔的水平线间距要比酒杯塔小,所占线路走廊要窄,适合于在拆迁比较多的地段。同时,同等高的猫头塔与酒杯塔,在一般情况下猫头塔的地面电场强度比酒杯塔小。

2) 杆塔结构荷载的选取。杆塔的荷载分为永久荷载、可变荷载和特殊荷载。荷载的组合形式各国不尽相同,我国规定有正常运行工况、断线工况和安装工况三种组合形

式。其中正常运行工况主要考虑最大风速、最大覆冰、最低气温三种情况，保障线路运行期间能承受设计条件下的各种气象荷载；断线工况需按不同的杆塔类别、回路数和导线分裂数选定断线数量及断线能力的大小，保证杆塔沿线纵向的强度；安装工况考虑杆塔可能发生的各种安装情况，保证杆塔在安装或检修作业时有必要的强度，确保人身安全。

(3) 导线。导线是架空输电线路的主要元件之一，在建设投资中占有很大的比重。它的主要作用是传输电流。根据导线的作用和所处的环境与工况，对导线提出四个基本要求（原则）：①导线材料应具有较高的导电率（铜 96%~99%，裸铝 61%~65%，钢铁 8%~17%）；②导线应具有较高的机械强度和耐振性能；③导线应具有一定的耐化学腐蚀能力；④导线材质和结构的选取应保证线路造价经济。

导线的结构形式，一般按电流密度初步选定，再用发热条件、电晕条件、无线电干扰条件和电晕噪声条件加以校验。分裂导线的结构形式由所要求的电晕特性及导线的最大表面电场强度决定。我国目前主要采用钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线。

总之，导线应具有低电阻特性以减少运行时的损耗；具有高强度特性以增强线路上动态和静态的机械荷载；具有耐大气腐蚀和耐电化学腐蚀的能力。

(4) 地线。地线架设在导线上方，其主要作用是防止输电线路遭受雷击，要求机械强度高、耐振、耐腐蚀，并具有一定的导电性和足够的热容量。地线按用途不同分为一般、绝缘、屏蔽、复合光纤四种类型。目前在无特殊要求时超高压线路多选用一根镀锌钢绞线（GJ）和一根 OPGW 型复合光纤电缆，其安全系数配置大于导线。

(5) 金具。金具分为线路金具和变电金具两种，是指连接和组合电力系统中各类装置，以传递机械、电气负荷及起到某种防护作用的金属附件。

线路金具按用途可以分为悬垂金具、耐张金具、连接金具、接续金具、防护金具、拉线金具六大类。其中悬垂金具的作用是将导线通过绝缘子串挂到直线塔上，其主要元件是悬垂线夹（包含固定型、防晕型、加强型、预绞式等）。悬垂线夹对于导线而言是一个支点，要承受由导线上传递过来的全部负荷，容易造成机械损伤。耐张金具（包括液压型、爆压型、螺栓型、预绞式等）的作用是将导线通过耐张绝缘子串锚定在耐线塔上，耐线金具是一个耐张段导线的终点，承受着导线的全部张力。连接金具（如 U 型挂环、碗头挂板、球头挂环、直角挂板等）在绝缘子串组合串中起连接作用的。接续金具（如钢绞线用接续管、钢芯铝绞线用压接管、补偿管并沟线夹等）主要是用来接续导线、地线的，使导线、地线保持连续性。防护金具（如防震锤、护线条、均压环、屏蔽环、间隔棒等）主要是用于对导线、地线的电晕、振动、磨损、支承等防护。拉线金具（如上拔、下拔、UT 型线夹等）是用于连接拉线，承受杆塔横向、纵向能力的。

(6) 绝缘子。绝缘子是架空输电线路绝缘的主体，其主要作用是保持导线与悬挂导线的杆塔之间的绝缘。

架空输电线路的绝缘可分为两类：一类是导线与杆塔或大地之间的空气间隙（绝缘介质是空气）；另一类是绝缘子。这两种绝缘均属于自恢复型绝缘。第一类绝缘，即空气间隙，在架空输电线路中存在四种情况：导线之间、导线地塔之间、档距中间导线对地之

间、档距中间导线对地面上运输工具或传动机械之间。第二类绝缘，即绝缘子是采用多个绝缘子组成悬垂或耐张绝缘子串来实现绝缘的，除了对自身绝缘性能有要求外，还要求有高的机械强度、防污闪、耐受过电压和降低无线电干扰。

目前我国采用的绝缘子主要有三种，即瓷质绝缘子、钢化玻璃绝缘子及复合棒式绝缘子。

## 思考题

1. 什么是电力系统？什么是电网？
2. 电网有哪几种类型？
3. 电压等级如何划分？
4. 对电力线路有哪些基本要求？
5. 架空电力线路由哪些元件组成？
6. 线路各元件的作用和相互关系？
7. 什么是一般档距、水平档距、垂直档距，其各自的作用是什么？
8. 什么是代表档距？
9. 架空输电线路各主要元件的作用是什么？

## 第二节 架空输电线路电气知识

### 一、电工基础

#### 1. 电阻

线性电阻元件是一个二端理想元件，在任何时候，它两端的电压与电流的关系服从欧姆定律。线性电阻元件在电路中的图形符号如图 1-5 所示。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标，电流取为横坐标，画出电压和电流的关系曲线，这条曲线称为该电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线，元件上的电压与元件中的电流成正比，如图 1-6 所示。

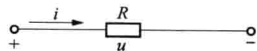


图 1-5 线性电阻元件在电路中的图形符号

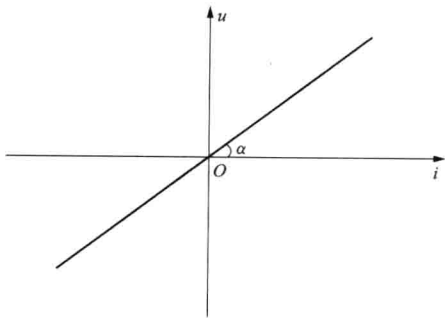


图 1-6 线性电阻元件的伏安特性曲线

在电压和电流的关系曲线上, 欧姆定律可表示为

$$U = Ri \quad (1-1)$$

式中:  $R$  为元件的电阻, 它是联系电阻上电压和电阻中电流的一个电气参数。

电阻的单位为  $\Omega$  (欧姆, 简称欧); 工程上常用的单位还有  $\mu\Omega$ 、 $m\Omega$ 、 $k\Omega$  和  $M\Omega$ , 它们之间的关系分别为:  $1\mu\Omega = 10^{-6}\Omega$ ,  $1m\Omega = 10^{-3}\Omega$ ,  $1k\Omega = 10^3\Omega$ ,  $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。输电线路导线连接处的电阻值一般以  $m\Omega$  或  $\mu\Omega$  为单位, 接地网的电阻值一般以  $\Omega$  为单位, 而绝缘子的电阻值一般以  $M\Omega$  为单位。

日常生活中的电灯、电炉可视为电阻元件, 但实际上所有的电阻器件都具有一定的非线性特性, 也就是说它们的伏安特性曲线不是一条直线, 这是因为任何器件的电阻值都受环境温度等因素的影响。

## 2. 电流

电荷的有规则移动形成电流。电流可分成两类: 传导电流和运流电流。微观的带电粒子 (电子、离子) 在导体内有规则地移动所形成的电流, 称为传导电流; 带电物体在空间做机械运动所形成的电流, 称为运流电流。

电流同时产生某些效应, 例如热效应、化学效应和磁效应等。因此可以利用这些效应来检验电流是否存在和量度电流的强弱。

要使电荷相对于导体有规则地移动, 在导体内部一定有电场存在。在电场的作用下, 正电荷沿着电场方向有规则地移动, 而负电荷沿着相反方向移动。一般来说, 在导体中产生电流的条件有两个: 第一要有载流子 (即可以移动的带电粒子); 第二要有使电荷做定向移动的力 (电场), 或者说, 在导体两端要有电动势差 (电压)。

## 3. 电压、电位

在图 1-7 中, 正电荷在电源的作用下, 从电源的正极通过荷载  $R$  流向电源的负极, 在荷载  $R$  两端的电位差也就是荷载  $R$  上承受的电压。而在电源内部正电荷是从电源的负极流向正极, 电源在这个过程中是将其他形式的能量 (如化学能、热能、机械能等) 转换成电能。设将  $q$  的正电荷从负极送到正极电源所做的功为  $A$ , 那么电源的电动势定义为

$$E = A/q \quad (1-2)$$

图 1-7 电压、电位  
含义示意图

在不考虑电源的内阻时荷载  $R$  上的电压和电源的电动势在数值上相等, 即

$$E = U = IR \quad (1-3)$$

在考虑电源内阻 ( $r$ ) 时外荷载  $R$  上的电压和电源的电动势在数值上不相等。其关系式为

$$E = I(R + r) \quad (1-4)$$

电压是指两点间的电位差, 而某一点的电动势是指该点与无穷远处的电位差。

电压常用单位为 V、mV、kV,  $1mV = 10^{-3}V$ ,  $1kV = 10^3V$ 。

## 4. 电功率

正电荷从电路元件的电压正极经元件移动到电压的负极, 是电场力对电荷做功的结果。