



输电线路感应电分析与防护

主 编 潘巍巍

副主编 方玉群 崔建业 赵寿生



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

输电线路感应电分析与防护

主 编 潘巍巍

副主编 方玉群 崔建业 赵寿生



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

针对输电线路感应电防护存在的高安全隐患风险问题,为满足线路运行检修人员和技术管理人员的需要,促进输电线路本质安全管理的提升,总结输电线路感应电相关成果编写此书。

全书共分10章,包括概述、感应电危害分析、输电线路感应电原理分析、输电线路电磁场及感应电的测量、带电作业感应电防护、停电工作感应电防护、设备感应电防护、电缆线路感应电防护、感应电安全防护用具和感应电防护新技术应用。

本书内容丰富,实用性强,可供输电线路运行检修人员及技术管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路感应电分析与防护 / 潘巍巍主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5170-6735-1

I. ①输… II. ①潘… III. ①输电线路—电磁感应
IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第185594号

书 名	输电线路感应电分析与防护 SHUDIAN XIANLU GANYINGDIAN FENXI YU FANGHU
作 者	主编 潘巍巍 副主编 方玉群 崔建业 赵寿生
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.75印张 397字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	59.00元



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编 潘巍巍

副 主 编 方玉群 崔建业 赵寿生

参编人员 刘 凯 秦威南 祝 强 孔晓峰 邢哲鸣
肖 宾 徐飞明 雷兴列 潜力群 金德军
彭 勇 虞 驰 王 斌 朱 凯 蒋其武
叶 宏 蒋卫东 顾 浩 朱亦振 梁加凯
陈 晨 李 炯 俞晓辉 赵俊杰 郑宏伟

前 言

对于工作在发电厂、变电站、输配电线路等场所的电力企业或施工企业一线员工而言，高压触电主要分为两种：一种是直接误碰高压带电设备触电；另一种是强电磁场环境中的感应电触电。对于前者，往往因为作业人员足够重视、现场安全和组织措施到位而很少发生；对于后者，则因作业人员认识程度不足、现场安全组织措施不够完善而时有发生。特别是随着输电线路电压等级的不断提高、负荷容量的持续提升、同塔多回线路数量的日益增加，以及线路长度越来越长、输电线路的感应电压和感应电流越来越大，感应电安全隐患风险越来越高。近几年来，在我国供电系统先后发生了多起感应电伤害事故，导致了重大的生命和财产损失，因此，非常有必要对感应电进行系统分析。

对感应电的认识由来已久，理论分析也较为成熟，但针对实际工作中出现的感应电分析及防护研究，尚未有专著或教材进行较为全面的论述。为了进一步提高输电线路运行检修安全水平，使广大电力员工对感应电有更加全面而充分的认识，编写组决定进行本书的编写。

本书在对输电线路感应电产生原理进行分析的基础上，通过计算分析、现场实测，对一线作业人员在带电作业、停电作业工作中的感应电安全防护以及如何防止感应电造成设备事故等进行了详细阐述，介绍了一批已应用于工作实际的感应电防护用具，并对新技术、新装备应用于感应电防护做出了认真探讨。

本书以预防实际工作中常出现的感应电伤害事件为出发点，在理论方面对输电线路感应电进行了通俗易懂的叙述并做出了计算和测量分析，能够使电力工作者从源头上对输电线路感应电有一个较为准确的认识；通过分析在带电作业、停电作业过程中感应电产生的危害、原因等，提出了相应的防护措施，可为一线员工提供有效的人身保障方案；通过分析在运设备如何防止感应电造成设备事

故，可为设备安全运行提供有效的借鉴方法；通过感应电防护用具和新技术、新装备的介绍和探讨，可引导广大读者积极关注新技术的发展和应用。本书力求从理论到实际全方位贴近工作需求，具有内容翔实、理论解析充分、实用性高、针对性强等特点。

本书由国网金华供电公司潘巍巍主编，方玉群、崔建业、赵寿生副主编。中国电力科学研究院武汉分院对本书编写工作给予了很大支持和关心，刘凯、肖宾、雷兴列、彭勇等同志对书稿提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

由于时间仓促，水平有限，书中难免存在疏漏不当之处，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 输电线路基本介绍	1
1.2 感应电基本知识	13
第2章 感应电危害分析	17
2.1 感应电伤人机理及处理措施	17
2.2 感应电对周围物体的影响和危害	29
第3章 输电线路感应电原理分析	34
3.1 输电线路电磁场基本概念	35
3.2 输电线路电磁场分析	36
3.3 输电线路感应电压及其影响因素	43
3.4 工程中输电线路感应电的计算方法	57
3.5 输电线路感应电计算实例及分析	62
第4章 输电线路电磁场及感应电的测量	68
4.1 输电线路电磁场的测量	68
4.2 输电线路感应电压的测量	77
4.3 输电线路感应电流的测量	80
4.4 感应电对输电线路工频参数测量的干扰及消除	84
第5章 带电作业感应电防护	86
5.1 带电作业感应电分析	86
5.2 带电作业感应电防护措施	113
5.3 邻近带电体作业感应电防护	125
第6章 停电工作感应电防护	136
6.1 停电线路感应电计算分析	136
6.2 停电作业感应电防护	161
第7章 设备感应电防护	175
7.1 地线绝缘子间隙烧伤分析	175
7.2 孤立档地线金具感应电烧伤分析	186
7.3 ADSS 光缆感应电腐蚀分析	190
7.4 接地线感应烧伤分析	195
第8章 电缆线路感应电防护	203
8.1 电缆线路感应电综述	203

8.2	电缆设计阶段感应电防护措施	208
8.3	电缆施工阶段感应电防护措施	214
8.4	电缆运行阶段感应电防护措施	216
8.5	电力电缆感应电案例分析	217
第9章	感应电安全防护用具	223
9.1	接地线（个人保安线）	223
9.2	屏蔽服（静电防护服）	226
9.3	导电鞋	231
9.4	绝缘手套	234
第10章	感应电防护新技术应用	240
10.1	±800kV 直流输电线路验电器	240
10.2	新型接地线装置	247
10.3	接地线电流检测装置及管理系统的研究	252
参考文献		255

第1章 概述

1.1 输电线路基本介绍

现代大型发电厂一般建在能源基地附近，如火力发电厂大都集中在煤炭、石油等能源产地，水力发电厂集中在江河流域水位落差大的水力资源点；而电力负荷中心则多集中在工业区和大城市。发电厂和电力负荷中心间往往相距很远，从而产生了电能远距离输送的问题，需要通过架设电力线路解决。

电力线路是电力系统的重要组成部分，它承担着输送和分配电能的任务。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输电线路；由电力负荷中心向电力用户分配电能的线路称为配电线路。为了减少电能在输送过程中的损耗，根据输送距离和输送容量的大小，输、配电线路采用各种不同的电压等级。目前，我国采用的电压等级主要有：交流 380/220V、10kV、35kV、66kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV；直流 ± 400 kV、 ± 500 kV、 ± 660 kV、 ± 800 kV、 ± 1100 kV。通常把 1kV 以下的线路称为低压配电线路；10kV、20kV 线路称为中压配电线路；35kV 线路称为高压配电线路；110kV、220kV 线路称为高压输电线路；330kV、500kV、750kV 和直流 ± 400 kV、 ± 500 kV、 ± 660 kV 线路称为超高压输电线路；1000kV 和直流 ± 800 kV 及以上线路称为特高压输电线路。

电力线路按其结构又可分为架空线路和电缆线路。

1.1.1 架空线路

架空线路主要指将导线固定在直立于地面杆塔上的输电线路。相比于电缆线路，架空线路有许多显著优点，如结构简单、造价低、架设速度快、输送容量大、施工和运行维护方便等。因此，早期的输电线路普遍是以架空的形式建设的。架空线路的组成元件主要有导线、架空地线（或称避雷线、地线）、杆塔、绝缘子、金具、基础、接地和拉线，它们的作用和型式分述如下。

1.1.1.1 导线

导线的作用主要是用来传导电流，输送电能。

1. 导线的材料特性

架空线路的导线应具备以下特性：

- (1) 导电率高，以减少线路的电能损耗和电压降。
- (2) 耐热性能高，以提高输送容量。
- (3) 具有良好的耐振性能。
- (4) 机械强度高，弹性系数大，有一定柔软性，容易弯曲，以便于加工制造。

(5) 耐腐蚀性强，能够适应自然环境条件和一定的污秽环境，使用寿命长。

(6) 质量轻，性能稳定，耐磨，价格低廉。

常用的导线材料有铜、铝、铝镁合金和钢。各类材料的优、缺点及适用范围见表 1-1。

表 1-1 各类导线材料的优、缺点及适用范围

材料	优 点	缺 点	适用范围
铜	导电性能最好，机械强度高，抗氧化腐蚀能力强	质量大，储量少，产量低，价格昂贵	除特殊情况以外，不采用铜导线
铝	导电性能较好，导热性能好，质地柔韧、易于加工，无低温脆性，耐腐蚀性较强，质量轻，铝矿资源丰富、产量高，价格低廉	抗拉强度低，机械强度低，允许应力小，抗酸、碱、盐的能力较差	档距较小的 10kV 及以下的线路
铝镁合金	抗拉强度很大，导电率较高	抗振性能差	尚未采用
钢	机械强度很高，价格较有色金属低廉	导电率低	跨越山谷、江河等特大档距且电力负荷较小的线路

电压等级较高的架空线路，因其输送功率大，导线截面大，所以对导线的机械强度要求高。为了兼顾导线机械性能和导电性能，通常将铝和钢两种材料结合起来制成钢芯铝绞线。由于交流电的趋肤效应，使铝线截面的载流作用得到充分地利用，而其所承受的机械荷载则由钢芯和铝线共同担负。这样，既发挥了两种材料的各自优点，又补偿了它们各自的缺点。因此，钢芯铝绞线被广泛应用在 35kV 及以上线路中。近年来，耐热铝合金导线、碳纤维复合芯铝绞线等新型架空导线相继出现，具有较多优越性能，在输电线路改造和新建工程中也得到应用。

2. 分裂导线

一般架空线路每相采用单根导线。而对于电压等级较高的架空线路，为了提高线路输送能力，降低电能损耗，减少对无线电、电视等的干扰，可采用扩径导线、空芯导线或分裂导线。又因扩径导线和空芯导线制造和安装不便，故高电压等级架空线路多采用分裂导线。

分裂导线每相分裂的根数一般为 2~4 根，近几年投运的 ±800kV 直流特高压输电线路采用了 6 分裂导线，1000kV 的特高压输电线路采用了 8 分裂导线。分裂导线由数根导线组成一相，每根导线称为次导线，两根次导线间的距离称为次线间距离，一个档距中，一般每隔 30~80m 装一个间隔棒，使次导线间保持一定的次线间距离，两相邻间隔棒间的水平距离称为次档距。

3. 导线排列方式

架空线路有单回路、双回路并架以及多回路并架等。由于线路回路数的不同，导线在杆塔上的排列方式也是多种多样的。一般单回路架空线路导线的排列方式有水平排列、三角形排列、上字形排列等排列方式，如图 1-1 所示。双回路并架架空线路导线的排列方式有伞形排列、倒伞形排列、六角形排列等排列方式，如图 1-2 所示。

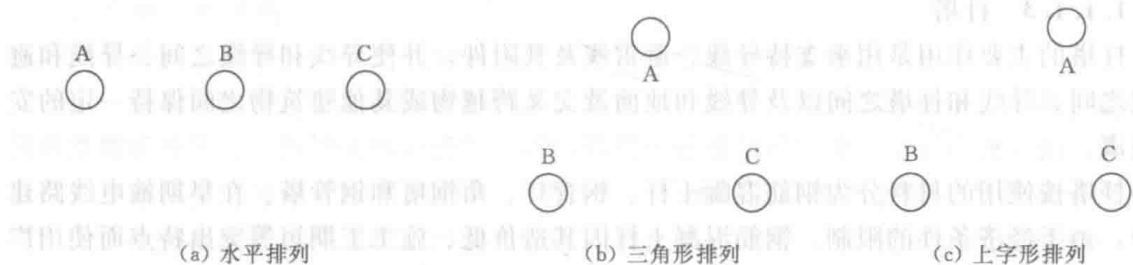


图 1-1 单回路架空线路导线排列方式

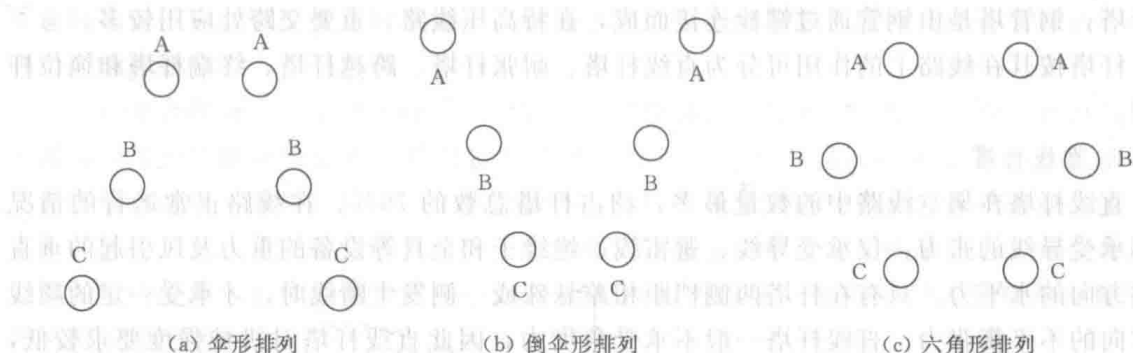


图 1-2 双回路架空线路导线排列方式

1.1.1.2 架空地线

架空地线又称避雷线、地线，通常悬挂于杆塔顶部，杆塔上的架空地线一般通过接地线与接地体相连接。当雷击线路时，因架空地线位于导线上方，雷电首先击中架空地线，并借以将雷电流通过接地体泄入大地，从而减少雷击导线的概率，保护线路绝缘免遭雷电压的破坏，起到防雷保护作用，保证线路安全运行。

为减少能耗对于 220kV 及以上电压等级的输电线路，常常采用绝缘架空地线的方式。绝缘架空地线通过带有放电间隙的绝缘子使地线与杆塔绝缘，雷击时利用放电间隙将雷电流引入地下，从而不影响其防雷性能。

架空地线一般采用钢绞线或铝包钢绞线，对于双地线架空线路，其中一根也可以采用复合光缆制作。复合光缆的外层铝合金绞线起防雷保护作用，内部的芯层光导纤维起通信作用。

对于不同电压等级的线路，一般有以下要求：

- (1) 35kV 线路及不沿全线架设架空地线的线路，宜在发电厂或变电站的进线段架设 1~2km 架空地线，以保护导线及发电厂、变电站的设备免遭直接雷击。
- (2) 66kV 线路位于年平均雷暴日为 30 日以上的地区时，宜沿全线架设架空地线。
- (3) 110kV 线路宜全线架设地线，在年平均雷暴日不超过 15 日的地区或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可不架设架空地线。
- (4) 220~330kV 输电线路应沿全线架设架空地线，年平均雷暴日不超过 15 日的地区或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可架设单地线，山区宜架设双地线。
- (5) 500kV 及以上输电线路应沿全线架设双地线。

1.1.1.3 杆塔

杆塔的主要作用是用来支持导线、避雷线及其附件，并使导线和导线之间、导线和避雷线之间、导线和杆塔之间以及导线和地面及交叉跨越物或其他建筑物之间保持一定的安全距离。

杆塔按使用的材料分为钢筋混凝土杆、钢管杆、角钢塔和钢管塔。在早期输电线路建设中，由于经济条件的限制，钢筋混凝土杆因其造价低、施工工期短等突出特点而使用广泛；钢管杆由于其美观、维护方便等特点，在城区线路中得到较多使用；角钢塔是用角钢焊接或螺栓连接而成，因其坚固、耐用、使用期限长等特点，是目前应用最广泛的输电线路杆塔；钢管塔是由钢管通过螺栓连接而成，在特高压线路、重要交跨处应用较多。

杆塔按其在线路上的作用可分为直线杆塔、耐张杆塔、跨越杆塔、终端杆塔和换位杆塔等。

1. 直线杆塔

直线杆塔在架空线路中的数量最多，约占杆塔总数的 70%。在线路正常运行的情况下不承受导线的张力，仅承受导线、避雷线、绝缘子和金具等设备的重力及风引起的垂直线路方向的水平力。只有在杆塔两侧档距相差悬殊或一侧发生断线时，才承受一定的顺线路方向的不平衡张力。直线杆塔一般不承受角度力，因此直线杆塔对机械强度要求较低，造价也比较低。

2. 耐张杆塔

耐张杆塔又称承力杆塔。在线路正常运行或断线事故的情况下，均承受较大的顺线路方向张力。两相邻耐张杆塔间的一段线路称为一个耐张段。两相邻耐张杆塔间各档距的和称为耐张段的长度。当线路发生断线故障时，不平衡张力很大，这时直线杆塔可能逐个被拉倒，耐张杆塔强度大，能承受住导线对杆塔的断线张力，使断线故障的影响范围限制在与断线点相邻的两耐张杆塔之间。在架线施工中，耐张杆塔也可作为紧线操作塔或锚塔。所以，耐张杆塔也称作锚型杆塔或断连杆塔。

3. 跨越杆塔

跨越杆塔位于线路与河流、山谷、铁路等交叉跨越的地方。跨越杆塔也分为悬垂型和耐张型两种。当跨越档距很大时，就得采用特殊设计的耐张型跨越杆塔，其高度也较一般杆塔高得多。

4. 终端杆塔

终端杆塔位于线路的首端和末端，即变电站进线、出线的第一基杆塔。终端杆塔是一种承受单侧张力的耐张杆塔。

5. 换位杆塔

换位杆塔是用来进行导线换位的。高压输电线路的换位杆塔分滚式换位用的悬垂型换位杆塔和耐张型换位杆塔两种。

1.1.1.4 绝缘子

架空线路的绝缘子用于支持导线并使之与杆塔绝缘。它应具有足够的绝缘强度和机械强度，同时应对化学杂质的侵蚀具有足够的抵御能力，并能适应周围大气环境的变化，如温度和湿度的变化对其本身的影响等。

1. 绝缘子的种类

架空线路上所用的绝缘子有悬式、棒式和复合绝缘子等数种。

(1) 悬式绝缘子。悬式绝缘子形状多为圆盘形，故又称为盘形绝缘子。此类绝缘子以往都是陶瓷材质的，所以又称为瓷瓶。近年来钢化玻璃悬式绝缘子得到广泛应用，其优点是尺寸小、机械强度高、电气性能好、寿命长、不易老化、维护方便。当绝缘子有缺陷时，由于冷热剧变或机械过载，即自行破碎，即称为“自爆”，让巡线人员可以很容易地用肉眼检查出来，减少了大量的劣化瓷质绝缘子的检测工作。

(2) 棒式绝缘子。棒式绝缘子是一个瓷质整体，可以代替悬垂绝缘子串。它的优点是质量轻、长度短、省钢材；缺点是棒式绝缘子制造工艺较复杂、成本较高，且在运行中易由于振动而断裂。

(3) 复合绝缘子。复合绝缘子由伞套、芯棒组成，并带有金属附件。伞套由以硅橡胶为基体的高分子聚合物制成，具有良好的憎水性，抗污能力强，用来提供必要的爬电距离，并保护芯棒不受气候影响。芯棒通常由玻璃纤维浸渍树脂后制成，具有很高的抗拉强度和良好的减振性、抗蠕变性以及抗疲劳断裂性。根据需要，复合绝缘子的一端或者两端可以制装均压环。复合绝缘子适用于海拔 1000m 以下地区，尤其用于污秽环境时能有效防止污闪的发生。

2. 绝缘子串的组装型式

绝缘子串的组装型式基本分为悬垂绝缘子串和耐张绝缘子串两大类。

(1) 悬垂绝缘子串。悬垂绝缘子串用于直线杆塔上，正常运行时仅支撑导线自重、冰重和风力，在断线时，还要承受断线张力，在一般情况下，采用单串悬垂绝缘子串就能满足设计要求。当线路跨越山谷、河流或重冰区以及线路采用的导线牌号较大时，导线的荷载很大，超过了单串绝缘子串所允许的荷载范围，在这种情况下可采用双联悬垂绝缘子串和多联悬垂绝缘子串。为了减少悬垂串的风偏摇摆角以达到减小杆塔头部尺寸的目的，可采用 V 形及八字形组合绝缘子串。

(2) 耐张绝缘子串。耐张绝缘子串用于耐张、转角和终端杆塔，除支撑导线自重、冰重和风力外，还要承受正常情况和断线情况下顺线路方向导线的全部张力。当导线截面在 185mm^2 及以下时，普遍采用单串耐张绝缘子串；当导线截面较大或遇到特大档距，导线张力很大时，可采用双联耐张绝缘子串或多联耐张绝缘子串。耐张绝缘子串两侧的导线通过跳线连接，跳线绝缘子串用以限制跳线的风偏角，保证跳线对杆塔各部分空气间隙的要求。

1.1.1.5 金具

金具在架空线路中主要用于支持、固定、接续导线及绝缘子连接成串，也用于保护导线和绝缘体。金具一般是由铸钢、锻铁或铝合金材料制成，应具有足够的机械强度。连接导电体的部分金具要具有良好的电气性能。金具按照其用途可分为线夹类金具、连接金具、接续金具、保护金具和拉线金具五大类。

1. 线夹类金具

线夹分为悬垂线夹和耐张线夹两类，悬垂线夹类以字母 X 表示，耐张线夹类以字母 N 表示。

悬垂线夹用于将导线固定在直线杆塔的悬垂绝缘子串上，或将避雷线悬挂在直线杆塔上，也可用于换位杆塔上支持换位导线。

耐张线夹用于将导线固定在耐张杆塔的绝缘子串上，以及将避雷线固定在耐张杆塔上。耐张线夹根据使用和安装条件的不同，分为螺栓型、压接型、楔形和混合型节能耐张线夹四种。螺栓型耐张线夹有正装和倒装两种结构，由于受握着力限制，一般只用于 240mm^2 及以下中小截面的导线上，实用中较多地采用倒装式螺栓型耐张线夹；压接型耐张线夹分液压和爆压两种型式，由于握着力较大，适用于 240mm^2 以上大截面导线；楔形耐张线夹主要用于与避雷线的配合，靠楔形块与螺栓配合构成混合型节能耐张线夹，既减少电能损耗，方便施工，又可以增加其握着力。

2. 连接金具

连接金具用于与绝缘子连接成串，将一串或数串绝缘子串连接或悬挂在杆塔横担上。常用的连接金具有以下类型：

(1) 球头挂环。用于连接绝缘子上端碗头铁帽，主要有圆形连接的 Q 型和螺栓平面连接的 QP 型。

(2) 碗头挂板。用于连接绝缘子下端球头铁脚，分单联和双联碗头两种。

(3) U 型挂环。一般用于金具之间的连接，可单独使用，也可组装使用。

(4) 直角挂板。是一种转向金具，其连接方向成直角，故可按使用要求转变绝缘串的连接方向。

(5) 平行挂板。用于单板与单板、单板与双板的连接，以及与槽型绝缘子的连接。

(6) 平行挂环。用于加大绝缘子串长度、改善导线张力或增大跳线间隙。

(7) 二联板。用于将两串绝缘子组装成双联悬垂、耐张及转角悬垂子串。

连接金具类型选择应根据使用条件和连接方式进行。例如：用于球窝形绝缘子的连接应选择球头挂环、碗头挂板等；用于槽形绝缘子的连接应选用直角挂板、平行挂板等；用于绝缘子串与杆塔横担的连接则需根据耐张绝缘子串和悬垂绝缘子串连接方式的不同进行选配。

连接金具的机械强度一般不是按导线的荷载选择，而是按绝缘子的机械强度确定，每一种型式的绝缘子配备一套与其机械强度相同的金具。考虑金具的互换性，定型金具按照破坏荷载分为 4、7、10、12、16、20、25、30、50、60 等 10 个等级。例如 XP-60 型绝缘子所配金具的破坏荷载不应小于 60kN，即应选等级标记为“7”的金具，其破坏荷载为 69kN，相应的金具有 U-7 型、QP-7 型、W-7A 型等。连接金具所用的螺栓、销钉直径及螺孔和销钉孔的直径等，也力求统一，相互配合。

3. 接续金具

接续金具用于架空线路的导线及避雷线终端的接续、承力杆塔跳线的接续及导线补修等，产品型号以字母 J 表示。接续金具主要分为承力接续和非承力接续两种。

(1) 承力接续金具：主要有导线、避雷线的接续管等，用于导线连接的接续管主要有爆压管、液压管和钳压管三种。爆压管、液压管呈圆形，适用于架空绝缘导线或 240mm^2 及以上裸导线的承力连接，钳压管呈椭圆形，适用于 240mm^2 及以下裸导线的承力连接。承力连接金具的握着力不应小于该导线、避雷线计算拉断力的 95%。

(2) 非承力接续金具：主要有并沟线夹（用于导线作为跳线、T 连接导线时的连接）、带电装卸线夹（主要用于导线带电拆、搭头）和异径并沟线夹等。非承力接续金具的握着力不应小于该导线计算拉断力的 10%。

4. 保护金具

保护金具包括导线及避雷线的防振金具，用于分裂导线保持线间距离并抑制导线微风振动的间隔棒以及护线条、防振锤、铝包带，以及用于绝缘子串的均压屏蔽环等。

5. 拉线金具

拉线金具主要用于拉线杆塔拉线的连接、紧固和调整，具体如下：

(1) 连接。用于使拉线与杆塔、其他拉线金具连接成整体，主要有拉线 U 型环、二联板等。

(2) 紧固。用于紧固拉线端部，与拉线直线接触，要求有足够的握着力度，主要有楔形线夹、预绞丝和钢线卡子等。

(3) 调节。用于施工和运行中固定与调整拉线的松紧，要求有调节方便、灵活的性能，主要有可调式和不可调式两种 UT 线夹。

1.1.1.6 基础

杆塔基础的作用是保证杆塔稳定，防止杆塔因承受导线、冰、风、断线张力等的垂直荷载、水平荷载和其他外力作用而产生倾斜、下沉、上拔或倒塌。杆塔基础一般分为混凝土电杆基础和铁塔基础。

1. 混凝土电杆基础

混凝土电杆基础一般采用底盘、卡盘、拉盘（俗称三盘）基础。通常是事先预制好的钢筋混凝土盘，使用时运至施工现场组装，较为方便。底盘是埋在电杆底部的方形盘，承受电杆的下压力并将其传递到地基上，以防电杆下沉；卡盘是紧贴杆身埋入地面以下的长形横盘，其中采用圆钢或圆钢与扁钢焊成 U 型抱箍与电杆卡接，以承受电杆的横向力，增加电杆的抗倾覆力，防止电杆倾斜；拉盘是填埋于土中的钢筋混凝土长方形盘，在盘的中部设置 U 型吊环和长形孔，与拉线棒及金具相连接，以承受拉线的上拔力，稳住电杆，是拉线的锚固基础。

2. 铁塔基础

铁塔基础型式一般根据铁塔类型、塔位地形、地质及施工条件等实际情况确定。根据铁塔根开大小不同，大体可分为宽基和窄基两种。宽基铁塔是将铁塔的每根主材（每条腿）分别安置在一个独立的基础上，这种基础稳定性较好，但占地面积较大，常被用在郊区和旷野地区；窄基铁塔是将铁塔的四根主材均安置在一个公用基础上。这种基础出土占地面积较小，但为了满足抗倾覆能力要求，基础在地下部分较深、较大，常被用在市区电力线路上或地形较窄的地段。

1.1.1.7 接地装置

架空地线在导线的上方，它通过每基杆塔的接地线或接地体与大地相连，当雷击地线时，可迅速地将雷电流向大地中扩散。因此，输电线路的接地装置主要是泄导雷电流，降低杆塔顶电位，保护线路绝缘不致击穿闪络。它与地线密切配合对导线起到了屏蔽作用。接地装置分为接地体和接地线。

1. 接地体

接地体是指埋入地中并直接与大地接触的金属导体，分为自然接地体和人工接地体两种。为减少相邻接地体之间的屏蔽作用，接地体之间的必须保持一定距离。为使接地体与大地连接可靠，接地体同时必须有一定的长度。

2. 接地线

架空电力线路杆塔与接地体连接的金属导体叫接地线。对非预应力钢筋混凝土杆可以利用内部钢筋作为接地线；对预应力钢筋混凝土杆因其钢筋较细，不允许通过较大的接地电流，可以通过爬梯或者从避雷线上直接引下线与接地体连接。铁塔本身就是导体，故可将扁钢接地体和铁塔腿进行连接即可。

1.1.1.8 拉线

拉线的作用是为了在架设导线后能平衡杆塔所承受的导线张力和水平风力，以防止杆塔倾倒，影响安全正常供电。拉线与地面的夹角一般为 45° ，若受环境限制可适当增减，一般不超出 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。拉线按其作用可分为张力拉线（如转角、耐张、终端、分支杆塔拉线等）和风力拉线（如在土质松软的线路上设置拉线，增加电杆稳定性）两种；按拉线的型式，又可分为普通拉线、人字拉线、十字拉线、水平拉线、弓形拉线、共同拉线和 V 形拉线、Y 形拉线、X 形拉线等。

1.1.2 电缆线路

电缆线路问世的时间相对架空线路不长。世界上第一条电缆线路于 1890 年在英国投入运行，而我国的第一条电缆线路诞生于 20 世纪 30 年代。在 1949 年以前，我国的电力电缆生产规模还很小。1951 年，我国研制成功了 6.6kV 铅护套低绝缘电力电缆；1966 年生产出了第一条充油电力电缆；1968 年和 1971 年又先后研制出了 220kV 和 330kV 充油电缆；到了 1983 年，首次研制出了 500kV 充油电缆。进入 21 世纪后，电缆线路快速发展，新型的交联聚乙烯（XLPE）电缆在高、中、低压线路中均得到广泛应用。

1.1.2.1 电力电缆的种类和特点

电力电缆的品种规格很多，分类方法多种多样，通常按照绝缘材料、结构、电压等级和特殊用途等方法进行分类。

1. 按绝缘材料分类

电力电缆按绝缘材料主要分为油纸绝缘电缆、挤包绝缘电缆和压力电缆三大类。

(1) 油纸绝缘电缆。油纸绝缘电缆是绕包绝缘纸带后浸渍绝缘剂（油类）作为绝缘的电缆。

根据浸渍绝缘剂的不同，油纸绝缘电缆可以分为两个种类，即黏性浸渍纸绝缘电缆和滴流浸渍纸绝缘电缆。两者结构完全一样，除制造过程除浸渍工艺有所不同外，其他均相同。滴流浸渍纸绝缘电缆的浸渍剂黏度大，在工作温度下不滴流，能满足在高差较大的环境（如矿山、竖井等）使用。

按绝缘结构不同，油纸绝缘电缆主要分为统包绝缘电缆、分相屏蔽电缆和分相铅包电缆。

1) 统包绝缘电缆（又称带绝缘电缆）。统包绝缘电缆的结构特点，是在每相导体上分

别绕包部分带绝缘后，加适当填料经绞合成缆，再绕包带绝缘，以补充其各相导体对地绝缘厚度，然后挤包金属护套。

统包绝缘电缆的优点是结构紧凑、节约原材料、价格较低；缺点是内部电场分布很不均匀、电力线不是径向分布、具有沿着纸面的切向分量。所以，这类电缆又叫做非径向电场型电缆。由于油纸的切向绝缘强度只有径向绝缘强度的 10%~50%，所以统包绝缘电缆容易产生移滑放电，故只能用于 10kV 及以下电压等级的线路。

2) 分相屏蔽电缆和分相铅包电缆。分相屏蔽电缆和分相铅包电缆的结构基本相同，这两种电缆特点是在每相绝缘芯制好后包覆屏蔽层或挤包铅套，然后再成缆。但是，分相屏蔽电缆在成缆后挤包一个三相共用的金属护套，使各相间电场互不相关，从而消除了切向分量，其电力线沿着绝缘芯径向分布，所以这类电缆又叫径向电场型电缆。径向电场型电缆的绝缘击穿强度比非径向型高得多，多用于 35kV 电压等级的线路。

(2) 挤包绝缘电缆。挤包绝缘电缆又称固体挤压聚合电缆，它是以热塑性或热固性材料挤包形成绝缘的电缆。

目前，挤包绝缘电缆有聚氯乙烯 (PVC) 电缆、聚乙烯 (PE) 电缆、交联聚乙烯电缆和乙丙橡胶 (EPR) 电缆等，这些电缆均使用于不同的电压等级。

交联聚乙烯电缆是 20 世纪 60 年代以后发展起来的电缆品种，与油纸绝缘电缆相比，它在加工制造和敷设应用方面有不少优点，如其制造周期较短、效率较高、安装工艺较为简便、导体工作温度可达到 90℃ 等。由于制造工艺的不断改进，如用干式交联取代早期的蒸汽交联，采用悬链式和立式生产线，使得 110~220kV 高压交联聚乙烯电缆产品具有优良的电气性能，能满足城市电网建设和改造的需要。目前，在 220kV 及以下电压等级的线路中，交联聚乙烯电缆已逐步取代了油纸绝缘电缆。

(3) 压力电缆。压力电缆是在电缆中充以能流动、具有一定压力的绝缘油或气体的电缆。在制造和运行过程中，油纸绝缘电缆的纸层间不可避免地会产生气隙。气隙在电场强度较高时，会出现游离放电，最终导致绝缘层击穿。压力电缆的绝缘处在一定压力下（油压或气压），抑制了绝缘层中形成气隙，使电缆绝缘工作场强明显提高，可用于 63kV 及以上电压等级的电缆线路。

为了抑制气隙，用带压力的油或气体填充绝缘，是压力电缆的结构特点。按填充压缩气体与油的措施不同，压力电缆可分为自容式充油电缆、充气电缆、钢管充油电缆和钢管充气电缆等品种。

2. 按结构分类

电力电缆按照电缆芯线的数量不同可以分为单芯电缆和多芯电缆。

(1) 单芯电缆是单独一相导体构成的电缆。一般在大截面、高电压等级电缆多采用此种结构。

(2) 多芯电缆是由多相导体构成的电缆。该种结构一般在小截面、中低压电缆中使用较多。多芯电缆有两芯、三芯、四芯、五芯等。

3. 按电压等级分类

根据 IEC 标准推荐，电缆按照额定电压分为低压、中压、高压和超高压等四类。

(1) 低压电缆。额定电压小于 1kV，如：0.6/1。