

第一篇 导线、避雷线部分

第一章 基本知识

电力系统中发电厂的位置，决定于动力资源的分布、运输的条件和工农业用户的分布等。若发电厂建在用户端，则需由能源基地向发电厂运输燃料（煤、石油等）；若发电厂建在能源基地，则需由发电厂向用户中心输送电能。通过经济比较表明，不论距离远近，输送电能都比输送燃料经济，因此，现代大型电厂，均在能源基地建厂，然后用高压送电线路向用户中心输送电能。

由发电厂向电力用户中心输送电能的线路称为送电线路；由电力用户中心向电力用户分配电能的线路，称为配电线路。送配电线路通称为电力线路，它按结构又有架空线路和电缆线路之分。架空线路使用广泛，因为它比电缆线路具有一些显著的优点，例如：建设费用低，施工期短，技术要求较低，维护检修方便，节省有色金属等。所以除了特殊情况（如地面狭窄而线路拥挤或有特殊要求等）外，应尽先采用架空线路。

架空送电线路机械部分的计算内容，包括架空送电线路的导线和避雷线的机械计算、杆塔及其基础的计算、线路选线与杆塔定位以及施工计算等。计算的目的在于保证架空线路运行的可靠性和建设的经济性。

架空送电线路由导线、避雷线（或称架空地线、简称地线）、电杆（杆塔）、绝缘子串和金具（图中未画出）等主要元件组成，如图 1-1-1 所示。它们的作用是：

- （1）导线用来传导电流，输送电能；
- （2）避雷线是把雷电流引入大地，以保护线路绝缘免遭大气过电压的破坏；
- （3）杆塔用来支持导线和避雷线，并使导线和导线间，导线和避雷线间，导线和杆塔间以及导线和大地、公路、铁轨、水面、通讯线等被跨越物之间，保持一定的安全距离；
- （4）绝缘子是用来使导线和杆塔之间保持绝缘状态；
- （5）金具是用来连接导线或避雷线，将导线固定在绝缘子上，以及将绝缘子固定在杆塔上等的金属元件。

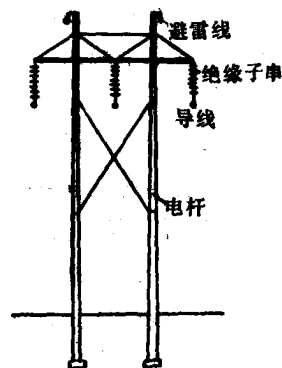


图 1-1-1 架空线路的主要元件

第一节 导线和避雷线

一、导线

架空线路的导线，除应具有良好的导电率外，还应具有以下的特点：机械强度高、坚硬耐磨、质韧耐折、抗蚀性较好及质轻价廉等。这些要求是根据线路的不同情况而占有不同的比重。

架空线路常用的导线材料是铜、铝、钢、铝合金等。各种导线材料的物理特性见表1-1-1所示。

表 1-1-1 导线材料的物理特性

材 料	20°C时的电阻率 (欧·毫米 ² /米)	比 重 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	抗化学腐蚀能力及其它
铜	0.0182	8.9	39	表面易形成氧化膜，抗腐蚀能力强
铝	0.029	2.7	16	表面氧化膜可防继续氧化，但易受酸碱盐的腐蚀
钢	0.103	7.85	120	在空气中易锈蚀，须镀锌
铝 合 金	0.0339	2.7	30	抗化学腐蚀性能好，受振动时易损坏

由表1-1-1可见，铜是比较理想的导线材料，但由于铜相对于其它金属来说用途较广而产量较少，因此，架空线路的导线，除特殊需要者外，一般都不采用铜线。

铝的导电率仅次于铜。铝是地球上存在最多的元素之一，它稍逊于氧、硅而居第三位。铝的比重小，采用铝线时杆塔受力较小。但铝的机械强度低，允许应力小，导线放松时的下垂度（称为弛度或弧垂）较大，导致杆塔高度增加。所以，铝导线只用在档距（相邻杆塔间的水平距离）较小的10千伏及以下的线路。对于档距较大电压较高的线路，则需用铝和其它金属配合，以提高导线的机械强度。此外，铝的抗酸、碱、盐的能力较差，故沿海地区和化工厂附近不宜采用。

上表中钢的导电率是最低的，但它的机械强度很高，且价格较有色金属低廉，在线路跨越山谷、江河等特大档距中有时采用钢导线。钢线需要镀锌以防锈蚀。

铝合金线的导电率与铝相近，机械强度与铜相近，价格却比铜低，抗化学腐蚀性能好，但铝合金受振动而断股的现象却很严重。近年来，国内外在使用铝合金线方面，有较大进展，不过，铝合金导线的防振措施仍在研究中。

架空线路一般都是用裸导线敷设的。裸导线按结构可分为三种（参见图1-1-2）：

- (1) 单股线；
- (2) 单金属多股绞线；
- (3) 复金属多股绞线（包括钢芯铝绞线、扩径钢芯铝绞线、空心导线、钢铝混绞线、钢芯铝包钢绞线、铝包钢绞线、分裂导线）。

若架空线路的输送功率大，导线截面大，对导线的机械强度要求高，而多股单金属铝

绞线的机械强度仍不能满足要求时，则把铝和钢两种材料结合起来制成钢芯铝绞线，其不仅有较好的机械强度，且有较高的电导率。由于交流电的趋肤效应，使铝线截面的载流作用得到充分的利用，而其所承受的机械荷载则由钢芯和铝线共同负担。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，钢芯铝线被广泛地应用在 35 千伏及以上的线路中。

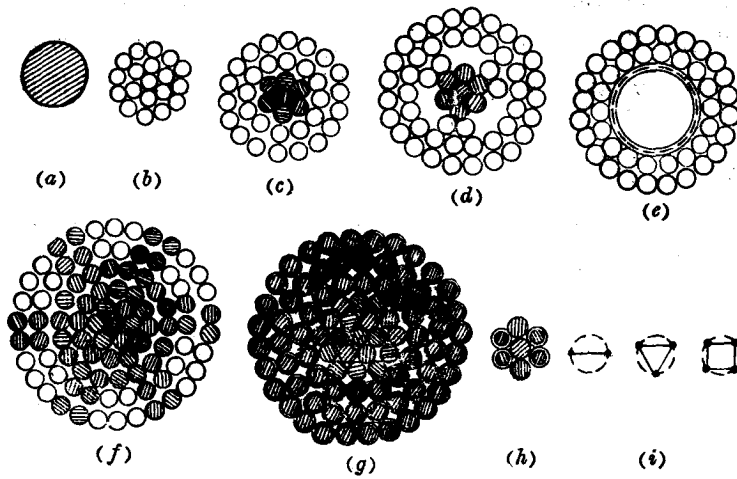


图 1-1-2 架空线路各种导线和避雷线断面图

(a) 单股导线；(b) 单金属多股绞线；(c) 钢芯铝绞线；(d) 扩径钢芯铝绞线；(e) 空心导线（腔中为蛇形管）；(f) 钢铝混绞线；(g) 钢芯铝包钢绞线；(h) 铝包钢绞线避雷线；(i) 分裂导线

架空线路导线的型号，是用导线材料、结构和载流截面积三部分表示的。导线的材料和结构用汉语拼音字母表示。如：**T**——铜线；**L**——铝线；**G**——钢线；**J**——多股绞线；**TJ**——铜绞线；**LJ**——铝绞线；**GJ**——钢绞线；**HLJ**——铝合金绞线；**LGJ**——钢芯铝绞线。导线截面用平方毫米为单位。如**LGJ-120**——标称截面为 120 平方毫米的钢芯铝绞线。

钢芯铝绞线简称钢芯铝线，按铝钢截面比的不同，又分为三种类型：

第一种是普通型钢芯铝线，代号为**LGJ**，其铝钢截面比为 5.3~6.1；

第二种是轻型钢芯铝线，代号为**LGJQ**，其铝钢截面比约为 7.6~8.3；

第三种是加强型钢芯铝线，代号为**LGJJ**，其铝钢截面比约为 4~4.5。

普通型和轻型钢芯铝线，用于一般地区；加强型钢芯铝线，用于重冰区或大跨越地段。

为了减小电晕以降低损耗和对无线电、电视等的干扰以及为了减小电抗以提高线路的输送能力，高压和超高压送电线路的导线，应采用扩径导线，空心导线或分裂导线。因扩径导线（图 1-1-2，*d*）和空心导线（图 1-1-2，*e*）制造和安装不便，故送电线路多采用分裂导线（图 1-1-2，*i*）。分裂导线每相分裂的根数一般为 2~4 根，正在研究使用的 1000~

1500千伏的特高压送电线路，国外将考虑采取多至12根的分裂导线。

分裂导线由数根导线组成一相，每一根导线称为次导线，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30~80米装一个间隔棒，使次导线间保持次线间距离，两相邻间隔棒间的水平距离称为次档距。

在一些线路的特大跨越档距中，为了降低杆塔高度，要求导线具有很高的抗拉强度和耐振强度，国内外特大跨越档距，一般用强拉力钢绞线，但也有用加强型钢芯铝线和特制的钢铝混绞线和钢芯铝包钢绞线的（如图1-1-2，f及g所示）。我国某220千伏线路中的一个跨越档的导线采用了GLGJ-38/19型钢芯铝包钢绞线，另一跨越档则采用了LGJJ-300加强型钢芯铝绞线，既满足了送电量和机械强度的要求，又获得造价低和运行费少的经济效益。

二、避雷线

避雷线一般多采用钢绞线，但近年来，在超高压送电线路上有采用良导体作避雷线的趋势。避雷线一般都是通过杆塔接地，但也有采用所谓“绝缘避雷线”的。绝缘避雷线即采用带有放电间隙的绝缘子把避雷线和杆塔绝缘起来，雷击时利用放电间隙引雷电流入地。这样做对防雷作用毫无影响，而且还能利用避雷线作载流线；用于避雷线熔冰；作为载波通讯的通道；在线路检修时，可作为电动机的电源；此外还可对小功率用户供电等。绝缘避雷线还可减小避雷线中由感应电流而引起的附加电能损耗。

对超高压和特高压送电线路，为了减小其对邻近的通讯线路的危险影响和干扰影响，以及降低超高压线路的潜供电流，常用铝包钢绞线或其他有色金属线作绝缘避雷线。

110千伏及以上的送电线路，应沿全线架设避雷线；经过山区的220千伏输电线路，宜采用双避雷线；330千伏及以上的送电线路，应沿全线架设双避雷线；对于不沿全线架设避雷线的35~60千伏线路，应在变电所1~2公里的进出线上架设避雷线，以防护导线及变电所设备免遭直接雷击。

避雷线的型号一般配合导线截面进行选择，其配合表见表1-1-2。

各种常用架空线导和避雷线的规格见表1-1-3及表1-1-4。

表 1-1-2 常用导线与避雷线配合表

导 线 型 号	LGJ-35	LGJ-95	LGJ-210	LGJ-400
	LGJ-50	LGJ-120	LGJ-240	LGJ-500及以上
	LGJ-70	LGJ-150	LGJ-300	
		LGJ-185	LGJQ-300	
			LGJQ-400	
避 雷 线 型 号	GJ-25	GJ-35	GJ-50	GJ-70

表 1-1-3 各种常用架空线的规格 (现行国家标准GB1179-74)

标称截面 (毫米 ²)	导 线 型 号															
	LJ型				LGJ型				LGJQ型				LGJJ型			
	股数	计算外径 (毫米)	计算截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股数	计算外径 (毫米)	计算截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股数	计算外径 (毫米)	计算截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股数	计算外径 (毫米)	计算截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)
10	3	4.46	10.10	27.6	6	4.5	12.37	42.9	1	4.5	12.37		1	4.5	12.37	
16	7	5.10	15.89	43.5	6	5.4	17.81	61.7	1	5.4	17.81		1	5.4	17.81	
25	7	6.36	24.71	67.6	6	6.6	26.6	92.2	1	6.6	26.6		1	6.6	26.6	
35	7	7.50	34.36	94.0	6	8.4	43.1	149	1	8.4	43.1		1	8.4	43.1	
50	7	9.00	49.48	135	6	9.6	56.3	195	1	9.6	56.3		1	9.6	56.3	
70	7	10.65	69.29	190	6	11.4	79.4	275	1	11.4	79.4		1	11.4	79.4	
95	19	12.50	93.27	257	28	13.68	112.04	401	7	13.68	112.04		7	13.68	112.04	
95(1)	7	12.42	94.23	258	7	13.68	112.04	398	7	13.68	112.04		7	13.68	112.04	
120	19	14.00	116.99	323	28	15.2	138.3	495	7	15.2	138.3		7	15.2	138.3	
120(1)					7	15.2	138.3	492	7	15.2	138.3		7	15.2	138.3	
150	19	15.75	148.07	409	28	16.72	167.4	598	24	16.44	161.4	537	30	17.5	181.6	677
185	19	17.50	182.80	504	28	19.02	216.8	774	24	18.24	198.5	661	30	19.6	227.8	850
240	19	19.90	236.38	652	28	21.28	271.1	969	24	21.88	285.6	951	30	22.4	297.6	1110
300	37	22.40	297.57	822	28	25.2	377.2	1348	54	23.7	335.0	1116	30	25.68	389.6	1446
300(1)					24	23.72	335.7	1117	24	23.72	335.7		24	23.72	335.7	
400	37	25.90	397.83	1099	28	27.68	454.6	1626	54	27.36	446.6	1487	30	29.18	502.99	1868
400(1)					24	27.4	448.3	1491	24	27.4	448.3		24	27.4	448.3	
500	37	28.98	498.97	1376	54	30.16	538.5	1795	54	30.16	538.5	1795				
600	61	31.95	603.78	1669	54	33.2	652.8	2175	54	33.2	652.8	2175				
700					54	36.24	778.2	2592	54	36.24	778.2	2592				

表 1-1-4

各种常用架空线的规格 (旧型部颁标准JB649-65)

标 称 截 面 (毫米 ²)	导 线 型 号																			
	LJ型				LGJ型				LGJJ型				GJ型							
	计算 外径 (毫米)	计算 截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股 数	计算 外径 (毫米)	计算 截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股 数	铝	钢	计算 外径 (毫米)	计算 截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)	股 数	计算 外径 (毫米)	计算 截面 (毫米 ²)	单位重量 (公斤/公里)			
16	7	5.1	15.9	44	6	1	5.4	17.8	62											
25	7	6.4	24.7	68	6	1	6.6	26.6	92											
35	7	7.5	34.4	95	6	1	8.4	43.1	150											
50	7	9.0	49.5	136	6	1(7)	9.6	56.3	196											
70	7	10.7	69.3	191	6	1(7)	11.4	79.3	275											
95	7	12.4	93.3	257	28	7	13.7	113.0	404											
120	19	14.0	117.0	322	28	7	15.2	137.0	492											
150	19	15.8	148.0	407	28	7	17.0	174.6	617	24	7	16.6	165.8	559	30	7	15.5	142.6	4.36	
185	19	17.5	183	503	28	7	19.0	215.4	771	24	7	18.4	203.0	687	30	7	17.5	181.4	4.27	
240	19	20.0	239	656	28	7	21.6	281.1	997	24	7	21.6	274.7	937	30	7	19.6	228.1	4.29	
300	37	22.0	298	817	28	7	24.2	351.3	1257	54	7	23.5	328.2	1098	30	19	22.4	297.3	4.28	
400	37	25.8	396	1087	28	19	28.0	467.2	1660	54	7	27.2	441.5	1501	30	19	25.2	369.2	4.12	
500	37	29.1	501	1376						54	19	30.2	541.7	1836						4.29
600	61	32.0	604	1658						54	19	33.1	650.2	2206						
700										54	19	37.1	805.3	2756						

第二节 导线的排列与换位

导线在单回路杆塔上的排列方式有水平排列、三角形排列等。双回路同塔架设时，有伞形排列、倒伞形排列、六角形排列以及双三角形排列等。各种排列方式的示意图见图 1-1-3。

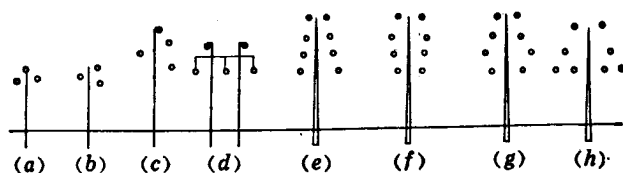


图 1-1-3 导线和避雷线在杆塔上的排列方式

●—避雷线；○—导线

选择导线的排列方式时，主要看其对线路运行的可靠性，对维护检修是否方便，能否减轻杆塔结构。运行经验表明，三角形排列的可靠性较水平排列差，特别是在重冰区、多雷区和电晕严重地区，这是因为下层导线在因故向上跃起时，易发生相间闪络和上下层导线碰线故障，且水平排列的杆塔高度较低，可减少雷击的机会。但水平排列的杆塔结构上比三角形排列者复杂，使杆塔投资增大。

因此，一般说来，对于重冰区，多雷区的单回线路，导线应采用水平排列。对于其余地区可结合线路的具体情况采用水平或三角形排列。从经济观点出发，电压在 220 千伏以下，导线截面不特别大的单回线路，宜采用三角形排列。对双回线路的杆塔，倒伞形排列（见图 1-1-3f）的优点是便于施工和检修，但它的缺点是防雷差，故目前多采用六角形排列（见图 1-1-3g）。

导线的各种排列方式，除等边三角形以外，均不能保证三相导线的线间距离相等，因此，三相导线的电感、电容及三相阻抗都不相等，这会造成三相电流的不平衡。这种不平衡，对发电机、电动机和电力系统的运行以及对输电线路附近的弱电线路均会带来一系列的不良影响。为了避免这些影响，各相导线应在空间轮流地改换位置，以平衡三相阻抗。二避雷线和三相导线的换位顺序如图 1-1-4 所示，图中 l 为线路总长度。

经过完全换位的线路，其各相在空间每一位置的各段长度总和相等。进行一次完全换位的线路称为完成了一个换位循环。

设线路的总长度均为 l 公里，当三相导线进行单循环换位时（如图 1-1-4a 所示），其上部为两根避雷线进行四处交叉换位，下部为三根导线进行了三处换位，图上分别标出的 $\frac{l}{6}$ 、 $\frac{l}{3}$ 、 $\frac{l}{12}$ 等，为两换位处之间相距的距离，是用线路全长的一个分数表示的。每相导线在图上的三个位置（上、中、下）的长度和是相等的（如图 a 上 A 相在上方的长度和为 $\frac{l}{6} + \frac{l}{6} = \frac{l}{3}$ ；A 相在中间和下方的长度和也均为 $\frac{l}{3}$ ；同样 B 相、C 相在上中下三个位

置的长度和也都分别为 $\frac{l}{3}$ ），故为完全换位。当然，避雷线换位后在每一位置的长度和，分别为 $\frac{l}{2}$ 。图（b）和图（c）只画出了三相导线的换位示意图，从图中看出，也是完全换位，不过，其换位处总数相对地减少了，小于单循环换位者的2倍或3倍，这对远距离送电线路的运行安全性和经济性是有好处的。

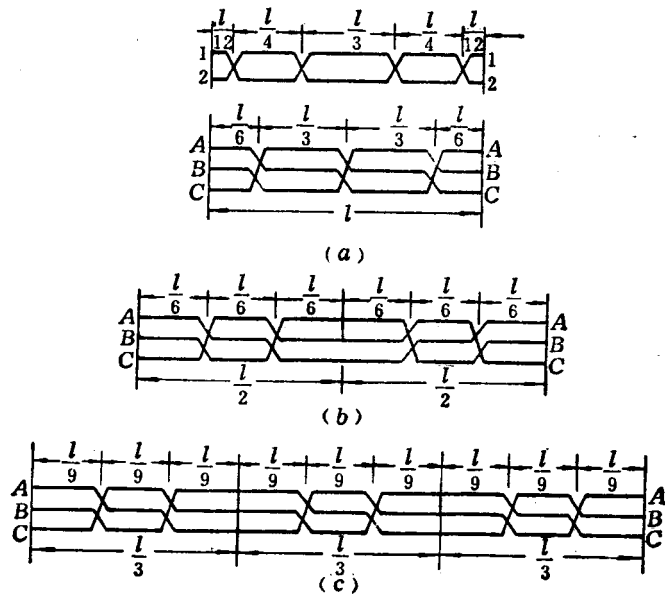


图 1-1-4 送电线路换位示意图
(a) 单循环换位；(b) 双循环换位；(c) 三循环换位

常用的换位方式有滚式换位、耐张塔换位和悬空换位三种（如图 1-1-5 所示）。滚式换位的优点是可用一般型式的杆塔（后面杆塔分类中讲到），缺点是换位处有导线交叉现象，易因复冰不均而引起导线短路，且在档距中导线间的距离不稳定，易接近，因此只广泛应用于轻冰区。耐张塔换位的优点是导线换位时导线间距离较稳定，但需用特殊的耐张换位塔，复杂且不经济，故一般在重冰区使用。悬空换位方式虽在芬兰、瑞典用得较多，我国山西、辽宁也曾采用过，但因施工和检修不便，故未被普遍推广。

无论采用上述哪种换位方式，导线换位都将增大线路投资，且交叉换位处是线路绝缘的薄弱环节，影响运行的可靠性，所以应对换位的循环数加以限制。

《架空送电线路设计技术规程》（以下简称《规程》）规定：“在中性点直接接地的电力网中，长度超过 100 公里的线路，均应换位。换位循环长度不宜大于 200 公里”。

《规程》规定：“如一个变电所某级电压的每回出线虽小于 100 公里，但其总长度超过 200 公里，可采用变换各回线路的相序排列或换位，以平衡不对称电流。”

《规程》规定：“中性点非直接接地的电力网，为降低中性点长期运行中的电位，可用换位或变换线路相序排列的方法来平衡不对称电容电流。”

为使三相导线对地线的感应电压降至最小，绝缘避雷线也要进行换位。二避雷线的换位点应和导线的换位点错开，两线在空间每一位置的总长度应相等。其换位顶视图见图 1-1-4a。

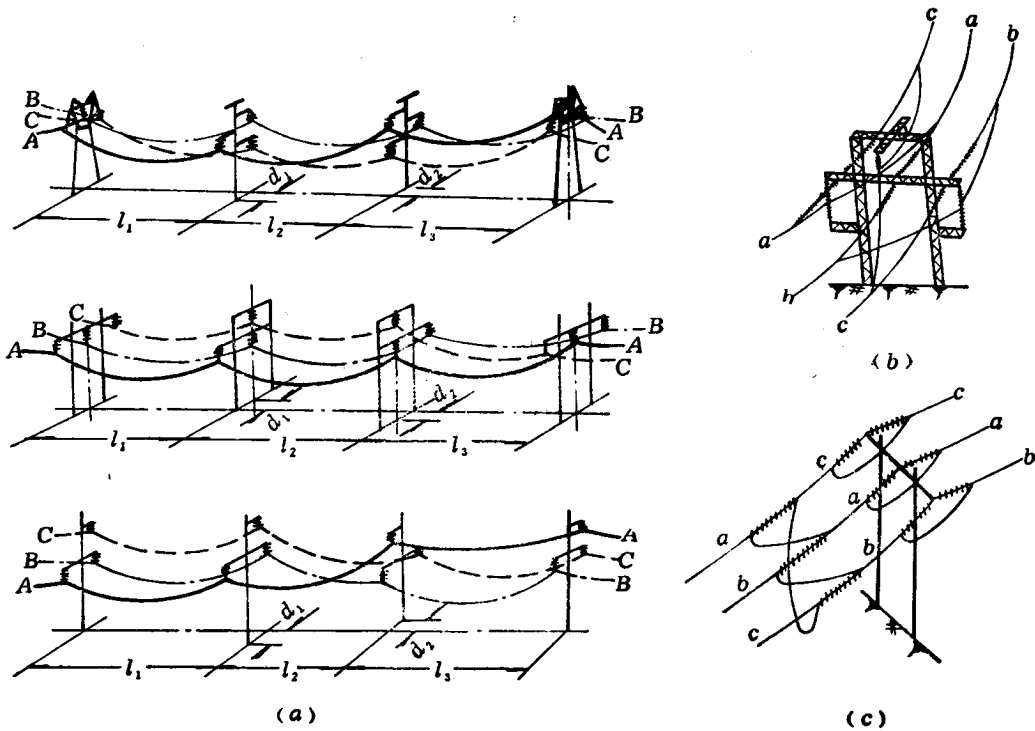


图 1-1-5 换位方式图
(a)滚式换位；(b)耐张塔换位；(c)悬空换位

第三节 杆塔

一、按用途分类

架空线路的杆塔，按其在线路上的用途可分为：直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔、跨越杆塔和换位杆塔等。

直线杆塔（又称中间杆塔），在架空线路中的数量最多，约占杆塔总数的80%左右。在线路正常运行的情况下，直线杆塔不承受顺线路方向的张力，而仅承受导线、避雷线、绝缘子和金具等的重量，所以，其绝缘子串是垂直悬挂的，称做悬垂串（见图 1-1-6 中的直线杆 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的绝缘子串），只有在杆塔两侧档距相差悬殊或一侧发生断线时，直线杆塔才承受相邻两档导线的不平衡张力。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，造价也较低廉。

耐张杆塔（又称承力杆塔），在线路正常运行和断线事故情况下，均承受顺线路方向的张力，因此，这种杆塔称耐张杆塔。在耐张杆塔上是用耐张绝缘子串和耐张线夹来固定

导线的（参见图 1-1-10 两端的杆塔）。

两耐张杆塔间的距离称为耐张段。当线路发生断线故障时，不平衡张力很大，这时直线杆塔因顺线路方向的强度较差而可能逐个被拉倒。耐张杆塔强度高，可将倒杆事故限制在一个耐张段内。所以，耐张杆塔也有称做“锚型杆塔”或“断连杆塔”的。

转角杆塔立于线路转角处。线路转向内角的补角称为“线路转角”（见图 1-1-7）。转角杆塔两侧导线的张力不在一条直线上，因而须承受角度力，见图 1-1-7。转角杆塔除应承受垂直重量和风荷以外，还应能承受较大的角度力。角度力决定于转角的大小和导线的水平张力。转角杆塔的类型有耐张型和直线型之分，这是随角度力的大小而定的。

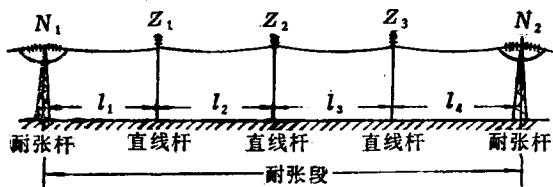


图 1-1-6 线路的一个耐张段

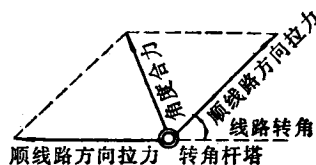


图 1-1-7 转角杆塔的受力图

跨越杆塔位于线路与河流、山谷、铁路等交叉跨越的地方。跨越杆塔也分直线型和耐张型两种。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。

终端杆塔位于线路的首、末端，即变电所进线、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。

换位杆塔是用来进行导线换位的。高压送电线路的换位杆塔分滚式换位用的直线型换位杆塔和耐张型换位杆塔两种。

二、按材料分类

杆塔按使用的材料可分为：木杆、钢筋混凝土杆和铁塔。木杆由于强度低、易腐朽、寿命短，故已逐渐为钢筋混凝土杆所代替。

钢筋混凝土杆的混凝土和钢筋粘结牢固俨如一体，且二者具有几乎相等的温度膨胀系数，不致因膨胀不等产生温度应力而破坏。当电杆受弯时，混凝土受压而钢筋受拉。混凝土又是钢筋的防锈保护层；所以，钢筋混凝土是制造电杆的好材料。

钢筋混凝土杆的优点是：

- (1) 经久耐用，一般可用 50~100 年之久；
- (2) 维护简单，运行费用低；
- (3) 较铁塔节约钢材 40~60%；
- (4) 比铁塔造价低，施工期短。

其缺点主要是笨重，运输困难，因此对较高的水泥杆，均采用分段制造，现场进行组装，这样可将每段电杆重量限制在 500~1000 公斤以下。

混凝土的受拉强度较受压强度低得多，当电杆杆柱受力弯曲时，杆柱截面一侧受压另一侧受拉，虽然拉力主要由钢筋承受，但混凝土与钢筋一起伸长，这时混凝土的外层即受

一拉应力而裂缝。裂缝较宽时就会使钢筋锈蚀，缩短寿命。防止产生裂缝的最好方法，就是在电杆浇铸时将钢筋施行预拉，使混凝土在承载前就受到一个预压应力。当电杆承载时，受拉区的混凝土所受的拉应力与此预压应力部分地抵消而不致产生裂缝。这种电杆叫做预应力混凝土电杆。

预应力混凝土杆能发挥高强度钢材的作用，比普通混凝土杆可节约钢材40%左右，同时水泥用量也减少，电杆的重量也减轻了。由于它的抗裂性能好，所以延长了电杆的使用寿命。预应力混凝土杆是今后的发展方向。

铁塔是用角钢焊接或螺栓连接的（个别有铆接的）钢架。它的优点是坚固、可靠，使用期限长，但钢材消耗量大，造价高，施工工艺较复杂，维护工作量大。因此，铁塔多用于交通不便和地形复杂的山区，或一般地区的特大荷载的终端、耐张、大转角、大跨越等特种杆塔。

第四节 绝 缘 子

架空线路的绝缘子，是用来支持导线并使之与杆塔绝缘的。它应具有足够的绝缘强度和机械强度，同时对化学杂质的侵蚀具有足够的抗御能力，并能适应周围大气条件的变化，如温度和湿度变化对它本身的影响等。

架空线路上所用的绝缘子有针式、悬式、棒式和瓷横担等数种。

针式绝缘子（见图1-1-8a）多用于电压较低（35千伏以下）和导线张力不大的配电线路上，导线则用金属线绑扎在绝缘子顶部的槽中使之固定。

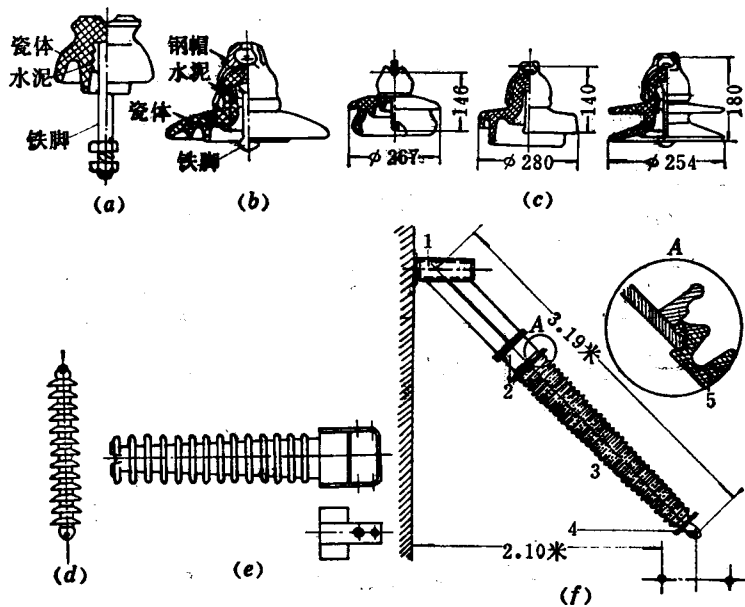


图 1-1-8 绝缘子

(a) 针式绝缘子；(b) 悬式绝缘子；(c) 防污型悬式绝缘子；(d) 瓷质棒式绝缘子；(e) 瓷横担；

(f) 玻璃钢摆动式绝缘横担

1—轴；2—金属套节；3—环氧树脂玻璃钢绝缘子；4—金属帽；5—外壁

悬式绝缘子（见图 1-1-8b）多组成绝缘子串，用于 35 千伏及以上的线路上。在沿海地区和化工厂附近的线路，使用防污型悬式绝缘子（见图 1-1-8 之 c）。

绝缘子以往都是陶瓷的，所以又叫做瓷瓶。近几年来我国已开始使用钢化玻璃悬式绝缘子，这种绝缘子尺寸小、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，巡线人员很容易用望远镜检查出来）。玻璃悬式绝缘子现已在 35~500 千伏线路上使用。

棒式绝缘子的形状如图 1-1-8d 所示，它是一个瓷质整体，可以代替悬垂绝缘子串。它的优点是重量轻、长度短、省钢材、且降低了杆塔的高度。但棒式绝缘子制造工艺较复杂，成本较高，且运行中易于由振动而断裂，因此瓷质棒式绝缘子未被大量使用。

瓷横担是棒式绝缘子的另一种型式，它代替了针式和悬式绝缘子且省去电杆横担。根据几年来的运行经验证明，瓷横担具有许多优点，如运行安全可靠、绝缘水平高、节约钢材、有效地利用了杆塔高度、降低线路造价 20~30% 左右，且安装方便加速了施工进度。目前我国在 10~35 千伏配电线路上，瓷横担已广泛使用，并在 110~220 千伏线路上开始使用。其缺点是易被冰雹击断而造成断线倒杆事故。

最近，国内外试用环氧树脂和玻璃纤维制成的新型玻璃钢棒式绝缘子和绝缘横担。图 1-1-8f 是用玻璃钢做成的摆动式绝缘横担。

悬式绝缘子在直线型杆塔上组成悬垂串。悬垂串在正常运行时仅支承导线自重、冰重和风力，在断线时，还要承受断线张力。大跨越档距或重冰区导线的荷载很大，超过悬垂串的允许荷载时，可采用双联悬垂串和多联悬垂串（如图 1-1-9）。为了减小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、“人”形及人字形悬垂串。

双联或多联悬垂串的串数是根据最大垂直荷载和断线张力选择的。即：

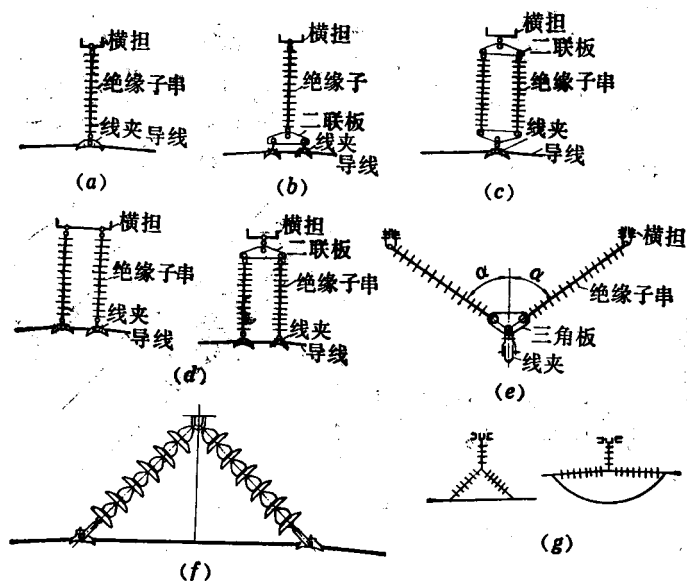


图 1-1-9 悬垂串

(a) 单线夹单联悬垂串；(b) 双线夹单联悬垂串；(c) 单线夹双联悬垂串；(d) 双线夹双联悬垂串；
(e) “V”形悬垂串；(f) 人字形悬垂串；(g) “人”形组合悬垂串

$$n \geq \frac{K \Sigma G}{P} \quad (1-1-1)$$

$$n \geq \frac{K' T_D}{P} \quad (1-1-2)$$

式中 n —— 悬垂串的串数；

ΣG —— 悬垂串所承受的最大垂直荷载（公斤）；

K 、 K' —— 正常运行情况、断线情况时的绝缘子的安全系数（见表 1-1-5）；

T_D —— 断线张力（公斤）；

P —— 悬式绝缘子的一小时机电试验负荷或瓷横担绝缘子的抗弯破坏负荷（公斤），

可由绝缘子型号得知。如 X-4.5 型悬式绝缘子，其 $P=4500$ 公斤。

表 1-1-5 绝缘子的安全系数

线路运行情况	悬式绝缘子	瓷横担绝缘子
正常情况 (K)	2.0	3.0
事故情况 (K')	1.3	2.0

悬式绝缘子在耐张杆塔上组成耐张串，耐张串除支承导线自重、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不平衡张力。当大跨越档距中的导线张力很大时，可采用双联或多联耐张串（其结构见图 1-1-10）。耐张串两侧的导线通过跳线（又称引流线）连接，见图 1-1-11，（a）为用压接型线夹与耐张串连接；（b）为用倒装式线夹与耐张串连接；（c）跳线中央用悬垂串限制摇摆。

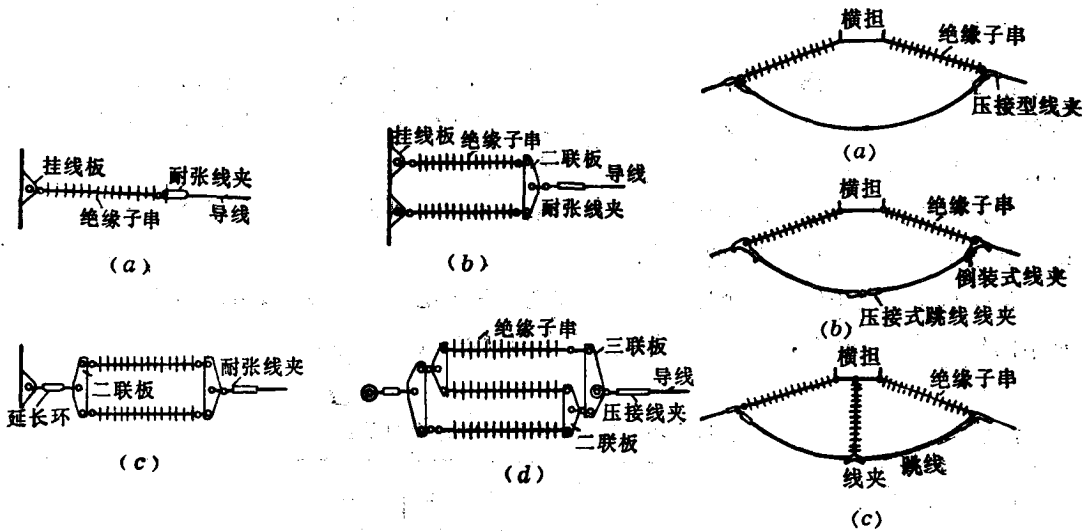


图 1-1-10 耐张串

(a) 单联耐张串；(b) 双联耐张串之一；(c) 双联耐张串之二；(d) 三联耐张串

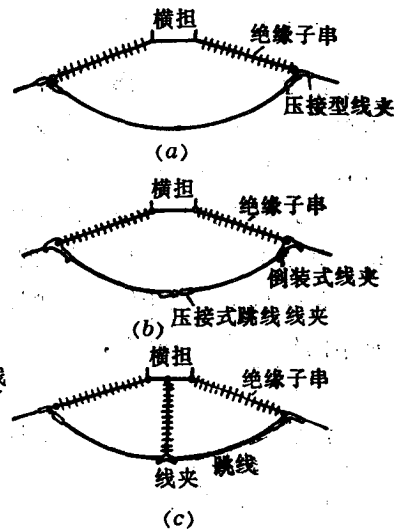


图 1-1-11 跳线与耐张串的连接

耐张串的串数应按导线的最大张力计算：

$$n \geq \frac{KT}{P} \quad (1-1-3)$$

式中 T ——导线的最大水平张力（公斤），可由 $T=[\sigma] \cdot S$ 计算；

S ——导线的横截面积（毫米²）；

$[\sigma]$ ——导线的许用应力（公斤/毫米²），计算方法见第五章第三节。

【例 1-1-1】（1）已知线路的导线为 LGJ-150 型，其许用应力 $[\sigma]=11.6$ （公斤/毫米²），绝缘子采用 X-4.5 型；（2）已知导线为 LGJ-185 型，其 $[\sigma]=11.6$ （公斤/毫米²），绝缘子采用 X-4.5 型；（3）已知导线为 LGJ-185 型，绝缘子用 X-7 型。试确定以上三种情况的耐张串的串数。

解：（1）查表 1-1-3 可知，LGJ-150 型导线的计算截面为 $s=167.4$ 毫米²，且知导线的许用应力 $[\sigma]=11.6$ （公斤/毫米²）；查表 1-1-5 得正常情况下绝缘子的安全系数 $K=2.0$ ，由 X-4.5 型可知 $P=4500$ 公斤按（1-1-3）式计算耐张串的串数为：

$$n \geq \frac{KT}{P} = \frac{K[\sigma]S}{P} = \frac{2.0 \times 11.6 \times 167.4}{4500} = 0.865 \text{ 串，取一串。}$$

（2）与（1）步骤相同：查表 1-1-3 得知，LGJ-185 型导线的计算截面 $S=216.8$ 毫米²，查表 1-1-5 知绝缘子的安全系数 $K=2.0$ 由绝缘子型号知， $P=4500$ 公斤，则由（1-1-3）式得：

$$n \geq \frac{2.0 \times 11.6 \times 216.8}{4500} = 1.118 \text{ 串，取两串。}$$

（3）同上方法查表得出： $K=2.0$ ，X-7 型的绝缘子的 $P=7000$ 公斤，而导线的计算截面和许用应力不变， $s=216.8$ 毫米²， $[\sigma]=11.6$ （公斤/毫米²）则由（1-1-3）式得：

$$n \geq \frac{2.0 \times 11.6 \times 216.8}{7000} = 0.69 \text{ 串，取一串。}$$

由上计算结果看出，采用 LGJ-150 型及以下的导线时，X-4.5 型绝缘子的耐张串都可用单串；若采用 LGJ-185 型及以上的导线时，X-4.5 型绝缘子的耐张串都应采用双串。但后者若改用 X-7 型的绝缘子，耐张串仍可用单串。

在运行中的悬垂串、耐张串或瓷横担的安全系数，可由（1-1-1）式至（1-1-3）式校核，其值不应小于表 1-1-5 中的数值。

每一悬垂串上绝缘子的个数，是根据线路的额定电压等级按绝缘配合条件选定的。悬垂串的绝缘子最少个数，应不少于表 1-1-6 中的规定数。

表 1-1-6 直线杆塔上悬垂串绝缘子的最小用量表

额定电压（千伏）	35	60	110	154	220	330	500	750
每串绝缘子的最少个数 (X-4.5型)	3	5	7	10	13	19 (16~20)	24 (23~25)	(33~35)

注 括号内数字系参考国外标准绝缘子的个数。

《架空送电线路设计技术规程》(以后均简称《规程》)规定：“一般地区的线路，绝缘子串或瓷横担绝缘子的单位工作电压(额定线电压)泄漏距离不应小于1.6(厘米/千伏)。”以保证正常工作电压下不致闪络。因此，悬垂串绝缘子的个数应不小于下式计算的个数，即：

$$\text{绝缘子个数} = \frac{1.6U_e}{h_x} \quad (1-1-4)$$

式中 U_e ——额定线电压(千伏)；

h_x ——每个绝缘子的泄漏距离(厘米)，常用的X-4.5型绝缘子的泄漏距离为28厘米。

例如110千伏线路采用X-4.5型绝缘子时，按1-1-4)式计算，绝缘子个数 = $\frac{1.6 \times 110}{28} = 6.3$ 个，于是就选用每串7个的悬垂串(见表1-1-6)。

除以上条件外，所选悬垂串的个数，还应满足内部过电压的要求和耐雷水平的要求，因超出本书范围，此处不加详述。

每串耐张串的绝缘子个数应比每串悬垂串同型号绝缘子的个数多1个。这是因为耐张串在正常运行中经常承受较大的导线张力，绝缘子容易劣化的缘故。

杆塔高度超过40米后，每超过10米应增加一个绝缘子，全高超过100米的杆塔，绝缘子的个数应结合运行经验，通过大气过电压的计算确定。

对于架设在空气中含有工业污秽地带或接近海岸、盐场、盐湖和盐碱地区的线路，应根据运行经验和可能污染的程度，增加绝缘子的泄漏距离。这时宜采用防污型绝缘子(见图1-1-8c)或增加普通绝缘子的个数。

若增加普通绝缘子时，一级污秽区(盐尘区)应满足单位电压泄漏距离2.0厘米/千伏，对110千伏线路采用X-4.5型绝缘子的每串个数 = $\frac{2.0U_e}{h_x} = \frac{2.0 \times 110}{28} = 7.85 \approx 8$ 。

以上均指适于海拔高度不超过1000米地区的线路。对于架设在海拔高度超过1000米但未超过3500米地区的线路，悬垂串的个数除应满足(1-1-4)式外，尚应不少于下列公式计算的个数。

$$\text{绝缘子个数} = N[1 + 0.1(H - 1)] \quad (1-1-5)$$

式中 N ——表1-1-6中绝缘子个数，且考虑了高杆塔增加的个数和污秽区增加的个数；

H ——海拔高度(千米)。

第五节 常 用 金 具

架空送电线路使用的金属部件很多，下面介绍一些常用的主要金具。

1. 悬垂线夹线夹是用来固定导线和避雷线的。在直线杆塔的悬垂绝缘子串上使用悬垂线夹。悬垂线夹有固定型和释放型两种如图1-1-12所示。固定型线夹使导线在线夹中固定得很牢固，导线在任何情况下都不能在线夹中自由滑动。释放型线夹在正常情况下和固定型一样夹紧导线，但当发生断线时，由于线夹两侧导线的张力严重不平衡，使绝缘子串

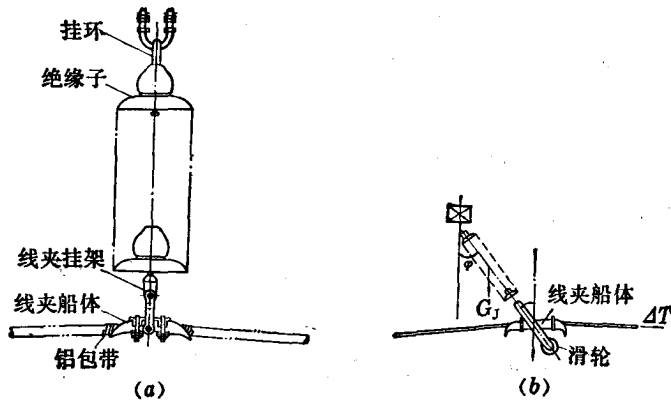


图 1-1-12 悬垂线夹
(a)固定型; (b)释放型 (在动作时)

发生偏斜, 偏斜至某特定角度 φ (一般为 $35^\circ \pm 5^\circ$) 时, 导线即连同线夹的船形部件从线夹的挂架中脱落, 导线在挂架下部的滑轮中, 顺线路方向滑落到地面, 这样做的目的是为了减小直线杆塔在断线情况下所承受的不平衡张力, 从而减轻杆塔的受力。释放线夹不适

用于居民区或线路跨越铁路、公路、河流以及检修困难的地区, 也不适宜用在容易发生误动作的线路上, 如档距相差悬殊或导线悬挂点高度相差十分悬殊的山区和重冰区线路等。总之, 释放线夹使用有限。

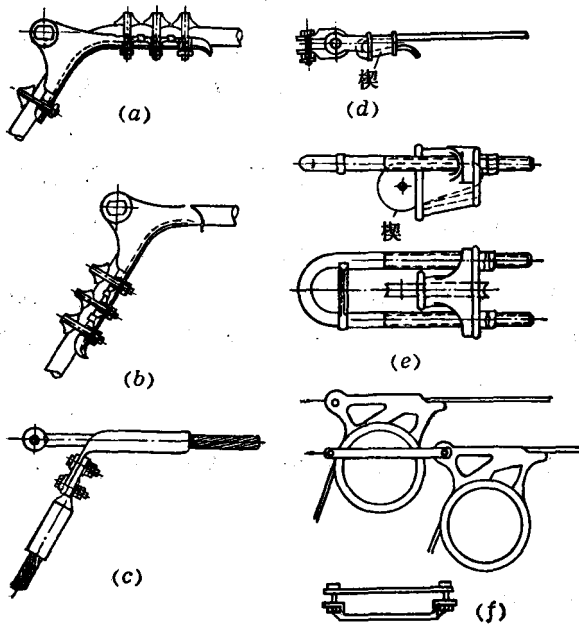


图 1-1-13 耐张线夹
(a)正装螺栓型; (b)倒装螺栓型; (c)压接型; (d)楔型 (地线用); (e)楔型 (拉线用); (f)螺旋型

2. 耐张线夹 耐张杆塔上的耐张串需使用耐张线夹固定导线。常用的耐张线夹有: 螺栓型、压接型、楔型和螺旋型等, 如图 1-1-13 所示。螺栓型又有正装螺栓型和倒装螺栓型之分, 它适用于铝绞线和钢芯铝线。压接型由两部分组成, 先用爆炸压接法把线夹的两部件与导线压接起来, 然后再用螺栓把两部件连接在一起。压接型线夹适用于大截面的钢芯铝线和钢绞线。楔型线螺旋型线夹使导线受力较好, 多

夹使导线所受压力很大, 故只用来固定钢质绞线或拉线。用于超高压线路上。

3. 导线连接器 导线和避雷线都有一定的制造长度，在架线时，为了把它们各自连接起来，必须使用连接器（或称压接管）。这种压接管有定型的铝管和钢管，压接时，用铝管压接铝线，用钢管压接钢线，钢芯铝线是将铝和钢分别压接的。近年来，我国成功地采用了爆炸压接的新工艺。经过爆炸压接的导线接头如图 1-1-14所示。

4. 防振金具 防振金具包括护线条，阻尼线和防振锤等其作用原理和设计计算方法见第四章。



图 1-1-14 用爆炸压接的导线接头

第二章 线路设计用气象条件

第一节 概述

架空线路的导线和避雷线统称为架空线，它们一年四季暴露在大气中，作用在它们上面的机械荷载是随气象情况的不断变化而变化的。架空线的机械荷载不仅影响其本身的长度、弧垂和张拉应力，而且又决定杆塔和杆塔基础的受力及带电部分与各方面的安全距离等。所以，送电线路设计用气象条件选取得是否合理，对保证线路建设和运行的安全性和经济性都有着决定性意义。

送电线路的设计用气象条件，广义的说是指那些与架空线路的电气强度和机械强度有关的气象参数，如：风速、复冰情况、气温、湿度、雷电参数等等。但机械计算的气象参数主要指：风速、复冰厚度和气温，称为设计用气象条件的三要素。

送电线路在运行过程中将连续经历很多种气象情况，而机械设计计算时，则需选取那些对各线路部件强度起控制作用的气象条件。这些设计用气象条件一般有九种：即最高气温、最低气温、年平均气温、最大风速、最大复冰、内过电压（即操作过电压）情况、外过电压（即大气过电压）情况、以及安装情况、断线事故情况等。

第二节 设计用气象条件的选取

架空线路在进行计算前，必须全面了解沿线路的气象资料，必要时应向沿线气象台站或中心气象站搜集有关资料，经过换算以确定出设计用气象条件。

一、最大设计风速值的选择

风级是按风速划分的。风级及风速的对照见风力等级表（表 1-2-1）。

将收集到的各气象台站采用不同测记方式和不同的风仪高度测得的历年的最大风速值，换算为标准测记方式和实际设计高度下的风速值，再根据规程规定的最大风速重现期，经过概率计算得出最大设计风速值。