

电网工程部送电电气专业技术培训专题

专题之九 绝缘子串型及金具研究

2011 年 12 月

批准：

审核：

校核：

编写：吴启维

目 录

1	金具及绝缘子串型式概述.....	4
2	金具型式	4
2.1	金具强度的安全系数	5
2.2	金具型式及选用要求	5
3	绝缘子串型式	7
3.1	绝缘子机械强度的安全系数	7
3.2	悬垂串设计	8
3.3	耐张串设计	16
3.4	联塔金具型式的选择	19
3.5	金具零件连接接触点的选择	21
3.6	串型图示例	22
4	跳线联接型式及跳线绝缘子串组装	26
4.1	跳线型式	26
4.2	国内外超高压线路跳线使用情况	29
4.3	跳线的计算方法	33

1 金具及绝缘子串型式概述

送电线路主要由杆塔、导线、地线、绝缘子和金具等组成。将杆塔、导线、地线和绝缘子连接起来所用的金属零件，统称为送电线路金具。送电线路由联接铁塔并由联接金具和多个绝缘子元件组合在一起，柔性悬挂导线的组件统称为绝缘子串。

绝缘子串由于杆塔结构、绝缘子型式、导线型号、每相导线的根数及电压等级不同，将有很多不同的组装型式。但归纳起来可分为悬垂组装及耐张组装两大类型。绝缘子串不论是悬垂还是耐张都是由几个分支组成，整个组装称为“串”，其中分支称为“联”。金具与绝缘子组装时，需考虑的主要问题是绝缘子形式和联数的确定；绝缘子本身的组装型式；绝缘子串与杆塔的连接形式；绝缘子串与导线的连接等。此外，还要考虑金具零件的机械强度，金具零件间的尺寸配合、方向等都要选择正确，检查无误。

2 金具型式

送电线路金具，按其性能、用途大致可分为悬垂线夹、耐张线夹、联结金具、接续金具、保护金具和拉线金具等六大类。金具是关系到线路安全运行的重要部件，送电线路金具在大自然中长期运行，除需要承受导线、地线和绝缘子等自身的荷载外，还需承受其覆冰和风的荷载。由于金具的失效和损坏，将导致线路的破坏和断电，因此，送电线路金具应有足够的机械强度和很高的可靠性。此外，作为导电体的金具还应具有良好的电气性能。对由黑色金属制成的金具还应采用

热镀锌防腐处理（灰铸铁另作防腐处理）。

2.1 金具强度的安全系数

根据国标 GB50545-2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》，金具强度的安全系数应符合下列规定：

- 1) 最大使用荷载情况不应小于 2.5；
- 2) 断线、断联、验算情况不应小于 1.5。

2.2 金具型式及选用要求

2.2.1 一般要求

高压输电线路金具除满足现行有效的国家标准、行业标准和相关规范外，在设计中还应该重点考虑各电压等级线路所提出的特殊要求，同时兼顾金具的运输、安装、检修、更换的方便性。总结起来有以下几个方面的问题：

- (1) 可靠性高，满足输电线路的安全稳定运行要求；
- (2) 结构合理，包括金具与绝缘子、导线或金具连接结构，以及金具自身的结构都应进行最优设计；
- (3) 对于材料的选择应该充分考虑 1) 和 2) 项的要求，从材料的强度、成本、可加工性等方面综合考虑最优选择；
- (4) 尽量借鉴已有的成熟技术、先进成果和经验；
- (5) 对于涉及到防电晕问题的金具，必须满足在线路工作电压下不产生可见电晕的基本要求，从结构上应进行特殊设计。
- (6) 金具的互换性要强，便于线路的维护。

2.2.2 对联接金具的要求

输电线路对联接金具的要求，除满足 GB/T 2314-2008、GB2315-2000《电力金具 标称破坏荷载系列及连接型式尺寸》外，还应注意以下几个问题：

- (1) 钢铁件模具成型首选锻造工艺；
- (2) 如果采用焊接工艺，在结构上保证焊缝不受力；
- (3) 尽量降低单件重量和尺寸，便于运输和安装；
- (4) 使用高强度材料应重点考虑材料的延展性，避免脆断；
- (5) 采用成熟的技术、成熟的材料和成熟的加工工艺；
- (6) 尽量简化金具结构、减少金具数量。

(7) 与横担连接的第一个金具应转动灵活且受力合理，其强度应高于串内其他金具强度。

2.2.3 对悬垂线夹的要求

输电线路对悬垂线夹的要求，除满足 GB/T 2314-2008《电力金具通用技术条件》、DL/T 756-2001《悬垂线夹》外，还应注意以下几个问题：

- (1) 采用防晕型设计，以避免使用屏蔽环。
- (2) 在选材上要注意铸造的质量控制，保证铸造质量。
- (3) 表面处理，保证光洁度。

2.2.4 对耐张线夹的要求

(1) 各类耐张线夹的破坏荷载应不小于安装导线或地线的计算拉断力值；其对导线或地线的握力，压缩型耐张线夹应不小于导线或地线计算拉断力的 95%；非压缩型耐张线夹应不小于导线或地线计算

拉断力的 90%。

(2) 作为导电体的耐张线夹压接后，其接续处的电阻应不大于同样长度导线的电阻；温升应不大于被接续导线的温升；载流量应不小于被安装导线的载流量。

除此之外耐张线夹选用时还需满足 GB/T 2314-2008 《电力金具通用技术条件》要求。

2.2.5 联塔金具

联塔金具是将悬垂或耐张绝缘子串连接到铁塔横担上的一个金具，是决定送电线路安全运行的重要因素。除要求有足够的机械强度以外，更需要它能灵活地转动、耐磨损等。绝缘子串需要在两个正交的方向上运动，因此要求联塔金具能在两个正交的方向上灵活转动。一方面联塔金具需要传递风产生的水平作用力，故要求它能在水平方向转动；另一方面又需要传递垂直力而要求它能在垂直方向转动。

3 绝缘子串型式

3.1 绝缘子机械强度的安全系数

绝缘子机械强度的安全系数应符合表 3-1 的规定。双联及多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度，其荷载及安全系数按断联情况考虑。

表 3-1 绝缘子机械强度安全系数

情 况	最大使用荷载		常年 荷载	验算	断 线	断 联
	盘型绝缘子	棒型绝缘子				
安全 系数	2.7	3	4	1.8	1.8	1.5

注：①常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载。验算荷载是验算条件下绝缘子所承受的荷载；

②断线、断联的气象条件是无风、有冰、 -5°C ；

③棒型绝缘子包括复合绝缘子和瓷棒绝缘子。

3.2 悬垂串设计

3.2.1 型式的选择

目前国内外输电线路悬垂绝缘子串型式绝大多数采用为 I 型串和 V 型串两种方式。I 串及 V 串的线路设计及使用已有丰富的经验。

通过对 I 串塔与 V 串塔走廊宽度、拆迁范围、树木砍伐范围、风偏、对于排位塔高的影响、塔重的影响及绝缘强度影响等方面的对比可以看出两种绝缘子串型式的差异。

(1) 对走廊宽度及塔重的影响

对于直线塔，早期的线路工程都是采用的 I 型绝缘子串直线塔，由于 V 型绝缘子串直线塔，可起到减小走廊宽度的作用，故后期逐步设计了多种 V 型串直线塔型，如猫头 V 型塔、酒杯 V 型塔以及紧凑型塔，有效地解决因村庄密集区走廊狭窄使线路难以穿过的这一难题。

并在以后的工程中逐步开始大量使用V型串直线塔型，直流线路也从贵广直流开始采用V型串直线塔，从 $\pm 500\text{kV}$ 工程比较来看，采用V型串，导线极间距离可以减小4.7~4.9米；可减少走廊宽度；铁塔单基指标约轻5%左右，减轻铁塔的耗钢量，节省钢材。

对于特高压线路由于塔的尺寸大，占用的线路走廊更宽，问题更为突出，采用V型串直线塔型更是尤为必要的。以 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路为例。

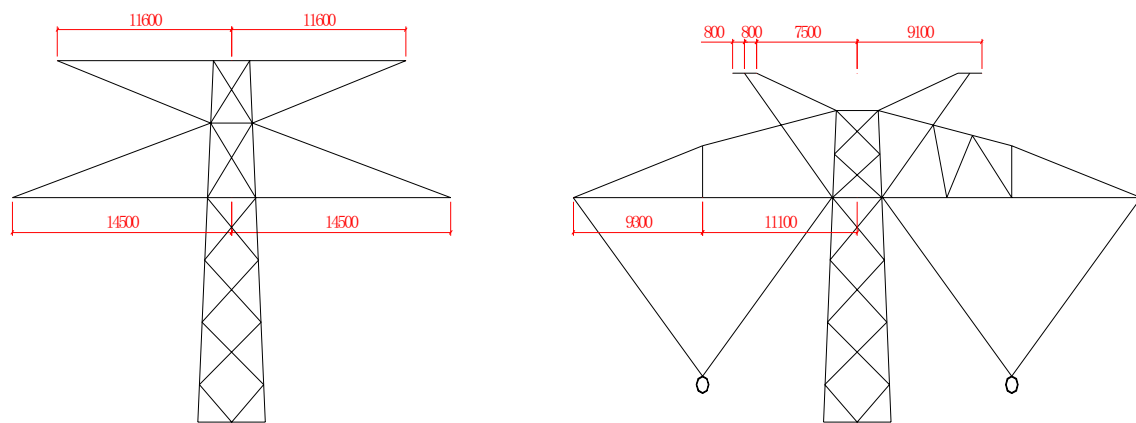


图 3-1 直流线路 I 型串与 V 型串塔头尺寸比较

图 3-1 中可看出，V型串塔导线横担比I型串塔导线横担要长，但是作用在端头挂点的垂直荷载以及纵向张力只有I型串塔的一半，但横担长度没有I型串塔横担长度的2倍，故V型串塔导线横担主材反而比I型串塔要小；另外V型串塔导线点对塔身的水平距离比I型串塔要小，故其导线荷载对塔身的扭矩比I型串塔要小。从计算结果来看，V型串塔的单基钢材指标比I型串塔轻了约7%~10%。须指出的是V型串塔还可减小杆塔呼称高，在杆塔排位时，具有一定的指标优势。

(2) 对铁塔呼高影响

由于绝缘子串采用了 V 型悬挂方式，导线悬挂点相对导线横担降低的长度肯定要小于 I 型串的长度，其直接的效应是在保证安全的绝缘要求条件下，有效提高了导线的悬挂点高度，即相同呼高的铁塔 V 型串塔施放档距要大于 I 型串布置的铁塔。

(3) 对铁塔风偏的影响

并且 V 型绝缘子串对导线的偏移有限制作用，尽管其导线横担比 I 型串塔导线横担要长，但 V 型串塔极间距的距离小于 I 型串铁塔，且当导线发生风偏时，导线挂点位置不发生位移，导线以此为固定点进行风偏摇摆，对于 I 型串风偏时是以绝缘子串挂点为固定点进行摆动的，两者间存在较大的差异。

对于山区线路除对地垂直距离外，还有风偏校验的问题，因 I 串塔极间距较大，绝缘子串在有风情况下也要参与摆动，相应增加了摆动幅度，而 V 型串避免了此类问题，因此 V 串塔较 I 串塔可有效抑制导线风偏，降低工程造价。

通过以上比较可以看出，V 串直线塔的塔重，走廊宽度，风偏开方量，房屋拆迁量，树木砍伐量都小于 I 串直线塔，且电压等级越高，优势更为明显，尤其对于通道紧张的地区。但由于使用 V 型绝缘子串本身要比 I 型串多使用一倍左右的绝缘子量，金具量也将相应增加，且绝缘子的机械强度因倾斜受力的缘故相应增加，故对低电压线路优势不明显。综上因素，对于新建线路工程可根据上述影响综合考虑适用工程悬垂绝缘子串型。

3.2.2 联数的确定

导线挂在直线杆塔上，悬垂绝缘子串应能承受导线等的全部荷载，其联数应按如下荷载计算并考虑相应的安全系数后进行选择确定。

(1) 按正常运行时作用在绝缘子串上的最大荷载计算；

(2) 按断线后作用在绝缘子串上的荷载计算；

(3) 按断联后作用在剩余完好联上的垂直荷载计算。

3.2.3 直线塔悬垂串风偏计算及间隙圆绘制

在设计杆塔时，通过对绝缘子串的风偏大小进行计算，及对运行（工频）电压、操作过电压及雷电过电压工况作用下绝缘子串长及塔头空气间隙数值的选取，来最终确定直线塔塔头间隙尺寸。

3.2.3.1 风偏角计算

绝缘子串的风偏大小依其所产生的风偏角大小来表示。绝缘子串的风偏角可按下式计算。

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P_z / 2 + n \cdot G_4 \cdot Lh}{G_0 / 2 + n \cdot G_1 \cdot Lv} \right)$$

φ ——悬垂绝缘子串风偏角，(°)；

P_z ——悬垂绝缘子串风压，N；

G_0 ——悬垂绝缘子串重力，N；

G_4 ——相应于工频电压、操作过电压及雷电过电压风速下的导线风荷载，N/m；

G_1 ——导线自重力，N/m；

Lh ——悬垂绝缘子串风偏角计算用杆塔水平档距，m；

L_v ——悬垂绝缘子串风偏角计算用杆塔垂直档距，m；

n ——导线分裂根数。

但值得注意的是，因为在设计串型时，不能以工程塔位实际情况进行计算，只能以杆塔规划成果进行计算，但规划中的水平、垂直档距以及 K_v 值均为高温工况的，所以在计算时应考虑计算工况条件下的垂直档距。

导入垂直档距公式后为：

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P_z / 2 + n \cdot G_4 \cdot Lh}{G_o / 2 + n \cdot G_1 \cdot Lh + n \cdot \alpha \cdot T} \right)$$

α ——塔位高差系数；

T ——相应于工频电压、操作过电压及雷电过电压工况下的导线张力，N。

将 K_v 值系数分解：

$$K_{v\text{高温}} = \frac{L_{v\text{高温}}}{Lh} = \frac{Lh + \frac{\alpha \cdot T_{\text{高温}}}{G_1}}{Lh} \Rightarrow \alpha = \frac{G_1 \cdot Lh (K_{v\text{高温}} - 1)}{T_{\text{高温}}}$$

将其导入后，以大风工况为例其摇摆角公式为：

$$\varphi_{\text{风}} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P_{z\text{风}} / 2 + n \cdot G_{4\text{风}} \cdot Lh}{G_{o\text{风}} / 2 + n \cdot G_{1\text{风}} \cdot Lh \cdot (1 + (K_{v\text{高温}} - 1) \cdot \frac{T_{\text{风}}}{T_{\text{高温}}})} \right)$$

通过上述公式可以计算出不同塔型不同工况下的金具串风偏角。

依据工程规划杆塔使用条件进行风偏摇摆角的计算。

3.2.3.2 杆塔间隙圆绘制

悬垂绝缘子片数及串长（包括连接金具）以及运行（工频）电压、操作过电压、雷电过电压所需空气间隙距离和其相应的风偏角确定之

后（若需要考虑带电检修，则尚应包括带电检修的情况），即可着手进行直线杆塔间隙圆图的绘制，以最终确定直线塔塔头间隙尺寸。

绘制间隙圆图时，则先需确定绝缘子串长度，并明确串中带电点位置，然后以其带电点为中心，将对应工况的间隙值为半径画圆。最后以对应工况的风偏角，将带有间隙圆的绝缘子串进行偏转。

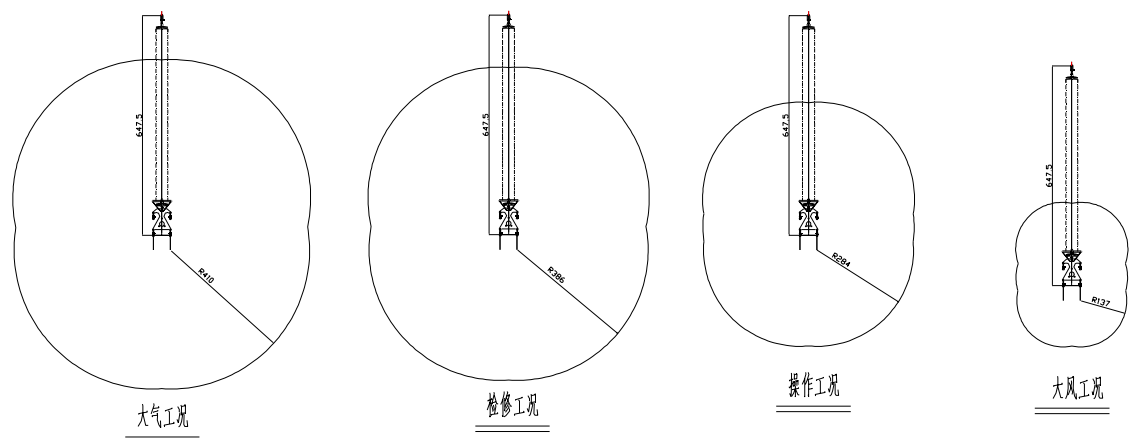


图 3-2 各种工况间隙圆

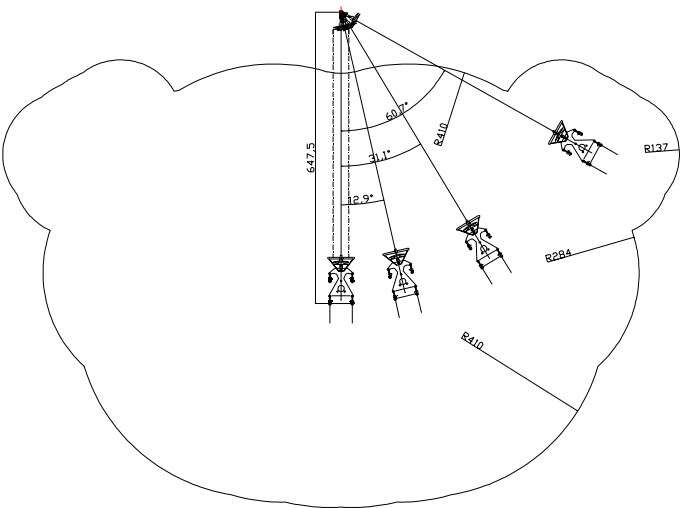


图 3-3 考虑绝缘子串风偏各种工况组合间隙圆

3.2.4 V 型串夹角选取及荷载计算

3.2.4.1 V 串夹角的选取

采用“V”型串设计。其优势在于“V”型串与常规“I”串比较，具有有效长度短，限制绝缘子串在塔窗风偏摇摆，从而合理布置铁塔塔头，减小走廊宽度的优点。但“V”型串的夹角过大，会造成绝缘子串负荷及塔窗相应增大；夹角过小，会造成风偏时单支绝缘子串受压严重，绝缘子串断联。如果要避免此种情况，设计时就要根据不同的塔型的设计使用条件，分析设计合理的“V”型串的夹角。

V串夹角的计算方法跟I型串计算塔头间隙风偏角的方法基本一致。为了有效的控制V串迎风肢过偏范围，国标《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》规定，输电线路悬垂V串两肢之间夹角的一半可比最大风偏角小 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

V串过偏示意图如下：

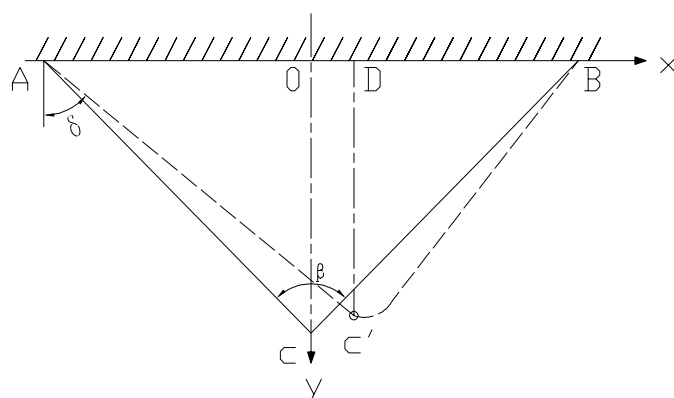


图 3-4 V串过偏示意图

3.2.4.2 V串荷载计算

V形绝缘子串与塔的连接方式，应能保证在断线时平行线路方向灵活转动。在导线最大风偏时，应能避免绝缘子串受压松弛，以防绝缘子脱落或受压损坏。

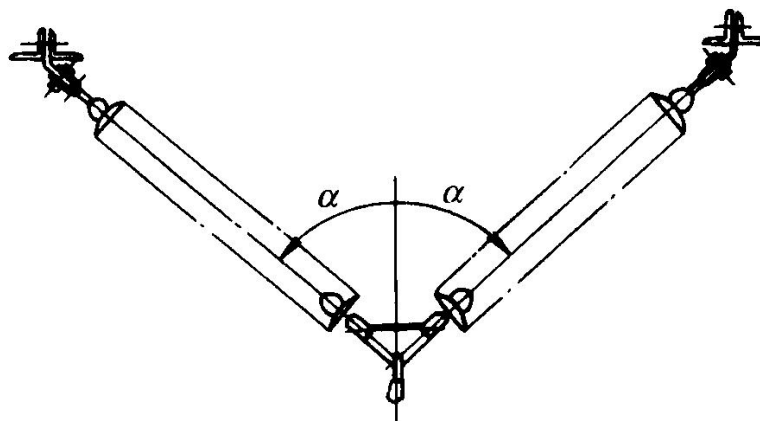


图 3-5 V 型绝缘子串示意图

绝缘子串是否受压松弛，取决于 V 形绝缘子串的夹角，即 V 形串的夹角 α (即 1/2 “V” 串夹角)，如图 3-6 所示，夹角 α 与风偏角 φ 有关，其计算公式如下。

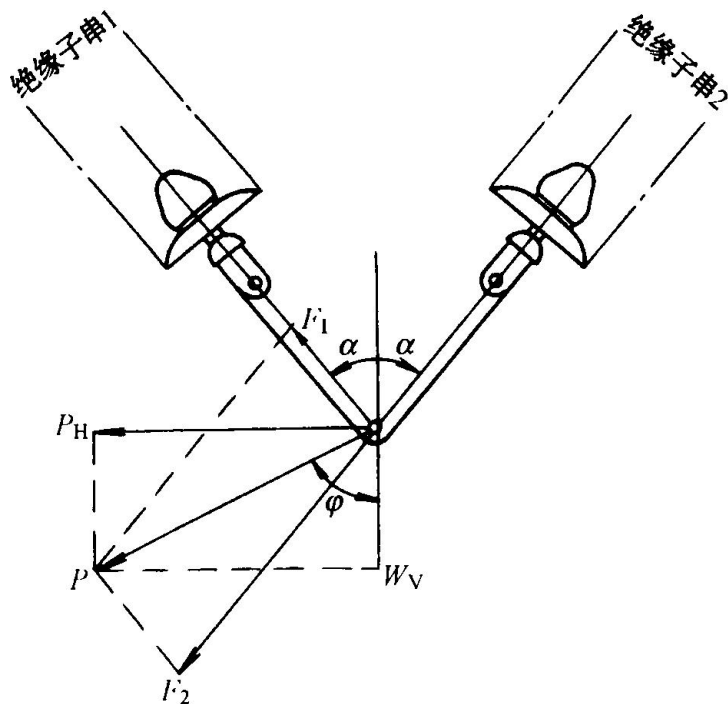


图 3-6 V 型绝缘子串受力分析图

$$P = \sqrt{P_H^2 + W_V^2}$$

$$F_1 = \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin 2\alpha} P$$

$$F_2 = \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin 2\alpha} P$$

式中：

P——最大风时导线的综合荷载，N；

PH——导线最大风荷载，N；

WV——导线自重荷载，N；

F1——综合荷载在绝缘子串 1 上的分力，N；

F2——综合荷载在绝缘子串 2 上的分力，N；

φ ——导线最大风偏角，(°)；

α ——V 型串夹角的一半，(°)。

由上图的分析可知，V 形绝缘子串的夹角 α 须大于或等于导线最大风偏角 φ ，才能避免绝缘子串受压。

3.3 耐张串设计

3.3.1 型式的选择

在正常运行情况下，各联绝缘子的张力分配相等，并满足规定的安全系数。

在断线或断联情况下，保持线路的正常运行，且剩余联能够承受冲击荷载而不至于破坏；同时剩余联的张力尽可能相同或满足规定的

安全系数。

当导线产生跳跃或舞动等动态情况时，各连接点(含铁塔上的连接点)应耐磨损和耐疲劳。

由于导线或绝缘子的长度存在误差或有变化时，对各联张力分配产生的差异有调整或自恢复的可能性。

根据负荷要求，输电线路的耐张串一般要采用多联绝缘子。从挂线点可靠度的角度考虑，绝缘子串各联分别固定在杆塔上是最为可靠的，且绝缘子串自身结构简单，还能降低串本身的造价，但是同时也势必会造成塔材重量的增加。绝缘子串联间距是随着线路转角的角度而变化，因此耐张串的联间距应考虑耐张塔上出现最大可能的转角时，不同联相互接近的绝缘子之间要保证足够的距离，以免在它们之间发生局部放电和碰撞的可能。基于这样的考虑，根据铁塔的转角度数及电气距离的要求，设计时要考虑多联绝缘子串的联间距离，且在多联绝缘子串靠近杆塔的一侧，应当加入联结金具调节，保证联间距离在安全值以上。

3.4 联塔金具型式的选择

国内常见的联塔金具的品种有：U 型螺丝、UB 挂板、U 型挂环、耳轴挂板等，如下图所示。

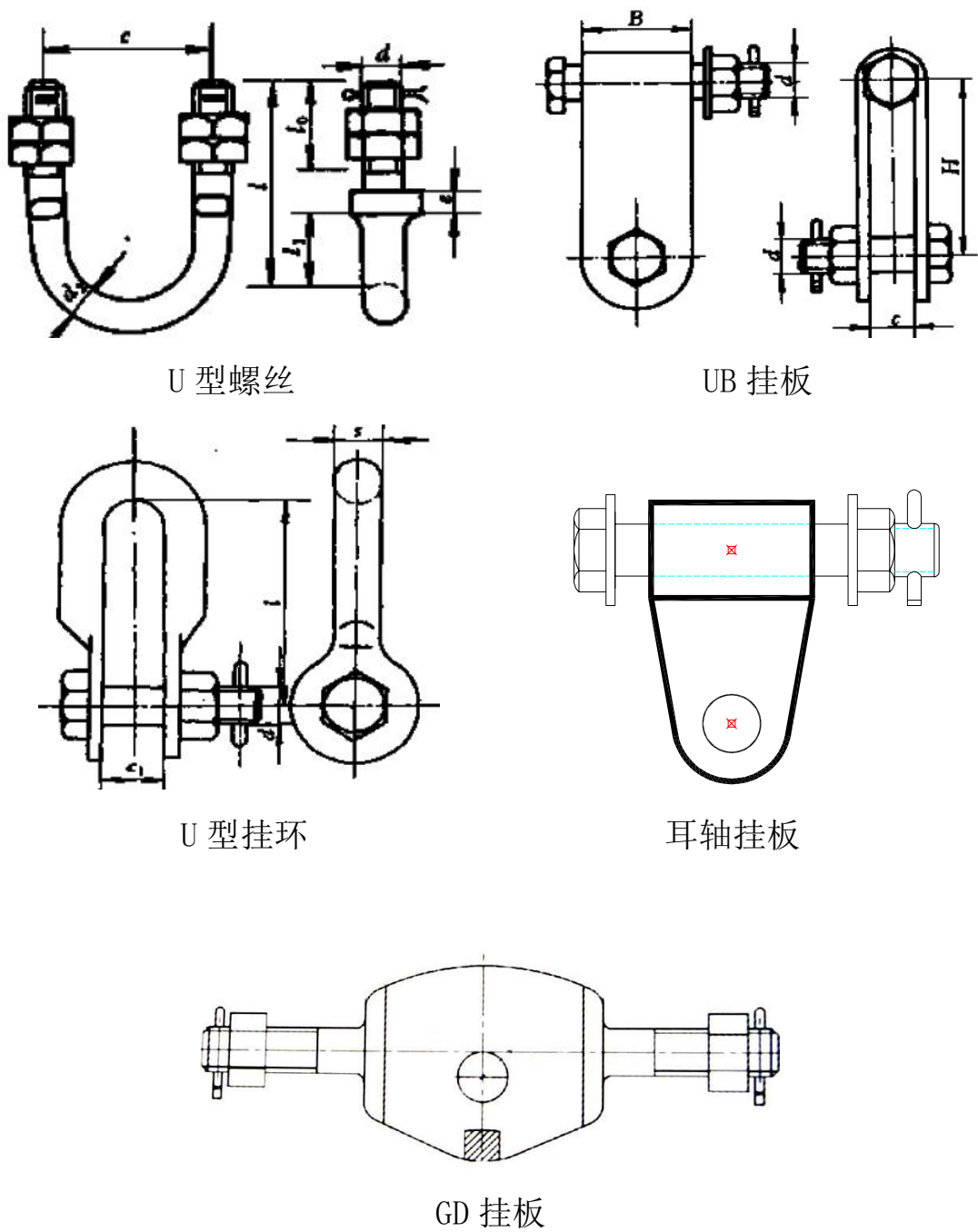


图 3-8 各种联塔金具型式

这些联塔金具分别在其两端来适应两个方向的转动，故使金具承

受弯矩作用而容易遭受破坏。在 110kV~330kV 常采用 UB 挂板、U 型挂环；跳线串采用 U 型螺丝。500kV、750kV 使用 U 型挂环、UB 挂板、耳轴挂板、GD 挂板。

在以往工程中发生过与铁塔连接的 UB 板断裂事故，经对大房 500kV 线路类似问题的研究表明，由于大风的作用 UB 挂板与铁塔挂点处的角钢紧贴，造成其不能够灵活转动，当出现纵向张力差时，球头挂环与 UB 挂板连接处无法灵活转动，造成硬掰球头挂环从而发生断裂。750kV 官兰线中相 V 串挂点金具采用 U 型挂环，施工中曾发生杆塔上与 U 型挂环连接的钢板断裂，造成绝缘子损坏的事故。在后来的 750kV 线路设计上，中相 V 串挂点金具已经全部采用耳轴挂板型式。为避免此类问题，建议以后的 500kV 及以上线路不再采用 UB 挂板、U 型挂环。

目前我国超高压输电线路工程中采用的耳轴挂板和 GD 挂点金具，保证各个方向转动灵活。GD 型的连塔金具缩小了两个方向转动点之间的距离，从而大大地提高了连塔金具地可靠性。但缺点是它需要在加工和组装铁塔时就要将它们安装好，使铁塔横担结构变得较为复杂，螺栓和本体连为一体，安装制造不方便。经工程实际检验，采用 GD 挂点金具和耳轴挂板避免了 UB 挂板、U 型挂环等金具受力不合理的连接组合，提高了线路运行安全性。具体的形式如下图所示：

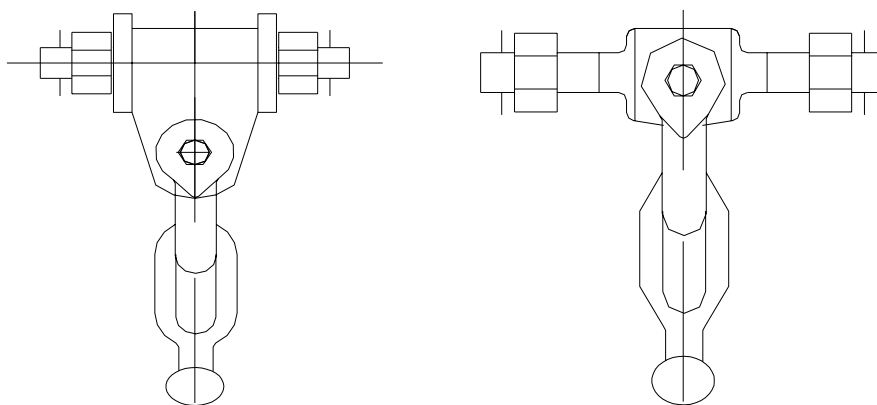


图 3-9 耳轴挂板连接方式 图 3-10 GD 挂板连接方式

耐张金具由于在上下、左右四个方向都需要灵活转动，耳轴挂板由于水平转动点距离螺栓中心线距离较远，在转角度数较大时需要调整其水平方向，以免产生弯矩，使得螺栓受到剪切应力，故用于耐张挂点时建议采用 GD 挂板联接方式。

联塔金具的上部与塔连接处，考虑磨损等因素，联塔端强度应比实际使用强度高一级。

3.5 金具零件连接接触点的选择

在金具零件的互相连接时，应尽量避免点接触，以防止应力集中。两零件间若采用螺栓连接，还应避免因开档过大而使螺栓受到不必要的弯矩。图 3-11 列举了几种正确与错误的连接方式，供选用时参考。

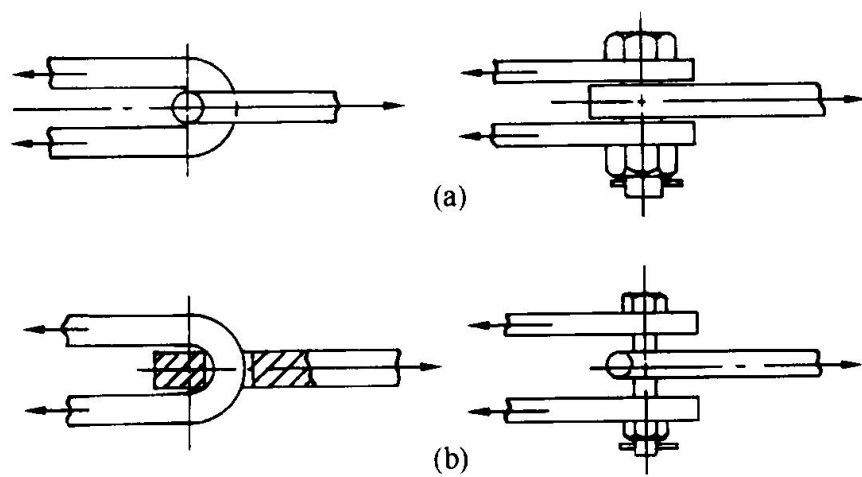


图 3-11 金具零件联结接触点

(a) 正确连接；(b) 错误连接

3.6 串型图示例

3.6.1 高压输电线路典型串图

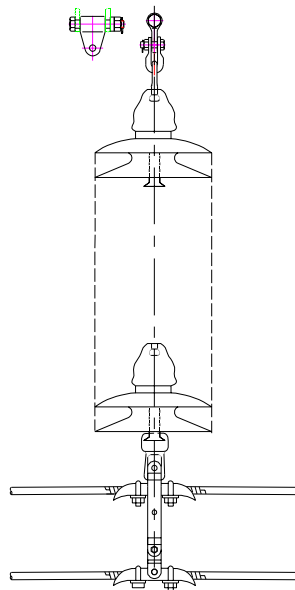
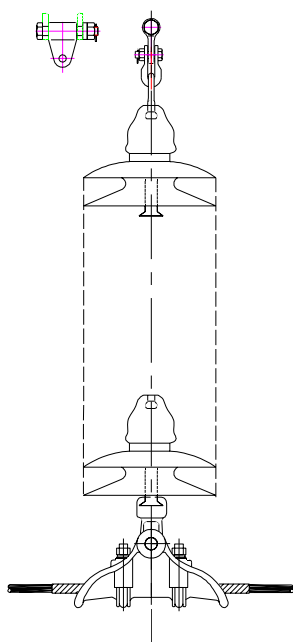


图 3-12 单分裂导线悬垂串

图 3-13 双分裂导线悬垂串

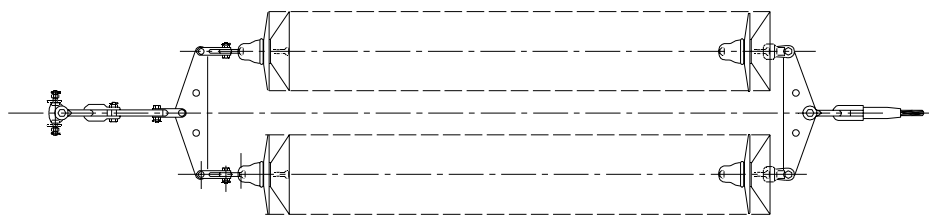


图 3-14 单分裂导线耐张串

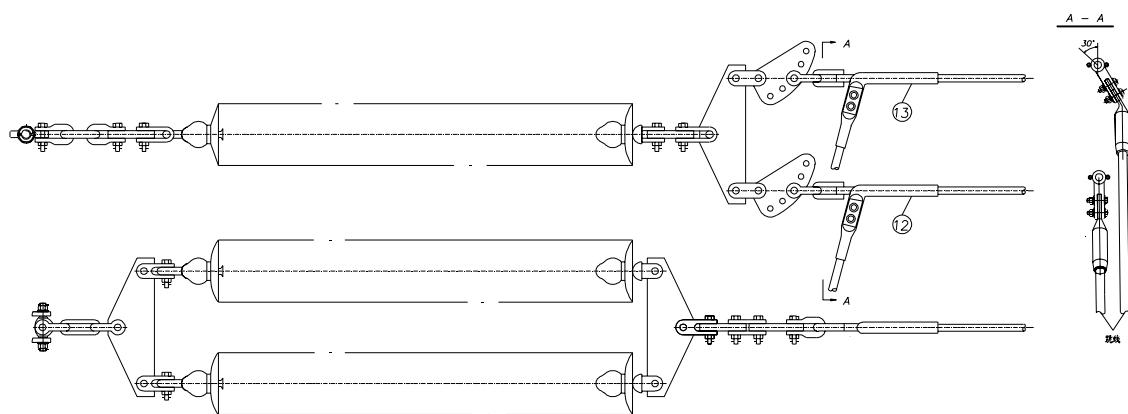


图 3-15 双分裂导线耐张串

3.5.2 超高压输电线路典型串图

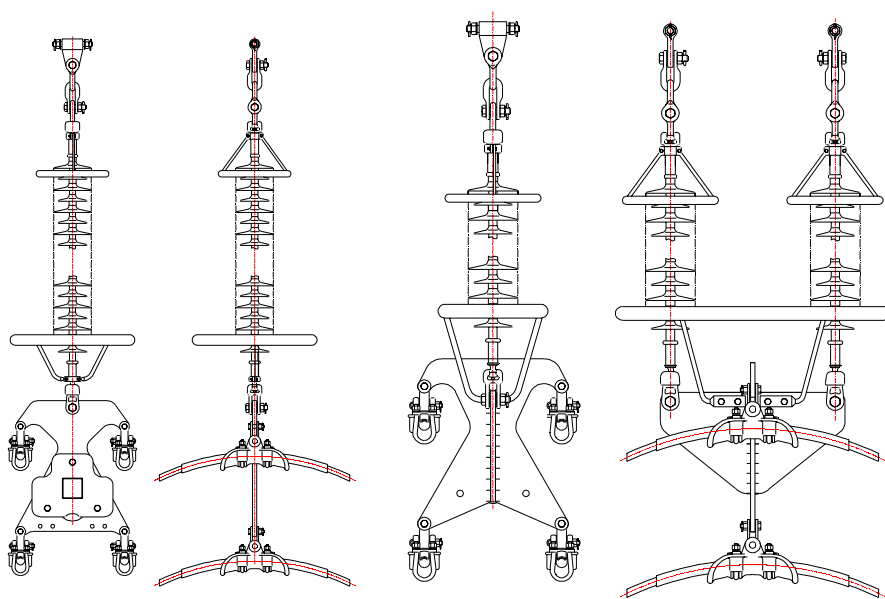


图 3-16 四分裂单联导线悬垂串

图 3-17 四分裂双联导线悬垂串

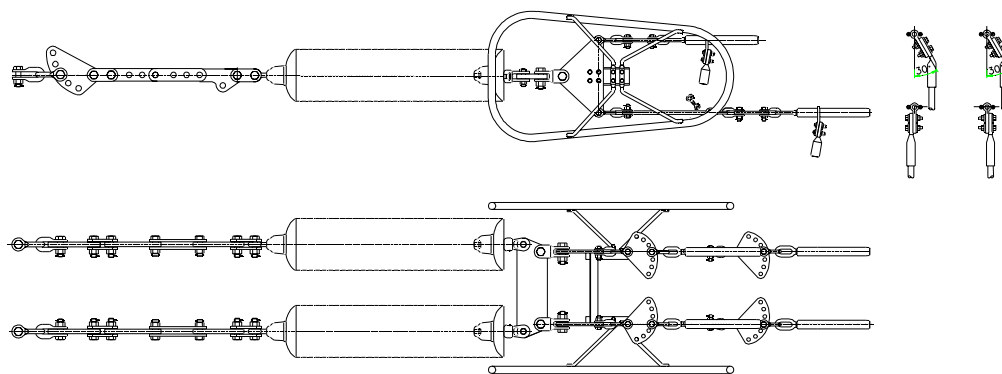


图 3-18 四分裂导线耐张串

3.5.3 特高压交流 1000kV 线路典型串图

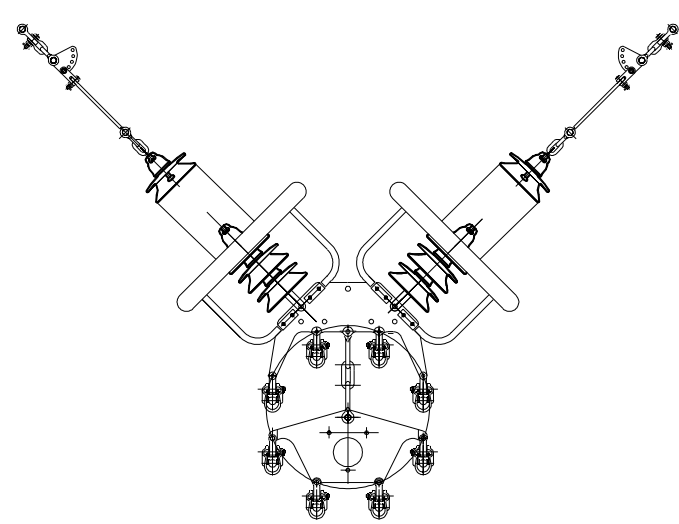


图 3-19 8 分裂导线 V 型悬垂串

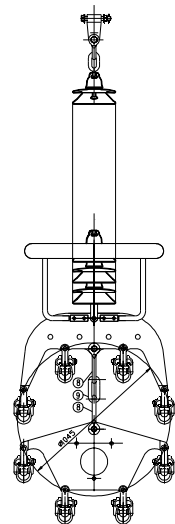


图 3-20 8 分裂导线 I 型悬垂串

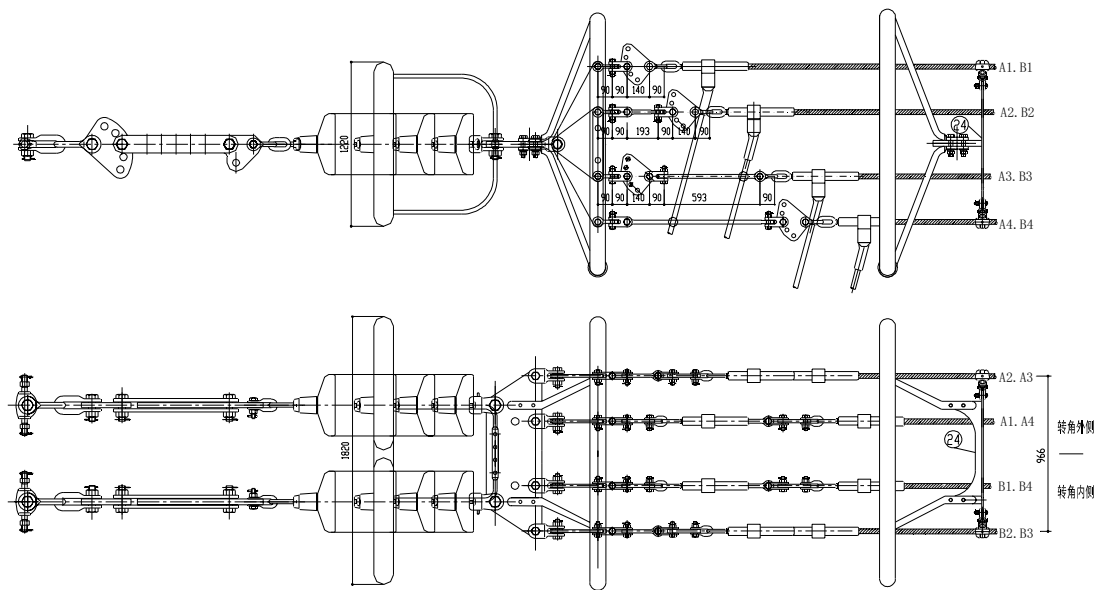


图 3-21 8 分裂导线耐张串

3.5.4 特高压直流 $\pm 800\text{kV}$ 线路典型串图

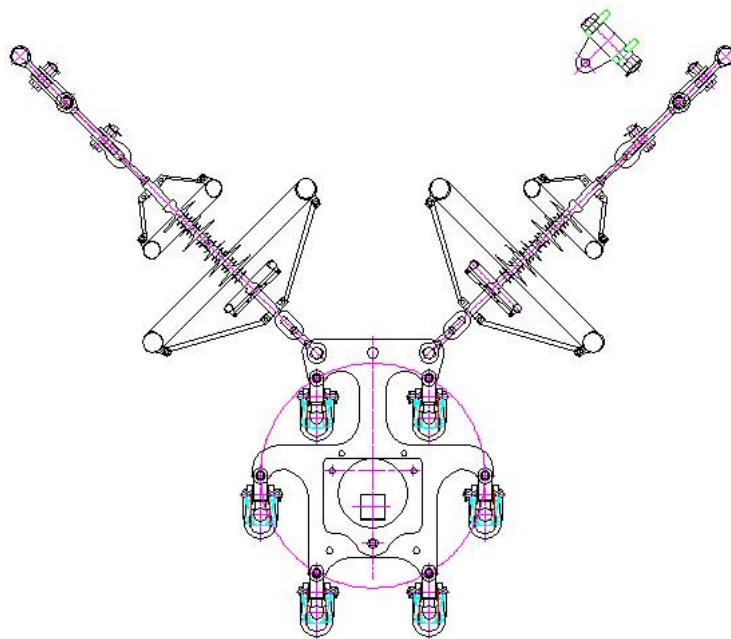


图 3-22 6 分裂导线单联“V”型悬垂串

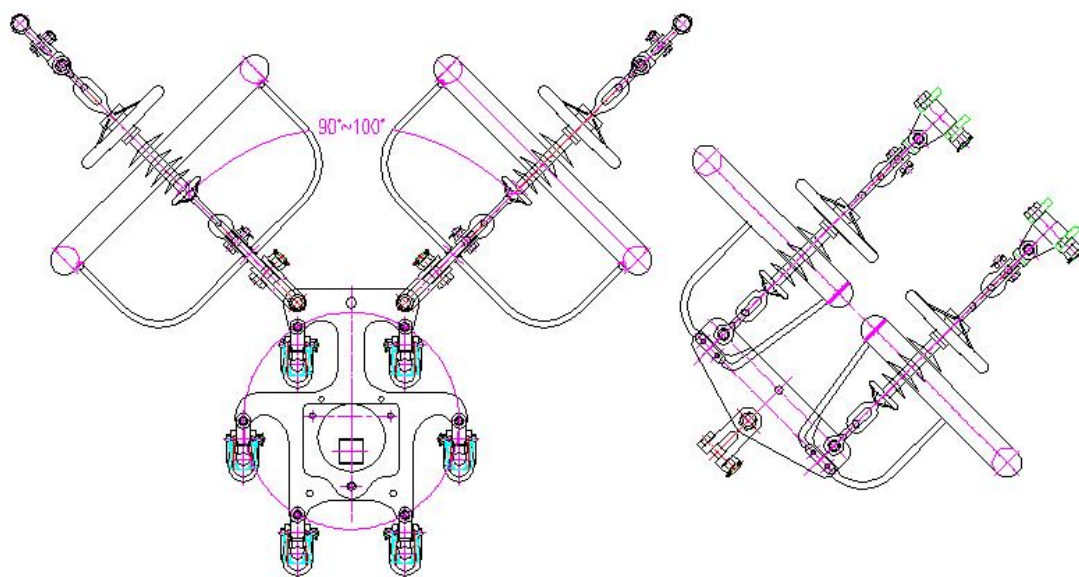


图 3-23 6 分裂导线双联“V”型悬垂串

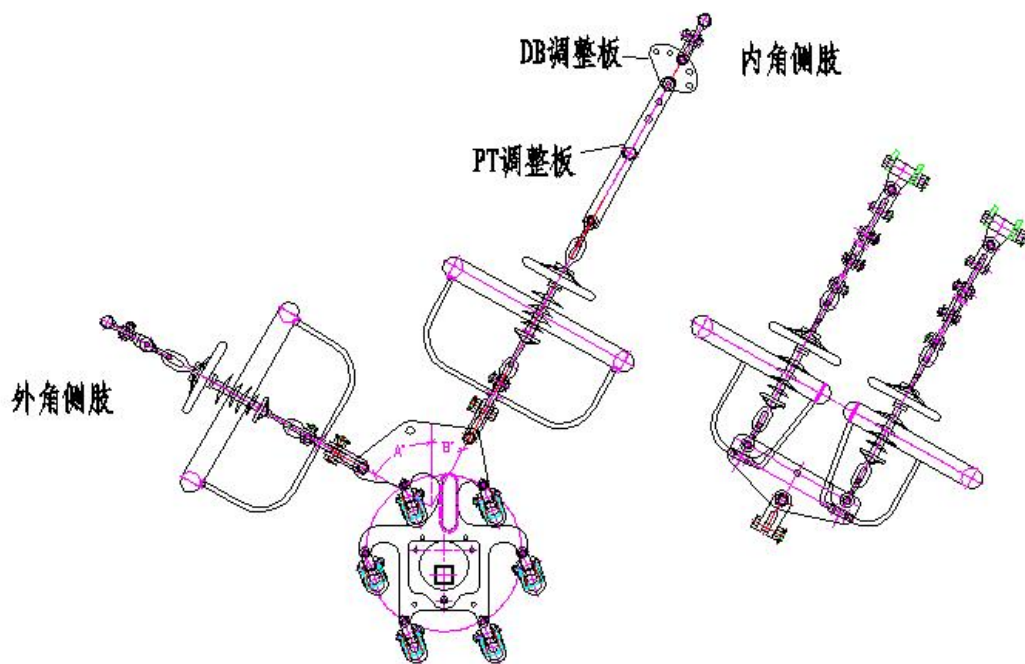


图 3-24 6 分裂导线悬垂转角塔用 L 型悬垂串

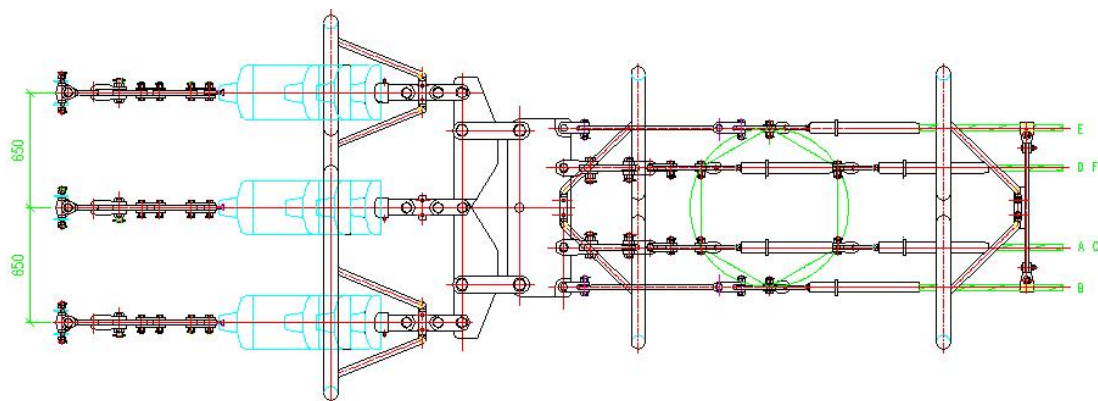


图 3-25 6 分裂导线三联水平排列耐张串

4 跳线联接型式及跳线绝缘子串组装

4.1 跳线型式

减少跳线弧垂及其风偏偏移值是缩小耐张塔尺寸的有效方法。而跳线弧垂及偏移主要决定于采用的跳线或固定跳线的方式，国内外曾作过大量研究试验工作，采取了多种耐张塔引流方式，从水平跳线到弓形跳线、从软跳线到刚性跳线、从一般耐张塔跳线到三柱耐张塔跳线等，而使用最多的为软跳线及刚性跳线。

随着电压等级的升高，电气间隙的加大，耐张塔跳线的跨距增加，导致跳线弧垂的加大，跳线弧垂风偏后对铁塔构件的间隙决定了耐张塔横担的尺寸，进而影响到耐张塔的重量指标。减小跳线弧垂及风偏角是缩小耐张塔尺寸的有效方法。而跳线弧垂及风偏角主要决定与采用的跳线型式和固定跳线的方式，目前耐张塔跳线主要有软跳线、加支撑管的笼型刚性跳线和加铝合金管的刚性跳线等型式。

软跳线是指耐张塔跳线采用常规导线且不采用其它限制跳线弧垂措施的型式，此种跳线型式在国内耐张塔上普遍使用，具有成熟的运行经验，但对耐张塔横担尺寸影响较大。刚性跳线与软跳线相比，在软跳线基础上增加一个支撑管，软跳线通过间隔棒或线夹固定在支撑管上，支撑管通过拉杆或跳线绝缘子串连接至耐张绝缘子串或铁塔上，跳线弧垂小，耐张塔横担短。刚性跳线主要为笼式刚性跳线和铝管型刚性跳线。

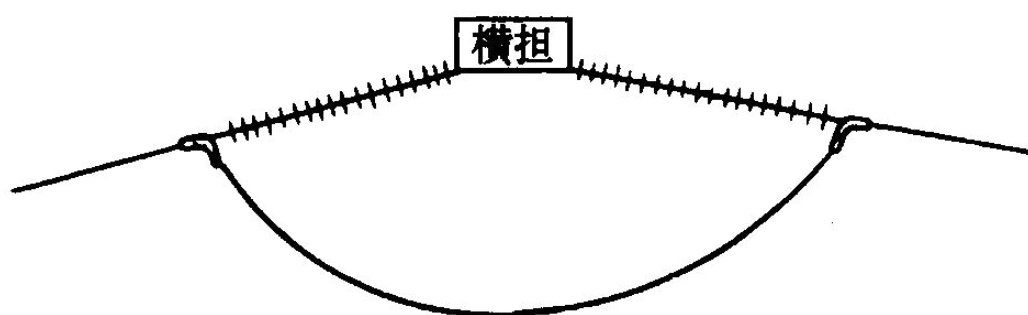


图 4-1 软跳线

笼式刚性跳线是国外超高压、特高压线路中普遍采用的一种跳线形式，目前在国内也逐步被大量采用。与普通软跳线相比，笼式刚性跳线在跳线下侧（三档绕跳中段）增加了一个跳线支撑装置，将跳线固定于支撑架上，支撑架通过拉杆或跳线绝缘子串连接至耐张绝缘子

串或铁塔上，增加了跳线刚性、减少了跳线弧垂，支撑架上根据需要可加重锤片。笼式刚性跳线可以有效减少跳线风偏和弧垂，压缩杆塔结构尺寸。鼠笼式跳线主要的缺点在于不够美观，虽可通过增加间隔棒数量加以改善，但总归不如铝管式跳线整洁美观。

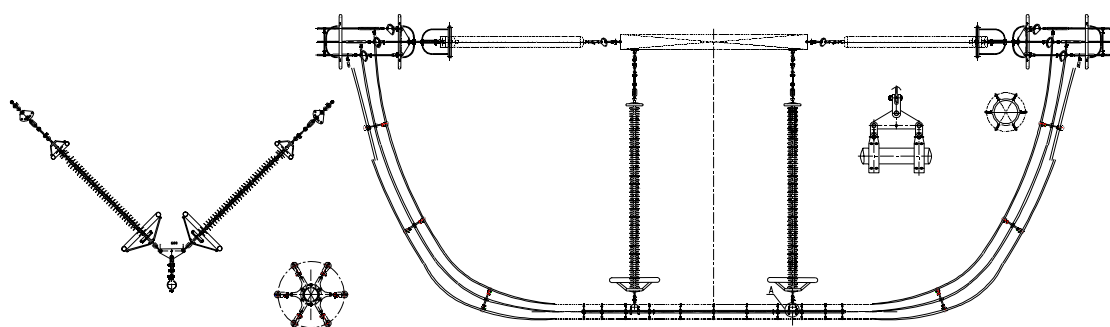


图 4-1 鼠笼式刚性跳线

铝管式刚性跳线在第一条 750kV 示范工程官亭-兰州东线路中开始采用。铝管式刚性跳线与笼式刚性跳线相比，是将跳线下侧(三档绕跳中段)一段普通六分裂软跳线用两根铝管替代，铝管通过拉杆或跳线绝缘子串连接至耐张绝缘子串或铁塔上，铝管既导流又起支撑作用。在 1000kV 特高压试验示范工程晋东南-南阳-荆门线路和±800kV 直流特高压工程向家坝-上海、锦屏-苏南线路中也都采用了铝管式刚性跳线。

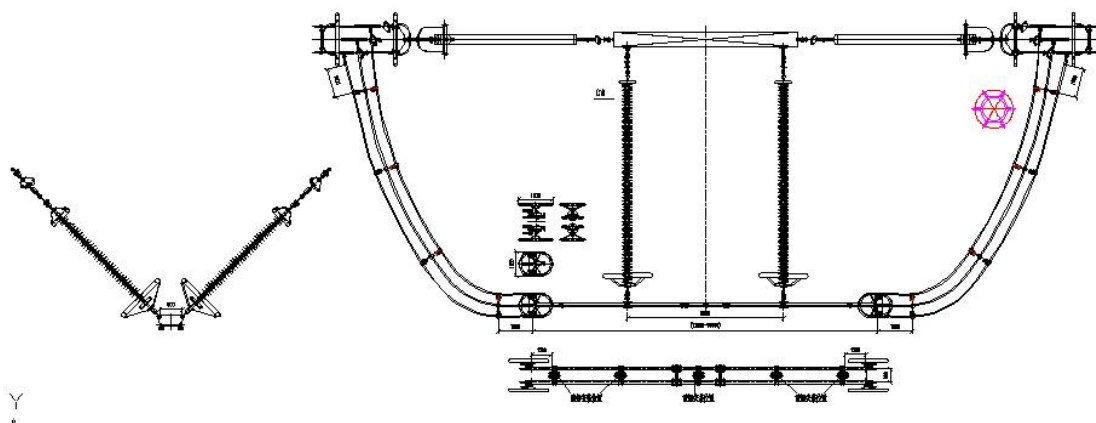


图 4-2 铝管式刚性跳线

4.2 国内外超高压线路跳线使用情况

日本 1000kV 线路所采用铝管式刚性跳线，以减小跳线弧垂和风偏，如下图。

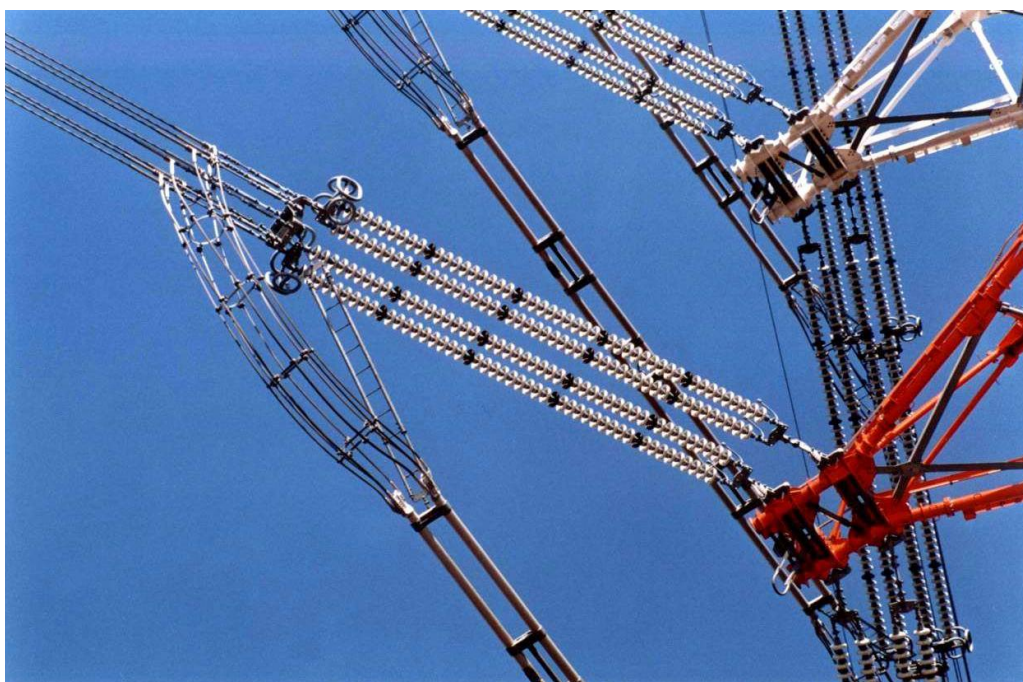


图 4-3 日本 1000kV 采用的铝管式刚性跳线照片

前苏联采用独立的三柱耐张塔跳线，如下图。



图 4-4 前苏联采用独立的三柱耐张塔跳线

国内 500kV 及以下超高压输电线路一般采用普通软跳线，见下图：



图 4-4 国内 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路采用软跳线型式

国内 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路对于大转角外角侧也有采用类似与鼠笼式刚性跳线的简易支撑架方式软跳线，见下图：



图 4-4 国内 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路采用简易支撑架鼠笼式刚性跳线方式



图 4-5 我国第一条 750kV 输电线路采用铝管式刚性跳线

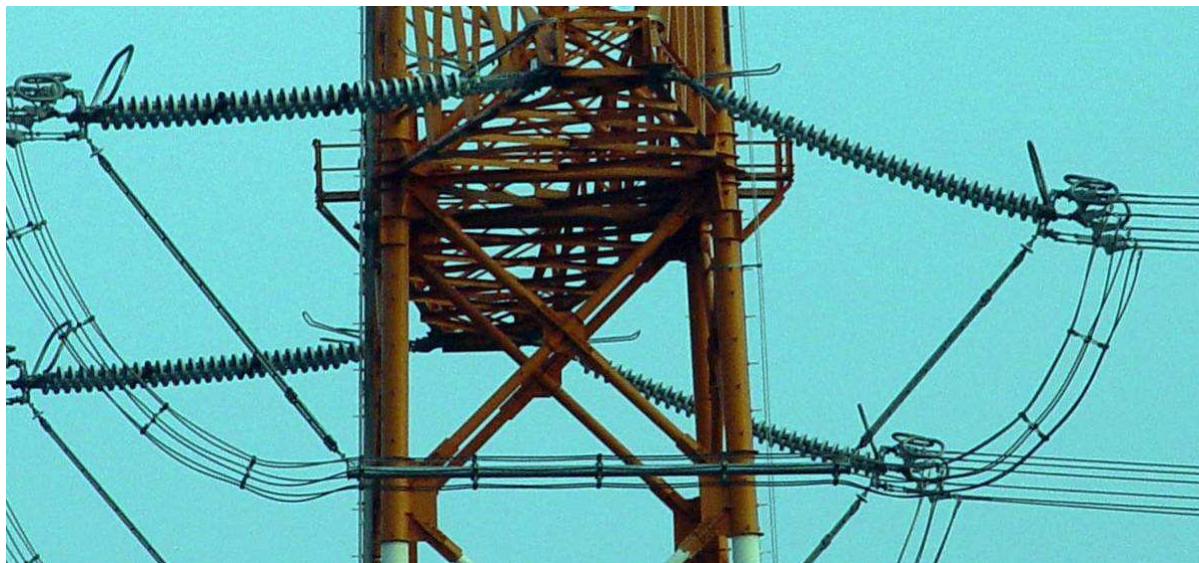


图 4-6 韩国 765kV 输电线路采用鼠笼式刚性跳线

加拿大 765kV 输电线路采用 V 型串软跳线，见下图：

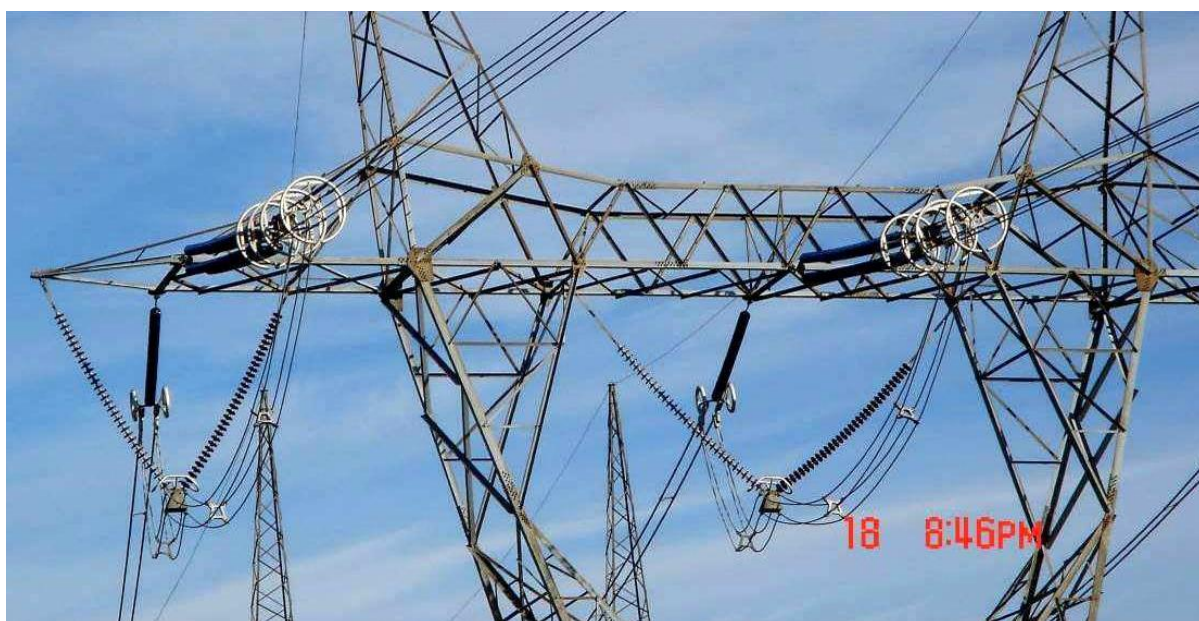


图 4-7 加拿大 765kV 输电线路采用 V 型串软跳线

国外也有采用补强线增加跳线刚度的措施，补强线可贯通跳线全长或仅在跳线两端补强。下图为两端补强的示意图：

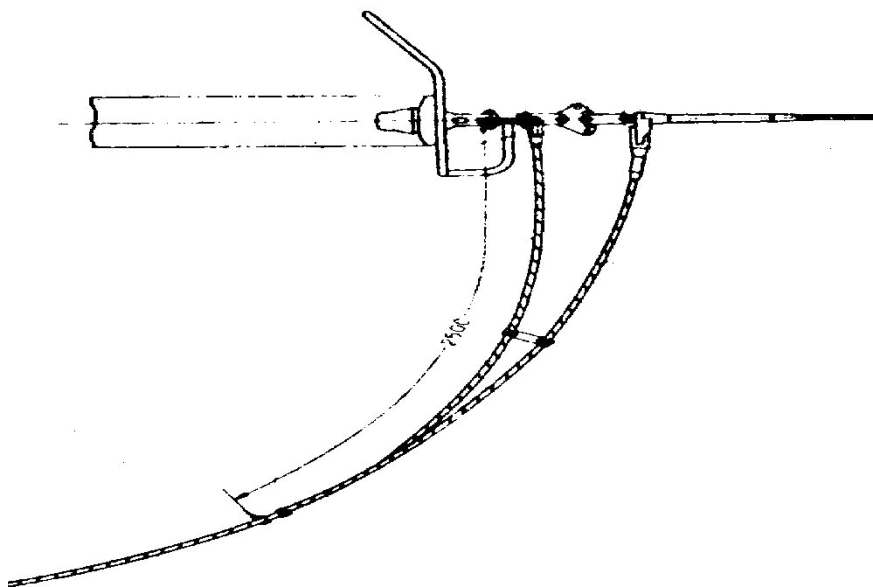


图 4-8 补强跳线示意图

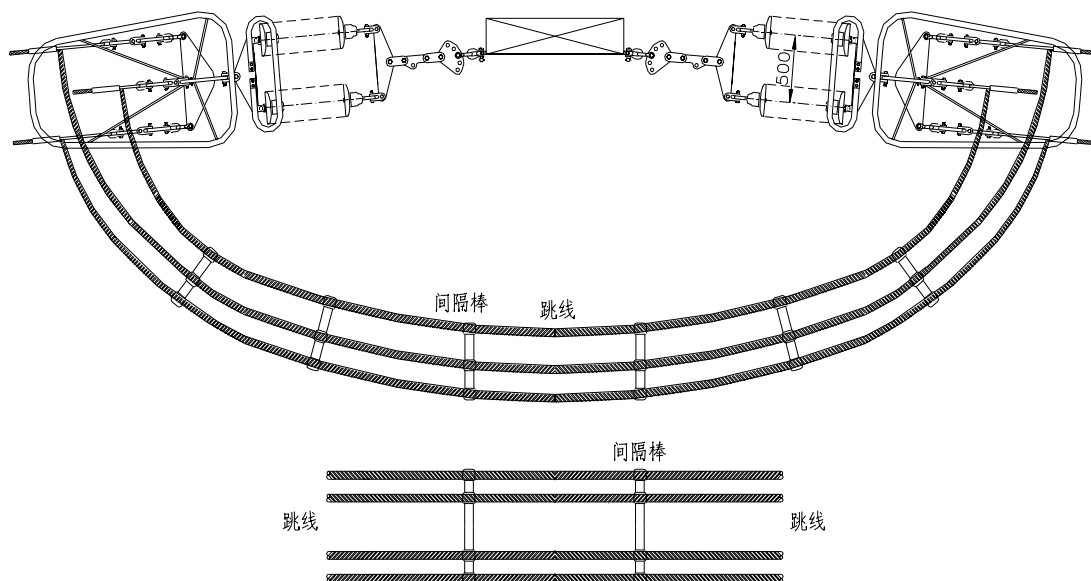
此种方式的补强线可采用钢芯铝线、钢线，或铝管、钢管等。补强线也可安装在跳线与线路导线之间，这时，补强线只能采用钢芯铝线或钢线。据有关资料介绍，采用补强措施与未采用补强措施相比，风偏角可减少 15% 至 50% 并可改善跳线端部的受力状况。除上述方式外，也可用软铝管压接在跳线支点附近以增加跳线的刚性，但此种方式与上述的补强线方式相比，支点附近线股在风偏时所受应力较大。

但是此种限制跳线风偏角的方式，我国超高压线路没有使用经验，因此国内工程不考虑此种限制跳线风偏角的方式。

4.3 跳线的计算方法

4.3.1 普通软跳线

普通软跳线示意图如下：



普通软跳线示意图 (1)



普通软跳线照片

目前，国内在送电线路设计中普通软跳线风偏角按下式计算：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{P_4}{P_1} \quad (1-1)$$

式中： P_4 —跳线单位长度风荷载 (kg/m)

P_1 —跳线单位长度自荷载 (kg/m)

计算 P_4 时，不考虑风速不均匀系数。

工程中按照计算的跳线风偏角，考虑各种工况下（雷电过电压、操作过电压、工频过电压）的电气间隙要求以及耐张绝缘子串长度、悬垂角、摇摆角、线路水平转角等，确定出跳线弧垂及线长。

为了减少跳线风偏对线间距离的影响，工程中广泛采用加装 1~2 串跳线绝缘子串及加装重锤片等方式以增加跳线的垂直荷重，从而减少跳线的风偏角度。跳线通过跳线绝缘子串绕接至两侧导线，将跳线段分为两档或三档。此时，确定铁塔尺寸，应首先计算出各种工况下跳线绝缘子串风偏角及其位移量，然后按照电气间隙要求，考虑各种因素，采用作图法或解析法求出各跳线档合理的弧垂、线长及张力。

跳线绝缘子串风偏角计算公式为：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{n \times T \times \sin K + P_0 / 2 + n \times P_4 \times l / 2}{G_0 / 2 + G_Z + n \times P_1 \times (l / 2 + T \times \sin \beta / P_1)} \quad (1-2)$$

式中：

T —跳线张力（N）

P_4 —跳线单位长度风荷载（kg/m）

P_1 —跳线单位长度自荷载（kg/m）

P_0 —跳线绝缘子串风荷载（kg）

G_0 —跳线绝缘子串垂直荷载（kg）

G_Z —重锤垂直荷载（kg）

l —跳线档距（m）

K —跳线与垂直横担直线间的夹角（°）

β —跳线高差角 (°)

n —导线分列根数

各档跳线张力与弧垂按斜抛物线公式计算为:

$$T = \frac{P_6 \times l^2}{8 \times f \times \cos \beta} \quad \text{或} \quad T = \sqrt{\frac{P_6^2 \times l^3 \cos \beta}{24 \times (L - l / \cos \beta)}} \quad (1-3)$$

式中:

P_6 —跳线单位长度综合荷载 (kg/m)

f —跳线弧垂 (m)

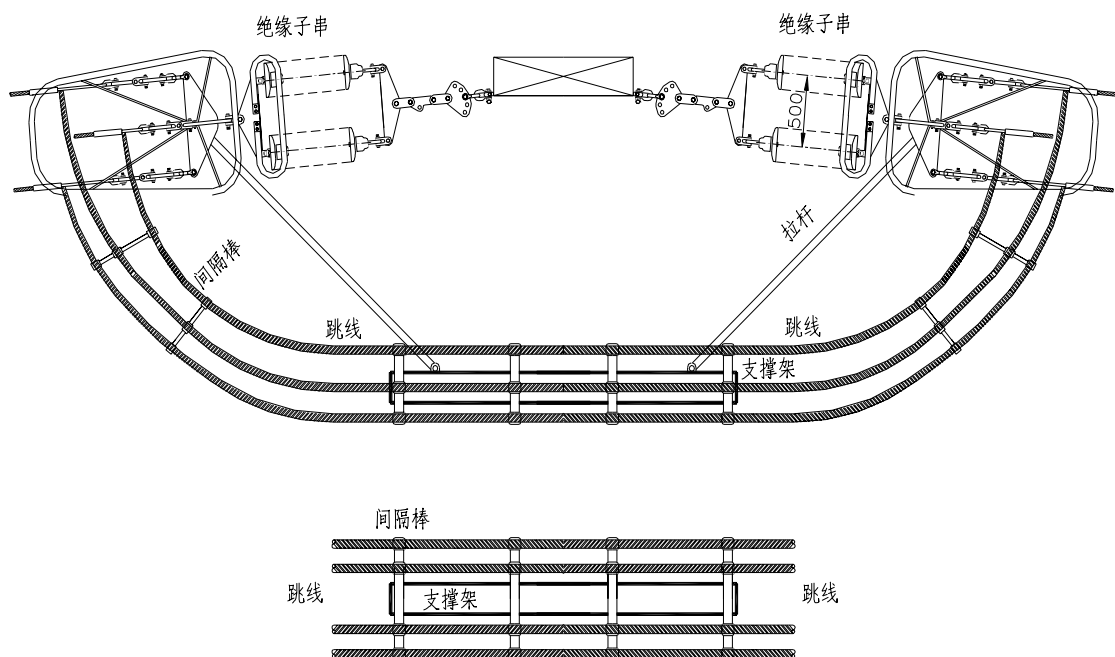
l —跳线档距 (m)

L —跳线线长 (m)

β —跳线高差角 (°)

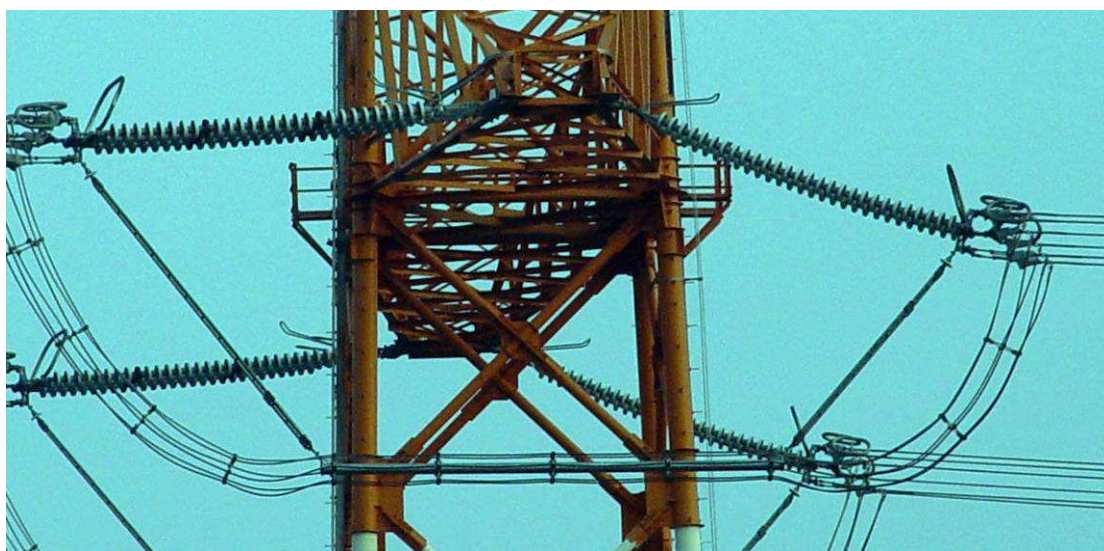
4.3.2 笼式刚性跳线

笼式刚性跳线示意图如下:



笼式刚性跳线示意图 (2)

笼式刚性跳线与普通软跳线相比，在跳线下侧（三档绕跳中段）增加了一个跳线支撑装置，将跳线固定于支撑架上，支撑架通过拉杆或跳线绝缘子串连接至耐张绝缘子串或铁塔上，增加了跳线刚性、减小了跳线弧垂。支撑架上按需要可加重锤片（见笼式刚性跳线照片 1、2）。



笼式刚性跳线照片 1



笼式刚性跳线照片 2

笼式刚性跳线及跳线绝缘子串偏角计算应计及跳线支撑架影响。

直跳跳线风偏角按下式计算：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{n \times P_4 \times l + P_c}{n \times P_1 \times l + G_c + G_z} \quad (1-4)$$

式中：

P_4 —跳线单位长度风荷载（kg/m）

P_1 —跳线单位长度自荷载（kg/m）

l —跳线档距（m）

P_c —支撑架风荷载（kg）

G_c —支撑架垂直荷载（kg）

G_z —重锤垂直荷载（kg）

n —导线分列根数

笼式刚性跳线当直跳间隙不满足要求或为了减小塔头尺寸，一般采用两组跳线绝缘子串将跳线段分三档，两跳线绝缘子串间的跳线采用支撑架固定，其风偏角计算公式为：

绕引跳线绝缘子串风偏角计算公式为：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{n \times T \times \sin K + P_c / 2 + P_0 / 2 + n \times P_4 \times (l / 2 + l_0 / 2)}{G_0 / 2 + G_z + G_c / 2 + n \times P_1 \times (l_0 / 2 + l / 2 + T \times \sin \beta / P_1)} \quad (1-5)$$

式中：

T —靠耐张串一侧跳线档张力（N）

P_4 —跳线单位长度风荷载（kg/m）

P_1 —跳线单位长度自荷载（kg/m）

P_0 —跳线绝缘子串风荷载（kg）

G_0 —跳线绝缘子串垂直荷载（kg）

P_C —支撑架风荷载 (kg)

G_C —支撑架垂直荷载 (kg)

G_Z —重锤垂直荷载 (kg)

l —靠耐张串一侧跳线档档距 (m)

l_0 —两跳串间跳线档距 (m)

K —跳线与垂直横担直线间的夹角 ($^\circ$)

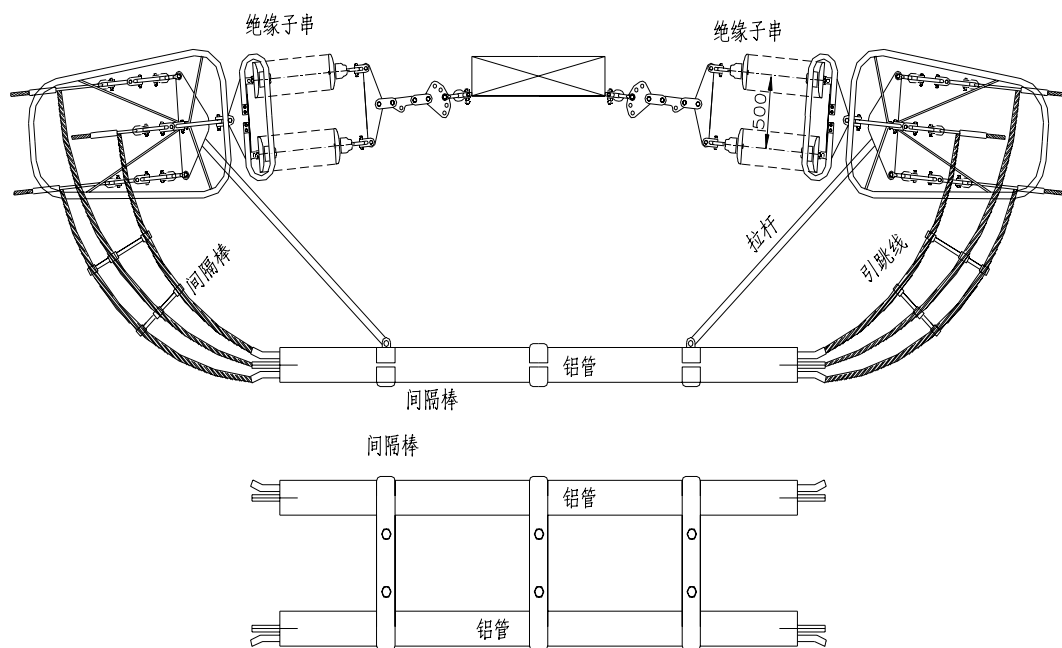
β —跳线高差角 ($^\circ$)

n —导线分列根数

两侧跳线档张力与弧垂计算同公式 (1-3)。

4.3.3 铝管式刚性跳线

铝管式刚性跳线示意图如下：



铝管式刚性跳线示意图 (3)

铝管式刚性跳线与笼式刚性跳线相比，是将跳线下侧（三档绕跳中段）一段普通软跳线用两根铝管替代，铝管通过拉杆或跳线绝缘子

串连接至耐张绝缘子串或铁塔上，铝管既导流又起支撑作用（见铝管式刚性跳线照片 1、2）。



铝管式刚性跳线照片 1



铝管式刚性跳线照片 2

铝管式刚性跳直跳跳线风偏角按下式计算：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{n \times P_4 \times l + P_l}{n \times P_1 \times l + G_l + G_z} \quad (1-6)$$

式中：

P_4 —跳线单位长度风荷载 (kg/m)

P_1 —跳线单位长度自荷载 (kg/m)

l —跳线档距 (m)

P_L —铝管风荷载 (kg)

G_L —铝管垂直荷载 (kg)

G_z —重锤垂直荷载 (kg)

n —导线分列根数

铝管式刚性跳线当直跳间隙不满足要求或为了减小塔头尺寸，一般采用两组跳线绝缘子串将跳线段分三档，两跳线绝缘子串间段为铝

管，根据需要调整铝管长度，并可加装重锤片。

绕引跳线绝缘子串风偏角计算公式为：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{n \times T \times \sin K + P_l / 2 + P_0 / 2 + n \times P_4 \times l / 2}{G_0 / 2 + G_z + G_l / 2 + n \times P_1 \times (l / 2 + T \times \sin \beta / P_1)} \quad (1-7)$$

式中：

T—靠耐张串一侧跳线档张力（N）

P₄—跳线单位长度风荷载（kg/m）

P₁—跳线单位长度自荷载（kg/m）

P₀—跳线绝缘子串风荷载（kg）

G₀—跳线绝缘子串垂直荷载（kg）

P_L—铝管风荷载（kg）

G_L—铝管垂直荷载（kg）

G_z—重锤垂直荷载（kg）

l—靠耐张串一侧跳线档档距（m）

K—跳线与铝管水平夹角（°）

β—跳线高差角（°）

n—导线分列根数

两侧跳线档张力与弧垂计算同公式（1-3）。