

黄河大跨越系列金具的研究

李星球

上海永固电力器材有限公司 上海 202112

摘要: 随着国内外电力事业的迅猛发展,高电压、大容量、远距离输电线路经常需经过江河,峡谷等地形,经过江河、峡谷的输电线路段称为跨越段,该段所采用的金具称为大跨越金具。输电线路跨越段一般由耐张塔—直线塔—直线塔—耐张塔组成,自成一个耐张段。由于跨越段档距大,塔高较高,所以受所处位置的地理条件、气象条件等影响比正常输电线路大,发生故障时修复困难,维修费用高。为确保输电线路大跨越段的安全运行,输电线路对跨江河、峡谷的大档距的跨越金具的性能提出更高的要求,故大跨越金具需特殊研制。

关键词: 大跨越金具; 大档距高性能

一、开封变—新乡东500kV线路工程基本情况

开封变—新乡东500kV线路工程黄河大跨越段,该工程最大档距达到了1170米,导线采用特强钢芯铝合金导线LHBGT-400/95,导线抗拉强度达到273kN,工程采用四分裂形式,导线分裂间距550mm。大跨越的档距长,要求的绝缘子吨位比一般线路高,同时联数也要增多,这样使金具产品之间互相连接多样性,对施工人员增加困难,往后事故概率增多,同时线路建设造价高,不便于后续维修等特点。鉴于黄河大跨越段的特殊设计条件,本文对开封变—新乡东500kV线路工程导线耐张串和悬垂绝缘子串金具进行研究分析,满足工程要求并达到线路总体经济优化目的。

二、耐张塔—直线塔大跨越导线串型研制

针对导线部分设计要求,研制了如下2种导线耐张串型及悬垂串型,6类配套金具,共26种产品:

- (1) 4×320kN导线四联耐张绝缘子串配套金具;
- (2) 2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串配套金具。

三、4×320kN导线四联耐张绝缘子串及配套金具的研制

对4×320kN导线四联耐张绝缘子串配套金具主要研制了与铁塔、绝缘子和导线相配套的挂点金具、连接金具、均压屏蔽环及耐张线夹等。设计时对耐张串所用金具的受力条件、电场分布、以及连接结构进行了详细的研究探讨,确保所研制的金具安全可靠、工艺合理、同时具有良好的技术经济性。

1. 4×320kN导线耐张绝缘子串金具的设计条件

4×320kN导线四联耐张绝缘子串配套金具除满足电力金具通用技术条件:GB2314-2008标准的有关规定外,还应同时满足线路运行电压500kV;适用于400kN的绝缘子;导线耐张串的绝缘子间距为550mm;子导线

分裂间距为550mm;适用LHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线,导线外径为29.14mm,计算拉断力为273kN;耐张线夹的握力值不能小于导线计算拉断力的95%,即259.4kN。

2. 4×320kN导线耐张绝缘子串结构和金具

导线被锚固在耐张杆塔上时,耐张绝缘子串将承受整个导线的全部张力。按照设计院提供的技术参数及串型图,此工程采用分裂间距为550mm×550mm的4X320kN绝缘子串结构,通过两挂点把导线锚固在耐张塔上,选取的导线为4XLHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线,导线耐张绝缘子串图见下图:

3. 4×320kN导线耐张绝缘子串配套金具的研制

(1) 挂点金具

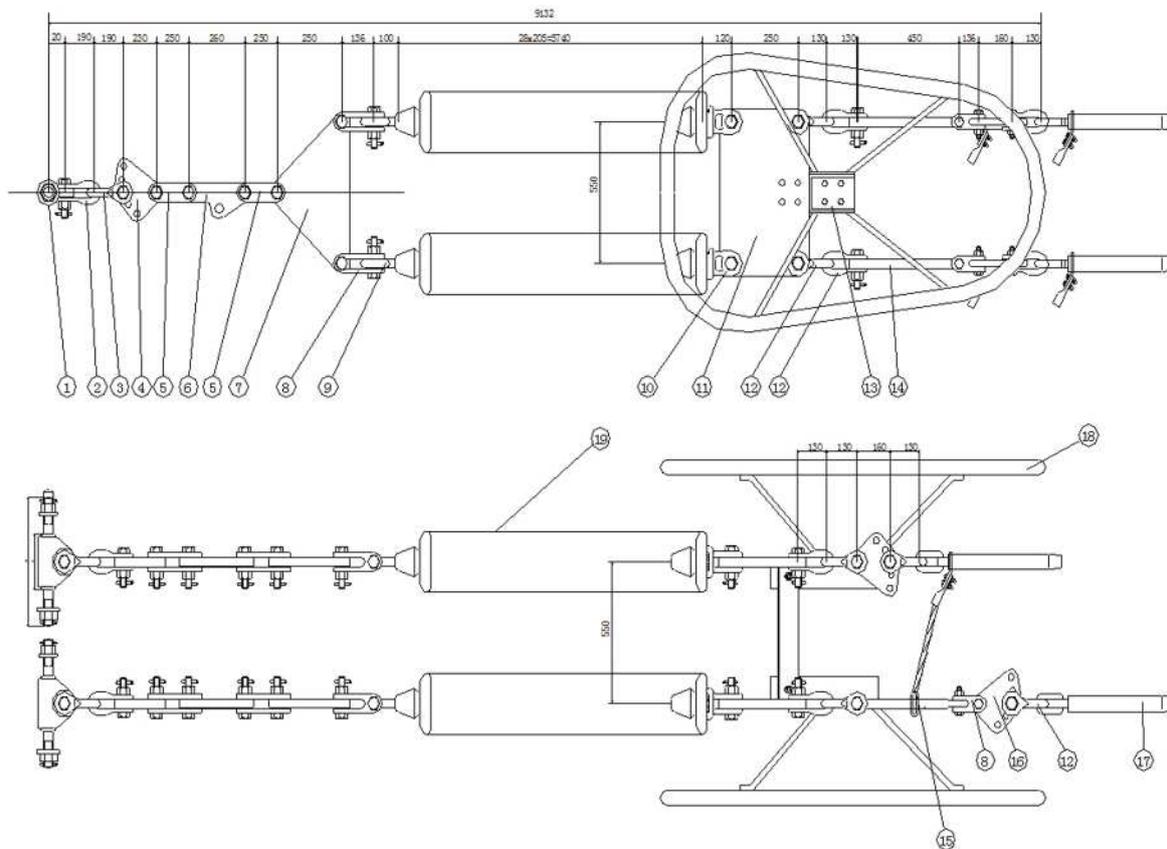
挂点金具是耐张绝缘子串与铁塔连接的首件,在设计时不仅要考虑转动灵活,有足够的强度承担导线、绝缘子、金具的重量及导线的全部张力,还需要满足线路转角和导线下倾角的要求。为此特将挂板与悬挂螺栓设计为一个整体,减小了金具的连接尺寸,适应各种导线下倾角,增加了挂点螺栓的强度,同时能满足线路不同转角的要求。

本次设计挂点金具的抗拉强度与两串绝缘子的抗拉强度相当,不小于640kN,与铁塔连接部分的抗拉强度不小于700kN。

(2) 联接金具

①联接金具技术条件

连接金具满足电力金具通用技术条件:GB2314-2008的有关规定,标称破坏载荷值以及连接件型式尺寸符合GB/T 2315-2008的规定;联板分裂间距满足耐张串分裂间距的要求;金具连接成串后转动关节转动灵活;受剪螺栓的螺纹,不允许进入受力板件;钢制件需采用热镀锌防腐。



②连接金具原材料的选取

根据GB/T 2315-2008的要求,连接金具的主体材料均采用强度不小于500MPa的优质碳素结构钢制造,轴螺栓采用6.8级高强度螺栓。

③连接金具强度的设计计算

连接金具在强度设计时主要是轴螺栓及眼孔强度的计算,参考《送电线路金具的设计、安装、试验和应用》中式1-1和式1-3两个基本公式进行设计计算。

轴螺栓强度的设计计算公式:

$$\sigma = M/W \quad W = \pi \times d^3/32 \quad M = P/2 \times (l/2 - a/4)$$

式中: σ —轴螺栓所受的应力; M —轴螺栓受的弯曲力矩; W —抗弯截面模量; d —轴螺栓直径; P —螺栓所受的破坏力; l — $l=1.05A$, A 值为两板开档; a —单板厚度。

眼孔强度的设计计算公式:

$$P = 2.05 \times F \times \sigma_b / (1 + 0.5K)$$

式中: P —眼孔的破坏力; F —侧截面积, $F=h \times t$; h —孔壁厚; t —板件的厚度; σ_b —材料的抗拉强度; K —孔的弯曲度 $K=h/R$; R —孔壁的平均半径。

④根据耐张串的结构、强度的计算公式研制了不同强度等级的U型挂环、调整板、平行挂板、牵引板、联板、球头挂环、碗头挂板、直角挂板、延长拉杆等连接金具。

a、U型挂环:环-链连接是普遍使用的结构形式,其结构连接单一,受力方式较好,角度旋转灵活,不受角度方向的限制,转动角度大,故选取U型挂环与挂点金具和耐张线夹相连接,研制了抗拉强度不小于640kN和320kN两个强度等级的U型挂环。

b、调整板:调整板串联与连接金具中,以调解双联并联绝缘子串长度;使用在串型中的连接金具与耐张线夹之间,以调整分裂导线的驰度,研制了抗拉强度不小于640kN和320kN两个等级的调整板。

c、平行板:平行板能使耐张绝缘子串延长长度和与其它金具相连接,研制了抗拉强度不小于640kN的平行板。

d、为便于线路施工,两个挂点下串联了专供安装使用的牵引板,其抗拉强度不小于640kN。

e、联板:采用两块三角联板、两块方联板通过支撑架相连组成正方形结构,支撑绝缘子、子导线的正方形结构,在支撑架上安装均压屏蔽环。研制了抗拉强度不小于640kN的三角形联板和方形联板。

f、研制了抗拉强度不小于320kN与绝缘子相连的球头挂环和碗头挂板。

g、为防止跳线引出时与金具相碰,设计了抗拉强度不小于320kN的延长拉杆,上导线引下的跳线与延长拉杆用TJ2跳线间隔棒支撑,避免线路摆动时磨损跳线。

所有新研制的耐张串联接金具经试验验证,性能完

全满足工程和设计要。

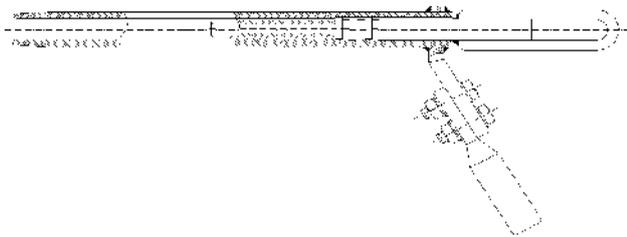
(3) 耐张线夹

①耐张线夹研制的技术条件

耐张线夹满足电力金具通用技术条件：GB2314-2008 的有关规定；适用LHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线；导线外径为29.14mm，计算拉断力为273kN；耐张线夹的握力值不能小于导线计算后拉断力的95%，即259.4kN；耐张线夹的直流电阻不大于等长被安装导线的电阻。

②耐张线夹的结构设计

导线耐张线夹不仅承载导线的全部张力，还当导电体使用，这就要求耐张线夹不仅对导线有足够的握力，还要有好的电气性能。耐张线夹由铝管主体+引流线夹+钢锚三部分组合，耐张线夹铝管和钢锚与导线采用液压的方法压接在一起，钢锚钢管部分承载导线钢芯的拉力，铝管承载导线铝合金线的拉力，铝管承载的拉力通过钢锚环箍传递给钢锚，钢锚最终承载导线的全部张力。导线耐张线夹结构采用铝管+铝板氩焊焊接型式。导线耐张线夹结构如下图：



耐张线夹铝管的结构及尺寸如下：

铝管内、外径计算公式： $\Phi = (1.03-1.04) d$

$$\sigma_1 \left\{ (0.83 \times \pi \times D^2) / 4 - \pi (k\mu \times d)^2 / 4 \right\} \\ = \sigma_N \times \pi (k\mu \times d)^2 \times Q / 4$$

$$K\mu = \left[(4A / \pi)^{0.5} \right] / d$$

式中： σ_1 —铝管材料强度； d —导线直径； σ_N —铝合金线强度； Q —铝线截面与导线总截面的比值； A —导线总截面积， mm^2 ；

计算结果：

$$\Phi = 30.5 (\text{mm}) ; D = 54.7 (\text{mm}) \text{ 取 } D = 60 (\text{mm})$$

a、耐张线夹钢锚主要尺寸的设计计算

在《电力金具产品样本（一九九七修订版）》中将耐张线夹钢锚设计成整体锻造形式，钢锚在锻造过程中有可能产生过烧、重叠等锻造缺陷，给耐张线夹带来安全隐患。本次设计钢锚材料选用的优质碳素结构钢，属于低碳钢，低碳钢的焊接性能好，焊缝金属的强度指标超过母材，故将钢锚压接管部分与连接环部分设计为焊接形式更安全可靠：

钢锚钢管内径、外径计算公式， $\Phi = (1+7\%) d$

$$\sigma_1 \left\{ (k_1 \times \pi \times D^2) / 4 - \pi (0.9 \times d)^2 / 4 \right\}$$

$$= \sigma_M \times \pi (0.9 \times d)^2 / 4$$

式中： σ_1 —钢管材料强度， N/mm^2 ； k_1 —钢管压成六角形后的内包面积，相当于外接圆的百分数，经计算约为0.83； d —钢芯直径， mm ； σ_M —钢芯强度， N/mm^2 ；
计算结果：

$$\Phi = 13.2 (\text{mm}) ; D = 27.05 (\text{mm}) \text{ 取 } D = 30 (\text{mm})$$

钢锚环箍部分承载导线的全部张力，钢锚环箍最小直径 $\Phi 1$ 计算公式：

$$\sigma = F / A \quad A = \pi \times \Phi^2 / 4 \quad \sigma \leq \sigma_b$$

式中： σ —环匝部位的拉应力， N/mm^2 ； F —导线计算拉断力的 N ； σ_b —钢管材料强度 N/mm^2 ；

$$\text{计算结果： } \Phi 1 = 30.45 (\text{mm}) \text{ 取 } \Phi 1 = 32 (\text{mm})$$

钢锚钢管与钢锚拉环的焊接长度，焊缝承载导线的全部张力，焊缝强度计算公式：

$$\sigma = F / A \quad A = \delta \times L \times 4 \quad \sigma \leq \sigma_b$$

式中： σ —焊缝材料的疲劳强度， N/mm^2 ； F —导线计算拉断力 N ； δ —焊缝的厚度： mm 。

b、耐张线夹的引流线夹设计

耐张线夹的引流线夹为满足耐张塔跳线的需要设计为A型和B型两种折弯结构。

(4) 均压屏蔽环

为改善耐张绝缘子串中绝缘子的电压分布和防止金具在运行中产生电晕，需在耐张绝缘子串上安装均压屏蔽环。

①均压屏蔽环研制的技术条件

耐张绝缘子串在电路运行时，靠近导线处的绝缘子电压分布不均，容易产生电晕，为了改善和防止运行中电晕的发生，在绝缘子处安装均压屏蔽环。

②均压屏蔽环的设计

按照《电力金具产品样本（一九九七修订版）》我国500kV输电线路高压侧均压环及屏蔽环的铝管直径是50mm，考虑到大跨越工程工况的特殊性，为提高均压屏蔽环的强度和电气性能，将均压屏蔽环的管直径设计为60mm。由于大跨越两联绝缘子间距加大，考虑到经济和实用性，均压屏蔽环采用圆耳式结构。

四、2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串配套金具的研制

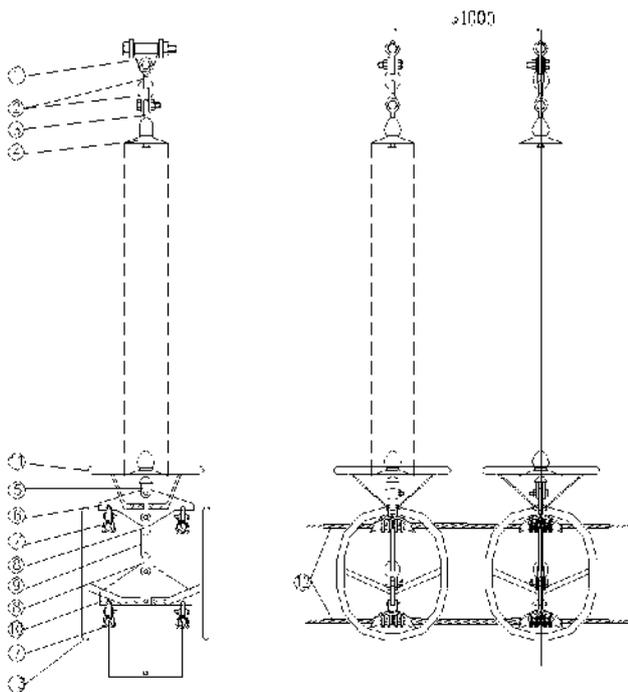
对2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串金具主要研制了与铁塔、绝缘子和导线相配套的挂点金具、连接金具、均压环、屏蔽环、预绞丝护线条、悬垂线夹等。设计时对悬垂串所用金具的受力条件、电场分布、以及连接结构进行了详细的研究探讨，查阅了大量的国内外有关技术资料，确保了所研制的金具安全可靠、工艺合理、同时具有良好的技术经济性。

1. 2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串金具的设计条件

2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串配套金具除满足电力金具通用技术条件:GB2314-2008的有关规定外,还应同时满足线路运行电压500kV;适用于300kN的绝缘子;导线悬垂串的绝缘子间距为≥1000mm;子导线分裂间距为550mm;适用LHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线,导线外径为29.14mm,计算拉断力为273kN;悬垂线夹的破坏载荷100kN;对导线握力不小于导线计算拉断力的18%,即49.1kN;满足500kV输电线路电晕要求。

2. 2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串结构和金具

导线被锚固在悬垂杆塔上时,悬垂绝缘子串将承受导线、金具、覆冰的全部重量和风压引的载荷。按照设计院提供的技术参数及串型图,此工程采用分裂间距为≥1000mm的2X300kN绝缘子串结构,通过两挂点把导线悬挂在悬垂塔上,导线为4XLHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线,具体见下图:



3. 2×300kN导线双联下垂式悬垂绝缘子串配套金具的研制

(1) 连接金具、均压屏蔽环的研制参考4×320kN导线耐张绝缘子串连接金具、均压屏蔽环的研制。

(2) 预绞丝护线条的研制

预绞丝护线条选用防锈铝合金制造,缠绕在悬垂线夹处的导线上,以提高悬垂线夹处导线的刚度,达到防振的目的,其防振功能直接可靠。包在导线外还可防止

电弧烧伤导线。预绞丝护线条在设计过程中,主要考虑成型孔径和节距,一般情况下,成型孔径为导线直径的85%。

预绞丝护线条的节距按以下公式计算:

$$T = \pi \times (D1 + d_p) \times \text{ctg } \theta$$

式中: T—预绞丝节距, mm; θ —预绞丝的捻角; D1—导线外径, mm; d_p —单根预绞丝直径, mm;

计算结果: T=272 (mm)

(3) 悬垂线夹的研制

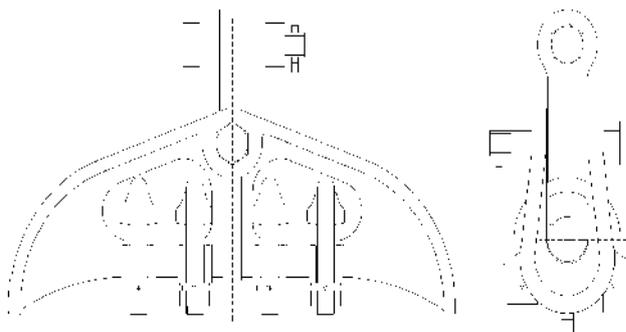
悬垂线夹的用途是在直线塔上提携导线,经悬垂绝缘子串与杆塔的横担相连,也可用在耐张、转角塔上固定跳线。

①悬垂线夹研制的技术条件

悬垂线夹满足电力金具通用技术条件:GB2314-2008的有关规定;适用LHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线,导线外径为29.14mm,计算拉断力为273kN,导线外缠绕预绞丝护线条;悬垂线夹的破坏载荷100kN;悬垂线夹对导线握力不小于导线计算拉断力的18%,即49.1kN;悬垂线夹的曲率半径不小于导线直径的8倍;悬垂线夹在电路上应转动灵活,其旋转角不小于±30°;悬垂线夹悬垂角不小于25°;悬垂线夹与被安装导线间应有足够的电气接触面,以避免由故障电流引起的损伤。

②悬垂线夹结构设计

本次设计的悬垂线夹为提包式,悬垂线夹由船体(主体)、压块、U型螺丝、挂板四部分组成,其结构简单,握力大。具体结构见下图:



③悬垂线夹原材料的的选取

悬垂线夹在一般线路采用的是铸造铝合金材料,但大跨越要求抗拉强度高,加上弧垂大,经以往经验以及试验结果,本次船体(主体)、压块材料选用中碳铸钢,材料本身具有较高的强度和硬度,同时具有一定的韧性,优良的切削性能和好的铸造性能。悬垂线夹的U型螺丝、挂板选用碳素结构钢。

④悬垂线夹的设计

a、悬垂线夹船体(主体)挂耳的设计

悬垂线夹的挂耳是悬垂线夹的重要部位，它承受着导线作用在线夹上的全部荷载，除受轴螺栓对其产生的拉力外，同时承受轴螺栓变形后对其产生的弯矩。为提高悬垂线夹挂耳处的强度，设计时采取了适当增大挂耳的孔边距及厚度，轴螺栓选用高强度材料，以减小螺栓的弯曲变形等措施，改善轴螺栓与线夹挂耳的受力条件。

挂耳的强度按下式计算：

$$P=2.05 \times t \times h \times 6_{\text{B}} / (1+0.5k) \quad k=h/R \quad R=(D+h)/2$$

式中：P—标称破坏荷重；t—挂耳板厚；h—孔边距厚； 6_{B} —抗拉强度；D—销轴直径；R—孔壁的平均半径。

b、悬垂线夹船体（主体）线槽的设计

导线用悬垂线夹适用于LHBGT-400/95特强型钢芯铝合金绞线，导线外径为29.14mm；线槽在设计时考虑到导线外缠绕预绞丝护线条、导线的误差、悬垂线夹船体（主体）铸造误差及安装方便等技术条件，将线槽直径设计为44mm。

c、悬垂线夹船体（主体）线槽悬垂角、旋转角和曲率半径的设计

输电线路通过平坦地带，一般悬垂角为 5° ~ 8° 及 10° ~ 12° ，本大跨越段处于平坦地带，但考虑设计悬垂线夹的通用性，此次设计悬垂角取为 25° 。

旋转角是悬垂线夹的重要技术指标，悬垂线夹顺线路的方向转动时要求灵活自由，且适合不同工况角度旋转要求，线夹转动所形成的角度与导线的水平张力和垂直张力息息相关，与转动轴位置也有关系，IEC标准仅要求线夹垂直于导线水平轴线灵活摆动，法国直线塔悬垂线夹旋转角大都在 30° 以下，因此本次设计悬垂线夹的旋转角不小于 $\pm 30^{\circ}$ 。并尽量减小转动轴与导线中心的距离，以减小导线的应力。

对于悬垂线夹曲率半径的计算公式，各国均有不同的规定，按照我国悬垂线夹标准规定的船体线槽曲率半径应不小于导线或地线直径的8倍，在设计过程中，我们对国内多条1000米以上跨越线路工程用悬垂线夹进行研究，针对本大跨越工程中悬垂串选用双悬垂线夹的结构形式，悬垂线夹的线槽曲率半径取导线直径的8倍。

d、悬垂线夹船体（主体）长度的设计

IEC标准要求悬垂线夹的线槽要有足够的接触面，以避免短路电流对线夹及导线的损伤。由于没有具体值，各国的悬垂线夹长度也不尽一样，前苏联设计的普通型悬垂线夹长度不低于导线直径的10倍，日本设计的普通型悬垂线夹长度显得略短一些。悬垂线夹船体长度根据曲率半径、悬垂角及保证悬垂线夹对导线有足够的握力确定，本次设计的悬垂线夹船体长度为476mm。

e、悬垂线夹船体的强度计算

悬垂线夹船体断面受导线均布载荷的作用，其强度按弯矩最大和断面最小处计算，悬垂线夹船体断面较不规则，按近似的U形断面计算。

悬垂线夹船体的强度计算参照梁弯曲时正应力的强度计算公式进行：

$$\sigma = M/W \quad \sigma \leq \sigma_{\text{B}}$$

公式中： σ —校核点处的正应力；M—横截面的弯矩；W—抗弯截面模量； σ_{B} —材料的许用弯曲应力。

f、悬垂线夹压块、U型螺丝和挂板的设计

根据悬垂线夹的船体结构尺寸、对导线的握力和破坏载荷要求，配套设计了悬垂线夹压块、U型螺丝和挂板。

五、本工程技术特点

本次新研制的配套金具具有以下特点：

(1) 大量采用了高强度材料，减小了金具结构尺寸，减轻了金具重量。

(2) 产品采用了各种先进的工艺，从而有效保证了产品的安全性。

(3) 各部件转动灵活，挂点金具结构能适应各种导线下倾角的要求。

(4) 耐张线夹铝管采用高强度铝合金管，减小了铝管外径和壁厚，减轻重量的同时大大降低了铝管受力时的伸长量和伸长速度，使耐张线夹的铝管和钢锚在受力时匹配的更好，保证了耐张线夹对导线的握力。

(5) 均压环、屏蔽环以及均压屏蔽环的组合设计，保证了工程对金具串运行过程中电晕、无线电干扰和电压分布的要求。

(6) 悬垂线夹曲率半径大，有足够大的旋转角和悬垂角，满足大档距、低弧垂大跨越线路工程的要求。

六、结论

本次研制的开封变-新乡东500kV线路工程黄河大跨越系列金具在2016年8月已经安全运行，运行至今工况良好，经试验与实践验证，完全满足工程的各项要求。本次研发成功，不仅解决了工程需求，同时表明在金具设计技术层面是可行的，也为以后新的大跨越金具设计积累了重要经验。

参考文献：

[1]《送电线路金具的设计、安装、试验和应用》作者：程应镗

[2]《输变电常用标准汇编 电力金具卷》中国标准出版社编

[3]《电力工程高压送电线路设计手册》东北电力设计院编

[4]开封变-新乡东500kV线路工程黄河大跨越技术规范书