

# 高压输电线路铁塔结构优化设计的研究

朱伯文 刘逸蕾 芦明智 代静雯 李翠林  
国核电力规划设计研究院 北京 100095

**摘要:** 架空线路作为我国高压线路的主要送电方式,其大体上由导线、铁塔和基础三部分组成。铁塔作为导线的主要承力结构,其安全性关系到整个电网的稳定。本文从铁塔的选型及规划、塔身布材、塔身坡度、塔头及横断面的优化等角度出发,阐述了铁塔结构设计过程中常见问题的优化方案,并提出了一些合理性建议,为相关专业提供一些参考。

**关键词:** 高压输电线路;铁塔结构;优化设计

**引言:** 架空输电线路是我国高压线路送电的主要方式,相比于地理电缆线路,架空线路具有输送距离长、施工周期短、建设投资少的优点。架空线路中的铁塔作为导线的主要承力结构,其可靠性关系到整条电能输送通道的安全,因此在设计阶段,如何进行铁塔选型、优化塔身结构、合理布材成为了输电技术人员关心的热点问题。本文针对铁塔的结构设计,分析、探讨了各个结构细部在设计过程中常见的问题,并提出了一些合理性建议。

## 1 我国高压输电线路铁塔结构设计优化的现状

目前已有部分专家学者在输电杆塔设计优化方面展开研究,文献<sup>[1]</sup>从杆塔结构选材、强度等方面阐述了当前铁塔设计中存在的不足,并给出了一些改进方法;文献<sup>[2]</sup>针对塔身坡度和斜材夹角给出了优化方案;文献<sup>[3]</sup>分别叙述了窄基塔和宽基塔的设计方法,并分析了铁塔结构设计对基础的影响;文献<sup>[4]</sup>基于拓扑优化方法,通过选择合适的杆塔支撑形式、边缘形式、内层数以及冗余数对位于采空区的杆塔尺寸及形状进行了优化,得出了此方法能够有效减轻结构重量,且由于结构更具弹性,更适合用于采空区的结论;文献<sup>[5]</sup>首先从杆塔强度和钢结构的选择两个方面指出了当前输电杆塔设计中面临的问题,然后以某110千伏杆塔为例,阐述了塔头、塔身的优化方法;文献<sup>[6]</sup>借助铁塔内力分析软件,对包括塔身、塔腿坡度,塔身布置,塔身隔面,长短腿配置等在内的杆塔结构进行了优化分析,给出了一些优化建议;文献<sup>[7]</sup>分析了铁塔结构的设计原则,并结合某500千伏双回路线路设计案例,对铁塔塔头、塔身横断面样式、塔身坡度以及塔身斜材布置的设计方案进行优化探究。文献<sup>[8]</sup>针对某工程设计的500SZ杆塔为研究对象,先后从导线排列方式、铁塔头部外形形式、塔身主材坡度、腹杆布置、塔身断面型式、横隔面处理等方面阐述了杆塔优化设计的思路。

虽然业内在杆塔结构设计优化方面取得了不少进

展,但大多都是阐述理念和思路,一些重要的影响因素及其作用原理并未深入论述。

## 2 高压输电线路铁塔选型及规划

架空线路大体上由导线(含绝缘子)、铁塔和基础三部分组成。其中,铁塔的费用占整个工程造价的35%左右<sup>[2]</sup>,因此,铁塔的选型在铁塔设计环节中至关重要,其原则大体上取决于以下几个方面:一是电压等级,电压等级决定了输送容量、电气间隙、绝缘要求及对地距离等参数,这些参数直接影响了杆塔荷载、塔头尺寸及杆塔呼高。二是地形地貌,地形地貌会影响铁塔的刚度,对于高差较大的地形,一般多用方塔以增加纵向刚度。三是沿线交通状况,交通状况决定了杆塔材料运输的难易度,这将直接影响建设成本,如在交通运输不便的山区线路采用钢管塔或钢管混凝土塔,其运输成本往往是角钢塔的数倍甚至数十倍。四是沿线经济发展状况,经济的发展状况直接影响了土地价格,尤其是在经济相对发达的地区,征地费用是建设投资的主要影响因素,在此类地区要尽可能避免拉线塔和导线水平排列等占地面积较大的杆塔。

对已有工程的杆塔使用情况进行统计分析,并在此基础上进行规划是现阶段杆塔规划的主要做法,此方法有两个明显的缺点:一是规划结果受样本优劣程度的影响较大,二是样本数量要足够多才具有一定的代表性。由于工程内外部条件的唯一性和该方法的局限性,故此方法在一定程度上很难反映出工程杆塔规划的真实情况。尤其在高压等级的输电线路中,呼高大、塔重沉的特点导致杆塔费用较高,若在杆塔规划时仅考虑经济档距、经济塔高这两方面因素的影响,则规划后得出的杆塔系列并非最优解。合理的做法是:优先结合工程的实际情况,在无边条件约束的情况下进行排位,并基于黄金分割的方法,在排位结果的基础上对呼高、水平

档距、垂直档距、转角度数、kV值等杆塔使用条件进行统计、分析及归纳合并，这样得到的结果才是相对最优的。该方法可根据铁塔的实际使用情况，规划出常规的一塔至四塔方案，甚至五塔、六塔方案，塔型方案越多，杆塔造价越低。但随着塔型方案不断增多，塔重及综合造价的差值越来越小，由此可确定出规划塔型的相对最优方案数，再根据选取方案中各塔的使用情况确定出杆塔的摇摆角及其间隙。这种方法能够在满足技术要求的条件下使杆塔的造价最低。

### 3 铁塔结构细部设计的优化方案

铁塔结构设计中，要尽力做到在外荷载作用下，铁塔满足强度、刚度及稳定性的要求，并且塔重最轻，投资最小。这就需要对铁塔的设计进行优化，优化可分为两个大方向，一是铁塔整体，二是结构细部。铁塔整体的优化受电气间隙圆等因素的影响，在进行外型规划时就已经考虑，此处就不再过多赘述。下面着重阐述铁塔结构细部的设计优化。

#### 3.1 塔身坡度的优化设计

塔身坡度直接关系到铁塔根开，而铁塔根开是影响塔重最主要的因素，当铁塔的荷载恒定时，铁塔根开的大小直接决定钢材消耗量。

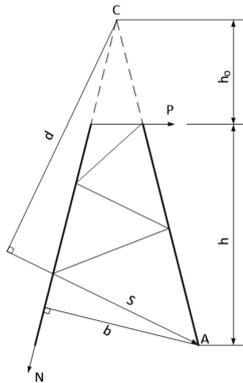


图1 杆塔结构计算简图

图1所示为杆塔桁架结构的计算简图。由图1可知，杆塔受力平衡时为静定结构，对A点取矩，有

$$\sum M_A = ph - Nb = 0 \quad (1)$$

式中，P为作用在铁塔上的荷载；N为主材轴力；S为斜材轴力；b为主材力臂；d为斜材力臂。故

$$N = \frac{ph}{b} \quad (2)$$

同理，对C点取矩，有

$$S = \frac{-ph_o}{d} \quad (3)$$

由公式(2)可以看出，对于同一种腹杆布置形式的塔身，当荷载一定时，不同的塔身坡度直接影响杆塔根开大小，而根开又与主材力臂b成正比，与主材内力成反比，即塔身坡度越大，主材内力越小，主材角钢规格越小，塔重越轻。由图1和式(3)还可以看出，随着铁塔坡度的不断增大，倘若塔身节间高度不变，斜材力臂d将进一步增大，斜材轴力S将进一步减小，但斜材的长度会增加，此时，斜材的规格将由内力控制转换为长细比控制，导致斜材规格增大，塔重增加。因此在杆塔优化时，要控制塔身坡度，使塔身主、斜材内力及长细比的变化与材料规格、材质的变化相协调。

#### 3.2 塔身横隔面的优化设计

铁塔的横隔面主要承受铁塔扭转变形时产生的内力，常见的横隔面型式如图2所示。对于塔身横担高度处的横隔面，由于铁塔瓶口宽度不大，长细比对杆件的影响较小，因此常采用样式(a)至样式(d)的布材方式。对于塔腿高度处的横隔面，由于杆塔瓶口宽度较大，横隔面的受力相对较小，布材多以杆件长细比控制，相比于样式(e)来说，样式(f)和(g)能够进一步减小杆件的长细比，使塔重相对较轻，因此也更受到设计人员的青睐。

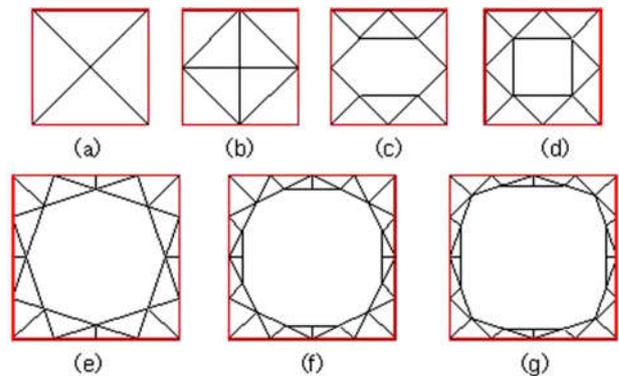


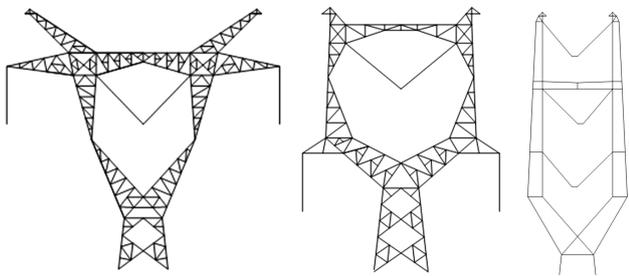
图2 常见的横隔面样式

#### 3.3 铁塔塔头的优化设计

由于回路数的不同，铁塔的塔头优化基本可以分为单回路直线塔、单回路耐张塔及双回路塔，单回路耐张塔大多采用的是“干”字结构，双回路塔大多采用的是鼓型结构，这两种塔型相比于单回路直线塔来说，具备结构简单、受力清晰、施工快捷、运行检修方便等优点，优化方面极其有限，此处就不过多赘述，下面着重阐述单回路直线塔塔头的优化。

单回路直线塔的塔头布置受导线排列方式的影响，单回路杆塔一般采用的导线排列方式有水平排列、三角排列及垂直排列，如图3所示。垂直排列杆塔可明显

减小走廊宽度,但由于导线竖向排列,铁塔高度相对较高,线条及塔身风荷载随高度的增加而增大,这会导致杆塔重量增大。导线水平排列的杆塔可有效降低杆塔高度、平衡杆塔荷载,节约杆塔本体投资,但走廊宽度会有所增大。导线三角形排列的杆塔在塔重和走廊宽度方面介于两者之间。因此,在不受走廊宽度影响的地区,优先推荐采导线水平排列的方式。导线水平排列常用的杆塔型式有酒杯塔、门型塔和拉线塔,门型塔较酒杯塔重2.5%左右,经济性上不占优势;拉线塔的塔重虽然较轻,但需要在拉线的作用下保持自立,拉线长期处于受力疲劳状态,易发生断裂事故,给运行维护带来了极大的不便。因此在无特殊要求的情况下,单回路直线塔优先推荐酒杯塔。



(a) 三相水平 (b) 三角形 (c) 三相垂直  
图3 常见的单回路直线塔塔头

### 3.4 塔身斜材布置的优化

斜材的布材形式不仅影响铁塔受力安全,还将影响铁塔的重量,常见的塔身斜材的布置型式有正“K”型、倒“K”型、交叉式等。在以往的工程中,铁塔斜材的布置多采用交叉式,其目的是充分利用拉压系统的受力特性(拉杆对压杆的稳定计算起支撑作用),有效减小斜材规格。但经过大量试算发现在连续使用4个以上的交叉布置型式后,斜材的控制工况极易出现同压控制工况,尤其是横担附近的塔身节间斜材,出现同压控制工况的概率更高。同压工况下,杆件的计算长度较常规工况大幅增加,致使杆件规格成非线性增大趋势,塔重明显增大,采用倒K结构可以避免这一情况的发生,使斜材的受力恢复一拉一压的状态。

此外,斜材布置方式与塔身节间高度有关。以交叉式斜材为例,塔身节间高度越大,斜材与塔身主材的夹角越小,斜材受力增加,导致材质和规格增大,塔重增加。经过测算,当交叉斜材与水平面的夹角控制在 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间时,斜材内力和长细比均能达到相对理想的状态,使得塔重较轻。但控制斜材与水平面夹角在 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 仅适用于铁塔塔身宽度较小的情况,如大根开、高呼高铁塔塔身变坡点以上的位置或者呼高较低、根开较小的铁塔全塔

身。当铁塔呼高较高,塔身坡度较大时,越靠近塔腿处,塔身宽度越大,此处节间的斜材若采用交叉式布置,为满足夹角在 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的要求,会导致塔身节间高度过大,一方面主材分段将达到7到8段或更多,另一方面斜材的规格主要为长细比控制,选材上将进一步增加,造成塔重增大。对于塔身宽度较大的节间,推荐斜材采用一正“K”一倒“K”依次交错的布置方式,必要时在倒“K”材上布设“V”面,将倒“K”材由平行轴控制改为最小轴控制,可进一步减小斜材规格。此种布材较交叉式布材可使塔重降低3%-6%左右。

## 4 高压输电线路铁塔结构优化设计的建议

### 4.1 合理选材

铁塔材料的选择和使用直接影响杆塔的强度和刚度,对铁塔的安全性和稳定性至关重要。随着大肢宽角钢在特高压工程的广泛应用,其优势也愈发明显。相比于传统的双拼和四拼组合角钢,采用大肢宽角钢,一方面能够简化节点构造,减少填板和螺栓的使用;另一方面可以降低角钢间填板焊接质量构成的铁塔安全隐患<sup>[9]</sup>。同时,大肢宽角钢在经济性上更具优势,大规格角钢的杆塔单重较组合角钢的杆塔能够减轻约5%左右,有效减低了铁塔钢耗指标,有利于造价控制和节能减排。

### 4.2 优化节点板构造

与国外同种类型塔相比,我国塔材单基耗钢量相对较多。除了因钢材的机械性能差异性与压应力稳定的公式计算不同等条件之外,较高的节点板用量是塔重指标较高的主要因素之一<sup>[10]</sup>。例如通过提高螺栓强度等级以减少螺栓个数,可缩减节点板的尺寸,但是效果往往并不理想。最有效的方式是将斜材杆件通过螺栓直接和主材连,这样既可有效减少节点板的用量,还可有效减少用于连接主材和节点板的螺栓个数。

## 结论

本文从杆塔选型、塔身坡度优化、塔头布置、横断面选择、塔身布材、节点优化等角度出发,详细论述了杆塔结构细部的优化方案,得出以下结论:

(1) 在排位结果的基础上,采用黄金分割的方法进行杆塔规划可使杆塔的综合造价最低。

(2) 塔身坡度和布材是杆塔重量的主要影响因素,在设计时要控制塔身坡度,将斜材夹角控制在 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间,避免连续4次及以上使用交叉材布置型式。塔身宽度较大的节间,斜材采用一正“K”一倒“K”布置方式能够有效节约塔材。

(3) 在条件允许的情况下,直线塔应优先采用酒杯型结构;采用大规格角钢替代双拼和四拼角钢,可有效

降低塔重。

(4) 斜材杆件在连接时, 应优先考虑通过螺栓直接和主材相连, 减少节点板的使用可有效节约塔材。

#### 参考文献

- [1] 廖林宏. 关于输电线路杆塔结构优化设计的浅析[J]. 数字通信世界, 2021, No.200(08):229-230+133
- [2] 闫小峰. 关于输电线路杆塔结构优化设计分析[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (03):43.
- [3] 陈明亮. 架空输电线路铁塔结构设计优化探析[J]. 工业设计, 2017, No.133(08):167-168.
- [4] 宰红斌, 刘云峰, 卫栋, 朱丹, 上官明霞, 单荣. 面向采空区的输电线路杆塔设计优化方法[J]. 电力工程技术, 2021, v.40;No.198(04):182-188.
- [5] 张春阳, 邓薇. 输电线路杆塔结构优化设计解析[J]. 中国新技术新产品, 2017, No.355(21):94-95.
- [6] 张斌. 输电线路杆塔塔身结构设计优化研究[J]. 电气传动自动化, 2018, v.40;No.187(04):25-27.
- [7] 孟德浩. 输电线路铁塔结构设计的发展和现状研究[J]. 新型工业化, 2020, v.10;No.110(02):41-44.
- [8] 朱鸿斌. 输电线路铁塔结构设计优化探讨[J]. 中国高新技术企业, 2017, No.390(03):139-140.
- [9] 谢晨光. 大肢宽高强等边角钢的稳定性研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [10] 孙宇爽. 高压输电线路铁塔结构设计要点分析[J]. 电子世界, 2014, No.456(18):68