

# 中欧架空输电线路铁塔交叉斜材长细比计算方法 对标分析

孙墨林<sup>1,✉</sup>, 庄志翔<sup>1</sup>, 郭洪亮<sup>2</sup>, 侯伟<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 特变电工沈阳电力勘测设计有限公司, 辽宁 沈阳 110020)

**摘要:** [目的] 为了有效规避由于国内外工程设计规范不同引起的设计质量问题, 结合中国现行《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)、欧洲标准《1 kV及以上架空输电线路通用规定》(EN—50341—2012), 对输电线路铁塔角钢构件交叉斜材长细比计算方法进行对比分析。[方法] 以工程中常见的有辅助材的交叉斜材布置型式为例, 分别采用两种标准计算了其杆件长细比。[结果] 研究表明: 在计算交叉斜材同压时, 中国标准采用计算长度修正系数来修正两根斜材的共同作用对受压构件稳定承载力的影响, 欧洲标准采用验算两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载代数和的方法来保证构件的稳定承载力满足结构要求。[结论] 在有辅助材的交叉斜材布置型式时, 两杆同压且压力相等、两杆同压且压力不等、两杆一拉一压这3种情况下国标稳定承载力计算结果均小于欧标稳定承载力。

**关键词:** 架空输电线路; 角钢构件; 交叉斜材; 长细比; 稳定承载力; 中欧标准; 标准对比

中图分类号: TM7; TM753

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0129-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Comparative Analysis of Slenderness Ratio Calculation Methods of Cross Bracings for Towers Between China and EU Overhead Transmission Line Standards

SUN Molin<sup>1,✉</sup>, ZHUANG Zhixiang<sup>1</sup>, GUO Hongliang<sup>2</sup>, HOU Wei<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. TBEA Shenyang Electric Technology Consulting Co., Ltd., Shenyang 110020, Liaoning, China)

**Abstract:** [Introduction] This paper aims to effectively avoid the design quality problems caused by the difference between domestic and foreign engineering design specifications. The study makes comparative analysis of slenderness ratio of cross bracings for angle steel members of transmission towers according to the current Chinese standard *Technical Code for the Design of Tower and Pole Structures of Overhead Transmission Line* (DL/T 5486—2020) and the European standard *Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV* (EN—50341—2012). [Method] An example of the typical arrangement pattern of cross bracings with auxiliary materials in projects was given to calculate the slenderness ratio of the poles according to the two standards. [Result] The results we obtained demonstrate that when calculating for the two cross bracings subject to same compression, the Chinese standard adopts the calculation of length correction factor to correct the influence of the joint action of the two cross bracings on the buckling strength of the compression member. The European standard adopts the checking calculation of the sum of buckling strength of the two poles which shall be greater than or equal to the algebraic sum of the loads on the two poles to ensure the buckling strength of the member meets the structural requirement. [Conclusion] In the arrangement pattern of typical cross bracings with auxiliary materials, the calculated buckling strength obtained according to the Chinese standard is less than that obtained according to the European standard under the following three conditions: two poles subject to same compression and equal pressure, two poles subject to same compression and unequal pressure, and two poles with one pole subject to pulling and the other subject to compression.

**Key words:** overhead transmission line; angle steel member; cross bracings; slenderness ratio; buckling strength; China and EU standards; standard comparison

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-12-03

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司集中开发科研项目“铁塔单角钢构件加固技术”(ER05871W)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

新时代对电网技术的发展提出了新的要求<sup>[1-2]</sup>。未来随着国家“一带一路”倡议的推动,越来越多的中国企业会参与到国际输电线路工程建设业务中<sup>[3-4]</sup>,海外不同国家和地区要求采用的铁塔结构设计标准不尽相同<sup>[5-6]</sup>。在“一带一路”沿线国家中,多数国家在进行输电线路铁塔结构设计时采用欧洲标准<sup>[7]</sup>。在准确理解中国标准与欧洲标准不同的基础上进行铁塔设计可以有效规避由于国内外工程设计规范不同引起的设计质量问题<sup>[8-10]</sup>。对格构式角钢铁塔来说,受压杆件破坏形式通常为屈曲失稳破坏<sup>[11-13]</sup>,而杆件的稳定承载力大小又取决于杆件长细比取值,

故本文采用中国标准与欧洲标准对比的方式,分析计算了中国标准《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)<sup>[14]</sup>(取代 DL/T 5154—2012<sup>[15]</sup>,以下简称中国标准)及欧洲标准 EN—50341—2012<sup>[16]</sup>(以下简称欧洲标准)在铁塔交叉斜材长细比计算方法中的差别。主材及单斜材的长细比取值<sup>[17-19]</sup>,可参考相关文献进行计算。

## 1 中欧标准的斜材长细比计算方法

在计算交叉斜材长细比时,对斜材的不同布置型式,中国标准和欧洲标准计算方法差异较大。现以图 1 所示典型铁塔交叉斜材布置型式为例,比较中国标准和欧标标准杆件长细比计算方法。

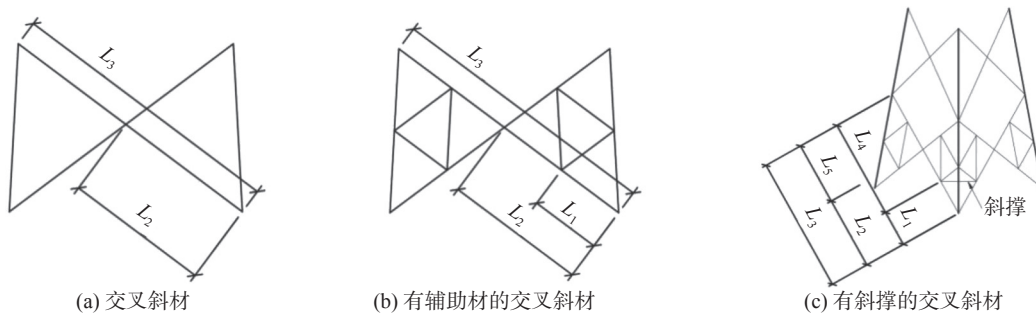


图 1 典型铁塔交叉斜材布置型式

Fig. 1 Typical arrangement pattern of tower cross bracing

### 1.1 无辅助材的交叉斜材布置型式

#### 1.1.1 中国标准

交叉斜材布置型式如图 1(a) 所示时,根据中国标准中表 6.1.8-2 的规定,交叉斜材的长细比计算方法如下:

1) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力大于或等于 20% 压杆内力时:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_{y0}} \quad (1)$$

式中:

$\lambda$  ——构件长细比;

$L_2$  ——杆件计算长度,如图 1(a) 所示;

$r_{y0}$  ——杆件最小轴方向回转半径。

2) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力小于 20% 压杆内力或两根斜材同时受压时:

$$\lambda = \frac{KL_3}{r_x} \quad (2)$$

式中:

$L_3$  ——杆件计算长度(m),如图 1(a) 所示;

$r_x$  ——杆件平行轴方向回转半径(m);

$K$  ——交叉斜材计算长度修正系数,按下式计算确定:

两根斜材一拉一压时:

$$K = \sqrt{(L_2/L_3) \cdot (1 - 3N_0/4N)} \geq 0.5 \quad (3)$$

两根斜材同时受压时:

$$K = \sqrt{0.5(1 + N_0/N)} \quad (4)$$

式中:

$N$  ——所计算杆的内力(kN),取绝对值;

$N_0$  ——相交另一杆的内力(kN),取绝对值,两

根斜材同时受压时,取  $N_0 \leq N$ 。

### 1.1.2 欧洲标准

当交叉斜材采用与 1.1.1 节同样的布置型式,如图 1(a) 所示,根据欧洲标准规定,交叉斜材的长细比计算方法如下:

1) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力大于 2/3 压杆内力时:

应计算  $L_2$  长度沿最小轴方向的长细比,即:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_{y0}} \quad (5)$$

2) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力不大于 2/3 压杆内力或两根斜材同时受压时:

首先应使用式(5)计算  $L_2$  长度沿最小轴方向的长细比。

当两杆同时受压时,还应验算两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受内力的代数和。计算稳定承载力时,计算长度取  $L_3$ , 回转半径取平行轴。长细比可取值为:

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} \quad (6)$$

### 1.1.3 中欧标准的主要区别

1) 中国标准和欧洲标准确定杆件计算长度方法不同。中国标准分类方式为两根斜材为一拉一压且拉杆内力大于或等于 20% 压杆内力与两根斜材为一拉一压且拉杆内力小于 20% 压杆内力或两根斜材同时受压,计算长度与拉杆内力与压杆内力的相对大小关系有关。

欧洲标准为当两根斜材为一拉一压且拉杆内力大于 2/3 压杆内力时,可仅计算  $L_2$  长度沿最小轴的长细比;否则还需验算两杆受压稳定承载力。

2) 当斜材同压时,中国标准采用交叉斜材计算长度修正系数  $K$  的方法来修正两根斜材的共同作用对受压构件稳定承载力的影响;欧洲标准采用验算两杆的受压稳定承载力之和不小于两杆内力代数和的方法来保证构件的稳定承载力满足要求。

## 1.2 有辅助材的交叉斜材布置型式

### 1.2.1 中国标准

有辅助材的交叉斜材布置型式如图 1(b) 所示时,根据中国标准中表 6.1.8-2 的规定,交叉斜材的长细比计算方法如下:

1) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力大于或等

于 20% 压杆内力时:

$$\lambda = \frac{1.1L_2}{r_x} \quad (7)$$

2) 当两根斜材为一拉一压且拉杆内力小于 20% 压杆内力或两根斜材同时受压时:

$$\lambda = \frac{KL_3}{r_x} \quad (8)$$

### 1.2.2 欧洲标准

1) 交叉斜材之间无斜撑连接情况:

当有辅助材的交叉斜材采用与 1.2.1 节中同样的布置型式,如图 1(b) 所示时,根据欧洲标准规定,当拉、压力相同时,首先应计算  $L_1$  长度沿最小轴方向的长细比,即:

$$\lambda = \frac{L_1}{r_{y0}} \quad (9)$$

式中:

$L_1$ ——杆件计算长度,如图 1(b) 所示。

还需计算  $L_2$  长度沿平行轴方向的长细比,即:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_x} \quad (10)$$

当两根斜材拉力与压力不同或同时受压时,需进一步验算两杆的受压稳定承载力之和不小于两杆内力的代数和。计算稳定承载力时,沿平行轴方向计算长度取  $L_3$ 。长细比可取值为:

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} \quad (11)$$

2) 交叉斜材之间有斜撑连接情况:

如图 1(c) 所示,在交叉斜材正侧面加设斜向支撑,根据欧洲标准规定,此交叉斜材系统应分别验算以下 5 种情况:

1) 计算  $L_1$  长度沿最小轴的长细比,即:

$$\lambda = \frac{L_1}{r_{y0}} \quad (12)$$

2) 计算  $L_5$  长度沿平行轴的长细比,即:

$$\lambda = \frac{L_5}{r_x} \quad (13)$$

式中:

$L_5$ ——杆件计算长度,如图 1(c) 所示。

3) 由于有斜撑的连接,还需验算  $L_4$  长度内两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和。计算稳定承载力时,计算长度取  $L_4$ , 回转半径取平行轴。长细比可取值为:

$$\lambda = \frac{L_4}{r_x} \quad (14)$$

式中:

$L_4$ ——杆件计算长度,如图 1(c)所示。

4) 验算由斜撑连接的两杆(在相邻的正侧面中)的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和。计算稳定承载力时,计算长度取  $L_2$ , 回转半径取平行轴。长细比可取值为:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_x} \quad (15)$$

5) 验算交叉斜材中四根杆件(在相邻的正侧面中)的受压稳定承载力之和大于或等于四杆内力的代数和。计算稳定承载力时,计算长度取  $L_3$ , 回转半径取平行轴。长细比可取值为:

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} \quad (16)$$

### 1.2.3 中欧标准主要区别

除 1.1.3 节中所列中国标准与欧洲标准计算长细比的主要区别外,还应注意:

1) 欧洲标准中,考虑了斜撑对交叉斜材稳定计算的影响。在斜撑与斜材交点处,由于斜撑的存在,该节点可提供平面内及平面外约束,因此,验算两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和时,计算长度由没有斜撑时的  $L_3$  变为有斜撑时的  $L_4$ 。由于布置了斜撑,由斜撑连接的两杆之间的相互作用有所增强,需验算两杆之间以及由斜撑连接的交叉斜材四根杆件的稳定承载力。在中国标准表 6.1.8-2 中,未明确列出有斜撑连接的布置型式和有斜撑连接时交叉斜材长细比的计算方法。

2) 欧洲标准中,需考虑  $L_1$  长度沿最小轴的长细比;对有辅助材的交叉斜材,中国标准未考虑此计算长度。这是因为中国国内铁塔一般采用等肢角钢,其  $r_x/r_y \leq 2$ , 当辅助材布置在  $L_2$  段的中点时,  $L_1$  段沿最小轴的长细比小于  $L_2$  段沿平行轴的长细比,对杆件长细比一般不起控制作用。国外部分铁塔采用不等肢角钢,对不等肢角钢构件,  $L_1$  段最小轴长细比可能会控制整个杆件的长细比,因此需严格验算。

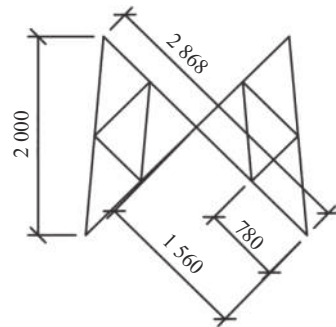
3) 当两根斜材一拉一压时,中国标准  $L_2$  计算长度取 1.1 的增大系数,即  $L_0 = 1.1 L_2$ ; 欧洲标准并没有考虑此项影响,其计算长度仍为  $L_2$ 。这是由于中国标准计算条件为拉杆内力不小于 20% 压杆内力,欧洲标准为拉杆内力不小于 66.7% 压杆内力;中国标

准中拉杆可能不能为压杆提供有效约束,因此乘以 1.1 的增大系数。

## 2 计算实例及结果分析

### 2.1 计算说明

本文以工程中常见的有辅助材的交叉斜材布置型式为例,对比了中国标准和欧洲标准长细比计算的不同。铁塔斜材布置型式及杆件尺寸如图 2 所示,  $L_1 = 780 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 1\ 560 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 2\ 868 \text{ mm}$ , 钢材强度为 Q235, 计算斜材长细比及杆件规格。



注: 图中尺寸单位为 mm。

图 2 交叉斜材布置型式及杆件尺寸

Fig. 2 Arrangement pattern of cross bracings on a pole length

### 2.2 两杆同压且压力相等计算结果

假设交叉材同时受压力作用, 内力大小为:

$N = -30 \text{ kN}$ ,  $N_0 = -30 \text{ kN}$  (符号命名规则为: 拉力为正, 压力为负), 计算如下:

#### 1) 欧洲标准

经试算, 取杆件截面为  $L56 \times 3$  (虽然在输电线路铁塔构件中较少采用该规格角钢, 为了说明因中国标准和欧洲标准长细比计算结果的差异导致构件选材的不同, 本文采用该规格角钢进行计算比较)。同压时, 杆件控制长细比为:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_x} = \frac{156}{1.75} = 89.14$$

根据欧标受压杆件稳定承载力计算方法, 可得杆件稳定承载力为 53.3 kN。

因为两根斜材同时受压, 还需验算两根杆件的受压稳定承载力之和是否大于或等于两杆所受荷载的代数和。此时:

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} = \frac{286.8}{1.75} = 163.89$$

按照欧标计算方法, 杆件稳定承载力为 26.0 kN。

此时,不满足两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和,需要加大截面。

调整杆件规格为  $L56 \times 4$ :

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} = \frac{286.8}{1.73} = 165.78$$

在此长细比下,根据欧标受压杆件稳定承载力计算方法,得杆件稳定承载力为 34.4 kN。两根杆件稳定承载力之和大于所受力代数和,满足要求。

2) 中国标准

当  $N = -30$  kN,  $N_0 = -30$  kN 时:

$$K = \sqrt{0.5(1 + N_0/N)} = 1$$

计算长度为:

$$L_0 = KL_3 = 2868 \text{ mm}$$

取杆件截面为  $L56 \times 4$ :

$$\lambda = \frac{KL_3}{r_x} = \frac{286.8}{1.73} = 165.78$$

根据国标受压杆件稳定承载力计算方法,得杆件稳定承载力为 31.47 kN。

从以上两种标准的计算结果来看,虽然计算方法不同,但杆件控制长细比相同,且该规格该长细比下国标稳定承载力略小于欧标稳定承载力。

### 2.3 两杆同压且压力不等计算结果

铁塔斜材布置型式及杆件尺寸与 2.1 节设计条件相同,当内力大小分别为:  $N = -30$  kN,  $N_0 = -15$  kN, 计算过程如下所示:

1) 欧洲标准

经试算,取杆件截面为  $L56 \times 3$ , 此时杆件控制长细比为:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_x} = \frac{156}{1.75} = 89.14$$

根据欧标受压杆件稳定承载力计算方法,可得杆件稳定承载力为 53.3 kN。

因为两根斜材同时受压,还需验算两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和。此时:

$$\lambda = \frac{L_3}{r_x} = \frac{286.8}{1.75} = 163.89$$

在此长细比下,根据欧标受压杆件稳定承载力计算方法,得杆件稳定承载力为 26.0 kN。取杆件截面为  $L56 \times 3$ , 满足要求。

2) 中国标准

当  $N = -30$  kN,  $N_0 = -15$  kN 时:

$$K = \sqrt{0.5(1 + N_0/N)} = 0.866$$

计算长度为:

$$L_0 = KL_3 = 2484 \text{ mm}$$

取杆件截面为  $L56 \times 3$ :

$$\lambda = \frac{KL_3}{r_x} = \frac{248.4}{1.75} = 141.94$$

在此长细比下,根据中国标准受压杆件稳定承载力计算方法,得杆件稳定承载力为 25.81 kN < 30 kN, 不满足要求。

取杆件截面为  $L56 \times 4$ :

$$\lambda = \frac{KL_3}{r_x} = \frac{248.4}{1.73} = 143.58$$

在此长细比下,根据中国标准受压杆件稳定承载力计算方法,得杆件稳定承载力为 33.42 kN > 30 kN, 满足要求。

对比同压时在不同内力条件下的欧标计算结果可以发现,当  $N = -30$  kN,  $N_0 = -30$  kN 时,是由  $L_3$  段对应的长细比控制整个杆件的稳定承载力,即由  $L_2$  段对应的长细比计算出的杆件规格并不满足两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和的要求;当  $N = -30$  kN,  $N_0 = -15$  kN 时,由于两杆所受荷载变小,是由  $L_2$  段对应的长细比控制整个杆件的稳定承载力的,因此,后者的选材较小。

当两杆同压且两杆内力大小不同时,欧洲标准、中国标准的计算结果差异较大。欧洲标准计算结果中,当杆件规格为  $L56 \times 3$  时,虽然  $L_3$  长度对应的杆件受压稳定承载力为 26 kN,从单根杆件来看,小于压力较大杆件所受内力 30 kN,但欧洲标准认为两根杆件的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载的代数和,两根交叉斜材组成的系统即满足受压稳定承载力要求,因此该规格角钢满足要求。中国标准需验算交叉斜材两根杆件各自的受压稳定承载力。

从选材结果来看,按欧标计算杆件截面取  $L56 \times 3$  满足承载力要求,按国标计算需取  $L56 \times 4$  才能满足。可见在两杆同压且压力不等的情况下,欧标稳定承载力大于国标稳定承载力。

### 2.4 两杆一拉一压计算结果

铁塔斜材布置型式及杆件尺寸与 2.1 节设计条件相同,当内力大小为:  $N = -30$  kN,  $N_0 = 30$  kN (一拉一



压), 计算过程如下所示:

#### 1) 欧洲标准

取杆件截面为  $L56 \times 3$ , 此时杆件控制长细比为:

$$\lambda = \frac{L_2}{r_x} = \frac{156}{1.75} = 89.14$$

根据欧标受压杆件稳定承载力计算方法, 可得杆件稳定承载力为 53.3 kN, 满足要求。

#### 2) 中国标准

经试算, 取杆件截面为  $L56 \times 3$ , 此时杆件控制长细比为:

$$\lambda = \frac{1.1L_2}{r_x} = \frac{171.6}{1.75} = 98.06$$

在此长细比下, 根据中国标准受压杆件稳定承载力计算方法, 得杆件稳定承载力为 38.26 kN > 30 kN, 满足要求。

从以上两种标准的计算结果来看, 中国标准  $L_2$  计算长度取 1.1 的增大系数, 即  $L_0=1.1L_2$ ; 欧洲标准并没有考虑此项影响, 其计算长度仍为  $L_2$ , 因此中国标准长细比计算结果为欧洲标准的 1.1 倍, 且国标稳定承载力小于欧标稳定承载力。

### 2.5 计算结果分析

以上 3 种情况国标、欧标承载力计算结果如表 1 所示:

表 1 国标、欧标承载力计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculated buckling strength obtained according to Chinese standard and European standard

工况	国标承载力	欧标承载力
两杆同压且压力相等	31.47 kN	34.4 kN
两杆同压且压力不等	$L56 \times 4$	$L56 \times 3$
两杆一拉一压	38.26 kN	53.3 kN

注: 两杆同压且压力不等时按国标、欧标计算选材不同。

从表 1 可以看出, 在图 2 所示铁塔斜材布置型式及杆件尺寸下, 以上 3 种情况时国标稳定承载力计算结果均小于欧标稳定承载力计算结果。

### 3 结论

1) 在计算交叉斜材同压时, 中国标准采用交叉斜材计算长度修正系数  $K$  来修正两根斜材的共同作用对受压构件稳定承载力的影响; 欧洲标准采用验算两杆的受压稳定承载力之和大于或等于两杆所受荷载代数和的方法来保证构件的稳定承载力满足结

构要求。

2) 对于有辅助材的交叉斜材布置型式, 当两根斜材一拉一压时, 中国标准  $L_2$  计算长度取 1.1 的增大系数, 即  $L_0=1.1L_2$ ; 欧洲标准并没有考虑此项影响, 其计算长度仍为  $L_2$ 。这是由于中国标准计算条件为拉杆内力不小于 20% 压杆内力, 欧洲标准为拉杆内力不小于 66.7% 压杆内力; 中国标准中拉杆可能不能为压杆提供有效约束, 因此乘以 1.1 的增大系数。

3) 欧洲标准中, 对于有辅助材的交叉斜材, 考虑了斜撑对交叉斜材稳定性的影响。在斜撑与斜材交点处, 斜撑可以提供平面内与平面外约束。因为布置了斜撑, 由斜撑连接的两杆之间的相互作用有所增强, 需验算两杆之间以及由斜撑连接的交叉斜材 4 根杆件的稳定承载力。在中国标准中, 未对此作特殊说明。

4) 从计算实例可以看出, 在有辅助材的交叉斜材布置型式时, 两杆同压且压力相等、两杆同压且压力不等、两杆一拉一压这 3 种情况下国标稳定承载力计算结果均小于欧标稳定承载力。

#### 参考文献:

- [1] 李喜来, 李永双, 贾江波, 等. 中国电网技术成就、挑战与发展 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.001.
- [2] LI X L, LI Y S, JIA J B, et al. Review of the achievements, challenges and development of power system technology in China [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.001.
- [3] 张晶, 李彬. 新一代智能电网技术标准体系支撑电网高质量发展 [J]. 供用电, 2020, 37(3): 2+1.
- [4] ZHANG J, LI B. New generation technical standard systems for smart grid support high-quality development of power grid [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 2+1.
- [5] 岳浩, 陈媛, 林芳, 等. 中欧输电线路电气设计标准主要内容对比研究 [J]. 电力勘测设计, 2018(12): 24-28. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.12.005.
- [6] YUE H, CHEN Y, LIN F, et al. Comparative study on main contents of China and European Union electric design standards of transmission line [J]. Electric Power Survey & Design, 2018(12): 24-28. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.12.005.
- [7] 李敏生, 王振华. 中国输电线路规范的风荷载计算比较 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 89-93. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.014.
- [8] LI M S, WANG Z H. Comparison of wind load calculation for China transmission codes [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(3): 89-93. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.014.
- [9] 黎景辉, 李敏生. 输电线路历年规程与新荷载规范风荷载对比 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 102-106. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.013.
- [10] LI J H, LI M S. Comparison of wind load on transmission lines between old codes and new load code [J]. Southern Energy Con-

- struction, 2020, 7(3): 102-106. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.013).
- [6] 白建基, 王芳, 邓成刚. 欧洲管件标准与中国管件标准对比研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 79-84. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.011).
- BAI J J, WANG F, DENG C G. Comparative research on European pipe fitting standards and Chinese pipe fitting standards [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 79-84. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.011).
- [7] 李正良, 曹哲贤, 施菁华, 等. 输电塔不等边角钢交叉斜材稳定承载力研究 [J]. *建筑钢结构进展*, 2020, 22(2): 111-120. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.014](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.014).
- LI Z L, CAO Z X, SHI J H, et al. Investigation on the stability bearing capacity of unequal angle steel cross bracing in transmission towers [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2020, 22(2): 111-120. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.014](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.014).
- [8] 高嘉, 郑智慧, 熊纽, 等. 基于广域连接的广东地区接地极连接方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 115-122. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.015).
- GAO J, ZHENG Z H, XIONG N, et al. Research on connection scheme of HVDC WAN grounding electrode in Guangdong based on wide-area connection [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 115-122. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.015).
- [9] 刘洪义, 李正良, 刘凯. 输电线路角钢塔交叉斜材极限承载力研究 [J]. *特种结构*, 2020, 37(3): 55-62. DOI: [10.19786/j.tzjg.2020.03.011](https://doi.org/10.19786/j.tzjg.2020.03.011).
- LIU H Y, LI Z L, LIU K. Study on the bearing capacity of cross-diagonal bracing in transmission line [J]. *Special Structures*, 2020, 37(3): 55-62. DOI: [10.19786/j.tzjg.2020.03.011](https://doi.org/10.19786/j.tzjg.2020.03.011).
- [10] 黄佩, 吴海洋, 胡星. 输电铁塔角钢构件计算长度修正系数研究 [J]. *电力勘测设计*, 2019, 31(5): 35-39. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2019.05.007](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2019.05.007).
- HUANG P, WU H Y, HU X. Study on the effective length correction factor of transmission tower angle steel [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2019, 31(5): 35-39. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2019.05.007](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2019.05.007).
- [11] 王军, 陈驹. 连接方式对内配格构式角钢圆钢管混凝土构件轴拉性能的影响 [J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(增刊1): 354-361. DOI: [10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.047](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.047).
- WANG J, CHEN J. Influence of connection modes on axial tensile properties of concrete-filled circular steel tubes with latticed angle steels inside [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Supp. 1): 354-361. DOI: [10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.047](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.047).
- [12] 王军. 内配格构式角钢圆钢管混凝土力学性能研究及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 27-79.
- WANG J. Research and application on the mechanical properties of concrete-filled circular steel tubes with latticed steel angles inside [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 27-79.
- [13] 陈哲, 王军, 俞培祥, 等. 内配格构式角钢圆钢管混凝土梁受弯承载力试验及计算 [J]. *钢结构*, 2019, 34(2): 41-45, 8. DOI: [10.13206/j.gjg.201902007](https://doi.org/10.13206/j.gjg.201902007).
- CHEN Z, WANG J, YU P X, et al. Experiment and calculation of the bending capacity of concrete filled circular steel beams with latticed steel angles inside [J]. *Steel Construction*, 2019, 34(2): 41-45, 8. DOI: [10.13206/j.gjg.201902007](https://doi.org/10.13206/j.gjg.201902007).
- [14] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规程: DL/T 5486—2020 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- National Energy Administration. Technical specification for the design of steel supporting structures of overhead transmission line: DL/T 5486-2020 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [15] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- National Energy Administration. Technical code for the design of tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [16] BSI. Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV -Part 1: general requirements - common specifications: BS EN 50341-1: 2012 [S]. Brussels: British Standards Institution, 2013.
- [17] 庄志翔, 赵雪灵, 熊静进, 等. 220 kV单回路复合杆塔关键技术研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(2): 77-83. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.014).
- ZHUANG Z X, ZHAO X L, XIONG J J, et al. Research on key technologies of 220 kV single circuit composite tower [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(2): 77-83. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.014).
- [18] 张少军, 王艳波, 田力男, 等. 铁塔用角钢性能影响因素及断裂机理分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2012, 30(6): 6-11.
- ZHANG S J, WANG Y B, TIAN L N, et al. Performance influence factors and fracture mechanism of angle steel for tower structure [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2012, 30(6): 6-11.
- [19] 房正刚, 李正, 李毅刚, 等. 杆塔结构设计规程变化对杆塔通用设计的影响研究 [J/OL]. *建筑结构*: 1-6 [2022-09-27]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS220106>. DOI: [10.19701/j.jzjg.LS220106](https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS220106).
- FANG Z G, LI Z, LI Y G, et al. Research on influence of design regulation change of steel supporting structure on its general design [J/OL]. *Building Structure*: 1-6 [2022-09-27]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS220106>. DOI: [10.19701/j.jzjg.LS220106](https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS220106).

## 作者简介:



孙墨林

## 庄志翔

1990-, 男, 广东广州人, 工程师, 建筑与土木工程专业硕士, 主要从事输电线路的设计和研究工作(e-mail) 164625568@qq.com。

## 郭洪亮

1981-, 男, 内蒙古通辽人, 高级工程师, 结构工程专业硕士, 主要从事国内外输电线路铁塔及基础设计工作(e-mail) 24415860@qq.com。

## 侯伟

1981-, 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 一级注册结构工程师, 防灾减灾及防护工程专业硕士, 主要从事国内外输电线路铁塔及基础设计工作(e-mail) 315865877@qq.com。

(编辑 孙舒)