

构件并联法加固输电塔的试验研究及设计建议

刘学武, 夏开全, 高 燕, 刘思远, 任西春

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘 要: 输电塔易由于荷载过大、断线冲击或覆冰舞动而发生损伤和破坏。针对角钢塔的结构特点, 在其原构件的侧面通过连接板及螺栓并联一根新的同规格角钢, 以提高结构的承载力。对十字型、Z 字型和 T 字型三种截面形式加固构件的承载性能进行了数值分析和试验研究, 考虑了二次受力的影响, 研究了加固构件的破坏过程、破坏模式和极限荷载, 与单角钢构件的承载性能进行了对比分析, 结果表明加固后新构件的承载力明显提高。借鉴钢结构加固技术规范, 建议了加固构件稳定性设计计算公式, 确定了加固折减系数的取值。

关键词: 输电线路; 输电塔; 角钢; 加固方法

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)06-0838-07

输电线路多处于环境恶劣的条件下, 易遭受雨雪冰冻、强风等自然灾害的作用。近年来, 我国电网灾害时有发生, 特别是在 2008 年春节期, 我国南方发生了大范围雨雪冰冻天气, 输变电设施覆冰覆雪严重, 线路跳闸、倒塔和断线现象普遍, 严重威胁电网安全稳定运行, 电网受损范围之大、数量之多、后果之严重实属罕见, 其中尤以湖南电网受灾最为严重^[1-3]。

灾害发生后, 除破坏严重的杆塔将直接重建外, 大多数输电塔经过恢复或加固仍可以永久使用。目前钢结构加固的方法主要有改变结构计算图形和加大构件截面等^[4], 但是由于输电塔结构形式和构造的独特性和复杂性, 很难借鉴一般钢结构的加固方法, 因此灾后输电塔特别是角钢塔的加固一直是工程中的难点, 不少学者开展了相关的研究。其中, 谢强、张勇和 Albermani 等采用加横隔面的方法对输电塔结构的加固改造进行了数值分析和试验研究^[5-6]; 韩军科和杨靖波等研究了输电塔的加固补强措施及其效果^[7]。这些研究取得了一定的成果, 但是至今仍没有形成系统有效的输电塔加固技术。

针对角钢塔的结构特点, 在其原构件的侧面通过连接板及螺栓并联一根新的同规格角钢, 形成一个新的组合截面构件, 可有效提升结构的承载力, 称之为构件并联法。该方法可以看作是增大截面法的一种, 具有可操作性, 但是构件加固的效果以及如何设计这种加固构件, 仍值得研究。本文对采用该方法不同截面形式加固构件的承载力进行理论分析、数值模拟和试验研究, 探讨加固后构件的破坏形态、受力性能及设计计算方法。

1 试验方案

采用构件并联加固角钢, 即在原构件的侧面并联一根新的构件后, 形成新的组合构件, 其截面形式主要有十字型、Z 字型、T 字型和 C 字型, 见图 1。重点考察前三种加固形式加固构件的效果和承载力, 分别对这三种形式的加固构件进行试验研究。

试验制作了十字型、Z 字型和 T 字型 3 组组合截面加固构件, 每组 3 个试件。根据实际工程中常用角钢, 加固试件的长度为 1.8 m, 新旧构件规格均为 Q345-L100×7, 试件的填板设计满足《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中关于组合构件填板间距不大于 $40i$ 的规定, i 为截面回转半径。为了加载的准确性及方便性, 为每组试件制作了加载板, 安装在加固构件的两端。图 2 为十字型试验件, 其他两组的试

收稿日期: 2011-06-16 修改稿日期: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978149); 国家电网公司科技项目(SGKJJSKF[2008]600)

作者简介: 刘学武(1977-), 男, 河北人, 博士、工程师, 主要从事输电线路防灾减灾研究。

验件类似.

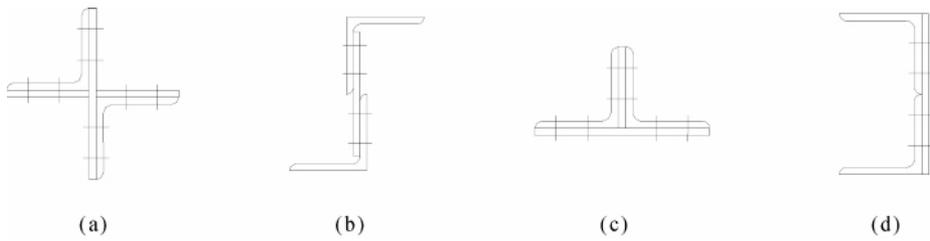


图 1 加固构件的截面形式

Fig. 1 Several kinds of the section of the strengthened angle-shaped member

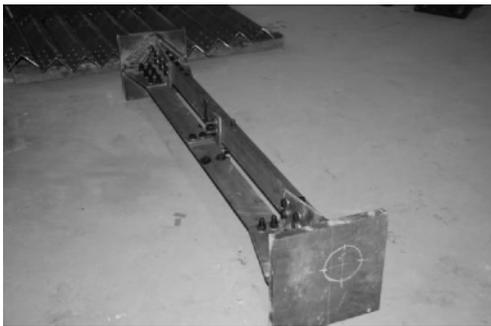


图 2 十字型试验件

Fig. 2 Cross-shaped member for the experiment



图 3 二次加载紧固连接螺栓

Fig. 3 Two members connected together during the experiment

一般情况下,输电塔加固时结构上已经产生了一定的荷载效应,原构件已具有一定的内力,新加构件仅在新增外荷载的作用下才会参与受力,因此,新加构件存在应力滞后现象,整个组合加固构件存在二次受力现象,这与新旧构件一次性同时受力的物理特性存在一定的差异,该差异对加固构件及加固后输电塔受力性能的影响不容忽视.

为考察二次受力现象对加固构件承载力的影响,每种组合截面形式加固构件采取两种加载方式:一次性加载和分二次加载.所谓一次性加载,就是不考虑原构件已承载历史,直接在组合截面构件上加载;所谓分二次加载,就是模拟输电塔加固的真实受力过程,考虑原构件荷载效应的影响,先给原构件施加一个初始荷载,然后再并联上新加构件形成组合截面构件,再加载至组合截面构件破坏.

分二次加载的实施方式为,先将组合截面构件拼装在一起,将原构件与加载板连接紧固,而新加构件与两端加载板之间的连接螺栓对孔穿好但不拧紧螺母,然后对试验件实施第一次加载,待加在原构件上的力达到初始荷载级别后,暂停加载并迅速将新加构件与连接板之间的螺栓紧固,再实施第二次加载,直到整个加固构件破坏.图 3 所示为工人进行二次紧固螺栓.经试验证明,此分二次加载方案合理可行,在加初始荷载阶段,新加构件测点上的应变和位移均非常小,可认为此阶段新加构件未参与承载.

每组试验件中,1 个试件进行一次性加载试验,另 2 个试件进行分二次加载试验.其中,分二次加载的两个试件初始荷载分别为 75 kN 和 100 kN,见表 1.此外,为对比加固前后构件的承载力,进行 1 根同

表 1 各组试件的编号及加载方式

Tab. 1 Numbering and loading method of each experimental member

Number	Loading method	Initial load/kN	Number	Loading method	Initial load/kN
+1	Method 2	100	T3	Method 2	100
+2	Method 2	75	Z1	Method 1	—
+3	Method 1	—	Z2	Method 2	75
T1	Method 1	—	Z3	Method 2	100
T2	Method 2	75	S1	Method 1	—

规格单角钢轴心受压试验, 试件长度为 1.8 m. 考虑实际结构的受力特性, 试验中加载点位于原角钢的形心位置. 为测试构件的位移和应力, 在 1/2 构件长度的截面上对称布置了若干应变片和位移计. 图 4 为位移计的布置方案, 图中 C、P 代表原构件的形心, C 代表新加构件的形心.

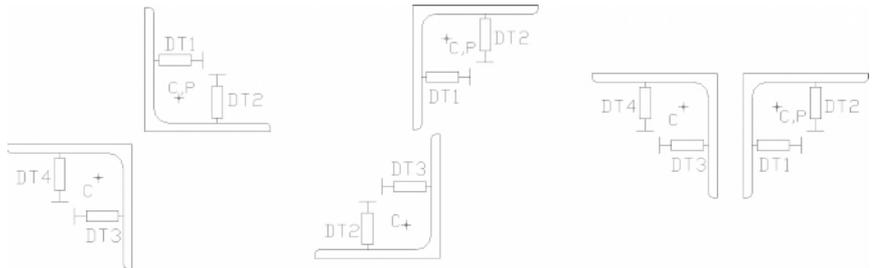


图 4 各组构件位移测点布置

Fig. 4 Displacement meters in the section of the member

2 试验结果

十字型、Z 字型、T 字型三组试验件的破坏过程比较接近, 呈以下几个阶段: 1) 加载初期, 构件处于自行对位调整阶段, 变形不明显; 2) 随着荷载的增加, 在 250~300 kN 左右, 试件加载端部出现明显横向位移, 原构件加载板以下 500 mm 左右周围, 受压力较大的角钢肢尖边缘出现局部屈曲, 但此时整个构件仍可以继续承受荷载; 3) 当荷载达到极限荷载时, 构件端部附近角钢的局部屈曲全面发展, 构件发生失稳破坏, 承载力急剧下降, 试验结束.

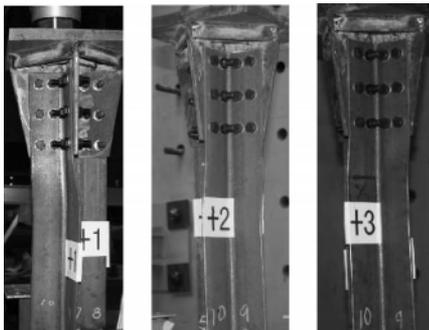


图 5 十字型构件的破坏形态

Fig. 5 Failure mode of the cross-shaped strengthened member

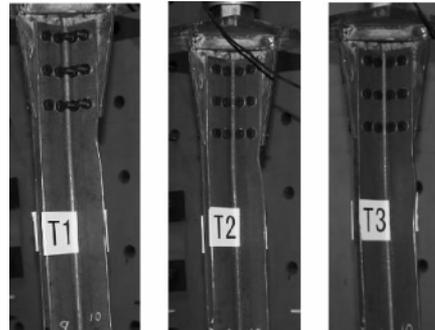


图 6 T 字型构件的破坏形态

Fig. 6 Failure mode of the T-shaped strengthened member

三组构件的破坏模式类似, 都是加固构件端部原构件角钢发生局部屈曲破坏, 见图 5~图 7. 试验中, 荷载均施加在原构件的形心, 且初始荷载全部由原构件承担, 导致原构件的受力较大, 加上加固构件的长细比不大, 因此加固构件不易发生整体失稳, 且新加构件由于受力较小也不易破坏, 多是因原构件的角钢发生大范围的局部屈曲而破坏.

由于试件基本上均是因原构件加载板下方部位角钢发生局部屈曲而破坏, 加上实际边界条件、位移计安装、试件安装不能完全处于理想状态, 因此在 1/2 试件长度处的位移增长不明显. 图 8 和图 9 为两个试件的荷载-位移曲线.

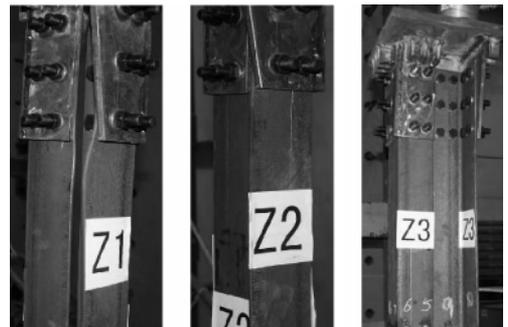


图 7 Z 字型构件的破坏形态

Fig. 7 Failure mode of the Z-shaped strengthened member

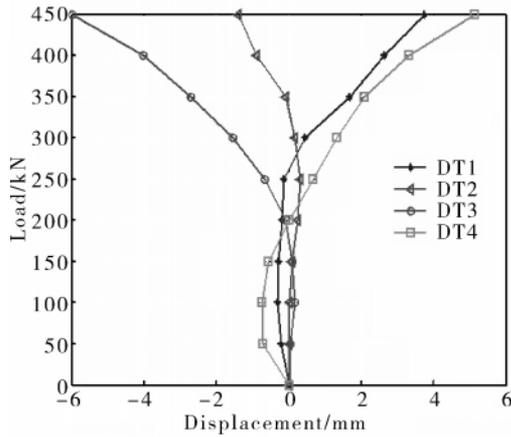


图 8 试件+1 的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of the cross-shaped strengthened member

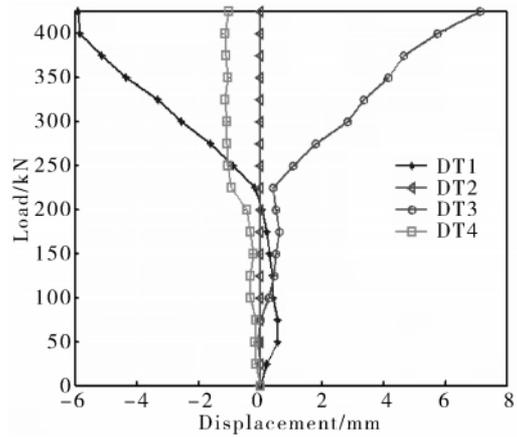


图 9 试件 T1 的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of the T-shaped strengthened member

表 2 各组试件的极限荷载(kN)

Tab. 2 Ultimate load of the experimental member (kN)

Section type	Number	Ultimate load	Average value	Section type	Number	Ultimate load	Average value
Cross-shaped section	+1	450	425	Z-shaped section	Z1	500	425
	+2	425			Z2	425	
	+3	400			Z3	350	
T-shaped section	T1	425	475	Single angle-shaped member	S1	350	—
	T2	500					
	T3	500					

500 各组试验件及单角钢的极限承载力见表 2。可以看出,三种截面形式加固构件的极限承载力相差不大,T 字型截面试件承载力相对较高,十字型截面和 Z 字型截面的承载力相当,这主要是因为三组试验件的破坏模式基本相同,都是因原角钢发生局部屈曲而破坏,甚至有的试验件的新加构件基本没有变形或变形很小,所以三种加固构件的极限承载力均是由原角钢的局部屈曲荷载控制,承载力相差不大。另外,考虑二次受力与否,各组加固试件的极限承载力也相差不大,这主要也是因为加固试件的破坏荷载是由原角钢的屈曲破坏控制所致。但是,因新加构件对原构件有一定的增强作用,整体上看三种截面形式加固构件比单角钢的承载力均有大幅度的提升,T 字型截面试件比单角钢高 35.7%,其他两种截面试件比单角钢高 21.4%。试验表明,采用并联构件的方法对输电塔进行加固可以取得较好效果,但由于加固前后构件的受力形态发生变化,加固前构件为轴心受压,而组合构件为偏心受压,加载点仍位于旧构件形心处,因此新加构件对原构件承载能力的提升有限,并不能成倍提高原构件的承载力。

为深入考察上述三种加固形式构件的稳定性能,考虑几何和材料非线性的影响,对一次性加载和分二次加载两种情况下加固构件的极限承载力进行了数值分析。分析中位移约束和外力始终加在原构件的形心上,且给模型施加最大值为 1/500 的初始弯曲,以考虑初始缺陷的影响。数值模拟中分二次加载的实施方法为,首先建立整个加固构件的有限元模型,然后利用单元生死技术^[9]“杀死”新加构件,仅给原构件施加荷载,待所加荷载达到给定的初始荷载后,“激活”新加构件,再继续施加荷载直到构件破坏。图 10 为 T 字型和十字型截面构件在极限状态下的应力分布,与试验中加固构件的破坏模式类似,极限状态下三种加固构件的原构件的应力比较大,而新加构件的应力较小,也是因原构件丧失稳定性而破坏。分析所得到的三种构件的极限荷载见表 3~5,可以看出,数值分析的结果比试验结果小,且两者的偏差比较大,主要原因是数值分析中钢材强度采用了相对保守的设计值,且实际试验件及其加载条件与数值分析之间存在一定的偏差。

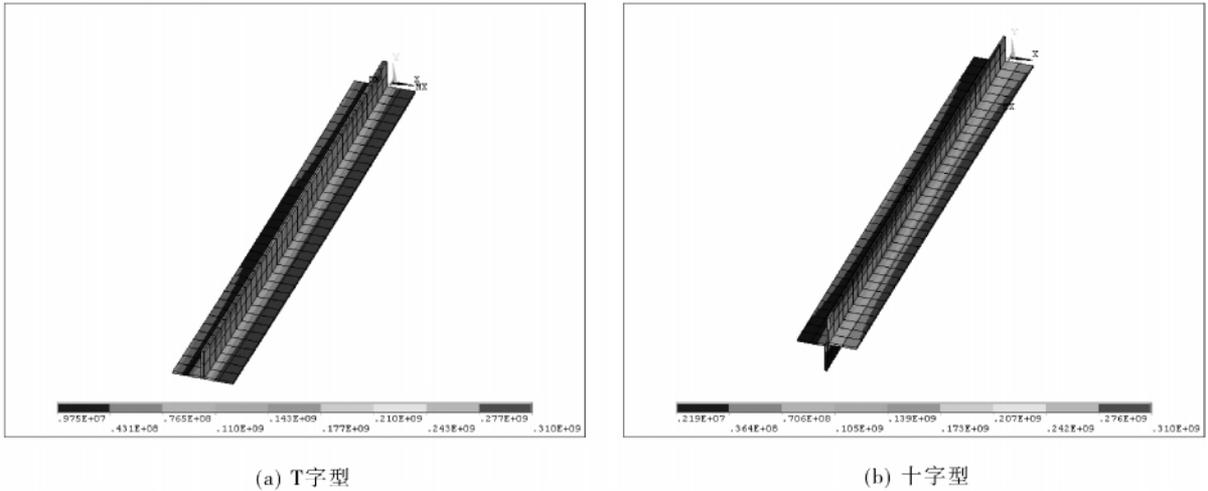


图 10 极限状态下加固构件的应力分布(Pa)

Fig.10 Stress of the strengthened member under limit state

3 设计建议

加固前原构件是一个轴心受力构件,并联构件后外荷载的作用点没有改变,所以新的组合构件是一个偏心受力的压弯构件.加固构件中原构件往往先受力,新加构件存在应力滞后,即加固构件存在二次受力的物理特性.为考虑二次受力等加固因素对构件承载力的影响,《钢结构加固技术规范》(CECS 77:96)在构件稳定承载力的设计公式中给钢材强度设计值 f 乘以一个折减系数 η .但是,一般情况下,输电塔结构中单角钢被加固后,整个新组合构件的受力状态更接近于压弯构件,本文建议采用压弯构件的设计公式来计算角钢加固构件的稳定性,所以《钢结构加固技术规范》中 η 的取值不一定适合用来计算上述的这几种加固形式的构件.

借鉴《钢结构加固技术规范》的压弯构件稳定设计公式.假设新旧角钢的规格相同,填板的间距满足《钢结构设计规范》中组合构件的要求.建议采用公式(1)和(2)计算考虑二次受力等因素影响输电塔单角钢构件加固后的十字型、Z型和T字型构件的稳定承载力.

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_x \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{ex}}\right)} \leq k f \tag{1}$$

$$\frac{N}{\varphi_y A} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_y \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{ey}}\right)} \leq k f \tag{2}$$

公式(1)和(2)中各符号的含义参见《钢结构加固技术规范》.以下利用试验数据和数值分析的结果,考察上述公式的正确性,并给出T字型、十字型和Z字型加固形式下折减系数 k 的取值.三种截面的坐标见图11,三个截面面积均为 $A = 27.592 \text{ cm}^2$,截面惯性矩分别为 $I_x = 264 \text{ cm}^4$ 和 $I_y = 566 \text{ cm}^4$, $I_x =$

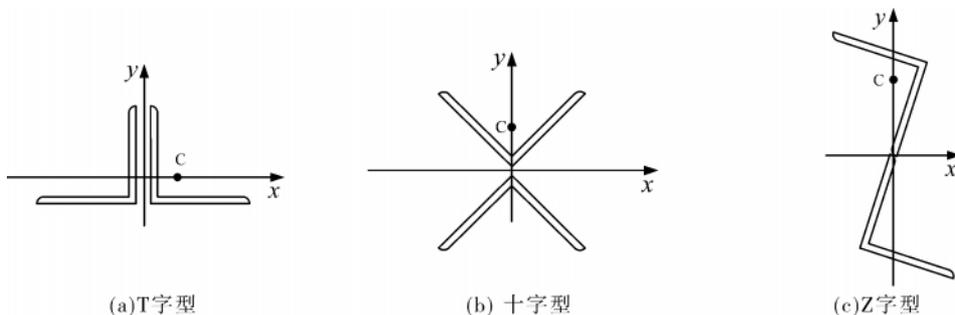


图 11 三种构件截面的坐标系

Fig.11 Section coordinate system of the member

716 cm⁴ 和 $I_y=418 \text{ cm}^4$ 以及 $I_x=1928.3 \text{ cm}^4$ 和 $I_y=171.3 \text{ cm}^4$, 力作用点到截面形心距离分别为 $e_x=3.31 \text{ cm}$ 和 $e_y=0, e_x=0$ 和 $e_y=4.68 \text{ cm}$ 以及 $e_x=0$ 和 $e_y=7.66 \text{ cm}$. 塑性发展系数均取 1.2, 均采用 b 类柱子曲线.

采用试算法, T 字型、十字型和 Z 字型三种截面形式加固构件的加固折减系数 k 分别取 0.95、0.9 和 0.8 时, 稳定设计公式所计算的承载力小于试验和数值分析的结果, 并且具有一定的安全度, 证明系数 k 的取值合理, 设计公式可靠, 计算结果见表 3~5.

表 3 T 字型加固构件承载力对比

Tab. 3 Ultimate load of the T-shaped strengthened member

/kN

Number	Initial load	Formula result	Experimental result	Numerical result
1	0		425	353.67
2	50	290.27	—	298.00
3	75		500	—
4	100		500	322.00

表 4 十字型加固构件承载力对比

Tab. 4 Ultimate load of the cross-shaped strengthened member

/kN

Number	Initial load	Formula result	Experimental result	Numerical result
1	0		400	375.05
2	50	290.27	—	361.39
3	75		425	—
4	100		450	—

表 5 Z 字型加固构件承载力对比

Tab. 5 Ultimate load of the Z-shaped strengthened member

/kN

Number	Initial load	Formula result	Experimental result	Numerical result
1	0		500	368.27
2	50	308.29	—	375.85
3	75		425	—
4	100		350	—

4 结 论

采用构件并联法加固角钢输电塔时, 加固构件的截面形式主要有 T 字型和十字型等. 重点对十字型、T 字型和 Z 字型三种截面形式加固构件的受力性能进行了非线性数值分析和破坏试验, 考察了其破坏过程、破坏特征及加固效果, 研究了加固构件的设计方法, 主要结论为: 1) 三种截面形式加固构件均因原构件发生屈服而破坏; 2) 一次性加载和分二次加载对加固构件的极限承载力影响不大; 3) 整体上看, T 字型截面构件的承载力相对较高, 比单角钢的承载力约高 35.7%, 十字型和 Z 字型截面构件的承载力相当, 均比单角钢的承载力约高 21.4%, 加固效果明显; 4) 加固构件的稳定性计算可以采用《钢结构加固技术规范》中压弯构件稳定设计公式, 其中 T 字型、十字型和 Z 字型三种截面构件的加固折减系数 k 可分别取 0.95、0.9 和 0.8.

参考文献 References

- [1] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 1-5.
ZHANG Wen-liang, YU Yong-qing, SU Zhi-yi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hrunan power grid in 2008 [J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-5.
- [2] 李成榕, 吕玉珍, 崔翔, 等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.
LI Cheng-rong, LÜ Yu-zhen, CUI Xiang, et al. Research issues for safe operation of power grid in China under ice snow disaster [J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22.
- [3] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.

- HUANG Xin-bo, LIU Jia-bing, CAI Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries [J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28.
- [4] CECS 77:96 钢结构加固技术规范[S].
CECS 77: 96 Code for strengthening steel structure technology [S].
- [5] 谢强, 孙力, 张勇. 500 kV 输电塔结构抗冰加固改造方法试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 108-114.
XIE Qiang, SUN Li, ZHANG Yong. Experimental study on retrofitting of 500kV transmission tower against ice load [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 108-114.
- [6] ALBERMANI F, MAHENDRAN M, KITIPORNCHAI S. Upgrading of transmission towers using a diaphragm brace system [J]. Engineering Structures, 2004, (26): 735-744.
- [7] 韩军科, 杨靖波, 杨风利, 等. 输电铁塔加固补强承载力研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(7): 118-131.
HAN Jun-ke, YANG Jing-bo, YANG Feng-li, et al. Study on bearing capacity of reinforced and strengthened transmission tower [J]. Industrial Construction, 2010, 40(7): 118-131.
- [8] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].
GB 50017-2003 Code for design of steel structures [S].
- [9] 刘学武, 郭彦林. 考虑几何非线性钢结构施工力学分析方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 161-169.
LIU Xue-wu, GUO Yan-lin. Construction mechanics analytical procedures for steel structures in view of the geometric nonlinearity [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 161-169.
- [10] 陈绍蕃. 塔架压杆的稳定承载力[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(3): 305-314.
CHEN Shao-fan. Buckling resistance of compression members in tower structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(3): 305-314.
- [11] GALAMBOS T V. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [12] GB 50545-2010 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
GB 50545-2010 Code for design of 110~750 kV overhead transmission line [S].

Study on strengthening the structure and its design for the transmission tower

LIU Xue-wu, XIA Kai-quan, GAO Yan, LIU Si-yuan, REN Xi-chun

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Serious damage and collapse of transmission towers were easily induced by the ice disaster, wind disaster and so on. To improve the mechanical performance of the damaged tower assembled by angle-shaped members, an identical angle-shaped member is connected on the side of the existing angle-shaped member through steel plates and bolts. Several kinds of the composite section for the strengthened member are proposed, such as cross-shaped section, Z-shaped section, T-shaped section, and so on. The mechanical behavior of the strengthened member is discussed numerically and experimentally, and the failure mode and the ultimate load of each strengthened member are obtained, which demonstrate that the methods in this paper can strengthen the tower effectively. Based on the experimental results and the codes, the design formula for the stability of the strengthened member is given.

Key words: overhead transmission line, transmission tower, angle-shaped member, strengthening method