DOI：10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.018

保底线路抗台风加固技术研究

陶祥海[1]，黄国栋[1]，江巳彦[2]
（1. 广东电网有限责任公司湛江供电局，湛江 524005；2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，广州 510663）

摘要：探究了保底输电线路的抗风加固技术。基于台风彩虹数据，采用有限元方法开展输电杆塔内力分析计算，研究了强台风作用下输电杆塔的损伤特点，且进一步开展了输电杆塔抗台风加固技术研究，提出了主材、斜材和基础的加固方法，为输电杆塔的抗风防灾提供了参考。

关键词：输电杆塔；台风灾害；抗风加固
中图分类号：TM755　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-8676(2017)04-0095-05

Research on the Reinforcement Technique for Typhoon-induced Disaster of the Reserved Transmission Tower-line

TAO Xianghai[1], HUANG Guodong[1], JIANG Siyan[2]
(1. Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The wind-resistant reinforcement technique of the reserved transmission tower-line system is actively investigated in this study. Base on the data of typhoon "Rainbow", Internal forces of transmission towers were computed by the aids of finite element method to study the damage properties of transmission towers which subjected to typhoon. Furthermore, the reinforcement techniques of the transmission tower were examined for major members, crew members and foundation respectively. The research can be taken as the reference for the wind-resistant design of transmission tower.

Key words: transmission tower; typhoon-induced disaster; wind-resistant reinforcement

电网运行的安全稳定事关国家的生产建设、人民的生活秩序以及社会的和谐稳定。强台风是危及沿海输电线路安全稳定运行的重大隐患之一。历次强台风登陆，都使登陆地区的电网遭受重大损失。输电线路在强台风作用下的动力反应非常显著，国内多次发生强台风引起的输电线路灾变破坏事故[1]。

近年来广东沿海地区连续受到多个强台风吹袭，其中湛江地区多次受到"威马逊"、"彩虹"等超强台风的吹袭，发生了大面积的线路杆塔受损事故，造成严重的影响。由于输电线路倒塔事故的灾后修复周期较长，往往造成长时间的大面积停电，特别是负责城市中心区域供电的线路发生长时间停运的情况时，将严重扰乱正常的社会生活秩序。目前虽然国内外已经开展了输电线路的抗风研究，但针对强台风作用下保底输电线路的建设工作还非常有限，相关方法和关键技术还很不完善。基于此，本文以湛江地区输电线路为工程背景，开展了保底输电线路抗台风评估和加固处置技术的研究，为输电线路抗风防灾提供参考。

1　输电杆塔强风作用承载力分析模型

输电杆塔是一种典型的空间杆系钢结构，其设

收稿日期：2017-07-20
基金项目：广东电网有限责任公司湛江供电局科技项目：湛江地区保底电网输电线路抗风能力评估及加固措施设计研究(GDKJQQ20154004)
作者简介：陶祥海(1981)，男，山东菏泽人，工程师，学士，主要从事输电设备运行管理工作(e-mail)47278023@qq.com。

计分析过程中可采用空间杆单元进行计算。整体坐标系下第 i 个单元的单元刚度矩阵和质量矩阵可表示为[12-14]：

$$\boldsymbol{K}_i = \boldsymbol{T}_i^{eT}\boldsymbol{K}_i^e\boldsymbol{T}_i^e \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{T}_i^{eT}\boldsymbol{M}_i^e\boldsymbol{T}_i^e \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{K}_i^e$ 和 $\boldsymbol{M}_i^e$ 为局部坐标系的单元刚度矩阵和质量矩阵；$\boldsymbol{T}_i^e$ 为坐标转换矩阵。

在得到整体坐标系下的单元刚度和质量矩阵后，可以根据自由度对号入座原则集成结构的整体刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和质量矩阵 $\boldsymbol{M}$：

$$\boldsymbol{K} = \sum_{i=1}^{ne}\boldsymbol{T}_i^T\boldsymbol{K}_i^e\boldsymbol{T}_i \tag{3}$$

$$\boldsymbol{M} = \sum_{i=1}^{ne}\boldsymbol{T}_i^T\boldsymbol{M}_i^e\boldsymbol{T}_i \tag{4}$$

式中：ne 为输电杆塔的杆件单元数量；$\boldsymbol{T}_i$ 为输电杆塔的自由度定位矩阵。

作用于输电杆塔第 i 节点的风荷载 p_i 可表示为：

$$p_i = w_0\mu_r\mu_f(z_i)\mu_s(z_i)\mu_z(z_i)A_i \tag{5}$$

式中：w_0 为输电杆塔所在地区的基本风压；μ_r 为重现期调整系数；μ_f 为脉动风压系数；$\mu_s(z)$ 为风载体型系数；μ_z 为风压高度变化系数；A_i 为作用在第 i 节点的风荷载的作用面积。

输电杆塔在强台风作用下的承载力方程可表示为：

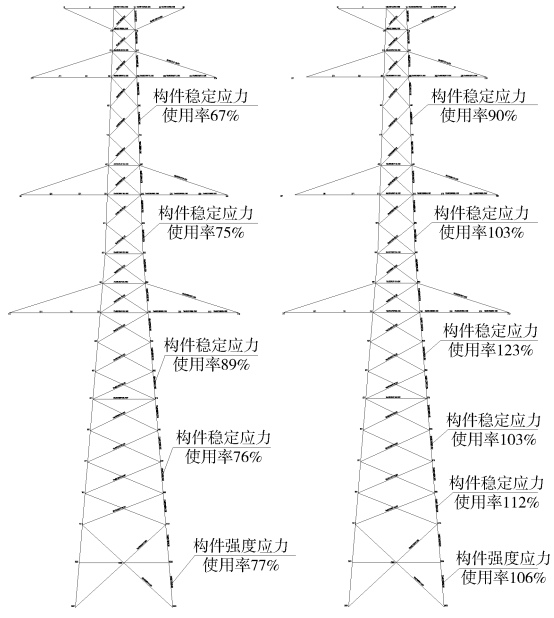
$$K_x = G + W \tag{6}$$

式中：x 为风荷载作用下输电杆塔的变形；G 为输电杆塔自重荷载；W 为作用于输电杆塔的强台风荷载。

2 输电杆塔强台风灾害分析

“彩虹”是 1949 年以来 10 月份登陆我国陆地的最强台风。1949 年 10 月 4 日 14 时在广东省湛江市坡头区沿海登陆，登陆时中心附近最大风力有 15 级(55 m/s)，导致湛江市区首次出现 18 级阵风，创历史纪录。在“彩虹”强台风吹袭期中，湛江电网蒙受巨大损失，各电压等级的线路设备均发生不同程度的事故或损毁。受损线路中，220 kV 湛霞线受损塔型较多。220 kV 湛霞甲乙线事故段现场周边环境空旷，地形平缓，植被稀疏，对台风风力减弱作用有限。线路事故段附近设立了 1 处气象部门的麻章镇自动气象站，站点测得 10 m 高处 10 min 平均最大风速为 39.6 m/s，可以判断线路事故段附近台风期间 10 m 高的实际风速应在 39 m/s 左右。

根据当时设计规程要求，线路的最大设计风速采用离地面 15 m 高处 15 年一遇 10 min 平均最大值，风速值取 35 m/s，换算至 10 m 高为 32.8 m/s。本文对 ZY2 塔型(220 kV 湛霞线#99 塔)、KGU 塔型(220 kV 湛霞线#塔)进行正常大风(基本风速 32.8 m/s)及台风(10 m 高最大风速 39 m/)工况的受力分析计算，杆塔主材构件利用率详见图 1 和图 2 所示。



(a) 32.8 m/s (正常大风)　　(b) 39 m/s (台风)

图 1　220 kV 湛霞线# 99(ZY2)杆件利用率

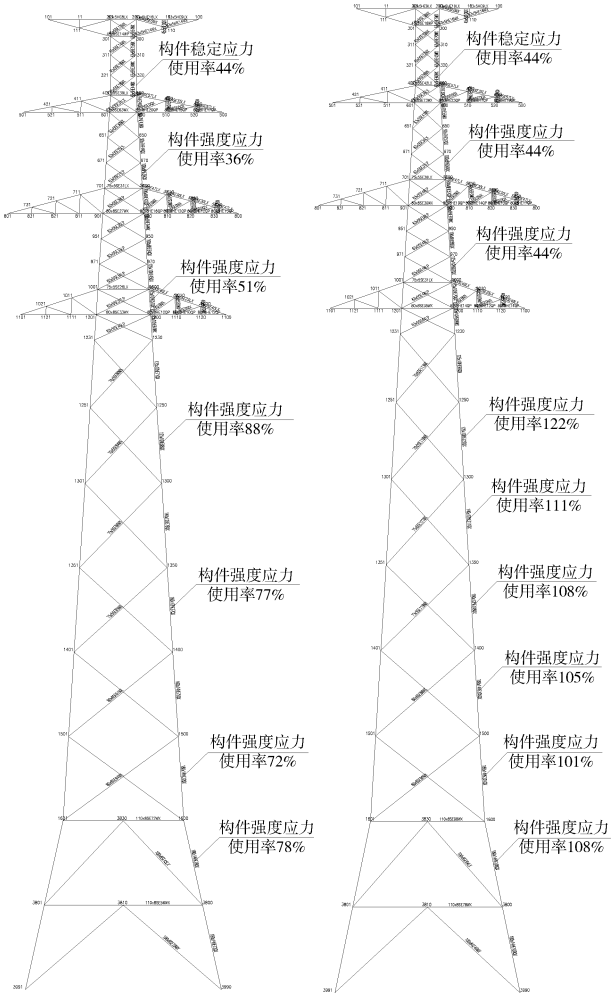
Fig. 1　The utilization of the component for 220 kV zhanxia-line # 99(ZY2)

计算结果表明：ZY2 塔型塔身下横担第二段主材在台风荷载验算工况中的杆件利用率达到了 123%，大幅超出了允许限值，主材出现整体性压弯失稳破坏。KGU 塔型塔身下横担的第二段主材的杆件利用率达到了 122%，主材出现整体性压弯失稳破坏。

实测结果表明现场强台风 10 m 高处最大平均风速为 39 m/s，是基本风速 32.8 m/s 的 1.2 倍，在此风速下杆塔所受荷载达到设计所能承受荷载的 1.44 倍。分析计算表明：由于现场风速远超设计风速，实际风荷载明显超过设计风荷载，因此导致输电杆塔因为荷载过大而发生倒塌。

3　保底电网线路设防标准

输电线路的技术标准多年来一直处于不断改进、完善的过程，根据年代的不同，我国输电线路的设计规程主要有以下三个版本：



（a）32.8 m/s（正常大风）　　（b）39 m/s（台风）

图 2　220 kV 湛霞线#6(KGU)杆件利用率

Fig. 2　The utilization of the component for 220 kV zhanxia-line #6(KGU)

1)《架空线路设计技术规程》(SDJ3—79)[2]。

2)《110～500 kV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092—1999)[3]。

3)《110 kV～750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)[4]。

不同年份的技术标准之间对输电线路风荷载计算的要求，存在着若干差异，详见表 1。

结合近年来沿海地区电网风灾事故的经验教训，2015 年 2 月实施的《35 kV～500 kV 交流输电线路装备导则》第 6.1.3 规定：对沿海 I、II 类风区的 110～220 kV 输电线路，计算导、地线大风工况水平荷载时风荷载调整系数 β_c 应取 1.3。

表 1　不同年份技术标准的若干规定

Tab. 1　The rules of different criterion for different time period

规范版本	设计风速重现期(大跨越除外)	计算方法	塔身风计算(220 kV 部分)	导地线风荷载调整系数 β_c
《架空线路设计技术规程》(SDJ3－79)	15 年	容许应力法	塔高 < 60 m，β_z =1.0 塔高≥60 m，β_z =1.5	不考虑
《110～500 kV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092－1999)	330 kV 及以下取 15 年；500 kV 取 30 年	分项系数法	按塔高：20～60 m 取 1.0～1.6；高于 60 m 不小于 1.6	500 kV 以下不考虑；500 kV 考虑 1.1～1.3
《110 kV～750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545－2010)	330 kV 及以下取 30 年；500 kV 及以上取 50 年	分项系数法	按塔高：20～60 m 取 1.0～1.6；高于 60 m 不小于 1.6	500 kV 以下不考虑；500 kV 及以上考虑 1.1～1.3

考虑到保底线路是保障中心城区负荷的供电通道，是系统网架的骨干，其重要性与 500 kV 线路不分伯仲，为此考虑保底线路的加固设防标准统一与 500 kV 线路看齐，执行现行国标及南网相关防风导则的技术要求，基本风速参照风区分布图成果及全国基本风压分布曲线，重现期考虑 50 年[5-6]。

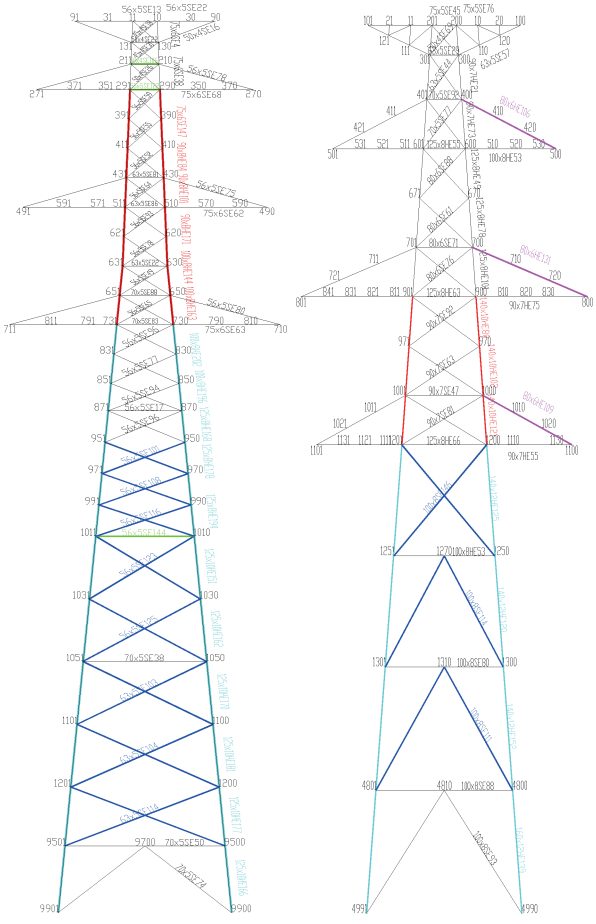
4　已建杆塔的受力分析计算

目前旧线路的杆塔强度与保底线路设防标准存在着较大的差距，主要原因是基本风速重现期由 30 年提高至 50 年，且导地线风荷载调整系数 β_c 考虑 1.3 及塔身风荷载系数 β_z 按现行设计规范要求执行，这导致杆塔承受的风荷载大幅增加。为准确地掌握这些旧线路现有的抗风能力与新标准之间的差距，从而有针对性地提出合适的加固改造方案，本文按照保底线路设防标准选择了较为典型的 ZY2(双回路直线)、GUT4(双回路转角)塔型进行受力分析计算，计算结果详见图 3 所示。

计算结果表明：ZY2、GUT4、Z8 三个塔型在重现期 50 年基本风速 37 m/s，考虑导地线风荷载调整系数 β_c 考虑取 1.3 的条件下，执行现行设计标准，杆塔结构均出现较多构件超限，且超限比较

大，其中 ZY2 杆件出现最大的利用率达 202%。杆塔的基础作用力也比原设计条件超出较多。

分析研究表明造成这种现象的原因主要有以下几点：(1)基本风速重现期、风荷载调整系数、塔身风荷载的风振系数等执行保底线路设防标准；(2)旧规范与现行在杆件偏心折减存在一定的差异。



(a) ZY2塔型 (b) GUT4塔型

图 3 杆件利用率计算结果

Fig. 3 The calculation for the utilization of the component

5 输电杆塔及基础加固技术研究计算

通过上述计算，可以正确地发现输电杆塔构件的薄弱环节，从而采取相应的技术手段进行加固改造。

设计与构件材料、计算长度、截面面积、杆端约束形式密切相关。因此，杆塔加固也从这几个方面考虑，在不改变构件材料前提下增加构件承载力主要方法：增加构件的截面面积、折减构件计算长度及改变构件回转半径，此外还可通过改变结构传力路径的方式来达到加固目的。

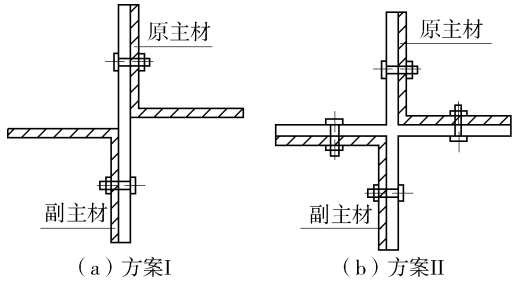
5.1 主材加固方法

主材加固主要通过增加构件截面积和减小构件计算长度的方法来实现。其中增加构件截面面积主要又分为采用更大规格或更高强度的主材和十字组合角钢构件两种加固办法[7-9]。

1)采用更大规格或更高强度的主材。

考虑到本次改造需要更换导、地线型号，可以将这种加固主材的方法应用于某些需要更换横担的塔头主材上。这种加固方法会存在难度大、费用高、停电时间长等问题，在改造中可视具体情况而采用。

2)在原主材背面附加一个相同规格(或比主材规格略小)的主材(副主材)组成十字组合角钢构件对塔身主材进行加固补强。根据国内外调研结果，十字组合角钢构件加固方案对塔身主材进行加固补强是一项工程施工简单、速度快的技术措施。



(a) 方案I (b) 方案II

图 4 十字组合角钢

Fig. 4 The cross combination of angle steel

3)采用增加支撑杆件减小构件计算长度的方法实现主材加固补强。在杆塔验算中发现，有些主材是因为计算长度较大而导致失稳超限。对于这一类超限的主材，现提出增加支撑杆件减小构件计算长度的方法来实现主材加固补强。这种方法就是在原主材上打孔，然后添加辅助材来实现减小原主材长细比以提高主材的承载能力。它计算方法简单，但涉及到在原主材上打孔及辅助材精确定位等问题，存在一定的改造风险，在本次改造中视具体情况而采用。

5.2 斜材、横材加固方法

斜材、横材加固可以通过增加构件截面积和折减构件计算长度的方法来实现。其中，增加构件截面面积主要又分为采用更大规格或更高强度的主材和 T 形组合角钢构件两种加固办法。

1）采用更大规格或更高强度的斜材更换原塔上超限的斜材。

2）考虑到采用更大规格或更高强度的斜材更换原塔上超限的斜材存在一定的隐患，现提出在原斜材背面附加一个相同规格组成 T 形组合角钢构件对斜材进行加固补强。考虑到这种加固方法对交叉斜材加固较为困难，所以较多地应用于腿部斜材的加固。

3）提出采用折减构件计算长度的方法来实现主材加固补强，加固方案可见图 5。

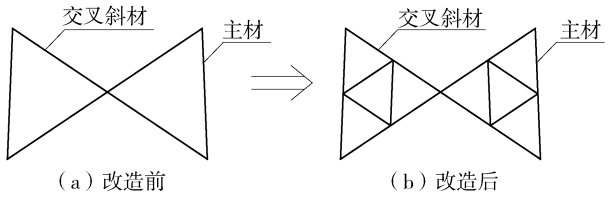


图 5　斜材加固方法

Fig. 5　The reinforcement technique for crew member

5.3　基础加固

根据保底线路的设计资料，基础加固方案如下：

1）在原基础周边扩宽以实现提高原基础抗拔、压的能力，新旧混凝土通过植筋的方式连接起来达到共同受力，这种方法可称为“扩展式基础加固法”。

2）杆塔基础的承载能力取决于基础四周土的强度和密实度，因此基础加固的途径之一是使回填土强化或密实。通过对表面压实、冲击夯实、振动密实、压力注浆、打入桩柱、爆炸挤实等方法[10-11]。其中对于杆塔基础加固而言，振动密实和压力注浆可能最为实用。用振实法和压浆法，基础加固后回填土密实程度的改善与回填土的土质类型和施工时的夯实程度有关。在回填土本就很密实的地方，以及本就按很密实的回填土进行设计时，采用振密法和压浆法加固基础的效果就很有限。这种方法受施工方法的影响较大，且施工质量的检测有一定的困难，在工程改造时需根据现场情况再行确定是否采用。

6　结论

本文通过相关研究可以得到如下主要结论：

1）台风风速远超设计风速，实际风荷载明显超过设计风荷载，是导致输电杆塔因为荷载过大而发生倒塌的主要原因。

2）通过计算，提出差异化的设计方案，对输电杆塔的薄弱环节进行加固，避免大面积“推倒重建”的加固方式，有效地减少了工程规模，节省了投资费用。

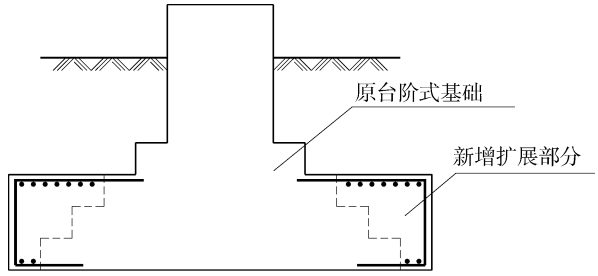


图 6　扩展式基础加固法

Fig. 6　The extended reinforcement technique for foundation

3）考虑到线路改造在实施过程中现场的影响。因素较多，对改造方案的设计、施工和管理等各个环节均要求较高，特别是施工质量对改造效果影响非常大。因此，在现场实施过程中有必要加强技术环节的监管。

参考文献：

[1]　李宏男，白海峰．高压输电塔－线体系抗灾研究的现状与发展趋势[J]．土木工程学报，2007，40(2)：39-46.
LI H N，BAI H F. State-of-the-art review on studies of disaster resistance of high-voltage transmission tower-line systems [J]. China Civil Engineering Journal，2007，40(2)：39-46.

[2]　中华人民共和国水利电力部．架空线路设计技术规程：SDJ3—79 [S]．北京：水利电力出版社，1979.
Ministry of Water Resources and Electric Power of the People's Republic of China. Technical code for designing overhead transmission line：SDJ3—79 [S]. Beijing：Hydraulic and Electric Power Press，1979.

[3]　中华人民共和国国家经济贸易委员会．110～500 kV 架空送电线路设计技术规程：DL/T 5092—1999 [S]：北京：中国电力出版社，1999.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Technical code for designing 110～500 kV overhead transmission line：DL/T 5092—1999 [S]. Beijing：China Electric Power Press，1999.

[4]　中华人民共和国住房及城乡建设部．110～750 kV 架空输电线路设计规范：GB50545—2010 [S]．北京：中国计划出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Code for design of 110～750 kV overhead transmission line：GB50545—2010 [S]. Beijing：China Planning Press，2010.

[5]　国家计划委员会．建筑结构荷载规范：GBJ9—87 [S]．北京：中国计划出版社，1987.
State Planning Commission. Load code for the design of building structures：GBJ9—87 [S]. Beijing：China Planning Press，1987.

（上转第 94 页 Continued on Page 94）

可靠的。

5)本工程采用 Q460 高强钢管，具有明显的经济效益和社会效益。

参考文献：

[1] 郭咏华，张天光，王经运．Q460 高强钢试验研究及电力工程应用［M］．北京：中国电力出版社，2010.
GUO Y H，ZHANG T G，WANG J Y. Experimental study and electrical engineering application of Q460 high-strength steel［M］. Beijing：China Electric Power Press，2010.

[2] 曹现雷，郝际平，张天光．新型 Q460 高强度钢材在输电铁塔结构中的应用［J］．华北水利水电学院学报，2011，32(1)：79-82.
CAO X L，HAO J P，ZHANG T G. Engineering application of new high-strength steel Q460 in transmission tower［J］. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power，2011，32(1)：79-82.

[3] 范金华，薛敏，傅鹏程．Q460 高强钢管在 500 kV 练塘—泗泾输电线路工程中的应用［J］．华东电力，2010，38(7)：1040-1042.
FAN J H XUE M，FU P C. Application of Q460 high-strength steel tube in the 500 kV Liantang-Sijing power transmission line project［J］. East China Electric Power，2010，38(7)：1040-1042.

[4] 刘盼．高强等边角钢极限承载力及稳定性试验与分析［D］．重庆：重庆大学，2009.
LIU P. Experiments and analysis on the ultimate bearing capacity and stability of high-strength equilateral-angle steel member［D］. Chongqing：Chongqing University，2009.

[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会．铁塔用热轧角钢：YB/T 4163—2007［S］．北京：冶金工业出版社，2007.
The National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Hot rolled steel aangles for tower structure：YB/T 4163—2007［S］. Beijing：Metallurgical Industry Press，2007.

[6] 中国国家标准化管理委员会．低合金高强度结构钢：GB/T 1591—2008［S］．北京：中国标准出版社，2008.
China National Standardization Administration Commission. High strength low alloy structural steels：GB/T 1591—2008［S］. Beijing：China Standard Press，2008.

[7] 中国国家标准化管理委员会．输电线路铁塔制造技术条件：GB/T 2694—2010［S］．北京：中国电力出版社，2013.
China National Standardization Administration Commission. specificaton of manufacturing for transmission line tower：GB/T 2694—2010［S］. Beijing：China Electric Power Press，2013.

[8] 国家能源局．架空线路钢杆塔结构荷载试验：DL/T 899—2012［S］．北京：中国电力出版社，2012.
National Energy Administration. Loading tests on tower and pole structures of overhead line：DL/T 899—2012［S］. Beijing：China Electric Power Press，2012.

（责任编辑　黄肇和）

（下接第 99 页 Continued from Page 99）

[6] 中华人民共和国住房及城乡建设部．建筑结构荷载规范：GB 50009－2012［S］．北京：中国建筑工业出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Load code for the design of building structures：GB 50009－2012［S］. Beijing：China Architecture and Building Press，2012.

[7] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定：SDGJ94—90［S］：北京：中国电力出版社，1990.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line：SDGJ94－90［S］. Beijing：China Electric Power Press，1990.

[8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会．架空送电线路杆塔结构设计技术规定：DL/T 5154—2002［S］．北京：中国电力出版社，2002.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line：DL/T 5154－2002［S］. Beijing：China Electric Power Press，2002.

[9] 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：中国计划出版社，2012.
National Energy Administration. Technical code of design for tower and pole structures of overhead transmission line：DL/T 5154－2012［S］. Beijing：China Planning Press，2012.

[10] 国家能源局．架空输电线路基础设计技术规定：DL 5219－2014［S］．北京：中国计划出版社，2014.
National Energy Administration. Technical code for designing of foundation of overhead transmission line：DL 5219－2014［S］. Beijing：China Planning Press，2014.

[11] 何运祥，徐力，聂卫平．基于强度折减法的输电杆塔临坡基础边坡稳定性影响因素分析［J］．电力建设，2012，7(4)：30-33.
HE Y X，XU L，NIE W P. Slope stability influence factors analysis of slope-side foundations of transmission tower by strength reduction method［J］. Electric Power Construction，2012，7(4)：30-33.

（责任编辑　高春萌）