

500 kV 双回路直线角钢塔杆件控制工况研究

庄志翔[✉], 孙墨林, 张珏

(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)

摘要: [目的] 为了探究输电杆塔中各个杆件的主要控制工况, 文章对 500 kV 双回路直线塔进行测算, 并对各类杆件进行汇总归类, 识别其控制工况, 为今后的直线塔设计提供参考。[方法] 文章介绍了杆塔设计中的典型工况, 结合杆塔的挂点荷载, 以 500 kV 直线塔为例通过测算识别各杆件的控制形式, 并对识别结果进行总结归纳, 找寻变化规律。[结果] 针对挂点, X 向荷载最大的工况为 90° 大风工况, Y 向荷载最大的工况为断线工况, Z 向荷载最大的工况为起吊工况。总荷载最大的工况为起吊工况。正常工况控制了杆塔大部分主材, 且 60° 大风工况直接影响了基础力的大小。断线工况控制了杆塔大部分交叉材, 安装工况控制的杆件最少。杆塔中有相当一部分杆件由于同压作用受平面外的荷载所控制, 这部分杆件主要为杆塔正面上横担下弦杆至中横担上弦杆交叉材, 变坡以下交叉材这两部分, 在设计中应给予注意。[结论] 输电杆塔有着杆件数量多、型号多、布置形式多等特点, 在工程建设中, 应依据设计条件结合杆件控制工况, 有针对性的对杆件进行优化。

关键词: 直线角钢塔; 杆件; 荷载; 控制工况; 设计策略

中图分类号: TM7; TM753

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S2-0106-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Control Conditions of 500 kV Double Circuit Tangent Angle Steel Tower Member

ZHUANG Zhixiang[✉], SUN Molin, ZHANG Jue

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

Abstract: [Introduction] In order to explore the main control conditions of each member of the transmission tower, this paper calculates the 500kV double circuit tangent tower, summarizes and classifies all kinds of members, and identifies their control conditions, so as to provide reference for the future design of tangent tower. [Method] This paper introduced the typical operating conditions in tower design. Taking the 500 kV tangent tower as an example, this paper identified the control forms of each member through calculation based on the hanging point load of the tower, and summarized the identification results to find the changes in the law. [Result] For the hanging point, the operating condition with the maximum load in X direction is 90° strong wind, the operating condition with the maximum load in Y direction is broken line, and the operating condition with the maximum load in Z direction is lifting. The operating condition with the maximum total load is lifting. The normal operating condition controls most of the main members of the tower, and the 60° strong wind directly affects the foundation force. The broken line condition controls most of the cross members of the tower, and the installation condition controls the fewest members. Considerable members of the tower are controlled by the load out of the plane due to the same pressure. These members are mainly the cross members from the lower chord of the upper cross arm to the upper chord of the middle cross arm on the front of the tower, and the cross members below the variable slope, and attention should be paid to these members in the design. [Conclusion] Tangent tower is featured by great number, various models and layout forms of members. In project construction, the members should be optimized according to the design conditions and the control conditions of members.

Key words: tangent angle steel tower; member; load; control conditions; design strategy

2095-8676 © 2022 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/>).

收稿日期: 2021-10-20 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 中国能源建设集团规划设计有限公司集中开发科研项目“铁塔单角钢构件加固技术”(GSKJ2-T01-2020)

0 引言

近年来伴随着我们经济的飞速发展,各地的用电需求也呈现较快的增长态势,对输电线路的建设需求日益增加。输电杆塔是输电线路的重要组成部分,是远距离输电的承载体系,在日常运行中主要承受横向和纵向的各类荷载,保证在输电环节中能将电能安全、可靠的运输到各个站点^[1]。输电杆塔的结构形式主要采用空间桁架结构,杆件主要由单根等边角钢或组合角钢组成,用材主要以 Q235、Q355、Q420 和 Q460 热轧型钢为主。我国幅员辽阔,各地区的自然环境复杂,输电杆塔除了承受正常运行时风、冰和导线等荷载外,还需要考虑起吊安装,突发断线等特殊工况的影响。

输电杆塔有着杆件数量多、型号多、布置形式复杂等特点,每一根杆件均需要满足杆塔建设到投运过程中所涉及全部工况,这对杆塔的设计、施工都是一大挑战。若能大致的了解杆塔中各杆件的控制形式及控制工况,这将有助于设计中有针对性地开展杆件优化,降低杆塔重量,在施工中识别敏感杆件,从而对其采取保护措施。将杆件计算受力情况与杆塔施工,运行时的实际受力情况相结合,能更好地了解杆件的实际受力状态,从杆件的受力角度增强对杆塔的感性认识,为今后的杆塔设计提供参考。

国内学者对杆塔荷载^[2-3]、覆冰荷载^[4-5]、杆塔钢结构材料^[6-7]、复合材料^[8]和塔头布置^[9-10]等多个方向进行了深入的研究,但针对杆塔杆件控制形式及控制工况的研究尚不多见。文章以 500 kV 双回路直线塔为例,研究杆塔各杆件的控制形式及控制工况,并将其归类整理,为今后的直线塔设计提供参考。

1 直线塔设计方案

1.1 直线塔设计条件与尺寸

文章以 500 kV 双回路直线角钢塔为研究对象,杆塔设计条件如表 1 所示,杆塔模型如图 1 所示。

1.2 直线塔部件划分

输电杆塔虽然杆件数量众多,但铁塔结构存在对称性,杆件布置存在一致性,杆件的设计长度也有相应的要求,故将杆件按照所属部位进行划分有利于探寻各部位的控制工况的变化规律。

杆塔辅助材众多,布置形式复杂,主要是对受力

表 1 杆塔设计条件

Tab. 1 Tower design conditions

项目	设计条件
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	27
覆冰/mm	0
海拔/m	<1 000
导线	4线0件ign condition
地线	1线0件ign condition

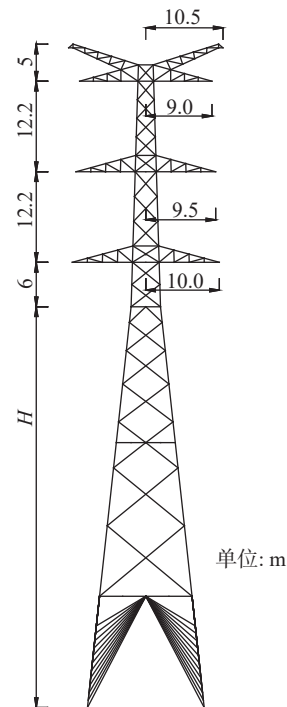


图 1 直线塔

Fig. 1 Tangent tower

杆件起支撑作用。杆塔横隔面的设计主要是确保杆塔的刚度与上人的需求,其杆件尺寸主要与主材尺寸相关。故文章不对上述两类杆件的受力情况展开研究,仅研究杆塔主要杆件的控制形式与控制工况。

文章将杆塔划分为地线支架,导线横担,变坡以上塔身,变坡以下塔身和塔腿,共五个部分。其中地线支架包含:上弦主材,下弦主材,正面杆件,顶面杆件,底面杆件。导线横担包含:上弦主材,下弦主材,正面杆件,顶面杆件,底面杆件。变坡以上塔身包含:塔身主材,塔身交叉材。变坡以下塔身包含:塔身主材,塔身交叉材。塔腿包含:塔腿主材,塔腿斜材。

2 直线塔计算工况介绍

各类型杆塔均应计算线路正常运行工况、断线

工况、不均匀覆冰工况、验算冰工况和安装工况下的荷载组合,必要时还应验算地震等稀有工况下的荷载组合。文章案例的设计覆冰为 0 mm,故不需考虑覆冰工况、验算冰工况,同时地震等稀有工况发生几率较少,且可在选线阶段进行针对性避让,故文章亦不考虑该类工况所产生影响。

直线塔的计算荷载主要由导线、地线挂点荷载和塔身风荷载组成。下文将照工况对挂点荷载进行整理,为之后的杆件计算打下基础。

2.1 正常工况

正常工况是杆塔运行时承受时间最长的工况,也是最重要的设计工况。由于本算例设计风速为 27 m/s,设计覆冰为 0 mm,故杆塔的正常运行情况荷载组合为基本风速、无冰、未断线(包括最小垂直荷载和最大水平荷载的组合)。

部分典型正常工况荷载如表 2 所示,地线和导线的挂点荷载与导线的受风面积相关,90°大风工况的导线受风面积最大,故相应的挂点荷载也最大。

表 2 部分典型正常工况荷载

Tab. 2 Some typical loads under normal operating conditions
单位: kN

项目	X向荷载	Y向荷载	Z向荷载	总荷载	备注
地线挂点	15.09	0.00	14.62	21.00	90°大风
	11.32	0.00	14.62	18.50	60°大风
	7.55	2.26	14.62	16.60	45°大风
	0.00	3.77	14.62	15.10	0°大风
导线挂点	127.95	0.00	157.71	203.10	90°大风
	96.57	2.52	157.71	184.90	60°大风
	65.04	21.99	157.71	172.00	45°大风
	0.00	35.76	157.71	161.70	0°大风

注: X向为垂直线路方向; Y向为顺线路方向; Z向为竖向

随着风向由 90°逐渐变为 0°时, X 向荷载逐渐减小, Y 向荷载逐渐增大, 总荷载逐渐减小。

2.2 断线工况

线路断线发生的概率很低, 但一旦断线的情况发生, 轻则中断供电, 重则影响杆塔的安全, 其造成的损失不可小觑^[11]。

直线塔的断线工况应按照-5℃、有冰(本算例设计覆冰为 0 mm)、无风的气象条件。需计算同一档内的两种情况: (1)单导线断任意一相导线, 地线未断; (2)断一根地线, 单导线断任意一相导线。部分典型断线工况荷载如表 3 所示。

表 3 部分典型断线工况荷载

Tab. 3 Some typical loads under broken line operating conditions
单位: kN

项目	X向荷载	Y向荷载	Z向荷载	总荷载	备注
地线挂点	0	41.55	18.32	45.40	断地线
导线挂点	0	75.90	161.01	178.00	断一相导线

注: X向为垂直线路方向; Y向为顺线路方向; Z向为竖向

2.3 安装工况

直线塔的安装工况应计算 10 m/s 风速、无冰、相应气温气象条件下的荷载组合^[12]。其中包括:

1)提升导、地线及其附件时的作用荷载。包括提升导、地线、绝缘子、金具等重量和安装工人及工具的附加荷载。

2)导线及地线锚线作业时的作用荷载。锚线对地夹角不宜大于 20°。

部分典型安装工况荷载如表 4 所示, 在安装工况中起吊工况总荷载大于锚线荷载。

表 4 部分典型安装工况荷载

Tab. 4 Some typical loads under installation operating conditions
单位: kN

项目	X向荷载	Y向荷载	Z向荷载	总荷载	备注
地线挂点	1.51	0.00	35.80	35.80	起吊地线
	1.21	2.65	30.52	30.70	锚地线
导线挂点	12.33	0.00	214.97	215.30	起吊导线
	9.87	14.76	209.90	210.60	锚导线

注: X向为垂直线路方向; Y向为顺线路方向; Z向为竖向

综上, 针对上述 7 个工况的地线支架和导线横担的挂点荷载, X 向荷载最大的工况为 90°大风工况, Y 向荷载最大的工况为断线工况, Z 向荷载最大的工况为起吊工况。总荷载最大的工况为起吊工况。

3 直线塔杆件分析

直线塔杆件的控制形式主要有稳定控制、强度控制、受拉控制, 下文将基于这 3 种控制形式开展研究。

基于风速风向, 荷载组合, 断线轮换, 安装工艺的考虑, 在实际计算中, 这 3 类主要荷载会组合出多种受力工况。下文将结合杆件划分及计算工况, 对杆塔的各类杆件进行分析。

3.1 正常工况控制杆件分析

正常工况控制的杆件情况, 详见表 5。

表 5 正常工况控制杆件

Tab. 5 Member control under normal operating conditions

杆塔部件	杆件类型	主要控制形式	主要控制工况
地线支架	顶面杆件	稳定	0°大风
	主材	稳定	45/60°大风
变坡以上塔身	交叉材	稳定	90°大风
	主材	稳定、强度	60°大风
变坡以下塔身	交叉材	稳定	0°大风
	主材	稳定	60°大风
塔腿	主材	稳定	60°大风
	斜材	稳定	0°大风

针对地线支架,其顶部杆件主要由稳定控制,主要控制工况为 0°大风。地线挂点荷载主要沿底面传递,顶面分担挂点荷载较少,故主要由塔身风荷载控制。

针对变坡以上塔身,主材主要由稳定控制,上横担到下横担处主要控制工况为 45°大风,下横担到变坡位置处主要控制工况为 60°大风。交叉材主要由稳定控制,中横担下弦杆至变坡处正面交叉材主要控制工况为 90°大风。主材的控制工况逐渐向 60°大风靠近。

针对变坡以下塔身,主材主要由稳定和强度控制,主要控制工况为 60°大风。可以看出在这部分 60°大风已经成为了主材的控制工况。塔身正面全部与塔身侧面下半部分交叉材主要控制工况为 0°大风。由于同压效应增加了杆件的计算长度,平面外荷载结合同压所产生的效应大于平面内的荷载所产生的效应,故正面交叉材受平面外荷载控制。

针对塔腿,其主材主要由稳定控制,主要控制工况为 60°大风工况。塔腿斜材主要由稳定控制,主要控制工况为 0°大风。对于本算例杆塔主材的最大控制荷载为 60°大风工况,该工况也直接影响了基础力的大小。

3.2 断线工况控制杆件分析

断线工况控制的杆件情况,详见表 6。

针对地线支架,其上弦杆件由受拉控制,下弦杆件和底面杆件均由稳定控制,其正面杆件部分由受拉控制,部分由稳定控制,以上杆件的主要控制工况均为断地线工况。断地线工况是该部分最主要的控制工况,除了顶面杆件外,地线支架的全部杆件均受断地线工况控制,同时也表明地线支架对 Y 向荷载较为敏感,其杆件规格主要受 Y 向荷载控制。

表 6 断线工况控制杆件

Tab. 6 Member control under broken line operating conditions

杆塔部件	杆件类型	主要控制形式	主要控制工况
地线支架	上弦主材	受拉	断地线
	下弦主材	稳定	断地线
	正面杆件	受拉、稳定	断地线
	底面杆件	稳定	断地线
导线横担	下弦主材	稳定	断导线
	正面杆件	—	零杆
	顶面杆件	—	零杆
变坡以上塔身	底面杆件	稳定	断导线
	交叉材	稳定	断地线
变坡以下塔身	交叉材	稳定	断地线

针对导线横担,其下弦主材与底面杆件主要由稳定控制,主要控制工况为断导线,表明到导线横担的杆件与地线支架一样,对 Y 向的荷载较为敏感。

针对变坡以上塔身,上横担下弦杆至中横担上弦杆的正侧面交叉材主要由稳定控制,主要控制工况为断地线。断地线工况对于正面交叉材为平面外荷载,主要是由于同压增加了杆件的计算长度,而上横担下弦杆至中横担上弦杆处风荷载的叠加效应尚不明显,故杆件受断地线工况控制。变坡以上塔身侧面交叉材主要由稳定控制,主要控制工况为断地线。

针对变坡以下塔身,侧面靠近变坡位置的部分交叉由稳定控制,主要控制工况为断地线。由于风荷载的经叠加后仍未大于断线荷载,故呈现出断线工况控制,随着风荷载的继续叠加,往下的某个节点会出现风荷载大于断地线荷载的情况。

3.3 安装工况控制杆件分析

安装工况控制的杆件情况,详见表 7。

表 7 安装工况控制杆件

Tab. 7 Member control under installation operating conditions

杆塔部件	杆件类型	主要控制形式	主要控制工况
导线横担	上弦主材	受拉	起吊导线
变坡以上塔身	主材	稳定	起吊导线

针对导线横担,其上弦杆主要由受拉控制,主要控制工况为起吊导线,而起吊导线工况的最主要组成部分是 Z 向荷载,即导线横担上弦杆主要受 Z 向荷载控制。

针对变坡以上塔身,仅有其最上端的交叉材为

起吊导线控制,其主要是传递导线横担上弦杆专递的荷载,使该交叉材承受了从上往下的压力。

4 直线塔杆件控制规律及优化策略

4.1 直线塔杆件控制规律

正常工况控制了杆塔的大部分主材,大部分正面交叉材和小部分侧面交叉材。其中 60° 大风控制是塔腿的主材的控制工况,该工况也直接影响了基础力的大小。 60° 大风工况影响着杆塔中一大批规格较大的杆件,对塔重有着举足轻重的影响。

断线工况控制了地线支架的大部分材料,导线横担的下弦杆和底面杆件,绝大部分侧面交叉材和小部分正面交叉材。该工况是 Y 向荷载最大的工况,主要对交叉材起控制作用。

安装工况控制了导线横担的上弦杆和个别交叉材料,在三种主要设计工况中,控制的杆件数量最少。

针对地线支架和导线横担,其上弦杆则主要有受拉控制。若上弦杆根部低于挂点,则该上弦杆由断线控制;若上弦杆根部高于挂点,则该上弦杆由起吊工况控制。地线支架除了顶面杆件,导线横担除了上弦杆及零杆,其余杆件均由断线工况控制,由于断线工况是 Y 向荷载最大的工况,即该类杆件主要受 Y 向荷载控制。

杆塔中有相当一部分杆件由于同压作用受平面外的荷载所控制,这部分杆件主要为杆塔正面上横担下弦杆至中横担上弦杆交叉材,变坡以下交叉材这两部分。

4.2 直线塔杆件优化策略

杆塔大部分杆件为稳定控制,在设计中可合理设置支撑杆件以减少其计算长度,从而实现减少构件面积的效果。

部分变坡以下主材为强度控制,针对该类杆件,增加支撑亦对杆件安全帮助不大,由于变坡以下材质较为统一,故应关注杆件截面积及其利用率,在设计时不应使其利用率过满。

针对由起吊工况控制的杆件,如横担上弦杆,塔头交叉材,可结合施工单位的安装技术进行设计,必要时可提醒施工单位不应采用双倍起吊等增加额外荷载的施工方式,确保杆件安全。

5 结论

直线型杆塔结构形式多样,构件规格众多,其杆件的控制工况和杆塔的拓扑结构,设计气象条件,导线截面等都有一定的关系,随着设计条件的变化,杆件的控制工况可能会发生改变。

文章以设计覆冰为 0 mm ,设计风速为 27 m/s 的 500 kV 双回路直线塔为例,分别对正常工况,断线工况,安装工况所控制的杆件进行了分类和研究,总结归纳出各类杆件的控制工况,并提出了直线塔的优化建议。

1)针对挂点荷载, X 向荷载最大的工况为 90° 大风工况, Y 向荷载最大的工况为断线工况, Z 向荷载最大的工况为起吊工况。总荷载最大的工况为起吊工况。

2)正常工况控制了杆塔大部分主材,且 60° 大风工直接影响了基础力的大小。断线工况控制了杆塔大部分交叉材、地线支架下弦杆、导线横担下弦杆,该类构件主要受 Y 向荷载影响。安装工况控制的杆件最少,主要是导线横担的上弦杆。

3)杆塔中有相当一部分杆件由于同压作用受平面外的荷载所控制,这部分杆件主要为杆塔正面上横担下弦杆至中横担上弦杆交叉材,变坡以下交叉材这两部分,在设计中应给予注意。

4)可根据杆件的受力情况采用增加支撑或增大截面的方式对杆塔进行设计,应结合施工技术,对由安装工况控制的杆件进行设计。

参考文献:

- [1] 王身丽,严利雄,陈典丽,等.输电线路杆塔受力分析研究现状[J].*科技创新与应用*,2018(35):71-72. DOI:10.3969/j.issn.2095-2945.2018.35.030.
WANG S L, YAN L X, CHEN D L, et al. Research status of transmission line tower stress analysis [J]. *Technology Innovation and Application*, 2018(35): 71-72. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2945.2018.35.030.
- [2] 杨风利,牛华伟,杨靖波,等.酒杯型输电铁塔曲臂风荷载风洞试验研究[J].*振动与冲击*,2017,36(24):170-176. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.24.026.
YANG F L, NIU H W, YANG J B, et al. Wind tunnel tests for wind loads of crank arms of cup-type transmission towers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(24): 170-176. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.24.026.
- [3] 杨风利.角钢输电铁塔横担角度风荷载系数取值研究[J].*工*

- 程力学, 2017, 34(4): 150-159. DOI: CNKI:SUN:GCLX.0.2017-04-019.
- YANG F L. Study on skewed wind load factor on cross-arms of angle steel transmission towers under skewed wind [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(4): 150-159. DOI: CNKI:SUN:GCLX.0.2017-04-019.
- [4] 熊铁华, 梁枢果, 吴海洋. 某输电线路铁塔覆冰条件下的失效模式分析 [J]. *计算力学学报*, 2011, 28(3): 468-472. DOI: 10.7511/jslx201103027.
- XIONG T H, LIANG S G, WU H Y. Failure modes analysis of a broken down transmission tower under ice loads [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(3): 468-472. DOI: 10.7511/jslx201103027.
- [5] 钟寅亥. 冰区输电铁塔设计的荷载组合 [J]. *广东输电与变电技术*, 2010, 12(1): 65-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2010.01.022.
- ZHONG Y H. Combination of load for transmission tower in ice-coating zone [J]. *Guangdong Power Transmission Technology*, 2010, 12(1): 65-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2010.01.022.
- [6] 张文涛. 高强度钢在输电线路铁塔材质选择上的应用 [J]. *吉林电力*, 2014, 42(5): 10-11,34. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2014.05.004.
- ZHANG W T. Application of high-strength steel on material selection of transmission tower [J]. *Jilin Electric Power*, 2014, 42(5): 10-11,34. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2014.05.004.
- [7] 胡浩莹, 张志强, 郑世明, 等. 复合材料横担在500kV双回路输电线路的应用 [J]. *电工技术*, 2020(8): 75-76,78. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2020.08.031.
- HU H Y, ZHANG Z Q, ZHENG S M, et al. Application of composite cross arm in 500 kV double circuit transmission lines [J]. *Electric Engineering*, 2020(8): 75-76,78. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2020.08.031.
- [8] 蔡康毅, 方晴, 杜新喜, 等. 高压输电线路复合横担受力性能研究 [J]. *工业建筑*, 2020, 50(4): 162-167,150. DOI: 10.13204/j.gyjz202004028.
- CAI K Y, FANG Q, DU X X, et al. Research on mechanical properties of composite cross arms in high-voltage transmission lines [J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(4): 162-167,150. DOI: 10.13204/j.gyjz202004028.
- [9] 邹相国, 易黎明, 冯炎, 等. 负保护角羊头型输电杆塔塔头局部杆件布置优化 [J]. *建筑结构*, 2018, 48(增刊2): 538-541. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.S2.108.
- ZOU X G, YI L M, FENG Y, et al. Optimized layout of members in head of sheep-head type power-transmission tower with negative protecting angle [J]. *Building Structure*, 2018, 48(Supp. 2): 538-541. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.S2.108.
- [10] 胡海瑞. 输电线路碳纤维复合芯导线杆塔塔头规划分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2015, 33(3): 14-17,21. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2015.03.006.
- HU H R. Planning and analysis of ACCC suitable for tower head in transmission line [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2015, 33(3): 14-17,21. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2015.03.006.
- [11] 贾国强, 武力. 断线工况对输电铁塔重量的影响 [J]. *电力勘测设计*, 2014(3): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2014.03.015.
- JIA G Q, WU L. Effect of breaking line condition on weight of transmission line iron tower [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2014(3): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2014.03.015.
- [12] 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.

作者简介:



庄志翔

庄志翔(第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 广东广州人, 工程师, 建筑与土木工程硕士, 主要从事输电线路的设计和研究工作(e-mail)zhuangzhixiang@gedi.com.cn.

(编辑 李辉)