

## 500 kV双回路复合横担直线塔设计方案研究

庄志翔, 张珏, 唐峦, 王丙乾

引用本文:

庄志翔, 张珏, 唐峦, 王丙乾. 500 kV双回路复合横担直线塔设计方案研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 112-118.

ZHUANG Zhixiang, ZHANG Jue, TANG Luan, WANG Bingqian. Research on Design Scheme of 500 kV Double Circuit Composite Cross Arm Tangent Tower[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(增刊1): 112-118.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 220kV单回路复合杆塔关键技术研究

Research on Key Technologies of 220 kV Single Circuit Composite Tower

南方能源建设. 2019, 6(2): 77-83 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.014>

#### ±800kV极导线与接地极线共塔线路耐雷性能及双极闭锁反事故措施分析

Analysis on the Lightning Performance and Anti-accident Measures of ±800 kV Bipolar Blocking of Polar Wires and Electrode Wires on the Same Tower

南方能源建设. 2018, 5(4): 86-91 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.013>

#### ±500 kV双回路直流耐张塔真型试验分析

Full-scale Test Analysis for Strain Tower Applied in UHV DC Double-circuit Transmission Line

南方能源建设. 2015, 2(z1): 55-59 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.012>

#### 侧向横风作用下角钢输电塔的动力响应研究

Research on Dynamic Responses of a Transmission Tower with Angle Section Members Under Lateral Wind Loadings

南方能源建设. 2015, 2(1): 88-91 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017>

#### 海上风机支撑结构整体优化设计

Integrated Design Optimization of Offshore Support Structure

南方能源建设. 2019, 6(4): 86-92 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.014>

# 500 kV 双回路复合横担直线塔设计方案研究

庄志翔<sup>✉</sup>, 张珏, 唐峦, 王丙乾

(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] 探究不同设计方案复合横担塔与常规塔之间工程量的差异, 可在规划设计阶段快速开展方案比选, 为不同场景复合横担塔的应用提供参考。[方法] 文章以 500 kV 杆塔为例, 将杆塔划分为多个部件, 并将其与复合横担塔设计方案进行对比分析, 同时对塔重, 基础混凝土量, 金具和绝缘子工程量进行测算, 研究各复合横担塔与常规塔工程量的差异。[结果] 测算结果表明: 对比常规塔, 复合横担塔设计方案 1 经济性较好, 走廊压缩性能较好, 应急抢修性能较差; 复合横担塔设计方案 2 经济性一般, 走廊压缩性能较好, 应急抢修性能一般; 复合横担塔设计方案 3 经济性较差, 走廊压缩性能较好, 应急抢修性能较好。[结论] 文章研究成果可以为今后的复合横担方案选择提供参考。

**关键词:** 复合横担; 塔重; 基础混凝土量; 对比分析

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0112-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Design Scheme of 500 kV Double Circuit Composite Cross Arm Tangent Tower

ZHUANG Zhixiang<sup>✉</sup>, ZHANG Jue, TANG Luan, WANG Bingqian

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

**Abstract:** [Introduction] Exploring the difference of quantities between composite cross arm tower and conventional tower in different design schemes can quickly carry out scheme comparison and selection in the planning and design stage, and provide reference for the application of composite cross arm tower in different scenarios. [Method] Taking the 500 kV tower as an example, the tower was divided into several parts, and compared with the design scheme of the composite cross arm tower. At the same time, the tower weight, the amount of foundation concrete, the quantities of fittings and insulators were calculated, and the differences between the quantities of each composite cross arm tower and the conventional tower were studied. [Result] The calculation results show that compared with the conventional tower, the design scheme 1 of composite cross arm tower has better economy, better corridor compression performance and poor emergency repair performance; Design scheme 2 of composite cross arm tower has general economy, good corridor compression performance and general emergency repair performance; Design scheme 3 of composite cross arm tower has poor economy, good corridor compression performance and good emergency repair performance. [Conclusion] The research results of this paper can provide reference for the selection of composite cross arm scheme in the future.

**Key words:** composite cross arm; tower weight; quantity of foundation concrete; comparative analysis

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/>).

## 0 引言

随着电网快速发展, 西电东送、南北互供的电网建设如火如荼, 全国输电线路将越来越多, 对钢

材的需求也越来越大, 消耗了大量的矿产能源, 也造成生态环境的严重污染。目前我国 110 kV 以上输电线路杆塔绝大部分采用全钢制结构, 但钢材存在质量重、易锈蚀或开裂等缺陷, 还存在施工

收稿日期: 2021-09-10 修回日期: 2021-11-29

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科学技术项目复合材料杆塔设计关键技术研究及应用(CEEC2016-KJ10)

运输和运行维护困难等问题。此外,杆塔为全钢结构的输电线路易发生污秽闪络、风偏放电等故障和事故<sup>[1]</sup>。

复合材料横担采用复合材料代替原来输电线路角钢材料的杆塔横担,充分利用复合材料绝缘性能好、重量轻、强度高、耐腐蚀性能优异、安装方便等诸多优点<sup>[2-5]</sup>,是新型复合材料在输电线路中继复合绝缘子之后的又一创新性应用。

复合材料技术及其制造工艺的迅速发展使得输电线路采用复合材料杆塔技术已然成熟。随着电力的大发展,输电线路走廊越发紧张,对输电线路的安全可靠性要求也日益提高,输电线路的运行维护问题也日益突出,复合材料杆塔在全寿命使用期内呈现良好的经济性,为复合杆塔在输电线路中的应用奠定了基础。

国内学者从复合横担的布置形式、连接方式,受力分析等多个方向对复合横担塔进行了深入的研究,但结合经济性与应急抢修性能的复合横担塔设计方案研究至今较少。

本文以500 kV双回路直线塔为例,结合经济性与应急抢修性能,研究复合横担直线塔的设计方案,为今后的复合横担杆塔设计提供数据参考。

## 1 复合横担塔特点

### 1.1 复合横担塔优点

复合材料具有轻质高强、耐腐蚀、电气绝缘性能好、环境性能友好、可设计性好等优点,这些优点促使了复合横担塔的出现和发展。我国对输电线路复合横担塔的研究进展迅速,目前已成功在超高压、特高压交直流输电线路工程进行了试用<sup>[6-8]</sup>。输电线路复合横担塔具有以下技术优点:

1) 降低风偏闪络机率。由于横担采用复合材料,其绝缘性能优良,仅用较短的悬垂金具串连接联板和导线,即使发生超预期风偏,也不会发生风偏闪络事故,有利于保证线路的安全运行。

2) 压缩走廊宽度。利用复合横担的绝缘特性,通过合理设计,可压缩走廊宽度,减少房屋拆迁量,具有重要的社会和经济效益<sup>[9]</sup>。

3) 节省塔材。利用复合横担的绝缘特性,缩短了悬垂绝缘子串的长度,缩短杆塔的高度,降低塔重和基础混凝土量,节省了工程投资。

4) 节约资源。采用复合横担塔可减少钢材用量,减少不可再生的铁矿石用量;而复合材料的主要原材料为二氧化硅矿石,蕴藏量丰富。

5) 耐腐蚀。利用复合材料优异的防腐性能,可以降低沿海及重工业地区输电线路杆塔的腐蚀程度,延长输电线路的使用寿命,降低运维成本。

6) 环境友好。复合材料制品与钢构件相比,生产能耗低,减小环境污染;同时复合材料易加工、颜色可调,能够与环境协调,可增强线路的环境友好性。

### 1.2 复合横担塔局限性

由于输电线路复合横担塔的研究及应用时间尚短,施工运维经验少,制约了其进一步推广应用。输电线路复合横担塔具有以下局限性:

1) 单价相对较高。现阶段输电线路复合横担塔应用规模较小,在未大批量生产条件下其单价较高,增加输电线路工程投资;但随着推广应用和使用量的增加,其单价预计将随用量的增大而下降,从而带来经济优势。

2) 运行经验相对较少。目前运行最久的试点线路约为11年(2~3基,2009年投运),试点杆塔基数最多的为14基(2018年投运)。

3) 全寿命周期抗老化性能积累数据较少。长期暴露野外复杂气候环境,与线路复合绝缘子类似,复合横担产品亦存在老化问题<sup>[10]</sup>。由于目前运行经验相对较少,复合横担的全寿命周期抗老化性能数据相对欠缺,其抗老化性能有待进一步验证<sup>[11]</sup>。

4) 超高压线路尚未有复合横担耐张塔应用先例。由于耐张塔受力复杂,目前超高压线路复合横担塔均仅应用于直线塔,随着复合横担塔的推广应用,对复合横担在耐张塔中的应用研究正逐步开展。

5) 复合横担事故抢修工作难度较大、效率较低。复合绝缘子+传统铁横担的组合一般需考虑30年运行期内更换一次复合绝缘子;而传统铁横担一般在全寿命周期内无需更换。一旦因事故需抢修更换复合横担,除需考虑复合横担体积大、运输困难外,还需考虑相关机动绞磨、钢丝绳等工器具的人力运输或大型吊车进场施工的难度,故其综合难度较大、效率较低。

## 2 复合横担塔设计方案

### 2.1 常规塔设计方案

本文选用设计覆冰 0 mm, 设计风速 27 m/s, 导线为  $4 \times \text{JL/LB20A-400/35}$ , 60 m 呼高的 500 kV 双回路伞形直线塔作为对照对象, 并定义其为常规塔, 常规塔如图 1 所示。

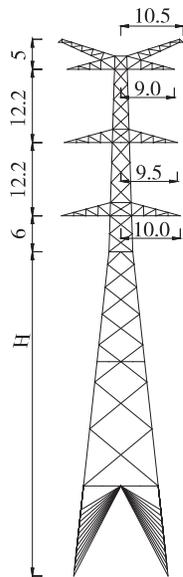


图1 常规塔

Fig. 1 Conventional tower

### 2.2 复合横担塔设计方案

常规杆塔地线支架考虑经济性, 主要考虑采用羊角型地线支架, 可有效减少塔材的使用量。

由于复合横担塔的特殊性, 其地线支架除了架设地线外, 还肩负着检修作业时, 临时起吊导线, 悬挂导线的作用, 故一般采用平顶型地线支架。平顶型地线支架结构简洁, 传力清晰, 有利于垂直荷载的传递, 同时也方便施工人员和运维人员的塔上作业。

同时, 复合横担塔利用复合材料的绝缘特性, 缩短了悬垂绝缘子串的长度, 有效缩短了杆塔的层间距。

复合横担虽较多优点, 但由于其运输、储存、安装的难度较大, 且应急抢修经验较少, 现阶段在进行复合横担塔设计时应考虑应急抢修的需求。

综合考虑经济性与应急抢修需求, 复合材料横担直线杆塔根据横担与杆塔的组合情况, 分为三个方案, 如图 2 所示。

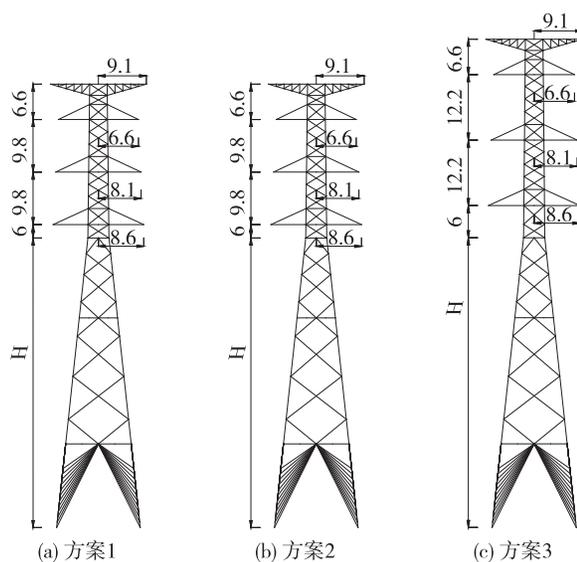


图2 三种复合横担塔设计方案

Fig. 2 Three design schemes of composite cross arm tower

方案 1: 整塔按复合横担杆塔设计, 基础按实际荷载配置;

方案 2: 变坡以上按复合横担塔设计, 变坡以下按常规塔设计, 基础亦按常规角钢塔的荷载配置;

方案 3: 兼顾复合横担塔与常规横担塔, 该方案满足常规塔设计, 同时地线支架需满足复合横担塔的特殊需求 (起吊单相复合横担, 起吊检修设备, 导线临时起吊等), 基础按实际荷载配置。

常规塔一侧下横担长度为 10 m, 复合横担塔一侧下横担长度为 8.6 m, 复合横担塔设计方案可压缩约 2.8 m 走廊宽度。

### 2.3 杆塔部件划分

对比常规塔, 复合横担塔的层间距, 地线支架形式有较大的变化, 为分析复合横担杆塔与常规塔各部件之间的差异, 现将杆塔划分为五个主要部件, 地线支架 (标注红色), 2 导线横担 (标注黄色), 变坡以上塔身 (标注黑色), 变坡以下塔身 (标注蓝色), 塔腿 (标注紫色), 并在图中用不同颜色标出。杆塔部件划分如图 3 所示。

### 2.4 杆塔材料参数

常规塔及复合横担塔除横担外部分采用 Q235B、Q355B 和 Q420B 级钢, 其质量标准分别符合《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)、《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018) 的要求。

复合横担采用采用纤维增强复合材料, 外绝缘

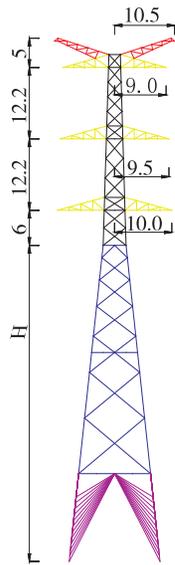


图3 杆塔部件划分

Fig. 3 Tower component division

主体材质采用高温硫化硅橡胶。复合横担材料参数如表 1 所示。

表 1 复合横担材料参数

Tab. 1 Composite cross arm material parameters

项 目	绝缘芯棒	绝缘管
	标准值	标准值
抗拉强度	$\geq 1100$ MPa	$\geq 300$ MPa
拉伸模量	$\geq 45$ GPa	$\geq 20$ GPa
弯曲强度	$\geq 900$ MPa	$\geq 250$ MPa
弯曲模量	$\geq 36$ GPa	$\geq 20$ GPa
压缩强度	$\geq 350$ MPa	$\geq 250$ MPa
压缩模量	$\geq 45$ GPa	$\geq 20$ GPa
面内剪切强度	$\geq 35$ MPa	—
泊松比	0.3~0.4	0.3~0.4

### 3 设计方案测算分析

#### 3.1 塔重分析

杆塔工程占工程本体造价比重较高<sup>[12]</sup>。塔重是杆塔工程中一项至关重要的工程指标,快速估算出复合横担塔的塔重对把控工程投资具有重要意义。

为仔细探究复合横担塔各方案的塔重差异,现对各方案进行测算,并按照上文杆塔部件的类型分别列出各方案中各杆塔部件的塔重指标。杆塔部件重量及占总塔重比例如表 2 所示。

针对方案 1,其对比常规塔可节约近 15.20 t 塔

表 2 杆塔部件重量及占总塔重比例

Tab. 2 Weight of tower components and proportion in total tower weight

杆塔部件	设计方案	估算塔重/t	塔重占比/%
地线支架	常规塔	1.87	3.0
	复合横担塔-方案 1	2.65	5.5
	复合横担塔-方案 2	2.65	4.9
	复合横担塔-方案 3	2.65	4.3
导线横担	常规塔	7.84	12.4
	复合横担塔-方案 1	0.00	0.0
	复合横担塔-方案 2	0.00	0.0
	复合横担塔-方案 3	0.00	0.0
变坡以上塔身	常规塔	14.66	23.2
	复合横担塔-方案 1	12.70	26.5
	复合横担塔-方案 2	12.70	23.5
	复合横担塔-方案 3	18.93	30.4
变坡以下塔身	常规塔	29.48	46.7
	复合横担塔-方案 1	24.64	51.4
	复合横担塔-方案 2	29.48	54.5
	复合横担塔-方案 3	30.86	49.6
塔腿	常规塔	9.28	14.7
	复合横担塔-方案 1	7.93	16.6
	复合横担塔-方案 2	9.28	17.1
	复合横担塔-方案 3	9.77	15.7
总塔重	常规塔	63.13	100.0
	复合横担塔-方案 1	47.92	100.0
	复合横担塔-方案 2	54.11	100.0
	复合横担塔-方案 3	62.21	100.0

材,约占常规塔重的 24%。各部件重量的变化情况如下:地线支架增加约 0.78 t,导线横担减少约 7.84 t,变坡以上塔身减少约 1.96 t,变坡以下塔身减少约 4.84 t,塔腿减少约 1.34 t。由于复合横担塔构造特殊,其地线支架除了架设地线外,还需承担临时起吊导线,悬挂导线的荷载,故地线支架重量有所增加。复合横担塔本身并无角钢横担,对比常规铁塔可节约全部横担的重量。虽因复合横担构造需要,变坡以上塔身宽度有所增加,但由于层间距缩短,变坡以上塔身的重量总体略有减少。上部结构变化所引起的荷载减少均体现在变坡以下塔身和塔腿的重量中,而变坡以下塔身占总塔重的比例较大,故减少重量也较多。

针对方案 2,其对比常规塔可节约近 9.02 t 塔材,约占常规塔重的 14%。该方案地线支架,导线横担及变坡以上塔身均与方案 1 一致,变坡以下塔

身和塔腿套用常规塔的设计。依据方案2测算结果,若地线支架,导线横担及变坡以上塔身按复合横担塔设计,可节约近14%的塔材。

针对方案3,其对比常规塔可节约近0.91 t塔材,约占常规塔重的1%。各部件重量的变化情况如下:地线支架、导线横担与方案1一致;变坡以上塔身增加约4.26 t,变坡以下塔身增加约1.39 t,塔腿增加约0.50 t。因复合横担的构造需要,变坡以上塔身宽度有所增加,而方案3需同时满足常规横担的使用需求,层间距并无缩短,故变坡以上塔身的重量略有增加,相应的变坡以下塔身和塔腿的重量也略有增加。

通过对复合横担塔三个方案的测算,可得出复合横担塔与常规塔相应部件重量的差异,经组合可得出各设计方案与常规塔重量之间的关系,可为今后复合横担塔的塔重估算提供参考,有利于快速估算杆塔工程量,加强对工程投资的把控。

### 3.2 基础混凝土量分析

根据以往工程经验,基础工程占工程本体造价的约20%~30%,其中最具代表性的指标则是基础混凝土量<sup>[13]</sup>。

本文以硬塑土地质条件下,露高为2.5 m的人工挖孔基础为测算对象,对常规塔及复合横担塔各方案的基础工程量进行测算,以探究其基础混凝土量之间的差异。杆塔基础工程量对比如表3所示。

表3 杆塔基础工程量对比

Tab. 3 Comparison of tower foundation quantities

项目	基础混凝土量/m <sup>3</sup>	比常规塔
常规塔	63.60	1.00
复合横担塔-方案1	59.52	0.94
复合横担塔-方案2	63.60	1.00
复合横担塔-方案3	66.68	1.05

针对方案1,由于全塔均按复合横担塔进行设计,其基础力有一定幅度的减少,基础混凝土量比常规塔减少约4.08 m<sup>3</sup>每基,约占常规塔混凝土的6%。

针对方案2,其基础工程量与常规塔一致。

针对方案3,该方案兼顾复合横担与常规横担的布置,其基础力有一定程度的增加,基础混凝土量比常规塔增加约3.08 m<sup>3</sup>每基,约占常规塔混凝土

的5%。

采用不同的复合横担塔设计方案其基础工程量有一定差异。全塔按照复合横担方案进行设计可以减少基础力,从而减少部分基础工程量。但基础工程量受地形及地质情况影响较大,故上表的基础混凝土量及比例关系仅可用作参考。

### 3.3 金具绝缘子工程量分析

金具,绝缘子也是线路工程的重要组成部分,对线路的工程造价有着一定程度的影响。对比常规塔,复合横担塔无需采用玻璃绝缘子,但其挂线金具有相应的调整。金具绝缘子工程量对比如表4所示。

表4 金具绝缘子工程量对比

Tab. 4 Comparison of quantities of fittings and insulators

项目	挂线金具/t	玻璃绝缘子/片
常规塔	0.48	250
复合横担塔-方案1	0.67	0
复合横担塔-方案2	0.67	0
复合横担塔-方案3	0.67	0

由表3可知,复合横担塔可节约近250片玻璃绝缘子,同时其挂线金具重量较常规塔增加约0.19 t。

## 4 设计方案比选

复合横担塔可有效节约塔材、基础混凝土等工程量,压缩走廊。由于各工程走廊所涉及的拆迁量和重要性差异较大,难以估量,本文将主要研究复合横担塔本体的经济性差异。按照以往工程经验及询价情况,各项工程量指标的综合单价为:塔材(1.2万元/t);基础混凝土量(0.32万元/m<sup>3</sup>);绝缘子(0.009万元/片);金具(1.8万元/t);复合横担(23万元/套)。杆塔方案经济性对比如表5所示。

表5 杆塔方案经济性对比

Tab. 5 Economic comparison of tower design schemes

项目	常规塔	复合横担塔-方案1	复合横担塔-方案2	复合横担塔-方案3
塔重/t	63.13	47.92	54.11	62.21
基础混凝土/m <sup>3</sup>	63.6	59.52	63.6	66.68
绝缘子/片	250	0	0	0
金具/t	0.48	0.67	0.67	0.67
复合横担/套	0	1	1	1
费用/万元	99.4	100.8	109.5	120.2

针对方案1,该方案工程量节约效果较好,可有效压缩走廊,遇极端情况或材料老化需抢修时,仅可采取更换复合横担的方式,若遇到产能紧张或施工运输困难的情况,会造成减缓抢修的速度。

针对方案2,该方案工程量节约效果一般,可有效压缩走廊,遇极端情况或材料老化需抢修时,除了可采取更换复合横担的方式外,还可以采取更换塔头重新使用角钢横担的方式。参照测算结果,更换塔头约造成15 t塔材报废,约占总塔重的28%,费用可控。由于角钢塔的产能丰富,运输储存要求较低且施工运维手段成熟,在应急抢修时具有较好的效果。

针对方案3,该方案工程量节约效果较差,可有效压缩走廊,遇极端情况或材料老化需抢修时,除了可采取直接更换复合横担或角钢横担,无需拆除杆塔其他部件。抢修时可选方案较多,抢修速度快,产生费用少,有利于快速恢复线路运行。

复合横担塔可有效节约塔材、基础混凝土等工程量,压缩走廊,减少线路建设的拆迁量,但其亦存在着生产周期长、安装运输要求高、运维经验少等局限性。综上,三个方案各有优劣,应依据工程实际使用场景,视情况按需求选用合适的设计方案。

## 5 结 论

本文先介绍了复合横担塔的优点和局限性,再对杆塔的各个部件进行划分,根据横担与杆塔的组合情况,提出了三个复合横担杆塔的设计方案;对三个方案的复合横担的工程量进行测算,并分析其差异;最后结合复合横担应用的实际情况对三个设计方案进行技术经济分析,阐明了各方案的优势和局限性。

1) 复合横担塔具有较多优势,具体表现为降低风偏闪络机率、压缩走廊宽度、节省塔材、节约资源、耐腐蚀和环境友好等。

2) 现阶段复合横担塔亦具有一定的局限性具体表现为:单价相对较高、运行经验相对较少、全寿命周期抗老化性能积累数据较少、超高压线路尚未有复合横担耐张塔应用先例、复合横担事故抢修工作难度较大、效率较低等。

3) 方案1的经济性较好,走廊压缩性能较好,

应急抢修性能较差;方案2的经济性一般,走廊压缩性能较好,应急抢修性能一般;方案3的经济性较差,走廊压缩性能较好,应急抢修性能较好。

4) 对比常规杆塔,复合横担塔可节约玻璃绝缘子,但其金具重量略有增加。

5) 复合横担塔三个设计方案各有优劣,在工程建设中,应依据实际情况,按需求选用合适的设计方案。

## 参考文献:

- [1] 邱雪梅,黄译丹,李雍,等. 复合材料杆塔研究现状及发展趋势[J]. 电气技术, 2017(9): 1-3+9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2017.09.006.  
QIU X M, HUANG Y D, LI Y, et al. Composite tower research status and development trend [J]. Electrical Engineering, 2017 (9): 1-3+9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2017.09.006.
- [2] 阮少林,陈国栋. 500 kV 复合材料单回路塔新型输电分析[J]. 云南电力技术, 2018, 46(6): 134-136. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2018.06.034.  
RUAN S L, CHEN G D. Comparison and analysis of 500 kV composite material Single loop tower [J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(6): 134-136. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2018.06.034.
- [3] 胡超,冯衡,徐彬. 750 kV 输电线路复合材料横担塔的适用性研究[J]. 电力勘测设计, 2016(1): 65-71. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2016.01.018.  
HU C, FENG H, XU B. Research on the applicability of composite cross arm tower for 750 kV transmission line [J]. Electric Power Survey & Design, 2016(1): 65-71. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2016.01.018.
- [4] 左玉玺,王虎长,朱永平,等. 750 kV 输电线路复合横担设计研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2013.01.001.  
ZUO Y X, WANG H C, ZHU Y P, et al. Research on the design of composite cross arm for 750 kV transmission line [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2013.01.001.
- [5] 柏晓路,雷雨泽,刘文勋,等. 1 000 kV 交流特高压输电线路复合横担应用研究[J]. 电力勘测设计, 2020(增刊1): 120-126. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.S1.022.  
BAI X L, LEI Y Z, LIU W X, et al. Research on the application of composite cross arm for 1 000 kV ultra high voltage AC transmission line [J]. Electric Power Survey & Design, 2020 (Supp. 1): 120-126. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.S1.022.
- [6] 杜颖. 强风地区500 kV同塔双回输电线路复合材料横担杆塔应用设计研究[J]. 科技创新与应用, 2020(5):85-86.  
DU Y. Application design of composite cross arm pole and tow-

- er for 500 kV double circuit transmission line on the same tower in strong wind area [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(5): 85-86.
- [7] 李子扬, 张思祥, 张丽娟, 等. 新型复合横担在1 000 kV特高压输电铁塔的应用 [J]. *山东电力技术*, 2017(9):56-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2017.09.011.
- LI Z Y, ZHANG S X, ZHANG L J, et al. Application of the new composite cross arm load in 1 000 kV transmission tower [J]. *Shandong Electric Power*, 2017, 44(9): 52-59. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2017.09.011.
- [8] 张禄琦, 郝阳, 李喜来, 等. 特高压直流杆塔新型复合横担布置研究 [J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2):5 8-62+68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2019.02.009.
- ZHANG L Q, HAO Y, LI X L, et al. Study on the layout of new composite cross arms for the UHV DC tower [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2019, 35(2): 58-62+68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2019.02.009.
- [9] 胡良全. 电力行业用复合材料的发展 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(3): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2012.03.020.
- HU L Q. Development of composites for power industry [J]. *Composites Science and Engineering*, 2012(3): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2012.03.020.
- [10] 吴雄, 胡虔, 潘吉林, 等. 复合材料杆塔及材料多因子老化特性 [J]. *高电压技术*, 2016, 42(3): 908-913. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20160308026.
- WU X, HU Q, PAN J L, et al. Aging properties of composite material pole and its materials under multi-factor environment [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 908-913. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20160308026.
- [11] 朱岸明, 杨大渭, 刘云贺, 等. FRP复合材料杆塔横担研究应用现状及分析 [J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(10): 76-82+88. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2015.10.015.
- ZHU A M, YANG D W, LIU Y H, et al. Application and analysis of cross arms made from FRP composite materials in transmission towers [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2015, 31(10): 76-82+88. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2015.10.015.
- [12] 林文. 基于覆冰地区500 kV输电线路抗冰设计探讨 [J]. *通讯世界*, 2016(9):133-135. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4222.2016.09.095.
- LIN W. Discussion on anti icing design of 500 kV transmission line based on icing area [J]. *Telecom World*, 2016(9): 133-135. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4222.2016.09.095.
- [13] 肖宇, 杨磊. 山区输电线路常规基础造价对比分析 [J]. *电力勘测设计*, 2015(3):74-80. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2015.03.018.
- XIAO Y, YANG L. Comparison on common foundation cost of power transmission line in mountain area [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2015(3): 74-80. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2015.03.018.

---

作者简介:



庄志翔

庄志翔 (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。

(责任编辑 叶筠英)