可释放复合横担端部转动节点设计方法研究

李文斌[1] 王鑫龙[2,*] 黄 煜[3] 林俊哲[1] 郑豪彬[3] 王伟煌[1] 任祥香[4]

（1.广东电网能源发展有限公司，广州 510000；2.上海神马电力工程有限公司，上海 201106；
3.广东电网有限责任公司潮州供电局，潮州 521000；4.同济大学土木工程学院，上海 200092）

摘 要 对于输电线路杆塔而言，复合横担作为关键部件，既要实现电气绝缘，又要满足多变工况下的不同荷载需求。在断线或不均匀覆冰等工况下，线路上存在较大的纵向不平衡张力，在很大程度上是横担和塔身规格的控制因素。减小纵向不平衡张力对新型塔/横担的设计具有重要意义。本文结合实际工程项目，基于不平衡张力值与偏移量之间的关系，设计出可释放纵向张力的转动型双C型板端节点金具并基于有限元仿真进行优化设计，进而进行了试验验证。数值分析及试验证实了优化设计的合理性，这一优化设计可实现复合横担塔不平衡张力的释放，更好地保护输电线路和杆塔，为后续工程项目提供了典型设计成功案例。

关键词 复合横担，节点优化设计，数值仿真，过载试验

中图分类号：TM753 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.20260617.002

Research on the Design Method of End Rotating Joints for Releasable Composite Insulated Cross-Arm

LI Wenbin[1] WANG Xinlong[2,*] HUANG Yu[3] LIN Junzhe[1]
ZHENG Haobin[3] WANG Weihuang[1] REN Xiangxiang[4]

（1.Guangdong Power Grid Energy Development Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2.Shanghai Shemar Power Engineering Co., Ltd, Shanghai 201106, China; 3.Chaozhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Chaozhou 521000; 4.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China）

Abstract For transmission line towers, the composite cross-arm serves as a critical component requiring both electrical insulation and load-bearing capacity under diverse operational conditions. In scenarios such as conductor breakage or uneven ice coating, substantial longitudinal unbalanced tension arises, predominantly governing the structural specifications of the cross-arm and tower body. Mitigating this tension is therefore vital for the design of novel tower structures. Based on an actual engineering project and the relationship between unbalanced tension and displacement, this paper proposes a rotating double C-plate end fitting designed to release longitudinal tension. The design was optimized via finite element simulation and validated through physical testing. Numerical analyses and experimental results confirm the rationality of the optimized design, demonstrating effective release of unbalanced tension in the composite cross-arm. This provides enhanced protection for transmission lines and towers, while also serving as a benchmark for future engineering applications.

Keywords composite insulated cross-arm, node optimization design, numerical simulation, overload test

收稿日期：2023-11-06

基金项目：江苏省科技计划项目（BE 2021064）；广东电网能源发展有限公司科技项目“免跳线复合横担转角塔和无悬垂串的复合横担直线塔的设计及应用研究”（KJXM-SD-202101-01）

作者简介：李文斌（1975-），男，硕士，高级工程师，注册电气工程师，主要研究方向为输电线路设计。E-mail：13702942281@163.com

[*] **联系作者**：王鑫龙（1988-），男，工学硕士，中级工程师，主要研究方向为输电外绝缘解决方案开发研究、海内外输电复合横担CICA解决方案设计开发与推广。E-mail：wxlong@smarepc.com

0 引　言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有强度大、质量轻、耐腐蚀以及耐久性能和电绝缘性能好等特点,非常适合应用于输电线路杆塔工程。FRP已在国内外110 kV到1 000 kV输电线路杆塔中得到了应用[1-4]。为了推动复合横担塔这项新技术的变革,建造新一代的经济、智能电网,快速打开输电复合横担塔的市场,亟需通过研发生产和设计的技术创新,从材料制造成本、成型工艺、产业化建设等多维度进行复合横担和塔身连接节点及金具设计。在保证安全、可靠的基础上尽量减轻节点重量、优化节点结构布置方式,使其方便运输和安装,实现生产制造成本、效率和应用的最优化,为电网客户创造更大的价值。

依据目前已有的研究成果,针对35~110 kV电压等级的复合横担塔,节点结构主要为挂线法兰式,其优点为结构简单、生产工艺简单、成本低,缺点为法兰与支柱绝缘子胶装连接,从而体型变长,会造成现场安装与运输困难。针对220~750 kV电压等级的复合横担塔,依据不同横担构型,节点结构分为B型节点、Π型节点、单柱三拉及单柱单拉挂线法兰式等。现有研究针对750 kV套管式节点[5],500 kV整塔高度、截面和强度[6],500 kV可踩踏复合绝缘横担塔的工程应用与运维情况[7-8],750 kV复合横担整体选型与承载能力[9],整体转动横担的设计实现[10]等进行了多方面的研究[11]。然而,已有研究对于节点金具的具体连接方式,优化设计和试验验证没有进行深入的研究。本文依托南网220 kV项目复合横担自立塔的使用设计条件,采用B型节点,确定横担规格尺寸,然后建立复合横担三维模型,将典型控制工况荷载施加在节点金具挂线孔上,对复合横担各个主要组成部分进行应力分析,然后结合复合横担整体进行过载试验,研究完善可释放性转动节点设计及复合横担主体受力结构稳定性。

1 复合横担杆塔设计条件及节点设计

本文依托南网沿海220 kV线路,考虑将复合横担直线塔应用于此工程,结合其工程条件进行设计研究,为实际工程应用提供参考。

根据此工程设计条件的实际情况,确定可释放性复合横担塔的使用条件见表1所示。

表1　　工程技术条件

Table 1　　Engineering technical conditions

技术条件	参数
海拔高度/m	≤1 000
污区	e级
地形	山地
风速/(m·s^{-1})	39
覆冰厚度/mm	0
导线型号	2×LGJ-630/45

规划的复合横担使用条件见表2。

表2　　复合横担使用条件

Table 2　　Use conditions of CICA

塔型	呼高/m	水平档距/m	垂直档距/m	K_v
2F2We-ZFH	15~39	400	600	0.75

根据其220 kV复合横担(CCA)自立塔,结合荷载要求,复合横担采用双柱双拉的布置形式,横担及线路绝缘子应用FRP材料,杆塔构件之间可以采取螺栓、胶装连接方式[12-14]。双柱双拉式CCA具有结构简单、结构稳定性好等优点。

由于复合横担是绝缘体,可通过转动节点对应金具把导线悬挂在横担上,省去了传统的复合绝缘子串,更省去了金具串长,此设计可以更极致压缩层间距及防风偏。220 kV复合横担直线塔头规划如图1所示。

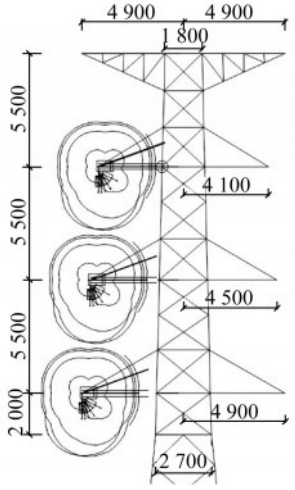


图1　220 kV复合横担塔塔头规划(单位:mm)

Fig.1　220 kV CCA tower head planning (Unit: mm)

根据杆塔使用条件可以提取结构挂点荷载,结合塔头规划,确定复合横担的受力与元件尺寸,

复合横担节点搭板焊接盘对接式连接的B型节点及转动双C型组装的形式，同时复合横担采用套管搭板，复合绝缘子成型后，利用胶接连接金属件，再通过金属件的螺栓进行相关部件连接。根据计算可得拉索的尺寸为ϕ24 mm，支柱绝缘子的尺寸为ϕ147 mm×130 mm。节点形式及连接如图2所示。

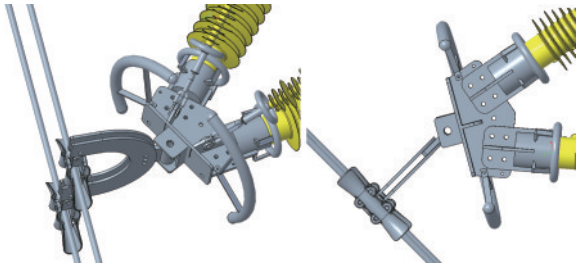


图2 220 kV释放复合横担节点

Fig.2 220 kV releasable CICA node

结合具体工程所需，最后优化的220 kV直线复合横担端部节点采用B型节点连接转动双C型节点，与支柱绝缘子采用套管法兰搭板连接。

2 复合横担结构仿真分析

2.1 复合横担及材料参数

可释放复合横担节点连接如图3所示，由三个部分组成，分别是两侧法兰盘与中间连板。

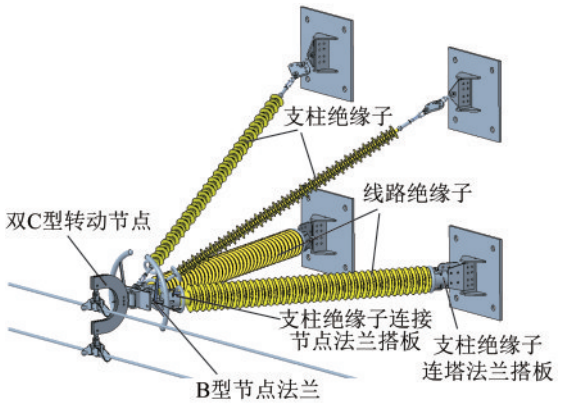


图3 220 kV可释放复合横担节点连接形式

Fig.3 Connection type of 220 kV releasable CICA node

对220 kV释放性复合横担结构承载力进行有限元分析，复合横担受拉绝缘子、受压支柱以及连接件均采用实体单元，这样建模可以满足精度要求，使模型更接近真实情况，计算更准确。为了提高计算效率，同时不改变计算结果的准确性，对图3的节点模型进行简化，具体包括：双C型转动节点与B型节点用转动轴连接，B型端部节点与支柱绝缘子采用8颗螺栓通过法兰搭板连接，其连接形式为固结，不产生相对位移；支柱绝缘子与套管式法兰之间通过胶装粘结，连接形式为固结；B型端部节点与线路绝缘子金具之间为单颗螺栓连接，连接形式为转动约束；绝缘子表面的伞裙不对横担的受力产生影响，在计算模型中可以省略。有限元模型参数见表3。

表3 有限元模型参数

Table 3 Parameters of finite element model

部件编号	材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	密度/(kg·m^{-1})
1、4	Q345钢	210	355	7 850
3	FRP(拉)	28	400	2 200
2	FRP(压)	40	520	2 200

2.2 释放复合横担结构静力学仿真分析

根据220 kV可释放复合横担塔的设计条件，结合计算复合横担挂点荷载，在数值仿真分析中，荷载施加在双C型转动节点挂线孔。此220 kV可释放性复合横担塔控制工况荷载见表4。

表4 220 kV可释放复合横担结构控制荷载

Table 4 Control loads of 220 kV releasable CICA structure

编号	工况	横向荷载 F_x/kN	纵向荷载 F_y/kN	垂向荷载 F_z/kN
1	大风工况	60.42	0.00	46.73
2	断线工况	0.00	41.85	38.97
3	安装起吊工况	3.53	0.00	93.81
4	安装起吊工况(2倍过载)	7.06	0.00	187.62

2.3 节点的应力与位移分析

可释放复合横担支柱的法兰与端部金具在实际工程中是通过螺栓相连接的，采用固定约束，端部金具螺栓孔周围节点的自由度与钢套管上螺栓孔周边节点的自由度保持一致，确保了力的有效传递。考虑到横担与塔身连接以及试验情况，横担支柱底部进行全约束(固接)；横担受拉线路绝缘子底部采用铰接，即其底部各个方向的位移为零。荷载施加位置为端部节点挂线孔处，在不同控制工况下，端部节点必须运行良好，不发生断裂、大变形等异常现象。

2.3.1　整相复合横担仿真分析

受拉线路绝缘子底部采用铰接，受压支柱绝缘子底部进行全约束（固接），可释放复合横担主要是采用 B 型端部节点及双 C 型转动节点，有限元计算[15-16]时，采用固定单元连接螺栓孔模拟连接机构（图 4）。

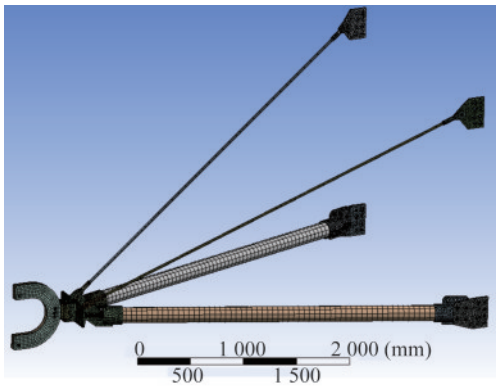
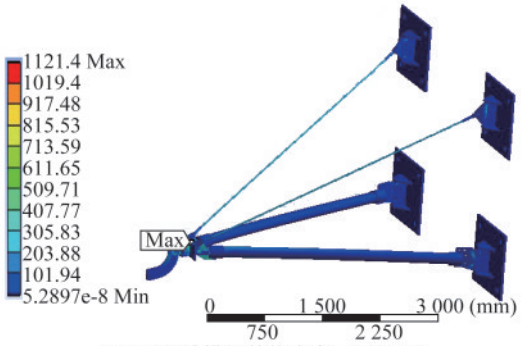


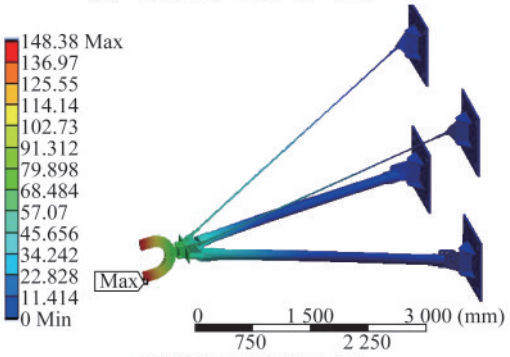
图 4　端部节点仿真分析

Fig.4　End node simulation analysis

释放复合横担整体受力分析，结果如图 5 所示（以安装工况为例）。



(a) 可释放横担整体应力云图(MPa)



(b) 可释放横担整体位移云图(mm)

图 5　复合横担仿真分析结果

Fig.5　Simulation analysis results of CCA

从图 6 可见，在第 3 种工况下可释放性复合横担整体处于较高应力水平，最大应力为 257 MPa，横担的最大位移约为 54 mm，满足运行要求。从第 4 种过载工况可以看出横担压杆整体处于最高应力水平，最大应力为 502 MPa。横担压杆的最大位移约为 109 mm，但其仍处于弹性工作阶段，且具有一定的安全裕度。

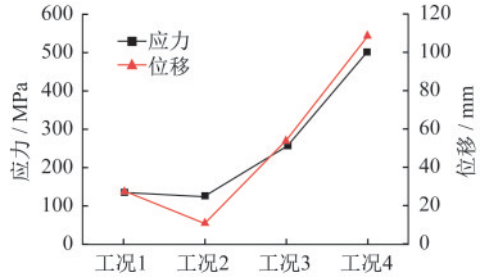
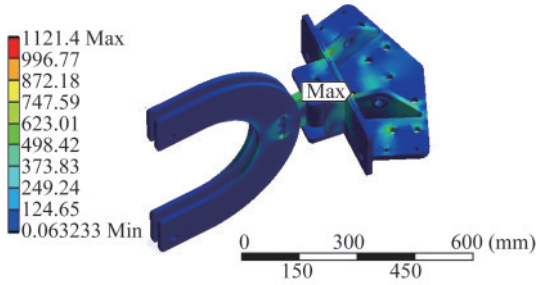


图 6　4 种工况下横担仿真结果

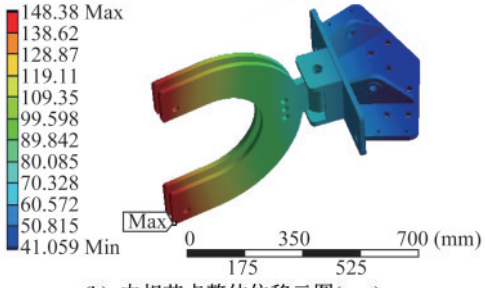
Fig.6　CCA simulation results under four working conditions

2.3.2　可释放性横担端部节点仿真分析

针对 220 kV 释放性复合横担主要是采用 B 端部节点及双 C 型转动节点组合形式，有限元计算时，一方面采用固定单元连接螺栓孔模拟连接形式，另外一方面采用转动约束。对其端部节点金具进行仿真分析，其结果如图 7 所示（以安装工况为例）。



(a) 中相节点整体应力云图(MPa)



(b) 中相节点整体位移云图(mm)

图 7　端部节点仿真分析结果

Fig.7　End node simulation analysis results

从图 8 可见，在第 2 种工况下，端部节点的应力最大值为 559 MPa，出现在线路绝缘子金具连接处。对于端部节点，其材料为 Q355 钢，屈服强度设计值为 355 MPa，考虑连接孔及边界应力集中的影响，满足使用要求，同时应力无突变现象，

应力分布合理，满足运行要求。对于过载工况，端部节点金具的拉杆孔处应力较大，最大应力达到485 MPa，端部金具位移最大为256 mm。横担压杆端部连接件均处于弹性工作阶段，且具有一定的安全裕度。

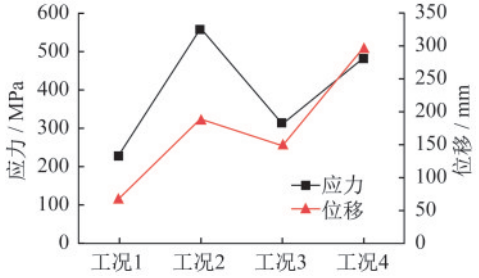


图8 四种工况下节点最大应力和位移仿真结果

Fig.8 Simulation results of nodes under four working conditions

3 试验研究

为了对初步的理论设计结果进行进一步的研究和验证，本文针对220 kV可释放性复合横担进行了过载试验研究。

3.1 试验加载装置

整相横担过载试验的装置主要包括试验反力系统、液压伺服结构试验机及多通道应变数据采集系统（DH3820）等。试验模型如图9所示。

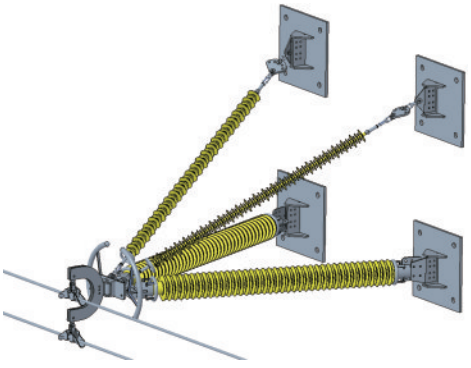


图9 复合横担试验模型

Fig.9 Experimental model of CICA

试件荷载加载方式如图10所示。三向荷载由试验反力系统加载并通过数据采集系统记录数据。

如图11所示，试验的反力系统由L形反力墙与门式钢框架组成，L形反力墙提供X向与Y向反力，门式钢框架提供Z向反力。X/Y/Z三个方向的荷载分别由300/1 000/300 kN液压伺服作动器控制。

本试验中应变与位移数据采用DH3820数据

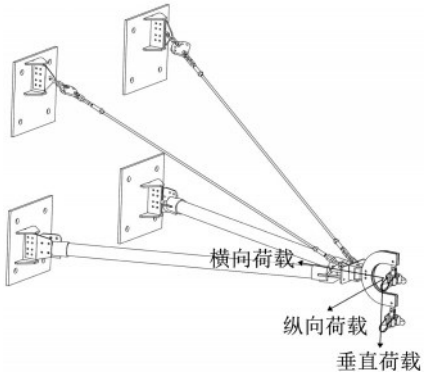


图10 试件加载示意图

Fig.10 Schematic diagram of specimen loading

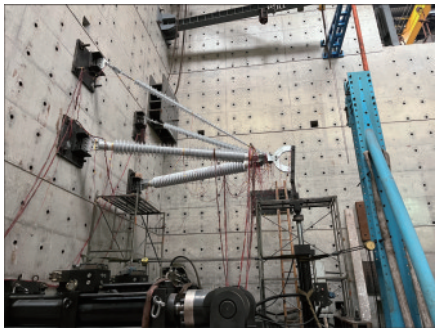


图11 现场试件加载装置

Fig.11 On site specimen loading device

采集记录仪（图12）进行采集，该设备可以同时采集128个通道的荷载、应变、位移等数据。应变测量采用BX120-3AA应变片和BX120-3CA三向应变花。

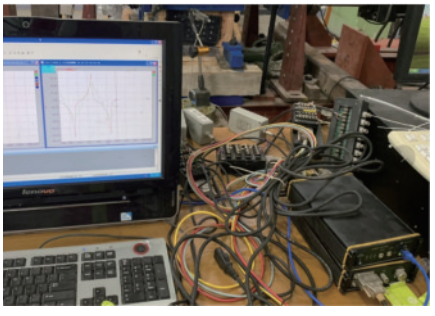


图12 DH3820数据采集系统

Fig.12 DH3820 data acquisition system

3.2 加载和测量方案

试验测量参数为结构整体位移及构件局部应力，测量点、加载及测量方式如下文所述。

（1）试件整体位移测点布置在横担端部，在X方向、Y方向与Z方向（如图13所示）各布置一个拉线位移计。

复合横担过载试验时将构件固定在反力墙

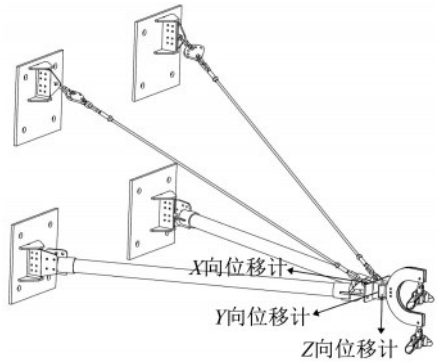


图 13　位移计布置示意图

Fig.13　Displacement meter layout diagram

上，通过反力系统、伺服液压作动器进行加载。除去材料分散系数和环境影响系数的影响，过载需要加载到控制工况的200%，横担才会开始出现破坏，由于考虑设计安全系数及结果离散性问题，最大过载可能需要加载到控制工况的250%，此时过载的工况荷载：安装起吊工况为8.83 kN（横向荷载）、0 kN（纵向荷载）、234.53 kN（垂向荷载）；设计极限工况，即断线工况设计工况荷载为0 kN（横向荷载）、41.85 kN（纵向荷载）、38.97 kN（垂向荷载）。

通过试验采集的应变数据可以计算出各个加载阶段复合横担支柱绝缘子、线路绝缘子以及端部节点金具的内力值，同时对加载过程进行监测。应变片具体布置如图14所示。

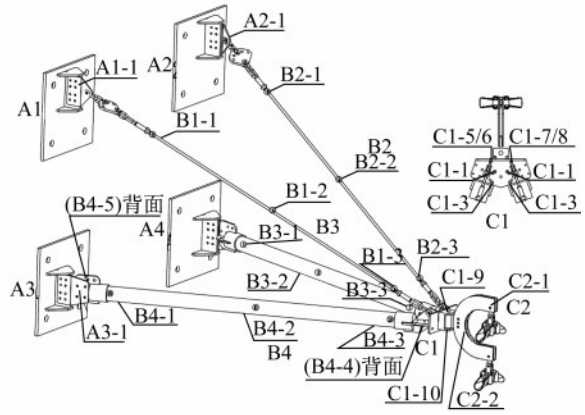


图 14　CICA对应变片布置示意图

Fig.14　Layout of CICA strain gauges

3.3　试验结果及讨论

试验采用位移加载控制，先预加载后正式分级加载。预加载旨在检查装置是否可靠、全部测试仪器仪表是否正常工作，保证加载系统运行良好、荷载与变形关系稳定。预加载荷载取试验工况最大荷载的20%。

3.3.1　断线工况

在断线工况下，转动节点横担端部C1节点的最大拉应变出现在C1-6位置的C1-6-2应变片，最大拉应变为493 με；最大压应变出现在C1-9位置的C1-9-1应变片，最大压应变为−1 091 με。C2节点最大拉应变出现在C2-2位置的C2-2-3应变片，最大值为1 110 με。在该工况下，端部节点的设计具有一定的安全裕度。

3.3.2　过载工况

过载工况试验时需加载至标准设计荷载的200%以上。在加载前期，试件无明显的破坏现象；当荷载施加至240%时，垂向荷载基本达到峰值，横担端部金具整体发生扭转现象；除端部金具存在扭转外，试件无明显的破坏。

3.3.3　安装起吊工况

在安装起吊工况下，试件的变形状态如图15所示，试件端部节点在X、Y、Z三个方向的荷载-位移关系曲线如图16所示。试件端部节点最大垂向位移值为247.5 mm。

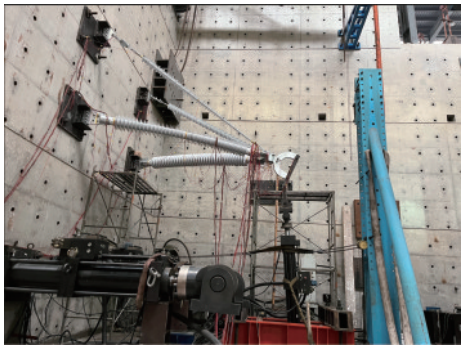


图 15　试件整体变形图

Fig.15　Overall deformation photo of the specimen

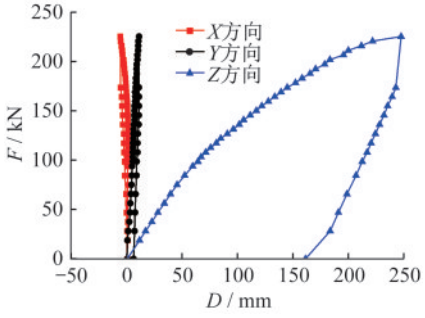
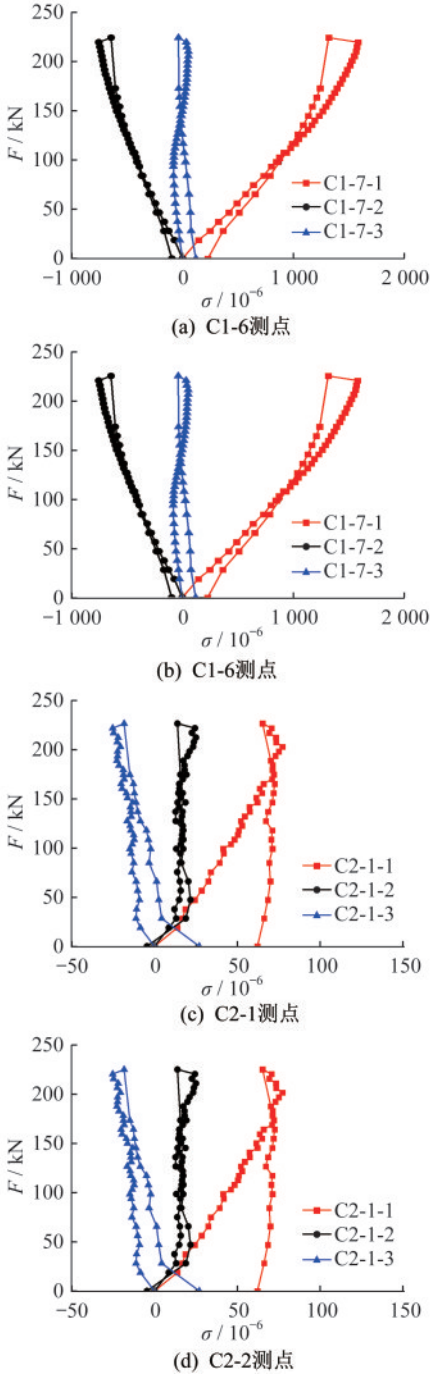


图 16　试件整体荷载-位移曲线

Fig.16　Overall load-displacement curves of the specimen

在安装起吊工况下，转动节点横担端部C1节点与C2节点的荷载-应变关系曲线如图17所示。最大拉应变出现在C1-7位置的C1-7-1应变片，最大拉应变为1 580 με；最大压应变出现在C1-6位置的C1-6-2应变片，最大压应变为−1 244 με。C2节点的应变较小，最大压应变出现在C2-2位置的C2-2-3应变片，最大值为−696 με。在该工况下，端部节点的设计是安全的，并具有一定的裕度。



(a) C1-6测点

(b) C1-6测点

(c) C2-1测点

(d) C2-2测点

图17 C区测点荷载-应变曲线

Fig.17 Load-strain curve of measuring point in area C

4 结 论

本文结合南网沿海220 kV线路，对220 kV可释放性复合横担端部节点进行了设计研究，针对已有的工程应用，对节点金具进行创新性优化设计，通过有限元仿真分析结合整相横担过载试验验证，得出主要结论如下：

（1）从理论分析及试验结果可以看出，可释放性复合横担组成构件的应力、位移及应变值均满足设计要求，未出现构件破坏情况，在设计荷载下，能保证结构正常运行安全。

（2）在安装起吊工况与断线工况下，转动节点横担压杆呈压弯状态，试件轻微向上拱起，最大位移出现在安装起吊工况下，最大垂向位移值为247.5 mm，试件整体受力性能良好，没有出现强度破坏和明显的变形。结合试验结果，针对双C型节点可能会上翘的情况，后续设计要考虑消除连接间隙的影响。

（3）在安装起吊工况与断线工况下，转动节点横担各部位的应变均未超出屈服强度，现有设计具有一定的安全裕度。

（4）采用新型可释放性复合横担设计方案，省去了传统悬垂串布置，当导线受到不平衡张力时，双C型节点的转动会释放掉一部分纵向不平衡张力，双C型节点本身具有足够的抗弯承载力以承受剩余的纵向不平衡张力。

参 考 文 献

[1] 杨林，王虎长，赵雪灵.复合材料在输电杆塔中的应用研究[J].中国电力，2014，47(1)：53-56.
Yang Lin, Wang Huchang, Zhao Xueling. Application research of FRP in the transmission structures [J]. Electrical Power, 2014, 47(1): 53-56.(in Chinese)

[2] 王虎长，胡建民，赵雪灵.玻璃钢复合材料轴压构杆稳定性分析[J].电力建设，2011，32(9)：85-89.
Wand Huchang, Hu Jianmin, Zhao Xueling. Stability analysis of axial compression component of FRP [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(9): 85-89.(in Chinese)

[3] 张磊，孙清，王虎长.玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能试验研究[J].电力建设，2010，31(9)：118-121.
Zhang Lei, Sun Qing, Wang Huchang. Experimental study on the mechanical properties of e-glass fiber/epoxy composite material [J]. Electric Power

Construction,2010,31(9):118-121.(in Chinese)

[4] 张文锋,曹明阳,李志伟,等.门型水泥杆塔中相复合横担新型节点设计研究[J].玻璃钢/复合材料,2019(9):93-99.
Zhang Wenfeng, Cao Mingyang, Li Zhiwei, et al. Study on the design of a new type of composite crossarm node in the middle phase of a portal cement tower[J]. Fibre Reinforced Plastics/Composite, 2019(9):93-99.(in Chinese)

[5] 孙强,朱勇,施荣,等.750 kV复合横担连接节点受力计算[J].电网与清洁能源,2014,30(2):38-42.
Sun Qiang, Zhu Yong, Shi Rong, et al. Forces on 750 kV composite insulator joints of the cross arm[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2014,30(2):38-42.(in Chinese)

[6] 李亮,何江,赵峥.500 kV双回路复合横担紧缩型塔设计及数值模拟分析[J].电力勘测设计,2020,(S2):179-184.
Li Liang, He Jiang, Zhao Zheng. Design method and numerical simulation analysis on 500 kV double circuit composite crosss-arm shrunk type tower [J]. Electrical Power Survey & Design, 2020, (S2): 179-184.(in Chinese)

[7] 李俊游,周志文,侯子龙,等.复合绝缘横担技术在500 kV架空输电线路上的应用[J].浙江电力,2020(10):74-79.
Li Junyou, Zhou Zhiwen, Hou Zilong, et al. Application of the composite insulation cross-arm technology in 500 kV overhead transmission lines [J]. Zhejiang Electrical Power, 2020, (10): 74-79.(in Chinese)

[8] 袁金,邢照亮,张卓,等.500 kV可踩踏复合绝缘横担塔设计及真型试验[J].绝缘材料,2021,54(4):50-57.
Yuan Jin, Xing Zhaoliang, Zhang Zhuo, et al. Design and true type test of trampled composite insulation cross arm tower for 500 kV line [J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 50-57.(in Chinese)

[9] 施荣,郁杰,朱勇,等.750 kV输电塔复合横担选型及承载力研究[J].电网与清洁能源,2013,29(9):23-26,44.
Shi Rong, Yu Jie, Zhu Yong, et al. Research on bearing capacity and composite cross arm selection for the 750 kV transmission tower [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 23-26, 44.(in Chinese)

[10] 孙涛,赵雪灵,高理迎.特高压直流线路复合材料转动横担设计[J].电力建设,2014,35(9):35-38.
Sun Tao, Zhao Xueling, Gao Liying. UHVDC transmission line rotation cross arm design for fiber reinforced plastic [J]. Electrical Power Construction, 2014, 35(9): 35-38.(in Chinese)

[11] 左玉玺,薛更新,孙强.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.
Zuo Yuxi, Xue Gengxin, Sun Qiang. Research on the design of composite cross arm for 750 kV transmission line[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1): 1-8.(in Chinese)

[12] 吴庆华,吴海洋.复合材料杆塔在直流接地极线路工程的应用研究[J].电力勘测设计,2010(6):60-64.
Wu Qinghua, Wu Haiyang. Research on application of FRP to electrode line project [J]. Electric Power Survey & Design, 2010(6): 60-64.(in Chinese)

[13] 杨敏祥,陈原,李卫国,等.复合材料杆塔研究现状及关键技术问题[J].华北电力技术,2010(10):48-50.
Yang Minxiang, Chen Yuan, Li Weiguo, et al. Research progress on composite tower and pole and its key technical problems [J]. North China Electric Power, 2010(10): 48-50.(in Chinese)

[14] 唐波,迟兴江,姚磊.新型绝缘输电杆塔的发展及展望[J].电力学报,2010,25(4):325-327.
Tang Bo, Chi Xingjiang, Yao Lei. Development and prospect new type electric power tower made in FRP [J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(4): 325-327.(in Chinese)

[15] 楚飞,雷宇,高瀚,等.基于ANSYS Workbench的顶驱提环侧连接板的拓扑优化设计[J].机械设计与研究,2019,35(1):189-191,195.
Chu Fei, Lei Yu, Gao Han, et al. Topology optimization design of side connecting plate of top drive based on ANSYS workbench [J]. Machine Design & Research, 2019, 35(1): 189-191, 195.(in Chinese)

[16] 王建中,龚超,谭潇,等.带钢暗梁的板柱结构边节点抗弯性能研究[J].结构工程师,2024,40(2):50-60.
Wang Jianzhong, Gong Chao, Tan Xiao, et al. Research on flexural performance of edge joint of column-slab structure with steel concealed-beam [J]. Structural Engineers, 2024, 40(2): 50-60.(in Chinese)