

# 复合材料输电杆塔设计方法讨论

柳欢欢<sup>1\*</sup>, 刘明慧<sup>2</sup>, 于鑫<sup>2</sup>

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 丹东供电公司, 丹东 118000)

**摘要:** 本文介绍了一种复合材料输电杆塔的设计思路及方法, 采用零阶优化算法计算出杆塔底径、锥度、厚度等最优尺寸参数, 使杆塔既满足设计要求同时也是质量最轻。在有限元分析软件 ANSYS 中建立了 110kV 复合材料杆塔计算模型并通过杆塔真型实验验证了该计算模型的准确性, 杆塔挠度计算值与实测值误差范围在 0.04% ~ 7.8% 之间。

**关键词:** 输电杆塔; 复合材料; 有限元; ANSYS; 玻璃钢

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2013)06-0048-05

## 1 前言

输电杆塔是电网构架的核心一次设备, 其构造和性能直接影响到电力输送的安全和维护检修难度。目前我国使用的输电杆塔主要为钢管塔和角钢塔, 传统杆塔存在易锈蚀、检修不便、维护成本高、占地面积大、线路走廊宽等问题。与此同时, 传统杆塔线路绝缘强度均依赖绝缘子串的绝缘性能, 在重污秽、重雷区易发生线路闪络事故, 给电网安全运行带来危害。为避免线路跳闸事故发生, 增加线路运行维护频率是方法之一, 但造成巨大的线路检修工作量, 导致线路运行成本上升。随着我国电网建设和改造规模不断扩大, 提高输电线路的运行可靠性、降低运维检修工作量和成本成为输电技术领域的一个重要发展方向。解决传统杆塔上述诸多问题的方法之一便是新材料技术的应用。使用玻璃纤维增强复合材料制备的输电杆塔质量轻、耐腐蚀、机械性能优良、绝缘性能突出, 能有效提高输电线路防雷、防污、防覆冰和防风偏能力, 可大幅降低输电线路的运维和检修成本。因此, 复合材料杆塔是替代传统杆塔成为新一代架空线路杆塔的理想高新技术产品。

复合材料结构精细, 研制成本高, 工艺复杂周期长, 特别是输电杆塔这类大型制件其模具制备周期通常为 30 ~ 40 天, 且开模费用高昂, 如以传统的配方试探加以研制, 反复开模试验需耗费大量的人力物力财力, 且难以得到准确而系统的科学结论。而应用有限元分析方法可以对复合材料实施优化设计、性能分析, 对材料承载受力破坏过程进行计算机数值模拟, 获得难以用传统试验获得的一系列信息, 再配以适当的实验来检验模型, 能够节约大量的费

用, 缩短研制周期<sup>[1]</sup>。

传统的输电杆塔设计软件采用有限元方法, 通常将杆塔模型简化成梁单元与杆单元进行计算分析, 这种方法计算简单, 效率高, 为大多数杆塔设计人员所采用。然而复合材料是一种各向异性材料, 即在不同方向具有不同的力学性能, 这种特性不同于各向同性的金属材料, 其受力行为为各方向综合作用的结果, 如果直接套用金属材料的计算方法显然不合适<sup>[2]</sup>。另一方面, 复合材料既是材料又是结构, 材料的铺层方式就是一种结构形式。基于以上两点, 采用有限元方法模拟复合材料力学行为, 其本构矩阵和离散方法均与金属材料不同, 其离散化是双重的, 既要对结构离散还要对铺层离散<sup>[3]</sup>。因此传统的有限元钢管塔设计方法不论在本构矩阵上还是在有限元模型处理上都不适用于复合材料输电杆塔的设计。本文旨在推荐一种复合材料输电杆塔的设计思路及方法。

## 2 复合材料杆塔有限元模型

在复合材料结构分析中, 已经广泛采用有限元数值仿真分析。目前, 在复合材料性能研究方面, 赵娜<sup>[4]</sup>等人采用 ANSYS 有限元软件计算大型风力叶片的仿真分析; 贾红雨<sup>[5]</sup>等人采用有限元方法对不同轮毂材料的储能飞轮转子进行了分析; 段成红<sup>[6]</sup>等人采用有限元对碳纤维缠绕复合气瓶爆破压力进行了分析。对复合材料的有限元计算, 其基本原理在本质上与各向同性材料相同, 只是离散方法和本构矩阵不同。复合材料有限元法中的离散化是双重的, 包括了对结构的离散和每一铺层的离散。这样的离散可以使铺层的力学性能、铺层方向、铺层形式

收稿日期: 2012-11-28

作者简介: 柳欢欢 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料在电力系统的应用研究, liuhuanhuan@sgepri.sgcc.com.cn。

直接体现在刚度矩阵中<sup>[7]</sup>。普通的杆塔设计软件多将构件离散成两节点单元进行计算,这种计算方法对各向同性的金属杆件比较简单有效,但其计算方程不适用于复合材料并且无法体现复合材料的铺层形式。因此对复合材料杆塔的分析计算应当采用四节点的壳单元<sup>[8]</sup>或八节点的实体单元<sup>[9]</sup>。如图1为在有限元软件中用六面体实体单元对复合材料横担的建模,该结构件由内至外共分三层,内外表面层为玻璃纤维布且按45°方向排布,中间层为0°玻璃纤维纱结构。将结构离散成有限数目单元体,对每个单元体应用弹性力学基本方程和最小势能原理进行联立求解,即可得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析,可解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。

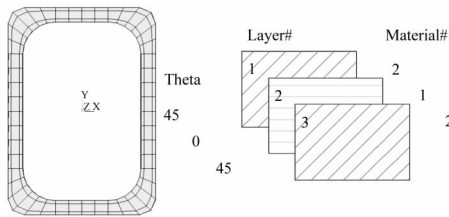


图1 复合材料横担铺层有限元建模  
Fig. 1 FEA model of laminated plate

$$\delta \Pi p = \int_V \delta \epsilon^T \sigma dV - \int_A \delta u^T P dA - \int_V \delta u^T G dV = 0 \quad (1)$$

式(1)就是最小势能原理,它是位移法有限元方法的力学基础。

### 3 设计构想

#### 3.1 材料性能设计

复合材料杆塔设计之初应先确定所用材料的性能参数,金属杆塔只需预先确定所用金属牌号如Q235、Q345即可查表获得所需材料参数。而复合材料既是材料又是结构,生产工艺、铺层方法、纤维和树脂材料的选取对最终制品的性能影响都比较大,因此制品的设计应先从材料设计开始。复合材料可通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此联系,从而获得新的优越性能。其在结构和性能上具有可设计性,且其材料和结构的设计是同步的<sup>[10]</sup>。相比金属杆塔,设计人员可以根据输电杆塔承受的载荷性质、大小以及性能要求,灵活地选择成型工艺及铺层方式来量身定制材料的力学性能。复合材料这种可设计性能极大提高材料利用效率。如图2所示,某构件其主要受轴向正拉力而横向受力较小,若选用金属材料则横向强度明显较富裕,材料的利用率不充分,倘若选用复合材料则设计人员可以根据

该构件受力情况使纤维按合适比例在横纵向铺放,适当降低材料横向强度提高纵向强度,以达到充分发挥材料性能的目的。

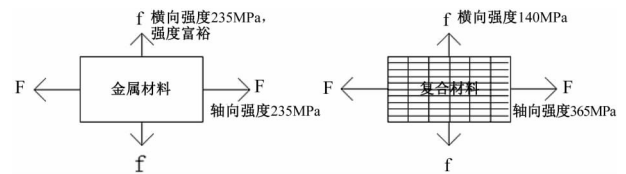


图2 金属材料与复合材料受力对比

Fig. 2 The contrast of metallic material and composite material

复合材料铺层设计应注意以下几点<sup>[11]</sup>:

(1) 有效传力。复合材料制品主要靠纤维来承受荷载,为了最大限度地利用纤维轴向的高性能,应该用0°铺层来承受纵向荷载;±45°铺层来承受剪切荷载;90°铺层来承受横向荷载,以避免树脂直接受载;

(2) 对于可能遭受垂直于铺层平面冲击的构件,在最外层铺设±45°层或加一层玻璃布,以提高抗冲击能力;

(3) 除特殊需要外,应采用均衡对称铺层方式,以免固化时或受载后因耦合效应引起翘曲。同一铺层角度不宜过于集中,以免出现层间分层。

考虑输电杆塔的受力情况主要承受弯矩,因此应适当提高杆塔轴向纤维含量以增强轴向强度和模量。

#### 3.2 杆塔关键参数设计

根据已设计好的铺层方式得到材料的力学性能参数后即可对杆塔进行设计。

**截面形状:**圆形截面受力最优,可避免应力集中现象。钢管塔由于加工的问题,杆身构件断面多采用多边形,边数越多受力越优但加工难度增大<sup>[12]</sup>。复合材料杆塔采用模具缠绕成型构件断面为圆环形,受力好材料相对损耗较小,且杆壁厚度不受工艺限制。同时复合材料耐候性好不需热镀锌等防腐处理。

**锥度:**杆塔的锥度主要根据杆塔所受荷载来确定,一般以弯矩曲率的外包络线为准,荷载越大所需锥度也越大<sup>[13]</sup>,但锥度过大直接导致根径增大,不仅浪费材料而且增加占地面积。对于复合材料杆塔虽然强度较高但模量相对较低,因此杆塔的设计宜采取挠度控制。因此锥度的确定应根据杆塔底径、各段壁厚、挠度限值共同确定,以达到质量最轻的目的。

**底径:**底径对杆塔的挠度控制起决定性作用,挠度与杆塔截面惯性矩I成反比,根据公式(2),可见杆塔直径对挠度的影响远大于壁厚,另一方面增大

杆径的同时势必会增加杆塔质量以及占地面积,因此应根据挠度限值,综合考虑多方因素来计算最优的底径。

$$I = \frac{\pi D^4}{64} (1 - \alpha^4) \quad (2)$$

式中  $\alpha = \frac{d}{D}$ 。

优化设计:综上所述,复合材料杆塔的设计应综合考虑杆塔底径、锥度、各段壁厚等参数。这就需要对结构进行优化设计,这是一种确定结构最优设计方案的技术。所谓最优设计,指的是一种方案可以满足所有的设计要求,并且所需的支出(重量、体积、应力、费用等)最合理。优化算法的种类很多,其中零阶方法是一个很完善的处理方法,可以有效地处理大多数工程问题。以一个分三段的复合材料杆塔为例,其设计变量包括:底径  $D$ ,各段锥度  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ,各段壁厚  $t_1, t_2, t_3$ ,共七个变量;此外还要引入状态变量,即约束设计的数值,如应力  $\sigma <$  设计强度,位移  $u <$  挠度限值;通过计算机程序不断地迭代计算,寻找一组最优的设计序列,即当设计变量取特定的数值时,既满足设计要求同时目标函数杆塔质量最轻<sup>[14]</sup>。

以某特定条件的复合材料杆塔为例,通过优化设计计算得到了一系列设计序列,如图3所示。

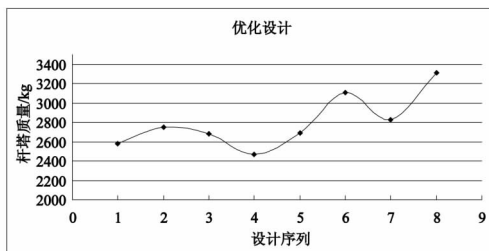


图3 杆塔设计尺寸与杆身重量图

Fig. 3 Design sizes correspond to the weight

根据以上设计序列可以找到当采用尺寸4时,杆塔即满足设计要求同时也是质量最轻,可见采用这种优化算法能够极大地降低研发成本。

## 4 ANSYS 仿真计算与实验对比

### 4.1 ANSYS 有限元计算

在有限元分析软件 ANSYS 中对复合材料杆塔进行有限元分析计算,复合材料杆塔塔身采用的是缠绕成型工艺其中涉及到铺层方式的设计,因此根据塔身的实际铺层设计采用四边形映射网格建模。按照《架空线路杆塔结构荷载试验》(DL/T899-

2004) 规定要求将风荷载作等效处理,将等效处理的荷载分别施加到杆塔各挂点上。建立了110kV终端杆塔塔头的有限元分析模型,图4与图5模拟了终端杆塔塔头及横担在30m/s、0°大风工况下的受力情况。该塔设计使用条件如下:电压等级为110kV,回路数为双回,水平档距为125m,垂直档距为150m,呼高为24m,导线型号为LGJ-400/35,地线型号为LBJ-150,最大覆冰厚度为5mm,最大风速为30m/s。

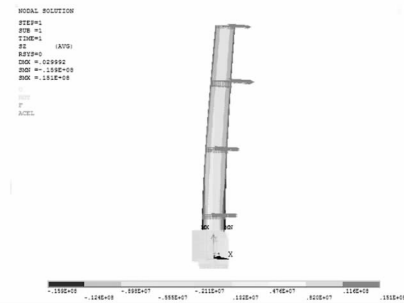


图4 杆身0°大风工况应力云图

Fig. 4 Stress cloud of 0° gale condition for tower

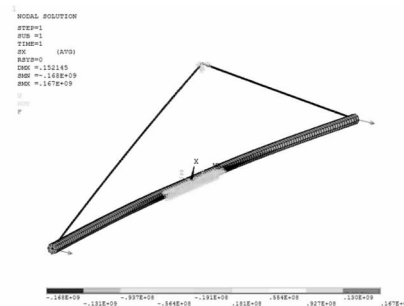


图5 横担0°大风工况应力云图

Fig. 5 Stress cloud of 0° gale condition for cross arm

从分析结果可以看出,杆塔塔头在30m/s、0°大风工况下,塔身挠度为29.9mm,最大压应力为15.9MPa,安全系数为11.3,最大应力出现在杆身根部被约束处,横担挠度为152.1mm,最大应力为168MPa,安全系数为7.1,最大应力出现在横担根部被约束处。从计算结果也可以看出,复合材料由于其本身高强度而低模量的性质,复合材料杆塔设计的主要控制因素应是挠度控制。

### 4.2 实验设计

为了验证上述分析的可行性,制备了1:1的复合材料杆塔塔头样品,基体选用改性聚氨酯树脂,增强纤维采用无碱玻璃纤维,在中国电科院北京良乡杆塔试验基地进行了七个工况的委托试验。试验现场照片如图6所示。



图6 现场试验照片  
Fig. 6 Photo of the experiment

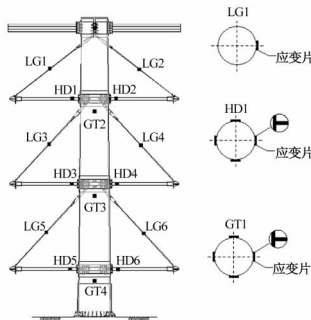


图7 应变片布置图  
Fig. 7 The arrangement of strain gauge

本试验采用应变片对整个试验过程中杆塔指定部位的应力进行监测,要求同时测量轴向应变和环向应变。应变片的布置如图7所示。

在各级荷载施加完毕,杆塔稳定后,测量杆塔变形。所用测量值均以杆塔未加荷载之前的中心线作为基准参照系。

复合材料塔头计算工况参照 GB-50545-2010《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》的荷载组合<sup>[15]</sup>。加荷级别按照《架空线路杆塔结构荷载试验》(DL/T899-2004)规定要求进行<sup>[16]</sup>。其中极限工况超载至345%,塔头各部杆件未见异常,如图8、图9所示为杆塔超载实验后,杆身及横担所受应力最大位置处,外观并未出现脱胶、开裂、泛白等现象,试件各部件未见异常。



图8 杆身根部约束处  
Fig. 8 Constraints of the tower



图9 横担根部约束处  
Fig. 9 Constraints of the cross arm

### 4.3 实验位移分析

整理杆塔塔头及横担实验位移与计算位移数据如图10、图11所示。

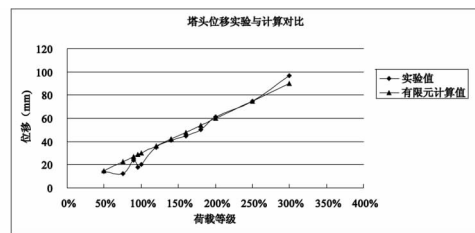


图10 塔头位移实验值与计算值对比  
Fig. 10 Tower displacement of the experimental and calculated values

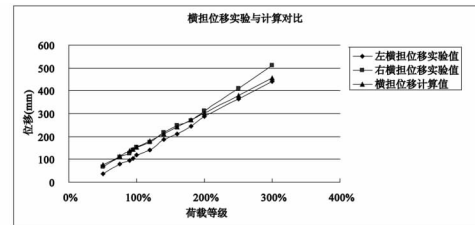


图11 横担位移实验值与计算值对比图  
Fig. 11 Cross displacement of the experimental and calculated values

从图中可以看出实验数据存在部分奇异值,剔除奇异数值后,塔头位移计算值与实验值误差范围为0.04%~7.8%,横担位移计算值与实验值误差范围为0.13%~7.44%,并且力-位移曲线图线性度较好,表明复合材料尚处在弹性变形阶段,进一步验证了杆塔的安全性还可承受更大的极限荷载。可以看出本文建立的复合材料杆塔有限元计算模型位移计算是可行的。从上图还可以看到随着加载等级的提高,计算误差逐渐减小,可从两方面来考虑,一方面工程装配存在装配间隙,随着加载等级的提高,装配间隙对挠度的影响越来越小;另一方面加载初期挠度值基数较小,较小的偏差也会产生很大的误差值波动。

### 4.4 实验应力分析

整理杆塔塔头及横担实验位移与计算位移数据如图12、图13所示。

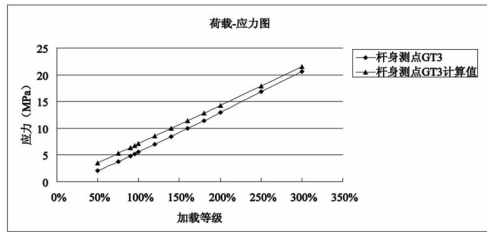


图 12 杆身测点应力值与计算值对比  
Fig. 12 The comparison of experimental and calculated values for stress

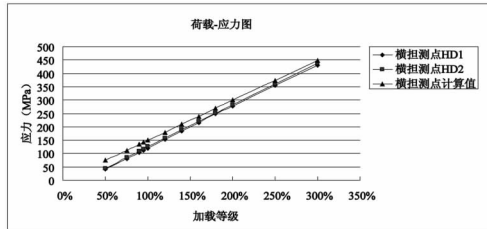


图 13 横担测点应力值与计算值对比  
Fig. 13 The comparison of experimental and calculated values for stress

从上图应力-应变曲线可以看到,塔身与横担的线性度非常好,表明了复合材料尚处在弹性变形阶段,也进一步验证了杆塔的安全性还可承受更大的极限荷载。塔身测点应力计算误差范围在 2 ~ 3MPa,横担应力计算误差范围为 2% ~ 10%,随着加载等级的提高误差逐渐减小。可以看出本文建立的复合材料杆塔有限元计算模型应力计算是可行的,能够满足工程实际需要。

## 5 结 论

(1) 复合材料性能具有可设计性,制品的设计应先从材料开始设计。设计人员应根据构件的受力情况来量身订制材料的力学性能;

(2) 采用合适的优化算法对设计参数进行优化选型,能够极大地降低产品生产成本;

(3) 杆塔超载实验超载至 345%,塔头各部杆件未见异常,塔头位移计算值与实验值误差范围为 0.04% ~ 7.8%,横担位移计算值与实验值误差范围为 0.13% ~ 7.44%。塔身应力计算误差范围为 2 ~

3MPa,横担应力计算误差范围为 2% ~ 10%,达到设计预期。也验证了本文建立的有限元模型能够很好地模拟复合材料的力学行为;

(4) 复合材料杆塔虽然强度较高但模量相对较低,因此杆塔的设计宜采取挠度控制。

## 参考文献

- [1] 廖英强, 苏建河. ANSYS 在复合材料仿真分析中的应用[J]. 玻璃纤维, 2006, (4).
- [2] Dimos J, Polyzois, Ioannis G, Raftoyiannis. Nonlinear shell-type to beam-type fea simplifications for composite frp poles[J]. Arch Appl Mech, 2009, 79: 347-358.
- [3] 周鹏展, 肖加余, 曾竟成, 王进, 杨军. 基于 ANSYS 的大型复合材料风力机叶片结构分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2).
- [4] 赵娜, 李军向, 李成良. 基于 ANSYS 建模的风力机叶片模态分析及稳定性分析[J]. 玻璃钢复合材料, 2010, (6).
- [5] 贾红雨, 张璐璐. 基于三种不同轮毂材料的储能飞轮转子有限元分析[J]. 玻璃钢复合材料, 2012, (7).
- [6] 段成红, 吴祥, 罗翔鹏. 碳纤维缠绕复合气瓶爆破压力的有限元分析[J]. 玻璃钢复合材料, 2012, (2).
- [7] S. Ibrahim, D. Polyzois. Ovalization analysis of fiber-reinforced plastic poles[J]. Composite Structures, 1999, (45): 7-12.
- [8] Amir Fam, Yail J. Kim, Je-Kuk Son. A numerical investigation into the response of free end tubular composite poles subjected to axial and lateral loads[J]. Thin Walled Struct, 2010, 44: 002.
- [9] Shin-etsu Fujimoto, Hideki Sekine. Identification of crack and disband fronts in repaired aircraft structural panels with bonded FRP composite patches.
- [10] 李顺林, 王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 湖北: 武汉工业大学出版社, 1993. 1-6.
- [11] 赵美英, 陶梅贞. 复合材料结构力学与结构设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [12] 陆洲. 220kV 钢管杆设计的最优参数及设计要点[J]. 红水河, 2007, (2).
- [13] 沈才元, 章志鸿. 110kV 钢管杆设计的几点思考[J]. 华东电力, 2003, (12).
- [14] Amir Fam, Je-Kuk Son. Finite element modeling of hollow and concrete-filled fiber composite tubes in flexure: Optimization of partial filling and a design method for poles[J]. Engineering Structures, 2008, (30): 2667-2676.
- [15] GB-50545-2010, 110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范[S].
- [16] DL/T899-2004, 架空线路杆塔结构荷载试验[S].

## THE DISCUSSION OF DESIGNING FIBER REINFORCE PLASTIC TRANSMISSION TOWER

LIU Huan-huan<sup>1\*</sup>, LIU Ming-hui<sup>2</sup>, YU Xin<sup>2</sup>

(1. Wuhan Nari Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Dandong Power Supply Company, Dandong, 118000, China)

**Abstract:** The paper introduced a method to design FRP transmission tower, used an optimization algorithm calculating the most suitable structure for FRP transmission tower, and build a mathematical model in ANSYS for 110kV FRP transmission tower. The experiment illustrated that the mathematical model in this paper is credible.

**Key words:** transmission tower; composite; FEA; ANSYS; FRP