

文章编号:1673-2049(2019)04-0071-09

输电线路风致倒塌失效分析及监测方案

肖凯¹,付兴²,雷旭¹,汪佳²,谢文平¹,李宏男²,聂铭¹

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院,广东 广州 510080;

2. 大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024)

摘要:为研究输电线路的抗风性能及现场监测方案,利用 ANSYS 软件对整个耐张段的抗风承载力进行了模拟。以广东省 2 条正在运营的输电线路为工程背景,建立了 2 条耐张段输电线路有限元模型。对模型施加风荷载并不断调整风速,完成了非线性静力倒塌分析,进而研究了规范中提到的潜在最不利风攻角的影响;根据应力云图和振型等信息对应变及加速度传感器的布置方案进行了设计;通过对实测的加速度数据进行分析,得到了 32[#] 塔 2 个水平方向的前 2 阶频率。结果表明:121[#]~129[#] 耐张段中 124[#] 塔首先发生破坏,最不利风攻角为 90°,临界倒塌风速为 34.91 m·s⁻¹,与设计风速 35 m·s⁻¹ 非常接近;30[#]~34[#] 耐张段最先失效的铁塔为 32[#] 塔,最不利风攻角为 60°,临界倒塌风速为 45.6 m·s⁻¹,大于其设计风速 35 m·s⁻¹,这是因为设计时采用的是双分裂导线,而实际工程采用单根导线;实测结果与有限元仿真结果两者的相对误差小于 10%,说明了监测数据的可靠性;铁塔首先进入屈服的位置一般为变坡处上下连接主材、塔身横隔上方连接主材和塔腿主材,并且主材应力较大区域往往与主材截面规格变化处相吻合,因此这些位置在设计及监测时需要加以重视。

关键词:输电塔线体系;失效机制;非线性静力分析;健康监测

中图分类号:TU347

文献标志码:A

Failure Analysis of Transmission Line Subjected to Wind Loading and Monitoring Scheme

XIAO Kai¹, FU Xing², LEI Xu¹, WANG Jia², XIE Wen-ping¹, LI Hong-nan², NIE Ming¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the wind resistance performance of transmission lines and on-site monitoring scheme, the wind resistance capacity of the whole tension section was simulated by ANSYS software. Based on the engineering background of two practical transmission lines in Guangdong Province, the finite element models of two tension-resistant sections were established. By applying wind loads on the model and continuously adjusting the wind speed, the non-linear static collapse analysis was completed, and the influence of the potential worst wind attack angle mentioned in the code was studied. Based on the information of stress nephogram and mode shape, the layout scheme of strain and acceleration sensor was designed. Through

收稿日期:2018-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51708089,51421064);中国博士后科学基金项目(2019T120207,2017M620101);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT19RC(4)021);中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ20153009)

作者简介:肖凯(1986-),男,湖南益阳人,工程师,E-mail:xk0606@sina.cn。

通信作者:付兴(1988-),男,辽宁葫芦岛人,讲师,工学博士,E-mail:fuxing@dlut.edu.cn。

analyzing the measured acceleration data, the first two order frequencies of 32[#] tower in two horizontal directions were obtained. The results show that 124[#] tower in tension section 121[#]-129[#] was damaged firstly. The most isadvantageous attack angle was 90°. The critical collapse wind speed was 34.91 m · s⁻¹, which was very close to the design wind speed of 35 m · s⁻¹. 32[#] tower is the first failure tower in tension section 30[#]-34[#], and the most disadvantageous wind attack angle is 60°, as well as the critical collapse wind speed is 45.6 m · s⁻¹, which is larger than the designed wind speed of 35 m · s⁻¹. This is because the double split conductor is used in the design, while the single conductor is used in the actual project. The relative error between the measured results and the finite element simulation results is less than 10%, which shows the reliability of the monitoring data. The connection main material up and down the changing slope, connection main material above tower body diaphragm and main material of tower legs are the firstly yielded members of tower. The areas where the stress of the main material is larger often coincide with the changes of the cross-section specifications of the main material. Therefore, attention should be paid to these locations in the design and monitoring of the main material.

Key words: transmission tower-line system; failure mechanism; nonlinear static analysis; health monitoring

0 引 言

输电塔线体系是电力系统的重要组成部分,其安全性问题直接影响国家的生产建设以及人民的生活秩序。对于输电塔线体系来说,风荷载是极其重要的控制荷载,起着决定性作用^[1]。中国幅员辽阔,风灾频繁发生,尤其是东南沿海区域,每年夏季均有台风过境,造成了大量的输电线路破坏。因此,非常有必要针对输电塔线体系开展倒塌仿真及健康监测研究工作,以发现设计过程中存在的缺陷和不足,进而提高和补强结构抵抗外部环境荷载灾害性破坏的能力^[2]。

输电线路兼有塔状高耸结构和大跨度结构的共同特点,对风作用反应敏感,容易发生振动疲劳损伤和极端条件下的动态倒塌破坏^[3]。Ozono 等^[4]提出了 2 种求解输电塔线耦联体系平面动力特性的计算模型,即在高频段简化为塔线耦联摆动模型,在低频段简化为塔线多质点模型,同时分析了塔线跨数、边界条件、导线质量和垂跨比等因素对塔线体系动力响应的影响及塔线耦合效应。梁枢果等^[5]以广东罗江 500 kV 输电线路为工程背景进行了塔线体系气弹模型风洞试验,研究了导线及不同来流风攻角对输电塔动力特性的影响,试验结果表明,塔体结构的加速度响应随风速单调增加,顺风向加速度响应主要来自第 1 阶振型的贡献。Okamura 等^[6]对跨越山区输电线路的风场特性、输电塔的动力响应规律进行了实测,并在风洞中对山区风场做了模拟分析,

数值分析和实测结果均表明风攻角是跨越山区输电线路风致动力响应的重要影响因素。Albermani 等^[7]将输电塔杆件用梁单元简化并考虑几何及材料非线性,研究了输电塔的整体破坏及局部节点失效,该数值方法可广泛应用于工程设计及已有结构的改造加固。王锦文^[8]利用塑性疲劳破坏模型模拟了输电塔结构在下击暴流作用下的倒塌过程,结果表明,输电塔结构首先从结构中下部主材发生塑性疲劳破坏,继而引发其他杆件失效,最终导致输电塔整体发生倒塌。孟令星等^[9]在考虑导线影响的基础上,模拟了不同风速、不同攻角下输电塔的倒塌破坏,结果表明,在 0°,45°,90°风攻角作用下,输电塔倒塌路径相似,在 0°风攻角下最易倒塌。

结构健康监测技术可为输电线路的维护、检修和管理决策提供依据和参考,对于保障输电线路的安全具有重要现实意义。汪江等^[10]以 500 kV 淮蚌线蚌埠-淮河大跨越输电塔实际工程为例,设计开发了在线监测和模态分析系统,实现了输电塔振动信号、气象环境信息的不间断监测。曹海林等^[11]提出了一种基于智能天线、扩频技术的超高输电塔变形测量方案和一种基于平面阵的二维多重信号分类的改进算法,实现了对超高输电塔的变形以毫米级精度进行实时监测。林友新等^[12]指出单元模态应变损伤指数法能够准确地识别出结构的损伤位置,并可在某种程度上反映出损伤程度,可以应用到实际输电塔结构损伤识别中。楼文娟等^[13]提出了利用环境激励下的结构振动曲线进行小波变换的结构损

伤位置识别方法,并将该方法应用于大型输电铁塔的损伤位置识别。

从上述文献中可以看出:国内外学者对输电塔的动力响应及倒塌过程开展了大量研究工作,但在倒塌机理方面还有待进一步深入研究;结构健康监测系统在许多大跨结构及超高层上得以实现^[14-16],但针对输电塔线体系实施的监测系统还非常少。本文以广东省 2 条实际运营的输电线路为工程背景,分别选取上述输电线路中的 2 个耐张段建立有限元模型,研究其倒塌规律和状态,确定该输电线路的现场监测方案。

1 耐张段有限元模型

本文选取广东省 2 条输电线路的 121[#]~129[#]耐张段和 30[#]~34[#]耐张段为研究对象。2 条输电线路铁塔的杆件截面均为角钢,121[#]~129[#]耐张段主材采用 Q345 钢材,辅材采用 Q235 钢材,铁塔高度在 38~54 m 范围内变化。30[#]~34[#]耐张段主材和辅材均采用 Q235 钢材,铁塔高度在 25~34 m 范围内变化。121[#]~129[#]耐张段的导线型号为 JL/LB20A-630/45 型铝包钢芯铝绞线,地线型号为 OPGW-105 光缆,绝缘子型号为 FXBW3-220/100-C 型复合绝缘子。30[#]~34[#]耐张段的导线型号为 LGJX-240/30 型铝包钢芯铝绞线,地线型号为 LGJX-240/30,绝缘子型号为 FC70P/146 型复合绝

缘子。2 条输电线路均依照《110~500 kV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092—1999)^[17]进行设计,设计风速为 35 m·s⁻¹。2 条耐张段输电线路信息如表 1,2 所示。

考虑到耐张塔刚度很大,同时为进一步降低模型单元数量,故模型中没有建立耐张塔,与耐张塔相连的导地线直接铰接固定。利用 ANSYS 软件建立模型时,采用 Beam188 单元模拟输电塔杆件,Link10 单元模拟导地线,Link8 单元模拟绝缘子;对每一档距的导地线进行自重作用下的迭代找形。对于输电塔来说,铁塔倒塌的直接原因往往不是材料强度达到极限值,而是初始缺陷引起的杆件屈曲失稳。为使有限元模型更加符合实际,塔线体系模型在分析前需要施加缺陷,在施加缺陷时需依次单独选中各塔,逐塔施加缺陷,获得整个耐张段模型,建立的 2 条耐张段输电线路模型如图 1 所示。设置材料非线性,在各塔风荷载模拟点和导地线节点施加风荷载,不断调整风速,直至输电线路中某铁塔失效倒塌。完成各风攻角下的静力推覆分析后,即可获得该输电线路的非线性静力倒塌曲线。Q235、Q345 钢材的屈服强度分别为 235 MPa 和 345 MPa,弹性模量为 206 GPa,钢材本构关系采用理想弹塑性模型。材料非线性在 ANSYS 中设置非常简单,但考虑杆件缺陷相对比较复杂,需要进行屈曲分析,具体流程^[18]如图 2 所示。在进行静力分析时需

表 1 121[#]~129[#]耐张段输电线路信息

Tab. 1 Information of Transmission Line 121[#]-129[#]

杆塔运行编号	杆塔型号	档距/m	实际水平档距/m	实际垂直档距/m	呼高/m
121 [#]	BJ361-21	455.0	405.0	285.0	21.0
122 [#]	BZ362-27	439.0	447.0	435.0	27.0
123 [#]	BZ362-37	315.0	377.0	428.0	37.0
124 [#]	BZ361-27	371.0	343.0	332.0	27.0
125 [#]	BZ361-24	354.0	363.0	405.0	24.0
126 [#]	BZ362-23	484.0	419.0	383.0	23.0
127 [#]	BZ362-33	235.0	360.0	369.0	33.0
128 [#]	BZ362-36	181.0	208.0	438.0	36.0
129 [#]	2F2W9-J1-26		261.0	335.0	26.0

表 2 30[#]~34[#]耐张段输电线路信息

Tab. 2 Information of Transmission Line 30[#]-34[#]

杆塔运行编号	杆塔型号	档距/m	实际水平档距/m	实际垂直档距/m	呼高/m
30 [#]	ZM4-21	285.0	290.0	—	21.0
31 [#]	ZM1-21	178.0	231.5	—	21.0
32 [#]	ZM1-30	149.0	163.5	—	30.0
33 [#]	ZM1-21	220.0	184.5	—	21.0
34 [#]	ZM1-21	238.0	229.0	—	21.0

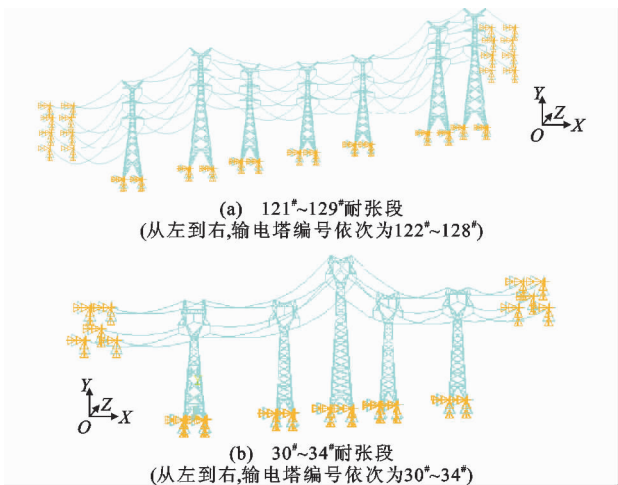


图 1 整个耐张段有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model of Entire Tension Section

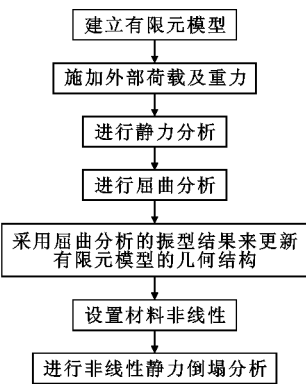


图 2 输电线路非线性静力倒塌分析流程

Fig. 2 Flowchart of Non-linear Static Collapse Analysis of Transmission Lines

要开启预应力效应,同时只采用最低阶屈曲模态来更新有限元模型的几何结构。

2 非线性静力倒塌分析

获得整个耐张段输电线路仿真模型后,将各输电塔从上到下简化成若干风荷载模拟点,在各塔的风荷载模拟点和所有导地线节点处施加风荷载,风荷载根据《110~500 kV架空送电线路设计技术规

程》(DL/T 5092—1999)^[17]的规定进行计算。目前铁塔设计的最新规范为 DL/T 5154—2012,本文采用老规范的目的是对既有线路和原始设计进行校核。规范中提到输电线路的潜在最不利风攻角 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,风攻角定义如图 3 所示,并给出了铁塔和导地线在上述 4 个风攻角下的风荷载分配,如表 3 所示。不断增大风速,对输电线路在不同风攻角下进行 Pushover 分析,风速增量为 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,可得到该输电线路中各塔塔顶位移随风速的变化规律。

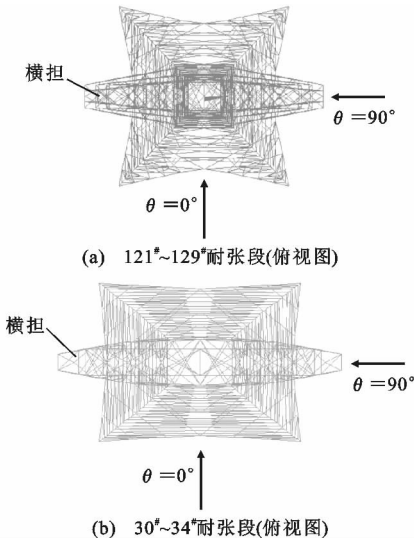


图 3 风攻角示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Wind Attack Angle

2.1 121#~129#耐张段

在上述 4 个风攻角的静力推覆下,该耐张段均在 124# 塔首先发生破坏,该塔在 4 个风攻角下的推覆曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,最不利风攻角为 90° ,该塔的临界倒塌风速为 $34.91\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 4 中各风攻角的风荷载 Pushover 分析曲线出现 2 次跳跃,原因在于按照上述规范计算导地线风荷载时风压不均匀系数的取值不连续。

整个耐张段在风攻角为 90° 时的临界倒塌时刻

表 3 潜在最不利风攻角的风荷载分配

Tab. 3 Wind Load Distributions Under Unfavorable Wind Attack Angles

风攻角 $\theta/(^\circ)$	线条风荷载		塔身风荷载		水平横担风荷载	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
0	0	$0.25W_X$	0	W_{SY}	0	W_{SC}
45	$0.5W_X$	$0.15W_X$	$0.424K(W_{SX}+W_{SY})$	$0.424K(W_{SX}+W_{SY})$	$0.4W_{SC}$	$0.7W_{SC}$
60	$0.75W_X$	0	$K(0.747W_{SX}+0.249W_{SY})$	$K(0.431W_{SX}+0.144W_{SY})$	$0.4W_{SC}$	$0.7W_{SC}$
90	W_X	0	W_{SX}	0	$0.4W_{SC}$	0

注: W_X 为风攻角为 90° 时作用在导地线上的风荷载; W_{SX}, W_{SY} 分别为风攻角为 90° 和 0° 时对应的塔身风荷载; W_{SC} 为风攻角为 0° 时的横担风荷载; K 为塔身风荷载断面形状系数,本文取 1.0。

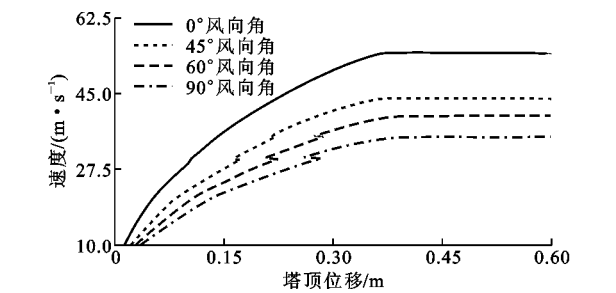


图 4 124# 塔风荷载 Pushover 分析结果

Fig. 4 Pushover Analysis Results of 124# Tower Under Wind Load

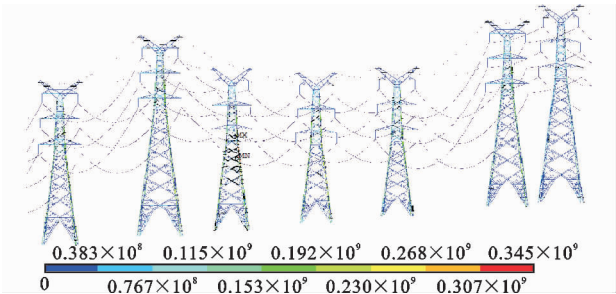


图 5 90°风攻角时整个耐张段的临界倒塌时刻应力云图
(单位:MPa)

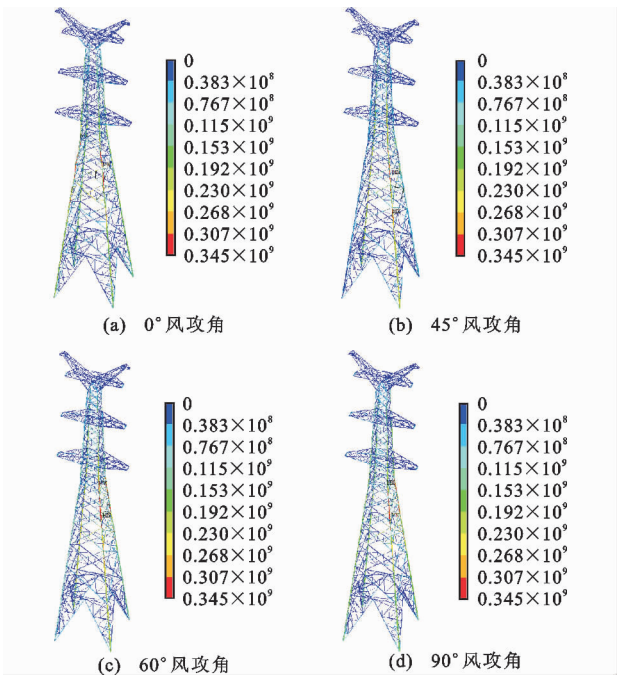


图 6 不同风攻角时 124# 塔临界倒塌时刻的应力云图
(单位:MPa)

Fig. 6 Critical Collapse Stress Nephograms of 124# Tower with Different Wind Attack Angles (Unit:MPa)

表 4 30#~34# 耐张段推覆结果

Tab. 4 Pushover Results of Tension Sections 30#-34#

风攻角/(°)	破坏塔号	临界倒塌风速/(m·s ⁻¹)
0	33#	55.5
45	32#	45.7
60	32#	45.6
90	31#	54.1

应力云图如图 5 所示。从图 5 可以看出,124# 塔的应力最大。图 6 给出了 124# 塔在 4 个风攻角下的临界倒塌时刻应力云图。从图 6 可以看出,各风攻角下,该输电塔首先进入屈服的位置有 2 处,分别为变坡处上下连接主材和塔身中部主材,故这 2 处位置在设计 and 监测时需要多加注意。变坡处和塔身中部是 2 个比较典型的铁塔杆件破坏失效位置,在很多倒塌案例中均有所报道^[8,19]。变坡处也是主材规格变化处,上部主材杆件截面较小,所以更易发生破坏;同时下部主材发生倾斜,所以承受的轴向力要略大于上部主材,虽然截面尺寸较上部杆件截面略大,但承受荷载也大,因而容易进入屈服。

2.2 30#~34# 耐张段

30#~34# 耐张段的推覆结果如表 4 所示。由表 4 可知:32# 塔在 45°,60°风攻角下最先倒塌;0°风攻角时,33# 塔最先倒塌,90°风攻角时,31# 塔最先倒塌,但临界风速均高于 32# 塔在 45°,60°风攻角下的临界倒塌风速。因此,选择 32# 塔作为重点研究对象。

32# 塔临界倒塌时刻的应力云图如图 7 所示。由图 7 可以看出,该输电塔应力较大位置有 4 处,分别为中部横隔上方连接主材、中下部横隔上方连接

主材、下部横隔上方连接主材以及塔腿主材,故这 4 处位置在设计 and 监测时需要加以重视。另需强调,图 7(a),(d)中的最大应力未达到 235 MPa,这是因为在 0°,90°风攻角下 33# 塔和 31# 塔最先发生破坏,此时 32# 塔杆件未进入屈服状态。

32# 塔应力较大区域有 2 处发生在横隔上方尺寸规格较小的主材上;有 2 处发生在塔腿横隔上下方主材,这是因为塔腿处受力最大,且塔腿横隔下方主材受力略大于上方主材,同时下方主材的计算长度略大于上方主材,因而导致了塔腿横隔上下方主材几乎同时进入塑性阶段。

3 铁塔倒塌失效机理探讨

为深入探讨输电铁塔破坏失效机理及解释 2 个耐张段铁塔发生破坏的原因,图 8 给出了 124# 塔主材杆件尺寸与倒塌时刻应力云图的对比特征。从图 8 可知,应力较大的杆件集中在横担上侧、变坡处、

的阈值,在杆件实测应变达到此阈值时发出警报,有利于提前发现结构薄弱点,及时维修加固,防止结构发生倒塌。

应变传感器的布置原则为选择铁塔应力较大的杆件。对于 121[#]~129[#]耐张段中的 124[#]塔,确定了 2 处最易破坏主材,分别为变坡点上下共 8 根主材和塔身中部 8 根主材,应变传感器布置位置如图 11(a)所示。对于 30[#]~34[#]耐张段中的 32[#]塔,确定了 4 处最易破坏主材,应变传感器布置位置如图 11(b)所示,所需应变传感器数量为 16 个。

图 12,13 分别为安装的应变传感器和加速度传感器,图 14,15 分别为数据采集设备和相应的监测软件界面。

4.2 加速度传感器布置方案

结构的整体振动监测主要通过加速度传感器实现,实时监测结构各关键节点的加速度,测量结构的整体模态,有利于进行结构的计算模型验证与性能监测。通过模态识别可以得到结构的振动频率、振型和阻尼比等动力参数。

加速度传感器布置采用平均布置原则,同时避免前几阶振型变形为 0 的位置。124[#] 塔的加速度

传感器布置方案如图 16(a)所示,共需 6 个具有双向采集功能的加速度传感器。32[#] 塔的加速度传感器布置方案如图 16(b)所示,需要 3 个具有双向采集功能的加速度传感器。

目前,32[#] 塔已采集 1 组数据,通过数据分析,得到该塔 2 个水平方向的前 2 阶频率,如表 5 所示。同时表 5 给出了有限元仿真结果,两者相对误差小于 10%,说明了监测数据的可靠性。识别的顺导线方向阻尼比为 2.16%,垂直导线方向阻尼比为

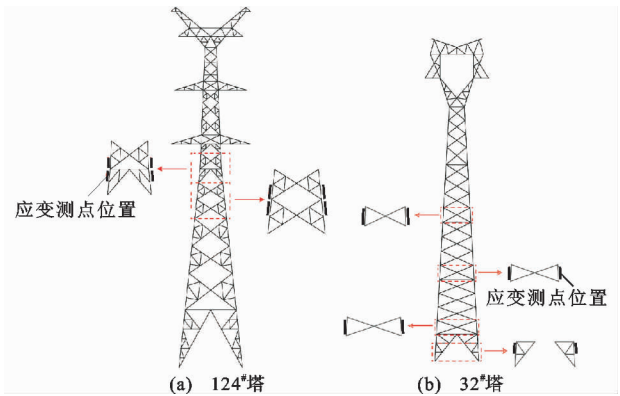


图 11 应变传感器布置方案

Fig. 11 Arrangement Scheme of Strain Sensors



图 12 光纤光栅应变传感器

图 13 加速度传感器

图 14 数据采集设备

Fig. 12 FBG Strain Sensor

Fig. 13 Acceleration Sensor

Fig. 14 Data Acquisition Device

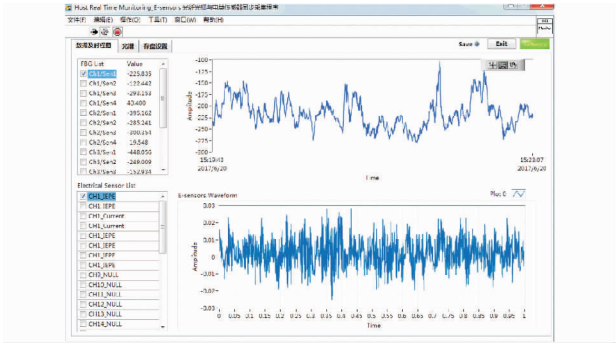


图 15 监测软件界面

Fig. 15 Interface of Monitoring Software

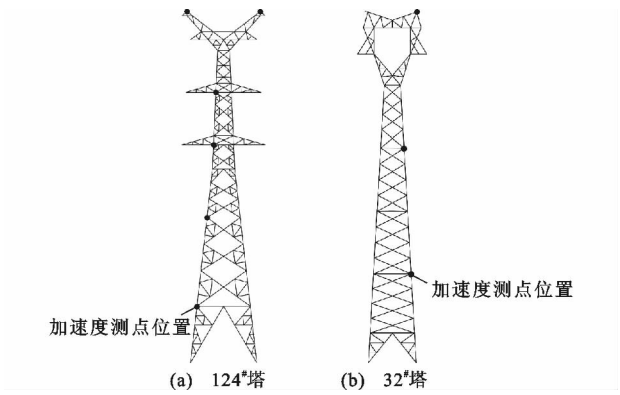


图 16 加速度传感器布置方案

Fig. 16 Arrangement Scheme of Acceleration Sensors

表 5 32# 塔前 2 阶频率

Tab. 5 Frequencies of the First Two Orders of 32# Tower

方向	第 1 阶频率			第 2 阶频率		
	实测值/ Hz	仿真值/ Hz	相对误差/ %	实测值/ Hz	仿真值/ Hz	相对误差/ %
垂直导线方向	2.636	2.444	7.3	7.813	7.502	4.0
顺导线方向	2.004	2.175	8.5	7.171	7.454	3.9

4.28%。风速方向大致垂直导线走向,所以铁塔在垂直导线方向振动剧烈,导地线气动阻尼也较为显著,因而导致垂直导线方向识别的阻尼比明显大于顺导线方向。

5 结 语

(1)在 4 个风攻角的静力推覆下,第 1 个耐张段在 124# 塔首先发生破坏,最不利风攻角为 90°,临界倒塌风速为 34.91 m·s⁻¹,和设计风速 35 m·s⁻¹ 非常接近;第 2 个耐张段最先失效的铁塔为 32# 塔,最不利风攻角为 60°,临界倒塌风速为 45.6 m·s⁻¹,大于设计风速 35 m·s⁻¹,这是因为设计时采用的是双分裂导线,而实际工程采用单根导线。

(2)124# 塔首先进入屈服的位置为变坡处上下连接主材和塔身中部主材;32# 塔首先进入屈服的位置为中部横隔上方连接主材、中下部横隔上方连接主材、下部横隔上方连接主材和塔腿主材,这些位置在设计和监测时需要多加注意。

(3)主材应力较大区域与主材截面规格变化处相吻合。输电塔在风荷载作用下位置越低,杆件所承受的轴力越大,通常越往下主材规格和截面尺寸越大,以保证结构的承载力;然而在主材变截面处,由于 2 根主材相连,所以受力非常接近,但由于上部主材截面面积较小,因而应力较大,更易破坏失效。

(4)应变传感器的布置方案应基于结构受力分析结果,本文 2 条输电线路的应变传感器均布置在铁塔应力较大区域;加速度传感器一般采用均匀布置原则,同时避免振型变形为 0 的位置。

参考文献:

References:

[1] 李宏男,李 雪,李 钢,等.覆冰输电塔-线体系风致动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报,2008,28(2): 127-134.
LI Hong-nan, LI Xue, LI Gang, et al. Wind-induced Dynamic Response Analysis of Iced Transmission

Tower-line System[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 127-134.
[2] 张卓群,李宏男,李士锋,等.输电塔-线体系灾变分析与安全评估综述[J]. 土木工程学报,2016,49(12): 75-88.
ZHANG Zhuo-qun, LI Hong-nan, LI Shi-feng, et al. Disaster Analysis and Safety Assessment on Transmission Tower-line System: An Overview[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(12): 75-88.
[3] 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 Hong-nan, BAI Hai-feng. 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.
[4] OZONO S, MAEDA J. In-plane Dynamic Interaction Between a Tower and Conductors at Lower Frequencies[J]. Engineering Structures, 1992, 14(4): 210-216.
[5] 梁枢果,邹良浩,赵 林,等.格构式塔架三维动力风荷载的风洞试验研究[J]. 空气动力学学报,2007,25(3): 311-318, 329.
LIANG Shu-guo, ZOU Liang-hao, ZHAO Lin, et al. The Investigation of 3-D Dynamic Wind Loads on Lattice Towers by Wind Tunnel Test[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(3): 311-318, 329.
[6] OKAMURA T, OHKUMA T, HONGO E, et al. Wind Response Analysis of a Transmission Tower in a Mountainous Area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 53-63.
[7] ALBERMANI F G A, KITIPORNCHAI S. Numerical Simulation of Structural Behavior of Transmission Towers[J]. Thin-walled Structures, 2003, 41(2/3): 167-177.
[8] 王锦文. 强风作用下输电线塔结构塑性疲劳破坏机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
WANG Jin-wen. Research on Plastic Fatigue Damage Mechanism of Transmission Tower Under Strong Wind Excitations[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
[9] 孟令星,俞琪琦,曾玉洁,等.考虑导线影响的风致输电塔倒塌模拟[J]. 低温建筑技术,2016(7): 81-84.
MENG Ling-xing, YU Qi-qi, ZENG Yu-jie, et al. Transmission Wires Influenced Collapse Analyses of Transmission Tower System Subjected to Wind Load [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016 (7): 81-84.
[10] 汪 江,杜晓峰,田万军,等.500 kV 大跨越输电塔振

- 动在线监测与模态分析系统[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 180-184.
- WANG Jiang, DU Xiao-feng, TIAN Wan-jun, et al. Online Vibration Monitoring and Modal Analysis System of 500 kV Long-span Power Transmission Tower [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 180-184.
- [11] 曹海林, 杨力生, 尹 朋, 等. 基于智能天线的超高输电塔变形监测技术[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 38-41.
- CAO Hai-lin, YANG Li-sheng, YIN Peng, et al. Deformation Monitoring Technique Based on Smart Antenna for Ultra-high Tower of Power Transmission Line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 38-41.
- [12] 林友新, 周 翠, 李宏男, 等. 单元模态应变能法在输电铁塔损伤识别中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 102-107.
- LIN You-xin, ZHOU Cui, LI Hong-nan, et al. Application of Element Modal Strain Energy Method in Damage Identification of Transmission Tower [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 102-107.
- [13] 楼文娟, 林宝龙. 基于小波变换的大型输电铁塔损伤位置识别[J]. 工程力学, 2006, 23(增1): 157-162, 168.
- LOU Wen-juan, LIN Bao-long. Wavelet Transform Based Method for Detecting Damage Location of Electricity Transmission Towers[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S1): 157-162, 168.
- [14] 李宏男, 高东伟, 伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 151-166.
- LI Hong-nan, GAO Dong-wei, YI Ting-hua. Advances in Structural Health Monitoring Systems in Civil Engineering [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 151-166.
- [15] 李宏男, 杨礼东, 任 亮, 等. 大连市体育馆结构健康监测系统的设计与研发[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 40-49.
- LI Hong-nan, YANG Li-dong, REN Liang, et al. Design and Development of Structural Health Monitoring System for the Dalian Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 40-49.
- [16] 李宏男, 田 亮, 伊廷华, 等. 大跨斜拱桥结构健康监测系统的设计与开发[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 574-584.
- LI Hong-nan, TIAN Liang, YI Ting-hua, et al. Design and Development of Structural Health Monitoring System for Long Span Skew Arch Bridge [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 574-584.
- [17] DL/T 5092—1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- DL/T 5092—1999, Technical Code for Designing 110~500 kV Overhead Transmission Line [S].
- [18] 付 兴. 风雨致输电塔线体系动力反应及倒塌分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- FU Xing. Dynamic Response and Collapse Analyses of Transmission Tower-line System Subjected to Wind and Rain Loads [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [19] 张卓群, 周 楠, 李宏男, 等. 风荷作用下的输电塔结构倒塌破坏分析[J]. 价值工程, 2016(35): 141-142.
- ZHANG Zhuo-qun, ZHOU Nan, LI Hong-nan, et al. Analysis on the Collapse of Transmission Tower Structure Under Wind Loads [J]. Value Engineering, 2016(35): 141-142.