

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.012

ZS 型老旧杆塔自动化建模及承载特性分析

刘 洋¹,李鸿泽²,陈 杰¹,赵 恒¹,吴佰建³

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210024;
3. 东南大学土木工程学院,江苏 南京 211189)

摘要:为探求不利工况下 ZS 型老旧杆塔的力学响应,解释其在大风作用下倒塌的原因,以 110 kV ZS 型架空输电塔为例,通过编制自动化建模程序建立结构的有限元模型,分析不同风载荷工况下电塔的静力承载性能,并基于振型叠加理论分析电塔的动力承载特性。结果表明:ZS 型输电塔抗扭性能差且塔身中部为薄弱部分,由于承载力不足,在不利荷载作用下容易发生破坏从而导致整体的倒塌。基于电塔的承载力分析,提出相应的加固方案,数值模拟表明加固后主材的承载力比显著降低,验证了加固方案的有效性。

关键词:ZS 型架空输电塔;力学响应;有限元模型;风荷载;角钢;动力特性;承载力比

中图分类号:TU323 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)02-0171-05

Automatic numerical simulation of ZS-type transmission tower and its bearing capability analysis

LIU Yang¹, LI Hongze², CHEN Jie¹, ZHAO Heng¹, WU Baijian³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;
3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical response and interpret the key collapsing reason of old transmission towers under unfavorable conditions of strong winds, an automatic numerical simulation method has been developed with emphasis on the 110 kV ZS-type of overhead transmission towers. The static bearing capacity of components under different load conditions as well as dynamic characters of the structure were analyzed in this study based on the proposed simulation method and mode superposition theory. The results show that the middle section of the ZS-type transmission tower is the weakest section. Thus, the relatively weak middle section combined with insufficient anti-twist capacity of the tower is the main cause of its structural collapse. On this basis, structural reinforcement and performance improvement can be carried out, which were verified by the numerical model.

Key words: ZS-type overhead transmission tower; mechanical response; finite element model; wind load; angle steel; dynamic characteristics; bearing capacity ratio

输电塔一般是由多规格的型钢构成,具有塔身高、档距大、柔性大的特点,对地质灾害、覆冰、飚线风、强风等环境因素较为灵敏^[1-4],在极端环境作用下易发生杆塔倒塌事故^[5]。据国网江苏电力有限公司报告统计,近年来江苏境内的杆塔倒塌现象多发生在大风天气,且杆型集中于 ZS、ZGU 这 2 种直线塔型(这 2 种塔型均为 20 世纪 70 年代设计的典型塔型),事故大都表现为拦腰折断。近年来,全球范围内极端天气出现频率增多,我国杆塔倒塌事故也呈现高发趋势,迫切需要对杆塔的力学性能做出评估,掌握铁塔的承载力特性,

基金项目: 国家自然科学基金(10672039)

作者简介: 刘洋(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事输电线路技术研究。E-mail:15105168820@163.com

通信作者: 吴佰建,讲师。E-mail: bawu@seu.edu.cn

引用本文: 刘洋,李鸿泽,陈杰,等. ZS 型老旧杆塔自动化建模及承载特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):171-175.

LIU Yang, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Automatic numerical simulation of ZS-type transmission tower and its bearing capability analysis [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2): 171-175.

明确其结构受力薄弱环节^[6-7]。

建立输电塔的数值模型,是对杆塔结构分析的基础工作之一,对输电塔受力性能^[8]分析以及结构的损伤识别^[9-12]具有重要意义,还可以为现有杆塔加固以及未来输电塔的结构设计^[13]提供数值方法。ZS型杆塔广泛应用于110 kV 架空输电塔,现有杆塔基数大,服役时间较长,在大风载荷^[14]作用下易发生倒塌,开展此类杆塔的承载特性研究具有重要的实际工程意义^[15-17]。

本文以ZS型输电塔为例,建立了修正的梁单元模型,通过输电塔的静、动力特性研究,对比分析结构在0°、45°、90°大风工况下的力学性能,并进一步提出加固解决方案,最后通过数值模拟对比分析,验证加固方案的有效性。

1 杆塔的自动化数值模型

1.1 自动化数值模型生成

ZS型输电塔为上字型塔,全塔各部件为等边角钢通过螺栓连接而成;塔身主材随高度增加采用不同截面的钢材,钢材型号分别为16Mn合金钢和Q235钢。

输电塔杆件的受力特点是承受弯矩、扭矩和轴向力,所有杆件均在大型商用软件平台ANSYS上自动生成,采用梁单元(BEAM188)模拟,该单元各端节点包含了 x 、 y 、 z 方向的位移以及绕这3个轴的扭转共6个自由度,杆件受力更加符合实际。杆件均为对心连接,忽略结构的偏心作用、节点板、螺栓等^[18-20]因素的影响。

铁塔杆件主要由主材、斜材、辅材以及横隔等部分连接而成。主材与横隔间采用刚性连接,使用刚性连接节点进行建模。辅材与斜材连接节点以及斜材间的交叉节点则为铰接方式。建模过程中,梁节点的连线将会自动以刚接的方式与周围杆件进行连接,因此刚性节点自动生成。对于铰接节点,本文开发的程序可自动识别,并在节点处释放辅材的转动自由度,使之符合真实模型。

利用上述算法编制了自动化建模程序,可实现铁塔模型的快速生成(只需要输入少数几何和材料参数),使得工程专业人员能够将精力集中于结构分析,大幅提高了实际生产中故障分析或者结构评估的效率。该类型输电塔模型大约有300个关键点,约2000个节点,约1500个单元;以42.3 m设计高度输电塔为例,塔身呼高为36 m,塔身根开为3.46 m,整体与局部模型如图1所示。需要说明的是,该算法具有通用性,其他类型的铁塔也可以利用该算法自动生成,图1(c)展示了ZGU铁塔的模型。

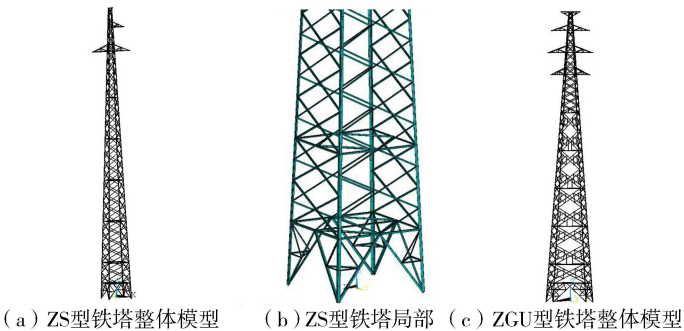


图1 输电铁塔的数值模型
Fig. 1 Numerical model of transmission towers

1.2 风荷载的确定与施加

风荷载是塔身的主要活荷载,实际上ZS和ZGU这2类铁塔杆塔倒塌均发生在大风天气。根据规范^[20],作用于输电塔上的荷载分为两类,采用不同方式施加:(a)作用于塔身的风载荷,依据最大风速算出最大载荷,按照规范所规定的不同风向角的荷载分配系数进行计算,分段施加;(b)输电线风载荷,应加载于悬挂点上。

垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值为

$$W_x = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_p B_1 \sin^2 \theta \tag{1}$$

式中: α ——风压不均匀系数; μ_z ——风压高度变化系数; μ_{sc} ——导线或底线的体型系数; β_c ——500 kV和750 kV线路导线及地线风荷载调整系数; d ——导线或地线的外径或覆冰时的计算半径; L_p ——杆塔的水平档距; B_1 ——导线、地线及绝缘子串覆冰风荷载增大系数; θ ——风向与导线或地线方向之间的夹角; W_0 ——基准风压标准值。

杆塔风荷载标准值 W_s 为

$$W_s = W_0 \mu_z \mu_s B_2 A_s \beta_z \tag{2}$$

式中: μ_s ——构件的体型系数; A_s ——迎风面构件的投影面积计算值; β_z ——杆塔风荷载调整系数; B_2 ——杆

塔构件覆冰风荷载增大系数。

2 ZS 型铁塔承载特性分析

针对输电塔拦腰倒塌的事故现象,对铁塔进行承载特性分析,寻找倒塌原因,从两方面对输电塔结构进行分析:(a)结构静力响应分析;(b)结构动力特性分析。

2.1 铁塔静载荷响应分析

由于杆塔结构为高柔体系,对横向荷载较为敏感,实际杆塔倒塌多为大风天气发生。按照规范要求^[21],分别对输电塔在 0°、45°、90°大风载荷工况下进行数值模拟和结构受力计算。

以 0°大风工况下杆塔结构应力云图为例进行结构受力分析,从图 2 可以看出,杆塔结构应力分布大致为两头小中间大的趋势;塔头结构刚度较大,所受载荷相对较小,构件应力最小;结构的应力在横隔层附近出现一定的波动现象,有减小的趋势;相比于主材,斜撑以及腹杆受力较小。

计算结果表明,杆塔结构受力主要由塔身 4 根主材承担,因此输电塔的倒塌原因分析应主要聚焦于主材的受力情况。经过先期的有限元法和行业内程序核算,发现输电塔主材构件长细

比一般满足要求,其承载能力主要由强度控制。由于主材的截面和材料属性随高度变化,将主要利用截面最大应力而非截面弯矩或轴力作为指标来考察杆塔的薄弱部分,0 ~ 23 250 mm 高度构件设计强度为 310 MPa,23 250 ~ 42 300 mm 高度构件设计强度为 215 MPa。塔身 4 根主材编号分别为 1 号、2 号、3 号、4 号。定义承载力比 k 为承受的最大正应力 $\sigma_{x,max}$ 与设计强度 σ_b 的比值(式(3)),杆塔主材的承载力比数据见表 1。

$$k = \frac{\sigma_{x,max}}{\sigma_b}$$

(3)

表 1 0°、45°和 90°大风工况 4 根主材承载力及承载力比

Table 1 Bearing stresses and ratios of the main frame under 0°, 45° and 90° strong winds

高度/ m	1 号主材承载力/MPa			2 号主材承载力/MPa			3 号主材承载力/MPa			4 号主材承载力/MPa			承载力比 $k/\%$		
	0°大风	45°大风	90°大风	0°大风	45°大风	90°大风	0°大风	45°大风	90°大风	0°大风	45°大风	90°大风	0°大风	45°大风	90°大风
2.25	152.444	249.437	174.169	150.170	111.834	158.139	131.154	228.123	152.844	128.850	145.445	174.064	49.18	80.46	56.15
5.25	153.688	221.831	164.121	151.560	303.860	151.047	133.675	202.391	146.113	131.720	197.12	164.008	49.58	71.56	52.91
8.25	147.219	223.151	160.794	144.570	181.700	145.365	129.366	202.605	140.181	127.393	163.4	160.518	47.49	71.98	51.78
11.25	126.215	202.255	148.917	123.154	154.392	137.546	110.648	185.526	132.205	108.712	150.36	148.573	40.71	65.24	47.93
14.25	173.492	280.614	203.547	168.572	208.761	185.971	152.442	255.516	178.003	149.727	207.58	202.792	55.97	90.52	65.42
17.25	149.390	249.263	187.212	144.006	234.211	174.104	129.990	228.670	166.797	126.938	208.68	186.789	48.19	80.41	60.25
20.25	177.779	285.032	220.395	172.431	265.746	196.308	154.144	259.690	186.758	149.864	247.95	220.743	57.35	91.95	71.21
23.25	149.421	251.168	204.944	141.990	290.265	181.676	128.204	229.119	172.824	123.268	248.45	204.463	48.20	81.02	65.96
26.25	145.304	230.645	185.822	138.505	286.759	164.648	123.537	207.536	154.874	117.363	241.495	186.967	67.58	107.28	86.96
29.25	117.820	197.436	161.546	109.218	287.300	149.779	98.263	178.672	141.312	90.655	238.315	160.879	54.80	91.83	74.83
36.00	108.668	171.304	141.748	100.893	338.206	131.158	90.606	154.039	121.587	80.572	274.255	142.105	50.54	79.68	66.10
42.30	51.468	78.057	49.857	22.987	190.206	44.364	35.036	67.427	49.736	28.805	189.985	49.849	23.94	36.31	23.19

表 1 可以看出:(a)输电杆塔结构的应力占比分布大致为两头小中间大;(b)对比于 0°、90°大风工况,45°大风工况下主材部分杆件承载力最大,已超过设计值(107.28%),这也反映了该杆塔的抗扭效果较差;(c)3 种大风工况下的计算结果均显示,23 ~ 26 m 高度间的主材受力最大,是塔身的薄弱处。此时若主材破坏,塔身表现为拦腰倒塌,与国网江苏省电力有限公司的调查结果一致,侧面说明了数值模型较为可靠。

2.2 铁塔动力特性分析

利用振型叠加理论对输电塔进行动力特性分析,计算输电杆塔模型固有频率和振型,进而研究杆塔结构在动力荷载作用下的薄弱环节。对于本文算例,通过 ANSYS 软件提取了结构前五阶模态频率,分别为 1.396 0、1.398 3、5.462 6、5.542 2、10.205,得到杆塔振型如图 3 所示。

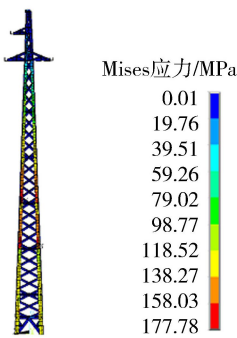


图 2 0°大风工况下杆塔的应力云图
Fig.2 Stress contour of the tower under 0° strong wind

由图 3 可知,铁塔第一、二阶振型图主要为 x 、 y 向的振动,频率非常接近,与塔身为正方形对称截面属性相符合;第五阶振型出现了塔头的扭转。由于该输电塔塔型为上字型塔,塔头不是几何对称,结构出现偏心;在 45° 大风工况的诱导下,结构较易发生扭转振动从而产生荷载的二次效应,使得杆塔呈现出拦腰破坏的现象。

3 铁塔加固分析

针对输电塔承载力分析,主材的安全度由材料自身强度最大值决定,本文提出了在薄弱塔身部分的原有结构上利用已有的螺栓和连接板并联一根共规格的角钢,形成新的截面组合结构。主要的截面形式十字形、Z 字形、T 字形和 C 字形等,如图 4 所示。

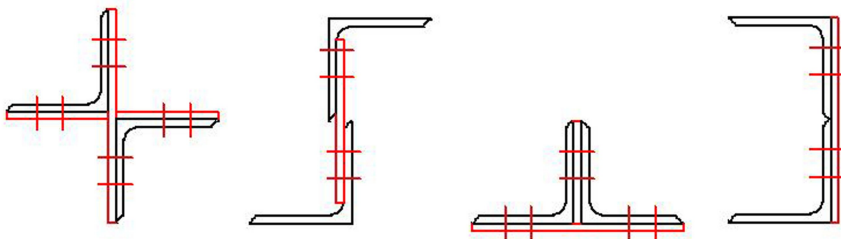


图 4 不同形式的组合截面

Fig.4 Different forms of combined sections

将输电塔模型按高度等分为 7 段,通过 ANSYS 数值模拟,分析输电塔加固前后的承载力比折线图,如图 5 所示。通过折线图的对比分析,输电塔主材结构性能有了显著的提升,可证实加固方案的有效性。

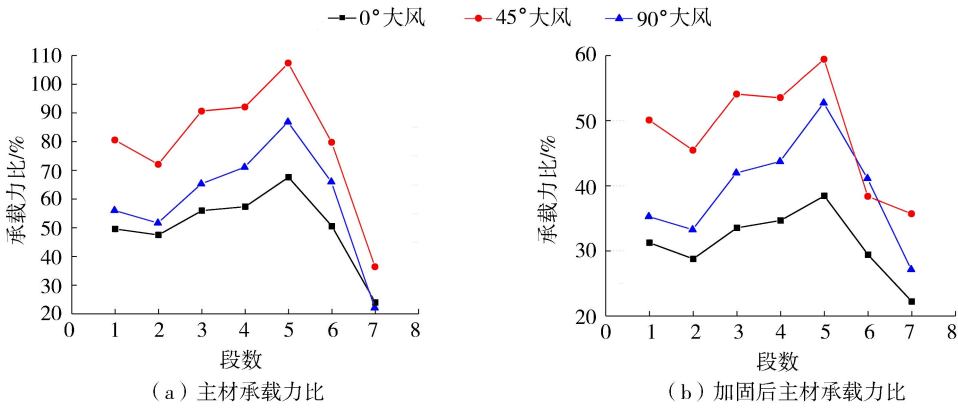


图 5 加固前后承载力比折线

Fig.5 Change of bearing ratios before and after the reinforcement

4 结 语

以 ZS 型输电杆塔为例,编制了铁塔自动化快速建模程序,探讨了铁塔结构的静力和动力承载特性,解释了工程实际中 ZS 型铁塔大风作用下拦腰破坏的原因。铁塔的梁单元数值模型计算结果表明该型塔抗扭转性能较差;大风荷载作用下,结构受力为上下小中间大,塔身容易从中间折断,与倒塌事故相一致。通过输电塔加固方案的比较分析,现有的 ZS 型输电塔塔身中部进行结构加固,可以有效提高其承载能力。同时,对于新设计塔型应适当增加主材截面尺寸,确保在极端荷载下可安全运行。

参考文献:

[1] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3491-3499. (HU Yi,LIU Kai,WU Tian, et al. Analysis of influencing factors on operation safety of transmission lines and preventive measures [J]. High Voltage Technology,2014, 40(11):3491-3499. (in Chinese))

[2] JI Kunpeng,RUI Xiaoming,LI Lin, et al. Dynamic response of iced overhead electric transmission lines following cable rupture shock and induced ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):2215-2222.

[3] ZHANG Xiaolei,JU Yanzhong,WANG Fuwang. Statistical analysis of wind-induced dynamic response of power towers and four-circuit transmission tower-line system[J]. Shock and Vibration, 2018,2018:1-18.

[4] 程含渺, 李红斌, 徐晴, 等. 基于高维随机矩阵的系统状态评估方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 72-78. (CHENG Hanmiao,LI Hongbin, XU Qing, et al. Research on system state assessment method based on high dimensional random matrix [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):72-78. (in Chinese))

[5] LI Tian,YU Qiqi,MA Ruisheng, et al. The collapse analysis of a transmission tower under wind excitation[J]. Open Civil Engineering Journal, 2014, 8(1):136-142.

[6] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治 [J]. 高电压技术, 2007,33(3): 1-8. (HU Yi. Analysis and prevention of transmission line operation faults [J]. High Voltage Technology, 2007,33(3):1-8. (in Chinses))

[7] McCLURE G, LAPPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines [J]. Computers and Structures, 2003,81(8/9/10/11): 825-834.

[8] 王永瑞. 基于 ANSYS 的输电铁塔力学特性分析[D]. 宜昌:三峡大学,2013.

[9] RAO N P, KNIGHT G M S, SEETHARAMAN S, et al. Failure analysis of transmission line towers[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 25(3):231-240.

[10] McCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003, 81(8/9/10/11):825-834.

[11] FU Xing,LI Hongnan. Uncertainty analysis of the strength capacity and failure path for a transmission tower under a wind load [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173:147-155.

[12] 曹苏岳. 基于结构健康监测系统的输电塔损伤分析[D]. 保定:华北电力大学,2016.

[13] 樊禹江,王社良. 基于新型压电摩擦阻尼器的高压输电塔半主动抗震控制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):336-341. (FAN Yujiang,WANG Duliang. Semi-active seismic control of high voltage transmission tower based on novel piezoelectric friction damper[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(4):336-341. (in Chinese))

[14] 郭惠勇,李正良. 大跨越高压输电塔线体系风致振动的研究与进展[J]. 海大学学报(然科学版),2008,36(1):106-111. (GUO Huiyong,LI Zhengliang. Research and development of wind-induced vibration of large crossing high voltage transmission tower line system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008,36(1):106-111. (in Chinese))

[15] 郭惠勇,李小晶,李正良. 大跨越输电塔的结构优化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):93-97. (GUO Huiyong,LI Xiaojing,LI Zhengliang. Structural optimization analysis of long-span transmission tower[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2010,38(1):93-97. (in Chinese))

[16] 曾滨. 预应力钢结构诊治关键技术研究及展望 [J]. 工业建筑, 2017,47(1): 135-143. (ZENG Bin. Research and prospect of key technologies for diagnosis and treatment of prestressed steel structures[J]. Industrial Architecture, 2017,47(1):135-143. (in Chinese))

[17] MOON B W, PARK J H, LEE S K, et al. Performance evaluation of a transmission tower by substructure test[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(1):1-11.

[18] 黄兴,田雷,杨洋,等. 于点估计法的杆塔结构平均可靠度分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 127-131. (HUANG Xing,TIAN Lei,YANG Yang, et al. Average reliability analysis of tower structures based on point estimation [J]. Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 127-131. (in Chinese))

[19] KNIGHT G M S, SANTHAKUMAR A R. Joint effects on behavior of transmission towers [J]. Journal of Structural Engineering, 1993,119(3): 698-712.

[20] 张子阳. 考虑节点连接滑移的特高压输电铁塔直接非线性分析[D]. 保定:华北电力大学,2016.

[21] 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:中国计划出版社,2012.