

文章编号:1673-2049(2018)02-0047-09

风荷载作用下输电塔极限承载力和失效模式计算模型

陈正^{1,2}, 唐可人^{1,2}, 周强³, 张伟^{1,2}, 陈嘉其^{1,2}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311305)

摘要:针对现有输电塔极限承载力和失效模式研究未考虑计算模型影响的问题,剖析了空间桁架、空间刚架和空间梁桁组合3种常用计算模型的力学基础和模拟方法;以110 kV鼓形直线输电铁塔为例,对比研究了0°,45°,60°,90°四种风向工况下3种计算模型的弹性响应,同时对比分析了最不利工况下各计算模型极限承载力和失效模式的计算结果,揭示了不同计算模型对结构极限承载力和失效模式的影响规律。结果表明:空间刚架和空间梁桁组合模型较桁架模型能给出偏安全的弹性响应结果;该类输电塔最不利风荷载工况下的极限活荷载乘子约为2.00,空间梁桁组合模型能反映铁塔结构的延性破坏性质,给出偏安全的极限承载力计算结果;该类输电塔高承载构件主要集中在塔腿主材,空间刚架和空间梁桁组合模型都能较准确识别出高承载构件;建议采用空间梁桁组合模型进行输电塔极限承载力和失效模式的分析。

关键词:输电塔;计算模型;风荷载;极限承载力;失效模式

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Calculation Models of Ultimate Bearing Capacity and Failure Modes for Transmission Tower Under Wind Load

CHEN Zheng^{1,2}, TANG Ke-ren^{1,2}, ZHOU Qiang³, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Jia-qi^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 311305, Zhejiang, China)

Abstract: In order to solve the problem of not taking account of the influence of calculation models on ultimate bearing capacities and failure modes of the existing transmission towers, the fundamental mechanical principles and simulation methods of the three commonly used models, including space truss, space rigid frame and space beam-truss, were illustrated. Taking a 110 kV drum type linear transmission tower as an example, the elastic responses of 3 calculation models under for 0°, 45°, 60°, 90° wind load were compared. The calculation results of the ultimate bearing capacity and failure mode of each calculation model under the most unfavorable conditions were compared and analyzed. The influences of different calculation models on the ultimate bearing capacity and failure modes of structure were revealed. The results show that the rigid frame and beam-truss model can give safe elastic response results compared with the truss model.

收稿日期:2017-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51469004,51468004);广西“十百千人才工程”专项基金项目(2014202)

作者简介:陈正(1982-),男,湖南祁东人,教授,工学博士,E-mail:chenzheng@gxu.edu.cn.

通讯作者:张伟(1977-),男,四川达县人,教授,工学博士,E-mail:zhangwei@gxu.edu.cn.

The limit live load multiplier of this type of transmission tower is about 2.00 under the worst wind load condition. The beam-truss composite model can reflect the ductility failure properties of the tower structure and give safer calculated results of ultimate bearing capacity. The bearing components of this kind of transmission tower mainly concentrate in the tower leg materials. The rigid frame and beam-truss model can accurately identify high load bearing member. The space beam-truss composite model is proposed to be used for analyses of ultimate bearing capacity and failure mode of the transmission tower.

Key words: transmission tower; calculation model; wind load; ultimate bearing capacity; failure mode

0 引言

输电塔是重要的生命线工程结构,保证其安全性十分重要,已有工程事故表明在风雨^[1]、地震^[2-3]、冰雪^[4]等荷载作用下输电塔极有可能发生局部失稳破坏、节点断裂破坏、整体倒塌破坏等问题,其中整体倒塌将严重影响人民生活和生产建设。因此,开展输电塔极限承载力和失效模式研究具有重要的科学和工程意义,本文将针对输电塔结构整体倒塌破坏开展研究。目前,已有一些学者对输电塔极限承载力和失效模式进行了研究。姚陈果等^[5-10]采用弹塑性增量有限元法(EPIA)对输电塔在风、覆冰作用下的结构极限承载力进行了分析与总结;杨绿峰等^[11-12]采用弹性模量缩减法分析了输电塔的极限承载力;谢强等^[13-14]通过模型试验和数值模拟研究了输电塔抗风极限承载力和失效模式;鞠彦忠等^[15]通过试验研究了输电塔钢管十字插板连接的承载力;刘春城等^[16]对输电塔覆冰工况下失效模式进行了总结;Albermani 等^[17]对输电塔不同工况下的失效模式进行了分析。此外,一些文献对导线作用^[18]、基础非均匀沉降^[19]、残余应力^[20]对极限承载力和失效模式的影响进行了研究。这些成果为输电塔极限承载力和失效模式的进一步研究提供了一定的参考,却没有关注到计算模型对输电塔极限承载力和失效模式的影响。

考虑到输电塔具有体型高耸、杆件众多、节点连接复杂的特点,一些学者开展了计算模型对输电塔结构响应的影响研究。刘鸣等^[21-25]研究了不同计算模型下的弹性位移、内力、应力和动力特性,结果表明输电塔计算模型对结构弹性响应有明显影响。输电塔极限承载力和失效模式是结构经过弹性响应后的非弹性响应,因而也将受输电塔计算模型的影响。

鉴于此,本文以某 110 kV 鼓形直线输电铁塔为例,建立了目前常用的空间桁架、空间刚架和空间

梁桁组合计算模型,对比分析了 0° , 45° , 60° , 90° 风向下 3 种计算模型的位移、应力和弯矩等结构响应,并对比了最不利工况下的输电塔塑性极限承载力和失效模式,总结了计算模型的影响规律,给出了输电塔极限承载力和失效模式中计算模型的选取建议。

1 输电塔结构分析的常用计算模型

输电塔结构分析目前主要采用平面桁架模型、空间桁架模型、空间刚架模型和空间梁桁组合模型。平面桁架模型将输电塔超静定结构简化为静定或少数超静定的平面桁架,进而采用节点法和截面法求解内力,在早期的手算中得到应用^[26-27],然而因其简化过多、误差较大,目前已被空间计算模型所取代。本文主要研究空间模型及其影响,前述 3 种空间模型主要差别在于杆件节点连接形式和杆件截面内力的不同,以角钢塔为例,工程中常用的节点连接方式如图 1 所示。

1.1 空间桁架模型

空间桁架模型假定所有节点为理想铰接,如图 2(a)所示,各杆件在节点处可以自由转动,杆件在整个变形过程中始终保持为直杆,只有轴向的伸长和缩短,而没有弯曲变形。空间桁架模型计算简单、受力机理清晰^[22],因此输电塔设计软件多采用空间桁架模型。然而,将输电塔节点简化为铰节点时,忽略了杆件间的转角约束作用以及构件中存在的弯矩,得到的结构响应并不精确。同时,直接采用几何形体建立空间桁架模型,会导致部分节点存在平面外的几何可变性,进行计算前必须消除各节点存在的几何可变性,目前主要有 6 种方法^[24-25,28]:虚杆法、去掉次腹杆法、移去自由度法、增加虚拟弹簧法、梁单元法和主从节点法。主从节点法具有稳定性强、计算效率高的特点^[28],本文选用主从节点法消除空间桁架模型的几何可变性。

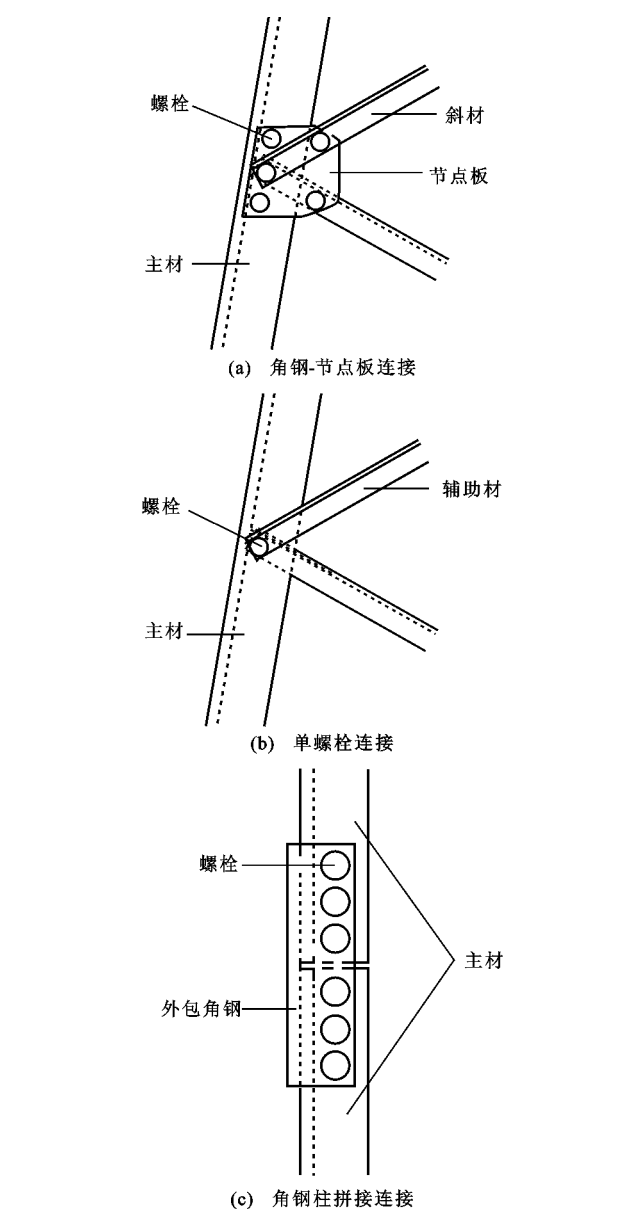


图 1 输电塔常用节点连接方式

Fig. 1 Commonly Used Connection Types for Transmission Tower

1.2 空间刚架模型

空间刚架模型假定所有节点为理想刚接,如图 2(b)所示,考虑各杆件在节点处存在强约束作用,杆件中存在除轴力以外的弯矩、剪力等内力。现有输电塔数值模拟分析中常采用空间刚架模型进行线弹性和非线性响应分析^[5,13,29-30]。然而,实际输电塔结构中,节点采用螺栓连接为主,杆件在节点处既传递弯矩和剪力等内力,同时又会产生相对转角,不是完全的刚性节点,因此采用空间刚架模型会造成构件及结构整体刚度偏大。

1.3 空间梁桁组合模型

空间梁桁组合模型根据塔架的受力特点选用梁

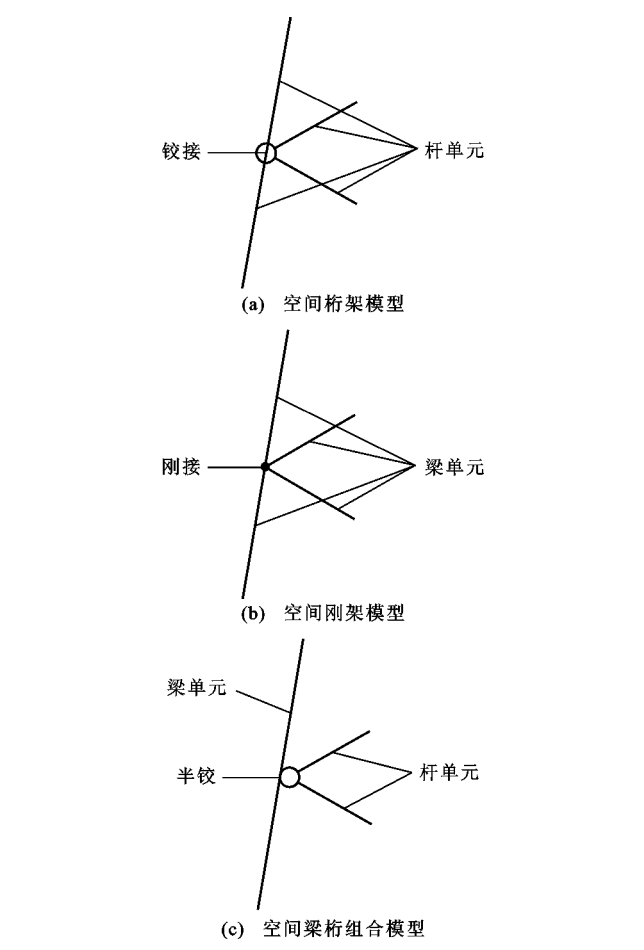


图 2 输电塔空间计算模型的节点连接模拟

Fig. 2 Connection Simulation of Space Calculation Models for Transmission Tower

单元和杆单元建立计算模型,如图 2(c)所示。考虑到主材及端部连接刚度明显大于斜材和辅助材,通常选用梁单元;斜材直接与主材连接,存在再分节点,自身刚度和端部连接刚度都较大,也按梁单元考虑;辅助材承受内力较小,主要起减小主材和斜材计算长度的作用,按杆单元考虑^[23]。空间梁桁组合模型相对较合理地考虑了节点刚度对整体刚度的贡献大小,但由于杆件分布复杂,梁单元与杆单元的遴选还存在不确定性。

由此可见,目前 3 种空间计算模型各有优缺点,并且在结构分析和设计中都有应用,因此有必要研究这 3 种模型对输电塔极限承载力和失效模分析的影响。

2 工程实例与基本参数

国网输电线路通用的设计鼓形杆塔 1D11-SZ3 如图 3 所示[图 3(a)中 1~8 为杆件编号],呼高为 36 m,全高为 49.3 m,塔身横截面采用正方形布置,

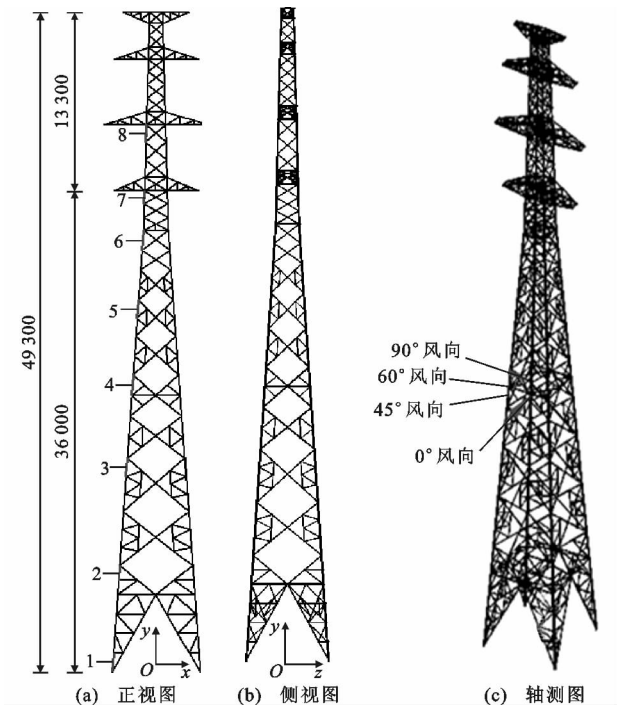


图 3 鼓形输电塔(单位:mm)

Fig.3 Drum Type Transmission Tower (Unit:mm)

根开为 6.6 m。主材采用 Q345 等边角钢,斜材和辅助材采用 Q235 等边角钢,每种型号的钢材分别有 8 种截面尺寸,弹性模量均为 $E=2.1\times10^6$ MPa,密度 $\rho=7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比 $\mu=0.3$ 。设计条件为:电压等级为 110 kV;基本风速为 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;B 类地貌;水平档距为 500 m;垂直档距为 700 m。

采用大型通用结构分析软件 ANSYS 分别建立空间桁架模型、空间刚架模型和空间梁桁组合模型。

空间桁架模型的所有杆件采用 Link10 模拟,共有 1 572个杆单元和 613 个节点;空间刚架模型所有杆件采用 Beam189 模拟,每根杆件划分一个单元,共 1 572个梁单元和 3 757 个节点;空间梁桁组合模型的主材和斜材采用 Beam189 模拟,辅助材采用 Link10 模拟,塔脚处固定约束,共有 1 572 个单元和 3 013 个节点。3 种模型的钢材均采用理想弹塑性本构关系。

3 计算模型对结构弹性响应的影响

3.1 荷载计算

3.1.1 输电塔风荷载

将输电塔分为 8 个塔段,根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[31] 分别计算各塔段 0°风向和 90°风向的风荷载,计算结果如表 1 所示。45°和 60°风向的塔身风荷载可根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[31] 确定其分量。施加风荷载时,将风荷载标准值平均分配到各塔段节点上。

3.1.2 导线、地线风荷载

根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[31] 计算导线、地线 90°风向的风荷载(表 2),0°,45°和 60°风向的导线、地线风荷载可根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[31] 确定其分量。水平风荷载作为导线、地线对输电塔的水平力,重力荷载作为导线、地线对输电塔的竖直力,施加在导线、地线与输电塔横担的连接节点上。本文算例并无不平衡张力,因此不计导线、地线的张力。

表 1 输电塔风荷载

Tab.1 Wind Loads of Transmission Tower

高度范围/m	0°风向(顺导线方向) 迎风面积/m ²	0°风向(顺导线方向) 风荷载标准值/Pa	90°风向(垂直导线方向) 迎风面积/m ²	90°风向(垂直导线方向) 风荷载标准值/Pa
0.0~8.0	5.01	10 029.73	5.01	10 029.73
8.0~16.0	4.90	11 198.50	4.90	11 198.50
16.0~25.1	4.88	12 625.28	4.88	12 625.28
25.1~33.0	3.95	10 683.63	3.95	10 683.63
33.0~36.0	1.52	3 905.34	1.52	3 905.34
36.0~40.9	2.76	7 468.38	1.91	5 330.26
40.9~45.8	2.88	7 828.22	1.73	4 883.85
45.8~49.3	2.62	6 967.17	1.00	2 897.36

表 2 导线、地线荷载

Tab.2 Loads of Ground Wire and Conductor

电线类型	型号	外径/m	风压高度变化系数	水平风荷载/N	重力荷载/N
地线	JLB20A-100	0.013 00	1.66	4 430.70	4 624.33
上相导线	LGJ-300/40	0.023 94	1.62	7 306.14	7 772.38
中相导线	LGJ-300/40	0.023 94	1.57	7 063.62	7 772.38
下相导线	LGJ-300/40	0.023 94	1.50	6 767.11	7 772.38

3.2 位移对比分析

针对 3 种计算模型,考虑其导线、地线的水平力和竖直力以及塔架自重的影响,运用有限元分析软件

ANSYS 计算正常运行时 4 个风向工况下塔架的位移,塔顶位移 U_p 和典型高程位移 U_t 见表 3,4。

由表 3 可知,在 4 个风向工况下,空间桁架模

表 3 塔顶位移

Tab. 3 Displacements at Top of Tower

风向	0°	45°	60°	90°
模型Ⅰ塔顶位移/mm	231.26	321.12	392.58	386.92
模型Ⅱ塔顶位移/mm	228.84	319.37	390.13	382.40
模型Ⅲ塔顶位移/mm	230.06	321.03	392.10	383.94
模型Ⅰ,Ⅱ塔顶位移相对误差/%	1.06	0.55	0.63	1.18
模型Ⅱ,Ⅲ塔顶位移相对误差/%	0.53	0.52	0.50	0.40

注:模型Ⅰ为空间桁架模型;模型Ⅱ为空间刚架模型;模型Ⅲ为空间梁桁组合模型。

表 4 典型高程位移

Tab. 4 Displacements at Typical Elevations

高度/m	0°风向时的位移/mm			45°风向时的位移/mm			60°风向时的位移/mm			90°风向时的位移/mm		
	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ
8.0	5.24	5.04	5.04	10.66	9.41	9.50	9.83	9.44	9.50	6.56	6.12	6.23
16.0	19.85	19.52	19.64	30.18	28.70	28.97	32.80	32.36	32.59	23.32	22.59	22.69
25.1	50.79	49.78	50.13	68.09	68.95	69.45	82.08	81.78	82.35	65.08	63.87	64.24
33.0	90.44	89.37	89.96	122.89	123.89	124.72	149.98	149.01	150.00	128.29	126.24	126.97
36.0	110.79	109.63	110.34	150.97	152.39	153.38	185.18	183.96	185.12	163.14	160.70	161.57
40.9	149.70	148.44	149.32	204.43	206.86	208.09	252.60	251.05	252.51	233.01	229.83	230.95
45.8	194.94	193.62	194.68	266.22	269.87	271.34	330.68	328.79	330.54	317.79	313.79	315.15
49.3	229.33	227.98	229.18	312.90	317.39	319.04	389.57	387.41	389.37	384.00	379.38	380.92

型、空间刚架模型和空间梁桁组合模型的最大位移都发生在 60°风向工况时,数值基本相同,相对误差都在 1.2%以内。由表 4 可知,3 种计算模型在各典型高度上的位移相差也不大,且均在 60°风向工况下取得最大值。因此,采用 3 种模型均可较好地估计角钢塔在设计工况下的弹性位移。同时,根据《高耸结构设计规范》^[32],以风为主的荷载标准组合作用下,弹性分析的塔顶位移与塔高比值应小于 1/75,该输电塔线性分析的水平位移限值为 657.33 mm。由表 3 还可知,3 种模型的各风向工况塔顶位移均能满足限值要求。

3.3 应力对比分析

表 5 为 3 种模型的最大 Mises 应力。4 个工况下各模型的最大应力都发生在塔腿或塔腿横隔上方的主材上。应力计算结果从小到大的排列顺序为空间桁架模型、空间梁桁组合模型、空间刚架模型。同时,空间梁桁组合模型和空间刚架模型得出的应力值相对误差较小,在 15%以内;空间桁架模型所给出的应力计算值除 90°风向工况以外,皆低于空间刚架模型应力计算值的 30%以上。实际上,输电塔的主材杆端刚度往往较大,不能忽略其弯矩的影响,

表 5 最大应力

Tab. 5 Maximum Stresses

风向	0°	45°	60°	90°
模型Ⅰ最大应力/MPa	111	188	189	191
模型Ⅱ最大应力/MPa	176	270	291	230
模型Ⅲ最大应力/MPa	152	236	252	218
模型Ⅰ,Ⅱ最大应力相对误差/%	36.93	30.37	35.05	16.96
模型Ⅱ,Ⅲ最大应力相对误差/%	13.64	12.59	13.40	5.22

甚至弯矩影响比轴力更加显著,因此用空间桁架模型计算得到的应力偏小,采用空间刚架和空间梁桁模型均能给出较为安全的弹性应力计算结果。

3.4 弯矩对比分析

采用杆单元的空间桁架模型不考虑杆端弯矩对杆件受力的影响,因此模型Ⅰ得到的塔身主材弯矩均为 0。在与模型Ⅰ相同的 45°风荷载作用下,采用模型Ⅱ和模型Ⅲ得到的输电塔主材弯矩见图 4,杆件编号如图 3(a)所示。图 4 中, M_y 为梁单元绕局部坐标系 y 方向上、下端弯矩的较大值; M_z 为梁单元绕局部坐标系 z 方向上、下端弯矩的较大值。

由图 4 可知,塔身主材从上至下所受弯矩逐渐增大,在相同的外荷载作用下,模型Ⅱ与模型Ⅲ得到的主材弯矩在不同位置差距也不同。辅助材单元类

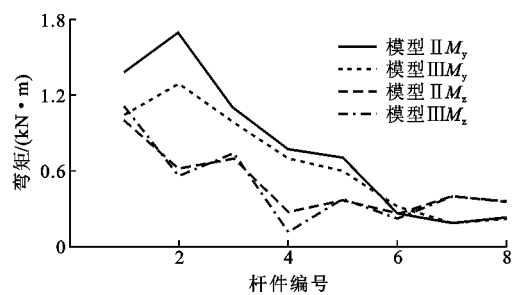


图 4 主要杆件的弯矩

Fig. 4 Bending Moment of Main Components

型的选取对杆件内力分布有一定影响,有大量辅助材分布的塔腿部分主材(杆件 1,2)弯矩相差最大,其次是有少量辅助材分布的塔身主材(杆件 3,4,5),相差最小的是没有辅助材分布的塔头部分(杆件 6,7,8)。可见,采用空间刚架和空间梁桁模型均能给出较为安全的弯矩计算结果。

4 计算模型对结构极限承载力的影响

采用弹塑性增量加载法(EPIA)^[11,29]计算输电塔的塑性极限承载力。设计工况下的竖向荷载作为恒荷载,水平荷载作为活荷载施加在输电塔节点上。按比例增加水平活荷载,直至结构由超静定结构转化为机构而发生塑性倒塌(计算不收敛)为止,进而得到输电塔结构的塑性极限承载力,其中活荷载为 kP_d , k , P_d 分别为活荷载乘子和活荷载设计值。

针对该鼓形直线输电塔的 3 种计算模型,分别求解 60°风向工况的塑性极限承载力。图 5 为活荷载乘子的增量迭代过程,图 6,7 为 3 种模型在加载过程中活荷载乘子 k 与塔顶位移 U_p 的关系。

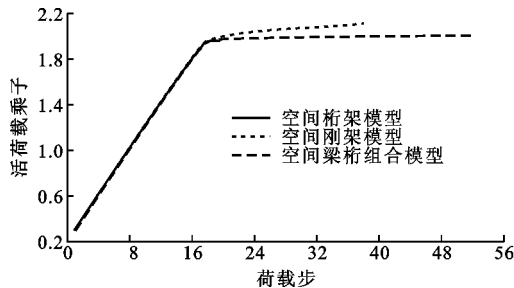


图 5 活荷载乘子增量迭代过程

Fig. 5 Incremental Iterative Process of Live Load Multiplier

由图 5 可知,3 种模型的极限承载力和塔顶位移 U_p 由大到小的排列顺序为空间刚架模型、空间梁桁组合模型、空间桁架模型。后 2 种模型的极限承载力和塔顶位移相差较小。

由图 6,7 可知,3 种计算模型在线弹性承载过程中,塔顶位移 U_p 与活荷载乘子 k 间均呈线性关

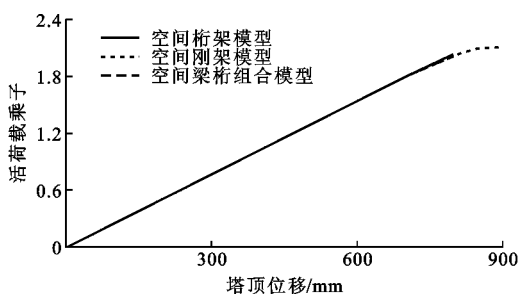


图 6 $k-U_p$ 关系曲线

Fig. 6 Relationship Curves of k and U_p

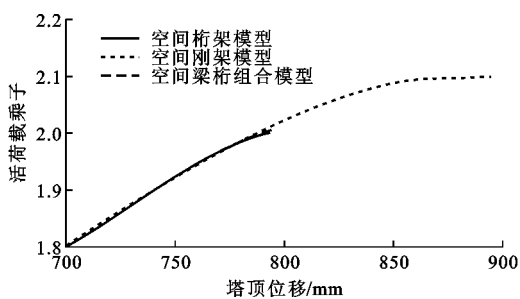


图 7 塑性阶段 $k-U_p$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship Curves of k and U_p at Plastic Stage

系,即风荷载对 U_p 起控制作用,且塔顶位移基本相同。同时,3 种计算模型在非线性承载阶段有一定的差别:空间桁架模型整体一旦进入构件屈服,便很快达到结构极限承载状态,整个加载过程主要表现为弹性阶段,基本没有塑性阶段;其他 2 种结构特别是刚架模型,进入屈服后,因约束条件更合理,可以较充分地进行结构内力重分布,经过相对较明显的屈服阶段后才进入塑性极限承载状态,体现了铁塔结构的延性破坏性质,空间刚架模型和空间梁桁组合模型塑性阶段 k 的范围分别为 1.95~2.00 和 1.95~2.10。

总体可见,空间刚架模型和空间梁桁组合模型都能反映出铁塔结构的延性破坏性质,且空间梁桁组合模型的极限承载力计算结果偏于安全。根据《高耸结构设计规范》^[32],以风为主的荷载标准组合作用下,非线性分析的塔顶位移与塔高比值应小于 1/50,该输电塔非线性分析的水平位移限值为 986 mm。由图 6,7 还可知,3 种模型的极限塔顶位移均能满足限值要求。

5 计算模型对结构失效模式的影响

3 种空间模型对塔架结构的失效模式也有一定影响,图 8 为失效杆件示意,表 6 为 60°风向工况下 3 种计算模型的失效模式。

3 种模型失效模式的相同点为:塑性极限承载

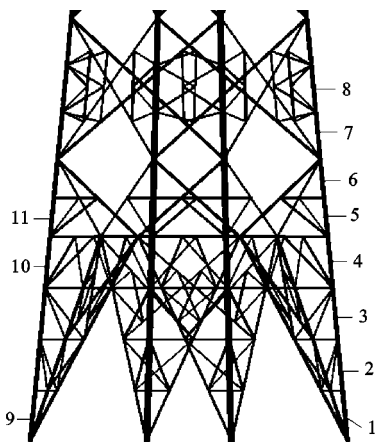


图 8 失效杆件示意

Fig. 8 Schematic Diagram of Failure Members

表 6 失效模式

Tab. 6 Failure Modes

计算模型	失效路径	失效杆件位置
I	1,2,3,4,5,8	塔腿和塔腿附近的塔身主材
II	1→4,5→6→7,8→10,11	
III	6,7→3,4→1,2→10,11→9	

状态的失效杆件均分布在受拉侧和受压侧的塔腿和塔腿附近的塔身主材上,且受压侧杆件分布数量均大于受拉侧。由于结构自重和导线垂直荷载使塔腿主材受压,因此风荷载作用下受压侧塔腿主材较受拉侧相同高度主材的 Mises 应力值大,高承载杆件数量在塔腿受压侧较多些。同时,3 种模型的失效模式也存在差异:空间桁架模型的失效杆件仅在受压侧,且同时出现在加载的最后一步,随即结构整体达到塑性极限状态;空间刚架和空间梁桁组合模型在加载过程中均先在受压侧一步步出现失效杆件,随后在受拉侧出现失效杆件,最后才达到塑性极限状态。

总体可见,塔架失效杆件主要集中在塔腿主材部位,是结构整体安全的薄弱环节,可考虑通过加强塔腿主材抗力提高整体安全储备。同时,工程研究也表明,当输电塔塔身有显著变坡时,变坡处的主材应力也较大,是结构整体安全的薄弱环节。可见,空间刚架和空间梁桁组合模型识别的失效杆件一致,偏于安全,建议采用这 2 种模型进行塔架结构失效模式研究。

6 结 语

(1)3 种模型均能较好地估计输电塔的弹性位移,空间刚架和空间梁桁组合模型相比于空间桁架模型能给出较安全的弹性应力和弯矩。

(2)输电塔风荷载工况下的计算极限活荷载乘子在 2.00 左右,空间梁桁组合模型能反映出铁塔结构的延性破坏性质,极限承载力计算结果相比于空间刚架模型偏于安全。

(3)输电塔的高承载构件主要集中在塔腿主材和塔身变坡部位,空间刚架和空间梁桁组合模型都能较准确、安全地识别出输电塔的高承载构件。

(4)从符合结构受力特点、失效机理以及安全角度考虑,建议采用空间梁桁组合模型进行输电塔塑性极限承载力和失效模式的分析。

参考文献:

References:

[1] 谢 强. 电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J]. 电力建设,2008,29(8):1-6.
XIE Qiang. State-of-the-art of Seismic Disaster Research and Emergency Response of Electric Power System[J]. Electric Power Construction,2008,29(8):1-6.

[2] 尹荣华,李东亮,刘戈林,等. 高压输电塔震害及抗震研究[J]. 世界地震工程,2005,21(1):51-54.
YIN Rong-hua,LI Dong-liang,LIU Ge-lin,et al. Seismic Damage and Analysis of Power Transmissions Towers[J]. World Earthquake Engineering,2005,21(1):51-54.

[3] 曹枚根,朱全军,默增禄,等. 高压输电线路防震减灾研究现状及震害防御对策[J]. 电力建设,2007,28(5):23-27.
CAO Mei-gen,ZHU Quan-jun,MO Zeng-lu,et al. Current Research Status of HV Transmission Line Earthquake Prevention and Disaster Relief and Earthquake Countermeasures[J]. Electric Power Construction,2007,28(5):23-27.

[4] 蒋正龙,陆佳政,雷红才,等. 湖南 2008 年冰灾引起的倒塔原因分析[J]. 高电压技术,2008,34(11):2468-2474.
JIANG Zheng-long,LU Jia-zheng,LEI Hong-cai,et al. Analysis of the Causes of Tower Collapses in Hunan During the 2008 Ice Storm[J]. High Voltage Engineering,2008,34(11):2468-2474.

[5] 姚陈果,李 宇,周泽宏,等. 基于极限承载力分析的覆冰输电塔可靠性评估[J]. 高电压技术,2013,39(11):2609-2614.
YAO Chen-guo,LI Yu,ZHOU Ze-hong,et al. Reliability Evaluation for Iced Tower Based on Ultimate Bearing Capacity Analysis. [J]. High Voltage Engineering,2013,39(11):2609-2614.

- [6] 王 东. 角钢输电塔风荷载作用模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WANG Dong. Study of Wind Load Mode on Transmission Tower Consisted of Angle Steels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [7] 李宏男, 胡大柱, 黄连状. 地震作用下输电塔体系塑性极限状态分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 192-199.
LI Hong-nan, HU Da-zhu, HUANG Lian-zhuang. Plastic Limit Analysis of the Transmission Tower System Subjected to Earthquake Action[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 192-199.
- [8] AHMED A, ARTHUR C, EDWARDS M. Collapse and Pull-down Analysis of High Voltage Electricity Transmission Towers Subjected to Cyclonic Wind[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2010, 10(1): 012004.
- [9] TIAN L, YU Q Q, MA R S, et al. The Collapse Analysis of a Transmission Tower Under Wind Excitation[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2014, 8: 136-142.
- [10] ASGARIAN B, ESLAMLOU S D, ZAGHI A E, et al. Progressive Collapse Analysis of Power Transmission Towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 123: 31-40.
- [11] 杨绿峰, 李 琦, 张 伟, 等. 齐次化广义屈服函数与角钢输电塔架极限承载力分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 317-323.
YANG Lu-feng, LI Qi, ZHANG Wei, et al. Homogeneous Generalized Yield Function and Ultimate Bearing Capacity Evaluation of Transmission Towers Fabricated with Angle Section[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 317-323.
- [12] YANG L F, LI Q, ZHANG W, et al. Homogeneous Generalized Yield Criterion Based Elastic Modulus Reduction Method for Limit Analysis of Thin-walled Structures with Angle Steel[J]. Thin-walled Structures, 2014, 80: 153-158.
- [13] 谢 强, 孙 力, 林 韩, 等. 500 kV 输电杆塔结构抗风极限承载力试验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 712-719.
XIE Qiang, SUN Li, LIN Han, et al. Experimental Study on Wind-resistant Ultimate Load-carrying Capacity of 500 kV Transmission Tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 712-719.
- [14] XIE Q, SUN L. Failure Mechanism and Retrofitting Strategy of Transmission Tower Structures Under Ice Load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 26-36.
- [15] 鞠彦忠, 闫冬雪, 白俊峰, 等. 钢管十字插板连接承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(5): 77-84.
JU Yan-zhong, YAN Dong-xue, BAI Jun-feng, et al. Experiment Research and Finite Element Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Steel Tube Connection with Cross Flashboard[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(5): 77-84.
- [16] 刘春城, 胡晓炜, 乔 亮, 等. 覆冰荷载下 500 kV 输电塔失效模式研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 197-200.
LIU Chun-cheng, HU Xiao-wei, QIAO Liang, et al. Failure Mode Analysis of 500 kV Transmission Tower Under Icing Load[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(11): 197-200.
- [17] ALBERMANI F, KITIPORNCHAI S, CHAN R W K. Failure Analysis of Transmission Towers[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(6): 1922-1928.
- [18] 王干军, 吴毅江, 陈 波, 等. 导线挡距对转角输电塔承载力性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(8): 94-98.
WANG Gan-jun, WU Yi-jiang, CHEN Bo, et al. Investigation on Effects of the Cable Span on the Force-bearing Capacity of Transmission Angle-tower[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(8): 94-98.
- [19] 高 康, 陈海波, 王 朋, 等. 螺栓滑移对非均匀沉降输电塔承载能力的影响初探[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(12): 984-989.
GAO Kang, CHEN Hai-bo, WANG Peng, et al. Preliminary Research of the Effect of Bolt Slippage on the Bearing Capacity of Transmission Towers with Base Unequal Settlement[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(12): 984-989.
- [20] 贾玉琢, 张 亮, 林 丽. 基于 ANSYS 模型大跨越输电塔钢管-板节点焊接残余应力分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 108-111.
JIA Yu-zhuo, ZHANG Liang, LIN Li. Analysis on the Residual Welding Stress in Steel Tube-plate Joints of Long Span Transmission Towers Based on an ANSYS Model[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 108-111.
- [21] 刘 鸣, 付华平, 李永浩, 等. 不同有限元模型对钢管角钢混合塔动力特性分析的影响[J]. 特种结构, 2014, 31(6): 114-118.
LIU Ming, FU Hua-ping, LI Yong-gao, et al. Influ-

- ence of Different Finite Element Models on Dynamic Characteristics Analysis of Tube-angle Steel Tower[J]. *Special Structures*, 2014, 31(6): 114-118.
- [22] DA SILVA J G S, VELLASCO P C G D S, DE ANDRADE S A L, et al. Structural Assessment of Current Steel Design Models for Transmission and Telecommunication Towers[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(8): 1108-1134.
- [23] 胡星, 包永忠, 覃伟平, 等. 输电铁塔计算模型分析[J]. *电力建设*, 2010, 31(12): 33-37.
HU Xing, BAO Yong-zhong, QIN Wei-ping, et al. Study on Calculation Model of Transmission Towers[J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(12): 33-37.
- [24] 杨靖波, 韩军科, 李茂华, 等. 特高压输电线路钢管塔计算模型的选择[J]. *电网技术*, 2010, 34(1): 1-5.
YANG Jing-bo, HAN Jun-ke, LI Mao-hua, et al. Selection of Calculation Model for Steel Tubular Tower of UHV Power Transmission Line[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(1): 1-5.
- [25] 赵滇生, 金三爱. 有限元模型对输电塔架结构动力特性分析的影响[J]. *特种结构*, 2004, 21(3): 8-11.
ZHAO Dian-sheng, JIN San-ai. Influences of Finite Element Models on Dynamic Characteristics Analysis of Transmission Tower[J]. *Special Structures*, 2004, 21(3): 8-11.
- [26] 陈祥和, 刘在国, 肖琦. 输电杆塔及基础设计[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
CHEN Xiang-he, LIU Zai-guo, XIAO Qi. *Transmission Tower and Foundation Design*[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [27] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Northeast Electric Power Design Institute of State Power Corporation. *Design Manual of High Voltage Power Transmission Line for Electric Power Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [28] 王飞, 李清华, 韩军科, 等. 一种平面节点的处理方法[C]//《工业建筑》杂志社. 2015年全国智慧城市与智慧结构学术会议论文集. 北京:《工业建筑》杂志社, 2015: 128-132.
WANG Fei, LI Qing-hua, HAN Jun-ke, et al. A Method of Processing Plane Node[C]//*Industrial Construction Magazine Agency*. Proceedings of National Symposium on Intelligent City and Wisdom Structure in 2015. Beijing: *Industrial Construction Magazine Agency*, 2015: 128-132.
- [29] 张伟, 周强, 唐可人. 基于位移的输电塔地震易损性分析[J]. *钢结构*, 2016, 31(12): 47-52.
ZHANG Wei, ZHOU Qiang, TANG Ke-ren. Displacement-based Seismic Fragility Analysis Method for Power Transmission Tower[J]. *Steel Construction*, 2016, 31(12): 47-52.
- [30] 张伟, 周强, 马智勇, 等. 输电塔 Pushover 分析的侧向力分布模式选取研究[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2016, 41(6): 1764-1771.
ZHANG Wei, ZHOU Qiang, MA Zhi-yong, et al. Selection of Lateral Load Patterns for Pushover Analysis of Transmission Tower[J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2016, 41(6): 1764-1771.
- [31] DL/T 5154—2012, 架空输电线路杆塔结构设计技术规范[S].
DL/T 5154—2012, Technical Code for the Design of Tower and Pole Structures of Overhead Transmission Line[S].
- [32] GB 50135—2006, 高耸结构设计规范[S].
GB 50135—2006, Code for Design of High-rising Structures[S].