

输电塔线体系多因素风致动力响应分析

汪佳,付兴,李宏男

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要 目的 研究塔线耦联效应、几何非线性和线路初始张力对塔线体系动力响应的影响,并揭示各因素作用下塔线体系动力效应演化机制. 方法 运用 ANSYS 软件建立精细化仿真模型,对比简化模型和三塔四线模型在风荷载作用下的动力响应;对不同呼高的铁塔进行静力 pushover 分析,研究几何非线性对铁塔抗风承载力的影响以及线路初始张力的变化对塔线体系动力响应的影响. 结果 塔线耦联效应对塔顶位移和杆件应力的均值响应影响很小,对其均方根影响很大;当铁塔高度大于 40 m 时,是否考虑几何非线性所得结果相差达到 25% 以上. 结论 简化模型只能反应输电塔位移和应力的均值响应,利用塔线耦联模型才能得到真实的动力响应;几何非线性对铁塔抗风承载力的影响随塔身高度的增加而增大;导地线初始张力的变化对其动力响应影响很小,可忽略不计.

关键词 塔线体系;风荷载;耦联效应;几何非线性;初始张力

中图分类号 TU973⁺.32;TM753

文献标志码 A

Dynamic Analysis of a Transmission Tower-Line System under Wind Loading with Multiple Factors

WANG Jia, FU Xing, LI Hongnan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: This paper studies the influence of coupling effect, geometric nonlinearity and the initial tension of transmission line on the dynamic response of the tower-line system. The three-dimensional finite element models of transmission tower-line system are established in ANSYS. The dynamic response of the simplified model and the three-tower and four-line model under wind loads is compared; the static pushover analysis of the towers with different heights are concluded to study the influence of geometric nonlinearity on the wind-bearing capacity of the tower; the effects of initial tension of transmission line are compared. The results show that the simplified model can only reflect the mean value of the tip displacement and the mean stress of the

收稿日期:2019-03-16

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(2017M620101,2019T120207);中央高校基本科研业务费(DUT19RC(4)021)

作者简介:汪佳(1993—),男,博士研究生,主要从事输电塔线体系抗风方面研究.

member, root-mean-square value correspondingly are invalid, and the coupling model can be used to obtain the real dynamic response; the influence of geometric nonlinearity on the wind-bearing capacity of the tower increases with the tower height, the relative error is more than 25% when the height of the tower is greater than 40 m; the effects of initial tension of transmission line are compared, which demonstrate that the change of the initial tension has little effect on the dynamic response and can be ignored.

Key words: transmission tower-line system; wind loading; coupling effect; geometric nonlinearity; initial tension

输电塔线体系是输电线路的主干线, 是高负荷电能输送的载体, 也是重要的生命线工程. 与一般的工程结构相比, 兼有高耸结构和大跨度结构的共同特点, 对风荷载等灾害荷载反应敏感, 容易发生振动疲劳损伤和极端条件下的倒塌破坏^[1]. 由于塔线体系轻质、高柔、小阻尼的特性, 其风损和风毁在世界各地频发, 给各国带来了巨大的经济损失. 因此, 为保证塔线体系的安全性及可靠性, 研究风荷载作用下各种因素对塔线体系动力响应的影响具有非常重要的现实意义.

塔线体系是由输电塔、导地线、绝缘子串等组成的复杂空间耦联体系, 导地线的振动具有较强的几何非线性及密集模态的特点, 其动力行为对输电塔的风振响应影响显著^[2]. 针对塔线耦联效应对其动力响应的影响, 国内外学者已经开展了大量的试验研究与理论分析. 谢强等^[3]通过五塔四线耦联模型风洞试验揭示了塔线耦联体系的风荷载传递机制, 研究表明导线及绝缘子的振动对输电塔具有重要影响, 随着风速的增加, 导线高阶振型对振动能量的贡献增大. 赵桂峰等^[4]对比了单塔与塔线体系完全气弹模型在多个风向角、多级风速下的风洞试验, 发现塔线体系的风致振动具有非线性内共振的特点, 导地线的存在使得塔线体系的位移和应力响应比单塔时的显著增大. 郭勇等^[5]通过单塔和一塔双线体系风洞试验研究, 得出输电塔的响应可分解为共振响应与背景响应, 通过分析塔线耦合作用对两部分分量的影响, 揭示了塔线体系的风振响应特性. S. Ozono 等^[6]

提出了两种求解塔线耦联体系在平面动力特性的计算模型, 分析了塔线跨数、边界条件、导线的质量和垂跨比对塔线体系在平面动力特性的影响, 探讨了塔线耦联对输电塔和导线振型的影响. 李宏男等^[7-9]首先提出了塔线体系多质点模型, 利用能量原理建立了塔线体系动力分析方法, 结合大量理论分析和试验研究, 提出了可供工程应用的塔线体系简化抗震设计实用计算方法. 谢献忠等^[10]提出了塔线体系非线性耦合振动的动力学模型, 研究了导线的耦合振动特性和能量传递机理. 张琳琳等^[11]研究了三塔两线模型的风致动力响应, 结果表明, 塔线耦联效应可使该输电塔顺风向动力反应较规范拟静力分析明显增加. 大量的研究表明, 塔线耦联效应对塔线体系有重要影响, 设计中不可忽略这种作用.

随着电网的不断升级, 塔线体系的高度和跨度不断增大, 几何非线性对塔线体系的影响更为突出. F. G. A. Albermani 等^[12]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. C. Ladubec 等^[13]研究了几何非线性对拉线式输电塔受下击暴流荷载的影响, 得出非线性分析所得杆件轴力峰值比线性分析增大 30% 以上. W. Yi 等^[14]对比了三种考虑材料几何双重非线性的铁塔有限元模拟结果和真型试验结果, 发现梁-实体单元模型优于梁单元模型, 杆系模型结果与试验结果误差较大. 王辉等^[15]将输电塔有

限元分析结果与真型试验对比,分析结果表明,按线弹性和小变形法设计的输电塔安全裕度过大,应考虑几何非线性、材料非线性及端弯矩对结构受力性能的影响。汪欣等^[16]研究了地震作用时输电塔线体系在不同档距和阻尼比下,导线对塔架非线性性能的影响,建议在输电塔抗震设计中,应充分考虑非线性。

导地线是一类典型的大跨度高柔性缆索,由于其刚度小、阻尼低,在外部荷载激励作用下易发生大幅振动。正是由于其特殊性,国内外学者通过理论建模、数值分析以及实验验证等取得了大量研究成果。现有对导地线的研究主要集中在导线舞动^[17-18]、覆冰^[19]、断线^[20]、不平衡张力^[21]等方面,对导地线初始张力研究很少,然而初始张力与其初始形态密切相关,不同的初始形态必然导致塔线体系动力响应有所变化。

由上述可知,塔线耦联效应越来越受到国内外学者的关注,但现有的研究并未深入、定量对比是否考虑耦联效应对塔线体系动力响应的影响;几何非线性是影响输电塔结构抗风承载力的重要因素,但其所受几何非线性的影响程度也少有定量的研究;塔线体系的动力反应具有高度非线性特点,其对体系的初始状态非常敏感,但对导地线初始张力影响塔线体系动力响应的研究目前非常少。基于此,笔者通过对比简化模型与三塔四线模型在风荷载作用下的非线性动力时程分析结果,研究塔线耦联效应对输电塔风致响应的影响程度;通过对不同高度的铁塔进行非线性静力推覆分析,得到了该类输电塔设计时必须考虑几何非线性效应的塔高限值;通过对不同导地线张力的塔线模型进行非线性动力时程分析,得出导地线初始张力变化对输电塔风致响应的影响很小,可忽略不计。研究分析上述关于塔线耦联效应、几何非线性和导地线初始张力这三种因素对塔线体系动力响应的影响可为塔线体系的抗风设计提供重要的理论支持。

1 塔线耦联效应

以广东省某 220 kV 输电线路为工程背景,该线路导线型号为 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,设计风速为 35 m/s。选取该线路中#124 号塔(BZ361 - 27)为研究对象,水平档距为 300 m。建立两个单塔简化模型和一个塔线耦联模型进行对比研究,分别为将导地线质量简化为质量点的简化模型 1,将导地线质量简化为集中荷载的简化模型 2,以及考虑铁塔、导地线和绝缘子耦联效应的三塔四线模型,分别如图 1、图 2 和图 3 所示。上述有限元模型均利用 ANSYS 软件建模,采用 BEAM188 单元模拟输电塔杆件,MASS21 单元模拟质量点,LINK180 单元模拟导地线及绝缘子,简化模型中的导地线质量或集中荷载简化到横担悬挂点。

对于输电塔结构,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失稳破坏^[22]。笔者采用一致缺陷模态法施加缺陷,以最低阶屈曲模态更新有限元模型的节点坐标^[23-24]。采用双线性等向强化模型模拟钢材本构关系,设置材料非线性后即可进行非线性动力时程及相关静力 pushover 分析。将输电塔从上到下简化成 12 个风荷载模拟点,简化模型的导地线风荷载施加在附加质量点或集中荷载所在处,取相邻半跨导地线的迎风面积计算等效风荷载,三塔四线模型则直接施加在导地线单元节点上。风荷载根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2002)^[25]的规定进行计算,采用谐波叠加法生成脉动风速时程。该输电线路的最不利风攻角为 90°,故笔者只考虑风速垂直输电线路的工况(X 方向为垂直导线方向,Z 方向为顺导线方向),基本风速取 20 m/s。



图 1 简化模型 1

Fig. 1 Simplified model 1

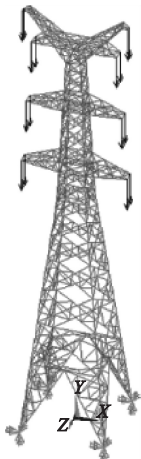


图 2 简化模型 2

Fig. 2 Simplified model 2

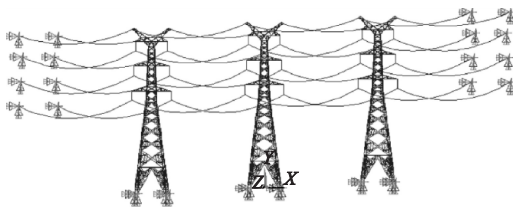


图 3 塔线体系模型

Fig. 3 Model of tower-line system

简化模型和三塔四线模型的塔顶位移和加速度响应分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出,三者的均值结果较为一致,但简化模型的计算结果波动性更强,最大值及均方根均明显大于三塔四线模型结果。从图 5 中可以看出,简化模型的顺风向加速度响应明显大于三塔四线模型,简化模型 2 由于在横

担悬挂点处没有附加导线质量,其加速度响应明显大于简化模型 1。

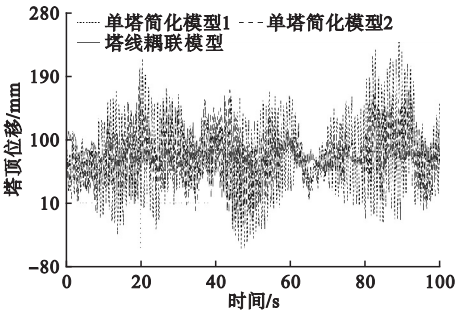


图 4 不同模型的塔顶位移时程曲线

Fig. 4 Time history curves of tower tip displacement for different models

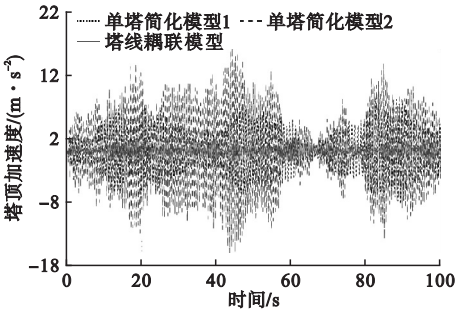


图 5 不同模型的塔顶加速度时程曲线

Fig. 5 Time history curves of tower tip acceleration for different models

主要受力杆件的应力时程对比如图 6 所示。图中各杆件单元的位置详见图 1。从图 6 中可明显看出,简化模型及三塔四线模型计算结果的均值较为一致,但简化模型的主材应力波动非常剧烈,均方根和极值亦明显大于三塔四线模型分析结果。

为进一步定量对比考虑塔线耦联效应的影响,表 1 和表 2 汇总了简化模型和三塔四线模型计算结果的均值及均方根。从表中可以看出,是否考虑塔线耦联效应,对塔顶位移和杆件应力的均值影响很小,可忽略不计;塔线耦联效应对位移、加速度、应力的均方根影响很大,考虑耦联效应后均方根明显小于简化模型结果。这主要是因为,一方面,简化模型和塔线模型中导线总质量和总风荷载相同,但简化模型未考虑导线对系统总阻尼的贡献,使得简化模型的共振响应偏大;另一

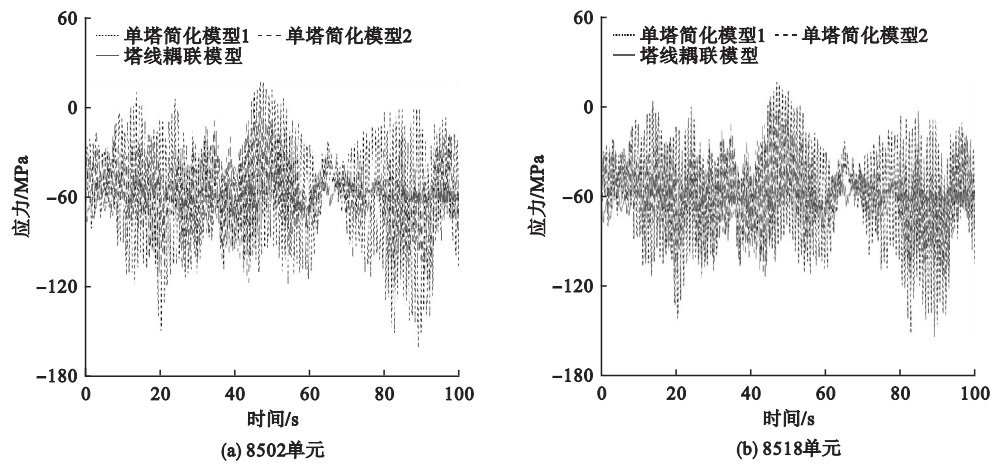


图 6 不同模型的杆件应力时程曲线

Fig. 6 Time history curves of member stress for different models

方面,塔线体系中导地线悬挂在输电塔横担的下端,在风荷载作用下来回摆动,其减振机理类似于带有阻尼的质量摆,而简化模型将导地线质量及对应风荷载直接施加到横担悬挂点上,没有导地线摆动产生减振的有利因素,反应较为剧烈. 对于两个单塔简化模型,可知简化模型 1 塔顶位移和杆件应力的均方根均小于简化模型 2,因此,简化模型 2 优于简化模型 1.

由上述分析可知,两种单塔简化模型不能准确的反应塔线体系的动力特性,只有在研究铁塔响应的均值时才能得到较为准确的结果. 因此,在有关塔线体系的数值仿真中,应该建立塔线耦联模型开展相关研究工作.

表 1 简化模型和三塔四线模型动力响应

Table 1 Dynamic response of simplified model and coupling model

模 型	均值				标准差			
	塔顶位 移/mm	塔顶加速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	8502 单元 应力/MPa	8518 单元 应力/MPa	塔顶位 移/mm	塔顶加速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	8502 单元 应力/MPa	8518 单元 应力/MPa
简化模型 1	75. 074	—	-58. 833	-59. 204	53. 707	3. 313	34. 176	31. 592
简化模型 2	74. 990	—	-58. 427	-59. 128	37. 036	6. 170	23. 211	22. 437
三塔四线模型	75. 260	—	-58. 663	-59. 059	10. 807	0. 739	6. 663	6. 602

表 2 简化模型及三塔四线模型结果对比

Table 2 Comparison of simplified model and coupling model

参 数	简化模型 1		简化模型 2	
	均值相对误差/%	标准差相对误差/%	均值相对误差/%	标准差相对误差/%
塔顶位移	0. 25	396. 97	0. 36	242. 71
塔顶加速度	—	348. 27	—	734. 95
8502 单元应力	0. 29	412. 94	0. 40	248. 36
8518 单元应力	0. 25	378. 54	0. 12	239. 86

注:相对误差=(简化模型响应-三塔四线模型响应)/三塔四线模型响应×100%.

2 几何非线性影响

本节研究几何非线性对输电塔结构抗风承载力的影响时,采用静力 pushover 方法. 对 BZ361-27 号塔(即上一节中的简化模型 2, 总高为 43.5 m)和 BZ361-15 号塔(总高为 31.5 m)建立有限元模型,BZ361-15 号塔的有限元模型及应力提取杆件位置如图 7 所示.

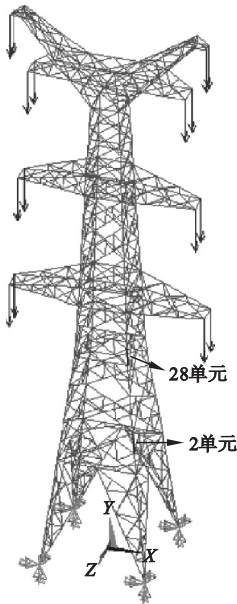


图7 BZ361-15 号塔有限元模型
Fig.7 Finite element model of BZ361-15 tower

对上述模型在考虑几何非线性和不考虑几何非线性时分别进行静力推覆分析,计算结果如图 8 所示. 从图 8 中可以看出,考虑几

何非线性时 BZ361-27 和 BZ361-15 号塔的临界倒塌风速分别为 36.1 m/s 和 52.6 m/s,不考虑几何非线性时临界倒塌风速分别为 45.13 m/s 和 53.5 m/s,两者相对误差分别为 25.0% 和 1.7%;对于 BZ361-15 塔,是否考虑几何非线性对其抗风承载力影响较小,对于 BZ361-27 塔,二者间计算结果相差较大.

BZ361-15 和 BZ361-27 号塔主要受力杆件的应力结果分别如图 9 和图 10 所示. 均在风速较小时,是否考虑几何非线性对杆件应力影响很小,随着风速的增大,两条推覆曲线逐渐分离,考虑几何非线性时,输电塔杆件的应力更快达到屈服强度. 应当说明,图 8~图 10 中 Pushover 曲线出现转折的原因是按规范要求计算导地线风荷载时风压不均匀系数的取值不连续,风压不均匀系数的取值详见《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2002)^[25]的规定.

为进一步研究几何非线性对不同高度输电塔抗风承载力的影响,定义临界倒塌风速相对误差 R_e :

$$R_e = \frac{V_{wo} - V_{nlgeom}}{V_{nlgeom}} \tag{1}$$

式中: V_{nlgeom} 和 V_{wo} 分别表示考虑几何非线性和不考虑几何非线性所对应的铁塔临界倒塌风速.

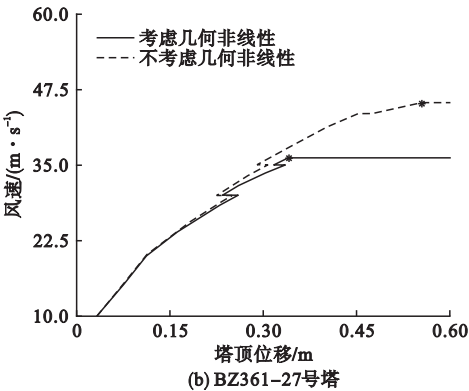
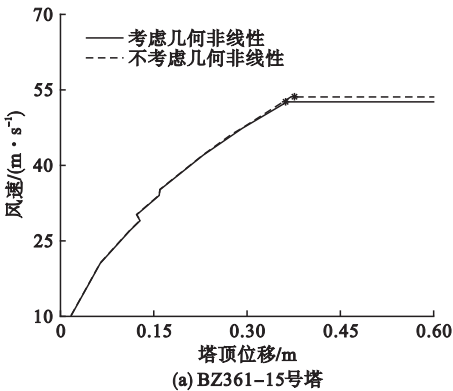


图8 几何非线性对推覆结果的影响
Fig.8 Influence of geometric nonlinearity on the pushover results

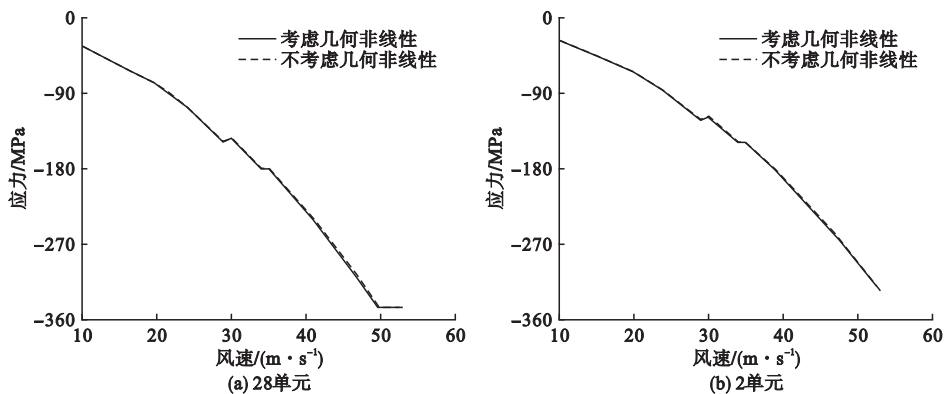


图 9 几何非线性对 BZ361-15 号塔杆件应力的影响

Fig. 9 Influence of geometric nonlinearity on the member stress for BZ361-15 tower

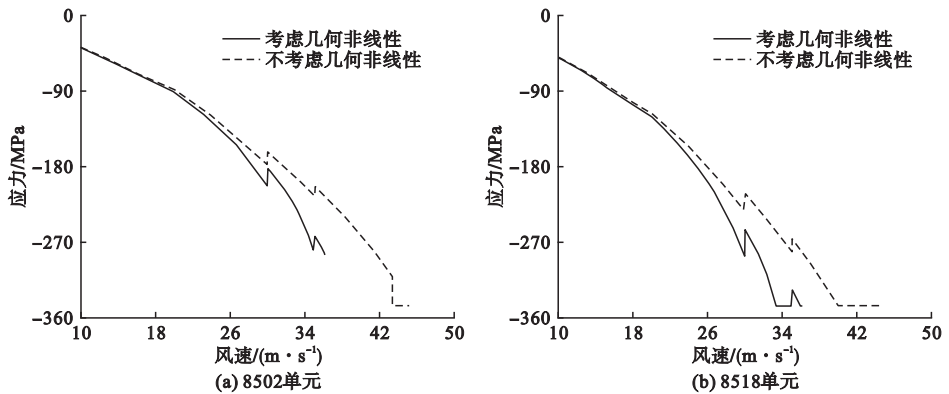


图 10 几何非线性对 BZ361-27 号塔杆件应力的影响

Fig. 10 Influence of geometric nonlinearity on the member stress for BZ361-27 tower

选取七个不同高度的铁塔进行静力 pushover 分析,所得结果详见图 11.

得结果的相对误差小于 5%;当铁塔高度大于 40 m 时,相对误差达到 25% 以上. 因此,建议实际工程中高度大于 40 m 的输电塔,在设计时考虑几何非线性对其承载力的影响.

3 导地线初始张力

我国规范规定^[26],导线和地线的设计安全系数不应小于 2.5,考虑接头等降低导线强度的因素,导地线的最大许用张力为

$$T = \frac{0.95T_p}{k_c} \quad (2)$$

式中: T 为导地线的最大许用张力; T_p 为导地线的计算拉断力; k_c 为导地线的安全系数;0.95 为考虑导线接头等强度降低的因数.

导地线的初始形态会随初始张力的变化而改变,建立有限元模型时,需要根据导地线的初始张力进行循环找形. 在实际施工及运

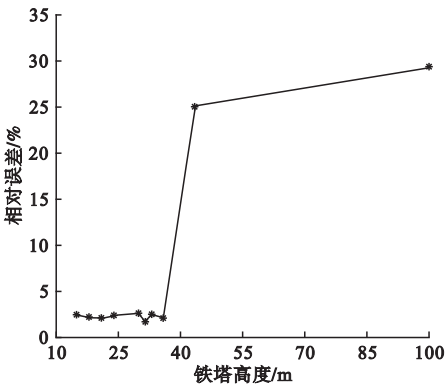


图 11 不同高度铁塔几何非线性影响趋势

Fig. 11 The influence of geometric nonlinearity on different height towers

从图 11 中可以明显看出,当铁塔高度较小时(高度小于 36 m),几何非线性对铁塔抗风承载力影响很小,是否考虑几何非线性所

营过程中,导地线的初始张力与其设计张力必然有所偏差,因而有必要研究初始张力变化对塔线体系动力响应的影响。

本节以图 3 所示的塔线耦联模型为基本模型,该模型导地线的设计安全系数取 4.0,单根导线的计算拉断力为 143.93 kN,初始张力为 35.98 kN,单根地线的计算拉断力为 58.04 kN,初始张力为 9.92 kN。以基本模型为基础,建立导地线初始张力增大 30% 的塔线耦联模型 1 和导地线初始张力减小 30% 的塔线耦联模型 2,对上述模型施加基本风速为 20 m/s 的脉动风速时程进行动力分析。

上述模型的塔顶位移、加速度和主要受力杆件应力计算结果分别如图 12 ~ 图 14 所示。从图中可以看出,三者的计算结果较为一致,说明初始张力变化对塔顶位移、加速度和杆件应力的影响很小。为进一步定量对比考虑导地线初始张力变化的影响,表 3 和表 4 汇总了三者计算结果的均值及均方根,分析表中数据亦可以得出上述结论。

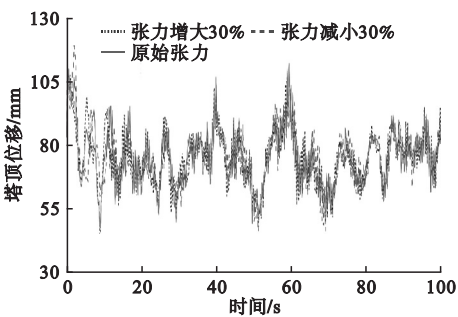


图 12 不同初始张力模型塔顶位移时程曲线
Fig. 12 Time history curves of tower tip displacement for different initial tension models

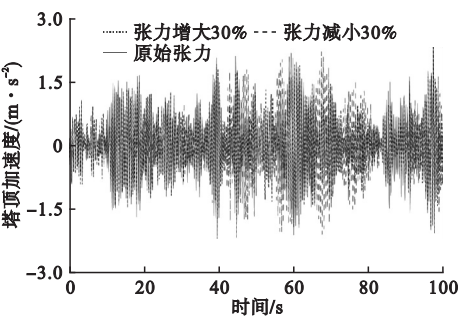


图 13 不同初始张力模型塔顶加速度时程曲线
Fig. 13 Time history curves of tower tip acceleration for different initial tension models

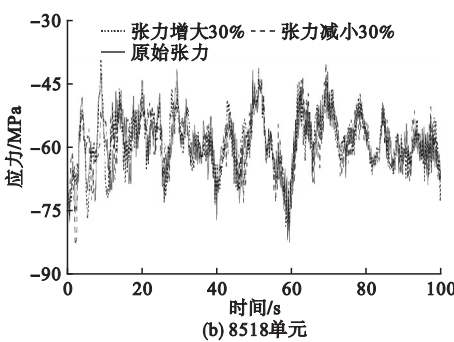
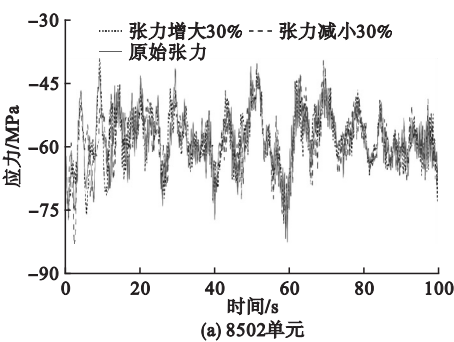


图 14 主要受力杆件应力时程对比

Fig. 14 Comparison of time history curves for member stress

表 3 耦联模型与基本模型动力响应

Table 3 Dynamic response of coupling model and basic model

模 型	均值				标准差			
	塔顶位 移/mm	塔顶加速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	8502 单元 应力/MPa	8518 单元 应力/MPa	塔顶位 移/mm	塔顶加速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	8502 单元 应力/MPa	8518 单元 应力/MPa
耦联模型 1	75.151	—	-58.609	-59.008	10.756	0.690	6.660	6.622
耦联模型 2	75.385	—	-58.691	-59.088	10.554	0.720	6.626	6.535
基本模型	75.260	—	-58.663	-59.059	10.807	0.739	6.663	6.602

表 4 耦联模型与基本模型结果对比

Table 4 Comparison between coupling model and basic model

参 数	耦联模型 1		耦联模型 2	
	均值相对误差/%	标准差相对误差/%	均值相对误差/%	标准差相对误差/%
塔顶位移	0.15	0.47	0.17	2.34
塔顶加速度	—	6.62	—	2.57
8502 单元应力	0.09	0.04	0.05	0.55
8518 单元应力	0.09	0.30	0.05	1.02

注:相对误差=(耦联模型响应-基本模型响应)/基本模型响应×100%。

4 结 论

(1)是否考虑塔线耦联效应,对塔顶位移和杆件应力的均值影响很小,但对其均方根影响很大,在设计中应更合理地考虑塔线耦联效应。

(2)几何非线性对输电塔抗风承载能力的影响随塔体高度的增加而增大,建议高度大于 40 m 的铁塔,在设计时考虑几何非线性的影响。

(3)导地线初始张力变化对塔顶位移、加速度和杆件应力的影响很小,可忽略不计。

参考文献

[1] 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 Hongnan, BAI Haifeng. 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.)

[2] 赵桂峰,李杰,谢强,等. 高压输电塔线耦联体系风振响应有限元分析与现场实测对比研究[J]. 自然灾害学报,2014,23(1):64-74.
(ZHAO Guifeng, LI Jie, XIE Qiang, et al. Finite element analysis and field measurement of wind-induced vibration response of high-voltage transmission tower-line coupling system [J]. Journal of natural disasters, 2014, 23(1): 64-74.)

[3] 谢强,李继国,严承涌,等. 1000 kV 特高压输电塔线体系风荷载传递机制风洞试验研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):109-116.
(XIE Qiang, LI Jiguo, YAN Chengyong, et al. Wind tunnel test on wind load transferring mechanism in the 1000 kV UHV transmission tower-line system [J]. Proceedings of the Chinese society for electrical engineering, 2013, 33(1): 109-116.)

[4] 赵桂峰,谢强,梁枢果,等. 输电塔架与输电塔-线耦联体系风振响应风洞试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(2):69-77.
(ZHAO Guifeng, XIE Qiang, LIANG Shuguo, et al. Wind tunnel test on wind-induced response of transmission tower and tower line coupling system [J]. Journal of building structures, 2010, 31(2): 69-77.)

[5] 郭勇,孙炳楠,叶尹,等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(9):1482-1486.
(GUO Yong, SUN Bingnan, YE Yin, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of long span transmission line system [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2007, 41(9): 1482-1486.)

[6] OZONO S, MAEDA J. In-plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies [J]. Engineering structures, 1992, 14(4): 210-216.

[7] 李宏男,肖诗云. 纵向地震作用下输电塔相互作用体系分析 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 105-107.
(LI Hongnan, XIAO Shiyun. Analysis on model of transmission tower-pile-soil interaction and its seismic response [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1998, 20(6): 105-107.)

[8] 李宏男,石文龙,贾连光. 考虑导线影响的输电塔侧向简化抗震计算方法 [J]. 振动工程学报,2003,16(2):101-105.
(LI Hongnan, SHI Wenlong, JIA Lianguang. Simplified aseismic calculation method considering effects of lines on transmission tower [J]. Journal of vibration engineering, 2003, 16(2): 101-105.)

[9] 李宏男,石文龙,贾连光. 导线对输电塔体系纵向振动的影响界限及简化抗震计算方法 [J]. 振动与冲击,2004,23(2):1-7.
(LI Hongnan, SHI Wenlong, JIA Lianguang. Limitations of effects of lines on in-plane vibration of transmission towers and simplified seismic calculation method [J]. Journal of vibration and shock, 2004, 23(2): 1-7.)

[10] 谢献忠,沈伟成,彭剑,等. 输电线路非线性耦合振动的动力学模型与分析 [J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(6):972-977.
(XIE Xianzhong SHEN Weicheng, PENG Jian, et al. Modeling and analysis of nonlinear

- coupled vibration of transmission line system [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2016, 36(6): 972 - 977.)
- [11] 张琳琳, 谢强, 李杰. 输电线路多塔耦联体系的风致动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(3): 261 - 267.
(ZHANG Linlin, XIE Qiang, LI Jie. Dynamic wind-induced response analysis of multi-tower-line coupled system of transmission line [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2006, 26(3): 261 - 267.)
- [12] ALBERMANI F G A, KITIPORNCHAI S. Numerical simulation of structural behaviour of transmission towers [J]. Thin-walled structures, 2003, 41(2/3): 167 - 177.
- [13] LADUBEC C, EL DAMATY A A, EL ANSARY A M. Effect of geometric nonlinear behaviour of a guyed transmission tower under downburst loading [C]//Proceedings of the international conference on vibration, structural engineering and measurement. Shanghai: [s. n.], 2012: 1240 - 1249.
- [14] YI W, LIU X H. Nonlinear analysis of transmission tower structure by three FEM models [C]//Proceedings of the 4th international conference on measuring technology and mechatronics automation. Sanya: [s. n.], 2012: 914 - 917.
- [15] 王辉, 汪楚清, 薛建阳, 等. 特高压输电钢管塔双重非线性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(2): 210 - 216.
(WANG Hui, WANG Chuqing, XUE Jianyang, et al. Bilinear analysis of steel tube tower in UHV transmission lines [J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2014, 46(2): 210 - 216.)
- [16] 汪欣, 刘东, 潘启科. 地震作用下导线对输电塔非线性分析的影响[J]. 四川建筑, 2011, 31(6): 132 - 134.
(WANG Xin, LIU Dong, PAN Qike. The influence of conductors on nonlinear analysis of transmission tower under earthquake [J]. Sichuan architecture, 2011, 31(6): 132 - 134.)
- [17] KIM J W, SOHN J H. Galloping simulation of the power transmission line under the fluctuating wind [J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2018, 19(9): 1393 - 1398.
- [18] 王黎明, 高亚云, 卢明, 等. 特高压输电线路新型防舞技术计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2541 - 2550.
(WANG Liming, GAO Yayun, LU Ming, et al. Calculation on a new anti-galloping technique for UHV transmission lines [J]. High voltage engineering, 2017, 43(8): 2541 - 2550.)
- [19] 刘敏, 晏致涛, 冯上铭, 等. 多跨覆冰导线脱冰振动模型风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 223 - 229.
(LIU Min, YAN Zhitao, FENG Shangming, et al. Wind tunnel model tests for ice-shedding vibration of multi-span icing conductors [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(3): 223 - 229.)
- [20] 曹丹京, 田利, 马瑞升. 输电线路断线对高压输电塔—线体系的冲击作用分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 365 - 369.
(CAO Danjing, TIAN Li, MA Ruisheng. Analysis of impact effect of power transmission tower-line system subjected to broken wire of transmission line [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2014, 34(3): 365 - 369.)
- [21] 刘庆丰. 输电线路不平衡张力分析和计算[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 93 - 95.
(LIU Qingfeng. Analysis and calculation of transmission line unbalanced tensile force [J]. Electric power automation equipment, 2006, 26(1): 93 - 95.)
- [22] FU X, LI H N, LI J X. Wind-resistance and failure analyses of a lightning-damaged transmission tower [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2018, 32(1): 04017127.
- [23] 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.)
- [24] 陈昕, 沈世钊. 单层穹顶网壳的荷载-位移全过程及缺陷分析[J]. 建筑结构学报, 1992, 13(3): 11 - 18.
(CHEN Xin, SHEN Shizhao. Complete load-deflection response and imperfection analysis of single-layer lattice dome [J]. Journal of building structures, 1992, 13(3): 11 - 18.)
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of 110kV ~ 750kV overhead transmission line: GB 50545—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.)
- [26] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
(National Energy Administration. Technical code for the design of tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)