

文章编号:1673-9469(2025)01-0018-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.003

单塔模型在塔-线体系风致动力响应中的适用性研究

李玉学^{1,2,3}, 陈鹏⁴

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 中国铁路成都局集团有限公司遂宁工务段, 四川 遂宁 629000)

摘要: 以质量单元模拟输电线的质量, 以弹簧单元作为边界条件模拟输电线平面内、外等效刚度, 建立了输电塔线体系的单塔简化模型。以河北省唐山市乐亭县某一自立式钢管输电塔为工程背景, 分别采用所建立的单塔简化模型和传统的三塔两线模型进行结构风致动力响应计算, 通过对比两者在不同风向角、不同输电线初始水平张力和不同输电线跨度下结构的风致动力响应, 研究单塔简化模型的适用性。结果表明: 在 0° 、 45° 和 90° 风向角下, 保持输电线跨度不变, 输电线两端初始水平张力在基准值基础上分别增加20%和减少20%时, 两种计算模型所得结构在不同高度处的位移响应均方根和最大主材应力均方根基本吻合, 且均呈现出随着输电塔高度的增加, 二者偏差增大的规律; 在不同输电线跨度下, 两种计算模型所得结构动力响应的偏差随着输电线跨度增加而增大, 其中位移响应均方根偏差较主材应力均方根偏差受跨度影响更显著, 因此提出的单塔简化模型适用于跨度小于700 m的输电塔线体系风致动力响应计算。另外, 在塔高较小的输电塔线体系中, 提出的单塔简化模型具有较高的计算精度。

关键词: 输电塔; 单塔简化模型; 三塔两线模型; 初始水平张力; 风致动力响应

中图分类号: TU347

文献标识码: A

Applicability of Single Tower Model in Wind-Induced Dynamic Response Analysis of Transmission Tower-Line System

LI Yuxue^{1,2,3}, CHEN Peng⁴

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 4. China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Suining Works Section, Suining, Sichuan 629000, China)

Abstract: A simplified single tower model of the transmission tower line system was established by simulating the quality of the transmission line using quality units and simulating the equivalent stiffness of the transmission line inside and outside the plane using spring units as boundary conditions. Taking a self-standing steel tube transmission tower in Laoting County, Tangshan City, Hebei Province as the engineering background, the single tower simplified model was established and the traditional three tower two line model was used to calculate the wind-induced dynamic response of the structure. By comparing the wind-induced dynamic response of the two models under different wind direction angles, initial horizontal tension of transmission lines, and different transmission line spans, the applicability of the single tower simplified model was studied. The results show that under wind direction angles of 0° , 45° , and 90° , keeping the span of the transmission line unchanged, when the initial horizontal tension at both

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278314); 河北省自然科学基金资助项目(E2019210031); 中央引导地方科技发展资金资助项目(206Z5401G); 北京交通大学“结构风工程与城市风环境北京市重点实验室”开放课题(2023-1)

第一作者: 李玉学(1978—), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 从事桥梁与建筑结构风荷载与风致振动方面的研究。

ends of the transmission line increases by 20% and decreases by 20% respectively based on the reference value, the root mean square of displacement response and the root mean square of maximum main material stress obtained by the two calculation models at different heights are basically consistent, and both show a pattern of increasing deviation with the increase of transmission tower height; The deviation of structural dynamic response obtained by the two calculation models increases with the increase of transmission line span under different transmission line spans. Among them, the root mean square deviation of displacement response is more significantly affected by span than the root mean square deviation of main material stress. Therefore, the simplified tower model proposed is suitable for wind-induced dynamic response calculation of transmission tower line systems with spans less than 700 meters. In addition, in transmission tower line systems with smaller tower heights, the simplified model of the bill of lading tower has higher computational accuracy.

Key words: transmission tower; single tower simplified model; three towers and two lines model; initial horizontal tension; wind response

在实际工程中,输电线在风荷载作用下发生振动,并通过绝缘子将振动传递给输电塔,与此同时风荷载导致的输电塔自身振动也会引起输电线张力的改变,二者相互作用^[1-2],使得结构对风荷载十分敏感,容易发生风致破坏或疲劳损伤,引发大面积停电,造成经济损失或不良的社会影响^[3-6]。大多数学者通过建立塔线精细化模型进行相关研究。精细化建模虽然结果准确,但存在建模分析过程相对繁琐,计算效率不高的缺点。针对上述问题,国内外不少学者提出了多个简化计算模型,包括将输电塔简化为具有多个集中质量点的串联多自由度体系,将输电线简化成多个集中质点,各集中质量点之间采用刚性杆相连,该方法所得计算结果与理论解吻合较好,能准确反映输电塔线耦联振动效应^[7-10]。另外,谢献忠等^[11]将直线塔绝缘子串简化为一个转动的刚体,据此研究了输电线的耦合振动特性和能量传递机理。杨文刚等^[12]采用梁柱简化模型计算了某自立式输电塔线体系的动力特性,并与桁梁混合精细化塔线体系模型所得结构动力特性进行对比,结果表明,两者计算所得动力特性基本相同,但前者计算效率明显提升。姚旦等^[13]采用 C++ 语言编写了向量式有限元程序,对输电塔线体系进行风振响应计算,并与传统有限元方法计算结果进行对比,发现所编写的向量式有限元程序具有较好的工程应用价值。

本文以河北省唐山市乐亭县某一自立式钢管输电塔为工程背景,采用集中质量点模拟输电线质量,采用悬垂索的抛物线理论计算输电线平面内等效刚度,采用小弧垂和水平张力不变假设计算输电线平面外等效刚度,并以弹簧单元作为边

界条件模拟输电线平面内、外等效刚度,据此建立输电塔线体系的单塔简化模型。基于线性滤波法得到结构风荷载,通过对比单塔简化模型以及传统的三塔两线模型在不同风向角、不同输电线初始水平张力、不同输电线跨度下的结构风致动力响应,研究所建立的单塔简化模型的适用性,为类似输电塔结构风致动力响应分析提供更多选择和参考。

1 输电塔线体系分析模型

1.1 工程背景

本文所选自立式大跨越输电塔塔高 117.3 m,档距 500 m,输电线垂度为 22.69 m,输电线共分 4 层,最上层是两相地线(JLB20A-185),下三层每层分别有两相四分裂输电线(XJL/G1A-630/45),绝缘子为 FXBW3-220/100-C 型复合绝缘子。输电塔的主材及辅材为不同直径的 Q235 圆钢管,横担和部分缀条由不同型号的 Q235 角钢组成,其截面宽度随着输电塔高度增加而逐渐减小,结构立面布置如图 1 所示。

1.2 计算模型建立

研究选取的输电塔线体系由输电塔、输电线以及绝缘子构成,为了准确模拟这三种构件的协同工作状态,模型中的绝缘子采用梁单元模拟,并设置较大的刚度,以便将输电线上的风荷载传递到输电塔架,其摆动可以自动平衡输电线两侧的张力。同时,为简化计算,将地线和每相四分裂输电线按承受风荷载数值等效原则简化为一根输电线^[14]。

对于输电线的模拟,确定其初始形态(初始找

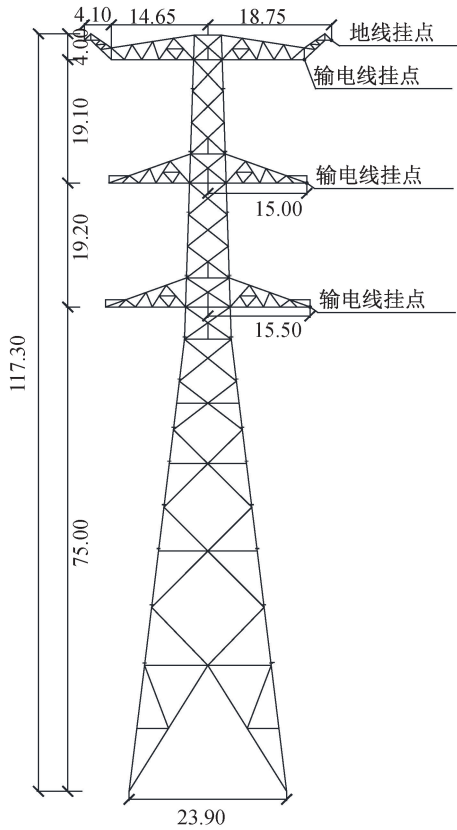


图1 输电塔结构立面图(单位:m)

Fig.1 Elevation of transmission tower structure(unit:m)

形)是关键环节,考虑到输电线所受均布荷载一般为沿曲线的弦线均匀分布的抛物线形状,或沿弧长均匀分布的悬链线形状^[15],本文以抛物线族为其线形,由输电线所需垂度确定其两端的水平张力,在自重荷载作用下输电线的初始状态解为

变形曲线:

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} + \frac{h}{l}x \quad (1)$$

跨中垂度与水平张力关系:

$$H = \frac{ql^2}{8f\cos\theta} \quad (2)$$

式中, f 为两塔间输电线跨中垂度,m; l 为两塔间输电线的水平跨度,m; h 为两塔间输电线两端挂点的高差,m; H 为输电线初始张力,N; q 为输电线的自重集度,N/m; θ 为输电线两端挂点与水平线的夹角,(°)。

输电线质量用质量单元模拟,悬挂于绝缘子下方,其质量大小取相邻两半跨输电线的质量,并在质量点处以弹簧单元作为边界条件,模拟输电线平面内、外的等效刚度。因此,在此简化模型建模过程中最关键的是准确模拟输电线两端的边界条件,根据悬垂索的抛物线理论计算输电线平面

内的等效刚度,根据小弧垂及水平张力不变假设计算输电线平面外等效刚度^[16]。

其中,单跨输电线平面外等效刚度 K_x 为

$$K_x = \frac{ql + w/2}{a} + \frac{H}{l} \quad (3)$$

单跨输电线平面内等效刚度 K_z 为

$$K_z = (1 + \frac{q^2l^2}{8H^2}) / (\frac{l}{EA} + \frac{q^2l^3}{12H^3}) \quad (4)$$

式中, w 为绝缘子自重,N; a 为绝缘子长度,m; E 为输电线弹性模量,N/m²; A 为输电线横截面积,m²。

输电塔模型底部4个节点均采用固定约束。同时,还建立传统的三塔两线模型,其中两端输电塔上绝缘子与输电线连接处节点施加顺输电线方向的位移约束,用来平衡顺输电线方向的张力^[17]。定义垂直输电线为 X 向,沿塔高为 Y 向,顺输电线为 Z 向,平面内为 YOZ 平面,平面外为 XOY 平面,且风荷载沿 Z 向为0°风向角,沿 X 向为90°风向角,本文建立的单塔简化模型及三塔两线模型如图2所示。

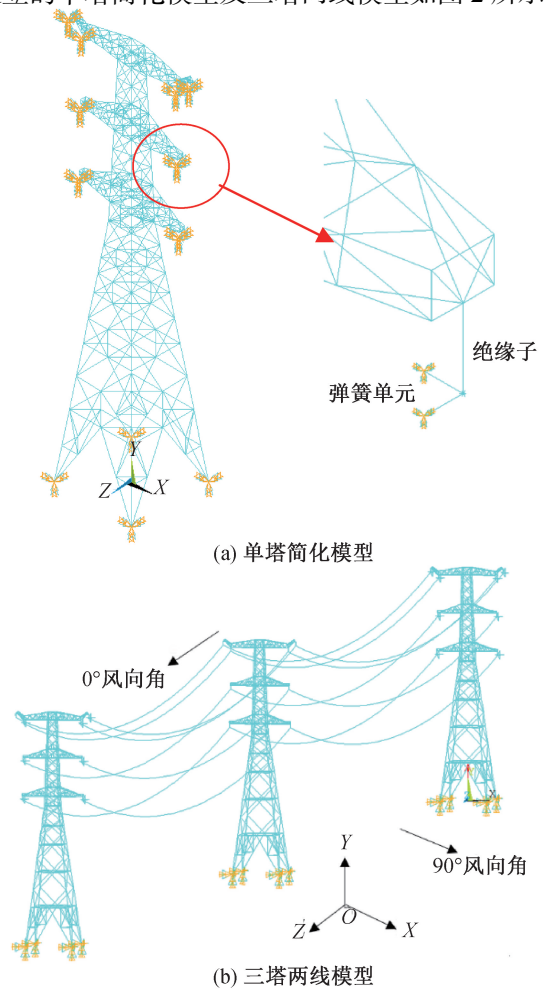


图2 两种计算模型

Fig.2 Two types of computing model

2 输电塔线体系风荷载

本文研究的输电塔线体系风荷载时程采用线性滤波法基于 Davenport^[18] 风速谱生成,具体参数见表 1。

表 1 线性滤波法计算输电塔结构风荷载所需参数

Tab. 1 Parameters required for calculating wind load on transmission tower structures using linear filtering method

类别	参数
地貌类型	A 类
地面粗糙度指数	$\alpha = 0.08$
地表阻力系数	$K = 0.001\ 29$
平均风速模型	指数率模型
10 m 高度处平均风速	25 m/s
脉动风速谱	Davenport 谱
衰减系数	$C_x = 6, C_y = 16, C_z = 10$
AR 模型阶数	$P = 4$
模拟风速时程长度	600 s
模拟风速步长	0.1 s
频率范围	0~10 Hz

对输电塔结构选取 15 个风荷载加载点,每根输电线路选取 12 个风荷载加载点,三塔两线模型中共计 141 个加载点,具体位置如图 3 所示,其中单塔简化模型输电线路风荷载施加在等效质量单元上,其数值取相邻两半跨输电线上的风荷载。采用线性滤波法计算得到各加载点处的脉动风速时程,选取代表性的塔顶处加载点结果示于图 4。

为了验证所得脉动风速时程的可靠性,将其

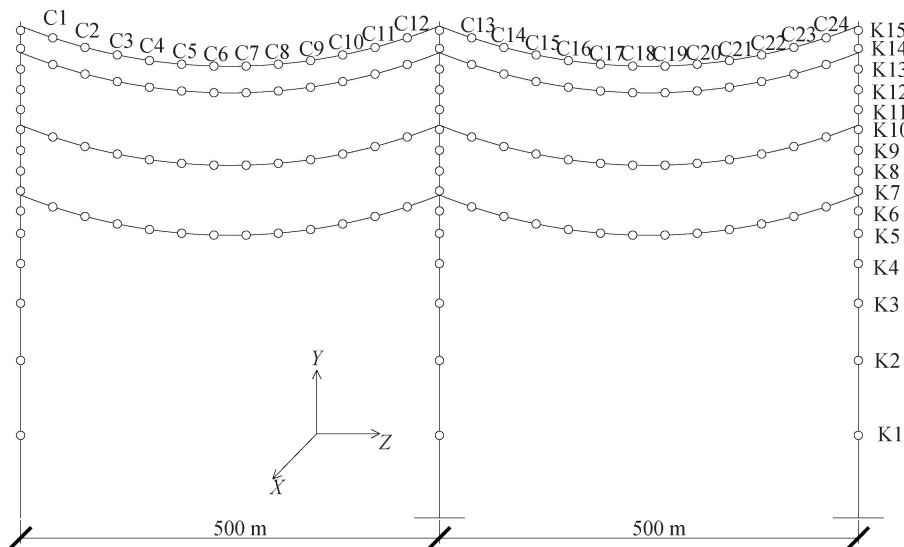


图 3 输电塔线风荷载加载点及编号

Fig. 3 Loading points and numbering of wind loads on transmission tower lines

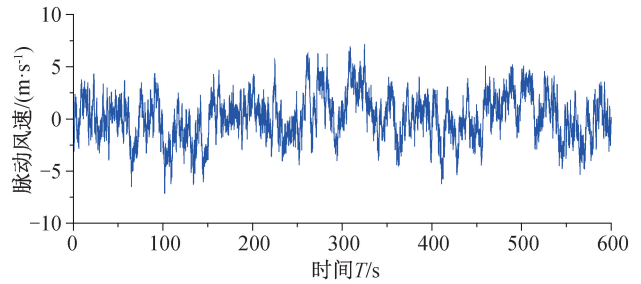


图 4 塔顶加载点处脉动风速时程

Fig. 4 Time history of fluctuating wind speed at top loading point

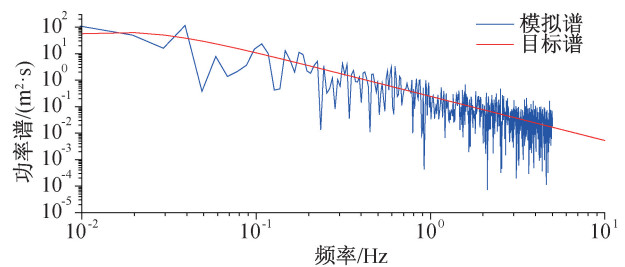


图 5 塔顶加载点模拟谱与目标谱对比

Fig. 5 Comparison between the simulated spectrum of the top loading point and the target spectrum

转换为功率谱并与 Davenport 谱进行对比,如图 5 所示。

由图 5 可见,模拟所得脉动风速功率谱与目标谱吻合较好,表明模拟所得输电塔线结构脉动风速时程可行。

对输电塔线结构进行风致动力响应计算,需将图 3 所示加载点生成的脉动风速转化为风荷载,并由公式(5)计算得到其动力响应^[19]。

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \quad (5)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别是结构的质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵; $\ddot{u}(t)$ 为节点的加速度, m/s^2 ; $\dot{u}(t)$ 为节点速度, m/s ; $u(t)$ 为节点位移, m ; $F(t)$ 为节点风荷载, N 。

根据公式(5)分别计算 0° 和 90° 风向角、不同输电线初始水平张力、不同输电线跨度共 12 种工况下, 所建立的塔线单塔简化模型以及传统三塔两线模型的风致动力响应, 并对计算结果进行分析对比。

3 不同工况下输电塔线体系风致动力响应分析

3.1 不同风向角下风致动力响应结果

3.1.1 0° 风向角下风致动力响应结果

根据 1.2 节建立的输电塔线体系单塔简化模型以及三塔两线模型, 施加第 2 部分所得 0° 风向角下风荷载, 由公式(5) 计算得到了结构风致动力响应, 其中选取结构不同高度处 Z 向位移响应均方根和最大主材应力均方根分别示于图 6。

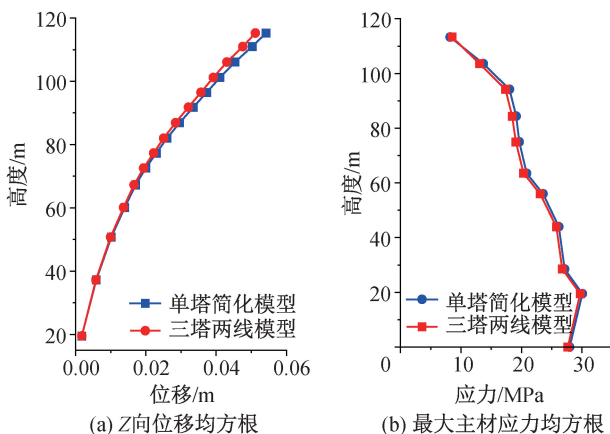


图 6 0° 风向角输电塔 Z 向风致动力响应

Fig. 6 Z -direction wind-induced dynamic response of the transmission tower with 0° wind direction angle

由图 6(a) 可见, 0° 风向角下, 单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构 Z 向位移响应均方根在输电塔底部吻合较好, 随着输电塔高度的增加, 二者偏差增大, 其中位移响应均方根最大偏差位于塔顶, 数值为 5.57% (以三塔两线模型计算结果为基准)。由图 6(b) 可见, 0° 风向角下, 单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的最大主材应力均方根整体吻合较好, 二者最大偏差也出现在输电塔顶, 数值为 3.92% (以三塔两线模型计算结果为基准)。

综合来看, 0° 风向角下, 采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构不同高度处的 Z 向位移响应均方根和最大主材应力均方根基本吻合。

3.1.2 45° 风向角下风致动力响应结果

根据 1.2 节建立的输电塔线体系单塔简化模型以及三塔两线模型, 施加第 2 部分所得 45° 风向角下风荷载, 由公式(5) 计算得到了结构风致动力响应, 选取结构不同高度处 Z 向、 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根分别示于图 7。

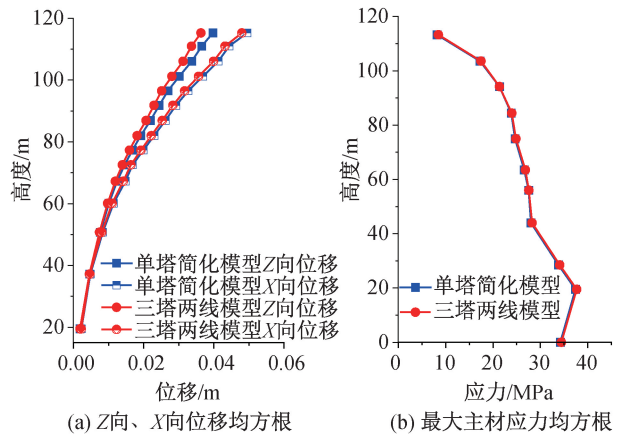


图 7 45° 风向角输电塔 Z 向、 X 向动力响应

Fig. 7 Z and X direction dynamic responses of the 45° wind direction transmission tower

由图 7(a) 可见, 45° 风向角下, 单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构 Z 向、 X 向位移响应均方根在输电塔底部均吻合较好, 随着输电塔高度的增加, 二者的偏差增大, 其中位移响应均方根最大偏差均位于塔顶处, Z 向数值为 7.56%, X 向数值为 3.1% (以三塔两线模型计算结果为基准)。由图 7(b) 可见, 45° 风向角下, 单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的最大主材应力均方根整体吻合较好, 二者最大偏差也出现在输电塔塔顶, 数值为 3.5% (以三塔两线模型计算结果为基准)。

综合来看, 45° 风向角下, 采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的 Z 向、 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根基本吻合。

3.1.3 90° 风向角下风致动力响应结果

根据 1.2 节建立的输电塔线体系单塔简化模型以及三塔两线模型, 施加第 2 部分所得 90° 风向角下风荷载, 由公式(5) 计算得到了结构风致动力响应, 选取结构不同高度处 Z 向位移响应均方根和最大主材应力均方根分别示于图 8。

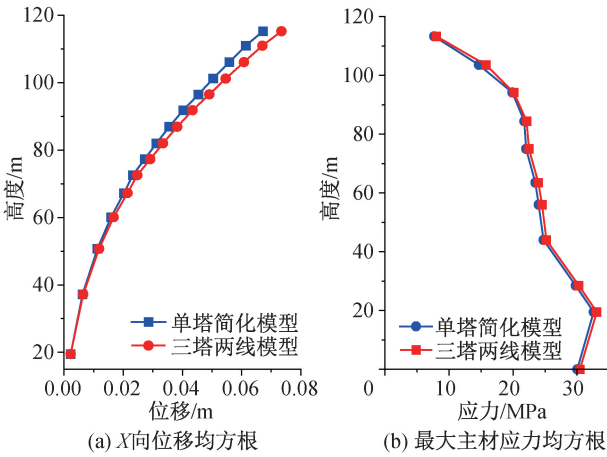


图 8 90° 风向角输电塔 X 向风致动力响应

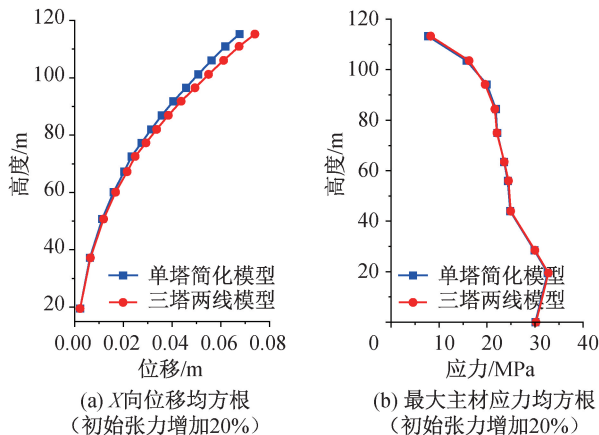
Fig. 8 X-direction wind-induced dynamic response of a 90° wind direction transmission tower

由图 8(a) 可见,90° 风向角下,单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构 X 向位移响应均方根在输电塔底部吻合较好,随着输电塔高度的增加,二者的偏差增大,其最大偏差位于塔顶,数值为 8.52% (以三塔两线模型计算结果为基准)。由图 8(b) 可见,90° 风向角下,单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的最大主材应力均方根整体吻合较好,二者最大偏差出现在输电塔顶,数值为 4.34% (以三塔两线模型计算结果为基准)。

综合来看,90° 风向角下,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根基本吻合。

3.2 不同输电塔输电线张力下风致动力响应结果

输电线在有限元建模之初根据其两端的水平



张力进行迭代循环找形,进而在确定输电线水平张力大小时确定输电线的初始形态。由公式(3)(4)可见,输电线的等效刚度受两端初始水平张力影响较大,因此为了研究不同输电线张力下所建立单塔简化模型的适用性,以公式(2)计算得到的单根输电线初始水平张力 28.06 kN 为基准,分别考虑增加 20% 和减小 20% 共两种工况,计算得到了 90° 风向角下单塔简化模型和三塔两线模型结构的风致动力响应,其中选取结构在不同高度处的 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根分别示于图 9。

由图 9(a)(c) 可见,在增加 20% 和减少 20% 输电线两端初始水平张力时,单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构 X 向位移响应均方根在输电塔底部吻合较好,随着输电塔高度的增加,二者的偏差增大,其位移响应均方根最大偏差位于塔顶,数值分别为 8.53%、8.5% (以三塔两线模型计算结果为基准)。由图 9(b)(d) 可见,在增加 20% 和减少 20% 输电线两端初始水平张力时,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的最大主材应力均方根整体吻合较好,二者最大偏差均出现在输电塔顶,数值分别为 4.38%、4.3% (以三塔两线模型计算结果为基准)。

综合来看,在增加 20% 和减少 20% 输电线两端初始水平张力时,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构在不同高度处的 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根基本吻合。

3.3 不同输电线跨度下风致动力响应结果

跨度是输电塔线体系的一个重要结构参数,其对输电线的总质量、平面内外刚度、阻尼等有重

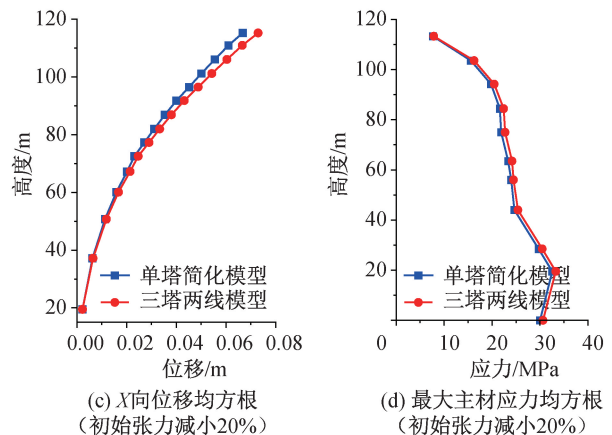


图 9 增加 20% 和减少 20% 输电线初始水平张力时结构风致动力响应

Fig. 9 The dynamic response of the simplified single tower model and the basic model when the initial horizontal tension of the transmission line is increased by 20% and decreased by 20%

要影响。为了研究输电塔线体系在不同跨度下所建立单塔简化模型的适用性,以图 2(b) 输电线跨度为 500 m 的三塔两线模型为基准,分别选取跨度为 400、600、700 m 的三种常见跨度工况,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算结构的风致动力响应,其中选取结构在不同高度处的 X 向位移响应均方根和最大主材应力均方根分别示于图 10。

由图 10(a)(c)(e) 可见,在不同的输电线跨度下,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构 X 向位移响应均方根在输电塔底部吻合较好,随着输电塔高度的增加,二者的偏差增大,比如输电线跨度为 400 m 时,输电塔在高度为 37.2、67.3 和 115.3 m 处,二者偏差分别为 2.92%、4.61%、6.89% (以三塔两线模型计算结果为基准);而在输电塔同一高度处,输电线跨度越大,二者偏差越大,比如输电线跨度为 400、600、700 m 时,输电塔顶 X 向位移响应均方根偏差分别为 6.89%、9.98% 和 11.51% (以三塔两线模型计算结果为基准)。由图 10(b)(d)(f) 可见,在不同的输电线跨度下,采用单塔简化模型和三塔两线模型

计算所得结构不同高度处最大主材应力均方根整体吻合较好,随着输电塔高度的增加,二者的偏差增大,其与 X 向位移响应均方根表现的规律较一致,比如输电线跨度为 400 m 时,输电塔在高度为 20、63.5 和 113.3 m 处,二者偏差分别为 1.03%、2.51%、4.14% (以三塔两线模型计算结果为基准);而在输电塔同一高度处,输电线跨度越大,二者偏差也越大,比如输电线跨度为 400、600、700 m 时,输电塔顶位移响应均方根二者偏差分别为 4.14%、4.45% 和 4.59% (以三塔两线模型计算结果为基准)。

综合来看,在不同的输电线跨度下,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得结构位移响应均方根和最大主材应力均方根,它们的偏差随着输电线跨度的增加而增大,其中最大主材应力均方根的偏差受跨度的影响相对很小,其最大偏差为 4.59% (以三塔两线模型计算结果为基准),而位移响应均方根受跨度影响相对较大,其中在跨度为 700 m 时,最大偏差为 11.51% (以三塔两线模型计算结果为基准),超过了通常工程允许的范

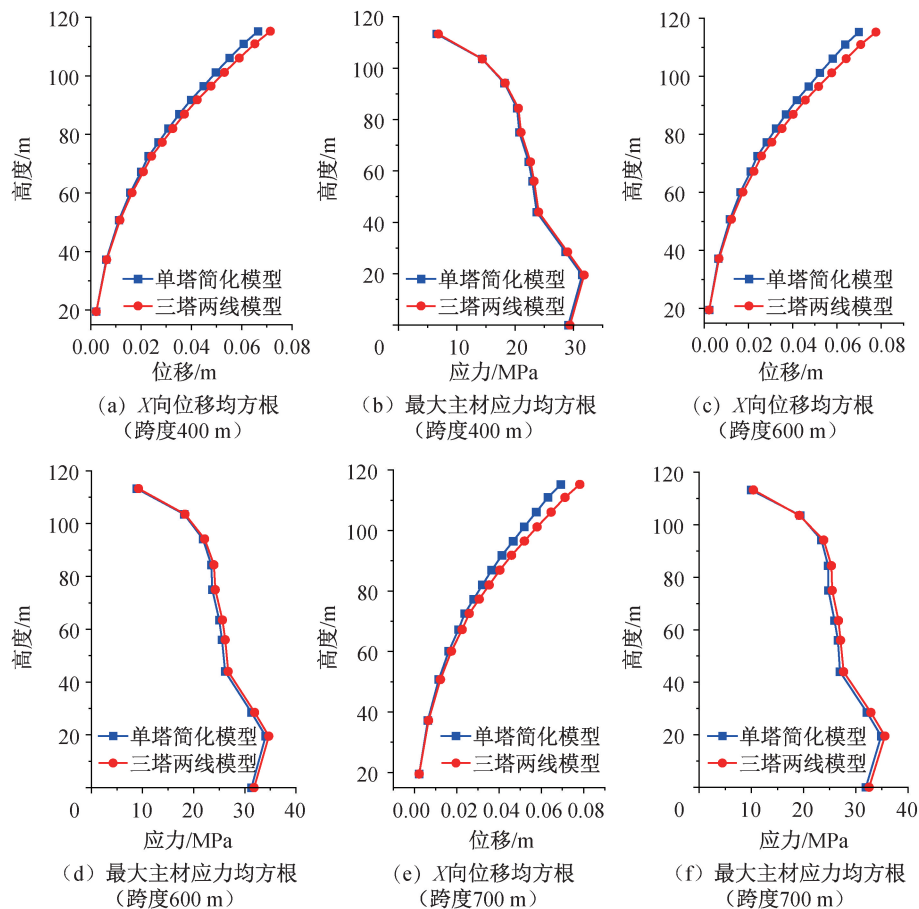


图 10 3 种跨度时单塔简化模型与三塔两线模型的动力响应

Fig. 10 Dynamic responses of single tower simplified model and three tower two-line model under three span conditions

围,据此建议采用本文所提单塔简化模型在输电线跨度不超过 700 m 范围内使用。

4 结论

1) 在 0° 、 45° 和 90° 风向角下,保持输电线跨度不变,输电线两端初始水平张力在基准值基础上分别增加 20% 和减少 20% 时,采用单塔简化模型和三塔两线模型计算所得输电塔在不同高度处的位移响应均方根和最大主材应力均方根二者基本吻合,且均呈现出随着输电塔高度的增加,二者偏差增大的规律。

2) 采用单塔简化模型与三塔两线模型计算所得输电塔动力响应的偏差随着输电线跨度的增加而增大,其中位移响应均方根偏差较最大主材应力均方根偏差受跨度影响更显著,据此建议采用本文所提单塔简化模型分析结构动力响应,并控制输电线跨度不超过 700 m。

参考文献:

- [1] 刘孟龙,吕洪坤,罗坤,等. 真实山地地形条件下输电塔线体系风致动力响应数值模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 232-239.
- [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.
- [3] XIE Q, ZHU R Y. Earth, wind, and ice[J]. Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [4] 安利强,张志强,黄仁谋,等. 台风作用下输电塔线体系动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 255-262.
- [5] 张鑫. 多类气候下耐张输电塔线体系风致动力响应研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [6] 汪佳,付兴,李宏男. 输电塔线体系多因素风致动力响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2020, 36(1): 1-10.
- [7] 张庆华,顾明,黄鹏. 格构式输电塔结构多质点简化模型研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 148-152.
- [8] HUANG Z, LIU S, NIE M, et al. Study on wind-induced response of a simplified model of transmission tower based on finite particle method [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019, 657(1): 012023.
- [9] 梁峰,李黎,尹鹏. 大跨越输电塔-线体系数值分析模型的研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 61-65.
- [10] 舒爱强,吴海洋,邹良浩,等. 高压大跨越输电塔-线体系动力特性计算分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 224-229.
- [11] 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.
- [12] 杨文刚,蒋超. 梁柱简化模型在自立塔塔线体系动态响应中的适应性研究[J]. 计算力学学报, 2020, 37(6): 700-708.
- [13] 姚旦,沈国辉,潘峰,等. 基于向量式有限元的输电塔风致动力响应研究[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 63-70.
- [14] 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.
- [15] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [16] 刘小会,张文斌,方元庆,等. 连续档输电线面内及面外等效刚度研究[J]. 应用力学学报, 2015, 35(5): 759-761.
- [17] 余传运,张建润. 输电塔线体系动力特性及风振响应分析[J]. 东南大学学报, 2019, 49(1): 116-124.
- [18] DAVENPORT A G. How can we simplify and generalize wind loads? [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54(55): 657-669.
- [19] 侯洁,霍林生,李宏男. 非线性悬吊质量摆对输电塔减震控制的研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 178-181.

(责任编辑 王利君)