

# 高烈度地震区特高压直流输电塔线体系地震反应分析

郑治祥<sup>1</sup>, 徐海潮<sup>1</sup>, 刘红军<sup>2\*</sup>, 杨海龙<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230601;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 为探究9度设防烈度下某在建特高压直流输电线路的抗震设计方法的适用性, 本文建立了某在建特高压直流输电线路在9度设防烈度下的空间有限元模型, 研究分析了塔线系统的动力特性, 比较了不同模型和计算方法的地震响应结果, 并对地震作用下的杆件内力和杆件设计承载力进行对比研究。结果显示, 导地线会显著降低输电塔频率, 对输电塔具有一定减震作用, 但若在地震响应计算时忽略导地线, 则会使得横担杆件内力被低估。此外, 地震工况下各杆件内力较小, 地震效应在输电塔设计中并非主要控制因素。但在直线塔中的横担主材拉杆和塔身变坡处主材, 以及耐张塔中的横担导线挂点上部受拉材, 杆件地震工况内力占设计承载力的80%以上, 是相对薄弱部位, 可考虑对其适当加强。

**关键词:** 特高压直流输电线路; 高烈度地震区; 时程分析; 反应谱分析; 设计承载力

中图分类号: TU311.3, TM75

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0022-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240321001

## Seismic Response Analysis of Ultra-High Voltage Direct Current Transmission Tower-Line System in High Seismic Intensity Region

ZHENG Zhixiang<sup>1</sup>, XU Haichao<sup>1</sup>, LIU Hongjun<sup>2\*</sup>, YANG Hailong<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

\*Corresponding author: lhj20040308@126.com

**Abstract:** In order to explore the applicability of the seismic design method of an ultra-high voltage (UHV) direct current (DC) transmission line under construction under 9-degree seismic intensity, this study presents a spatial finite element model for a UHV DC transmission line under 9-degree seismic intensity. The dynamic characteristics of the tower-line system are analyzed, the results of different models and methods are compared, and the design bearing capacity of the members are compared and studied. The results reveal that the lines significantly reduce the tower frequency and provide seismic damping. However, neglecting the lines in seismic response calculations underestimates cross arm rod

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(51508054), 安徽省电力设计院科标业项目(KY-20-01), 中国电力工程顾问集团有限公司科研项目(DG2-D01-2024)

作者简介:

郑治祥(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输电线路方面的研究。E-mail: zhengzx@ahedi.com.cn。

徐海潮(1980—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事送电结构设计与管理方面的研究。

通信作者:

刘红军(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间钢结构理论与设计方法和高耸结构抗连续倒塌能力方面的研究。

E-mail: lhj20040308@126.com。

forces. Furthermore, it is observed that the internal force of each rod under seismic conditions is relatively small compared to the design control internal force. This suggests that seismic effects are not the primary control factor in transmission tower design. However, it is important to note that the internal force of seismic conditions accounts for more than 80% of the design bearing capacity for the tensile members in cross arm and the angle steel column at the slope transition zones of the tower body in the tangent tower and the tensile members in cross arm in the tension tower. Therefore, it is recommended to consider appropriate reinforcement measures in these parts.

**Keywords:** ultra-high voltage direct current transmission line; high seismic intensity region; time-history analysis; response spectrum analysis; design bearing capacity

电力资源是关系到国家发展与人民生活的重要资源,保证电力的供应对地区的经济发展和日常生活具有重要意义。我国西部地区恰恰是高烈度地震灾害频发地区,目前已有多个超特高压线路穿越基本烈度达到9度的区域,因此对高烈度地震区输电线路杆塔结构的抗震设计方法进行深入研究,对保障线路安全具有重要意义。

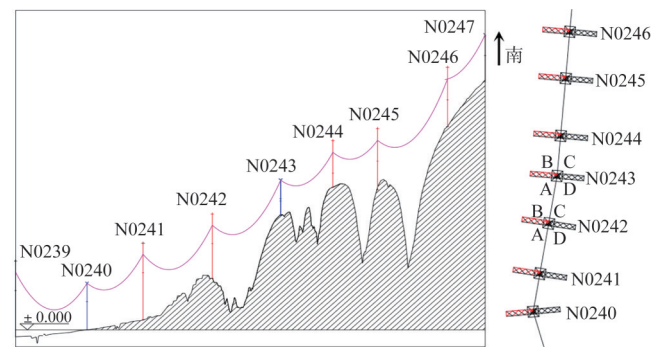
国内外学者对输电塔线体系动力特性和地震响应规律进行了广泛研究。GHOBARAH等<sup>[1]</sup>指出地震波行波效应对输电塔线体系地震反应影响较大。田利等<sup>[2-6]</sup>设计高压输电塔-线体系振动台试验,对地震波差动作用下输电塔-线体系的地震响应进行了系统性的研究,研究表明塔-线耦合作用和地震波差动作用对结构响应存在重要影响,不可忽视。黄增浩等<sup>[7]</sup>指出特高压直流输电塔因其自身呼高更高、结构更复杂,受地震荷载的影响也更加明显。安利强等<sup>[8]</sup>指出地震动多维激励或考虑行波效应作用时,有高差变化的输电塔较无高差变化的输电塔地震响应更大,对于途经山地丘陵的特高压直流输电线路需要考虑高差的影响。

目前国内外相关规范<sup>[9-10]</sup>均没有给出考虑导线和地线影响的输电塔抗震设计方法,并认为在计算输电塔的动力特性和动力反应时,可不计入导线和地线的重量,规范主要针对I形绝缘子串铁塔模型进行了研究,针对其他形式的绝缘子串连接形式分析尚不全面。BATTISTA等<sup>[11]</sup>研究表明对输电塔线体系进行分析时绝缘子串会加强导地线的非线性作用。李宏男等<sup>[12-13]</sup>设计制作了简化的输电塔-线体系模型,并进行了振动台试验,研究结果表明导线对输电塔地震反应的影响随两者耦合作用的提高而增加,输电线对输电塔地震反应的影响不可忽略。谢强等<sup>[14]</sup>进行了振动台试验,试验结果表明对于绝缘子采用V形悬挂方式的杆塔结构,在计算塔动力特性时,垂直线路方向需考虑绝缘子连接方式及导线质量的影响。

目前已有研究中大多对所研究问题的分析模型作简化处理,因此本文依托某在建特高压直流输电线路工程,考虑实际工程中遇到的复杂山地线路和场地问题,在输电线路大档距、大高差、高烈度的实际工程背景下建立七塔八档塔线体系,基于振型反应谱法和时程分析法对其进行了设防地震响应的分析研究,为高烈度地震区特高压直流输电塔-线体系抗震设计提供参考。

## 1 特高压直流塔线体系的分析模型

选取输电线路工程位于海源县的一段线路,其附近区域抗震设防烈度为9度。根据体系的平断面图(图1)及塔位信息(表1),采用ANSYS有限元软件对N0240~N0246段输电塔-线体系进行有限元分析,以N0240塔脚所在平面作为±0.000,各塔按实际高差建模,其中输电塔N0242~N0243跨越海源和尚铺断裂带。



注:面朝线路前进方向(向南)左后侧为A支座,顺时针依次为A,B,C,D支座。

图1 直流线路平断面图

Fig. 1 DC line plan and profile diagram

表1 塔位信息表

Table 1 Tower location information

塔号	塔型	转角度数	塔脚平面中心 相对高程/m	结构呼 高/m	档距/ m
N0239	直线塔	0	-7.2	78	—
N0240	耐张塔	右 28°18'16"	0	48	655
N0241	直线塔	0	11.2	78	514
N0242	直线塔	0	49.2	72	635
N0243	耐张塔	左 8°27'58"	118.2	39	627
N0244	直线塔	0	146.8	48	479
N0245	直线塔	0	144.2	66	410
N0246	直线塔	0	209.3	66	641
N0247	耐张塔	右 11°58'56"	254.9	51	345

输电塔使用桁梁混合模型进行建模,即输电塔主材和部分斜材采用Beam188梁单元模拟,其余斜材、辅材和绝缘子采用Link8杆单元模拟。导地线与绝缘子拉杆之

间以及绝缘子拉杆与输电塔之间的连接均为铰接,两端导地线采用铰接约束,输电塔基底采用固定约束。塔身杆件均为等边角钢,主材采用Q420钢,斜材和辅材分别采用Q345钢和Q235钢。地线和导线型号分别为1×JL1/G2A-1 000/80和6×JLB20A-150,采用只承受轴向拉力的Link10杆单元进行模拟。塔线体系的有限元模型如图2所示,定义输电塔局部坐标系 $x$ 方向为横导线方向、 $y$ 为顺导线方向、 $z$ 为竖直方向。本文针对输电线路中典型直线塔N0242和耐张塔N0243进行地震响应分析比较,如图3所示。

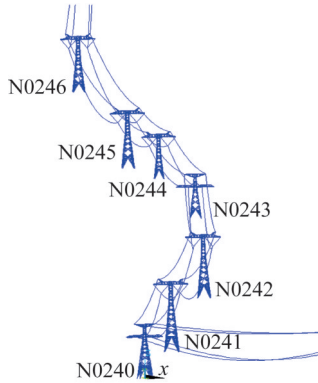


图2 塔线体系有限元模型

Fig. 2 The FEM of tower-line system

有限元计算单塔第一自振周期,直线塔为0.796 s,耐张塔为0.519 s,与根据电力系统实测研究得到的第一自振周期估算公式<sup>[15]</sup>的计算值直线塔0.738 s、耐张塔0.558 s比较相近。塔线体系有限元模型平衡状态下计算的导线内力为373.3 kN、地线内力为37.8 kN,与导线内力设计值377.9 kN、地线内力设计值38.2 kN的误差较小,验证了所

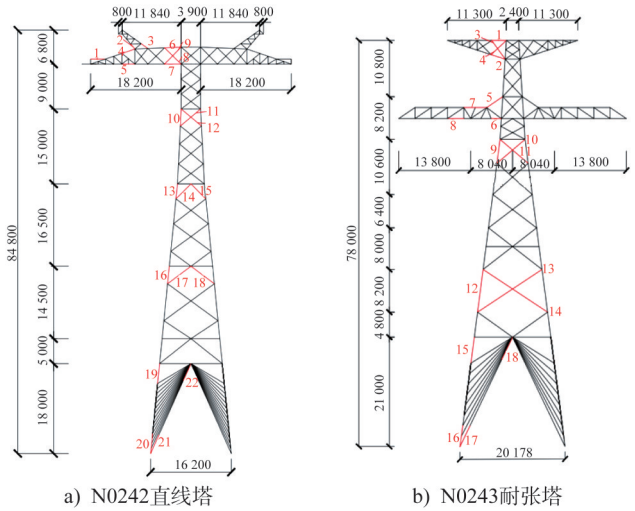


图3 输电塔及关键杆件示意图(单位:mm)

Fig. 3 Transmission tower and key member diagram(unit:mm)

建立的输电塔单塔模型和塔线体系模型的准确性。

## 2 结构的动力特性

研究输电塔结构的地震作用下结构响应时,需要先进行输电塔的动力特性研究,结构在振动时的动力响应与结构系统的固有特性密切相关。我国电力设施抗震规范指出,计算杆塔动力特性时,将导地线视为单摆,可不计入导地线等物的重量,导地线只是作为外荷载加在杆塔上进行设计计算。特高压直流输电线路中导地线与直线塔和耐张塔的连接方式不再是简单的I形绝缘子串的单摆系统,为了解特高压直流输电塔-线体系中典型直线塔和耐张塔的特性,表2给出了两种单塔模型和塔线体系模型的模态分析计算结果。

表2 塔线体系典型各阶模态固有频率和模态特征

Table 2 Typical modal natural frequencies and modal characteristics of tower line system

塔型	模态特征	塔线体系模型		单塔模型 I		单塔模型 II	
		频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
N0242 直线塔	$x$ 向一阶弯曲	0.921 4	1.085 3	1.255 9	0.796 2	0.724 1	1.381 0
	$y$ 向一阶弯曲	1.247 1	0.801 9	1.303 1	0.767 4	0.792 1	1.262 5
	$z$ 向一阶扭转	1.322 4	0.756 2	1.536 6	0.650 8	0.725 7	1.378 0
N0243 耐张塔	$x$ 向一阶弯曲	1.799 1	0.555 8	1.925 0	0.519 5	1.632 8	0.612 4
	$y$ 向一阶弯曲	1.941 5	0.515 1	2.227 1	0.449 0	1.814 4	0.551 1
	$z$ 向一阶扭转	2.088 0	0.478 9	2.479 0	0.403 4	1.787 1	0.559 6

注:单塔模型 I 为忽略导地线的单塔模型,单塔模型 II 为挂点处附加导地线质量的单塔模型。

对单塔模型和塔线体系模型进行模态分析,其中单塔模型 I 为目前《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)<sup>[9]</sup>中建议的输电塔分析模型,忽略导地线;单塔模型 II 为将导地线质量附加于挂点处的单塔模型。通过塔

线体系模型与单塔模型 I 的模态对比可以发现,考虑导地线的作用,塔线体系模型的各阶频率变小,且导地线对输电塔垂直线路方向频率的影响大于顺线路方向。可以看出对于特高压直线塔和耐张塔,导地线和绝缘子对于

塔架振型和模态有较大影响,其与塔架的连接不可简单视为单摆,在进行动力分析时不可忽略。

通过单塔模型和单塔附加导线质量模型的模态对比,如果不考虑导线刚度的影响,而只是把导线作为质量附加于跨越塔上,附加导线质量的输电塔模型各阶频率均将明显变小,其中扭转频率的变化尤为明显,直线塔和耐张塔的扭转模态均早于 $x$ 、 $y$ 向模态出现。

### 3 地震响应结果分析

#### 3.1 非一致多维地震激励时程分析结果比较

##### 3.1.1 地震波模型

根据该输电线路工程的地质报告,该区域场地类别为II类,属9度抗震设防区。根据场地类别和周期本文选取了附近青海省地震局提供的三条地震波和一条人工波对输电塔进行分析,如图4所示。对地震波采用最小均方速度法进行基线修正,以使得在地震激励结束时地震波的位移和速度值归0,对三维地震动按适当比例进行调幅,使加速度峰值等于9度设防地震烈度0.4g。采用三向地震波输入,加速度最大值按 $x$ 方向: $y$ 方向: $z$ 方向为1:0.85:0.65进行调整。规定地震动的主传播方向与输电塔线路方向重合,限于篇幅,单条波的计算结果不再一一列出,本节主要以时程曲线结果的平均值进行分析。

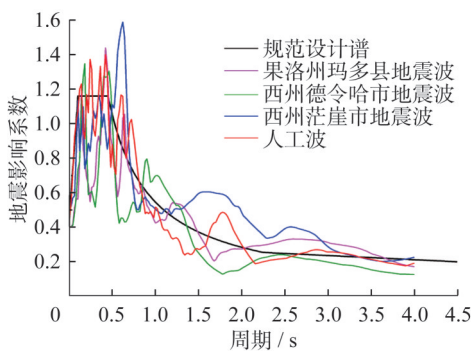


图4 地震波的加速度反应谱和规范反应谱

Fig. 4 Acceleration response spectrum and standard response spectrum of seismic waves

##### 3.1.2 单塔模型和塔线体系模型时程分析结果对比

对单塔模型和塔线体系模型在重力平衡状态进行时程分析,塔顶位移时程曲线均表现出相似的特征,因此选取其中一条代表性地震波的塔顶位移时程曲线结果进行分析,如图5所示,比较塔线体系和单塔体系的塔顶位移计算结果可以看出,对于直线塔,塔线体系模型塔顶最大位移十分相近;对于耐张塔塔线体系模型塔顶最大位移为0.68m,单塔模型为0.74m,导地线的存在使得耐张塔塔顶最大位移降低约8.1%。

图6提供了两种塔型的单塔模型和塔线体系模型主

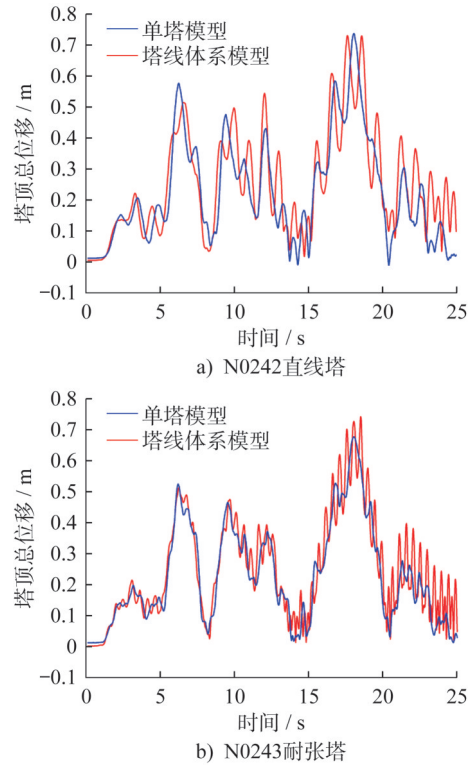


图5 塔顶位移时程曲线

Fig. 5 Displacement time-history curves of tower top

材单元的内力分布情况,直线塔单塔模型内力较塔线体系模型平均增大约13.7%,耐张塔单塔模型内力较塔线体系模型平均增大约26.5%。表3和表4提供了不同模

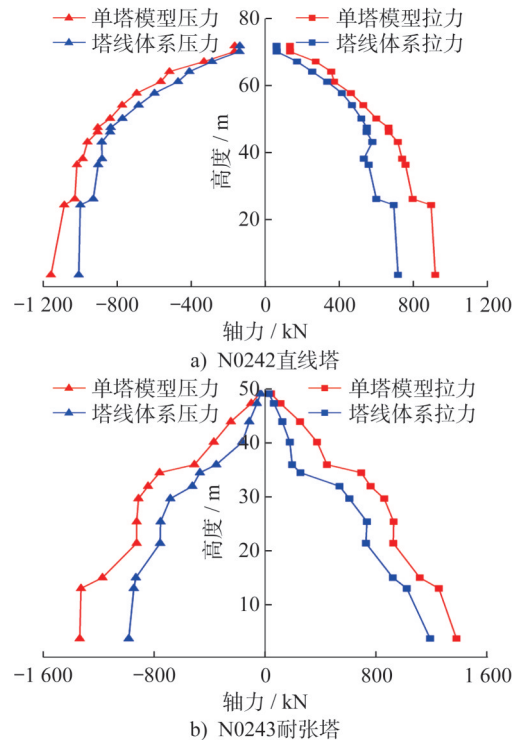


图6 输电塔杆件内力分布图

Fig. 6 Internal force distribution of transmission tower member

型的塔底基底反力计算值,比较塔线体系和单塔的基底剪力计算结果可以看出,导地线的存在会使得输电塔基底剪力减小,一定程度上减小整体结构响应,其中对于直线塔  $x$  向剪力平均降低 13.7%,  $y$  向剪力平均降低 13.8%,  $z$  向轴力平均降低 13.7%;对于耐张塔  $x$  向剪力平均降低 27.45%,  $y$  向剪力平均降低 18.94%,  $z$  向轴力平均降低 13.5%。其因为当地震作用时输电线产生一定的摆动耗能使得塔线体系的底部剪力减少,输电线在一定程度上起到了类似于 TMD 的阻尼器作用,且导地线对耐张塔的减震作用大于对直线塔的减震作用。

表3 N0242直线塔基底反力时程分析计算值

Table 3 The time-history analysis results of base reaction force of the tangent tower N0242 kN

支座编号	塔线体系模型			单塔模型		
	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向
A	149.0	117.7	1 045.3	163.4	168.8	1 182.8
B	114.7	212.8	866.3	130.9	225.6	999.3
C	178.9	165.2	789.6	185.6	191.0	924.9
D	145.5	166.4	832.5	167.3	183.0	991.0

表4 N0243耐张塔基底反力时程分析计算值

Table 4 The time-history analysis results of base reaction force of the tension tower N0243 kN

支座编号	塔线体系模型			单塔模型		
	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向
A	222.2	215.3	1 080.7	244.8	319.0	1 605.9
B	163.7	348.3	1 221.8	251.9	359.6	1 591.1
C	188.4	298.4	861.5	323.2	346.8	1 470.6
D	249.2	203.0	927.1	315.2	288.4	1 548.2

图7为塔线体系模型与单塔模型杆件内力对比图,表5和表6提供了两种塔型关键杆件内力比具体值,其中关键杆件编号见图3。反映输电塔线体系模型与单塔模型杆件内力的对比情况。

$\varphi_1$ 为输电塔线体系模型与单塔模型的杆件内力比,其表达式如下:

$$\varphi_1 = \max\left(\frac{F_{T1}}{F_{T2}}, \frac{F_{C1}}{F_{C2}}\right) \quad (1)$$

式中: $F_{T1}$ 和 $F_{T2}$ 分别为塔线体系模型和单塔模型时程分析中杆件最大轴拉力, $F_{C1}$ 和 $F_{C2}$ 分别为塔线体系模型和单塔模型时程分析中杆件最大轴压力。

比较塔线体系模型和单塔模型的计算结果可以看出,直线塔中有55%的杆件 $\varphi_1$ 小于1,耐张塔中有66%

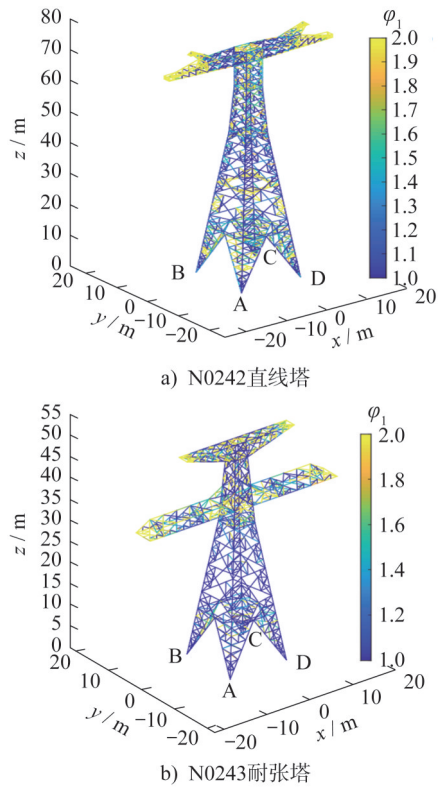


图7 两种模型杆件内力比较

Fig. 7 Comparison of internal forces between two models

表5 N0242直线塔关键杆件内力比 $\varphi_1$

Table 5 The internal force ratio  $\varphi_1$  of key members of the tangent tower N0242

编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$
1	2.81	7	1.53	13	0.62	19	0.71
2	1.05	8	0.98	14	0.72	20	0.79
3	1.63	9	1.02	15	0.90	21	0.72
4	2.71	10	0.72	16	0.58	22	0.72
5	3.63	11	1.73	17	0.81	—	—
6	1.59	12	1.62	18	0.88	—	—

注:杆件编号位置见图3。

表6 N0243耐张塔关键杆件内力比 $\varphi_1$

Table 6 The internal force ratio  $\varphi_1$  of key members of the tension tower N0243

编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$	编号	$\varphi_1$
1	0.67	6	1.38	11	1.25	16	0.96
2	0.66	7	1.43	12	0.74	17	0.82
3	1.49	8	0.94	13	0.88	18	0.70
4	0.96	9	0.73	14	0.80	—	—
5	1.78	10	1.06	15	0.72	—	—

注:杆件编号位置见图3。

的杆件  $\varphi_1$  小于 1, 说明大部分杆件塔线体系模型计算结果小于单塔模型。塔线体系模型相比于单塔模型, 在输电塔的横担挂点附近的杆件轴应力更大, 其原因可归结为输电线和绝缘子在地震过程中的惯性力对结构动力响应产生影响, 而单塔模型未考虑导地线的动力特性。虽然导地线能够起到一定阻尼器的作用, 减小整体结构响应, 但对所有杆件内力影响并不都是增大或减小的。直线塔和耐张塔最大内力比均位于导地线横担处, 若忽略导地线的动力特性, 将导致输电塔横担杆件内力设计偏于危险, 而塔身主材杆件内力设计需偏于保守, 因此在输电塔设计过程中有必要考虑导地线的作用。

### 3.2 反应谱分析与时程分析结果比较

输电塔线体系由于铁塔的高柔特性和导地线及绝

缘子串的强几何非线性, 在实际工程中对它进行精确计算是比较困难的, 我国电力设施抗震设计规范和建筑抗震设计规范计算地震响应均是以反应谱理论为基础的。因此本节将目前设计过程中常采用的输电塔单塔分析模型反应谱计算结果与塔线体系时程分析结果进行比较, 反应谱方法基于振型叠加, 在单塔分析中选取前 400 阶振型进行组合, 选取的振型数在三个方向 ( $x$  向平动、 $y$  向平动及  $z$  向扭转) 的有效质量均占总质量的 90% 以上。

表 7 和表 8 给出两种计算方法的输电塔基底反力计算值, 直线塔的塔线体系模型计算结果较单塔模型的计算结果大, 对于耐张塔, 塔线体系模型计算结果大于单塔模型 I 的计算结果而小于单塔模型 II 的计算结果。

表 7 N0242 直线塔基底反力计算值对比

Table 7 Comparison of calculated base reaction force results of the N0242 tangent tower

kN

支座编号	振型分解反应谱法						时程分析法		
	单塔模型 I			单塔模型 II			塔线体系模型		
	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向
A	106.2	107.5	844.5	135.2	131.3	1 150.3	149.0	117.7	1 045.3
B	105.9	107.6	844.8	134.7	132.0	1 150.7	114.7	212.8	866.3
C	106.1	107.5	844.8	134.7	132.4	1 150.6	178.9	165.2	789.6
D	106.1	107.3	844.6	135.5	131.5	1 150.4	145.5	166.4	832.5

表 8 N0243 耐张塔基底反力计算值对比

Table 8 Comparison of calculated base reaction force results of the N0243 tension tower

kN

支座编号	振型分解反应谱法						时程分析法		
	单塔模型 I			单塔模型 II			塔线体系模型		
	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向
A	132.0	136.2	601.7	307.9	309.3	1 029.9	222.1	215.3	1 080.7
B	131.7	136.8	603.2	307.1	310.9	1 027.0	163.7	348.3	1 221.8
C	131.8	136.6	603.0	307.2	310.7	1 027.0	188.4	298.4	861.5
D	131.9	136.4	602.0	307.9	309.0	1 029.4	249.1	203.0	927.1

时程分析法可以考虑塔线体系的非线性, 计入结构所有振型的振动情况, 计算结果更接近结构的实际情况。图 8 为单塔模型反应谱法与塔线体系模型时程分析法的杆件内力比图, 表 9 和表 10 提供了两种塔型关键杆件内力比具体值, 反映了规范计算方法与塔线体系时程分析计算内力的对比情况, 其中关键杆件编号见图 3。

$\varphi_2$  和  $\varphi_3$  分别为单塔模型 I 和单塔模型 II 的反应谱法与塔线体系模型时程分析法计算的最大内力比, 其表达

式如下:

$$\varphi_2 = \max\left(\frac{F_{T3}}{F_{T1}}, \frac{F_{C3}}{F_{C1}}\right) \quad (2)$$

$$\varphi_3 = \max\left(\frac{F_{T4}}{F_{T1}}, \frac{F_{C4}}{F_{C1}}\right) \quad (3)$$

式中:  $F_{T3}$  和  $F_{T4}$  分别为单塔模型 I 和单塔模型 II 反应谱法计算的最大轴拉力;  $F_{C3}$  和  $F_{C4}$  分别为单塔模型 I 和单塔模型 II 反应谱法计算的最大轴压力。

通过比较可以看出, 即使不考虑导地线作用, 单塔模

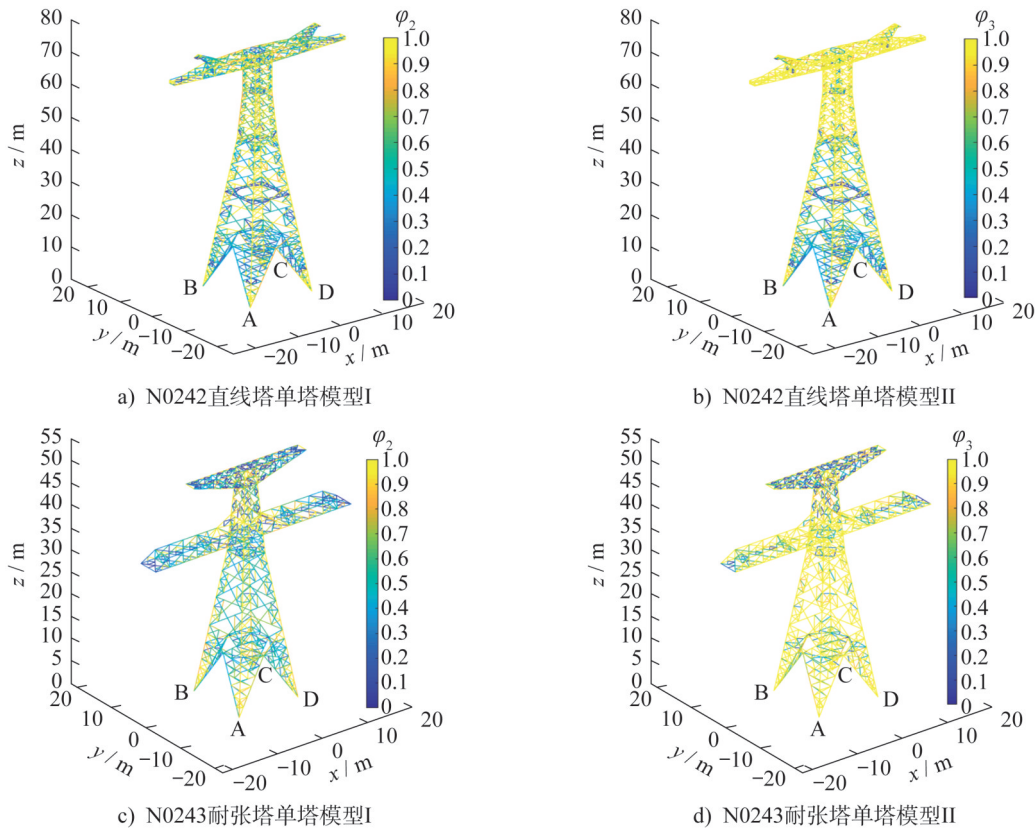


图8 两种计算方法杆件内力比较

Fig. 8 Comparison of internal forces between two calculation methods

表9 N0242直线塔关键杆件内力比  $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$

Table 9 The internal force ratios  $\varphi_2$  and  $\varphi_3$  of key members of the tangent tower N0242

编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	0.34	1.91	7	0.62	1.13	13	1.24	1.88	19	1.04	1.56
2	0.87	1.46	8	0.83	1.15	14	0.83	1.72	20	0.94	1.37
3	0.57	1.01	9	0.74	0.99	15	1.95	2.90	21	0.78	1.11
4	0.96	1.16	10	1.26	1.78	16	1.28	1.97	22	0.69	0.80
5	0.78	1.02	11	1.22	2.11	17	1.01	1.57	—	—	—
6	0.66	1.17	12	0.74	1.91	18	1.12	1.40	—	—	—

注：杆件编号位置见图3。

表10 N0243耐张塔关键杆件内力比  $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$

Table 10 The internal force ratios  $\varphi_2$  and  $\varphi_3$  of key members of the tension tower N0243

编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$	编号	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	0.86	1.20	6	0.64	1.60	11	0.53	1.45	16	0.68	1.38
2	0.69	1.17	7	0.52	1.28	12	0.86	1.72	17	0.73	1.58
3	0.55	0.83	8	0.67	1.91	13	0.64	1.81	18	0.99	1.93
4	0.64	0.93	9	0.96	1.82	14	0.67	1.56	—	—	—
5	0.96	1.55	10	0.53	1.68	15	0.84	1.70	—	—	—

注：杆件编号位置见图3。

型 I 大部分杆件  $\varphi_2$  小于 1, 反应谱法计算结果仍小于塔线体系模型时程分析结果。直线塔塔身主材内力比在 0.71~1.36 之间, 平均内力比为 0.91, 耐张塔塔身主材内力比在 0.41~1.58 之间, 平均内力比为 0.88, 说明规范中不考虑导地线动力特性的反应谱法计算结果是偏于危险的, 会低估杆件内力。这是因为振型分解反应谱法是取若干阶振型进行叠加, 会遗漏结构的某些真实响应情况, 而时程分析法则是考虑了塔线体系的振型、非线性和动力响应, 其动力计算的结果更为准确和更接近实际。

比较单塔模型 II 的计算结果, 直线塔塔身主材内力比在 1.14~1.98 之间, 平均内力比为 1.55, 耐张塔塔身主材内力比在 1.19~1.93 之间, 平均内力比为 1.72, 单塔模型 II 的简化方法使得输电塔杆件地震响应普遍增大, 计算结果可以包络塔线体系模型但偏于保守, 会过高地估计杆件内力。这是因为将导地线质量附加于输电塔结构后, 将增大结构刚度, 减小结构自振周期, 而当输电塔结构自振周期大于场地特征周期时, 结构吸收的地震力增大。

### 3.3 考虑地震作用的杆件内力和杆件设计承载力的比较

参考电力行业标准《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)<sup>[9]</sup>位于 9 度设防区的杆塔结构或构件承载力应采用下式进行抗震验算:

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{EV} S_{EVK} + \psi_Q \gamma_Q S_{QK} + \psi_w \gamma_w S_{wk} \leq R / \gamma_{RE} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_G$  为重力荷载分项系数, 取 1.2;  $\gamma_{Eh}$ 、 $\gamma_{EV}$  为水平、竖向地震作用分项系数, 取  $\gamma_{Eh}=1.3$ 、 $\gamma_{EV}=0.5$ ;  $\gamma_Q$  为活荷载分项系数, 取 1.4;  $\gamma_w$  为风荷载分项系数, 取 1.4;  $\psi_Q$  为活荷载组合值系数, 取 0.2;  $\psi_w$  为风荷载组合系数, 取 0.35;  $\gamma_{RE}$  为承载力抗震调整系数, 取 0.8;  $S_{GE}$  为重力荷载代表值的效应;  $S_{Ehk}$  为水平地震作用标准值的效应;  $S_{EVK}$  为竖向地震作用标准值的效应;  $S_{QK}$  为导地线张力可变荷载的代表值效应;  $S_{wk}$  为风荷载标准值的效应;  $R$  为结构构件承载力设计值。

图 9 为考虑地震工况时的抗震验算内力与不考虑地震时的设计承载力的内力比图, 其中考虑地震作用的抗震验算内力采用塔线体系的时程结果进行组合计算, 杆件的设计承载力是指不考虑地震作用工况时杆件的最大设计内力, 反映地震工况较其他常规工况(如大风工况、安装工况和断线工况等)对杆件最大设计内力是否起控制作用。 $\varphi_4$  为抗震验算内力与设计控制内力的最大内力比, 其表达式如下:

$$\varphi_4 = \max\left(\frac{F_{T5}}{F_{T6}}, \frac{F_{C5}}{F_{C6}}\right) \quad (5)$$

式中:  $F_{T5}$  和  $F_{T6}$  分别为抗震验算最大轴拉力与杆件受拉设计承载力;  $F_{C3}$  和  $F_{C4}$  分别为抗震验算最大轴压力与杆件受压设计承载力。

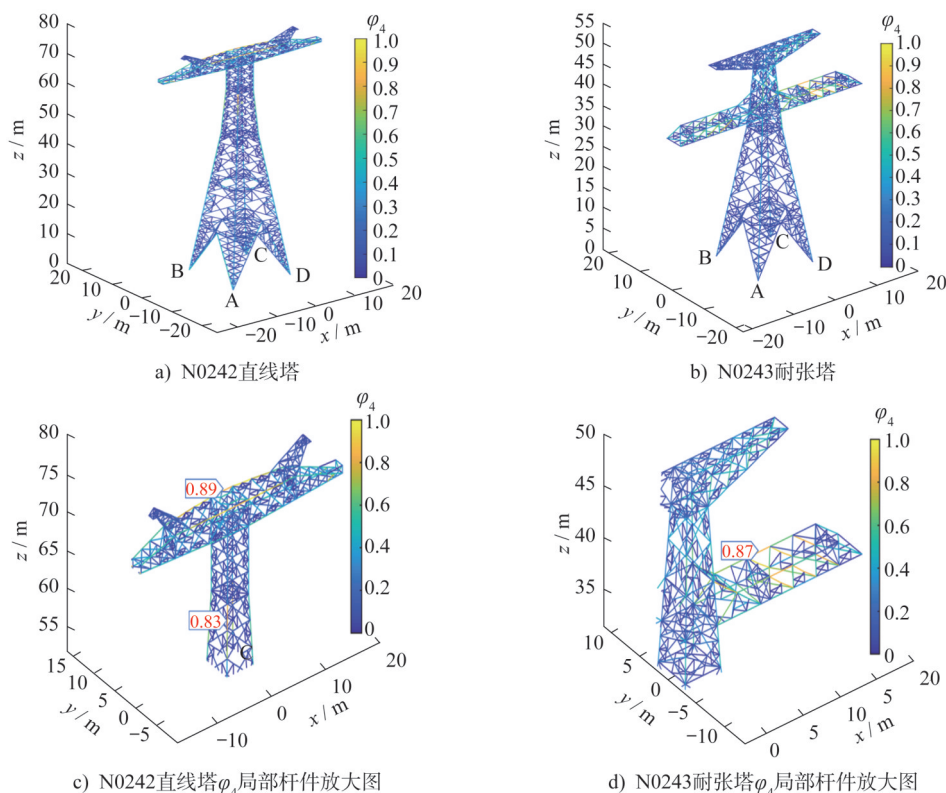


图 9 抗震验算内力和设计承载力比较

Fig. 9 Comparison of seismic internal forces and design bearing capacities

从图9a)和b)可以看出,各杆件考虑地震作用的内力值均小于无地震作用时的设计承载力,大多数杆件的地震作用轴力值在设计控制内力的80%及以下,这说明在特高压典型直线塔和耐张塔的设计中,地震效应不起主要控制作用。

直线塔和耐张塔 $\varphi_4$ 局部杆件放大图如图9c)和d)所示,位于直线塔导线横担主材拉杆处 $\varphi_4=0.89$ 、位于直线塔塔身变坡主材杆件处 $\varphi_4=0.83$ 、位于耐张塔导线挂点上部受拉材处 $\varphi_4$ 最大值为0.87,这些位置在地震工况下的抗震验算轴力与设计控制内力比值较大,是考虑抗震设计的相对薄弱位置,可考虑对其适当加强。

#### 4 结论

本文针对特高压直流输电线路高烈度抗震区的一段输电塔线体系进行了地震响应分析。通过建立多种有限元模型分析对比了单塔、塔线体系的动力特性和地震响应,比较了采用规范单塔振型反应谱法以及塔线体系时程分析法计算的地震响应结果,并对高烈度地震区的地震工况内力与设计控制内力进行了综合的对比分析,得出结论如下:

(1) 对单塔和塔线体系进行模态分析,考虑导地线的作用,输电塔各阶频率将减小,且导地线对输电塔垂直线路方向频率的影响大于对顺线路方向的影响。考虑导地线作为质量附加于塔上,输电塔的各阶频率均将明显变小,且扭转模态会早于y向弯曲模态出现。

(2) 采用时程分析时,单塔的塔顶最大位移和基底剪力均大于塔线体系的塔顶最大位移和基底剪力,导地线具有一定减震作用,且对耐张塔的影响更为显著。对于杆件内力,导地线作用并不总是使其增大或减小,采用单塔模型会低估直线塔和耐张塔的横担部位杆件内力,且高估塔身杆件内力。

(3) 用《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)中基于单塔的反应谱法计算的杆件内力普遍低于塔线体系时程分析法计算结果,计算结果偏于危险,而将导地线质量附加于挂点处的单塔反应谱计算结果将会过大估计杆件内力。

(4) 各杆件考虑地震作用的内力值均小于无地震作用时的设计承载力,这说明在典型直线塔和耐张塔的设计中,地震效应不起主要控制作用。直线塔中横担主材拉杆和耐张塔中导地线横担主材拉杆,地震工况内力占设计控制内力80%以上,是结构相对薄弱处,可考虑对其适当加强。

文中选取一段典型档距及高差的输电塔线体系作为分析模型,而在相同地震激励下,不同档距和高差的输电塔线体系中杆件内力大小有所变化,但内力分布都是相

似的,由此可见,所得结论对不同档距及高差的输电塔线体系具有一定参考意义。

#### 参考文献:

- [1] GHOBARAH A, AZIZ T S, EL-ATTAR M. Response of transmission lines to multiple support excitation[J]. Engineering Structures, 1996, 18(12): 936-946. DOI: 10.1016/S0141-0296(96)00020-X.
- [2] 田利,李宏男,黄连壮. 多点激励下输电塔-线体系的侧向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 108-114. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2008.16.018. TIAN Li, LI Hongnan, HUANG Lianzhuang. Lateral response of transmission tower-line system under multiple support excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 108-114. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2008.16.018. (in Chinese)
- [3] 田利. 输电塔一线体系多维多点地震输入的试验研究与响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. TIAN Li. Experimental research and response analysis of transmission tower-line system under multi-component and multi-support earthquake excitations [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] TIAN L, MA R S, LI H N, et al. Progressive collapse of power transmission tower-line system under extremely strong earthquake excitations [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(7): 1550030. DOI: 10.1142/s0219455415500303.
- [5] TIAN L, FU Z Y, PAN H Y, et al. Experimental and numerical study on the collapse failure of long-span transmission tower-line systems subjected to extremely severe earthquakes [J]. Earthquakes and Structures, 2019, 16(5): 513-522. DOI: 10.12989/eas.2019.16.5.513.
- [6] TIAN L, DONG X, PAN H Y, et al. Critical seismic incidence angle of transmission tower based on shaking table tests [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 76(2): 251-267. DOI: 10.12989/sem.2020.76.2.251.
- [7] 黄增浩,龚博,张志强,等. 多维地震激励下特高压直流输电塔线的响应分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 120-125. HUANG Zenghao, GONG Bo, ZHANG Zhiqiang, et al. Seismic response analysis of ultra-high voltage direct current transmission tower under multi-component ground motion excitation [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 120-125. (in Chinese)
- [8] 安利强,冯亮,张志尧,等. 变高差特高压直流输电塔线体系的地震响应分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3990-3996. AN Liqiang, FENG Liang, ZHANG Zhiyao, et al. On seismic response of ultra-high voltage direct current transmission tower-line system considering elevation difference [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3990-3996. (in Chinese)

- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Electrical Installations: GB 50260—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [10] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规程:DL/T 5486—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.  
National Energy Administration. Technical Specification for the Design of Steel Supporting Structures of Overhead Transmission Line:DL/T 5486—2020[S].Beijing:China Planning Press,2020. (in Chinese)
- [11] BATTISTA R C, RODRIGUES R S, PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1051-1067. DOI: 10.1016/S0167-6105(03)00052-7.
- [12] 石文龙,李宏男,贾连光. 输电塔-导线耦联体系模型的振动台试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 89-93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.05.016.  
SHI Wenlong, LI Hongnan, JIA Lianguang. Shaking table test of coupled system of transmission lines and towers [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 89-93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.05.016. (in Chinese)
- [13] 李宏男,田利,张鹏. 高压输电塔-线体系多维多点振动台试验模型研究[C]//第八届全国地震工程学术会议论文集(II). 重庆:重庆大学期刊社,2010:343-345.  
LI Hongnan, TIAN Li, ZHANG Peng. Research on multi-dimensional and multi-point vibration table test model of high-voltage transmission tower-line system [C]// Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering (II). Chongqing: Chongqing University Journal Press, 2010: 343-345. (in Chinese)
- [14] 谢强,白杰,薛松涛,等. 1 000 kV 角钢塔地震模拟振动台试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 58-64. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2013.01.014.  
XIE Qiang, BAI Jie, XUE Songtao, et al. Shaking table test on 1 000 kV angle steel transmission tower [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 58-64. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2013.01.014. (in Chinese)
- [15] 朱轶,张大长,林致添. ±800 kV 特高压直流输电杆塔结构的动力特性研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 11-13. DOI: 10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2008.06.004.  
ZHU Yi, ZHANG Dachang, LIN Zhitian. Study on dynamic behavior of ±800 kV DC transmission tower structure [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(6): 11-13. DOI: 10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2008.06.004. (in Chinese)