

# 输电塔-线体系地震响应分析方法研究进展

董利虎<sup>1</sup>, 宋丹青<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 输电塔-线体系作为保障国民生产生活的基础设施, 确保其安全可靠地运行具有重要的现实意义。多次地震灾害数据统计表明, 地震作用下输电塔-线体系的易损性较高。主要从输电塔-线体系地震响应的动力分析模型、数值模拟及振动台模型试验 3 个方面, 对现有的研究成果进行了系统阐述, 并分析了输电塔-线体系动力分析模型及其研究方法的特点及存在的不足之处, 对输电塔-线体系地震响应分析方法亟需解决的关键问题及未来研究的发展趋势进行了展望, 为以后相关人员从事研究提供参考。

**关键词:** 输电塔-线体系; 动力分析模型; 数值计算; 振动台模型试验

**中图分类号:** TV734.3; TM752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2021)02-0146-05

## Research progress on seismic response analysis methods of transmission tower - line system

DONG Lihu<sup>1</sup>, SONG Danqing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to provide for the national production and consumption, it is of practical significance to ensure the safe and reliable operation of the transmission tower - line system, as part of the infrastructure. The statistics of multiple earthquake disasters show that the system is highly vulnerable during seismic motions. We summarized research progress of the transmission tower - line system from aspects of dynamic analysis models of seismic response, numerical simulation and shaking table model test, and analyzed the characteristics and the existing deficiencies of dynamic analysis models and the research methods. And then the key issues needing immediate attention and the research prospect of seismic response analysis methods of transmission tower - line system were addressed, which laid the foundation for further study.

**Key words:** transmission tower - line system; dynamic analysis model; numerical calculation; shaking table model test

## 1 研究背景

我国能源资源与负荷中心呈明显不均衡分布, 大量的煤炭、水能资源分布在西北、西南地区, 但电能需求相对集中地分布在东部经济发达地区<sup>[1]</sup>, 为此我国提出了“西电东送”的电力发展战略。输电塔-线是输送电能的载体, 是连接大型能源基地和用电地区的重要纽带。“十四五”期间, 多条输电线

路工程将相继核准、开工和建设<sup>[2]</sup>。

随着特高压输电线路工程建设规模的不断扩大, 输电线路的档距及输电杆塔高度朝着更大、更高的方向发展, 这意味着输电线路不可避免地要跨越地震频发区, 地震将会对输电塔-线体系与电网的安全可靠运行造成更严重、更广泛的破坏<sup>[3]</sup>, 给人民生活带来诸多不利影响。在国内外, 地震造成输电塔线倒塌、倾斜等情况时有发生。1976 年我国河

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M680583); 博士后创新人才支持计划项目(BX20200191); 清华大学“水木学者”计划项目(2019SM058)

作者简介: 董利虎(1995-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为多能源系统与电力网络分析。

通讯作者: 宋丹青(1989-), 男, 河南郑州人, 博士, 助理研究员, 研究方向为岩土体动力特性。

北唐山大地震<sup>[4]</sup>造成输电铁塔地基下陷、倾斜或倒地,一些绝缘子完全爆裂。1994年美国Northridge地震<sup>[5]</sup>主要造成高压输电线路中的输电设备损坏,少数输电塔遭到破坏。1995年日本阪神地震<sup>[6]</sup>造成20座输电塔倾斜破坏,架空输电线路中有11座输电塔倾倒。1999年我国台湾省南投县集集镇发生大地震<sup>[7]</sup>,使变电站、发电厂、输电塔线等多处受到严重破坏,其中最显著的是高压输电塔线受到破坏。2008年汶川地震<sup>[8]</sup>的震级达到8.0级,对灾区的输电线路造成了严重破坏,致使电力供电系统瘫痪,500 kV及以下的高压设备破坏严重,20多座输电塔倒塌,多条输电线路因滑坡或地形变化受损。2013年庐山地震<sup>[9]</sup>的震中烈度达到9度,造成多条输电线路受损严重或停运。2014年云南鲁甸地震<sup>[10]</sup>造成变电站设施破坏、多条输电线路处于停运或严重受损状态。

表1给出了国内外地震中部分输电塔-线体系受损的状况。由表1可知,地震中输电塔线耦联体系的易损性较高。因此,为保证电力系统安全、高效、可靠运行,输电塔-线体系地震响应分析研究是十分必要和有意义的课题。

目前,地震作用下输电塔-线体系地震响应特征的研究已经取得了较多的研究成果,本文针对地震作用下输电塔-线体系地震响应特征的研究方法进行了总结,并对最新的研究进展及发展趋势进行了分析,为地震作用下输电塔-线体系地震响应特征研究提供研究思路。

表1 部分国内外地震中输电塔-线体系受损状况统计<sup>[11]</sup>

地震名称	里氏震级	塔-线体系受损数量				受损线路
		倒塌	倾斜	地基破坏 (下陷、位移)	变电设施	
唐山大地震	7.8	8	375	102	33	82
Northridge地震	6.6	2				63
阪神地震	7.2	11	20	20	50	23
集集大地震	7.6	24	29	511	79	79
汶川地震	8.0	20			91	63
庐山地震	7.0	合计约80多处			34	265
鲁甸地震	6.5				6	27

## 2 输电塔-线体系动力分析模型研究

输电塔-线体系是由输电导线连接各个输电塔组成的复杂空间耦联体系,具有塔体高、跨度大、柔

性强等特点,在强震作用下存在明显的随机性与强非线性,因而对这种复杂的空间耦联体系进行地震响应分析十分困难,需要对其进行模型简化研究,国内外学者在这方面已取得丰硕的研究成果<sup>[12]</sup>。

Irvine<sup>[13]</sup>建立塔-索体系模型,分析了缆索模型结构的动力响应特性。Ozono等<sup>[14]</sup>根据试验中塔线体系地震响应的差别提出了两种动力分析简化模型,高频段简化为塔-线耦联摆动分析模型,而在低频段简化为塔-线多质点分析模型。Tian等<sup>[15]</sup>将塔架简化为梁单元,输电线路简化为索单元,同时考虑地震波的非相干性与波的传播效应,研究边界条件、地震动空间变化及入射角等因素对地震波传播的影响。徐震等<sup>[16]</sup>将导(地)线简化为节点质量,并将其添加到导(地)线与输电塔连接的部位,通过对结构的倒塌分析确定输电塔的薄弱环节和倒塌机理,检测该种简化模型在输电塔倒塌分析中的可行性。李宏男等<sup>[17]</sup>提出了将导线简化为质点、输电塔简化为多自由度体系的多质点模型,给出了考虑导线振动影响的塔线体系纵向振动简化计算方法,并将纵、侧向地震作用下的输电导线振动分别简化为悬链与垂链模型,提出了输电塔线体系抗震计算的反映谱法。梁枢果等<sup>[18]</sup>将导线简化成多刚性连杆,在国内外学者对塔-线体系动力计算模型研究的基础上,根据塔线结构的动力特性给出用于地震和风振的多自由度分析计算模型。

综上所述,现有的动力分析模型研究多是将输电塔线体系简化为串联多质点等效梁模型和杆梁混合单元模型,忽略了输电塔-线体系为复杂空间耦联结构这一特性,无法体现导地线的空间几何位置,没有考虑各类负载的三维空间耦合作用,而且考虑到大跨越输电塔-线耦联体系具有塔身高、跨度大的特点,在进行地震响应分析时,有必要采用数值计算方法进行精细化的三维动力分析。

## 3 输电塔-线体系地震响应研究方法

### 3.1 输电塔-线体系地震响应数值模拟研究

地震作用下,输电塔-线体系的地震响应表现出明显的空间耦合性与位移非线性变化。国内外学者通过建立串联多质点模型等各种动力分析模型,借助有限元软件对地震作用下单塔和塔线耦联体系线性与非线性动力响应特性进行分析。以下针对输电塔-线体系地震响应数值模拟研究进行了总结。

Ghobarah等<sup>[19]</sup>采用空间桁架模型,分析了多点地震动输入对输电线路地震响应的影

等<sup>[20]</sup>、袁光英等<sup>[21]</sup>、刘俊才等<sup>[22]</sup>、Pan等<sup>[23]</sup>采用模拟生成的地震波,对位于谷底和峰顶的输电塔线耦联体系模型进行研究,分析地形变化对塔-线体系的地震反应特性的影响;基于不同失效判别准则,通过对多维地震动激励下结构倒塌机理研究进而判断失效杆件的位置与类型;采用已有的判别方法,开展了远场地震作用下塔-线体系最不利输入方向的研究。盖霞等<sup>[24]</sup>以塔顶峰值加速度、位移等作为评价指标,分析不同地震强度下,地震动持时应对输电塔-线体系的结构弹性和塑性响应的影响。孙建梅等<sup>[25]</sup>采用B-R准则并结合动态增量法,得到了多点与一致输入条件下临界失稳荷载系数、临界失稳节点位移、临界失稳杆件轴力等响应参数,指出地震作用下输电塔的塔头、横担等位置为结构的薄弱位置。易思银<sup>[26]</sup>、Tian等<sup>[27]</sup>对近断层地震作用下大跨越输电塔-线体系地震响应特征进行研究,给出生成近断层多维地震动的方法,提出近断层多维地震动最不利输入方向的判别方法。潘海洋<sup>[28]</sup>建立概率地震需求模型,开展了近断层地震动激励下塔-线体系的易损性研究,采用节间损伤指数定量评估节间的损伤程度。徐静等<sup>[29]</sup>对不同场地条件下的塔线体系,开展考虑桩-土-结构动力相互作用的输电塔线体系简化计算模型与动力响应分析研究,得出相互作用效应能够增加塔体位移与构件应力。田利等<sup>[30]</sup>通过与考虑刚性地基的塔-线体系对比,得出了考虑桩-土-结构相互作用的输电塔的薄弱位置。黄增浩等<sup>[31]</sup>研究了呼称高度对特高压输电塔多维地震动特征的影响,得出适当降低呼称高度或增加耐张塔数量均可提高输电塔线的抗震能力。

综上所述,现有文献主要考虑行波效应、局部场效应、部分相干效应以及地震动入射角度等因素对输电塔-线耦联体系的地震响应进行研究,而考虑SSI (soil-structure interaction) 效应和跨越断层地震动作用下输电塔-线体系动力响应数值模拟研究及输电塔-线体系弹塑性分析的研究相对较少。

### 3.2 输电塔-线体系振动台模型试验研究

地震模拟振动台试验是通过在振动台上加载各种形式的地震波来较真实地模拟地面运动及其对输电塔-线体系的影响作用,因此,振动台模型试验可以较好地分析地震动作用下输电塔-线体系的破坏机理与破坏模式,也可较好地评价塔-线耦联体系结构整体性抗震能力<sup>[32]</sup>。目前,地震模拟振动台试验已应用于输电塔-线体系地震响应的研究分析,

并取得了一定的研究成果。

Kotsubo等<sup>[33]</sup>考虑导地线及导地线对相邻输电塔的影响,对输电塔进行了振动台模拟试验,得到了地震作用下塔-线耦联体系的地震响应特征。田利等<sup>[34]</sup>、Tian等<sup>[35-36]</sup>通过引入不同的导、地线的修正系数,研究了多维多点地震动激励下振动台模型非等比例问题;考虑近断层地震动速度脉冲特征,引入不同入射角的位移响应比,探讨近断层近场地震波在不同输入角度下输电塔-线体系的动力响应,通过对塔线体系进行位移比分析,得出不同地震激励下塔-线体系最不利入射角存在的差异;开展了空间变化的地震动对大跨越输电塔-线体系动力响应规律的影响研究,得出地震动的空间变化能够显著放大输电塔的地震响应。辛爱强<sup>[37]</sup>开展了近断层与跨越断层振动台试验,得出跨越断层放大了结构的地震响应,揭示了多维断层地震激励下塔-线体系动力响应规律及其倒塌破坏机理。刘文明等<sup>[38]</sup>以斜坡输电塔为研究对象,开展斜坡-基础-塔线体系地震响应振动台试验研究,得出坡表具有明显的放大效应且加速度放大系数与振幅之间存在正相关关系。Wang等<sup>[39]</sup>基于4个比较模型,利用3个振动台组成的台阵对超高压杯式输电塔-线体系进行试验,研究塔-线耦合作用的动态特性。李钢等<sup>[40]</sup>、谢强等<sup>[41]</sup>、Liang等<sup>[42]</sup>对特高压塔-线体系缩尺试验模型进行了振动台试验,提出了一种满足动力特性与惯性力相似要求的模型设计中相似比的重新标定方法,选取不同类型的地震动作为输入,通过悬挂质量块等效导地线的方法,研究地震动过程中质量效应对塔体动力反应的影响,利用钢绞线模拟导地线,研究输电线的非线性振动对输电塔减震的效能。魏文辉等<sup>[43-44]</sup>对考虑地震动水平-摇摆耦合分量作用的输电塔-线体系地震响应特性进行振动台试验,研究表明地震动水平-摇摆耦合分量会造成塔体产生一定程度的非对称位移响应。

输电塔-线体系振动台模型试验研究能够较好地模拟结构倒塌破坏机理,同时也可以验证数值模拟结果的准确性,但是,鉴于输电塔-线体系跨度大、塔身高的特点以及试验设备尺寸有限、模型加工困难等因素,目前开展的输电塔-线体系振动台模型试验研究较少,并且现阶段的试验研究多建立在单个振动台试验基础上,利用多振动台试验研究多维多点地震作用下输电塔-线体系的动力响应分析将成为未来的研究趋势。

## 4 结论与展望

本文主要从输电塔-线体系动力分析模型、数值计算、振动台模型试验3个方面,对现有的研究成果进行了综述和讨论。数值计算和振动台试验是研究地震作用下输电塔-线体系地震响应特征的重要手段,但是,单一研究手段的可信度不如多手段研究方法高,其研究范围也不如多手段范围广,这是由单一研究手段的局限性决定的。未来多种研究方法相结合的研究手段将成为一种发展趋势,这将会在很大程度上避免某一种方法计算结果带来的局限性,提高计算结果的可靠性及准确性。针对地震作用下输电塔-线体系的地震响应特征仍需进一步深入研究,主要存在如下问题:

(1)目前许多学者对地震作用下高压输电塔-线体系的动力响应特征进行了研究,但是已有的研究成果不够深入,且针对特、超高压输电塔-线体系的地震响应分析研究较少,亟需开展该类型塔-线体系的地震响应特征及其连续性倒塌破坏机理研究。

(2)多次地震灾害表明,输电塔-线体系在地震中的破坏以地基破坏为主,现有的动力力学模型研究多是基于刚性地基假设,忽略了地基与输电塔线之间的相互作用对结构的动力特性和结构响应的影响,因此刚性地基的假设严格意义上讲是有误差的,有必要对考虑地基在输电塔线体系中的影响进行地震响应特征的研究。

(3)虽然振动台试验是一种有效、可靠的研究方法,但是,由于输电塔-线体系结构和动力问题的复杂性,利用振动台试验对输电塔-线体系地震响应特征进行研究具有一定的局限性,例如振动台试验设备尺寸有限,急需利用多振动台试验开展多维多点地震作用下输电塔-线体系动力响应研究。

(4)由于输电塔是由不同规格的构件组成,构件和整体截面都很小,杆件类型也较多,导致缩尺后规格种类繁多且模型制作材料上很难满足要求,结构的连接也存在一定的困难,使得振动台试验模型不能满足缩尺比例设计要求,因此需要对输电塔-线体系中各构件的缩尺比例因子进行研究。

(5)随着输电线路建设规模的扩大,由于客观因素的存在,输电塔往往无法避免建立在活动断层附近区域,甚至是跨域活动断层,目前,关于跨越活动断层的输电塔-线体系地震响应分析研究较少。

### 参考文献:

[1] 王丽,蔡春霞,王忠臣,等.我国能源结构及电力供需简

析[J].能源环境保护,2014,28(2):1-4+8.

- [2] 张化冰. 特高压输电助推能源资源远距离、大规模优化配置功炳史册——专访中国电力设备管理协会执行会长刘斯颀[J]. 电力设备管理,2020(1):20-24.
- [3] WU Gang, ZHAI Changhui, LI Shuang, et al. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on large crossing transmission tower-line system[J]. Engineering Structures, 2014, 77:161-169.
- [4] 杨少勇,赵建国. 电力系统地震灾害预防技术综述[J]. 电网技术,2010,34(8):57-63.
- [5] HALL F J. Northridge earthquake of January 17, 1994: Reconnaissance report[J]. Earthquake Spectral, 1995, 11(3):21-25.
- [6] 李杰. 生命线工程抗震:基础理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [7] 台湾地震工程研究中心. 九二一集集大地震震灾调查报告[R]. 2001.
- [8] 于永清,李光范,李鹏,等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术,2008(11):5-10.
- [9] 尤红兵,赵凤新. 芦山7.0级地震及电力设施破坏原因分析[J]. 电力建设,2013, 34(8):100-104.
- [10] 帅向华,姜立新,侯建盛,等. 云南鲁甸6.5级地震灾害特点浅析[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(3):340-358.
- [11] 王飞,李正,黄福云,等. 特高压输电塔-线体系地震模拟振动台试验研究现状[J]. 工业建筑,2016(增刊II):312-316+339.
- [12] 田利. 输电塔-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.
- [13] IRVINE H M. Cable structures[M]. Cambridge: The MIT Press, 1981.
- [14] OZONO S, MAEDA J. In plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies[J]. Engineer Structures, 1992, 14(4):210-216.
- [15] TIAN Li, LI Hongnan, LIU Guohuan. Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010, 17(3):587317.
- [16] 徐震,王文明,林清海,等. 输电塔-线体系简化模型地震作用下的连续性倒塌分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2):304-309.
- [17] 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.
- [18] 梁枢果,朱继华,王力争. 大跨越输电塔-线体系动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(6):63-69.
- [19] GHOBARAH A, AZIZ T S, EI-ATTAR M. Response of transmission lines to multiple support excitation[J]. Engineering Structures, 1996, 18(12):936-946.

- [20] 田利,李宏男,李术才. 多点地震激励下考虑地形变化输电塔线体系的响应分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2):257-266.
- [21] 袁光英,潘海洋,马瑞升,等. 多维地震下考虑不同破坏准则的输电塔-线体系倒塌分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1):184-192.
- [22] 刘俊才,田利,张睿,等. 远场地震作用下输电塔-线体系最不利输入方向预测研究[J]. 工程力学, 2020, 37(S1):97-103.
- [23] PAN Haiyang, DONG Xu, TIAN Li, et al. Critical seismic incidence angle of transmission tower based on shaking table tests[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2020, 76(2):251-267.
- [24] 盖霞,田利,马瑞升,等. 考虑地震动持时效应的输电塔-线体系响应研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(4):229-237.
- [25] 孙建梅,张健,崔浩. 多点输入下大跨输电塔线体系抗震稳定性分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(4):58-65.
- [26] 易思银. 近断层地震下大跨越输电塔-线体系响应分析[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [27] TIAN Li, YI Siyin, QU Bing. Orienting ground motion inputs to achieve maximum seismic displacement demands on electricity transmission towers in near-fault regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4):04018017.
- [28] 潘海洋. 近断层地震作用下输电塔-线体系易损性分析[D]. 济南:山东大学, 2019.
- [29] 徐静,李宏男,李钢,等. 考虑桩-土-结构动力相互作用的输电塔地震反应分析[J]. 工程力学, 2009, 26(9):24-29.
- [30] 田利,李兴建,易思银,等. 地震下考虑桩-土-结构相互作用的输电塔-线体系响应分析[J]. 世界地震工程, 2018, 34(3):1-11.
- [31] 黄增浩,龚博,张志强,等. 多维地震激励下特高压直流输电塔的响应分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23):120-125.
- [32] 宋丹青,陈志荣,陈俊栋. 岩质边坡地震动力响应研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6):1-7.
- [33] KOTSUBO S, TAKANISHI T, UNO K, et al. Dynamic tests and seismic analyses of high steel towers of electrical transmission line[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1983(333):59-69.
- [34] 田利,刘俊才,潘海洋,等. 近断层地震下输电塔-线体系振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(S1):127-132.
- [35] TIAN Li, GAI Xia, QU Bing. Shake table tests of steel towers supporting extremely long-span electricity transmission lines under spatially correlated ground motions[J]. Engineering Structures, 2017, 132:791-807.
- [36] TIAN Li, ZHOU Mengyao, PAN Haiyang, et al. Shaking table tests of a reduced-scale UHV transmission tower-line system subjected to near-fault ground motions[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(6):2040015.
- [37] 辛爱强. 跨越断层输电塔-线体系振动台试验研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- [38] 刘文明,龚秋明. 基于振动台试验的斜坡-基础-线塔地震响应研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(4):13-17.
- [39] WANG Fei, DU Ke, SUN Jingjiang, et al. Shaking table array tests of an ultra-high-voltage cup-type transmission tower-line system[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019:2350675.
- [40] 李钢,谢强,文嘉意. 地震作用下输电塔线耦联体系导线减震作用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(5):47-53.
- [41] 谢强,白杰,薛松涛,等. 1000kV角钢塔地震模拟振动台试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1):58-64.
- [42] LIANG Huangbin, XIE Qiang, BU Xianghang, et al. Shaking table test on 1000 kV UHV transmission tower line coupling system[J]. Structures, 2020, 27:650-663.
- [43] 魏文晖,袁超,王浩,等. 考虑地震动摇摆分量作用的输电塔线体系响应[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6):79-88.
- [44] 魏文晖,刘坤,王浩. 输电塔线耦联体系的地震作用影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(8):88-93.