

输电塔同步环境脉动测试及 振动特性研究

闫祥梅 著



黄河水利出版社

输电塔同步环境脉动测试及 振动特性研究

闫祥梅 著

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书主要内容包括绪论、两相邻输电塔的动力特性分析、高压输电塔—线体系的同步环境脉动实测研究、两相邻输电塔的非线性动力时程分析、输电塔—线体系的振动特性研究、结论与展望。书中在深入阐述输电塔—线体系环境脉动测试原理及方法的基础上,重点分析研究了两相邻直线输电塔及两相邻转角输电塔的动力特性的差异。

本书可作为土木工程相关专业研究生的教学用书,还可作为相关科技人员或设计人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

输电塔同步环境脉动测试及振动特性研究/闫祥梅
著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 7
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0304 - 3

I. ①输… II. ①闫… III. ①输电铁塔—脉动—测试—研究 ②输电铁塔—振动—研究 IV. ①TM75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 161367 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsclchs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:4.5

字数:130 千字

印数:1—1 000

版次:2012 年 7 月第 1 版

印次:2012 年 7 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

高压输电塔-线体系是应用极为广泛的、重要的生命线电力工程设施,它与一般的土木工程结构不同之处在于它是由输电线将相邻输电塔连接而成的连续体系,其整体柔度随杆塔高度的增加而呈非线性的增加,且输电塔与输电线在不同量级的动力特性条件下耦联工作。大量的自然灾害表明,风荷载是输电塔-线体系灾害性事故频繁发生的主要原因,并且输电塔-线体系在风荷载作用下动力响应形态复杂,敏感性强,而且具有不确定性。

作为高压电能输送的载体,输电塔-线体系的破坏会导致供电系统的瘫痪,这不仅严重地影响人们的生产建设和生活秩序,而且可能会引发火灾等次生灾害,给社会和人民生命财产造成严重的后果。由于输电塔-线体系是导(地)线和钢塔架连成的一个整体,一个输电塔的倒塌破坏,往往会引起相邻塔架的破坏,因此对两相邻输电塔的动力特性和风振响应进行研究是一项非常有意义的工作。而认识和研究输电塔-线体系在风荷载作用下的响应特点和响应规律是为了进一步了解结构的抗振性能。

本书提出了杆塔、绝缘子、输电线及边界条件的有限元建模原则与方法,建立了输电塔-线体系的空间非线性有限元模型,得出塔架、绝缘子与输电线之间的相互影响规律;运用环境脉动方法测试了两相邻直立式直线输电塔和两相邻转角输电塔的动力特性,识别出两相邻输电塔耦合导(地)线的动力特性及绝缘子在输电塔的横向和纵向的振动频率,并对测试结果进行了对比分析;模拟了作用在整个系统上的脉动风速时程记录,进行了非线性动力时程分析,从频率的分布范围进一步分析导(地)线与输电塔架相互影响的规律;分析了输电塔与导(地)线达到何种状态时,导(地)线本身可以作为输电塔的减振控制装置,从而达到控制结构体系风振反应的目的。

书中的重点部分吸纳了作者在博士阶段的研究成果。作者在撰写本书的过程中得到了同济大学何敏娟教授和马人乐教授以及石家庄电力勘测设计院张益国高级工程师的大力支持和热情帮助,在此表示深深的谢意。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点或不足之处,敬请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2012 年 5 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 地震和风灾的危害性	(3)
1.3 输电塔-线体系研究现状	(6)
1.4 本书主要研究内容	(18)
第 2 章 两相邻输电塔的动力特性分析	(20)
2.1 概 述	(20)
2.2 输电塔-线体系的双重非线性	(21)
2.3 体系的非线性静力平衡方程及求解	(25)
2.4 体系的自由振动方程及频率、振型的求解	(26)
2.5 两相邻输电塔的力学计算模型	(28)
2.6 塔线体系动力特性的计算结果及分析	(34)
2.7 本章小结	(38)
第 3 章 高压输电塔-线体系的同步环境脉动实测研究	(40)
3.1 概 述	(40)
3.2 频域识别理论	(41)
3.3 两相邻输电塔的双向同步环境脉动测试	(55)
3.4 模态参数识别	(69)
3.5 结果分析与对比	(74)
3.6 本章小结	(78)
第 4 章 两相邻输电塔的非线性动力时程分析	(79)
4.1 概 述	(79)
4.2 随机风荷载模拟	(80)
4.3 动力响应分析方法	(91)

4.4	输电塔-线体系的风振响应时程分析	(95)
4.5	本章小结	(104)
第5章	输电塔-线体系的振动特性研究	(106)
5.1	概 述	(106)
5.2	主从系统的减振设计原理	(107)
5.3	塔线耦合体系风振响应随时间变化的统计值	(111)
5.4	输电塔-线体系振动特性分析	(113)
5.5	本章小结	(129)
第6章	结论与展望	(130)
6.1	结 论	(130)
6.2	未来工作展望	(132)
参考文献		(134)

第1章 绪论

1.1 引言

随着国民经济的迅速发展、科学技术的进步和环保意识的增强,电力工业作为经济建设和人民生活的支柱产业正发生着巨大的变化。就输电方式而言,发展高压、超高压输电已成为当今各国电力供应的主要发展模式,在我国尤为重要。

高压输电模式自1952年在瑞典问世以来,已经经历半个多世纪的发展。超高压输电以苏联和日本为代表,分别于1985年和1992年建成1 150 kV和1 000 kV超高压输电线路,并投入运营使用,这标志着输电模式进入了高压和超高压输电技术并用的阶段。此后,各主要发达国家,如美国、苏联、日本和加拿大等纷纷制订了超高压输电线路发展规划,如表1.1所示。如今,已经建成或拟建的高压、超高压输电网络已经达到相当的规模。

表1.1 各国超高压输电线路建设规划

国别	电压(kV)		拟输送容量 (MW)	拟输送距离 (km)	建设原因
	标称	最高			
苏联	1 150	1 200	5 000	2 000	大容量、长距离
美国	1 150	1 600	5 000	>480	大容量
	1 100	1 200	5 000 ~ 10 000	300 ~ 400	大容量
日本	1 000	1 100	8 000	250	大容量、短路电流、走廊
意大利	1 000	1 050	5 000 ~ 10 000	300 ~ 400	大容量、走廊
加拿大	1 000		10 000	1 200	大容量、长距离
巴西	1 000		20 000	1 500 ~ 2 000	大容量、长距离

相比之下,我国高压建设的发展相对滞后,主要表现为两个方面:第一,虽然已经建成覆盖全国的高压输电网络,与发达国家相比还有一定差距;第二,电力工业的发展尚不能完全满足经济建设对能源的需求,国家提出了“西电东输”“北电南输”的电力发展战略。据我国电力规划部门预测,21 世纪我国对电力的需求量仍然有强劲增长的趋势,2020 年以前年需求量将以 5% 以上的增长速度递增,拟建的超高压输电线路也正在规划之中,如表 1.2 所示。然而,近年来由于国民经济的快速稳步增长,甚至出现了电力工业的发展滞后于国民经济发展的现象,用电高峰期出现的频次增多,时段增长,致使电力供应短缺的现象常见于媒体和报端。因此,可以预见短期内电力工业的发展无论是在规模还是总量方面都将比预期建设投入更大、更快。

表 1.2 我国 2020 年前超高压输电线路建设预测

输送方向	输送电力(MW)	输送距离(km)
华北—华东	4 000	800
华北—东北	6 000	1 100
华中—华东	6 000 ~ 8 000	1 000
云贵—华南	7 000 ~ 8 000	1 500
四川—华东	10 000	2 000 ~ 2 300
四川—华中	5 000	1 100

综上所述,目前高压输电的建设与发展具有以下特点:

(1)随着电力能源应用比例的提高,电网分布范围日趋扩大,架空线路趋于长大化,输电网络建设速度逐年加快;

(2)为满足电力需求,提高输电效率,采用高压、超高压输电技术已成为输电行业的重要手段;

(3)输电线路工程规模的大型化,土木工程费用在总费用中所占的比例日益提高。

可见,研究其动力响应特性、结构设计理论和防灾控制措施,是高压、超高压输电建设发展的迫切需要。

1.2 地震和风灾的危害性

风是一种最为常见的大气现象。它是建筑物常遇的侧向荷载之一,特别是对于高耸建筑物,如桅杆、输电塔、电视塔、烟囱、高层房屋等,风荷载往往起着决定性作用。我国幅员辽阔,风灾频繁发生,尤其是东南沿海区域,每年夏季均有台风过境,造成大量的设施破坏及电力、交通的中断,直接和间接的经济损失巨大。

输电线路是重要的生命线工程。电力是现代城市正常运作的基础。电力供应系统的中断,将导致整个城市陷于瘫痪。并且在灾害发生时,电力供应系统的中断将造成开展救援工作困难。因此,各国学者对输电线路的抗风、抗震相当重视,展开了广泛的研究。高压输电塔-线体系是输电线路的主干线,是远程电力传输的主要途径,是高负荷电能输送的载体,是重要的生命线工程。与通常的土木工程相比,它具有塔体结构高、跨距大,整体结构柔性强,兼有塔状高耸结构和大跨距结构的共同特点,对地震、风等作用反应敏感,容易发生振动疲劳损伤和极端条件下的动态倒塌破坏。目前,由于对这种高压输电塔-线体系缺乏系统深入的基础理论研究,导致抗灾措施不合理。以地震为例,1992年的Landers地震,致使100多条输电线路不同程度损坏,造成洛杉矶电力供应短时瘫痪;1994年的Northridge地震,导致连续两座大型输电塔完全破坏,多回路供电中断;1999年台湾集集地震,同样出现个别大型输电塔倒塌故障,致使主要输电线路中断供电多达六周之久,其直接和间接损失之大,引起电力工程界的高度关注。同样,各种类型和强度的风雨作用、导线浮冰作用导致的输电塔-线体系破坏的现象也频繁发生,图1.1是2005年发生在天津的一输电塔风致破坏;图1.2和图1.3分别是2002年和2004年发生在我国辽宁的两次暴风雨导致输电塔-线体系风雨致振倒塌破坏,其损失的严重程度可想而知。

目前,我国正在加快电网建设,推进全国联网,积极准备进行电网特高压升级,为满足“全国联网、西电东送、南北互供”的需要,建设一批1000 kV交流特高压输电线路和 ± 800 kV直流高压输电线路工程。

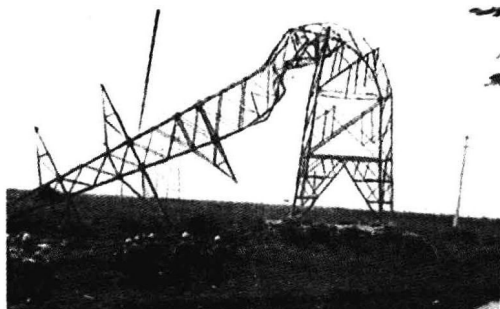


图 1.1 天津 2005 年某输电塔风致破坏

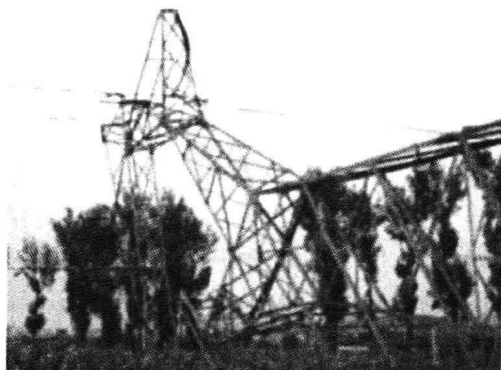


图 1.2 2002 年 7 月辽宁朝北线暴风雨倒塔

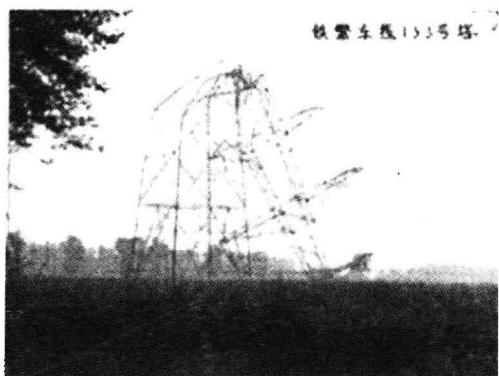


图 1.3 2004 年 7 月辽宁铁繁东线暴风雨倒塔

随着输电电压等级的升高,跨越地形日趋复杂,高压输电塔正向着高柔方向发展。风荷载是已知的造成输电塔损坏和倒塌的主要原因,见表 1.3,主要包括风致振动、由裹冰引起的输电线舞动等。作为大型生命线工程,输电塔结构的破坏将导致供电系统的瘫痪甚至引发火灾等严重后果,不仅造成重大经济损失,其安全问题还将直接影响到国家的生产建设和人民的生活秩序,应引起工程设计及科研人员的广泛关注。由此可见,不断深入研究输电塔-线体系的风振特点具有科研及实际应用价值。

表 1.3 近几年我国输电塔风荷载破坏实例

时间	破坏实例
1991 年	19 号台风,造成高压输电塔和其他电力设施的极大破坏
1998 年 8 月 22 日	华东 500 kV 江南 I 线江都段 4 基输电塔倒塌
2004 年 8 月 12 日	“云娜”台风在浙江登陆,损坏的线路达到 3 342 km
2005 年 4 月 20 日	江苏盱眙的同塔双回路发生风致倒塔事故,一次倒塔八基
2005 年 6 月 14 日	国家“西电东送”和华东、江苏“北电南送”的重要通道——江苏泗阳 500 kV 任上 5237 线发生风致倒塔事故,一次性串倒 10 基输电塔
2005 年	青海省贵德县拉吉山上的 330 kV 龙硝兰线发生风致倒塔事故
2005 年 4 月	江苏省双北线一次性风致倒塔 8 座

强风所造成的输电塔倒塌事故不只局限于中国,世界各地时有发生。日本的统计表明,其电力供给中由自然现象引起的故障的 70% 都是由架空输电线路的故障引起的。2002 年 10 月 1 日,日本 21 号台风造成茨城线 10 基高压输电塔连续倒塌的严重事故。

1.3 输电塔－线体系研究现状

高压输电塔－线体系动力响应的研究动向反映了高压输电事业建设发展与灾害预防的客观需要,其动力响应特性研究可为设计提供准确的技术参数和设计方法,是当前结构工程领域迫切需要解决的课题。为此,国内外学者和科研机构以试验测试、理论分析、数值模拟等手段,对高压输电塔－线体系的动力响应特性和分析方法等问题进行了探索性的研究,目的在于提高输电塔－线体系抗振抗风能力、结构控制和设计理论水准,实现灾害控制目标。

高压架空输电线路是集高耸和大跨越两种特征于一体的高柔度结构。在地震、风、雨和浮冰等荷载作用下,结构动力反应表现为明显的随机性和几何非线性特征。

1.3.1 输电塔－线体系耦合作用研究

近些年来,随着超高压输电事业的迅速发展,输电塔高度越来越高,其跨度也增加到几百米甚至上千米,人们对其投资也越来越大。由于输电塔－线体系在人们生产和生活中的重要性,国内外学者在充分重视塔架结构非线性静力性能研究的同时,越来越关注对结构动力响应的研究。目前,国内对输电塔－线体系动力特性的研究还不充分,沿用《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)的风振系数取值来考虑随机风荷载的风振响应。实际上,结构外形对结构自身的动力特性及其在随机荷载下的反应有较大的影响。由于输电塔结构的特殊性,即它的横担宽度较塔身宽度大得多,质量也比较大,其风振系数在集中质量处存在突变,所以该体系在风荷载作用下产生的动力响应明显。

与钢结构自立式广播电视塔等空间桁架结构相比,最大的区别是输电塔－线体系还包含非线性很强的输电线。在对导线进行分析和研究时,人们往往把导线当做单索结构来进行分析。随着时代的不断发展,对于索动力问题的研究也取得了很大的进步。早在17世纪,伽利略就研究了悬挂于两端支架上、且不可伸长的索或链的曲线形式,称之

为“悬链曲线”的理论。几何学家 James Bernallì 等于 1691 年开始建立了包含超越函数的“悬链曲线”的解。之后 Fuss 于 1794 年发现了“抛物线”理论,到 1862 年以后逐渐形成了“抛物线”理论体系。到 20 世纪七八十年代,已经有了较完善的静力分析方法,包括解析解、近似解和静力有限元等。关于索的振动问题的研究也是不断发展的。1738 年, Bernodi 求解了一根悬链的自振频率;1760 年, Lagange 通过建立一个“珠子串”模型的方法建立了悬索的运动方程;1764 年, Euler 建立了极坐标下绷紧的索、膜的运动方程并进行了求解;1981 年 Irvine 的著作《Cable structure》对索的动力和静力分析与计算进行了较为完整的阐述。我国古代就已建造了悬索桥,但对索的系统研究直到近代才出现,从 20 世纪 50 年代到 70 年代,我国对于索的研究集中在连续化随机理论,运用解析法对索结构进行静力分析和研究。金问鲁著的《悬挂结构计算理论》是我国第一部比较完整的关于悬挂结构理论的系统性专著。单圣淦在文献《悬索曲线理论及其应用》中指出,对于荷载沿曲线均匀分布的单索结构,“悬链体系”是它的精确解,“抛物线”理论的实质是取代了“悬链曲线”方程级数展开式二阶以下项,并对其加以修正后得到的理论解,针对这种情况,他提出了一种以四阶代数函数为基础的“悬链曲线”理论,将设计范围扩大了两倍左右,但计算过程略显复杂。20 世纪 80 年代,由于计算机技术的发展,以离散化理论为基础的有限元法和处理非线性问题的各种迭代解法获得了迅速的发展。其中,哈尔滨建筑工程学院的沈世钊教授和他的研究生们对索网结构和索桁架结构做了大量的研究工作,这些研究大多以有限元理论为基础,采用时程反应分析方法和随机振动理论对索系进行分析。同济大学的王肇民和他的研究生对索网结构和索桁架结构也做了大量的研究工作。这些研究工作大多以有限元理论为基础,采用时程反应分析方法和随机振动理论对索系进行分析。

输电线在风荷载作用下的振动形式主要有以下几种:微风振动、分裂导线的次档距振动、导线的舞动。许多研究根据实际工程中导线不同振动下传给输电塔的荷载特征,假设导线传给塔的水平及垂直荷载同时作用于塔身,利用随机参数结构受随机激励响应的模型,计算了输

电塔脉动位移的统计值,计算结果定性地表明导线对输电塔的动力影响不可忽略。输电线作为一种单索结构,其反应普遍具有大位移小应变的几何非线性,同时还具有频率密集性的特点,使得风振研究更为复杂。由于输电线档距大,又暴露在室外,本身受自然条件如温差、地面粗糙度等的影响很大,所受风荷载又具有强烈的随机性,这些都给精确计算带来难度。随着输电塔建设规模的逐年增大,国内外越来越多的研究开始考虑塔线在振动中的相互作用。比较早期的 Iwata 和 Ijima 采用不同的方法将导线简化为动力弹簧对整个体系的动力特性进行了研究,但研究仅限于地震反应,这是因为地震作用是通过端点传递的,而风荷载则是同时作用于导(地)线上。另外,导(地)线有较强的几何非线性,并且其刚度与风荷载造成的几何形状有很大的关系,仅把它简化成弹簧是不够的;日本的 S. Ozone 等在 20 世纪 80 年代后期就对塔式结构的动力特性进行了分析,研究了塔索耦合对振动特性的影响,并考虑了塔线跨数、边界条件等因素的影响;Yasui 等在塔线体系风振响应的分析中考虑了挂线绝缘子的作用,并比较了悬挂式和张拉式绝缘子对输电塔振动的影响;加拿大西安大略大学的 A. Y. Shehata 等对输电线路体系进行了有限元分析,得到了大量的高强风下输电塔体系的响应结果,为输电塔设计提出了一些建议,并对绝缘子的位移响应进行了研究;我国的王前信在 20 世纪 80 年代末提出了塔线体系三个方向的抗震计算简化力学模型;上述研究对输电塔-线体系的动力研究起了很大的推动作用,然而限于数值计算条件,做了许多简化。随着有限元理论的不断进步、计算机数值计算能力的不断提高,现在已可以建立非线性索元和桁架单元混合的体系,进行数值计算,精确分析体系的动力反应。

针对输电塔-线体系的耦合作用,国内的李宏男等进行了大量的研究工作,首次进行了大跨越输电塔-线耦联体系的振动台试验,用以检验提出的输电塔-导线耦联体系理论计算模型和方法的合理性和正确性。通过分析输电塔在竖向、侧向、纵向的特性,推导出三个方向的刚度方程,并针对三个方向的地震,分别提出了不同的多质点计算模型,然后在不同的方向分别与输电塔耦合,进行简化计算。通过文献中

的数值计算结果,认为导线对输电塔的自振特性有较大的影响。为确定导线的影响,选取5个不同形式的输电塔,计算时将导线的跨度由大到小进行变化。结果表明,导线对输电塔纵向地震反应的影响很大,可达34%,且偏于危险,其作用在动力分析时不能忽略。针对不同的场地类型确定了高压输电塔体系侧向和纵向振动时考虑导线影响的界限跨度值,结合抗震设计规范给出了在振型分解反应谱法中的 G_i 上增加一个附加质量 Δm 以考虑导线影响的简化抗震计算方法。 Δm 的计算公式如下:

$$\Delta m = f(l_x) \times l_x \times q$$

式中, Δm 为附加质量; l_x 为铁塔的垂直档距; $f(l_x)$ 为附加质量系数; q 为导线每km长度上的质量,kg/km。

当进行体系的侧向抗震计算时,由式(1.1)确定

$$f(l_x) = \begin{cases} 0.17 + \frac{3l_x}{200l_0} & \text{软土} \\ 0.21 + \frac{l_x}{100l_0} & \text{中硬, 当 } f(l_x) > 0.7 \text{ 时, 取 } f(l_x) = 0.7 \\ 0.35 + \frac{l_x}{20l_0} & \text{软土} \end{cases}$$

(1.1)

作为一种自然现象,风具有随机性和复杂性,这使得输电线路的风荷载和风振响应问题尚无法从理论上完善解决。所以,进行输电塔-线体系的脉动和各种风激励的实测研究以及通过不同单元的有限元方法建立结构动力特性与响应特性分析的结构分析模型具有实际意义。

1.3.2 输电塔-线体系动力特性研究

日本 S. Ozone 教授等在大量试验分析的基础上,提出了求解输电塔线耦合体系在平面动力特性的两种计算模型:在高频段,把输电塔简化成质量集中于顶部的悬臂杆,导线简化成无质量的弹簧,各输电塔之间在顶部由无质量的弹簧相连,为塔线耦合振动模型;在低频段,输电塔-线体系平面内振动动力特性比较接近塔线多质点模型。S. Ozone

从理论上分析了这种简化方法的合理性及可行性,并对低频下导线、塔振动的行为进行了研究,给出了导线的振动对塔振动有一定影响的结论和频响函数;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,探讨了塔线耦合对输电塔和导线振型的影响。但导线如何简化成无质量的弹簧,弹簧的刚度如何确定,该方法的计算结果与实际的频率及振型是否吻合,均未做进一步研究分析。

李宏男对高压输电塔-线体系的动力特性做了大量的研究,提出了一种简化的计算方法——多质点模型。此模型将导线简化成多个集中质点,各集中质点之间由刚性杆相连,输电塔亦简化成具有多个集中质量的串联多自由度体系。塔线体系做平面内纵向振动时,将导线简化成两端固定的悬索;塔线体系做平面外振动时,将导线简化为垂链。

瞿伟廉在李宏男提出的多质点模型的基础上,采用多质点模型分析输电线路的振动,并重点研究了多质点模型的几个模型参数对动力特性的研究。

梁枢果等在李宏男工作的基础上考虑了节点纵向位移二阶小量的影响,并基于输电塔-线体系属高柔结构且风荷载是主要荷载的特点,对其动力特性和频域风振响应做了广泛研究,使多自由度模型能同时用于地震和风振响应的计算。此外,以广东罗江 500 kV 输电线路为工程背景,进行了输电塔-线体系气弹模型风洞试验,研究了在挂与不挂导线以及不同来流风攻角下输电线对输电塔动力特性的影响。

H. Max Irvine 系统地研究了索结构的静力和动力特性,并用连续体模型对两端固定索在考虑索刚度和不考虑索刚度两种情况下的动力特性进行了推导和计算。目前,国内外学者在采用离散化模型计算输电导线动力特性时,一般将此连续体模型计算结果作为精确解来检验计算精度,并运用到输电塔-线体系动力特性计算中。柳春光等将输电塔-大垂度电缆体系的计算简图近似为折线形链杆体系,在刚度特性不确定的情况下,利用“最不利可能变形状态”替代振型,并做极限计算确定出地震反应的上限。程志军用虚功原理完善了空间悬链单元刚度矩阵,并利用空间悬链线单元模拟导线,对输电线路进行了静力和动力计算。胡松对输电线系统中的输电线、绝缘子及塔身分别采用索