

输电塔线体系断线动力响应及杆塔破坏模拟研究

胡位勇¹ 严波¹ 程皓月¹ 郭跃明²

(重庆大学资源及环境科学学院工程力学系 400030 重庆)¹ (中国电力工程顾问集团西南电力设计院 610021 成都)²

摘要: 利用 ABAQUS 软件建立 500kV 典型输电线路塔线耦合体系的精细有限元模型, 数值模拟覆冰塔线耦合体系断线后的动态响应和杆塔破坏过程。对杆塔引入等效塑性应变破坏准则, 当单元的最大等效塑性应变达到许用值时, 删除单元以模拟杆塔的破坏。数值模拟结果与按我国电力设计规程以及 IEC 设计规程的计算结果比较表明: 地线断线时用塔线模型和规程计算得到的杆塔应力的差别较导线断线时大, 地线和导线断线时杆塔的最大应力均大于两种规程的计算值; 杆塔上与地线连接的角担是断线时的薄弱区域。现行电力设计规程中采用静力分析方法对断线产生的冲击动力作用的估计不足。

关键词: 输电塔线耦合体系; 断线; 破坏; 有限元模拟

中图分类号: TN753; O39 **文献标识码:** A

1 引 言

途经重冰区的架空输电线路在严重覆冰情况下的安全性是线路设计中必须考虑的重要因素。重冰区线路常见的事故包括绝缘子串破坏、导线断裂、杆塔折损和倒塌等, 其中以杆塔破坏带来的损失最大。线路断线通常会产很大的纵向不平衡荷载, 引起整个塔线体系的振荡, 甚至导致输电塔多米诺骨牌式的倒塌。如 1975 年美国的 Wisconsin 和 Indiana 就发生了因线路断线导致多个输电塔倒塌, 使整条输电系统瘫痪的事故^[1]。

目前我国电力设计行业规程及 IEC 标准中均采用静力分析方法对杆塔在断线工况下的强度进行校核^[2-3]。然而时有发生因断线引起的杆塔倒塌事故表明静力设计方法可能存在不足。关于输电线路断

线产生的非平衡力和震荡问题的研究已有报道^[4-7], 但这些工作均没有考虑塔线体系的耦合作用。文献[8]首先通过塔线模型, 研究断线后杆塔及导线的动力响应, 但其采用二维简化模型, 和实际相差甚远。文献[9]通过建立三维杆塔模型, 利用弹簧模拟导线和地线, 研究了断线后杆塔的动力响应, 但没有考虑塔线之间的耦合作用。文献[10]通过建立鼓型塔线耦合模型, 研究了绝缘子破坏情况下塔线的动力响应, 并指出绝缘子破坏后相邻档的应力放大系数较大。文献[11]研究了塔线耦合体系在不同子导线断裂根数情况下, 导线和地线和杆塔所受的冲击作用, 但这些研究工作的计算模型中均未考虑杆塔的破坏。

本文以 500kV 高压输电线路重冰区典型线路段为研究对象, 采用有限元方法模拟研究了在严重覆冰、典型断线情况下塔线体系动力响应和杆塔的破坏过

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2009BB7367); 中央高校基本科研业务费资助(CDJXS10 24 102)

来稿日期: 2012-03-27

修回日期: 2012-06-01

第一作者简介: 胡位勇, 男, 1987 年生, 重庆大学资源及环境科学学院工程力学系, 研究生; 研究方向——工程力学。

通讯作者: 严波, E-mail: boyan@cqu.edu.cn

程。并对杆塔破坏的原因进行分析,指出现行电力设计规程对杆塔进行断线强度校核时,对断线冲击动力作用的估计不足。

2 塔线耦合体系有限元模型

2.1 有限元模型

以一典型的四档三塔线路段为对象,首先建立塔线体系的有限元模型。该线路段各档档距为200m,无高差。杆塔型号为JB16G,全高74m;呼称高度57m的耐张塔由角钢组合而成,包括Q235、Q345、Q420三种材料。分裂子导线及地线型号分别为A3/S3A-732/92和GJ-240,具体物理参数如表1所示。绝缘子串为4×420kN四联耐张绝缘子串,串长8145mm,总重2871kg;间隔棒型号为FJZ-500/732,外型尺寸为500mm×500mm,总重13.5kg。

建立的塔线耦合体系有限元模型包含各子导线、地线、杆塔、绝缘子、间隔棒等。杆塔为典型的框架结构,根据结构中各相邻杆件之间的连接关系,建立空间杆梁混合有限元模型。绝缘子和间隔棒的刚度相对较大,在塔线耦合体系的运动过程中变形相对较小。因研究重点为导线和杆塔的变形和应力,故为简化起见,将绝缘子串和间隔棒用空间梁单元进行离散。由于绝缘子串的端部可以自由转动,因此模型中释放模拟绝缘子串梁单元的转动自由度。

此外,导线和杆塔的阻尼采用瑞利阻尼模型,即阻尼矩阵 C 是质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的线性组合,即

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

其中 α 和 β 为瑞利阻尼系数,其值与结构和材料有关。根据文献[12]~[13],裸导线和覆冰导线的阻尼分别为临界阻尼的2%和10%;杆塔的阻尼则为临界阻尼的3%; β 通常很小,可以近似为0。由此可计算得到覆冰导线的 α 为0.1,杆塔为0.2。

表1 导线和地线物理参数

型号	弹性模量/ MPa	截面积/ mm ²	线重/ kg·m ⁻¹	抗拉应力/ MPa
A3/S3A-732/92	67000	824.7	2.75	424.2
GJ-240	181420	238.76	1.9005	1440.72

采用文献[14]提出的方法确定导线和地线的初始构形,该方法无需迭代过程。导线和地线可视为

柔索结构,在ABAQUS模拟中可采用桁架单元并设置其材料为不可压缩。每根子导线和地线划分为100个单元。模型两端所有导线和地线为铰接,各杆塔与基础连接点均设置固定边界条件。建立的塔线耦合体系有限元模型如图1所示。经单元收敛性检查,划分的网格可以得到满足精度要求的解。

根据我国中重冰区架空输电线路设计技术规定^[2],对重冰区杆塔进行断线情况下的强度验算时考虑100%覆冰和无风情况。本文研究的杆塔所处重冰区的设计覆冰厚度为60mm,假设覆冰均匀覆盖在杆塔和导线上。

导线和地线覆冰后承受冰荷载的作用。假设冰均匀覆盖在导线和地线上,由于覆冰的强度可以忽略不计,故可以通过增加导线和地线的密度来模拟作用在导线和地线上的覆冰静力荷载。因此,在计算导线和地线覆冰后的平衡状态时,可以通过赋予模拟导线和地线的单元以等效密度来模拟载荷。覆冰后导线和地线的等效密度 ρ' 可由下式计算

$$\rho' = \frac{W_1 + W_2}{A} = \rho_1 + \rho_2 \quad (2)$$

其中: W_1 和 W_2 分别为单位长度导线和地线的自重和覆冰重量; A 为截面积。

根据《高耸结构设计规范》(GB50135-2006)^[15],非圆截面构件单位面积上的覆冰荷载可按下式计算

$$q_a = 0.6ba_2\gamma \times 10^{-3} \quad (3)$$

其中: q_a 为单位面积上的覆冰荷载(kN/m²); b 为基本覆冰厚度(mm),根据当地离地10m高度处的观测资料取值; a_2 是覆冰厚度的高度递增系数,按表2取值; γ 是覆冰重度,按照9kN/m³取值。

表2 覆冰厚度的高度递增系数 a_2

离地高度/m	10	50	100	150	200	250	300	≥350
a_2	1.0	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8

2.2 断线工况

根据中重冰区架空输电线路设计技术规定^[2],对于单回耐张型杆塔考虑的断线组合为两种情况:①导线安全,断任意一根地线;②地线安全,任意两相导线断线。此外,IEC杆塔设计标准^[3]中规定,对于耐张塔,按杆塔一侧导线和地线全部断裂进行静力计算校核。

实际情况中,多根导线同时断线的情况很罕见。规范中在对杆塔进行断线强度校核时,可以理

解为由于在对杆塔进行静力分析时没有考虑断线产生的冲击作用的缘故。但这种简化处理方式值得深入探讨。为此, 考查各单相导线和地线不同位置断裂后系统的动力响应。已有的研究表明断线发生在档两端时对杆塔产生的冲击作用最大。本文模拟的断线位置如图1所示, 计算工况为图中所示断线点位置分别断裂的情况。其中断线点D、E、F为导线与耐张绝缘子串连接处, 这也可理解为绝缘子串破坏; G和H点为地线与杆塔的连接处。由于杆塔结构左右不对称, 故需分别考虑A相和C相导线分别断线以及两根地线分别断线的情况。

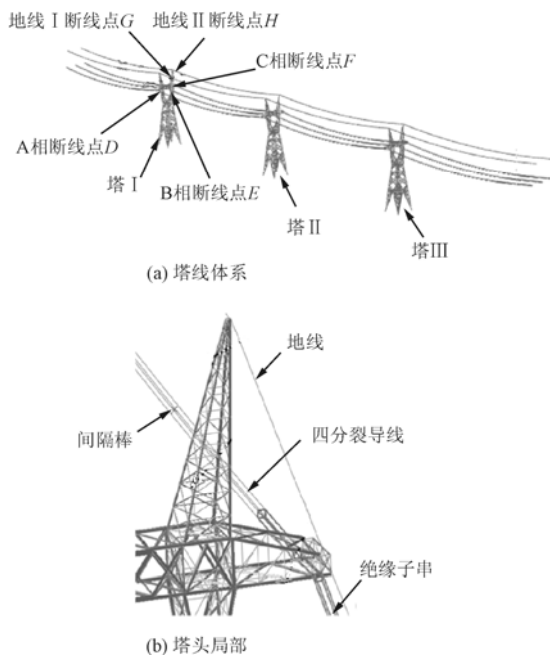


图1 典型四档三塔有限元模型

3 杆塔破坏准则和数值模拟方法

3.1 杆塔破坏准则

杆塔结构采用了 Q235、Q345、Q420 三种材料, 其材料参数如表 3 所示。文献[16]在研究大跨桁梁结构体系的连续性倒塌机理与抗倒塌设计问题时, 对 Q235 材料采用了双线性弹塑性模型, 且使用等效塑性应变破坏准则。在此, 本文采用与文献[16]相同的弹塑性模型和破坏准则。不考虑应变率的影响, 破坏等效塑性应变均取为 1%。

表3 杆塔材料参数

名称	杨氏模量/MPa	强化模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
Q235				235
Q345	2.1×10^5	2.1×10^4	0.3	345
Q420				420

3.2 断线及杆塔破坏数值模拟方法

在利用 ABAQUS 软件模拟塔线耦合体系断线的动力响应过程中: 首先计算得到覆冰情况下塔线体系的平衡状态; 然后使断线处的单元失效, 即定义该单元为“死”单元, 从而实现导线和地线断裂的模拟。

在 ABAQUS 的材料模块中定义杆塔各种材料的弹塑性本构关系和破坏等效塑性应变。数值模拟过程中, 当杆塔某单元的最大等效塑性应变达到破坏值时, 即删除该单元, 从而模拟杆塔杆件的破坏。

4 断线后塔线体系动力响应模拟及安全性分析

4.1 断线后塔线体系动力响应

采用前述方法首先计算在重冰作用下塔线体系的平衡状态, 再进一步分别对各断点断线后塔线体系的动力响应和杆塔破坏过程进行数值模拟。结果表明, 在断线前 60mm 重冰工况下塔线体系均是安全的。下面重点讨论各点断线后塔线体系的动力响应。

首先考察 A 相导线 D 点断线后塔线体系的动力响应。图 2 所示为该断线工况下典型时刻的状态。从图 2 (a) 中可见: 断线前, 覆冰状态下塔线体系的最大应力为 440.2MPa, 出现在地线上。地线的许用应力为 1440MPa, 其强度足够。此时, 导线和杆塔的应力水平均较低, 强度足够; 断线后, 塔线体系受到非平衡力的作用而发生强烈振动, 塔线受力重新分配。在断线后 1s 时, 地线中的最大应力高达 700.6MPa, 如图 2 (b) 所示。这是因为断线前地线中的初始应力水平较高。随着时间的推移, 杆塔 II 左角担与地线连接的杆件产生较大的塑性变形。最终其等效塑性应变超过允许值而发生破坏, 地线脱落, 如图 2 (c) 所示。此时, 其它两个杆塔均未发生破坏。

图 3 所示为 A 相导线 D 点断线过程中杆塔 II 在典型时刻的应力分布图。从图中可以看出, 在断线前, 该杆塔中的最大应力为 132.6MPa; 断线后 1s 时最大应力为 273.2MPa。此时对应于 A 相导线侧的左角担发生了较大的变形, 这是由于断线产生的不平衡力所致; 在断线后 4s 时刻, 杆塔左角担变形严重, 且已经发生破坏。此时杆塔的最大应力有所下降, 为 268.2MPa。

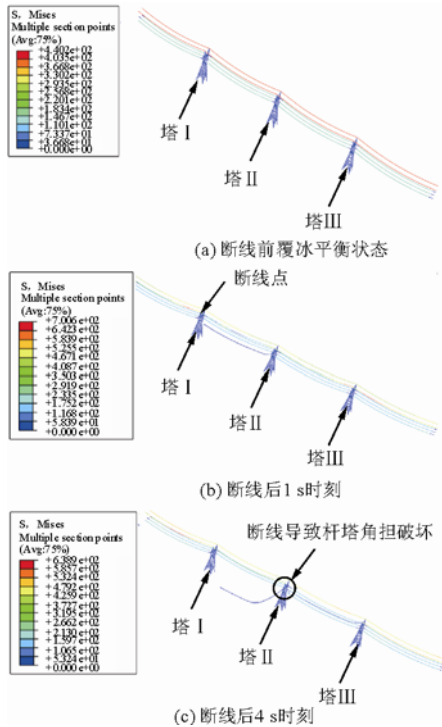


图2 A相导线D点断线过程典型时刻状态

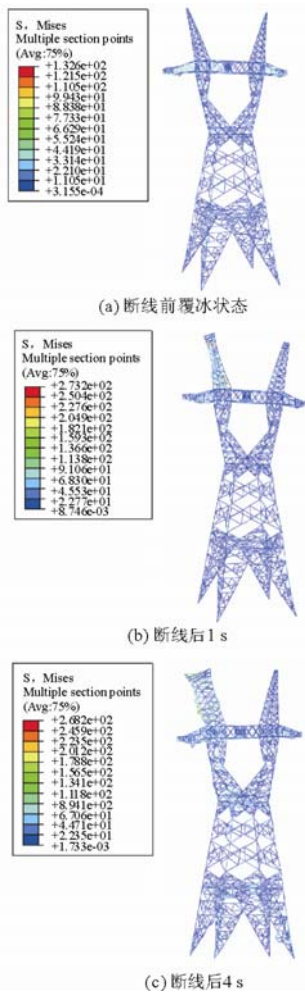


图3 A相导线D点断线过程中塔II典型时刻应力分布(位移放大100倍)

图4所示为地线I的G点断线后典型时刻塔线体系的状态。比较图2(b)和图4(a)可见:A相导线断线后1s时导线断裂段已落下较大距离,而地线断线后1s时地线断裂段落下的距离较小。这是由于导线为四分裂导线,其自重远大于地线。由图4(b)可见,地线G点断裂后4s时,远离断裂点的右杆塔的左角担发生了断裂破坏,该杆塔角担局部的破坏过程如图5所示。

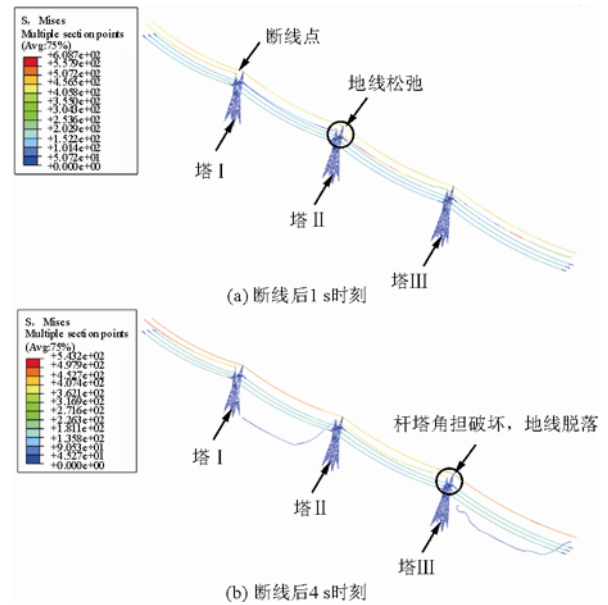


图4 地线I的G点断线后典型时刻塔线体系状态

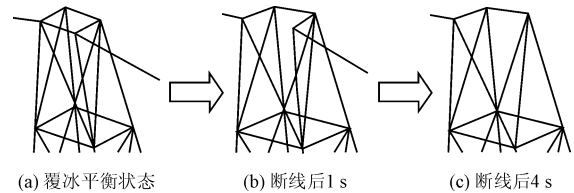


图5 地线I的G点断线过程中右杆塔角担破坏过程

另外,C相导线F点和地线II的H点断线后,中间杆塔左角担有杆件破坏,但角担仍然保持与地线连接。而B相导线E点断线后,塔线体系除断点外,均无构件发生破坏。由于B相处于三相导线的中间,其断裂后对杆塔和塔线体系产生的非平衡力最小。E、F、H点断线后4s时刻塔线体系的状态如图6所示。

上述破坏的发生,均是由于在断线过程中塔线耦合体系产生较大的纵向不平衡张力使得电线张力发生放大作用而导致的。

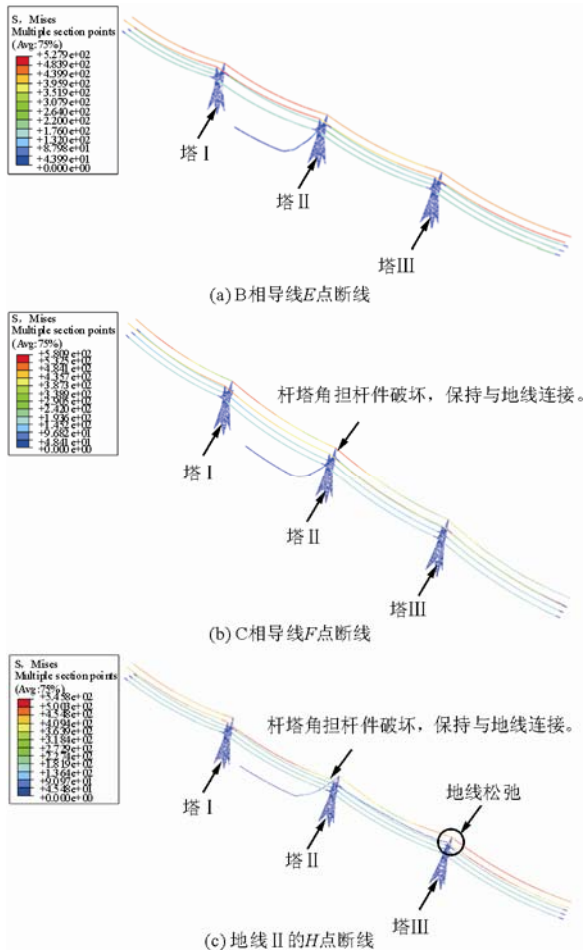


图 6 其它点断线后 4s 时刻塔线体系的状态

4.2 断线后塔线体系安全性讨论

对四档三塔输电线路塔线体系断线动态过程的数值模拟结果表明: 导线和地线在断线后的最大应力均小于许用应力, 即断线后导线均满足强度要求。

另一方面, 由数值模拟结果可见: 除 B 相导线断线后杆塔未发生破坏外, 其它断线工况下, 均导致了杆塔的破坏。破坏的杆塔主要为断线档远离断点的杆塔, 破坏点几乎都在角担上。这是由于角担受到地线较大的初始张力的作用所致。

根据中重冰区架空输电线路设计技术规定^[2], 对于单回耐张型杆塔考虑的断线组合为导线安全、断任意一根地线和地线安全、任意两相导线断线两种情况。而 IEC 杆塔设计标准^[3]中规定, 对于耐张塔, 按杆塔一侧导线全部断裂进行静力计算校核。计算时均不考虑动力放大系数。依据此两个设计规程对杆塔进行了校核, 其计算结果如表 4 中所列, 可见杆塔的所有杆件均满足强度要求。为了对比, 表 5 列出了塔线耦合体系在 II 档各种断线工况下杆

塔的最大应力及其出现的位置。与表 4 比较可见: 地线断线时塔线模型和规程计算得到的杆塔应力差别较导线断线时大。地线 I 断线时, 采用塔线模型计算得到的杆塔最大应力高达 380.4MPa, 而我国标准为 186.1MPa, IEC 标准为 175.7MPa; 导线断线情况以 A 相导线断线时杆塔应力差别最大, 塔线体系模型对应的最大应力为 285.6MPa, 远大于两种规程的计算值。由塔线耦合体系计算得到的断线工况下杆塔的最大应力明显大于规范计算值, 因此, 现行设计规程中对断线产生的冲击作用可能考虑不足。这可能是重冰区杆塔破坏事件发生较多的重要原因之一, 因而值得进一步深入研究。

表 4 按规范计算得到的杆塔断线最大应力

杆塔材料	最大应力/MPa					IEC 标准 ^[3]
	我国规范 ^[2]			地线 I 断线	地线 II 断线	
	A、B 相断线	B、C 相断线	A、C 相断线			
Q235	120.1	101.3	77.31	106.8	113.2	111.3
Q345	162.6	153.8	149.6	186.1	189.0	175.7
Q420	150.8	153.7	115.1	163.0	162.2	199.3

表 5 塔线耦合体系模拟得到的 II 档各种断线工况下

断线工况	杆塔最大应力		材料
	断线过程最大应力/MPa	最大应力出现位置	
A 相断线	285.6	横担与塔身连接处	Q345
B 相断线	158.9	横担上	Q 345
C 相断线	258.4	塔腿连接处	Q 420
地线 I 断线	380.4	角担上	Q 345
地线 II 断线	348.3	角担上	Q 345

5 结论

本文采用有限元法针对 500kV 四档三塔塔线耦合体系在不同断线工况下系统的动力响应和杆塔破坏进行了数值模拟与分析, 得到以下结论。

- 1) 地线断裂对塔线体系的冲击作用最大, 杆塔最容易破坏; 其次是边相导线断线情况; 中相导线断线产生的冲击作用最小, 最不容易引起杆塔破坏。
- 2) 断线档远离断点段的杆塔最易发生破坏, 有时也可能引起相邻档杆塔的破坏; 杆塔上与地线连接的角担是断线时杆塔的薄弱区域, 最容易发生破坏, 设计时可对该区域进行加强。

3) 国内现行电力设计规程和 IEC 杆塔设计标准对断线时产生的冲击动力作用的估计不足, 建议对杆塔进行静力校核时引入断线载荷冲击系数。由于杆塔结构形式的多样性, 冲击系数的取值值得进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Peabody A B. Applying shock damping to the problem of transmission line cascades [D]. Montreal: McGill University, 2004.
- [2] 国家电网公司. Q / GDW 182 - 2008 中重冰区架空输电线路设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] IEC608263 Design criteria of overhead transmission line[S]. 3rd ed. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2003.
- [4] Siddiqui F M A, Fleming J F. Broken wire analysis of transmission line systems[J]. Computers and Structures, 1984, 18(6): 1077-1085.
- [5] Mozer J D, Wood W A, Hribar J A. Broken wire test on a model transmission line systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3): 938-947.
- [6] Thomas M B, Peyrot A H. Dynamic response of ruptured conductors in transmission lines[J]. IEEE Trans Power Appar Syst PAS, 1982, 101(9): 3022-3027.
- [7] 李黎, 夏正春, 江宜城, 等. 输电线断线振荡研究[J]. 工程力学, 2008, 25 (6): 165-169.
- [8] McClure G, Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines [J]. Computers and Structures, 2003, 81(8/11): 825-834.
- [9] 夏正春, 李黎, 梁政平, 等. 输电塔在线路断线作用下的动力响应[J]. 振动与冲击, 2007, 26 (11): 45-49.
- [10] 刘云, 钱振东, 夏开全, 等. 鼓型塔输电线路绝缘子破坏非线性动响应分析[J]. 振动工程学报, 2009, 22 (1): 6-12.
- [11] 沈国辉, 默增禄, 孙炳楠, 等. 突然断线对输电塔线体系的冲击作用研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28 (12): 4-8.
- [12] Barbieri N, Honorate De Souza Junior O, Barbieri R. Dynamic analysis of transmission line cables, Part II – damping estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18: 659-669.
- [13] 李黎, 张行, 尹鹏. 大跨越输电线路脱冰跳跃反应的控制研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 61-64.
- [14] Yan B, Lin X S, Luo W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator in overhead transmission line under wind load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 248-260.
- [15] 同济大学. GB50135-2006 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [16] 江晓峰, 陈以一. 大跨桁梁结构体系的连续性倒塌机理与抗倒塌设计研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 76-83.