

基于性能的输电塔地震易损性分析*

谢丽宇¹ 唐珏¹ 谢强² 薛松涛^{1,3} 仲诚¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系 上海 200092;
3. 日本东北工业大学工学部建筑学科 仙台)

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, Japan)

[摘要] 本文以某高压输电塔为研究对象,同时考虑了结构本身的随机性和地震作用的随机性,采用了非线性屈曲分析及动力响应分析对结构的抗震性能、地震反应进行了分析。在基于性能的分析框架下,通过蒙特卡罗数值模拟获得了输电塔的抗震能力曲线,并分析了其统计特性,计算得到结构的地震易损性曲线,为输电塔的抗震防灾规划提供风险评估的数据基础。

[关键词] 地震 输电塔 非线性屈曲分析 蒙特卡罗 易损性曲线

ABSTRACT: *The knowledge and assessment of the seismic fragility curve is important to evaluate the integrity and reliability of transmission towers. In this paper, the seismic capacity assessment of the transmission tower was performed within a probabilistic frame, through a nonlinear buckling analysis and nonlinear dynamic analysis, considering the internal uncertainty of the tower and the randomness of ground motion. The performance limits of different damage states of transmission towers were determined. Finally, the seismic fragility curve of the transmission tower was evaluated by numerical Monte Carlo simulation. By the seismic fragility curve, the failure probability of the transmission tower under different magnitudes of earthquake can be visually predicted.*

KEYWORDS: *Earthquake Transmission tower Nonlinear buckling analysis Monte Carlo simulation Fragility curve*

引言

电力系统在国民经济建设中有着举足轻重的地位,而高压输电塔是电力系统的重要组成部分,是电能输送的载体,也是重要的生命线基础设施,一旦发生破坏将对社会造成重大影响。我国是地震多发国家,在1975年的海城地震、1999年的集集地震和2008年的汶川地震中,震区的输电线路都有不同程度的损坏^[1],造成了较大的经济损失。谢强等^[2]回顾了我国近年来电力系统的主要自然灾害情况,阐明了开展我国电力系统风险评估工作的重要性,提高电力系统在自然灾害下的安全性、保障电力供给是目前刻不容缓的任务。地震风险评估包括地震危险性分

析、结构易损性分析和地震灾害损失评估三方面。其中,结构易损性分析是地震风险评估的核心内容,即研究结构在一定强度地震作用下发生破坏的可能性,可以预测结构在不同震级的地震作用下发生不同程度损伤的概率。分析输电塔结构的地震易损性对于评定输电塔的抗震安全性,制定防灾策略、规划及措施有重要的意义。

国内外对输电塔结构的失效机制和性能分析作了很多研究。李宏男等^[3]全面考虑材料非线性和几何非线性的影响,分析了输电塔在强震下的塑性极限状态。Prasad Rao等^[4]通过输电塔的原型试验,以及运用有限元软件进行了考虑材料非线性和几何非线性的数值模拟分析,得到了输电塔在风荷载作用下的失效破坏模式。Banik等^[5]运用非线性静力推覆分析方法和增量动力分析方法研究了输电塔结构的能力曲线。

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208377, 51278369);
教育部博士点基金新教师资助项目(20110072120036)

目前对结构的易损性分析越来越引起国内外学者的关注和重视,根据目前国内外的研究现状,结构易损性分析已经从传统的基于灾后调查的经验方法,转向基于结构静力、动力分析获得结构性能的理论分析方法。本文采用 Monte Carlo 模拟法结合非线性动力分析对输电塔进行易损性分析,选取某高压输电塔为研究对象,以结构的顶部位移转角作为抗震性能参数和结构反应参数,以峰值地面加速度为地震输入强度参数,获得输电塔结构的地震易损性曲线。

1 工程背景及有限元模型

本文分析案例原型为某设计院设计的特高

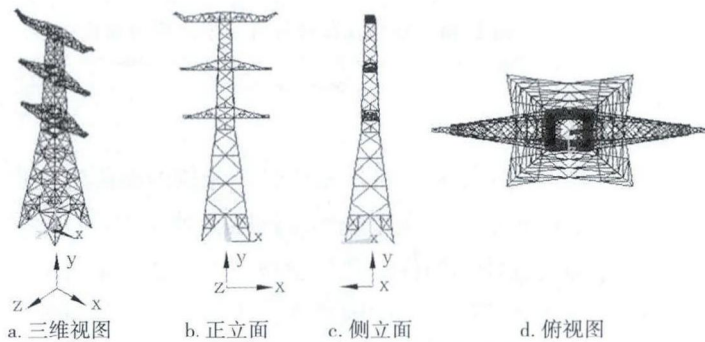


图1 输电塔结构的有限元模型
Fig.1 Finite element model of transmission tower

不同破坏状态的以 RDA(输电塔顶部最大位移角,最大侧移与输电塔高的比值)为参数的界限值及其统计特性。

2.1 输电塔的非线性屈曲分析与破坏状态定义

输电铁塔属于钢结构,稳定性是钢结构一个突出的问题,输电塔在实际过程中,经常是由于失稳而破坏。Prasad Rao 等^[4]通过对输电线路塔的原型实验和非线性有限元分析得到了塔不同的失效模式,并发现许多塔的失效破坏都是由受压的腿部构件或支撑构件的屈曲引起的。结构的稳定性可以由其荷载~位移全过程曲线来进行分析。Al Bermani 等^[6]陈述了一种考虑材料非线性和几何非线性的非线性分析技术来预测输电塔的倒塌失效破坏。非线性屈曲分析是利用逐渐增加荷载的非线性静力分析方法来求得使结构开始变得不稳定的临界荷载。该分析方法可以同时考虑结构的几何非线性、材料非线性和初始缺陷

压输电线路中自立跨越式直线塔。该塔为鼓形塔,总高 100.6m,呼高 58.4m,根开 18.75m,主材、斜材采用 Q345 无缝钢管,支撑采用 Q235 角钢。该结构为杆系结构,有限元模型采用 ANSYS 中的 BEAM188 梁单元,该单元支持梁截面形状显示,可以考虑剪切变形和翘曲,同时也支持大转动和大应变等非线性行为。结构材料为钢材,考虑材料的非线性,采用理想弹塑性假定,材料的屈服强度准则采用 Von Mises 准则,强化规则采用双线性随动强化 (Bilinear Kinematic, BKIN) 模型。建立的有限元模型如图 1 所示,本文不考虑在地震荷载作用下导线对输电塔结构的影响。

2 基于性能的抗震性能分析

为了得到结构各个破坏极限状态的界限值,需要对结构进行抗震性能分析。由于结构自身的随机性,导致这些界限值也是随机的。为了得到这些界限值及其概率统计特性,本文进行了在概率框架下的抗震性能分析,采用蒙特卡洛模拟法结合结构的非线性屈曲分析来获得结构的抗震能力曲线,并由此确定对应于

的影响。本文采用 ANSYS 有限元软件对输电塔进行非线性屈曲分析,来研究输电塔的抗震性能和极限承载力。

根据规范^[7],采用简化的水平地震力荷载计算公式来计算输电塔受到的水平地震荷载:

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{EK} (1 - \delta_n) (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: F_i 为分层水平荷载; F_{EK} 为荷载标准值; G 为集中于质点的重力荷载代表值; H 为计算高度; δ_n 为顶部附加地震作用系数。

考虑到输电塔结构自身的特点,将结构划分为 5 段,再按照式 (1) 计算出每段结构受到的水平地震荷载,其比例关系为: F5:F4:F3:F2:F1=1:0.68:0.50:0.32:0.10。水平地震荷载加载后的结构示意如图 2 所示,图 3 为输电塔在导线布置的横向方向上的第一振型。对输电塔结构进行

特征值屈曲分析, 获得结构的一阶屈曲模态, 即最容易发生的屈曲模态, 如图4所示。输电塔的破坏是由于受压腿部和支撑构件的平面外屈曲引起的, 这与文献[8]中得到的输电塔失效破坏模式是一致的。

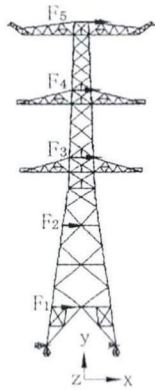


图2 地震荷载示意
Fig. 2 Simplification of seismic loading



图3 结构第一振型
Fig. 3 The first vibration mode

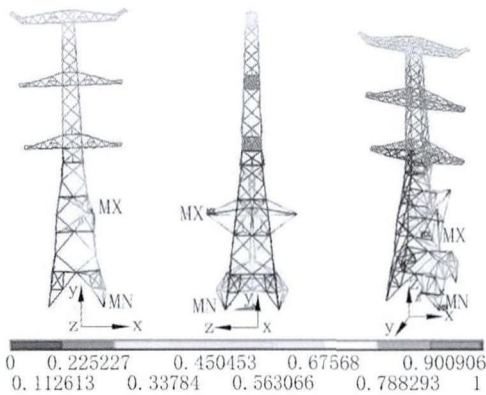


图4 输电塔一阶屈曲模态
Fig. 4 The first buckling mode of transmission tower

根据特征值屈曲分析结果, 以特征值屈曲模态的变形施加初始缺陷, 对输电塔进行了非线性屈曲分析, 可获得的结构顶点的位移转角~基底剪力的抗震能力曲线, 如图5所示。可以看出, 顶点位移刚开始呈线性增长, 处于弹性阶段, 随着荷载的增大逐渐屈服, 到最后在很小的荷载增量下结构的顶点位移转角发生很大的变化, 可以判断结构已经进入失稳状态, 结构可能约束不足或者结构已经屈服。从抗震能力曲线中可以直观地观察到结构的弹性阶段、屈服点和极限位移点。

本文将极限荷载作用下的结构 RDA 定义为输电塔倒塌状态 (Collapse) 界限值 RDA_{co} ,

当结构的响应 $RDA \geq RDA_{co}$ 时, 结构处于倒塌状态。由于钢结构的设计强度只考虑弹性强度, 同时考虑输电塔的特点, 本文将塔的杆件开始产生塑性应变的 RDA 定义为严重破坏状态 (Major Damage) 界限值 RDA_{ma} , 即认为, 当结构 $RDA_{ma} \leq RDA < RDA_{co}$ 时, 结构处于严重破坏状态。

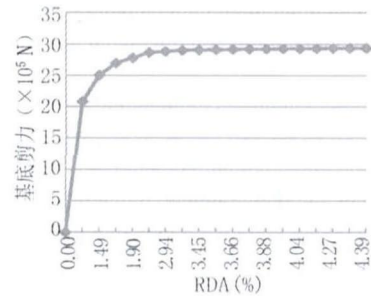


图5 输电塔顶点位移转角~基底剪力曲线
Fig. 5 Rotation angle at the top of transmission tower Vs. base shearing force

2.2 概率分析

由于结构本身的随机性, 结构的抗震性能也是随机的。本文考虑到结构的随机性主要包括材料的性能和构件的几何参数。本章通过蒙特卡洛方法来模拟结构的随机性, 主要考虑了材料的弹性模量、屈服强度、屈服后模量、泊松比、密度以及构件截面的随机变异性。

在 ANSYS 的 PDS (Probabilistic Design System) 模块中, 可以方便地对上述随机变量设定概率分布函数, 进行蒙特卡洛抽样。为了简化分析, 本文假定这些随机参数都服从正态分布, 设定均值为设计值, 标准差为均值的 5%。

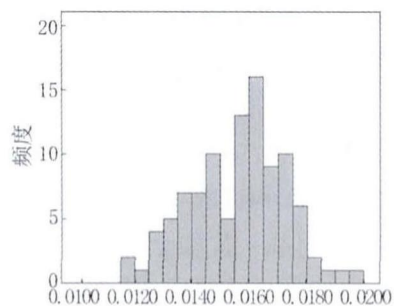


图6 严重破坏状态界限值频度统计
Fig. 6 Statistics of limits of severe damage state

对结构参数进行 100 次蒙特卡洛抽样并完成结构的非线性屈曲分析, 可以得到 100 条输电塔的抗震能力曲线, 按照破坏状态的定义, 共获得

100 组结构严重破坏及倒塌的界限值。对这些数据进行统计分析，获得两种破坏状态界限值样本的频度统计直方图，结果分别如图 6、7 所示。由图可见，严重破坏状态的界限值，分布形态较好，而倒塌状态的界限值，分布离散程度较大，出现了双峰，这说明，在结构处于濒临倒塌状态、抗力已达极限时，结构的不确定性显著增大。

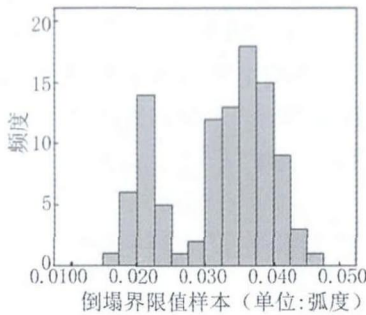


图 7 倒塌状态界限值频度统计
Fig. 7 Statistics of limits of collapse state

依据 Shinozuka 等人^[9]提出的双参数对数正态分布假设，本文假定输电塔两个界限值均服从对数正态分布，其概率分布函数为：

$$f(x;u,\sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - u)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中： u 为变量的对数均值； σ 为变量的对数标准差。

对统计数据进行回归分析，计算获得两个界限值的分布参数，如表 1 所示。

表 1 界限值对数正态分布参数
Tab.1 Lognormal distribution parameters of state limits

	均值 (rad)	对数标准差 (rad)
严重	$\overline{RDA}_{ma} = 0.0156$	$\beta_{ma} = 0.1085$
倒塌	$\overline{RDA}_{co} = 0.0324$	$\beta_{co} = 0.2579$

3 输电塔地震反应分析

结构在不同的地震强度下有不同的性能表现，为确定结构的易损性曲线，需要把握结构在各种地震强度下的反应。本节以结构的顶部最大位移角 (RDA) 作为结构的地震反应参数，以峰值地面加速度 (PGA, Peak Ground Acceleration) 作为地震的强度参数，选取 100 条地震原始记录，对结构进行非线性动力时程分析，通过对数据的回归分析，建立了结构地震反应参数与地震动强

度参数之间的关系。

地震原始记录选自美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 网站，这些地震波具有不同的场地条件、不同的 PGA、不同的频谱特性、不同的持时，其中 PGA 作为选择的主要依据，最小 0.109g，最大 1.779g。结构阻尼比取为 0.01，地震输入方向为 X 轴，也就是输电塔导线的横向方向。

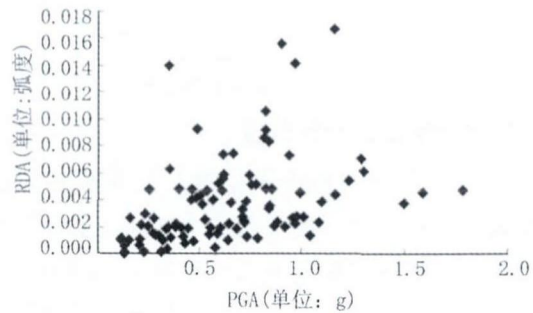


图 8 PGA~RDA 散点关系
Fig.8 PGA vs. RDA

将结构的顶部最大位移转换为最大位移转角，可以得到对应于每一条地震波输入时结构的 RDA 响应，其散点关系如图 8 所示，输电塔顶部最大位移转角 RDA 数据的频度统计如图 9 所示。可以看出，由于地震输入的不确定性，数据的离散性较大，但 RDA 与 PGA 之间基本上呈正相关的关系。对其取自然对数，然后再绘制 $\ln(RDA)$ 与 $\ln(PGA)$ 的散点关系图，如图 10 所示，对其进行线性回归分析，得到的回归方程为：

$$\ln(RDA) = 0.993 \ln(PGA) - 5.354 \quad (3)$$

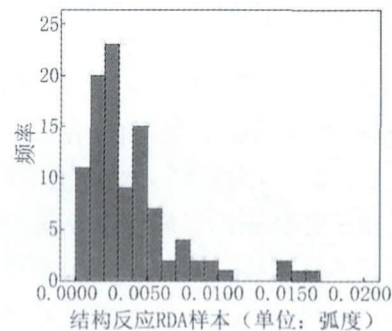


图 9 结构响应 RDA 频度统计直方图
Fig.9 Histogram of RDA

从频度统计直方图可知，结构的地震反应数据分布形态较好地符合对数正态分布。本文假定地震响应参数 RDA 服从双参数对数正态分

布, 求得其均值 $\overline{RDA} = 0.0037\text{rad}$, 对数标准差 $\beta = 1.0555$ 。

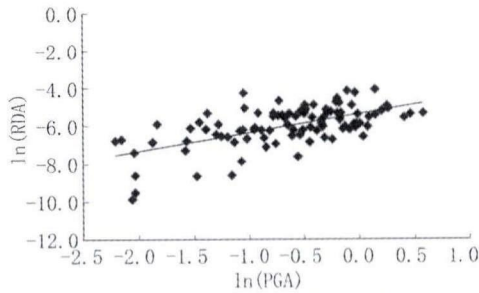


图 10 $\ln(\text{PGA}) \sim \ln(\text{RDA})$ 关系
Fig.10 $\ln(\text{PGA})$ vs. $\ln(\text{RDA})$

4 输电塔地震易损性分析

结构工程中的地震易损性是指地震动强度与结构破坏程度之间的关系, 本文通过易损性曲线来表示, 描述了给定地震动作用下超越某一破坏状态的概率。易损性曲线与结构本身的特性、破坏状态及地震强度参数有关。

本文的易损性曲线表示不同强度地震作用下结构响应超过结构破坏状态的界限值的条件概率。结构响应参数 S_d 超过结构破坏状态的界限值 R_c 的概率可按式(4)进行计算:

$$P_f = P\left(\frac{R_c}{S_d} \leq 1\right) \quad (4)$$

根据假定, R_c 和 S_d 都服从对数正态分布, 失效概率 P_f 可由下式确定:

$$P_f = \Phi\left[\frac{-\ln\left(\frac{\tilde{R}_c}{S_d}\right)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right] \quad (5)$$

式中: \tilde{R}_c 表示承载力均值; S_d 表示结构反应; β_c 表示承载力对数标准差; β_d 表示结构反应对数标准差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

将结构破坏状态的界限值和结构响应参数的统计特征值代入公式(5), 可以分别得到严重破坏的失效概率公式(6)和倒塌的失效概率公式(7)。

$$P_f(\text{PGA})_{ma} = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{0.0047\text{PGA}^{0.993}}{RDA_{ma}}\right)}{\sqrt{\beta_{ma}^2 + \beta_d^2}}\right] \quad (6)$$

$$P_f(\text{PGA})_{co} = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{0.0047\text{PGA}^{0.993}}{RDA_{co}}\right)}{\sqrt{\beta_{co}^2 + \beta_d^2}}\right] \quad (7)$$

按照公式(6)、(7)可以将对应于不同PGA时结构各种破坏状态的失效概率分别计算出来, 得到结构的地震易损性曲线如图11所示。从图11中可以看到, 该输电塔在PGA=1.0g的强震作用下, 倒塌的概率不到5%, 严重破坏的概率不到15%, 这说明该输电塔结构本身的抗震能力是很强的, 在地震作用下不容易发生破坏, 这与实际情况也是相吻合的。

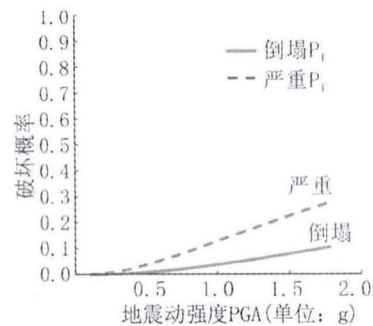


图 11 输电塔结构易损性曲线
Fig. 11 Fragility curve of transmission tower

5 结论与展望

本文以某鼓形输电塔结构为例, 考虑了结构本身的随机性和地震作用的随机性, 利用非线性屈曲分析方法分析了结构的抗震性能, 利用非线性动力时程分析方法分析了结构的地震反应, 在ANSYS有限元计算平台上对结构进行了数值模拟, 并最终获得了输电单塔结构的地震易损性曲线。通过地震易损性曲线可以比较直观地预测结构在地震作用下的损伤概率。结合本文研究过程中的一些体会, 笔者认为以下一些问题有待做更进一步的深入分析与研究。

1. ANSYS的非线性屈曲分析得到的结果实质上还是在静力作用下的输电塔临界失稳荷载, 而地震作用是一种动力作用, 输电塔在地震作用下会产生显著的动力响应, 塔的动力稳定性还有待于进一步研究。
2. 地震动特性有三要素: 振幅、频谱和持时。

(下转第 68 页)

桥梁的损伤,然后基于一定的标准(引入分项检算系数修正极限状态设计表达式的方法)对桥梁的承载能力进行折减,再与桥梁的设计承载能力进行对比来判断桥梁的健康状况。这种评估模式存在以下问题:

1. 没有从力学本质上来分析损伤对桥梁的承载能力的影响,现行的评估方法只是人为的进行判断或是综合一些专家的意见对损伤对桥梁承载能力影响程度进行估算,没有从本质和理论上分析损伤对桥梁承载能力的影响程度;

2. 对于很多桥梁评估中存在的确定性因素都使用确定性方法来处理;

3. 评估的实质都是基于构件的评估,然后对其进行综合而得出桥梁整体的健康状态,没有从系统的角度来分析桥梁的健康状况。针对以上我国桥梁评估方法存在的问题,桥梁评估方法的发展趋势应该集中在以下三个方面:

(1) 应该从损伤力学的角度来具体的分析损伤对桥梁承载能力的影响程度,因此应该加强损伤力学在桥梁评估中应用的理论研究;

(2) 应该加强对桥梁的可靠度评估的理论研究,包括对影响因素的统计分析和桥梁可靠度分析方法的研究;

(3) 应该从系统论的角度来考虑对桥梁损伤进行评估,研究桥梁的系统可靠度及其求解方法。

4 结 语

总之,桥梁评估是一个涉及多门学科的边缘学科,应加强新的方法和理论的应用研究,包括损伤力学、可靠度理论、计算机智能计算方法、新的检测方法和系统论等方面。从对桥梁评估的角度来说,不能只依靠一种评估方法来对桥梁进行健康评估,要从多方面来对桥梁进行健康评估。但是要从许多方法中选择一种合理的方法进行最终的评估是现实中要面对和解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 杨文渊,徐. 桥梁维修与加固[M]. 北京:人民交通出版社, 1995
- [2] 贡金鑫. 钢筋混凝土结构基于可靠度的耐久性分析[D]. 大连:大连理工大学, 1999
- [3] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000. 12 20
- [4] 伍朝晖. 工程结构可靠度理论分析研究[D]. 大连:大连理工大学土木水利学院, 1997
- [5] 高剑波. 在役钢筋混凝土桥梁的检测评估方法研究[J]. 长沙:公路与汽运. 2005(4) 127-128
- [6] 李昌铸等. 公路桥梁技术状况评定标准 JTG/T H21-2001. 北京:人民交通出版社, 2011
- [7] 张劲泉等. 公路桥梁承载能力检测评定规程 JTG/T J21-2001. 北京:人民交通出版社, 2011
- [8] 张建仁,刘扬. 遗传算法和人工神经网络在斜拉桥可靠度分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 7-13

(上接第 108 页)

由于时间原因,本文只针对地震动的振幅(也即PGA)与结构反应的关系做了研究,对于另外两个地震动特性(频谱、持时)与结构反应的关系未深入涉及,这两方面对于结构地震反应的影响还有待进一步的研究。

3. 本文只研究了输电塔结构本身,而忽略了导线对输电塔的影响,在大跨越输电线路中,塔-线耦联体系在地震作用下的反应及动力特性还有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 李宏男. 高压输电塔抗震分析与设计. 2009,北京:中国电力出版社
Li Hongnan, Seismic Analysis and Design of High-voltage Transmission Towers. 2009, Beijing: China Electric Power Press
- [2] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策. 自然灾害学报, 2006. 15(4): p. 126-131
Xie Qiang, and Li Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures. Journal of Natural Disasters, 2006. 15(4): p. 126-131
- [3] 李宏男,胡大柱,黄连状. 地震作用下输电塔体系塑性极限状

态分析. 中国电机工程学报, 2006. 26(24): p. 192-199

- Li Hongnan, Hu Dazhu, and Huang Lianzhuang. Plastic Limit Analysis of the Transmission Tower System Subjected to Earthquake Action. Proceedings of the CSEE. 2006. 26(24): p. 192-199
- [4] Prasad Rao, N., Samuel Knight, G.M., Mohan, S.J. and Lakshmanan, N., Studies on failure of transmission line towers in testing. Engineering Structures, 2012. 35: p. 55-70
 - [5] Banik, S.S., Hong, H.P. and Kopp, G.A., Assessment of capacity curves for transmission line towers under wind loading. Wind and Structures, An International Journal, 2010. 13(1): p. 1-20
 - [6] Al Bermani, F.G.A. and Kitipornchai, S., Nonlinear analysis of transmission towers. Engineering Structures, 1992. 14(3): p. 139-151
 - [7] 由中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范, GB50011-2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings. GB 50011-2010
 - [8] Prasad Rao, N., Knight, G.M.S., Lakshmanan, N. and Iyer, N.R., Investigation of transmission line tower failures. Engineering Failure Analysis, 2010. 17(5): p. 1127-1141
 - [9] Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J. and Naganuma, T., Statistical Analysis of Fragility Curves. Journal of Engineering Mechanics, 2000. 126(2): p. 1224-1231