

塌陷区输电铁塔的可靠性评估

袁广林¹, 张云飞², 陈建稳¹, 舒前进¹, 刘涛³, 郭广礼⁴

- (1. 中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏省 徐州市 221008; 2. 徐州供电公司, 江苏省 徐州市 221006;
3. 山东新兴建筑规划设计研究院, 山东省 潍坊市 261200;
4. 江苏省资源环境信息工程重点实验室(中国矿业大学), 江苏省 徐州市 221008)

Reliability Assessment of Transmission Tower in Mining Subsidence Area

YUAN Guang-lin¹, ZHANG Yun-fei², CHEN Jian-wen¹, SHU Qian-jin¹, LIU Tao³, GUO Guang-li⁴

- (1. School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China; 2. Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221006, Jiangsu Province, China; 3. Shandong Xinxing Architecture Planning & Design Institute, Weifang 261200, Shandong Province, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Against the background of transmission line erected on a certain mining subsidence area, the coal-mining situation at this area where transmission line passes through is analyzed, and the deformation of ground surface in the subsidence area is estimated and analyzed. Using numerical analysis, the impacting rule of ground surface deformation on structural internal force and deformation of transmission towers is re-researched. Research results show that except the downward displacement load exerted on single support abutment, it is reputed that the abutment displacement is within 5% of the foot distance of a tower under other working conditions when the yield load of bars will not be achieved; it is possible to taken the abutment displacement that appear when the material Q235 begin to yield as the criterion to judge whether the tower is safe, i.e., when the estimated ground surface deformation is smaller than the abutment displacement under the yield limit of the material Q235, the transmission tower can be considered as in safe condition.

KEY WORDS: mining subsidence area; ground surface deformation; transmission tower; reliability assessment

摘要: 以某塌陷区上输电线路为对象, 分析了输电线路经过地区的煤炭开采状况, 对塌陷区地表变形进行了预计分析。采用数值分析方法, 分析了地表变形对输电杆塔结构内力和变形的影响规律, 研究表明, 除了单支座施加竖向位移荷载, 其他工况可以认为在支座位移为根开的 5% 以内, 杆件均不会达到屈服荷载; 可以利用出现 Q235 材料屈服时的支座位移作为判断塔架是否安全的标准, 即当预测的地表变形小于 Q235 材料屈服时的支座位移时, 认为塔架处于安全状态。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50004008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50004008)。

关键词: 塌陷区; 地表变形; 输电铁塔; 可靠性评估

0 引言

超、特高压电网的大量建设给输电线路杆塔的研究提出许多新的课题^[1-7], 不断发生的暴风雨、覆冰雪等自然灾害, 也严重危及电网和输电线路杆塔的安全^[8-19]。同时, 近年来随着煤炭的不断开采以及坑口电厂的大量建设, 一些高压输电线路不可避免地要通过开采沉陷区, 这些工程的安全性一直是人们关注的热点^[20-26]。因此开展塌陷区输电杆塔结构的安全性研究, 对确保输电线路安全运行, 具有重要的意义。

本文以某塌陷区上输电线路为研究对象, 对处于塌陷区的输电塔架的安全性进行评估, 对输电线路抗变形设计和治理提出合理化建议, 为保证输电线路的安全提供依据。

1 塌陷区地表变形规律

1.1 塌陷区地质和采煤情况

某 500kV 输电工程(初期降压 220kV)是东陇海经济产业带重要的电力基础设施, 其中任庄—徐州东输电线路中段经过煤矿塌陷区。根据收集的资料, 输电线路主要经过丰县煤矿(新庄矿)、旗山煤矿、大吴煤矿, 其中经过矿区的大部分线路位于旗山矿采空区。

输电线路所经矿区井田为全隐蔽煤田, 覆盖于第 4 系冲击层之下。主要可采煤层为 1 煤、3 煤、9 煤、17 煤、20 煤、21 煤局部可采, 旗山矿的-420

水平已基本结束，现主采-700水平1、3煤，配采山西组9煤。输电线路附近采空区分别为1煤、3煤和9煤采空区，目前，17煤、20煤、21煤还未开采。各煤层平均厚度见表1。

表1 各可采煤层平均厚度

Tab. 1 The average coal seam thickness

煤层	1、3煤	9煤	17煤	20煤	21煤
煤厚/m	4.68	1.87	0.61	0.59	0.68

1.2 采空区地表变形

研究表明，地下开采引起的地表沉陷是一个时间和空间过程，这个过程伴随地表出现复杂的移动变形^[9]。地下开采对地表的影响主要有垂直方向的移动和变形(下沉、倾斜、扭曲、曲率)与水平方向的移动和变形(水平移动、拉伸和压缩变形)，以及地表平面内的剪应变等。

地表变形的大小和形式与煤层的赋存条件、顶板管理方法、开采深度、采区大小、开采布局和开采顺序、方向、时间，以及上覆岩层的性质有关。多煤层开采时地表将受到重复采动的影响，采动影响的延续时间或长或短，开采结束后，地表变形将逐渐趋于稳定。

1.3 塌陷区预计结果

本区地表移动和变形预计采用概率积分法预测模型^[9]，根据有关理论和经验资料，初次采动下沉系数0.71；一次重复采动下沉系数0.78；多次重复采动下沉系数0.85。1、3煤，9煤采后造成的杆塔处地表变形最大值见表2。

表2 开采9煤后地表变形最大值

Tab. 2 Surface ultimate deformation after the coal 9 was mined

下沉/mm	倾斜/(mm/m)	曲率/(mm/m ²)	水平移动/mm	水平变形/(mm/m)
1383	5.4	-0.03~0.03	475	-2.66~2.12

2 数值计算方法

本文以某线路中的KT16直线跨越塔为计算模型，该塔呼高54m，总高度为59.5m，宽侧根开13.660m，窄侧根开9.379m。KT16直线跨越塔由各种等边角钢组成，塔腿部主材截面为Q345等边角钢L200×14。在铁塔杆件的中心轴线交点连接处形成模型节点，两节点间的角钢简化为模型单元。

本文采用ANSYS程序进行数值分析，选用自底向上的建模方式，用梁桁混合单元模型模拟输电铁塔结构^[8]，分析工况考虑单独地表变形和复合地表变形。

3 计算结果分析

3.1 单独地表变形对输电铁塔的影响

图1为地表变形下各工况对比，没有出现柱条

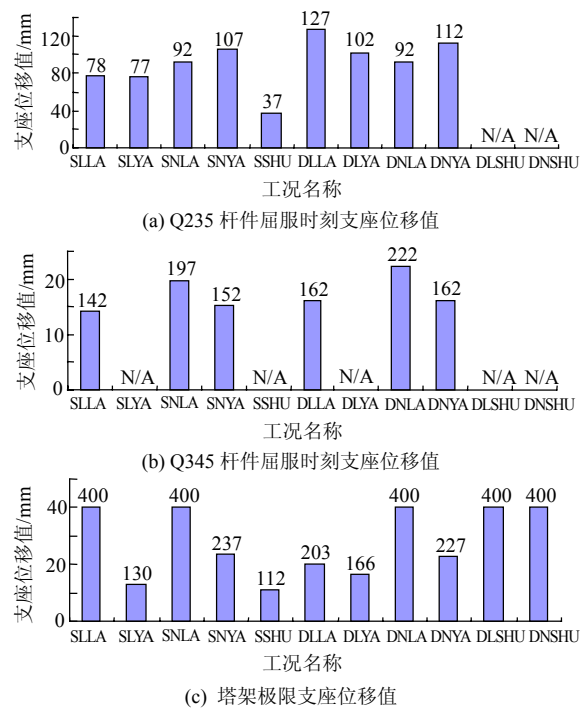


图1 不同变形下极值比较
Fig. 1 Comparison of ultimate displacement of different deformation

的表示该工况情况下没有杆件达到此状态(以N/A表示)，如DNSHU工况下没有柱条表明没有Q235和Q345杆件达到屈服荷载。图中，SLLA为长向单独支座水平拉伸；SLYA为长向单独支座水平压缩；SNLA为短向单独支座水平拉伸；SNYA为短向单独支座水平压缩；SSHU为单独支座竖向下沉；DLLA为长向两支座水平拉伸；DLYA为长向两支座水平压缩；DNLA为短向两支座水平拉伸；DNYA为短向两支座水平压缩；DLSHU为长向两支座竖向下沉；DNSHU为短向两支座竖向下沉。由图1(a)可以发现，水平支座位移工况下，在支座水平位移为80~100mm时就出现了Q235杆件达到屈服的情况，此时支座水平位移分别为根开的5.8%~7.3%(长边)与8.5%~10.7%(短边)，即支座水平位移为根开的5%以内，杆件均不会达到屈服荷载。

支座竖向位移工况下，单支座施加竖向位移荷载(SSHU)工况在37mm时就有Q235杆件屈服，双支座竖向位移DLSHU与SNSHU工况相当于塔架基础倾斜，在400mm内是安全的，没有出现材料屈服，因此必须采取有效措施防止单支座竖向下沉这种比较危险的情况发生。

可以利用出现Q235材料屈服时的支座位移作为判断塔架是否安全的标准，即当预测的地表变形小于Q235材料屈服时的支座位移时，认为塔架处于安全状态，反之认为塔架是不安全的。

由图 1(b)可知，受拉伸时主材均可达到屈服荷载，说明此时主要是主材破坏导致铁塔破坏；而受压缩位移荷载时，大部分主材均没有达到屈服荷载，铁塔主要是因为 Q235 钢材的斜材和辅助材破坏，造成构件失稳过多形成机构破坏。

分析表明，单独支座水平位移时首先达到 Q235 屈服应力的杆件节点位于底部横隔中，首先达到 Q345 屈服应力的节点位于底部横隔以上变形较大的交叉斜材与主材的连接处；单独支座竖向位移时首先达到屈服应力的 Q235 杆件位于塔身中部横隔上；双支座水平位移时首先达到 Q235 与 Q345 屈服应力的杆件节点一般位于底部横隔上部变形较大的交叉斜材与主材的连接处。实际中，如果首先达到屈服应力的连接节点采用螺栓连接，则容易发生节点滑移的现象，起到减少杆件应力的作用。

由图 1(c)可以发现塔架支座受压缩作用比受拉伸作用更危险，支座受压缩时破坏都比较早，而大部分拉伸工况下都可达到控制值 400 mm 未发现杆件屈服。图 1(c)还可看出沿着长向(垂直线路方向)与沿着短向(平行线路方向)施加变形，短向能承受的位移荷载更大，主要是由于沿长向发生支座位移时候，由于上部横担较大，会引起上部电线荷载的偏心，从而产生较大次弯矩的影响。而沿短向发生支座位移时，虽然也会产生荷载偏心，但是影响要小。线路布置时候，应该尽量使线路的方向与煤层开采的方向平行，以减少对线路影响。

综上所述，可以把 Q235 材料出现屈服时刻的支座位移做为判断安全性的标准，换算为地表变形值见表 3。

表 3 单独地表变形折算表
Tab. 3 Conversion of single ground deformation

变形 工况	Q235 杆件	折算地表	
	屈服支座位移/mm	倾斜/(mm/m)	水平变形/(mm/m)
SLLA	78	—	5.71
SLYA	77	—	-5.64
SNLA	92	—	9.81
SNYA	107	—	-11.41
SSHU	37	2.71 或 0.539	—
DLLA	127	—	9.3
DLYA	102	—	-7.47
DNLA	92	—	9.81
DNYA	112	—	-11.94
DLSHU	400 未屈服	>42.6	—
DNSHU	400 未屈服	>29.28	—

3.2 复合地表变形对输电铁塔的影响规律

图 2 为不同复合变形下塔架位移的极值。图中，NORZLA 为正常拉伸倾斜组合；NORZYA 为正常

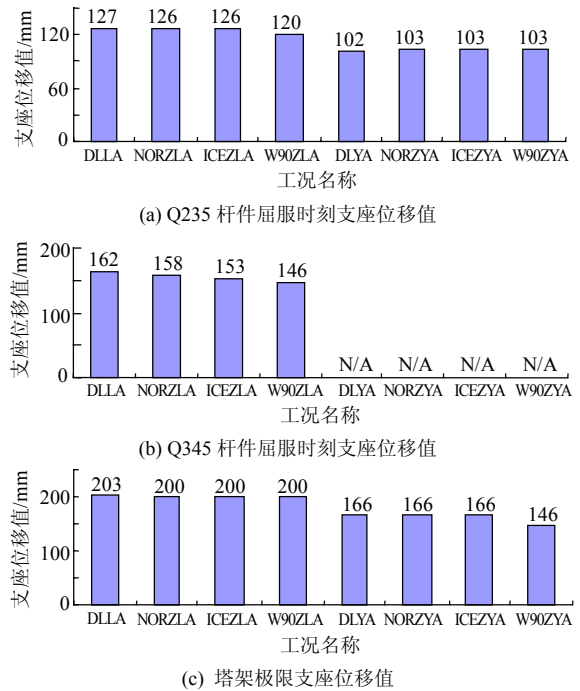


图 2 不同复合变形下极值比较

Fig. 2 Comparison of extremum complex deformation

时压缩倾斜组合；W90ZLA 为 90°大风时拉伸倾斜组合；W90ZYA 为 90°大风时压缩倾斜组合；ICEZLA 为 90°大风覆冰时拉伸倾斜组合；ICEZYA 为 90°大风覆冰时压缩倾斜组合。图 2(a)为塔架中 Q235 杆件达到屈服时的支座位移值，可以看出，双支座单独水平位移工况与双支座水平位移和倾斜复合作用工况出现 Q235 杆件初始屈服的支座位移值基本相同，不同荷载时上部结构在复合位移作用下出现屈服的位移也基本相同。一方面是因为与水平变形相比，塔架的倾斜对于杆件的影响较小；另一方面因为发生屈服的 Q235 杆件主要集中在最底部横隔上的交叉斜材处，在不同塔架荷载下这些交叉斜材的初始内力差值较小，因此出现屈服的时刻基本相同。

图 2(b)为塔架中 Q345 杆件达到屈服时支座的水平位移值(极值不存在时以 N/A 表示)，Q345 杆件主要是主材和周边轮廓的杆件，此类杆件在不同的荷载条件下初始内力有较大差值，可以看出 Q345 杆件初始屈服的支座位移基本上随着上部电线、风等荷载值的增大而减小的，即上部荷载越大，初始应力越大，出现屈服时的支座位移越小。地表组合变形时，正常工况下支座位移在 158 mm 达到屈服应力，而覆冰工况下 153 mm 即达到屈服应力；同时复合变形作用下 Q345 杆件达到屈服要比双支座单独水平变形作用时的支座位移小。如正常工况下，地表组合变形与非组合变形到达 Q345 屈服应

力的位移分别为 158 mm 和 162 mm。

90°大风荷载工况下出现屈服较早是因为在大风作用下,塔架整体弯曲,有两肢主材受压力荷载较大,初始应力大,破坏较早。压缩组合位移下 Q345 主材均没有达到屈服荷载,塔架就已经破坏。

图 2(c)为塔架破坏时刻的支座水平位移值,主导变形下的极限支座位移基本相同,如拉伸变形下塔架均可以承受竖向倾斜 400 mm,水平拉伸 200 mm 的支座位移,但是压缩变形时均较早退出计算,表明塔架承受拉伸的能力要比承受压缩的能力强。

复合变形下的地表变形折算表见表 4,其中支座水平变形为竖向变形的 1/2。

表 4 复合地表变形折算表
Tab. 4 Conversion of complex ground deformation

复合变形 工况	Q235 杆件	Q235 杆件	折算地表	折算地表
	屈服支座 竖向位移/mm	屈服支座 水平位移/mm	倾斜/ (mm/m)	水平变形/ (mm/m)
NORZLA	252	126	18.45	9.22
NORZYA	206	103	15.08	-7.54
W90ZLA	240	120	17.57	8.78
W90ZYA	206	103	15.08	-7.54
ICEZLA	252	126	18.45	9.22
ICEZYA	206	103	15.08	-7.54

3.3 塌陷区输电铁塔可靠性评价

1) 由表 2 可以看出,塌陷区塔架整体下沉较大,然而,当塔架所处的地表出现均匀下沉时,塔架结构中不会产生附加应力。在这种情况下,将会降低输电塔架的有效高度,对塔架的危害不大,塔架只会产生位置的变化。

2) 由表 3~表 4 可以看出, Q235 材料出现屈服时单独地表的拉伸和压缩变形分别为 5.71 和 -5.64 mm/m, Q235 材料屈服时复合地表变形的拉伸和压缩变形分别为 9.22 和 -7.54 mm/m, 而开采 9 煤后地表拉伸和压缩变形分别为 2.12 和 -2.66 mm/m (见表 2), 因此, 可以认为铁塔塔架能够承担预计的地表水平变形。

3) 由表 3、4 可以看出, Q235 材料出现屈服时单独支座竖向下沉引起的塔架倾斜变形为 2.71 mm/m, 其它各种单独变形和复合变形下倾斜变形均超过 15.08 mm/m, 而开采 9 煤后地表倾斜变形为 5.4 mm/m(见表 2)。考虑到如无外力的作用, 单独支座竖向下沉引起塔架出现倾斜的可能性不大, 因此可以认为铁塔塔架能够承担预计的地表倾斜变形。

4) 由表 3 可以看出, Q235 材料出现屈服时单独支座地表曲率变形为 0.539 mm/m², 而开采 9 煤

后地表曲率变形为 0.03 mm/m²(表 2), 因此, 可以认为铁塔塔架能够承担预计的地表曲率变形。

限于篇幅, 本文在分析时未考虑塔材自身的疲劳、螺栓固定方式下塔架变形等因素对煤矿塌陷区输电铁塔可靠性的影响。

4 结论

1) 除 SSHU 外的工况, 可以认为在支座位移为根开的 5%以内, 杆件均不会达到屈服荷载。

2) 单支座竖向位移也是一种比较危险的情况, 在位移荷载较小时塔架就丧失了稳定性。

3) 仅考虑煤矿塌陷区地表变形对输电铁塔可靠性的影响时, 可以利用出现 Q235 材料屈服时的支座位移作为判断塔架是否安全的标准, 即当预测的地表变形小于 Q235 材料屈服时的支座位移时, 认为塔架是处于安全状态。

4) 本文研究的输电铁塔在预计的地表变形下结构是安全的。

参考文献

- [1] 李茂华, 李正, 任吉华, 等. 500 kV 输电线路杆塔结构的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 91-94.
Li Maohua, Li Zheng, Ren Jihua, et al. Reliability analysis on tower structure for 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 91-94(in Chinese).
- [2] 杨靖波, 李茂华, 杨风利. 我国输电线路杆塔结构研究新进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 77-83.
Yang Jingbo, Li Maohua, Yang Fengli. New advances in the study of transmission tower structure of China[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 77-83(in Chinese).
- [3] 孙昭英, 廖蔚明, 丁玉剑, 等. ±800 kV 直流输电工程空气间隙放电特性试验及间隙距离选择[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 8-12.
Sun Zhaoying, Liao Weiming, Ding Yujian, et al. Air gap flashover characteristics and selection of gap distances for ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 8-12(in Chinese).
- [4] 国网北京电力建设研究院. 1000 kV 级交流线路杆塔方案及荷载研究[R]. 北京: 国网北京电力建设研究院, 2006.
- [5] 韩军科, 李正, 杨风利. 冷弯型钢输电铁塔真型试验研究[J]. 电力建设, 2008(29): 58-60.
Han Junke, Li Zheng, Yang Fengli. Full scale test of transmission tower using cold-bending profiled steel[J]. Electric Power Construction, 2008(29): 58-60(in Chinese).
- [6] 中国电力科学研究院. 1 000 kV 交流特高压同塔双回线路杆塔结构研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [7] 孙昭英. 第一代 500 kV 杆塔用于漫昆线的可行性研究[J]. 电网技术, 1990, 14(3): 59-63.
- [8] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-85.
Mo Fujiang, Chen Yunping, Ruan Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-85(in Chinese).

- [9] 吴盛麟. 对我国输电线路工作的几点建议[J]. 电网技术, 1994, 18(2): 49-52.
Wu Shenglin. Some suggestions on the research work of power transmission line in China[J]. Power System Technology, 1994, 18(2): 49-52(in Chinese).
- [10] 唐国安. 我国 500 kV 线路倒塔事故率浅析[J]. 电力建设, 1994, 15(11): 18-20.
Tang Guo'an. The analysis about the accident probability of 500 kV transmission tower downburst in China[J]. Electric Power Construction, 1994, 15(11): 18-20(in Chinese).
- [11] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-63.
Qu Jing, Guo Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-63(in Chinese).
- [12] 张皖军, 尹其云. 1996 年电网事故的启示[J]. 电网技术, 1996, 21(4): 54-57.
Zhang Wanjun, Yin Qiyuan. Analyses of power system faults occurred in 1996 and some suggestions for fault treatment[J]. Power System Technology, 1996, 21(4): 54-57(in Chinese).
- [13] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟. 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.
Huang Xinbo, Liu Jiabing, Cai Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28(in Chinese).
- [14] 李庆峰, 范峥, 吴穹. 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.
Li Qingfeng, Fan Zheng, Wu Qiong, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36(in Chinese).
- [15] 张文亮, 于永清, 宿志一. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 1-15.
Zhang Wenlang, Yu Yongqing, Su Zhiyi. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-15(in Chinese).
- [16] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-85.
Mo Fujiang, Chen Yunping, Ruan Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-85(in Chinese).
- [17] 黄强, 王家红, 欧名勇. 2005 年湖南电网冰灾事故分析及应对措施[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 16-19.
Huang Qiang, Wang Jiahong, Ou Mingyong. Analysis on accidents caused by icing damage in Hunan power grid in 2005 and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 16-19(in Chinese).
- [18] 谢强, 张勇, 李杰. 华东电网 500 kV 任上 5237 线飊线风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 59-63.
Xie Qiang, Zhang Yong, Li Jie. Investigation on tower collapses of 500 kV renshang 5237 transmission line caused by downburst[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 59-63(in Chinese).
- [19] 李再华, 白晓民, 周子冠. 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13(in Chinese).
- [20] 张建强, 杨昆, 王予东. 等. 煤矿采空区地段高压输电线路铁塔地基处理的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 30-34.
Zhang Jianqiang, Yang Kun, Wang Yudong, et al. Research on foundation treatment of high voltage transmission towers erected above goaf of coal mine[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 30-34(in Chinese).
- [21] 周国铨, 崔继究, 刘广容. 等. 建筑物下采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983: 74-93.
- [22] 赵洪才. 高压输电铁塔下采煤可行性预测及实践[J]. 山东煤炭科技, 1989(4): 53-60.
Zhao Hongcai. High-voltage transmission tower under the projections and the feasibility of mining practice[J]. Shandong Coal Science and Technology, 1989(4): 53-60(in Chinese).
- [23] 史振华. 采空区输电线路直线自立塔基础沉降及处理方案[J]. 山西电力技术, 1997, 17(3): 18-20.
Shi Zhenhua. Subsidence transmission line tower in a straight line basis for self-reliance and settlement programs to deal with[J]. Shanxi Electric Power, 1997, 17(3): 18-20(in Chinese).
- [24] 张联军, 王宇伟. 高压输电铁塔下采煤技术研究[J]. 河北煤炭, 2002(4): 12-13.
Zhang Lianjun, Wang Yuwei. Study on mining under high voltage transmission tower[J]. Hebei Coal, 2002(4): 12-13(in Chinese).
- [25] 孙俊华. 煤矿采空区线路设计技术[J]. 山西电力, 2004(3): 13-14.
Sun Junhua. Experience and measure for design the transmission line in empty coal mine[J]. Shanxi Electric Power, 2004(3): 13-14(in Chinese).
- [26] 刘涛. 采动区自立式输电铁塔破坏机理及抗变形能力研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.



袁广林

收稿日期: 2009-05-07.

作者简介:

袁广林(1965—), 男, 教授, 主要从事建筑物保护与加固技术的研究工作;

张云飞(1976—), 男, 工程师, 主要从事输电线路设计和运行维护工作;

陈建稳(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事建筑结构防灾减灾研究工作。

(编辑 褚晓杰)