



高耸构筑物采动损害与保护技术研究现状与展望

郭文兵 赵高博 马志宝 杨伟强 李学臣

引用本文:

郭文兵, 赵高博, 马志宝, 等. 高耸构筑物采动损害与保护技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 403–415.
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, MA Zhibao. Research status and prospect on mining damage characteristics and protective technology of high-rise structures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 403–415.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1600>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于三维激光扫描的矿区建筑物变形监测与采动损害评估

Research on deformation monitoring and mining damage evaluation of buildings in mining area based on 3D laser scanning technology
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 213–222 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ed1552ad-851e-47ad-8198-905f3ef6eb4d>

采煤沉陷区损害防治对策与技术发展方向

Counter measures and technical development direction of damage prevention in coal mining subsidence area
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/14505047-d6d1-407e-bee8-c7146e4d7395>

关闭矿井次生沉陷研究现状及展望

Research status and prospect of secondary subsidence in closed mine
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/40caa2f3-f7ae-4f38-bd04-9f2e2a77a164>

采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用

“Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 23–35 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0561>

煤矿开采地表沉陷UAV-摄影测量监测技术研究

Study on surface subsidence in coal mining by UAV-photogrammetry monitoring technology
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f12741f2-d042-4a5e-8565-d509f0e79b1d>

矿山开采损害InSAR / UAV融合监测关键技术及应用

Key technology and application of InSAR / UAV fusion monitoring for coal mining damages
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 121–134 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/274c8cd7-97a9-425d-9578-32efe4b2cab4>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭文兵, 赵高博, 马志宝, 等. 高耸构筑物采动损害与保护技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 403–415.

GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, MA Zhibao, *et al.* Research status and prospect on mining damage characteristics and protective technology of high-rise structures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 403–415.

高耸构筑物采动损害与保护技术研究现状与展望

郭文兵^{1,2}, 赵高博³, 马志宝¹, 杨伟强¹, 李学臣⁴

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000;

3. 西弗吉尼亚大学 矿业工程系, 西弗吉尼亚州 摩根敦 26506; 4. 焦作煤业(集团) 科学技术研究所, 河南 焦作 454000)

摘要:我国一些矿区面临着高耸构筑物下压煤技术难题。矿区高耸构筑物具有高度大、横断面小、重心高、支撑基础底面积小等特点, 作为一种特殊的构筑物, 其对地下开采引起的地表移动变形较敏感。在分析了高耸构筑物自身特性及其采动变形特征基础上, 从采动变形理论、数值模拟、变形监测技术、保护技术等4个方面总结分析了高耸构筑物采动损害与保护技术的研究发展历程, 包括高耸构筑物与地基、基础协同变形理论、工作面开采对高耸构筑物变形影响数值(物理)模拟分析、实时高效精准监测技术、地基精准注浆加固技术、基础抗变形改造技术、高耸构筑物动态调斜技术、源头减损技术等; 并展望了高耸构筑物采动损害与保护技术的4个发展方向: 地表移动变形多指标作用下高耸构筑物采动变形规律, 采动地表沉降规律与高耸构筑物变形传导机理, 高耸构筑物实时高效精准变形监测技术, 高耸构筑物精准保护技术, 以便形成地表高耸构筑物“变形小-监测精-保护准”的综合理论与技术体系, 为高耸构筑物下安全高效采煤提供理论和技术支撑。

关键词:高耸构筑物; 开采沉降; 采动损害与保护; 沉降监测

中图分类号: TD73

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0403-13

Research status and prospect on mining damage characteristics and protective technology of high-rise structures

GUO Wenbing^{1,2}, ZHAO Gaobo³, MA Zhibao¹, YANG Weiqiang¹, LI Xuechen⁴

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 3. Department of Mining Engineering, West Virginia University, Morgantown WV 26506; 4. Science and Technology Institute, Jiaozuo Coal Industry(Group) Co., Ltd., Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Some mining areas in China are facing with technical problems about coal mining under high-rise structures. The high-rise structure in the mining area is characterized by large height, small cross-section area, high center of gravity, small bottom area of supporting foundation, etc. It is a kind of special structure and is sensitive to the surface movement and deformation caused by underground mining. Based on the analysis of the characteristics of high-rise structures and their mining deformation characteristics, this paper summarizes and analyzes the research and development process of mining damage and protection technology of high-rise structures based on four aspects: mining deformation theory, numerical simulation, deformation monitoring technology, and protection technology, including the theory of cooperative deformation of high-rise structures and foundations, numerical (physical) simulation analysis of the impact of mining on the deformation of high-rise structures, real time, efficient and accurate monitoring technology, precise grouting and reinforcement technology for foundations, anti-deformation transformation technology for foundation, dynamic inclination adjustment technology for high-rise structures, reducing surface subsidence from the source, etc; The four development directions of mining damage and protection technology for high-rise structures are prospected: mining deformation characteristics of high-rise structures under the action of multiple indicators of surface movement and deformation, transmission mechanism from mining subsidence to deformation of high-rise structures, real-

收稿日期: 2022-09-30

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1600

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U21A20108, U22A20620); 中原科技创新领军人才资助项目(224200510012)

作者简介: 郭文兵(1969—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士生导师。E-mail: guowb@hpu.edu.cn

通讯作者: 赵高博(1996—), 男, 河南南乐人, 博士研究生。E-mail: gz00001@mix.wvu.edu

time and efficient accurate deformation monitoring technology for high-rise structures, and accurate protection technology for high-rise structures.

Key words: high-rise structures; mining subsidence; mining damage and protection; subsidence monitoring

0 引言

煤矿开采引起的煤层顶板垮落,上覆岩层破坏,传递至松散层、地表,覆岩岩层形成自下而上形成垮落带、裂缝带与弯曲下沉带,地表形成下沉盆地,位于下沉盆地内部及附近的地表建(构)筑物将受采动影响^[1-3]。不同类型的建(构)筑物因其自身特殊性,通常表现出不同的采动损害特征,同时对应的保护技术也不同^[4]。

高耸构筑物较一般建(构)筑物(如民房房屋、桥梁、铁路、地下管道等)有很大的差异性,如材料、结构、高度等方面,位于下沉盆地内部及附近的高耸构筑物对地表移动与变形的响应更加敏感,对受采动影响的高耸构筑物进行保护难度更大,涉及的因素较多,包括高耸构筑物的位置、高度、结构类型、基础类型、地基稳定性,甚至高耸构筑物的种类,如高压线塔、广播通讯信号塔、烟囱、风电塔筒、工业广场内的水塔、井架及煤仓等^[5]。其中对输电线路的保护难度极大,需要考虑输电线路的电压、所处的地形、各高压线塔的稳定性和高压线塔间导线的连贯性等^[6]。

目前,我国各大矿区几乎所有的煤矿井田上方均有高压输电线路通过,由于高压输电线路分布的特殊性,尤其是高压线塔对开采引起的地表移动变形敏感,高压输电线路的安全性显得十分重要^[7]。若为整个输电线路的高压线塔留设保护煤柱,则会严重影响煤矿井下开拓开采布局,并损失大量的煤炭资源。而采取搬迁输电线路(改线)措施,仍会面临更多、更复杂的难题,如投资大、涉及面广、实施难度大、新路径选择困难、重复压煤、周期长等^[8]。因此,我国煤矿面临着高耸构筑物下采煤问题,高耸构筑物采动损害与保护问题的矛盾日益突出。

从高耸构筑物采动变形特征、采动变形理论与数值模拟、采动变形监测技术、保护技术等方面系统归纳总结了高耸构筑物采动损害与保护技术,并进行了展望,对提高煤炭资源采出率、预防或减轻高耸构筑物采动损害、丰富和发展现有采动区建(构)筑物保护理论等具有重要实际意义。

1 开采沉陷对高耸构筑物的影响特征

煤矿开采引起的地表移动变形是造成高耸构筑

物损坏的主要原因^[4],如图 1 所示。高耸构筑物一般是指高度较大、横断面较小、高度和直径比值较大的构筑物,以水平荷载(风荷载)为结构设计的主要依据^[9]。其特点是重心高、支撑基础底面积小,主要包括高压线塔、广播通讯信号塔、风电塔筒及烟囱等。其中,高耸构筑物下安全采煤工程实践活动已经在我国部分矿区得以实现,见表 1。



图 1 煤矿长壁开采引起地表高耸构筑物损坏示意
Fig.1 High-rise structures damage due to longwall mining

地表移动变形主要有垂直方向的移动和变形(下沉、倾斜、曲率、扭曲),水平方向的移动和变形(水平移动、拉伸与压缩变形)以及地表平面内的剪应变 3 类不同性质的地表移动和变形^[10]。过大的地表移动变形将可能导致铁塔各种运行参数超限,进而诱发安全隐患,严重时可能造成铁塔的严重破坏。目前,判断地表移动变形对高耸构筑物是否有影响时,运用较广泛的为《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》中高耸构筑物允许和极限地表(地基)变形值^[11],见表 2。

此外,在电力行业中,架空输电线路中的杆塔类型繁多,高度不等,相应输电线路杆塔的允许变形值也有所区别,文献^[12]中给出了不同类型、高度的交、

表 1 国内高耸构筑物下采煤实例

Table 1 Examples of mining under high voltage transmission line towers in China

矿井	工作面尺寸(走向×倾向)	采厚/m	倾角/(°)	采深/m	采煤方法	高耸构筑物特征
田屯煤矿	623工作面350 m×250 m	0.70~0.80	2~4	142.0	倾斜长壁采煤	烟囱
煤矿洞煤矿	工作面01	0.77	—	66.4	走向长壁采煤	风电塔筒
金龙煤矿	21081工作面450 m×100 m	6.00~8.25	9	430.0	炮采放顶煤	高压线塔高41.5 m
张家崙煤矿	14211工作面306 m×2 370 m	3.88	1-2	90.0	走向长壁采煤	高压线塔高38.0 m
阳泉三矿	72607、72609工作面825 m×183 m	2.46	7	227.0	走向长壁采煤	高压线塔高25.0 m
济宁二号煤矿	4302工作面800 m×180 m	3.59	3~15	572.0	综放(离层注浆)	高压线塔
济宁三号煤矿	4301工作面177 m×1 347 m	6.88	0~11	575.4	综采放顶煤	高压线塔高16.0 m
邢台矿	7810工作面1 000 m×95 m	6.00	18	270.0	综采放顶煤	高压线塔高31.2 m
龙口洼里煤矿	7101工作面260 m×109 m	1.45	4~11	113.6	走向长壁采煤	高压线塔高40.0 m
神东补连塔矿	31401工作面4 560 m×265.3 m	4.80~5.20	3	211.0~235.0	走向长壁采煤	高压线塔
陈四楼煤矿	2003、2100工作面825 m×83 m	2.20	14	371.7	炮采工作面	高压线塔高18.0 m
寺河煤矿	东井区工作面296 m×1 042 m	4.45~8.75	2~5	357.0~519.0	综合机械化开采	高压线塔高48.0~83.4 m
郑煤白坪煤矿	13031工作面192 m×1 421 m	6.00	10	634.0	综采放顶煤	广播信号塔高55.0 m

表 2 高耸构筑物允许变形值与极限变形值^[11]

Table 2 Allowable deformation values and its limits of high-rise structures^[11]

构筑物及其特征		允许变形值/(mm·m ⁻¹)		极限变形值/(mm·m ⁻¹)	
		水平变形	倾斜	水平变形	倾斜
钢筋混凝土基础上的筒仓式构架		—	7.0	—	12.0
混凝土、毛石混凝土基础上的水塔		3.0	8.0	5.0	12.0
煤仓		—	8.0	—	—
砖和钢筋混凝土烟囱	高度20 m	—	10.0	—	—
	高度30 m	—	8.0	—	—
	高度40 m	—	7.0	—	—
	高度50 m	—	6.0	—	—
	高度60 m	—	5.0	—	14.0
	高度70 m	—	4.5	—	10.0
	高度100 m	—	4.0	—	10.0
电视塔和无线电转播塔	高度≤50 m	—	—	—	7.0
	高度>50 m	—	—	—	5.0
钢井架		—	6.0	—	—

直流输电线路杆塔的允许变形值,见表 3、表 4。

根据表 2、表 3 及表 4 中数据可知,高耸构筑物的允许(或极限)水平变形值、倾斜变形值与其基础类型、架构形式、高度等有显著关系,并且高耸构筑物的允许(或极限)变形值与其自身高度呈现明显负相关关系;目前,多种高耸构筑物的允许(或极限)水平变形值、倾斜变形值尚无具体数据,需进一步研究确定。

另外,相关学者研究了不同类型的地表移动变形对高耸构筑物变形特征的影响。如郭文兵等^[9]研究了地表均匀下沉、不均匀下沉对高压线塔的影响,如图 2 所示。

由图 2 可知,均匀下沉对单一高耸构筑物的影响较小,单对高压线塔影响较大,如图 2a 中的 2 号高压线塔基础从 E_1 下沉到 E_2 ,下沉量为 W (单位为 mm),该高压线塔悬挂点的张力、导线的弧垂与近地

表 3 交流输电线路杆塔允许变形值^[12]

Table 3 Allowable deformation values of alternating current transmission tower^[12]

类别	钢筋混凝土电杆	钢管杆	角钢塔	钢管塔
直线杆塔倾斜度(包括挠度)/%	1.5	0.5(倾斜度)	0.5(高度50 m及以上铁塔)	1.0(高度50 m以下铁塔)
直线转角杆最大挠度/%	—	0.7	—	—
转角和终端杆66 kV及以下最大挠度/%	—	1.5	—	—
转角和终端杆110~220 kV最大挠度/%	—	2.0	—	—
杆塔横担歪斜度/%	1.0	—	1.0	0.5

表 4 交流输电线路杆塔允许变形值^[12]

Table 4 Allowable deformation values of direct current transmission tower^[12]

电压等级/kV	杆塔高度/m	杆塔倾斜度 (包括挠度)/%	横担 歪斜度/%
660及以上	100及以上	0.15	1.0
	50及以上、100及以下	0.25	
	50及以下	0.30	
500及以下	50及以上	0.50	1.0
	50以下	1.00	

距离、最大弧垂的位置和倾斜角等都发生了改变,并影响其临近高压线塔。图 2b 将不均匀下沉分为 2 类:高耸构筑物基础位于地表下沉盆地边缘与位于地表下沉盆地中间,对高耸构筑物塔身产生倾斜变形与拉伸变形。其中,倾斜变形对于基础面积小、塔身高度高的高耸构筑物影响显著:即使发生微小的倾斜,高耸构筑物在其自身重力作用下将发生较大的水平分力和倾覆力矩,该倾覆力矩的作用又将增加了高耸构筑物的倾斜,从而产生恶性循环。

另外,拉伸变形、水平移动对独立基础的高耸构筑物变形影响显著,对于联合基础的高耸构筑物影响较小。曲率变形对于底面积小的高耸构筑物影响较小,且高耸构筑物刚度较大,地表曲率变形传递至高耸构筑物塔身上的曲率变形较小,因此一般不考虑曲率变形对高耸构筑物的作用^[13]。需要进一步说

明的是,地表移动变形对高耸构筑物的损坏不是地表下沉、倾斜、水平移动、水平变形或曲率单一指标作用下的结果。通常是 2 种及以上多种指标综合作用的结果。因此,在未来研究中有必要探讨多种指标作用下高耸构筑物的采动变形特征。

2 高耸构筑物采动变形理论与数值模拟

2.1 高耸构筑物与地基、基础协同变形理论

高耸构筑物的主体结构、基础与地基三者联成一个整体,共同承担自身荷载、地表移动变形,产生相对应的变形;同时,三者都基于其各自的刚度对邻近部件的变形产生制约,并对整个体系的内力、地基反力和结构变形及地基下沉影响显著,这种地基、基础与上部结构间复杂的共同作用就称之为协同作用^[7]。基于此理念,谭志祥等^[14-15]建立了采动区建筑物地基、基础和结构协同作用模型,并研究了采动区建筑物附加地基反力变化规律;夏军武等^[16-17]研究了采动区地基、条形基础与框架结构共同作用机理,建立了相对应的理论计算模型,分析了采动过程中上部结构变形、内力等变化规律。

在上述研究的基础上,文献^[18]建立地表下沉和高压线铁塔下沉 2 个相互独立又相互联系的坐标系,研究了采动区域高耸构筑物地基、基础与上部铁塔结构的协同作用问题,如图 3 所示。地表下沉坐标系为 $W_1(x)-O_1-x$;高耸构筑物坐标系为 $W(s)-O-s$ 。高耸构筑物任意点 s 的下沉为 $W(s)$,对应地表点的

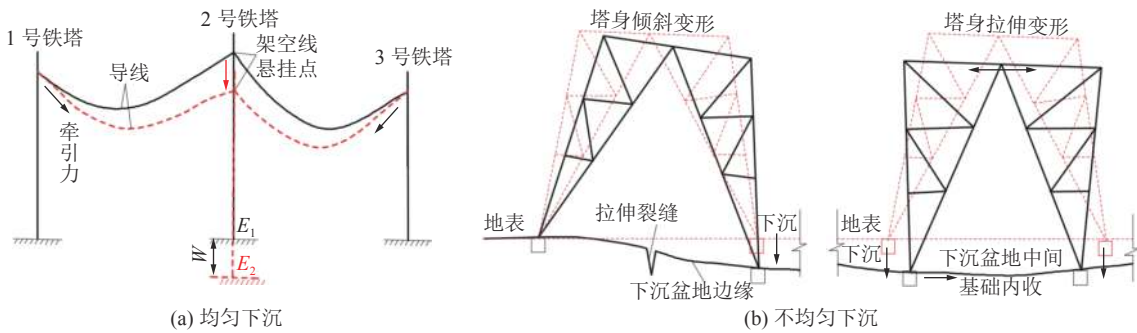


图 2 地表下沉对高耸构筑物影响示意^[9]

Fig.2 Schematic of subsidence influence on high-rise structures^[9]

下沉为 $W_1(x+s)$ 。另外, 4 个独立基础平均承受并传递上部高耸构筑物结构的荷载, 任取其中一个基础进行受力分析(图 3), 竖直荷载与水平荷载对基础的共同作用与基础荷载的作用完全等效。基于此方法, 结合相关开采沉陷理论、Winkler 弹性地基模型及其理论, 推导出随着长壁开采工作面的推进, 高耸构筑物桁架结构变形计算公式与其桁架结构内力计算公式, 见表 5。根据表 5 中的公式, 可计算出地表移动盆地主断面不同位置铁塔处地表移动变形引起的高压线塔桁架结构内任意点 s 的附加变形和附加内力。

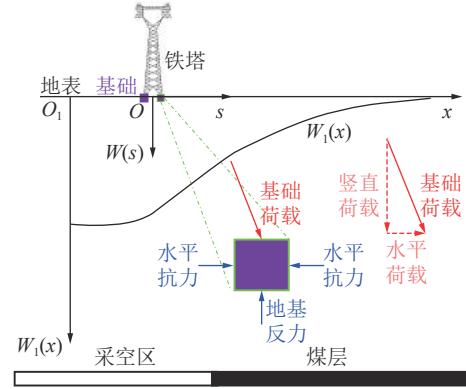


图 3 地表下沉与高耸构筑物下沉坐标系

Fig.3 Coordinates of surface subsidence, high-rise structure

表 5 采动影响下高耸构筑物桁架结构变形与内力计算公式^[18]Table 5 Equations of truss deformation and inner-force of high-rise structures under mining influences^[18]

项目	高耸构筑物计算公式
下沉	$W(s) = C_1 e^{\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} + \frac{kW_0L^2}{2\pi(kL^2 + 4\pi^2GF_1)} \sin\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right) - \frac{W_0}{L}(x+s) + \left(\frac{q_1}{k} + W_0\right)$
倾斜	$i(s) = C_1 \sqrt{\frac{k}{GF_1}} e^{\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} - C_2 \sqrt{\frac{k}{GF_1}} e^{-\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} + \frac{kW_0L}{kL^2 + 4\pi^2GF_1} \cos\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right) - \frac{W_0}{L}$
桁架结构变形	曲率 $k(s) = \frac{k}{GF_1} C_1 e^{\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} + \frac{k}{GF_1} C_2 e^{-\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} - \frac{2\pi kW_0}{kL^2 + 4\pi^2GF_1} \sin\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right)$
水平移动	$U(s) = C_3 e^{\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} + C_4 e^{-\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} + \frac{1}{k_h} \left(q_2 - \frac{1}{2}k_h b W_0\right) + \frac{k_h b W_0 L^2}{2k_h L^2 + 8\pi^2GF_2} \cos\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right)$
水平变形	$\varepsilon(s) = C_3 \sqrt{\frac{k_h}{GF_2}} e^{\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} - C_4 \sqrt{\frac{k_h}{GF_2}} e^{-\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} - \frac{\pi k_h b W_0 L}{k_h L^2 + 4\pi^2GF_2} \sin\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right)$
地基反力	$\sigma_{d1}(s) = k[W(s) - W_1(x+s)]$
水平抗力	$\sigma_{d2}(s) = k_h[U(s) - U_1(x+s)]$
桁架结构内力	基础竖向附加剪力 $F_{s1}(s) = EI \left[C_1 \left(\frac{k}{GF_1}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} - C_2 \left(\frac{k}{GF_1}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\sqrt{\frac{k}{GF_1}}s} - \frac{4\pi^2 kW_0}{L(kL^2 + 4\pi^2GF_1)} \cos\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right) \right]$
	桁架竖向附加剪力 $Q_1(s) = GF_1 \frac{dW(s)}{ds} = GF_1 i(s)$
	基础水平附加剪力 $F_{s2}(s) = EI \left[C_3 \left(\frac{k_h}{GF_2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} - C_4 \left(\frac{k_h}{GF_2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}s} + \frac{4\pi^3 k_h b W_0}{L(k_h L^2 + 4\pi^2GF_2)} \sin\left(2\pi\frac{x+s}{L}\right) \right]$
	桁架水平附加剪力 $Q_2(s) = GF_2 \frac{dU(s)}{ds} = GF_2 \varepsilon(s)$

$$\text{注: } C_1 = \frac{n}{m} \frac{\cos\left(2\pi\frac{x}{L}\right) + t \cos\left(2\pi\frac{x+l}{L}\right)}{t^2 + 1}, C_2 = \frac{nt}{m} \frac{t \cos\left(2\pi\frac{x}{L}\right) - \cos\left(2\pi\frac{x+l}{L}\right)}{t^2 + 1}, m = \left(\frac{k}{GF_1}\right)^{\frac{3}{2}}, n = \frac{4\pi^2 kW_0}{L(kL^2 + 4\pi^2GF_1)}, t = e^{\sqrt{\frac{k}{GF_1}}l},$$

$$C_3 = \frac{q}{p} \frac{\sin\left(2\pi\frac{x}{L}\right) - r \sin\left(2\pi\frac{x+l}{L}\right)}{r^2 - 1}, C_4 = \frac{qr}{p} \frac{r \sin\left(2\pi\frac{x}{L}\right) - \sin\left(2\pi\frac{x+l}{L}\right)}{r^2 - 1}, p = \left(\frac{k_h}{GF_2}\right)^{\frac{3}{2}}, q = \frac{4\pi^3 k_h b W_0}{L(k_h L^2 + 4\pi^2GF_2)}, r = e^{\sqrt{\frac{k_h}{GF_2}}l}$$

式中: k 为地基基床系数, kN/m^3 ; GF_1 、 GF_2 分别为高耸构筑物结构的竖向抗剪刚度和水平抗剪刚度, kN ; W_0 为地表最大下沉值, m ; L 为半盆地长(最大下沉点至下沉盆地边界点的距离), m ; b 为水平移动系数; k_h 为地基水平抗力系数; q_1, q_2 分别为上部结构传来的竖直等效均布载荷和水平等效均布载荷; l 为高耸构筑物独立基础长度, m ; $\sigma_{d1}(s)$ 为高耸构筑物基础竖直方向上任意一点所受的地基反力, kN/m^2 ; $\sigma_{d2}(s)$ 为高耸构筑物基础水平方向上任意一点所受的水平抗力, kN/m^2 ; e 为常数。

上述理论分析得出的公式一定程度上反映了高耸构筑物采动变形与各地表移动参数之间的关系, 但是公式过于繁琐, 很难直接应用于现场, 因此部分学者采用数值模拟方法研究高耸构筑物采动变形特征。

2.2 高耸构筑物采动变形特征数值模拟

目前, 通过数值模拟方法分析高耸构筑物采动变形特征的研究可分为 2 类: ①给定地表移动变形下的高耸构筑物变形数值模拟分析; ②工作面开采

中高耸构筑物变形数值模拟分析。前者偏向于得到高耸构筑物变形的临界值,而后者更侧重于地表移动变形与高耸构筑物变形的相互作用关系。

2.2.1 给定地表移动变形对高耸构筑物影响模拟分析

文献[9]利用 ANSYS 软件对高压线铁塔进行了数值模拟分析,建立的数值模型如图 4a 至图 4c 所示。图 4d 至图 4f 为模拟给定的水平拉伸变形(2~12 mm/m)、水平压缩变形(2~12 mm/m)与倾斜(3~90 mm/m)的方法:即固定 2 个基础,并对其余 2 个基础施加给定的拉伸量、压缩量与下沉量,从而达到高压线塔收到给定的水平变形、水平压缩与倾斜。该数值模拟得到高压线铁塔最大拉(压)应力与不同倾斜、水平变形之间的曲线关系,如图 5 所示。

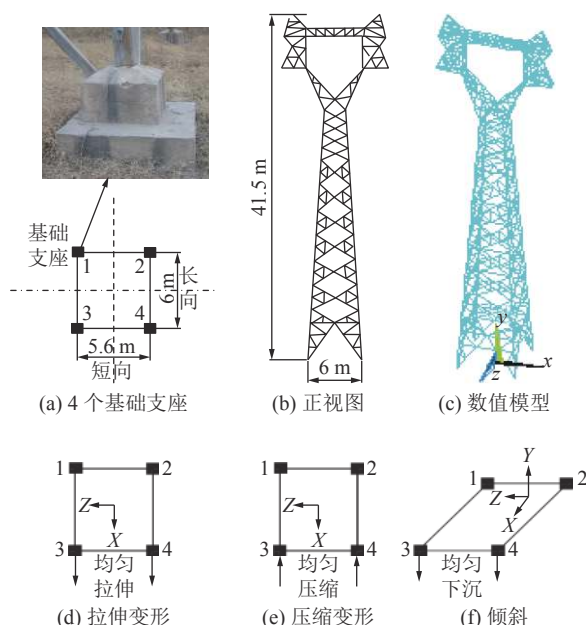
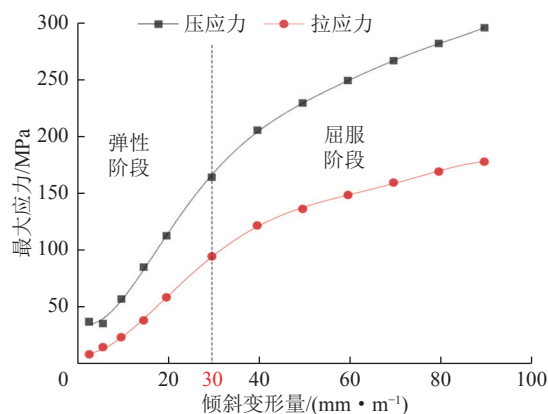


图4 高压线塔 ANSYS 数值模型与基础移动变形模拟方法
Fig.4 Numerical modeling of high voltage tower by ANSYS software and simulation method of fundament movement deformation

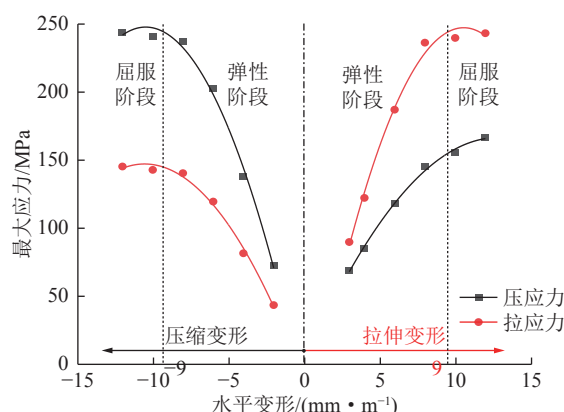
由图 5 可知,高压线塔经历了弹性阶段与屈服阶段,且得到弹性阶段与屈服阶段交界处的倾斜、水平拉伸变形、水平压缩变形分别为+30、+9、-9 mm/m。该方法对进一步完善表 2 中的高耸构筑物允许变形值与极限变形值具有一定的借鉴意义。

2.2.2 工作面开采中对高耸构筑物变形影响模拟分析

为分析地表移动变形与地表高压线塔变形之间的相互作用关系,文献[4]利用 ADINA 有限元程序建立了高压线塔与地表变形移动的协同作用有限元



(a) 高压线塔最大应力与倾斜变形量关系曲线



(b) 高压线塔最大应力与水平变形量关系曲线

图5 高压线塔最大应力与倾斜、水平变形量关系曲线^[9]

Fig.5 Curves of relationship between maximum stress, slope and horizontal deformation of high voltage tower^[9]

模型^[4],模型中含有 3 个高压线塔模型关键节点:塔顶中间节点 N7523、柱脚节点 N7507 与 N7509,如图 6 所示。关键节点的下沉与水平移动曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,高压线塔顶中间节点 N7523 比同一时刻的柱脚节点 N7507 和柱脚节点 N7509 下沉量、水平移动值大,说明高压线塔越高,对地表下沉、水平移动越敏感。

上述 2 类数值模拟对丰富完善高耸构筑物采动变形特征具有一定的实际意义,但是数值模型较真实的高耸构筑物进行了不同程度的简化,较难反映现场高耸构筑物真实变形情况;在这数值模型中需输入的参数较多,这些参数的合理性难以保证,因此通过数值模型得出的高耸构筑物采动变形特征仅处于定性阶段,难以量化。为较为真实地得到高耸构筑物采动变形特征,部分学者对高耸构筑物进行现场监测,以期得到高耸构筑物地基、基础、塔身的采动变形数据。

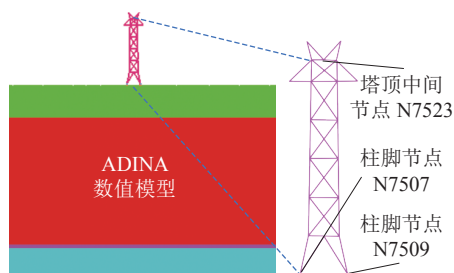


图 6 高压线塔 ADINA 数值模型与其关键监测节点

Fig.6 Numerical modeling of high voltage tower in ADINA and its key observation points

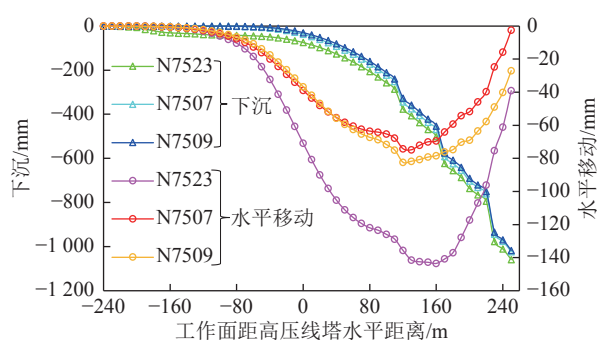


图 7 高压线塔关键节点下沉与水平移动动态曲线

Fig.7 Dynamic curves of subsidence and horizontal movement of key observation points on high voltage tower

3 高耸构筑物采动变形监测技术

3.1 常规监测技术

目前,高耸构筑物采动变形常规监测技术较多,见表 6。

表 6 高耸构筑物采动变形常规监测技术

Table 6 Common observation technologies of high-rise structure deformation by mining

监测方法	仪器设备	监测参数
水准测量法、投点法、差异沉降法、前方交会法、纵横轴线法、激光铅直仪法、垂准法、倾斜仪法与水平角观测法等	水准仪、全站仪、经纬仪等	下沉、倾斜、塔基根开尺寸、各基础顶界面高差等

相关学者运用常规技术监测不同类型的高耸构筑物采动变形取得了较为丰硕的成果。郭倩倩等^[19]研究了基于角度前方交会的高耸建筑倾斜监测方法,并进行了工程实践;王瑞斌等^[20]以风电塔架的倾斜观测为例,采用三点前方交会观测塔架倾斜,对交会点的点位精度进行了分析。阎跃观等^[21-22]基于水准测量法对采动影响区内高压输电线路铁塔进行了首采面开切眼优化设计;郭文兵等采用 GPS 定位技术、水准测量与激光水平仪监测方法分析了地表倾斜变形对电视信号铁塔的影响,如图 8 所示。

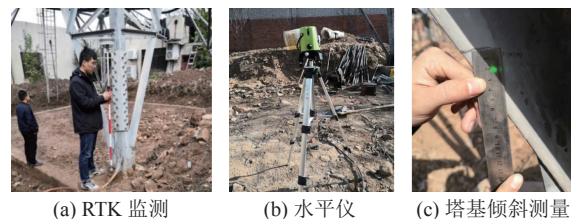


图 8 RTK 与水平仪现场监测

Fig.8 RTK and spirit level on-site monitoring

上述常规监测技术可以较直接的得出高耸构筑物采动变形量,但需布设控制点、线、网,并进行全天候、全方位的监测,监测过程受地面、地形、地物的限制,并对时间、人力、物力都有较高要求。另外,常规监测技术是对地面上单个离散点的标高进行观测,由于高耸构筑物自身结构的特殊性,该技术难以获取高耸构筑物采动变形的整体信息。

3.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是一种先进的、全自动、高精度立体扫描技术,其通过获取研究对象的线、面、体等三维空间实测数据并加以处理,最终实现研究对象快速建模和重构^[23-24],其具体流程如图 9 所示。

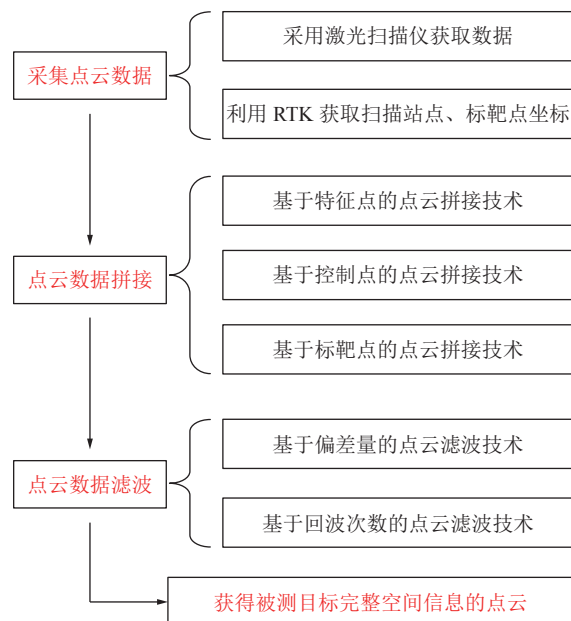


图 9 三维激光扫描技术操作流程

Fig.9 Operation process of 3D laser scanning technology

上述操作流程,可将三维激光扫描技术分为外业数据采集与内业对于点云数据的处理。外业工作主要包括标靶点的设置及被扫描物体点云数据的获取(图 10a);内业的主要任务就是将不同测站之间的点云数据拼接及去除点云数据中噪点,并最终得到高耸构筑物的空间点云数据(图 10b);随后对点云数据再处理,获得高耸构筑物移动变形的倾斜、塔基移动、

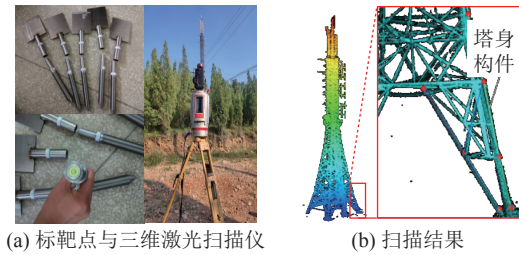


图 10 三维激光扫描仪及其扫描结果

Fig.10 3D laser scanning device and its scanning results of high-rise structures

构件破坏等信息。

目前,相关学者运用三维激光扫描技术监测高耸构筑物采动变形,并取得了一定的成果^[25-27]。如彭雄等^[28]利用三维激光扫描输电铁塔得到点云数据,并基于空间参数转换模型解算出输电铁塔重点监测部位的旋转参数与平移变化量,进而对铁塔变形进行分析;梁华等^[29]利用三维激光扫描技术进行输电铁塔变形进程监测,并用特征拟合方法计算铁塔倾斜,实现了铁塔变形可视化;马维青等^[30]利用三

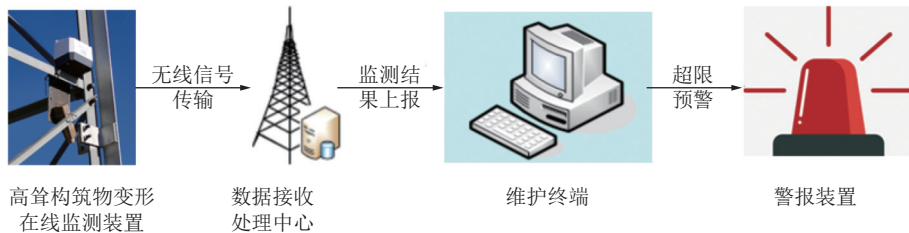


图 11 高耸构筑物变形实时监测技术框架

Fig.11 Technical framework for real time deformation monitoring of high-rise structures

该技术通过无线信号发射装置将现场变形监测数据发送到数据接收处理中心,软件自动对测量数据进行换算,输出各监测指标,将监测指标上报至维护终端,根据设置的变形上限报警命令,可以通过PC端和移动端对铁塔等高耸构筑物变形情况进行实时掌握。

综上所述,对高耸构筑物采动变形监测技术主要有 3 类:常规监测技术、三维激光扫描技术和实时监测技术。需要说明的是,除上述 3 类技术外,在工程实践中,往往对长壁工作面上方、高耸构筑物附近布置地表移动观测站(图 12),用于监测高耸构筑物附近地表移动变形情况,以确保高耸构筑物安全运行。

4 采动影响下高耸构筑物保护技术

采动影响下高耸构筑物保护技术主要分为地表保护技术与地下保护技术。目前,地表保护技术包括 3 种:地基精准注浆加固技术、基础抗变形改造技术与高耸构筑物动态调斜技术、地下保护技术主要

维激光扫描技术对采动区高压线塔变形监测与结构安全进行了研究,分析了高压线塔整体变形规律。

总之,采用三维激光扫描技术监测高耸构筑物采动变形具有以下优势:①数字化采集,并实时可视化。②非接触测量,受约束相对较小。③速度快,精度高。另外,三维激光扫描技术相较于常规监测技术,可以省去布置观测点和观测点等步骤,极大减少了人力、时间和物力的投入。

3.3 实时监测技术

高耸构筑物采动变形实时监测技术是利用传感器技术、信号传输技术,以及 5G 网络技术和信息收集解算技术,从宏观、微观相结合的全方位角度,在线监测高耸构筑物变形指标,智能化记录、分析监测数据并预判变形发展趋势,为运营单位提供决策依据,有效防范和遏制运行安全事故。实时监测技术(系统)一般由变形监测装置、无线信号传输装置、中心信号接收及处理装置、维护终端设施以及报警装置等组成,技术系统结构如图 11 所示。

为源头减损技术。

4.1 地基精准注浆加固技术

郭文兵等^[9]提出了高耸构筑物精准注浆加固技术理念:基于概率积分法预计基础移动变形值,在工作面将要(或正在)影响至高耸构筑物时,对其地基

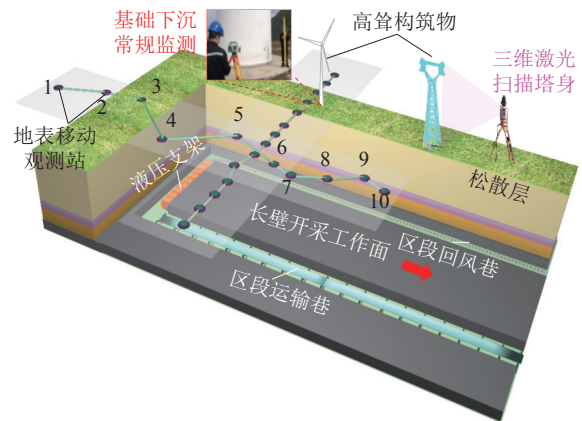


图 12 高耸构筑物采动变形监测技术

Fig.12 Observation technology of high-rise structure deformation by mining

(基础内部与基础周边)进行注浆加固,通过控制不同注浆位置的注浆压力与注浆量,实现提高地基强度、补偿地基下沉、矫正地基角度目的,从而精准保护高耸构筑物。

设计注浆方案包括注浆管长度、宽度、注浆半径、注浆压力等。根据注浆方案使得调节注浆压力,控制调节地基反向作用力,矫正基础倾斜,如图 13 所示。

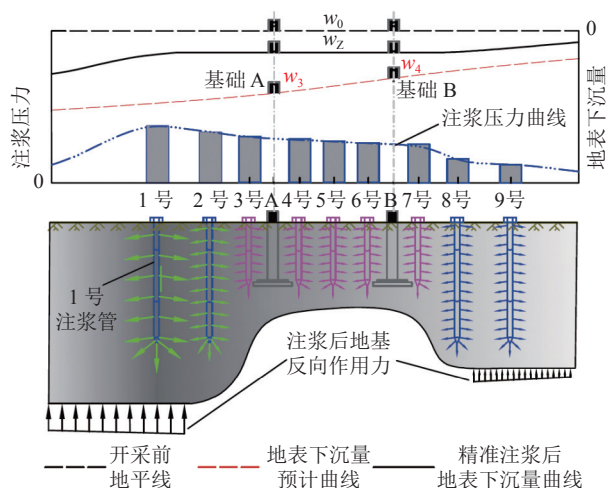


图 13 高耸构筑物基础地基注浆调斜作用剖面示意^[9]

Fig.13 Section sketch of grouting inclination adjustment effects for foundation of high rise structure^[9]

由图 13 可知,开采前基础 A、B 均位于地平线上(w_0);基础 A、B 的预计下沉量为 w_3 、 w_4 ,实施精准注浆后基础 A、B 的下沉量均为 w_z 。已知上述基础的下沉量,可计算出下沉差(w),并依据式(1)可计算出地基的注浆压力(P'):

$$P' = \frac{2G \sqrt{R'^2 + D^2}}{R'^2} w \quad (1)$$

式中: G 为土体的剪切模量, Pa; R' 为地基注浆半径, m; D 为注浆孔深度, m。

基于上述内容,给出了高耸构筑物地基精准注浆技术的核心内容,如图 14 所示。

4.2 基础抗变形改造技术

高耸构筑物基础抗变形改造技术主要有 2 类:改造为板式基础或在独立基础之间增加联系梁形成联合基础^[31-33]。其中,板式基础保护铁塔的原理为:在独立基础底面浇筑一层混凝土垫层,再在其上绑扎板式基础钢筋,浇筑板式基础,铁塔独立基础与板式基础之间铺垫一层砂卵石垫层^[34-35],如图 15 所示。板式基础中的卵石粗砂垫层可减小原基础与钢筋混凝土板式基础之间的摩擦阻力,以便于地基下沉、基础滑移后对基础根开调整复位,同时在不均匀沉降过程中起到缓冲受力的作用。需要说明的是,改造

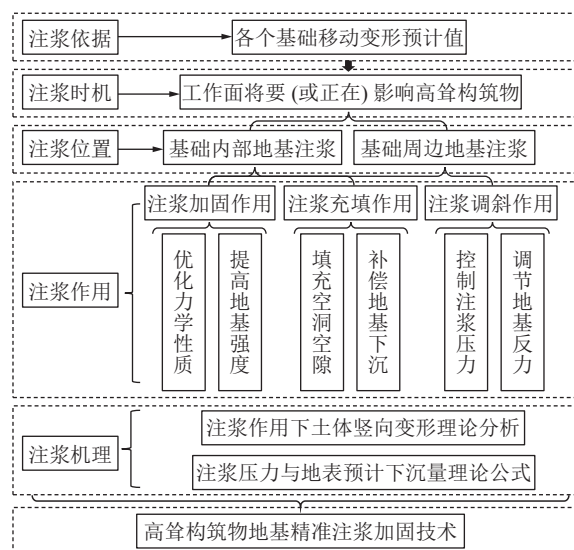


图 14 高耸构筑物地基精准注浆技术核心内容^[9]

Fig.14 Core content of precise grouting technology for high-rise structures^[9]

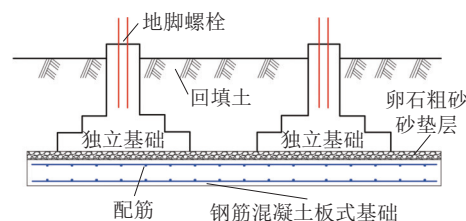


图 15 板式基础改造示意

Fig.15 Schematic of slab foundation reconstruction

为板式基础时,土方开挖量较大、施工复杂、且造价较高,但同时也具有埋深浅、易开挖成型、混凝土用量少等优点,且在受采动影响的软弱地基中应用较为广泛。

另外,在独立基础之间增加联系梁可提高铁塔基础的抗水平变形和不均匀下沉能力。目前,运用较为广泛的是在基础之间添加联系梁,将独立基础改造为由联系梁连接的联合基础,如“井”字梁、“口”字梁与“H”型梁基础形式。张建强等^[36]提出了将采空区地表输电铁塔由分裂基础改造为混凝土“井”字梁联合基础和“井”字钢梁联合基础;阳军生等^[37]提出采用“H”型框架梁将高压输电铁塔塔基连成整体的加固方案,如图 16 所示。张佰庆等^[38]在板式基础的条件上,通过在基础支墩之间植筋并浇筑混凝土,将原来的独立基础改造为联合基础,进一步提升了基础的抗倾覆能力。

同板式基础相比,板式基础并非联合基础,本质上各基础支墩间仍相互独立,可以产生相对位移,而梁式联合基础可以有效抑制基础之间的相对位移,具有优良的抗采动影响特性,具有明显的经济、技术优势。

4.3 高耸构筑物动态调斜技术

现有的高耸构筑物动态调斜技术主要分为迫降法、顶升法 2 类,同时根据施工工艺与纠偏原理的差异又衍生了许多纠倾方法,对于高压线塔还有吊车吊法、抱杆法等纠偏调斜方法^[39-40]。上述技术运用于高耸构筑物动态调斜所需工程量大且工艺复杂,调斜效果也具有时效性。而高耸构筑物在地表移动变形期间持续变形,因此,对采动区高耸构筑物的动态调斜工作应贯穿于整个地表移动变形期,确保可对高耸构筑物进行重复动态调斜。

笔者在分析上述动态调斜技术的基础上,提出一种在基础与塔脚之间增设可调过渡装置,形成塔脚高度调节系统,采取植入调节丝杆、焊接钢板等手段将原来电视信号铁塔塔基改造为动态可调式基础,技术方案如图 17 所示。

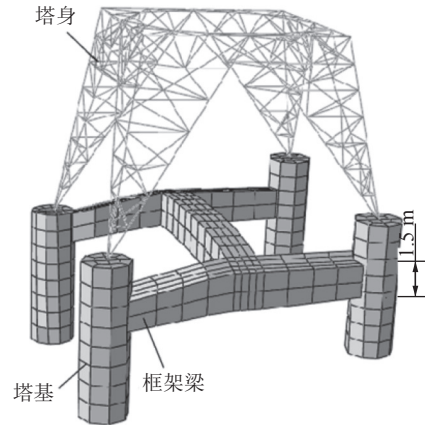


图 16 “H”型联合基础示意^[37]

Fig.16 Schematic of H-shape combined foundation^[37]

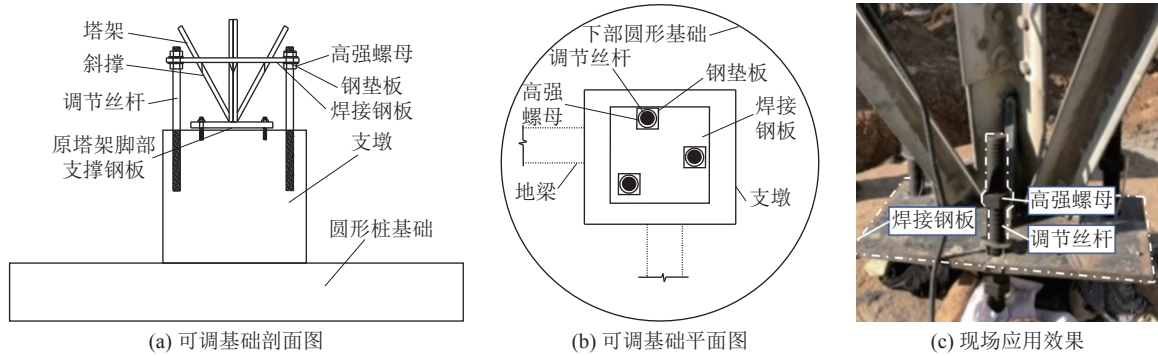


图 17 塔脚-支墩分离可调式基础改造设计与现场应用

Fig.17 Reconstruction drawing and on-site application of tower foot-buttress separation adjustable foundation

根据上述塔脚-支墩分离可调式基础改造装置,当铁塔基础发生不均匀沉降时,通过塔脚高度调节系统控制各塔脚的高度,使 4 个塔脚动态维持在一个水平面上,减小塔基不均匀下沉程度,以此降低塔基倾斜变形。该技术可实现在工作面开采整个过程中、回采结束后,对高耸构筑物进行动态调斜。

在浅埋煤层开采时,地表移动剧烈,对高耸构筑物影响更加显著,通常同时使用基础抗变形改造技术与铁塔调斜纠偏技术,如图 18 所示。最终实现全塔基础由井字调节梁和混凝土防沉梁取代,在铁塔受采动影响发生倾斜变形时,通过调节纠偏调斜装置降低铁塔倾斜度,实现对高压线塔的保护。

4.4 源头减损技术

近几年,部分学者基于煤炭绿色开采、科学开采、智能开采及其地表建构筑物、生态环境保护理念^[2,41-42],提出了源头减沉控损的概念:采取井上下技术措施控制开采引起的覆岩和地表移动,从而在源头上实现减沉控损的目的;并进一步归纳了源头减

沉控损技术要素,如开采方法的选择(部分开采、协调开采)、开采参数优化(采厚、工作面尺寸)、保护煤柱尺寸的优化以及采用充填材料置换煤炭开采(充填开采)等^[43-46],上述技术要素的目的均为减缓

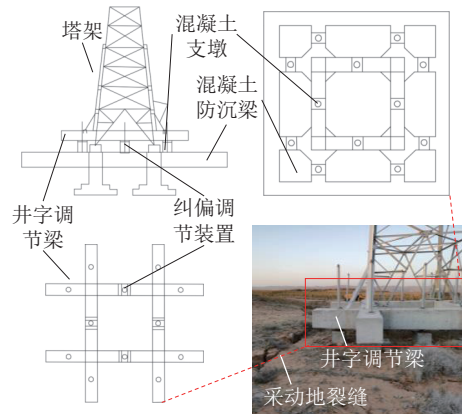


图 18 可调式基础抗变形加固改造设计与现场效果

Fig.18 Design of the foundation reconstruction and on-site photo

覆岩与地表变形,从而实现源头减沉控损。上述这些方法各有优缺点,在不同的条件下均有应用。在美国 Virginia 州 Island Creek 煤炭公司进行过一例高压输电线路铁塔下采煤的工程实例,采用注浆充填采空区控制地表沉陷和变形^[5]。

5 结 语

综合上述国内外研究,围绕高耸构筑物采动变形特征、变形理论、监测技术、保护技术等方面已开展了相关研究,但针对高耸构筑物采动损害特征与保护关键技术方面的研究仍有不足,应在以下方面进行深入研究:

1)地表移动变形多指标作用下高耸构筑物采动变形规律。当前研究主要关注单个指标对高耸构筑物的影响,应构建多指标影响下高耸构筑物采动变形模型,阐明多种指标组合下高耸构筑物采动变形规律。

2)采动地表沉陷规律与高耸构筑物变形传导机理。当前研究忽略了其附近地表沉陷波及区与高耸构筑物地基的作用关系,应进一步揭示其附近地表沉陷规律与高耸构筑物地基变形传导机理,结合现场实测数据,探讨分析高耸构筑物的允许(极限)水平变形和倾斜变形值。

3)高耸构筑物长时效高精度变形监测技术。高耸构筑物受采动变形影响是长期、缓慢的,甚至受地表残余变形影响,常规监测技术与三维激光扫描技术难以同时实现长时效与高精度监测,因此,高耸构筑物的采动变形监测技术需要进一步研发。

4)文中涵盖的保护技术尚未形成规范或行业标准,因此有必要进一步进行融合扩展,基于高精度的采动变形,实现高耸构筑物的精准保护,以便形成地表高耸构筑物“变形小-监测精-保护准”的综合理论与技术体系。

参考文献(References):

- [1] 李树志. 我国采煤沉陷区治理实践与对策分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 36-43.
LI Shuzhi. Control practices and countermeasure analysis on coal mining subsidence area in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 36-43.
- [2] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973-984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.
- [3] GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, LOU Gaozhong, et al. A new method of predicting the height of the fractured water-conducting zone due to high-intensity longwall coal mining in China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 52: 2789-2802.
- [4] 郭文兵. 高耸构筑物采动变形理论与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [5] PENG. S. Syd. Surface subsidence engineering: theory and practice[M]. Netherlands: CRC Press, 2020.
- [6] 郭文兵, 郑彬. 高压线铁塔下放顶煤开采及其安全性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 267-272.
GUO Wenbing, ZHENG Bin. Study of coal caving mining under the steel tower of high-voltage transmission line and its safety[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 267-272.
- [7] 邓喀中, 郭广礼, 谭志祥. 采动区建筑物地基、基础协同作用特性研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 601-605.
DENG Kazhong, GUO Guangli, TAN Zhixiang. Study on the properties of coordination of the base and foundation of the building above mining subsidence areas[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 601-605.
- [8] LUO, Y. Assessment and mitigation of subsidence effects on a tall self-supporting and free-standing communication tower[C]. 27th International Conference on Ground Control in Mining, 2007: 153-160.
- [9] 郭文兵, 赵高博, 杨伟强, 等. 高耸构筑物采动变形特征与地基精准注浆加固机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1908-1920.
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, YANG Weiqiang, et al. Deformation characteristics of high-rise structures and their precise grouting reinforcement mechanisms due to coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1908-1920.
- [10] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京: 应急管理出版社, 2019.
- [11] 胡炳南, 张华兴, 申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [12] 国家能源局. 架空输电线路运行规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [13] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 条带开采地表移动参数研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 182-186.
GUO Wenbing, DENG Kazhong, ZOU Youfeng. Research on surface movement parameters of strip-partial mining [J]. Journal of China Coal Society. 2005, 30(3): 182-186.
- [14] 谭志祥, 邓喀中. 采动区建筑物地基、基础和结构协同作用模型[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 2-5.
TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Coordinating work model of ground, foundation and structure of building in mining area[J]. Journal of China University of Mining & Tethnology, 2004, 33(3): 2-5.
- [15] 谭志祥, 邓喀中. 采动区建筑物附加地基反力变化规律研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 907-911.
TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Study on change laws of additional ground reaction force of buildings in mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2007: 32(9): 907-911.
- [16] 夏军武, 袁迎曙, 董正筑. 采动区地基、条形基础与框架结构共同作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 537-541.
XIA Junwu, YUAN Yingshu, DONG Zhengzhu. Mechanism study on subsoil-strap footing-framework interaction in mining

- subsidence area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 537-541.
- [17] 夏军武, 袁迎曙, 董正筑. 采动区地基、独立基础与框架结构共同作用的力学模型[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 33-37.
- XIA Junwu, YUAN Yingshu, DONG Zhengzhu. Mechanics model of ground, independent footing and framework interaction in mining subsidence area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 33-37.
- [18] 郭文兵, 雍强. 采动影响下高压线塔与地基、基础协同作用模型研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1075-1080.
- GUO Wenbing, YONG Qiang. Study on the synergy acting model of high voltage power transmission lines tower, groundwork and foundation influenced by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1075-1080.
- [19] 郭倩倩, 高兴国, 葛文海. 基于角度前方交会的高耸建筑倾斜监测方法与实践[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(11): 210-213.
- GUO Qianqian, GAO Xingguo, GE Wenhai. Method and practice of high rise building inclination monitoring based on angle intersection[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(11): 210-213.
- [20] 王瑞斌, 王清朋. 全站仪三点前方交会测量风电塔架倾斜[J]. 城市勘测, 2021(3): 169-172.
- WANG Ruibin, WANG Qingpeng. Measurement of wind power tower inclination by three points forward intersection of total station[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(3): 169-172.
- [21] 阎跃观, 戴华阳, 高文龙, 等. 逆断层条件下特高压输电线路铁塔采动影响变形规律研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(12): 82-84, 88.
- YAN Yueguan, DAI Huayang, GAO Wenlong, et al. Deformation rules of ultra-high voltage transmission tower due to two sides mining of reverse fault[J]. Coal Engineering, 2015, 47(12): 82-84, 88.
- [22] 阎跃观, 戴华阳, 范振东, 等. 高压输电线路铁塔下特厚急倾斜煤层首采面开切眼位置优化研[J]. 煤矿开采, 2015, 20(2): 66-69.
- YAN Yueguan, DAI Huayang, FAN Zhendong, et al. Location optimization of open-off cut in steeply-inclined and extreme-thick coal-seam under high-voltage line tower[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2015, 20(2): 66-69.
- [23] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005(2): 32-34, 56.
- ZHENG Dehua, SHEN Yunzhong, LIU Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005(2): 32-34, 56.
- [24] 毛方儒, 王磊. 三维激光扫描测量技术[J]. 宇航计测技术, 2005(2): 1-6.
- MAO Fangru, WANG Lei. Measurement technology of 3D laser scanning[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2005(2): 1-6.
- [25] 王巍, 王彬, 花春亮, 等. 电力铁塔倾斜测量方法比较[J]. 电力勘测设计, 2018(8): 10-13, 23.
- WANG Wei, WANG Bin, HUA Chunliang, et al. Comparison of inclination measurement methods of power tower[J]. Electric Power Survey & Design, 2018(8): 10-13, 23.
- [26] 麦晓明, 陈驰, 彭向阳, 等. 输电线路走廊三维可视化技术和系统设计[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 98-103.
- MAI Xiaoming, CHEN Chi, PENG Xiangyang, et al. 3D visualization technique of transmission line corridors: system design and implementation[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 98-103.
- [27] 冯耀, 戴中东, 刘伟劲, 等. 通信铁塔垂直度三维激光扫描分析[J]. 测绘通报, 2022(S2): 140-142, 178.
- FENG Yao, DAI Zhongdong, LIU Weijin, et al. Verticality analysis of communication tower based on 3D laser scanning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(S2): 140-142, 178.
- [28] 彭雄, 郭凯宁, 万程辉. 三维激光扫描技术在输电线路铁塔变形监测中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(7): 38-39.
- PENG Xiong, GUO Kaining, WAN Chenghui. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of transmission line tower[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(7): 38-39.
- [29] 梁华, 袁蕴良, 王云端, 等. 利用三维激光扫描技术进行输电铁塔变形监测研究[J]. 测绘通报, 2017(7): 156-157.
- LIANG Hua, YUAN Yunliang, WANG Yunduan, et al. Research on deformation monitoring of transmission tower using 3D laser scanning technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(7): 156-157.
- [30] 马维青, 穆昭玺, 袁广林. 基于三维激光扫描技术的采动区高压线塔变形监测和结构安全分析[J]. 钢结构, 2017, 32(12): 76-80, 116.
- MA Weiqing, MU Zhaoxi, YUAN Guanglin. Deformation monitoring and structural safety analysis of high-voltage tower in mining area based on TLS[J]. Steel Construction, 2017, 32(12): 76-80, 116.
- [31] 代泽兵, 鲁先龙, 程永锋. 煤矿采空区架空输电线路基础研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(S1): 312-316.
- DAI Zebing, LU Xianlong, CHENG Yongfeng. Research on foundation of transmission line tower in mined-out areas[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(S1): 312-316.
- [32] 孟克, 赵戈, 王文明, 等. 输电线路工程基础简介及发展趋势[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(6): 146-150.
- MENG Ke, ZHAO Ge, WANG Wenming, et al. Brief introduction and development trend of foundations used in transmission line projects[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(6): 146-150.
- [33] 陈榕, 高宇聪, 孟宪彬, 等. 我国输电线路基础型式对比及其适用性分析[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(6): 77-85.
- CHEN Rong, GAO Yucong, MENG Xianbin, et al. Comparison and applicability analysis for foundation types of transmission tower in China[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2015, 35(6): 77-85.
- [34] 刘彦东, 贾云吉, 张华. 王家岭煤矿采空区110kV输电线路区域基础设计[J]. 露天采矿技术, 2015(3): 20-22.
- LIU Yandong, JIA Yunji, ZHANG Hua. Foundation design of

- 110 kV electric transmission line in Wangjialing Coal Mine goaf[J]. *Opencast Mining Technology*, 2015(3): 20–22.
- [35] 舒前进, 袁广林, 郭广礼, 等. 采煤沉陷区输电铁塔复合防护板基础抗变形性能及其板厚取值研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(3): 294–299.
- SHU Qianjin, YUAN Guanglin, GUO Guangli, *et al.* Research on the composite foundation anti-deformation performance and optimal thickness of electricity transmission towers in tining subsidence area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(3): 294–299.
- [36] 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.
- [37] 阳军生, 杨元洪, 晏 莉, 等. 大断面隧道下穿既有高压输电铁塔施工方案比选及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1184–1191.
- YANG Junsheng, YANG Yuanhong, YAN Li, *et al.* Construction scheme choice of laefe-span tunnels under-passing high voltage transmission tower and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1184–1191.
- [38] 张佰庆, 康宇斌, 谢 伟, 等. 临接高速公路的输电铁塔基础改造加固研究[J]. *电力安全技术*, 2016, 18(3): 37–41.
- ZHANG Baiqing, KANG Yubin, XIE Wei, *et al.* Research on reconstruction and strengthening of transmission tower foundation adjacent to expressway[J]. *Electric Safety Technology*, 2016, 18(3): 37–41.
- [39] 王新武, 钱玉水. 送电线路铁塔基础不均匀沉降纠偏技术研究[J]. *山西建筑*, 2013, 39(31): 74–75, 162.
- WANG Xinwu, QIAN Yushui. Study on deflection rectification for uneven settlement of electric tower foundation[J]. *Shanxi Architecture*, 2013, 39(31): 74–75, 162.
- [40] 刘毓炆, 刘祖德. 输电线路倾斜铁塔原位加固纠偏关键技术研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 173–176.
- LIU Yuchuan, LIU Zude. Study on stabilization and rectification technology for inclined transmission tower[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 173–176.
- [41] 王双明, 孙 强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 8–15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, *et al.* Geological guarantee of coal green mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 8–15.
- [42] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 1–13.
- QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 1–13.
- [43] 张吉雄, 巨 峰, 李 猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 131–140.
- ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, *et al.* Method of coal gangue separation and coordinated in-situ backfill mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 131–140.
- [44] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 27–35.
- FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 27–35.
- [45] 刘文生. 覆岩离层注浆充填保护地面高压线路试验研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(3): 236–239.
- LIU Wensheng. Experimental study on protecting high voltageelectric power lines by grouting separated strata zone in overburden[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3) : 236–239.
- [46] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 198–206.
- HU Zhenqi, DUO Linghua, WANG Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1) : 198–206.