

基于概率积分法对高压输电线路稳定性分析

计 烜¹, 许明镜¹, 张晨亮¹, 姚 彬¹, 常璐凡^{2*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²邯郸慧龙电力设计研究有限公司, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年1月14日; 录用日期: 2025年2月17日; 发布日期: 2025年2月26日

摘 要

在建设高压输电线路过程中, 难免会经过煤矿采空区。受地下开采活动的影响, 若在这些区域立塔, 可能会造成铁塔倾斜或沉陷, 从而影响铁塔的稳定性。以某高压输电线路途径邯郸孙庄矿区为例, 基于概率积分法得出地表各形变参数的计算公式, 并结合高压输电线路的沉降限制标准, 预测未来沉降情况, 得出如下结论: 在仅采动 2#煤层时, 中心最大沉降值较小, 为 1.83 m。加入 4#煤层的采动后, 沉降值增大至 2.49 m, 当包括 6#煤层的采动后, 沉降值增加到 3.45 m; 沉降完全后的预测残余沉降值为 101 mm, 小于沉降最大允许值 400 mm, 高压线塔可投入使用。

关键词

输电工程, 煤炭开采, 概率积分法, 变形预测

Stability Analysis of High Voltage Transmission Lines Based on Probability Integral Method

Xuan Ji¹, Mingjing Xu¹, Chenliang Zhang¹, Bin Yao¹, Lufan Chang^{2*}

¹College of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Handan Huilong Electric Power Design and Research Co., Ltd., Handan Hebei

Received: Jan. 14th, 2025; accepted: Feb. 17th, 2025; published: Feb. 26th, 2025

Abstract

In the construction of high-voltage transmission lines, it is inevitable that routes will traverse mined-out areas of coal mines. Due to the impact of underground mining activities, erecting

*通讯作者。

文章引用: 计烜, 许明镜, 张晨亮, 姚彬, 常璐凡. 基于概率积分法对高压输电线路稳定性分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(2): 195-205. DOI: 10.12677/ag.2025.152021

transmission towers in these regions may result in tower tilting or subsidence, thereby compromising the structural stability of the towers. Taking a high-voltage transmission line passing through the Handan Sunzhuang mining area as a case study, this paper employs the probability integral method to derive the formula for surface deformation parameters. By integrating these parameters with the settlement limit standards for high-voltage transmission lines, future subsidence is predicted, leading to the following conclusions: When only the 2[#] coal seam is mined, the maximum central settlement value reaches 1.83 meters. The settlement value increases to 2.49 meters with the addition of mining activities in the 4[#] coal seam, and further rises to 3.45 meters when mining extends to the 6[#] coal seam. After full settlement, the predicted residual settlement value is 101 millimeters, which is significantly lower than the maximum allowable settlement value of 400 millimeters, thereby ensuring that the high-voltage tower can be safely commissioned.

Keywords

Power Transmission Engineering, Coal Mining, Probability Integral Method, Deformation Prediction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭在我国能源结构中的重要地位决定了它在未来一段时间内依然是主要能源[1]。但煤炭资源的开采所造成的地表沉陷变形不仅对生态环境造成负面影响,还可能破坏地表建筑、高压输电设施以及影响工农业生产,进而影响可持续发展[2][3]。河北省是我国重要的煤炭资源大省,其煤炭开采在一定程度上影响了输电线路的规划和建设[4]。由于地下开采的影响,高压输电线路在邯郸、邢台等地区穿越采空区已成为现实。地下开采过程中的采空区会导致地面沉降和土壤不均匀压实[5],从而对穿越该区域的高压输电线路铁塔产生严重的安全隐患。

随着地质勘察、环境监测以及建筑工程等领域的不断发展,地表变形问题成为一个关键关注点。概率积分法因其强大的适应性、灵活性和准确性,成为了目前最为广泛的计算方法之一。它通过对变形过程的概率分布进行积分计算,有效地处理复杂地表变形问题,尤其是在应对不确定性和复杂边界条件时,能够得到与实际情况更加吻合的结果。戴华阳[6]将概率积分法与波兹曼函数结合,通过对不同可能性的采动参数进行积分运算,总结出采动程度与地表下沉系数的变化规律,并为地表沉降的监测和预警提供理论依据。何昌春[7]将关键层理论和概率积分法相结合,在地表移动变形计算中能够更加准确地考虑到地质层次的非均匀性和变形过程中的随机性,从而提升了计算结果的可靠性和精度。王汉元[8]针对某煤矿开采沉陷引起的地表变形和破坏问题,通过非线性函数来拟合地表移动变化规律,并用概率积分法作为对比分析,得出最大下沉速度与开采深度、采掘速率等因素之间的关系。

某高压输电线路工程预在邯郸孙庄煤矿上方架设五座铁塔,分别为J01~J05。为确保输电线路架设的安全性与可持续性,有必要对输电线路建设进行风险评估。本文通过概率积分法对煤矿开采过程中不同采厚、采深条件下的地面沉降进行预测,分析了这些因素对地表形变的影响。有助于为矿区及周围的基础设施(如输电线路铁塔)提供科学的风险评估与防护建议。

2. 煤炭开采对高压线塔的影响

煤炭开采引起的地表位移是一个严重的安全隐患问题,特别是对地面上的铁塔和高压输电线路的影

响[9]。如果地表位移距离远超其最大允许值,可能会导致多个铁塔或整个线路失效,甚至对整个区域的电力供应造成长时间的影响。

2.1. 沉降对铁塔的影响

煤炭开采导致的地面沉降会影响高压线塔基[10],产生一定的附加作用力。沉降方式分为均匀沉降和不均匀沉降,二者对高压输电线路的影响有所不同。当地面沉降均匀时,高压线塔的基础随之下沉,由于是均匀沉降,高压线塔与地基间的附加应力对塔本身的影响相对较小,塔基相对地面的位置没有大的变化,高压线塔的稳定性和结构安全不会受到太大威胁。而不均匀沉降则会造成地面不同部分沉降速率和幅度不一致,进而使高压线塔的不同部位沉降不同,这种情况下,会产生较大的附加应力[11],从而导致高压线塔发生倾斜或不对称沉降,影响其结构安全和长期使用,如图 1。



Figure 1. Subsidence caused the tower to tilt
图 1. 沉降引起的铁塔倾斜

2.2. 倾斜对铁塔的影响

沉降通常会引起地表局部或整体的倾斜,在开采活动较为集中的区域倾斜的程度较为严重。而高压线塔作为重要的电力基础设施,其对地面变化的适应能力较弱,尤其是当地面发生倾斜时,会显著影响其结构的稳定性。由于塔基较小且高度较高,当地面发生倾斜时,塔基的受力状态会发生变化,塔身会偏离垂直方向,塔身的重心也会发生偏移,产生较大的弯矩[12],弯矩的作用会使得塔身产生扭曲,塔基的稳定性降低,甚至可能导致塔基的局部破坏。

2.3. 水平位移对铁塔的影响

当地表发生水平位移时,塔基和地基之间的摩擦阻力起着关键作用。当水平位移造成的应力低于摩擦阻力,塔基就不会发生滑动,塔基会随地面一起移动,避免了结构的进一步变形。当应力超过摩擦阻力时,塔基与地基之间就会发生滑动。应力在塔基内部会沿着塔基向塔身传递,并影响到整个结构。如果这些应力传递到塔身上并超过了其承载能力,就可能引发塔身的变形,甚至倾斜。

2.4. 曲率对铁塔的影响

地表曲率的影响主要体现在地面形状的变化上,即地表的倾斜度会导致不同位置的点产生不同的重力分布和应力影响,从而影响到塔基的受力。但地表曲率的变化不是很明显,所以塔基的受力变化通常较小。

3. 采动影响下地表形变计算

煤矿开采过程中的地表沉降与覆岩变形，称为采动影响。采动影响的作用机制为：地下开采引起采空区产生，使采空区周围的岩土体出现失稳现象，地下岩体的收缩作用显著[13][14]，导致开采区域的岩体逐渐向外挤压，影响采空区上方的岩层，通常表现为地面向下移动，形成凹陷低洼地区。

在分析采动影响引起的地表沉降和形变时，通常采用 5 个指标来进行表征：沉降、水平位移、倾斜、曲率、水平变形。这五个指标相互关联，需要综合考虑这些因素，以全面理解和评估地表形变特点。

3.1. 概率积分法的基本原理

(1) 矿山岩体的软弱面与随机性[15]。由于岩体中存在裂隙和断层等软弱面，这些结构使得岩体在受力时表现出不确定性。在开采过程中，地表移动不仅受到开采方式的影响，还受到岩体自身力学特性的影响，具有很强的随机性。

(2) 统计学模型与单元开采。煤层的开采可以划分为许多微小的开采单元，每个单元都代表一个独立的开采活动，每个单元的开采会导致地表的下沉和变形，形成一个个小的“单元盆地”。

(3) 整体采动的叠加效应。为了计算这些影响的总和，通过积分的方式，将各个单元的影响相互叠加，得到整个采区的地表下沉曲线或形变特征。

基于概率积分法得出地表形变各指标的计算公式：

最大沉降：

$$W_{\max} = q \times H \cos \alpha \quad (1)$$

最大水平位移：

$$U_{\max} = b_t \times W_{\max} \quad (2)$$

最大倾斜：

$$i_{\max} = \pm W_{\max} \tan \beta / H \quad (3)$$

最大曲率：

$$K_{\max} = \pm 1.52 W_{\max} \tan^2 \beta / H^2 \quad (4)$$

最大水平变形：

$$\varepsilon_{\max} = \pm 1.52 b_t W_{\max} \tan \beta / H \quad (5)$$

式中： q ——沉降系数；

b_t ——水平位移系数；

α ——煤层倾角，(°)；

M ——开采厚度，(m)；

d ——影响距离，(m)，

H ——埋藏深度，(m)，

$\tan \beta$ ——影响范围角正切值。

3.2. 参数的确定

孙庄煤矿可采煤层从上到下编号依次为 2#、4#、6#，煤层倾角 12°，以粗砂岩、细砂岩和页岩为主，属较硬岩石。

(1) 沉降系数 q ：用来描述地表最大沉降与所开采的岩体或煤层厚度之间的比例关系，是衡量开采过

程中地表形变(特别是沉降)的一个重要参数。结合表 1，取 $q = 0.75$ 。

Table 1. Rock type and parameter value
表 1. 岩石类型及参数取值

岩石类型	岩石构成	参数取值范围				
		q	b_t	$\tan\beta$	S_0/H	θ_0
坚硬	质地坚硬的砂岩、石灰岩	0.40~0.65	0.2~0.3	1.2~1.6	0.15~0.20	$\frac{\pi}{2} - (0.7\sim0.8)\alpha$
较硬	粗砂岩、细砂岩、页岩	0.65~0.85	0.2~0.3	1.4~2.2	0.10~0.15	$\frac{\pi}{2} - (0.6\sim0.7)\alpha$
松散	细砂岩、页岩、泥岩	0.80~1.00	0.2~0.3	1.8~2.6	0.05~0.10	$\frac{\pi}{2} - (0.5\sim0.6)\alpha$

- (2) 水平位移系数 b_t ：在开采过程中岩层或地表在受到外力作用下，发生的水平位移程度。取表 1 中的平均值 $b_t = 0.25$ 。
- (3) 影响范围角正切值 $\tan\beta$ ：通过角度来表征开采活动对周围地质环境的影响范围。取 $\tan\beta = 2.0$ 。
- (4) 拐点偏距 S_0 ：围岩变形或应力发生显著变化的地方与开采区域的距离，通常与覆岩类型密切相关，结合表 1 取 $S_0 = 0.1H$ 。
- (5) 采动影响角 θ_0 ：影响区域从开采点向外传播的程度和方向。结合表 1 取 $\alpha = \pi/12$ ， $\theta_0 = \pi/2 - 0.6\alpha = 9\pi/20$ 。

3.3. 形变计算

结合孙庄矿区地理位置信息，通过矿区提供的煤层底板等高线、地层柱状图和相关钻孔信息，估算出煤层埋深厚度；利用矿区提供的各煤层资源储量图，计算出各塔位在不同煤层下的采深采厚比，结果如表 2~4。

Table 2. Relevant data for each base of 2# coal
表 2. 各塔基在 2#煤下的相关数据

塔位	地面标高(m)	底板标高(m)	采深(m)	采厚(m)	采深采厚比
J01	227.93		煤层发育不明显		
J02	212.35		煤层发育不明显		
J03	204.91	75.50	129.41	2.50	51.76
J04	218.36	-60.00	278.36	2.30	121.02
J05	194.65		煤层发育不明显		

Table 3. Relevant data for each base of 4# coal
表 3. 各塔基在 4#煤下的相关数据

塔位	地面标高(m)	底板标高(m)	采深(m)	采厚(m)	采深采厚比
J01	227.93		煤层发育不明显		
J02	212.35	110.00	102.35	1.20	85.29
J03	204.91	15.00	189.91	0.90	211.01
J04	218.36	-110.00	328.36	1.00	328.36
J05	194.65	-61.00	255.65	1.00	255.65

Table 4. Relevant data for each base of 6[#] coal
表 4. 各塔基在 6[#]煤下的相关数据

塔位	地面标高(m)	底板标高(m)	采深(m)	采厚(m)	采深采厚比
J01	227.93		煤层发育不明显		
J02	212.35	20.00	192.35	1.00	192.35
J03	204.91	-50.00	254.91	1.20	212.42
J04	218.36	-145.00	363.36	1.40	259.54
J05	194.65	-82.00	276.65	1.20	230.54

利用地表形变五个指标的计算公式，求解各塔基在不同煤层下的变形预测值，如表 5~9 所示。

Table 5. The projected value of coal 2[#]
表 5. 2[#]煤预测值

塔位	采深(m)	采厚(m)	沉降(m)	水平位移(m)	水平变形(mm/m)	倾斜(mm/m)	曲率($\times 10^{-3}/m$)
J01	-	-			无煤层发育		
J02	-	-			无煤层发育		
J03	129.41	2.50	1.83	0.46	10.77	28.34	0.67
J04	278.36	2.30	1.69	0.42	4.61	12.12	0.13
J05	-	-			无煤层发育		

Table 6. The projected value of coal 4[#]
表 6. 4[#]煤预测值

塔位	采深(m)	采厚(m)	沉降(m)	水平位移(m)	水平变形(mm/m)	倾斜(mm/m)	曲率($\times 10^{-3}/m$)
J01	-	-			无煤层发育		
J02	102.35	1.20	0.88	0.22	6.54	17.20	0.51
J03	189.91	0.90	0.66	0.16	2.64	6.95	0.11
J04	328.36	1.00	0.73	0.18	1.70	4.47	0.04
J05	255.65	1.00	0.73	0.18	2.18	5.74	0.07

Table 7. The projected value of coal 6[#]
表 7. 6[#]煤预测值

塔位	采深(m)	采厚(m)	沉降(m)	水平位移(m)	水平变形(mm/m)	倾斜(mm/m)	曲率($\times 10^{-3}/m$)
J01	-	-			无煤层发育		
J02	192.35	1.00	0.73	0.18	2.90	7.63	0.12
J03	254.91	1.20	0.88	0.22	2.62	6.91	0.08
J04	363.36	1.40	1.03	0.26	2.15	5.65	0.05
J05	276.65	1.20	0.88	0.22	2.42	6.36	0.07

由表 5~7 可知，单独考虑一层煤开采情况，涉及塔位出现的各开采变形预测最大值均出现在 2[#]煤中的 J03 塔位，其原因是位于 J03 塔位下方的 2[#]煤埋深较浅，采深采厚比较小，采动活动对地表形变沉降

产生的影响较大[16]；由表 8 可知，开采 2[#]、4[#]煤层后，最大曲率值出现在 J02 塔位，其余最大变形预测值出现在 J03 塔位；由表 9 可知，三层煤全部开采后，最大沉降值和最大水平位移值出现在 J04 塔位，分别为 3.45 m 和 0.86 m；最大水平变形值、最大倾斜值和最大曲率值出现在 J03 塔位，分别为 10.06 mm/m、26.48 mm/m 和 $0.32 \times 10^{-3}/\text{m}$ 。这些数据表明，随着更多煤层的开采，各变形预测值逐渐增大。这是因为开采过程中的采动影响不仅仅局限于单一煤层，还会在多个煤层的开采过程中引起地面沉降的叠加效应。

Table 8. The projected value of coal 2[#] and 4[#]
表 8. 2[#]、4[#]煤预测值

塔位	采深(m)	采厚(m)	沉降(m)	水平位移(m)	水平变形(mm/m)	倾斜(mm/m)	曲率($\times 10^{-3}/\text{m}$)
J01	-				无煤层发育		
J02	102.35	1.20	0.88	0.22	6.54	17.20	0.51
J03	189.91	3.40	2.49	0.62	9.98	26.27	0.42
J04	328.36	3.30	2.42	0.60	5.60	14.75	0.14
J05	255.65	1.00	0.73	0.18	2.18	5.74	0.07

Table 9. The projected value of coal 2[#], 4[#], 6[#]
表 9. 2[#]、4[#]、6[#]煤预测值

塔位	采深(m)	采厚(m)	沉降(m)	水平位移(m)	水平变形(mm/m)	倾斜(mm/m)	曲率($\times 10^{-3}/\text{m}$)
J01	-				无煤层发育		
J02	192.35	2.20	1.61	0.40	6.38	16.78	0.26
J03	254.91	4.60	3.38	0.84	10.06	26.48	0.32
J04	363.36	4.70	3.45	0.86	7.21	18.98	0.16
J05	256.65	2.20	1.61	0.40	4.43	11.67	0.13

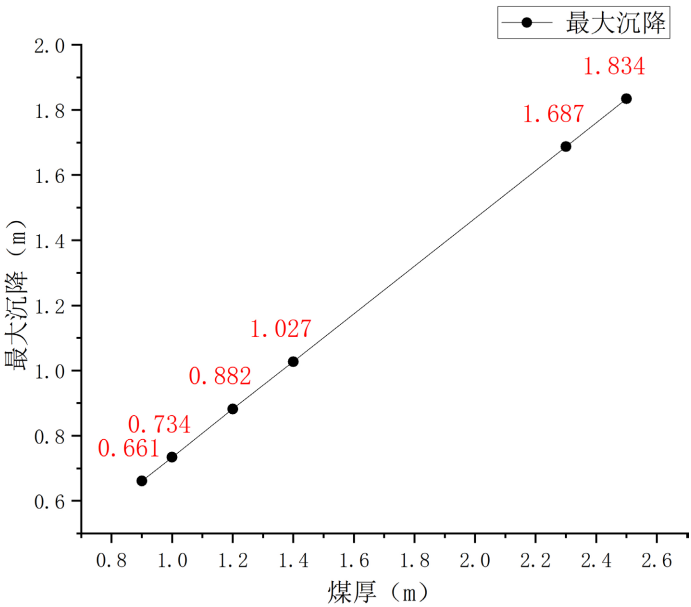


Figure 2. Relationship between maximum settlement and coal thickness
图 2. 最大沉降与煤层厚度关系图

图 2 为最大沉降值与煤层厚度之间的关系。随着煤层厚度的增加，地表最大沉降值逐渐增大。这是因为煤层厚度较大的情况下，开采过程中的地表沉降会受到更强的影响，导致沉降值的增加。

图 3 为最大水平位移值与煤层厚度之间的关系。图 3 同样显示了随着煤层厚度增加，最大水平位移也会相应增加。这意味着煤层厚度较大的地区，开采时不仅会产生较大的垂直沉降，还会引起较大的水平位移，从而使地表发生更大的水平方向的形变。

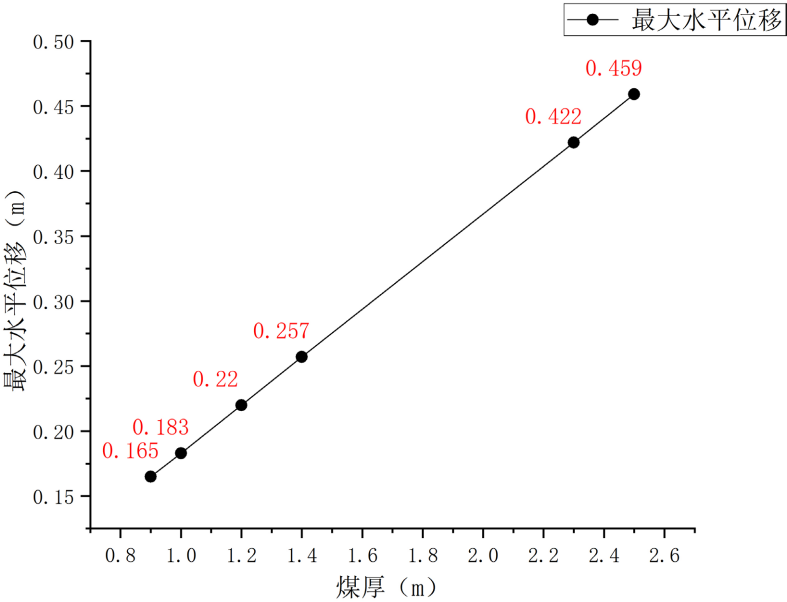


Figure 3. Relation between maximum horizontal displacement and coal thickness
图 3. 最大水平位移与煤层厚度关系图

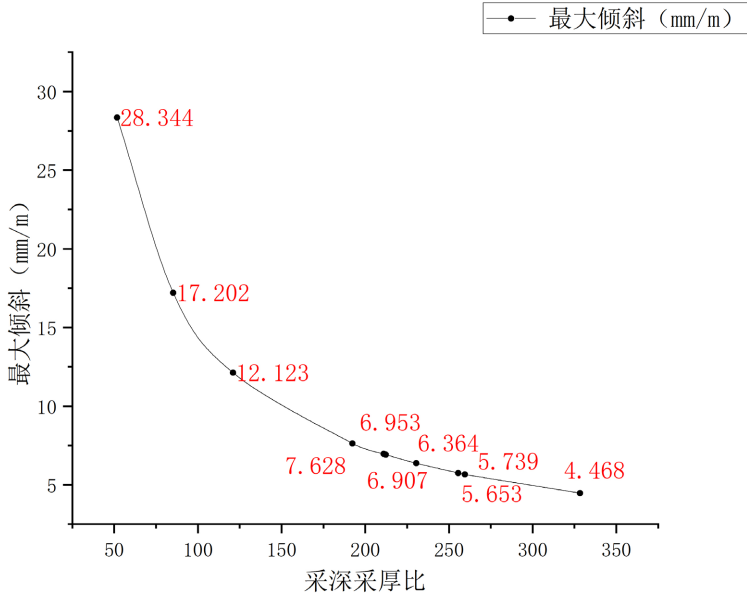


Figure 4. Relationship between maximum inclination and ratio of mining depth and thickness
图 4. 最大倾斜与采深采厚比关系图

图 4 为最大倾斜与采深采厚比之间的变化关系。随着采深采厚比的增大，地表的倾斜值逐渐减

小。这表明在相同的开采影响下，当采深采厚比增大时，地表倾斜的程度会降低。

图 5 为最大曲率与采深采厚比之间的变化关系。随着采深采厚比的增大，最大曲率值逐渐减小。这意味着采深采厚比越大，地表的曲率变形越小，曲线趋于平缓。

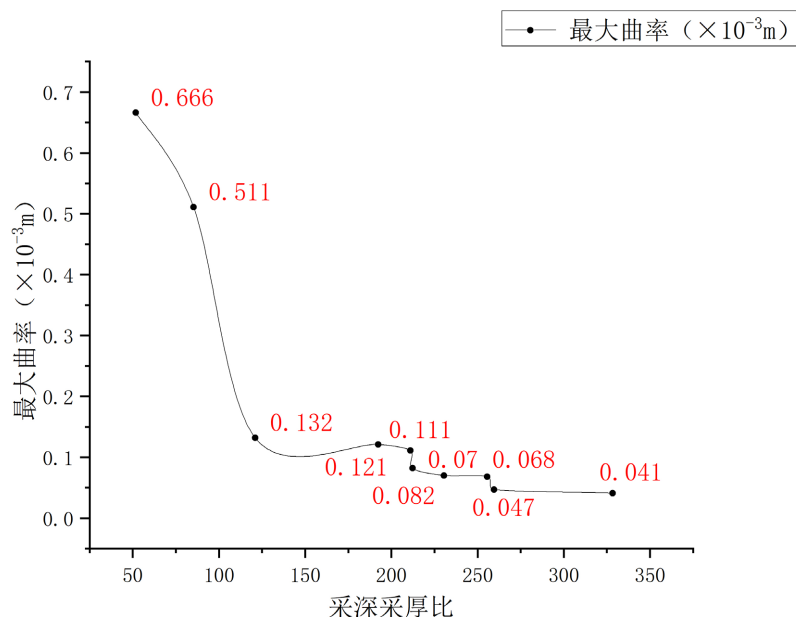


Figure 5. Relationship between maximum curvature and ratio of mining depth and thickness

图 5. 最大曲率与采深采厚比关系图

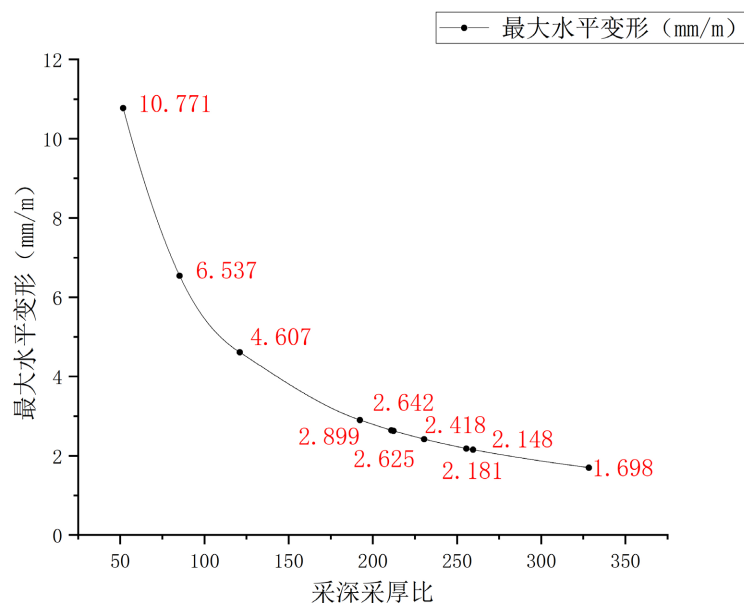


Figure 6. Relationship between maximum horizontal and ratio of mining depth and thickness

图 6. 最大水变形与采深采厚比关系图

图 6 为最大水平变形与采深采厚比之间的变化关系。随着采深采厚比的增大，最大水平变形值逐渐减小。说明随着采深采厚比的增加，煤层开采对水平位移的影响减弱，可能的原因是采深增加时，地表形变受到更深层岩层的支撑，导致水平位移的减小。

3.4. 预测残余变形量

研究区各塔位的残余变形预测结果[17] [18]如下。

沉降模量计算公式为：

$$q_{\text{沉}} = (1 - q)k \left[1 - e^{-\left(\frac{50 - t}{50}\right)} \right]$$
 (6)

式中：q——沉降系数；

k——校正系数，范围介于 0.5~1.0；

t——停产时间，(a)。

研究区各塔位的沉降模量见表 10。研究区各塔位残余变形量预测见表 11。

Table 10. Settlement modulus of each tower in the study area

表 10. 研究区各塔位沉降模量

开采煤层	塔位	停产时间(a)	沉降模量
2#煤	J01	无煤层发育	-
	J02	无煤层发育	-
	J03	42 年	0.022
	J04	34 年	0.041
	J05	无煤层发育	-
4#煤	J01	无煤层发育	-
	J02	34 年	0.041
	J03	21 年	0.066
	J04	2.5 年	0.092
	J05	32 年	0.045
6#煤	J01	无煤层发育	-
	J02	32 年	0.045
	J03	15 年	0.076
	J04	15 年	0.076
	J05	30 年	0.049

Table 11. Prediction of residual deformation of each tower in the study area

表 11. 研究区各塔位残余变形量预测

塔位	残余沉降(mm)	残余水平位移(mm)	残余倾斜(mm/m)	残余曲率($\times 10^{-3}/\text{m}$)	残余水平变形(mm/m)
J01	无煤层发育				
J02	46	12	0.65	0.01	0.25
J03	101	25	0.79	0.01	0.30
J04	91	23	0.55	0.00	0.21
J05	51	13	0.40	0.00	0.15

由表 11 可知：三层煤均开采结束经过沉降恢复等过程后，最终残余的最大垂直沉降量为 101 mm，而铁塔建筑(如高压线塔)在基础沉降完全后所允许的最大沉降变形值为 400 mm，因此认为高压线塔可正常建设。

4. 结论

(1) 分别阐述了沉降、倾斜、水平位移以及曲率对高压输电线路铁塔的影响。认为高压线塔作为重要的电力基础设施，对地面变化的适应能力较弱，尤其是当地面发生不均匀沉降和倾斜时，造成地面不同部分沉降速率不同，进而使高压线塔的不同部位沉降不同，导致高压线塔发生倾斜或不对称沉降，显著影响其结构的稳定性。

(2) 利用概率积分法估算煤层开采对地表形变的影响，并结合高压输电线路的沉降限制标准，预测未来沉降情况。单独考虑一层煤开采情况，最大沉降值为 1.83 m，三层煤全部开采后最大沉降值为 3.45 m。根据计算结果画出对应关系图，得出沉降值和水平位移值与煤层厚度成正比；倾斜、曲率和水平变形值与采深采厚比成反比。

(3) 三层煤均开采结束经过沉降恢复等过程后，最终残留的最大垂直沉降量为 101 mm，小于所允许的最大沉降值 400 mm，高压线塔可投入使用。

参考文献

- [1] 胡健. 全球煤炭资源利用现状、供需格局及发展趋势[J]. 中国煤炭, 2024, 50(11): 153-162.
- [2] 雷雯, 赵坤. 探讨煤炭开采对生态环境的影响及治理策略[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(14): 58-60.
- [3] 胡荣涛. 浅谈煤炭开采对矿区及周边生态环境的影响[J]. 山东煤炭科技, 2020(8): 163-165.
- [4] 孙钰昊. 深厚回填区地表变形及其对铁塔的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [5] 高文龙. 采空区特高压输电杆塔的稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
- [6] 戴华阳 王金庄. 非充分开采地表移动预计模型[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 583-587.
- [7] 何昌春. 基于关键层结构的地表沉陷预计方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [8] 王汉元, 赵岷, 敖嫩. 东胜煤田典型煤矿开采沉陷变形破坏研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(4): 73-79.
- [9] 金永军, 王彦兵. 煤矿采动影响区特高压输电线路塔基稳定性评价方法比较[J]. 电力勘测设计, 2018(S1): 12-16.
- [10] 张宇, 李小明, 李健, 等. 煤层开采影响下高压线塔移动变形规律研究[J]. 煤, 2023, 32(6): 40-43+53.
- [11] 郑志刚, 滕永海. 综放开采地表移动与建筑物变形规律分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 114-116+124.
- [12] 邓燕华. 厚煤层开采围岩应力分布规律研究[J]. 煤, 2022, 31(7): 38-41.
- [13] 郭文彬. 基于岩层移动理论的急倾斜煤层采后地表移动变形规律研究[J]. 金属矿山, 2023(8): 231-236.
- [14] 杨明美, 王沉. 薄煤层开采岩层移动与地表沉陷预测分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(4): 408-410.
- [15] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 岩层与地表移动控制技术的研究现状及展望[J]. 中国安全科学学报, 2005(1): 9-13+14.
- [16] 秦庆芝, 曹玉杰, 毛彤宇, 等. 特高压输电线路煤矿采动影响区铁塔基础设计研究[J]. 电力建设, 2009, 30(2): 18-21.
- [17] 宋亚坡, 郝舍廷. 煤矿预测地面沉陷与实际沉陷的对比分析——以章村矿 2404 工作面为例[J]. 科技信息, 2011(13): 375-376.
- [18] 马原. 近水平煤层开采覆岩移动规律及地表沉陷预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.