

采动影响区输电杆塔 地基稳定性评价

张 勇 高文龙 李振华 赵云云 著



科学出版社

采动影响区输电杆塔地基稳定性评价

张 勇 高文龙 李振华 赵云云 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以晋东南-南阳-荆门 1000kV 输电线路为工程背景,研究特高压线路途经煤矿采动影响区的输电杆塔地基稳定性问题。书中论述了特高压线路采空区勘察的原则及方法、采空区地球物理勘探的原则及方法选择。采取结合现场调查、地球物理勘探、数值计算、模糊综合评判等多种手段,对杆塔地基稳定性进行了定性及定量评价研究。根据研究结果,结合 BP 神经网络对特高压输电线路路径进行了优化。书中重点介绍了采空区地球物理勘探、采空区杆塔地基稳定性综合评价,多种采动影响区杆塔地基稳定性数值分析,采动影响区杆塔地基变形预测、预测方法及相关公式。在上述研究成果的基础上,作者基于概率积分法及其他相关公式,开发了“输电线路采动影响区地基稳定性评价系统”软件,介绍了软件编制及使用方法、各种预测实例分析等相关内容。

本书可供从事岩土工程分析、计算、施工和管理工作的技术人员阅读,也可供大专院校相关专业教师、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

采动影响区输电杆塔地基稳定性评价/张勇等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050446-3

I. ①采… II. ①张… III. ①采动区—线路杆塔—地基稳定性—研究 IV. ①TM75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 264466 号

责任编辑:焦 健 韩 鹏/责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 230 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国首条 1000kV 特高压输电线路途径采动影响区,关键技术问题是掌握采空区输电杆塔地基变形规律及判定杆塔地基的稳定性,为此,研究人员对 1000kV 特高压线路采空区的分布情况进行调查分析,通过收集煤矿开采资料,摸清线路下煤层的开采情况,对采空区按现状进行了科学分类;局部有疑问的地区,合理运用钻探、三维地震、地质雷达和高密度电法等不同的勘探方法,对采空区资料进行补充勘探和验证,从而为杆塔地基稳定性分析、线路路径优化和采空区杆塔地基处理提供依据。

影响采空区杆塔地基稳定性的因素有很多,笔者在充分分析这些影响因素的基础上,运用层次分析法和模糊综合评判理论,提出了采空区特高压杆塔地基稳定性模糊综合评价方法,探讨了 BP 神经网络对采空区杆塔地基的沉陷变形进行预测的可行性。

笔者运用 FLAC 数值模拟方法,对采空区下伏煤层的复采、规划区煤层开采等对输电杆塔地基稳定性的影响进行了数值分析,并在大郭沟对断裂带两侧煤层进行了开采风险数值模拟,分析了各开采方案对输电杆塔地基稳定性的影响。

根据采动影响区的不同类型,结合特高压输电杆塔的结构特点,提出了输电线路路径优化方法,并运用模糊优选方法对采空区输电线路路径及塔位进行了优化,确定了优化路径。

笔者几十年来致力于岩土工程的勘察设计、研究与教学工作,在总结多年教学及科研工作经验的基础上,利用概率积分法基本原理、以 C#作为开发语言,编制完成了“输电线路采动影响区地基稳定性评价系统”软件,该系统包括采动影响区输电杆塔静态开采沉陷预计、残余变形预计、小煤窑采空区输电杆塔基础稳定性评价、采空区杆塔地基临界深度判断、输电杆塔基础保护煤柱设计及压覆资源量计算等相关内容。

全书分为六章:第一章介绍特高压线路采空区勘察,包括采空区对输电杆塔的影响、采空区勘察及原则、采空区勘察方法、采空区地球物理勘探布置原则及方法选择等内容;第二章主要介绍采空区输电杆塔地基稳定性模糊综合评判、基于 BP 神经网络的采空区杆塔地基变形预测以及采空区特高压输电线路路径及塔位优化;第三章介绍多种采动影响区杆塔地基稳定性数值分析,包括采空区下伏煤层复采影响分析、规划采空区杆塔地基稳定性计算分析、大郭沟断层两侧煤层风险开采与杆塔地基稳定性;第四章介绍 MTFA 沉陷变形预计公式及编程要点;第五章介绍小煤窑采空区地基稳定性初步评价、采空区输电杆塔塔基安全煤柱设计及压覆资源量计算;第六章介绍“输电线路采动影响区地基稳定性评价系统”软件基本功能及使用方法、预测实例分析等。

本书是笔者作为课题负责人和参与者,对参与完成的国家电网公司的 1000kV 级交流特高压输变电工程关键技术“多种采动影响区特高压线路塔基变形规律及稳定性”(SGKJ[2007]57)课题部分内容,以及中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司

“科标业”课题“输电线路采动影响区地基稳定性评价系统”的系统总结。

本书由河北工程大学张勇和赵云云、中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司高文龙和李振华合作完成，第一章由高文龙撰写，第二章至第四章由张勇撰写，第五章由李振华撰写，第六章由赵云云撰写，最后由张勇、高文龙统稿定稿。

本书写作过程中，引用了一些单位及个人的部分研究成果，在此表示衷心的感谢！书中涉及学科交叉的相关理论，如有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者
2016年9月

目 录

前言

第一章 特高压输电杆塔采空区勘察	1
第一节 1000kV 特高压输电线路	1
第二节 采空区对输电杆塔的影响	3
一、采动影响区及分类	3
二、高压线路安全运行基本要求	4
三、开采沉陷移动变形对输电杆塔的影响	5
第三节 采空区勘察及原则	7
一、国内采空区勘察规范	7
二、特高压输电线路采空区勘察原则	10
第四节 采空区勘察方法	11
一、工程地质测绘	11
二、地球物理勘探	11
三、采空区钻探	12
第五节 输电杆塔地基采空区地球物理勘探	12
一、地球物理勘探的目的	13
二、地球物理勘探的布置原则及方法选择	13
第六节 特高压杆塔采空区地球物理勘探	15
一、三维地震勘探	15
二、高密度电法	21
三、地质雷达	23
四、采空区钻探验证	25
第二章 采空区杆塔地基稳定性综合评判及线路路径优化	27
第一节 杆塔地基稳定性分级及影响因素选择	27
第二节 AHP 层次结构及判断矩阵的建立	28
一、AHP 层次结构	28
二、构造两两比较判断矩阵	28
三、层次单排序和一致性检验	30
第三节 模糊综合评判计算模型	31
第四节 隶属度的确定	32
第五节 模糊综合评判及结果分析	33
第六节 基于改进 BP 神经网络的采空区输电杆塔地基变形预测	34
一、BP (Back Propagation) 神经网络	34
二、参数的选取及数据准备	35

三、BP 神经网络的训练及预测	36
第七节 采空区特高压输电线路路径及塔位优化	39
一、输电线路路径相关规定及采空区线路路径优化原则	39
二、采空区输电线路路径模糊优选	40
三、研究区输电线路路径及塔位优化结果	43
第三章 多种采动影响区杆塔地基稳定性数值分析	48
第一节 采空区下伏煤层复采影响分析	48
一、模型建立	48
二、模拟分析过程	49
三、模拟结果分析	50
第二节 规划采空区杆塔地基稳定性计算分析	55
一、模型的建立	55
二、计算参数的选择	57
三、工作面开采模拟	57
四、模拟结果分析	64
第三节 大郭沟断层两侧煤层风险开采与杆塔地基稳定性	66
一、模型建立及参数选取	66
二、四种开采情况下的模拟	69
第四节 模拟结果分析及优化开采方案	81
第四章 MTFA 沉陷变形预计公式及编程要点	83
第一节 矩形工作面地表任意点沉陷变形预计公式	83
一、地表任意点 (x, y) 的下沉值 $W(x, y)$	83
二、地表任意点 (x, y) 沿 φ 方向的倾斜值、曲率值、水平移动和水平 变形值	84
第二节 坐标系转换	86
第三节 采区矩形工作面坐标原点的确定	86
第四节 任意工作面概率积分法数学模型	87
第五节 任意工作面计算区域的确定及坐标变换	89
一、任意工作面计算区域的确定	89
二、坐标系的建立和变换	89
三、拐点偏移距的计算	91
第六节 任意工作面直接积分法开采区域的处理	92
第七节 等价计算工作面坐标变换	93
一、等价计算工作面的转换	93
二、等价计算工作面各角点坐标的确定	93
第八节 利用 Simpson 数值积分求解沉陷变形值	95
一、复化 Simpson 公式	95
二、概率积分法二重积分数值解推导	96

第五章 采空区杆塔地基稳定性初判与安全煤柱设计	107
第一节 小煤窑顶板稳定性评价	107
一、小煤窑顶板自重稳定性评价	107
二、考虑杆塔基底压力下小煤窑顶板稳定性	108
第二节 杆塔地基采空区稳定临界深度计算	109
一、采空区三带的划分	109
二、垮落裂隙带高度估算方法	110
三、杆塔基础附加应力影响深度的确定	112
四、采空区稳定临界深度计算公式	113
第三节 输电杆塔安全煤柱设计及压覆资源量计算	114
一、保护煤柱的留设原理	114
二、移动角与围护带	115
三、垂直剖面法留设保护煤柱	116
四、输电杆塔压覆资源量计算	120
第六章 输电线路采动影响区地基稳定性评价系统 (MFAT)	121
第一节 MFAT 预测系统	121
一、系统简介、基础平台及系统结构	121
二、系统软件的安装及卸载	122
三、软件启动及主要功能	123
第二节 MTFA 杆塔地基沉陷预计计算参数	126
一、特高压杆塔基础参数	126
二、沉陷变形预测参数及回采工作面参数	127
三、残余变形计算	129
第三节 数据的录入及计算	131
一、输电杆塔基础数据输入	131
二、静态沉陷预计	133
三、残余变形预计	136
四、小煤窑采空区地基稳定性评价	138
五、采空区地基稳定临界开采深度计算	139
六、保护煤柱设计与压覆资源量计算	140
七、图形显示与出图	143
第四节 MFAT 软件系统计算实例	145
一、矩形工作面开采沉陷预计	145
二、小煤窑顶板自重稳定性评价	147
三、考虑输电杆塔基底压力下小煤窑顶板自重稳定性评价	149
四、采空区地基稳定临界深度计算	150
五、输电杆塔安全保护煤柱设计及压覆资源量计算	151
参考文献	153

第一章 特高压输电杆塔采空区勘察

第一节 1000kV 特高压输电线路

输电系统的稳步发展和彼此互联,使得现代电力系统正朝着大型、超大型互联系统方向发展,其覆盖地域延绵几百公里,甚至上千公里。大型互联系统能经济合理地利用资源,解决各地区能源与负荷分布不平衡问题;可以利用时差和季节差错开负荷高峰,减少电力系统总的装机容量、备用容量;可以安装大容量机组,降低运行成本,以提高投资效益和运行经济性;便于开展电力系统的优化调度,提高整个系统运行的经济性;便于在电力系统中发生故障时,各地区间发电出力的相互支援,提高电力系统运行的可靠性;等等。国外已形成多个跨洲、跨国的联合电力系统。在我国,现已形成华北、东北、华东、华中、西北、川渝、华南七个跨省的区域电力系统,实现国家总体能源发展及布局方针,“西电东送、南北互供、全国联网、厂网分开”已成为 21 世纪我国电力工业发展的方向。通过跨区超高压、远距离、大功率交直流输电线路实现大区联网,乃至全国联网是我国电力系统发展的目标。我国东北和华北已实现了交流 500kV 的联网,华北和华中实现大区联网。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中重点领域及其优先主题中首先提到能源,而提高能源区域优化配置的技术能力,重点开发安全可靠的先进电力输配技术,实现大容量、远距离、高效率的电力输配是主要内容,其优先主题之一为超大规模输配电和电网安全保障,重点研究开发大容量远距离直流输电技术和特高压交流输电技术与装备、间歇式电源并网及输配技术、电能质量监测与控制技术、大规模互联电网的安全保障技术、西电东输工程中的重大关键技术、电网调度自动化技术、高效配电和供电管理信息技术和系统。

特高压是一种 1000kV 交流或 ± 800 kV 直流的输电技术,由于技术和经济的因素,当时世界范围仅有日本和俄罗斯架设了尚未转入商业化运行的特高压线路。为了适应国民经济发展对电力工业的要求,促进电力产业升级,对更大范围内的资源优化配置,实现跨大区、跨流域的水火互济,变输煤为输电,以提高能源利用率,国家电网公司在 2004 年提出投资 4060 亿元,用 15 年的时间将分散在东北、华北、西北、华中、华东的电网连成一片,从而实现电力资源的优化。在此背景之下,国家电网公司启动了特高压项目:晋东南-南阳-荆门的 1000kV 交流特高压试验示范工程,工程线路全长 645km,跨越华北-华中电网,其未来投资数倍于三峡工程,堪称新中国成立后第一大工程。

我国建设的晋东南-南阳-荆门 1000kV 交流特高压试验示范工程,自北向南相继穿越山西的沁水煤田、河南的偃龙煤矿区、线路规划阶段共压覆煤矿产 98.3km,其中在山西段穿越 9.6km 的大面积采空区、57km 的压矿区、11km 的正在开采区、在河南段穿越 5.8km 的正在开采区、14.9km 的未来采空区,而且在未来的十年或几十年的时间内,线

路路径沿线 98km 的区域内都将成为未来采空区。地下煤炭的大面积开采，必然引起采空区上方地表的移动和变形，造成地表的不均匀沉降，这将影响到途经开采沉陷区的输电线路杆塔的安全性，轻则可造成基础倾斜、开裂、杆塔变形，重则造成基础沉陷、杆塔倾倒，严重威胁特高压输电线路的安全运行。

图 1.1 为可研阶段特高压线路山西段不同设计方案的部分路径示意图，图 1.2 为可研阶段河南偃师、伊川、汝州段部分路径示意图。

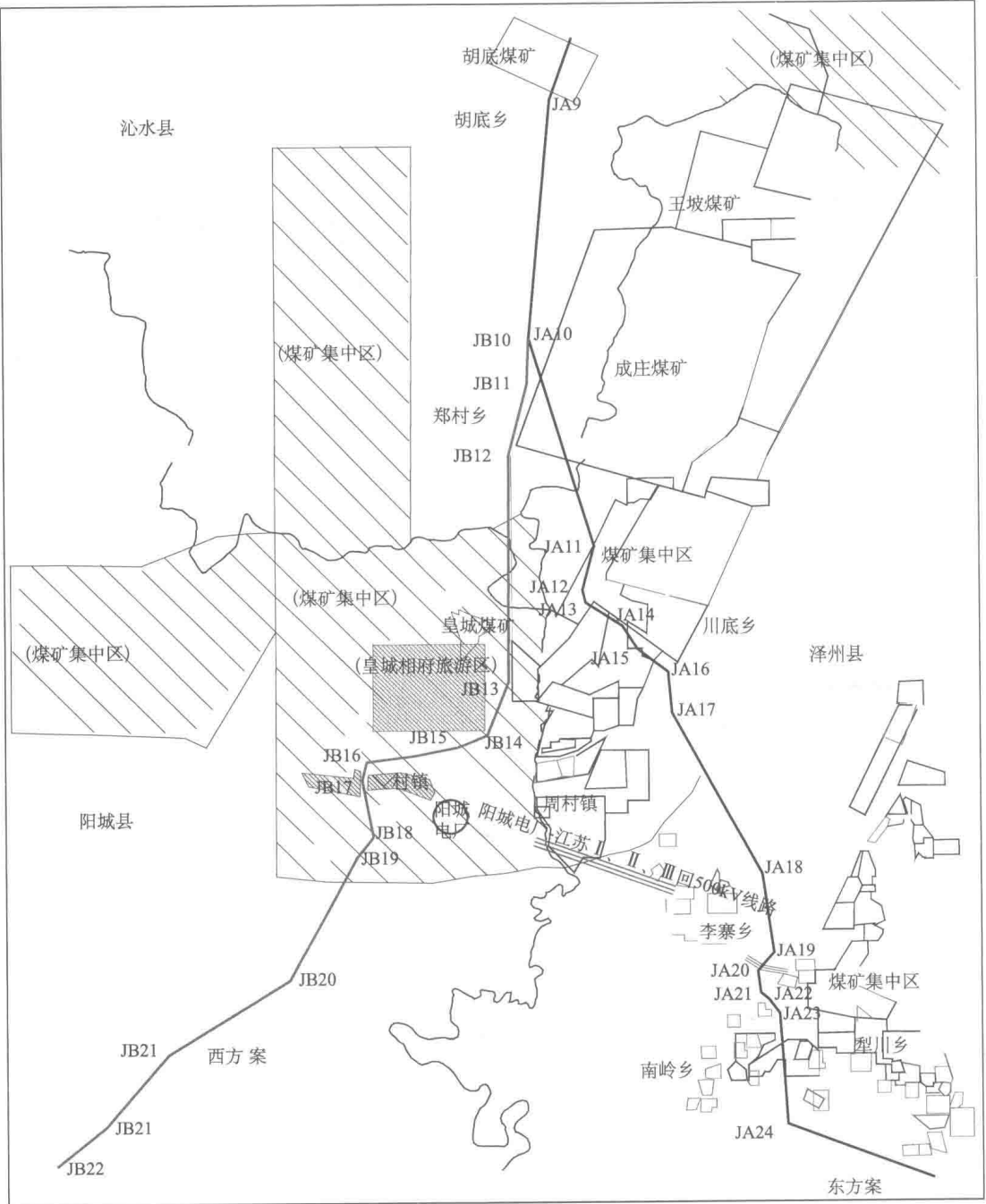


图 1.1 可研阶段山西段部分特高压线路路径示意图

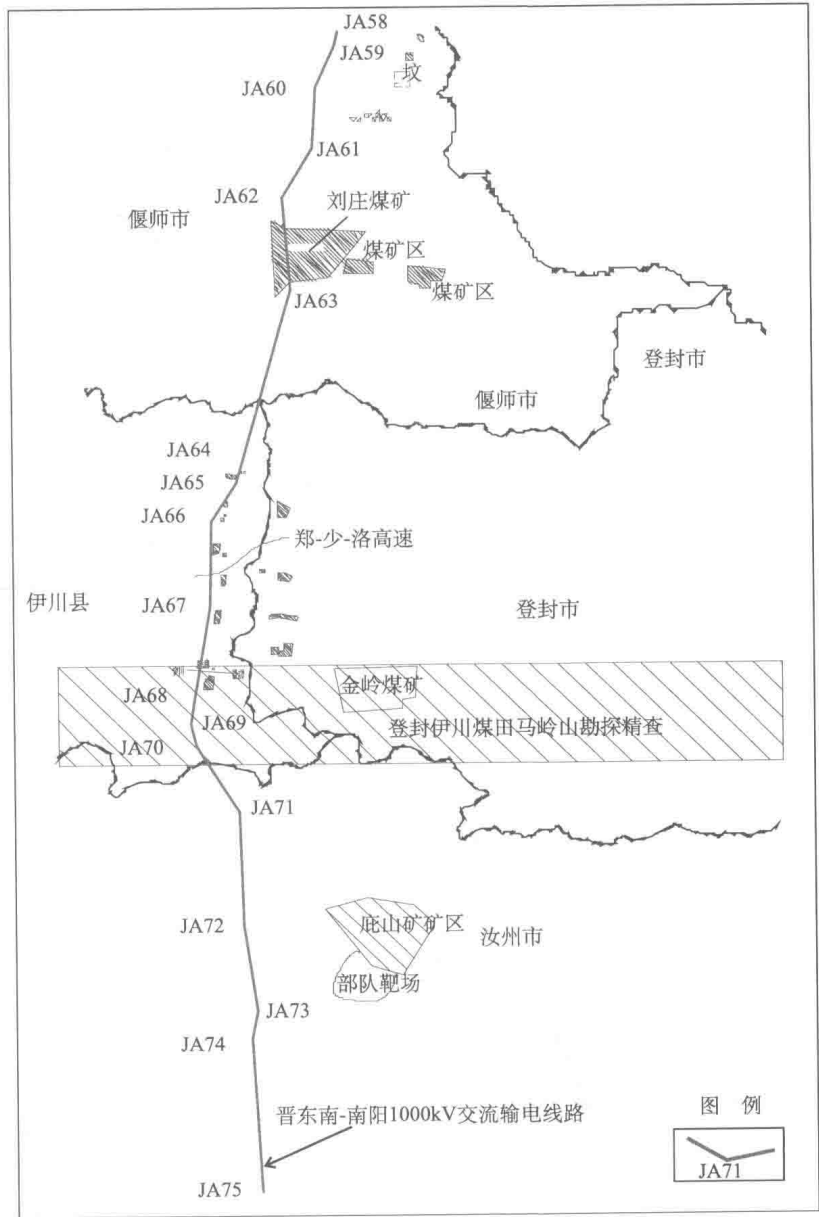


图 1.2 可研阶段河南段部分特高压线路路径示意图

特高压输电线路工程作为全国联网的骨干电网，线路运行要求安全可靠、万无一失，对线路途经的采空区如何进行准确的勘察、塔基变形规律如何、对塔基的稳定性采取何种手段和方法进行科学的分析与评价等，都是迫切需要解决的问题。

第二节 采空区对输电杆塔的影响

一、采动影响区及分类

1000kV 特高压输电线路山西段跨越了老采空区、正在开采区及规划开采压矿区等多

种采动影响区域，根据特高压线路建设期间途经山西段、河南段对特高压杆塔开采影响的形式，将采动影响区进行分类，详细划分见表 1.1。

表 1.1 采动影响区分类

类型	亚类	基本情况
采动影响区	采空区	开采已经完成，形成的新、老采空区
	开采区	煤矿正在开采的区域
	规划区开采区	规划、设计已经完成，未开采的区域
	压矿区	未做规划的煤田区域，输电杆塔基础直接压覆矿产

二、高压线路安全运行基本要求

高压输电线路由杆塔基础、拉线、接地装置、杆塔、导线、绝缘子、横担、线路金具等组成。开采沉陷必然引起采空区上方的输电线路杆塔地基及杆塔产生移动、变形，从而威胁到线路的安全运行。

《架空输电线路运行规程》（DLT-741—2010）第 5.3.9 条规定，直线杆塔的绝缘子串顺线路方向的偏斜角（除设计要求的预偏外）大于 7.5°，且其最大偏移值不应大于 300mm，绝缘横担端部偏移不应大于 100mm。

为确保输电线路的安全运行，规程规定杆塔的倾斜、杆（塔）顶挠度、横担的歪斜程度不应超过表 1.2 的规定。

表 1.2 输电杆塔的各类缺陷严重程度分级

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	1.5%	0.5% (倾斜度)	0.5%（适用于 50m 及以上高度铁塔）	0.5%
直线转角塔最大挠度		0.7%		
转角和终端杆 66kV 及以下最大挠度		1.5%		
转角和终端杆 110~220kV 及以下最大挠度		2%		
杆塔横担歪斜度	1.0%			0.5%

《架空输电线路运行规程》（DLT-741—2010）中的附录 A.1 规定，导线与地面的距离，在最大计算弧垂情况下，不应小于表 1.3 所列数值。导线与山坡、峭壁、岩石之间的净空距离，在最大计算风偏情况下，不应小于表 1.4 所列数值。

国家电网输电一次设备标准缺陷库（2011 年版）及输电线路缺陷、隐患分类标准（试行）规定，不同材料类型输电杆塔的各类缺陷按其严重程度，分为三个级别，分别是一般缺陷、严重缺陷和危急缺陷，见表 1.5。

表 1.3 导线与地面的最小距离

地区类别	线路电压/kV				
	66~110	220	330	500	750
居民区/m	7.0	7.5	8.5	14	19.5
非居民区/m	6.0	6.5	7.5	11（10.5）	15.5（13.7）
交通困难地区/m	5.0	5.5	6.5	8.5	11

注：500kV 线路对非居民区 11m 用于导线水平排列，10.5m 用于导线三角排列的单回路；750kV 线路对非居民区 15.5m 用于导线水平排列单回路的农业耕作区，13.7m 用于导线水平排列单回路的非农业耕作区；交通困难地区是指车辆、农业机械不能到达的地区。

表 1.4 导线与山坡、峭壁、岩石最小净空距离

线路经过地区	线路电压/kV				
	66~110	220	330	500	750
步行可以到达的山坡/m	5.0	5.5	6.5	8.5	11
步行不能到达的山坡、峭壁和岩石/m	3.0	4.0	5.0	6.5	8.5

表 1.5 输电杆塔的各类缺陷严重程度分级

部件	部件种类	部位	缺陷描述	分类依据	缺陷等级
杆塔	角钢塔 钢管塔 钢管杆	塔身	倾斜	全高 50m 以下	
				倾斜度 10‰~15‰	一般缺陷
				倾斜度 15‰~20‰	严重缺陷
				倾斜度 ≥20‰	危急缺陷
				全高 50m 以上	
				倾斜度 5‰~10‰	一般缺陷
	砼杆	塔身	倾斜	倾斜度 10‰~15‰	严重缺陷
				倾斜度 ≥15‰	危急缺陷
				倾斜度 15‰~20‰	一般缺陷
杆塔	大跨越塔			倾斜度 20‰~25‰	严重缺陷
				倾斜度 ≥25‰	危急缺陷
				倾斜度 5‰~10‰	一般缺陷
杆塔				倾斜度 10‰~15‰	严重缺陷
				倾斜度 ≥15‰	危急缺陷

三、开采沉陷移动变形对输电杆塔的影响

随着采掘工作面的推进，采空区塌陷使得地下开采沉陷波及地表，地表形成比采掘工作面大得多的采空沉陷区，称为地表移动盆地，在地表移动盆地的逐渐形成与发展过程中，采空区沉陷导致岩层与地表的移动变化，引起地表输电杆塔地基的变形破坏。一

般常用下面的定量指标描述地表移动的状态：地表下沉、水平移动、倾斜、曲率、水平变形、扭曲和剪切应变（何国清等，1991）。其中，扭曲和剪切应变在实际工作中评价应用较少。

（一）地表下沉对输电线路及杆塔的影响

采空区地表塌陷将引起输电杆塔基础下沉，基础下沉必然降低输电杆塔的有效高度，使得输电线路垂距变短。采空区相邻塔基的沉降量不同，将影响导线的近地距离，地下水位较低的区域将引起杆塔基础被泡、地基土软化等一系列问题。

输电杆塔要承受上拨和下压及水平剪力的共同作用，相邻基础之间的不均匀沉降，产生了多种组合的载荷，造成杆塔内部各构件产生较大的应力。当铁塔构件的内力在附加应力的作用下超过材料的许可应力时，将导致铁塔结构的破坏，引发线路运行安全事故。

（二）地表倾斜对输电线路及杆塔的影响

相对于地表下沉，地表倾斜对输电杆塔的影响是最危险的，采空区输电杆塔基础的不均匀下沉将引起杆塔和基础发生倾斜。通常情况下，顺着线路方向的线杆倾斜由于电线的张力与牵引力作用，线杆沿线路方向的倾斜对线路产生的危害，比线杆垂直线路方向的倾斜引起的危害小（成枢等，2003）。输电杆塔在自身重力作用下将增加较大的水平分力和倾覆力矩，影响输电杆塔和基础的稳定性。由于采空区不同位置高压线塔的倾斜值不一致，必然导致输电杆塔之间的档距扩大或缩小，档距的变化相应地引起线路弧垂、导线近地距离等发生变化，从而产生诸如悬垂串倾斜、横担变形、导线弧垂超标等安全问题（查剑锋等，2005）。

（三）地表水平移动对输电线路及杆塔的影响

地表水平移动会引起杆塔基础发生平移，如果线路上的相邻杆塔沿线路发生的水平移动量并不一致或水平移动方向不同，则会造成输电杆塔之间的档距增加或减小，引起弧垂发生变化，档距的变化在相邻档产生的不平衡张力导致悬垂串向导线绷紧的一侧偏斜。水平移动方向的不一致使铁塔、横担受到扭力矩作用，导致铁塔转角超限或是横担变形（查剑锋等，2005），而且还会引起杆塔基础的根开增大或者减小（郭文兵、郑彬，2011），根开的变化使高压线塔结构内部产生附加应力，极易使横担产生弯曲甚至破坏。

（四）地表水平变形的影响

水平变形包括拉伸变形和压缩变形两种。地表水平变形对输电杆塔的影响主要体现在以下两个方面：①郭文兵和郑彬（2011）的研究表明，随着地表水平拉伸变形值的增加，高压线铁塔内杆件的轴向压应力和拉应力均呈二次方关系增加；随着地表水平压缩变形值的增加，高压线铁塔内杆件最大压应力和最大拉应力均呈对数关系递增。②地表拉伸变形对高压线铁塔的影响大于地表压缩变形的影响；地表水平变形对高压线铁塔倾斜度及横担歪斜度影响相对较小。

（五）地表曲率的影响

地表曲率变形使得杆塔地基产生弯曲,受地表曲率变形的影响,杆塔将重新调整内部的应力状态,从而使输电杆塔产生附加应力。正曲率使得输电杆塔基础中间受力大,负曲率使得杆塔基础两端受力大,正负曲率均易造成杆塔地基产生裂缝,影响塔基的安全。

通过上述分析可以看出,考虑到高压输电线路是由导线连接的点状构筑物组成,高压线塔与地表接触面积较小,故地表水平变形、曲率变形对其影响程度较轻。对输电线路有明显影响的变形指标是下沉、倾斜和水平移动。下沉、水平移动及倾斜变形通过地基与输电杆塔基础的相互作用后改变了高压线塔的空间位置,进而引起诸如档距、悬垂串偏斜、弧垂等运行参数超标。

对采空区 1000kV 特高压线路输电杆塔塔基变形规律及稳定性进行研究,可为解决采空区杆塔地基勘察特高压线路路径优化、稳定性评价、预测及地基处理方案优化等诸多问题提供一些可行方案。

第三节 采空区勘察及原则

一、国内采空区勘察规范

关于采空区的探测,目前国内外以采矿情况调查、工程钻探、地球物理勘探为主,辅以变形观测。

西方等发达国家对采空区的探测以物探方法为主,国内对采空区的探测以往主要借助于钻探,但近年来国内也逐渐认识到应用工程物探方法探测采空区的重要性和优越性。在美国,采空区等地下空洞探测技术全面,电法、电磁法、微重力法、地震法等都有很高的水平。其中高密度电阻率法、高分辨率地震勘探技术尤为突出(孙忠弟,2000;童立元等,2004)。

国内近年来对地下采空区探测方面做了大量的工作,针对不同采空区类型采用了多种物探方法,如电法、电磁法、地震波勘探、微重力勘探、放射性勘探等均在实际工作中得到应用(郭彦民、冯世民,2006;王强等,2001;张建强等,2004)。特别是三维地震勘探的推广应用,以其独具的信息量大、分辨率高等优点,使得探测地下几百米深的直径几十米甚至更小的采空区成为可能。为此,近几年国内从事煤田地震勘探研究和生产的单位相继开展了采空区探测的专题应用研究。

采空区岩土工程勘察包括工程地质测绘、勘探、采矿情况调查、地表变形观测及矿井井下测量等相关工作。工程地质勘察的目的是查清线路沿线采空区的分布位置,确定物探、钻探探测范围,并为输电线路路径方案的选择提供依据。关于采空区勘察,国内有几部规范及规程对其一般性原则进行了规定,如《工程地质手册》(第四版)、《岩土工程手册》、《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)、《公路工程地质勘察规范》(JTGC20—2011)、《铁路工程地质勘察规范》(TB10012—2007)、《铁路工程不良

地质勘察规程》(TB10027—2012)。

《工程地质手册》(第四版),特殊地质条件勘察和评价中关于采空区勘察指出,采空区的岩土勘察工作,主要是搜集资料、调查访问、变形分析和岩土工程评价。主要查明以下内容:

(1) 矿层的分布、层数、厚度、深度、埋藏特征和开采层的上覆岩性、构造等。

(2) 矿层开采的范围、深度、厚度、时间、方法和顶板管理方法,采空区的塌落、密实程度、空隙和积水情况。

(3) 地表变形特征和分布,包括地表陷坑、台阶,以及裂缝的位置、形状、大小、深度、延伸方向及其与地质构造、开采边界、工作面推进方向等的关系。

(4) 地表移动盆地的特征,划分中间区、内边缘区和外边缘区,确定地表移动和变形的特征值。

《工程地质手册》(第四版)还对小窑采空区的勘察和评价提出了指导意见。

《岩土工程手册》第二十一章关于采空区勘察要求,采空区勘察主要应查明和预测下列内容:

(1) 地层岩性、地质构造和水文地质条件。

(2) 煤层的层数、厚度、倾角、埋藏深度、上覆岩层性质。

(3) 开采计划、开采方法、顶板管理方法、开采边界、工作推进方向和速度。

(4) 断层的露头位置、可能出现的台阶裂缝、塌陷坑的位置和大小。

(5) 有无老采空区和老采空区活化的可能性及其对地表的影响。

(6) 地表移动盆地特征,预测地表变形值:地表下沉、倾斜、曲率变形、水平变形和移动。

(7) 采空区附近的抽、排水情况及对采空区稳定的影响。

(8) 建筑场地的地形和地基土的物理力学性质。

(9) 建筑物的类型、结构及其对地表变形的适应程度、建筑经验。

对老采空区尚应通过调查访问和物探、钻探工作查明采空区的分布范围、采厚、埋深、充填情况和密实程度、开采时间、开采方式,评价上覆岩层的稳定性,预测残余变形的影响,判定作为建筑场地的适宜性和应采取的措施。

对现采空区和未来采空区尚应预测和计算地表移动和变形的各种参数,并根据地表变形值的大小和建筑物的容许值,判断对建筑物的危害程度,决定是否需要采取加固保护措施。

采空区勘察的物探工作宜根据物性条件和当地经验采用综合物探方法,如地震法、电法等。

《岩土工程手册》对小窑采空区的勘察和稳定性评价提出了相关要求。

《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)规定,采空区的勘察宜以搜集资料调查访问为主。要求查明的主要问题与《工程地质手册》(第四版)一致。《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)提出对老采空区和现采空区,当工程地质调查不能查明采空区的特征时,应进行物探和钻探工作。对现采空区和未来采空区,需计算预测地表移动

和变形的特征值时,可按现行标准《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》执行。该规范对采空区建筑场地的适宜性地段及非适宜性地段提出了一般性原则,对小煤窑采空区建筑适宜性地段及稳定性评价做出了具体规定。

《公路工程地质勘察规范》(JTGC20—2011) 7.8.2 节规定,采空区的勘察应查明下列内容:

- (1) 地层岩性、地质构造、水文地质条件、地震动参数。
- (2) 采空区的开采历史、规划、现状、方法、范围和深度。
- (3) 采空区的井巷分布、断面尺寸及相应的地表位置。
- (4) 采空区的顶板厚度、地层及其岩性组合,顶板管理方法及稳定性。
- (5) 地下水的类型、分布、水位及其变化幅度,地下水开采对采空区稳定性的影响。
- (6) 有害气体的类型、分布特征和危害程度。
- (7) 地表沉陷、裂缝、塌陷的位置、形状、规模、发生时间。
- (8) 采空区与路线及构筑物的位置关系、地面变形可能影响的范围和避开的可能性。

《公路工程地质勘察规范》(JTGC20—2011) 7.8.7 节规定:

当采空区的开采资料齐全,能说明采空区的位置、埋深、变形特征及其发展趋势和稳定条件时,宜布置物探,钻探进行验证。

(1) 对开采巷道或坑洞分布复杂,无法进入坑洞内进行调查的采空区,应根据地面塌陷变形情况,开展综合物探,结合挖探、钻探进行综合勘探。

(2) 宜采用地震勘探、地质雷达、高密度电法,孔间 CT 等与钻探结合进行综合勘探,物探测线宜垂直采空巷道的轴线方向布置。对开采资料匮乏或无规划开采的小型采空区勘探线宜按网格状布置。

《铁路工程地质勘察规范》(TB10012—2007) 涉及采空区勘察的内容,在其 5.7.4 节人为坑洞部分有下列叙述:

(1) 对有规划、有设计、有计划开采的矿区宜采用矿区设计、实施资料、实地测量资料与区域地质资料综合分析的方法,确定采空层位及范围、提出稳定性评价和工程措施意见、预留保安矿柱的宽度等。

(2) 古窑、小窑采空区宜采用区域地质资料分析、实地调查访问、坑洞测量与勘探相结合的方法,查明开采情况、开采的层位、坑道的宽度及高度、顶板岩体性质、采空特征、地面变形情况,提出稳定性评价和工程措施意见。

(3) 时间久远的其他人为坑洞地带宜采用区域地质资料、实地广泛调查访问及勘探相结合的方法,物性条件反映较好的地区宜采用物探指导钻探,以确定人为坑洞分布的层位及具体位置,提出稳定性评价及工程措施意见。

《铁路工程不良地质勘察规程》(TB10027—2012) 10.3.2 节强调,人为坑洞地区地质调查应包括下列内容:

(1) 收集人为坑洞区域地质资料(含矿产地质资料)、相关政府主管部门的矿产资源规划资料、矿区规划资料、矿区地质勘察资料(地质勘察报告、地质图、地质剖面图及综合柱状图)。