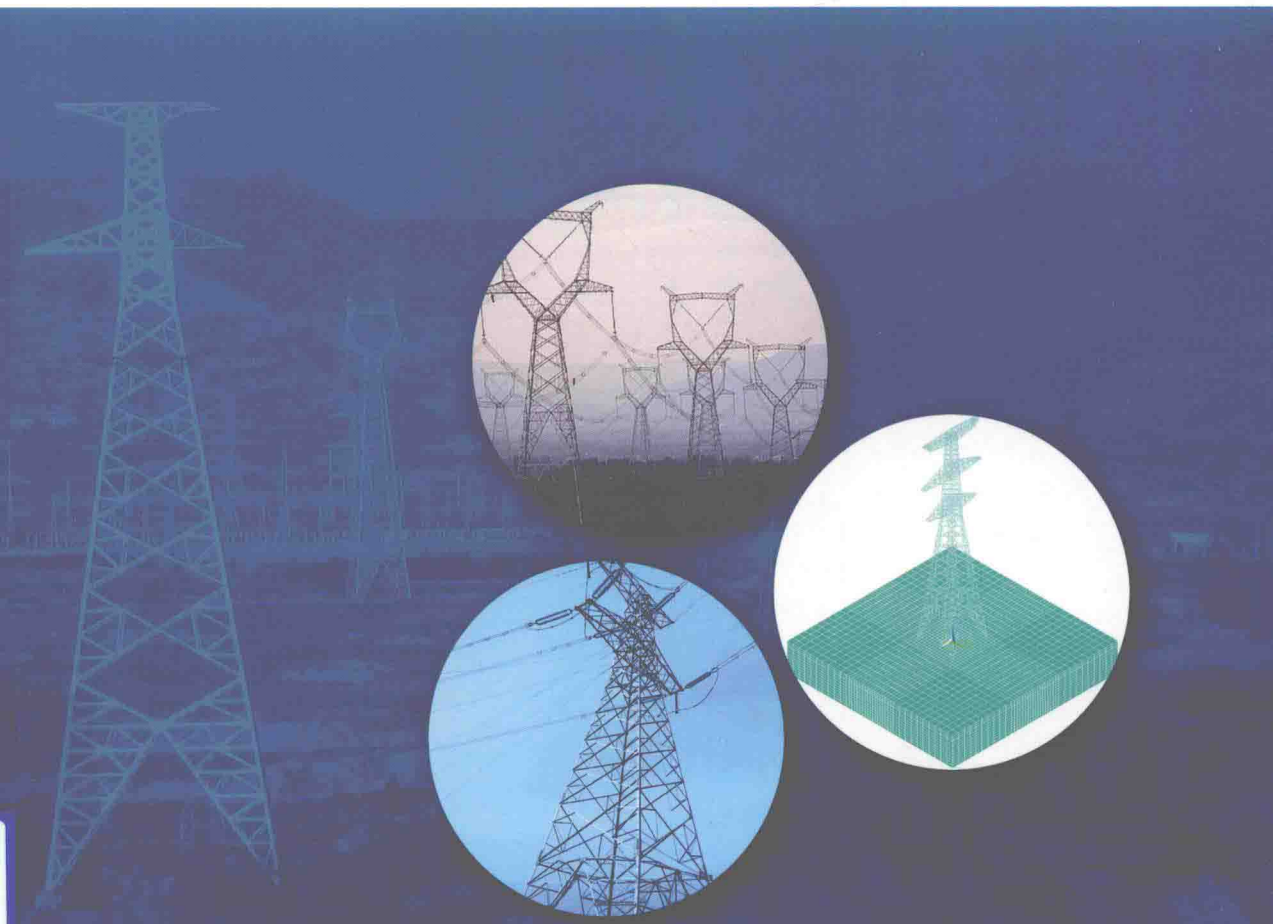
Caidongqu Chaogaoya Shudian Tieta

Pohuai Jili Yu Bianxing Kongzhi Jishu Yanjiu

采动区超高压输电铁塔

破坏机理与变形控制技术研究

舒前进 安彦斌 李庆涛 著



中国矿业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

采动区超高压输电铁塔破坏机理与变形控制技术研究

舒前进　安彦斌　李庆涛　著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书进行了螺栓连接角钢节点滑移变形的试验研究，提出了一种描述铁塔镀锌角钢螺栓连接的滑移变形的四阶段线性简化力学模型；进行了角钢交叉斜材稳定承载力试验研究，建立了考虑两杆侧移和扭转双重约束作用的计算模型，改进了其稳定承载力的计算方法；分析了在地表变形下节点滑移对铁塔受力和变形的影响规律；研究了复合防护板基础的抗变形性能，提出了其合理厚度的取值方法；提出了采动区输电铁塔复合防护板基础考虑弹性地基土共同作用的设计理论，分析了防护板受力和变形的影响因素；提出了采动区输电铁塔结构安全性的评价方法，进行了工程应用；对比分析了增设附加横隔和替换杆件等方法对铁塔极限抗地表变形性能的影响规律。

图书在版编目(CIP)数据

采动区超高压输电铁塔破坏机理与变形控制技术研究/
舒前进，安彦斌，李庆涛著. —徐州：中国矿业大学出版社，2018.12

ISBN 978-7-5646-4334-8

Ⅰ. ①采… Ⅱ. ①舒… ②安… ③李… Ⅲ. ①采动区—特高压输电—输电铁塔—破坏机理—研究②采动区—特高压输电—输电铁塔—变形—控制—研究 Ⅳ. ①TM752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 297530 号

书　　名　采动区超高压输电铁塔破坏机理与变形控制技术研究
著　　者　舒前进　安彦斌　李庆涛
责任编辑　杨　洋
出版发行　中国矿业大学出版社有限责任公司
（江苏省徐州市解放南路　邮编 221008）
营销热线　(0516)83884103　83885105
出版服务　(0516)83995789　83884920
网　　址　http://www.cumtp.com　**E-mail**:cumtpvip@cumtp.com
印　　刷　江苏凤凰数码印务有限公司
开　　本　787×1092　1/16　**印张** 13　**字数** 325 千字
版次印次　2018 年 12 月第 1 版　2018 年 12 月第 1 次印刷
定　　价　48.00 元

（图书出现印装质量问题，本社负责调换）

前　言

采动区地表沉陷一直是影响输电线路安全运行的重大隐患。随着我国电网建设的快速发展，线路走廊日趋紧张，途经采动区的问题日益突出，已严重影响输电线路建设和安全运行。特别是随着超(特)高压输电线路的建设，人们对采动区输电线路的安全性越来越关注。因此，开展采动区超高压输电铁塔破坏机理与变形控制技术的研究具有重要意义。本书的主要研究内容如下：

(1) 进行了典型截面镀锌角钢螺栓连接滑移变形的试验研究，提出了一种新的描述镀锌角钢螺栓连接的滑移变形的四阶段线性简化力学模型，给出了连接滑移系数、初始滑移变形值、弹性挤压刚度以及极限滑移变形值等模型参数的取值方法；提出了一种角钢交叉斜材稳定承载力试验装置，进行了典型角钢交叉斜材稳定承载力的试验研究，建立了同时考虑两杆侧移和扭转双重耦合作用的力学计算模型，对交叉斜材的稳定承载力计算方法和相应长细比修正系数提出了改进意见；建立了采动区输电铁塔考虑螺栓连接节点滑移的有限元整体计算模型，分析并揭示了节点滑移对铁塔受力和变形的影响规律，确立了输电铁塔根开变化限值的判断准则，获得了典型地表变形作用下铁塔根开变化的允许限值。

(2) 建立了考虑铁塔结构与采动地基和基础协同作用的有限元整体计算模型，分析了典型地表变形作用下铁塔结构受力变形和基底反力分布变化规律，研究了独立基础和复合防护板基础的抗变形性能，获得了复合防护板厚度与铁塔抗变形性能的相关关系，提出了复合防护板厚度的取值方法；提出了采动区输电铁塔复合防护板基础的设计理论，建立了考虑铁塔复合防护板基础与弹性采动地基的协同作用理论计算模型，针对典型算例研究了复合板厚度、地基抗力系数和地表最大下沉值等因素对防护板基础受力和变形的影响规律，开发完成了采动区输电铁塔复合防护板基础内力和位移的计算程序。

(3) 提出了利用关键斜材达到稳定承载力时的根开变化限值作为铁塔是否安全可靠的判断准则，建立了采动区输电铁塔的安全性评价方法，对典型采动区输电铁塔的安全性进行了科学评价；基于有限元分析，研究了增设附加横隔和替换杆件的方法对提高输电铁塔结构的极限抗地表变形性能的影响规律。

在撰写本书过程中，得到了山西省电力公司王永安高工，中国能源建设集团山西省电力勘测设计院吕建国高工、阎涛高工、白俊平高工、蒙春玲高工，中

国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司林致添高工，国网江苏省电力公司徐州供电公司张云飞高工，国网北京经济技术研究院徐州勘测设计中心林康立高工，中国电力科学研究院杨风利高工，中国矿业大学王东权教授、郭广礼教授等领导、专家的帮助和指导。硕士研究生叶盛、谭晓哲和李青在数据整理和文字录入等方面付出了辛勤劳动。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者经验和水平有限，书中难免存在疏漏和欠妥之处，敬请广大读者批评指正。

作　者

2018 年 10 月于徐州

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

1　绪论 …… 1
1.1　研究意义 …… 1
1.2　国内外研究现状 …… 2
1.3　存在的问题和不足 …… 14
1.4　本书研究内容和技术路线 …… 15

2　输电铁塔镀锌角钢螺栓连接节点滑移变形的力学模型 …… 19
2.1　引言 …… 19
2.2　螺栓连接角钢节点滑移变形的试验研究 …… 20
2.3　镀锌角钢螺栓连接节点的滑移变形力学模型 …… 32
2.4　本章结论 …… 41

3　输电铁塔角钢交叉斜材的稳定承载力研究 …… 43
3.1　引言 …… 43
3.2　输电铁塔角钢交叉斜材稳定承载力的试验研究 …… 44
3.3　输电铁塔角钢交叉斜材稳定承载力的理论分析 …… 51
3.4　输电铁塔角钢交叉斜材稳定承载力的有限元模拟分析 …… 60
3.5　采动区输电铁塔角钢交叉斜材稳定承载力的计算方法 …… 72
3.6　本章结论 …… 73

4　考虑节点滑移时采动区输电铁塔的抗变形性能研究 …… 75
4.1　引言 …… 75
4.2　输电铁塔考虑节点滑移的整体有限元计算模型 …… 75
4.3　节点滑移对输电铁塔抗变形性能的影响规律 …… 78
4.4　采动区输电铁塔考虑节点滑移的根开变化限值 …… 82
4.5　本章结论 …… 85

5　采动区输电铁塔抗变形基础的作用机理及其设计理论研究 …… 86
5.1　引言 …… 86
5.2　有限元模型的建立及其计算方法 …… 86
5.3　独立基础的抗变形性能研究 …… 94

5.4 复合防护板基础抗变形性能研究及其优化分析 …… 98
5.5 两种基础型式的影响对比 …… 119
5.6 采动区输电铁塔复合防护板基础的设计理论研究 …… 121
5.7 本章结论 …… 142

6 采动区输电铁塔安全性评价方法及其工程应用 …… 144
6.1 引言 …… 144
6.2 采动区输电铁塔安全性评价方法 …… 144
6.3 背景工程的输电线路铁塔概况 …… 145
6.4 研究区输电线路铁塔的地表沉陷变形预计 …… 148
6.5 沉陷区输电铁塔抗变形性能 …… 160
6.6 研究区输电线路安全性评价 …… 163
6.7 本章结论 …… 169

7 采动区输电铁塔抗地表变形性能的增强技术研究 …… 170
7.1 引言 …… 170
7.2 附加横隔控制铁塔采动变形技术研究 …… 170
7.3 杆件替换法增强铁塔抗变形性能技术研究 …… 178
7.4 本章结论 …… 184

8 主要结论和展望 …… 185
8.1 主要结论 …… 185
8.2 创新点 …… 187
8.3 展望 …… 188

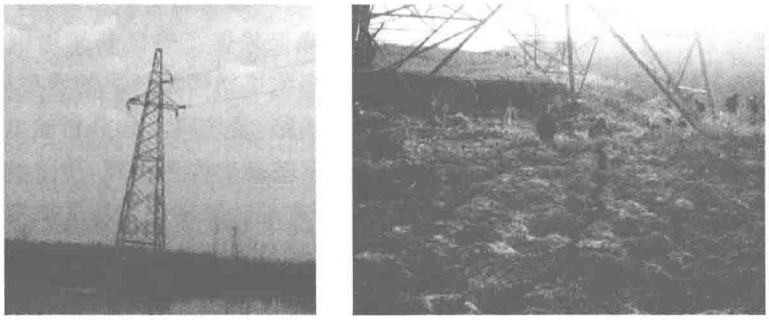
参考文献 …… 189

1 绪 论

1.1 研究意义

我国是世界上最大的煤炭生产国，煤炭资源在我国一次能源消费中长期占据绝对主导地位。煤炭开采在提供大量煤炭资源的同时，也使地表产生移动和变形，给影响区内的地面建(构)筑物(房屋、铁路、桥梁、输电塔架、输油管道及其他构筑物等)带来严重危害，引起结构位移、附加变形和附加应力，改变它们的工作状态和承载性能，甚至会导致结构破坏和整体倒塌，造成严重的人员伤亡和财产损失[1-10]。

近年来，随着我国“变输煤为输电”和“西电东送”等能源方针的深入执行，越来越多的坑口电厂将建设在煤炭主产区内，造成许多高压和超(特)高压输电线路将不可避免途经采煤沉陷区。比如，我国第一条特高压示范线路“晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 交流输电线路”就有长达 98.1 km 线路建设于山西省和河南省的煤炭规划区和采空区上方[11]。其他已明显受到不利影响的采动区线路也有多处，如山西省的晋城变—临汾变 500 kV 输电线路工程、晋城阳城北 500 kV 工程(阳城北—直流换流站)、内蒙古省内的乌海伊公线工程、贵州省内的 220 kV 输电线路鸡Ⅰ回工程、陕西省内西安地区的 110 kV 北西线工程、江苏省内的 500 kV 徐连输电工程等[12-17]。部分典型的采动区输电线路的地质灾害案例见图 1-1 及表 1-1[12]。



(a) (b)

图 1-1 采动区输电线路典型灾害

(a) 基础不均匀沉陷导致铁塔倾斜；(b) 地表开裂使铁塔根开增大

目前，途经煤矿采空区的输电线路的电压等级大大提高，在山西省和江苏省的采煤影响区内建设的多条输电线路均为 500 kV 以上的超(特)高压输电线路，例如我国已建设完成的“晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 输电线路”和正在建设的“锡盟—南京 1 000 kV 特高压

输电线路”工程等(锡林郭勒盟简称锡盟)。这些 500 kV 和 1 000 kV 高电压等级输电线路的送电负荷远远超出 220 kV 和 110 kV 的线路,一旦发生事故,将对整个系统的稳定和受端电网造成灾难性冲击,这对线路的安全可靠运行提出了更高的要求。

表 1-1　　典型的采空区输电线路地质灾害

序号	线路名称	时间	采空区地质灾害	破坏特征
1	500 kV 阳淮Ⅱ回	1999 年 8 月	某铁塔整体向北侧移动约 685 mm	整体位移
2	500 kV 阳淮Ⅲ回	1999 年 8 月	某塔整体向北侧位移 85 mm,塔基被一裂缝斜插穿过,致使塔基不均匀沉降,上部塔材变形,塔腿横隔材弯折,基础顶面沉降差达 141 mm。根开增大最大值 97 mm	塔基不均匀沉降,铁塔倾斜,塔材屈曲变形
3	500 kV 阳东一线	2005 年 5 月	某铁塔倾斜,顺线路方向向大号侧倾斜 200 mm(4.88‰),横线路中线挂点向左倾斜 387 mm(9.44‰)	铁塔倾斜
4	500 kV 晋临线	2006 年 11 月	某铁塔沿线路方向右地线支架向小号侧倾斜 529 mm,左地线支架向小号侧倾斜 375 mm,横线路中线挂点向左倾斜 688 mm	铁塔倾斜
5	220 kV 新马二回	2003 年 3 月	某铁塔基础出现不均匀沉降及严重倾斜,导致架空地线张力过大,发生断线事故,停电时间超过 40 h	铁塔倾斜,地线断线
6	220 kV 漳长一二回	2004 年 5 月	多个铁塔不均匀沉降,倾斜严重,导地线弧垂严重不平衡,短时大风使地线发生舞动,造成地线对导线放电故障	铁塔倾斜,风偏放电
7	500 kV 托源线	2003 年 11 月	3 个铁塔严重倾斜和歪扭,基础顶面最大高差达 346 mm	铁塔严重倾斜、歪扭

综上所述,随着我国电力建设的加速发展,输电线路途经煤矿采动影响区的问题必将日益突出,已经严重影响输电线路的安全运行。如何确保采煤沉陷区新建输电铁塔和已有输电铁塔的结构安全可靠和输电线路的安全运行,是当前迫切需要解决的重要研究课题。

因此,针对建设和运行在采煤影响区内的输电线路,系统科学地分析输电铁塔在地表变形作用下的抗变形性能;揭示采动区输电铁塔抗变形基础的作用机理,建立抗变形基础的设计理论;提出采动区输电铁塔的安全性评价方法;研究采动区输电铁塔的抗变形性能增强技术,有效预防采动地表变形诱发线路工程事故,对于确保输电线路乃至整个电网系统的安全可靠运行,都具有重要的理论意义和广泛的工程应用价值。

1.2　国内外研究现状

采动区输电线路保护是一门综合学科,需综合结构工程、地基基础工程、输电线路设计与运行工程等多个学科的知识和技术进行系统研究,方能取得理想效果。因此,本书相关的研究将充分参考国内外采动区各种类型建(构)筑物的建设和保护的成功经验,主要涉及采动区地表变形及其对地表建筑的影响、非采动区输电铁塔的受力性能及其计算理论、采动区

输电铁塔及基础的作用机理及其变形控制技术等方面。

1.2.1 采动区地表变形及其对地表建筑的影响

1.2.1.1 采动变形预计理论与实践

早在19世纪中叶，地下采煤引起的地表塌陷及其给地面建(构)筑物带来的严重损害，已经引起当时西方学者的关注。

19世纪30年代至40年代，德国就有文献资料表明，当时可以根据实测资料分析地表移动规律，并表示为移动变形曲线[4,6]。到20世纪初，德国和波兰等国家已经开始建立地面观测站，对采矿地表移动进行系统观测，并形成了开采沉陷学这一专门学科[4,6]。

20世纪30年代，苏联也开始了矿山地表移动和变形的实地观测工作。1936年，成立专门的矿山测量研究所，统一组织和领导全国矿区的实地观测和研究工作[1,4]。1947年，苏联学者阿维尔申[1]发表《煤矿地下开采的岩层移动》，确立了水平和倾斜煤层开采条件下地表移动矢量的垂直分量和水平分量的微分关系式。1958年苏联出版了《岩层与地表移动》，首次提出采空区上方岩层移动“三带”理论和地表移动变形的典型曲线法[10]。20世纪50年代，波兰学者提出了用于地表移动变形预计的布德雷克—克诺特方法、柯赫曼斯基方法和李特维尼申方法[4,6,10]。

我国关于煤矿开采沉陷的研究工作是从20世纪50年代开始的。1954年，开滦矿务局林西矿设置了我国第一个采煤地表移动观测站[6,10]。50年代后期，我国开滦、淮南、峰峰、新汶、阳泉、本溪、鹤岗、抚顺、阜新等矿区，先后建立了观测站，积累了大量的实测资料，形成了经验公式法、剖面函数法、影响函数法、解析模型法、物理模型法、地表非连续变形预报方法、矿山沉陷模型识别和模型优化、曲面分布形式煤层开采地表移动预报方法等开采沉陷预计理论[6,10]。同时，随着有限元理论和计算机技术的发展，又提出了各种地表移动预计方法和配套计算软件。

在开展地表移动规律的观测和分析研究的同时，我国积极开展了“三下”采煤的试验和工程应用。1978年至1982年期间，湖南资江煤矿与中国煤炭科学研究院唐山分院，在国内首次开展了新建抗变形建筑群下采煤的试验[18-19]。其后，我国在阳泉、霍州、平顶山、兖州、徐州、峰峰、开滦、枣庄、皖北等十多个矿区又相继进行了塌陷区建房的工程实践和科学研究。中国煤炭科学研究院唐山分院、中国矿业大学等单位开展了煤矿采动区房屋、铁路桥、公路桥、公路建设的基础理论和相关的技术研究，并进行了工程实践，取得了成功经验[4,6]。

宋新华等[20]研究发现，在同等的开采条件下，地形条件的区别将导致地表移动和变形规律的明显变化。查剑锋等[21]基于数值模拟方法，分析了煤矿矸石充填体的非线性变形特征对上覆岩层的移动和变形的影响规律，分析结果表明：在充分采动后，采用线弹性模型和双屈服模型得到的地表沉陷位移特征基本一致；而在非充分采动时，采用弹性模型和双屈服模型分析得到地表移动与变形极值、地表下沉速度等方面均存在明显差异。

上述理论研究和工程实践为采煤沉陷区的地表变形预计提供了基础，为采动区输电线路的科学规划和安全性评价奠定了前提条件。

1.2.1.2 采动区地表变形及其对地表建(构)筑物的影响

近年来，我国针对采动区地表变形的危害开展了多方面的科学研究，取得了关于砌体结构、桥梁结构和民用钢结构(此处不包括输电铁塔)等各种结构型式在采动区地表变形作用下的受力变形规律，对其破坏机理取得了一定的认识，提出了多种型式的抗变形技术措施，

取得了较好的效果。这些成果对本书的相关研究具有重要的参考价值。

(1) 采动区砌体结构抗变形性能研究现状

于广明[22]建立了煤层、岩层、地基、基础和上部砌体结构的整体力学模型，计算分析表明，受采动影响，建筑物墙体中出现了主拉应力集中区和剪应力集中区。仲继寿[23]研究了在正交地表变形和斜交地表变形作用下砌体结构房屋的地基反力分布规律，提出了对采动区砌体结构房屋进行抗采动和抗震双重保护的概念。乔志春[24]通过相似比例模型试验和有限元分析，研究了砌体结构与基础和地表土的共同作用规律，得到了地表变形与基础变形的相关关系，得到了地表变形作用下墙体和基础的附加内力分布规律。袁迎曙等[25,26]进行了移动地表土与基础底接触界面的剪切变形试验、砌体与地基基础共同作用试验研究，建立了土体与基础底面的接触力学模型，得到了地表变形与砌体结构及其钢筋混凝土条形基础变形的相关关系，发展了双重保护体系和相应的技术措施。谭志祥等[27]对采动区建筑物的移动变形及附加应力进行了有限元模拟研究，认为增大建筑物的抗变形能力，重点应对建筑物下部基础进行加固，同时适当软化地基可以减小建筑物的附加应力。鲁建琴[28]探讨了结构骨架构件、砖墙的强度等级、基础圈梁、檐口圈梁和构造柱等抗变形结构构件，对采动区砌体结构构件受力和砖墙应力的影响规律。舒前进[29]和张先扬[30]进行了典型砖混房屋承重墙体的比例模型抗地表变形性能试验和有限元模拟分析，探讨了二次曲率变形作用下砖墙的受力变形规律和累积损伤作用，对比分析了滑动层、圈梁和构造柱等构造措施对砌体建筑的抗地表变形性能的作用。段敬民等[31]分析了煤炭开采作用下岩体附加应力重分布规律，提出一种新型的自平衡抵抗大变形的住宅体系，发展了采空区房屋的设计方法。

(2) 采动区道路和桥梁抗变形性能研究现状

杨洋[32]采用有限元方法研究了不同曲率半径的地表沉降对桥体和地表土的影响，得出变形缝宽度、基底附加应力、地表沉降曲线、土体孔隙比和最大孔隙水压力的变化规律。谭志祥等[33]根据地表及桥梁移动变形观测资料，总结了地表和铁路桥移动变形规律，得出了地表下沉、倾斜、水平变形与桥梁对应的变形之间的经验表达式，得到了桥梁缝隙变化量与桥梁水平变形的相关关系。于广云[34-35]、夏军武[36]对不同开采方式引起的地表沉陷和水平移动的变化规律进行数值模拟和理论分析，研究了铁路桥因地表变形产生的附加内力的变化情况，提出了在地表大幅度不均匀沉陷的情况下针对铁路桥的治理技术。

此外，张继伟[37]、王丽娟等[38]、丁振武[39]采用有限元分析技术研究了煤矿开采对地面公路和矿区铁路桥梁的影响规律。前者重点研究了多煤层多次开采的叠加作用对地面公路的影响规律，后两者则主要研究开采沉陷引起地表水平位移和竖向位移的动态发展规律。

(3) 采动区框架结构(钢筋混凝土框架和钢框架)抗变形性能研究现状

乔志春等[40]在地表变形预计的基础上，运用 SAP84 软件，对老采空区上方的某选煤厂的混凝土框架结构厂房进行了有限元模拟分析，提出了抵抗不均匀沉降的抗变形措施。胡敬礼[41]通过大型采动台试验，得到了轻钢结构门式刚架在地表负曲率条件下的内力、位移变化规律，利用 ANSYS 有限元分析软件，模拟其在地表拉伸、压缩、倾斜、正曲率和负曲率变形条件下的内力和位移变化规律，探讨了不同的保护措施的适用效果。夏军武等[42-44]建立了采动区地基—条形基础—框架结构共同作用的力学模型，推导出计算采动区建筑物移动变形和附加内力的计算公式。根据相似模型试验，研究了平面钢框架结构在采动地表变形作用下的附加内力和附加变形的演化规律。谢伟等[45-46]分别对有填充墙板和无墙板的

需要全本请访问 www.ertongbook.com

双跨两层钢框架进行在地表变形作用下的模型试验和有限元分析。结果表明，两种构件在不同的地表变形下对框架响应的影响程度不同，在不同地表变形区可通过布置不同的构件以改善钢框架的抗地表变形性能。

(4) 采动区的地基基础保护理论和技术研究现状

我国关于采动区建筑物抗变形基础及其技术措施的研究开始于20世纪70年代。1980年前后，我国部分学者在吸收苏联和波兰等国家在煤矿建筑物保护成功经验的基础上，在国内部分煤矿成功进行了一系列村庄下采煤的工程实践。1982年，中国煤炭科学研究院唐山分院与湖南资江煤矿[9,47]，综合运用了刚性结构和柔性结构等建筑措施，在采动区上方建设了砖混结构综合性抗变形建筑群，在采动区建筑物的地基基础的设计和处理、变形缝的设置等抗变形技术措施等方面进行了成功实践。该项目成果在阳泉、南桐、平顶山、铁法、攀枝花、七台河、徐州等矿区得到了广泛的推广和改善提高，同时在建筑物选址、煤矿开采控制、建筑物抗变形技术措施等方面也取得了较大的进展[10]。

周国铨[9,47]认为建筑物是位于弹性地基上的一个刚性体，将墙体当作承受上部载荷和地基土反力的弹性地基梁，推导出了地基反力表达式和墙体附加内力计算式，为砌体结构基础的内力计算提供了理论依据。探讨了抗变形基础的技术措施及其抗采动能力。刘金辉[48]通过在矸石充填塌陷坑上建设抗变形建筑物的成功实践，总结了矸石地基的处理方法及在矸石地基上建设抗变形民用住宅的设计方法和技术措施。刘学林等[49]进行了原地重建抗变形建筑物的建筑群下采煤的实践，应用并改进了一种在毛石基础和基础圈梁之间加设滑动层的柔性保护措施。顾少华等[50]根据大量现场试验数据，认为在煤矿采动区地表压缩变形与负曲率变形条件下，基础在地基中的切入量及切入曲线不仅与地表曲率变形和上部荷载有关，还与地表水平变形的性质和大小有关。

此外，仲继寿[23]、张勇[51]、张贵双[52]等在采动区民房的抗变形技术措施和采动区建筑物的地基处理等方面也进行了一些研究。

采动区地基、基础及其上部结构的共同作用一直是采动区建筑物保护研究领域的重点和难点。20世纪80年代以来，我国学者相继开展了一些理论分析和数值模拟研究。吴戈[53]假定地基反力呈抛物线形分布，推导了在地面出现正、负曲率变形时，砌体结构建筑物及其基础产生的附加弯矩和附加剪力。研究表明，正负曲率变形作用下的计算公式和临界半径均是不同的；但在全面接触条件下，最终的弯矩和剪力当曲率半径值相同时，其结果绝对值相同但符号相反。杨刚等[54]通过墙体有限元分析发现，在基础和墙体之间设置滑动层，可显著减小墙体圈梁的应力，并对不同滑动层措施进行了对比分析。刘长文等[55]对地基基础共同工作的计算公式进行了推导，建立了地基与基础接触面变形协调、相对滑动和脱离接触约束的三维有限元计算模型。邓喀中等[56]研究了采动区建筑地基、基础的相互作用及地基反力的影响规律，认为曲率半径对地基、基础相互作用的影响很大，是对地基反力影响最大的因素，建筑物基础曲率是导致建筑物附加内力的真正原因。谭志祥[57]建立了采动区建筑物地基、基础和结构的共同作用力学模型，提出了采动区建筑物附加地基反力和墙体附加应力的计算理论和方法。夏军武等[44]建立了采动区框架结构与地基和独立基础的共同作用计算模型，从理论上揭示了建筑物位于下沉盆地不同位置时地表变形与建筑物附加变形和附加内力的关系，并推导出计算采动区建筑物附加变形和附加内力的计算公式，大大提高了采动区框架结构设计的理论水平。

试验研究是进行采动区建筑物保护研究的重要手段。然而限于采动区建筑物受力情况的复杂性和试验条件的不足，已有研究仍以物理相似比例模型试验为主。中国矿业大学在20世纪90年代成功研制国内首个建筑物大尺寸抗变形试验台，其后相关学者利用该试验台进行了一系列比例模型试验，对采动地表变形作用下地基—基础—上部结构的共同作用进行了有益的探索。肖跃军[58]通过砌体结构比例模型试验，得到了在水平拉伸位移作用下砌体结构试验模型的顶部、底部水平位移的对应关系，并证实了地基反力不随地基底面不均匀水平位移的变化而变化的规律。秦杰[59]通过一组砖墙在地表曲率变形作用下的比例模型试验，取得了砖墙与其下部条形基础变形与地表曲率变形的相互关系。舒前进[29]进行了2组矸石地基二层砖混民房外纵墙的1/2比例模型试验研究，取得了抗变形柔性基础的基底反力分布随着地表曲率变形的变化规律。

上述已有的关于砌体结构、桥梁结构、钢结构在采动地表变形作用下的影响规律，在研究方法和理论推导的思路方面均为本书的研究提供了有益的参考。

1.2.2 非采动区输电铁塔的受力性能及其计算理论

输电线路是我国的生命线工程，主要由输电铁塔、导线(地线)、变电站等结构及其他附属构件组成，其中输电铁塔的受力性能是影响输电线路安全稳定运行的关键因素。

输电铁塔的结构形式随线路电压等级、沿线地形、施工运行条件等各种因素而变化，形式繁多。在实际运行过程中输电铁塔所受到的载荷也多种多样，如铁塔在正常运行情况下受到的载荷主要有导线自重、风荷载、覆冰作用和气温变化的影响等，在这些条件下铁塔都应该有足够强度以保证输电系统的正常运行。而在另外一些特殊情况下(如导线断裂时)，铁塔也应该有足够的强度储备，以防止由于断线引起的进一步严重破坏。

因此，国内外学者对输电铁塔的设计与维护非常重视，进行了大量研究，并取得了丰硕的成果。本节主要对非采动区输电铁塔的研究现状进行综述，并主要从以下四个方面分别进行阐述：(1) 输电铁塔的结构计算方法及构件承载力；(2) 输电铁塔在风、冰(雨)荷载作用下的静动力特性研究；(3) 输电铁塔在地震作用下的动力特性研究；(4) 输电铁塔结构的静动力特性的试验研究。

1.2.2.1 输电铁塔的结构计算方法及构件承载力

(1) 输电铁塔角钢构件的受压承载力

角钢作为输电铁塔的主要构件，在工程设计和实践中应用广泛。

对于角钢承载力的研究，国外从20世纪50年代就开始了比较系统的研究。研究重点集中于角钢的轴心受压或者单个几何轴受弯的理论分析和试验研究。Bauld[60]、Haaijer[61]、Holston[62]和Zureick[63]等采用不同的理论分析，得到角钢或者关于弱轴以弯曲屈曲模式失稳，或者关于主轴弯曲屈曲的同时绕纵轴扭转的弯扭屈曲失稳。

国内针对角钢压杆承载力的系统研究是从1980年前后才开始的。李开禧等[64-65]采用逆算单元长度法编制相应的有限元程序，对各种形状截面的钢轴心压杆和偏心压杆在参与应力、初弯曲等因素影响下的临界力进行了大量计算，提出以108条曲线作为归纳轴心压杆柱子曲线的依据，推荐165条曲线作为拟定面内相关公式的基础。沈祖炎等[66-67]分析了轴心受压单角钢和单面连接单角钢压杆的极限承载能力，并得到了轴心受压等肢和不等肢单角钢压杆和在端部具有约束的单面连接角钢压杆的 φ—λ 曲线。陈骥[68]指出单轴对称截面轴线受压构件绕截面对称轴计算时，应先将截面对称轴的弯扭屈曲荷载等效于弯曲屈曲荷

载，导出弯扭屈曲换算长细比，而后将此构件视作发生弯曲屈曲按照 b 类截面进行计算。曹磊等[69]认为《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)对于单角钢的计算偏于保守，而《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2002)只是部分适用，并给出了修正长细比的经验值表达式。陈绍蕃[70]认为单轴对称角钢的设计方法宜采用换算长细比法。郭兵[71]根据弹性稳定理论和角钢截面特征规律，推导了等边单角钢的扭转屈曲换算长细比和弯扭屈曲换算长细比。刘红燕[72]利用有限元方法分析了剪切型螺栓连接角钢构件在一端单肢连接，另一端双肢连接时的极限承载能力，发现现行规范中大长细比杆件承载力使用不够充分，小长细比杆件设计又不够安全，并改进了长细比修正系数。

在现有的输电铁塔设计中，其内部的交叉斜材多数考虑为拉—压受力状态，此时相应的压杆长细比一般均能满足要求，但是当铁塔受到采动地表变形尤其是水平拉伸和水平压缩变形作用时，部分交叉斜材(尤其是靠近底部横隔附近的交叉斜材)将出现同时受压的情况，且其工作特点与陈绍蕃[73,74]所述的垂直方向风荷载的受力情况完全不同，此时仍沿用非采动区的设计方法显然不合理。因此针对建设在采煤沉陷区内的输电铁塔，其结构设计不能完全照搬现行《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2012)的规定，而应根据采动地表变形对上部铁塔的作用规律，对其交叉斜材的长细比限制及稳定承载力计算开展专门的研究。

在输电铁塔交叉斜材的承载力方面，国内外学者在试验研究和理论分析方面均进行了初步的研究。D. D. Cannon 等[75]完成了一批塔架交叉斜材承载力的试验，揭示了交叉斜材组合稳定承载力的特点，并给出了关于交叉斜材压杆计算长度取值的建议。M. D. Raghunathan[76]完成了一组 X 形冷弯薄壁型钢交叉构件承载力的原型试验，得到了相关的破坏形态和极限荷载的计算方法。此外，我国电力建设研究所[73]也完成了几组拉—压和压—压交叉斜材的试验研究，但是其试验方法和试验手段有待改进，部分试验结论与现行的规范差距较明显。陈绍蕃[73,74]分析了单角钢主杆绕平行轴屈曲和以空间形式屈曲时扭转的效应，提出塔架主杆屈曲承载力的计算长度系数取值；依据弹性稳定理论，考虑屈曲时构件失稳变形的相关性，得出了精度和可靠度比较好的实用计算公式；作者还讨论了杆端连接螺栓数量对角钢压杆承载力的影响。

(2) 输电铁塔的结构计算方法

输电铁塔结构是一种复杂的空间结构，常用的计算方法可分为简化平面桁架法与空间桁架法两类。张殿生[77]提出用简化的平面桁架法对输电铁塔进行内力和变形计算。这种方法忽略了塔架各个塔面的折角和杆件间的变形协调关系，以及横隔和辅助杆件的影响，计算结果有一定的误差，对于塔身坡度明显变化及塔身有大量交叉斜材的铁塔误差更大。

随着电子计算机技术的发展，空间桁架法在我国电力设计单位得到了广泛应用。空间桁架法考虑了塔架结构各杆件的变形协调关系和力学平衡关系，能比较准确地反映塔架受力的实际情况，它分为简化空间桁架法、分层空间桁架法和整体空间桁架法三种。现在一般采用的整体空间桁架有限元法是将整个塔架作为超静定空间体系，根据平衡条件和变形协调关系列出联立方程，然后求解塔架的内力和变形。它适用于各种腹杆形式的塔架，可计算塔架在风力和地震力作用下的杆件内力、位移和转角，还能计算塔架的自振周期和振型，是一种较为精确、适应面广的计算方法。

近些年来，工程实践和计算分析发现，空间桁架法计算结果与大量的铁塔真型试验数据

存在较大的误差。因此，有学者提出应充分考虑铁塔角钢构件的端部约束效应，建立铁塔的刚架模型或者刚—桁架混合模型进行铁塔计算分析。随着相关研究的不断深入和有限元计算软件技术的推广使用，这种思想在实践中得到不断的推广应用，使得我国的输电铁塔设计水平得到了较大的提高。

S. Matsuo 等[78]使用三维模型分析了不同荷载方向、地形和地理特性、基础类型情况下，基础的位移和输电塔构件应力的相互影响，提出了 275 kV 下输电塔与基础的联合设计方法。F. G. A. Albermani 等[79]与 J. G. S. da Silvaa 等[80]认为将节点假定为理想铰节点的计算方法与实际不相符，提出将输电铁塔中的杆件作为梁单元来分析，且应考虑节点柔性的影响。此外，P. S. Lee[81]和 F. Albermani[82-83]考虑材料的弹塑性变形，对输电铁塔结构和类似的薄壁结构的非线性大变形破坏进行了计算分析，得到了较好的结果。A. Kaveh[84]则采用对称数组完成了一例空间桁架结构的计算分析。

赵滇生[85]对自立式铁塔结构的有限元分析理论进行了研究，分析了节点构造、腹杆连接方式、节点刚度和螺栓受剪滑移等因素对塔架受力性能的影响。杨必峰等[86]采用一种直线单元的非线性有限元法，建立了增量形式的索杆混合体系的静、动力平衡方程，并用 Newton-Raphson 法求解了增量静力平衡方程，用 Newmark-β 法直接积分了增量动力平衡方程，可以较为全面地得到输电塔线体系的静动力特性，尤其是可以完全考虑塔和线的空间耦合以及塔身的扭转效应。王前信等[87-88]认为输电塔—大垂度电缆体系的抗震计算简图在三个不同方向各不相同：竖向地震作用时，电缆的质量应集中于塔上；侧向地震作用时，电缆应以等效垂链替代，悬吊于塔上，塔与缆的刚度矩阵耦联，但质量矩阵不耦联；纵向地震作用时，塔与缆质量矩阵耦联，但刚度矩阵不耦联。杨万里等[89]提出了一种计算机有限元分析方法，并通过程序设计，初步实现了对自立式铁塔、拉线塔静力分析的数值解法。赵静[90]以空间桁架有限元杆系模型为理论基础，考虑地震、不同风速和不同高度等工况，建立了特高压输电铁塔的有限元分析模型，进行了各塔架结构的动力特性和地震反应分析，对比研究了非抗震和抗震两种组合情况下塔体各部分杆件的设计控制内力。

综上所述，已有的研究多限于理论分析，已有规范和规程关于角钢构件的规定也多适用于小长细比的构件，对于大长细比的角钢构件，尤其是交叉斜材的受力特点及其极限荷载也多限于简化的理论分析和数值模拟。而关于单边支撑大长细比单角钢构件、单边支撑大长细比交叉斜材的试验研究目前缺乏足够的资料，仍需进一步研究。

1.2.2.2 输电铁塔在风、冰(雨)荷载及断线工况作用下的静动力特性研究

输电铁塔是一种高耸建筑物，主要荷载有风荷载、冰(雨)荷载等，当发生断线事故后，其产生的不平衡张力也会造成非常不利的影响，故目前在关于输电铁塔的研究中，对风、冰(雨)荷载的研究是其中重要内容。

聂国一[91-92]研究了导线风振计算方法及脉动大风有关参数的合理选择，提出一种计算导线风振系数的实用方法。

程志军[93]对架空输电线路结构的静动力特性和风振问题进行了理论分析和试验研究。在频域内分析了基于准定常假设的输电塔架抖振响应，并探讨了气动阻尼对输电线路风振的影响。利用等代离散刚度法设计制作了输电塔架气动弹性模型，并进行了风洞试验，结合试验结果提出了高耸格构式结构横风向风振力等可供设计参考的重要意见。

黄斌等[94]讨论了不同高度多个调频质量阻尼器对大跨越输电塔结构脉动风反应的振

动控制，应用随机振动和多变量非线性优化方法对 TMD 装置的阻尼比进行了优化，对控制效果进行了时频域对比和动力可靠度评估。

刘群等[95]研究了现场实测塔架与导线的耦合现象，对其发生机理进行了探讨。

楼文娟等[96]介绍了一种计算导线风振系数的实用方法，并提供了一组新的风振系数。

罗乃东[97]以可靠度理论、随机振动理论为基础，对高层、高耸结构的抗风分析及相关问题作进一步的研究。

梁波等[98]运用有限元数值方法分析了典型的两跨三基架空输电线路的顺风向动力响应，在考虑各节点风力空间相关的条件下，利用 Karman 风速功率谱对节点风力进行了数值模拟。

马宏伟等[99]通过 ANSYS 对某 35 m 高输电铁塔结构的振型及自振周期进行分析，研究了自重对铁塔这类高柔结构振动特性的影响。

邓洪洲等[100]用弹—塑性和半弹—塑性单元失效形式模拟结构系统中的拉杆和压杆，用增量载荷法结合有限元重分析技术计算结构系统的失效模式和极限承载力，并提出了一种有效的工程优化准则用于枚举结构系统的主要失效模式。

郝紫阳[101]研究了输电铁塔的动态特性，计算了铁塔在风载作用下所引起的动力响应。

张琳琳等[102-103]建立了包含三塔两线的塔线耦合体系精细化有限元分析模型，对比了输电塔的拟静力计算结果与多塔耦合体系的动力响应计算结果。结果表明，中国现行输电塔抗风设计方法是偏于不安全的，有待进一步改进。同时，该利用概率密度演化方法和等价极值事件原理，准确地考虑复杂失效准则下的结构动力可靠度，实现了输电铁塔结构的抗风动力可靠性的精细化分析。

谢强等[104]利用大型通用有限元软件 ABAQUS 研究了设置不同横隔面时结构的模态、内力与变形。研究表明，目前高压输电塔抗风设计规范中的横隔面设置数量和方法有待改进。

梁峰[105]以“晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 输电线路”中典型输电塔为例，使用有限元软件 ANSYS，针对单塔结构和塔线耦合体系建立了精确有限元模型，通过模态分析得到单塔和塔线耦合体系的频率和振型等动力特性，并总结出了单塔和塔线耦合体系中塔架的第一自振周期的经验公式。

刘万群[106]通过模态分析得到大跨越输电塔线体系的频率和振型等动力特性，分析了体系中输电塔、导线、电梯井筒三者之间的相互影响，然后采用时程分析方法，计算整个大跨越输电塔线体系在模拟的风荷载作用下的风振响应及其频谱特性。

白海峰等[107]根据结构体型特征和脉动风场的功率谱特性，考虑输电塔—线分布、平均风速剖面变化、功率谱能量与相干性等影响因素，提出了简化作用于输电塔线体系的多变量三维脉动风场为多变量一维脉动风场的分析方法。结合输电塔线体系有限元法风振响应分析的特点，应用谐波叠加法和谱分解的适当修正，建立了脉动风速时程数值模拟方法。

吴静[108]运用谐波合成法将脉动风荷载模拟为空间相关的多维随机过程，进而对多个跨越单塔模型及大跨越塔线体系模型进行风振响应时程计算。

任月明[109]对输电塔线体系的风雨荷载进行了分析，提出了一种以马歇尔—帕尔默雨滴谱为模型的雨荷载模拟方法；通过模态分析得到单塔、导线、地线和输电塔线体系的频率和振型等动力特性；最后采用时程分析法分别以模拟风荷载单独激励和模拟风雨荷载共同

作用计算，完成对输电塔线体系的动力分析。其研究结果表明，雨激励对输电塔线体系的位移和应力都有增大的影响，同时随雨强的增大而增大，因此雨荷载影响在输电塔线体系的设计中不应该忽略。

李宏男等[110]考虑输电塔结构体型特征、平均风剖面变化、功率谱能量特性与相干性等影响因素，通过谐波叠加法，对输电塔结构进行了脉动风速模拟，并以 Kaimal 谱为谱模型生成脉动风，结合脉动风速模拟提出一种雨激励的模拟方法，计算出在一定风速情况下雨的冲击力。研究结果表明，雨荷载激励对输电塔的影响不能忽略。

Xia Kaiquan 等[111]研究了机械性故障对高压输电线路耦合体系的受力影响，采用瞬态动力分析方法计算了导线、绝缘子破坏失效危险工况下的输电线路耦合体系非线性动响应。

陆佳政等[112]应用梁单元和索单元建立了输电铁塔和导线整体单元模型。对输电塔线体系结构覆冰荷载进行了有限元计算，得到了铁塔的不平衡张力，分析了铁塔的最大压应力随覆冰厚度的变化，指出了档距差和高差角过大是产生不平衡张力的主要原因，而不平衡张力致使铁塔失稳。

侯镭等[113]分析了导线脱冰时的非线性动力过程，建立适用于导线脱冰跳跃分析的 3 自由度多挡导线模型，确定采用中心差分的显式积分作为计算方法，计算得到导线脱冰跳跃的时程响应，并分析了脱冰量、档距组合、导线机械参数、均匀与非均匀脱冰等因素的影响。

夏开全等[114]建立了高压输电线路的基准有限元动力计算模型，并通过非线性静力计算验证了模型可用于后续分析，采用瞬态动响应计算方法分析了导线断裂失效后邻近破坏塔的输电线路结构非线性动响应变化规律。

此外，S. Yu. Sadov[115]、Yansheng Xu[116]和 Michael J. Riley[117]也分别在输电线路的覆冰厚度的确定、覆冰脱冰振动的数值模拟分析等方面进行了有意义的探索。

1.2.2.3 输电铁塔在地震作用下的动力特性研究

针对地震作用给输电铁塔及其线路带来的严重危害，国内外学者也开展了相应的研究。

柳春光等[118]将输电塔—大垂度电缆体系的计算简图近似为折线形杆链体系，在刚度特性不确知的情况下，利用“最不利可能变形状态”替代振型做极限计算，从而确定地震反应的上限。

黄涛等[119]应用时间序列法，以描述结构动态特性的格林函数为判据，对钢结构的高压输电铁塔振动稳定性进行建模分析及在线稳定性判定。

李宏男等[120,121]指出输电塔—导线体系是一种复杂的空间塔—线耦联振动体系，并给出更一般的简化动力和抗震分析计算模型，导出了振动方程，最后提出了输电塔—线体系抗震计算的反应谱方法。

张朝阳等[122]推导了无抗弯刚度弹性浅悬链线的平面上下振动微分方程及其一般解，并用该解求得一般传递矩阵。

何锃等[123]以中山口大跨越分裂导线为实际背景，给出了导线静态形状和张力的计算方法，推导了三分裂导线的单元矩阵，并用有限元法计算了中山口大跨越导线铅垂面内的固有频率和振型。

唐建民等[124]提出了一种适合于悬索结构空间非线性分析的三节点等参数索单元有限元模型；在三维整体坐标下，由应变的定义得到了可以考虑任意高阶位移影响的非线性应变几何关系；采用 Lagrangian 坐标描述法，并由虚功原理建立了非线性有限元增量方程及切

需要全本请访问 www.ertongbook.com