



国家电网公司
电力科技著作出版项目

架空输电线路 杆塔基础变形破坏数值模拟技术

崔强 张振华 鲁先龙 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

架空输电线路 杆塔基础变形破坏数值模拟技术

崔强 张振华 鲁先龙 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本专著以我国常见的架空输电线路杆塔基础为研究对象,采用目前国内外通用的岩土工程数值仿真软件 FLAC3D 和有限元分析软件 ANSYS 为计算工具,针对架空输电线路杆塔基础变形数值模拟技术进行编写。

本专著共分为 6 章,包括架空输电线路杆塔基础分类、变形破坏特征及设计,数值模拟的基本原理及执行步骤,数值模拟的前处理,数值模拟的求解,数值模拟的后处理,实例,并附有基于 ANSYS 软件的数值网格模型建立命令流、基于 FLAC3D 的杆塔基础地基变形破坏模拟程序通用命令流,方便设计人员使用。

本专著可供从事我国岩土工程数值分析的科研人员、电力系统科技工作者、输电线路工程技术人员等使用,也可供土木工程、岩土工程及电网防灾减灾等工程学科的教师、研究生等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

架空输电线路杆塔基础变形破坏数值模拟技术/崔强,张振华,鲁先龙著. —北京:中国电力出版社,2018.12

ISBN 978-7-5198-1577-6

I. ①架… II. ①崔… ②张… ③鲁… III. ①架空线路—输配电线路—线路杆塔—变形—破坏分析—数值模拟 IV. ①TM752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 274936 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:罗 艳(yan-luo@sgcc.com.cn, 010-63412315) 高 芬

责任校对:黄 蓓 朱丽芳

装帧设计:张俊霞

责任印制:石 雷

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2018 年 12 月第一版

印 次:2018 年 12 月北京第一次印刷

开 本:710 毫米×1000 毫米 16 开本

印 张:13.75

字 数:258 千字

定 价:128.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社营销中心负责退换



序

输电线路是组成电力网的主要部分，分为架空和地下两种方式，我国主要以架空输电线路为主要输电方式。杆塔基础作为架空输电线路的主要组成部分，直接影响输电线路运行的可靠性和建设的经济性。由于架空输电线路常年暴露于外界，易受气象和环境的影响，导致杆塔基础承受竖向（上拔、下压）与水平向交变荷载的作用，其变形破坏特征较常规基础更加复杂。现有的工程设计技术是建立在对杆塔基础变形破坏机理认识清楚的基础上，正确表述杆塔地基基础的变形破坏特征，准确获取地基力学参数是杆塔基础优化设计的关键。地基岩土体在遭受外荷载作用时，其变形和破坏过程为复杂的非线性数学力学问题，很难采用准确的定值解析式来表示。数值模拟技术作为工程科学领域中的一种重要分析手段，它可将复杂的非线性映射关系经过数学处理，转换成可采用计算机手段进行运算和求解的定值问题，近年来在航天、机械、水利水电等领域得到广泛应用。而目前针对输电线路地基基础学科领域还没有一本正式出版的完整、系统地介绍数值模拟技术在输电线路杆塔地基基础工程中应用的中文专著，这也大大限制了数值模拟技术在输电线路工程领域中的应用。

在这种大背景下，著者编写了《架空输电线路杆塔基础变形破坏数值模拟技术》一书，本专著针对输电线路地基基础变形破坏非线性的科学问题，瞄准了输电线路地基基础设计参数取值、地基破裂面形态的描绘及基础承载力确定等工程需求，结合近年来大量的现场试验和理论分析结果，采用原理解读、代码展示、界面操作指引、实例分析等多种表达手段，深入浅出地介绍架空输电线路杆塔基础变形破坏数值模拟技术的基本原理、实施步骤及关键环节，并辅以工程实例。本专著的出版可作为设计技术的辅助手段，大大提高工程设计人员对杆塔基础变形破坏过程的认识水平，同时也为数值模拟技术在电网建设过程中的应用打开新的局面。

本专著由中国电力科学研究院崔强正高级工程师、合肥工业大学张振华教授、中国电科院鲁先龙教授级高工合著，他们有常年深入工程一线的科研骨干，也有精通数学力学理论，具有丰富授课经验的高校教师。

崔强正高工现为中国电科院岩土工程实验室科研骨干，自 2009 博士毕业以来，一直投身于工程一线，不仅具有扎实的理论知识，更具有丰富的工程经验。

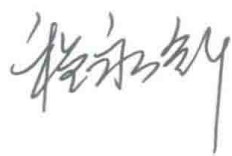
近 10 年来，主持并参与实施了黄土、凝灰岩、石灰岩等地基条件下 150 个 1:1 尺寸的原状土（岩）基础现场原型试验及理论分析工作，将岩土反分析法和人工智能分析方法首次引入架空输电线路杆塔地基基础的研究领域，作为特邀专家参与多条特高压输电工程的审查和技术咨询，作为核心成员参与研发架空输电线路杆塔基础设计优化软件系统（TFDP），为我国架空输电线路杆塔基础的标准化建设开创了良好局面。

张振华教授现任合肥工业大学水利系副主任，早年毕业于中科院武汉岩土所，具有深厚的数学力学功底，在水库岸坡稳定性分析评价与加固技术领域具有很深的造诣，曾多次作为国土资源部三峡库区地质灾害防治专家参与相关项目的技术咨询。自 2010 年与崔强博士开展项目合作以来，相继成立合工大土体微观测试分析实验室和架空输电线路杆塔基础变形破坏分析专业方向组，先后承担中国电科院委托的多项科研课题，指导相关专业方向的研究生 10 余名。

鲁先龙教授现任中国电科院输变电工程所副总工程师，曾任岩土工程实验室主任，享受国务院政府特殊津贴专家，是我国架空输电线路行业知名专家，在架空输电线路地基基础设计领域具有很深的造诣。

本专著共 6 章，3 个附录。在第 1 章中首先介绍了架空输电线路杆塔基础的变形破坏特征及其与工程设计之间的关系，引出数值模拟技术对工程设计的重要性；第 2 章简要介绍了数值模拟的原理；第 3~5 章分别采用文字描述、视频演示等表达方式介绍数值建模、数值求解、计算结果表达的实操过程；第 6 章中结合 6 个工程算例，将数值模拟技术在工程中的应用落地，旨在便于广大读者快速而高效地将数值模拟技术应用在工程设计中。

本专著研究对象为输电线路杆塔基础，计算方法采用了有限差分法，技术手段涉及人工智能和最优化，属于多学科交叉的知识领域，全书构建出的知识体系对我国架空输电线路杆塔地基基础的设计优化和工程应用具有重要意义，填补了该方面论著的空白，为从事我国岩土工程数值分析的科研人员、电力系统科技工作者、输电线路工程技术人员等提供有益的参考，非常值得土木工程、岩土工程及电网防灾减灾等工程学科的教师、研究生等阅读。



教授级高级工程师 博士生导师

中国电力科学研究院副总工、输变电工程研究所所长

2018 年 11 月



前言

架空输电线路由线路杆塔、导线、绝缘子、线路金具、拉线、杆塔基础、接地装置等构成，架设在地面之上。杆塔基础作为架空输电线路工程的重要结构体，一方面承担来自上部杆塔结构作用力；另一方面又与周围地基岩土体形成整体，共同承担由于自然因素或人类活动引起的外荷载。杆塔基础的造价、工期和劳动消耗量在整个架空输电线路工程中占比很大，据不完全统计，杆塔基础的施工工期约占整个架空输电线路工程工期的 50%，运输量约占整个工程的 60%，费用约占整个工程的 20%~35%。因此，杆塔基础对于架空输电线路工程经济高效地建设和安全运行具有重要意义。

架空输电线路杆塔地基基础在外荷载作用下的变形破坏是复杂的高度非线性过程，其应力、位移等场变量的求解通常无法通过解析方法获得，目前多采用试验方法或数值模拟方法近似获得。根据模型尺寸与地基状态的不同，可分为模型试验与真型试验。模型试验一般在实验室内进行，它的优点是试验条件容易控制，缺点是难以保证地基基础模型与实际的地基基础体系完全相似，导致获得的试验结果与实际基础的受力也存在较大的差异，试验数据无法直接应用于工程实践；真型试验一般在现场进行，它的优点是能够真实再现架空输电线路杆塔基础在外荷载作用下的变形破坏过程，试验数据可靠，可直接应用于工程实践，但其成本高、耗时长、试验条件不易控制，并且无法监测地面以下岩土体的破坏过程。与试验方法相比，数值模拟方法具有成本低、耗时短、可重复性强、能再现和预测外荷载作用下杆塔地基基础的变形破坏特征、承载力等优点，因此在架空输电线路杆塔地基基础变形破坏分析方面具有广阔的应用前景。

本专著依托中国电力科学研究院青年科学基金《组合荷载作用下扩底基础上拔土体破坏模式及抗拔极限承载力计算方法理论研究》、国家电网公司基建新技术项目《强风化岩地基挖孔扩底基础设计方法研究》、甘肃省电力公司科技项目《黄土地基大荷载杆塔原状土直柱基础承载特性试验》等科研项目，以我国常见的几类架空输电线路杆塔基础为研究对象，采用目前国内外通用的岩土工程数值仿真软件 FLAC3D 和有限元分析软件 ANSYS 为计算工具，从数值模拟的前处理（几何模型的建立与数值网格划分、初始条件与边界条件的确定、本

构模型和屈服准则的选取、计算参数的确定)、求解以及数值模拟结果后处理等几个方面,对架空输电线路杆塔基础变形破坏过程的数值模拟技术进行全面介绍,并以著者近年来主持完成的现场真型试验为工程实例,对数值模拟技术在架空输电线路杆塔基础变形破坏分析方面的工程应用作了详细阐述。本专著采用图示、列表、操作流程图、文字描述等不同表述方式,对计算原理、软件操作和实例分析等方面进行了形象地解释和说明,旨在使我国广大电网建设、运行、管理人员更好地理解数值模拟技术在架空输电线路杆塔基础变形破坏分析方面的应用,并为数值模拟技术在我国架空输电线路杆塔基础建设领域的推广应用提供技术参考。

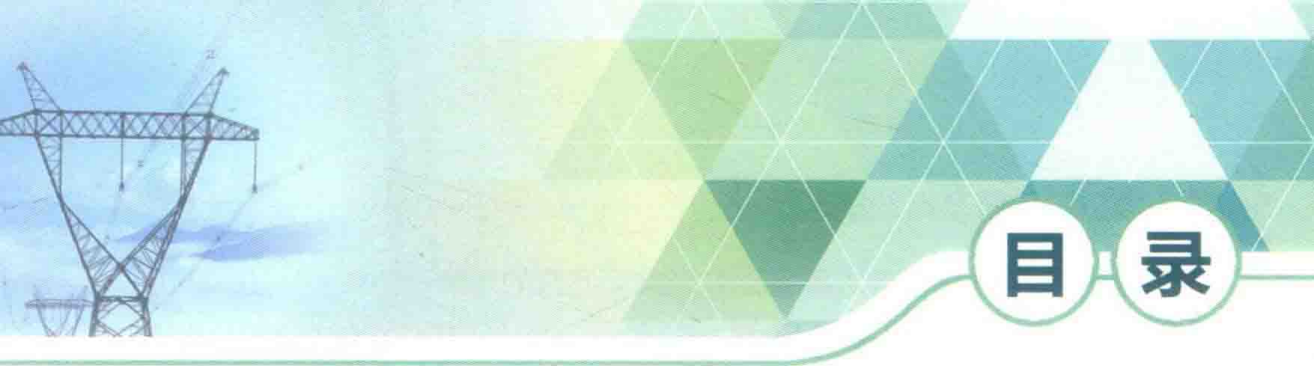
本专著共分为6章。第1章介绍了架空输电线路杆塔基础的主要类型及其变形破坏特征,同时详述了数值模拟结果与杆塔基础设计之间的关联;第2章简要介绍了数值模拟的原理和执行步骤;第3~5章为数值模拟过程中的三个主要环节:建模、求解以及计算结果表达;第6章结合工程实例,对数值模拟技术在架空输电线路杆塔基础工程中的应用进行了实例分析。附录列出了典型杆塔基础数值建模以及分析计算的通用命令流。

本专著中的现场试验工作得到了中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司孟宪乔、谢枫,中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司李永祥、刘生奎,佛山电力设计院有限公司邢明以及中国电力科学研究院有限公司童瑞铭、陈培、杨文智、郑卫锋、满银等专家同仁的支持和帮助。同时,合肥工业大学硕士研究生黄翔、三峡大学硕士研究生安占礼等在算例的实施、命令流的编写以及文字的编排过程中付出了辛勤的劳动,在此,著者一并表示感谢!

由于著者水平有限,书中难免存有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2018年8月

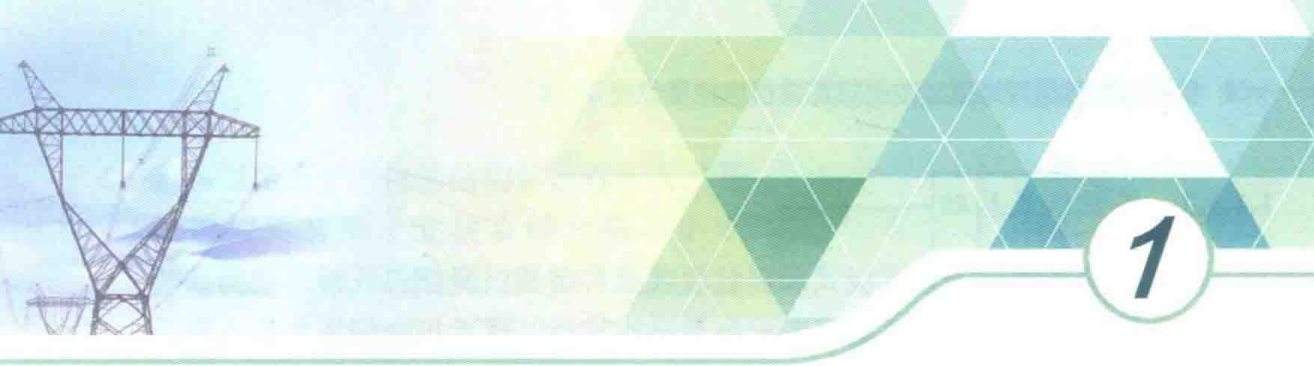


目 录

序
前言

1 架空输电线路杆塔基础分类、变形破坏特征及设计	1
1.1 架空输电线路杆塔基础分类	1
1.2 架空输电线路杆塔基础变形破坏特征	5
1.3 架空输电线路杆塔基础设计	17
2 数值模拟的基本原理及执行步骤	21
2.1 数值模拟的基本原理	21
2.2 数值模拟的执行步骤	24
2.3 数值模拟的建模及原则	25
3 几何模型的建立	27
3.1 掏挖基础地基基础体系几何模型的建立	27
3.2 桩基础地基基础体系几何模型建立	38
3.3 岩石嵌固基础地基基础体系几何模型建立	47
3.4 岩石锚杆基础地基基础体系几何模型建立	57
3.5 短桩—锚杆复合基础地基模型体系几何模型建立	60
4 数值计算模型的建立	64
4.1 地基基础体系数值网格模型建立	64
4.2 初始条件与边界条件的确定	109
4.3 本构模型及屈服准则的选取	112
4.4 计算参数的确定	117

5	数值模拟的求解及其结果表达	120
5.1	架空输电线路杆塔地基基础变形破坏问题的求解	120
5.2	应力与位移计算结果的表达	121
5.3	塑性区计算结果的表达	122
5.4	地基滑动面的确定	123
5.5	荷载位移曲线计算结果的表达	126
6	实例	128
6.1	计算参数的确定	128
6.2	杆塔基础地基变形破坏过程的再现以及承载力的确定	134
6.3	杆塔基础地基土体滑动面形态的确定	159
6.4	原状土杆塔基础基坑稳定性分析	175
附录 A	基于 ANSYS 软件的数值网格模型建立命令流	184
附录 B	架空输电线路杆塔基础地基基础体系数值模拟建模步骤	201
附录 C	基于 FLAC3D 的杆塔基础地基变形破坏模拟程序 通用命令流（以掏挖基础为例）	202
	参考文献	204
	索引	208



架空输电线路杆塔基础分类、 变形破坏特征及设计

1.1 架空输电线路杆塔基础分类

架空输电线路杆塔基础是一种连接杆塔结构与地基，并将杆塔结构的荷载传递到地基土或岩石中的一种结构体。杆塔基础通常采用混凝土、钢材或其他材料制成，杆塔基础型式需根据杆塔结构型式、沿线地形地貌特点、塔位处的地质条件以及施工运输条件等因素综合确定。目前，架空输电线路工程中常采用的基础型式可分为开挖基础、掏挖基础、岩石基础、桩基础和复合基础五类。

1.1.1 开挖基础

开挖基础的制作过程可概括为：① 开挖基坑；② 在挖好的基坑内支模、支立钢筋骨架；③ 在模板内浇筑混凝土而形成结构体；④ 待拆模后进行土体回填，并将回填土夯实。开挖基础分为刚性台阶基础和柔性板式基础两类。

1.1.1.1 刚性台阶基础

刚性台阶基础是传统的开挖基础型式，适用各类地质条件和各种塔型条件，其特点是基础自重大、底板不配筋，利用土体与混凝土的重量承担上拔荷载。由于素混凝土的底板抗拉强度低，因此基础底板和台阶的高宽比不小于 1.0，刚性台阶基础示意图如图 1-1 所示。

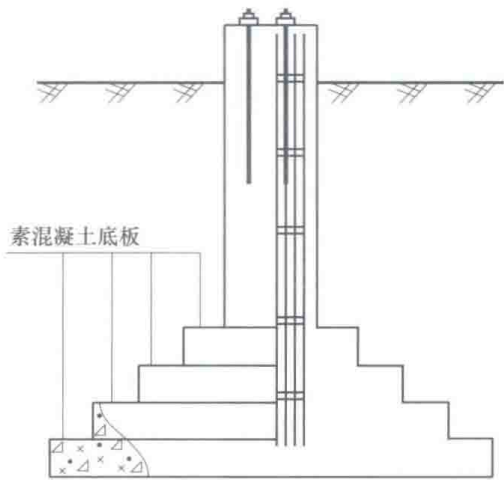


图 1-1 刚性台阶基础示意图

1.1.1.2 柔性板式基础

柔性板式基础分为直柱板式和斜柱板式两种型式（见图 1-2），该类基础利用其底板大、埋深浅、底板双向配筋等结构特点，可承担由杆塔上拔、下压和水平三种荷载引起的弯矩和剪力。柔性板式基础底板一般有台阶形和锥形两种结构型式，并且底板和台阶双向配筋，用于提高底板的抗拉能力。与刚性台阶基础相比，柔性板式基础消耗混凝土量少、消耗钢筋量多。

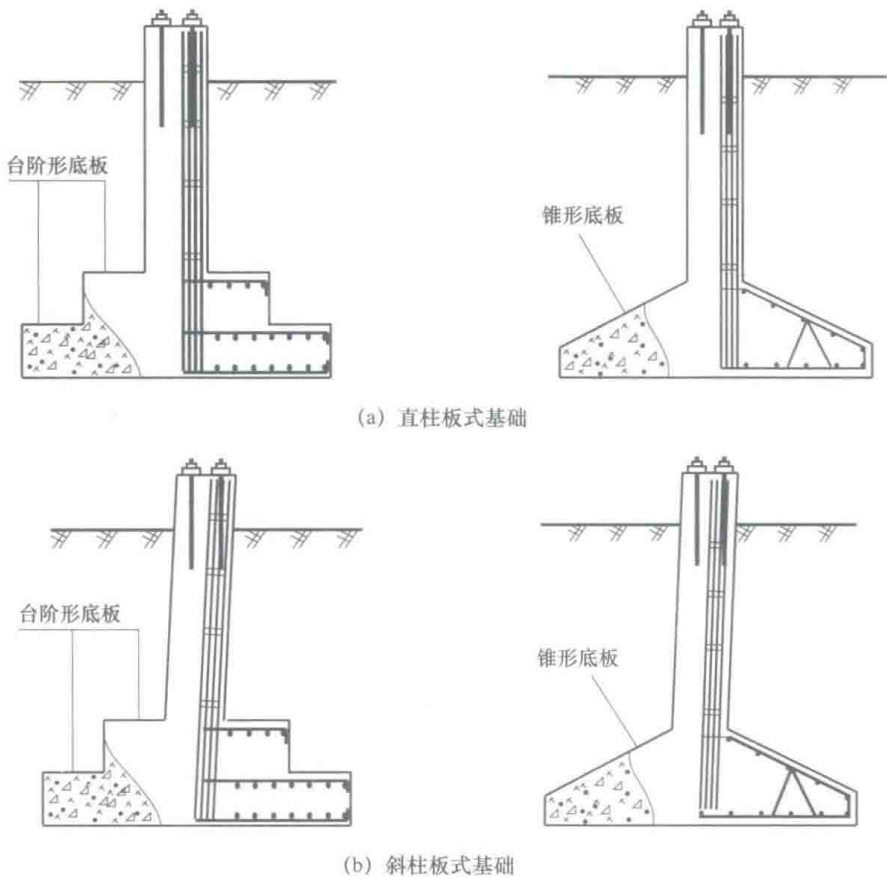


图 1-2 柔性板式基础

直柱板式基础适用范围广，是目前高压输电线路工程中最常用的基础型式之一，适用于各类地质条件及各种塔型。斜柱板式基础中的主柱坡度与塔腿主材坡度一致，施工工艺复杂，需要具备平坦的操作平面，因此一般适宜在地形简单、地势平坦、交通便利的地区使用。

1.1.2 掏挖基础

掏挖基础是指利用人工（或机械）在天然土体中掏挖出与基础大小一样的基坑，支立钢筋骨架，然后以土代模直接在基坑内浇筑混凝土，从而形成土体

包裹混凝土于一体的结构体。对于人工开挖的掏挖基础，立柱直径一般不小于 800mm；机械开挖的掏挖基础，立柱直径一般不小于 600mm。工程设计中，为了提高基础的抗拔承载能力，同时减小基底平均压力，通常在立柱底部设置一定大小的扩大头，掏挖基础示意图如图 1-3 所示。人工掏挖基础适用于无水条件下硬塑及以上的黏性土中，机械掏挖基础可忽略塌孔造成的人员安全，主要能满足交通运输条件、机械可挖成形即可。

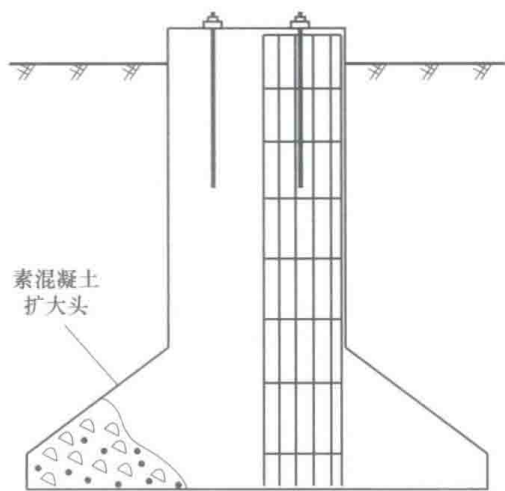


图 1-3 掏挖基础示意图

掏挖基础充分发挥了原状土的承载能力，取消了支模及回填土工序，加快了工程施工进度，降低了工程造价，同时施工过程中避免了大开挖操作，减少了对塔基周围环境的破坏，有利于环境保护，因此在我国架空输电线路工程中被广泛采用。

1.1.3 岩石基础

岩石基础是指在岩石地基中制作而成的基础体，可分为岩石锚杆基础与岩石嵌固基础两类。

1.1.3.1 岩石锚杆基础

岩石锚杆基础是指在岩石中直接钻孔、插入锚杆，然后灌浆，使锚杆与岩石紧密黏结而形成的一种结构体。该类基础充分利用了岩石的强度，大大降低了基础混凝土和钢材用量，适用于中等风化及以上且完整性较好的岩石。

根据锚杆数量和承载能力大小，岩石锚杆基础可分为单锚基础和群锚基础两类，输电线路中通常采用群锚基础。按照基岩面上部覆盖层的情况，群锚基础又分为直锚式群锚和承台式群锚两种基础型式，如图 1-4 所示。其中，直锚

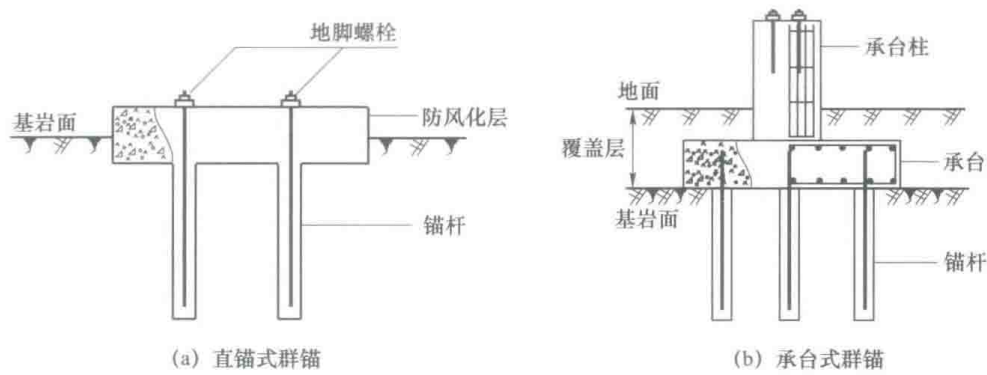


图 1-4 岩石群锚基础

式群锚基础中锚杆既充当锚筋作用，又代替地脚螺栓连接基础与上部杆塔，一般适用于小电压等级且岩石直接裸露地面的输电线路工程中；承台式群锚基础由承台柱、承台和锚杆三部分组成，一般适用于高电压等级且基岩面覆盖有一定厚度强风化层的地基条件。

1.1.3.2 岩石嵌固基础

岩石嵌固基础是指利用人工（或机械）在天然岩基中开挖出与基础大小一样的基坑，支立钢筋骨架，然后以石代模直接在基坑内浇筑混凝土，从而形成岩基包裹混凝土于一体的结构体，该类基础适用于覆盖层较浅或无覆盖层的强风化及以下的岩石地基中。

岩石嵌固基础充分利用了原状岩体自身的抗剪强度，施工中无需支模，节省了人力和物力；同时施工过程中避免了大开挖操作，减小了对塔基周围环境的破坏，是一种抗拔承载性能优良、钢筋混凝土消耗量小的经济型、环保型基础型式，近年来在我国山区输电线路工程中被广泛采用。

根据外形的差异，岩石嵌固基础可分为扩底型和坛子型两种基础型式，如图 1-5 所示。

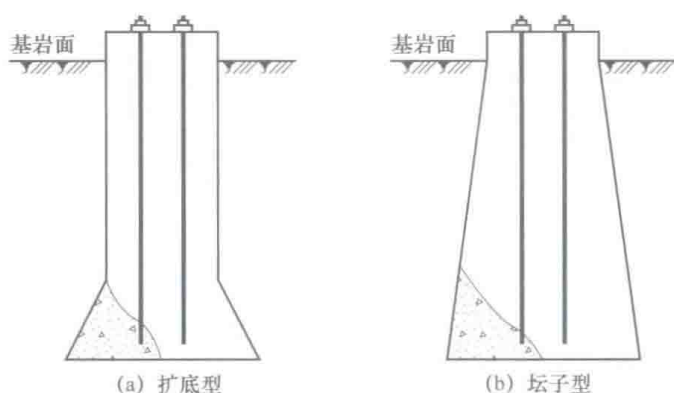


图 1-5 岩石嵌固基础

1.1.4 桩基础

输电线路工程中的桩基础与其他行业中桩基础型式相同，根据基桩数量和承载能力大小，桩基础可分为单桩和群桩。按照施工作业方式，单桩又分为灌注桩和人工挖孔桩，如图 1-6 所示。

1.1.5 复合基础

复合基础是指由下部岩石锚杆基础与上部开挖基础或掏挖基础组合而成的基础型式。根据上部基础型式不同，可分为掏挖—岩石锚杆复合基础〔见

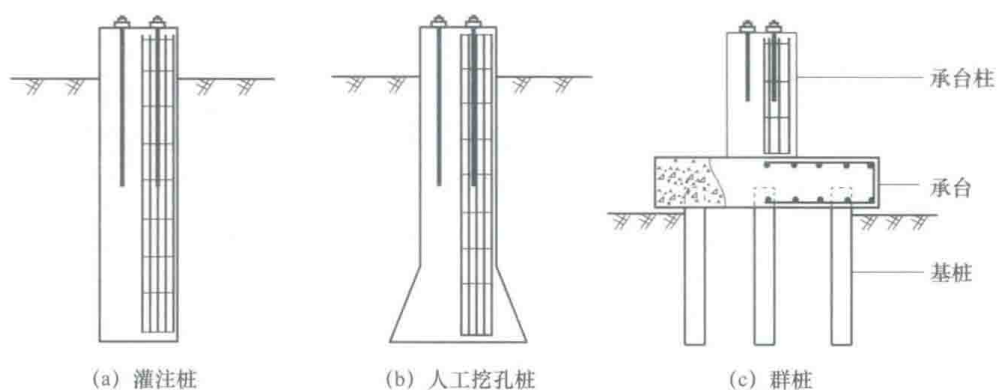


图 1-6 桩基础

图 1-7 (a)]、开挖一岩石锚杆复合基础 [见图 1-7 (b)] 两种主要型式。其中掏挖一岩石锚杆复合基础适用于基岩上覆原状土层厚度 $3\sim 7\text{m}$ ，开挖一岩石锚杆复合基础适用于基岩上覆扰动土层厚度 $1\sim 2\text{m}$ ，复合基础的抗拔承载力由上部基础和下部基础两部分的承载力叠加组成。

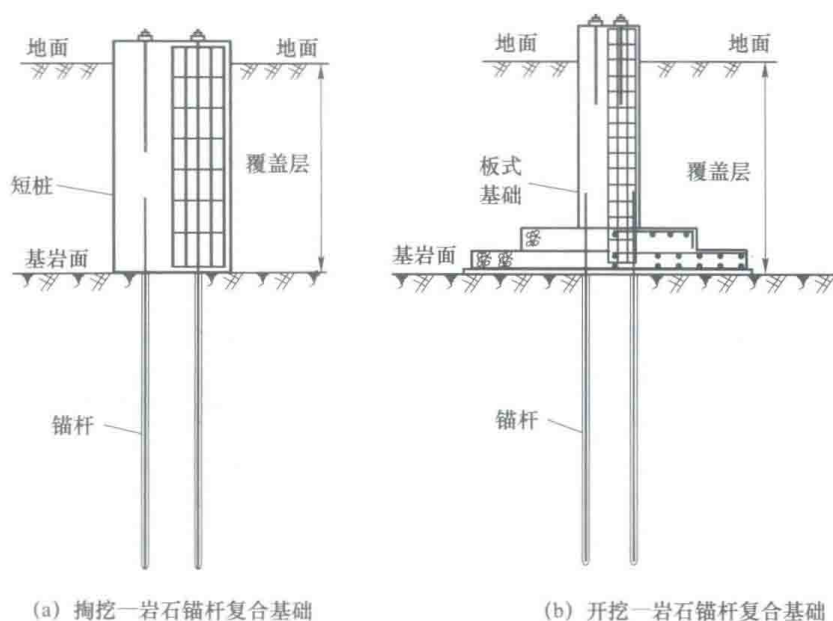


图 1-7 复合基础

1.2 架空输电线路杆塔基础变形破坏特征

1.2.1 受力特点

架空输电线路杆塔基础所承受的荷载复杂，随外界条件的变化，基础不仅承受拉/压竖向交变荷载的作用，还承受较大的水平荷载作用。一般情况下，架

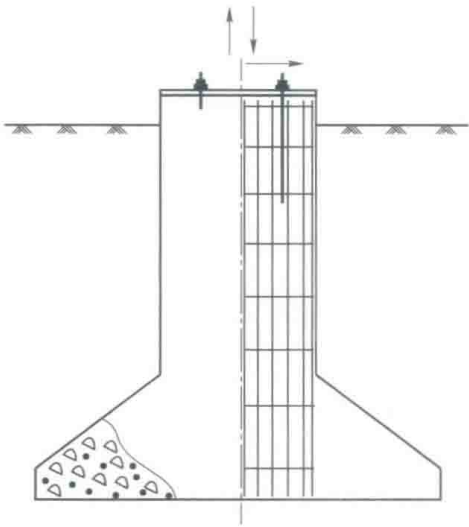


图 1-8 架空输电线路杆塔基础受力图

于不同荷载作用下基础变形破坏的数值模拟方法和思路是相同的，本专著主要介绍上拔荷载作用下架空输电线路杆塔基础变形破坏的数值模拟技术。

1.2.2 变形特征

近年来，著者所在单位在我国五个省份开展的架空输电线路主要类型基础现场试验的相关信息见表 1-1，图 1-9 为表 1-1 中每个现场试验中获得的架空输电线路主要类型杆塔基础的荷载一位移曲线。

表 1-1 架空输电线路主要类型杆塔基础现场试验信息

序号	地基类型	基础型式	加载工况	试验地点	试验时间
1	黄土	掏挖基础	上拔	甘肃甘谷	2012 年
2	黄土	人工挖孔桩	上拔	甘肃甘谷	2012 年
3	粉质黏土	直柱板式基础	上拔	北京焦庄	2013 年
4	微风化石灰岩	岩石锚杆基础	上拔	湖北宜昌	2014 年
5	强风化角砾安山质凝灰岩	岩石嵌固基础	上拔	安徽霍山	2016 年
6	上覆红黏土，下卧石灰岩	掏挖—岩石锚杆复合基础	上拔	广东阳春	2017 年

从图 1-9 所示的曲线形态特征来看，所有的试验基础荷载一位移曲线（ $Q-S$ 曲线）可分为陡降型和缓变型两种。

陡降型曲线（见图 1-10）可划分为两个特征阶段：初始直线段 oa 和终了直线段 ab 。与缓变型曲线相比，陡降型曲线存在较明显的临界荷载，即图 1-10 中的 a 点。当作用于基础上的荷载较小时，基础的位移随上拔荷载的增加呈线性变化，荷载位移曲线近似直线，曲线上各点的斜率基本保持不变，地基基础

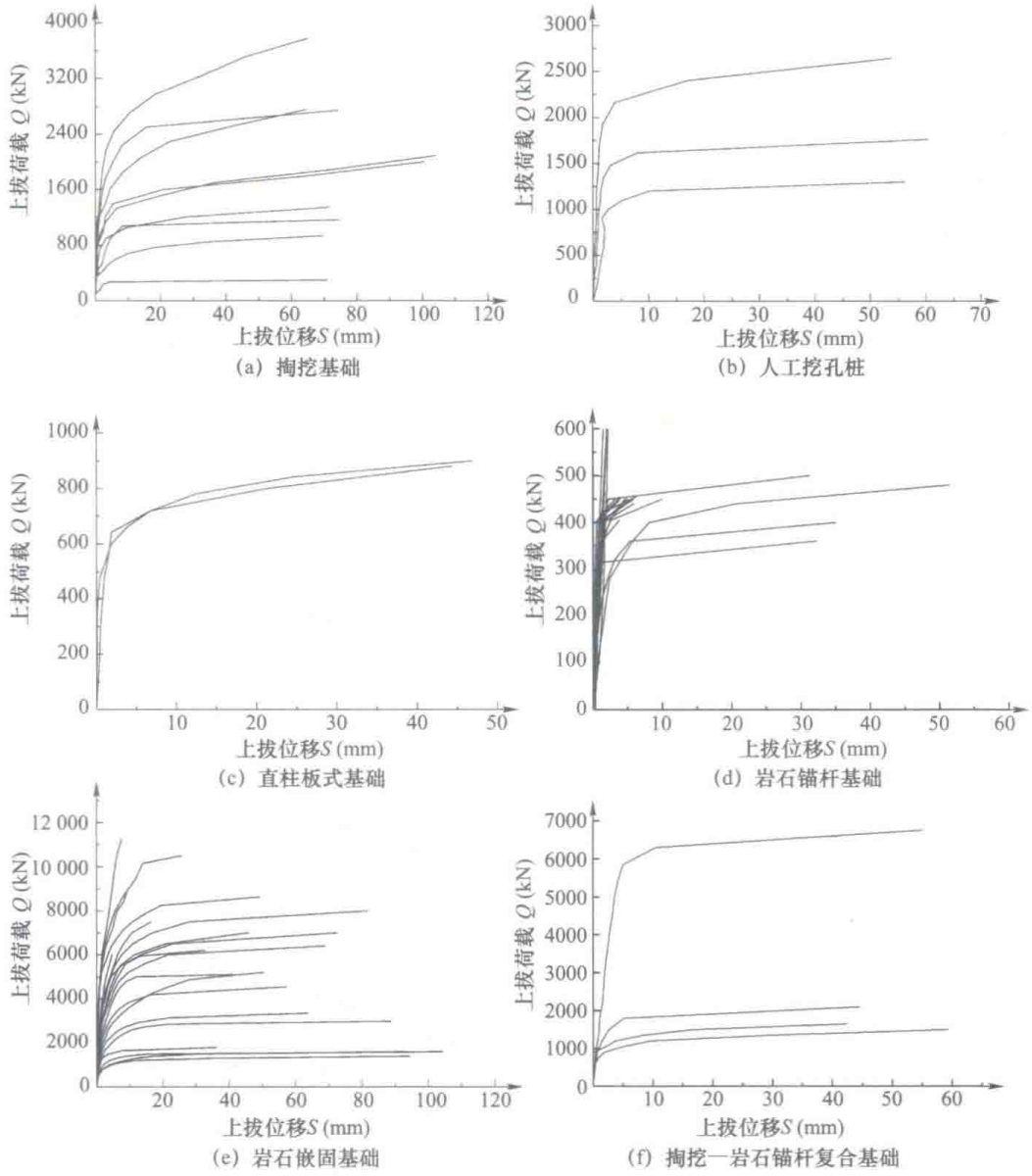


图 1-9 架空输电线路主要类型基础上拔荷载—位移曲线

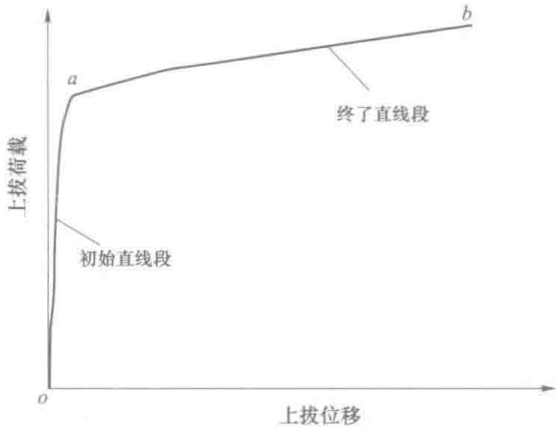


图 1-10 陡降型曲线

体系具有线弹性介质的变形特征；上拔荷载达到临界荷载时，地基基础体系快速发生失稳，变形急剧增加，此时的地基基础呈现出脆性介质的变形特性。其中，以黄土地基中人工挖孔桩的变形最为典型。对于陡降型曲线，往往取 a 点所示的临界荷载作为基础的极限承载力值。

缓变型曲线（见图 1-11）可划分为三个特征阶段：初始直线段（ oa ）、中间曲线段（ ab ）、终了直线段（ bc ）。初始直线段的上拔荷载约在破坏荷载的 0~30% 之间，相应的位移约在破坏位移的 0~5% 之间，该阶段基础的位移随上拔荷载的增加呈线性变化，荷载位移曲线近似直线，曲线上各点的斜率保持不变，地基基础体系具有线弹性变形特征；中间曲线段荷载大小约在破坏荷载的 30%~90% 之间，相应的位移约在破坏位移的 5%~40% 之间，该阶段基础位移随上拔荷载的增加呈非线性变化，且荷载位移曲线上各点的斜率随着荷载增加逐渐减小，地基基础体系的变形符合弹塑性变形特征；当基础承受的荷载达到一定值时（邻近破坏荷载），基础位移随着荷载的增加迅速增加，较小的荷载增量便产生很大的位移增量，此时可认为地基基础体系已经发生破坏。

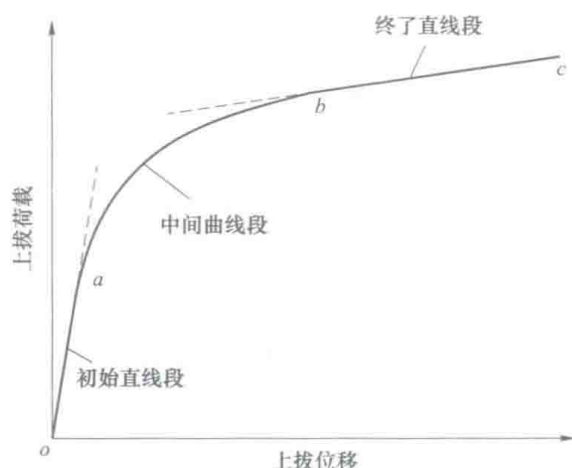


图 1-11 缓变型曲线

1.2.3 破坏模式

1.2.3.1 开挖基础

架空输电线路杆塔基础在上拔荷载作用下地基土体的破坏模式与基础的施工方式有关。开挖基础在施工过程中破坏了抗拔土体的微观结构，改变了土体中骨架颗粒的连接状态，导致抗拔土体的抗剪强度降低。当基础受到上拔荷载作用时，地基土体经历了从主动土压力到被动土压力过渡的过程。最终基础拔出前的那一刻，仅靠兜起土体自身的重量以及基础自重承受上拔荷载。试验表