

国家自然科学基金项目 (50678059) 联合资助
河北省教育厅出版基金 (2005 年度)

朱庆杰 苏幼坡 陈艳华 著

城市防灾技术

——ADINA-M
建模与
IDRISI
防灾决策



中国科学技术出版社

国家自然科学基金项目 (50678059)

河北省教育厅出版基金 (2005 年度)

联合资助

城市防灾技术

——ADINA-M 建模与 IDRISI 防灾决策

朱庆杰 苏幼坡 陈艳华 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

城市防灾技术:ADINA-M建模与IDRISI防灾决策/朱庆杰,苏幼坡,陈燕华著. —北京:中国科学技术出版社,2007.7

ISBN 978-7-5046-4761-0

I. 城… II. ①朱…②苏…③陈… III. 城市—防灾—地理信息系统 IV. X4 P91

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第109369号

自2006年4月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

内容提要

该书围绕城市防灾减灾研究中埋地管道抗震性能分析和GIS防灾决策这两个技术关键,介绍了场地-断层-管道三维整体有限元几何建模过程、管土相互作用的实现过程、流固耦合计算、管道破坏的人工神经网络预测方法、多准则评价技术应用等内容,并结合实际工作,介绍了有限元模型中的多种荷载复合加载、管道抗震设计参数优化、考虑基岩条件的地震小区划、防灾数据库开发和材料损伤数值模拟技术。书中采用针对具体实例以实际软件操作为主的阐述方法,结合近年来多项课题的研究成果,以ADINA和IDRISI软件的开发应用为核心,使得所阐述方法技术可以方便地实现,以期得以在城市防灾领域及时进入应用,解决防灾实践中的具体问题。该书可以作为防灾减灾工程专业以及土木工程、市政工程专业研究生相关课程的教学参考书,并可供城市防灾规划与管理相关部门的相应科技人员参考。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:15 字数:360千字

2007年7月第1版 2007年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5046-4761-0/X·94

定价:40.00元

前 言

本书是几位著者近几年在防灾减灾领域多个研究课题的总结和提炼并系统化的成果。书中主要围绕场地—断层—管道三维整体有限元建模和 GIS 防灾决策这两个技术关键,采用针对具体实现过程以实际软件操作为主的阐述方法,以 ADINA 和 IDRISI 软件的开发应用为核心,系统阐述了埋地管道的有限元几何建模、管土相互作用的实现、模型参数选择、多种荷载复合加载、流固耦合计算、结果分析与抗震设计参数优化、人工神经网络预测模型开发、多准则评价和材料损伤数值模拟技术等内容。全书共分九章,第一章介绍了该方向的前人研究成果与研究现状;第二章是本书的基础工作部分,主要介绍应用 ADINA 进行场地—断层—管道整体有限元建模所涉及诸多方面,其中尤以几何模型的建立和管土摩擦的设定最为关键,写作顺序基本上按照实际建模步骤来写,以使读者能够依据此方法建立实际的计算模型;第三章依据计算结果分析了管土相互作用、断层活动、管道特性、荷载类型等因素对计算结果的影响,包括管土摩擦系数、断距、断层位移、断层与管道交角、管道埋深、管径、壁厚、重力荷载、地震荷载等诸多参数,并依据分析结果为管道抗震设计参数优化和采取防护措施提供了参考依据,需要说明的是,这些结论只是依据实例模型的计算结果,不同模型的运算结果可能存在很大差异,而且还需要试验和实际工程中的检验和修正,不能代表最终结论;第四章考虑管道一般是用来输送流体的,介绍了流固耦合作用的分析原理与计算过程,包括固体模型和流体模型的建立、流固耦合的求解和结果分析;第五章介绍了在 MATLAB 中建立地下管道破坏预测人工神经网络模型的方法,包括 BP 神经网络预测模型介绍、MATLAB 中的神经网络工具箱函数和模型构建过程、误差分析与模型优化等内容,该模型同样可用第六章中的方法采用 VB 编程来实现;第六章介绍了人工神经网络模型在地震小区划中的应用,包括基于人工神经网络的最大地震影响系数分布预测计算模型构建,基于计算结果的反应谱设计和唐山市地震小区划实例;第七章介绍了应用 IDRISI 软件进行防灾决策多准则评价的方法,主要包括栅格图像简单线性增强处理、栅格图像目标识别、基于布尔运算的决策支持和多目标决策支持等,并给出了应用实例;第八章介绍了与评价相关的其他数学模型和唐山市防灾数据库开发实例,意在提供实例计算所需的基础数据和相关方法;第九章介绍了材料损伤的数值模拟技术,无论是埋地管道还是其他工程材料,都存在随着使用时间的延长而产生疲劳损伤的问题,该部分为考虑材料损伤疲劳因素提供研究方法和计算模型。

本书的完成特别感谢国家自然科学基金和河北省教育厅出版基金的资助,以及河北省教育厅和科技厅相关项目的支持,并感谢蒋录珍和刘玮玮两位研究生在本书第三、四、七章中所做的许多基础工作,感谢同事陈静老师在本书写作以及研究生指导等诸多方面的辛苦工

作。可以说，除了本书著者之外，还有许多人付出了辛苦的劳动并给予了大量帮助和支持，才使本书最终得以完成。另外，值得一提的是，城市防灾技术是一个宏大的课题，包含很多方面，本书仅是其中有关城市地下生命线工程和防灾决策技术研究中的很小一部分，即便如此，由于著者水平和精力有限，错误和不妥之处在所难免，望各位专家和广大读者批评指正。

著 者

2007 年 2 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 城市综合减灾规划与防灾决策	1
第二节 埋地管道破坏与城市地下生命线工程减灾	2
第二章 埋地管道的 ADINA 三维建模	5
第一节 ADINA 软件简介	5
第二节 埋地管道建模所考虑的因素	7
第三节 考虑场地条件的三维几何建模过程	12
第四节 参数选择与模型求解	18
第五节 管土摩擦的设定	27
第六节 复合荷载的加载	30
第七节 模型参数说明与后处理	35
第三章 模型参数对埋地管道破坏的影响分析	39
第一节 管土相互作用的影响分析	39
第二节 场地和断层活动的影响分析	40
第三节 管道特性的影响分析	43
第四节 荷载类型的影响分析	45
第五节 参数优化与防护措施建议	47
第四章 考虑流固耦合的埋地管道破坏模拟	48
第一节 流固耦合作用的影响分析	48
第二节 FSI 有限元分析原理	49
第三节 几何模型建立	50
第四节 模型参数选择与计算过程	61
第五节 结果分析与建议	61
第五章 地下管道破坏的神经网络预测方法	64
第一节 神经网络的基本理论	65
第二节 BP 神经网络预测模型	68
第三节 BP 网络在 MATLAB 中的神经网络工具箱函数	70
第四节 MATLAB 的分析过程	77
第五节 计算结果分析与建议	84

第六章 考虑基岩条件的地震影响系数计算与地震小区划	89
第一节 地震影响系数的影响因素分析	89
第二节 基于神经网络的计算模型	91
第三节 计算实例与计算结果分析	94
第四节 反应谱设计与地震小区划实例	97
第五节 在唐山市综合防灾中的应用实例	99
第七章 IDRISI 决策支持分析	102
第一节 IDRISI 软件简介及基本操作	102
第二节 栅格图像与矢量图像对比分析	113
第三节 栅格图像简单线性增强处理与结果分析	114
第四节 栅格图像目标识别	117
第五节 决策基础分析	119
第六节 基于布尔运算与非布尔运算的决策支持分析	127
第七节 多准则决策支持分析方法	129
第八节 决策支持分析方法在唐山市土地开发防灾决策中的应用	134
第八章 灾害评价其他数学模型与防灾数据库简介	151
第一节 地裂缝预测模型	151
第二节 多元统计分析数学模型	157
第三节 贝叶斯动态预测模型	168
第四节 唐山市灾害数据库	172
第九章 复合材料界面疲劳损伤的数值模拟	190
第一节 复合材料疲劳破坏机理	190
第二节 模型建立与计算过程	192
第三节 数值计算与结果分析	201
第四节 涂层影响分析	206
第五节 认识与建议	224
主要参考文献	225

第一章 绪论

第一节 城市综合减灾规划与防灾决策

经济的快速发展和城市化进程的加快,使城市灾害损失以几何级数递增,防灾减灾工作显得极为重要。2005 年由联合国主持召开的世界减灾会议发表了《兵庫行动框架》,提出了 2005 年至 2015 年全球减灾工作的 5 个行动重点,其中包括识别、评估和监测灾害风险以及减少潜在的灾害危险因素和确保对灾害作出有效反应等内容。同年,中国城市规划年会提出了“健康城市化”的主题,确立了完善城市生命线系统安全性和发展城市综合减灾的理念。

由于自然灾害的发生不是孤立的,前一种灾害的结果可能是后一种灾害的诱因或是灾害链中的某一环节,在某些特定的区域内,受地形、区域地质和气候等条件的控制。因此,城市减灾研究也向考虑多灾种的综合减灾方向发展。以唐山市为例,影响城市安全的自然灾害主要包括地震、岩溶塌陷、采空区塌陷、洪灾等及其诱发的次生灾害。地震的能量来源是地下应力和能量的积累和释放,地下应力和能量的分布决定了震害的分布。岩溶塌陷作为一种地质灾害,破坏人类的生存环境,影响资源的开发,毁坏建筑物以致危及人民的生命财产安全,危害性很大;在岩溶发育强烈地段,地下水的变化,雨后地表面流汇入,基础及地下构筑物拦堵地下水正常流泻等,特别是开采岩溶水使水动力条件变化而引发塌陷,地面排水防渗对岩溶塌陷也有一定影响。而地下煤矿开采形成采空区,下层岩体结构的失稳将诱发上方各层岩体结构的相继失稳和离层裂缝的压密,导致建筑物地基出现较大的不均匀沉降。各种灾害在一定程度上是相互影响的,并与场地条件及水文地质环境的变化有密切的联系。地震作为岩溶塌陷和采空区塌陷的触发因素可能触发以上灾害。唐山大地震促使广大科技工作者对地震灾害和地震灾害引起的其他灾害进行了许多研究工作,也可以把地震引起的其他自然灾害称为次生灾害。这些次生灾害主要是:地震引起的地质灾害,对于唐山市主要有滑坡、崩塌、地陷、地裂、砂土液化等;地震引起的洪水灾害,对于唐山市主要是陡河水库堤坝滑坡、震裂以及冲垮等;地震引起易燃的油罐破坏而形成火灾,地震造成地下煤气管道破裂诱发火灾,或煤气中毒,进而引起爆炸;地震引起采空区塌陷、岩溶危害加重等。在单一灾害分析的基础上,首先分析单一灾害的破坏效应,进而分析各种灾害的破坏效应,可建立综合成灾模式(图 1.1)。

城市综合减灾规划是城市总体规划的组成部分,其内容及发展态势是由单项规划趋向综合规划,以便于城市科学选择用地、科学安排城市功能布局、统一规划、采取减灾措施等。灾害分布具有地理空间散布的特点,且不同灾种的评价准则不相同,所以需要建立基于地理信息系统(GIS)平台的多准则评价方法。识别不同空间位置的致灾因子,开发多准则决策方法,可为城市土地资源科学开发利用提供决策诊断,为防灾资源优化配置和灾后恢复分析提供决策支持,达到最大限度减灾的决策目标。城市 GIS 是利用计算机软硬件技术、数据库技术、网络技术,对城市各种空间、非空间数据进行输入、存储、查询、检索、处理、分析、

显示、更新，最终提供处理城市各种空间实体及相互关系的应用系统。科罗拉多州立大学 MARIO MEJIA-NAVARRO 等人（1996 年）将 GIS 技术与决策支持系统（DSS）结合起来，建立了自然灾害及风险评估的决策支持系统，并应用在科罗拉多州的 Glenwood Springs 地区。吴泉源（2001）应用 GIS 和 IDRISI 构建了龙口市水资源环境管理决策支持系统，Peter S.Anderson 等（2003）借助 GIS 平台探讨了减灾决策评估方法。本书将在第七章中以唐山市土地开发强度评价为例，探讨在 IDRISI 平台上进行土地利用评价的多准则评价方法。

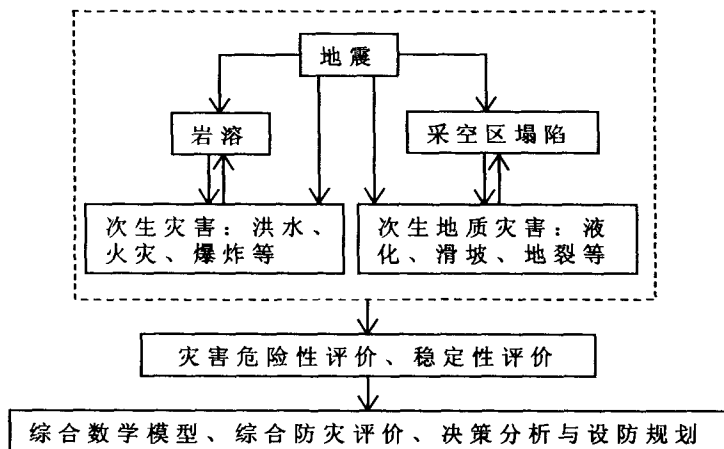


图 1.1 综合灾害成灾模式（以唐山市为例）

第二节 埋地管道破坏与城市 地下生命线工程减灾

城市减灾研究的一个重要方面是城市生命线系统防灾减灾研究，我国在这方面的研究起步不算晚，并已具备较好的基础，但是在研究范围及观测试验和实时监控等方面尚有较大的差距。具体涉及埋地管道的抗震设计指标和方法，发展考虑地面运动输入机制及管土相互作用的设计方法，研究城市生命线系统的专用 GIS 系统和防灾减灾信息管理系统，研究城市基础设施的综合减灾对策等。地下管道是城市基础设施的重要组成部分，在供热、给水、排水、煤气以及通信等方面得到广泛的应用，被称为城市地下生命线工程。地下管道破坏是指在动荷载，尤其是多级灾害动荷载作用下，由于场地条件和断层等地质构造情况的差异，管道自身材质、管径、壁厚等管道特性的差异，管道与场地和断层相互作用的空间变化，以及管内流体作用的差异和流固耦合作用的影响等，使管道在地理空间位置上产生不同程度的破坏。防灾决策者们迫切需要知道不同材质和内部流体的管道破裂程度及其地理空间位置分布，才能有针对性的优化防灾资源配置和灾后恢复。

随着我国城市化进程的发展和城市规模的扩大，地下管网越来越复杂，使得极易引发次

生灾害的城市地下生命线系统变得极其脆弱,危机四伏。仅 1999 年北京市的自来水管道路,就发生管道破裂事故 3800 多起,2003 年 6 月 1 日东三环附近的一次地下水管爆裂使得东三环路面面积水长达 2 千米。如果遇到自然灾害,如地震,城市地下管道将会遭受巨大破坏并可能引发火灾、爆炸、泄毒以及疫情传播等灾害,威胁城市安全,造成生命财产的巨大损失。1995 年日本神户地震,供水管网的完全修复历时 84 天;燃气系统的中压管破坏 96 处,低压管损坏 21647 处,污水干管破坏 1896 米,支管破坏 6158 米,4 个月后才完全修复。1996 年 2 月 3 日云南丽江 7.0 级地震,丽江旧水厂主干供水管道遭到严重破坏,多处破裂、爆管。1996 年 5 月 3 日内蒙古包头 6.4 级地震,铸铁供水管道震后多处渗漏。2001 年 11 月 14 日可可西里 8.1 级地震,钢质焊接输油管道出现三处裂口。2003 年 10 月 12 日云南大姚地震,金碧镇自来水管道路工程共发现渗漏点近 40 处。2004 年 3 月内蒙古东乌 5.9 级地震,东乌旗主干自来水管道路多处爆管。而由于管道破坏进一步引起灾害的例子也不少见,如 1906 年美国旧金山地震,由于三条输水干管破坏,消防用水断绝,全市 50 余处火灾造成的损失是地震直接造成损失的 3 倍;1923 年日本关东地震,由于供水管道破坏,无法控制火势蔓延,约 36 平方千米市区被烧毁,3.2 万人被烧死或窒息而死;1976 年中国唐山地震中,秦京输油管线有 4 处被破坏,流失原油 1 万余吨;2004 年日本新潟 6.8 级地震,诱发了一些地区的火灾事故等。其中对管土相互作用的研究尤其受到国内外科技人员的重视。

地下管道破坏的管土相互作用研究起自 20 世纪 70 年代,主要基于弹性地基梁模型将管道与土之间看做是若干弹簧连接来分析地下管道与土介质的相互作用。Newmark-Hal (1975) 最早提出了只考虑轴向应变的管道穿越断层计算方法。Kennedy (1977) 对 Newmark-Hal 的计算方法作了改进,模型中考虑了侧向管土相互作用和弯曲应变。Arciman 等 (1979) 随后提出壳模型,把埋地管道视作各向同性的弹性圆柱壳求解,使模型更接近实际情况。冯启民、赵林 (2001) 考虑埋地管道与土介质的相互作用,分析了管道作为薄壳结构的有限元模型与断层位错反应。刘爱文 (2002) 用壳单元模型有限元方法分析了管道在断层两侧发生非对称变形的情况和管线的反应分析。张智勇等 (2000, 2001) 考虑流体影响,研究了充液直管管系中固液耦合对管系轴向振动响应的影响,并使用 ANSYS 有限元分析软件与传递矩阵法计算了两种边界条件下的模态频率与模态振型,为地下管道破坏分析中考虑流固耦合作用提供了思路和方法。同时,研究者也注意到场地与管道特性参数对管道破坏的影响。如高惠瑛,冯启民等 (1997) 分析了沉陷参数、埋深、管径、管-土间摩擦角等几个因素对管道的影响。韩扬,孙绍平 (1999) 根据试验对不同类型的管道,不同填料接头的变形均值、标准偏差提出了建议。O.Rourke,T.D.等 (1999) 通过分析包括场地条件在内的影响因素,借助 GIS 平台来探讨地下管道震后恢复的关系式,以帮助防灾决策。Sevtap SelÇuk M. (2000) 综合震害分析、管道特性和管网可靠性评估方法,给出了生命线系统恢复的概率模型。苏幼坡等 (2001) 则考虑生命线震害相互影响探讨了震后恢复时序。随着管道分析模型的日臻成熟,尤其是大型通用计算机程序的普及和 GIS 软件的应用,研究不仅仅局限于地下管道破坏模型,还包括

防灾决策管理信息系统开发方法的探讨。汤爱平、欧进萍等（2002）在分析埋地管网震害与地震动特性、土质条件、地理环境、地质环境和管道自身特征等因素之间关系基础上,提出运用地理信息系统建立城镇埋地管网监测系统的思路。D.V.REDDY 等（2002）通过考虑管土相互作用的聚乙烯管道试验来分析管道破坏情况,为考虑多因素的防灾决策提供了重要的实验分析思路。Marco Casari 等（2005）在文献中探讨了通过修改应急预案来减少灾后生命线修复费用的方法。郭恩栋等（2004）指出,目前在管道地震反应分析、管线系统功能失效状态分析等方面都取得了许多成果的情况下,伴随着计算机软硬件技术的发展以及大型通用结构分析程序的普及利用,地下管道的抗震分析已向模型的精细化和管网系统的大型复杂化发展,并指出预测时应考虑地震作用、场地类别、管道特征参数以及工作压力等多种参数。孙绍平等（2003）提出,地理信息系统在地下生命线工程中的应用,涉及震害预测、震时灾情判断、应急决策、灾后修复等各方面,使 GIS 应用方向进一步明确。本书在著者所进行的相关研究基础上,介绍在 ADINA 软件中,通过布尔操作实现场地材料和管道材料几何融合的方法,管土摩擦的设定、多个几何体融合建模与模型参数选择方法,多种荷载的复合加载方法等。模型中考虑了场地条件的复杂多变性（岩土性质、地层产状、断层分布及其活动性,地下构造形态、基岩与场地土层的接触等）和管道本身特性（材质、管径）,并通过固体模型与流体模型的耦合运算来考虑内部流体性质和流固耦合作用的影响。

第二章 埋地管道的 ADINA 三维建模

第一节 ADINA 软件简介

ADINA 的含义是 Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis 的首字母缩写, 为动力非线性有限元分析, ADINA 具备分析非线性问题的强大功能, 包括求解结构以及多场耦合问题。最早由 K.J.Bathe 博士带领的研究小组于 1975 开发完成, 1986 年开始商业化, 现已推出 8.1 系统 (本文采用的版本)。ADINA 的 User Interface (简称 AUI) 界面可实现所有建模和后处理功能, 共分为六个部分, 分别是菜单区、图形区、图标区、命令输入栏、输出信息栏和模块选择窗口。菜单区是包括输入输出文件、几何建模、单元划分、加载、求解控制等所有 ADINA-AUI 功能。图形区用于显示所建模型, 并可以由用户控制显示颜色和方式。图标区包括常用命令的快捷键, 用户也可以自定义图标。命令输入栏可通过输入 ADINA 命令启动其某一功能。输出信息栏显示程序对当前操作的响应, 或程序对下一步操作的提示信息。命令流文件 Jobname.in 自动记录跟踪用户输入数据和所选的选项, 用户可以随意查看、编辑 Jobname.in 文件, 达到重建或修改整个模型的目的。ADINA-AUI 可通过 Bottom-Up 和 Parasolid 方式创建各种几何模型, 并提供各种时间函数和空间函数, 空间函数能够实现各种非均布载荷的加载。ADINA 提供多种网格划分器, 同时也具有自适应网格重划分功能。后处理功能支持各种结果变量可视化处理方法, 如网格变形图、彩色云图、等值线图、矢量图等; 可简便实现旋转、平移、缩放、抓图和生成动画等操作; 方便地生成计算结果的动画显示、切片动画、动画播放, 同时可以进行旋转、缩放、平移等操作; 可从输出变量中定义导出变量; ADINA 模型可以进行隐藏、透明显示并方便的绘制出模型的任意点任一计算结果参量随时间或其他参量的变化曲线等。ADINA 还具有以下多个易于使用的特点:

- 完全交互式的图形界面, 具有下拉菜单和对话框, 可选取选项和输入数值;
- 快捷图标可进入常用的任务;
- 制图窗口具有复制和粘贴特点;
- 程序内可直接创建 AVI 视频;
- 图形以矢量和位图形式输出;
- 具有撤销和重做特点, 撤销的数量可由用户定制;
- 模型可进行动态旋转、缩放和快速平移;
- 对于经常重复的任务支持命令文件输入。

在后处理过程中, 包括大量的结果可视化工具:

- 变形和原始的网格图;
- 带状图和轮廓图;
- 矢量图和张量图;
- 在图表上标示变量;

- 在屏幕上或者以文件形式详细罗列变量值;
- 对输出变量产生的合成变量进行解释。

ADINA 系统由以下模块组成:

1. ADINA-AUI

ADINA 用户界面程序为所有 ADINA 子程序提供了完整的预处理和后处理功能, 它为建模和后处理的所有任务提供了一个完全交互式的图形用户界面。

主要特点:

- 模型的几何图形可直接创建, 或者从多种 CAD 系统中引入, 包括: 从 Pro/ENGINEER 和基于 Parasolid 系统 CAD 引入的固体模型 (如: Unigraphics 和 SolidWorks);
- 物理特性、载荷和边界条件可直接分配到模型的几何图形上, 因此有限元网格得到修改, 不受模型清晰度的影响;
- 普通的几何图形上可使用全自动网格生成, 它可灵活控制单元大小分布, 而映射网格划分可用于更简单的几何图形;
- 在模型创建期间, 会话文件 (Session) 会记录下用户的输入和选取值。通过播放会话文件可以重新创建一个完整的模型, 同时还可以修改会话文件创建一个不同的模型。

ADINA 程序为固体、桁架、梁、管道、金属板、壳体和缝隙提供了多样化和通用的有限元, 材料模型有金属、土壤与岩石、塑料、橡胶、织物、木材、陶瓷和混凝土可选。ADINA 程序具有以下分析功能:

- 有效的线性分析;
- 小型和大型的变形、大型应变;
- 弹塑性、徐变 (Creep) 分析, 包括热效果;
- 屈曲和后屈曲 (Post-buckling) 分析;
- 静力学和动力学中的接触问题;
- 大型系统的迭代算法;
- 用于所有分析的高效却稀少的算法;
- 静力学和动力学的子结构分析;
- 分析过程中可增减单元;
- 频率和模式的叠加;
- 感应波谱、随机震动分析;
- 线性化的屈曲分析;
- 波的传播、冲击波分析;
- 结构震动、谐波分析;
- 声学的流体-结构间相互作用;
- 带裂纹传播的断裂力学;
- 用户提供的单元、模型和载荷。

2. ADINA-M

ADINA-M 是 ADINA-AUI 程序的一个附件, 提供了立体建模的功能, 通过 ADINA-M 可在 ADINA-AUI 程序中直接创建立体的几何图形。ADINA-M 基于 Parasolid 核心, 先进的 Parasolid 几何建模技术提供的实体建模器可以方便地建立各种复杂的实体结构, 同时对所有

基于 Parasolid 的 CAD 系统的模型实现无缝链接；并提供多种收敛准则和丰富的材料模型，用户可以提供自定义的破坏准则；提供的固液耦合求解器，可为各种流固耦合问题的解决提供支持。尤其重要的是 ADINA 提供多种摩擦模型，供用户进行自定义并使用，可定义摩擦系数随任意接触状态参数如接触压力、相对滑动速度、甚至温度的变化规律，为管土接触问题提供了解决方法。

3. ADINA-F

ADINA-F 程序为可压缩和不可压缩的流体提供了世界一流的有限元和控制流量的解决能力，流体可包含自由表面和流体间以及流体与结构间的流动界面。程序运用一个任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 公式。

ADINA-F 中使用的程序基于有限元和有限体积离散图，带有非常全面和高效的解决方法，可解决任意几何学中的全部流动问题。

4. ADINA-T

ADINA-T 用来解决固体和结构中的热传递问题。它具有强大的特点，譬如：任意几何图形表面间的辐射、单元生死选项和高度非线性材料特性的功能。ADINA-T 具有以下分析能力：

- 2-D 和 3-D 传导、对流和辐射；
- 立体和壳体结构；
- 稳态和瞬变条件；
- 任意表面间的辐射；
- 单元生死选项；
- 随时间和温度变化的材料特性；
- 自动时间步进；
- 静电、渗流和压电分析；
- 潜热效应，如：凝固和融化条件；
- 与 ADINA 连接。

5. ADINA-FSI

ADINA-FSI 程序是用于带有结构相互作用的流体流动完全耦合分析（多物理场）的主要工具。它把 ADINA 与 ADINA-F 的所有功能全部整合成一个程序模块，结构和流体流动理想化可使用截然不同的网格。它包含自由表面，使用任意拉格朗日-欧拉公式 (ALE)。

6. ADINA-TMC

ADINA-TMC 程序可用于解决如下类型的问题：

- 完全耦合的热机械分析；
- 压电分析（带用户定义子程序）；
- 土壤固结分析（推荐使用 ADINA 程序中的多孔媒介方程来解决这类型的问题）。

第二节 埋地管道建模所考虑的因素

埋地管道建模过程中，对影响因素考虑的多少是建模的关键，也是模型计算结果准确与否的决定因素，埋地管道破坏的影响因素可以归结为以下几个方面：

2.1 管道自身参数的影响

管道自身参数包括管材、管件、管径、壁厚、敷设方式等。

1. 管材的影响

不同用途的埋地管道所使用的管道材料不同，主要材料有铸铁管、钢管、石棉水泥管、预应力混凝土管等。在建模时，管材取决于管道的实际用途，比如燃气、供暖和长距离输油管道以钢管为主；而供水管道大量使用 PVC 管，排水管以石棉水泥管和预应力混凝土管道为主等。不同材质的管道抗震能力有很大区别，大量震害资料表明，韧性好的管材比脆性管材有较好的抗震性能。

2. 管件的影响

事实上，管道的连接方式可分为焊接和机械连接，由于焊接规范规定的焊接质量要求，使得焊缝的强度不低于母材的强度，所以不考虑焊接对管道抗震性能的研究。因此，本文主要研究埋地管道的机械连接，即管件。管件是指由一个或几个零件组成的用于管道连接的零部件，是一种管道组成件，构成埋地管道的重要组成部分。管件按材质可分为金属管件和非金属管件，非金属管件一般应用于特定的腐蚀环境中，配管工程中大部分使用的是金属管件。金属管件中又有钢制、铸铁制以及有色金属制管件，其中使用最多的是钢制金属管件。管件按其用途和使用目的分类，如表 2.1 所示。

表 2.1 管件的用途分类

用途	管件名称
直管连接	法兰、由任、管接头
管道弯曲	弯头、斜接弯头
管道分支	三通、四通、斜三通、半管接头、支管台
异径管连接	异径接头、异径短节、异径管接头
管端封闭	管帽、盲板（盲法兰）、管塞、封头
其它	短管、翻边、螺纹短节、加强管接头等

管道接头，即管件对埋地管道破坏有很大影响，地下管道在受外力作用时，通常都在管件处破坏。如唐山地震中，唐山市三十七中学后街 $\Phi 125\text{mm}$ 钢管，两个转弯处断开；自来水公司北铁道桥至华新桥 $\Phi 400\text{mm}$ 铸铁管因拐弯较多，破坏达 10 处。历次震害调查资料表明，柔性接头的管道抗震性能好于刚性接头，如海城地震时，营口市 8 度区 $\Phi 500\sim 600\text{mm}$ 预应力钢筋混凝土管道，采用橡胶圈柔性接头的石棉水泥管均未发生震害，而石棉水泥接口的同类管道损坏严重，震害率达 20 处/km 以上。据郭恩栋等的研究结果，采用柔性接口的混凝土管道和热熔连接的聚乙烯管道表现出了良好的抗震性能，焊接连续钢管道比柔性连接的球墨铸铁管道的抗震性能好。

在建模中，对管道接头破坏应考虑的主要因素有包括接头处搭接长度、弯头管径的变化、管道的接头形式等。在历次震害中，承插口的拔出现象十分普遍，因此，搭接长度的大小与管道的连接强度有密切关系。在有限元建模过程中，接口处的搭接长度与连接强度可以用同种材料的摩擦来实现，摩擦面积的大小将影响摩擦力的大小，因而搭接长度是影响接口破坏的因素之一。管道转弯处用弯头连接时，弯头的内径即直管的外径，弯头与直管搭接的部位会出现管径的突变，当考虑管道的内压时，突变的管径会使其受力性能发生很大的变化。从

管道的接头形式看,柔性接头的管道抗震性能比刚性接头好得多。其他一些诸如管道的设计、施工、腐蚀程度等因素,对管道接口的破坏也有一定影响。此外,一些情况也表明,不同方位的管道破坏亦有差异。

3. 管径和壁厚

管径和壁厚是管道的基本参数,决定了管道的强度和抗破坏能力,影响到管道轴向应力、环向应力、最大剪应力、轴向应变和环向应变的分布和时程曲线形态。随着管径的变化,管道的应力和应变的分布以及时程曲线发生变化。管道壁厚对管道轴向应力、轴向应变、环向应力和环向应变的影响,从理论上讲,管壁越厚管道横截面面积越大,应力越小。故管壁越厚,管道应力应变越小,破坏越轻,适当增大管道的壁厚会提高地下管道抵抗地震破坏的能力。

4. 敷设方式

地下管道的敷设方式一般要考虑管道内输送介质的不同来进行设计。热力管道大都采用直埋敷设方式;输油管道的敷设方式要考虑因地制宜和技术要求两方面因素,通常采用地沟式敷设和埋地式敷设两种地下埋设方式;给排水管道通常采用直埋和地下管沟处理等方式。直埋敷设与地沟敷设方式各有优缺点,与地沟敷设相比,直埋管道可以节约地沟费用、占地少、施工方便。在投入使用后,易于发现管网发生的问题,给管网的维护创造了条件,保证了管网的正常运行。地沟敷设具有占地面积小,对地面环境影响小,对于热力管道,热损失相对也较小等,与直埋相比,地沟有空气间隙有利于保温层的干燥。管道在受到地震外力作用时,由于地沟做了特殊处理,故相对直埋敷设的管道来说破坏较小。

2.2 场地条件的影响

埋地管道的地震破坏和一般建筑物震害不同,一般建筑物震害是由建筑物和地面在地震时发生相对运动导致,而埋地管道在震时是与地面一起运动的,但因为埋地管道具有空间分布性,在不同空间位置场地条件有所差异,从而引起管道不同部位的相对运动而导致管道破坏。因此,埋地管道的破坏是由场地的差异及其产生的差异运动引起的。这包括土体类型、土体类型的变化、覆盖层厚度、管道埋深等几个方面。

1. 土体类型的影响

不同土体类型在同样地震荷载的作用下,其反应是有很大差异的,从而导致埋地管道破坏的差异。如唐山地震中,唐山市小山东街至吉祥路,有一条管线处于两类土质条件,同样是 $\Phi 300\text{mm}$ 铸铁管,在填土地段,铅接口破坏严重,而在坚实土质处,破坏却较轻;塘沽和汉沽的场地条件比天津差,同样的地震影响下,其破坏严重得多。其破坏机理可描述为:硬土区及硬土-软土的过渡区破坏的原因是管道周围土未均匀变形所致,冲积软土区是由于竖向地震力作用而引起的环形截面断裂、不均匀沉降引起管道屈曲而产生破坏。

2. 土体类型变化的影响

地下管道在不同地质、地理单元交界处或岩土条件变化较大地段易发生破坏。如 1923 年 9 月 1 日日本关东 8.3 级地震中,埋地管线破坏基本集中在丘陵向平原的过渡区。此处岩性由密实土向软土变化,土体出现明显竖向位移、横向位移,地形和岩土性质突变是管道破坏的直接原因。

3. 覆盖层厚度

地震动是由基岩传递到场地的，场地覆盖层厚度对地震动起到或加大或压制的作用，而对管道破坏产生不同的影响。如 1976 年中国唐山地震，覆盖层厚达 100 多米的市路南区震害比覆盖层厚度仅有几米的路北区严重得多。

4. 管道埋深

地下管道一般总是埋在地表下有限的深度处，研究表明，其他条件相同的情况下，管道轴向应力随埋深而增大，弯曲应力基本不随埋深变化。随着管道埋深的变化，管道受力状态发生改变，埋深越浅，作用于管道的土压力、纵向摩擦力就越小，管道在地震时越不易变形，从而降低破坏。

上述震害特点表明了非均匀场地对埋地管网的动力特性有较大的影响。管道在穿过不均匀场地土时，土体出现明显的竖向位移、横向位移，地形和场地条件差异使管道在不同土体类型中变形不同，从而导致埋地管道的破坏产生差异。

2.3 地质构造条件的影响

地质构造条件对埋地管道的破坏主要表现在地层结构和断层活动两个方面。由于不同地区第四系沉积物的性质及其对应的地下地层层序均有很大区别，在同样地震荷载作用下其破坏也就表现出较大差异。断层是导致埋地管道破坏的主要地质构造因素，如 1931 年 Managua 地震，1952 年 Kerncounty 地震，1971 年 SanFemado 地震，1976 年唐山地震，1995 年阪神地震，大量的管道因跨越断层或位于断层附近而受压或受拉发生破坏。震害调查认为，具有高强度和韧性的钢管一般能抗拒强烈地震的地面运动，却不能抵御断层作用和地面破坏所产生的永久地面变形。

断层对埋地管道破坏的影响表现在断距、断层与管道交角、断层材料、断层运动等诸多方面。其中断距、断层与管道交角、断层材料等因素造成管道在断层两侧运动的差异而引起埋地管道破坏；断层活动产生的断层两盘水平和垂直位移，将直接导致场地在断层两侧的永久形变和埋地管道的差异运动，从而导致埋地管道破坏。

2.4 管土相互作用的影响

由于埋地管道的破坏是由管土间发生相互作用引起的，因此，很早人们就意识到考虑管土相互作用的重要，但由于建模手段的缺乏，一直无法建立管土融合分析的有限元模型。也正是立足这一点，我们来探讨考虑管土间物理作用的管土融合有限元建模方法。我们把管土间的相互作用以管土摩擦的形式考虑，在考虑管土摩擦作用时，无论是位移还是应力大小，摩擦均使管道应力值大小有数量级的变化。因此，摩擦是跨断层地下管道破坏数值模拟中一个不可忽略的影响因素。通过研究发现，随着管土摩擦系数的变化，管道的轴向应力应变和环向应变发生变化。通过寻找管道所受应力随摩擦系数的变化趋势来寻找合适的管土摩擦系数，并尝试在工程中通过采用改善回填土质量的办法来改变摩擦系数，从而提高管道抵抗力。

2.5 流固耦合作用的影响

液体输送管道在石油、机械、化工等行业中有着广泛的应用，管道在一定压力和流速的