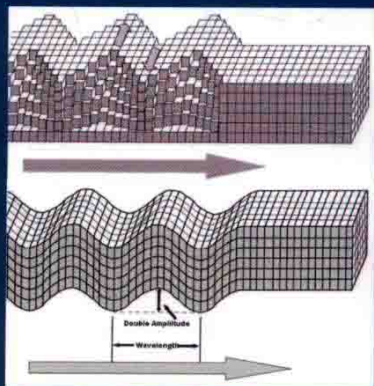


长输管道 地震反应分析

李昕 周晶 著



非外管



科学出版社

长输管道地震反应分析

李 昕 周 晶 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

油气输送工程、城市引水工程等往往需要采用长距离管道运输,地震是长输管道潜在的破坏原因之一。本书系统地论述了长输管道在地震的波动效应和地震引起的永久地面变形作用下的分析理论和方法,共三篇。第一篇论述了陆地和海底长输管道在空间变化的地震波作用下的分析方法;第二篇论述了长输管道在断层和滑坡作用下的分析方法;第三篇论述了长输管道地震作用下的失效模式、失效准则和安全评价方法。

本书可作为相关专业的研究生学习用书,也可供土木工程、水利工程、海洋与船舶工程、工程力学等相关专业中从事管道工程领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

长输管道地震反应分析/李昕,周晶著. —北京:科学出版社,2017.11

ISBN 978-7-03-054967-9

I. ①长… II. ①李… ②周… III. ①长输管道-地震反应分析 IV. ①U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 255474 号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:彭涛
责任印制:张伟/封面设计:耕者工作室

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年11月第一次印刷 印张:20 1/2 插页:2

字数:410 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着社会经济的不断发展,地下管道在输水、输油、输气、排水等方面得到广泛的应用,成为现代社会的大动脉,通常称之为地下生命线工程。长输管道穿越复杂地质条件场地,地震是潜在破坏原因。1971年美国圣费尔南多地震之后,人们从惨痛的地震经验教训中领悟到生命线工程的重要性。国内外广大学者经过近半个世纪的努力,在地震作用下埋地管道的理论分析、试验研究和数值计算等方面取得了丰硕的成果。

地震作用下,导致埋地管道破坏的原因主要是地震的波动效应以及地震引起的断层错动、滑坡、液化等永久地面变形效应。随着计算机性能的提高,数值仿真方法广泛用于埋地管道的地震反应分析。长输管道必须考虑地震波的空间传播效应,建立时域分析模型来精确计算地震波动反应。海底管道不可避免的会出现悬空情况,地震作用下悬空管道与周围海水的相互作用复杂,其水动力计算模型的研究较少。因此,陆地和海底长输管道的地震反应分析和评价方法的研究非常重要。

作者多年从事埋地管道地震反应的研究,结合国内外的文献,总结本课题组的研究成果整理成书。全书共分为三篇:第一篇为地震波作用下长输管道反应分析、论述了空间多点地震动合成方法、地震波作用下长输管道反应的数值分析、地震波作用下长输管道反应的理论分析、地震波作用下海底悬跨管道水动力计算模型、地震波作用下海底悬跨管道分析方法;第二篇为永久地面变形作用下长输管道反应分析,论述了永久地面变形危害、断层作用下埋地管道反应的数值方法分析、断层作用下埋地管道反应的解析方法分析、滑坡作用下埋地管道地震反应分析;第三篇为长输管道地震安全评价、论述了埋地管道失效模式和失效准则、埋地管道地震反应分析经典方法、长输管道地震反应分析和评价软件。

本书是作者及合作者二十多年来研究工作的总结。高级工程师翟贺,博士研究生董汝博、李明高、王滨,硕士研究生刘慧、王原嵩、周灵林、李秀梅、成洪武、赵翀、王颂翔、康鹏程、武慧生和周润等做了大量的研究工作,他们的辛勤工作才使得本书的研究工作逐步深入,也使得本书内容丰富、翔实,在此表示衷心的感谢。

本书的研究工作得到了国家重点研发计划(2016YFC0802301)、国家自然科学基金委员会重点基金(50439010)、面上基金(50308012)、国际合作基金(50811140341)、教育部科学技术研究重大项目(305003)的资助,在此表示衷心

感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，衷心希望读者批评指正。

李 昕

大连理工大学

2017年6月

目 录

第一篇 地震波作用下长输管道反应分析

第 1 章 空间多点地震动合成方法	3
1.1 引言	3
1.1.1 地震动空间变化特性的认识与发展	3
1.1.2 空间相关多点地震动合成三要素	4
1.1.3 空间相关多点地震动合成方法	9
1.2 空间相关多点地震动传统合成方法	10
1.2.1 地震波传播特点及检验方法	10
1.2.2 传统的空间相关多点地震动合成方法	11
1.3 空间相关多点地震动改进合成方法	15
1.3.1 基于实际地震记录的空间多点地震动合成方法	15
1.3.2 基于地震反应谱的空间多点地震动合成方法	20
1.4 空间相关多点地震动合成实例	22
1.4.1 基于传统 HOP 法的地震动合成实例	22
1.4.2 基于实际地震记录的地震动合成实例	25
1.4.3 基于地震反应谱的地震动合成实例	28
第 2 章 地震波作用下长输管道反应的数值分析	30
2.1 引言	30
2.1.1 确定性动力分析法	30
2.1.2 反应谱法	30
2.1.3 随机振动分析法	31
2.2 埋地管道动力反应分析控制方程	31
2.2.1 管道动力时程分析控制方程	31
2.2.2 拟静力方法分析控制方程	32
2.3 管道和土体相互作用模型	33
2.3.1 非液化土土弹簧模型	33
2.3.2 土弹簧的等效刚度	35
2.3.3 液化土土弹簧模型	37

2.4	地震波作用下长输管道反应分析实例	39
2.4.1	管道钢本构关系	39
2.4.2	有限元模型的建立	40
2.4.3	空间相关多点地震波的合成	41
2.4.4	无运行荷载下的地震反应	44
2.4.5	运行荷载下的地震反应	49
2.4.6	运行荷载与无运行荷载结果对比	54
第 3 章	地震波作用下长输管道反应的理论分析	55
3.1	引言	55
3.1.1	不考虑土壤与管道相对变形的埋地管线地震反应计算	55
3.1.2	考虑土壤与管道相对变形的埋地管线地震反应公式	57
3.2	地震行波作用下长输管道轴向变形反应	63
3.2.1	理论推导	64
3.2.2	建议公式的讨论	67
3.2.3	工程实例分析	70
3.3	地震行波作用下长输管道弯曲变形反应	71
3.3.1	公式的推导	71
3.3.2	公式的讨论	74
3.3.3	工程实例分析	75
3.4	地震行波作用下长输管道轴向和弯曲共同变形反应	76
3.4.1	埋地管道总应变计算公式推导	76
3.4.2	总应变计算公式的讨论	79
3.4.3	土体弹簧系数的确定	80
3.4.4	工程实例分析	81
第 4 章	地震波作用下海底悬跨管道水动力计算模型	82
4.1	引言	82
4.2	地震作用下海底悬跨管道水动力模型实验	82
4.2.1	动力模型实验相似理论	82
4.2.2	动力模型实验设计	85
4.2.3	地震作用下管道周围流场特性	90
4.2.4	地震作用下管道受到的水动力特性	95
4.3	地震作用下水动力计算模型	99
4.3.1	传统的 Morison 方程	99
4.3.2	地震作用下水动力计算方程	101

4.3.3	地震作用下水动力系数的确定	106
第 5 章	地震波作用下海底悬跨管道分析方法	111
5.1	引言	111
5.2	海底悬跨管道-水体耦合计算模型	112
5.2.1	悬跨管道-水体流固耦合系统的基本理论及动力学模型	112
5.2.2	悬跨管道-水体流固耦合控制方程和边界条件	117
5.2.3	悬跨管道-水体流固耦合三维数值模拟	119
5.3	含悬空段的海底长输管道计算模型	123
5.3.1	地震激励下管道所受的水动力	123
5.3.2	基于水动力模型的海底管道多点输入耦合运动方程	124
5.3.3	海底悬空管道地震反应影响因素	125
5.4	地震作用下海底管道临界悬跨长度	129
5.4.1	有限元模型建立	129
5.4.2	失效准则确定	131
5.4.3	人工合成地震波作用下悬跨长度的确定	132

第二篇 永久地面变形作用下长输管道反应分析

第 6 章	永久地面变形危害	137
6.1	断层	137
6.2	滑坡	139
6.3	侧向滑移	142
6.3.1	侧向滑移的概念	142
6.3.2	永久地面变形量	143
第 7 章	断层作用下埋地管道反应的数值方法分析	145
7.1	引言	145
7.2	有限元模型的建立	147
7.2.1	管壳单元简介	147
7.2.2	非线性管壳单元有限元模型的建立	150
7.2.3	有限元模型的验证	152
7.3	断层作用下管道反应影响因素	156
7.3.1	断层错动量的影响	157
7.3.2	几何非线性特征的影响	159
7.3.3	管材本构模型的影响	161
7.3.4	管材类别的影响	162

7.3.5	场地土均一程度的影响	163
7.3.6	管道外径的影响	164
7.3.7	管道壁厚的影响	166
7.3.8	管道埋深的影响	167
7.4	断层作用下运行状态埋地管道反应分析	168
7.4.1	管壳单元对内压和温差的考虑	168
7.4.2	数值模型的建立	171
7.4.3	内压的影响	172
7.4.4	温度的影响	173
7.4.5	内压荷载与温度荷载共同作用分析	175
7.5	断层作用下埋地管道等效边界分析模型	176
7.5.1	等效分析模型的建立	176
7.5.2	等效分析模型的验证	183
第 8 章	断层作用下埋地管道反应的解析方法分析	189
8.1	引言	189
8.2	改进解析方法的推导	191
8.2.1	弹性梁分析	192
8.2.2	变量说明	194
8.2.3	基于应力的解析方法	195
8.2.4	基于应变的解析方法	208
8.3	改进解析方法的验证与分析	217
8.3.1	基于应力解析方法的比较	217
8.3.2	基于应变解析方法的比较	220
第 9 章	滑坡作用下埋地管道地震反应分析	224
9.1	引言	224
9.2	轴向滑坡作用下埋地管道反应分析	225
9.2.1	轴向滑坡下埋地管线受力分析	225
9.2.2	轴向滑坡作用的埋地管线有限元建模	232
9.2.3	轴向滑坡作用下埋地管道计算分析	233
9.3	横向滑坡作用下埋地管道反应分析	236
9.3.1	横向滑坡下埋地管线受力分析	236
9.3.2	横向滑坡作用下埋地管道计算分析	243
9.4	深层圆弧滑坡作用下埋地管道反应分析	246
9.4.1	深层圆弧滑坡下埋地管线受力分析	247
9.4.2	深层滑坡作用下埋地管道计算分析	250

第三篇 长输管道地震安全评价

第 10 章	埋地管道失效模式和失效准则	255
10.1	埋地管道抗震规范简介	255
10.1.1	陆地埋地管道抗震规范简介	255
10.1.2	海底管道抗震设计规范简介	256
10.1.3	海底管道与陆地埋地管道抗震设计的异同	259
10.2	埋地管道失效模式	259
10.2.1	拉伸失效	260
10.2.2	局部屈曲	260
10.2.3	梁屈曲	261
10.2.4	滑动式焊接缝	264
10.3	埋地管道失效准则	266
10.3.1	判断准则	266
10.3.2	中国《油气输送管道线路工程抗震设计规范》	267
10.3.3	美国 ASCE—1984 规范	268
10.3.4	美国 PRCI—2004 规范	269
10.3.5	日本 Earthquake Resistant Design Codes in Japan 规范	271
10.3.6	失效准则对比	272
第 11 章	埋地管道地震反应分析经典方法	275
11.1	地震波作用下埋地管道分析经典方法	275
11.1.1	共同变位法	275
11.1.2	位移传递系数法	277
11.2	断层作用下埋地管道分析经典方法	279
11.2.1	Newmark-Hall 法	279
11.2.2	Kennedy 法	281
11.2.3	SY/T 0454—2004	284
11.2.4	GB 50470—2008	285
11.3	断层作用下埋地管道反应控制策略	285
11.3.1	方法说明	285
11.3.2	通用措施	286
11.3.3	专项措施	287
11.3.4	工程实践经验方法	288
第 12 章	长输管道地震反应分析和评价软件	289
12.1	简介	289

12.2	软件基本框架和功能	290
12.2.1	软件基本框架	290
12.2.2	软件基本功能	291
12.3	安装手册	291
12.3.1	运行环境	291
12.3.2	安装软件简介	291
12.3.3	NET Framework.4.0 安装	292
12.3.4	MCRInstaller 安装	293
12.4	使用方法简介	298
12.4.1	启动	298
12.4.2	管道参数输入	298
12.4.3	失效准则的选取	299
12.4.4	断层分析方法选择	230
12.4.5	地震波动分析方法选择	302
12.4.6	土弹簧参数计算	302
12.4.7	应力集中因子	304
12.4.8	断层分布的 APDL 命令流生成	305
12.4.9	数据保存及生成报告	305

参考文献	308
------	-----

彩图

第一篇

地震波作用下长输管道 反应分析

第 1 章 空间多点地震动合成方法

1.1 引言

由震源释放出来的地震波所引起的地表附近土层的振动被称为地震动。地震波在地壳的传播过程中会经历复杂的介质条件,不同频率地震波分量的传播速度、反射和散射方式均不相同,不同空间点的各地震波频率分量的到时、幅值和叠加方式亦不相同。影响地震动的主要因素有三个:震源、传播途径与传播介质、局部场地条件。

对于小尺度结构,结构不同位置受到的地震动差别不大;但当结构在平面上尺度较大时,不同位置经历的地震动将存在一定差异。主要体现在以下四个方面^[1]:① 在地震动场的不同位置,地震波到达的时间上存在差异,即行波效应;② 地震波在传播过程中发生复杂的反射和散射,同时,在地震动场的不同位置,地震波的叠加方式也不同,存在相干性,即部分相干效应;③ 在地震波传播过程中,随着能量的耗散,振幅会减小,即波的衰减效应;④ 在地震动场的不同位置,地质条件不同,影响地震波的振幅和频率,即局部场地效应。这些差异会对大跨度结构的地震反应产生不可忽视的影响,因此建立能够综合反映地震地面运动的空间变化的多点地震动模型对大尺度结构的地震反应分析具有重要的意义。

1.1.1 地震动空间变化特性的认识与发展

人类对地震动空间变化特性的分析研究是从地震动监测台阵建设完成后开始的。在没有获得差动台阵的强震记录之前,学者在研究地震动的空间变化对结构反应的影响时多采用行波法,即完全相干模型。这种方法假定地震波沿地表以一定的波速传播,多点地震记录的形状没有任何变化,只是时间的滞后,没有考虑幅值衰减。行波法能考虑各点间地震动的相位变化,比一致输入前进了一步,但这种方法不能反映各点间的地震动的波形差异。密集的地震动监测台阵建设完成后,根据监测到的数据,人们才对地震动空间变化特性有了新的认识并展开了进一步的研究。

目前,可提供大量数据并被国内外研究人员采用最多的地震动监测台阵是于 1980 年 9 月在中国台湾东北海岸安装的数字强震动地震仪台阵,称为强地面运动台阵台湾 1 号 (strong motion aRay, Taiwan, No.1, SMART-1)。SMART-1 台阵由分别安置在半径为 100m, 1km 和 2km 的三个圆环上的 36 个数字式加速度仪和在

圆心的第 37 个加速度仪共同组成 [2], 具体布置见图 1.1。

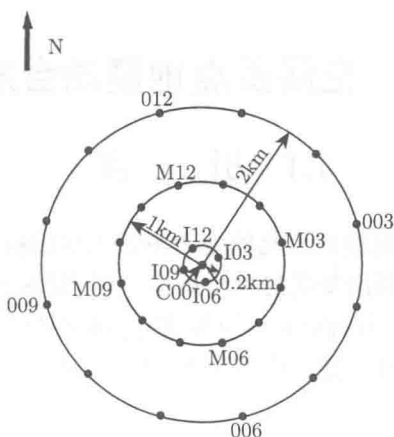


图 1.1 SMART-1 台阵示意图

1.1.2 空间相关多点地震动合成三要素

合成空间相关多点地震动一般需要具备三个要素：① 功率谱密度函数；② 相干函数；③ 强度包络函数。其中功率谱密度函数和相干函数被用来描述地震动空间变化特性。关于地震动空间变化性的研究，通常都是基于台阵采集的地震记录来得到。为了在有限的记录中得到有价值的信息，一般采用如下假设 [2]：

(1) 研究区域内的场地在空间上是均匀的。也就是说，所有描述地震动空间变化性的量只与空间点的相对距离有关，与它们的绝对坐标无关。

(2) 台站采集的地震动时程记录是平稳随机过程。从这个角度来说，地震动记录不存在开始与结束过程。虽然实际地震记录有明显的开始与结束阶段，但这可以看成是无限的平稳随机时程在通过强震剪切波窗 (strong motion shear wave window) 之后的一个时程片断。

(3) 台站采集的平稳随机过程是各态历经的。也就是说，任何一个实例所包含的信息都能充分描述整个时间过程。

以上假设与实际并不完全相符，但这些限制性的假设可以将实际中难以用数学进行描述的统计上的复杂性简单化，对于从众多实际地震记录中提取的描述地震动空间变化特性模型的工作来讲则是必要的。

1. 功率谱密度函数模型

功率谱密度函数是描述地震动频域特性的重要指标，与地震动的场地特性密切相关。根据场地均匀性假设，各空间点的功率谱密度函数应该是一致的。目前应

用最广的是 Kanai-Tajimi 谱及其修正形式。Kanai-Tajimi 谱的表述为 [3,4]

$$S_a(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (1.1)$$

式中： S_0 ——来自基岩的白噪声过程；

ω_g ——土体滤波器的频率；

ξ_g ——土体滤波器的系数。

该模型形式简单，应用方便，经过多年的研究已经形成了较完整的参数确定方法，但是该模型存在低频成分失真以及不满足地面运动的速度和位移在频率 $\omega = 0$ 处是有限值的条件，即不满足两次可积。故对于长周期结构地震反应分析可能给出不正确的结果。为此，国内外学者在 Kanai-Tajimi 谱的基础上提出了一系列的修正方案。

国外最常用的为 Clough 和 Penzien 提出的 C-P 模型 [5]：

$$S_a(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \quad (1.2)$$

该模型在 Kanai-Tajimi 谱的基础上附加了一个滤波器， ω_f 和 ξ_f 分别为该滤波器的频率和阻尼系数。通过调整 ω_f 和 ξ_f ，可模拟地震动低频能量的变化。

国内较为常用的是胡聿贤提出的修正模型 [6]：

$$S_a(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^n}{\omega^n + \omega_c^n} \quad (1.3)$$

式中： ω_c ——控制低频含量的参数。

ω_c 越大，地震动低频含量越小。参数 n 取 4 或 6。

国内学者对 C-P 模型和胡聿贤修正模型进行比较分析后认为 [7]，C-P 模型和胡聿贤修正模型的总体统计结果之间的差异较小。对一般的应用可采用胡聿贤修正模型，因其参数较少，易于确定；但对于抗震安全性能要求较高的长周期结构，建议采用 C-P 模型来充分考虑地震动低频能量的影响。

2. 相干函数模型

相干函数是在频域内描述不同测点地震动过程的相关程度的量，其值介于 0 与 1 之间。一般情况下，地表两个不同点地震动之间的相干函数可以通过以下公式得到

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega) S_{kk}(\omega)}} \quad (1.4)$$

式中： γ_{jk} —— j 和 k 两点地震动的相干函数；

S_{jk} ——两点之间的互功率谱;

S_{jj}, S_{kk} ——两点的自功率谱。

同时为了表达方便,省略了频率下标 n 。式 (1.4) 是一个复数,将其写成指数形式并将两点之间在地表的距离作为变量,则式 (1.4) 可表示为

$$\gamma(\xi, \omega) = |\gamma(\xi, \omega)| \exp[i\theta(\xi, \omega)] \quad (1.5)$$

式中: ξ —— j 和 k 两点之间在地表的距离; $i = \sqrt{-1}$ 。

式 (1.3) 中的复数项 $\exp[i\theta(\xi, \omega)]$ 用以描述地震动的行波效应,即地震波波形的传播导致在前方空间点处地震波到时的延迟。考虑在地震波传播方向上的一系列空间点,则这些地震动相干性的行波效应部分可表示为

$$\gamma_{wp}(\xi, \omega) = \exp\left[-i\frac{\omega(c \cdot \xi)}{|c|^2}\right] = \exp\left[-i\frac{\omega\xi}{c}\right] \quad (1.6)$$

式中: γ_{wp} ——相干性的行波效应部分;

c ——地震波波速。

根据场地均匀性假设,考虑场地内地震波波速一致是合理的 [8]。因此,在式 (1.5) 中:

$$\theta(\xi, \omega) = -\frac{\omega\xi}{c} \quad (1.7)$$

相干函数中的另外一项, $|\gamma(\xi, \omega)|$ 用来描述各点地面运动之间的相似性。到目前为止,各国学者已经提出了许多模型,主要可以分为经验性和半经验性两类。

1) 经验性模型

(1) Feng 和 Hu 模型 [9]。

$$|\gamma(\xi, \omega)| = \exp[-(a\omega + b)|\xi|] \quad (1.8)$$

式中: a, b ——统计参数。

(2) Loh 模型 [10]。

$$|\gamma(\xi, \omega)| = \exp[-a(\omega)|\xi|] \quad (1.9)$$

式中: $a(\omega)$ ——根据实际地震记录得到的关于 ω 的函数。

(3) Harichandran 和 Vanmarcke 模型 [8]。

$$|\gamma(\xi, \omega)| = A \exp\left[-\frac{2|\xi|}{\alpha\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] + (1 - A) \exp\left[-\frac{2|\xi|}{\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] \quad (1.10)$$

其中,

$$\theta(\omega) = K \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^b\right]^{-0.5} \quad (1.11)$$