

油气田储罐

抗风和抗震理论与设计方法

张文福◇著

油气田储罐

抗风和抗震理论与设计方法

张文福◇著

图书在版编目(CIP)数据

油气田储罐抗风和抗震理论与设计方法/ 张文福著

. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-81129-666-2

I. ①油… II. ①张… III. ①油气储存-储罐-抗风
结构-结构设计②油气储存-储罐-防震设计 IV.

①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 248565 号

油气田储罐抗风和抗震理论与设计方法

YOUQITIAN CHUGUAN KANGFENG HE KANGZHEN LILUN YU SHEJI FANGFA

张文福 著

责任编辑 张永生 魏翥然

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 720×1000 1/16

印 张 40

字 数 575 千

版 次 2013 年 11 月第 1 版

印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81129-666-2

定 价 92.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

风灾是自然灾害中发生最频繁的一种,给人类造成了巨大的损失。近半个世纪以来,在结构工程师和空气动力学家的共同努力下,专门研究结构风致振动的结构风工程学得到了发展。时域分析法是对结构进行风致振动分析的主要方法之一,而采用该法的前提是要有一系列的风速(或风压)时程样本,因此研究模拟风场的时域模型就成了该领域的重要内容。

大型石油储罐工程是国家战略石油储备计划的重要组成部分,而储罐大型化所需要的相应抗风研究还是薄弱环节。本书结合对风场模拟的研究成果,用有限元法开展了大型储罐风致屈曲的初步研究。研究表明,储罐在风压作用下可按线性结构来分析,并且考虑风荷载的动力特性对储罐的抗风更有利。

立式圆柱形钢制储罐是石油储运系统中的重要储液容器,多用于存储易燃、易爆的介质,是重大危险源。储罐一旦在地震作用下发生破坏,危害十分严重,因此,储罐的抗震研究成为普遍关注的课题。

本书提出一种新的储罐结构形式——网壳储罐,此结构可以充分利用网壳抗拉、抗弯性能好的特点,有效地减小底板和罐壁的板材厚度,降低造价,且具有外观独特、优美,视觉效果好等优点。

液化天然气(Liquefied Natural Gas,以下简称 LNG)具有便于运输和储存、使用安全的特点,在过去的几十年中,世界 LNG 消费量大幅度增加,各国均将 LNG 作为一种低排放的清洁燃料加以推广。LNG 储罐是存储、使用 LNG 过程中所用到的重要设备。目前国外对 LNG 储罐已有不少研究成果,并且很多成果已应用到工程实际中,但是针对 LNG 储罐的抗风和抗震研究相对欠缺,结构设计人员也迫切需要

了解 LNG 储罐在承受各种动力荷载时的内力及变形规律。因此,开展 LNG 储罐的抗风和抗震力学性能研究具有重要的意义。

本书主要介绍笔者十几年来来的研究成果。全书一共 17 章:第 1 章主要介绍了储罐抗风的重要性和抗风与抗震的研究现状;第 2 章介绍了风的相关知识,并研究了在随机过程中占有重要地位的功率谱,根据其物理含义推导了单、双边功率谱的关系,进而对 Wiener-Khintchine 公式的变换形式做了相应的修正;第 3 章首先对 AR 模型进行了较系统的研究,然后基于小波函数消失矩的概念建立了脉动风速时程模拟的小波分析模型,导出了小波分析模型模拟脉动风速时程的快速算法,并推导了含有时间信息的自相关函数估计和功率谱密度函数估计的表达式;第 4 章进行了大型储罐的风致静力和风致动力屈曲研究,并提出有效的抗风措施;第 5 章提出一种新的储罐结构形式——网壳储罐,采用有限元软件建立了网壳储罐模型,讨论了网壳储罐中环向、纵向网格尺寸及网壳厚度的变化对储罐应力的影响,对已建成的普通储罐进行了优化设计,并对罐壁钢材造价和经济性进行了对比;第 6 章对普通储罐及经优化设计的网壳储罐进行了各种状态下的自振特性分析;第 7 章对经优化设计的网壳储罐进行了四种地震波作用下的地震响应分析,得到了储罐的径向位移、环向应力、轴向应力、液压及波高响应规律,对 Taft 波作用下网壳储罐与普通储罐的地震响应进行了对比,得到网壳储罐地震响应规律;第 8 章介绍了有限元法,结合有限元法阐述了结构分析理论、结构静力分析和动力分析的类型及求解方法,介绍了导管架储油平台的工程概况,并详细地介绍了用 ANSYS 软件建立有限元模型的方法;第 9 章对导管架储油平台上的储罐进行各种荷载组合下的静力分析,并对得到的储罐的尺寸和厚度进行验算,为实例中储罐的安全可靠性提供了参考;第 10 章对导管架储油平台进行了动力特性分析,得到了储油平台在空罐、半罐和满罐三种工况下的自振频率及振型,通过分析频率和振型得到储罐内液体对整个平台结构模态的影响;第 11 章应用 ANSYS 软件建立了三种 LNG 储罐有限元模型,并对模型实施简化,以 SOLID45 有限元模型

为标准,通过模型的振动特性验证 SHELL63、SHELL91 两种有限元模型的可靠性;第 12 章建立了两种 LNG 储罐的六种有限元模型,分别对六种有限元模型进行模态分析,得到各种有限元模型的频率、振型、最大相对位移等;第 13 章将国内规范中的周向风压分布与国外公式进行对比,并用有限元法对两种 LNG 储罐进行了风致静力屈曲分析;第 14 章根据《建筑抗震设计规范》要求,按照 2+1 的原则选取三种地震波对两种 LNG 储罐进行了地震响应分析,记录了两种 LNG 储罐特殊位置点的位移、加速度、等效应力时程曲线,同时对两种储罐在三种地震波作用下的位移、内力、加速度、等效应力等进行对比;第 15 章建立了两类锚固储罐(高罐和矮罐)的三维有限元模型,在满罐状态下对其进行模态分析,得到有限元模型的自振频率和振型,并与现有文献中的结果对比,验证了 ANSYS 流固耦合模型的正确性;第 16 章对 LNG 储罐罐壁、桩、土体进行合理的简化,利用 ANSYS 软件提供的单元建立考虑桩土结构 LNG 储罐的有限元模型,选取三种地震波对满罐和空罐状态下的 LNG 储罐进行单向水平地震波作用下的响应分析,得到 LNG 储罐在这三种地震波作用下的相对位移、加速度,并与不考虑桩土结构的 LNG 储罐的地震响应进行对比;第 17 章对加装防屈曲支撑的 LNG 储罐进行模态分析,然后采用三种地震波进行地震响应分析,得到 LNG 储罐在三种地震波作用下的相对位移、加速度,并与未加装防屈曲支撑的 LNG 储罐的地震响应进行对比。

本书研究内容为国家自然科学基金项目和黑龙江省科技计划项目。全书由张文福撰写,计静等参加了部分文稿编排、资料整理等工作。由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 油气田储罐抗风与抗震研究概述	1
1.1 抗风研究的重要性	1
1.2 抗风研究的主要方法	5
1.3 风场模拟研究现状	8
1.4 储罐的大型化及其抗风研究现状	10
1.5 储罐的抗震研究现状	16
1.6 海洋储油平台研究现状	20
1.7 LNG 储罐的抗风研究	24
1.8 LNG 储罐的抗震研究	27
第 2 章 风场模拟的相关理论及注记	31
2.1 自然风的一些特性	31
2.2 关于功率谱密度的注记	40
2.3 风场模拟中 AR 模型的注记	48
2.4 本章小结	60
第 3 章 基于小波分析的风场模拟	61
3.1 有关小波分析的一些重要内容	61
3.2 基于小波分析的一点处脉动风速时程模拟研究	79
3.3 AR 模型与小波分析模型比较	91
3.4 基于小波分析的空间相关性风场的模拟	96
3.5 本章小结	105

第 4 章 大型储罐风致屈曲初步研究	107
4.1 储罐的风压分布	107
4.2 储罐风致静力屈曲分析	112
4.3 储罐风致动力屈曲分析	128
4.4 本章小结	154
第 5 章 网壳储罐静力分析	156
5.1 有限元模型与验证	156
5.2 网壳储罐静力影响参数分析	165
5.3 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐设计	175
5.4 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐与普通储罐经济性对比	179
5.5 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 普通储罐设计	180
5.6 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐设计	181
5.7 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐与普通储罐经济性对比	183
5.8 本章小结	185
第 6 章 网壳储罐流固耦合频率分析	187
6.1 流固耦合的基本概念	187
6.2 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐自振特性分析	188
6.3 网壳储罐模态参数影响分析	201
6.4 本章小结	204
第 7 章 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网壳储罐地震响应分析	206
7.1 基本理论	206
7.2 地震波的选取	208
7.3 网壳储罐地震响应分析	211
7.4 Taft 波作用下网壳储罐与普通储罐地震响应对比	249
7.5 设计建议	250

7.6 本章小结	250
第 8 章 有限元法及结构分析理论	252
8.1 有限元法及 ANSYS 软件简介	252
8.2 结构分析理论	258
8.3 导管架储油平台工程概况和有限元模型的建立	270
8.4 本章小结	282
第 9 章 导管架储油平台静力分析	283
9.1 导管架储油平台自重下的静力分析	283
9.2 平台甲板上储罐的静力分析	286
9.3 锚固储罐内力计算	310
9.4 本章小结	313
第 10 章 导管架储油平台动力特性分析	314
10.1 导管架储油平台模态分析	314
10.2 冰荷载作用下储油平台结构响应分析	332
10.3 导管架储油平台地震响应时程分析	351
10.4 本章小结	375
第 11 章 LNG 储罐建模方法及其有限元模型的 确定	377
11.1 ANSYS 有限元软件在 LNG 储罐模拟中的应用	377
11.2 LNG 储罐单元及其属性	379
11.3 有限元模型的验证	383
11.4 本章小结	395
第 12 章 LNG 储罐振动特性	396
12.1 LNG 储罐有限元模型	396

12.2	边界条件	398
12.3	单元划分	398
12.4	LNG 储罐模态分析	399
12.5	本章小结	406
第 13 章 风荷载作用下 LNG 储罐的屈曲性能分析		407
13.1	风荷载的一些特性	407
13.2	风荷载的基本参数	414
13.3	LNG 储罐的风压分布	415
13.4	LNG 储罐风致静力屈曲分析	420
13.5	本章小结	433
第 14 章 LNG 储罐地震响应分析		435
14.1	地震响应分析方法	435
14.2	地震波的选取	435
14.3	混凝土 LNG 储罐地震响应分析	439
14.4	夹心 LNG 储罐地震响应分析	484
14.5	本章小结	527
第 15 章 LNG 储罐流固耦合有限元模型的确定		528
15.1	ANSYS 软件建模方法	528
15.2	流固耦合问题的求解	529
15.3	LNG 储罐有限元模型的确定	532
15.4	LNG 储罐桩土结构有限元模型的建立	542
15.5	本章小结	553
第 16 章 地震作用下 LNG 储罐桩土结构动力相互 作用		554
16.1	LNG 储罐模态分析	554

16.2	地震分析方法及地震波的选取	560
16.3	El - Centro 波地震响应分析	565
16.4	兰州波地震响应分析	572
16.5	人工波地震响应分析	579
16.6	本章小结	586
第 17 章 设置防屈曲支撑的 LNG 储罐地震响应分析 ...		587
17.1	防屈曲支撑的构造和原理	587
17.2	防屈曲支撑储罐模态分析	592
17.3	El - Centro 波地震响应分析	593
17.4	兰州波地震响应分析	601
17.5	人工波地震响应分析	609
17.7	本章小结	616
参考文献		618

第 1 章 油气田储罐抗风与抗震研究概述

1.1 抗风研究的重要性

风灾是自然灾害中发生最频繁的一种。国内外统计资料表明,在所有自然灾害中,风灾造成的损失位居各种灾害之首。例如,20 世纪 80 年代对西方国家损失 1 亿美元以上的自然灾害统计结果表明,由于风灾发生的频率高,次生灾害大,其所造成的经济损失占自然灾害总损失的 40.5%。又如,1999 年,全球发生的严重自然灾害共造成 800 亿美元的经济损失,其中飓风造成的损失占 70%。2005 年 8 月 29 日,卡特里娜(Katrina)飓风袭击美国南部墨西哥湾数州,造成的损失达 400 亿~600 亿美元。

高耸、大跨度的悬索桥以及塔架等结构相对而言刚度小,自振周期长,在大多数情况下它们所受的风荷载比地震荷载更大。历史上,此类结构的风毁事件也较多,现简要列举其中的典型事例。

(1) 桅杆

桅杆结构具有经济、实用和美观的特点,但其刚度小,在受风荷载时易产生较大幅度的振动,从而发生疲劳或破坏。近年来,世界范围内发生了数十起桅杆倒塌事故。例如,1955 年 11 月,捷克斯洛伐克一桅杆在风速达 30 m/s 时因失稳而被破坏;1969 年 3 月,英国约克郡一座高 386 m 的钢管电视桅杆被风吹倒;1985 年,联邦德国一座高 298 m 的无线电电视桅杆受风倒塌;1988 年,美国密苏里州一座高 610 m 的电视桅杆受阵风倒塌,造成 3 人死亡。

(2) 体育场悬挑屋盖

图 1-1 所示为英国一座体育场主看台悬挑钢屋盖结构风毁。当大风从开阔的地面吹来时,由于屋盖下部强大的压力和屋盖上部的吸力,屋盖覆面结构(石棉板)在固定点处损坏,从而大片覆面结构被掀掉,而屋盖钢结构基本保持完好。为了调换所有覆面结构,共花费了 26 000 英镑。

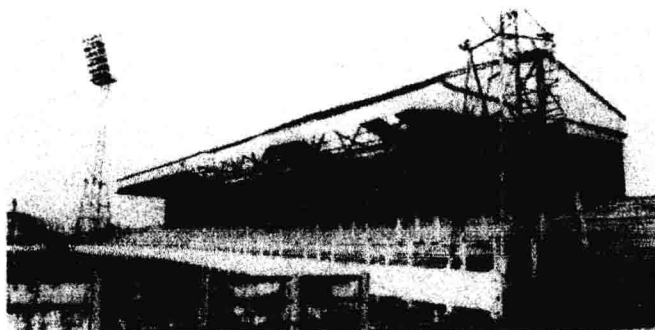


图 1-1 体育场主看台悬挑钢屋盖覆面结构风毁

(3) 电厂冷却塔群

英国渡桥热电厂有 8 座冷却塔,每座塔高 116 m,直径 93 m,其中 3 座塔在 1965 年 11 月 1 日被风吹毁,其余 5 座幸存(图 1-2)。



图 1-2 英国渡桥热电厂冷却塔风毁

(4) 高层建筑

至今还未发现高层建筑因大风作用而倒塌的事例,但发生在 1926 年的一次飓风袭击,使美国一座 10 多层的大楼的围护结构受到严重破坏,钢框架结构发生塑性变形,大楼在整个风暴中严重摇晃。

美国波士顿约翰·汉考克大楼高 241 m,在 1972 年夏天至 1973 年 1 月间,由于大风的作用,共有 16 块玻璃破碎,49 块严重损坏,100 块开裂,后来不得不调换了所有的 10 348 块玻璃,价值 700 万美元以上,超过了原玻璃的价值,同时,还采取了其他防风措施,增加了造价。该建筑不仅使用耽误了 3 年半,而且造价也从预算的 7 500 万美元上升到 15 800 万美元。

(5) 桥梁结构

1940 年,在美国华盛顿州塔科马海峡建造的塔科马悬索桥主跨 853 m,建好不到 4 个月,就在一场风速不到 20 m/s 的风灾中因产生上下和来回扭曲振动而倒塌。图 1-3 是塔科马悬索桥的毁坏瞬间。

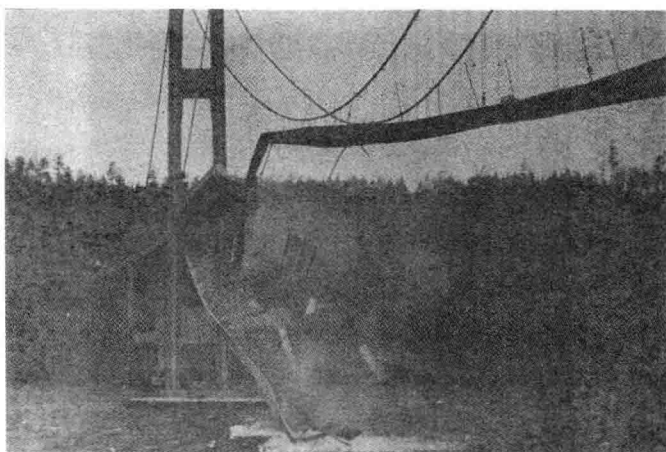


图 1-3 塔科马悬索桥的毁坏瞬间

此外,被大风吹倒的电力输送塔数量就更多了,图 1-4 是其中一个电力输送塔的风毁实例照片。

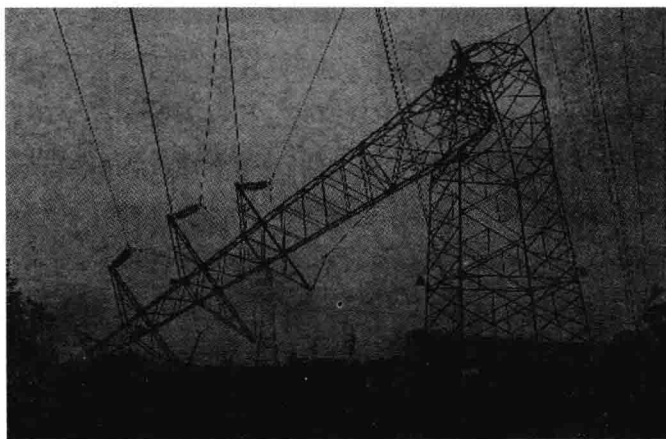


图 1-4 电力输送塔的风毁

在上述事件中,塔科马悬索桥的严重风毁震惊了土木工程界,开辟了土木工程界考虑空气动力学问题的新纪元。半个多世纪以来,结构工程师和空气动力学家经过共同努力,基本上弄清各种风致振动的机理,并且形成了一门新兴的边缘学科——风工程学。作为风工程学核心的结构风工程,研究的就是建筑钝体在近地紊流风场中的气动弹性现象,即风致振动(Wind-induced Vibration)问题。

1.2 抗风研究的主要方法

柔性结构的风致振动有多种形式。对于高耸、大跨度结构,主要是紊流风场中顺风向和横风向的响应;对于大跨度桥梁结构,主要是发散性的颤振和驰振(空气动力稳定问题)、非发散性的涡振和抖振以及拉索的风致振动。

目前,对于风荷载敏感结构的风致振动分析主要有以下几种方法。

1.2.1 频域分析法

将由通用风速谱或由风洞试验测得的风压时程通过傅里叶变换直接转化为风压谱,通过动力传递系数得到动力响应谱,由随机振动理论通过响应谱积分得到结构的动力响应。频域分析方法概念清晰、简便,在工程中应用广泛。

对于大跨度结构,由于其频率密集,在计算中应取多少阶模态,及是否应考虑模态之间耦合项的影响等仍是需要研究的问题。

1.2.2 时域分析法

虽然频域分析法有它的方便之处,但是对结构进行时域分析仍是必要的。首先,频域分析法只能对结构进行线性或准线性分析,要较精确地进行非线性分析,只能借助于时域分析法。其次,从结构工程师的角度看,利用时域分析法可以更直接地了解结构的特性,不必在抗风分析中做简化结构的力学模型等大量工作,只需直接计算出设计所需要的力和位移的最大值。再次,时域分析法还可以比频域分析法获得更多的有关可能发生的疲劳问题的信息。

1.2.3 风洞试验法

虽然理论分析有了高度的发展,但风荷载会在平均值上下波动,存在紊流、旋涡脱落等效应,不仅会引起剪力和倾覆效应,还会为整体结构带

来波动荷载,致使结构的受力分析非常复杂,有时甚至难以实现。所以在复杂结构的设计中,风洞试验法仍是目前得到设计风荷载的一种常用方法。这是因为风洞试验法具备如下特点:

(1)风洞中的气流参数,如速度、压力、密度、温度等,都可以比较准确地控制,且可以随时改变,因而风洞试验可以方便、可靠地满足各种试验要求。

(2)风洞试验在室内进行,一般不受大气环境(如季节、天气、气温等)变化的影响,可以连续进行试验,因而风洞的利用率很高。

(3)风洞试验时,试验数据的测量既方便又准确,而且也比较安全。

(4)风洞试验可以测试结构物的空气静力性能和空气动力性能。

风洞试验法的不足之处主要表现在如下几点:

(1)风洞试验不能同时满足相似律所提出的所有相似准则,如平均风速剖面、紊流度剖面、紊流谱和紊流尺度等。

(2)在风洞试验中,气流是有边界的,不可避免地存在洞壁的影响(洞壁干扰),同时,模型支撑系统也会影响模型流场(支架干扰),这些都影响流场的几何相似。

(3)试验必须采用缩尺模型,比例一般在 $1:200 \sim 1:1\,000$,这样对风荷载效应有影响的建筑物细部通常得不到合理的描述,建筑物上尺寸较小构件的风荷载效应也无法准确得到。

风洞试验尽管有以上的一些不足,但仍有足够的可靠性,因而世界各国先后建造了许多风洞,并且不断更新改进。

1.2.4 数值风洞技术

数值风洞技术是指利用计算流体力学(CFD)方法在计算机上模拟结构周围风场的变化并求解结构表面风荷载的技术。这种技术是20世纪90年代初从航空领域引入土木工程领域的,经20年左右的发展,已成为一种结构风工程研究方法,并逐渐形成了一门新兴的结构风工程分支学科——计算风工程学(CWE)。数值风洞技术已成为结构风工程研究的重要方向之一。