

重要工业设备 在地震中的可靠性分析

[美] ANNE KIREMIDJIAN
RICHARD J. NIELSEN 等著

罗瑛 耿艳玲 译 韦树莲 校



中国石油化工总公司
地震出版社

86.218

9201696

重要工业设备在地震中的可靠性分析

[美] ANNE KIREMIDJIAN 等 著
RICHARD J. NIELSEN

罗瑛 耿艳玲 译
韦树莲 校

中国石油化工总公司

地震出版社

1992

(京)新登字095号

内 容 提 要

本书论述了可靠性研究方面的理论,介绍了最新的可靠性分析方法在重要工业设备(如炼油厂设备)地震失效方面的应用,并通过塔的实例介绍了在进行抗震设计时,采用能量吸收机构来防止结构可能产生的灾难性破坏。本书适用于从事工业设备和工业建筑抗震方面的研究、设计、安装人员和大专院校师生参考使用。

重要工业设备在地震中的可靠性分析

[美] ANNE KIREMIDJIAN
RICHARD J. NIELSEN 等 著

罗瑛 耿艳玲 译

韦树莲 校

责任编辑:李洪杰

责任校对:张崇山 李珩

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/32 4.125印张 99千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数: 0001-2,500

ISBN 7-5028-0565-6/T·19

(954)定价: 3.50元

序 言

传统的结构设计方法,按其发展的先后次序,可分为容许应力法、破坏阶段法和极限状态法。这些方法,尤其是前两种方法,都属于定值设计法。近20年来,结构的安全理论发展很快。人们提出了“结构软设计”理论,也就是从“决定论”走向“统计决定论”和“选择论”。从70年代开始,以概率论为基础的结构可靠性理论日趋完善,许多国家都把可靠性理论纳入结构设计规范中,这在某种意义上可说是设计思想的一场革命,是80年代工程设计领域最热门的话题之一。我国1984年的《建筑结构设计统一标准(GBJ 68-84)》就是在此理论背景下编制而成的。各种工程结构设计规范、标准均应遵守它,或向它所规定的原则靠拢。因此,现在不是我们该不该接受可靠性设计方法,而是如何加紧掌握并运用这个设计方法的问题。

石油化工产品的生产和储运多为组合体系,每个环节的破坏都可能导致整个体系的损坏,从而造成重大的损失,所以每个环节对整个体系的安全度和可靠度就显得非常重要。再加上设计过程的变量多具有很大的不确定性,这对抗震设计更为明显,因此用概率去表达其可靠度就显得更为合理。近年国内外虽已进行了不少的研究,但可靠性设计尚未形成统一的设计准则,更没有体现在石化设备的设计规范中。影响其发展的一个主要原因是统计资料的不完备;此外,这种设计思想尚未得到应有的普及,人们的接受程度有限也是很重要的一个原因。因此,中国石油化工总公司抗震办公室主任韩精忠

同志组织工程抗震振动技术中心站两位同志翻译本书，希望能对这一工作的发展有所贡献。

本书由两篇研究报告组成，是对石油化工设备和炼油厂进行可靠性分析研究的成果，它在这一领域中是一个较新的尝试。其内容从理论到方法都比较具体和细致，因此对石化行业的设计、科研和教学人员都有较大的理论意义和实用价值。对其它行业也是一本新的、实用的参考书。

韦树莲

1991.1

目 录

一、重要工业设备的地震危害性分析.....	
..... A. Kiremidjian K. Ortiz (1)	
1. 概述	(1)
1.1 问题的提出	(2)
1.2 项目范围	(3)
1.3 一般危害性分析问题	(3)
2. 过去大地震的破坏	(7)
2.1 引言	(7)
2.2 破坏汇总	(8)
2.3 讨论和结论	(24)
3. 体系分析法	(26)
3.1 体系分析基础	(26)
3.2 体系失效模式的确定	(32)
3.3 失效模式概率计算	(34)
3.4 体系失效概率	(37)
3.5 总结	(39)
4. 单元体可靠度公式	(40)
4.1 单元体失效的结构可靠性理论	(40)
4.2 对数正态脆弱方法	(44)
4.3 AFOR方法的应用	(46)
4.4 总结和结论	(50)
5. 分析方法在炼油厂的应用	(52)
5.1 炼油厂的一般描述	(52)
5.2 抗震设计标准	(69)

6. 单元体可靠性计算	(79)
6.1 前言	(79)
6.2 螺栓屈服分析	(79)
6.3 裙座屈曲	(91)
6.4 焊缝撕裂	(93)
6.5 非均匀容器	(97)
6.6 总结和结论	(99)
7. 总结和将来的工作	(101)
7.1 总结	(101)
7.2 将来的工作	(103)
二、能量吸收在高塔可靠性中所起的作用	
..... R. J. Nielsen St. Mem. Asce	(105)
引言	(105)
模型的表述	(106)
荷载应力公式	(109)
模型的应用	(120)
符号说明	(124)

一、重要工业设备的地震 危害性分析

1. 概 述

人们已经认识到，需要一套综合方法来评估地震对重要工业设备失效的危害。因为人们已日益觉察到大地震所带来的潜在危害——在地震活动区内分布着大量的工厂，而这些工厂又与人口稠密的地区相邻，因而公众对失效后果的担忧愈来愈强烈。

在众多类型的工厂中，人们最关心的是失效时会导致巨大直接损失(如火灾)或间接损失(如公共服务中断)的设备，例如化工厂、炼油厂、电厂(非核电站)、电子仪器厂、汽车制造厂、食品加工厂、化学及生物实验厂等设备。这些设备根据产品产量、产品价值、经济影响、生态影响的程度等因素，或上述各种因素的综合影响程度而划归为重要工业设备(按此定义，核电站属于重要工业设备，但因核电站设计的独特性和破坏的严重性，需要对它进行专项分析。因此本文不对核电站进行研究)。

本项研究的目的是寻找一个适用于大地震且具有通用性的重要工业设备危害性分析方法。这一危害性分析的结果有下列用途：

(1) 修复经过鉴定确认是薄弱而需要加固或者需要设置赘余构件的现有设备；

(2) 评价和改进现有设计方法;

(3) 为一些可能性极大的严重失效寻求一些应急措施。

1.1 问题的提出

重要工业设备通常是由互相连接在一起的结构、机械和电气等子体系组成。这些子体系在功能和现场特性上是相互依赖的。子体系形成其自己的复杂体系,而子体系本身能通过高级体系分析法进行分析。我们既关心每个子体系的危害性,也关心总体系的危害性。危害性的确定取决于设备的类型和危害性分析的目的。

在常规建筑物中,已经采用了地震危害性分析方法。常规建筑物一般属于单体结构,鉴于重要工业设备的复杂性,建筑物地震危害性分析技术不能直接应用于这些设备上。对核电站来说,在开发体系分析技术方面已做了大量的工作,对这种复杂体系最重要的研究是反应堆安全性研究,由加利福尼亚的Lawrance Livermore实验室所进行的地震安全范围研究(SSMRP)(Smith等,1981;Bohn等,1980)是最新的研究课题。尽管用于以上这些研究的技术很多都可以用于重要工业设备中,但与设计工作相比,所投入的大量资源(人力、财力、时间)并不经济。因此,结构和体系可靠性分析方面新理论的发展非常有限。总之,重要工业设备危害分析的对象与核电站的差别相当大,因此,工业设备的研究应与核电站区别开来。

总的说来,适用于重要工业设备的危害分析方法必须将设备作为一个体系,必须考虑其物理特性和功能之间的相关性。而且这套方法所需要的理论基础必须与每个工业部门流行的结构分析方法和设计实践相一致。目前还没有这样通用

的分析方法。

1.2 项目范围

为了建立一套用于重要工业设备的通用分析方法，本研究集中在评估大体系中单元体*在地震地面运动下的性能。本研究调查了结构可靠性理论的近期发展，提出了应用于多个单元体的可靠度计算标准化公式，并通过炼油厂子体系中一些单元体的应用实例来说明所提出方法的可行性。

1.3 一般危害性分析问题

一般的重要工业设备地震危害性分析方法的主要步骤如下：

- (a) 场地危险性评估；
- (b) 设备单元体性能评估；
- (c) 全厂性能评估；
- (d) 损耗计算。

分析方法进一步划分见图1.1。

场地危险性评估

目前有关场地潜在地面运动的计算方法有多种，其中绝大多数能用于工厂的危害性分析。选用哪个方法取决于该地区的地壳构造状态、整个场地土壤条件的变化及场地的地震历史。例如，一个地区的地质及构造背景、历史地震的考察将揭示沉降带是否存在，地质断层是否被正确地识别出来，地震特征是否经大小事件描述过。因此，选择的模型要尽可能地反映这些方面的情况。场地危险计算结果应由适用于

* 这里分成两种情况来分析：一是对由多个单元体构成的群体(或称为“体系”)进行分析；二是对每一个单元体进行分析。如果把前者作为一个总体，那么后者就相当于前者的一个样本——译注。

设备危害分析方法

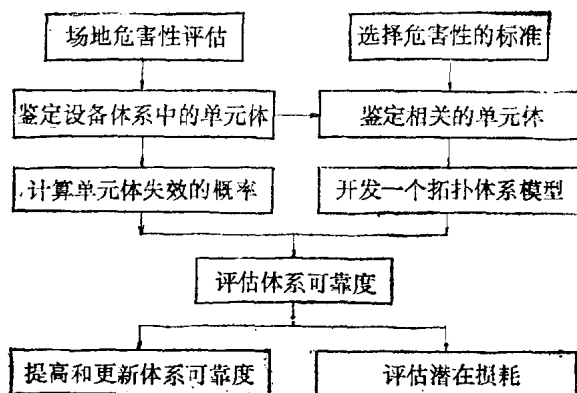


图1.1 重要工业设备震害分析步骤

单元体和体系可靠性分析的地面运动参数来表示，如峰值地面加速度、反应谱加速度、功率谱加速度，等等。同样，危险性预报是对年危险性和设备整个寿命期间的危险性而言。

单元体可靠性分析

在做整个体系可靠性分析之前，一个重要步骤是鉴定子体系的相关性和子体系在整个体系内的作用。结构可靠性理论的最新发展为评估这些单元体的失效概率(或可靠度)提供了方法。改进一阶可靠性分析(AFOR)方法是一非常有用的方法，本文将在第4章中讨论。

体系可靠性分析

传统的体系分析方法是在机械和电气系统中发展起来的。随同体系可靠性评估方法发展起来的数学方法包括事件/故障树、框图和网络分析法。这些技术最早是用在体系中

随机设备失效的研究(也就是基本单元体失效),它们是体系失效的根本原因。在上述分析中可合理地假设单元体失效是互不相关的,可是,工厂中单元体的失效却是互相密切相关的。

大多数体系通常是子体系串联和并联的复杂组合。这些复杂体系通常可以简化为串联组合的并联体系或并联组合的串联体系。这些体系的分析方法将在第三章中更详细地讨论。这种分析的目的在于确定可能发生失效的后果和提高体系的性能。

危害指标和体系模型

为了用节点和杆件网络来模拟设备,需要选择一个危害性指标来确定体系的现场设置和设备的工作情况。

对重要工业设备,有几个危害性指标是特别有用的,其中包括全部资金损耗、产品损耗、火灾危害性及由于有害物质泄漏而造成的危害性。对某个设备的体系描述取决于所选择的危害性估量。下面将对每个指标进行讨论:

(a) 资金损耗:若假设某单元体破坏后的修理费用与其它单元体的破坏状态无关,那么这是计算中最简单的一种情况,全部资金损耗(或称为破坏修理费)是所有单元体的预期费用之和。“全部”危害的最简单形式是单元体危害的算术和。但是,更全面的资金损失测算应包括在停产期间(非操作期间)产品损失而造成的经济损失。

(b) 有害物质的泄漏:有害物质泄漏所造成的危害与核电厂中放射性物质泄漏造成的危害相似。这些泄漏可根据泄漏的数量和后果的严重程度来表示。为了估算泄漏的危害性,首先要确定导致泄漏事件的因果关系以及它们的概率。着重

考虑安全系统对此类分析是十分重要的。

(c) 火灾：火灾可能性与易燃物质泄漏（例如储罐中泄出的丁烷气）几乎是同义词。因此火灾可能性分析与有害物质的泄漏分析是相似的。但有一附加条件，那就是火源必须与易燃物质的泄漏同时出现，并且，在分析中必须考虑防火安全体系。例如，马达上的电火花会点燃泄漏的丁烷气。由于可燃物质的泄漏及火源的存在通常与时间和空间有关，所以火灾可能性及其损失的估算是非常复杂的。简单的分析方法只考虑易燃物质的泄漏，这样便将问题简化为有害物质泄漏的危害性。

(d) 生产损耗：生产中断的损失估算需要精通生产系统知识。除了系统中的常规生产操作外，还必须知道和了解备用的生产线路，这些线路能够使工厂在减产情况下连续操作。以原油脱水系统为例，油水混合物被加热后装进一个油水分离罐，然后在装运前将油抽入几个油罐中。一旦某个分离装置失效，其中一个油罐可改作分离罐，这样可让系统继续操作，或者说在减产状态下操作。在这样的情况下，即使能直接估算单元体和子体系的停工时间，但要估算失效对产量的影响或损耗还是比较困难的。由于生产系统的动态特性和在较长时间内经济上具有不确定性，很难将生产上的损失以货币形式表现出来。

2. 过去大地震的破坏

2.1 引言

为了研究和确定重要工业设备中结构和设备的特性及其失效模式,评述这些工厂在过去地震期间的震害情况是很重要的。本章总结了过去地震事件中结构和设备的破坏情况,尤其强调了炼油厂结构的破坏情况,并对影响破坏的因素进行了简要讨论。

工业设备中结构和设备的破坏取决于地震地面运动的特性、结构或设备的特性和地区的土壤特性。加速度、速度、位移幅值,频率成分、持续时间和超过某一指定幅值的波峰数均为与破坏有关的地面运动特性。目前广泛使用的地面运动参数是峰值地面加速度 PGA。直观地讲,PGA 应与结构破坏程度成正比。但现有的数据太分散,且缺乏确定性,所以不足以证明这一论断。尽管如此,经常报道的地面运动参数仍是峰值地面加速度。其它地面运动参数,如频率成分、运动持续时间、加速度的均方根等,在破坏估算中即使不比 PGA 重要,也是同等重要的。假若有场地的强地面运动记录,就能计算出这些参数。但由于各报告中数值之间有矛盾,所以对参数中的一部分尚没有统一的确定方法,但为了达到本研究的目的,在可能获得的情况下,震害报告中均包含了峰值地面加速度值。而对其它地面运动参数,尽管也承认其重要性,但因为没有现成的结果,其计算也超出本研究的范围,所以未将它们列入报告中。

与损失评估相关的结构特性包括:结构自振频率、阻尼、

延性及其它材料和几何性能,它们对破坏的估算是很重要的。把具有相似现场特征和功能特征的结构编为一组。文献中有一些结构参数方面的信息,这些信息是在参照过去的破坏数据的基础上总结出来的。

对场地输入的地面运动取决于地区的土壤条件。地面运动的频率成分,幅值和持续时间是随场地特性而变的。同样,结构的反应取决于地基土壤和结构之间的相互作用。土壤的液化和沉降是重要的失效模式,即使它们对结构可能没有任何直接的破坏,也必须加以考虑。因此,对过去地震破坏的评述应包含有地区的土壤特性。本文总结了土壤的失效,而且每当有这方面信息时,总是包含所有土壤对结构或设备的破坏形式和破坏程度的影响。

2.2 破坏汇总

过去,有几次大地震影响了重要工业设备。如果要评估未来地震对工业设备的危害程度,仔细研究过去地震对这些设备的影响是非常有价值的。结构和设备在过去地震中的表现对确定单元体和体系中的潜在问题和薄弱环节起到了指导作用。通过调查研究,能够确定单元体可能出现的失效模式和这些失效模式对整个体系的影响。

最近,Yanev和Swan(1982)汇总了一些发电厂不同单元体在大地震中的表现。他们的研究评述了典型单元体的设计标准,计算了在过去地震所给定的地面运动下这些单元体的反应,并报道了单元体的反应对整个体系的影响。他们研究的主要结论是:所设计的设备在承受高达 $0.2g$ 的峰值加速度时表现很好,甚至在承受更大加速度时,表现也很好。他们的研究讨论过多种类型的单元体,如泵、马达、阀门等,这些在

重要工业设备中是常见的。

除了他们的研究结果外，本文汇总了一些典型炼油厂和炼油厂类型的设备的破坏情况，作为从过去地震中收集信息的一例，这个汇总表仅仅描述了直接地震影响所带来的破坏，没有包括类似海啸和液化这样的次生灾害。由于过去50年前的设备和制造方法与现在的情况有本质上的不同，而过去50年间的地震报告在估算方法上基本一致，因此，本篇报告的汇总表中收入了下列地震的破坏情况：

1. 1933年3月10日 加利福尼亚长滩地震
2. 1952年7月21日 加利福尼亚克恩地震
3. 1964年3月27日 阿拉斯加地震
4. 1964年6月16日 日本新潟地震
5. 1971年2月9日 加利福尼亚圣费尔南多地震
6. 1972年12月23日 尼加拉瓜马那瓜地震
7. 1978年6月12日 日本宫城地震
8. 1979年10月15日 加利福尼亚帝谷地震
9. 1980年1月24日 加利福尼亚格林维尔地震
10. 1981年2月24日 希腊中部地震
11. 1983年5月2日 加利福尼亚科灵加地震

破坏情况列在表2.1, 2.2, 2.3中。其中包括罐(表2.1)，高塔(表2.2)和其它设备(表2.3)。表2.2.1是表2.2中最后一列数据的扩充。

表中第1列是地震名称，地震名称下是资料来源。第2列是设备位置或从震中到设备的距离以及已知的场地烈度参数。第3列是结构或设备零件的描述。第4列是破坏情况。最后一列是其它有关信息，包括破坏引起次生灾害地区土壤

2.1 表

地震名称 (资料来源)	地区烈度/ 震级和位置	罐 的 结 构 描 述							结构破坏情况	备 注
		罐数	直径D (英尺)	高度H (英尺)	H/D	罐顶 型式	基础 类型	液面高 (英尺)		
科灵加 1983年 5月2日 (Nielsen, 1983, 未发表)	M(震级) =6.5 距震中 3英里	1	48	30	0.625	固定式	沙石	24.5	在液面处壳体鼓出 并开裂 出口管线拉脱	从挡油堤溢 出。铆接板结 构
格林维尔 1980年 1月24日 (Stratts, 1980)	MMI(修 正的麦卡 里烈度)= VI PGA(峰 值地面加 速度)= 0.2-0.3g	1	25.0	50.2	2.0	固定式	混凝土		产生象足	用20个直径 为5/8英寸的 拉钉把储罐锚 固在基础上

注 1英尺=0.3048m; 1英寸=2.54cm.