

# 基于能力曲线的燃气系统地震脆弱性评估方法<sup>\*</sup>

颜峻

(中国劳动关系学院 安全工程系, 北京 100048)

**摘要:** 为了定量评估燃气系统在地震中的脆弱性水平, 基于能力—需求谱方法建立了燃气系统地震脆弱性评估方法。评估方法从地震潜在危险性分析、结构抗震能力、需求谱与脆弱性曲线建立以及破坏状态预测等四方面着手研究。基于上述模型与方法, 研究了地震动作用下燃气系统最大承载能力、破坏等级及概率。最后以某天然气压缩站主体建筑为例, 建立了反映场地地震潜在危险性的地震反应谱, 构建了用于确定性能点的抗震能力—需求谱, 并基于 FEMA 273 绘制了不同破坏等级的脆弱性曲线, 定量分析了该压缩站遭受破坏等级和概率。

**关键词:** 天然气系统; 地震; 脆弱性; 能力曲线; 需求谱; 评估方法

**中图分类号:** X43; P511.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)01-0028-04

## 0 引言

燃气系统是确保城市正常运行的生命线, 在破坏性地震中不但其自身建筑、设施及管道会遭受严重的破坏, 而且容易导致泄漏、火灾、爆炸等次生灾害事故, 造成的损失可能要比地震造成的直接损失更加严重<sup>[1]</sup>。建立燃气系统地震脆弱性评估方法, 对有效开展城市生命线工程地震风险分析、进行有针对性的灾害事件应急处置决策具有重要的参考价值。

燃气系统可能遭受破坏的对象主要包括设备设施及管线。根据已有的研究成果<sup>[2-3]</sup>, 燃气系统主要破坏的部位包括中压配气管道、管间和支管连接部件、阀门以及高压设施。其中加气站中高压储气罐闸门和管线焊接处在地震中断裂极易导致燃气泄漏, 地下燃气输送管线虽然在地震过程中发生扭曲但并不一定产生严重的损坏。地面的燃气设施或管线却由于建构筑物的局部坠落或整体倒塌而受损。目前针对燃气系统在地震中的损坏主要通过理论分析和经验统计方法进行研究。理论分析方法主要是通过计算管道变形值用以确定管道破坏状态的概率<sup>[4]</sup>。基于经验统计方法包括建立地震烈度与管道震害率之间经验公式<sup>[5]</sup>。一直以来, 尤其是在国内的地震风险评估中均将地震烈度等同于地震动参数加以应用。但人们逐渐发现, 地震烈度与地震动参数之间并不存在明确的对应关系, 有研究表明两者之间存在较大的离散性, 因此将烈度值代替地震动参数用以地震

风险评估及损失预测是不适合的<sup>[6-7]</sup>, 而以地震动参数为基础的地震损失预测分析方法逐渐被国内外广大研究人员所关注<sup>[8-11]</sup>。

本文将基于静力弹塑性分析(Pushover 分析)原理建立用于燃气系统震害脆弱性的评估方法。将从地震潜在危险性分析着手, 找到确定抗震能力极限(性能点)的基本思路, 最终确定衡量燃气系统脆弱性的评估方法。

## 1 评估方法及模型

本文所建立的燃气系统地震灾害脆弱性评估方法是一种将脆弱性曲线与能力—需求谱相结合, 用于描述承灾体破坏程度概率的定量分析方法。首先基于我国《建筑抗震设计规范》中所给出的地震设计反应谱确定地震潜在危险性, 将其转换为表征场地地震强度的需求谱。参照 FEMA 273 中有关能力曲线的设置, 建立燃气系统主体建筑抗震能力曲线。最后, 结合能力曲线与需求谱确定性能点, 并将性能点对应的反应峰值作为脆弱性曲线输入, 得到燃气系统不同破坏等级的概率。方法中涉及到的模型如下。

### 1.1 地震反应谱

地震危险性一般通过地震反应谱加以描述。地震反应谱代表了单自由度弹性系统在不同地震固有周期下的反应最大值(包括峰值地面加速度、峰值地面速度等)。其横坐标对应不同地震周期, 纵坐标为各结构自振周期对应体系的反应最大值。在我国《建筑抗震设计规范》中以地震影响系数作

\* 收稿日期: 2012-05-25

修稿日期: 2012-06-16

基金项目: 中国劳动关系学院院级科研项目“典型城市自然灾害预测预警模型及灾后损失评估方法研究”(10YYA030)

作者简介: 颜峻(1977-), 男, 天津人, 博士, 讲师, 从事公共安全管理及自然灾害风险评估研究。E-mail: yanjunn@sina.com

为抗震设计的依据, 给出的地震设计反应谱(地震影响系数曲线)<sup>[12]</sup>(图1)。图1中 $\alpha$ 为地震影响系数,  $\alpha = S_a/g$ (无量纲);  $S_a$ 为单质点体系在地震作用下的最大反应加速度(g);  $g$ 为重力加速度( $m/s^2$ );  $\alpha_{max}$ 为地震影响系数最大值(无量纲);  $\eta_1$ 为直线下降段的斜率调整系数(无量纲);  $\gamma$ 为衰减指数(无量纲);  $T_g$ 为特征周期(s);  $\eta_2$ 为阻尼调整系数(无量纲);  $T$ 为结构自振周期(s)。

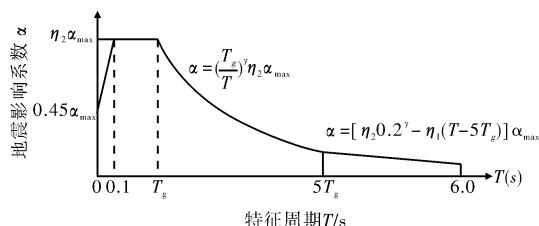


图1 地震设计反应谱

## 1.2 抗震能力曲线与需求谱

能力—需求谱分析方法的理论基础为目前在抗震设计中广泛采用的静力弹塑性分析方法, 即 Push-over 分析方法。建构筑物在地震中的反应由能力曲线代表, 该曲线反映了结构受到地震横向载荷与顶点位移关系曲线(能力谱)。再将地震波到达建构筑物场地的反应谱转化为需求谱, 两曲线的交点即性能点, 作为建筑物在地震作用下的峰值位移或加速度。

### 1.2.1 能力曲线

依据 Push-over 分析方法, 给结构施加水平荷载进行静力推覆, 随着水平推覆力不断增加建筑物进入塑性形变阶段, 最终达到建筑物损坏。在此过程中记录建筑物受到基底剪力与顶点位移, 得到反映建筑物抗震能力的荷载—位移曲线。然后再将建筑物考虑成等效单自由度体系, 转化得到表征谱加速度与谱位移关系的能力曲线。FEMA 273报告中推荐的能力曲线形式如图2所示<sup>[13]</sup>, 同时给出了屈服承载能力与极限承载能力的参数设置参考。

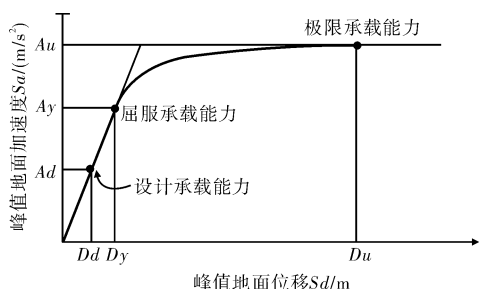


图2 能力曲线

一般认为, 当结构受力到达屈服点以前曲线呈线性变化特征, 因此可通过屈服承载能力与极

限承载能力两个控制点确定能力曲线的形状。已知  $A_y = C_s \gamma / \alpha$ ,  $D_y = 9.8 A_y T_e^2$ ,  $A_u = \lambda A_y$ ,  $D_u = \lambda \mu D_y$ , 式中  $C_s$  为设计强度系数(无量纲);  $T_e$  为结构处于弹性状态时间(s);  $\alpha$  为结构处于静力弹塑性模式自重系数(无量纲);  $\gamma$  为屈服承载能力相对于设计承载能力的结构强度超过系数(无量纲);  $\lambda$  为极限承载能力相对于屈服承载能力的结构强度超过系数(无量纲);  $\mu$  为延性系数(无量纲)。各变量取值可参考 HAZUS-MH 相关说明<sup>[14]</sup>。

### 1.2.2 需求谱建立

在建立以周期为横坐标的加速度反应谱的基础上, 将其转换为加速度与位移关系的需求谱,  $S_a$  与  $S_d$  之间的转换关系为<sup>[14]</sup>:

$$S_d(T) = 0.25 \times S_a(T) \times T^2. \quad (1)$$

式中:  $S_d$  为单质点体系在地震作用下的最大位移(m); 再采用谱折减系数  $R$  将弹性需求谱进一步转化为阻尼比为 5% 的弹塑性需求谱。Newmark 和 Hall 给出的加速度谱折减系数  $R_A$  和速度谱折减系数  $R_V$  计算公式为<sup>[14]</sup>:  $R_A = 2.12 / (3.21 - 0.68 \ln(B_{eff}))$ ,  $R_V = 1.65 / (2.31 - 0.41 \ln(B_{eff}))$ 。式中  $B_{eff}$  为有效阻尼( $N \cdot s/m$ )。

### 1.3 脆弱性曲线

对于燃气设施以脆弱性曲线代表其易损性。脆弱性曲线以对数正态分布函数的形式给出了一定地面震动强度或地基失效程度下承灾体达到或超过特定破坏等级的累积概率分布。以峰值地面位移  $S_d$  为例, 承灾体达到或超过特定破坏等级的概率分布函数有如下形式<sup>[14]</sup>:

$$P[d_s | S_a] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{S_a}{\bar{S}_{a,ds}} \right) \right]. \quad (2)$$

式中:  $d_s$  为破坏等级;  $\bar{S}_{a,ds}$  承灾体达到破坏程度  $d_s$  所承受的峰值地面加速度的中位值(g);  $\beta_{ds}$  为  $S_d$  取自然对数的标准差;  $\Phi$  为标准正态分布累积函数。

### 1.4 损失状态预测

将需求谱与能力曲线画于同一坐标内, 两者的交点即为性能点, 反映了建筑物在地震荷载的作用下所能承受极限承载能力。再将性能点对应的地震强度(谱位移  $S_d$  或谱加速度  $S_a$ ) 作为脆弱性曲线的输入参数, 便可得到不同破坏等级的累积概率值<sup>[15]</sup>。

## 2 燃气设施脆弱性评估步骤

本文所述燃气系统震害脆弱性评估框架是基于 FEMA 273 和 ATC-40 中提供的基本方法, 其步骤如下:

(1) 将设施所在场地的  $S_a-T$  形式的地震加速度反应谱转化成  $S_a-S_d$  形式的需求谱;

(2)将设施的水平荷载——位移曲线转化成  $Sa-S_d$  形式的能力曲线;

(3)将折减后需求谱与能力曲线置于同一个坐标内,其交点即为设施最大承受极限值(谱加速度或位移);

(4)在反映不同破坏等级的建构筑物或设施脆弱性曲线上,查找对应上述谱加速度(位移)的概率值,即为该燃气系统可能遭受特定破坏等级的可能性大小。

### 3 应用

以 8 级地震所在震中区域的天然气压缩站为例说明脆弱性评估基本步骤。研究场地及天然气压缩站设置条件为:场地类别为 II 类,设计地震分组第一组;天然气压缩站结构形式:预制混凝土框架内填混凝土剪力墙结构,层数 2 层。

#### 3.1 加速度反应谱选取

根据规范要求,采用如图 1 形式的设计反应谱。反应谱相关参数设置如下:水平地震影响系数最大值为 0.9,特征周期值为 0.4 s,建筑结构的阻尼比取 0.05,地震影响系数曲线的阻尼调整系数为 1.0,曲线下降段自特征周期至 5 倍特征周期区段的衰减指数取 0.9。直线下降段自 5 倍特征周期至 6s 区段下降斜率调整系数取 0.02。通过计算,得到天然气压缩站所在场地地震设计谱如图 3 所示。以该反应谱作为该天然气压缩站所在场地的地震潜在危险。

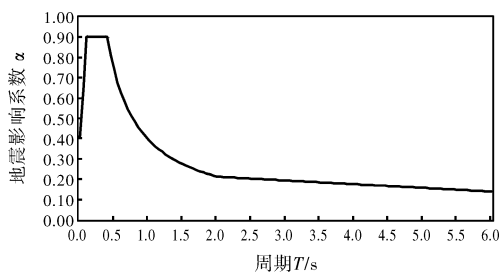


图 3 天然气压缩站所在场地地震设计端

#### 3.2 能力与需求谱参数设定

根据公式 1 可将上述反应谱转化为以谱位移  $S_d$  为横坐标、经加速度谱折减系数  $R_A$  折减后的需求谱,如图 4 所示。其中折减后的需求谱代表了该站所在场地的地震强度。得到需求谱后,下一步是确定性能点所处的位置,首先是得到反应该压缩站建筑结构的抗震能力曲线。

为了进一步得到该站抗震能力曲线。以图 2 所示能力曲线为基本形状,并依据 HAZUS-MH 对相关能力曲线参数进行设置。本例中屈服承载能力与极限承载能力两个控制点相关参数设置如下:  $C_s$  为 0.05,  $T_e$  为 0.35,  $\alpha$  为 0.75,  $\gamma$  为 1.5,  $\lambda$  为 2,

$\mu$  为 5。将以上参数代入能力谱控制点公式,得到该天然气压缩站抗震能力曲线如图 5 所示。

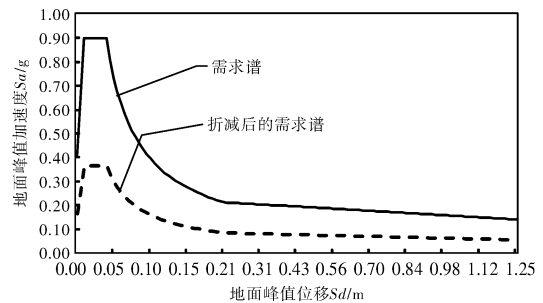


图 4 天然气压缩站需求谱

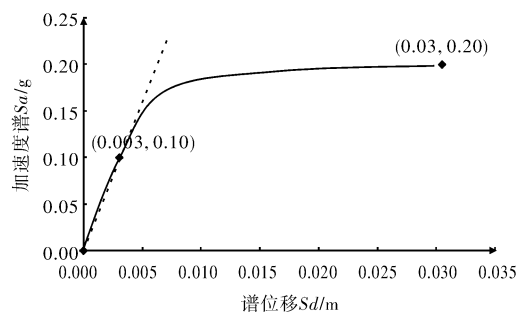


图 5 天然气压缩站抗震能力曲线

#### 3.3 性能点及破坏概率

将天然气压缩站抗震能力曲线与需求谱绘制在同一坐标内,得到性能点,如图 6 所示。可以看出,性能点对应的地面峰值加速度约为 0.2 g,地面峰值加速度约为 0.07 m。该性能点反映了天然气压缩站在本次地震中所能承受的极限值。

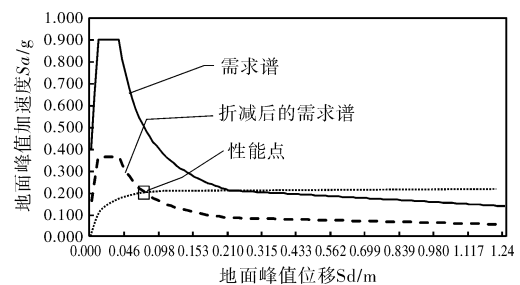


图 6 天然气压缩站抗震性能点

由于我国缺少燃气压缩站脆弱性曲线相关数据,这里依据 HAZUS 中建议采用相关参数,如表 1 所示,拟合出的天然气压缩站的脆弱性曲线,如图 7 所示。

表 1 天然气压缩站建筑结构脆弱性曲线  $\bar{S}_{a,ds}$  及  $\beta_{ds}$

| 类型   | 破坏程度 | 中位值  | 标准差  |
|------|------|------|------|
| 锚固储罐 | 轻微   | 0.15 | 0.75 |
|      | 中等   | 0.34 | 0.65 |
|      | 严重   | 0.77 | 0.65 |
|      | 完全   | 1.50 | 0.80 |

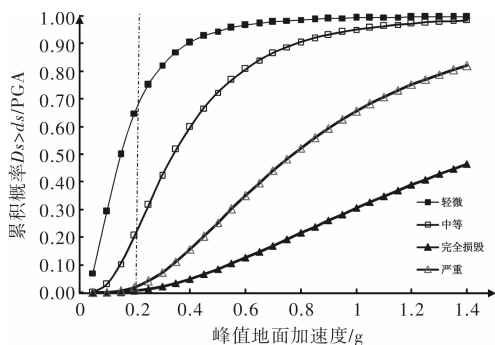


图7 天然气压缩站抗震性能点

图7所示脆弱性曲线,反映了该天然气压缩站四种破坏程度的概率值。由图中任一条脆弱性曲线趋势可以看出,随着地震所导致的地面峰值加速度的加大,特定破坏程度的概率也在不断的提高。并且当地面峰值加速度值相同时,压缩站较低破坏程度的概率相对较高。最后,根据图6中确定的性能点,可以得到当峰值地面加速度为0.2 g时,对应的轻微破坏的概率约为0.65,而对应中等破坏的概率为0.2。至此,完成了在特定地震强度下该天然气压缩的脆弱性评估工作。

## 4 结论

基于能力需求谱分析方法,以燃气设施地震脆弱性评估方法为研究主线,建立了脆弱性评估模型。通过研究,得到以下结论:

(1)由于地面烈度与反映地震强度的动参数之间存在较大的不确定性,因此选取地震动参数为基础进行建构物脆弱性评估更为合理。

(2)对于同一类承灾体,随着地震动参数强度的不断加大,该承灾体遭受特定破坏等级的概率也随之提高,脆弱性曲线呈现对数正态分布特征。

(3)对于相同强度地震动参数,破坏等级提高对应的破坏概率相对降低。算例中8级地震中燃气系统遭受中等破坏的概率要比遭受轻微破坏的概率低约45%。

(4)将 *push-over* 方法用于确定承灾体抗震能力极限,并应用于定量分析脆弱性水平,适合工程实践要求,同时能够满足结构抗震性能设计基本理论。

(5)基于能力需求谱的脆弱性评估方法具有直观、参数物理意义明确等特点,符合当代基于性能的抗震设计理念,代表了承灾体脆弱性评估的发展方向,已被各国广泛的重视。

## 参考文献:

- [1] 叶耀先. 地震灾害比较学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 高乃辉, 赵鸣, 李素贞, 等. 汶川8.0级地震都江堰市天然气系统震害分析及救灾过程[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 71-76.
- [3] 周成. 化工储罐区事故多米诺效应概率分析[J]. 石油化工设备, 2010, 39(3): 31-34.
- [4] 金康锡, 任爱珠. 煤气管道的震害率分析[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 148-153.
- [5] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 胡聿贤. 地震工程学(第二版)[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [7] 吕红山. 基于地震动参数的灾害风险分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
- [8] 温增平. 建筑物地震易损性分析研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009.
- [9] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model HAZUS-MH MR3 technical manual[R]. Washington, D. C: FEMA, 2003.
- [10] 杨杰, 刘茂, 徐宁. 基于能力谱的建筑物震害评估及城市抗震规划[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 18-24.
- [11] 陈长坤, 李建, 孙云凤, 等. 基于粗糙集的城市燃气管道破坏灾害演化诱发机制分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 92-96.
- [12] 中华人民共和国国家标准. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings[R]. FEMA 273. Washington, D. C., 1996.
- [14] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model HAZUS-MH MR3 technical manual[R]. Washington, D. C., 2003.
- [15] N M Newmark, W J Hall. Earthquake spectra and design[M]. Earthquake Engineering Research Institute Monograph, 1982.

## Vulnerability Assessment Method of Natural Gas System in Seism Based on Capacity Curve

Yan Jun

(Department of Safety Engineering, China Institute of Industrial Relations, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In order to assess the vulnerability level of natural gas supply system in seism quantitatively, assessment method of vulnerability level is investigated based on capacity-demand spectrum. Study works are done from 4 aspects including potential earthquake hazard analysis, capacity-demand spectrum of the natural gas supply system, vulnerability curves and forecast method for the destruction state. On this basis, maximum carrying capacity and probabilities of specific damage levels in the role of ground motion parameters are studied. Finally, take for example the main structure of a natural gas compressor station, seismic response spectrum is established to analyze the potential earthquake risk, capacity-demand spectrum is constructed to determine the seismic performance point, vulnerability curves of the corresponding destruction states for this type of natural gas compressor stations is drew based on the FEMA 273, the level and the possibilities of destruction level is calculated quantitatively.

**Key words:** natural gas system; seism; vulnerability; capacity curve; demand spectrum; assessment method