

工业设备震害预测研究*

孙增寿 李 杰 陈淮

(郑州工学院土木系)

摘 要: 本文在分析工业生产设备结构特点和震害规律的基础上, 提出了一般地面上工业设备的震害预测方法, 并成功地应用于大中型企业震害预测工作中。

关键词: 工业设备, 震害预测。

中图分类号: P315

在近代的历次地震灾害中, 不仅出现了大面积建(构)筑物的严重损坏; 通讯、电力, 以及厂矿企业中的生产设备也往往遭到不同程度的损坏; 而且由于通讯、电力等关键设备的重要性, 它们的震害程度直接关系到震时的救援和震后的恢复工作, 所以, 对设备的抗震能力进行分析研究是十分必要的。

目前, 为了提高城市的企业的综合抗震防灾能力, 大部分城市和企业已经编制了本市和本企业的抗震防灾规划。但是, 在防灾规划的基础研究工作中, 只进行了建(构)筑物的震害预测, 进而预测城市和企业遭遇地震后的直接经济损失和间接经济损失, 很少涉及设备的震害预测。众所周知, 生产设备是企业的重要组成部分, 是企业赖以存在和生产的基础。企业的综合抗震防灾能力, 企业震后的经济损失和企业震后恢复生产的时间等都与设备的抗震能力密切相关。所以, 设备的震害预测工作是企业防灾的重要组成部分。

基于工业设备的结构特点和震害特点, 本文提出了地面工业设备的震害预测方法, 并给出了震害划分的多准则标准, 编制了相应的计算机程序。这一工作对于工矿企业进行工业设备的抗震性能评定具有基础性的意义。

1 工业设备的震害特点

纵观各类厂矿企业, 不难发现, 大部分设备位于建筑物内部, 它们与地面(或楼面)的连结形式主要有下述两种类型:

- ① 设备直接搁置在地面(或楼面)上, 有的用缆绳与地面拉结。
- ② 设置通过地脚螺栓或支承固定在地面(或楼面)

所以在地震中, 设备的震害也分为两个方面。一方面是建筑物的倒塌或严重破坏将设

* 收稿日期: 1993-06-19

备砸坏，因此，设备的震害预测必须和建筑物的震害预测相协调。另一方面是设备自身在地震荷载作用下的损坏。本文所研究的是第二方面的震害。

历史震害表明，工业设备的震害通常表现为连接和支承的破坏。例如，浮放在地面上的设备，往往由于抗倾覆能力不足翻倒而造成破坏；对锚固于地面上的设备，当它与地面锚固不足时，往往由于地脚螺栓被拉断或剪断而造成破坏；而支承在支架上的设备，由于支架的侧向刚度较小，其破坏多是由于刚度或强度不足，因而经受不住地震时激烈的侧向摇动所造成。

2 工业设备的震害预测

2.1 地震作用计算

由于设备自身的刚度较大，且质量比较集中，所以采用底部剪力法计算设备的水平地震作用，其计算简图如图 1 所示，计算公式为：

$$F_0 = I \cdot \alpha_{max} \cdot mg \tag{1}$$

式中：

- I ——设备重要性系数，
一般设备取 1.0，
特别重要设备取 1.5
- α_{max} ——地震影响系数，
按表 1 取值
- m ——产生地震力的总质量。

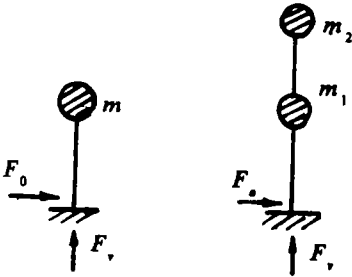


图 1 设备地震作用计算简图

表 1 地震影响系数

烈度	7	8	9
α_{max}	0.23	0.45	0.9

对于重叠式设备，按式(2)进行底部剪力分配
$$F_i = \frac{m_i H_i}{\sum_{j=1}^n m_j H_j} F_0 \tag{2}$$

F_i ——第*i*个设备所受的水平地震力，
竖向地震作用按式(3)计算
$$F_v = \begin{cases} 0.5 F_0 & (\text{地震烈度} \geq 8^\circ) \\ 0 & (\text{地震烈度} \leq 7^\circ) \end{cases} \tag{3}$$

2.2 震害预测

2.2.1 浮放式设备的计算

浮放式设备直接搁置在地面上，和地面之间没有任何联接，在较小的水平动力荷载作用下，由于摩擦力的存在，不会产生倾倒或移动，不影响其正常工作。一旦遭遇较强地震，在水平地震力的作用下，设备极易发生移动和倾覆。

如图 2 所示，以设备的一边（B 点）为矩心，考虑水平和竖直地震作用倾覆力矩为：

$$M_{ov} = F_0 \cdot \frac{L}{2} \quad (4)$$

抵抗倾覆力矩

$$M_r = \frac{1}{2} mgL \quad (5)$$

以倾覆系数 K_r 表示设备抵抗倾覆能力.

$$K_r = M_r / M_{ov} \quad (6)$$

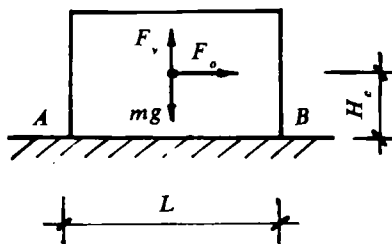


图2 浮放设备计算简图

2.2 卧式设备计算

卧式设备在石化、机械等企业较常见，如化工企业中的卧式储罐，机械企业中的车床、镗床、铣床等，它们大部分是通过地脚螺栓固定在地面或突出地面的砼支座上，其抗震能力主要决定于地脚螺栓和支座的抗震能力。而在地震作用下，地脚螺栓主要承受由于水平地震作用、竖直地震作用和倾覆力矩作用所产生剪应力和拉应力，砼支座主要承受水平剪力和由倾覆力矩作用所产生压力

① 地脚螺栓

卧式设备的计算简图如图3所示，在水平地震力 F_0 作用下，假定基底剪力平均分配，则地脚螺栓承受的剪应力为

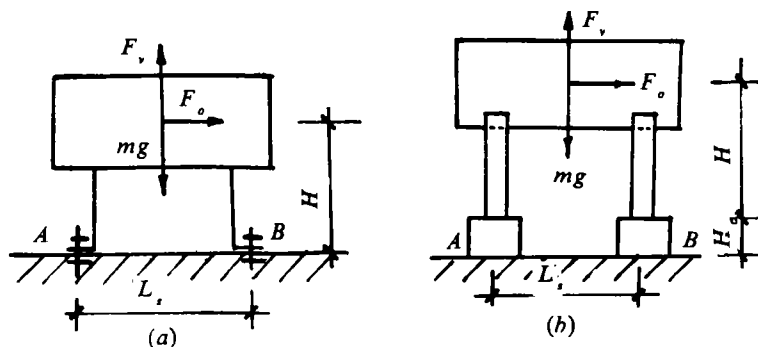


图3 卧式设备计算简图

$$f_v = \frac{F_0}{n_d A_d} \quad (7)$$

对B点取矩，由力矩平衡条件 $\sum M_B = 0$ ，并且考虑竖向地震力的作用，我们可以得到在地脚螺栓中产生的拉应力

$$f_v = \frac{2F_0 H}{A_d n_d L_s} + \frac{F_v - mg}{A_d n_d} \quad (8)$$

式中： A_d ——螺栓有效断面积(mm^2)； n_d ——支座上地脚螺栓个数

H ——设备重心高度(mm)

显然，地脚螺栓在地震作用下承受剪力和拉力的复合作用，运用能量强度理论，螺栓在复杂应力作用下的折算应力为

$$f_{2s} = \sqrt{f_t^2 + 3f_v^2}$$

以螺栓的屈服强度系数 K_{2s} 来反映螺栓的抗震能力, 则有

$$K_{2s} = f_t^b / f_{2s} \quad (9)$$

式中 f_t^b 为螺栓的抗拉强度设计值.

② 砼支座

在一些设备连结中, 由于工艺和防腐方面的要求, 往往设置有突出地面的砼支座.

这时, 还必须对砼支座进行抗剪和抗压强度计算

假定支座截面为 $b \times h$, 根据钢筋砼构件抗剪性能得

$$Q_{cs} = 0.07f_c b h_0 + 1.5 \frac{A_{sv}}{S} h_0 \quad (10)$$

$$\text{而水平地震作用在支座中产生的水平剪力为 } Q = F_0 / n_z \quad (11)$$

$$\text{则支座抗剪屈服系数为 } K_s = \frac{Q_{cs}}{Q} \quad (12)$$

式中:

f_c ——砼抗压设计强度 f_s ——钢筋抗拉设计强度.

A_{sv} ——同一截面内箍筋的截面面积 S ——箍筋间距

在地震作用下, 砼支座不仅受到压力的作用, 而且由于水平剪力的作用还将在砼支座中产生弯矩, 这就使得砼支座处于偏心受压状态.

$$M = \frac{1}{2} F_0 H_c, \quad N = \frac{1}{2} mg - \frac{1}{2} F_v \pm \frac{F_0 H}{L_e} \quad (13)$$

当 $e_0 = \frac{M}{N} > 0.3h_0$ 时, 构件处于大偏心受压状态, 构件截面抵抗弯矩为

$$M_u = f_{cm} b \xi (h_0 - \frac{\xi}{2}) + f_s A_s' (h_0 - a') \quad (14)$$

当 $e_0 \leq 0.3h_0$ 时, 砼支座处于小偏心受压状态, 支座截面抵抗弯矩为

$$M_u = 0.5f_c b h_0^2 + f_s A_s' (h_0 - a') \quad (15)$$

式中: ξ ——受压区高度, $\xi = \frac{Nb}{f_c}$

a' ——受压钢筋合力点到受压区边缘的距离, 取 $a' = 0.1B_s$, B_s 为支座宽度

由地震作用和砼支座抗力, 我们得到砼支座的抗弯判定系数

$$K_M = \frac{M_u}{N_e} \quad (16)$$

e ——垂直压力 N 到受拉钢筋合力点的距离 (m), 按下式计算

$$e = e_0 + \frac{h}{2} - a' = e_0 + 0.4h \quad (17)$$

根据历史震害资料和上述分析, 考虑螺栓等材料的变形性能, 将设备震害划分为基本完好、轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏和倾倒五个等级, 本文建议的各等级的震害划分标

准如表 2 所示

表 2 多准则化分标准

震害判定系数	I	S	M	Y	D
K _r	K _r >1.2	K _r >1.2	K _r >1.2	K _r >1.2	K _r <1.2
K _{2s}	K _{2s} >1.0	0.6<K _{2s} <1	0.3<k _{2s} <0.6	0.1<K _{2s} <0.3	K _{2s} <0.1
K _s	k _s >1.24	1<K _s <1.24	0.7<K _s <1	0.4<K _s <0.7	K _s <0.4
K _m	k _m >1.24	0.8<K _m <1.24	0.5<K _m <0.8	0.25<k _m <0.5	K _m <0.25

注: I——基本完好 S——轻微破坏 M——中等破坏 Y——严重破坏
D——倾倒

2.2.3 支承式设备震害预测

在石油化工企业中,立式反应器和立式容器等设备往往采用支承式连接和固定,具体结构如图 4 所示,对支承式设备,除了对地脚螺栓和砼支座进行分析外,由于支腿截面尺寸较小,还必须对支腿进行强度分析和稳定分析.对单个支腿来讲,由于设备和支腿连接处的偏心影响,在地震作用下,支腿处于偏心受压状态.

$$P_c = \frac{4F_0 L_e}{n_e D} + \frac{mg}{n_e} + \frac{F_v}{n_e} \tag{18}$$

$$M = QL_1 = \frac{F_0 L_1}{n_e} \tag{19}$$

偏心率 $\varepsilon = \frac{M}{P_c} \cdot \frac{A_s}{W}$

当 $\varepsilon \leq 30$, 则按下式计算支承压应力

$$f_z = \frac{P_c}{\varphi A_s} \tag{20}$$

当 $\varepsilon > 30$, 支腿压应力为

$$f_z = \frac{M}{W_j} \tag{21}$$

由此得震害判定系数

$$K_z = f^b / f_z \tag{22}$$

式中:

φ ——钢支腿在弯矩作用平面内的稳定系数,按钢结构设计规范选取.

W_j ——钢支腿在弯矩作用平面内的净截面抵抗矩(m^3)

与卧式设备相同,支承式设备的震害也为五个等级,本文建议的各等级的震害划分标准如表 3 所示

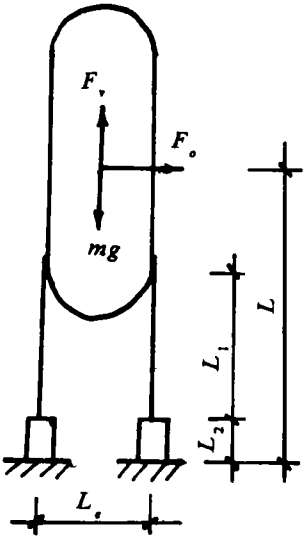


图4 支承式设备

表 3 震害化分标准

震害判定系数	I	S	M	Y	D
K_{zs}	$K_{zs} > 1.0$	$0.6 < K_{zs} > 1.0$	$0.3 < K_{zs} > 0.6$	$0.1 < K_{zs} < 0.3$	$K_{zs} < 0.1$
K_z	$K_z > 1$	$K_z > 1$	$0.8 < K_z < 1$	$0.6 < K_z < 0.8$	$K_z < 0.6$
K_M	$k_M > 1.24$	$0.9 < K_M < 1.24$	$0.6 < K_M < 0.9$	$0.35 < K_M < 0.6$	$K_m < 0.35$
K_s	$k_s > 1.24$	$1 < K_s < 1.24$	$0.8 < K_s < 1.0$	$0.55 < k_s < 0.8$	$K_s < 0.55$

3 震害预测实例

运用上述多准则判别方法对某企业的重要生设备进行了震害预测，该算例为某一卧式设备的震害预测过程与结果

设备资料：设备质量 $m_0 = 10.5 \times 10^3 kg$ ，支架质量 $m_z = 2000 kg$ ，支架采用 4 个 M24 的地脚螺栓固定在砼支座上，支座宽 350mm，深 500mm 埋置在地坪之下，基本地震烈度为 8°，今依据本文方法预测其震害。

首先计算设备重心处的集中质量，此时，考虑支架部分，将支架质量的一半集中于设备重心处，另一半集中于支座。

$$m = m_0 + \frac{1}{2} m_z = (10.5 + \frac{1}{2} \times 2.0) \times 10^3$$

$$= 11.5 \times 10^3 kg$$

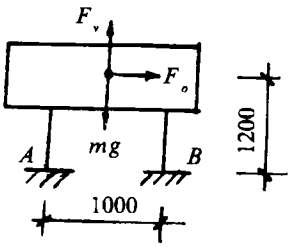


图5 算例计算简图

在地震作用下，水平和竖向地震力为

$$F_0 = \alpha_{max} mg = 0.45 \times 11.5 \times 10^3 \times 9.8 = 50.77 \times 10^3 N$$

$$F_v = \frac{1}{2} F_0 = 25.78 \times 10^3 N$$

由于该设备为卧式设备而且支座埋置在地坪之下，所以不必进行砼支座抗弯和抗剪计算，只需进行抗倾覆和地脚螺栓的分析计算。

以支座B为矩心

$$M_{ov} = F_0 \cdot H + \frac{1}{2} F_v \cdot L = 50.77 \times 10^3 \times 1.2 + \frac{1}{2} \times 25.38 \times 10^3 \times 1 = 73.6 \times 10^3 N - m$$

$$M_r = \frac{1}{2} mgL = \frac{1}{2} \times 11.5 \times 10^3 \times 9.8 \times 1.0 = 56.35 \times 10^3 N - m$$

$$K_r = M_r / M_{ov} = 0.76$$

在水平地震力 F_0 和竖直地震力作用下，地脚螺栓中心拉应力和剪应力为

$$f_t = \frac{2F_0 H}{A_d n_d L} + \frac{F_v}{A_d n_d} - \frac{mg}{A_d n_d}$$

$$= \frac{2 \times 50.77 \times 10^3 \times 1.2}{3.4 \times 10^{-4} \times 4 \times 1} + \frac{25.38 \times 10^3 - 11.5 \times 10^3 \times 9.8}{3.4 \times 10^{-4} \times 4} = 25.3 MPa$$

$$f_v = \frac{F_0}{n_d A_d} = 50.77 \times 10^3 / 3.4 \times 10^{-4} \times 4 = 37.3 MPa$$

螺栓在拉力和剪力作用下的折算应力为

$$f_{zs} = \sqrt{f_t^2 + 3f_v^2} = \sqrt{25.3^2 + 3 \times 37.32^2} = 69.3 MPa$$

屈服强度系数为

$$K_{zs} = f_t^b / f_{zs} = \frac{170}{69.3} = 2.4 > 1.0$$

从分析结果可以看出, 该设备不能浮搁, 若采用 4 根 M24 螺栓连接, 在 8° 度地震作用下, 设备处于完好状态。

4 结语

本文提出了地面工业设备的震害预测方法, 该方法使用方便, 并与现行建筑抗震规范相衔接, 易于工程技术人员掌握。初步应用表明, 本文提出的方法是可行的, 但由于这一问题的复杂性, 本文只是工业设备震害预测系列研究的初步结果, 其中有些参数还需根据新的资料和进一步研究进行调整。另外, 有关楼层设备震害预测方法将另文发表。

参 考 文 献

- 1 钢筋砼结构设计规范(GBJ10-89)
- 2 钢结构设计规范 (GBJ17-88)
- 3 建筑抗震设计规范 (GBJ11-89)
- 4 工业设备震害预测. 化学工业部抗震防灾研究室报告集91003.
- 5 李杰, 李国强. 地震工程学导论.
- 6 李杰. 地震灾害预测与城市规化. 河南科技出版社.
- 7 [日]武藤青著, 滕家禄等译. 结构物动力设计. 北京: 中国建筑工艺出版社, 1984, 11.

Research in Earthquake Damage Prediction of Industry Equipment

Sun Zengshou Li Jie ChenHuai
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, based on the analysis of structural characteristic and earthquake damage feature in industry production equipment, the method of earthquake damage prediction of industry equipment on the ground is put forward. This method is succesfully used in earthquake damage prediction of some industry enterprises.

Keywords: industry equipment, earthquake damage prediction.