

简论重大危险源灾害的评估与控制

Assessment and Control of Disasters from the Major Risk Origins

张国顺

(中国兵器工业总公司, 高级工程师 北京 100823)

清华大学梅启智教授将灾害粗分为自然灾害和人为(技术)事故灾害两类(见《科技导报》1993年第4期)。其中人为事故灾害是指某种文明、某种先进科学技术引入社会,在为人类带来利益的同时伴随而来的对人类的损害,如汽车、火车、飞机、轮船发生的交通事故和空难、海损事故,化工厂、农药厂、天然气柜和油罐等发生的燃烧爆炸事故。他用图1列举了美国几种人为事故造成的死亡人数及相应的发生频度。由图1可见,火灾、爆炸事故仅次于飞机坠毁事故而居第2、3位。发达国家尚且如此,发展中国家这类事故造成的损失就更为严重了。我国1978年11月24日辽宁向东化工厂硝

15人,伤141人,直接经济损失2.5亿元。这些重大企业灾害使人们痛苦地认识到,大型工业企业潜在着巨大的灾害风险,因而研究企业灾害风险评估技术,对于预先采取措施,做到防患于未然具有重要意义。

一、企业灾害风险的辨识

企业灾害风险一般与企业内会发生重大事故的重大危害设施相关联。1993年6月第80届国际劳工大会通过的《预防重大工业事故公约》将重大事故定义为:在重大危害设施内进行生产、储运或其他加工、处理活动时出现意外的突发性事件,如火灾、爆炸或严重毒气泄漏,其中涉及到一种或多种危害物质,并导致对工人、公众或环境造成即刻的或延期的严重危害的事故。所谓重大危害设施是指:不论长期或临时地加工、生产、处理、搬运、使用或贮存数量超过临界量的一种或多种危害物质的设施,但不包括核设施、军事设施及设施现场以外的非管道运输设施。关于危害物质和临界量,表1列出了欧共体1982年颁布的《工业活动中重大事故风险法令》中的重点控制危害物质及其临界量。

关于严重危害的定量规定,各国国情不同,差异很大。我国至今尚无统一规定,国务院第34号令只是定性描述特别重大事故:“是指造成特别重大人身伤亡或巨大经济损失以及性质特别严重、产生重大影响事故。”笔者建议按如下界定:一次事故死亡10人以上,或重伤30人以上,或直接经济损失100万元以上,或造成了严重的影响。

根据以上概念,我们可按以下定义辨识企业灾害风险:企业内存在的某一重大危害设施或相互关联的一群设施,聚集了超过临界量的危害物质(如表1所示物质),并且其环境情况(人员密度、建筑物分布等)不利,一旦该设施发生事故,会造成如上述严重危害的后果。据此就可以确定这一设施或设施群具有灾害风险,或称其为重大危险源。

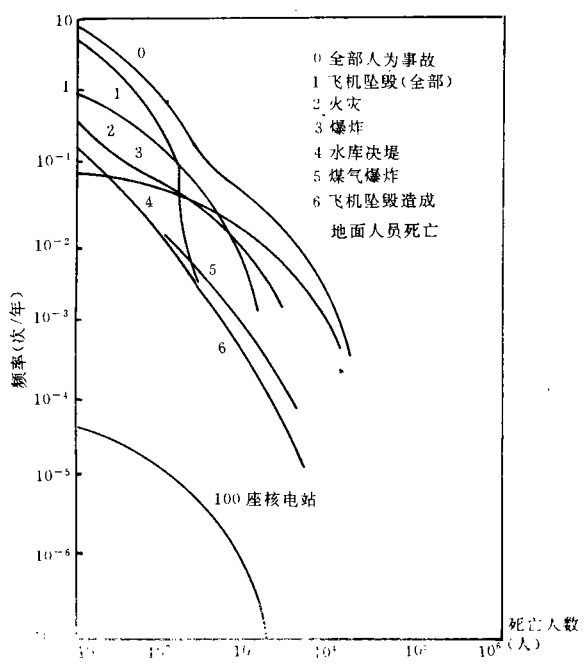


图1 人为事故造成的死亡人数与事故发生频度

铵炸药车间爆炸,死亡27人,伤15人,直接经济损失40万元。1987年3月15日哈尔滨亚麻厂爆炸事故,死亡56人,伤179人,直接经济损失1000多万元。1991年2月9日辽宁庆阳化工厂TNT硝化车间爆炸,死亡17人,伤107人,直接经济损失2266万元。1993年8月5日深圳危险品仓库爆炸,死亡

二、燃烧爆炸灾害风险的评估方法
——BZA—1 法

风险评估一般采用概率风险评估法 (Probabilistic Risk Assessment),即灾害风险 R 是灾害事故发生的概率 P 与灾害造成后果 C 的乘积:

R = \sum P_i C_i (1)

对于一个重大危险源,其风险大小既要考虑事故发生时对本身的破坏或损害程度,也要考虑对其周围人员和建筑物的危害情况,因而,重大危险源系统的现实风险 H,应为系统内风险 H_in与系统外风险 H_ex之和,并按下式计算:

H = H_in + H_ex
= [W + (1 - A_1/A_0)B] + \sum (1 - R_{1i}/R_{0i})C_i (2)

式中 W 为区别企业类别的风险指数;B 为系统本底风险,它由系统内危险物质及其装置的风险指数 V、系统内人员密度 D 和事故概率指标值 P 等因素决定,即 B = VDP;(1 - A_1/A_0)为系统风险未受控程度系数,用 K 表示,其中 A_0 为系统安全标准值,A_1 为安全评价价值;C_i 为系统外第 i 个安全距离不足的

表 1 欧共体用于重大危险源辨识
的重点控制危害物质

Table with 2 columns: 危害物质名称 (Hazardous substance name) and 临界量 (Critical quantity). Rows include categories like 一般性易燃物质 (General flammable substances), 特殊易燃物质 (Special flammable substances), 特殊爆炸性物质 (Special explosive substances), 特殊毒性物质 (Special toxic substances), and 极毒物质 (Extremely toxic substances) with specific substances and their critical quantities.

设施或建筑物受事故影响的严重度;(1-R_{1i}/R_{0i})为系统外第 i 个设施或建筑物的安全距离未达标系数,其中 R_{0i} 为有关安全规范规定的安全距离标准值,R_{1i} 为现场实测值,当 R_{1i} \ge R_{0i} 时按 R_{1i} = R_{0i} 处理。
需要再加以说明的是,系统风险未受控系数 K = (1 - A_1/A_0)。由于危险源是一个包括各种复杂因素的大系统,并且随着企业类型不同或生产中所处理的危害物质不同而不同,因此要制定全面的、科学的、有可比性的安全标准以求得 A_0 是困难的,同时为求得 A_1 而进行的评价又很繁琐。故笔者在实践中采用下面方法求得这个系数。

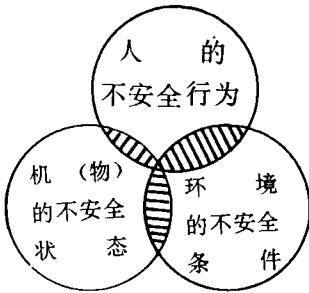


图 2 人—机—环系统示意图

根据事故致因理论,大多数事故是由于人的不安全行为与机(物)不安全状态在相同的时空相遇而发生的,少数事故是由于人员处在不安全环境中而发生的(如急性中毒),还有少数事故是由于自身有危险的物质暴露在不安全环境中而发生的(如硝化棉自燃)。从这个角度出发,可以把任何一个复杂的危险源系统都看作是由“人的不安全行为”、“机(物)不安全状态”、“环境不安全条件”三个子系统构成的。如果以三个圆分别表示人、机(物)、环境三个子系统,那么,每二个圆的交叉部分就为可能发生事故的区城,而三个圆的交叉部分就为高事故概率区,如图 2 所示。设 S_p、S_m、S_e 分别表示人、机(物)、环境三个子系统的安全标准值,S_x、S_y、S_z 分别表示人、机(物)、环境三个子系统的安全评价价值,则 (1 - S_x/S_p)、(1 - S_y/S_m)、(1 - S_z/S_e) 就分别表示人的不安全行为系数、机(物)不安全状态系数、环境不安全条件系数。如果考虑它们对发生事故的影响具有不同的权重 x、y、z,那么危险源系统风险未受控系数 K 就应为:

K = x(1 - S_x/S_p)(1 - S_y/S_m) + y(1 - S_x/S_p)(1 - S_z/S_e) + z(1 - S_y/S_m)(1 - S_z/S_e) (3)

根据大量事故统计资料确定的权重系数分别为:

x = 6.1 y = 2.2 z = 1.7

于是,式(2)就成为:

H = W + [6.1(1 - S_x/S_p)(1 - S_y/S_m) + 2.2(1 - S_x/S_p)(1 - S_z/S_e) + 1.7(1 - S_y/S_m)(1 - S_z/S_e)]C_i

$$+1.7(1-S_y/S_m)(1-S_z/S_o)]VDP \\ + \sum (1-R_{ii}/R_o)C_i \quad (4)$$

这就是企业燃烧爆炸风险评估方程 BZA—1 法。

三、应用 BZA—1 法的评估实践

从 1991 年 6 月至 1992 年 9 月,由中国兵器工业总公司与全国安全生产委员会办公室联合组织有关专家,先后对湖北东方化工厂等八个火炸药生产或加工的工厂进行了评估。这类企业灾害风险很大,安全生产具有特殊的重要性,因而必须要有精心的设计、合理的布局、周密的安全措施、良好的保安环境、严格的规章制度和高度的人员素质等条件。无论哪个环节出了问题,都会酿成重大燃烧爆

炸灾害。评估按(4)式进行,事先设计了各项指标值的估算方法,例如在估算系统的本底风险 $B=VDP$ 时,火炸药及其装置的风险指数 V 由其物性危险系数、物量危险系数和工艺过程系数决定;人员密度 D 与危险生产类型、自动化程度和劳动组织班次等有关;事故概率 P 可用一定的指标值来代替,即把尽可能收集到的同类生产发生的燃烧爆炸事故按不同后果和频次划分成若干个档次,对应相应的指标值。再如风险未受控系数 K 的求得,是先按“人员安全素质”、“机(物)安全状态”、“环境安全条件”设计出若干个安全检查表,确定各项安全标准值,评估时由专家现场检查打分,从而求得 S_x/S_o 、 S_y/S_m 、 S_z/S_o ,就可进一步算出 K 。全部指标值求得以后,最终算出该重大危险源系统的现实风险 H ,并按表 2 评判危险源的风险等级和整改分级。

表 2 危险源风险等级和整改分级

风险等级	现实风险 H	危险类别	可能后果	整改分级
I	≤500	轻度危险	较小伤亡和损失	车间或分厂级事故隐患
II	500~800	比较危险	一定伤亡和损失	工厂或总厂级事故隐患
III	800~1 200	中等危险	较大伤亡和损失	主管局级事故隐患
IV	200~1 500	严重危险	重大伤亡和损失	总公司级事故隐患
V	≥1 500	非常危险	灾难性伤亡损失	国家级事故隐患

四、对发展我国企业灾害风险评估和控制技术的建议

国外很早就开展企业灾害风险评估技术的研究。美国道氏化学公司早在 1964 年就提出了“火灾爆炸指数法”,用来评估化工工艺过程和装置的火灾爆炸危险性,并据此提出安全对策,改进工艺和设备的安全性,提高工厂的安全水平。这个方法经多次修改,到 1986 年的第六版臻于成熟,为许多国家所采用。英国帝国化学工业公司在道氏法的基础上进一步修改和完善,提出“蒙德法”,即 DOW/ICI,得到较广泛的应用。日本人早在 70 年代就开始研究重大危险源评估方法,提出了“正田法”、“六段法”等。欧共体 1982 年 6 月颁布了《工业活动中重大事故风险法令》,并在 1987 年 3 月和 1988 年 11 月两次对其进行修订和增补。为了实施欧共体的上述法令,英国、法国、德国、荷兰、意大利、比利时等都颁布了重大危险源控制规程,要求业主对企业的重大危害设施进行辨识、评估,提出相应的事故预防措施和应急处理办法,并上报主管当局。国际劳工大会 1992 年第 79 届会议专题讨论了预防重大

工业灾害问题,1993 年 6 月通过了《预防重大工业灾害公约》和《建议书》,倡导各国建立重大危险源评估和控制系统。为促进发展中国家开展这项工作,国际劳工组织 1991 年 1 月在曼谷召开了重大危险源控制区域性讨论会,1992 年 10 月在韩国召开了预防重大事故研讨会。印度、印尼、泰国、韩国、马来西亚、巴基斯坦等国相继开始建立国家重大危险源控制系统。

我国开展危险源评估工作起步于 80 年代末,化学工业、石化工业、兵器工业系统相继开始。化工系统采用英国的蒙德法,石化系统采用美国的 LEC 法,兵器工业系统采用 BZA—1 法,都取得较好的效果,但都存在一些问题,也没有建立有效的控制系统。为了促进这项工作的开展,跟上国际步伐,尽快扭转当前我国重大特大恶性事故频繁发生的局面,笔者建议:

1. 劳动部应尽快组织制定企业灾害风险评估与控制法规,明确危险源辨识、危险源评估程序和方法、危险源的安全运行和管理、危险源周围的安全距离和监督、定期安全报告、应急处理计划等。

2. 企业减灾是一项社会系统工程,应组织全国

(下转第 22 页)

表 3 中各列中的数字分别表示该因素的水平数。于是由表 3 即得试验方案,见表 4。

表 4 均匀设计

因素 试验号	A	B	C
1	1.0	13	1.5
2	1.4	19	3.0
3	1.8	25	1.0
4	2.2	10	2.5
5	2.6	16	0.5
6	3.0	22	2.0
7	3.4	28	3.5

若考虑因素的所有水平组合,则共需做 $7^3=343$ 次实验。若用正交设计,则需做 $7^2=49$ 次实验。均匀设计只需做 7 次实验即可。

关于数据处理问题。若用正交设计,除非每个因素只有两个水平,一般很难用方差分析方法分析出交互作用。若用回归分析来处理数据,则可以表格化进行。对于均匀设计,用回归分析处理数据的计算量比正交设计大些。但若有一台微机及相应的软件,则数据分析仍然是易于进行的。

均匀设计也可以处理各因素有不同的水平数的实验安排问题,我们也有均匀设计表,可以按照表格来安排实验。

均匀设计还可以处理某些带约束条件的试验设计问题,例如混料试验设计问题。即假定有 t 个因素 $A_i(1\leq i\leq t)$,每个因素有 q 个水平:

$$(A_i) \qquad a_{ij}(1\leq j\leq q)$$

要求每个实验:

$$(a_{i1},\cdots a_{it})$$

满足:

(上接第 62 页)

有关专家共同研讨企业灾害风险评估和控制技术,制定危险源评估方法标准、分级标准和控制规程,为劳动部和行业主管部门指导企业危险源评估和防灾减灾提供技术决策咨询。

3. 国家和大型企业建立适当的防灾减灾基金,增加投入,从“软件”(如防灾减灾教育、规章制度)和“硬件”上(如防灾减灾设备、设施等)采取实际措

$$a_{i1} + \cdots + a_{it} = 1$$

这相当于在单纯形

$$T = \{(x_1,x_2,\cdots,x_t); x_i \geq 0(1\leq i\leq t), x_1 + \cdots + x_t = 1\}$$

上找一个均匀散布的集合。我们也有混料均匀设计表格可供使用。

均匀设计产生于 70 年代末。由于某军工实验要求有一个试验少的试验方案,而正交设计所需的试验次数太多,这就导致了方开泰与我的合作。我们用数论方法来研究这个问题,借鉴了“近似分析中的数论方法”这一领域中的成果。该领域在国际上是 50 年代末开始研究的。我国在华罗庚的领导下,也在 50 年代末就开始了这方面的研究,所以起步较早,对这一领域的情况熟悉。若无基础理论研究的积累与素养,作出均匀设计这样的工作是不可能的。另一方面,熟悉实际工作的数学家方开泰能提出问题,当然是产生均匀设计的前提。这就提供了一个例子,即问题来源于实际,同时又由于有基础理论的积累与研究,才导致问题的解决。我们认为,作为长远起作用的基础理论研究,即使从应用与开发的角度上讲,其作用也是不容忽视的。

均匀设计只是数论方法的一个应用。数论方法还有广泛应用的园地,例如多重插值公式的建立;某些积分方程与微分方程的近似求解;求函数的整体极值;求某些多元分布的近似代表点;用于统计推断的一些问题,如多元正态性检验及多元球形检验。

近 15 年来,均匀设计已在我国的军工科技、纺织工业、制药工业、化学工业等方面有了不少应用,取得了一些经济效益与社会效益,在国外亦受到重视。当然,任何一个应用数学方法也不是万能的,不会没有缺点的,均匀设计也是一样,还需要在实际应用中加以鉴定与完善。 (责任编辑 王宏章)

施。同时,进一步加强保险在防灾减灾中的作用。保险公司除了损失赔偿外,还应把业务扩展到企业风险评估和防灾防损上。

4. 积极参与有关国际交流与合作,学习和借鉴西方国家在重大危险源评估、控制和防灾减灾方面成功的做法和经验。 (责任编辑 肖庆山)