

文章编号: 2095-0411 (2012) 02-0035-05

# 化工厂建设期作业风险定量研究<sup>\*</sup>

王凯全, 刘华月

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 为了有效地管理和控制化工厂建设期风险, 分析了化工厂建设期的风险特征, 针对施工作业在时间、空间的不断变化、相互叠加现象, 以作业条件危险评价法模型为基础, 建立了动态作业风险模型和叠加作业风险模型。运用该模型计算了示例化工厂建设期典型时段各单元前后期静态和动态风险值, 确定了风险叠加的区域并计算了该时段各区域叠加风险值, 绘制了叠加风险分布图, 据此确定了该时段风险管理和控制重点部位, 提出了重点风险部位的控制措施。依据该模型设计的基于GIS的风险管理系统, 提高了预防各类事故的能力和施工安全管理的水平。

**关键词:** 化工项目; 建设期; 作业条件危险评价法; 动态风险; 叠加原理

**中图分类号:** X 932

**文献标识码:** A

## Quantitative Study of Operational Risk During the Construction Period of Chemical Plant

WANG Kai-quan, LIU Hua-yue

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In order to manage and control the risk during the construction period in the chemical plant, the risk characteristics have been analyzed, in view of mutual accumulation of construction operational risk in time and space, establishing a dynamic and accumulative operational risk model based on the LEC model. The model is applied to calculate the static and dynamic risk score of each unit in a chemical plant during the typical construction period, and determine the risk accumulation area and score simultaneously. The accumulative risk distribution map was drawn, which can be an effective tool in view of the risk control and management of main parts. According to the model the risk management system was design on GIS, so that the ability of preventing the accidents and safety management ware get further improved.

**Key words:** chemical project; construction period; LEC; dynamic risk; accumulative principle

化工厂的建设期包括厂区内各单元(车间、仓库、办公和生活场所以及消防、供电、供水、供热、管网、路网、围墙等公用工程)的土建施工阶段、厂区内各种设备的安装及调试运行阶段的总

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-04-17

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助(2011BAK03B00)

作者简介: 王凯全(1951-), 男, 上海人, 教授, 博士, 主要从事安全科学与工程研究。

和。受企业发展的需要以及各种因素的制约,化工厂的建设与一般的建筑群的建筑相比,具有一定的特殊性,如:在时间上,厂区内各单元建设周期通常较短且进展不均衡,在1—2年内就要完成单元的土建、安装和调试,且各单元一般不会同时开工、同时完工;在空间上,同时施工的建设主体比较复杂,正是由于各单元进展不同,造成厂区内通常总有十几家甚至几十家不同单位同时进场平行作业。

化工厂建设的特殊性,决定了其建设期内作业风险具有更加突出的动态性和叠加性。主要表现在:化工厂建设区域内的风险布局、厂区内各个单元的作业风险模式、各单元作业的风险主体变化、更新较为频繁;处于不同建设阶段的各个单元作业风险相互交织和影响,各类风险的叠加较为明显。因此,化工厂建设期作业所面临的风险不再是单一阶段、单一对象的孤立和静态的风险,而是在时间和空间上的动态变化的、相互叠加的、集成化的作业风险。长期以来,人们对具有动态性、叠加性风险开展了广泛而深入的研究。在建筑项目动态作业风险的研究方面,解楠<sup>[1]</sup>等以建设工程为对象,提出了循环动态的风险管理体系。Wang Wei—Chih<sup>[2]</sup>等在施工网络图的基础上,描述了建筑施工过程中风险的动态特性。刘武<sup>[3]</sup>等基于PERT网络模型,对建设工程项目的进度风险问题提出了动态的风险分析方法,并得到风险因素的影响曲线。孙成双<sup>[4]</sup>等从建设项目分阶段的角度提出动态风险因素的识别和监控方法。白云<sup>[5]</sup>等结合上海轨道交通四号线修复工程中的超深基坑工程,验证了动态风险管理对于工程的风险控制的良好效果。在建设区域叠加作业风险的研究方面,翁韬等<sup>[6]</sup>以城市重大危险源为主体对象,将单独评价拓展为相关耦合的评价,提出安全等级“层级叠加”的概念。陈国华<sup>[7]</sup>等针对有多个重大危险源存在的区域,在对单个危险源进行风险评价的基础上,应用叠加原理得到描述该区域整体风险状况的定量评价结果。成俊伟<sup>[8]</sup>等在建筑单体施工风险研究的基础上,提出“建筑群”的概念,并从时空的结合上评价了建筑群施工的风险。

本文借鉴上述研究成果,分析化工厂建设期的风险特征,针对施工作业在时间、空间的不断变化、相互叠加现象。构建动态叠加风险模型,确定了化工厂建设期不同区域、不同时期的风险值。在此基础上,结合某化工厂建设项目示例,进行动态

叠加定量风险分析,提出有效控制其作业风险的对策措施。

## 1 动态叠加作业风险模型

### 1.1 作业风险模型

根据国际标准化组织的定义(ISO13702—1999),风险是衡量危险性的指标,是某一有害事故发生的可能性与事故后果的组合,直接与潜在危险变成事故的频率、强度和持续时间的概率有关。一般风险评价的方法基于风险度量的基本公式<sup>[9]</sup>:

$$R = P \cdot S \quad (1)$$

其中: $R$ —事故的风险; $P$ —事故发生的概率; $S$ —事故可能造成的损失。

格雷厄姆(K. J. Graham)和金尼(G. F. Kinney)提出了作业条件危险评价法<sup>[10]</sup>,认为对于生产作业的风险( $D$ ),不但与事故发生的可能性( $L$ )、事故后果的严重性( $C$ )有关,还应考虑与作业人员活动于风险环境中的情况( $E$ ),即

$$D = L \cdot E \cdot C。$$

兼顾两者的一致性,作业风险可以表达为:

$$R = P \cdot S \cdot E \quad (2)$$

其中: $E$ —暴露于危险环境的概率。

### 1.2 系统性作业风险模型

#### 1.2.1 动态作业风险 $R_i(t)$ 模型

根据(2)式,设某化工厂共有 $i$ 个建设单元;在建设期间,第 $i$ 建设单元在 $t$ 时刻共有 $j$ ( $j=1, 2, \dots, n$ )项平行作业。用 $P_{ij}(t)$ 、 $S_{ij}(t)$ 、 $E_{ij}(t)$ 分别表示在该单元、该时刻第 $j$ 项作业事故发生的概率、事故可能造成的损失及作业人员暴露于该危险环境的概率,则该单元、该时刻的动态作业风险为:

$$R_i(t) = \sum_{j=0}^n R_{ij}(t) = \sum_{j=0}^n P_{ij}(t) \cdot S_{ij}(t) \cdot E_{ij}(t) \quad (3)$$

其中: $R_i(t)$ —单元 $i$ 在 $t$ 时刻的作业风险值; $R_{ij}(t)$ —单元 $i$ 在 $t$ 时刻第 $j$ 项的作业风险值。

当 $n=0$ 时,表示单元 $i$ 处在 $t$ 时刻无作业,则此时无风险。显然, $n$ 越大,表示 $t$ 阶段区域 $i$ 内进行的平行作业越多,则风险越大。

$P_{ij}(t)$ 、 $S_{ij}(t)$ 、 $E_{ij}(t)$ 取值可以参照格雷厄姆和金尼提出的LEC作业风险量化标准<sup>[10]</sup>。

动态作业风险随着建设单元由土建施工阶段、安装阶段、试运行阶段的依次变化而发生性质、大小的变化。

1.2.2 动态叠加作业风险模型

各个单元动态作业风险因其作业性质、规模、使用装备等的不同，对其周边产生不同的干扰和影响，使该项作业风险的实际范围大于其作业区域范围（通常为建设单元轮廓线范围）。根据经验，土建作业的风险范围为建设单元轮廓线外 3—5m；设备安装作业为建设单元轮廓线外 10m 左右；生产调试作业为建设单元轮廓线外 10m 左右。

当  $t$  时刻，有两个以上属于不同单元的动态作业风险  $R_i(t)$ 、 $R_{i+1}(t)$  的实际影响范围在  $I$  处发生重合时，就在该处发生了风险的交叉和叠加。则该时刻， $I$  处的动态叠加作业风险  $Q_I(t)$  为：

$$Q_I(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \tag{4}$$

动态叠加作业风险随着相关建设单元  $i$  ( $i \in I$ ) 由土建施工阶段、安装阶段、试运行阶段的依次变化而发生性质、大小的变化。

2 示 例

某在建化工厂平面布置如图 1 所示。已知在  $t_0$

时刻，处于土建阶段的单元为：1#辅助车间、综合楼、办公室；处于安装阶段的单元为：喷塔楼；处于试生产阶段的单元为：储罐区、硝化棉仓库、1#仓库、2#仓库、成品仓库、主生产车间。

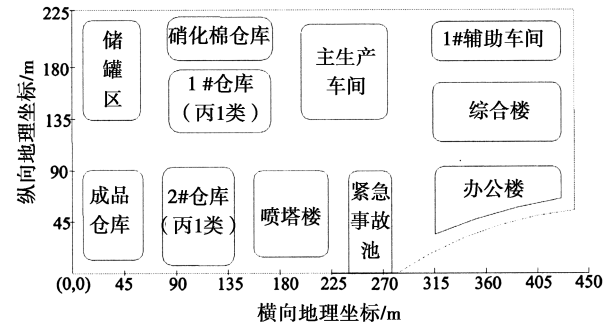


图 1 某在建化工厂平面布置图

Fig. 1 A chemical plant layout under construction

2.1 前后期动态作业风险分析

运用公式 (3) (其中： $P_{ij}(t)$ 、 $S_{ij}(t)$ 、 $E_{ij}(t)$  参照 LEC 作业风险定量化标准取值)，对  $t_0$  时刻（称为前期）及后续的  $t_1$  时刻（称为后期）进行动态作业风险分析，得到各建设单元前后期作业风险及其变化值，如表 1。

表 1  $t_0$ 、 $t_1$  时刻单元风险分析表

Table 1 The table of unit risk analysis at moment  $t_0$  and  $t_1$

$i$	单元名称	前期作业名称	$R_i(t_0)$	后期作业名称	$R_i(t_1)$	$R_i(t_1) - R_i(t_0)$
1	储罐区	槽车卸料	45 ( $n=1$ )	进料操作	90 ( $n=1$ )	45
2	硝化棉仓库	硝化棉进仓	60 ( $n=1$ )	硝化棉储存	90 ( $n=1$ )	30
3	1#仓库	原料储存	42 ( $n=1$ )	原料卸货	21 ( $n=1$ )	-21
4	主生产车间	投料操作	90 ( $n=1$ )	灌装操作	42 ( $n=1$ )	-48
5	成品仓库	成品储存	42 ( $n=1$ )	成品搬运	42 ( $n=1$ )	0
6	2#仓库	原料、成品储存	42 ( $n=1$ )	原料、成品储存	42 ( $n=1$ )	0
7	喷塔楼	稳压罐安装	42 ( $n=1$ )	管线安装、分离器安装	63 ( $n=2$ )	21
8	紧急事故池	无作业	0 ( $n=0$ )	无作业	0 ( $n=0$ )	0
9	辅助车间	钢筋绑扎、三层支模架	60 ( $n=2$ )	地沟施工	18 ( $n=1$ )	-42
10	综合楼	屋面、结平梁浇筑	42 ( $n=1$ )	屋顶施工	42 ( $n=1$ )	0
11	办公楼	水电安装、墙体粉刷	39 ( $n=2$ )	门窗施工	18 ( $n=1$ )	-11
12	车辆通道 1	化学品运输、施工材料运输	66 ( $n=1$ )	化学品运输、施工材料运输	66 ( $n=2$ )	0
13、14	车辆通道 2、3	化学品运输	45 ( $n=1$ )	化学品运输	45 ( $n=1$ )	0
15	车辆通道 4	施工材料运输	45 ( $n=1$ )	施工材料运输	45 ( $n=1$ )	0
16、17	塔吊 1、2	塔吊作业 1、2	42 ( $n=1$ )	塔吊作业 1	42 ( $n=1$ )	0

说明： $n$  为平行作业数。

由表 1 可知：①就静态风险而言， $t_0$  在和  $t_1$  时刻，主生产车间、硝化棉仓库和储罐区的风险最大，辅助车间、喷塔楼和办公楼由于在同一区域内进行平行作业较多，所以这些地点静态风险值较大；②就动态风险而言，在  $t_0$  向  $t_1$  过渡阶段，风险值增加 ( $R_i(t_1) - R_i(t_0)$  正向变化) 较大的

单元是储罐区、硝化棉仓库，风险值减少 ( $R_i(t_1) - R_i(t_0)$  负向变化) 较大的单元是主生产车间、辅助车间。因此，应加强对这些单元的风险管理和控制。

2.2 叠加作业风险分析

根据各个单元在  $t_0$  时刻各项作业的性质、规模、使用装备等情况，确定其作业风险  $R_i(t_0)$  影响范围，对影响范围发生叠加区域依据式 (4) 计算，得到时刻各区域叠加作业风险  $Q_i(t_0)$ ，得到区域叠加风险示意图 2。其中以不同填充图案代

表风险值，0—20 表示稍有危险，可以接受；21—70 表示一般危险，需要注意；71—160 表示显著危险，需要整改；161—320 表示高度危险，须立即整改；>320 表示极度危险，不能继续作业。类似地，可以得到  $t_1$  时刻各区域叠加作业风险  $Q_i(t_1)$ 。

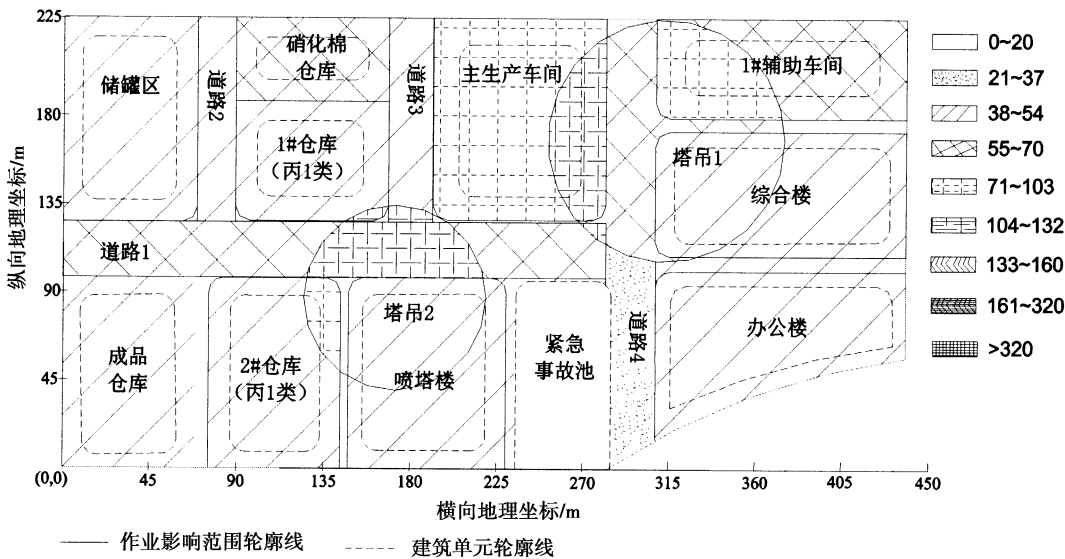


图 2 时刻区域叠加风险分布

Fig. 2 The accumulative risk distribution at moment

由图 2 可知：当  $t=t_0$  时刻，处于 0—20 风险值范围的区域为：紧急事故池，由于厂区处于试生产阶段，该区域  $t_0$  时刻无土建或生产作业，故其风险程度较小，可以接受；处于 21—70 风险值范围的区域为：储罐区、硝化棉仓库、1# 仓库、成品仓库、2# 仓库、1# 辅助车间、喷塔楼、综合楼及办公楼，由于这些区域内从事单一阶段的作业，并无多阶段交叉重叠作业，故其风险相对较小，处于“一般风险，需要注意”的风险程度范围；处于 71—160 风险值范围的区域为：主生产车间、辅助车间与综合楼交叉区域、以及喷塔楼、2# 仓库与道路 1 交叉区域，这些区域内分布着钢筋、水泥、砂石、脚手架等各种材料堆以及搅拌机、塔吊等机械和电器设备，施工人员密集，作业相互干扰，是事故易发区域，应成为风险预防和控制的重点，并且对风险较大区域应加强检查和管理力度，制定针对性的风险控制措施，以提高安全管理的目的性和效率，具体控制措施见表 2。

3 结 论

化工厂建设的特殊性，决定了其建设期内作业

风险具有更加突出的动态性和叠加性。为了有效地管理和控制化工厂建设期施工作业风险，分析了化工厂建设期的风险特征，针对施工作业在时间、空间的不断变化、相互叠加现象，以作业条件危险评价法模型为基础，建立了动态作业风险模型和叠加作业风险模型。

运用该模型计算了示例化工厂建设期典型时段各单元前后期静态和动态风险值，对各区域风险进行叠加，绘制出叠加风险分布图，据此确定了该时段风险管理和控制重点部位，提出了重点风险部位的控制措施。

依据该模型设计了计算机软件——“化工厂建设期风险分析与控制系统”，实现了基于 GIS（地理信息系统）的风险管理。在动态风险辨识和风险评价的基础上，编绘全项目周期的风险时、空分布及控制策略网络图集，可直观、形象地表达出整个厂区各区域的风险程度，全面系统地预测出区域内风险的分布及其动态情况，有利于确定风险管理和控制重点部位，进而实现对化工城建设期风险的动态预防和控制，提高预防各类事故的能力和施工安全管理的水平。

表 2  $t_0$  时刻区域风险控制措施

Table 2 The prevention measures of regional risk at moment  $t_0$

区域序号	风险控制措施
$I=4$ （主生产车间及附近 10 m）	土建塔吊作业：①设置警示带隔离，闲杂人等禁止进入；
	②不同材料或同一材料规格、长短不同，不得同时捆绑、起吊
	投料作业：①所有作业人员须佩戴劳动防护用品并遵守安全规程要求，须所有设备、机具应满足防火、防爆、防静电要求；
	②投料速度控制在规定范围内；
$I=9$ （辅助车间及附近 5 m）	③车间内严禁吸烟、动火，且只能使用防爆电话机；
	④作业中如出现任何异常情况，应立即要求停止相关作业，并立即报告
	支模架、钢筋绑扎作业：①佩戴防护手套；
	②设置防护棚、安全网，同一垂直面禁止交叉作业，所有人员登高作业，挂好安全带；
$I=6、7$ （喷塔楼及附近 10 m）	③塔吊操作人员须持证上岗；
	④塔吊作业时，不同材料或同一材料规格、长短不同，不得同时捆绑、起吊
	稳压罐安装：①用溜绳控制吊物平稳运送，且吊车作业半径内严禁站人并用警示带隔离；
	②作业人在操作平台上，须系好安全带以及佩戴个人防护设备；
$I=12$ （主道路 1 及附近 3 m）	③操作过程中严禁打击、燃烧、或暴力打击罐子
	①驾驶人员进去厂区内须遵守个人行为安全规范；
	②危化品运输须用专用车辆，进去罐区须带防火帽，驾驶员须先取得危化品通行证，方可进出厂；
	③严格控制车速，车辆进出装置大门及转弯处不得超过 5km/h，直线行驶不得超过 15km/h

参考文献：

[1] 解楠，何晖．工程建设中循环动态风险管理体系的探讨 [J]．地下空间与工程学报，2007，3（Z2）：1533—1536.

[2] Wang Wei—Chih，Liu Jang—Jeng，Chou Shih—Chieh. Simulation—based safety evaluation model integrated with network schedule [J]. Automation in Construction，2006，15（3）：341—354.

[3] 刘武，杜志达，张秋月．建设工程项目进度的动态风险分析研究 [J]．价值工程，2008，27（3）：127—129.

[4] 孙成双，王要武．建设项目动态风险分析方法研究 [J]．土

木工程学报，2003，36（3）：41—45.

[5] 白云，汤竞．动态风险管理在上海轨道交通四号线修复工程中的应用 [J]．施工技术，2008，37（8）：1—31.

[6] 翁韬，朱平，麻名更，等．城市重大危险源区域风险评价研究 [J]．中国工程科学，2006，8（9）：80—84.

[7] 陈国华，张静，张晖，等．区域风险评价方法研究 [J]．中国安全科学学报，2006，16（6）：112—117.

[8] 成俊伟，王凯全．建筑施工区域风险研究 [J]．中国安全科学学报，2009，12（19）：171—176.

[9] 孙斌，田水承，常心坦．事故风险评价与风险管理模式研究 [J]．中国矿业，2003，1（12）：71—73.

[10] 王凯全．石油化工安全概论 [M]．北京：中国石化出版社，2006：20—23.