

基于功能区域方法的项目安全性分析

温晓龙¹⁾ 宋存义¹⁾ 林海¹⁾ 金龙哲¹⁾ 崔巍²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 中国石化股份有限公司, 北京 100029

摘要 利用传统方法进行工业项目的安全性分析, 安全效益和安全价值都只能部分地反映系统的安全状况, 所得分析结果对改善方案安全效果的作用很有限且应用性不强. 通过引入价值分析理论, 建立安全效益-价值联立方程和优选判据, 再结合最合适区域法, 最终形成了功能区域分析方法和理论. 将功能区域方法应用于实际工程项目中, 根据项目技术数据得出最合适曲线和区域分析结果, 极大地改善了项目的安全价值和成本.

关键词 工业项目; 安全评价; 安全效益; 安全价值; 区域图; ABC 分析法

分类号 X 93; X 51; TB 39

在安全分析中存在一个永恒的矛盾: 人们总想用最小的安全成本实现最大的安全功能, 由此导致了人们对实现理想的安全配比的追求^[1]. 安全效益是安全功能与安全成本的差值, 而安全价值是安全功能与安全成本的比值, 二者都可以部分地反映系统当前的安全功能与安全成本的配比情况, 但是长期以来二者缺乏有机联系. 对系统进行安全分析与评价时, 安全价值分析是很重要的环节^[2].

在烟气脱硫项目中, 烟气监测系统和灭火砂石的安全价值相同而且都小于 1, 都是需要进行改善的对象, 但二者对系统安全的重要度的贡献却是不同的, 此时如何选取安全价值改善对象没有很好的解决办法. 如果在安全价值分析中考虑安全效益的变化, 就可以找到系统中安全价值不理想也就是需要改善的部件或功能.

1 安全效益-价值联立方程及优选判据

根据安全功能与安全成本的定义, 定义 s 为安全性^[3] ($0 < s < 1$), 有安全功能函数:

$$F(s) = I(s) + [-L(s)] = I(s) - L(s),$$

其中 $L(s)$ 是拾遗功能, 用损失函数来表示:

$$L(s) = L \exp(l/s) + L_0 \quad (L > 0, l > 0, L_0 > 0).$$

$I(s)$ 为增益功能, 可用增益函数来表示:

$$I(s) = I \exp(-i/s) \quad (I > 0, i > 0).$$

L 、 l 、 I 、 i 和 L_0 均为统计常数.

$F(s)$ 在第一象限是关于 s 的增函数. 安全成本函数

$$C(s) = C \exp[c/(1-s)] + C_0 \\ (C > 0, c > 0, C_0 < 0),$$

则安全效益:

$$E(s) = F(s) - C(s) \quad (1)$$

根据价值工程中对价值的定义和给出的表达式^[4], 可知安全价值 $V(s)$:

$$V(s) = \frac{F(s)}{C(s)} \quad (2)$$

所以,

$$\begin{cases} E(s) = F(s) - C(s) \\ V(s) = \frac{F(s)}{C(s)} \end{cases} \quad (3)$$

对项目中的部件或功能进行考虑安全效益后的安全价值分析, 就是要求式(3)有优化解 s , 从而实现在安全功能 $F(s)$ 尽可能大、而安全成本 $C(s)$ 尽可能小的情况下, 使得 $V(s)$ 和 $E(s)$ 最大化^[5]. 式(3)是安全效益-价值联立方程.

将式(2)代入式(1), 则安全效益为:

$$E(s) = [V(s) - 1]C(s).$$

当 s 确定后, 安全价值 $V(s)$ 也随之确定, $V(s)$ 为一确定数值, 则 $V(s) - 1$ 为一确定数值. 设 $K = V(s) - 1$, 则 $E(s) = KC(s)$. 当 s 变动一个微小量 Δs (~ 0) 时,

$$\frac{dE(s)}{ds} = K \frac{dC(s)}{ds},$$

即

$$\Delta E(s) = K \Delta C(s) \quad (0 < s < 1) \quad (4)$$

由式(4)可见, 在确定的 V 值下, 效益改善值 $\Delta E(s)$ 与成本改善值 $\Delta C(s)$ 正相关. K 值越大, 或

收稿日期: 2006-02-10 修回日期: 2006-10-12

基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划 (No. XK100080432)

作者简介: 温晓龙(1980—), 男, 博士研究生; 宋存义(1951—), 男, 教授, 博士生导师

者 $\Delta C(s)$ 值越大, 效益改善值 $\Delta E(s)^{[6]}$ 也越大. 式(4)是式(3)的优选判据, 判据解决了安全价值分析中 V 值相等如何优选改善对象的问题. 简而言之就是: V 值相等时, 视 $\Delta E(s)$ 的改善幅度, 改善幅度大的优先选择.

2 功能区域分析方法

功能区域分析方法是安全价值分析中一种综合、优化型方法. 在价值分析中, 功能评价是最重要的环节. 传统意义上有功能评价系数法和功能成本法两种方法^[7]. 总体思路就是将 F 与 C 量化后求得比值 V .

功能评价系数法对功能进行评分, 评分结果作为功能重要度系数, 当前成本与总成本的比值作为成本系数, 二者比值即为 V 值. 根据 V 值判断当前成本与功能是否符合. 功能成本法是把实现功能的最低成本(目标成本)作为功能评价值, 将当前功能成本与功能评价值(目标成本)相比较来判断成本高低.

在安全价值分析中使用上述两种方法均有不足之处. 当几个评价对象的 V 相等, 功能评价系数法视为有同等价值, 而实际上他们的功能和成本可能有很大不同. 在脱硫项目中, 灭火砂石和烟气监测系统安全价值可能相同, 但很显然二者对于系统的安全重要性是不同的^[8]. 此时需要参考成本的变化或者利用专家系统, 进行大量的统计工作, 容易出现偏差和错误; 同时, 严格来说只要 V 值不等于 1, 就都是改善的对象, 但工程量十分浩大, 且没有主次, 最终收益不会很理想. 通过综合分析和研究, 结合最合适区域分析法可以有效解决上述矛盾.

最合适区域是从实际工作对价值分析对象和目标的要求出发, 所有满足条件不需要进行功能或成本改善的点的分布区域^[9]. 处于此区域内, 均视为 V 值合理, 不作改进; 远离此区域的值, 作为价值分析的重点改进对象, 而且对于功能评价系数、成本系数的值越大的点, 就越严格加以控制.

将成本系数作为 x , 功能评价系数作为 y , $0 \leq x, y \leq 1$, 则 $V=1$ 为理想情况, 如图 1 所示. 原则上对偏离 $V=1$ 的点都应作为改善对象; 距离原点较远的, 也就是功能评价系数和成本系数大的点优先考虑. 定义第一象限内任一点 $M(x_m, y_m)$ 到 $V=1$ 的距离为 m , $N(x_n, y_n)$ 为 $V=1$ 的点, 则根据空间两点间的距离公式, $m = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}$, 原点到 N 点距离为 n ,

则有 $n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$, 因为 $x_n = y_n$, 则 $n = \sqrt{2} y_n$, 可得:

$$\begin{cases} m = \frac{\sqrt{2}}{2} |x_m - y_m| \\ n = \frac{\sqrt{2}}{2} (x_m + y_m) \end{cases}$$

设 $T = mn$, 则:

$$x_m^2 - y_m^2 = 2T \tag{5}$$

在 $V=1$ 上方, $y_m = \sqrt{x_m^2 + 2T}$; 在 $V=1$ 下方, $y_m = \sqrt{x_m^2 - 2T}$.

如图 1 虚线所示, 这是两条以 $V=1$ 为准线的渐近线, 在此区域外的点, 作为需要改善的点, 距离原点越远越要严加控制; 在此区域内的点, 被认为是符合要求的点, 不作为改善对象. T 值的选取视实际情况而定, 要了解当前是在以功能为重的作业中还是以成本为重的作业中, 而且与成本降低的目标有直接关系^[10]. T 值一定时, m 大时 n 小, m 小时 n 大. 当 T 值选取较大时, 曲线离准线距离远, 需改善的点较少, 符合要求的点就多一些; 反之, 则需改善的点多, 符合要求的点少一些. 通过改变 T 值使得曲线发生改变, 不但可以很直观地看到各点的分布情况, 还可以实现根据需求对目标进行有效控制.

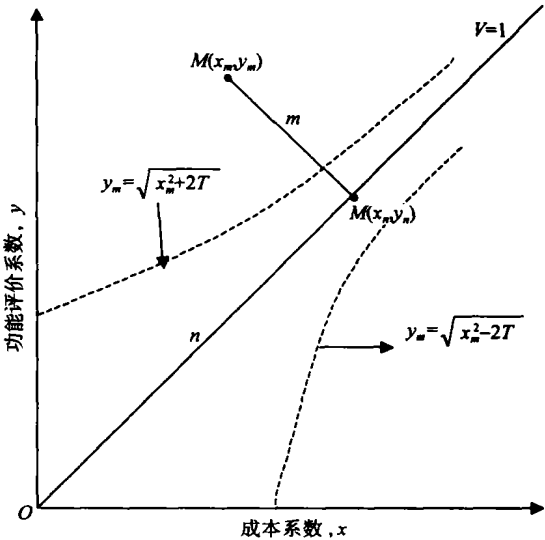


图 1 最合适区域图
Fig.1 Only area chart

功能区域法就是将传统的功能分析方法与最合适区域相结合, 这样就可以实现目标的随需求控制, 有效地控制了工作量, 减少出错的概率, 而且目标图形化非常直观. 一般来说主要有以下几步:

(1) 用 ABC 分析法或者 $0 \sim X$ 综合评分法选取好分析对象.

(2) 用功能评价系数法或者功能成本法进行功能分析,求得 V 值.

(3) 作最合适区域图,根据现实要求确定 T 值. 确定最合适区域和改善点.

(4) 根据安全效益—价值联立方程及优选判据,结合安全效益改进值 $\Delta E(s)$ 或者成本的改进值 ΔC ,得出改善方案.

通过以上四步,可以较好地实现对目标全面科学地分析.

3 功能区域分析方法的应用实例

在某 $4\times 200\text{ MW}$ 发电厂的 3 号机组进行的烟气脱硫项目(干法)的安全经济分析中,要进行安全

功能—成本分析. 此项目为技术改造项目,主体思路是以确保安全功能为主要出发点,兼顾成本的降低,要保证改进快速高效的完成,尽量不耽误生产时间,对部件的改善数量应不超过 50%,目标要求是成本降低 15%. 整个工程共有 115 个装置总共 209 个部件涉及到系统的安全,对这些装置(部件)全部进行安全价值分析是不现实的,不仅工程量浩大,而且很多部件是从国外进口^[11],很难确定最低成本或目标成本. 在这种情况下,决定采用最合适区域法进行安全价值分析. 具体步骤如下.

(1) 选取分析对象. 装置(部件)较多,而且成本有着显著的差异性分布,在这里选用 ABC 分析法. ABC 原始数据分析表见表 1.

表 1 ABC 数据分析表
Table 1 ABC analytical data

序号	部件名称	件数	累计		成本/ 万元	累计		分类
			件数	占总数百分比/%		成本/万元	占总成本百分比/%	
001	布袋除尘器	1	1	0.50	15.15	15.15	17.92	A
002	CEMS 综合测试仪	1	2	1.00	9.75	24.90	29.45	A
003	加湿器	1	3	1.44	7.77	32.67	38.64	A
004	链式搅拌机	1	4	1.91	6.22	38.89	45.99	A
005	密闭料仓	2	6	2.87	5.12	44.01	52.05	A
006	电气系统	2	8	3.83	4.89	48.90	57.83	A
007	反应器主体	1	9	4.31	3.49	52.39	61.96	A
008	增压风机	1	10	4.78	3.33	55.72	65.89	A
009	闸阀	4	14	6.70	2.41	58.13	68.74	A
010	消化部件	2	16	7.66	1.73	59.86	70.79	A
011	温湿度传感器	5	21	10.05	0.60	60.46	71.50	A
012~045	石棉等	42	63	30.14	0.56~0.28	75.25	89.00	B
046~117	个人防护等	146	209	100	0.27~0.01	84.56	100	C
总计			209	100		84.56	100	

根据表 1 数据,作 ABC 分析图,见图 2. 由 ABC 分析法的对象确定原则,最终确定 A 类部件为占总件数的 10.05%、成本占总成本的 71.50%的部件,可见在图 2 中是曲线上升最快的部分. B 类部件为占总件数 20.09%、成本占总成本 17.5%的部件;C 类部件为占总件数 69.86%、成本占总成本 11%的部件. 很显然,A 类部件是功能—成本分析的重点.

(2) 对 A 类部件进行安全功能分析. 当前有部分部件无法得知最低成本,这里采用的是功能评价系数法. 首先采用 0~4 打分法求出这 11 个部件的功能重要度系数. 共有 0、1、2、3、4 五个分档,将部件间两两进行比较,0 表示 y 部件完全没有 x 部件

重要;1 表示 y 部件有 x 部件一半左右重要;2 代表

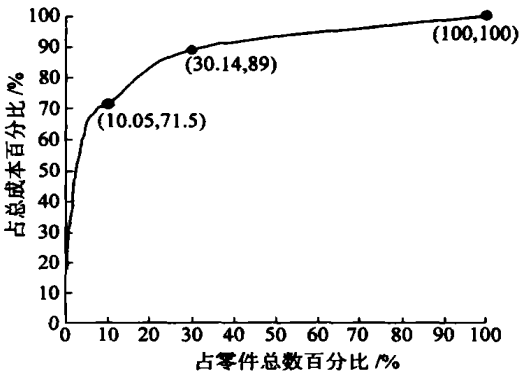


图 2 ABC 分析图
Fig. 2 ABC analytical chart

两部件一样重要;3 代表 y 部件比 x 部件重要一半左右;4 代表 y 部件完全比 x 部件重要(用 0~X 打分法打分,每两个部件的得分互补,是互补对称矩阵,求和可以运用对称矩阵的计算方法). 10 名专家均给出打分结果,汇总 10 位专家的打分结果,可以得出每个部件的功能重要度系数、成本系数,进而用式(2)求出价值,见表 2.

表 2 最终得分表
Table 2 Final score list

项目	得分	成本/ 万元	功能评价系 数, F_i (个体得 分/总分)	成本系数, C_i (个体成 本/总成本)	价值, V_i
001	315	15.15	0.143	0.251	0.570
002	310	9.75	0.141	0.160	0.881
003	295	7.77	0.134	0.129	1.039
004	176	6.22	0.080	0.103	0.777
005	189	5.12	0.086	0.085	1.018
006	216	4.89	0.098	0.081	1.210
007	136	3.49	0.062	0.058	1.069
008	231	3.33	0.105	0.055	1.909
009	95	2.41	0.043	0.040	1.075
010	48	1.73	0.022	0.028	0.786
011	189	0.60	0.086	0.010	8.600
总分	2 200	60.46	1.000	1.000	

(3) 根据表 2 数据,作散点图,见图 3. 可见,大部分点集中于准线附近,根据厂方的要求,改进部件最多不超过 50%,考虑到应留有 20%的余量,结合各点分布,最终确定(0.129, 0.134)点为最合适点,根据式(5)求得 $T = -0.000\ 657\ 5$,作最合适曲线,见图 3.

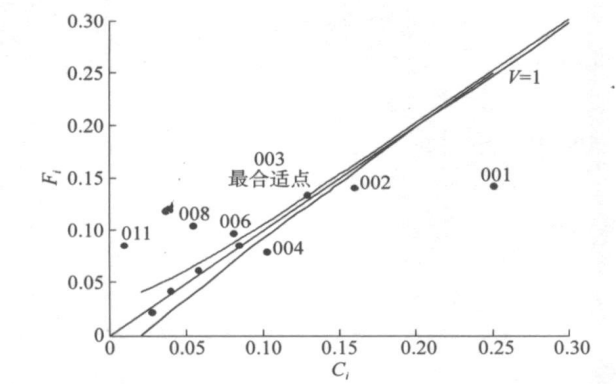


图 3 安全功能-成本最合适区域图

Fig.3 Only area chart of safety facton and cost

此时,可以直观得到改善对象,006(0.081, 0.098),008(0.055,0.105),011(0.010,0.086)这三

个部件在曲线上方,说明此时实现功能的现实成本小于目标成本,需要进行功能检查;001(0.251, 0.143),002(0.160,0.141),004(0.103,0.080)在曲线下方,说明此时实现功能的现实成本大于目标成本,是降低成本的重点所在. 在最合适区域内的点视为合格的点,说明该部件的功能、成本配比基本合适.

(4) 结合实际情况进行分析. 布袋除尘器本身有着较好的安全防护性能,原设计的安全防护案对除尘器进行整体封闭式防护,需加装滤网和隔音材料,成本较高,现改做部分防护,同时给现场人员增加防护用具,并加装监测系统,超过设定值自动报警,异常情况停机;CEMS 综合测试仪也如此,该设备从国外进口,价格昂贵,原来设计防护室成本也很高,现将其放置位置进行改变,作部分防护,这样既节省了场地空间,又提高了散热性能;对于链式搅拌机整体防护工程不变,具体材料的选取上进行调整,采用轻质有机材料;通过以上改进,实现了在保证性能的基础上,不但降低了初期投入成本,而且使用成本也大大降低了. 改进后的情况见表 3. 由表 3 可见这 11 个关键部件总成本由 60.46 下降至 46.09 万元,降低了 23.77%. 对总体而言,总成本降至 70.19 万元,下降了 16.99%.

表 3 成本改善表
Table 3 Cost melioration list

部件	原成本/万元	现成本/万元	ΔC
001	15.15	6.87	8.28
002	9.75	5.02	4.73
004	6.22	4.86	1.36
总计	31.12	16.75	14.37

对于 006、008、011 这三个价值大于 1(如表 2 所示)的部件,从新设置功能重要度系数,发现原系数设置基本合理,在专家系统的允许偏差范围内. 检查功能发现普遍存在功能不足的情况,但也可以满足实际需求. 在 001、002、004 号部件的改善过程中新使用了一些电气、控制元件,考虑到整体系统的性能均衡与通信稳定,现对 006、008、011 加入了新的通信、控制模块并替换部分原有器件,总共投入 1.51 万元.

此时整个系统 ΔC 为 12.86 万元,总成本为 71.7 万元,降低了 15.21%;对于 11 个重要部件来说,总成本为 47.6 万元,降低了 21.27%. 此时可以重新计算各项指标,作新的最合适区域图. 可以看到,原来偏离 $V=1$ 的点的位置大大改善了.

4 结 论

通过使用功能区域分析法对项目进行安全功能一成本分析,很好地满足了厂方的要求;各项经济指标都比原来有了显著提高,不但有效降低了成本,一次投入成本降低了 15.21%,而且大大改善了系统的性能,替换、淘汰了一些旧的部件,电气化、控制化程度比原来加强了,操作人员由 7 名减少到 4 名,占地面积也减小了 11 m²,粉尘、噪声、烟气、现场作业环境都比过去有了提高. 整个统计、分析、改善过程只用了 2d,参与人员只有 5 人. 使用传统功能分析方法则所需时间、人力、费用都要高得多,耽搁时间较长. 功能区域分析法在传统功能分析方法的基础上结合最合适区域分析方法的思路,有着简洁高效、重点突出、形象直观等特点,在特定的条件下使用能收到事半功半的效果. 这种方法的建立、提高还有很大的发展空间,在安全经济分析中,必须结合安全科学自有的特性,这样才可以发挥功能区域分析方法最大的作用.

参 考 文 献

[1] 保罗·萨缪尔森, 威廉·诺德豪斯. 经济学. 17 版. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 79

[2] 罗云. 注册安全工程师手册. 北京: 化学工业出版社, 2004: 189

[3] 吴添祖. 技术经济学. 北京: 清华大学出版社, 2004: 332

[4] 陈浩. 工程项目各阶段的造价控制. 项目管理, 2005(1): 23

[5] 李素琴. 极低硫钢的精炼脱硫动力学模型. 北京科技大学学报, 2004(6): 245

[6] 肖新国. 循环经济与火电企业的发展. 中国电力企业管理, 2005(8): 45

[7] 谢科范. 最合适区域法曲线方程的推导与 K 值确定. 西北工业大学学报, 2002(5): 17

[8] 刘明. 资源开发方案经济评价的价值工程模型. 资源环境与工程, 2003(12): 20

[9] 李宗正. 安全投资的量化分析. 中国安全科学学报, 2005(3): 70

[10] Davids T. Opening model in safety analysis and evaluation. Math Opening Model, 2004(11): 24

[11] Levis J. Employers may focus on indirect costs of injuries. Safety Health, 2002(5): 17

Safety analysis of a project based on function area method

WEN Xiaolong¹⁾, SONG Cunyi¹⁾, LIN Hai¹⁾, JIN Longzhe¹⁾, CUI Wei²⁾

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100029, China

ABSTRACT Using traditional methods to analyse the safety of industrial projects, safety benefit and value can only reflect the safety situation of system partially, the effect of analytical results on improving the safety situation of system is limited and its application is not satisfied. By introducing the theory of value analysis, safety benefit-value simultaneous equations and optimization criteria were built. Integrating the only area chart, the function area method (FAM) was finally developed. By applying this method to engineering projects, the only area chart and curves were obtained based on the technical parameters of projects, and the safety value and cost of projects were greatly improved.

KEY WORDS industrial project; safety evaluation; safety benefit; safety value; area chart; ABC analytical method