

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.008

附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型

白凤美, 李佳洋

(中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要:结合脚手架安全技术规范,建立了附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价指标体系,确定了 17 项风险因素;构建了基于集对分析法的风险评价模型,采用层次分析法确定了各因素权重;根据集对分析法原理,将各因素风险等级分为三个级别,根据专家打分结合各风险因素权重系数确定同一度、差异度、对立度;采用特殊取值法、集对势分析法确定附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险等级;将该方法应用于某工程实例,评定结果为该工程附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险等级处于可控状态,与现场工程实际相符。

关键词:附着式升降脚手架;集对分析法;层次分析法;风险评价

中图分类号:X947 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0035-05

Risk assessment model for overhead and fall accidents of attachment lifting scaffold

Bai Fengmei, Li Jiayang

(MCC Building Research Institute Co., Ltd, Beijing 100088, P. R. China)

Abstract: Based on the scaffolding safety technical standard, risk evaluation index system of overturning and falling accidents of scaffolding was established, 17 risk factors were determined, and a risk evaluation model based on set pair analysis method was established. weight and degree of risk. According to the principle of the Set Pair Analysis, the risk grade of each factor is divided into three levels. According to the expert's score and the weight coefficient of each risk factor, the same degree, difference degree and contrast degree are determined. Using special value method, this method is applied to the project example, and the result is that the risk level of overturned and falling accident of attached scaffolding is in controllable condition, which is in accordance with the engineering.

Key words: attached lifting scaffold; set pair analysis; analytic hierarchy process; risk assessment

附着升降脚手架是中国施工人员发明的具有独立知识产权的高层建筑施工工艺,在施工中可以电动整体提升或下降,有降低高层建筑的施工成本、提高施工速度和安全性,以及促进建筑施工技术朝着机械化方向发展的优点^[1]。但是由于技术和管理层面上的原因,实际使用中还存在不少问题,特别是脚手架的倾覆和坠落事故时有发生。由于附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险分析具有多因素、多层

次、不确定性,传统分析方法很难定量对其分析和评价。采用集对分析法和层次分析法构建附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险模型构建可以很好的解决这一问题。

1 附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价指标体系确定

附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价是

一个多因素共同影响的系统工程,建立科学、合理并符合工程实际的评价指标体系是进行风险评价的基础工作。

根据层次分析法的基本原理,遵照《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》(JGJ202—2010)、《建筑施工升降设备设施检验标准》(JGJ305—2013)相关内容,结合附着式升降脚手架倾覆和坠落事故统计分析情况,可建立附着式升降脚手架倾覆和坠落风险综合评价指标体系(O);基准层(P),分别为管理因素 P_1 、安全装置因素 P_2 、架体构造因素 P_3 、附着支座 P_4 、同步控制装置因素 P_5 ;指标层(X),分别为 $X_1 \sim X_{17}$ [2],见表 1。

表 1 附着式升降脚手架倾覆和坠落风险综合评价指标体系风险因素及权重系数

目标层	准则层	指标层
管理因素 P_1		无专项施工方案、方案未经审批或专家论证、或未按方案进行搭设; X_1
		附着式升降脚手架未经验收; X_2
安全装置 P_2		附着式升降脚手架未定期进行检测、检查; X_3
		未采用防坠落装置或技术性能不符合规范要求; X_4
附着式升降脚手架倾覆和坠落风险(O)	附着支座 P_4	防坠落装置与升降设备未分别独立固定在建筑结构上; X_5
		防坠落装置未设置在竖向主框架处并与建筑结构附着; X_6
架体构造 P_3		未安装防倾覆装置或防倾覆装置不符合规范要求; X_7
		架体高度大于 5 倍楼层高,宽度大于 1.2 m; X_8
同步控制装置 P_5		直线布置的架体支承跨度大于 7 m,或折线、曲线布置的架体支撑跨度的; X_9
		架体的水平悬挑长度大于 2 m 或大于跨度 1/2; X_{10}
附着支座 P_4		架体悬臂高度大于架体高度 2/5 或大于 6 m; X_{11}
		未按竖向主框架所覆盖的每个楼层设置一道附着支座; X_{12}
同步控制装置 P_5		使用工况未将竖向主框架与附着支座固定; X_{13}
		附着支座与建筑结构连接固定方式不符合规范要求; X_{14}
同步控制装置 P_5		当附着式升降脚手架升降时,未配备有限制荷载自控系统或水平高差的同步控制系统; X_{15}
		限制荷载自控系统未具有超载 15% 时的声光报警和显示报警机位,超载 30% 时,应具有自动停机的功能; X_{16}
同步控制装置 P_5		水平高差同步控制系统未具有当水平支承桁架两端高差达到 30 mm 时能自动停机功能; X_{17}

2 基于集对分析法的附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型构建

集对分析是中国学者赵克勤于 1989 年提出的一种处理不确定性问题的系统分析方法,其核心思想是把研究问题视作一个确定不确定系统[3]。在这个系统中,确定性与不确定性在一定条件下互相转化,互相影响,互相制约,并可用一个能充分体现其思想的确定不确定式子来统一地描述各种不确定性的数学模型[4]。

联系度(Degree of Connexion)一般可表示为

$$\mu = S/N + (F/N)i + (P/N)j \quad (1)$$

式中: N 为所集对中两个集合所具有的特性总数; S 为集对中两个集合共有的特性数; P 为集对中两个集合相互对立的特性数; $F = N - S - P$ 为集对中两个集合既不共同具有,又不相互对立的特性数; $S/N, F/N, P/N$ 分别为所论两个集合在指定问题背景下的同一度,差异度,对立度; j 为对立度系数,规定取值为 -1 ; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$ 。

令 $S/N = a, F/N = b, P/N = c$, 于是式(1)可简记为

$$\mu = a + bi + cj = \sum_{k=1}^S \omega_k + \sum_{k=S+1}^{S+F} \omega_k i + \sum_{k=S+F+1}^N \omega_k j \quad (2)$$

式中: $(k=1, 2, \dots, N)$ 为第 k 各特征向量的权重, $\sum_{k=1}^S \omega_k$ 。

矩阵形式为

$$\mu = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{E} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n) \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{W} 为权重系数向量, \mathbf{R} 为同、异、反多元测量评价矩阵; \mathbf{E} 为联系分量矩阵[5]。

其中,权重系数向量 \mathbf{W} 为专家评价权重向量,由各专家的权重确定,同、异、反三元测量评价矩阵 \mathbf{R} 通过专家打分法及层次分析法确定。同时,由公式(3)可以计算得出系统的同一度 a , 差异度 b , 对立度 c [6]。

由公式(1)可知, $j = -1$; 当 $i = 1$ 时, 不确定度转化为同一度; 当 $i = -1$ 时, 则转化为对力度, 当 i 在 $[-1, 1]$ 范围内取值, 则不确定度中同一与对立各占一定比例。

由于归一化联系度在 $[-1, 1]$ 范围内取值, 采用

极限状态下 i 的取值计算确定系统风险等级。本文采用联系度取值均分法^[7],联系度所对应的危险性等级见表 2。

表 2 附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险等级划分标准

等级	A	B	C
状态	很安全	一般安全	危险
联系数	$0.33 < \mu \leq 1$	$-0.33 < \mu \leq 0.33$	$-1 < \mu \leq -0.33$

依据计算得出的 a, b, c , 根据集对势等级和次序关系(见表 3), 可以得到系统的“集对势”, 由此确定系统是否处于风险状态^[8]。

表 3 集对势等级和次序关系

a, b, c 的相互关系	等级	集对势	集对势的含义
$a/c > 1, b = 0$	同势	准同势	系统有确定的同一趋势
$a/c > 1, b/c < 1$		强同势	系统以同一趋势为主
$a/b > 1, b/c > 1$		弱同势	系统的同一趋势比较弱
$a/c > 1, a/b < 1$		微同势	系统的同一趋势很弱
$a = b, b = 0$	均势	准均势	系统的同一趋势与对立趋势相当
$a = c, a/b > 1$		强均势	系统的同一趋势与对立趋势明显相当
$a = c, b = a$		弱均势	系统的同一趋势与对立趋势相等, 但不确定
$a = c, a/b < 1$		微均势	系统的同一趋势与对立趋势虽相等, 但很微弱
$a/c < 1, b = 0$	反势	准反势	系统有确立的对立趋势
$a/c < 1, a/b > 1$		强反势	系统以对立趋势为主
$a/c < 1, a/b < 1, b/c < 1$		弱反势	系统的对立趋势较弱
$a/c < 1, b/c > 1$		微反势	系统的对立趋势很微弱

3 层次分析法确定各风险因素权重

由于附着式升降脚手架倾覆和坠落事故是在多因素共同影响下发生的, 各因素对事故发生的影响度不同, 因此本文采用层次分析法确定各风险因素的权重。

3.1 构造比较标度

依据比较的标度和判断原理, 运用模糊数学理论, 可得出如下比较标准^[9](见表 4)。

表 4 比较标准意义

标准值	定义	说明
1	同样重要	因素 X_i 与 X_j 的重要性相同
3	稍微重要	因素 X_i 的重要性稍微高于 X_j
5	明显重要	因素 X_i 的重要性明显高于 X_j
7	强烈重要	因素 X_i 的重要性强烈高于 X_j
9	绝对重要	因素 X_i 的重要性绝对高于 X_j

若 $V_{ij} = X_i/X_j$, 则 $1/V_{ij} = X_j/X_i$ 。

3.2 构造比较判断矩阵

按照层次结构模型, 每一层元素都以相邻上一层各元素为基准, 按上述比较标度构造判断矩阵 D , 按定义则有^[10]

$$D = \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{m1} & \cdots & V_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1}{V_1} & \cdots & \frac{V_1}{V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{V_m}{V_1} & \cdots & \frac{V_m}{V_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对比较得到的判断矩阵 D , 解特征根问题: $DW = \lambda_{\max} W$, 所得到的 W 经正规化后作为因素的排序权重。可以证明, 对于正定互反矩阵 D , 其最大特征根 λ_{\max} 存在且唯一, W 可由正分量组成, 除相差 1 个常数倍数外, W 是唯一的。实际上, 对 D 很难求出精确的特征值和特征向量 W , 只能求它们的近似值^[11]。采用方根法进行计算:

1) 判断矩阵 D 的元素按行相乘, 得到各行元素乘积 M_i ,

$$M_i = \prod_{j=1}^n V_{ij} \quad (5)$$

2) 计算 M_i 的 n 次方根

$$\bar{V}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (6)$$

3) 对向量 \bar{V} 正规化

$$V_i = \bar{V}_i / \sum_{j=1}^n \bar{V}_j \quad (7)$$

4) 计算判断矩阵的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(DV)_i}{nV_i} \quad (8)$$

以上各式中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

3.3 判断矩阵的一致性检验

判断矩阵是分析者凭个人知识及经验建立起来的, 难免存在误差。为使判断结果更好地与实际状况相吻合, 需进行一致性检验。判断矩阵的一致性检验公式为 $CR = CI/RI$, 其中 CI 为一一致性检验指标, $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$; n 为判断矩阵的阶数;

RI 为平均随机一致性指标^[12](取值见表 5)。

表 5 平均随机一致性指标取值

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 时,认为 D 的一致性是可以接受的,否则需要重新调整判断矩阵,直至满足一致性检验为止。

3.4 计算权重向量

在判断矩阵满足一致性检验的条件下,可求得各层风险因素的权重系数向量^[13]。

4 工程实例应用

4.1 工程简介

某工程采用 SDG-03 型整体装配式附着升降脚手架,该工程标准层高 3.15 m,14 层与 27 层层高 4.2 m。爬架在 6 层结构楼面施工完成后开始搭设,架体全高为 14.4 m,宽度为 0.7 m,共覆盖 4.5 个操作层。架体主导轨边缘与建筑结构外沿之间的距离为 0.40 m。附着方式采用板式钢梁附着于楼板,共设置三道支座,提升时采用两道支座提升。三道附墙支座分别设置在第 2、3、4 层的楼板上,提升机构设置在第二道附着处。架体共设置两道翻板,分别设置在架体底层和施工层的下一层。架体与建筑物间的间隙防护利用脚手板底部的抽拉杆、铺设 C 型钢等达到全密封。本工程爬架由竖向主框架、立框、

脚手板、立网框、附着支座、控制系统、电动葫芦组成。

4.2 计算过程

1)根据现场实际管理情况,采用层次分析法确定附着式升降脚手架倾覆和坠落风险综合评价指标体系准则层权重向量 $P=(0.3,0.2,0.2,0.2,0.1)$,指标层中各风险因素的权重向量 $V=(0.06,0.06,0.08,0.12,0.03,0.06,0.09,0.05,0.05,0.05,0.05,0.04,0.06,0.03,0.03,0.04)$ 。

2)采用集对分析法对附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价。现场邀请 5 位专家结合现场情况对 $X_1 \sim X_{17}$ 的等级进行评判得到附着式升降脚手架倾覆和坠落风险评价专家现场打分表,结合层次分析法中得到的各风险因素的权重向量 V ,计算确定附着式升降脚手架倾覆和坠落风险同、异、反三元测量评价指标,见表 6。

附着式升降脚手架倾覆和坠落风险 R 为同、异、反多元测量评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.44 & 0.42 & 0.14 \\ 0.33 & 0.50 & 0.17 \\ 0.42 & 0.45 & 0.13 \\ 0.25 & 0.59 & 0.16 \\ 0.34 & 0.35 & 0.31 \end{bmatrix}$$

五名专家根据实际经验、能力确定的权重向量为 $W=(0.15,0.25,0.15,0.15,0.30)$ 。

表 6 附着式升降脚手架倾覆和坠落风险评价专家现场打分表

专家	评价指标																考虑各因素权重的同、异、反三元测量评价指标
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	
M_1	A	B	A	A	B	B	C	B	C	A	A	B	A	C	A	B	$0.44+0.42i+0.14j$
M_2	A	A	B	B	C	A	B	A	C	B	B	A	B	C	B	C	$0.33+0.5i+0.17j$
M_3	A	B	A	A	C	A	B	A	A	B	B	C	B	B	B	B	$0.42+0.45i+0.13j$
M_4	A	B	B	B	C	B	C	B	A	B	A	A	B	B	B	C	$0.25+0.59i+0.16j$
M_5	A	A	B	A	C	B	C	B	A	B	A	C	B	C	C	B	$0.34A+0.35i+0.31j$

4.3 计算结果

根据公式(3),由五名专家的权重向量为 W ,附着式升降脚手架倾覆和坠落风险同、异、反多元测量评价矩阵 R ,可得

$$\mu = 0.351 + 0.449i + 0.2j \quad (9)$$

4.4 结果分析

1)特殊取值分析 当 $i=1$,为最理想的情况,表明评价指标体系中所有处于“不确定是否安全”的指

标项经过整改后都处于“确定安全”的状态”,此时 $\mu=0.6$,根据附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险等级划分标准,评价结果为“很安全”状态;当 $i=-1$ 时,为最悲观状态,表明当放松警惕时,指标体系中所有处于“不确定是否安全”的指标项将全部转化为“确定不安全”的状态, $\mu=-0.298$,评价结果为“一般安全状态”。

综合以上,在最理想状态及最悲观状态下,评价

结果均未跌入“不安全状态”,说明该工程附着式升降脚手架安全管理有效,其倾覆和坠落事故风险总体可控。

2)集对势分析 由公式(9), $a=0.351$, $b=0.449$, $c=0.2$, $a/c=1.755$, $a/b=0.782$,满足表6中的 $a/c>1$, $a/b<1$ 条件,可以得出,本工程附着式升降脚手架属于“微同势”,系统以“同势趋势”为主但很微弱。这表明该工程附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险总体可控,但距离转化“危险”较为接近,须针对专家打分表中的薄弱项加强安全管理,确保架体稳定性。

5 结论

1)本文结合《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》(JGJ202—2010)、《建筑施工升降设备设施检验标准》(JGJ305—2013),建立了附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价指标体系;基于集对分析理论,构建了附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型,采用层次分析法确定各风险因素的权重;

2)将研究成果应用于某施工现场,计算并评价了附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险等级,评价结果与实际管控效果相符,证明该方法可较好的应用于附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价,可作为施工现场对附着式升降脚手架安全管理和风险评价的一个定量依据。

参考文献:

[1] 施海仙,陈安军. 附着升降脚手架使用现状及加强安全

管理的建议[J]. 设备管理,2012(Sup1):143-145.

- [2] 王峰,方敏进. 附着式升降脚手架项目策划和施工阶段危险源辨识及对策[J]. 建筑:科技版,2012,22:60-62.
- [3] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学与技术出版社,2000:23-56.
- [4] 李中才,冯述虎. 集对分析法在煤与瓦斯突出综合预测中的应用. 西安科技大学学报,2007,27(3):134-137.
- [5] 魏勇,许开立. 集对分析法在尾矿坝稳定性安全评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2012,9(8):101-105.
- [6] 罗渊,马力. 基于集对分析的煤矿安全评价[J]. 露天采矿技术,2015(1):74-77.
- [7] 万强,周怀发. 基于集对分析法的储油库火灾风险分析[J]. 价值工程,2014,16(2):49-50.
- [8] 谭陆,陆愈实. 集对分析法在露天采石场安全评价及预测中的应用[J]. 安全与环境学报,2016,16(6):25-29.
- [9] 黄贯虹,方刚. 系统工程方法与应用[M]. 广州:暨南大学出版社,2005.
- [10] 方述成,汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [11] 王新民,赵彬. 基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J]. 中南大学学报:自然科学版,2008,39(5):875-880.
- [12] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1998.
- [13] 李俊芳,吴小萍. 基于 AHP—FUZZY 多层次评判的城市轨道交通线网规划方案综合评价[J]. 武汉理工大学学报,2007,4(2):205-208.

(编辑 罗敏)