

文章编号: 1004 - 4574(2011)04 - 0066 - 05

## 玻璃幕墙安全评估的集对分析方法

吴红华 文 洁

(湖南大学 土木工程学院 湖南 长沙 410082)

**摘 要:** 近年来玻璃幕墙的安全受到了工程界的重视 相继提出了一些安全评估方法 取得了一些研究成果。将集对分析方法用于玻璃幕墙的安全评估 进而建立了玻璃幕墙安全评估中的集对分析评估方法。实例表明 该方法能使评判结果更加客观可信。

**关键词:** 玻璃幕墙; 安全评估; 集对分析

中图分类号: X928. 03 文献标志码: A

## Safety evaluation method of glass curtain wall based on set pair analysis

WU Hong-hua ,WEN Jie

( College of the Civil Engineering ,Hunan University ,Changsha 410082 ,China)

**Abstract:** The safety of the glass curtain wall is always concerned in engineering in recent years ,some evaluation methods for safety performance of glass curtain walls have been proposed and some research achievements have been obtained. In this paper ,the method of set pair analysis was used for solving the problem about safety evaluation of the glass curtain wall ,a new safety evaluation method is established based on set pair analysis. An example shows that the method presented in this paper makes the evaluation results to be more reliable.

**Key words:** glass curtain wall; safety evaluation; set pair analysis

随着现代建筑工程技术的进步与发展。玻璃幕墙已经成为一种新型的建筑表现方式 ,在我国的高层建筑 and 大型公共建筑上有了广泛的应用。玻璃幕墙是由支承结构体系与玻璃面板组成 ,在外荷载作用下其相对于结构主体可能出现一定的变形 ,作为建筑外围护结构 ,所造成的损坏不会对于结构主体的安全造成威胁 ,但会引发一些安全事故 ,甚至导致人员伤亡。如某市某大厦坠落一块玻璃幕墙 ,幕墙击中距该楼 10m 处的正在乘凉的人群 ,伤及 5 人。近年来人们对建筑玻璃幕墙的安全性越来越重视 ,对于玻璃幕墙的安全性能评估方法进行了一些研究和探索 ,如上海市 2005 年颁布了《玻璃幕墙安全性能检测评估技术规程》( 试行) ,美国也已经制定并颁发了有关幕墙强度性能、老化性能的现场检测方法。因为影响玻璃幕墙安全性的因素非常复杂 ,且影响因素还往往具有不确定性 ,为了解决这些问题有人提出了适用于玻璃幕墙结构安全性的模糊综合评判方法; 由于这些影响因素还可能是一个区间值 ,还提出了玻璃幕墙安全评估的区间数模糊综合方法 ,获得了比较准确的玻璃幕墙的安全状况的评估结果。本文将集对分析方法应用于玻璃幕墙结构的安全评估 ,建立了基于集对分析的玻璃幕墙安全评估方法 ,获得比较可信的玻璃幕墙的安全状况的评估结果。

收稿日期: 2010 - 11 - 21; 修回日期: 2011 - 03 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 90815030 ,50978094)

作者简介: 吴红华( 1967 - ) ,女 ,副教授 ,主要从事土木工程研究。E-mail: zhn88@ 263. net

# 1 玻璃幕墙安全评估的集对分析综合评价模型

## 1.1 集对分析原理

集对分析( set pair analysis ,SPA) 是我国学者赵克勤在 1989 年提出的一种新的系统分析理论方法,该方法已经在多个领域得到了广泛的应用。应用该方法能够从同、异、反 3 个方面研究 2 个事物的不确定性,可以更加全面的描述 2 个不同事物之间的联系。集对分析在实质上是一种新的不确定性理论方法,其核心思想是将确定、不确定视为一个确定不确定系统。这个系统中,确定性和不确定性相互联系、相互影响、相互制约,并在一定条件下相互转化,用一个能充分体现上述思想的关系度  $\mu$  来统一描述模糊、随机、中介和信息不完全所致的各种不确定性,从而把对不确定性的认识转换成具体的数学运算。同异反联系度及其数学表达一般定义:  $s/n$  为集合  $A_0$  与集合  $B_1$  的同一度,简记为  $a$ ;  $f/n$  为集合  $A_0$  与集合  $B_1$  的差异度,简记为  $b$ ;  $p/n$  为集合  $A_0$  与集合  $B_1$  的对立度,简记为  $c$ 。为全面刻画 2 个集合  $A_0, B_1$  总的联系状况,用联系度表示为:

$$u(A_0, B_1) = \frac{s}{n} + \frac{f}{n}i + \frac{p}{n}j = a + bi + cj. \quad (1)$$

式中:  $a, b, c$  满足归一化,即  $a + b + c = 1$ ;  $i$  为差异度标识数,  $i \in [-1, +1]$ ;  $j$  为对立度标识数,一般取  $j = -1$ ; 由上式可以看出,当  $i = 1$  时,不确定度转化为同一度;当  $i = -1$  时,不确定度转化为对立度;当  $i$  在区间  $[-1, +1]$  取值时,则不确定量中同一与对立各占一定的比例。

上述是 3 元联系度,可以根据公式(1)作进一步的扩展,为:

$$u(A_0, B_1) = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_ki_k + cj. \quad (2)$$

式中:  $a + b_1 + \dots + b_k + c = 1$ , 而  $b_1, \dots, b_k$  称为差异度分量,  $i_1, \dots, i_k$  称为差异度分量系数。

## 1.2 集对分析联系度的确定

确定联系度是应用集对分析方法进行评价的关键,而其核心是确定差异度系数。集对分析方法能够充分的提高信息的利用率,保证评价结果的可信度<sup>[7]</sup>。一般而言联系度函数可能出现正指标(值越小,结构越安全)和逆指标(值越大,结构越安全)同时出现的状况,为此需要对于逆指标进行正向化处理;另外,由于指标各自的取值范围不同,需要进行归一化处理。

根据相关的经验,我们可以将高层建筑玻璃幕墙的安全等级分为 4 级。其安全等级可为: a——符合要求、不影响继续使用; b——基本符合要求影响幕墙使用; c——部分符合要求,但还可以使用; d——不符合要求、幕墙不能使用。对于不同的因素其对应的安全等级区间值有不同的取值。

根据上述原则及集对分析的相关文献<sup>[5-7]</sup>,根据玻璃幕墙的指标均为逆指标,可以构造出以下 4 个联系度函数:

(1) 幕墙安全指标  $i$  对应于 a 类别的联系度函数:

$$\mu_{i(1)} = \begin{cases} 1 & x_i \in [s_{i(1)}, s_{i(0)}], \\ 1 - \frac{2(s_{i(1)} - x_i)}{s_{i(1)} - s_{i(2)}} & x_i \in [s_{i(2)}, s_{i(1)}], \\ -1 & x_i \in [0, s_{i(2)}]; \end{cases} \quad (3)$$

(2) 幕墙安全指标  $i$  对应于 b 类别的联系度函数:

$$\mu_{i(2)} = \begin{cases} 1 - \frac{2(x_i - s_{i(1)})}{s_{i(0)} - s_{i(1)}} & x_i \in [s_{i(1)}, s_{i(0)}], \\ 1 & x_i \in [s_{i(2)}, s_{i(1)}], \\ 1 - \frac{2(x_{i(2)} - x_i)}{s_{i(2)} - s_{i(3)}} & x_i \in [s_{i(3)}, s_{i(2)}], \\ -1 & x_i \in [0, s_{i(3)}]; \end{cases} \quad (4)$$

(3) 幕墙安全指标  $i$  对应于  $c$  类别的联系度函数:

$$\mu_{i(3)} = \begin{cases} -1 & x_i \in [s_{i(1)} \ s_{i(0)}] , \\ 1 - \frac{2(s_i - x_{i(2)})}{s_{i(1)} - s_{i(2)}} & x_i \in [s_{i(2)} \ s_{i(1)}] , \\ 1 & x_i \in [s_{i(3)} \ s_{i(2)}] , \\ 1 - \frac{2(x_{i(3)} - x_i)}{s_{i(3)} - s_{i(4)}} & x_i \in [s_{i(4)} \ s_{i(3)}] ; \end{cases} \quad (5)$$

(4) 幕墙安全指  $i$  标对应于  $d$  类别的联系度函数:

$$\mu_{i(4)} = \begin{cases} -1 & x_i \in [s_{i(2)} \ s_{i(0)}] , \\ 1 - \frac{2(s_i - x_{i(3)})}{s_{i(2)} - s_{i(3)}} & x_i \in [s_{i(3)} \ s_{i(2)}] , \\ 1 & x_i \in [s_{i(4)} \ s_{i(3)}] \end{cases} \quad (6)$$

以上公式中  $\mu_{i(1)} \sim \mu_{i(4)}$  为指标  $i$  对应于各个评价等级的联系度  $s_{i(0)}$  为等级  $a$  的上限值,对于承载力指标 取值为 1.1;对于变形状况指标 取值为 1。 $s_{i(1)} \sim s_{i(4)}$  为幕墙安全评价指标  $i$  中各个等级的下限值。

### 1.3 平均联系度及幕墙安全等级的评定

应用集对分析方法进行玻璃幕墙安全评价,是将玻璃幕墙的实际状况同安全标准形成一个集对,如设评价样本为集合  $A$   $l$  级评价标准为集合  $B$ ,则集对  $H(A_0, B_1)$  的  $K$  元的平均联系度为:

$$\mu_l = \mu_{A_l-B_k} = \sum_{i=1}^m w_i \mu_i \quad (7)$$

上式中  $w_l$  为指标  $l$  的权重,各个指标的权重可以根据以往的经验确定。如  $\mu_k = \max_{1 \leq i \leq m} \mu_i$   $k = 1, 2, \dots, m$ ,则幕墙的安全等级可以评估为  $k$  级。

### 1.4 玻璃幕墙安全状况指标及其指标值的确定

玻璃幕墙的破损一般是多种因素共同作用的结果,根据以往的研究最为重要的指标为玻璃幕墙承载力状况指标、玻璃幕墙变形状况指标和玻璃幕墙构造状况指标,其中玻璃幕墙承载力状况、玻璃幕墙变形状况为定量指标,玻璃幕墙构造状况为定性指标。本文根据相关文献和经验确定<sup>[8]</sup>其在各个安全状况下的指标值如表 1 所示。

表 1 玻璃幕墙安全状况指标值  
Table 1 Safety indices of glass curtain wall

安全等级	安全状况	玻璃幕墙承载力状况指标( R/S)	玻璃幕墙变形状况指标( $d_{f,jm}/d_f$ )	玻璃幕墙外观损伤状况指标
$a$	符合要求	[1.00, $\infty$ )	[0.95, $\infty$ )	符合设计及规范要求,表面完好无缺陷,连接可靠,构件齐全
$b$	基本符合要求	[0.90, 1.00)	[0.90, 0.95)	不完全符合设计及规范要求,表面略有缺陷,连接可靠,个别构件破损
$c$	部分符合要求	[0.85, 0.90)	[0.85, 0.90)	不能完全符合设计及规范要求,构造方式有缺陷,局部存在安全隐患
$d$	不符合要求	[0.00, 0.85)	[0.00, 0.85)	不能符合设计及规范要求,构造方式不当,有严重缺陷,存在安全隐患

注: R 为结构容许抗力, S 为结构荷载效应组合值,  $d_{f,jm}$  为规范容许变形,  $d_f$  为实际变形

### 1.5 确定因素的权值

权重是衡量指标集中某一子具体指标对幕墙安全等级影响程度相对大小的量,权重越大,则意味着该因素对幕墙安全的影响越大,反之则小。为了客观的给出权值系数,可以运用灰色关联分析法,以玻璃幕墙的破坏状况作为母因素,以其它因素为子因素,分别建立母数列和子数列,先计算各指标的关联度,再按归一化原则处理后即得出各个指标的权值。也可以采用面积法结合不确定层次分析法进行综合评估确定指标<sup>[9]</sup>。本文根据相关文献[9]所确定的各个因素的权重如表 2。

表 2 各个指标的权重  
Table 2 Weights of indices

指标	承载能力	变形	外观损伤状况指标
权重	0.674	0.242	0.084

## 2 集对分析方法幕墙安全评估中的运用

本文以某高层建筑在遭遇强风时其玻璃幕墙安全状况的评估为例说明具体的应用方法,该高层建筑物的主体结构为框架剪力墙结构,主楼的 7 层至顶层是半隐框玻璃幕墙。由于影响玻璃幕墙安全状况的因素众多,但在具体所安全评估时只能够选择有限的因素进行评估。从现有的资料可以看出对建筑玻璃幕墙安全影响最大的因素是玻璃幕墙隐框的承载力和变形,所以本文就将选取玻璃幕墙隐框的承载能力  $R/S$ 、变形状况( $d_{f\lim}/d_f$ )、构造状况为评价指标。

### 2.1 承载能力 $R/S$ 、变形状况( $d_{f\lim}/d_f$ )、构造状况为评价指标计算

在该玻璃幕墙现场检测的基础上,进行幕墙及其支撑结构的强度及承载力验算,分别得出玻璃幕墙结构在当地 50a 一遇强风作用下的承载能力和变形状况,而构造状况需要根据玻璃幕墙的实际状况判定。

### 2.2 联系度计算

将建筑玻璃幕墙经过处理的评价因素值代入前述公式(3) - (7)中即可得算例建筑幕墙安全性前 2 个指标的联系度,而构造状况由于是非定量因素可直接确定联系度,根据构造指标,与 b 级为同一度,直接取值为 1,其余取值为 -1。根据公式(3-7)和表 2 可以得出幕墙安全状况的平均联系度,具体的计算结果可见表 4。

表 3 评价因素指标值

Table 3 Indices of assessment factors

评价因素	承载能力 ( $R/S$ )	变形 ( $d_{f\lim}/d_f$ )	外观损伤 状况指标
因素指标值	0.98	0.89	局部构造不符合要求,个别部件有破损

表 4 玻璃幕墙安全状况联系度计算结果

Table 4 Calculation results of connectivity for safety of glass curtain wall

安全状况	承载力状况联系度	变形状况联系度	构造状况联系度	平均联系度
符合要求 a	0.6	-1	-1	0.0784
基本符合要求 b	1	0.6	1	0.9032
部分符合要求 c	-0.6	1	-1	-0.2464
不符合要求 d	-1	-0.6	-1	-0.9032

根据表 4 的计算结果,可以取联系度最大值对应的安全状况等级为评价所得出的幕墙安全性评价等级,具体为 b 级,玻璃幕墙略有破损,但不显著影响幕墙的正常使用。同实际的玻璃幕墙安全状况相符合,可以看出本文方法的精度比较高。

## 3 结 语

(1) 由于高层建筑玻璃幕墙损坏事故频繁发生,高层建筑建筑玻璃幕墙的安全性引起了人们的重视,相关的玻璃幕墙的安全性能评估方法的研究受到了重视,已经提出了一些具体的评估方法,而本文所进行高层建筑玻璃幕墙结构安全状况评估方法的研究是这个方面的一个新探索,还有许多问题需要作进一步的研究。

(2) 由于影响玻璃幕墙安全性的因素比较复杂,以往的评估方法难以解决此问题,本文应用集对分析方法进行高层建筑玻璃幕墙结构安全状况评估,建立了玻璃幕墙安全评估的集对分析方法,获得比较真实、准确的玻璃幕墙的安全状况的评估结果。

(3) 在进行高层建筑玻璃幕墙安全评估时,由于对一些问题在理论上的认识还比较有限,其损伤机理的研究还不够深入。还需要通过对玻璃幕墙开展系统的试验和实测研究深化对于玻璃幕墙安全问题的认识,所以高层建筑玻璃幕墙安全评估方法的研究还,有待于进一步的深化。

(4) 本文提出的玻璃幕墙安全评估的新方法可以比较合理的考虑各个因素对玻璃幕墙安全状况的影响,使评估结果更具客观性,评估结果比较准确。本文所提出的评估方法不仅可以应用于高层建筑玻璃幕墙的安全评估,也可以应用于类似结构的安全评估,所以本文方法有广泛的应用前景。

## 参考文献:

[1] 赵鸣、孙磊、赵鸿.既有玻璃幕墙的结构安全性模糊综合评判(1) [J].四川建筑科学研究,2008,5:80-85.

- [2] 赵鸣、孙磊、赵鸿. 既有玻璃幕墙的结构安全性模糊综合评判(2) [J]. 四川建筑科学研究, 2008, 6: 43 - 45.
- [3] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 1 - 3.
- [4] 赵克勤, 宣爱理. 集对论一种新的不确定理论方法与应用 [J]. 系统工程, 1996, 14( 1) : 18 - 23, 72.
- [5] 李德顺. 基于广义集对分析的系统危险性评价研究. 沈阳: 东北大学, 2010: 84 - 85.
- [6] 吴红华. 灾害损失评估的灰色模糊综合方法 [J]. 自然灾害学报, 2005, 2: 115 - 118.
- [7] 吴红华, 曾赛丽, 李正农. 玻璃幕墙安全评估方法研究 [J]. 自然灾害学报, 2010, 5( 19) : 96 - 100.
- [8] DG/TJ08 - 803 - 2005 玻璃幕墙安全性能检测评估技术规程( 试行) [S]. 19 - 20.
- [9] 张山山, 左勇志, 霍达, 等. 既有玻璃幕墙结构安全性综合评估研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 4( 32) : 94 - 99.