

文章编号:1674-2869(2017)02-0169-06

基于灰色关联度的在役混凝土结构耐久性评估

周小龙¹,袁燕超¹,陈莉²,马希瑞¹,刘博雅¹

1. 武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 湖北商贸学院建筑经济与工程学院,湖北 武汉 430079

摘要:为了提高混凝土结构耐久性评估结果的准确性和客观性,提出了一种基于灰色系统理论的混凝土结构耐久性评估方法.该方法首先以现场检测的数据为依据,进行“少数据”建模,并用非线性数学模型取代传统的线性模型对评估指标值进行归一化处理;然后应用层次分析法改进初始专家权重,并构造变权重;再基于灰色理论对样本及评价指标进行分析,并以灰色关联度作为划分混凝土结构或构件耐久性技术状态的主要依据;最后通过算例分析,说明了该方法的应用过程,并验证了该方法计算结果的可靠性.计算结果表明:基于灰色关联度的在役混凝土结构耐久性评估方法能够有效减小主观因素和专家知识对评估结果的影响,且计算过程简单,适于实际工程应用.

关键词:灰色关联度;混凝土结构;耐久性;评价指标

中图分类号:TU12 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.02.012

Durability Evaluation of Concrete Structure Based on Grey Relation Degree

ZHOU Xiaolong¹,YUAN Yanchao¹,CHEN Li²,MA Xirui¹,LIU Boya¹

- 1.School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Construction Economics and Engineering Management, Hubei Business College, Wuhan 430079, China

Abstract: To raise the accuracy and objectivity of concrete structure durability evaluation, we proposed a method based on grey system theory. First, the models with "less data" were developed based on inspection data, and the values of evaluation indexes were normalized by nonlinear mathematical methods replacing traditional linear methods; second, the initial expert weights were improved by using the analytic hierarchy process, and the variable weights were constructed; next, the sample and evaluation indexes were analyzed by the grey system theory, and the concrete structure durability condition was evaluated by the grey relation degree. Finally, the application process of the method was illustrated in a practical engineering case, and the reliability was also proved. The results show that the durability evaluation method of existing concrete structures based on grey relation degree can effectively reduce the influence of subjective factors and expert knowledge on the evaluation results and the calculation process is simple, providing references for practical engineering application.

Keywords: grey relation degree; concrete structure; durability; evaluation index

耐久性、安全性和适用性是混凝土结构可靠性保障的基本要求,目前的混凝土结构设计方法着重于强调结构的安全性和适用性,过高估计了

结构的使用寿命,而调查显示,大量混凝土结构,特别是震损结构及恶劣环境下的建筑结构过早劣化,面临着检测评估、维修加固,甚至提前退役的

收稿日期:2016-09-29

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20161505)

作者简介:周小龙,博士,讲师. E-mail:zhouxiaolong@cqu.edu.cn

引文格式:周小龙,袁燕超,陈莉,等. 基于灰色关联度的在役混凝土结构耐久性评估[J]. 武汉工程大学学报,2017,39(2):169-174.

ZHOU X L, YUAN Y C, CHENG L, et al. Durability evaluation of concrete structure based on grey relative degree [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(2): 169-174.

境遇^[1-2]. 近年来,混凝土耐久性问题得到越来越多的关注,而影响混凝土结构耐久性的因素复杂繁多、相互关联,更有部分信息不能通过检测手段获得,造成传统的混凝土结构耐久性评估模型较简单,评估结果也较粗糙,特别是对于老化结构,评估精度降低^[3]. 目前针对混凝土耐久性的评估模型较为简单,评价指标体系较为粗糙^[4],本文基于灰色系统理论,以现场检测的数据为依据,进行“少数据”建模,以灰色关联度为耐久性评估指标来划分混凝土结构或构件的耐久性技术状态.

1 混凝土结构耐久性评估指标

混凝土结构耐久性评估可从材料、构件和结构 3 个层次由低层向高层逐步分析,最后得出目标值来评判整个结构的耐久性技术状态,评估层次分析模型图如图 1 所示. 结构整体耐久性评估建立在构件评估结果基础上,以各构件评估结果作为其评估指标的初始值,评估方法和步骤与构件耐久性评估完全相同. 本文主要阐述了构件的耐久性评估方法,并给出了结构整体耐久性评估的步骤.

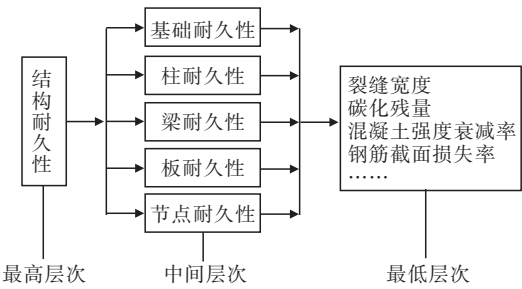


图 1 混凝土结构耐久性评估层次分析模型

Fig. 1 Analytic hierarchy process model of durability evaluation of concrete structures

2 基于灰色关联度的构件耐久性评估

2.1 构件耐久性评价指标矩阵

影响混凝土构件耐久性的因素很多,如裂缝宽度、碳化深度和混凝土强度衰减率等. 定义 $Y=\{y_j|j=1,2,\dots,n\}$ 为所有影响因素的一个集合,对于各个独立构件,从中选择最优目标集合 $T=\{x_i|i=1,2,\dots,p\}$ 作为其耐久性评估指标. 本文根据已有研究成果^[5]和工程经验选取构件外观、环境条件、混凝土碳化残量、裂缝宽度、混凝土强度衰减率、混凝土强度衰减速度、钢筋截面损失率和钢筋锈蚀速度等指标作为构件耐久性评估的依据. 各指标值的变化区间如表 1 所示.

表 1 耐久性评估指标变化区间
Tab. 1 Variation section of durability evaluation index

评估指标 evaluation index	外观打分 appearance	环境情况 environment	混凝土碳化		混凝土强度衰 减率 concrete strength attenuation rate / %	混凝土强度衰 减速度 concrete strength decay rate / (%/a)	钢筋锈蚀率 rebar corrosion ratio / %	钢筋锈蚀速度 rebar corrosion rate / (%/a)
			残量 concrete carbonation remains / mm	裂缝宽度 rack width / mm				
上限 x_k^u	5*	5*	10*	0.4	10	1	5	0.5
下限 x_k^l	0	0	0	0*	0*	0*	0*	0*

注:表 1 中带*号的数值为该指标的最优值

2.2 评估指标归一化处理

评估混凝土结构构件耐久性的各类指标由于其物理意义和数值大小均有很大区别,为了提高建模精度,采用指标区间化生成的方法对实测指标值归一化处理,以便消除各指标不同量纲和不可比性带来的影响. 考虑到实际工程中归一化后的评估指标值不应成线性变化,评估指标实测值越靠近劣化限值,该指标所表征的构件耐久性技术状态的变化就会越缓慢. 因此采用指数型数学模型改进以往的线性处理方法对各指标实测值归一化处理.

当实测值 x_k 以上限 x_k^u 为指标最优值时,其归一化值可表示为:

$$x_i(k)=\frac{1}{e-1}\exp(\frac{x_k-x_k^l}{x_k^u-x_k^l}). \tag{1}$$

当实测值 x_k 以下限 x_k^l 为指标最优值时,其归一化值可表示为:

$$x_i(k)=\frac{1}{e-1}\exp(\frac{x_k^u-x_k}{x_k^u-x_k^l}). \tag{2}$$

2.3 灰色关联系数

根据灰色关联分析理论^[6],混凝土构件耐久性

评估指标实测值与最优值之间的关联系数可表示为:

$$\gamma_i(k) = \frac{\xi}{1 - x_i(k) + \xi} \quad (3)$$

式(3)中: $x_i(k)$ 为经过归一化处理的评估指标值, 根据式(1)和式(2)确定; ξ 为分辨系数, 根据文献^[7-8], 取 $\xi = 0.5$.

2.4 混凝土耐久性评估指标权重确定

2.4.1 初始权重 目前, 绝大部分钢筋混凝土结构耐久性评估指标权重采用的是专家权重, 专家权重的确定反应的是专家的主观看法和经验, 但人类决策思维对高维空间往往不容易掌握, 而影响结构耐久性的因素本身就很复杂且相互关联, 专家直接对各指标给出权重可能会使结果失真. 层次分析法通过指标两两比较^[9], 由判断矩阵计算被比较指标的相对权重, 来确定各指标的权重, 很好地解决了传统方法的缺陷.

引入1-9标度法将各指标相对重要性量化, 构造判断矩阵来确定各指标相对权重^[10]. 以 w_k/w_l 表示第 k 个指标相对于第 l 个指标的重要性比值, 判断矩阵可表示为:

$$A_{p \times p} = [\alpha_{kl}] = \begin{bmatrix} w_k \\ w_l \end{bmatrix}, \quad k, l = 1, 2, \dots, p, \quad (4)$$

式(4)中: w_k 、 w_l 分别指第 k 个指标和第 l 个指标的初始权重. 实际工程中, 判断矩阵中的元素大多与真实值存在误差, Saaty 以 $C_1 = |\lambda_{\max} - n|/(n-1)$ 作为衡量指标权重偏离真实值程度的依据, 其中 λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值.

同时为了考虑矩阵不同阶次的影响, Saaty^[11] 通过对 1 000 个样本的分析, 引入平均随机一致性指标 R_1 对 C_1 进行修正, 如表 2 所示, 并以式(5)中 C_R 为修正后的一致性评价指标.

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \leq 0.1 \quad (5)$$

表 2 不同阶一致性指标 R_1 值

Tab. 2 Consistency index R_1 of different matrix orders

矩阵阶数 matrix order	一致性指标 consistency index R_1
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
≥ 10	1.56

一般认为满足式(5)时, 可认为构造矩阵 $A_{p \times p}$ 满足一致性要求, 若不满足, 则需修正矩阵中元素直到满足为止. 对满足一致性要求的构造矩阵 A , 其最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 x 可用来表示混凝土耐久性评估指标的相对重要性, 即 $Ax = \lambda_{\max}x$, x 的单位化向量即为各评估指标的初始权重向量.

2.4.2 初始权重修正 基于层次分析法得到的评估指标初始权重较好地体现了专家的经验和专业知识, 在一定程度上可以反映各评估指标间的相对重要程度. 但同时注意到对于指标相对较多的结构耐久性评估问题, 每个指标的权重影响却有限, 当个别评估指标值出现较大波动时, 总体评估结果却有可能变化不大, 而实际上, 当构件某个评估指标值接近其不利限值时, 该构件的耐久性会显著降低. 因而基于层次分析法的初始权重有时也不能很好地反映耐久性评估的真实结果.

考虑到指标值越接近不利限值, 该指标对结构构件耐久性的影响就会越大^[12-13]. 本文以评估指标的实测值为依据构造均衡函数, 对指标初始权重进行修正. 均衡函数 $B(X)$ 可选择和型惩罚性均衡函数, 如式(6)所示:

$$B(X) = \sum_{i=1}^p x_i^a, \quad 0 \leq a \leq 1. \quad (6)$$

构造的变权公式 $W_i(X)$ 为:

$$W_i(X) = \frac{w_i x_i^{a-1}}{\sum_{k=1}^m w_k x_k^{a-1}}, \quad (7)$$

式(7)中: $W_i(X)$ 为指标修正后的权重, w_i 为指标初始权重, x_i 为指标归一化值, a 为变权指数, $(0 \leq a \leq 1)$.

由式(7)可知, a 越小, 对评估指标初始权重值的修正就越明显, 鉴于评估指标实测值在归一化处理时已经考虑了指标值接近劣化限值时具有放大效应的特点, a 的取值可适当放大, 可取 0.5~1.

2.5 混凝土结构耐久性评估

对于混凝土构件或结构的耐久性评估, 以灰色关联度为评估依据, 计算公式如式(8)所示:

$$R(x) = \sum_{i=1}^p \gamma_i(x) \cdot W_i(x). \quad (8)$$

整体结构的耐久性评估可按照图 1 所示步骤, 首先对中间层次各构件进行耐久性评估, 以构件耐久性评估结果 $R(x)$ 作为结构层次耐久性评估的初始值, 然后依次计算该层次的归一化值、关联系数和指标权重, 最后确定灰色关联度, 从而划分整体结构的耐久性等级.

依据灰色关联度大小,混凝土构件或结构耐久性评估状态可分为5级^[14-15],如表3所示.当评估等级为1级和2级时,表示构件或结构只需保持正常维护,无需修复;当耐久性等级为3级时,表示应对构件或结构的耐久性损伤进行修复才能保证其可靠性;当评估等级为4级时,应对构件或结构进行安全性评估,并及时采取修复;对于评估等级为5级的构件或结构应立即进行安全性评估,确定解决方案.

表3 混凝土结构(构件)耐久性评估等级标准
Tab. 3 Grade standard for durability evaluation of concrete structures(component)

耐久性等级 durability level	灰色关联度 grey relation degree	耐久性状态 durability state
1	$1.0 \geq R > 0.9$	良好,基本无损伤
2	$0.9 \geq R > 0.75$	较好,损伤轻微
3	$0.75 \geq R > 0.6$	一般,有一定损伤
4	$0.6 \geq R > 0.45$	差,损伤较重
5	$R \leq 0.45$	很差,损伤严重

3 混凝土结构构件耐久性评估算例

夏宁在文献^[3]中对一栋B类震损钢筋混凝土结构进行了耐久性检测和评估,现场详细检查了梁、柱共计8个构件,并对各构件影响混凝土耐久性损伤的指标,包括总体外观情况、裂缝宽度、钢筋截面损失率、混凝土强度衰减率、钢筋锈蚀速度以及混凝土强度衰减速度等进行了打分或实际检测,如表4所示.本文以表4中提供的现场检测数据为原始数据,根据公式(1)和公式(2)结合表1定义的耐久性评估指标变化区间值,对这8个混凝土构件进行耐久性评估.表5给出了按本文方法计算的评估指标归一化值,其中指标中的外观、环境情况属于效益型指标,其它影响因素属于成本性指标.

3.1 灰色关联系数

根据公式(3),计算评估指标对于最优指标的灰色关联系数,分辨系数取 $\xi=0.5$,计算结果如表6所示.

表4 耐久性指标得分
Tab. 4 Value of durability evaluation index

混凝土构件 concrete member	外观 appearance	环境情况 environment	裂缝宽度 crack width / mm	混凝土强度 衰减率 concrete strength attenuation rate / %	混凝土强度衰 减速度 concrete strength decay rate / (%/a)	钢筋锈蚀率 rebar corrosion ratio / %	钢筋锈蚀速度 rebar corrosion rate / (%/a)
L1	4.4	3.6	0.09	1.5	0.3	1.1	0.05
L2	4.1	3.4	0.12	2.0	0.4	1.2	0.07
L3	4.0	3.3	0.15	2.3	0.4	1.2	0.08
Z1	3.7	3.0	0.22	2.5	0.5	1.8	0.13
Z2	3.8	3.0	0.21	2.5	0.5	1.6	0.12
Z3	3.6	3.0	0.24	2.5	0.5	1.8	0.14
Z4	3.9	3.6	0.27	2.0	0.4	1.2	0.09
Z5	4.1	3.7	0.21	2.0	0.36	1.0	0.06

表5 评估指标归一化处理结果
Tab. 5 Processed result of evaluation index normalized

混凝土构件 concrete member	外观 appearance	环境情况 environment	裂缝宽度 crack width / mm	混凝土强度 衰减率 concrete strength attenuation rate / %	混凝土强度衰 减速度 concrete strength decay rate / (%/a)	钢筋锈蚀率 rebar corrosion ratio / %	钢筋锈蚀速度 rebar corrosion rate / (%/a)
L1	0.821 1	0.613 7	0.681 3	0.779 6	0.590 0	0.687 6	0.849 5
L2	0.821 1	0.566 8	0.590 0	0.713 2	0.478 5	0.662 5	0.793 3
L3	0.713 2	0.544 0	0.505 3	0.675 0	0.478 5	0.662 5	0.766 1
Z1	0.637 8	0.478 5	0.330 7	0.650 1	0.377 5	0.521 7	0.637 8
Z2	0.662 5	0.478 5	0.353 9	0.650 1	0.377 5	0.566 8	0.662 5
Z3	0.613 7	0.478 5	0.286 2	0.650 1	0.377 5	0.521 7	0.613 7
Z4	0.687 6	0.613 7	0.223 5	0.713 2	0.478 5	0.662 5	0.739 4
Z5	0.739 4	0.637 8	0.353 9	0.713 2	0.521 7	0.713 2	0.821 1

表6 评估指标灰色关联系数
Tab.6 Grey correlation coefficient of evaluation index

混凝土构件 concrete member	外观 appearance	环境情况 environment	裂缝宽度 crack width / mm	混凝土强度 衰减率 concrete strength attenuation rate / %	混凝土强度衰 减速度 concrete strength decay rate / (%/a)	钢筋锈蚀率 rebar corrosion ratio / %	钢筋锈蚀速度 rebar corrosion rate / (%/a)
L1	0.736 5	0.564 1	0.610 7	0.694 1	0.549 5	0.615 5	0.768 6
L2	0.736 5	0.535 8	0.549 5	0.635 5	0.489 5	0.597 0	0.707 5
L3	0.635 5	0.523 0	0.502 7	0.606 1	0.489 5	0.597 0	0.681 3
Z1	0.579 9	0.489 5	0.427 6	0.588 3	0.445 4	0.511 1	0.579 9
Z2	0.597 0	0.489 5	0.436 3	0.588 3	0.445 4	0.535 8	0.597 0
Z3	0.564 1	0.489 5	0.411 9	0.588 3	0.445 4	0.511 1	0.564 1
Z4	0.615 5	0.564 1	0.391 7	0.635 5	0.489 5	0.597 0	0.657 4
Z5	0.657 4	0.579 9	0.436 3	0.635 5	0.511 1	0.635 5	0.736 5

3.2 评估指标权重

在征询专家意见的基础上,按照层次分析法构造构件耐久性评估指标判断矩阵,如表7所示.表7中的初始指标权重是对判断矩阵最大特征值

对应的特征向量的单位化值.根据公式(7)对初始指标权重值进行修正, a 取0.8,计算结果如表8所示.

表7 评估指标判断矩阵($\lambda_{\max}=6.998\ 8$, $C_R=1.52\times10^{-4}$)
Tab.7 Judgment matrix evaluation index ($\lambda_{\max}=6.998\ 8$, $C_R=1.52\times10^{-4}$)

评估指标 evaluation index	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$	$T7$	初始指标权重 initial index weight
$T1$	1	0.5	1	0.5	0.5	0.4	0.4	0.076 8
$T2$	2	1	2	1	1	0.75	0.75	0.150 7
$T3$	1	0.5	1	0.5	0.5	0.4	0.4	0.076 8
$T4$	2	1	2	1	1	0.75	0.75	0.150 7
$T5$	2	1	2	1	1	0.75	0.75	0.150 7
$T6$	2.5	1.33	2.5	1.33	1.33	1	1	0.197 1
$T7$	2.5	1.33	2.5	1.33	1.33	1	1	0.197 1

表8 修正后的指标权重
Tab.8 Corrected index weight

混凝土构件 concrete member	外观 appearance	环境情况 environment	裂缝宽度 crack width / mm	混凝土强度 衰减率 concrete strength attenuation rate / %	混凝土强度衰 减速度 concrete strength decay rate / (%/a)	钢筋锈蚀率 rebar corrosion ratio / %	钢筋锈蚀速度 rebar corrosion rate / (%/a)
L1	0.074 6	0.155 2	0.077 4	0.147 9	0.156 4	0.198 4	0.190 2
L2	0.073 3	0.154 8	0.078 3	0.147 9	0.160 2	0.196 3	0.189 3
L3	0.074 7	0.154 7	0.080 0	0.148 2	0.158 8	0.194 6	0.189 0
Z1	0.073 6	0.152 9	0.083 9	0.143 8	0.160 3	0.196 6	0.188 8
Z2	0.073 5	0.153 9	0.083 3	0.144 7	0.161 4	0.194 6	0.188 6
Z3	0.073 8	0.152 2	0.086 0	0.143 2	0.159 6	0.195 7	0.189 4
Z4	0.074 4	0.149 4	0.093 2	0.145 0	0.157 1	0.192 5	0.188 3
Z5	0.074 9	0.151 3	0.086 7	0.148 0	0.157 5	0.193 5	0.188 1

3.3 各构件耐久性评估结果

由公式(8)计算的各评估构件灰色关联度为:
 $R(x)=[0.647, 0.603, 0.581, 0.519, 0.529, 0.514, 0.574, 0.611]$,可以看出,除了L1、L2和Z5的耐久性评估状态为一般外,其余构件的耐久性评估均

为差,需要进一步进行安全性评估,并及时采取修复.而文献^[5]对各构件的耐久性评定结果为:L1、L2、L3和Z4、Z5耐久性评定结果良好,Z1、Z2和Z3耐久性评定结果一般.可见,与该文方法评定结果相比,本文的耐久性评估结果相对保守,这主要是

因为在归一化处理梁柱耐久性指标检测值原始数据时,本文充分考虑了指标实测值接近其不利限值时,对构件耐久性影响明显增大的特点.另外,本文还分别计算了变权指数为0.5和1.0时的评估结果,其中 $a=1.0$ 时相当于常权评估,结果如下:

$a=0.5$ 时, $R_{0.5}(x)=[0.643, 0.599, 0.578, 0.515, 0.525, 0.510, 0.566, 0.605]$;

$a=0.5$ 时, $R_{1.0}(x)=[0.649, 0.606, 0.583, 0.522, 0.532, 0.516, 0.579, 0.615]$.

可以看出,随着变权指数的减小,关联度也逐步变小,可见,变权法比常权法更能反映接近劣化程度的评估指标的真实状态.

4 结 语

1)灰色系统理论重点研究“样本小”、“信息少”的不确定性问题,本文基于灰色关联度的混凝土结构耐久性评估方法理论明确,计算方便,具有广泛的适用性.

2)相较于传统线型归一化方法,应用指数型数学模型对评估指标值归一化处理,更符合客观实际,使得评估结果更合理、更可靠.

3)变权评估既充分考虑了数据本身所表达的信息,也充分综合了专家的经验.

4)分辨系数的取值直接影响着灰色关联系数的数值和分布,选取合理的分辨系数对评估结果的可靠性有着较大影响,需要在后续研究中通过大量工程评估来优化和验证.

参考文献:

- [1] 刑锋. 混凝土结构耐久性设计与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 薛鹏飞,项贻强. 基于灰色关联度和模糊识别的混凝土结构耐久性评估[J]. 混凝土,2009(2):14-16.
XUE P F, XIANG Y Q. Concrete structure durability assessment based on grey relative degree & fuzzy recognition [J]. Concrete, 2009(2):14-16.
- [3] 夏宁. 钢筋混凝土结构耐久性的研究[D]. 扬州:扬州大学,2002.
- [4] 刘均利,方志. 基于灰色关联度的在役双曲拱桥耐久性综合评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,37(9):1-6.
LIU J L, FANG Z. Durability evaluation of existing two-way curved arch bridges using grey relation analysis [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2010,37(9):1-6.
- [5] 宋云飞,邓承继,祝洪喜,等. 基于灰色系统理论的多孔镁橄榄石材料气孔特性与耐压强度的相关性[J]. 硅酸盐学报,2016,44(6):896-900.
SONG Y F, DENG C J, ZHU H X, et al. Correlation between porosity characteristics and cold crushing strength of forsterite porous materials based on grey system theory [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016,44(6):896-900.
- [6] 刘思锋,谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [7] 申卯兴,薛西锋,张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(1):68-70.
SHEN M X, XUE X F, ZHANG X S. Determination of discrimination coefficient in grey incidence analysis [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003,4(1):68-70.
- [8] 东亚斌,段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(4):590-592.
DONG Y B, DUAN Z S. A new determination method for identification coefficient of grey relational grade [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008,40(4):590-592.
- [9] 许树柏. 实用决策方法-层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988.
- [10] 王晓舟. 混凝土结构耐久性能的概率预测与模糊综合评估[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [11] SAATY T L. Priority setting in complex problems [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1983,30(3):140-155.
- [12] 张锦春,裴杭萍,权翼川. 变权评估中均衡函数的构造[J]. 火力与指挥控制,2007,32(7):107-110.
ZHANG J C, QIU H P, QUAN Y C. The construction of balance function in variable weight evaluation [J]. Fire Control and Command Control, 2007,32(7):107-110.
- [13] 鲍学英,李海连,王起才. 基于灰色关联分析和主成分分析组合权重的确定方法研究[J]. 数学的实践与认识,2016(9):129-134.
BAO X Y, LI H L, WANG Q C. The combined weight based on grey relation and principal component analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016(9):129-134.
- [14] 陈晶,鲍学英,赵延龙. 基于模糊可拓层次分析法的在役混凝土桥梁耐久性评估[J]. 安全与环境学报,2015(4):16-20.
CHEN J, BAO X Y, ZHAO Y L. On the assessment of the durability of the concrete bridges in service via the fuzzy-EAHP [J]. Journal of Safety and Environment, 2015(4):16-20.
- [15] 李北星,张亚明,祝文凯,等. 酸雨环境下混凝土性能劣化灰色预测[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(9):66-71.
LI B X, ZHANG Y M, ZHU W K, et al. Grey prediction on performance degradation of concrete corroded by acid rain [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015,37(9):66-71.

本文编辑:苗 变