

城市隧道爆破震动影响因素的重要度研究

王海亮¹, 张亮¹, 张祖远²

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 上海建工二建集团有限公司南昌分公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 爆破震动对建(构)筑物会产生不同程度的影响, 有效降低爆破震动的有害效应是控制爆破震动的首要问题。本研究对影响爆破震动强度的相关因素进行分类, 采用灰色关联分析方法, 以青岛市两地铁工程部分实测数据为样本, 结合 MATLAB 程序编程计算, 得到应优先选择的控制因素按重要度从大到小依次为: 自由面数目、段最小间隔时间、总药量、地形地质条件、雷管段数、孔网参数、爆破持续时间、单段最大起爆药量、起爆方向。

关键词: 隧道; 爆破震动; 重要度; 灰色关联分析

中图分类号: TB41

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)02-0073-06

Importance Degree of Factors Influencing Tunnel Blasting Vibration

WANG Hailiang¹, ZHANG Liang¹, ZHANG Zuyuan²

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Nanchang Branch of Shanghai Construction Group Erjian Group Co. Ltd, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

Abstract: Since blasting vibration has different influences on buildings, to effectively reduce its harmful effects becomes the primary problem of blasting vibration control. The paper classified the relevant factors influencing blasting vibration strength and obtained the controlling factors that should be selected primarily by using the Grey relational analysis (GRA) method and taking the measured data of Qingdao subway project as samples. After MATLAB programming calculation, the sequence of these factors in decreasing order according to importance degree was determined. They were number of free surfaces, minimum time interval, total explosive charge, topographic and geologic conditions, number of detonators, hole pattern parameters, blasting duration, largest single segment initiation dose, and initiation direction.

Key words: tunnel; blasting vibration; importance degree; Grey relational analysis

爆破在城市地下轨道交通工程中仍占据较为重要的地位。因城市周围环境条件限制, 爆破震动控制的要求较高^[1], 有效降低爆破震动的影响成为城市隧道工程迫切需要解决的问题。由于城市隧道工程爆破实际施工中的有害效应较多^[2], 影响爆破震动强度的因素呈离散关系, 同时因受各种客观因素的影响, 难以全面统计到各种影响爆破震动强度因素的数据。

目前针对离散系统较多的采用 BP(back propagation)神经网络、GRA(grey relational analysis)灰色度

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672091); 青岛市建委科技项目(JK2013-4)

作者简介: 王海亮(1963—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程爆破、地下工程、安全评价理论研究,

E-mail: tlgcbp@263.net

张亮(1990—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事隧道工程、灾害预测防治等方向研究, 本文通信作者,

E-mail: kedazhangliang@126.com

关联等研究方法。沈薇等^[3]通过对灰色关联度矩阵的分析,指出台阶爆破爆源与待测点的高差是影响爆破震动参数的准优因素;谷任国等^[4]分析了水下爆破震动影响因素的主次关系,指出不同爆破地区及爆破条件下,爆破参数影响程度不同;赵同彬等^[5]根据现场爆破实测数据采用的灰局势方法优选岩巷掏槽爆破方案,为岩巷掏槽爆破方案优选提供了参考;黄成林等^[6]采用 GRA 方法分析了蒙库铁矿露天边坡爆破震动的主要影响因素,指出主要因素为炸药总量、单段药量等;杨珊等^[7]以厦门某隧道工程为背景,通过灰色关联计算得出爆破震动影响因素的主次顺序,确定爆心距为准优因素,同时根据可控准优参数对爆破参数进行了优化。

GRA 灰色关联分析法作为影响因素重要度研究量化的重要手段,其在分析中要收集的样本量较少,适合爆破震动影响研究。本研究采用灰色关联法来分析城市隧道工程中影响爆破震动强度可控因素的重要度,为制定科学合理的爆破震动控制措施、控制爆破震动有害效应提供参考。

1 隧道爆破震动强度的影响因素

影响隧道爆破震动强度的因素有很多^[8],大体可分为两类:第一类是爆源因素,包括炸药爆速、单段最大起爆药量、总药量、雷管段数、段最小间隔时间、孔网参数、装药结构、自由面数目、爆破方向和爆破持续时间等因素;第二类为传播途径方面,其中包含了高程、爆源与监控点距离、工程地质等因素。

采取减振措施时不加以区分,把每一个因素都进行控制不太可行^[9]。因此,首先应当把影响因素按能否采取控制措施分为可控因素和不可控因素。分析可知,爆源因素全部为可控因素,而传播途径因素除地形地质条件外,都为不可控因素。针对诸多可控影响因素,需要通过分析计算进行排序。进而制定针对性安全技术措施,是实现城市地下隧道工程爆破震动控制的有效途径之一。

2 影响因素重要度计算

2.1 GRA 运算方法

GRA 关联度反映不同因素间相互发展变化的异同度,其数值表征了异同度的大小。将影响爆破震动效应的各个因素间的灰色绝对关联度数值按递减排序,来表征各影响因素重要程度的次序。其运算步骤具体为^[10-12]:

1) 确定系统特征变量数据序列和相关可控因素数据序列

假定 $x_j(k)$ 为第 j 个关联因素变化值在第 k 次试验时监测的样本,假定 $y_i(k)$ 为第 i 个系统特征值在第 k 次试验时监测的样本,表示为:

$$Y_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(k), \dots, y_i(n)], i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

$$X_j = [x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(k), \dots, x_j(n)], j = 1, 2, 3, \dots, l. \quad (2)$$

其中: Y_i 是第 i 个系统特征因素变量; X_j 是第 j 个相关因素变量; n 值为样本的容量值; m 表示系统特征因素变量的数目; l 为相关因素变化值的数目。

2) 正相关因素与负相关因素转化的转换

$$\left. \begin{aligned} X_j D_0 &= [x_j(1)d_0, x_j(2)d_0, \dots, x_j(k)d_0, \dots, x_j(n)d_0] \\ x_j(1)d_0 &= 2\max(X_j) - x_j(k); k = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

式中, D_0 是对称化算子, X_j 是对称化像。

若 $X_j(k)$ 与 $Y_i(k)$ 为负相关关系,就可以通过算子 D_0 的作用,使 $X_j(k)$ 的对称化像 $X_j D_0$ 与 $Y_i(k)$ 有正相关关系。

3) 无量纲化转换

主要是借助算子作用,转换为数量级上近似的无量纲数值,同时把负相关因素变成正相关。普遍采用的方法包含初值化法、区间值化法、均值法等计算方法。

进行相关影响因素数据 X_j 无量纲化转换

$$\left. \begin{aligned} X_j D_1 &= [x_j(1)d_1, x_j(2)d_1, \dots, x_j(k)d_1, \dots, x_j(n)d_1] \\ x_j(1)d_1 &= x_j(k)/x_j(1); k = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

式中, D_1 是初值化算子, X_j 是原象, $X_j D_1$ 是 X_j 在初值化算子下的像, 简称初值像。

$$\left. \begin{aligned} X_j D_1 &= [x_j(1)d_1, x_j(2)d_1, \dots, x_j(k)d_1, \dots, x_j(n)d_1] \\ x_j(1)d_1 &= \frac{x_j(k)}{\bar{x}_j}; \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_j(k) \end{aligned} \right\} \circ \quad (5)$$

其中, D_2 是初值化算子, X_j 是原象, $X_j D_2$ 是 X_j 在初值化算子下的像, 简称均值像。

$$\left. \begin{aligned} X_j D_2 &= [x_j(1)d_2, x_j(2)d_2, \dots, x_j(k)d_2, \dots, x_j(n)d_2] \\ x_j(k)d_2 &= \frac{x_j(k) - \min x_j(k)}{\max x_j(k) - \min x_j(k)}; k = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\} \circ \quad (6)$$

式中, D_3 是初值化算子, X_j 是原象, $X_j D_3$ 是 X_j 在初值化算子下的像, 简称区间值像。

4) 差序列、最大差、最小差的计算

在进行无量纲转换的基础上, 系统特征变量数据序列表示为 $X_0(k)$, 相关因素数据序列表示为 $x_j(k)$, 那么其差序列表示为:

$$\Delta_{0i} = \|x_0(k) - x_i(k)\| \circ \quad (7)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, m, k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。则其最大差和最小差分别为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\max} &= \forall j \in i \forall k \|x_0(k) - x_i(k)\|, \\ \Delta_{\min} &= \forall j \in i \forall k \|x_0(k) - x_i(k)\|. \end{aligned} \right\} \circ \quad (8)$$

5) 计算灰色关联系数

计算灰色关联系数 $(x_0(k), x_j(k))$ 的数值, 其计算公式为:

$$\gamma(x_0(k), x_j(k)) = \frac{\Delta_{\max} + \zeta \Delta_{\min}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \circ \quad (9)$$

6) 求得灰色关联度

在计算灰色关联度时, 一般采用平权处理, 式(10)正是运用平权处理得出权重值, 既而得出加权灰色关联度。

$$\gamma(x_0, x_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_j(k)) \circ \quad (10)$$

式中, $\frac{1}{n}$ 表示权重值。

7) 将关联度按照数值大小进行前后排序。

8) 优点评价

根据前七个步骤可以计算得出各因素间的关联度, 但考虑相关参数数列不局限于单一情况, 其关联度可以组成一个矩阵 E 。

$$E = (\epsilon_{ij}) = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \dots & \epsilon_{1n} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \dots & \epsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \epsilon_{m1} & \epsilon_{m2} & \dots & \epsilon_{mn} \end{bmatrix} \circ \quad (11)$$

若存在 $h, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, 满足:

$$\epsilon_{ih} \geq \epsilon_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, m \circ \quad (12)$$

则称相关因素 X_h 优于 X_j , 即相关因素 X_h 的重要度要大于 X_j 。若满足:

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_{ih} \geq \sum_{i=1}^n \epsilon_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, m \circ \quad (13)$$

则称相关因素 X_h 准优于 X_j , 即相关因素 X_h 的重要度要大于 X_j 。最优因素为 X_h , 其判定条件为 $j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$, 使得 $j = 1, 2, 3, \dots, n, j \neq n, X_h$ 都较 X_j 优。若存在 $j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 满足对任意的 $j = 1, 2, 3, \dots, n, j \neq n, X_h$ 较 X_j 优, 即 X_h 是准优因素, 而且 X_h 重要度为最高。

2.2 程序基本步骤

在对 GRA 的计算中采用计算机编程的方式,以便快速准确地得出结果。综合分析效率、可视化、科学计算等因素,决定采用 MATLAB 软件进行程序语言的编写,具体参考流程图 1。

3 隧道爆破震动影响因素的 GRA

在明确影响因素重要度计算方式和流程后,结合青岛市地铁一期工程 2 号线某车站 1 号风道侧穿民房段和 3 号线下穿某医院段为实际工程背景,选取部分典型实测数据进行灰色关联分析。两个工程背景的地质条件基本相似,掌子面都处于强风化及中风化花岗岩层。

3.1 系统特征变量和相关因素变量的选择

目前,在国内外研究中,振动影响依据振动速度、主频、持续时间等,根据我国《爆破安全规程》(GB6722—2014)中爆破震动对地面建筑物影响的判断标准主要还是最大振动速度和主振频率两大指标^[13]。因此采用质点峰值振动速度和主振频率为系统特征变量,记为 $Y_i, (i=1, 2)$, Y_1 表示最大振动速度, Y_2 即爆破震动的主振频率。

X_j 表示作用于爆破最大振动速度和爆破主振频率的相关因素变量, $(j=1, 2, 3, \dots, l)$ 。对于隧道爆破,相关影响因素主要分为爆源因素和传播途径因素两大类。国内外较多研究人员把罗列的影响因素都定为相关因素变量^[14-16]。本研究考虑到实际控制时能否采取措施,分为可控影响因素和不可控影响因素。从爆破震动控制的实际角度出发,只定义可控影响因素为相关因素变量。可控影响因素包括炸药爆速、单段最大药量值、总起爆药量、雷管段别数目、雷管段别间隔时间最小值、孔网爆破参数、装药结构、自由面数目、爆破方向、爆破持续时间、地形地质条件等。由于两个工程都使用同一公司生产的 2 号岩石乳化炸药,炸药爆速是不变的,因此不予考虑炸药爆速。装药结构也基本不变,不予考虑。其余 9 个可控因素全部定义为相关因素变量,即 $l=9$ 。单段最大起爆药量为 X_1 ,总药量为 X_2 ,雷管段数为 X_3 ,段最小间隔时间为 X_4 ,孔网参数为 X_5 ,自由面数目为 X_6 ,爆破方向为 X_7 ,爆破持续时间为 X_8 ,地形地质条件为 X_9 。

孔网参数包含的内容较多,包括孔深、孔间排距、布孔形式等,孔深与装药量成正比,可以在总装药量和单段最大起爆药量的量化上体现^[3]。孔间排距则与钻眼密度有关,可用比钻眼数来进行量化。布孔形式呈多样性,难以量化,暂不考虑。因此,本章将孔网参数近似量化为比钻眼数。

量化爆破方向时,将中心定在装药炮孔中心处,把炸药起爆时最小抵抗线方向确定为基准线。从基准线到测点的角度为爆破方向,按顺时针旋转确定角度,大小以弧度计。如图 2 所示,爆破方向 β 的取值范围为 $0 \leq \beta \leq 6.28$ 。

关于地形地质条件的量化较难实现,尝试性地根

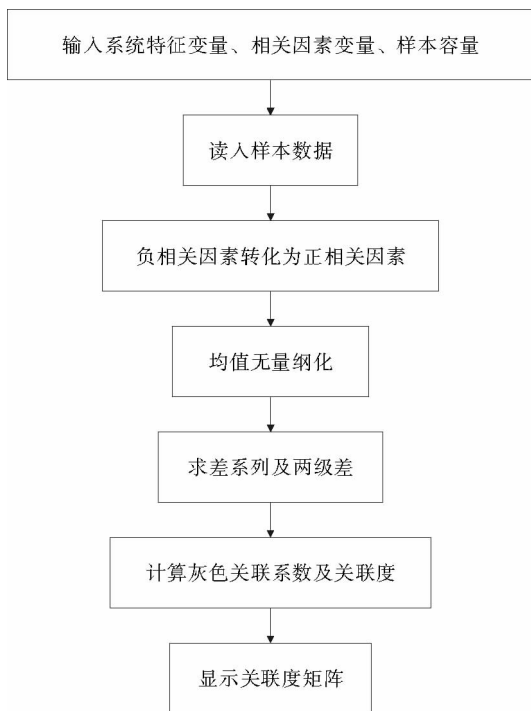


图 1 基于 GRA 的流程图

Fig. 1 Flow chart based on GRA

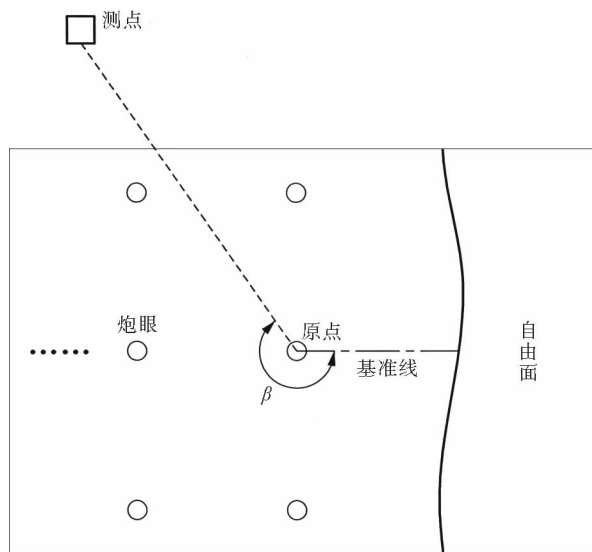


图 2 测点布置示意图

Fig. 2 The sketch map of monitoring points layout

据地质体的破碎程度及是否存在空腔考虑。将地质条件作为作用于爆破地震波传播影响因素变量的文献并不多见,对地质条件采用量化指标,并入相关因素变量中,来取得较为吻合工程的计算结论。根据地质条件得到的具体指标 0.2~1.0 分五个指标,幅度差为 0.2。例如在开挖断面下台阶中,上台阶已超前开挖,地形地质条件相当于发生了改变,量化为 0.4。若采用 CRD 法施工时,CRD 法上层开挖完成后,下层开挖时地形地质质量化为 0.6。表 1 是青岛市地铁两个工程背景隧道爆破时随机抽取的部分实测数据样本。

表 1 爆破震动实测数据样本

Tab.1 Measured data samples of blasting vibration

序号	相关因素变量 X_j									系统特征变量 Y_i	
	单段最大药量/kg	总药量/kg	雷管段数/段	最小间隔时间/ms	孔网参数/(个/m ²)	自由面数目/个	起爆方向/rad	爆破持续时间/s	地形地质条件	峰值振动速度/(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz
1	0.150	6.90	19	25	3.32	2	0	7.52	0.4	0.610	60.1
2	0.800	37.70	19	25	3.14	1	0	5.23	0.6	1.185	18.1
3	0.075	6.60	12	25	4.34	1	4.71	0.54	1.0	0.643	84.2
4	0.900	25.20	18	50	3.73	1	0.50	2.92	0.6	0.501	25.3
5	0.100	15.60	19	25	6.68	1	4.50	5.30	0.8	0.745	54.8
6	0.600	27.20	19	25	5.31	1	4.20	2.40	1.0	0.986	35.2
7	1.800	22.30	17	25	7.28	1	4.20	3.40	1.0	1.850	46.3
8	0.150	8.00	17	50	3.50	3	4.20	2.35	0.4	0.200	166.7
9	0.100	11.00	19	25	9.62	2	4.20	6.80	1.0	0.290	199.9
10	0.075	2.55	17	40	12.60	2	5.76	3.97	1.0	0.027	51.5

3.2 关联度的统计运算

根据表 1 青岛市两工程中的实测数据样本,在前述分析编写的 MATLAB 程序编辑器中运算。无量纲转换采用均值法,选取 0.5 的分辨率系数代入。由于峰值振动速度与最小间隔时间和自由面数呈负相关,而主振频率与总药量呈负相关^[17-18],在进行灰色关联度计算前,应先采用轴对称方法将负相关因素转化为正相关因素。得到隧道爆破震动影响因素灰色关联度计算结果如表 2 所示。

3.3 计算结果分析

由表 2 的计算结果,可得到各相关影响因素重要度顺序图(图 3)。由表 2 和图 3 的结果对相关因素进行灰色关联度排序和优势分析,可得到如下结论:

1)9 个可控影响因素对峰值振动速度的影响主次顺序为:单段最大药量值、爆破自由面的数量、雷管段别间隔时间最小值、总药量、地形地质条件、雷管段数、孔网参数、爆破持续时间、起爆方向。

2)9 个可控影响因素对主振频率的影响程度从大到小依次为:自由面数目、总药量、段最小间隔时间、雷管段数、孔网参数、地形地质条件、爆破持续时间、起爆方向、单段最大起爆药量。

表 2 隧道爆破震动影响因素 GRA 结果

Tab.2 GRA results of factors affecting tunnel blasting vibration

系统特征因素	相关因素								
	单段最大药量	总药量	雷管段数	最小间隔时间	孔网参数	自由面数目	起爆方向	爆破持续时间	地形地质条件
峰值振动速度	0.731 2	0.724 1	0.692 1	0.729 4	0.662 8	0.729 5	0.576 0	0.628 8	0.708 7
主振频率	0.580 5	0.779 6	0.732 9	0.778 9	0.732 0	0.816 2	0.713 9	0.718 1	0.731 9
求和(Σ)	1.311 7	1.503 7	1.425 0	1.508 3	1.392 8	1.545 7	1.289 9	1.346 9	1.440 6

3) 9 个可控影响因素中没有最优因素, 准优因素为自由面数目, 其次为段最小间隔时间和总药量。因此在进行隧道爆破施工时, 若需要考虑爆破震动对周围建(构)筑物的影响, 最有效地控制爆破震动有害效应的措施是充分利用和创造尽可能多的自由面、并严格控制段最小间隔时间, 依次按图 3 中的重要度顺序采取振动控制措施。

隧道爆破施工时, 单段最大起爆药量和自由面数目对爆破峰值振速的影响最大, 自由面数目和总药量对爆破震动主频的影响最大, 若同时考虑对峰值振速和振动主频的影响, 则自由面数目和段最小间隔时差影响最大。实际施工时, 可根据现场实测数据采取相应的措施, 使爆破震动控制的手段更具有针对性。

4 结论

利用灰色关联分析(GRA)方法, 得到爆破震动强度可控影响因素的重要度排序, 主要结论为:

1) 隧道爆破施工时, 可控影响因素对峰值振动速度的影响主次顺序为: 单段最大药量值、爆破自由面的数量、雷管段别间隔时间最小值、总药量、地形地质条件、雷管段数、孔网参数、爆破持续时间、起爆方向。

2) 可控影响因素对主振频率的影响程度从大到小依次为: 自由面数目、总药量、段最小间隔时间、雷管段数、孔网参数、地形地质条件、爆破持续时间、起爆方向、单段最大起爆药量。

3) 综合考虑隧道爆破峰值振动速度和主振频率对周边建(构)筑物的有害效应时, 应优先选择的控制因素按重要度从大到小依次为: 自由面数目、段最小间隔时间、总药量、地形地质条件、雷管段数、孔网参数、爆破持续时间、单段最大起爆药量、起爆方向。

本课题仅针对特定爆破工程分析, 应针对不同条件、根据具体情况进行深入研究, 以确保得到更符合实际工程条件的爆破震动强度优势影响因素。

参考文献

[1] 孙松, 王海亮, 彭志燕. 竖井爆破控制技术[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 106-110.
SUN Song, WANG Hailiang, PENG Zhiyan. The control of flyrock in shaft blasting[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(1): 106-110.

[2] 王海亮. 工程爆破[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 179-185.

[3] 沈蔚, 徐全军, 黄文华. 用灰关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J]. 工程爆破, 2000, 6(4): 6-13.
SHEN Wei, XU Quanjun, HUANG Wenhua, et al. Determination of main influencing factors on blasting vibration parameters by Grey correlation analysis[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(4): 6-13.

[4] 谷任国, 周传波. 水下爆破震动影响因素的灰关联分析[J]. 爆破, 2001, 18(4): 15-17.
GU Renguo, ZHOU Chuanbo. The influential factors of blasting vibration underwater by Grey correlation analysis[J]. Blasting, 2001, 18(4): 15-17.

[5] 赵同彬, 马植胜, 佟养贞, 等. 优选岩巷掏槽爆破方案的灰局势方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2004, 23(4): 30-32.
ZHAO Tongbin, MA Zhisheng, TONG Yangzhen, et al. The Grey situation method of optimizing cutting blasting plan of rock roadways[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 23(4): 30-32.

[6] 黄成林, 陈建平, 罗学东, 等. 露天矿边坡爆破震动影响因素的灰关联分析[J]. 爆破, 2010, 27(2): 96-98.
HUANG Chenglin, CHEN Jianping, LUO Xuedong, et al. Grey relational analysis on influence factors of blasting vibration in open-pit slope[J]. Blasting, 2010, 27(2): 96-98.

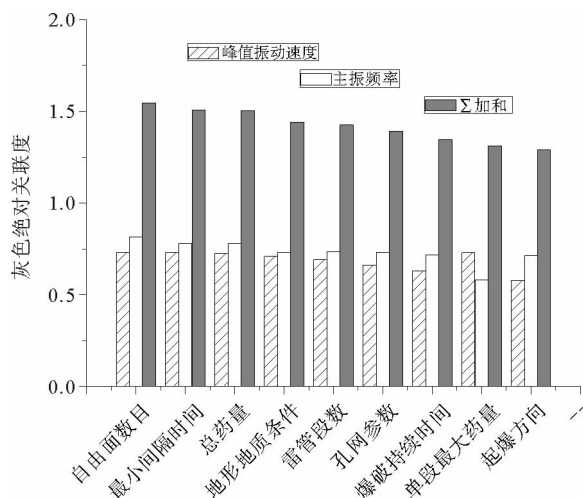


图 3 影响因素重要度顺序

Fig. 3 The sequence of importance of influence