

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.04.011

基于 AHP-Fuzzy 法的水下爆破设计方案优选*

李春军^① 吴立^② 付海涛^① 彭亚雄^② 李红勇^① 舒利^①

①长江重庆航道工程局(重庆,400011)

②中国地质大学(武汉)(湖北武汉,430074)

[摘 要] 针对水下爆破设计参数的多样性及影响因素的复杂性,结合层次分析法(AHP)和模糊数学(Fuzzy)综合评价方法,建立水下爆破设计方案优选模型。权重计算可以反映各个准则及指标对目标的影响程度,为克服权重赋值过程的主观性,该模型采用判断矩阵对权值进行分配。将该模型运用于嘉陵江航道整治三期工程的爆破设计优选,经计算方案1[#]为最优方案。采用方案1[#]进行爆破施工,爆区临近桥梁的振速得到很好的控制,岩碴块度达到要求,清碴效果良好。

[关键词] 水下爆破;设计优选;层次分析法;模糊数学

[分类号] TD235

引言

随着航运的不断发展,为了疏通航道和满足航运要求,水下炸礁工程呈现深水、大体积的趋势。如何对水下爆破设计进行优选成为学者最为关心的问题。许多学者^[1-2]研究了复杂环境水下控制爆破设计方案。李泉^[3]对比分析了几种水下爆破单耗药量计算公式的适用性,提出了修正瑞典法的单耗药量设计公式。郭强^[4]对水下钻孔爆破孔网参数进行了优化设计,提出了结合爆破经验与数值模拟方法的爆破方案设计。这些研究都对爆破设计优选提供了依据,但是由于水下爆破受到多方面因素影响,上述仅考虑单因素的优选方法存在明显不足。

在进行嘉陵江航道整治三期工程中,依据相关爆破规范^[5-6]及现场爆破经验,共提出了3套爆破设计方案。本文依据层次分析法(AHP)和模糊评价模型(Fuzzy),建立多参数的水下爆破设计优选模型,并获得最优方案,施工现场爆破效果良好。

1 AHP 法确定指标权重

1.1 水下爆破设计参数

在优选爆破设计方案时,应该综合多方面的因素,主要包括炮孔设计参数 A_1 、炮孔布设方式 A_2 、爆破控制方式 A_3 、安全爆破因素 A_4 和水介质影响 A_5 等。根据AHP法的层次原则,并结合水下爆破的特点,建立了水下爆破设计参数分层结构^[5-9],如表1所示。

表1 水下爆破设计参数分层表

Tab.1 Layered table of parameters in underwater blasting

第一层	第二层	第二层对第一层的影响
炮孔设计参数 A_1	单段最大药量 A_{11} ;	$A_1 = f_1(A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14})$
	总药量 A_{12} ;	
炮孔布设方式 A_2	堵塞长度 A_{13} ;	$A_2 = f_2(A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{25})$
	延时设置 A_{14}	
	孔排距 A_{21} ;	
	孔数 A_{22} ;	
	孔径 A_{23} ;	
爆破控制方式 A_3	最大孔深 A_{24} ;	$A_3 = f_3(A_{31}, A_{32}, A_{33})$
	最小抵抗线 A_{25}	
	装药方式 A_{31} ;	
安全爆破因素 A_4	雷管用量 A_{32} ;	$A_4 = f_4(A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{44})$
	覆盖方式 A_{33}	
	最大振速 A_{41} ;	
	爆破涌浪 A_{42} ;	
水介质影响 A_5	冲击波振幅 A_{43} ;	$A_5 = f_5(A_{51}, A_{52})$
	冲击波频率 A_{44}	
	水深 A_{51} ;	
	流速 A_{52}	

1.2 建立递阶层次结构

根据表1的水下爆破影响因素,建立水下爆破设计优选的递阶层次模型,如图1所示。

* 收稿日期:2015-03-06

基金项目:湖北省科技厅自然科学基金重点项目(2013CFA110);中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2014065)

作者简介:李春军(1972~),男,硕士,高级工程师,主要从事水下爆破施工及技术研究。E-mail:455046492@qq.com

表 6 $A_3 \sim A_{3n}$ 判断矩阵及一致性检验

Tab. 6 $A_3 \sim A_{3n}$ judgment matrix and consistency test

A_3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	$W_{A_{3n}} (n=1 \sim 3)$
A_{31}	1	3	1	0.428 6
A_{32}	1/3	1	1/3	0.142 9
A_{33}	1	3	1	0.428 6
$\lambda = 3; I_C = 0; I_R = 0.58; R_C = 0 < 0.1$				

表 7 $A_4 \sim A_{4n}$ 判断矩阵及一致性检验

Tab. 7 $A_4 \sim A_{4n}$ judgment matrix and consistency test

A_4	A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	$W_{A_{4n}} (n=1 \sim 4)$
A_{41}	1	4	1	3	0.358 9
A_{42}	1/4	1	1/6	1/2	0.073 3
A_{43}	2	6	1	5	0.451 3
A_{44}	1/3	2	1/5	1	0.116 5
$\lambda = 4; I_C = 0.018; I_R = 0.90; R_C = 0.020 0 < 0.1$					

表 8 $A_5 \sim A_{5n}$ 判断矩阵及一致性检验

Tab. 8 $A_5 \sim A_{5n}$ judgment matrix and consistency test

A_5	A_{51}	A_{52}	$W_{A_{5n}} (n=1 \sim 2)$
A_{51}	1	3	0.750 0
A_{52}	1/3	1	0.250 0
$\lambda = 2; I_C = 0; I_R = 0; R_C = 0 < 0.1$			

1.5 计算各层单元的组合权重

在计算出单一准则相对权重后,为了得到每一层次单元相对于总目标的影响,应对上述计算结果进行加权综合,获得指标因素总权重并进行总的一致性检验。这一步骤是由上至下进行的^[13]。

权重值反映了该因素对于爆破方案的影响程度。表9为层次总排序以及一致性检验结果。由表9可知,指标因素总权重为 $W = (0.234 5, 0.095 7, 0.035 3, 0.035 3, 0.047 2, 0.020 6, 0.009 3, 0.009 3, 0.029 4, 0.026 8, 0.008 9, 0.026 8, 0.126 9, 0.025 9, 0.159 5, 0.041 2, 0.050 5, 0.016 8)$ 。 A_{11} 、 A_{43} 、 A_{41} 对爆破方案影响较大,设计时需注意控制。

2 AHP-Fuzzy 评判模型

2.1 Fuzzy 综合评价法

Fuzzy 综合评价是以定量的方式构造同级子集模糊指标,并通过模糊交换原理实现指标的综合性处理。

定量指标可分为收益型与消耗型。收益型的权值越大越好;而消耗性型的权值则越小越好。为消除量纲差异,需对两类指标进行量纲为 1 的处理^[14]。计算公式为:

对于收益性指标,

$$r_{ij} = \frac{A_{ij} - \min_j(A_{ij})}{\max_j(A_{ij}) - \min_j(A_{ij})}; \tag{2}$$

表 9 层次总排序及一致性检验

Tab. 9 Total level sort and consistency test

	A_1 $W_{A_1} = 0.400 9$	A_2 $W_{A_2} = 0.115 7$	A_3 $W_{A_3} = 0.062 6$	A_4 $W_{A_4} = 0.353 5$	A_5 $W_{A_5} = 0.067 3$	综合权重 W_i	总排序一致性检验
A_{11}	0.585 0					0.234 5	
A_{12}	0.238 8					0.095 7	
A_{13}	0.088 1					0.035 3	
A_{14}	0.088 1					0.035 3	
A_{21}		0.408 1				0.047 2	
A_{22}		0.177 7				0.020 6	
A_{23}		0.080 0				0.009 3	
A_{24}		0.080 0				0.009 3	
A_{25}		0.254 2				0.029 4	
A_{31}			0.428 6			0.026 8	
A_{32}			0.142 9			0.008 9	
A_{33}			0.428 6			0.026 8	
A_{41}				0.358 9		0.126 9	
A_{42}				0.073 3		0.025 9	
A_{43}				0.451 3		0.159 5	
A_{44}				0.116 5		0.041 2	
A_{51}					0.750 0	0.050 5	
A_{52}					0.250 0	0.016 8	

$$I_C = \sum_{k=1}^5 W_{A_K} \cdot I_{C_K} = 0.006 8;$$
$$I_R = \sum_{k=1}^5 W_{A_K} \cdot I_{R_K} = 0.630 7;$$
$$R_C = \frac{I_C}{I_R} = 0.010 8 < 0.1$$

对于消耗性指标,

$$r_{ij} = \frac{\max_j(A_{ij}) - A_{ij}}{\max_j(A_{ij}) - \min_j(A_{ij})}。 \tag{3}$$

对那些无法定量描述的指标,需要采用二元对比排序法确定其隶属函数。

通过邀请多位爆破专家及工程师分别对爆破设计方案的定性指标进行了打分。最终得到隶属度矩阵为:

$$R = \{R_1, R_2, \cdots, R_n\} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{18,1} & r_{18,2} & \cdots & r_{18,n} \end{bmatrix}。 \tag{4}$$

2.2 AHP-Fuzzy 优选模型

运用 AHP 分析方法确定了指标因素总权重对于爆破方案的影响程度为 $W = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_{18}) = (0.234\ 5, 0.095\ 7, 0.035\ 3, 0.035\ 3, 0.047\ 2, 0.020\ 6, 0.009\ 3, 0.009\ 3, 0.029\ 4, 0.026\ 8, 0.008\ 9, 0.026\ 8, 0.126\ 9, 0.025\ 9, 0.159\ 5, 0.041\ 2, 0.050\ 5, 0.016\ 8)$ 。

结合 Fuzzy 综合评判体系,将 W 与 R 进行合成,建立 AHP-Fuzzy 评判向量 B 。

$$B = W \times R = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_{18}) \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{18,1} & r_{18,2} & \cdots & r_{18,n} \end{bmatrix}。 \tag{5}$$

3 工程应用

3.1 工程概况

嘉陵江航道整治三期工程需进行水下炸礁施工,炸礁区域位于重庆市嘉陵江中渡口至土湾,石门大桥之下,距重庆河口 12 km。

切除石门大桥下右侧部分的石梁(约 2/3),将航道加宽至 60 m,达到提高航道等级的目地。炸礁区域长度为 207 m,最大宽度为 25 m,炸礁工程量为 28 000 m³。

3.2 爆破设计方案优选

表 10 中共有 3 套爆破设计方案,通过对 3 套方案进行对比试验,监测临近桥墩的爆破振速及爆破涌浪情况。

通过 10 位爆破专家及工程师对爆破设计方案打分,按照式(4)获得了 3 套方案的隶属度矩阵,如式(6)所示。

根据 AHP-Fuzzy 法的最大隶属度原则,以各隶

表 10 爆破设计方案
Tab. 10 Design project for blasting

项目	方案 1 [#]	方案 2 [#]	方案 3 [#]
单段最大药量/kg	27.5	27.0	28.5
总药量/kg	357.0	618.0	280.5
堵塞长度/m	2.5	2.0~2.5	2.0~2.5
延时设置/ms	50	25	50
孔排距/(m×m)	2.1×1.8	2.3×1.8	2.1×1.8
孔数/个	21	28	20
孔径/mm	90	100	90
最大孔深/m	8.7	8.6	8.9
最小抵抗线/m	2.5	2.5	2.0
装药方式	不耦合 间隔	不耦合 连续	不耦合 间隔
雷管使用发数	109	112	100
覆盖方式	柔性	刚性	刚性
最大振速/(cm·s ⁻¹)	0.222	0.254	0.490
爆破涌浪	无影响	无影响	无影响
冲击波振幅/MPa	0.655	0.790	0.721
冲击波频率/Hz	73.9	88.2	101.3
水深/m	18	20	18
流速/(m·s ⁻¹)	0.5	0.5	0.5

$$R = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.60 & 0.30 \\ 0.48 & 0.40 & 0.51 \\ 0.80 & 0.80 & 0.80 \\ 0.80 & 0.50 & 0.80 \\ 0.90 & 0.80 & 0.90 \\ 0.80 & 0.70 & 0.80 \\ 0.90 & 1.00 & 0.90 \\ 0.80 & 0.80 & 0.80 \\ 0.90 & 0.80 & 0.90 \\ 1.00 & 0.70 & 1.00 \\ 0.37 & 0.27 & 0.67 \\ 1.00 & 0.70 & 0.70 \\ 0.78 & 0.75 & 0.51 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.35 & 0.21 & 0.28 \\ 0.80 & 0.80 & 0.70 \\ 0.60 & 0.50 & 0.60 \\ 0.70 & 0.70 & 0.70 \end{bmatrix}。 \tag{6}$$

属度最大的方案为最优。

根据 AHP-Fuzzy 优选模型,按照式(5)计算评判向量 B 可得:

$$B = W \times R = [0.633\ 5\ 0.581\ 7\ 0.538\ 7]。$$

因此,得到各个方案的优选排序为:方案 1[#] > 方案 2[#] > 方案 3[#]。故认为设计方案 1[#]为最佳的爆破设计方案。

4 水下爆破效果

为验证 AHP-Fuzzy 法所选方案的爆破效果,主要分析爆破时爆区临近桥梁的振速和爆破后岩碴块度与清碴情况。

4.1 桥梁振速监测

通过在爆破区域临近桥墩布设 TC-4850 型和 M20 型爆破振动测试仪(图 2),监测桥梁振动情况。监测结果列于表 11。



图 2 爆破测振仪布设
Fig.2 Design of blasting vibration

表 11 振速监测数据

Tab.11 Monitoring data of vibrating velocity
cm · s⁻¹

监测编号	X 方向	Y 方向	Z 方向
4-19-1	0.136	0.128	0.091
4-19-2	0.162	0.138	0.130
4-19-3	0.072	0.078	0.093
4-19-4	0.119	0.111	0.088

由爆破振速监测可知,临近桥梁爆破振动速度最大值仅 0.162 cm/s,远小于规范控制值 1 cm/s^[15]。爆破安全控制效果极佳。

4.2 岩碴块度与清碴

水下爆破完成后,计划采用 4 m³ 铲斗挖泥船进行清碴施工,将水下破碎礁石挖起,以达到设计标高,从而满足设计要求。爆破后,礁石直径 D95 小于 700 mm,松散系数在 1.10~1.20 间,爆破粉碎效果较好,达到了该挖泥船清碴要求。清碴施工效果如图 3 所示。



图 3 爆后岩碴块度及清碴
Fig.3 Rock clinker degrees and slag removal after blasting

5 结论

1)通过 AHP 建立水下爆破设计参数的层级结构,结合 Fuzzy 综合评价方法,获得了水下爆破设计优选模型。通过计算各指标因素的总权重,可知在进行爆破设计方案优选中单段最大药量、最大振速以及冲击波振幅的权重最大,最需进行控制。

2)在嘉陵江航道整治三期工程中,结合爆破试验,运用 AHP-Fuzzy 方法对 3 套爆破方案进行优选。计算各方案的隶属度,确定方案 1[#]为最优方案。爆破后,经监测可知爆区临近桥梁的振速得到很好控制,爆破后岩碴块度达到要求,清碴效果良好。

参 考 文 献

[1] 吴金仓,孙健,刘佳政,等. 复杂海况条件下水下深孔控制炸礁技术[J]. 工程爆破, 2006, 12(1):66-70.
Wu Jincang, Sun Jian, Liu Jiazheng, et al. Technology of underwater deep-hole controlled blasting of marl reef in complicated surroundings [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(1):66-70.

[2] 汪竹平,张道振,徐棣杨,等. 复杂环境内河航道疏浚水下控制爆破[J]. 工程爆破, 2013, 19(6):50-52, 56.
Wang Zhuping, Zhang Daozhen, Xu Bingyang, et al. Underwater controlled blasting of dredging inland waterway in complicated surrounding[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(6): 50-52,56.

[3] 李泉. 几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式的分析与比较[J]. 爆破, 2012, 29(1):94-97.
Li Quan. Analysis and comparison of several calculation formulas of specific charge underwater drilling blasting [J]. Blasting, 2012, 29(1):94-97.

[4] 郭强. 水下钻孔爆破孔网参数优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Guo Qiang. Parameters' optimization analysis in underwater blasting[D]. Wuhan : Wuhan University of Technology, 2005.

[5] 长江重庆航道工程局,等. JTS 204—2008 水运工程爆破技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, et al. JTS 204—2008 Technical code of blasting for port and waterway engineering[S]. Beijing:China Communications Press,2008.

[6] GB 6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
GB 6722—2003 Safty regulations for blasting[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.

[7] 张世雄,胡建华,阳生权,等. 地下工程爆破振动监测与分析[J]. 爆破, 2001, 18(2): 49-52.
Zhang Shixiong, Hu Jianhua, Yang Shengquan, et al. Mo-

- monitoring and analysis of blasting vibration in underground engineering[J]. *Blasting*, 2001, 18(2): 49-52.
- [8] 孙锡杰, 曲伟友, 吴金仓, 等. 海上水下深孔控制爆破[J]. *爆破*, 2006, 23(3): 73-75.
Sun Xijie, Qu Weiyou, Wu Jincang, et al. Underwater deep-hole controlled blasting in sea[J]. *Blasting*, 2006, 23(3): 73-75.
- [9] 林喜荣, 黄健宁. 航道炸礁水下爆破参数的探讨与实践[J]. *水运工程*, 1999(11): 7-9, 17.
Lin Xirong, Huang Jianing. Investigation and practice of underwater blasting parameters of channel[J]. *Port & Water Engineering*, 1999(11): 7-9, 17.
- [10] Aczél J, Saaty T L. Procedures for synthesizing ratio judgements[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1983, 27(1): 93-102.
- [11] 王东升. 市政桥梁工程质量等级评价体系的构筑[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Wang Dongsheng. Construction on quality evaluation system for municipal bridge engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [12] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [13] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 66-73.
Xu Jiuping, Wu Wei. Multiple attribute decision making theory and methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 66-73.
- [14] 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: 45-48.
Huang Guan hong, Fang Gang. System engineering method and application[M]. Guangzhou: Ji'nan University Press, 2005: 45-48.
- [15] GB 50201—2012 土方与爆破工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50201—2012 Code for construction and acceptance of earthwork and blasting engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

Design Optimization of Underwater Blasting Based on AHP-Fuzzy Method

LI Chunjun^①, WU Li^②, FU Haitao^①, PENG Yaxiong^②, LI Hongyong^①, SHU Li^①

① Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau (Chongqing, 400011)

② China University of Geosciences, Wuhan (Hubei Wuhan, 430074)

[ABSTRACT] Because of the diversity of design parameters in underwater blasting and the complexity of influencing factors, the method of analytic hierarchy process (AHP) and Fuzzy comprehensive evaluation were combined to optimize the design model of underwater blasting. Weighting can reflect the influence of various criteria and indicators for the target. In order to overcome the subjectivity of weight assignment process, the judgment matrix was used in the model to make weight distribution. The model was applied to optimize the blasting designs in the third phase of Jialing River waterway regulation engineering, and calculated scheme 1[#] was selected as the optimal solution. In blasting construction undertaken with this scheme, the vibration velocity near the critical zone of the bridge was well controlled. Rock has met the requirement of the degree of clinker and slag removal effect is good.

[KEY WORDS] underwater blasting; design optimization; analytic hierarchy process; Fuzzy mathematics

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部