

· 施 工 ·



水下爆破振动传播规律及其控制技术*

张利洪

(长江重庆航道工程局, 重庆 400010)

摘要: 为了分析、预测及控制西江龙圩水道整治工程水下爆破振动对临近建筑的影响, 安装爆破振动检测仪对水下爆破所产生的质点振动峰值速度进行检测。对比采用牛顿迭代法进行回归分析所得到的2种不同爆破振动速度预测模型的精度, 得出该水下爆破工程的爆破振动传播规律, 并对比不同技术方案的减振效果。结果显示: 在水下爆破工程中, 采用不考虑高程的传统爆破振动预测数学模型适用性较弱, 考虑高程影响因子的新预测模型适用性较强, 采用牛顿迭代法进行非线性回归所得到的数学模型能较为准确地反映该工程的爆破振动传播规律, 应用逐孔爆破技术可极大地控制爆破振动有害效应, 保护周围建筑物。

关键词: 爆破振动; 传播规律; 回归分析; 控制技术; 高程效应

中图分类号: O 329

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0186-06

Propagation law of underwater blasting vibration and its control technology

ZHANG Li-hong

(Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China)

Abstract: To analyze, predict and control the influence of underwater blasting vibration on adjacent buildings in Xijiang Longwei waterway regulation project, we installed the blasting vibration detector to detect the peak velocity of particle vibration produced by underwater blasting. Comparing the detection data with those obtained by two different blasting vibration velocity prediction models by Newton iteration regression analysis, we obtain the blasting vibration propagation law of the underwater blasting engineering, and compare the vibration reduction effects of different technical schemes. The results show that in the underwater blasting engineering, the applicability of the traditional blasting vibration prediction mathematical model without considering elevation is low, and the applicability of the new prediction model considering elevation influence factors is high. And the mathematical model obtained by nonlinear regression using Newton iterative method can accurately reflect the blasting vibration propagation law of the project. The application of hole by hole blasting technology can greatly control the harmful effect of blasting vibration and protect the surrounding buildings.

Keywords: blasting vibration; law of propagation; regression analysis; control technology; elevation effect

在水运工程建设过程中, 爆破技术会给周边环境带来负面影响。水下爆破施工产生的有害效应主要包括爆破振动、水下爆破冲击波、爆破涌浪等。水下爆破冲击波及爆破涌浪对周围的影响可通过防护措施进行较好的控制, 但预测及控制

水下爆破所产生的爆破振动有害效应是水下爆破工程领域亟需重点研究解决的问题。工程技术人员及研究学者进行了大量的理论研究及现场试验, 取得较为丰富的理论及实践结果。董承全等^[1]通过现场监测得到爆破振动数据, 分析爆破

收稿日期: 2022-01-06

***基金项目:** 广西大学工程爆破研究所资助项目(202112)

作者简介: 张利洪(1972—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道及水利水电工程研究。

振动参量随着比例距离的衰减规律，通过线性回归得到相应的表征参数；石教往等^[2]通过水下爆破实测振动数据分析总结水下爆破工程引起水中建筑物振动、水击波及脉动引起振动的基本特征；刘宝宏等^[3]利用实测数据确定安全判据、合理选择回归系数、进而优化爆破设计参数等措施，消除水下爆破振动的有害效应；郭涛等^[4]采用数值模拟的方法研究不同起爆位置对爆破振动效应的影响，结果表明起爆位置在孔底时爆破所产生的振动效应最小；张建球等^[5]通过现场监测数据，建立了考虑振速-频率-爆破持续时间三重影响因素改进萨道夫斯基（简称萨氏）预测模型，得到的拟合公式更为精确；张勤彬等^[6]采用线性及非线性回归分析方法，对比某工程的爆破振动监测结果，采用 1stOpt 分析软件求解出多元非线性爆破振动速度预测模型。

由于水下爆破的特殊性，一般情况下水下爆破区域距离被保护的建筑物间存在较为明显的高程差。因此，在前人研究的基础上，笔者利用现有的爆破振动检测数据与考虑高程及不考虑高程的传统预测经验公式，采用牛顿迭代法进行非线性及线性回归对比分析，拟合得到能较好地反映水下爆破工程爆破振动传播衰减规律的数学模型，以进一步预测及控制未施工区域的爆破振动效应。

1 质点振动峰值速度预测模型

在场地较为平整的陆上爆破工程中，爆破振动峰值速度常常与最大同段药量、爆源距及场地衰减系数密切相关。国内应用十分普遍的爆破振动峰值速度预测的数学模型为苏联爆破学者萨道夫斯基研究的萨氏公式。当前许多研究成果均为基于萨氏公式采用多组实测得到的爆破振动峰值速度、测量所得的爆源距及最大单段药量进行线性回归得到相应待定参数，进而得出爆破振动峰值速度 v 预测数学模型。萨氏公式如下：

$$v=K\left(\sqrt[3]{Q}/R\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中： K 为与爆破区域地质条件密切相关的场地影响系数； Q 为最大单段起爆药量（kg）； R 为爆

区距测点间的距离（m）； α 为爆破振动峰值速度的折减系数，与岩石性质密切相关。

但多年的工程经验表明，水下爆破工程中采用传统的萨氏公式进行回归分析时，建立的预测模型适用性不强，不能较好地反映水下爆破振动的传播衰减规律，无法准确地调整爆破技术参数。水下爆破区域通常在水下数米至数十米不等，爆破区域与爆破振动峰值速度检测点间存在较大的高程差。爆破振动峰值速度主要与最大同段药量 Q 、爆源距 R 、高程差 H 密切相关。为了研究爆破振动峰值速度与各影响因素之间的相互关系，假设爆破振动峰值速度 v 与 Q 、 R 、 H 之间的关系可由函数 F 表示，则 v 可以表示为：

$$v=F(Q,R,H,\rho,c,t) \tag{2}$$

根据萨氏公式（1），综合考虑爆破时 Q 、 R 、 H 时的 v 可表达为：

$$v=F\left(\sqrt[3]{Q}/R,\sqrt[3]{Q}/H\right) \tag{3}$$

v 与 Q 、 R 及 H 之间的关系可用数学模型表征为：

$$v=K_1\cdot\left(\sqrt[3]{Q}/R\right)^{\alpha}\cdot K_2\left(\sqrt[3]{Q}/H\right)^{\beta} \tag{4}$$

式中： K_1 为场地影响系数， K_2 为高程差影响因素， α 为场地衰减系数， β 为高程差衰减系数。

2 工程概况

西江航运干线贵港—梧州 3 000 吨级航道工程是实现西江黄金水道扩能的关键性工程，其建成后将全面对接粤港澳大湾区，加快珠江—西江经济带的发展，对于两广、粤港澳大湾区及内地航运具有重要的战略意义。龙圩水道水下爆破工程位于梧州主城区，爆破区域水下地形、地质条件较为复杂，主要为中风化砂岩及灰岩。为了预测及控制水下爆破所引起的爆破振动效应，在该水下爆破工程中采用了簇联起爆及逐孔起爆 2 种爆破技术^[7]。

爆破区域临近城镇居民建筑物，南北两岸已建防洪堤，爆区周围环境复杂。北岸河堤堤顶一侧为 009 乡道，沿乡道为城镇居民房，南岸堤顶一侧为沿江路，密布着城镇居民房。需要保护的

建(构)筑物较多,密集建筑群主要集中在东侧、南侧及西北侧,爆破区域中心距离较近的建筑物只有 200 m。该施工区域主要由硬岩质中风化砂岩及中风化灰岩组成,岩体较完整,不良地质不发育、局部有溶蚀现象,两岸基本无崩塌、滑坡等

不良地质现象。爆破区域与爆破振动检测点之间的高差约为 22 m,根据现场实地勘查,在需要保护的典型建筑物地基及楼面上选取爆破振动检测点,爆区周围环境及爆破振动检测点布置情况如图 1 所示。



图 1 爆区周围环境及检测点布置

3 爆破技术参数

为了保障该水下爆破工程顺利进行,保护航道南北两岸的建(构)筑物,该水下爆破工程采用宽孔距、小抵抗线长度的爆破参数进行爆破施工,以确保孔底开挖面上不残留未被炸出的礁石,同时炮孔上部不产生过多大块,方便挖装。考虑为了削弱及控制水下爆破作业所产生的爆破振动、水下冲击波及涌浪等有害效应,优化爆破设计参数并调整起爆网路。

该水下爆破工程的设计爆破炸礁高度为 3~5 m,采用竄翔号钻爆船进行垂直式凿岩钻孔。因前期爆破振动效应较为明显,所以对爆破参数进行优化。钻孔直径从 115 mm 优化为 90 mm,水下炮孔深度 L 为 5 m,炮孔设计的超深 h 为 2 m,抵抗线

长度 W 取 1.5 m,水下炮孔的填塞长度为 0.3~0.7 m 不等,炮孔间距 a 由 3.5 m 调整为 3.0 m,钻孔排距 b 由 3.5 m 调整为 1.5 m,炮孔布置形式由矩形调整为梅花形布孔。药卷直径由 90 mm 调整为 70 mm 的抗水压乳化炸药,起爆网路由簇联式调整为逐孔起爆式。采用簇联起爆网路时,每 3 孔为一簇,最大同段药量为 51 kg;采用逐孔起爆技术时,各炮孔间延期时间为 50 ms,最大单段药量为 17~21 kg,采用连续装药结构。为了保护周边建(构)筑物,保证爆破施工安全,每次起爆炮孔数不大于 21 个,爆破施工前对危险水域进行封闭,待爆破警戒信号解除后方可恢复水域航行。优化前、后钻爆参数见表 1。

表 1 优化前、后钻爆参数

阶段	孔径/mm	孔深/m	孔距/m	排距/m	药卷直径/mm	布孔形式	起爆网路	最大同段药量/kg
优化前	115	2.5~5.0	3.5	3.5	90	矩形	簇联起爆	51
优化后	90	2.5~5.0	3.0	1.5	70	梅花形	逐孔起爆	17~21

4 监测结果与分析

4.1 测点布置

为了对水下爆破振动效应进行检测，在周围的建(构)筑物上安装 TC-6850N 无线网络振动检测仪，用膨胀螺丝将传感器与地面紧固，以精确检测爆破所引起的建(构)筑物质点振动峰值速度。

4.2 监测结果

采用 TC-6850N 远程无线爆破振动检测装置实时记录、存储及上传各点位的爆破振动峰值速度、频率、爆破振动波形图(表 2)。

表 2 各测点的峰值振动速度

最大段药量 <i>Q</i> /kg	检测点	高差 <i>H</i> /m	爆源距 <i>R</i> /m	实测振速/ (cm·s ⁻¹)
51	1	22. 70	265. 00	0. 31
	2	75. 00	258. 80	0. 70
	3	24. 00	244. 00	0. 35
	4	22. 00	256. 00	0. 33
21	1	22. 00	272. 00	0. 24
	2	74. 50	383. 00	0. 32
	3	23. 60	405. 00	0. 10
	4	22. 00	323. 00	0. 19
19	1	22. 80	260. 00	0. 28
	2	75. 70	378. 00	0. 30
	3	24. 70	390. 00	0. 15
	4	23. 00	307. 00	0. 13
17	1	23. 20	262. 00	0. 26
	2	75. 80	384. 00	0. 27
	3	24. 90	388. 00	0. 11
	4	23. 20	306. 00	0. 18

爆破振动质点峰值速度常常可以表征爆破振动效应的大小。根据表 2 中振动数据，对比分析不同单段药量条件下的爆破振动峰值速度值，得出不同单段药量与爆破振动峰值速度值间的变化关系(图 2)。

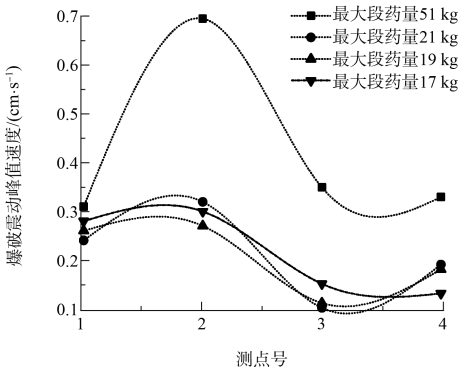


图 2 不同药量下对应的振动峰值速度

从图 2 可知，优化爆破设计参数后，爆破振动效应得到明显控制，爆破振动峰值速度得以减小，有利于保护水下爆破区域周边建(构)筑物。

4.3 爆破振动回归分析

回归分析是通过已知的相应变量参数，利用拟合等相关方法，依据特定的数学模型建立因变量与自变量间函数关系的一种分析方法。根据因变量与自变量之间的函数表达式的不同，可以分为线性回归及非线性回归 2 种分析类型。一般情况下，线性回归分析常用于处理因变量与自变量之间线性相关性较强的一类数学问题；而非线性回归常用于处理因变量与自变量间关系较为复杂、用常规线性回归不能建立相关性较好的回归方程的一类问题。文章对比分析爆破振动峰值速度线性回归及非线性回归分析的精度及其优劣^[8-10]。

4.3.1 线性回归分析

根据爆破振动检测数据，依据式(1)及式(4)建立线性回归模型，将式(1)及式(4)两端分别取对数，得到：

$$\ln v = \ln K + \alpha \cdot \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$$

(5)

$$\ln v = \ln K_1 + \ln K_2 + \alpha \cdot \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) + \beta \cdot \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)$$

(6)

式(5)中的 $\sqrt[3]{Q}/R$ 为自变量，可依据表 2 数据进行线性回归分析，将式(6)中的 $\sqrt[3]{Q}/R$ 与 $\sqrt[3]{Q}/H$ 做自变量，可依据表 2 数据进行线性回归，得到式(5)中的 α 为 1.09、 K 为 38.44；式(6)中的 α 为 1.68、 K_1 为 110、 β 为-0.71、 K_2 为 1.01；采用式(5)(6)线性回归所得结果的相关性分别为 65%、88%。

4.3.2 非线性回归分析

根据各检测点实际检测数据，依据公式(1)(4)建立非线性回归分析的数学模型，采用 originlab 进行非线性回归分析。

根据软件分析结果，采用式(5)进行非线性回归得到 α 为 1.12、 K 为 46.44。

$$v = 46.44 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.12}$$

(7)

采用式(4)进行非线性回归得到式(6)中的 α 为

1.53、 K_1 为 130.10、 β 为 -0.65、 K_2 为 0.49。

$$v = 130.10 \times 0.49 \left(\sqrt[3]{Q/R} \right)^{1.53} \times \left(\sqrt[3]{Q/R} \right)^{-0.65} \quad (8)$$

采用式(1)(2)非线性回归得到式(6)中的 α 为 1.68、 K_1 为 110、 β 为 -0.71、 K_2 为 1.01；采用式(1)(4)非线性回归所得结果相关性分别为 66%、97%(表 3)，采用式(8)进行表征爆破振动峰值速度时精度最高，能较好地反映该地区爆破振动的传播及衰减规律，可采用该数学模型对后期爆破作业产生的振动效应进行预测，不断优化改进爆破参数，更好地保护周围建(构)筑物。

表 3 非线性回归分析得到的振动峰值速度值对比

最大段药量 Q/kg	实测振速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	式(7)计算值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	式(8)计算值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
51	0.31	0.39	0.30
	0.70	0.40	0.68
	0.35	0.43	0.35
	0.33	0.40	0.31
21	0.24	0.27	0.22
	0.32	0.18	0.29
	0.10	0.17	0.12
	0.19	0.22	0.17
19	0.28	0.28	0.23
	0.30	0.18	0.29
	0.15	0.18	0.13
	0.13	0.23	0.18
17	0.26	0.26	0.23
	0.27	0.17	0.27
	0.11	0.17	0.13
	0.18	0.22	0.18

4.4 分析结果

图 3 为实测振动速度与计算值对比。从图 3 可知，在存在明显高程差的爆破区域进行爆破振动预测时，传统的不考虑高程效应的萨氏公式适用性较差，拟合精度仅为 66%；而考虑高程效应的改进预测数学模型式(8)拟合精度较高，能很好地反映爆破区域与检测点间存在高程差的爆破振动传播衰减规律。

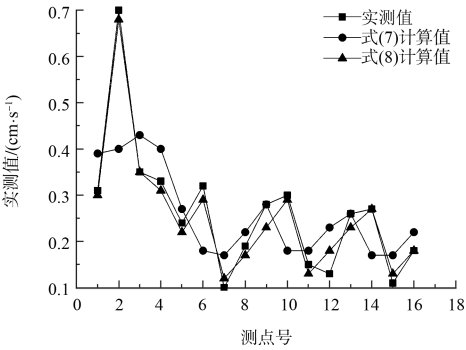


图 3 实测振动速度与计算值的对比

此外，由于 2#检测点与 1#、3#、4#检测点间存在明显的高程差，统计数据显示正高程具有爆破振动的放大效应，根据对表 2 数据的统计分析得出，平均高程每增加 10 m 时，爆破振动放大值约为 0.035 cm/s。

5 结论

1) 爆破振动具有高程放大效应，本工程在其他相关参数不变的情况下，高程每增加 10 m，爆破振动速度平均增加 0.035 cm/s。

2) 由于水下爆破的特殊性，爆破区域距爆破振动检测点间存在明显的高程差，采用传统的不考虑高程效应的萨氏公式适用性较差，拟合精度较低，采用线性及非线性拟合时其精度分别为 65%、66%，拟合精度较低；采用考虑高程效应的经验公式进行线性及非线性拟合分析时，其拟合精度显著提升为 88%及 97%，提高了改进后的爆破振动预测模型的适用性。

3) 采用非线性进行回归分析所得的爆破振动速度预测经验公式，其精度达到了 97%，能较好地表征该水下爆破振动的传播及衰减规律。

4) 在临近居民建(构)筑物的区域进行水下爆破时，采用降低最大单段起爆药量的方式进行爆破振动效应控制时效果较佳，本工程中的平均减振率达 46.66%，较好地保护了周边的建(构)筑物。

5) 优化参数后采用宽孔距、小排距的方式进行水下爆破,改善了岩石的破碎效果,使爆炸所产生的能量绝大多数用于岩体破碎做功,而用于振动传播的能量被削弱,进一步减小了爆破振动效应。

参考文献:

[1] 董承全,蔡金祥,高建光.水下爆破引起结构物振动的监测与分析[J].爆破,1987(2):47-52.

[2] 石教往,佟锦岳,张正宇.水下爆破地震效应的试验研究[J].水利水电快报,1997(18):24-28.

[3] 刘宝宏,韩玉峰,高岩,等.水下爆破震动有害效应对周边影响的防治[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008(S1):151-153.

[4] 郭涛,冯彬,李裕春,等.不同起爆方式对水下深孔爆破危害效应影响的数值模拟[J].爆破器材,2012,41(1):29-31.

[5] 张建球,廖德华,唐梦君.航道扩建工程水下炸礁爆破振动安全性判据研究[J].水运工程,2021(7):130-134,225.

[6] 张勤彬,程贵海,卢欣奇,等.考虑岩体损伤的爆破振动速度衰减多元非线性模型[J].中国安全生产科学技术,2018,14(3):95-101.

[7] 韦荣俭,刘信华.提高西江航运干线(广西段)南宁至梧州航道技术等级浅析[J].珠江水运,2005(11):27-29.

[8] 吕涛,石永强,黄诚,等.非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J].岩土力学,2007,28(9):1871-1878.

[9] 程贵海,张勤彬,唐春海,等.数码电子雷管在高边坡爆破开挖中的应用[J].化工矿物与加工,2018,47(8):52-55.

[10] 张勤彬,程贵海,徐中慧.基于回归分析的露天矿山爆破振动传播规律研究[J].矿业研究与开发,2018,38(5):37-40.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 147 页)

[19] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.

[20] 高峰.基于GIS和CSLE的区域土壤侵蚀定量评价研究[D].南宁:广西师范学院,2014.

[21] WILLIAMS J, NEARING M, NICKS A, et al. Using soil erosion models for global change studies[J]. Journal of soil and water conservation, 1996, 51(5):381-385.

[22] 怡凯,王诗阳,王雪,等.基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析:以辽宁省朝阳市为例[J].地理科学,2015,35(3):365-372.

[23] XU L F, XU X G, MENG X W. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China[J]. Catena, 2013, 100: 74-82.

[24] 向欣,罗煜,程红胜,等.基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J].农业工程学报,2014,30(18):205-212.

[25] 段学军,陈雯,朱红云,等.长江岸线资源利用功能区划方法研究:以南通市域长江岸线为例[J].长江流域资源与环境,2006,15(05):621-626.

[26] 李玲.南通五山森林公园军山片区植物规划设计应用研究[J].现代园艺,2020,43(17):152-155.

[27] 雷倩,章新平,王学界,等.基于MODIS-EVI和CI的洞庭湖流域植被指数对气象干旱的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):981-993.

[28] 查良松,邓国徽,谷家川.1992-2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J].地理学报,2015,70(11):1708-1719.

[29] 白金,赵斐.引水工程水土流失影响与水土保持措施分析[J].水利技术监督,2019(4):98-100.

[30] 高国刚,孟秀元.公路绿化中原生植物利用的筛选方法探讨:以山西省阳城市为例[J].山西交通科技,2019(2):65-68.

(本文编辑 武亚庆)