

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.013

复杂环境下预应力连续刚构跨河桥梁爆破拆除*

王威^{1,2}, 贾永胜^{1,3}, 刘昌邦¹, 袁方³, 伍岳¹, 聂森林³

(1. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056; 2. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065;
3. 江汉大学精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 预应力连续刚构桥梁是大跨径桥梁建设中广泛应用的一种结构体系,其拆除方式受到空间和周边设施的限制。结合预应力连续刚构跨河桥梁爆破拆除工程实践,对中跨桥面和翼板分别采用机械破碎方式预处理,在桥墩、中跨箱梁腹板、顶板、体外预应力钢索固定墩和桥头箱梁连接处设置爆破切口,并采取中跨箱梁→体外预应力钢索固定墩→桥头箱梁连接处、桥墩的总体起爆顺序,成功实现了桥梁逐段原地坍塌。同时,采用LS-DYNA动力学有限元软件建立三维数值模型,对总体爆破方案的合理性和桥梁倒塌过程进行数值仿真验算,结果表明:大桥倒塌全过程历时4.5 s,桥面触地速度约13.6 m/s,桥体触地冲击应力是结构解体的主导因素,体外预应力作为改善桥梁使用性能和提高结构承载力的加固技术,采用爆破的方式解除预应力有助于促进结构的充分解体。实际爆破效果表明:爆破拆除技术能够高效、安全地解决复杂环境下大跨径预应力连续刚构桥梁的拆除难题。

关键词: 预应力连续刚构桥; 爆破拆除; 预处理; 数值模拟; 振动监测

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)03-0116-10

Blasting Demolition of Prestressed Continuous Rigid-frame River-crossing Bridges in Complex Environments

WANG Wei^{1,2}, JIA Yong-sheng^{1,3}, LIU Chang-bang¹, YUAN Fang³, WU Yue¹, NIE Sen-lin³

(1. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
3. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Prestressed continuous rigid-frame bridges, a prevalent structural system in large-span bridge construction, present unique demolition challenges due to spatial constraints and adjacent infrastructure constraints during demolition. This study examined the controlled demolition of a river-crossing, prestressed, continuous, rigid-frame bridge using a blasting demolition practice. The demolition strategy incorporated mechanical crushing of mid-span deck and wing plates, complemented by strategically positioned blasting cuts at critical structural elements, including piers, mid-span box girder webs, top slabs, external prestressed steel cable anchor piers, and bridge-end box girder connections. The implementation of a sequential detonation order (mid-span box girders followed by external pres-

收稿日期 (Date of reception): 2025-02-13

网络首发日期 (Published online): 2025-03-19

作者简介: 王威 (1986-), 男, 高级工程师, 从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) 13545097785@163.com。

通讯作者: 贾永胜 (1970-), 男, 教授, 主要从事工程爆破相关研究与应用工作, (E-mail) 422103951@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52378399); 湖北省自然科学基金杰出青年项目 (2024AFA092)

About the author: WANG Wei (1986-), male, senior engineer, mainly engaged in engineering blasting research and practice work, (E-mail) 13545097785@163.com.

Corresponding author: JIA Yong-sheng (1970-), male, professor, mainly engaged in research and application of engineering blasting, (E-mail) 422103951@qq.com.

Fund Programs: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52378399); Outstanding Youth Project of Hubei Provincial Natural Science Foundation (2024AFA092)

tressed cable anchor piers, concluding with bridge-end connections and piers) resulted in controlled segmental collapse. Numerical simulation using LS-DYNA's dynamic finite element analysis validated the demolition scheme, revealing key process parameters; a total collapse duration of 4.5 seconds and a deck impact velocity of 13.6 m/s. The analysis identified impact stress as the primary mechanism for structural disintegration. A significant finding emerged regarding external prestressing technology. While originally implemented to enhance service performance and load-bearing capacity, the release of prestressing forces through controlled blasting was found to improve structural fragmentation efficiency significantly. Field implementation demonstrated the technical feasibility and safety of this approach, providing an effective solution for dismantling long-span, prestressed, continuous, rigid-frame bridges in complex environments. The study establishes a comprehensive framework for similar demolition projects, highlighting the importance of integrated mechanical and explosive techniques in modern bridge demolition engineering.

Key words: prestressed continuous rigid frame bridge; blasting demolition; pretreatment; numerical simulation; vibration monitoring

党的二十大作出建设交通强国的战略部署。近年来,高速公路改扩建工程逐渐成为一大热点,京沪、京港澳、沪渝、沪蓉等国家高速公路主线纷纷开始分段实施扩容升级。其中,大量桥梁已无法满足现代交通发展需求,面临拆除重建。公路桥梁依据其受力特点和结构形式,可分为梁式桥、拱桥、刚构桥、斜拉桥和悬索桥^[1]。近年来,国内外实施了多项不同结构类型桥梁的爆破拆除项目,主要为梁式桥、拱桥和斜拉桥等结构形式,例如,湖北省武汉市 3.5 km 沌阳高架桥爆破拆除工程(简支梁桥)、重庆旧石梁河大桥拆除爆破工程(提篮拱桥)^[2]、浙江省金华市金婺大桥爆破拆除工程(斜拉桥)^[3]。

目前,针对梁式桥、拱桥和斜拉桥的爆破拆除技术比较成熟,爆破界前辈对爆破切口、起爆网路、延期时间和安全防护措施等已展开深入研究,并取得相应成果^[4-7]。谢先启院士等针对 3.5 km 沌阳高架桥爆破拆除工程开展了相关研究,得到复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术与应用科技成果,荣获 2014 年湖北省科技进步一等奖^[8]。陈德志、罗鹏、黄小武等针对浙江省金华市金婺大桥爆破拆除工程开展研究,探索了斜拉桥爆破拆除失稳倒塌力学机理,依托工程实例,借助动力学有限元程序 LS-DYNA 模拟了斜拉桥整体模型的失稳倒塌运动过程,并重点分析了主塔、主梁、斜拉索三种基本构件的动力响应特征,其研究成果荣获 2023 年中国爆破行业协会科技进步奖特等奖^[9]。然而,关于预应力连续刚构桥爆破拆除技术及其科学问题研究尚不多见。

连续刚构桥是墩梁固结的连续梁桥,其上部主梁与下部桥墩整体结合,是大跨径桥梁建设中常用的结构体系,常用跨径在 100 ~ 300 m 之间,一般采用预应力混凝土结构,这种固结方式使结构的整体性增强,能够更好地承受上部结构传来的荷载,提高桥梁的整体稳定性^[2]。预应力连续刚构桥的拆除

方式有多种,常见的有满堂支架分小块切割拆除、倒序拆除、机械拆除和爆破拆除。满堂支架分小块切割拆除需要在桥下搭建满堂支架,将桥梁分成小块进行切割,其优点是施工过程相对较为稳定,对周边环境的影响较小,但搭建满堂支架需要大量的时间和人力物力,且对于跨河桥梁来说,可能会受到水流等因素的影响,增加施工难度。倒序拆除是按照桥梁建造的反向顺序进行拆除,这种方法可以充分利用桥梁原有的结构特点,逐步拆除各个部分,然而倒序拆除需要对桥梁的结构有深入的了解,施工过程中需要精确控制拆除顺序,否则可能会导致桥梁结构失稳。机械拆除主要是利用液压破碎锤等设备对桥梁进行拆除,其效率较高,可在较短的时间内完成拆除任务,但是需要较大的施工场地,对于周边环境复杂的跨河桥梁来说,可能会受到空间限制。爆破拆除主要在桥梁支撑部位实施钻孔爆破,使桥梁上部结构失稳塌落至地面,再做进一步破碎清渣处理,对于预应力箱梁结构,可根据破碎要求选择性爆破。对于预应力连续刚构跨河桥梁来说,爆破拆除是一种快速、高效、安全的拆除方式,可以有效地解决周边环境复杂、桥梁结构特殊等问题。

以沪渝高速公路武汉至黄石段改扩建工程柯家墩大桥爆破拆除工程为例,结合数值模拟方法,探讨复杂环境下预应力连续刚构跨河桥梁爆破拆除技术,为预应力连续刚构桥梁爆破拆除提供了新的设计施工思路。

1 工程概况

待爆大桥位于沪渝高速公路武汉至黄石段改扩建工程 K825 + 721.900 处,南北方向横跨长港,收费站匝道与 G316 国道在大桥西北侧桥头并排下穿。大桥两侧民房密集,东南侧距民房 22 m,西南侧距民房 26 m,西北侧距民房 72 m,东北侧距民房 43 m。工程环境如图 1 所示。

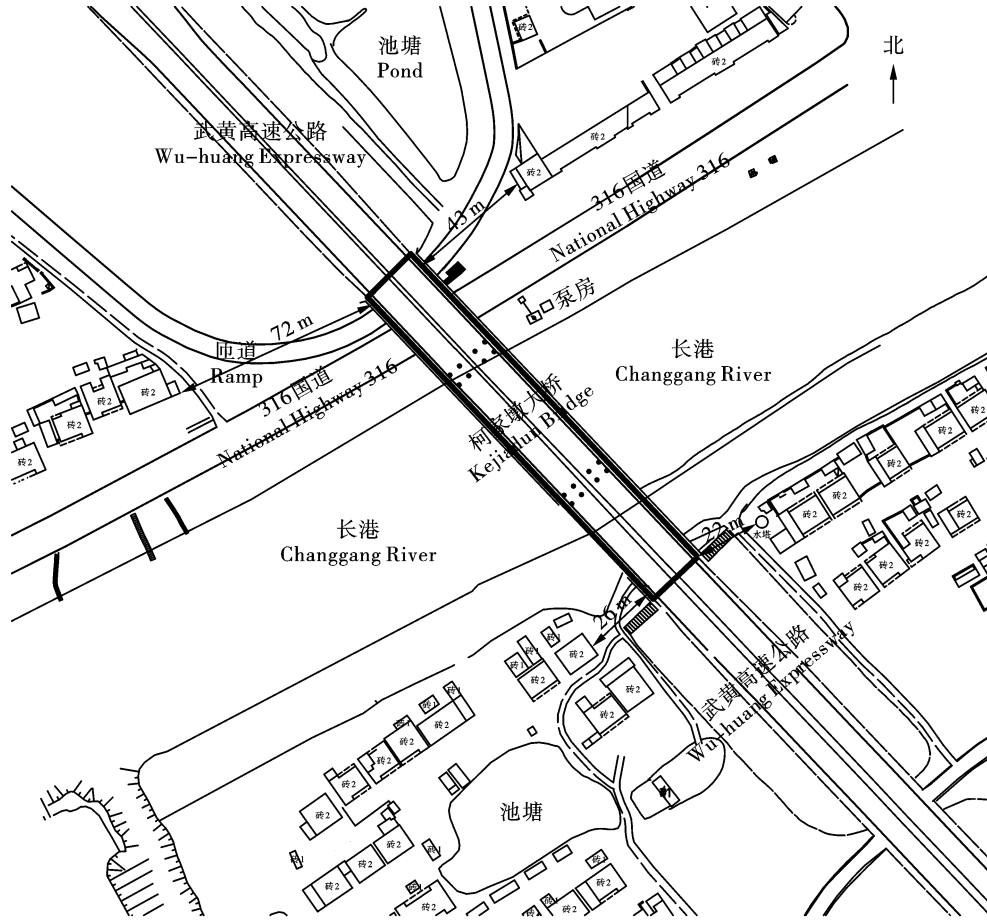


图1 工程环境图(单位:m)

Fig. 1 Engineering environment diagram(unit:m)

大桥全长 146 m,为上下行两座独立的一联三跨预应力混凝土变截面箱形连续刚构梁式桥梁,桥孔布置为 40 + 56 + 40 m,桥面全宽 24.0 m。大桥桥墩为圆形实心墩柱,直径为 1.2 m。墩柱主筋为 $\phi 20$,共计 16 根,箍筋为 $\phi 12$,混凝土等级为 C25。大桥箱梁为单室矩形横截面,箱底宽 6.0 m,箱梁顶翼缘总宽为

10.84 m,顶板厚 0.30 m,肋板厚 0.30 m,底板厚 0.18 ~ 0.80 m。中跨中心处梁高 1.60 m,墩顶处梁高 3.10 m,梁高按圆曲线变化,曲线半径 $R = 209.08$ m,两边孔在距墩中心线 27 m 处开始为边孔 13 m 支架现浇段,该段箱梁等高度为 1.60 m。大桥桥型布置图如图 2 所示, I - I 和 II - II 剖面横断面布置图如图 3 所示。

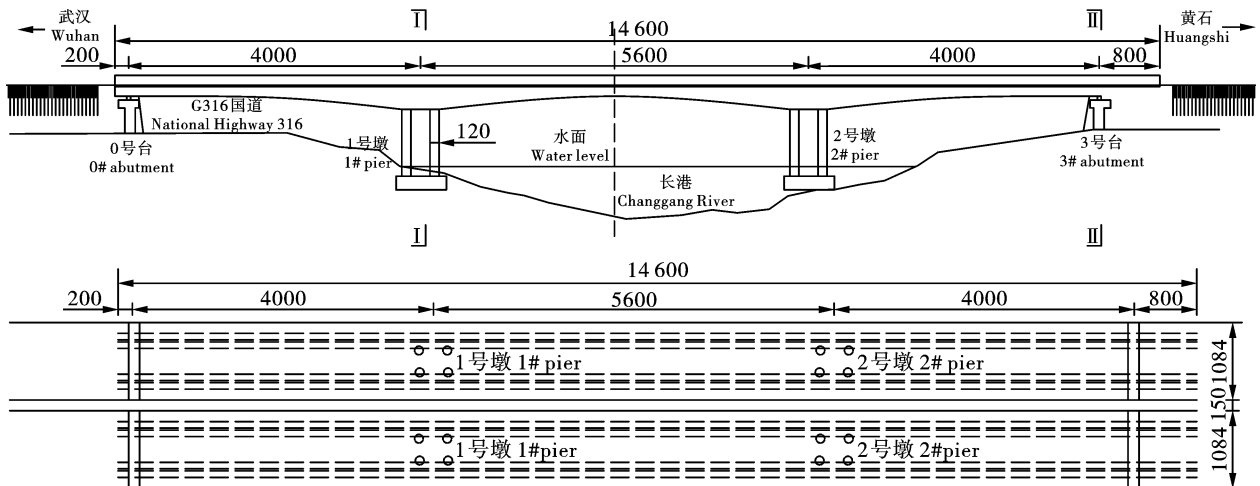


图2 大桥桥型示意图(单位:cm)

Fig. 2 Bridge type diagram(unit:cm)

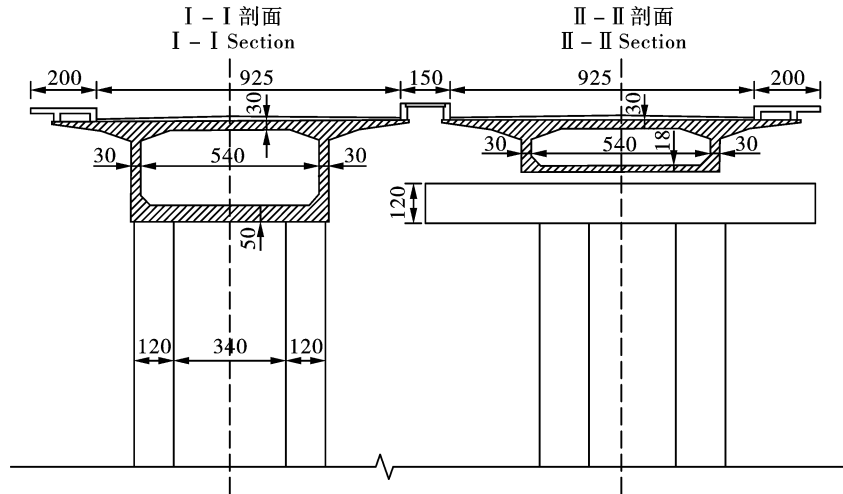


图 3 I - I 剖面 and II - II 剖面横断面布置图(单位:cm)

Fig. 3 Section I - I and Section II - II cross sectional layout(unit:cm)

大桥原设计为一级公路专用桥梁,后因道路级别提升,对大桥在原结构上进行了加固,在箱梁底板和肋板外侧进行了加固粘贴钢板(图 4),并在箱梁内部施加了体外预应力(图 5)。



图 4 粘贴钢板加固

Fig. 4 Paste steel reinforcement technique



图 5 体外预应力加固

Fig. 5 Strengthened by external prestressing

2 工程特点及难点分析

本项目在技术设计和施工组织方面具有以下特

点和难点:

(1)大桥周边分布有村庄,民房多为 80 年代建的砖房,年代久远,周边环境极其复杂,需要有效控制爆破有害效应。

(2)大桥为预应力混凝土变截面箱形连续刚构,整体强度高、刚度大,爆破破碎难度较大,需合理的选取爆破方案和爆破参数。

(3)长港为五级航道,河面宽约 70 m,中间跨水深 4.5 ~ 7.5 m,需通过合理设计并配合机械设备将爆破后的桥体打捞干净,确保河道船舶通航安全。

(4)G316 国道在大桥西北侧桥头下穿,拆除时需确保交通顺畅,施工组织难度大。

3 总体爆破方案

综合大桥的结构特点和周围环境条件,拟采用工业电子雷管延时起爆网路,一次性爆破大桥,使大桥逐段原地坍塌的总体爆破方案。

为保证中跨上部结构塌落解体充分,便于打捞,对中跨箱梁结构采取爆破和预处理相结合的方式。在桥面中间区域采用液压破碎锤将两幅桥面预处理为多个 2 m × 2.5 m 孔洞,中间间隔 1 m,预处理位置对应桥下水位较深处,并将对应位置的翼板采用机械破碎拆除。右幅(上游)共计 9 个孔洞,左幅(下游)共计 6 个孔洞。在桥面两端对应体外预应力钢索固定墩(位于箱梁中)区域,开凿 2 m × 2.5 m 孔洞,露出体外预应力钢索固定墩,便于固定和钻孔。

对于箱梁内部施加的体外预应力,对其千斤顶张拉固定墩采取松动爆破,解除预应力,改善桥体的破碎解体效果。总体爆破方案示意图如图 6 所示。

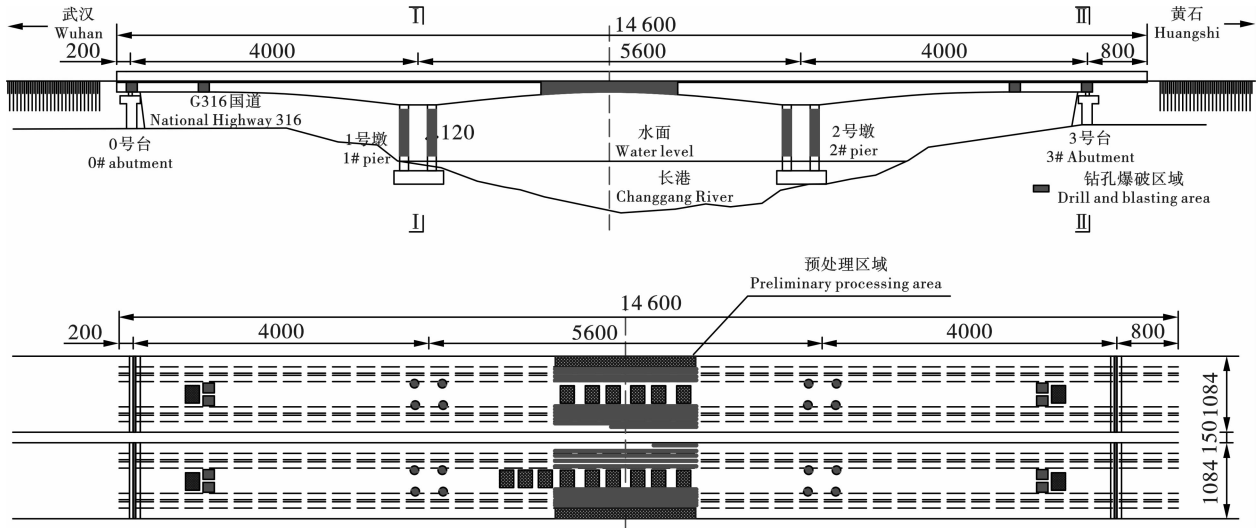


图6 总体爆破方案示意图(单位:cm)

Fig. 6 Schematic diagram of the overall blasting scheme(unit:cm)

4 爆破参数

大桥桥墩为直径1.2 m的圆形实心墩柱,为确保桥墩充分破碎,从水面以上1 m处开始对整个墩柱进行钻孔爆破,采用梅花形“2+1”布孔方式,排距35 cm,孔距25 cm,炮孔直径 $D=40$ mm。炮孔布置图和装药示意图如图7所示。

为保证中跨上部结构塌落解体充分,便于打捞,对桥体上部箱梁进行钻孔爆破,爆破部位分别为:桥体中跨箱梁顶板和腹板,两侧桥台上部箱梁顶端(此处为实心结构),体外预应力钢索固定墩(从桥

面钻孔,钻入墩柱内部)。见表1。

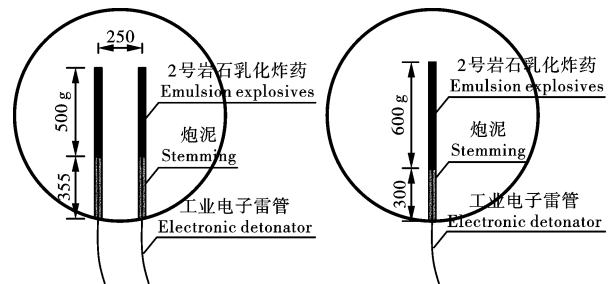


图7 桥墩炮孔布置及装药示意图(单位:mm)

Fig. 7 Blastholes layout and charge diagram(unit:mm)

表1 爆破参数表

Table 1 Blasting parameters

构件名称 Component	炮孔直径 Blasthole diameter/mm	孔距 Pitch-row/cm	排距 Array pitch/cm	炮孔深度 Blast hole depth/cm	堵塞长度 Stemming length/cm	炸药单耗 Unit explosive consumption/ ($g \cdot m^{-3}$)	单孔药量 Single charge weight/g
桥墩 Pier	40	25	35	90/85	30/35	2022	600/500
箱梁顶板 Box girder top plate	40	50	40	35/45	25/30	1250	100/150
腹板 Beam web	40	30	/	140	20	1466	60+60+100
桥头箱梁 Bridgehead box girder	40	35	/	140	50	/	900
外预应力固定墩 External prestressed fixed pier	40	35	/	140	50	/	900

5 起爆网路

采用工业电子雷管起爆网路。总体起爆顺序

为:中间箱梁→体外预应力钢索固定墩→边跨箱梁连接处、桥墩。具体延期时间为:

(1)右幅(上游)中间箱梁分为两响首先起爆,

起爆时间为 50 ms 和 150 ms, 左幅(下游)延迟右幅 120 ms 起爆, 起爆时间分别为 170 ms 和 270 ms。

(2) 右幅(上游)体外预应力钢索固定墩延迟右幅中间箱梁 100 ms 起爆, 起爆时间为 250 ms。左幅(下游)体外预应力钢索固定墩延迟左幅中间箱梁 100 ms 起爆, 起爆时间为 370 ms。

(3) 边跨箱梁、桥墩最后起爆, 右幅(上游)边跨箱梁、桥墩延迟右幅体外预应力钢索固定墩 300 ms 起爆, 起爆时间为 550 ms, 左幅(下游)边跨箱梁、桥墩延迟左幅体外预应力钢索固定墩 300 ms 起爆, 起爆时间为 670 ms。见图 8。

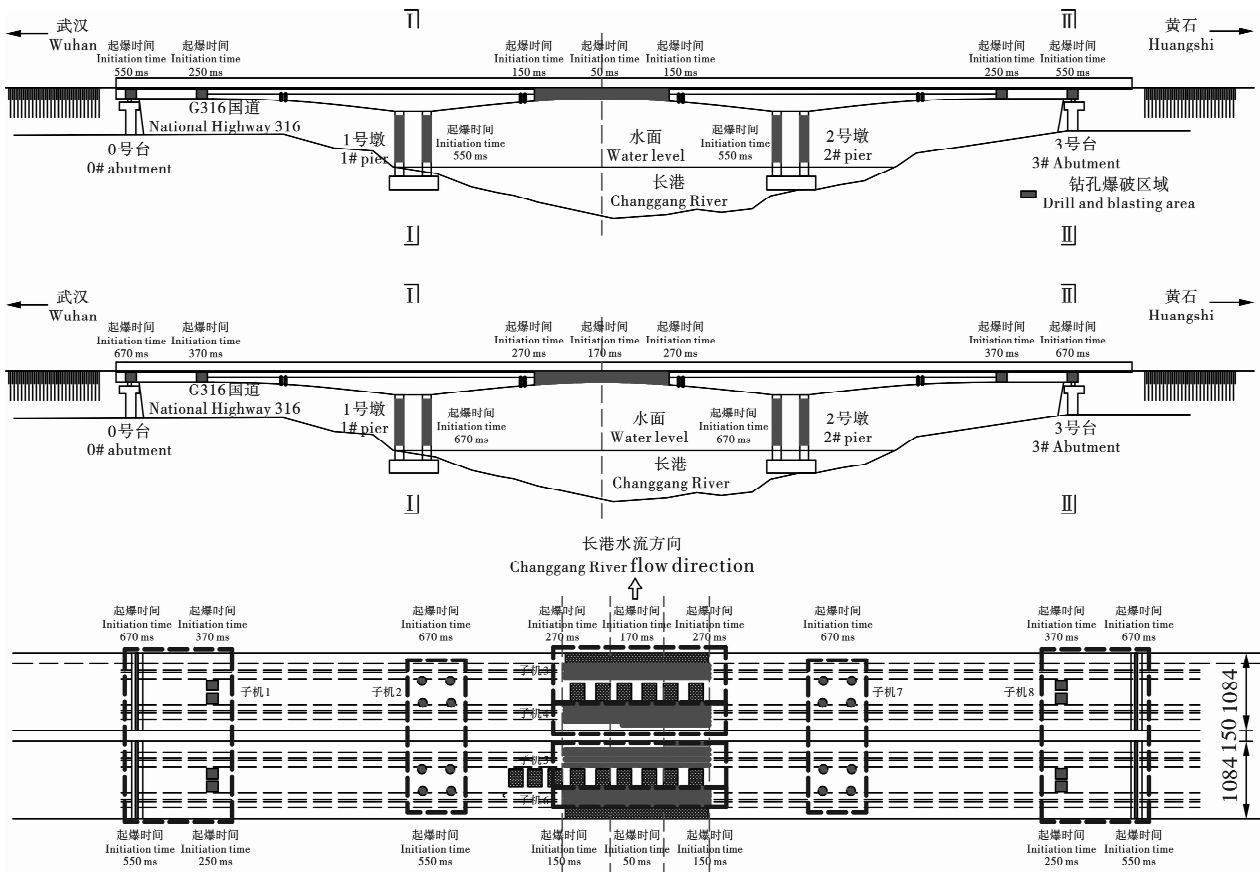


图 8 起爆网路示意图

Fig. 8 Initiation network diagram

采用单台主机起爆器联动组网, 连接多台子机起爆器, 全桥共计使用 8 台子机支路形成电子雷管起爆系统, 单台爆破支路子机的电子雷管数量控制在 300 ~ 400 发, 累计使用工业电子雷管 2800 发。

6 数值模拟分析

为验证爆破参数的合理性, 采用 ANSYS/LS-DYNA 动力学有限元软件, 对大桥倒塌过程开展数值仿真验算。根据柯家墩大桥的实际结构参数, 构建了大桥有限元模型, 具体如图 9 所示。

在建模过程中, 选用 * MAT_CABLE_DISCRETE_BEAM 材料来模拟预应力钢筋的运动状态。该材料常用于模拟钢丝绳等仅受拉力的结构, 可模拟绳索的多种运动状态, 并且能够通过 F0 选项定义材料初始张力, 从而较好地反映预应力钢筋

的运动情况^[10]。

通过调整 * MAT-ADD-EROSION 关键字中的 FALTAM 选项控制爆破切口单元定时侵蚀, 模拟爆破切口形成。利用 * LOAD_BODY_GENERALIZED 关键字为模型施加重力加速度, 同时联用 * CONTACT_AUTO_SINGLE_SURFACE 与 * ERODING_SINGLE_SURFACE 关键字, 模拟构件间的碰撞、冲击、侵蚀等接触情况。

计算结果如图 10 所示。模拟结果显示, 逐段原地坍塌的总体爆破方案能够确保大桥顺利解体倒塌。大桥倒塌全过程历时 4.5 s, 随着爆破切口的逐步生成, 在大桥结构内的应力重分配过程与体外预应力的共同作用下, 预应力钢筋支座处产生局部破坏, 待桥墩爆破破坏后, 大桥主体整体原地塌落并触地解体, 由图 11 可得, 桥面触地速度约为 13.6 m/s。

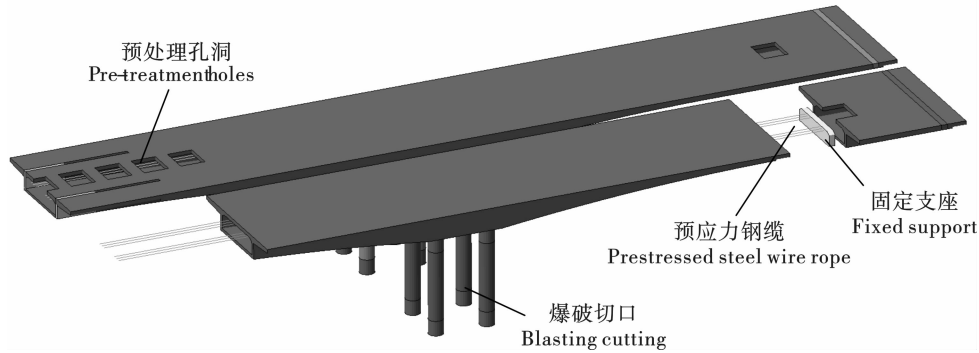


图9 柯家墩大桥数值仿真模型
Fig. 9 Numerical simulation model of Kejiadun Bridge

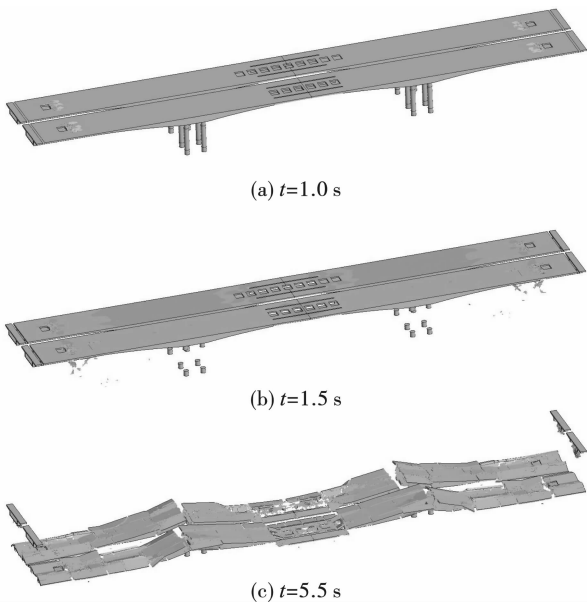


图10 柯家墩大桥倒塌模拟结果
Fig. 10 Simulation collapse results of Kejiadun Bridge

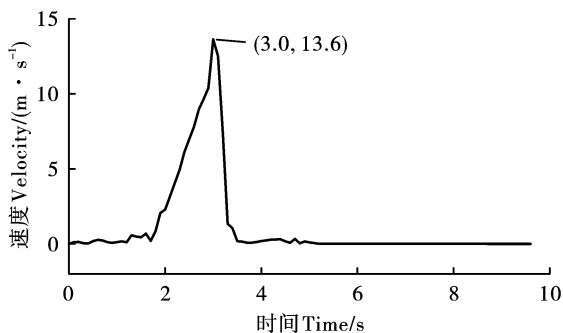


图11 桥面塌落速度时程曲线
Fig. 11 Time travel curve of bridge deck collapse velocity

图12 桥面监测点有效应力时程曲线可知,桥面监测点有效应力在桥面坍塌过程中出现显著波动。在0.0~1.0 s时间段内,预应力钢筋中的张力逐渐增大,桥面混凝土单元有效应力在0.9 s时达到峰值12.5 MPa;从1.05 s起,爆破切口按顺序形成,预应力钢筋支座于1.37 s时失效,钢筋预应力解除,

有效应力迅速衰减至0.4 MPa;随后在3.4 s触地时,有效应力再次达到峰值15.4 MPa。其中,结构倒塌触地所引起的有效应力峰值大于预应力钢筋引起的预应力峰值,表明结构的破坏主要由触地冲击导致,而预应力释放所引起的单元有效应力波动则有助于促进结构的充分解体。见图12。

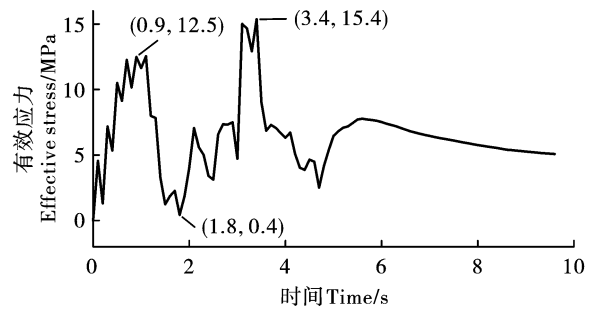


图12 桥面监测点有效应力时程曲线
Fig. 12 Effective stress time travel curve of bridge deck monitoring point

7 爆破效果分析

经过精心的设计、施工,柯家墩大桥爆破后按照设计要求逐段原地坍塌落,中跨箱梁上部结构在爆破的作用下基本上全部破碎,落入河中,便于后期的二次破碎和打捞,两边跨桥体塌落在岸边。周边各类保护对象均安然无恙,爆破飞石、震动和爆破粉尘等有害效应控制良好。见图13。

爆破过程中,采用Mini Mate Plus 振动记录仪对周边保护建筑进行了爆破和塌落振动监测,监测数据显示,周边22 m水塔和民房振动速度1.6 cm/s,振动监测结果虽未超出安全允许标准,但是仍然需要更严格的控制。从振动时程曲线图14中可以看到,振动持续总时长约5.0 s,塌落振动主要为10 Hz以下低频,桥体塌落冲击地面引起低频塌落冲击振动相对于爆破振动更大,主要是受制于桥体结构特

点和周边环境特点, 两侧边跨桥体箱梁因上跨公路, 未钻孔爆破, 导致解体不充分, 塌落冲击比较强。



图 13 爆破过程
Fig. 13 Blasting process

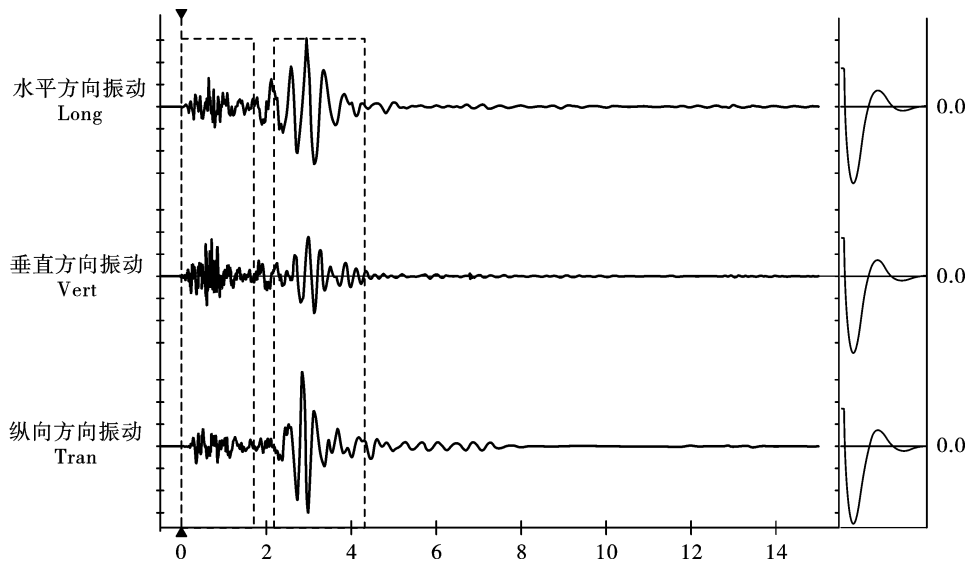


图 14 爆破振动监测时程曲线
Fig. 14 Blasting vibration monitoring time travel curve

为了监测爆破过程中桥体箱梁应力变化, 对右幅 1 号墩上部箱梁进行了应变测试, 应变监测点布置如图 15 所示, 各测点的应变曲线如图 16 所示, 从图中可知, 各点的应变曲线相似, 在中跨箱梁中间区域起爆后, 各监测点均产生了一个压应力和拉应力交替变化的过程, 此时桥墩上部箱梁的变形为弹性变形, 在体外预应力钢索固定墩爆破后, 箱梁产生了突变的压应力, 后桥墩上部箱梁的变形为塑性变形, 结构已经产生了不可逆的变化, 在边跨箱梁和桥墩爆破后, 箱梁同样产生了突变的压应力, 之后箱梁结构破坏。

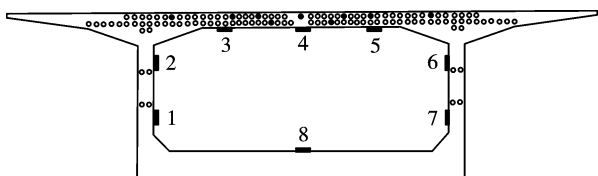


图 15 应变监测点布置图
Fig. 15 Layout of strain monitoring points

由于爆破正值雨季, 长港河水深且流速急, 爆破

后对该区域的打捞持续 20 d, 水中桥体结构打捞完毕, 河底三维扫描显示, 河底标高已恢复原始高程, 河道中间航道恢复。

8 结论与建议

(1) 对于复杂环境下的预应力连续刚构跨河桥梁, 爆破拆除具有独特的优势。当周边有建筑物、管线、航道等设施时, 其他拆除方案可能会受到空间限制或对周边设施造成较大影响, 而爆破拆除可以通过精确设计爆破方案, 控制桥梁的坍塌方向和范围, 减少对周边环境的影响。此外, 对于特定的桥梁结构, 如连续刚构桥主跨跨径较大、结构特殊的情况, 爆破拆除能够有效地解决施工难题。

(2) 体外预应力作为改善桥梁使用性能和提高结构承载力的加固技术, 采用爆破的方式解除预应力有助于促进结构的充分解体。

(3) 在多数情况下, 仅仅爆破桥墩让桥体上部结构塌落无法满足工程要求, 特别是像本项目的跨河桥梁, 必须对桥梁的箱梁结构进行部分爆破, 以便

于打捞以及减少桥体对地面的冲击。因此,对预应力连续刚构桥梁爆破拆除进行进一步研究是非常必要的,对箱梁爆破部位的选择、钻孔布孔方式的优

化、预应力的解除方式应更进一步研究,以达到爆破效果和安全防护的平衡。

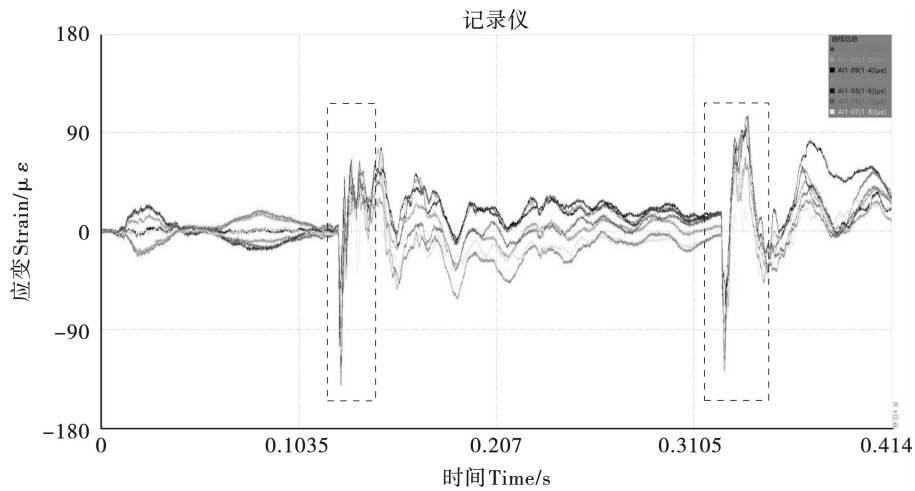


图 16 各测点的应变曲线

Fig. 16 Strain time travel curve of each measuring point

参考文献 (References)

- [1] 周军生,楼庄鸿.大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J].中国公路学报,2000(1):34-40.
- [1] ZHOU Jun-sheng, LOU Zhuang-hong. The status quo and developing trends of large span prestressed concrete bridges with continuous rigid frame structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000(1):34-40. (in Chinese)
- [2] 贾永胜,孙金山,姚颖康,等.我国拆除爆破研究进展与展望(1994—2024)[J].工程爆破,2024,30(5):45-60.
- [2] JIA Yong-sheng, SUN Jin-shan, YAO Ying-kang, et al. Research progress and prospect of demolition blasting in China (1994—2024) [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5):45-60. (in Chinese)
- [3] 周祥磊,陈德志,罗鹏,等.独塔单索面预应力斜拉桥爆破拆除[J].爆破,2020,37(4):89-93,137.
- [3] ZHOU Xiang-lei, CHEN De-zhi, LUO Peng, et al. Blasting demolition of prestressed cable-stayed bridge with single tower and single cable plane [J]. Blasting, 2020, 37(4):89-93, 137. (in Chinese)
- [4] 陈颢,谭雪刚,黄龙华,等.复杂环境下秀江双桥控制爆破拆除[J].爆破,2024,41(1):127-133.
- [4] CHEN Hao, TAN Xue-gang, HUANG Long-hua, et al. Blasting demolition of xiujiang double bridges in complex environment [J]. Blasting, 2024, 41(1):127-133. (in Chinese)
- [5] 李兵,刘桂勇,徐进.大孔径在桥梁爆破拆除工程中的应用技术研究[J].爆破,2023,40(2):132-137.
- [5] LI Bing, LIU Gui-yong, XU Jin. Research on application technology of large aperture in bridge blasting and demolition engineering [J]. Blasting, 2023, 40(2):132-137. (in Chinese)
- [6] 李跟,汪高龙,梁来君,等.复杂环境下单塔斜拉桥爆破拆除[J].爆破,2023,40(3):116-122.
- [6] LI Gen, WANG Gao-long, LIANG Lai-jun, et al. Blasting demolition of single-tower cable-stayed bridge in complex environment [J]. Blasting, 2023, 40(3):116-122. (in Chinese)
- [7] 王威,贾永胜,刘昌邦,等.连续梁跨江危桥应急抢险爆破拆除[J].爆破,2020,37(3):90-94.
- [7] WANG Wei, JIA Yong-sheng, LIU Chang-bang, et al. Emergency blasting demolition of continuous beam bridge across river [J]. Blasting, 2020, 37(3):90-94. (in Chinese)
- [8] 谢先启,贾永胜,姚颖康,等.复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术研究[J].中国工程科学,2014,16(11):65-71,77.
- [8] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Key technologies of precision demolition blasting of ultra-long urban viaduct in complicated surroundings [J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(11):65-71, 77. (in Chinese)
- [9] 黄小武,谢先启,陈德志,等.独塔单索面预应力斜拉桥爆破拆除倒塌解体过程分析[J].爆破,2021,38(4):108-114.
- [9] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, CHEN De-zhi, et al. Analysis of collapse and disintegration process of prestressed cable-stayed bridge with single tower and single

- cable plane by demolition blasting [J]. *Blasting*, 2021, 38(4):108-114. (in Chinese)
- [10] 胡志坚,张周煜,张永涛,等. 双柱墩混凝土梁桥爆破拆除倒塌过程与机理研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(5):67-79.
- [10] HU Zhi-jian, ZHANG Zhou-yu, ZHANG Yong-tao, et al. Investigation of explosive collapse process and mechanism of girder bridges with double-column piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(5):67-79. (in Chinese)
-
- (上接第115页)
- [11] 马泗洲,刘科伟,杨家彩,等. 不耦合装药下岩石爆破块体尺寸的分布特征[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(4):122-140.
- [11] MA Si-zhou, LIU Ke-wei, YANG Jia-cai, et al. Size distribution characteristics of blast-induced rock fragmentation under decoupled charge structures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4):122-140. (in Chinese)
- [12] 段继超,宗琦,汪海波,等. 起爆顺序对露天台阶爆破效果影响的数值模拟及现场试验[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(5):109-116.
- [12] DUAN Ji-chao, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Numerical simulation and field test on influence of blasting sequence on open-pit bench blasting effect [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(5):109-116. (in Chinese)
- [13] 黄雪峰,储亚坤,杨赛群,等. 露天矿山台阶爆破合理微差时间优选及应用[J]. *煤矿爆破*, 2024, 42(1):15-20.
- [13] HUANG Xue-feng, CHU Ya-kun, YANG Sai-qun, et al. Optimal selection and application of reasonable millisecond delay time for bench blasting in open-pit mines [J]. *Coal Mine Blasting*, 2024, 42(1):15-20. (in Chinese)
- [14] 苗小虎,喻智,谭期仁,等. 纳米比亚湖山铀矿空气间隔装药试验研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(8):165-168.
- [14] MIAO Xiao-hu, YU Zhi, TAN Qi-ren, et al. Experimental study on air-deck charge of Husab uranium mine in Namibia [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(8):165-168. (in Chinese)
- [15] 罗志华,史秀志,陈飞,等. 径向不耦合装药对粉矿控制的影响研究[J]. *爆破*, 2020, 37(3):47-55.
- [15] LUO Zhi-hua, SHI Xiu-zhi, CHEN Fei, et al. Study on influence of radial decoupling charge on fine ore control [J]. *Blasting*, 2020, 37(3):47-55. (in Chinese)
- [16] 叶海旺,彭瑞,田治平,等. 基于孔间延时优化的骨料矿山台阶爆破大块率控制[J/OL]. *金属矿山*, 2024, 1-10. [2025-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.td.20240812.1438.004.html>.
- [16] YE Hai-wang, PENG Rui, TIAN Zhi-ping, et al. Large lump rate control of aggregate mine bench blasting based on inter-hole delay optimization [J/OL]. *Metal Mine*, 2024, 1-10. [2025-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.td.20240812.1438.004.html>. (in Chinese)
- [17] 杨学军,钟金彪,林开颜,等. 双目立体视觉技术及其在智慧农业中的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(1):27-39.
- [17] YANG Xue-jun, ZHONG Jin-biao, LIN Kai-yan, et al. Research progress on binocular stereo vision technology and its applications in smart agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1):27-39. (in Chinese)
- [18] 张婵. 基于自适应双阈值的智能双目视觉系统设计[J]. *网络安全技术与应用*, 2023(11):57-59.
- [18] ZHANG Chan. Design of an intelligent binocular vision system based on adaptive dual thresholds [J]. *Network Security Technology & Application*, 2023(11):57-59. (in Chinese)
- [19] 陈丘轲. 基于改进YOLOv8的钢材缺陷目标检测方法[D]. 上海:华东师范大学, 2024.
- [19] CHEN Qiu-ke. A steel defect target detection method based on improved YOLOv8 [D]. Shanghai: East China Normal University, 2024. (in Chinese)
- [20] 杜雨珊. 基于YOLOv8的水下目标快速检测方法研究[D]. 大连:大连海事大学, 2024.
- [20] DU Yu-shan. Research on rapid underwater target detection method based on YOLOv8 [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024. (in Chinese)
- [21] 刘振,董绍江,罗家元,等. 基于双目视觉和改进YOLOv8n的火灾检测及测距方法[J]. *陕西科技大学学报*, 2025, 43(1):152-160.
- [21] LIU Zhen, DONG Shao-jiang, LUO Jia-yuan, et al. Fire detection and ranging method based on binocular vision and improved YOLOv8n [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2025, 43(1):152-160. (in Chinese)
- [22] 韩强. 面向小目标检测的改进YOLOv8算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- [22] HAN Qiang. Research on improved YOLOv8 algorithm for small target detection [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)