

重庆廊桥结构健康评估与保护策略研究^{*}

韩昭彦¹, 仇文岗², 张良帅³, 杨 阳², 刘远坚¹, 杨 昕²

(1. 重庆市文物考古研究院, 建筑遗产研究所, 重庆 400013; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 河南省文物考古研究院, 文物科技保护中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 廊桥作为融合交通、建筑与文化遗产价值的复合载体, 其保护研究对传统营造技艺传承具有重要意义。系统梳理了国内外廊桥发展脉络与地域分布特征, 针对廊桥面临的洪涝、强风、地震及火灾等多元风险, 总结了结构加固、智能防火及数字化保护等关键技术研究进展。聚焦重庆地区, 全面调研48座廊桥, 其类型涵盖单跨木梁木廊桥、石墩木梁木廊桥、石拱木廊桥三类, 集中分布于渝东南地区, 其中约68%廊桥保存完整, 其余存在石质劣化、木构腐朽、砖瓦病害等问题, 且消防与安防设施缺失问题突出。基于此, 结合廊桥结构特性与区域文化特征, 提出分类分级保护、活态传承营造技艺及文旅融合活化利用等保护策略。研究可为重庆廊桥的系统性保护提供依据, 对同类文化遗产的区域化保护具有参考价值。

关键词: 廊桥保护; 多元风险; 重庆地区; 结构安全评估; 保护策略

中图分类号: U448.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)03-0506-15

Study on Structural Health Assessment and Protection Strategies of Covered Bridges in Chongqing

HAN Zhaoyan¹, ZHANG Wengang², ZHANG Liangshuai³, YANG Yang²,
LIU Yuanjian¹, YANG Xin²

(1. Architectural Heritage Institute, Chongqing Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chongqing 400013, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Henan Provincial Institute of Cultural Heritage and Archaeology, Cultural Heritage Science and Technology Conservation Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Covered bridges are composite carriers integrating transportation functions, architectural value and cultural heritage attributes. Research on their conservation is of great significance for the inheritance of traditional construction craftsmanship. This paper systematically reviews the evolutionary history and regional distribution characteristics of covered bridges worldwide. In view of the multiple risks faced by covered bridges, including floods, strong winds, earthquakes, and fire disasters, the research progress of key conservation technologies such as structural reinforcement, intelligent fire prevention, and digital conservation is summarized. Focusing on Chongqing, a comprehensive field investigation is carried out on 48 covered bridges. These bridges are divided into three categories: single-

^{*} 收稿日期: 2025-08-19; 修回日期: 2025-09-10

基金项目: 重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2023JXJL-ZDX0010)、国家自然科学基金项目(52478326)、河南省重点研发专项(231111321100)资助

作者简介: 韩昭彦(1986—), 男, 馆员。主要从事建筑遗产保护研究。E-mail: 494686205@qq.com

通信作者: 杨 阳(1992—), 男, 副教授, 博导。主要从事岩土文物保护研究。E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn

span wooden beam covered bridges, stone-pier wooden beam covered bridges and stone-arch wooden covered bridges, which are mainly distributed in southeastern Chongqing. Approximately 68% of the investigated bridges are well-preserved, while the rest suffer from deterioration problems, including stone deterioration, timber decay, and brick and tile deterioration, with prominent shortages of fire protection and safety monitoring facilities. Accordingly, combined with the structural properties and regional cultural characteristics of covered bridges, this study puts forward classified and graded conservation strategies, living inheritance of traditional construction techniques, and adaptive utilization strategies integrating cultural tourism. The results provide a theoretical basis for the systematic conservation of covered bridges in Chongqing, and offer valuable references for the regional conservation of similar cultural heritage sites.

Keywords: covered bridge protection; multiple risks; Chongqing region; structural safety assessment; protection strategies

0 引言

廊桥是一种“河上架桥,桥上盖廊,以廊护桥,桥廊一体”的古老而独特的桥梁类型,又称“虹桥”“屋桥”“风雨桥”^[1-3]。廊桥作为一种将桥梁通行功能与建筑物遮蔽空间相结合的独特建筑形式,集中体现了传统营造技艺的精髓与智慧。廊桥不仅有效解决了山区交通的联通问题,同时逐步演变为当地社区进行集会、社交互动、商贸交易及驿传休憩的多元公共活动空间。

近年来,廊桥保护工作日益受到重视,保护意识和力度均显著增强。2009年,联合国教科文组织将“传统木拱廊桥营造技艺”列入《急需保护的非物质文化遗产名录》^[4];2017年,《关于实施中华优秀传统文化传承发展工程的意见》文件中明确阐释了文物遗产保护与传承的国家战略定位及其重大现实需求;2023年,《廊桥保护三年行动计划(2023—2025)》中指出应系统性加强廊桥的保护研究利用工作,其总体目标为:在“十四五”期间,完成廊桥专项调查,廊桥文物保护体系基本健全,廊桥保存状况和周边环境明显改善,重点廊桥安消防设施全覆盖,风险防控水平和应急处置能力显著提升,有效认知、保护和利用廊桥文化遗产。

现有研究中多聚焦于浙闽地区廊桥,西南地区廊桥保护研究较少^[5-7]。因此,本文以重庆廊桥为对象,通过梳理其历史演进脉络、解析地域化结构特征、评估现存病害类型,构建适用于西南山地环境的廊桥保护策略。

1 廊桥保护研究概况

1.1 国内外廊桥发展史及分布

国内廊桥发展历史可追溯至远古,河姆渡人建造的干阑式建筑似“桥屋”,虽因功能非连接未成真正廊桥,却为桥梁与建筑结合铺垫思维基础;西周春秋时桥梁复杂化,除通行外为行人提供遮风挡雨空间,桥屋与桥梁初步结合,且梁柱结构发展,出现抬梁式构架;战国秦汉时期铁器普及推动石质梁桥发展,悬臂梁结构出现,为解决木材腐蚀桥面上加建桥屋,斗拱技术问世,廊桥构造古朴实用,如西汉成都木制廊桥;隋唐宋时国力强盛,廊桥功能多样化,融入游赏、商业、祭祀等,贯木拱桥产生,耗才省、跨度大,斗拱成主要结构元素,廊桥造型优雅且结构与功能统一;元明清时官方手工业发达,廊桥装饰精美,砖雕、石雕应用增多,但技术创新不足多沿用前朝模式,木拱廊桥技术成熟,现存实例多建于此时;清末后因西方技术冲击及近代公路铁路建设,传统廊桥因难满足交通需求营建数量锐减,仅少数地区沿用^[8]。

我国现存的廊桥主要为木廊桥,也包括少量的石廊桥。国内现存廊桥主要分布于六大区域^[9]:浙南-闽北地区、江南地区、大武陵地区、客家地区、西南地区、华北地区。

国外廊桥历史始于中世纪欧洲,其兴起与宗教文化紧密相关。早期廊桥多为教堂与桥梁的结合体,兼具交通与宗教功能。随着社会需求变化,桥上建筑从单一宗教用途拓展至商业、居住领域,商店、住宅等陆续融入,此时廊桥呈现连续闭合的建

筑界面,楼房间无开敞空间,与城市街道布局相似,功能复合化特征显著。工业革命中,高强钢铁与预应力混凝土的应用革新了桥梁建造,设计转向以力学计算和功能需求为核心,经济性与实用性成为重点,建筑美学暂被弱化。20世纪后期,桥梁风格发生转变,简洁流畅的现代审美兴起,设计者在满足结构功能的同时注重视觉形态与空间体验,廊桥从单纯交通载体演变为技术理性与形式美感结合的建筑形态^[10-11]。

廊桥在全球范围内广泛分布。日本现存の木廊桥较少,以无廊伸臂式木桥为主,如三大名桥之首锦带桥,横跨锦川,由五座木拱相连而成,造型优美;欧洲现存廊桥数量较多,如东欧的斯拉夫地区、西欧瑞士地区^[12-13];美国廊桥始建于19世纪初期,最早出现于新英格兰地区,其主体承重结构为桁架系统。为满足综合性交通功能,设计者在关键节点处采用钢铁零件,从而显著提升了结构稳定性。此外,廊屋可使桥面在阴雨天气下保持干燥,既解决了桥面防滑问题,又能为行人提供遮风挡雨的场所^[14],因此,在19世纪中期美国廊桥的建造范围扩展至加州和北部加拿大地区。

1.2 廊桥保护措施研究

廊桥多依山临水而建,坐落于崇山峻岭、地势险要之处,常受到强风、洪涝灾害的影响。同时,随着全球气温变暖,加剧了高温干燥天气频率,火灾同样严重威胁廊桥安全。据《武义县志》记载,世界上最长的廊桥熟溪桥从明崇祯五年(1630年)至1942年的312年间,水毁4次,大火焚烧3次^[15];2006年寿宁县长瀨溪桥因水电站蓄水被淹没桥顶,随后被拆迁重建(图1);2016年强台风“莫兰蒂”过境期间,泰顺县境内三座享有全国重点文物保护单位称号的古廊桥一文兴桥、薛宅桥与文重桥不幸损毁;同时,闽侯县拥有逾八百年历史的永春东关桥也在这场灾害中毁于一旦。

廊桥保护历来是专家学者研究的重点,针对廊桥抗洪、防风、抗震、防火开展了研究^[16-20]。在防风抗洪方面,我国古代廊桥从选址、设计到现场建造均涉及到了防风抗洪的理念,如廊桥建造在河床顺直处,避免河道激流对廊桥的冲击,廊桥多采用跨度相对较大的单跨设计,且设置泄洪孔,辅助宣泄洪水^[21]。现代随着科技的发展,相关专家通过数值分析风荷载对廊桥的影响,从而提出针对性保护策



图1 长瀨溪桥淹没前后

Fig.1 Before and after submergence of Nagase River Bridge

略。贾晓蕾^[8]以剑阁县剑门新区清江河景观廊桥为依托,建立廊桥全桥数值模型,对比分析廊桥在无风荷载与整体迎风状态下主拱圈、立柱、桥墩等构件的内力与变形特征,提出现代廊桥设计中必须考虑风荷载组合效应的工程建议;韩宜丹等^[22]以浙江泰顺文兴桥为研究对象,基于精确测绘建立有限元模型,首次系统揭示了木拱廊桥在强风下的构件受力规律与整体动力特性,提出重点加固外侧斜苗与五节苗平苗,优化剪刀撑截面布置并增设硬木销钉,为传统木拱廊桥的抗风保护提供了量化依据与技术路径。

我国地处欧亚大陆东南部,位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,地震活动频繁^[23-25],因此,廊桥抗震性能及措施同样是廊桥保护重点。榫卯节点是我国传统木拱廊桥关键抗震部位,运用CFRP/BFRP、竹斜撑、金属材料进行榫卯节点能有效提高节点的承载力、吸能能力及延性,此外,使用隔震支座,铺设砂石料、鹅卵石弹性垫层等可以实现隔震

吸能,提高廊桥抗震性能^[24]。同时,在地震波作用下,木拱廊桥拱架斜撑是受力关键部位,应及时检查加固^[26]。

相较于石质廊桥,木拱廊桥由于建筑材料为木材,经长期环境侵蚀后,其表面易开裂、材质疏松、含水率显著下降,在高温干燥天气下,其火灾风险升高。据不完全统计,清代以来福建省内木拱廊桥火灾事故发生27起,比水毁多5起^[27]。其中,入选“中国世界文化遗产预备名单”的福建省屏南县万安桥先后发生4次火灾,如图2所示。由于多数木拱廊桥位于偏远山村,距消防站远,道路狭窄崎岖,消防车难以通行,且缺乏城市消防管网支持^[28],灭火救援困难,因此,木拱廊桥防火保护应以预防为主。首先,应加强对火源控制与管理,如将神龛迁移至桥头、电子蜡烛替代明火、供桌铺设金属板等措施显著降低祭祀火灾^[29];其次,应开发智能、高效火情监测技术,传统的感烟、感温式火灾探测器在开放性高的木拱廊桥中灵敏度低、易误报,而吸入式烟雾探测器因安装成本高且影响风貌不适用^[30],因此,可依托智能物联技术,将水、电、烟、气等信息进行综合监测,实现温度、烟雾等的实时监测及智慧化管理^[31];随后,应提高廊桥自身防火抗火能力,选用透明度高、腐蚀性低的涂料,同时针对木拱廊桥进行防火分区,包括桥梁上下分区、多跨桥跨间分区及桥与周围环境分区^[30];最后,提升灭火设施与技术:由于传统喷淋系统耗水量大、破坏风貌,固定式高压细水雾受通风影响效能降低,且管网安装侵入结构,可采用移动式高压细水雾灭火装置处理木拱廊桥火情^[32-34]。



图2 万安桥火灾损毁场景^[29]

Fig.2 Scenes of fire damage to Wan'an Bridge^[29]

廊桥长期暴露在自然环境中,由于年久失修、材料老化等因素影响,存在一定的安全隐患,威胁公共安全,因此,相关专家学者针对廊桥检测评估开展了研究。为了能够最大程度地保护廊桥,维持其原有风貌和历史价值,应采用无损检测方式开展检测评估^[35-37]。近年来,无损检测技术发展迅猛,包括应力波检测^[38]、超声波检测^[39]、X射线成像技术^[40]、THz-TDS技术^[41]等,其中,应力波和超声波检测在廊桥检测中应用较多。福州闽侯县远济桥检测评估过程中,率先采用了“应力波粗筛、超声波精测”的联合检测模式,应力波用于快速识别内部裂纹、空洞等宏观缺陷,超声波则用于量化缺陷尺寸与分布,同时,突破了传统单一指标局限,建立了基于双波速的四等级评估体系^[42],为廊桥保护和修缮提供了指导。

1.3 廊桥数字化保护探索

随着城市化进程的加速,部分廊桥因基础设施建设、土地开发等原因遭到拆除或破坏,同时,伴随着一些自然灾害的破坏,廊桥数量逐渐减小。传统廊桥营造技艺依赖师徒口传心授,现代社会中传承人老龄化严重,年轻一代参与度低^[43]。且传统保护模式下,廊桥文化传播受地域限制,公众认知度低。因此,当前廊桥保护逐步转向数字化发展^[44-46]。

数字化廊桥是借助数字技术,对廊桥进行全方位、多维度记录而呈现的一种新型形态。它通过运用三维激光扫描、无人机航拍、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、地理信息系统(GIS)以及大数据等先进技术,对廊桥的建筑结构、外观风貌、装饰细节、周边环境、历史沿革、文化内涵等信息进行采集、存储、分析与展示^[47-49]。鹿国伟^[50]以泰顺廊桥为对象,提出构建数字资源库、借助AI挖掘文化内涵(如语音识别民间故事、计算机视觉分析图案)、结合VR创建虚拟导览系统及开发数字化文创的策略,强调传播维度的技术赋能。徐金虎等^[49]针对温州廊桥,剖析数字赋能的价值与制度法规、主体能力等挑战,提出激光扫描数据采集、“廊桥+直播/AR”产品创新、数字化学徒计划及区块链治理等路径,侧重技术应用与生态构建。夏智勇^[51]以宁德廊桥为例,通过无人机航拍、三维激光扫描建立数字化档案,利用虚拟修复技术及“智慧云”小程序实现线上交互展示,凸显不可移动文物的数字化保护与智慧

管理模式。赖晨^[52]针对福建宁化廊桥文旅开发问题,提出构建“VR掌上全景馆”、整合红色与客家文化资源、设计数字化旅游线路,聚焦文旅场景的数字化体验升级。

现有研究已形成“数据采集-虚拟复原-应用传播-治理保障”的技术链条,但在跨区域标准体系、长效运营机制及文化深层解码等方面仍待深化,未来需加强技术标准化与文化叙事的融合创新。

2 廊桥结构分析研究

2.1 廊桥结构特点

木拱廊桥是我国古代木结构桥梁的杰出代表,其结构设计融合了力学智慧与建筑美学,展现出独特的构造逻辑与受力特性。采用“河上架桥,桥上建廊,以廊护桥,桥廊一体”的独特形式,主要包括廊屋结构、下部结构和主拱结构。其中,廊屋结构由木构架与屋面构成。木构架多为抬梁式,柱梁叠架后于檩上架椽子望板成屋面,其功能兼具适应多雨的坡顶排水,及以廊屋自重增强桥体抵御风洪引发的上拔、侧向荷载能力。下部结构涵盖桥台基础、护坡等。桥台多在岩石上以长条石砌筑,或凿刻悬崖而成。因木拱廊桥拱脚推力大,桥台需稳定牢固,其安全性是整座桥梁的关键前提^[53-55]。

主拱结构由“三节苗”与“五节苗”两套拱骨系统通过榫卯搭接编织而成,形成兼具稳定性与跨越能力的空间体系,如图3所示。从构造组成看,主拱结构的核心在于两套系统的协同工作。“三节苗”系统由中间平苗与两侧斜苗组成三折边形,通过截面较大的“大牛头”横木连接,形成稳定的支撑体系,

主要抵抗垂直荷载,其跨度与高度直接决定桥面跨度与拱高。“五节苗”系统则由中间平苗、上斜苗与下斜苗构成五折边形,通过“小牛头”连接,用料相对纤细,属不稳定结构,需与三节苗穿插搭接以形成整体。两者相互嵌套时,三节苗的斜苗与五节苗的平苗通过牛头抵接,形成“编木”效应,使荷载在两套系统间传递,改善内力分布。如三节苗斜苗底端以“鸭嘴”状榫头抵于“垫苗木”或桥墩,通过“将军柱”传递部分重量以稳定拱脚,五节苗的垫苗木则卡于将军柱与三节苗斜苗之间,形成受力闭环^[57-59]。

辅助构件对结构稳定性至关重要。为增强抗侧移能力,廊桥在两侧设置“剪刀撑”(或“剪刀苗”),通过铁箍或铁栓加固交叉节点,限制木拱侧向变形。跨度较大的廊桥还增设“青蛙腿”(或“马腿”),以立柱与斜撑组成排架,下端抵于将军柱,上端支撑端平苗,减小桥苗跨度并抵减五节苗的反弹力。桥面板系统作为第三受力体系,与主拱形成三角形空腔,既减轻结构自重,又通过“桥板苗”与主拱牛头的搭接,将荷载传递至拱架,增强整体刚度^[1]。

从力学特性看,木拱廊桥属互承式结构衍生形态,两套系统通过牛头搭接形成超静定体系。当节苗数相差1时为静定结构,相差2或相等时为超静定结构,这种构造使结构在荷载作用下能通过变形协调实现内力重分布。例如,满跨荷载下,五节苗中部牛头与三节苗斜苗可能脱开,但整体仍通过拱效应传递荷载;半跨偏载时,非加载侧五节苗因挤压上拱,荷载主要由三节苗承担,体现出结构对荷载分布的自适应能力。榫卯连接的半刚性特征也影响结构行为,节点转动刚度随荷载变化,初始阶段呈线性弹性,超载时出现塑性变形,这种“柔性连接”使结构在地震等动力荷载下具有耗能优势^[60-61]。

廊桥构造还体现出对材料特性的巧妙利用。木材顺纹受压性能优异,三节苗与五节苗的斜苗主要承受轴向压力,平苗则兼受弯压^[62];牛头多选用硬木,通过矩形截面与榫卯咬合传递剪力。施工时无需钉子,仅靠构件相互挤压形成稳定体系,如三节苗平苗以燕尾榫嵌入大牛头,五节苗上斜苗以透榫或半榫连接牛头,节点构造随受力需求调整,既保证传力效率,又便于拆卸修缮。这种结构形式不仅解决了木结构大跨度无柱跨越的难题,更通过“编木成拱”的智慧,使短小构件通过几何构造实现

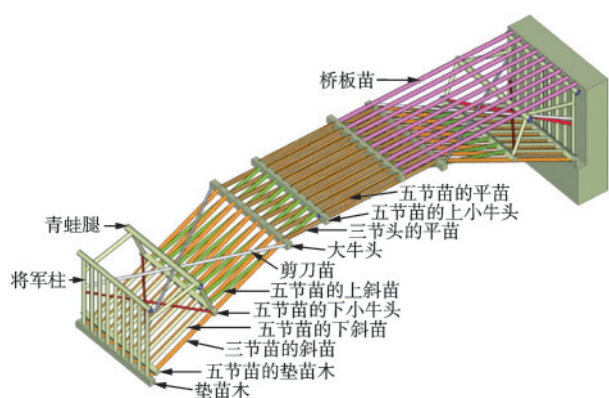


图3 木拱结构图示^[56]

Fig.3 Diagram of wooden arch structure^[56]

力学性能的最大化。现存廊桥中,单跨跨径最大可达30余米,超过赵州桥净跨,展现出古代工匠对结构力学的深刻理解^[63]。尽管历经数百年风雨,其结构体系仍为现代仿生建筑与可持续桥梁设计提供重要启示,尤其是互承结构与拱效应的结合,为大跨度木结构的创新发展奠定了理论基础。

2.2 廊桥结构受力分析

廊桥作为融合交通与建筑功能的结构,受力特性研究对其保护具有重要意义。廊桥结构承受荷载分为静力荷载和动力荷载^[64-66]。静力荷载主要为廊屋及桥面静荷载。欧加加等^[67-68]以景宁东坑下桥为研究对象,构建了廊桥三维力学结构模型,基于数值分析结果发现三节苗与五节苗组成的系统不仅能够相互传递荷载,防止局部产生过大变形,还增强了整座廊桥的稳定性,但当三节苗或五节苗单独存在时,变形幅度较大,并且存在明显的应力集中问题;张鹰^[53]基于典型单跨木拱廊桥模型,以“三节苗”为主系统、“五节苗”为副系统,通过铰支点协同受力,构建了木拱廊桥桥体二维平面力学模型,分析了均布荷载作用下三节苗和五节苗受力特征;吕伟荣等^[69]针对九龙木拱廊桥进行精细建模,分析了不同荷载工况下廊桥结构内力和挠度,明确了“三节苗”和“五节苗”通过牛头交叉实现拱结构机制;安然等^[70]采用数值分析与现场监测结合的方法,分析木拱廊桥在成桥状态下的结构变形及受力特性,结果表明恒载作用下主桥及桥面上、下游线形变化基本一致,变形均匀,数值分析与监测结果基本一致,为后期运维提供参考。

相较于均布荷载作用,非对称荷载对廊桥结构影响较大^[68]。张亮^[71]以东坑下桥为原型,开展了全跨与半跨荷载组合作用下木拱廊桥缩尺模型试验,研究了木拱廊桥在不同荷载工况下的受力机理、承载能力及“青蛙腿”的作用,结果表明对称荷载下廊桥变形小、承载能力高,半跨偏载更不利且易因榫卯脱开失稳破坏;季光耀^[72]提出木拱廊桥主体结构具有互承结构特性,存在瞬变体系和几何可变体系的可能,在非对称荷载作用下,结构中未承受荷载的一侧,牛头与苗杆会出现脱开现象,此时木拱廊桥会转变为几何可变体系,这使得廊桥的整体刚度有所下降,进而容易出现失稳情况。浙江泰顺文兴桥在长期非对称荷载作用下,桥体呈现东低西高的不对称形态,引发东侧三节苗受压变形成弓状、部

分五节苗压断或弯曲,同时,桥体上部出现木构架榫卯节点拔榫、檩条开裂及牛头劈裂等问题,降低了文兴桥的结构稳定性,威胁廊桥安全^[73-74]。

廊桥承受动力荷载主要包括风荷载、水荷载、地震荷载等。王廷文^[75]基于黄龙溪廊桥开展有限元分析,采用反应谱法和时程分析法对比研究了抗震设计中上部廊体结构对下部结构的影响,总结了廊桥动力作用下受力特性,为大跨度廊桥设计提供参考;张璇^[76]通过数值分析方法分析了洪水作用下木拱廊桥受力变形,对比研究了拆除风雨板和桥面加重两种抗洪方法,发现拆除风雨板可提高廊桥抗洪性能,抵御大型洪水,桥面加重适用于抵御中小型洪水,研究为制定高效的洪水预警和针对性抗洪应急预案提供了参考;刘明晖等^[26]以浙南木拱廊桥为研究对象,通过数值模拟方法研究了风荷载对廊桥的影响,结果表明风荷载作用下廊屋的侧向位移比桥体更为显著,其中跨中位置的侧向位移最大;剪刀苗能够大幅降低风荷载引发的廊桥侧向位移。

3 重庆廊桥调研与保护

3.1 重庆廊桥概况

重庆位于我国西南腹地、长江上游地带,素来以“山城”闻名。其别具一格的山水格局,为廊桥的诞生提供了重要推力。一方面,这片区域水系密布,众多河流纵横交错,把重庆的大部分地域分割开来;另一方面,当地峡谷与高山众多,大大加剧了人们出行往来的阻碍。

重庆廊桥最早有明确记载的始建于宋元时期,于明清时期达到高峰,近现代发展逐步陷入了停滞。本次调研重庆廊桥48处,根据保护级别划分,省级6处,市县级17处,一般文物25处,如图4所示。在中心城区,仅渝北区发现1座廊桥,名为回龙桥,是一座典型的石拱木廊桥;渝西丘陵区共有4座廊桥,分别位于合川区的五星桥、永川区的万寿桥、荣昌区的万福桥以及潼南区的长廊桥;渝东北山区廊桥资源相对丰富,共有8座,分别为忠县1座、奉节县2座、开州区2座、巫山县1座、巫溪县1座、城口县1座;渝东南山区是重庆市廊桥分布最为密集的区域,共发现35座廊桥。分别为石柱县2座、彭水县2座、丰都县3座、綦江3座、南川7座、武隆3座、黔江6座、酉阳4座、秀山5座。本次调研主要对

重庆市现存的廊桥进行了全面梳理,为今后的文化遗产保护与利用提供了重要的基础数据。



图4 重庆廊桥分布

Fig.4 Distribution map of covered bridges in Chongqing

重庆廊桥按照结构形制主要有单跨木梁木廊桥、石墩木梁木廊桥、石拱木廊桥以及组合式木廊桥;按照廊屋形式分类主要有单檐悬山式廊屋、重檐悬山式廊屋、单檐歇山式廊屋、重檐歇山式廊屋、重檐硬山式廊屋、单檐庑殿式廊屋、独特造型的重檐式木廊屋,见表1。

表1 重庆廊桥分类

Table 1 Classification of covered bridges in Chongqing

分类依据	描述	数量
结构形制	石拱木廊桥	11
	石墩木梁木廊桥	14
	单跨木梁木廊桥	19
	组合式木廊桥	4
廊屋形式	单檐悬山式廊屋	30
	重檐悬山式廊屋	5
	单檐歇山式廊屋	3
	重檐歇山式廊屋	5
	重檐硬山式廊屋	3
	单檐庑殿式廊屋	1
	独特造型的重檐式木廊屋	1

单跨木梁木廊桥是构造最简单、建造最方便的一种廊桥结构形式。采用木梁并排架设在两端的桥台或驳岸之上,梁上横铺木板作为桥面,再建设廊屋。这种廊桥自重轻、跨度小,廊屋多为单檐悬山式或歇山式结构,也有少数采用重檐的。桥台或

驳岸为石砌体结构,坚固、稳定且耐久性好;上部结构均为木构,取材方便、易加工、经济实用,主要包括丰都万寿桥、武隆彭家桥、武隆下关桥、大沙坝凉桥、深溪河凉桥、小溪沟凉桥、酉阳石家坝廊桥等。

石墩木梁木廊桥是河道较宽的地方,木梁的跨度有限,在河道中增设一个或多个桥墩的木梁廊桥形式,桥墩平面多为船形。无论是多跨还是单跨的形式,其力学性能都是简支梁结构;具备便于取材、施工快捷、经济实用等优点。廊屋既有单檐的也有二重或三重檐的,部分廊屋中部有升起的桥亭,主要包括南川太平廊桥、綦江木金桥、荣昌万福桥。

石拱木廊桥与木梁木廊桥不同,在石拱桥上加建廊屋是人们休闲、审美等使用功能的需求体现,是“锦上添花”式的叠加。而在木梁上加建廊屋则是保护木梁不受雨水侵蚀的结构共同体,同时兼具使用功能。石拱加木廊屋的显著优点是石拱桥部分可独立承担桥的通行功能而不依赖廊屋,且结构坚固、承重大、经久耐用,主要包括合川五星桥、永川万寿桥、忠县两河廊桥、丰都锡福桥、南川鱼泉廊桥、酉阳长安桥等。

3.2 重庆廊桥现状评估

廊桥完整性主要是指整体格局、主要功能空间保存完整。见证当时廊桥活动的地方县志、门联题记碑刻仅部分廊桥得以保存。大部分廊桥周边基本保持历史环境的自然与人文特征,能反映廊桥选址与地形地貌的关系。重庆地区48座廊桥中,约68%廊桥处于良好的保存状态,其余32%廊桥均有不同程度的病害问题,如图5所示。

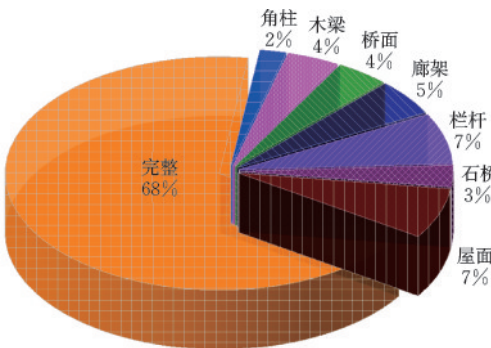


图5 重庆廊桥完整性评估

Fig.5 Integrity assessment of covered bridges in Chongqing

酉阳清泉龙幽沟廊桥是迁移较为成功的廊桥代表,该桥位于乌江边的重庆酉阳清泉乡,桥架于龙幽沟入乌江口之峡谷上,于清同治十年十月竣

工,题“回龙桥”,故又名“回龙桥”。桥梁原址位于靠近汇入口处,此处河道恰好有巨大的天然基岩突出,是水流最窄的地方。由于乌江彭水电站工程建设需要,该桥梁已实施迁移保护,现选址在距离汇入口约100米处(就近后靠),海拔略高于原址,地形地貌与之相近,亦坐落在突出的天然基岩之上,水流宽度约20多米。迁移前后有照片对比,用于佐证的题刻保存完好,文字记载得以保存,如图6所示。



图6 龙幽沟廊桥迁移前后景观

Fig.6 Landscape of Longdangou covered bridge before and after relocation

同时也有小部分廊桥面临着不同程度的损毁,包括屋面破损、栏杆缺失、廊架损坏、桥面遭朽以及木梁断裂等问题(图7),不仅影响了廊桥的美观,更对其结构安全构成了威胁。如彭水夏凉桥桥台局部垮塌、木梁掉落,黔江柏荫桥主梁断裂,黔江深溪河凉桥屋面破碎,石柱万寿桥瓦片缺失等。

通过进一步调研,统计了重庆廊桥的病害类型。廊桥结构以石质和木质为主,同时部分桥体涉及砖瓦构件。因此,从石质文物病害、木构文物病害及砖瓦文物病害三方面展开分析:



图7 部分损毁廊桥示

Fig.7 Diagrams of partially damaged covered bridges

(1) 石质文物病害:廊桥作为室外文化遗存,大多位于河道,长期受水流的物理冲击和化学侵蚀,加上重庆气候特点“春早气温不稳定,夏长酷热多伏旱,秋凉绵绵阴雨天,冬暖少雪云雾多”。历经千百年的冷暖交替、风吹日晒、雨雾浸蚀等自然因素影响,廊桥的石拱与石墩在自然环境的长期暴露下一直面临着变形开裂、石块缺损、材料表面劣化、受潮霉变、植物及微生物破坏等多种病害的威胁(图8)。其中表面劣化是指由于自然因素如水、风、冻融、温差变化、酸雨等现象导致的石块表面分化、面层剥落的现象。大气污染物与雨水会导致材料水溶盐含量升高;风化作用可引起表面磨损、剥落,温

差变化则会导致裂纹断裂;此外,地基变动、地震等自然现象还可能引发文物倾斜甚至倒塌风险。



图8 石质文物病害

(2) 木构文物病害(表2):廊桥的廊屋部分长期暴露在潮湿的环境中,容易受到真菌、细菌等微生物的侵蚀,导致木材腐朽。因重庆气候特点,木材受到温度变化和湿度变化的影响,容易发生开裂。开裂会使木构件的结构变得不稳定,影响廊桥的整体安全性。木材容易受到木虫、白蚁等昆虫的侵害,导致木材被蛀食,从而使木构件的强度减弱,影响廊桥的使用寿命(图9)。



图9 木构文物病害

表2 木构廊桥病害分析

病害类型	现象描述	劣化机理
表面变化	褪色、湿块、变色、污垢	化学成分、太阳辐射、雨水、环境温度
	开裂	木材各向异性、湿热气候
	变形	木材各向异性、湿热气候
机械损伤	局部破损、坑洞凹蚀	各向异性、人为磨损、化学成分、湿热气候
	虫蛀	表面虫眼、内部中空
腐朽	菌腐、霉腐、金属腐蚀	化学成分、湿热气候、铁构件
	生物着生	苔藓滋生、植物依附、真菌生长

(3) 砖瓦文物病害:廊桥建筑中的砖瓦,同样面临多重病害威胁,主要包括自然风化导致的材质疏松与剥落;生物侵蚀,如植物根系渗透、苔藓附着及动物蛀蚀加剧损伤;化学腐蚀源于酸雨、污染物质引起的变质与色变;物理损伤则涉及外力冲击造成的裂纹、破碎;盐分结晶于砖瓦内、外部引发的膨胀开裂;还有长期日晒、化学作用导致的褪色与变色问题;此外,基础沉降、地震等引起的结构性损伤,以及风蚀区域中风沙对表面的持续磨损,均为砖瓦文物保护需关注的重要方面(图10)。



图10 砖瓦文物病害

廊桥通常位于人口密集的地区或旅游景点,如不定期安全检查,更新消防设施和安防设施,可能会存在火灾、人为破坏等安全隐患。对廊桥的消防设施和安防设施进行调查和统计也是非常必要的,

有助于确保公共安全、预防火灾事故、应对突发事件、提升管理效率和规范管理措施。在48座梁桥中,有32座缺乏必要的消防措施,42座未配备有效的安防设施,见表3。这一情况无疑给这些历史遗产的安全带来了严峻挑战。

表3 消防设施和安防设施调查
Table 3 Survey of fire protection and security facilities

调查类别	描述	占比/%
消防设施	无消防措施	69
	1处消防栓	2
	1个灭火器	11
	2个灭火器	8
	3个灭火器	2
	4个灭火器	4
	6个灭火器	2
	8个灭火器 1处消防栓	2
安防设施	无安防措施	90
	1处监控	2
	2处监控	4
	4处监控	4

针对重庆廊桥的消防安防问题,建议加强消防设施建设尽量在每一座廊桥附近增设消防栓、灭火器等消防设备,并定期检查设备的有效性,确保在

紧急情况下可以迅速响应。同时,考虑到木质结构的易燃性,可考虑使用防火涂料对廊桥进行处理,提高其防火性能;完善安防监控系统:安装监控摄像头和报警装置,特别是在夜间,通过实时监控来预防险情的发生。同时,建立快速响应机制,确保在发现异常情况时能够及时处理;开展定期检查与维护,组织专业团队对廊桥进行定期的安全检查,包括结构稳定性、消防设施有效性及安防设备运行状况,及时发现并解决潜在的安全隐患;建立应急预案:制定详细的应急预案,包括火灾、自然灾害等情况下的紧急疏散和救援措施,确保在突发事件中能够有序应对,最大限度减少损失。

3.3 重庆廊桥保护策略

结合廊桥现状,对重庆现存廊桥实物进行分类分级保护,按照文物保护工程标准将廊桥保护工程分类:保养维护工程,对文物的轻微损害所作的日常性、季节性的养护。抢险加固工程,指文物突发严重危险时,由于时间、技术、经费等条件的限制,不能进行彻底修缮而对文物采取具有可逆性的临时抢险加固措施的工程。修缮工程,指为保护文物本体所必需的结构加固处理和维修,包括结合结构加固而进行的局部复原工程,主要病害及其应对措施见表4。

表4 廊桥结构病害及处理措施
Table 4 Structural damage and treatment measures of covered bridges

结构部位	病害分析	处理措施
桥墩、桥台、踏跺	植物侵害	清除后手工刷洗干净,使用防霉除菌去污剂进行进一步清洗,防止苔藓等有害植物短期内再生
	石质表面风化	经过表面清理、脱盐、干燥后,再采用Remmers300岩石增强剂(纯硅酸乙酯,约99%)进行局部岩面增强
主梁	挠度过大	在梁内埋设碳纤维板或型钢加固;或者更换构件
	糟朽、虫蛀	仅梁端损坏严重时采用端部开卯口嵌接、并用改性环氧胶粘牢,再加铁箍箍紧;其余部位则采取挖补、包镶并用耐水胶粘牢的方式
	裂缝	裂缝宽度小于梁宽或直径的1/3时,用木条和耐水胶嵌补严实再加两道铁箍箍紧;裂缝宽度过大时,可在梁内埋设碳纤维板或型钢加固;或者更换构件
桥面木板	糟朽、虫蛀、破损	更换构件
梁架木垫板	糟朽、虫蛀、破损	更换构件
柱、梁、枋、檩等木构件	开裂	裂缝宽度小于截面尺寸的1/3时,用木条和耐水胶嵌补严实,若裂缝宽度大于3cm需再加两道铁箍箍紧;裂缝宽度过大时,可外加型钢加固;或者更换构件
	糟朽、虫蛀、破损	仅构件端部损坏严重时采用端部开卯口嵌接或墩接、并用改性环氧胶粘牢,再加铁箍箍紧的方式;其余部位则采取挖补、包镶并用耐水胶粘牢的方式
	构件规格尺寸太小或不合理	更换构件
	破损严重	更换构件
	断裂	用改性环氧结构胶粘牢、再加铁箍箍紧,或更换构件
	缺失	补配构件
	椽	糟朽、破损严重或厚度太薄
瓦屋面	屋面变形、溜瓦、瓦件破损	更换构件 原材料、原规格瓦件重铺屋面

通过对重庆48座廊桥的细致评估,我们发现它们的现状各异,保护与修缮的需求亦各不相同。评估结果显示,有22座廊桥保存状况良好,无需进行大规模修缮,仅需定期进行常规的保养和维护,以保持其原有风貌,确保其长期稳定。然而,仍有14座廊桥显示出一定的轻微残损迹象,需要进行保养维护工程,这包括清理植被、修补轻微损伤、更换不当改建构件等,旨在延缓其自然老化过程,防止小问题演变成大隐患。更为紧迫的是,有3座廊桥存在结构性安全隐患,需要立即开展抢险加固工程,以确保其结构安全,防止突发性倒塌事故的发生。最后,9座廊桥则面临着较为严重的损坏,需要进行全面的修缮工程,以恢复廊桥的原始功能和风貌外观。作为非物质文化遗产的廊桥营造技艺传承至今,是廊桥价值的重要组成部分。在保护工程中延续当地建桥习俗和仪式,面向公众普及宣传文物保护理念和知识,激发当地民众的文化归属感和认同感。

4 结 论

(1) 重庆地区48座廊桥包括单跨木梁木廊桥、石墩木梁木廊桥、石拱木廊桥三类,多分布于渝东南区域,约68%保存状态良好,但存在诸多问题。病害方面,石质结构存在变形开裂、石块缺损等问题,木构面临腐朽、开裂、虫蛀等威胁,砖瓦则受风化、生物侵蚀等影响。

(2) 针对重庆廊桥,提出了相应保护策略。实施分类分级保护,对不同保存状况的廊桥采取保养维护、抢险加固、修缮工程等措施;注重非遗技艺活态传承,在保护工程中延续建桥习俗,由传承人主持工程以传承传统工艺;结合乡村振兴活化利用,挖掘廊桥价值,开展区域主题游径建设,赋能周边乡村产业发展。

(3) 当前研究存在不足,如数字化保护的跨区域标准与长效机制不完善,复杂荷载下廊桥动态响应机理研究待深化,重庆廊桥病害治理的针对性技术与活态传承落地机制需细化。未来可聚焦构建全国统一的廊桥数字化保护标准、揭示多场耦合作用下结构失效机理、研发重庆地区病害精准修复技术,完善“保护-传承-利用”一体化体系。

参考文献:

[1] 张成,关瑞明.木拱廊桥和虹桥的比较研究[J].福建建

筑,2007(4):4-7.

Zhang C, Guan R M. A comparative study of wooden arch covered bridges and Hongqiao bridges[J]. Fujian Architecture & Construction, 2007(4):4-7. (in Chinese)

[2] Yang Y, Nakamura S, Chen B, et al. Traditional construction technology of China timber arch bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 58: 777-784.

[3] 张可永.地域文化视野下的闽东木拱廊桥文化生态[J].福州大学学报(哲学社会科学版),2017,31(4):17-21.

Zhang K Y. The cultural ecology of wooden arch covered bridges in eastern Fujian from the perspective of regional culture[J]. Journal of Fuzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2017, 31(4):17-21. (in Chinese)

[4] 张德俐,肖飞.加强木拱廊桥文化遗产保护与传承[N].人民政协报,2009-12-12(A02).

Zhang D L, Xiao F. Strengthening the protection and inheritance of the cultural heritage of wooden arch covered bridges[N]. CPPCC Daily, 2009-12-12 (A02). (in Chinese)

[5] 陈发明.闽浙木拱廊桥的保护与传承[J].艺术科技,2016,29(7):139.

Chen F M. Protection and inheritance of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Art Science and Technology, 2016, 29(7):139. (in Chinese)

[6] 陈晓悦,姚李燕,马英,等.闽浙木拱廊桥空间分布特征及影响因素[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(6):1163-1169.

Chen X Y, Yao L Y, Ma Y, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(6):1163-1169. (in Chinese)

[7] 程霏,肖东.闽浙贯木拱廊桥与湘桂侗族风雨桥比较研究[J].古建园林技术,2017(2):22-27.

Cheng F, Xiao D. A comparative study of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang and Dong people's wind-rain bridges in Hunan and Guangxi[J]. Technology of Ancient Building and Garden, 2017(2):22-27. (in Chinese)

[8] 贾晓蕾.风对廊桥的影响[D].重庆:重庆交通大学,2015.

Jia X L. The influence of wind on covered bridges[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

[9] 鲁晓敏,吴卫平.中国廊桥跨越两千年的交通图腾

- [J]. 中国国家地理, 2012(5): 48.
- Lu X M, Wu W P. China's covered bridges: transportation totems spanning two thousand years[J]. Chinese National Geography, 2012(5): 48. (in Chinese)
- [10] 杨艇艇. 连续刚构景观廊桥结构研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- Yang T T. Structural research on continuous rigid frame landscape covered bridges [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [11] 罗华莹. 桥梁美学设计方法探索与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- Luo H Y. Exploration and research on bridge aesthetic design methods[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [12] 朱发文. 鄂西南传统木廊桥研究——以桂花桥、姚家湾桥、永顺桥等“三桥”为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- Zhu F W. Research on traditional wooden covered bridges in southwestern Hubei-taking "three bridges" such as Guihua Bridge, Yaojiawan Bridge and Yongshun Bridge as examples [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 林夏斌. 闽东北廊桥景观分析与评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- Lin X B. Analysis and evaluation of covered bridge landscapes in northeastern Fujian[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [14] Sloane E. The first covered bridge in America[J]. Geographical Review, 1959, 49(3): 315-321.
- [15] 缪小龙. 风起水涌 廊桥遗殇——闽浙木拱廊桥抗风防洪研究[J]. 华中建筑, 2012, 30(10): 174-179.
- Miao X L. Wind and water surges, the remains of covered bridges-research on wind and flood resistance of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Huazhong Architecture, 2012, 30(10): 174-179. (in Chinese)
- [16] 茅以升. 中国古桥技术史[M]. 北京: 北京出版社, 1986.
- [17] 唐寰澄. 中国木拱桥[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] Knapp R G, Miller T E, Liu J. China's corridor bridges: Heritage buildings over water[J]. Built Heritage, 2020, 4(2): 1-19.
- [19] 赵兵, 苏林宁, 吴丽珠, 等. 在海西发展背景下闽浙木拱廊桥保护对策研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2011, 27(5): 94-96.
- Zhao B, Su L N, Wu L Z, et al. Research on protection countermeasures of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang under the background of West Coast development[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2011, 27(5): 94-96. (in Chinese)
- [20] Chen S J, Yang Y, Shen Z J, et al. Reconstruction of Min-Zhe wooden arch bridges and its legitimization as tangible and intangible heritage[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2022, 16(12): 1779-1796.
- [21] 吴明桦. 闽浙木拱廊桥泄洪系统的设计[J]. 浙江水利水电学院学报, 2018, 30(2): 33-37.
- Wu M H. Design of flood discharge system for wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2018, 30(2): 33-37. (in Chinese)
- [22] 韩宜丹, 淳庆. 强风作用下木拱廊桥的风振响应分析——以文兴桥为例[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(5): 102-112.
- Han Y D, Chun Q. Wind-induced vibration response analysis of wooden arch covered bridges under strong wind-taking Wenxing Bridge as an example[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, 33(5): 102-112. (in Chinese)
- [23] Ahmed T, Rehman K, Shafique M, et al. Local-scale integrated seismic risk assessment using satellite data and field information in Northern Pakistan[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2024, 38(5): 1897-1918.
- [24] 李娜, 张广来, 张宁. 中国城市韧性水平综合评价及区域异质性分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(19): 117-120.
- Li N, Zhang G L, Zhang N. Comprehensive evaluation of urban resilience level in China and analysis of regional heterogeneity [J]. Statistics and Decision, 2023, 39(19): 117-120. (in Chinese)
- [25] Ming Y, Ding M, Ren H, et al. Geological hazard vulnerability assessment based on cloud model in Zhejiang Province, China[J]. Natural Hazards, 2025, 121(10): 11975-11995.
- [26] 刘明晖, 虞乾魁, 孟迪. 木拱廊桥的地震响应分析及风荷载特性研究[J]. 建筑与文化, 2017(10): 46-48.
- Liu M H, Yu Q K, Meng D. Seismic response analysis and wind load characteristics research of wooden arch covered bridges[J]. Architecture & Culture, 2017(10): 46-48. (in Chinese)
- [27] 龚迪发. 福建木拱桥调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [28] 缪小龙. 闽浙木拱廊桥防火研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(12): 945-948.
- Miao X L. Fire prevention research on wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang [J]. Fire Science

- and Technology, 2009, 28(12): 945-948. (in Chinese)
- [29] 陈舒洁, 刘永健, 秋原雅人, 等. 基于文化遗产价值的闽浙木拱廊桥防火策略[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(6): 163-174.
Chen S J, Liu Y J, Akihara M, et al. Fire prevention strategies for wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang based on cultural heritage value[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(6): 163-174. (in Chinese)
- [30] 任海龙. 大空间古建筑火灾探测方法研究[J]. 武警学院学报, 2012, 28(4): 58-60.
Ren H L. Research on fire detection methods for large-space ancient buildings[J]. Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy, 2012, 28(4): 58-60. (in Chinese)
- [31] 张文裕. 木拱廊桥消防保护策略研究[J]. 福建建筑, 2024(5): 93-96.
Zhang W Y. Research on fire protection strategies for wooden arch covered bridges[J]. Fujian Architecture & Construction, 2024(5): 93-96. (in Chinese)
- [32] 余平伟, 杨婉清, 吴晶珂, 等. 高压细水雾灭火系统在古建筑消防设计中的应用探讨[J]. 给水排水, 2021, 57(7): 89-92, 101.
Yu P W, Yang W Q, Wu J K, et al. Discussion on the application of high-pressure water mist fire extinguishing system in fire protection design of ancient buildings[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(7): 89-92, 101. (in Chinese)
- [33] 张子龙, 刘芳, 李宏文, 等. 文物建筑内移动式高压细水雾灭火装置设计参数研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(7): 990-996.
Zhang Z L, Liu F, Li H W, et al. Research on design parameters of mobile high-pressure water mist fire extinguishing devices in cultural relic buildings[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(7): 990-996. (in Chinese)
- [34] 刘慧敏, 郑淑健, 李晨希, 等. 文物古建筑高压细水雾灭火系统应用探讨[J]. 建设科技, 2024(17): 74-76.
Liu H M, Zheng S J, Li C X, et al. Discussion on the application of high-pressure water mist fire extinguishing system in ancient cultural relic buildings[J]. Construction Science and Technology, 2024(17): 74-76. (in Chinese)
- [35] 尚大军, 段新芳, 杨中平. 应力波无损检测技术及其在木结构古建筑保护中的应用[J]. 世界林业研究, 2008(2): 44-48.
Shang D J, Duan X F, Yang Z P. Stress wave non-destructive testing technology and its application in the protection of ancient wooden structures[J]. World Forestry Research, 2008(2): 44-48. (in Chinese)
- [36] 张艳霞, 王彦, 张国军, 等. 应力波和阻抗仪技术在古建筑木结构检测中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 145-151, 157.
Zhang Y X, Wang Y, Zhang G J, et al. Application of stress wave and impedance meter technology in the detection of ancient building wooden structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(1): 145-151, 157. (in Chinese)
- [37] 孙晓楠, 岳小泉, 林睿睿, 等. 基于Surfer软件的木横梁腐朽状态应力波无损检测技术[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(3): 90-95.
Sun X N, Yue X Q, Lin R R, et al. Stress wave non-destructive testing technology for decay status of wooden beams based on Surfer software[J]. Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(3): 90-95. (in Chinese)
- [38] 孙丽萍, 许述正, 魏喜雯, 等. 应力波木材无损检测技术应用及研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 39-43.
Sun L P, Xu S Z, Wei X W, et al. Application and research progress of stress wave non-destructive testing technology for wood[J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 39-43. (in Chinese)
- [39] 蒋昊, 蔺陆军, 郑红平, 等. 基于空气耦合式超声波的锯材节子缺陷检测[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 46-49.
Jiang H, Lin L J, Zheng H P, et al. Detection of knot defects in sawn timber based on air-coupled ultrasound[J]. China Wood Industry, 2019, 33(1): 46-49. (in Chinese)
- [40] Ge Z D, Chen L X, Luo R, et al. The detection of structure in wood by X-Ray CT imaging technique[J]. Bioresources, 2018, 13(2): 3674-3685.
- [41] Zhang M, Xie X R, Zhang D, et al. Nondestructive identification of wood species by terahertz spectrum[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2023, 65(5): 1117-1121.
- [42] 郑益锋, 王宇航, 林睿睿, 等. 应力波和超声波检测在木拱廊桥安全评估中的应用[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 64-70.
Zheng Y F, Wang Y H, Lin R R, et al. Application of stress wave and ultrasonic testing in safety assessment of wooden arch covered bridges[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2024, 40(1): 64-70. (in Chinese)
- [43] 董智辉. 廊桥及其文化的数字化传承和保护[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(18): 11-12.
Dong Z H. Digital inheritance and protection of covered

- bridges and their culture[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2020(18): 11-12. (in Chinese)
- [44] 邓华. BIM技术在福建木拱廊桥遗产信息化保护中的应用[J]. 文化产业, 2021, (32): 116-118.
Deng H. Application of BIM technology in information protection of Fujian wooden arch covered bridge heritage[J]. Culture Industry, 2021, (32): 116-118. (in Chinese)
- [45] 郑晓平, 陈雷, 黄培量, 等. 泰顺木拱廊桥木构件材质性能检测分析研究[J]. 东方博物, 2021, (4): 108-114.
Zheng X P, Chen L, Huang P L, et al. Detection and analysis of material properties of wooden components of Taishun wooden arch covered bridges[J]. Oriental Collection, 2021, (4): 108-114. (in Chinese)
- [46] 韩伊伟, 孙睿, 林志聪, 等. 基于Citespace的木拱桥研究进展[J]. 四川建筑, 2024, 44(5): 107-110, 113.
Han Y W, Sun R, Lin Z C, et al. Research progress of wooden arch bridges based on Citespace[J]. Sichuan Architecture, 2024, 44(5): 107-110, 113. (in Chinese)
- [47] 杨志勇. 数字技术语境中晋域古建筑遗产保护[J]. 建筑与文化, 2017, (10): 237-238.
Yang Z Y. Protection of ancient architectural heritage in Shanxi in the context of digital technology[J]. Architecture & Culture, 2017, (10): 237-238. (in Chinese)
- [48] 胡葛福. 廊桥保护的新思路: 构建廊桥数字博物馆[C]//中国古桥研讨会暨海峡两岸古桥学术交流会, 福州: 福建省公路学会, 2009.
Hu G F. A new idea for covered bridge protection: constructing a digital museum of covered bridges[C]//Chinese Ancient Bridge Symposium and Cross-Strait Ancient Bridge Academic Exchange Conference, Fuzhou: Fujian Highway Society, 2009. (in Chinese)
- [49] 徐金虎, 陈双双. 数字赋能温州廊桥文化遗产的价值、挑战与路径[J]. 嘉应文学, 2024(15): 128-131.
Xu J H, Chen S S. Value, challenges and paths of digital empowerment for the inheritance of Wenzhou covered bridge culture[J]. Jiaying Literature, 2024(15): 128-131. (in Chinese)
- [50] 鹿国伟. 模因视阈下泰顺廊桥文化的数字化设计转型策略研究[J]. 鞋类工艺与设计, 2024, 4(13): 124-126.
Lu G W. Research on the digital design transformation strategy of Taishun covered bridge culture from the perspective of meme[J]. Shoemaking Technology and Design, 2024, 4(13): 124-126. (in Chinese)
- [51] 夏智勇. 数字化技术在不可移动文物保护中的应用——以宁德市文物保护为例[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2024(16): 48-51.
Xia Z Y. Application of digital technology in the protection of immovable cultural relics-taking cultural relic protection in Ningde City as an example[J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2024(16): 48-51. (in Chinese)
- [52] 赖晨. 闽西廊桥文旅资源的保护与开发-以福建宁化县为中心[J]. 重庆第二师范学院学报, 2023, 36(3): 10-15, 127.
Lai C. Protection and development of cultural and tourism resources of covered bridges in western Fujian-centered on Ninghua County, Fujian[J]. Journal of Chongqing University of Education, 2023, 36(3): 10-15, 127. (in Chinese)
- [53] 张鹰. 闽浙木拱廊桥的建构技术解析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 917-922.
Zhang Y. Analysis of the construction technology of wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 917-922. (in Chinese)
- [54] 龙杰烨. 古木拱廊桥编织型主拱结构选型及参数化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
Long J Y. Selection and parametric design of woven main arch structure of ancient wooden arch covered bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)
- [55] 韦锦城. 福建木拱廊桥造型结构的源流与发展脉络[J]. 莆田学院学报, 2020, 27(4): 66-71.
Wei J C. Origin and development of the shape and structure of Fujian wooden arch covered bridges[J]. Journal of Putian University, 2020, 27(4): 66-71. (in Chinese)
- [56] 曹春平. 闽浙木拱桥[J]. 中国名城, 2009(8): 36-40.
Cao C P. Wooden arch bridges in Fujian and Zhejiang[J]. China Ancient City, 2009(8): 36-40. (in Chinese)
- [57] Liu Y. Building woven arch bridges in southeast China: Carpenter's secrets and skills[J]. Construction History, 2019, 34(2): 17-34.
- [58] 叶灵鹏. 木拱廊桥结构安全性评估方法和不落架加固方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Ye L P. Research on structural safety assessment methods and non-falling frame reinforcement methods of wooden arch covered bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [59] Yang Y, Nakamura S, Chen B, et al. Mechanical behavior of Chinese woven timber arch bridges[J]. Engineering Structures, 2019, 195: 340-357.
- [60] 孟雨泽, 宋郁民, 王思颖, 等. 虹桥式木拱桥结构力学特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 226-233.

- Meng Y Z, Song Y M, Wang S Y, et al. Analysis of structural mechanical properties of Hongqiao-style wooden arch bridges[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 226-233. (in Chinese)
- [61] 曹春平. 闽浙木拱廊桥[J]. 福建建筑, 2009(9): 9-12.
Cao C P. The Timber Arch Lounge Bridges in Fujian and Zhejiang Provinces[J]. Fujian Construction, 2009(9): 9-12. (in Chinese)
- [62] 张铮, 张博恒, 缪远, 等. 闽浙木拱廊桥结构研究综述[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(4): 307-313, 368.
Zhang Z, Zhang B H, Miao Y, et al. A review of structural research on wooden arch covered bridges in Fujian and Zhejiang[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2022, 20(4): 307-313, 368. (in Chinese)
- [63] 杨艳, 陈宝春, 纪丹琳. 闽浙木拱桥实地调查研究[C]//闽浙木拱廊桥保护利用与申遗学术研讨会, 福建:福建省文物局, 2013.
Yang Y, Chen B C, Ji D L. Field investigation and research on wooden arch bridges in Fujian and Zhejiang [C]//Academic Seminar on Protection, Utilization and Application for World Heritage of Wooden Arch Covered Bridges in Fujian and Zhejiang, Fujian: Fujian Provincial Cultural Relics Bureau, 2013. (in Chinese)
- [64] Dai G, Ge H, Su M, et al. Century-old covered bridge with cantilever beams in China[J]. Structural Engineering International, 2017, 27(2): 255-262.
- [65] 李奕达. 多跨连续梁景观廊桥运营期变形及应力研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
Li Y D. Research on deformation and stress of multi-span continuous beam landscape covered bridges during operation [D]. Xian: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [66] Widjajakusuma J, Wijaya H. Effect of geometries on the natural frequencies of pratt truss bridges[J]. Procedia Engineering, 2015, 125: 1149-1155.
- [67] 欧加加. 木拱廊桥受力机理的有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Ou J J. Finite element analysis of the mechanical mechanism of wooden arch covered bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [68] 王柏生, 张亮, 欧加加, 等. 景宁东坑下桥荷载试验[J]. 古建园林技术, 2014(2): 28-30, 59.
Wang B S, Zhang L, Ou J J, et al. Load test of Dongkengxia Bridge in Jingning[J]. Technology of Ancient Building and Garden, 2014(2): 28-30, 59. (in Chinese)
- [69] 吕伟荣, 陈智, 王智丰, 等. 大跨木拱廊桥的数值模拟与内力分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(8): 86-89.
Lyu W R, Chen Z, Wang Z F, et al. Numerical simulation and internal force analysis of long-span wooden arch covered bridges[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(8): 86-89. (in Chinese)
- [70] 安燃, 吴春利. 木拱廊桥成桥状态下结构力学行为分析[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 83-86.
An R, Wu C L. Structural mechanical behavior analysis of wooden arch covered bridges in completed state[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 83-86. (in Chinese)
- [71] 张亮. 木拱廊桥受力机理的模型试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Zhang L. Model test research on the mechanical mechanism of wooden arch covered bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [72] 季光耀. 基于结构几何构造分析木拱廊桥结构特性[J]. 丽水学院学报, 2014, 36(2): 46-50.
Ji G Y. Analysis of structural characteristics of wooden arch covered bridges based on structural geometric construction[J]. Journal of Lishui University, 2014, 36(2): 46-50. (in Chinese)
- [73] 淳庆, 胡石. 泰顺廊桥-文兴桥结构残损分析及修缮探讨[J]. 建筑技术, 2011, 42(6): 495-498.
Chun Q, Hu S. Structural damage analysis and repair discussion of Taishun covered bridge - Wenxing Bridge [J]. Architecture Technology, 2011, 42(6): 495-498. (in Chinese)
- [74] 纪丹琳. 闽浙木拱桥受力性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
Ji D L. Experimental study on mechanical properties of wooden arch bridges in Fujian and Zhejiang [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014. (in Chinese)
- [75] 王廷文. 大跨度钢筋混凝土拱式廊桥受力行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Wang T W. Study on mechanical behavior of long-span reinforced concrete arch covered bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [76] 张璇. 基于数值模拟的木拱廊桥抗洪性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhang X. Study on flood resistance performance of wooden arch covered bridges based on numerical simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)