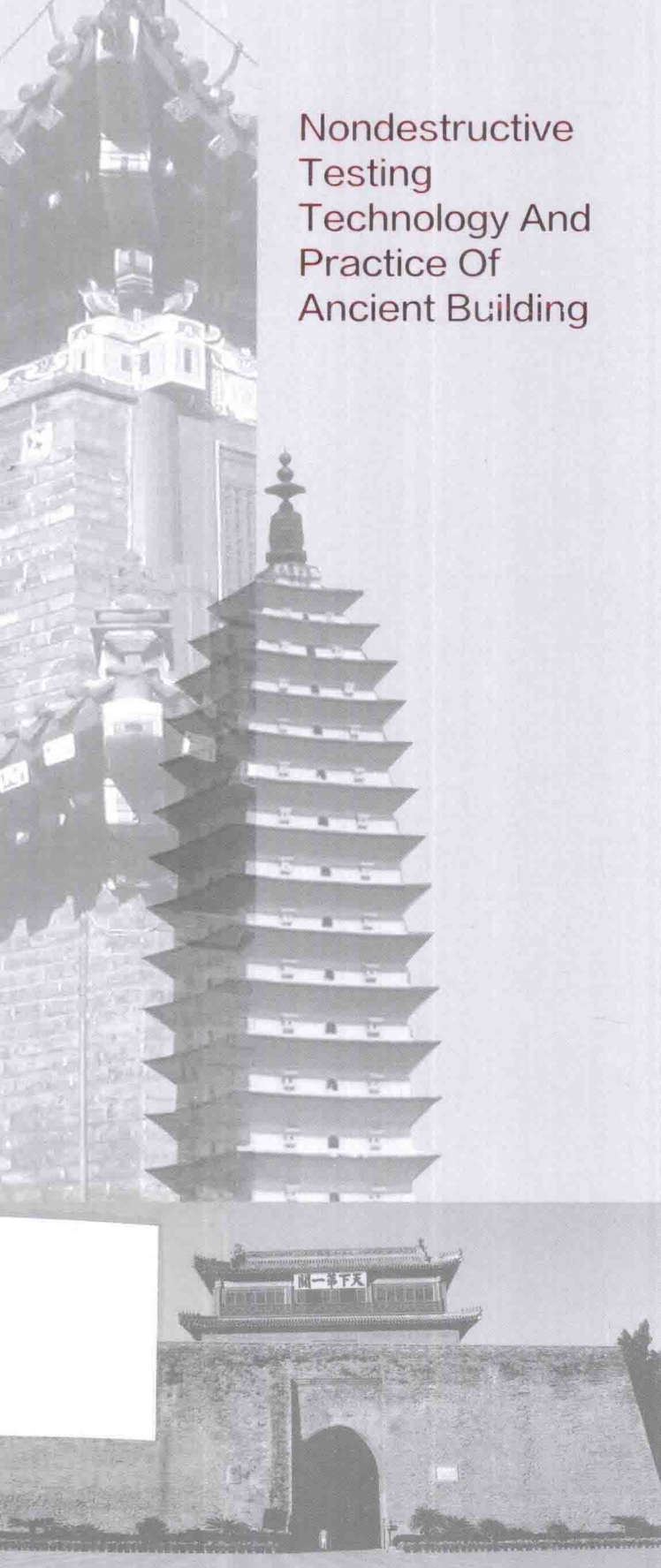




Nondestructive  
Testing  
Technology And  
Practice Of  
Ancient Building

# 古建筑 无损检测技术与工程实践

■ 王占雷 刘国辉 刘晓敬 等著 ■



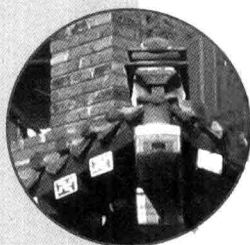
化学工业出版社

# 古建筑

■ 王占雷 刘国辉 刘晓敬 刘波 扈本娜 著 ■

# 无损检测技术与工程实践

Nondestructive  
Testing  
Technology And  
Practice Of  
Ancient Building



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是系统介绍古建筑综合无损检测技术的专著。主要包括：古建筑无损检测的基本问题，无损检测方法的可行性，古建筑综合无损检测技术，综合无损检测技术的工程实践。全书最后附古建筑无损检测技术的推荐导则。

本书既可作为从事古建筑检测工作技术人员的参考书，也可作为高等院校有关专业本科高年级学生和研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

古建筑无损检测技术与工程实践/王占雷，刘国辉，刘晓敬等著. —北京：化学工业出版社，2014.1

ISBN 978-7-122-19159-5

I. ①古… II. ①王…②刘…③刘… III. ①古建筑-无损检验-中国 IV. ①TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 283676 号

---

责任编辑：徐 娟

责任校对：宋 玮

装帧设计：韩 飞

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 10½ 字数 200 千字 彩插 4

2014 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

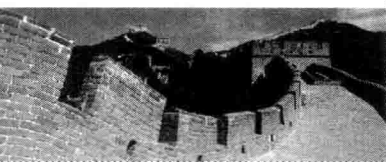
网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：45.00 元

版权所有 违者必究



## 前 言

古建筑是人类文明发展的重要遗产之一，不论是对人类文明史的研究，还是对弘扬民族精神和开发旅游事业都有着十分重要的意义。随着社会的发展、人类物质文明和精神文明的提高，将现存古建筑作为世界遗产加以保护已引起人们的广泛关注。

在漫长的岁月里，古建筑经受了不同自然条件下的侵蚀和人类活动的破坏作用，有的因年久失修，濒临被完全毁灭的危险，亟待抢修。为做好古建筑的抢修和现状评估工作，首先要对古建筑进行全面、彻底的检测，查明古建筑体内威胁其安全的缺陷和隐患，以此为修复和评价提供依据。现有的古建筑物检测方法大多数不满足无损检测的要求，并存在采集检测样本少、检测效率低等问题。对此，人们开展了以探地雷达为主的无损检测技术的研究与应用，虽取得了一定的成果，但对每种检测方法的可行性缺乏深入系统的研究，时常存在因方法单一，而影响检测可靠性，或检测到的异常机制不明确，技术方法不规范，并且大多数方法仅停留在定性分析之上，导致其应用领域和检测效果受到了限制。因此，开发适用于古建筑物的无损检测技术，使其在探明隐患的同时又确保对古建筑物本身不造成破坏作用，阐明各种无损检测技术应用于古建筑检测中的可行性，建立针对不同古建筑的综合无损检测模式及其异常判别方

法是进行古建筑保护工作中亟待解决的一个重要问题。

笔者曾先后承担了河北省科技厅科技发展指导计划项目（编号：07215699），河北省住房和城乡建设厅建设科学技术研究计划项目（编号：2007-132），开展了“古建筑无损检测技术的试验研究”工作。以山海关长城、涿州古永济桥、鸡鸣驿古城等多项全国重点文物保护单位为对象，分别选择不同损坏程度的古城墙体、古城台、古桥体、古建筑地基及其地下洞穴的典型地段，开展探地雷达、面波勘探（检测）、高密度地震映像、常时微动和回弹测试方法的有效性测试研究，研究每种检测方法的适用条件和可靠性，并进行了古建筑综合无损检测模型及其异常解释方法的研究，获得以下研究成果。

（1）首次系统地对不同古建筑物各种破损缺陷类型开展无损检测技术的物质基础进行了研究，从理论上阐明了利用现有无损检测技术应具备的物理前提条件、可行性及其检测精度。

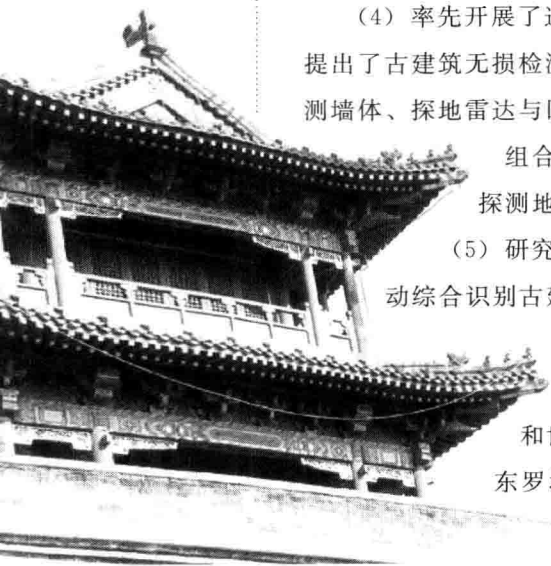
（2）通过对已知典型古建筑部位进行不同材质和不同缺陷类型的物性测试工作，初步获取和掌握了不同材质和不同缺陷类型的电阻率、介电常数、弹性波速以及抗压强度等参数，为各种方法技术的研究奠定了物性基础。

（3）通过回弹法测定古城墙砖强度的研究，分析了回弹值  $N$  和古城墙砖抗压强度  $R_N$  之间的相关性，经数据回归分析，首次建立了用于古建筑手工青砖回弹测强公式。

（4）率先开展了适合不同古建筑物的综合无损检测技术研究，首次提出了古建筑无损检测的综合检测模式，即探地雷达与面波勘探组合检测墙体、探地雷达与回弹测试组合检测墙外砌砖层、面波勘探与常时微动组合检测古建筑稳定性以及面波勘探与地震映像法组合探测地下古洞穴四组综合检测模式。

（5）研究制定利用探地雷达、面波、地震映像法、常时微动综合识别古建筑物损坏、稳定性及缺陷程度的判别标准。

该研究课题成果已在数项古建筑保护工程中推广应用，其中多项为国家重大全国重点文物保护单位和世界文化遗产地的保护修缮工程，如：山海关关城及东罗城 6000m 城墙修复工程，怀来县鸡鸣驿城抢修保护工程，清东陵的景陵圣德神功碑楼修复工程等，对



古建筑维修保护工作起到技术指导作用，成果的推广应用对于开展同类或相似探测任务具有很好的借鉴性和指导意义，带来显著的经济效益、环境效益和社会效益。另外，该研究成果获得了 2011 年度河北省科学技术进步三等奖。目前还未见系统地介绍古建筑综合无损检测技术的专著。

书中所列各项试验研究与实践工作的完成，离不开河北省建筑科学研究院和石家庄经济学院的项目组成员的辛勤劳动和付出，特别是王占雷、刘国辉、刘波、崔峰、徐晶、孙士辉、王猛、刘晓敬、扈本娜等人，并得到了河北省文物局、河北省古代建筑保护研究所、山海关区文物局、怀来县鸡鸣驿城抢修保护工程指挥部办公室等单位的大力支持和热情帮助！本书的问世，也得到了河北省建筑科学研究院和石家庄经济学院领导的大力支持，在此一并感谢。

本书由王占雷、刘国辉、刘晓敬、刘波和扈本娜共同完成，并由王占雷和刘国辉负责全书的统稿工作。由于该领域的有关研究内容仍处于探索、完善阶段，书中一定还有许多商榷甚至错误之处，期待读者对本书不吝赐教指正。

著 者

2013 年 10 月

# 目 录

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 第 1 章 | 引言 //                    | 1   |
| 1.1   | 开展无损检测的意义 //             | 1   |
| 1.2   | 主要内容 //                  | 2   |
| 1.3   | 国内外应用现状 //               | 2   |
| 第 2 章 | 古建筑无损检测的基本问题 //          | 6   |
| 2.1   | 古建筑基本特征 //               | 6   |
| 2.2   | 古建筑破损与缺陷类型 //            | 11  |
| 2.3   | 开展古建筑无损检测的物质基础 //        | 14  |
| 2.4   | 需要解决的关键技术 //             | 18  |
| 第 3 章 | 无损检测技术及其可行性 //           | 20  |
| 3.1   | 探地雷达检测技术 //              | 20  |
| 3.2   | 面波检测技术 //                | 41  |
| 3.3   | 常时微动测试技术 //              | 56  |
| 3.4   | 高密度地震映像法 //              | 69  |
| 3.5   | 回弹测试技术 //                | 76  |
| 第 4 章 | 综合无损检测技术 //              | 84  |
| 4.1   | 综合无损检测技术的提出 //           | 84  |
| 4.2   | 综合检测技术的组合原则 //           | 85  |
| 4.3   | 土质墙体综合检测技术 //            | 87  |
| 4.4   | 砌砖墙体综合检测技术 //            | 91  |
| 4.5   | 地下洞穴综合检测技术 //            | 96  |
| 4.6   | 古建筑物稳定性综合检测技术 //         | 99  |
| 第 5 章 | 综合检测技术的工程实践 //           | 104 |
| 5.1   | 山海关镇东楼至牧营楼区段墙体综合检测评估 //  | 104 |
| 5.2   | 山海关长城（老龙头至靖边楼段）综合检测评估 // | 110 |





|                               |                                      |     |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----|
| 5.3                           | 山海关长城（关城至角山旱门关段）综合检测评估 //            | 116 |
| 5.4                           | 清东陵景陵圣德神功碑楼修复工程遗址结构综合检测、<br>稳定性分析 // | 121 |
| 5.5                           | 张家口大境门城台及东侧部分长城墙体结构综合检测<br>及稳定性分析 // | 126 |
| 5.6                           | 涿州永济桥检测 //                           | 133 |
| 5.7                           | 鸡鸣驿古城地下洞穴检测 //                       | 135 |
| 第 6 章 展望 //                   |                                      | 141 |
| 附录 河北省建筑科学研究院古建筑无损检测技术推荐导则 // |                                      | 142 |
| 参考文献 //                       |                                      | 158 |



# 第 1 章 引 言

## 1.1 开展无损检测的意义

作为人类文明发展的重要遗产之一的现存古建筑，不论是对于人类文明史的研究，还是对于弘扬民族精神和开发旅游事业都有着十分重要的意义。随着社会的发展、人类物质文明和精神文明的提高，保护现存古建筑为主体的世界遗产保护项目引起了人们的广泛关注。我国具有数千年的悠久灿烂文明史，遗留有大批十分珍贵的、反映我国民族发展史、具有重要保存价值的古建筑。在河北省境内就存有数百公里蜿蜒起伏的古老长城，怀来县鸡鸣驿城，张家口大境门，定州古塔，正定大佛寺和赵州桥，清东、西陵，承德避暑山庄，明清皇家建筑群等一大批享誉世界的古建筑。

这些古建筑在漫长的岁月里经受了不同自然条件下的侵蚀和人类活动的破坏作用，有的年久失修，濒临被完全毁灭的危险，亟待抢修。邓小平同志在 1984 年 9 月 1 日发出了“爱我中华，修我长城”的号召，国家已对古长城进行了部分的修复工作，使其得到了保护和修缮。近年来，国家对文物保护工作的重视程度越来越高，资金投入也越来越大，保护项目越来越多，保护工作越来越科学化，对古建筑现状的检测和评估工作也已成为保护工作必不可少的一个环节。

为做好古建筑的抢修和现状评估工作，首先要对古建筑进行全面、彻底的检测，特别需要查明古建筑体内威胁其安全的缺陷和隐患。而现有的古建筑物检测方法多数为表面观察，对其内部缺陷和隐患则采取钻探取芯分析等有损检测方法，这一方面使建筑物受到不同程度的破坏，另一方面检测样本量少，检测效率较低，做出的评价结论很难代表古建筑物的全面、真实情况。为此，人们开展了大量的古建筑的无损检测技术的研究与应用。现有的以探地雷达为主



的无损检测方法则存在方法单一,检测异常机制不明确,技术方法不规范,并且大多停留在定性分析之上,使其应用领域和检测效果受到了限制。因此,在深入、系统地研究每种无损检测技术可行性的基础上,开发建立适用于不同古建筑物的无损综合检测技术,使其探明潜在隐患的同时又能对建筑物本身不产生破坏作用,建立针对不同古建筑检测任务的综合无损检测模型及其异常解释方法是进行古建筑保护的必然选择,无损检测的应用必将有力推动我国古建筑保护事业的快速发展。

## 1.2 主要内容

本书较系统地介绍了古建筑物的无损检测技术物质基础,技术的有效性和可行性,各种方法的适用条件及范围,参数的设置与选择,不同古建筑病害对应的综合异常图像特征,综合探测模式和异常判别方法等,其主要内容如下。

(1) 选择不同损坏程度的古城墙体、古城台,古桥体,古建筑地基及其地下洞穴的典型地段,开展探地雷达、面波勘探、高密度映像、常时微动和回弹测试无损检测方法的有效性测试研究,分析了每种检测方法的适用条件和可靠性,阐述了每种检测方法技术参数和技术指标,规范其检测方法。

(2) 对不同破损程度的古建筑隐患部位对应的各种异常分析了产生的机制,总结出不同古建筑病害对应的综合异常图像特征,并建立相应的综合异常图像的判别标准,提出隐伏病害异常的解释方法。

(3) 在开展各种检测方法的有效性和实用性研究的基础上,提供了针对不同检测任务的综合无损检测方法模式。

## 1.3 国内外应用现状

目前,对于古建筑物缺陷病害的检测和修复已被各国政府和人民所重视,无损检测技术在这方面的应用也被国内外所认可,并取得了一些成果,主要集中在以下几个方面。

### 1.3.1 国外应用现状

(1) 宫殿结构的检测。早在20世纪90年代人们就利用声波法对埃及金字塔进行了检测,取得了较好的效果。之后西班牙地质学家Pérez-Gracia V以Marques de Llió宫殿研究为例,介绍了探地雷达在历史建筑物结构检测中的应用。以S. XV建筑为例,最后进行的改建是在20世纪60年代,通过调查获得的探地雷达数据,可以确定最后一次改建工作的具体影响范围,也探测出建筑物的结构成分和各个部位,并且发现了一些最古老的结构变化和所采用的解



决方案。

(2) 建筑物支柱隐藏缺陷的检测。意大利学者 Binda L 深入研究了雪城大教堂(西西里岛,意大利),以评估该古迹支柱的结构状态。该教堂始于公元前第五世纪一个古希腊神殿,之后它的修建贯穿于以后的几个世纪。中殿的支柱是通过雕刻教堂墙壁得到的,呈现出复杂的损坏和维修情况。最终设计出一套调查方案(包括雷达、声波和超声波测试),旨在保护和修复,这次勘探定位了大多数的缺陷区位置和范围。意大利 Fais S 等人采用低频超声波测试和地震层析成像技术(简称 SLWTT)对意大利某古教堂的支柱进行了检测,目的是提供其保持现存状态,并发现可能的缺陷,如其内部不易被发现的软弱层、塌陷和裂隙。另外为了提高 SLWTT 的输入模型速率,提出一种基于互相关函数计算的新型实验程序,并得到有效应用。

(3) 木材抗拉压能力测试。葡萄牙地质学家 Feio AO 曾采用无损检测技术对栗木的顺纹抗拉和抗压能力进行了检测试验,进而对栗木的强度和刚度做出评估。参与检测的木材标本(分为压缩和拉伸试验)大概有 200 棵,包括最近的锯木(现在市场上随处可见的结构材料)和所谓的古木(属于古建筑构件)。利用无损检测技术测量木材性能的可行性是基于简单的线性回归模型。通过分析新木材和古木材回归模型的推广,结果显示力学的弹性性能和无损检测技术(超声波,阻抗检测仪和木材表面腐朽检测仪)之间存在相关性。新老木材的力学数据呈现为云散点,这说明在木材性能评估方面采用的回归模型不应该仅仅从最近的锯木数据得到证实。因此,在降低了 95% 的回归线置信限的基础上,提出了新老木材样本资料相结合的回归模型。

(4) 对建筑物砌石的检测。世界各地所有保存到今天的古老建筑物砌砖,作为古代文化的历史象征,给人们以深刻的印象。保护和修复文物建筑是现代社会的明确要求。葡萄牙学者 Vasconcelos G 采用超声脉冲速度的方法对花岗岩的力学和物理性能进行了描述(范围大小 0.1~4.0mm 和 0.3~16.5mm),并评估其风化状态。涵盖的力学性能为抗张、抗压强度和弹性模量,物理性质包括密度和孔隙率。为此,具有明显的纵向固有频率的超声波,能够测量不同大小和形状标本的波速。各种因素引起的超声波速度变化也会被提供。此外,与超音波速和花岗岩机械和物理性能的统计相关性也会被提出和讨论。

### 1.3.2 国内应用现状

(1) 长城墙体检测。我国学者王亚清曾采用探地雷达技术在山海关古城墙隐伏缺陷墙体进行探测研究,结果表明,探地雷达技术对古城墙砖体内隐伏空洞裂缝,古城墙底与夯土基础间隐伏塌落和空洞,以及古城墙基础下原状土体陷落等不良缺陷的勘测是可行和有效的,最后以古城墙隐伏缺陷进行标定的图件提交,



为遗址的保护和修缮工作提供了重要参考。崔洪庆教授也曾利用探地雷达技术对平遥古城墙进行了检测,由于古城墙经年代久远以及近代人为破坏,其内部结构发生了很大改变,目前已有部分马道面和墙体出现裂缝,甚至发生了严重的垮塌事故。通过采用探地雷达技术对目标体的检测,分析古城墙雷达剖面异常,得出了城墙内部存在松软土体、孔洞、裂缝等结构缺陷,并给出危险等级,为制订修缮计划提供了可靠的依据。

(2) 石窟维护中的应用。中国地质大学梅宝曾对探地雷达技术在云冈石窟文物保护中的应用展开研究,通过对云冈石窟某窟间墙壁厚度的检测,证明了探地雷达在检测遗址的厚度及其风化程度方面是可行和有效的,最后将标定的厚度以三维图件提交,为遗址的保护和修缮工作提供了地质参考。

(3) 古城台的检测。河南省登封市告城镇是我国现存最古老的天文台,是世界上现存较早天文科学建筑物,现存的部分已被列为国家重点文物保护单位。因年久失修内部出现裂痕缺陷。中国地质大学钱荣毅和他的研究生汪春香采用探地雷达技术完成了登封观星台的现场数据采集、数据处理工作,优化了登封观星台数据处理的流程。并综合分析登封观星台的探地雷达资料和内部结构情况,对可能存在的裂缝、空洞等隐患进行分析和识别,总结了其在时间剖面上的特征,为今后的古建探测工作提供一定的依据。

(4) 秦始皇陵的检测研究。秦始皇陵考古研究已取得大量成果,但对是否存在西墓道、阻排水渠位置及阻水效果等问题还不清楚。周小虎等人应用现代遥感技术在秦始皇陵区对文物遗存进行探测,对航空全色遥感图像和航空高光谱遥感图像进行数据处理、解释,提取文物遗存信息,发现了封土堆热异常,证实了阻排水渠的存在及其阻水效果,确认了西墓道的存在。与地球物理和地球化学的研究结果进行比较,得到的结论完全一致,证实了遥感方法的准确性和有效性。

(5) 古文物保护中的应用。中国地质大学袁加贝等人将面波勘探改造成检测石质文物局部特征的“显微镜”,让面波勘探法成为文物保护者的一把利器,从而更好地为古建修复工作服务;详细介绍了有关瑞雷波传播的基本原理和求解频散方程的两种算法。此外,严聪采用“先高密度电法和瞬态面波勘探、后轻便取芯触探”的方法,成功地使里耶古城遗址护城河的无损定位误差小于0.1m,该方法对地质勘探、文物保护和矿山安全等有重要参考意义。刘枫等人采用红外热像无损探测技术对古楼外立面饰面层黏结缺陷程度以及位置进行确定,通过非接触的无损检测方法,避免了对墙面的二次损坏,准确测出内隐的损坏程度和位置,保证了修缮的彻底性。

以上应用实践尽管取得了肯定性的结论,但其测试数据仍处于定性解释阶



段，各种无损检测技术的有效性、可行性、适用条件性还缺乏实验和论证，古建筑存在的不良隐患所反映的检测信号异常特征还有待于明确等问题亟待深入研究。此外，因采用单一无损检测模式还存在多解性、检测精度低等技术问题。因此，适合开展对古建筑进行检测的快速、准确、规范化的综合无损检测技术模式，是加快我国古建筑物的保护和抢修事业，促进古建筑质量评价水平提高的必由之路。



## 第 2 章

# 古建筑无损检测的基本问题

开展古建筑物的无损检测技术工作，首先要明确所检测对象的特征，针对不同材质、结构、风化、破损和隐患特征，明确是否具备开展无损检测技术的物质基础。因此，基于现有的技术方法应阐明古建筑检测中的以下基本问题。

### 2.1 古建筑基本特征

我国古建筑主要包括古城墙、房屋楼台、古桥、古塔及地下古洞穴等。古建筑涵盖建筑结构、岩土工程等多个领域，涉及的各个领域之间相互影响、相互制约，综合性较强，要求检测人员的专业素质亦较强。

#### 2.1.1 古城墙结构特征

古城墙的结构是根据当地的气候条件而定的，按其构筑材料有如下几种类型。

(1) 版筑夯土墙。版筑夯土墙是我国最早采用的构筑城墙的方法，它是以木板作模，内填黏土或灰石，层层用杵夯实修筑成的。

(2) 土坯垒砌墙。它是用黏土先做成土坯，晒干后再用黏土作胶结材料，像砌砖一样垒砌而成，墙面外再抹一层黄泥作保护层。像嘉峪关的城墙，不少地方均是用土坯垒砌而成。

(3) 青砖砌墙。到了唐代以后，制砖技术有了发展，对城门及附近的城墙，开始采取用砖包砌，内填土的方法来修筑；明清时期，采用双侧或单侧砌砖，内夯土的型制。

(4) 石砌墙。它是用山石砌筑的城墙，山石有的加工成条石，也有的是毛石，这样砌筑的城墙，能承受更大的垂直荷重，抵抗当时各种兵器的袭击，而且能经受大自然的侵蚀。

(5) 砖石混合砌筑。由于山石承重力好，又能抗自然侵蚀，所以长城不少关隘的城门，城墙以及长城许多地段，均以条石作基础。



古建筑墙体的结构特征与现代建筑的结构存在相似性，亦存在不同的结构状况，因为古建筑本身的历史特殊性以及结构材料的特殊性，现代的试验研究受古建筑无法复制性的制约，在对古建筑的试验研究等工作面临一定考验，无法用现代工程对其进行有效的、准确的模拟、评估，因此对古建筑墙体结构特性、物理力学性质研究就必须采用有效的无损检测方法进行，才能得到与古建筑本身相适宜的检测结果。

山海关长城、关城及东罗城古城墙具有古建筑墙体结构典型特征。该古城始建于明初，明嘉靖十四年《山海关志》载：“明朝洪武十四年（公元 1381 年），创建城池关隘，名山海关。”作为明万里长城的起点，历来兵家必争之地，属全国重点文物保护单位，世界文化遗产。山海关关城东、南、西、北城墙各设一门，依次为镇东门、望洋门、迎恩门和威远门。四周城墙总长约 4790m。其中，东城墙为长城主线墙体，镇东门上镇东楼即为举世闻名的“天下第一关”（图 2.1）。

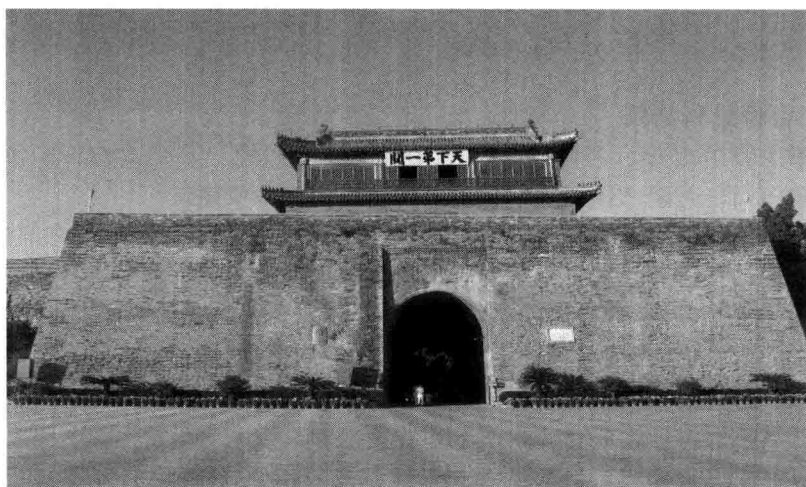


图 2.1 山海关镇东门城门

天下第一关的外侧设东罗城，位于山海关关城东门，即“天下第一关”东侧，为山海关长城的组成部分。东罗城于明万历十二年（公元 1584 年）增建，古代为边防驻兵和进出关口的军事重地。东罗城周长约 2046m。设立南、北、东三门，南门为渤海门，北门为襄龙门，东门为服远门。东罗城南、北墙西端均与关城东墙交汇，南墙西端与关城牧营楼城台相接，北墙西端与关城临闾楼城台相接。

山海关关城至老龙头长城段，走向总体为南北走向，全长约 5km，分布城台 34 个，部分城台已经破坏或损坏严重，南端为著名的长城水上起点——老龙头。本区段京哈铁路横穿长城墙体，形成豁口。



古城墙型为：山海关关城城墙两侧包砌青砖，内由黏土夯筑，城墙厚约10~12m，高8~10m；东罗城城门部分及瓮城城墙亦采用两侧包砌青砖，内侧黏土夯筑结构，东罗城城墙采用外侧砌砖、内侧夯土（图2.2、图2.3）。

山海关关城至老龙头长城墙体采用外侧砌砖、内侧夯土，城台采用四周包砌青砖，内部黏土夯筑。



图 2.2 两侧包砖、内夯土(山海关关城东墙)



图 2.3 外侧砌砖、内侧夯土（东罗城）

### 2.1.2 古桥结构特征

古桥主要是由石、木构成，有三种主要桥体形式，即梁式桥、拱桥、索式桥，在我国周秦时期已经出现，并大量应用于古代桥梁建筑。

(1) 梁式桥。梁式桥是我国最早的人工桥梁，古代梁式桥主要有两种形式，即木梁式桥和石梁式桥。石梁桥的历史最早于战国初期。早期石梁式桥的桥墩为石柱，后来发展成为用石材砌筑的石墩，石梁石墩式桥在宋代取得了辉煌的成就。

(2) 拱桥。我国最迟在东汉已有拱桥。在我国拱桥发展过程中，敞肩石拱桥和联孔石拱桥取得巨大成功。赵州桥是我国现存最古老的敞肩圆弧石拱桥，建成至今已有一千三百多年，敞肩圆弧拱技术应该存在一个较长的发展过程。在古代，由于技术和材料的限制，石拱的单孔跨距有限，因此，在宽阔的河面上建造多孔联拱石桥，是石拱桥发展的必然，自唐代以来，厚墩联拱石桥在我国北方屡有修建，而薄墩联拱桥是我国古代桥梁的独创，其构思十分巧妙，木拱桥的创建年代较晚。

河北省涿州古永济桥和安国古伍仁桥可谓典型古桥结构，二者均为多孔石拱桥。

始建于明万历二年（公元1574年）的涿州永济桥，俗称大石桥，位于涿州城北，距城约1.5公里处。据史料记载，永济桥始建于明万历二年（公元1574年），后因洪水泛滥，河床改道南移，现存永济桥建于清乾隆二十五年（公元1760年）。永济桥横贯北拒马河，桥体总长627.65m。涿州永济桥由主桥、南引



桥、北引桥三部分组成（图 2.4、图 2.5）。主桥为单路九孔石拱桥，主桥长 151.15m，桥面宽 10.7m。南、北引桥为石砌堤形引桥，石堤外砌块石，内夯填渣土，设有石砌涵洞流水。该桥是京广公路上的重要桥梁，直到 1987 年 107 国道扩建，在拒马河永济桥上游 150m 处新建“涿州桥”后，该桥才退役。



图 2.4 涿州古永济桥主桥

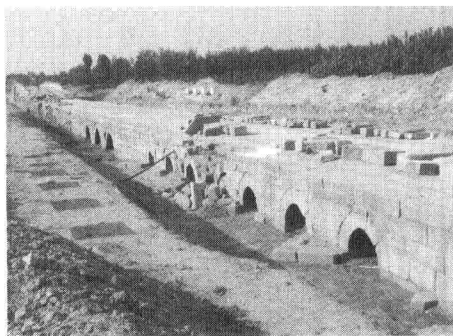


图 2.5 涿州古永济桥引桥

安国古伍仁桥始建于明万历二十六年（公元 1598 年），位于河北省安国市伍仁桥镇南端，古桥南北向跨越磁河。桥体为五孔联拱石桥，桥面、拱券和桥墩之间有铁腰和铁伸连接，桥基采用柏木桩和石板组成，桥南北长 65m（图 2.6）。伍仁桥建成后一直是贯通南北的交通要道，直到 1989 年后才断交，终止其作为主要交通设施的功能。

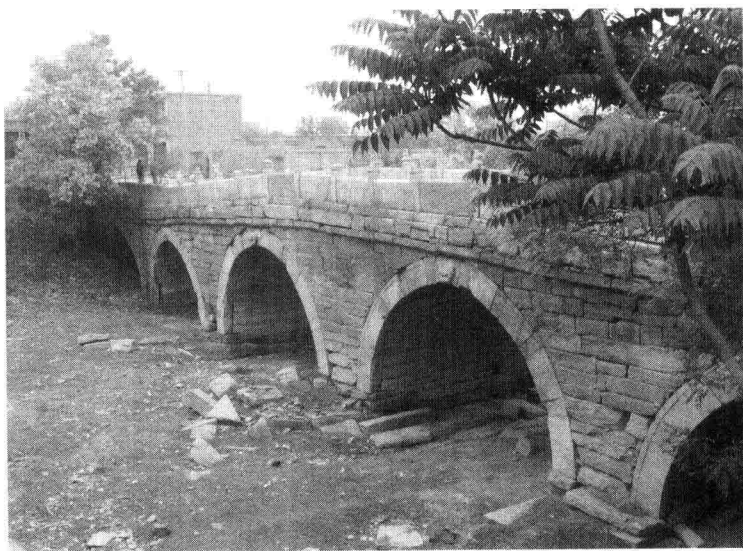


图 2.6 安国古伍仁桥