

古建筑木结构内部缺陷与损伤现场检测技术探讨^{*}

刘 佳, 申克常, 高 炜, 高小旺

(北京三茂建筑工程检测鉴定有限公司, 北京 100088)

[摘要] 提出了古建筑木结构内部缺陷与损伤的若干关键现场检测技术,包括工作流程的建立、无损检测仪器的比较优选、重点检测区域和一般检测区域的划分、不同部位构件无损检测方法的选用,并提出了运用应力波和阻抗仪技术对未被墙体包裹以及部分被墙体包裹的木柱进行无损检测的方法。在此基础上,对某寺庙的古建筑木结构进行了内部缺陷与损伤检测,结果表明该方法可行、数据科学,能准确把握住古建筑木结构的内部缺陷与损伤特点,可以为后续的安全鉴定和抗震鉴定提供可靠的技术参数和依据。

[关键词] 内部缺陷与损伤; 重点检测区域; 无损检测; 应力波; 阻抗仪

中图分类号: TU366.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0504-05

Study on in situ testing technology of inner defect and injury for ancient timber structures

Liu Jia, Shen Kechang, Gao Wei, Gao Xiaowang

(Beijing Sanmao Test & Appraisal of Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Several key in situ testing technology of inner defect and injury for ancient timber structures are put forward, such as establishment of working process, comparison optimum of non-destructive testing instruments, division of key testing area and general testing area, selection of non-destructive testing methods for members at the different position. And the non-destructive testing methods for timber columns non-wrapped and partly wrapped by stress wave and resistance instrument technology are put forward. The inner defect and injury of a certain temple's ancient timber structure are tested on this basis. The results shows that the method is feasible and the data is scientific. It can accurately grasp inner defect and injury characteristics of ancient timber structures and provide reliable technology parameters and basis for subsequent safety appraisal and seismic appraisal.

Keywords: inner defect and injury; key testing area; non-destructive testing; stress wave; resistance instrument

0 前言

作为古建筑中最常见的结构形式,我国的古建筑木结构在长年累月的昆虫、微生物侵蚀以及物理和化学作用等内、外部多种因素影响下,往往会出现开裂、霉变和虫蛀、腐朽等材质劣化损伤现象。这些劣化损伤不仅常发生在木材表面还可能发生在构件内部,不易发现的内部损伤大大降低了木材的力学性能,特别是发生在主要承重构件上的内部严重劣化势必会威胁到木结构整体的安全,若不及时修缮加固可能会出现倒塌破坏,造成不可弥补的损失。因此,研究古建筑木结构内部缺陷与损伤的现场检测技术,对于加强和提高古建筑木结构的安全水平和抗灾能力、延续人类宝贵的文化遗产有着非常重要的意义。

古建筑木结构内部缺陷与损伤的现场检测技术已从传统的现场锤击刺探结合经验判断或取样送试验室进行破坏性试验发展到如今无损检测与科学判断阶段,无损检测改变了以往只能靠肉眼和经验判断古建筑木结构木材虫蛀、腐朽及其他损伤缺陷并且无法探明构件内部情况或破坏的结构无法恢复的不利状况。

1 我国古建筑木结构无损检测技术的发展

木材无损检测技术是一门新兴的、综合性的木材非破坏性检测技术,是在不破坏木材的外观形状、内部结构和动力特性以及使用功能的前提下,木材的缺陷和腐朽情况及基本物理力学性质进行的测试。根据不同的物理和化学原理,无损检测技术可分为木材阻抗仪、应力波、超声波、Pilodyn(皮罗钉)、X射线以及微波、红外线、核磁共振和雷达探测技术等,主要应用于木材含水率的测定、木材强度与残余弹性模量测定、表面硬度及表层和内部腐朽虫蛀等各种缺陷的现场检测等方面。我国古建筑木结构内部缺陷与损伤的无损检测技术发展至今大致经历了三个阶段。

第一个阶段是在目测查缺、敲击辨声的基础上结合使用 Pilodyn 和含水率仪等简单测量工具的表层缺陷检测阶段,通过检测表面和近表面存在的缺陷并依据经验来推断内部的大致缺陷,这个阶段可以称为

^{*} 国家科技支撑计划“世界文化遗产地风险控制关键技术研究示范项目”,古建筑木结构安全性评价关键技术研究课题(2013BAK01B03)。

作者简介:刘佳,硕士,Email:liujia2001@126.com。

“点”层次上的检测。

第二个阶段是以阻抗仪、超声波、生长锥以及 Fakkop 2D、IML 应力脉冲锤、Metriguard 应力波仪等简易应力波检测仪器为主要检测手段的“线”层次上的内部缺陷检测阶段,单路径及点对点的检测得出的是“线”的检测结果,多路径及多处点对点的检测就可以得出“面”乃至三维空间“体”的检测结果。其中,阻抗仪是目前为止在古建筑木结构检测中最为精确的“线”检测设备,根据阻力曲线上显示的相对力值反映出木材内部的相对密实状况,由此可以在指定的单个路径上较准确地区分出缺陷类型和缺陷长度,补充不同位置的进针形成多点、多方向检测即可得出内部缺陷的平面及立体图。

第三个阶段是以应力波断层扫描仪和 Fakkop ArborSonic 3D 等应力波测定仪为主要检测手段的“面”层次上的内部缺陷检测阶段。这些应力波测定仪都能对木材内部缺陷进行有效的检测,通过同时、多点布置多个传感器实现了多方向、多路径的检测,检测得到的波速对二维“面”上和三维空间“体”的内部缺陷进行了直观显示。应力波测缺陷应用的是横向应力波技术,其原理主要是通过检测木构件不同部位在垂直于木材纹理方向(径向)和相切于木材纹理方向(弦向)的应力波传播速度,并与同种木材健康材应力波横向传播速度进行比较,根据应力波传播速度的衰减率来确定木构件的内部腐朽状况。

2 古建筑木结构内部缺陷与损伤的现场检测技术

古建筑木结构内部缺陷与损伤的现场检测,应根据检测类别、检测目的、检测项目、结构实际状况和现场具体条件选择适用的检测方法和仪器设备。即使同类结构构件所在的楼层及其位置不同也会对结构整体安全与抗震性能产生不同的影响,因此应根据古建筑木结构的受力及缺陷与损伤特点,区分重点检测区域和一般检测区域。

2.1 现场检测工作流程

古建筑木结构构件内部缺陷与损伤的现场检测是对古建筑木结构不同楼层或区域、不同种类的木构件利用不同的无损检测手段进行不同程度的检测,即针对古建筑中的柱、梁、檩、枋、椽、望板等构件种类、构件位置和构件重要性不同,分别采用目测查缺、敲击辨声以及简单仪器进行的表面检测和以阻抗仪、应力波为主的深层检测等不同方法进行检测。其现场检测主要分为三个步骤,木结构的全面检查、木构件的深层检测以及用于树种鉴定木材的取样。

木结构的全面检查是通过观测、敲击和简单工具对古建筑木结构所有能触及的木构件进行普查,记录

木构件的材质状况,包括含水率、是否开裂、是否腐朽、是否虫蛀、表面是否有渗漏水渍等。

木构件的深层检测主要是针对木柱、主要承重的梁枋以及之前整体检测中存在问题木构件选用阻抗仪和应力波测定仪进行深层检测,并对重点检测区域内木构件的缺陷损伤情况进行重点无损检测。

必要时应进行的树种鉴定取样一般选在不影响木材力学强度的部位对所能涉及的主要构件进行约5~10mm见方小木块取样,样本在实验室经过切片、制作后由专家通过光学电镜微观鉴定给出结果,并附相应的物理力学性能(如抗弯强度、抗弯弹性模量、抗压强度和密度等)参数供修缮设计使用。

检测完成后给出该古建筑木结构材质状况总的描述,木构件的主要残损和变形情况及照片,木构件的树种鉴定结果、物理力学性能及木材三切面照片,阻抗仪和应力波检测的内部缺陷图形。

2.2 重点检测区域和一般检测区域的划分

经调查研究,古建筑木构件内部缺陷与损伤检测的重点内容应为腐朽、虫蛀、裂缝,其重点检测部位应为被墙体包裹、存在渗漏和受潮现象、菌虫危害区域以及受力集中的构件和部位,如柱根、柱头、梁(柁)头、檩头、椽头和梁(柁)跨中部位。柱根常见的缺陷是腐朽和空洞,柱身常见的缺陷是开裂;梁架常见的缺陷是劈裂和开裂以及下挠;含水率较高或存在渗漏的构件表面常见的缺陷是腐朽。因此确定古建筑木结构现场重点检测区域如下(重点检测区域以外的可视为一般检测区域):

(1)被墙体包裹构件,未被墙体遮挡但长期不见阳光的构件,通风效果较差、存在渗漏和受潮现象的构件。

(2)底层木柱根部、主要的承重梁和枋,包括金柱、檐柱、月梁、四架梁、三架梁、五架梁、七架梁、天花梁、跨空枋等。

(3)存在虫蛀或蚁蚀等菌虫危害区域的构件。

(4)受力集中的构件和部位。

2.3 不同部位构件的无损检测方法

不同的检测项目采用不同的检测方法。同一检测项目中有多种方法可供选择时,应根据建筑结构状况和现场条件选择相适应的方法,应根据检测类别、检测目的、检测项目、结构实际状况和现场具体条件等,提出适合古建筑木结构自身的检测方法。

2.3.1 木柱

(1)四周完全裸露在外、未被墙体包裹或未被遮挡的木柱

对于四周完全裸露在外、未被墙体包裹或未被遮

挡的承重木柱,通过目测查缺、敲击辨声初步筛选出存在表面裂缝、柱根腐朽以及可能的内部空洞和腐朽的构件,然后使用阻抗仪和应力波测定仪进行结合检测。

首先使用应力波测定仪扫查木柱的断面材质状况,可自柱底部向上 0.2m 的断面开始,每间隔 0.4m 进行断面扫查,即在距离柱底部 0.2,0.6,1.0m 的柱身分别布置传感器进行检测,检测高度范围宜不小于该层柱高的 1/3 和 1.0m 的较大值;若在某个断面发现存在明显的内部缺陷则应加密扫查断面,可在该问题断面的上、下各 0.2m 位置处的断面进行二次扫查。每个测试断面的传感器应沿周长均匀布置,同一断面相邻传感器的间距不宜大于 200mm。对于圆柱,当直径小于 380mm 时,应至少布置 6 个传感器;当直径大于 500mm 时,应至少布置 10 个传感器;当直径不小于 380mm 且不大于 500mm 时,可布置 8 个或 10 个传感器。

在使用应力波测定仪检测出问题断面的基础上,依据该断面上显示的平面缺陷的位置、形状和尺寸,首先用阻抗仪在应力波传感器指定的单个(径向或弦向)路径上有重点地进针(径向检测时,若直径大于 0.5m 从两个相对方向向圆心进针,直径不大于 0.5m 从单方向进针穿透木柱;弦向检测则视阻抗仪能穿透的距离确定是采取单方向还是相对方向进针)检测,修正单路径上应力波的检测精度,在指定的单个路径上较准确地地区分出缺陷类型和缺陷长度;其次通过逐渐加密进针点、多路径、多方向检测,拟合出平面缺陷轮廓图;最后,通过对不同问题断面的进针检测结果进行组合即可得出内部缺陷的立体分布图。在对发现内部缺陷的问题断面进针时,不论是径向还是弦向测试,每一针打入构件内部检测时的直线度应最大程度地贴近应力波传感器指定的路径,前后相邻两次的进针方向宜交错地布置,然后逐渐加密、交错进针,进针的次数视具体情况能满足修正应力波测定仪检测结果得到更为精确的缺陷为准。

(2) 四周未完全裸露在外、部分被墙体包裹或被遮挡的木柱

对于四周未完全裸露在外、部分被墙体包裹或被遮挡的承重柱,如墙包柱,外露部分面积相比被墙体包裹的部分往往较小,应力波测定仪无法排列布置传感器,因此主要采用阻抗仪检测内部缺陷。阻抗仪检测木柱的内部缺陷也可以分为初步扫查和精细检测两个步骤,在柱外露部分以某一处为基准点采用阻抗仪进行类似扇形的单方向进针发散式检测。

初步扫查时,可自柱底部向上 0.2m 的断面开始,每间隔 0.4m 进行断面扫查,即在距离柱底部 0.2,

0.6,1.0m 的柱身分别进针检测,检测高度范围宜不小于该层柱高的 1/3 和 1.0m 的较大值;若在某个断面的路径上发现存在明显的内部缺陷则应加密扫查断面,可在该问题断面的上、下各 0.2m 位置处的断面进行二次进针扫查。

通过初步扫查和分析,现场确定出柱身存在内部缺陷的大致高度范围,再对问题断面进行精细检测。从过基准点与断面圆心的连线为基准线,绕基准点逆时针或顺时针两个方向转动并对称进针进行弦向检测,可初步设逆时针和顺时针分别 30°,60°,加上直径方向,共可检测五个方向。若缺陷轮廓难以判定则需根据现场情况逐渐加密进针方向和次数,实现多路径、多方向检测,并拟合出平面缺陷轮廓图。最后,通过对不同问题断面的进针检测结果进行组合即可得出内部缺陷的立体分布图。

(3) 其他发现存在明显变形和缺陷的部位

对于木柱顶部、柱中部等部位,在目测查缺、敲击辨声的基础上,若发现木柱存在明显倾斜、变形、开裂、腐朽、虫蛀等缺陷,则应增加内部缺陷的无损检测。具体检测方法应区分现场检测条件对四周完全裸露在外、未被墙体包裹或未被遮挡的木柱和四周未完全裸露在外、部分被墙体包裹或被遮挡的木柱分别参考以上方法进行针对性的重点部位检测。

2.3.2 主要承重梁(桷)和枋

对于主要承重梁(桷)和枋,采用阻抗仪在跨中和端部节点处检测,若发现问题补充应力波技术检测。

2.3.3 其他次要的檩、梁和枋

对于其他次要的檩、梁和枋,通过目测查缺、敲击辨声和表面简单量测检测,若发现问题再补充阻抗仪检测。

2.3.4 非承重的连接件以及椽子和望板

对于非承重的连接件以及椽子和望板等,通过目测查缺和敲击辨声检测。

3 古建筑木结构内部缺陷与损伤检测实例

3.1 建筑物概况

京西某寺庙二进院西配殿,进深两间、面阔三间,为地上两层的带前廊抬梁式古建筑木结构。该建筑的始建年代不详,现场检查中发现有明显的修缮痕迹,但其原始设计图纸和历代历次普查及维修加固的文档资料均未保留。现场检测木楼盖的形式为格栅式木梁板结构,木柱基础采用柱础形式,1 层层高为 3.3m,2 层楼面至脊檩底面高度为 5.3m。该殿的东立面见图 1。1 层和 2 层结构平面布置见图 2 和图 3,木屋架立面见图 4 和图 5。



图1 东立面

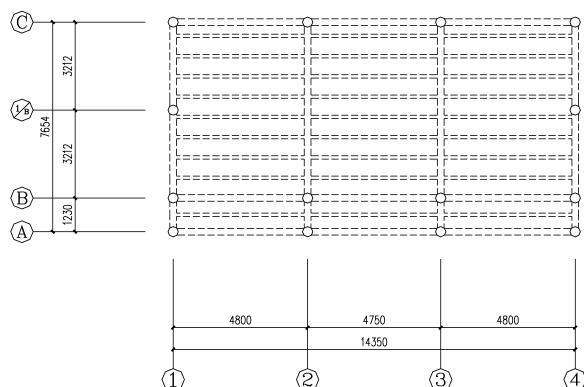


图2 第1层结构平面布置图

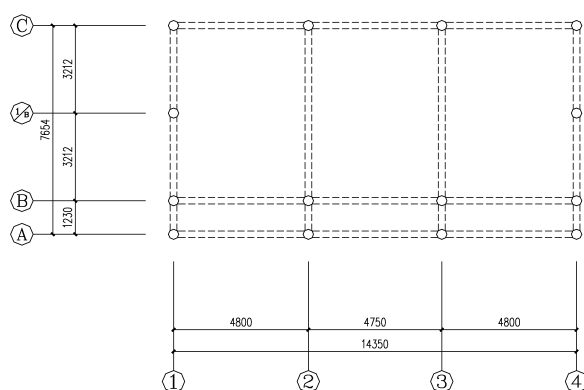


图3 第2层结构平面布置图

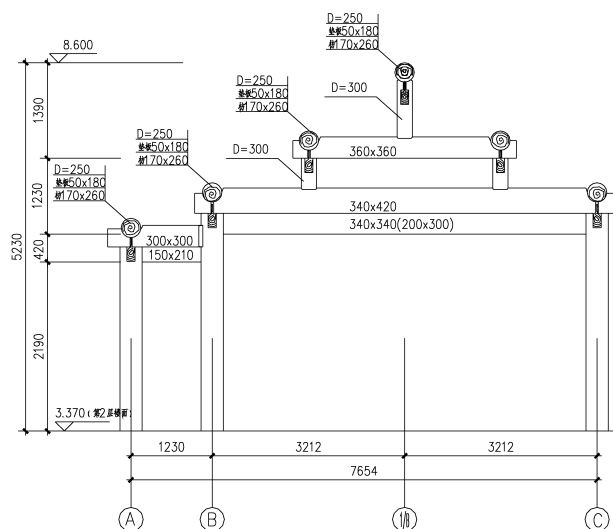


图4 2轴和3轴木屋架立面图

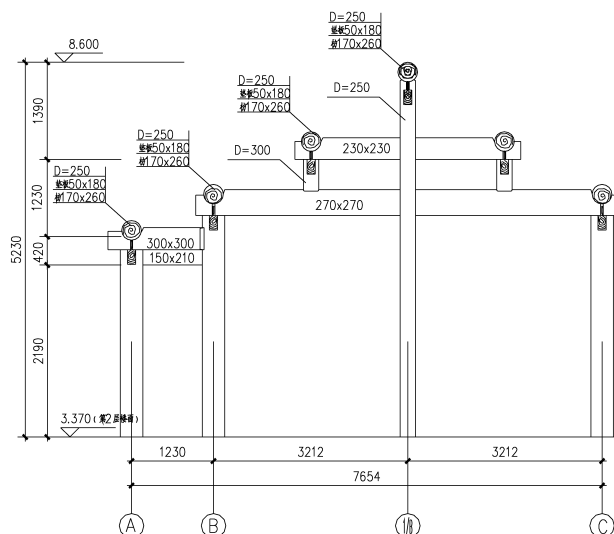


图5 1轴和4轴木屋架立面图

3.2 外观缺陷与损伤普查

在现场允许条件下对该配殿的外观缺陷与损伤情况进行了普查(见图6,7),结果表明:1)1层的前檐柱普遍存在腐朽现象,其中①/④柱腐朽最为严重。2)1层④轴~⑥轴间的梁、枋构件均存在轻微的腐朽、开裂现象。3)2层的梁、枋、檩等构件普遍存在开裂现象,部分檩、枋等构件存在歪闪现象;大部分瓜柱均存在劈裂现象;屋顶大部分木椽均存在腐朽现象。4)部分梁柱、枋柱、檩柱等节点处均存在拔榫现象。



图6 1层④/④柱腐朽



图7 2层3/④-⑥梁裂缝

3.3 内部缺陷与损伤检测

3.3.1 应力波检测内部缺陷与损伤

在现场允许条件下,采用应力波法对西配殿木柱的内部缺陷情况进行检测。现场采用10个传感器,以距柱础0.2m为一个平面,检测木材内部缺陷,若检测结果显示无缺陷,则不再继续检测;若出现缺陷,则向上0.4m再确定一个平面,以确定缺陷的大小。1层②/④柱距柱础0.6m现场检测见图8;检测可知木材内部不密实区及空洞逐渐扩大,木材健康状况逐渐恶化。

3.3.2 阻抗仪检测内部缺陷与损伤

在现场允许条件下,采用阻抗仪对采用应力波法检测的部分构件进行验证,并对无法进行应力波法检

测的构件进行检测,以确定是否存在内部缺陷。部分检测结果见图 10,11。

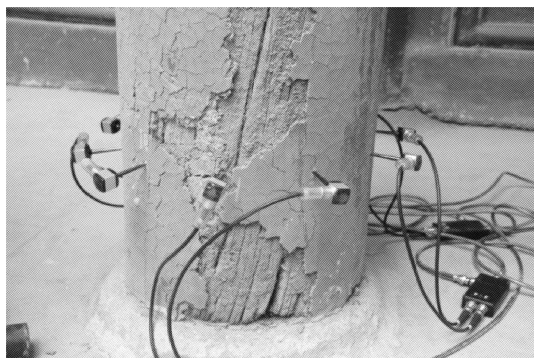


图 8 1 层②/④柱距柱础 600mm

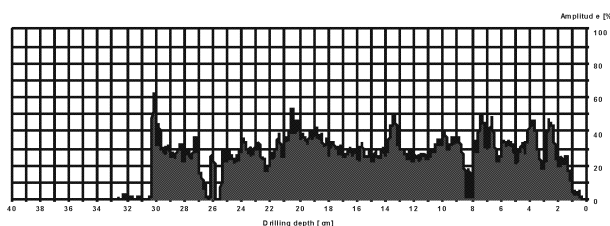


图 9 1 层②/④柱距柱础 0.2m 处
(1-10 点之间至 7-8 点)

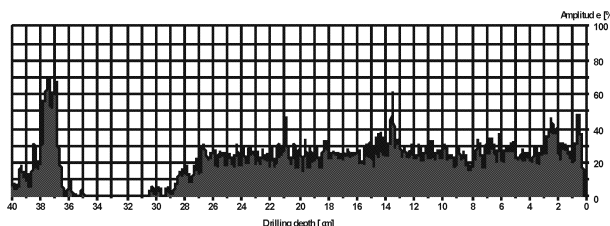


图 10 1 层①/④柱距柱础 0.6m 处

3.3.3 内部缺陷与损伤检测结果

(1) 应力波法

1) 1 层②/④柱 0.2m 处进行应力波检测,在最西侧的 1 点与 10 点之间,出现较严重的表皮腐朽,这与地仗层的剥落雨水进入柱体有直接的关系,但柱内部仍保持密实状态,不影响柱力学性能。对②/④柱 0.6m 处进行应力波检测,发现柱内部密实,基本无残损。

2) 1 层③/④柱 0.2m 处进行应力波检测,由于地仗层的脱落,在外表面有一定程度的腐朽,但内部木材为健康材,无残损。

(2) 阻抗仪法

1) 运用阻抗仪对 1 层②/④柱 0.2m 处应力波法检测结果进行了验证,从 1-10 点进针 7-8 点出针,

除了入针 0~20mm 数值较低外,基本上受阻力比较平均,其缺陷与应力波检测结果一致。

2) 运用阻抗仪对 1 层①/④柱进行检测,距柱础 0.2m 处沿径向进针(设定 250mm 自动退针),结果显示 220mm 处开始腐朽,可能是雨水顺墙体渗透柱内部产生腐蚀;距柱础 0.6m 处沿径向进针,显示 270~310mm 腐朽严重;距柱础 1.0m 处沿径向进针,显示 280~310mm 腐朽严重。表明 1 层①/④柱接触墙体部分严重腐朽,下部腐朽程度更为严重。

3) 运用阻抗仪对 1 层④/④柱进行检测,距柱础 0.2,0.6,1.0,1.4,1.8m 处沿径向进针,结果都显示进入内部 120~130mm 处开始严重腐朽,接触墙体部分的木柱已经没有阻力。

4) 运用阻抗仪对 1 层②/③柱进行检测,距柱础 0.2m 处沿径向进针,结果显示内部阻力值分布较均匀,属于健康状态。

4 结论

提出了古建筑木结构内部缺陷与损伤的若干关键现场检测技术,包括以木结构的全面检查、木构件的深层检测和用于树种鉴定的木材取样三步走的工作流程、无损检测仪器的比较优选、重点检测区域和一般检测区域的划分、不同部位构件无损检测方法的选择,并提出了运用应力波和阻抗仪技术对未被墙体包裹以及部分被墙体包裹的木柱进行无损检测的方法。在此基础上对某寺庙二进院西配殿的古建筑木结构进行了内部缺陷损伤检测,结果表明按此方法得出的检测结果可靠、数据科学,能准确把握住古建筑木结构的内部缺陷与损伤特点,可以为后续的安全鉴定和抗震鉴定提供可靠的技术参数和依据。

参 考 文 献

- [1] GB/T 50344—2004 建筑结构检测技术标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [2] GB 50165—1992 古建筑木结构维护与加固技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [3] GB 50005—2003 木结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 李诚(宋). 营造法式[M]. 1103.
- [5] 梁思成. 营造算例[M]. 中国营造学社,1934.
- [6] 梁思成. 清式营造则例[M]. 北京:清华大学出版社,2006.