

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.056



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



故宫同道堂木结构的残损分析及保护建议

秦术杰^{1,2}, 杨娜², 曹宝珠¹, 董金爽¹

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 古建木结构是华夏民族的宝贵财富, 但历经数百年服役后存在不同类型和程度的残损现象, 降低了结构的安全性能。选取北京故宫内的同道堂为研究对象, 通过现场勘查和残损分析, 获得结构柱框层、斗拱层和梁架层中典型的残损类型、特征、影响、数量和分布规律, 并对其残损成因进行归纳, 提出相应的保护建议。结果表明: 结构的残损类型主要包括构件开裂、糟朽、缺失、歪闪、分离和榫卯节点拔榫等, 其中, 斗拱层残损状况最为复杂和严重; 结构残损成因可归纳为材性退化和木材缺陷、生物侵蚀和自然环境变化、长期复杂的荷载效应以及不合理的修缮措施; 建立结构健康监测系统、加强生物病害防治、推进木结构力学性能的基础研究等是古建筑保护和修缮的重要基础和手段。

关键词: 古建筑; 木结构; 残损类型; 残损分布; 残损成因; 保护建议

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0119-10

Damage analysis and protection of timber structure of Tongdao Hall in the Imperial Palace

QIN Shujie^{1,2}, YANG Na², CAO Baozhu¹, DONG Jinshuang¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, P. R. China;
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: Ancient timber buildings are precious treasure of Chinese nation. However, some of them have suffered different types and degrees of damage after hundreds of years of service, which reduces the safety performance of structures. In this paper, the Tongdao Hall in the Imperial Palace at Beijing is chosen as the research object. Through on-site investigation and damage analysis, the typical damage types, characteristics, influences, quantity and distribution law of structural column frame layer, Dougong layer

收稿日期: 2020-12-30

基金项目: 海南省自然科学基金(520QN230); 海南省重大科技计划(ZDKJ201803); 国家重点研发计划(2019YFD1101003); 北京市自然科学基金(8151003); 海南大学科研启动基金(KYQD(ZR)1975)

作者简介: 秦术杰(1991-), 男, 博士, 主要从事古建筑木结构研究, E-mail: qinshujie@hainanu.edu.cn.

杨娜(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: nyang@bjtu.edu.cn.

Received: 2020-12-30

Foundation items: Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 520QN230); Major Science and Technology Project of Hainan Province (No. ZDKJ201803); National Key Research and Development Project (No. 2019YFD1101003); Beijing Natural Science Foundation (No. 8151003); Science Foundation of Hainan University (No. KYQD(ZR)1975)

Author brief: QIN Shujie (1991-), PhD, main research interest: ancient timber structure, E-mail: qinshujie@hainanu.edu.cn.

YANG Na (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: nyang@bjtu.edu.cn.

and beam frame layer are obtained. The causes of its damage are summarized and the protection suggestions are proposed. The results show that the types of structural damage mainly include component cracking, decay, missing, inclination, separation, and pulling-out of tenon joint, etc. Especially, the damage at the column frame layer is the most complex and serious. The reasons for structural damage can be summarized as material degradation and timber defects, biological erosion and variation of natural environment, long-term complex loading effect and irrationality of repair. Establishing structural health monitoring system, strengthening biological disease prevention and control, and promoting the basic research on mechanical performance of timber structures are essential for protection and repair of ancient buildings.

Keywords: ancient building; timber structure; damage types; damage distribution; damage reasons; protection suggestion

明清官式木构是中国古建筑发展和演变的集大成者和典型代表^[1],具有极高的文化、历史和科学价值。然而,在各种自然和人为因素的长期作用下,历经数百年的古建筑存在不同类型和程度的残损现象,降低了结构的受力性能,进而威胁结构的安全性。因此,明确古建木构的残损和分布特征,是准确进行结构状态评估并采取合理修缮措施的重要前提和基础。

目前,学者们对古建木结构的残损现象开展了大量的调研和分析工作。李铁英等^[2]和 Qiao 等^[3]在总结应县木塔和飞云楼残损类型的基础上,划分柱、额枋和铺作的残损等级,归纳残损原因,并从材性、变形和残损分布等方面分析了木塔和楼阁的受力现状。淳庆等^[4]对宁波保国寺的现场勘查发现,结构残损包括基础沉降、构件倾斜、劈裂和榫卯拔榫等,并提出增设硬木暗销和采用 CFRP 包裹等加固建议。Li 等^[5]和杨娜等^[6]整理了典型藏式古建筑的残损类型,分析其残损形成的原因,并通过模型试验研究了弓木尺寸和暗销位置对梁柱节点转动刚度和抗弯承载力的影响。谢启芳等^[7]、潘毅等^[8]和周乾等^[9]对汶川地震区的古建筑进行现场调研,获得并整理了古建木结构中包括节点、木柱、梁架和墙体的典型震害现象。王娟等^[10]以唐代殿堂型木结构为对象,探究了斗拱-梁架一体化铺作层构造、柱脚管脚榫形式、竖向荷载大小和位置对木构架滞回耗能和抗侧力性能的影响。然而,现有的研究大多针对明代以前的木结构,而且未给出详细的残损数量及其分布。由于不同年代的古建筑构造特征和服役时间不同,结构残损特征存在差异。为更好地指导明清官式古建木结构的保护工作,亟需开展其结构残损的调查和分析研究。

笔者以北京故宫博物院内具有典型明清官式古建木结构特征的同道堂为研究对象,对不同高度的

结构层进行现场残损勘查,分析各种残损类型的特征、影响、数量和分布规律,并归纳结构残损成因,以期为明清官式古建筑在残损现状下的受力性能、安全评估和修缮加固工作提供参考和依据。

1 勘查概况

1.1 勘查对象

同道堂始建于明永乐十八年(1420年),位于北京故宫博物院西北角的咸福宫内,如图1所示。同道堂面阔5间,东西向纵长21.16m,南北向横宽7.82m,柱高3.64m,屋脊高度8.18m。屋顶为歇山顶形式,顶覆黄琉璃瓦,立柱浮搁于础石之上,梁柱节点采用榫卯连接。檐下为单昂三踩斗拱,梁枋饰以龙凤和玺彩画,前檐明间安榻扇门、帘架,左右两次间为槛墙、支摘窗,后檐墙不开窗。整个结构为典型明清官式建筑做法结构。



图1 同道堂

Fig. 1 Tongdao Hall

对同道堂进行大修的最新记录时间为1929年,距今已近百年。在各种环境和荷载等因素的长期作用下,结构出现了不同类型和程度的残损,降低了结构的安全性能,目前该结构已暂停对游客开放。

勘查主要针对同道堂的木构架,从下往上对各部位的残损进行排查和记录,分析和归纳其残损特征、影响和成因,并统计各种残损类型的数量、比例和分布情况。

1.2 结构分层与编号

同道堂为抬梁式结构,各构件通过榫卯、斗拱和

柱脚等节点相互连接,结构平面呈对称布置,其木结构体系按空间高度和传力路径可分为3个结构层:柱框层、斗拱层和梁架层,各结构层自下而上逐层搭建,落架成屋,如图2(a)所示。

为便于各部件残损的指定说明,对各结构层的构件采用如下的编号命名规律。

1)柱框层:各立柱从西往东依次记为1,2,⋯,南、北排柱分别记为A和B,如图2(b)所示。

2)斗拱层:位于立柱正上方的斗拱按立柱编号,如A1柱正上方的斗拱命名为“斗拱A1”;与其临近的下一个斗拱命名为“斗拱A1-A2(2)”,表示从A1到A2数的第2个斗拱,依次类推,直到“斗拱A2”。

3)梁架层:东西纵向的檩三件命名由3部分组成,如“A1-2上”,“上”指构件名称“上金檩”,“1-2”指构件处在1-2开间,“A”指构件在该开间的位置靠近A排柱;南北横向的梁命名由构件名称和两端立柱编号组成,如“A1-B1五”指位于A1柱和B1柱之间的五架梁。

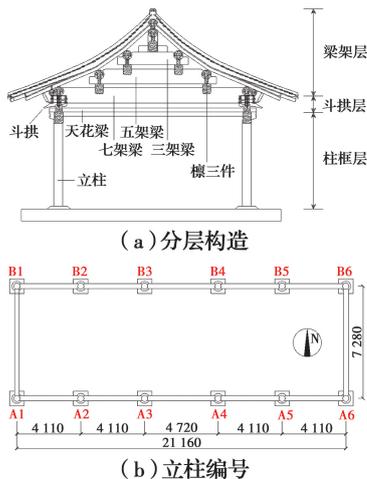


图2 同道堂结构分层和立柱编号

Fig. 2 Structural layers and column numbers of Tongdao Hall

2 典型残损类型的特征及分布

2.1 柱框层残损

在结构的传力体系中,柱框层起到将梁架层和斗拱层的荷载传递给台基的作用。立柱为整体结构受力的最关键构件,尺寸通常较大,其截面应力远低于木材的顺纹抗压强度,但在长期复杂的服役历史中,柱框层会出现一定的残损。经检测,同道堂立柱所用树种为润楠(*Machilus sp.*)。

2.1.1 残损类型及特征 1)柱脚糟朽 特征和成

因:柱脚木质粉化严重,有效承载面积被削弱,最严重的情况为剩余承载面积不足50%,如图3(a)所示。柱脚浮搁于础石上,易受雨水浸泡而糟烂,或在虫蛀侵蚀下致使木质分解粉化。影响:柱脚糟朽使最外层木材丧失强度,进而使有效承载面积减小,不仅降低立柱的竖向承压能力,还降低了柱脚节点的转动刚度和抗倾覆弯矩^[11]。

2)柱身糟朽和开裂 特征和成因:柱身糟朽常见于夹在墙内的立柱,如图3(b)所示;柱身开裂多沿顺纹方向,严重时甚至贯通立柱,如图3(c)所示。对于墙内的立柱,其通风性差,在潮湿环境下易遭受木腐菌或虫蚁的侵蚀而致柱身糟朽;木材弦向和径向干缩系数差异较大^[12],在温湿度的长期交替变化下,柱身开裂。影响:柱身糟朽会削弱木柱的有效承载面积,而顺纹裂缝一般不会显著降低其承压能力^[13]。然而,裂缝的形成和扩展会使立柱内部的木纤维暴露于空气中而加速其老化,甚至引起或加剧墙内木柱的糟朽,致使木柱的材料强度和承压能力降低^[14]。

3)柱头破损 特征和成因:柱头有直径为3~5 mm的孔洞,主要分布在南侧立柱上,如图3(d)所示。经考证,孔洞为采用微损伤检测手段或钻钉施工中留下的。影响:该孔洞使构件内部的木材暴露在空气中,会加速木质的老化,应尽量避免采用阻力仪和钻钉等带损伤的检测手段,而改用三维应力波扫描仪等无损检测方法。



(a) 柱脚糟朽



(b) 柱身糟朽



(c) 柱身开裂



(c) 柱头破损

图3 柱框层残损

Fig. 3 Damage of column frame layer

2.1.2 残损数量及分布 表1为柱框层的残损类型、编号和数量,其中柱脚槽朽3处,柱身开裂1处,而柱头破损5处。图4为各种残损类型的分布情况,柱脚槽朽均发生在夹在墙内的立柱中。需要注意的是,由于北侧、东侧和西侧的墙体遮挡,部分构件无法观测。

表1 柱框层的残损统计

Table 1 Statistics of damage of column frame layer

残损类型	构件编号	数量(比例)
柱脚残损	B3南, B4南, B5南	3(25%)
柱身槽朽和开裂	B4南	1(8%)
柱头破损	A1南, A3南, A4南, A5南, A6南	5(42%)

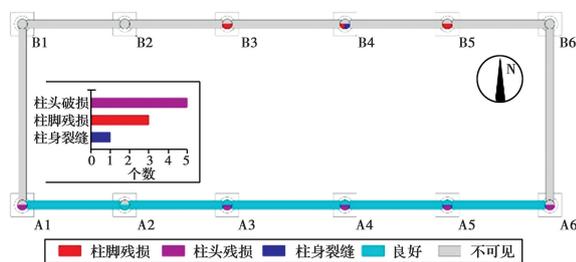


图4 柱框层的残损分布

Fig. 4 Distribution of damage of column frame layer

2.2 斗拱层残损

斗拱层是由方形的斗和弓形的拱或翘通过叠压咬合的方式形成的复杂节点群,起到将屋架荷载均匀地传递给柱框层的作用,是结构抗震耗能的关键部位^[7-9]。现场勘查发现,斗拱层残损状况最为严重,且残损类型最为繁杂。

2.2.1 残损类型及特征 1)构件分离和松动 特征和成因:多为三才升(小斗)和里拽瓜拱或里拽枋之间的分离和松动,如图5(a)所示。由于竖向荷载主要集中在大斗正上方,在荷载的长期作用下,拱将发生翘起变形,使小斗与拱发生分离。影响:分离和松动导致构件之间无压力作用,这意味着小斗已失去其承压和传力功能,进而降低了斗拱在竖向的承压刚度和承载力。对其他宫殿进行勘查发现,此类残损较为普遍。

2)构件裂纹和劈裂 特征和成因:构件表面常见龟裂状的细短裂纹,如图5(b)所示;部分构件出现严重的劈裂现象,如图5(c)所示。龟裂状裂纹主要由环境的温湿度交替变化引起,构件劈裂则是因局部修缮时打入铁钉造成的。影响:龟裂状裂纹对木材横纹抗压强度影响不大,构件劈裂是因处理方

式粗糙造成的,打入铁钉是为将大斗和梁枋等龙骨构件连接起来,以实现斗拱层受力时拉拽龙骨,但这样会破坏原有构件的完整性,并非符合规范^[15]的做法。

3)翘缺失 特征和成因:翘缺失如图5(d)如所示。在重屋盖的长期作用下,翘会发生顺纹方向的劈裂,劈裂部位易掉落而致翘缺失;现场发现部分翘缺失的断面较整齐,也可能是局部维修中为替换大斗而将翘劈掉的结果,这是一种粗暴的处理方式。影响:翘缺失导致其失去原来位置的承压功能,降低斗拱在竖向荷载下的刚度和承载力。

4)不协调的新材替换旧材 特征和成因:由于部分构件缺失或残损严重,采用新木材替换旧木材进行维修,但现场勘查发现,新材和旧材并非同一树种,而且新材构件只保持了原有形状,但修复后的小斗和拱间没有暗销,部件之间没有紧密叠压而是存在分离,这种现象如图5(e)所示。根据《古建筑木结构维护与加固技术规范标准》(GB/T 50165—2020)^[15]的规定:更换构件应与原有构件属同一树种,可见部分的纹理、色泽应与原有构件相似;不得因维修而损害原有构件;修缮斗拱时,应将小斗与拱间的暗销补齐。出现此类残损的主要原因是没有遵照相关规范开展维修工作,或缺乏对斗拱受力特征的充分认知。影响:这种不协调的新材替换旧材,只是外观形状得到了恢复,但新材和旧材的部件没有叠压在一起,且部件间没有暗销,斗拱的受力功能并没有得到修复。

5)斗拱整体倾斜 特征和成因:东侧的一整排斗拱发生整体歪斜,如图5(f)所示。可能是因为偶然较大的水平地震作用下,上部木枋发生较大位移,进而带动整排斗拱发生倾斜。影响:在重屋盖的作用下,斗拱整体倾斜使结构承受较大的附加弯矩,而在长期的竖向荷载作用下,其倾斜程度随时间增大,进而降低结构的稳定性能,增加结构发生失稳破坏的风险。

6)小斗残损 特征和成因:小斗残损形式较多,包括小斗缺失,见图5(g);小斗斗耳处在顺纹方向上的通长裂缝,见图5(h);小斗歪闪,见图5(i);小斗暗销缺失,见图5(j)。斗耳顺纹裂缝应该是由竖向荷载作用下因泊松效应引起的拉裂,或因木材横纹抗剪强度较低,斗耳在偶然水平推力下发生劈裂;小斗歪闪可能是由于里拽枋倾斜带动的结果;暗销

缺失则可能因为其尺寸较小,发生剪切破坏或木材干缩及材性退化所致。影响:小斗缺失或歪闪会降低斗拱的承压刚度和极限承载力,而斗耳的顺纹贯通裂缝和暗销缺失对小斗承压无影响,但会降低其水平抗剪能力。

7)大斗残损 特征和成因:大斗残损形式主要包括斗耳劈裂和底座被凿削两种,如图 5(k)~图 5(m)所示。经现场勘查判定,此两种残损均为不当的局部修缮所致。影响:大斗是斗拱承压的最关键部位^[16],斗耳劈裂和底座被凿削会降低斗拱的抗侧和抗压能力。

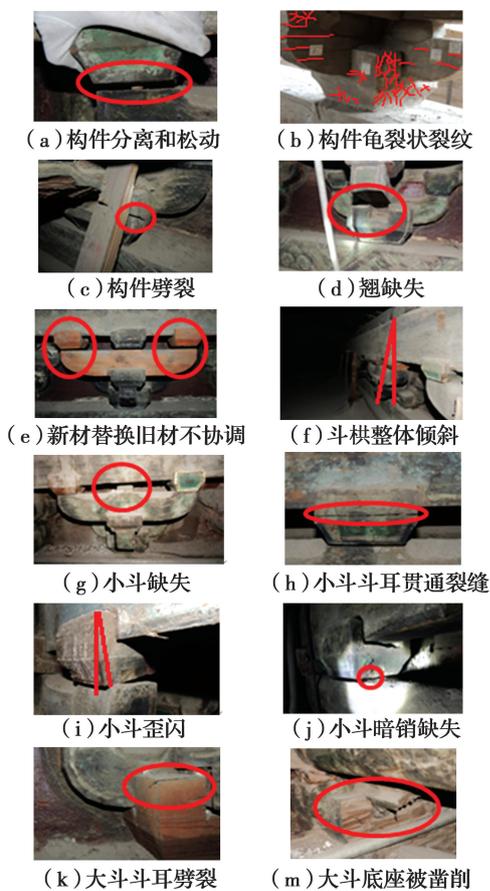


图 5 斗拱层的残损

Fig. 5 Damage of Dougong layer

2.2.2 残损数量及分布 表 2 为斗拱层的残损类型及对应的数量和比例,图 6 为各类残损数量的排序直方图,其中,不协调的新材替换旧材(60 处)、构件分离和松动(53 处)、构件裂纹和劈裂(50 处)的数量最多,分别占斗拱总数的 73%、65%和 61%。图 7 为各种残损类型的分布和位置情况,可以看出斗拱层残损主要出现在结构屋架的内部,而南侧外部斗拱基本完好。

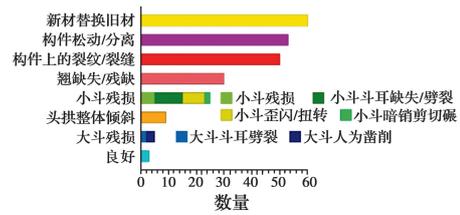


图 6 斗拱层残损数量排序

Fig. 6 Ranking of damage number of Dougong layer

表 2 斗拱层的残损统计

Table 2 Statistics of damage of Dougong layer

残损类型	数量(比例)
构件分离和松动	53(65%)
构件裂纹和劈裂	50(61%)
翘缺失	30(37%)
不协调的新材替换旧材	60(73%)
斗拱整体倾斜	9(11%)
缺失	5
斗耳裂缝	10
歪闪	8
暗销缺失	2
斗耳劈裂	2
底座被凿削	3
小斗残损	25(30%)
大斗残损	5(6%)

2.3 梁架层残损

在明清官式古建木结构中,梁架层面阔方向的檩、垫板和枋合称为“檩三件”^[1],作为一个整体协同受力,而进深方向根据高度不同分有天花梁、七架梁、五架梁和三架梁等。经检测,同道堂梁架所用树种为润楠(*Machilus* sp.)和桢楠(*Phoebe* sp.)。

2.3.1 残损类型及特征 1)枋和檩的开裂 特征和成因:枋和檩的裂纹大多沿顺纹方向扩展,并主要出现在构件中性轴的附近,如图 8(a)、(b)所示。由于木材的顺纹抗剪强度较低,通过半刚性连接木梁的解析模型^[17]可知,中性轴附近为剪应力最大的区域,侧面裂纹易发生于此。在温湿度交替变化较大的环境中,木材的干缩开裂特性也会造成此类残损。影响:枋和檩的顺纹开裂会降低其抗弯承载力^[13],同时,也会引起或加剧内部木质的老化。

2)垫板和枋或檩相分离 特征和成因:垫板和枋或檩相分离,如图 8(c)所示。主要是因为檩、垫板和枋之间缺乏有效的粘结,三者的下挠变形不协调引起的。影响:现场勘查发现,垫板和檩的分离程度通常比垫板和枋的分离程度要大,檩三件分离后将无法作为一个整体协同受力,其变形和承载力降低。

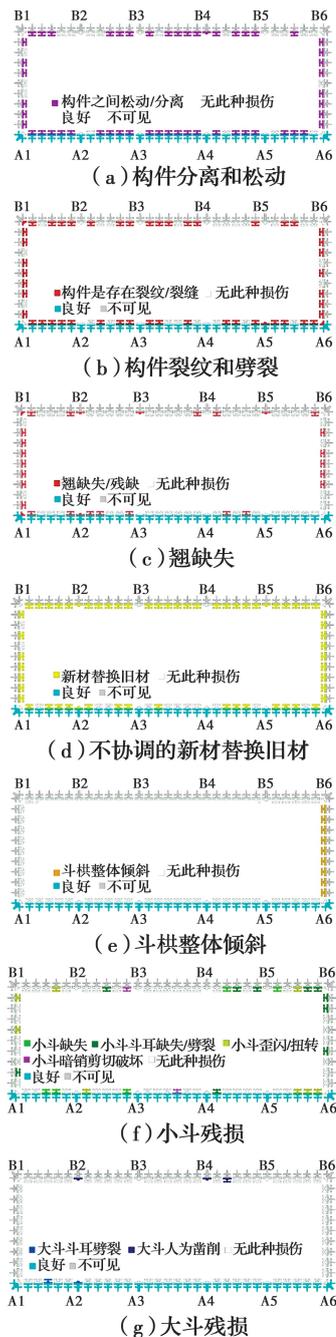


图7 斗拱层残损分布

Fig. 7 Distribution of damage of Dougong layer

3) 垫板局部破损 垫板角部容易出现木材破损现象,如图 8(d)所示。垫板尺寸相对较小,其角部木材受到檩或屋架的挤压,容易发生因泊松效应引起的横纹拉裂。

4) 虫蛀、糟朽 由于官式建筑保存条件较好,虫蛀和糟朽的程度和面积较小,多限于表层,如图 8(e)所示。此类残损现象一经发现应立即进行清除。

5) 榫卯节点拔榫 特征和成因:榫卯节点拔榫现象如图 8(f)所示。榫卯节点处的构件端面被削弱。当受到水平荷载或木材发生干缩时,连接构

件的接触面发生分离而造成拔榫现象。影响:拔榫会使榫头与卯口接触面积减小,进而降低榫卯节点的承载力。当拔榫量过大时,节点在外荷载作用下容易脱榫,导致梁柱构件连接失效。

6) 梁开裂 七架梁、五架梁和三架梁的开裂主要为侧面的顺纹裂缝,而天花梁的裂缝则集中在顶面,分别如图 8(g)~(j)所示。梁的开裂成因和影响与枋檩相同,不再赘述。



图8 梁架层的残损

Fig. 8 Damage of Dougong layer

2.3.2 残损数量及分布 表 3 为梁架层的残损类型、编号和数量,图 9 为各类残损数量的排序直方图,可以看出,构件开裂的残损数量最多。图 10 为檩三件中各种残损类型的分布情况,可以看出虫蛀和糟朽主要分布在梁架层的东北侧,说明此处的环境可能比较潮湿;垫板与檩分离现象集中在南侧和北侧的下金檩三件,也应与结构受力特征相关。

表3 梁架层的残损统计

Table 3 Statistics of damage of beam frame layer

残损类型	构件编号	数量 (比例)
枋开裂	A1-A2 上, A2-A3 下, A2-A3 上, A2-A3 脊, B2-B3 上, B2-B3 下, A3-A4 下, A3-A4 上, B3-B4 下, A4-A5 下, A4-A5 上, A4-A5 脊, B4-B5 上, B4-B5 下, B5-B6 上	15 (60%)

续表 3

残损类型	构件编号	数量 (比例)
檩开裂	A1-A2 下, B1-B2 上, A2-A3 下, A2-A3 脊, B2-B3 上, B2-B3 下, A3-A4 下, A3-A4 上, A3-A4 脊, B3-B4 上, B3-B4 下, A4-A5 下, B4-B5 下	13 (52%)
垫板与檩相分离	A1-A2 下, A2-A3 下, A3-A4 下, B3-B4 下, B4-B5 下, A5-A6 下, B5-B6 下	7 (28%)
垫板与枋相分离	B3-B4 上, A4-A5 下	2 (8%)
垫板局部破损	A1-A2 下, B1-B2 下, B5-B6 下	3 (2%)
虫蛀糟朽	B3-B4 上, B3-B4 下, B4-B5 下, B5-B6 下	4 (16%)
榫卯节点拔榫	A1-A2 脊	1 (4%)
梁开裂	A2-B2 天, A4-B4 天, A5-B5 天, A3-B3 七, A4-B4 七, A5-B5 七, A1-B1 五, A2-B2 五, A4-B4 五, A5-B5 五, A6-B6 五, A1-B1 三, A2-B2 三, A3-B3 三, A5-B5	16

注:“上”、“下”、“脊”分别指上、下、脊金檩三件;“天”指天花梁;“七”、“五”、“三”分别指七、五、三架梁。

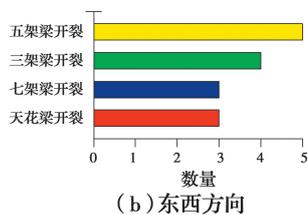
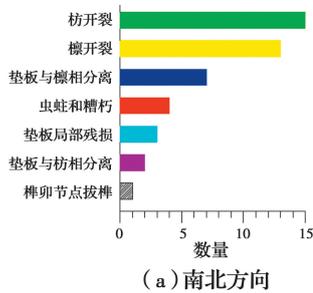


图 9 梁架层残损数量排序

Fig. 9 Ranking of damage number of beam frame layer

3 结构残损的成因归纳

3.1 木材缺陷和材性退化

作为一种天然的生物材料,木材常伴有髓心、木节和裂纹等初始缺陷。髓心木的力学性能指标极低,木节会造成应力集中和裂纹扩展,而裂缝会降低木梁的抗弯性能^[13]。

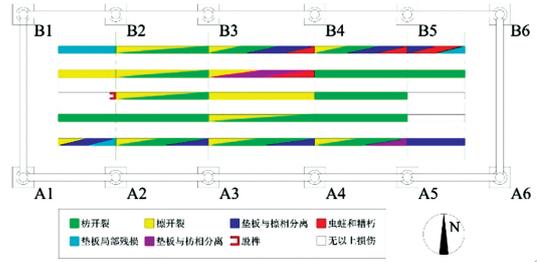


图 10 梁架层残损分布

Fig. 10 Distribution of damage of beam frame layer

随着时间的推移,木材中纤维素降解,水分减少而抽提物增多,木纤维间组织构造日趋稀松,宏观上表现为材料脆性和硬度增大,弹性模量和强度降低^[18],进而导致结构的刚度和承载力下降,构件挠曲和承压变形增大。表 4 为应县木塔、北岳庙、扬州古屋和景清门的古旧木材力学性能退化情况^[19-21]。不同树种的木材性能退化程度不同,如景清门的杨木顺纹抗拉强度、抗弯强度和弹性模量的退化率较其他树种大;而相同树种的木材,由于服役年限和环境的差异,其力学性能也存在差异,如北岳庙和扬州古屋的云杉材性退化程度不同。

表 4 古木材力学性能退化

Table 4 Degradation in mechanical properties of old timber

古建名称	树种(服役时间)	退化系数		
		顺纹抗拉强度	抗弯强度	弹性模量
应县木塔	落叶松(962 a)	0.50	0.85	0.81
北岳庙	云杉(900 a)		0.59	0.73
扬州古屋	云杉(150 a)		0.90	0.81
景清门	杨木(600 a)	0.42	0.34	0.81

3.2 生物侵蚀和自然环境变化

生物侵蚀主要包括木腐菌和虫蚁的入侵,这是威胁木结构耐久性的重要因素。木腐菌会由外而内逐步侵蚀木材,分解其纤维素和木质素等有机物组分,使其失去原木特征。古木构件腐朽层厚度随时间变化的发展规律为^[14]

$$\delta = 0.5\delta_0(1 + t/T_0)^a \quad (1)$$

式中: δ_0 为当前的腐朽层厚度; T_0 为已服役的时间; t 为木构件预期的服役寿命; δ 为第 t 年时的腐朽层厚度; a 为腐朽层厚度发展速度的指数参数。

虫蚁攻击可分为两个阶段:1)初始期,即木结构搭建完成至虫蚁突破构件保护层所需要的时间;2)发展期,即虫蚁开始攻击木构件至其完全失效所需时间。虫蛀残损通常采用面积率进行表征^[22]。

$$D(t) = A(t)_{\text{ter}}/A_0 \quad (2)$$

式中: $A(t)_{\text{ter}}$ 和 A_0 分别为虫蛀面积和构件的初始面积。

自然环境的变化包括温度、湿度、雨水和阳光等变化。温湿度的周期性变化会引发木材的胀缩,而木材在弦向和径向膨胀率的较大差异会导致其产生干缩开裂,开裂后的木材暴露在空气中会进一步发生碳化和氧化现象。木材在温湿度交替变化下的相对开裂深度随时间的变化关系为^[23]

$$\xi_h = \exp(E + F e^{kt}) \quad (3)$$

式中: ξ_h 为相对开裂深度; t 为时间; E 和 F 为与含水率相关的常数; k 为与温湿度相关的常数。

3.3 长期复杂的荷载效应

结构所受荷载包括两部分:结构自重和外荷载。

明清官式古建木结构均具有厚重屋盖,在屋盖自重的长期作用下,木材发生蠕变,材料损伤累积,进而造成强度降低和变形增大。考虑木材长期荷载作用下的材料强度退化时变模型为^[14]

$$\varphi_m(t) = \frac{1}{B} \ln(1 + (1 - \alpha(t))(\exp B - 1)) \cdot \left(\frac{C_0 - 1}{t_0^2} t^2 + 1 \right) \quad (4)$$

式中: B 为常数; C_0 为基准年 t_0 时的强度修正因子; $\alpha(t)$ 为第 t 年的损伤变量。

外荷载来源很多,包括地震、交通荷载、风荷载、雪荷载和人群荷载等。中国是一个地震多发的国家,地震作用会对古建木结构造成不同程度的损伤^[7-9],如立柱倾斜、榫卯拔榫、构架错位和歪闪等,甚至导致结构坍塌。古建筑周边日益增加的交通振动荷载也会对结构产生不利的累积疲劳损伤^[24]。近年来,随着旅游业的高速发展,人群荷载也成为古建筑残损的重要影响因素。

3.4 不合理的修缮措施

由于缺乏对古建木结构的传力机理和承载能力等受力特征和木材性能退化规律的充分认识,很多修缮和加固工作的开展主要依赖经验。在修复过程中可能存在一些不当或错误措施,如钻孔检测、多处打钉、凿削木构件、随意改变结构构件间原有的连接关系等,而这些措施会导致或加剧木结构在受力状态下的损伤。

4 古建筑的保护建议

4.1 建立结构健康监测系统

基于光纤光栅传感器的无线传输数据技术,可建立古建木结构关键部位的温度、湿度、应变和位移等信息的结构健康监测系统。利用多元线性回归模型、季节乘积 ARIMA-GARCH 模型对监测数据的

变化因素进行控制,然后基于单值-移动极差控制图、EWMA 控制图和 EWRMS 控制图对异常现象进行诊断^[25],可以实时掌握结构的受力状态,并为控制游客数量的判定提供依据。

利用 SSA 对长期监测数据进行分解和重构,可对结构未来的响应及趋势进行预测^[26]。一方面,对比预测值和实测值的差异,可实时掌握结构的残损变化;另一方面,预测模型还能给出结构在未来服役中的安全概率,为管理者采取干预措施提供判断依据,实现由“抢救性和被动性保护”向“预防性和主动性保护”转变的科学理念。

4.2 加强木材防腐防虫的生物病害防治

木腐菌和虫蚁的侵蚀是影响古建木结构耐久性的重要因素,生物病害问题在潮湿环境中更为严峻。防治措施包括:1)将木材含水率控制在 25% 以下,可有效抑制木腐菌的滋生^[27];2)在构件表面涂刷蜡乳浊液、胡桃醌等可降低木材的吸湿性,进而有效减缓木腐菌的侵蚀^[27];3)在立柱表面外包保护层;4)保持构件干燥通风,特别是控制密闭夹缝处的温湿度,破坏木腐菌和虫蚁的生存环境;5)定期对各构件进行检查,一旦发现菌斑或虫卵立即进行清除,防患于未然。

4.3 积极开展古建木结构的基础研究

正确认识古建木结构的基本受力性能是开展修缮和加固工作的前提。应开展更多、更全面的针对古建木结构的基础研究,包括节点、构件和整体结构的静动力性能、木材材性增强剂和防腐防虫涂料的研制、CFRP 和记忆合金等新型材料^[28-31]和无损扫描技术在木结构加固和检测中的应用适应性等,形成科学、系统的分析理论和计算方法,进一步完善相关规范和标准^[15],并提出准确、合理又行之有效的修缮和加固方法。如此,才能避免因不合理的人为修缮措施而造成的古建筑残损加剧。

5 结论

1)同道堂の木结构体系按空间高度和传力路径可分为柱框层、斗拱层和梁架层。柱框层残损包括柱脚糟朽、柱身糟朽、开裂额柱头破损;斗拱层残损包括构件松动分离、裂纹劈裂、翘缺失、不协调的新材替换旧材、斗拱整体倾斜、小斗缺失、歪闪、斗耳顺纹开裂、暗销缺失、大斗斗耳劈裂和底座被凿削;梁架层残损包括檁三件开裂、分离、局部破损、虫蛀糟朽、榫卯节点拔榫和梁开裂。其中,斗拱层的残损类型和数量最多,残损状况最为严重。

2)古建木结构残损成因比较复杂,但主要可归

纳为:材性退化和木材缺陷、生物侵蚀和自然环境变化、长期复杂的荷载效应以及不合理的修缮措施。

3)建立古建筑木结构关键部位的温度、湿度、应变和位移等信息的结构健康监测系统,加强木材防腐防虫的生物病害防治,开展包括结构静动力性能、木材材性增强剂、防腐防虫涂料、CFRP和记忆合金等新型材料的研制,是古建筑保护和修缮的重要基础和方法。

参考文献:

- [1] 梁思成. 清式营造则例[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1981.
LIANG S C. Qing-Style structure regulations [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981. (in Chinese)
- [2] 李铁英, 秦慧敏. 应县木塔现状结构残损分析及修缮探讨[J]. 工程力学, 2005, 22(Sup1): 199-212.
LI T Y, QIN H M. Structural analysis and repair of Yingxian wooden tower [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(Sup1): 199-212. (in Chinese)
- [3] QIAO G F, LI T Y, FRANK CHEN Y. Assessment and retrofitting solutions for an historical wooden pavilion in China [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 435-447.
- [4] 淳庆, 喻梦哲, 潘建伍. 宁波保国寺大殿残损分析及结构性能研究[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(2): 45-51.
CHUN Q, YU M Z, PAN J W. Research on damage characteristic and structural performance of the main hall of Baoguo Temple in Ningbo [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2013, 25(2): 45-51. (in Chinese)
- [5] LI P, YANG N, WANG Y. Research on structural present state and damage reasons of ancient Tibetan buildings [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351/352: 1652-1656.
- [6] 杨娜, 闫会春. 典型藏式古建木构梁柱连接转动性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(6): 112-119.
YANG N, YAN H C. Experimental analysis of rotational behavior of timber beam-column connection of ancient Tibetan architecture [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(6): 112-119. (in Chinese)
- [7] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁. 汶川地震中古建筑的震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(Sup2): 18-23.
XIE Q F, XUE J Y, ZHAO H T. Seismic damage investigation and analysis of ancient buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup2): 18-23. (in Chinese)
- [8] 潘毅, 王超, 季晨龙, 等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(7): 103-106.
PAN Y, WANG C, JI C L, et al. Investigation and analysis of seismic damage for Chinese ancient timber buildings in Wenchuan earthquake [J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (in Chinese)
- [9] 周乾, 闫维明, 杨小森, 等. 汶川地震古建筑震害研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(3): 330-337.
ZHOU Q, YAN W M, YANG X S, et al. Damage of ancient buildings after Wenchuan earthquake in China [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(3): 330-337. (in Chinese)
- [10] 王娟, 许刃文, 张熙铭, 等. 唐代殿堂型木构架抗侧力性能影响参数分析[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 48-59.
WANG J, XU R W, ZHANG X M, et al. Parameter analysis on lateral force resistance of the palace-style timber structure in Tang Dynasty [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 48-59. (in Chinese)
- [11] QIN S J, YANG N, DAI L. Rotational behavior of column footing joint and its effect on the dynamic characteristics of traditional Chinese timber structure [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-13.
- [12] 龙卫国. 木结构设计手册[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
LONG W G. Handbook of timber structure design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 杨小军, 孙友富, 吴森, 等. 裂纹对木梁承压与抗弯强度的影响[J]. 木材加工机械, 2007, 18(6): 11-13.
YANG X J, SUN Y F, WU M, et al. Influence of the crack on compressive and bending strength of a wood beam [J]. Wood Processing Machinery, 2007, 18(6): 11-13. (in Chinese)
- [14] QIN S J, YANG N. Strength degradation and service life prediction of timber in ancient Tibetan building [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(2): 731-747.
- [15] 古建筑木结构维护与加固技术规范: GB 50165—2020 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.
Technical code for maintenance and strengthening of ancient timber buildings: GB 50165-2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [16] CHEN Z Y, ZHU E C, LAM F, et al. Structural performance of Dou-Gong brackets of Yingxian Wood Pagoda under vertical load-An experimental study [J].

- Engineering Structures, 2014, 80: 274-288.
- [17] 张雷, 杨娜. 均布荷载作用下榫卯连接木梁的解析解[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 51-60, 78.
ZHANG L, YANG N. Analytical solution for mortise-tenon end wooden beam subjected to uniform load [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7): 51-60, 78. (in Chinese)
- [18] 戴澄月, 梁北红. 长期荷载下木材粘弹性质的研究[J]. 东北林业大学学报, 1987, 15(5): 53-60.
DAI C Y, LIANG B H. Viscoelastic behavior of wood in long-term load [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1987, 15(5): 53-60. (in Chinese)
- [19] 王晓欢. 古建筑旧木材材性变化及其无损检测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
WANG X H. Study on the variety and the NDE of aged wood physical and mechanical properties of ancient architecture [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [20] 倪士珠, 李源哲. 古建筑木结构用材的树种调查及其主要材性的实测分析[J]. 四川建筑科学研究, 1994, 20(1): 11-14.
NI S Z, LI Y Z. Tree species investigation and material properties analysis of timber in ancient architecture [J]. Building Science Research of Sichuan, 1994, 20(1): 11-14. (in Chinese)
- [21] 陈国莹. 古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究[J]. 古建园林技术, 2003(3): 49-52, 60.
CHEN G Y. Study on material properties and nondestructive test of old timber of ancient architecture [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2003(3): 49-52, 60. (in Chinese)
- [22] LEICESTER R H, FOLIENSTE G C. Models for timber decay and termite attack [J]. Durability of Building Materials and Components, 1999, 1: 756-765.
- [23] 王雪亮. 历史建筑木结构基于可靠度理论的剩余寿命评估方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
WANG X L. Research on evaluation method of reliability-based residual life of historic timber structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [24] ZHANG Y S, ZHANG N, CAO Y M, et al. A prediction method of historical timber buildings' vibrations induced by traffic loads and its validation [J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1-12.
- [25] 杨娜, 代丹阳, 秦术杰. 古建筑木结构监测数据异常诊断[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 64-71.
YANG N, DAI D Y, QIN S J. Monitoring data diagnosis of ancient wood structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 64-71. (in Chinese)
- [26] YANG N, BAI X B. Forecasting structural strains from long-term monitoring data of a traditional Tibetan building [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(1): e2300.
- [27] 池玉杰. 木材腐朽与木材腐朽菌[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
CHI Y J. Wood decay and wood decay fungi [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [28] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 3种材料加固古建筑木构架榫卯节点的抗震性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 649-656.
ZHOU Q, YAN W M, JI J B. Aseismic behaviors of tenon-mortise joints in wooden frame in Chinese ancient building strengthened by three materials [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 649-656. (in Chinese)
- [29] 阿斯哈, 周长东, 杨礼赣. 复合加固木柱轴压特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 1-9.
A S H, ZHOU C D, YANG L G. Experimental investigation on axial compression behavior of timber columns strengthened with composite reinforcement method [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2): 1-9. (in Chinese)
- [30] XIE Q F, ZHANG L P, ZHOU W J, et al. Cyclical behavior of timber mortise-tenon joints strengthened with shape memory alloy: Experiments and moment-rotation model [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2019, 13(8): 1209-1222.
- [31] 薛建阳, 吴占景, 张凤亮, 等. 碳纤维布加固古建筑木结构基于结构潜能和能量耗散地震破坏评估[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(6): 103-111.
XUE J Y, WU Z J, ZHANG F L, et al. Potential and energy dissipation-based seismic damage evaluation of ancient timber structure strengthened with CFRP [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6): 103-111. (in Chinese)

(编辑 胡玲)