



故宫学视野丛书

故宫古建筑的结构艺术

主编 单霁翔 郑欣淼 执行主编 章宏伟

周乾◎著

故宫出版社

故宫学视野丛书

故宫古建筑的结构艺术

主编 单霁翔 郑欣淼 执行主编 章宏伟

周乾◎著



故宫出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

故宫古建筑的结构艺术 / 周乾著. — 北京: 故宫出版社,
2017.11

(故宫学视野丛书)

ISBN 978-7-5134-1067-0

I. ① 故… II. ① 周… III. ① 故宫—古建筑—建筑
结构—研究 IV. ① K928.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 271883 号

故宫学视野丛书编委会

主 编: 单霁翔 郑欣淼

执行主编: 章宏伟

编 委: (按姓氏拼音排序)

曹兵武 陈正宏 单霁翔 冯天瑜 何孝荣 黄厚明 晋宏逵

李国荣 李文儒 李学勤 刘梦溪 罗卫东 南炳文 荣新江

宋纪蓉 苏东海 王 素 王亚民 吴卫国 阎崇年 余 辉

余同元 章宏伟 赵軼峰 郑欣淼

故宫学视野丛书

故宫古建筑的结构艺术

周 乾◎著

出 版 人: 王亚民

责任编辑: 邓曼兰 伍容萱

封面设计: 王 梓

出版发行: 故宫出版社

地址: 北京市东城区景山前街4号 邮编: 100009

电话: 010-85007808 010-85007816 传真: 010-65129479

网址: www.culturefc.cn 邮箱: ggcb@culturefc.cn

制 版: 保定市万方数据处理有限公司

印 刷: 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本: 787毫米×1092毫米 1/16

印 张: 42

字 数: 563千字

版 次: 2017年11月第1版

2017年11月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5134-1067-0

定 价: 120.00元

总 序

故宫遗产包括故宫古建筑群和故宫博物院藏品两大部分，两者在中国古代历史文化遗产中都有无与伦比的地位和价值。故宫建筑群是中国现存古代官式建筑的最大案例和最高典范。故宫建筑群原名紫禁城，建成于明永乐十八年（1420 年），及至清宣统三年（1911 年）溥仪退位，明清两代共 24 位皇帝在此居住执政。故宫建筑群既有深厚的历史价值，又有鲜明的艺术价值，其空间格局体现了中国传统礼制文化的规划理念，其园囿布置展示了中国古代宫廷园林的艺术成就，其建筑档案保存了中国古代营建制度和传统技艺的重要信息。故宫博物院藏品是中国古代艺术的完美表达和系统展示。故宫博物院堪称中国最大的古代文化艺术宝库，是中国古代物质文明和文化艺术的物质载体和精神象征。截至 2010 年 12 月，馆藏文物总计 1807558 件套，其中珍贵文物 1684490 件套、一般文物 115491 件套、标本 7577 件套。

自 20 世纪以来，在中国社会政治变革和文化转型进程中，紫禁城经历了极其复杂的转变。皇宫转变为博物馆，皇家收藏从秘藏走向公开，故宫博物院承载着政治、文化和艺术的丰富内涵，是中国社会变革进程的时代见证和经典缩影。保护好故宫建筑群，保管好故宫博物院藏品，是一代代故宫人肩负的神圣职责。跻身世界一流博物馆，展现中华文化艺术精神，是一代代故宫人不懈奋斗的目标。为此，故宫博物院着力于紫禁城建筑的保护修缮，埋首于清宫文物藏品的清理点查，潜心于明清宫廷历史文化的整理研究，专注于中国古代艺术珍品的陈列展览。

在长达 90 年的发展进程中，故宫博物院逐渐形成了一套自成体系、别具一格的研究体系和工作模式。

2003 年，在分析阐释故宫遗产的价值和梳理总结故宫博物院的学术路径的基础上，郑欣淼先生提出了“故宫学”的学术概念。从概念界定和范畴体系来看，故宫学的主要研究对象包括三方面：其一，故宫建筑群，既是明清两代的皇家建筑，也是中国保留最为完整的宫殿建筑群。其二，故宫博物院藏品，主要包括古物、典籍、档案，既是中国历代艺术文化的重要载体，也是明清两代宫廷历史文化的信息记录。其三，故宫博物院，既是近代中国社会政治变革的典型产物，也是推动当代中国文化转型的重要力量。故宫学将故宫建筑群、文物藏品和故宫博物院视为有机的文化整体，在类型庞杂、内容交叉的研究对象中，找寻相通的理论基础和方法体系，建构合理的学术范畴和学科体系，并有力地指导和推动着故宫的保护与博物院的发展。自 2005 年以来，故宫博物院陆续成立古建筑、古书画、古陶瓷、明清宫廷历史、藏传佛教文物五大研究中心，获批设立“明清官式建筑保护研究国家文物局重点科研基地”、“古陶瓷保护研究国家文物局重点科研基地”。尤其是 2009 年故宫学研究所的设立，将故宫学的理论探索与实践应用提升到一个新水平：以探索理论方法为核心的学术研究已初现成果，以建构学科体系为目标的联合办学已渐成规模，以积蓄学术力量为要务的交流平台已凸显成效。

最近五年，故宫博物院立足文化自觉和文化创新，有序推进“平安故宫”和“学术故宫”建设，全面提升故宫博物院的硬实力和软实力。一方面，故宫博物院启动“平安故宫”工程，预期在 2020 年完成文化遗产完整保护、环境质量稳步提升、安防设施全面覆盖、开放区域适度扩大、文物库房功能改善、文物藏品保护修复的六大目标，并最终实现将壮美的紫禁城完整地交给下一个 600 年的历史使命。另一方面，故宫博物院着手建设“学术故宫”，以故宫研究院和故宫学院为平台，

不断完善学术布局，逐步扩大学术影响力。目前，故宫研究院形成了“一个研究室、十五个研究所和一个博士后流动站”的学术布局，故宫学院已经形成了苏州分院、西安分院、景德镇分院、深圳分院的组织架构。至此，故宫博物院已经完成了双引擎、四轮驱动的战略布局：“平安故宫”和“学术故宫”统率故宫博物院硬实力和软实力的建设目标，两院（故宫研究院和故宫学院）两基地（明清官式建筑保护研究国家文物局重点科研基地和古陶瓷保护研究国家文物局重点科研基地）引领故宫博物院古建筑保护、文物修复、学术研究和文化传播的发展方向。在“平安故宫”实践中总结提炼，在“学术故宫”框架内提纲挈领，故宫学将会迎来一个新发展，迈上一个新台阶。

2020年，紫禁城将迎来建成600周年纪念。2025年，故宫博物院将迎来百年华诞。故宫和故宫博物院正走向百年历史进程的重要十年。值此关键时期，“故宫学视野丛书”即将出版，首次推出故宫学研究专著五种。郑欣森《故宫学概论》明确界定故宫学的概念、范畴以及学科体系，全面探讨故宫学的学科特点、研究方法以及意义价值，并详细论述故宫学的研究进展及前沿领域。王素《故宫学学科建设研究初探》从学科建设的视角出发，全面建构故宫学学科体系的基本架构，论证分支学科的对象、范围的价值。章宏伟《故宫学的视野》立足具体个案的实证研究，深入剖析故宫学文化整体性的思维结构和多重论证的方法体系。武斌《故宫学与沈阳故宫》坚持理论与实践的结合，详细论述故宫学对沈阳故宫博物院的建筑保护、藏品研究以及学术交流等方面的指导意义和应用价值。魏奕雄《故宫国宝南迁纪事》对地方文献、档案材料的挖掘，丰富了故宫这段院史的血肉。这五部论著坚持纯粹的学理阐述，又兼顾学术的实践维度，为故宫学的发展奠定了基础。

故宫学的探索与实践，故宫学的视野与梦想，看似学术理论层面的思考，实则影响到故宫博物院实践层面的效果，甚至是关乎国家文化外交和文化战略层面的重要因素。尤其是近年来，习近平总书记多次强

调要提高文化软实力，要努力展示中华文化的独特魅力，要系统梳理传统文化资源，让收藏在禁宫里的文物、陈列在大地上的遗产、书写在古籍里的文字活起来。如何在中华民族的伟大复兴进程中发挥故宫学的学术意义和现实价值，如何在故宫博物院建设世界一流博物馆进程中拓展故宫学的学术视野和学术影响，这是新的时代环境赋予的机遇与挑战。我们希望，经过几代故宫人的努力，故宫学能够成为海内外瞩目的一门显学，故宫遗产价值得到更为深刻的阐释，中华文化艺术得到更为广泛的传播。

单霁翔

前言

本书初稿完成于2010年。与之相关的写作背景包括以下4个方面：第一，故宫学之古建力学研究。郑欣淼先生于2003年提出故宫学，其核心内容之一即故宫古建筑保护。然而既有的故宫学相关文献中，故宫古建筑力学性能保护与研究相关的成果很少。基于此，作者以故宫古建筑为研究对象，基于理论与实践成果，完成了以故宫古建力学分析、评估为主旨内容的故宫学学术论著，可望弥补上述成果的不足。第二，故宫大修。自2003年起，故宫启动古建筑百年大修，作者有幸参与了太和殿、神武门、英华殿、建福宫、乾隆花园古建筑群等古建筑的力学性能评估工作，对故宫古建筑的力学特性有了一定的了解，并积累了故宫古建力学理论、实践、数值模拟相关经验。作者认为，把这些古建力学保护、研究的成果（或教训）整理出版，对故宫古建筑的整体保护和维修将起到积极推动作用。第三，汶川地震古建筑震害评估。2008年5月12日，我国四川省汶川县发生了8.0级地震，造成了包括古建筑在内的重大损失。时年7月，作者与故宫博物院专业同仁赴四川省剑阁县觉苑寺开展古建筑震害评估与加固分析工作，并积累了古建筑的典型震害特征、评估方法，加固技术相关的经验。这些宝贵的经验，对于故宫古建筑的防震保护与维修提供了很好的借鉴意义。第四，榫卯节点力学性能试验。2009年，作者根据课题研究需要，以故宫太和殿某榫卯节点为对象，开展了明清官式木构古建筑榫卯节点抗震性能系列试验，获得了不同材料加固古建榫卯节点的效果。这些榫卯节点力学特性的相关研究成果，对于故宫古建筑保护和维修提供了重要的指导作用。基于上述多因素作用的结果，使得本书得以完成。

与市场上同类书籍相比，本书创新之处为：第一，研究对象的典

型性。本书研究对象以故宫古建筑为主，而故宫古建筑是我国明清官式木构古建的典型代表。因此，开展故宫木构古建筑力学性能研究，探讨其合理有效的评估、保护和维修方法，其研究成果将具有普遍的意义。第二，研究内容的丰富性。本书研究内容涵盖故宫古建筑抗震构造特征、典型残损问题及加固技术、健康现状评估方法、古建筑震害特征评估方法与加固技术、故宫古建榫卯节点力学特性及加固方法等内容，较为全面地覆盖了古建修缮、保护、研究的相关内容。第三，研究成果的实用性。本书研究成果较为丰硕，且大都基于工程实践，因而在工程上具有一定的实用性。如对于古建筑出现的典型残损问题，提出了相应的加固方法；对于地震造成的古建筑震害，客观分析了原因，并提出了有效加固方法；提出了古建筑可靠性及抗震评估的有效方法；探讨了榫卯节点力学性能及加固方法。同时，本书还积累了大量珍贵的照片资料。这些成果，将有力推进故宫古建筑的保护和研究工作。

本书出版得到了故宫博物院各级领导的关心和支持，作者特表示衷心的感谢。

目 录

前言 / 1

第一章 绪论 / 1

1.1 研究背景 / 1

1.2 研究现状 / 3

1.2.1 榫卯节点 / 3

1.2.2 结构整体 / 12

1.3 现状分析 / 18

1.3.1 榫卯节点 / 18

1.3.2 结构整体 / 20

1.4 本书主要内容 / 21

1.5 本书创新点 / 23

1.6 故宫学指导意义 / 24

参考文献 / 27

第二章 紫禁城古建筑抗震性能研究 / 38

2.1 紫禁城古建筑的抗震机理 / 38

2.1.1 引言 / 38

2.1.2 抗震构造 / 40

2.1.3 小结 / 54

2.2 神武门的防震构造 / 55

2.2.1 引言 / 55

- 2.2.2 防震构造 / 57
- 2.2.3 结论 / 68
- 2.3 神武门的抗震性能 / 68
 - 2.3.1 引言 / 68
 - 2.3.2 力学模型 / 69
 - 2.3.3 模态分析 / 71
 - 2.3.4 地震反应 / 73
 - 2.3.5 谱分析 / 77
 - 2.3.6 随机地震响应分析 / 80
 - 2.3.7 小结 / 84
- 2.4 英华殿的抗震性能 / 84
 - 2.4.1 力学模型 / 85
 - 2.4.2 动力特性分析 / 87
 - 2.4.3 地震反应分析 / 88
 - 2.4.4 谱分析 / 91
 - 2.4.5 小结 / 92
- 参考文献 / 93

第三章 古建筑木结构加固方法研究 / 96

- 3.1 古建筑木结构加固方法简述 / 96
 - 3.1.1 引言 / 96
 - 3.1.2 破坏类型 / 96
 - 3.1.3 加固方法 / 98
 - 3.1.4 小结 / 102
- 3.2 铁件加固技术在古建筑木结构中的应用 / 102
 - 3.2.1 加固技术分类 / 102
 - 3.2.2 加固算例 / 105
 - 3.2.3 讨论与建议 / 109
 - 3.2.4 小结 / 112
- 3.3 FRP 在木结构加固中的应用 / 112

3.3.1 国外研究及应用现状 / 113	113
3.3.2 国内研究及应用现状 / 120	120
3.3.3 国内外研究现状对比 / 123	123
3.3.4 FRP 与传统加固木结构方法对比 / 124	124
3.3.5 小结 / 125	125
3.4 CFRP 加固木梁理论 / 125	125
3.4.1 计算假定 / 126	126
3.4.2 公式推导 / 127	127
3.4.3 有限元分析 / 130	130
3.4.4 小结 / 132	132
3.5 CFRP 加固木柱理论 / 132	132
3.5.1 公式推导 / 134	134
3.5.2 有限元分析 / 136	136
3.5.3 小结 / 140	140
3.6 古建筑木结构叠合梁和组合梁的受力 / 140	140
3.6.1 单梁开裂形成叠合梁 / 141	141
3.6.2 叠合梁与组合梁 / 144	144
3.6.3 “工”字型截面问题 / 152	152
3.6.4 小结 / 154	154
参考文献 / 154	154
第四章 太和殿部分构件的力学性能现状分析 / 162	162
4.1 太和殿西山挑檐檩结构现状 / 163	163
4.1.1 引言 / 163	163
4.1.2 模型的建立 / 165	165
4.1.3 结构分析 / 167	167
4.1.4 小结 / 170	170
4.2 太和殿三次间正身顺梁的加固 / 170	170
4.2.1 分析参数 / 172	172
4.2.2 破坏分析 / 173	173

- 4.2.3 加固方案 / 175
- 4.2.4 小结 / 180
- 4.3 太和殿明间藻井破坏原因 / 180
 - 4.3.1 模型建立 / 181
 - 4.3.2 结构分析 / 182
 - 4.3.3 小结 / 185
- 4.4 太和殿山面扶柁木结构现状 / 185
 - 4.4.1 荷载计算 / 186
 - 4.4.2 现状分析 / 187
 - 4.4.3 小结 / 190
- 参考文献 / 190

第五章 基于经验法的古建筑木结构健康评估 / 192

- 5.1 古建筑木结构抗震构造评估 / 192
 - 5.1.1 引言 / 192
 - 5.1.2 评估内容 / 193
 - 5.1.3 评估方法 / 197
 - 5.1.4 评估实例 / 202
 - 5.1.5 建议及结论 / 206
- 5.2 单层古建筑健康评估——故宫三友轩 / 206
 - 5.2.1 引言 / 206
 - 5.2.2 评估依据 / 208
 - 5.2.3 结构评估 / 209
 - 5.2.4 小结 / 232
- 5.3 二层古建筑健康评估——故宫萃赏楼 / 233
 - 5.3.1 引言 / 233
 - 5.3.2 评估依据 / 234
 - 5.3.3 结构评估 / 234
 - 5.3.4 结论 / 268
- 5.4 多层古建筑健康评估——故宫符望阁 / 268

5.4.1 引言 / 268	
5.4.2 评估依据 / 269	
5.4.3 结构评估 / 269	
5.4.4 小结 / 323	
5.5 古建筑木结构典型抗震构造问题研究 / 323	
5.5.1 评估依据 / 324	
5.5.2 典型问题 / 326	
5.5.3 原因分析 / 333	
5.5.4 加固建议 / 335	
5.5.5 小结 / 340	
参考文献 / 341	
第六章 古建筑木结构震害研究 / 344	
6.1 紫禁城古建筑历史震害及特点 / 344	
6.1.1 紫禁城历史震害 / 344	
6.1.2 紫禁城古建筑构造缺陷 / 346	
6.1.3 紫禁城古建筑震害特点 / 347	
6.1.4 紫禁城古建筑震害预测方法 / 347	
6.1.5 小结 / 348	
6.2 汶川地震导致的古建筑震害 / 349	
6.2.1 典型震害 / 350	
6.2.2 震害分析 / 357	
6.2.3 抗震加固建议 / 358	
6.2.4 小结 / 359	
6.3 古建筑木结构震害评估算例 / 362	
6.3.1 算例 1: 未加固古建筑 / 362	
6.3.2 算例 2: 已加固古建筑 / 402	
6.3.3 算例 3: 含嵌固墙体的古建筑 / 423	
参考文献 / 449	

第七章 古建筑榫卯节点力学性能数值模拟研究 / 452

7.1 古建筑榫卯节点拔棒过程数值模拟 / 452

7.1.1 受力机制 / 454

7.1.2 模型建立 / 455

7.1.3 拔棒分析 / 458

7.1.4 小结 / 461

7.2 古建筑榫卯节点受弯破坏过程数值模拟 / 461

7.2.1 受力机理 / 462

7.2.2 力学模型 / 462

7.2.3 接触分析 / 464

7.2.4 分析和讨论 / 469

7.2.5 小结 / 470

7.3 古建筑榫卯节点抗震性能数值模拟 / 471

7.3.1 力学模型 / 471

7.3.2 模态分析 / 473

7.3.3 动力分析 / 475

7.3.4 小结 / 477

参考文献 / 478

第八章 紫禁城古建筑典型榫卯节点抗震加固试验 / 479

8.1 古建筑榫卯节点抗震试验研究 / 479

8.1.1 试验设计 / 479

8.1.2 试验现象描述 / 486

8.1.3 试验分析（节点） / 494

8.1.4 试验分析（构架） / 511

8.1.5 小结 / 522

8.2 马口铁（扒钉）加固榫卯节点抗震试验研究 / 523

8.2.1 试验现象 / 524

8.2.2 试验分析（节点） / 533

8.2.3 试验分析（构架） / 544

8.2.4 小结 /	552
8.3 钢构件加固榫卯节点抗震试验 /	553
8.3.1 试验方案 /	555
8.3.2 试验现象 /	557
8.3.3 试验分析 (节点) /	568
8.3.4 试验分析 (构架) /	580
8.3.5 小结 /	589
8.4 CFRP 加固榫卯节点抗震试验研究 /	590
8.4.1 引言 /	590
8.4.2 CFRP 加固方案 /	591
8.4.3 试验现象描述 /	593
8.4.4 试验分析 (节点) /	603
8.4.5 试验分析 (构架) /	617
8.4.6 小结 /	628
8.5 试验结果对比 /	629
8.6 古建筑榫卯节点抗震加固振动台试验 /	633
8.6.1 试验方案 /	634
8.6.2 试验现象 /	638
8.6.3 试验分析 /	640
8.6.4 结论 /	650
参考文献 /	650

第九章 结论与展望 /	653
-------------	-----

第一章 绪论

我国的古建筑以木结构为主，具有悠久的建筑历史和文化。从构造上讲，我国的古建筑主要由基础、柱子、斗拱、梁架、屋顶等部分组成，如图 1-1-1 所示。千百年来，它们历经了多次地震灾害而保持完好，体现了一定的抗震能力。

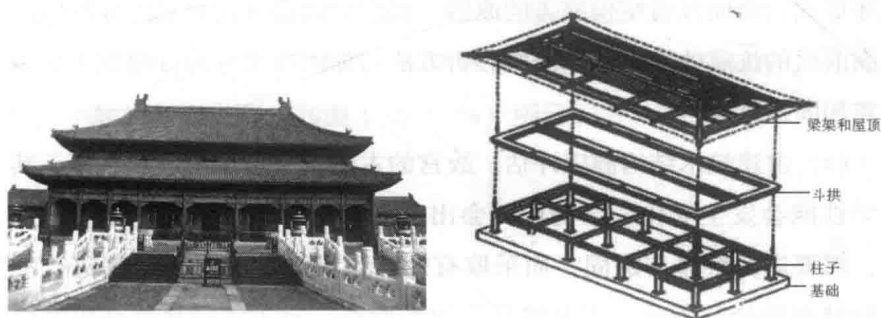


图 1-1-1 典型的中国古建筑

1.1 研究背景

故宫拥有世界上最大、最完整的古代木结构宫殿建筑群，具有重要的文化和历史价值，是中国古建筑的典型代表。因此，对故宫古建筑的力学性能与加固方法进行研究具有重要意义。本书内容的研究背景即故宫古建筑的维护保养与抗震加固，具体包括如下几个方面：

(1) 古建筑木结构的抗震构造。古建筑良好的抗震性能与其构造密切相关，以故宫古建筑为例，基于逻辑分析与理论计算结合的方法，对中国古建筑木结构的典型构造如柱础、侧脚、榫卯、斗拱、梁架、屋顶以及布局等进行研究，相关结果不仅有助于了解古建筑木结构的抗震机