

周乾 著



# 故宫 古建筑结构分析与保护



Structure  
Analysis and  
Protection of  
Ancient Build-  
ings in the  
Forbidden City



知识产权出版社

中国标准出版社

周乾 著



# 故 宫 古建筑结构分析 与保护

Structure  
Analysis  
and Protection  
of Ancient  
Buildings  
in the  
Forbidden  
City



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

## 图书在版编目 (CIP) 数据

故宫古建筑结构分析与保护/周乾著. —北京: 知识产权出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5130-5561-1

I. ①故… II. ①周… III. ①故宫—古建筑—建筑结构—结构分析②故宫—古建筑—保护  
IV. ①TU-092②TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 096052 号

## 内容简介

本书以故宫古建筑为研究对象, 对明清官式古建筑进行了评估和分析, 主要内容包括: 故宫太和殿静力稳定评价, 故宫神武门抗震性能评价, 故宫灵沼轩抗风性能评价, 基于经验法的故宫古建筑健康现状评估, 故宫古建筑变形构件的分析与保护, 故宫古建筑开裂构件的分析与保护, 故宫古建筑糟朽木构架的分析与保护, 故宫古建筑榫卯节点残损及加固, 故宫古建筑城墙的受力性能, 故宫古建筑基础的构造及抗震性能, 学者与故宫古建筑保护等。

本书适合从事古建筑研究、保护、维修、管理工作的人员使用, 亦可供建筑专业师生、历史文化和文物保护工作者参考。

责任编辑: 张雪梅

装帧设计: 王 鹏

责任校对: 潘凤越

责任印制: 刘译文

## 故宫古建筑结构分析与保护

周 乾 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

电 话: 010-82004826

社 址: 北京市海淀区气象路 50 号院

责编电话: 010-82000860 转 8171

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印 刷: 三河市国英印务有限公司

开 本: 720mm×1000mm 1/16

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

字 数: 395 千字

ISBN 978-7-5130-5561-1

网 址: <http://www.ipph.cn>

<http://www.laichushu.com>

邮 编: 100081

责编邮箱: 410746564@qq.com

发行传真: 010-82000860 转 8000270

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 20.25

印 次: 2019 年 1 月

定 价: 139.00 元

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。



## 致 谢

故宫学创始人郑欣森先生在百忙中为本书作序，对青年学者关爱有加，作者特致以衷心的感谢。

作者现任职的故宫博物院故宫学研究所，各级领导及同仁对作者的学术研究提供了全力支持及帮助，作者特致以衷心的感谢。

本书开展的古建结构性能分析及评估，离不开作者在故宫博物院古建部任职期间领导和同事的帮助和支持，作者特致以衷心的感谢。

北京工业大学闫维明教授（作者的博士生导师）、北京工业大学关宏志教授（作者的博士后合作导师）、北京交通大学杨娜教授（作者的博士后合作导师）在作者科研的道路上给予了诸多的指导和帮助，作者特致以衷心的感谢。

北京工业大学高级试验师纪金豹博士在作者开展理论和试验研究过程中提出了宝贵的意见和建议，作者特致以衷心的感谢。

作者的家人长期以来支持、鼓励作者开展科学研究，并提供了强大的后盾支持。对于他们的默默奉献和无私帮助，作者特致以衷心的感谢。

对其他帮助和支持作者从事科学研究的人士，作者一并致以衷心的感谢。

本书开展的相关研究工作亦得到了故宫博物院科研基金、北京市博士后基金、北京市自然科学基金、文化部科技创新基金等的资助，作者特致以衷心的感谢。

## 序

故宫学的研究对象包括故宫（紫禁城建筑）、故宫文物与故宫博物院三个方面；作为一门综合性学科，它又涉及建筑、器物、文献、典籍及历史、政治、艺术、宗教、民俗、科技等许多专业。但是故宫学最核心的层次是紫禁城建筑。紫禁城从1420年建成至今，虽经多次维修、重建、改建，但仍保持了始建时的基本格局并遗存了许多不同时代的建筑物。它作为中国古代宫殿建筑发展的集大成者，在建筑技术和建筑艺术上代表了中国古代官式建筑的最高水平。雄伟壮丽、千门万户的古老皇宫，每天吸引着数万中外游客驻足观赏，又以其深邃的文化底蕴和巨大的多方面价值成为人们深入研究的对象。

紫禁城建筑研究是一个大题目，包含着丰富的内容，其中对于紫禁城建筑本身的科学评估方法、保护技术的研究也具有重要的意义。《故宫古建筑结构分析与保护》就是一本关于明清官式木构古建筑力学性能及科学评估方法的著作。该书以故宫多个宫殿建筑为对象，基于现场调研、理论分析、数值模拟、静动力试验等手段，开展了静动力稳定性、抗震、抗风等科学分析，讨论了故宫官式木构古建普遍存在的开裂、变形、糟朽等问题的残损机制，提出了可行性保护和评估建议；本书还进一步探讨了故宫古城墙、故宫基础的科学保护方法。与已有成果相比，本书在研究对象、研究方法、研究内容、研究成果等方面多有创新，对故宫文化遗产保护具有积极的推动作用。此外，本书图文并茂，知识量丰富，体现了作者积累的专业研究功底和工程实践经验。

本书作者周乾博士目前就职于故宫博物院故宫学研究所。作者曾长期在故宫古建部工作，重视保护实践与理论探索的结合。特别是他以故宫古建筑为研究对象，着重开展明清官式木构古建的科学评估与保护方法研究，取得了不少成果。例如，在《土木工程学报》《建筑结构学报》《建筑材料学报》等专业期刊上发表的《故宫太和殿一层斗拱水平抗震性能试验》《罕遇地震作用下故宫太和殿抗震性能研究》《三种材料加固古建筑木构架榫卯节点的抗震性能》等多篇论文，以及《故宫古建筑的结构艺术》（收入《故宫学视野丛书》）专著的出版，反映了他的勤奋努力，也为《故宫古建筑结构分析与保护》一书打下了很好的基础。

从已有的明清木构古建研究的成果来看，与故宫古建筑的结构分析及科学评估相关的论著还比较少。本书的问世则是这方面的一个有益探索，是值得重视的

一项成果。实践需要理论的指导，实践也是理论之源。本书的出版说明，随着故宫保护实践的发展，理论的总结与提升也在加强。学无止境。希望作者继续努力，为故宫遗产的保护、为故宫学的建设奉献新的成果。

郑欣淼

2018年11月25日

# 前 言

紫禁城（今故宫博物院）是我国明清官式木构古建筑的典型代表，现存古建筑 9000 余间，自建成以来已有近 600 年，这些古建筑历经各种灾害（地震、风等）并能完整保存下来，体现了良好的承载性能。然而，由于长期受荷、木构古建筑的构造特征以及木材材性缺陷等原因，这些古建筑不可避免地出现开裂、变形、拔榫等残损问题，并对结构安全构成了潜在威胁。科学分析这些残损问题对古建筑的影响，评价结构的安全现状，及时采取可靠、有效的维修和加固措施，是确保古建筑结构安全、使其延年益寿的重要前提。因此，开展故宫古建筑结构安全现状的科学分析是一项极其重要而又紧迫的任务。

本书主要创新之处有三个方面：

（1）研究对象广泛。本书以故宫官式古建筑为研究对象，选取有代表性的木构古建筑开展分析和评估，研究对象不仅包括结构整体，还包括梁柱构件、榫卯节点等单体，并对故宫古建筑基础、古城墙的力学特性与保护方法开展研究，因而研究对象比其他同类书籍更加广泛。

（2）研究内容全面。本书开展的研究既包括故宫古建筑结构整体的抗震、抗风、静力稳定性能研究，还包括构件单体开裂、变形以及节点拔榫等具体工程问题的分析，研究内容更全面。

（3）研究成果丰富。本书以故宫古建筑构件、整体开展分析，基于科学建模手段和采集的可靠数据及工程资料获得了关于故宫明清官式木构古建筑结构特性及有效保护方法的多项成果，丰富了我国古建筑保护和研究的内容，并可为古建筑保护实践提供技术参考。

本书内容丰富翔实，研究内容大都源于作者承担并完成的故宫古建筑安全评估项目，相关成果亦是作者多年工程实践心血的汇总，可为古建筑保护、修缮和研究提供理论参考和技术指导。

限于作者的学识和技术手段，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

致谢  
序  
前言

## 第一章 绪论 002

- 1 · 引言 004
- 2 · 本书主要内容 009
- 3 · 研究意义 011

## 第二章 故宫太和殿静力稳定评价 012

- 1 · 柱 014
- 2 · 雀替 014
- 3 · 檩三件 017
- 4 · 斗拱 018
- 5 · 梁架 019
- 6 · 结论 019
- 参考文献 020

## 第三章 故宫神武门抗震性能评价 022

### 第1节 神武门的防震构造 024

- 1 · 引言 024
- 2 · 防震构造 024
- 3 · 结论 035

### 第2节 神武门的动力特性与地震响应 035

- 1 · 力学模型 035
- 2 · 模态分析 037
- 3 · 地震反应 038
- 4 · 结论 041
- 参考文献 042

## 第四章 故宫灵沼轩抗风性能评价 044

### 第1节 灵沼轩抗风性能简化分析 046

- 1 · 引言 046
- 2 · 有限元模型 049
- 3 ·  $x$  向风荷载作用 050
- 4 ·  $y$  向风荷载作用 053
- 5 · 小结 055

### 第2节 灵沼轩风振响应 056

- 1 · 结构现状 056
- 2 · 有限元模型 057
- 3 · 模态分析 059
- 4 · 风振分析 061
- 5 · 小结 070
- 参考文献 070

## 第五章 基于经验法的故宫古建筑健康现状评估 072

### 第1节 木构古建筑安全评估研究现状 074

- 1 · 现有的评估方法 074
- 2 · 评估方法评析 077

### 第2节 故宫古建筑安全现状评估——以三友轩为例 079

- 1 · 引言 079
- 2 · 评估依据 080
- 3 · 结构评估 081
- 4 · 小结 100
- 参考文献 100



## 第六章 故宫古建筑变形构件的分析与保护 106

- 第 1 节 太和殿西山挑檐檩大挠度问题 109
- 第 2 节 太和殿三次间正身顺梁榫头下沉问题 114
- 第 3 节 太和殿明间藻井下沉问题 121
- 第 4 节 太和殿山面扶柁木支顶问题 124
- 第 5 节 结 论 126
- 参考文献 126

## 第七章 故宫古建筑开裂构件的分析与保护 128

- 第 1 节 基于 XFEM 技术的古建筑木梁裂缝扩展分析 130
  - 1 · 引言 130
  - 2 · 基本原理 131
  - 3 · 分析结果 132
  - 4 · 结论 135
- 第 2 节 故宫东华门某残损三架梁受弯性能分析 136
  - 1 · 荷载计算 137
  - 2 · 工况 1 分析 138
  - 3 · 工况 2 分析 141
  - 4 · 小结 144

- 第 3 节 故宫中和殿明间中金檩断裂问题分析 145
  - 1 · 荷载分析 146
  - 2 · 工况 1 分析 148
  - 3 · 工况 2 分析 150
  - 4 · 工况 3 分析 152
  - 5 · 加固方案 1 分析 154
  - 6 · 加固方案 2 分析 157
  - 7 · 结论 159
- 参考文献 159

## 第八章 故宫古建筑糟朽木构架的分析与保护 162

- 第 1 节 古建筑叠合梁与组合梁的弯曲受力性能 164
  - 1 · 单梁开裂形成叠合梁 164
  - 2 · 叠合梁与组合梁 167
  - 3 · 工字形截面 173
  - 4 · 小结 175
- 第 2 节 古建筑糟朽角梁受力性能分析 175
  - 1 · 计算简图 176
  - 2 · 受力分析 177
  - 3 · 小结 180
- 第 3 节 古建筑糟朽叠合梁受弯性能分析 181
  - 1 · 计算简图 182
  - 2 · 有限元模型 183

|       |                                  |     |  |
|-------|----------------------------------|-----|--|
|       | 3 · 受力分析                         | 184 |  |
|       | 4 · 小结                           | 187 |  |
| 第 4 节 | 古建筑糟朽梁头墩接加固分析                    | 187 |  |
|       | 1 · 计算简图                         | 189 |  |
|       | 2 · 有限元模型                        | 189 |  |
|       | 3 · 分析结果                         | 190 |  |
|       | 4 · 小结                           | 192 |  |
| 第 5 节 | 传统铁箍墩接加固底部糟朽木柱轴压试验               | 192 |  |
|       | 1 · 试验概况                         | 193 |  |
|       | 2 · 试验现象                         | 194 |  |
|       | 3 · 试验分析                         | 197 |  |
|       | 4 · 小结                           | 200 |  |
|       | 参考文献                             | 201 |  |
| 第九章   | 故宫古建筑榫卯节点残损及加固                   | 204 |  |
| 第 1 节 | 故宫古建筑榫卯节点典型残损问题                  | 206 |  |
|       | 1 · 引言                           | 206 |  |
|       | 2 · 典型问题                         | 208 |  |
|       | 3 · 原因分析                         | 210 |  |
|       | 4 · 加固方法                         | 212 |  |
|       | 5 · 结论                           | 216 |  |
| 第 2 节 | CFRP 布加固榫卯节点 $M-\theta$ 滞回曲线定性分析 | 217 |  |
|       | 1 · 试验概况                         | 217 |  |
|       | 2 · $M-\theta$ 滞回曲线分析 (加固前)      | 219 |  |
|       | 3 · $M-\theta$ 滞回曲线分析 (加固后)      | 223 |  |
|       | 4 · 讨论                           | 228 |  |
|       | 5 · 结论                           | 232 |  |
|       | 参考文献                             | 232 |  |
| 第十章   | 故宫古建筑城墙的受力性能                     | 234 |  |
| 第 1 节 | 考虑集中荷载的故宫角楼城墙的受力性能               | 236 |  |
|       | 1 · 本构模型                         | 237 |  |
|       | 2 · 接触分析                         | 238 |  |
|       | 3 · 小结                           | 240 |  |
| 第 2 节 | 含孔土对故宫城墙受力性能的影响                  | 241 |  |
|       | 1 · 力学参数                         | 242 |  |
|       | 2 · 有限元模型                        | 244 |  |
|       | 3 · 力学分析                         | 245 |  |
|       | 4 · 结论与建议                        | 248 |  |
|       | 参考文献                             | 249 |  |

## 第十一章 故宫古建筑基础的构造及抗震

性能 252

### 第1节 故宫古建筑基础构造特征 254

1 · 基础构造 254

2 · 讨论 261

3 · 结论 266

### 第2节 基座对古建筑抗震性能影响分析

——以太和殿为例 267

1 · 引言 267

2 · 有限元模型 269

3 · 模态分析结果对比 273

4 · 谱分析结果对比 276

5 · 时程分析结果对比 281

6 · 结论 284

参考文献 286

## 第十二章 学者与故宫古建筑保护 290

### 第1节 梁思成与故宫古建筑 292

1 · 梁思成与故宫古建筑的关系 292

2 · 梁思成对故宫古建筑的影响 299

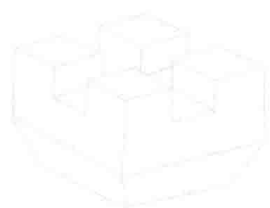
### 第2节 故宫学者与故宫古建筑结构保护研究 303

1 · 主要学者及其成果 303

2 · 研究成果总结 309

3 · 研究展望 310

参考文献 310





# 绪论

故宫古建筑群始建于1406年

1420年完工

至今已有近600年的历史

故宫拥有世界上规模最大、保存最完整的

木结构古代宫殿建筑群

是宝贵的文化遗产

开展故宫古建筑结构安全现状分析

与结构保护技术研究

是一项极其重要而又紧迫的工作



## 1·引言

故宫古建筑群始建于1406年,1420年完工,大部分建筑在明清时期历经不同程度的修缮或改建,现存古建筑构造及工艺大都遵循清《工程做法则例》相关规定。按屋顶(梁架)形式不同,故宫官式木构古建筑可分为以下五种类型:

- 1) 硬山,两坡屋顶,山墙不露出木檩。
- 2) 悬山,两坡屋顶,山墙露出木檩,又名“挑山”。
- 3) 歇山,硬山或悬山建筑,取其山尖以上部分,再向四周伸出屋檐。
- 4) 庑殿,四坡顶。
- 5) 攒尖,无论几个坡面,最后都交汇于一处。

不同屋顶形式的古建筑如图1-1所示。

从构造上讲,故宫官式木构古建筑主要由基础、柱、斗拱、梁架和墙体组成,其中梁和柱采用榫卯节点形式连接。下文以故宫太和殿为例简要介绍故宫官式木构古建筑的构造特征。

### (1) 基础(图1-2)

太和殿基础包括台基和高台两部分。台基基身除有防潮隔湿作用外,对礅墩也有稳固作用。太和殿高台由三层重叠的须弥座组成,高达8.13m。

### (2) 柱子(图1-3)

基础之上即为柱子。太和殿柱子包括柱底平摆浮搁及柱身侧脚。柱底平摆浮搁使得柱根不落入地下,而是浮搁在表面平整的柱顶石上。柱顶石露明不但可以保护柱根的木材不腐朽,更重要的是可将上部的结构和下部基础断开来,使柱根不会传递弯矩。侧脚是指檐部位置柱子的柱头微收向内,柱脚微出向外,以提高结构稳定性的做法。

### (3) 檩枋(图1-4)

檩枋是古建筑柱顶、屋顶的纵向连系构件,如太和殿柱顶之上的纵向连系构件为额枋,而屋顶内的纵向连系构件则称为檩三件(檩、垫板、枋)。檩三件根据在屋顶内的高度不同可分为檐檩三件、金檩三件、脊檩三件等。

### (4) 榫卯(图1-5)

太和殿内梁(枋)和柱采用榫卯形式连接,即梁端做成榫头形式,插入柱顶预留的卯口中。太和殿榫卯节点形式有多种,归纳起来可分为燕尾榫和直榫两种。燕尾榫又称大头榫、银锭榫,其端部宽、根部窄,与之相应的卯口里面大、外面小。它常用于拉扯连系构件,如檐枋、额枋、金枋、脊枋等水平构件与垂直构件相交部位。燕尾榫的安装通过上起下落进行,安装后与卯口有良好的拉结性能。直榫的形状特点是榫头端部和根部一样宽,主要用于需要拉结但无法用上起下落方法安装的部位,如穿插枋两端、抱头梁与金柱相交处、由戗与雷公柱相交



(a) 硬山(咸福宫西配殿)



(b) 悬山(英华殿西配殿)



(c) 单檐歇山(南三所)



(d) 重檐歇山(保和殿)



(e) 庑殿(太和殿)



(f) 攒尖(中和殿)

图 1-1 故宫官式木构古建筑形式

处、瓜柱与梁背相交处等，一般用拉结方法安装。

#### (5) 斗拱 (图 1-6)

斗拱 (宋代称铺作) 是我国古代建筑的特有形制，指安装在古建筑檐下或梁架间，由斗形构件、拱形构件和枋木组成的结构。斗拱种类很多，以清式斗拱为例，按所在建筑物位置可分为外檐斗拱和内檐斗拱。外檐斗拱位于建筑物外檐部位，包括平身科、柱头科、角科、溜金、平座等类型；内檐斗拱位于建筑物内檐部位，包括品字科、隔架斗拱等。斗拱内外侧一般都要向外挑出，称为“出踩”。斗拱向外挑出一拽架称为三踩，挑出二拽架称为五踩，挑出三拽架称为七踩，以





(a) 台基

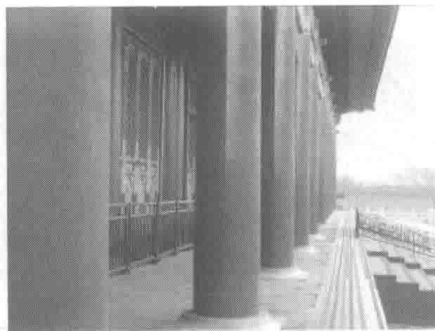


(b) 高台

图 1-2 太和殿基础

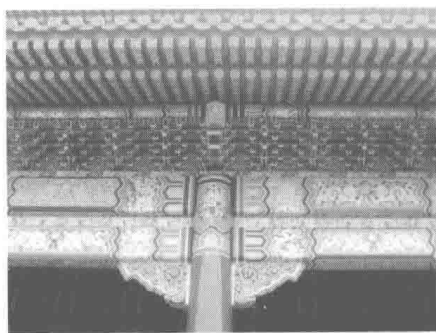


(a) 柱底平摆浮搁



(b) 侧脚

图 1-3 太和殿柱子



(a) 太和殿额枋插入柱顶



(b) 太和殿下金檩三件(溜金斗拱后尾穿过)

图 1-4 太和殿檩枋

此类推。太和殿为重檐庑殿屋顶，其斗拱做法是明清斗拱的最高形制，上下两檐均用溜金斗拱。下檐为单翘重昂七踩斗拱，上檐为单翘三昂九踩斗拱，斗拱内檐做成秤杆形式，落在上层花台枋上。