

# 山西应县木塔木结构受力分析初探

李治奇<sup>1</sup>, 李海燕<sup>2</sup>, 王琛<sup>3</sup>, 李育红<sup>4</sup>, 李果绵<sup>5</sup>

1. 加拿大多伦多凯谛思设计公司, 加拿大 多伦多 M4V 2V7

2. 山西中阳钢铁有限公司焦化厂, 山西 吕梁 033400

3. 辽阳市第四中学校办工厂, 辽宁 辽阳 111018

4. 鞍钢铁西医院新华门诊部, 辽宁 鞍山 114033

5. 中冶焦耐(大连)工程技术有限公司, 辽宁 大连 116085

DOI:10.61369/ERA.2026080017

**摘 要 :** 山西应县佛光寺释迦塔(俗称“应县木塔”)是世界上现存最高、最古老的木结构楼阁式塔,至今已有近千年历史。作为中国古代木结构营造技艺的集大成者,木塔以“层叠平台式梁柱结构”体系、数以千计的斗拱和数万榫卯节点,构成了一部独特的“活的力学教科书”。然而,在长期的环境侵蚀、地震、风载以及过往不当修缮等多重因素作用下,木塔已呈现出显著的整体倾斜与局部构件残损,其结构安全问题成为当前文物保护领域最紧迫且复杂的挑战之一。本文试从结构体系辨识、关键节点力学特性、结构性能评估与建模分析技术,以及当前面临的保护困境等几个方面,对应县木塔の木结构受力分析现状进行初步梳理与探讨,以期为后续深入研究提供参考。

**关 键 词 :** 应县木塔; 受力分析; 层叠平台式结构; 斗拱; 榫卯节点; 有限元分析

## An Initial Investigation of the Load-bearing Analysis of the Wooden Structure of the Wooden Pagoda in Yingxian, Shanxi Province

Li Zhiqi<sup>1</sup>, Li Haiyan<sup>2</sup>, Wang Chen<sup>3</sup>, Li Yuhong<sup>4</sup>, Li Guomian<sup>5</sup>

1.Kaitisi Design Company, Toronto, Canada, Toronto, Canada M4V 2V7

2.Shanxi Zhongyang Steel Co., Ltd. Coking Plant, Lvliang, Shanxi 033400

3.Liaoyang No.4 Middle School Industrial Workshop, Liaoyang, Liaoning 111018

4. Ansteel West Hospital – Xinhua Outpatient Department, Anshan, Liaoning 114033

5. Zhongye Jiaonai (Dalian) Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116085

**Abstract :** The Sakyamuni Pagoda at Foguang Temple in Ying County, Shanxi (commonly known as the "Ying County Wooden Pagoda") is the tallest and oldest surviving wooden pavilion-style pagoda in the world, with a history of nearly a millennium. As a masterpiece of ancient Chinese wooden construction techniques, the pagoda employs a "tiered platform-style beam-and-column structure," thousands of dougong brackets, and tens of thousands of mortise-and-tenon joints, forming a unique "living textbook of mechanics." However, due to prolonged environmental erosion, earthquakes, wind loads, and inadequate restoration efforts, the pagoda exhibits significant overall tilting and localized structural damage, making its structural safety one of the most pressing and complex challenges in cultural heritage conservation. This paper provides a preliminary review and discussion of the current state of structural force analysis for the Ying County Wooden Pagoda, covering aspects such as structural system identification, mechanical characteristics of critical nodes, structural performance evaluation and modeling techniques, as well as the prevailing conservation challenges, aiming to serve as a reference for further in-depth research.

**Keywords :** Yingxian Wooden Pagoda; load analysis; layered platform structure; dougong; mortise-and-tenon joint; finite element analysis

## 引言

公元1056年(辽清宁二年),一座纯木结构的高塔在今天山西朔州应县的土地上拔地而起。这座被后世称为“释迦塔”的宏伟建筑,高约67米,底层直径约30米,通体无钉无铆,全凭木材之间的叠摺、嵌压、榫卯咬合而成,用材约3000立方米,总重量超过7000吨。它以近千年的不朽身姿,向现代力学提出了一连串极为深刻的发问:在这座数千吨重的木质高塔之中,构件之间的力是如何传

递与分担，斗拱层与柱架层如何协同抵御地震与强风，巨大的榫卯“柔性”体系如何实现“以柔克刚”的抗震效果以及在木材自然老化和环境荷载的持续作用下，木塔的受力机制又发生了怎样的演变，这些问题共同汇聚为应县木塔受力分析的核心议题。尤其是木结构的静力与动力行为分析，始终是这一研究的核心主线。由于应县木塔作为不可移动的文物实体，很难开展大规模的破坏性试验，众多研究者采取了“勘察测绘+数值模拟+缩尺模型试验”相结合的技术路线，在揭示木塔受力机制的征程上取得了长足进展。本文正是以此为基础，尝试从多个维度对应县木塔的受力分析研究进行初步梳理。

## 一、“层叠的智慧”：应县木塔结构体系辨识

### （一）总体构成：明层、暗层与“层叠平台”架构

从宏观结构上看，应县木塔并非简单的一座“五层塔”。从外部可见五个明层（设有围栏和挑檐的楼层），而在每两个明层之间，还各设一个用于结构过渡和楼梯布置的暗层（即“平坐层”）。因此，按照柱架层与铺作层各自作为一个结构层来划分，木塔共包含19个结构层段。每一个结构层段基本遵循“明层柱架—明层铺作—平坐柱架—平坐铺作—楼屋面”的重复单元，一单元接一单元地向上叠加。每层平面均为正八角形，由内槽柱（8根）和外槽柱（24根）两圈立柱共同构成稳定的环形空间。这种“多单元叠加”的构型，正是应县木塔区别于一般刚性框架结构的关键所在。

### （二）“层叠平台式梁柱结构”体系与对比分析

在受力分析的语境下，陈志勇、祝恩淳等学者通过结合现场调查与有限元模拟提出：应县木塔不是简单的框架结构，而是一种“层叠平台式梁柱结构”。这一判断的意义在于：它在概念上确认了木塔由多个相对独立的柱架层和铺作层在竖向堆叠而成，层与层之间的水平力（如地震作用、风荷载）主要通过铺作层的摩擦与嵌压机理来实现传递和耗散。这与现代高层建筑强调整体刚性抗侧的理念截然不同。

进一步深入分析各结构层的抗侧刚度时，可以观察到一条清晰的递减链：刚度从大到小依次为“明层铺作—暗层柱架—暗层铺作—明层柱架”。这一刚度规律表明，明层铺作（即斗拱层）是木塔抵抗水平侧移和扭转的最大贡献者；而明层柱架由于其“浮搁”式的柱脚构造（柱头仅通过榫卯与上部铺作连接，柱脚直接置于石础之上而无刚性锚固），其抗侧刚度相对有限，反而在水平荷载下呈现一定的摇摆与转动能力，这形成了某种类似“摇摆柱”的耗能机制。整个结构因此如同一组多级缓冲系统，将外部能量逐级衰减，展示出极高的力学智慧。

### （三）斗拱层与柱架层的互补与协调

在木塔的受力关系中，斗拱层与柱架层的协同是分析的核心之一。铺作层（斗拱层）承受来自上部梁架和屋面的巨大垂直荷载，并将其扩散传递到下部柱网，同时在水平振动时通过构件间的嵌压和滑移来耗散能量。柱架层则通过环向的额枋（阑额）和普拍枋形成“闭合框架”，协同约束各柱的侧向位移，防止整体失稳。二者的互补性在于：铺作层提供水平刚度和耗能能力，柱架层提供竖向承载和环形稳定性。这一平衡在过去近千年中一直维持得很好，直到某些人为干预打破了这一平衡。

## 二、“柔性之筋”：关键节点的力学特性

### （一）斗拱：结构与美学统一的受力核心

在应县木塔中，斗拱绝非装饰，而是最核心的受力构件。全塔共使用了440组斗拱，形式从简单的四铺作到繁复的五铺作不

等，分布于各明层和暗层的柱头、转角及补间等处。每一座斗拱都是由多层斗、拱、昂、枋等小构件按照严格的构造逻辑层层向上“攒聚”而成的空间受力单元。

在数值建模中，如何简化这一高度复杂的组合体始终是一个技术难点。一种广为采纳的简化方法是使用“梁—短柱单元组”来等效模拟斗拱，即在有限元模型中采用一组刚度经过折算的梁单元和柱单元来代替斗拱群，从而兼顾计算精度与效率。更精细的研究则利用三维实体单元对特定斗拱进行建模（常用ABAQUS软件），并赋予其正交各向异性木材属性，以精确分析其在竖向荷载下的应力分布与传递路径。已有实体模拟结果显示，斗拱内部的应力分布并不均匀，其受力主要集中在枂斗、散斗等关键构件上，表现出明显的“力流集中—再扩散”的特征。

### （二）榫卯节点与“浮搁柱脚”：刚柔并济的力学机制

除了斗拱，榫卯节点是应县木塔的另一大力学奥秘。全塔依赖超过8万个榫卯节点将2万多件木构件联结成一体。节点多采用燕尾榫、直榫等传统形式，其中燕尾榫因形状“头宽颈窄”具有较强抗拔能力，在承受反复荷载时还能通过榫头与卯口之间的挤压和摩擦来耗散能量。研究表明，在有限元分析中，用“在梁单元两端加入半刚性单元”的方式能较好地表征榫卯节点的实际受力行为——它既非完全刚性，也非完全铰接，而是介于二者之间的半刚性连接，同时具备传力与耗能的双重功能。此外，“浮搁柱脚”也是一项不可忽视的力学设计。底层32根立柱（外槽24根+内槽8根）不设深基或铁箍固定，而是“平摆浮搁”于石质柱础之上。在地震或强风下，柱脚可以发生有限的摇摆位移，这一摇摆行为使得柱脚具有“半刚性”特征：一方面降低了结构的整体刚度，从而减小地震作用效应；另一方面也形成了另一种耗能机制。近年来，学者基于多弹簧模型提出了浮搁柱脚的简化力学建模方法，能够较为准确地模拟柱底—础石接触面的复杂受力状态。

### （三）接触面摩擦机制：连接界面统计与力传递特性

木塔结构的“柔性”不仅来自榫卯和浮搁柱脚，更广泛存在于构件之间的无数个接触面中。根据最新的一项统计研究，应县木塔1~5层共计包含87,744个木材—木材连接界面，其中“弦—弦”连接类型占61.29%，“横—弦”连接界面占18.41%。更重要的是，不仅界面数量随层高递减，构件间的嵌压值也呈现从2层至5层逐渐减小的规律，且枂斗与普拍枋之间的嵌压最为显著。这些数据确凿地表明：摩擦机制是木塔耗散地震等动态荷载的主要方式。在构建整体力学模型时，必须充分考虑各接触面的摩擦系数和嵌压刚度，才能正确反映木塔的实际性能。这一方向的量化研究为应县木塔受力分析提供了新的基础数据来源。

### 三、“静与动的较量”：整体结构性能评估

#### （一）竖向力工况：自重与二次应力的累积效应

在竖直方向，应县木塔承受着巨大的自重（超过7000吨）及其上屋顶、塔刹等附加荷载。理论上，这是一座符合结构静力学原理的高层塔楼。然而，由于木塔近百年来逐步发生整体倾斜和构件变形，原来的“垂直”受力状态已不复存在。倾斜导致的重力分量转变成了显著的“二次应力”，即附加弯矩和剪力。这正是木塔二层柱体进入静力失稳拐点的根本原因。当柱体倾斜达到一定阈值（一根顶梁柱已倾斜580多毫米）后，竖向荷载不再以单纯的压力形式传递，而是产生不可忽视的水平推力，进一步加速柱身的弯曲和榫卯节点的破坏，形成恶性循环。

#### （二）水平力工况：地震与风荷载作用下的动力响应

相较于竖向静力，地震与风荷载下的动力响应是应县木塔受力分析的另一重要领域。多模态分析表明，在多发地震（小震）作用下，部分明层柱架的层间位移角已超过弹性限值1/250~1/200，局部构件处于塑性变形状态。而罕遇地震（大震）模拟显示，木塔的侧移和扭转可能增大到倾覆风险难以忽视的程度。

2008年以来，随着缩尺模型模拟和原位动力测试的深入，对应县木塔动力特性的理解有了较大提升。研究人员利用安置于各层柱头和柱脚的加速度传感器，通过环境脉动法识别了木塔前7阶的自振频率和振型，并结合数值模型修正了材料参数和边界条件，使模型与实际响应更为吻合。在此基础上，还根据风洞试验生成的三维脉动风荷载时程曲线，计算了木塔在风振作用下的水平加速度响应，发现风的长期作用不可忽视。特别值得关注的是，研究发现明清时期将夹泥墙改为轻质格扇门后，木塔丧失了重要的抗侧力和抗扭转能力，成为塔体加速扭转和倾斜的重要诱因。

#### （三）抗震与抗风的储备与脆弱性

综合地震和风荷载分析可见，应县木塔在完好状态下拥有较高的地震与风振安全储备。其“层叠”构造、斗拱摩擦耗能和柱脚摇摆机制共同构成了多道抗震防线。然而，随着现有残损的不断扩展（包括柱身开裂、榫头劈裂、斗拱嵌压过度、木材腐朽等），木塔的抗侧刚度相比理想完好状态平均下降了约33%，其安全储备正被快速侵蚀。尤其是二层——受力最大、变形最严重的部位，已处于“局部失稳—刚度退化—内力重分布—一再失稳”的加速退化阶段。因此，当前受力分析的重点已从“初始设计性能”评估，转向“现状损伤性能”的精细化评估。

### 四、“建模的阶梯”：木结构受力分析的技术路径

#### （一）理想化模型 vs 现状残损模型的对照研究

由于应县木塔的不可移动性和文物特殊性，全面进行破坏性试

验是不可能的。因此，数值模拟成为揭示其受力机制的主要途径。目前主流的研究范式是“建双模、做对比”：一方面建立未考虑任何残损的理想复原模型，反映木塔在初建时期的“设计力学性能”；另一方面建立基于实测残损数据（几何变形、构件损伤、节点松动等）的现状残损模型，揭示木塔当前真实的受力状态和危险点。通过理想模型与现状模型的横向对比，可以定量评估损伤对整体结构和局部构件承载力的影响，为制定保护方案提供科学依据。

#### （二）多尺度建模策略：从整体到节点

在建模层级上，研究者通常采用多尺度策略：整体模型采用梁单元和壳单元，关注宏观位移和层间变形；局部模型（如某层斗拱、某根倾斜柱或榫卯节点）则采用三维实体单元，精细化分析应力集中、损伤演化等细节。关键节点采用了“节点耦合处理”和“半刚性单元”等技术，实现了整体模型中连接行为的精准等效。对于斗拱，除了刚度等效单元组外，更有研究以摩擦—剪切耗能模型在接触面处设置摩擦对，从而再现斗拱在地震作用下的能量耗散过程。

#### （三）从试验到反馈：模型试验在受力分析中的校准价值

所有的建模假设都需要试验验证。近年来，1:8大型缩尺模型试验已在振动台上开展，涵盖了不同地震波、不同激励水平下的结构响应，并已积累了一批有价值的试验数据。同时，针对二层明层叉柱与斗拱连接节点的1:3缩尺拟静力试验，精确测量了节点在不同方向加载下的承载能力和破坏模式，为纠正有限元模拟参数提供了直接参照。这些模型试验构成了连接“纸上力学”与“真实力学”的桥梁，显著提高了受力分析的置信度。

### 五、结语

回顾应县木塔的木结构受力分析研究，可以看到一幅生动的画卷：它以独特而智慧的“层叠平台式梁柱体系”和刚柔并济的节点构造，书写着与现代结构力学不尽相同却又高度契合的力学诗篇；它通过摩擦、嵌压、榫卯咬合等微观机制，成功实现了跨越千年的自然力和震动的消解；它又在当下的残损侵蚀之下，向当代研究者发出了求解“倾覆临界”与“修缮边界”的紧迫追问。这不仅是对一座古代建筑的科学解答，更是对中华木结构营造文明的最深层致敬。

### 参考文献

- [1] 张佳凝, 王品博, 周海宾, 等. 应县木塔构件连接界面统计分析 [J]. 木材科学与技术, 2025, 39(6): 1-9.
- [2] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 应县木塔精细化结构建模及水平受力性能分析 [J]. 建筑结构学报, 2013(9): 6-11.
- [3] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [4] 李豪邦, 张鹏程. 应县木塔千年前展示国人力学才智的十段柱五十五层梁榫接高层结构 [EB/OL]. 中国民族建筑, 2024-10-14.
- [5] 王珏. 基于摩擦-剪切耗能的应县木塔斗拱有限元模型研究 [D]. 扬州大学.
- [6] 袁建力, 陈韦, 王珏, 等. 应县木塔斗拱模型试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 66-72.
- [7] 李圣杰, 朱一凡, 赵波, 等. 应县木塔叉柱斗拱连接的结构行为研究 [J]. 工程力学, 2026.
- [8] 张鹏程, 黄文锦, 李顺时. 应县木塔结构内力分析 [EB/OL]. 中国民族建筑, 2024-01-05.
- [9] 陆维杰, 詹鑫, 邱洪兴. 基于多弹簧模型的浮搁柱脚节点建模方法 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2025, 47(4).
- [10] 应县木塔结构监测与试验分析研究综述 [J]. 中国文物科学研究, 2012.