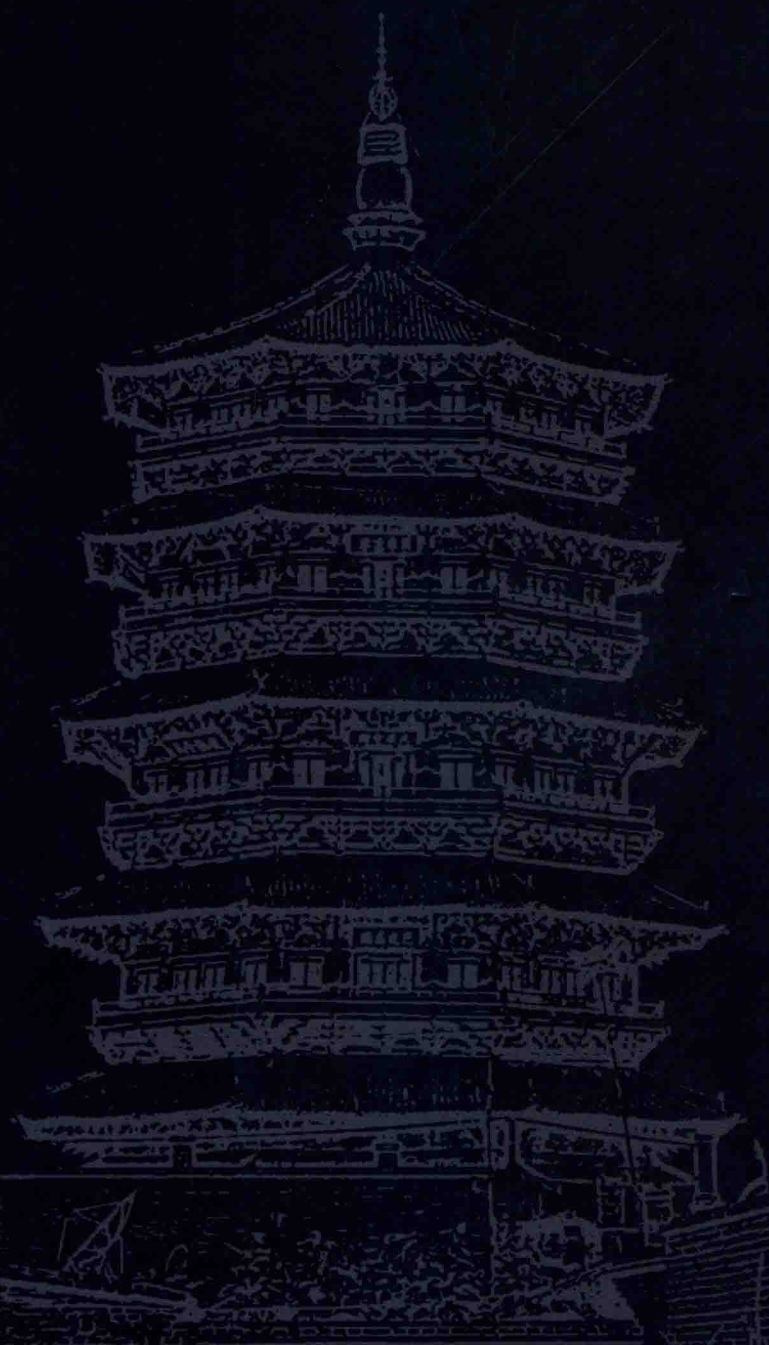


中国文化遗产研究院

应县木塔保护研究

侯卫东 主编

王林安 永昕群 编著



文物出版社

中国文化遗产研究院
应县木塔保护研究

侯卫东 主编

王林安 永昕群 编著

 文物出版社

图书在版编目(CIP)数据

应县木塔保护研究 / 侯卫东主编 ; 王林安, 永昕群
编著. — 北京 : 文物出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5010-4606-5

I. ①应… II. ①侯… ②王… ③永… III. ①佛塔—
文物保护—研究—应县 IV. ①K878.64

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第122964号

应县木塔保护研究

中国文化遗产研究院 编

责任编辑: 王 伟

实习编辑: 周燕林

责任印制: 梁秋卉

出版发行: 文物出版社

社 址: 北京市东直门内北小街2号楼

网 址: <http://www.wenwu.com>

邮 箱: web@wenwu.com

经 销: 新华书店

制版印刷: 北京图文天地制版印刷有限公司

开 本: 889×1194 1/16

印 张: 27.75

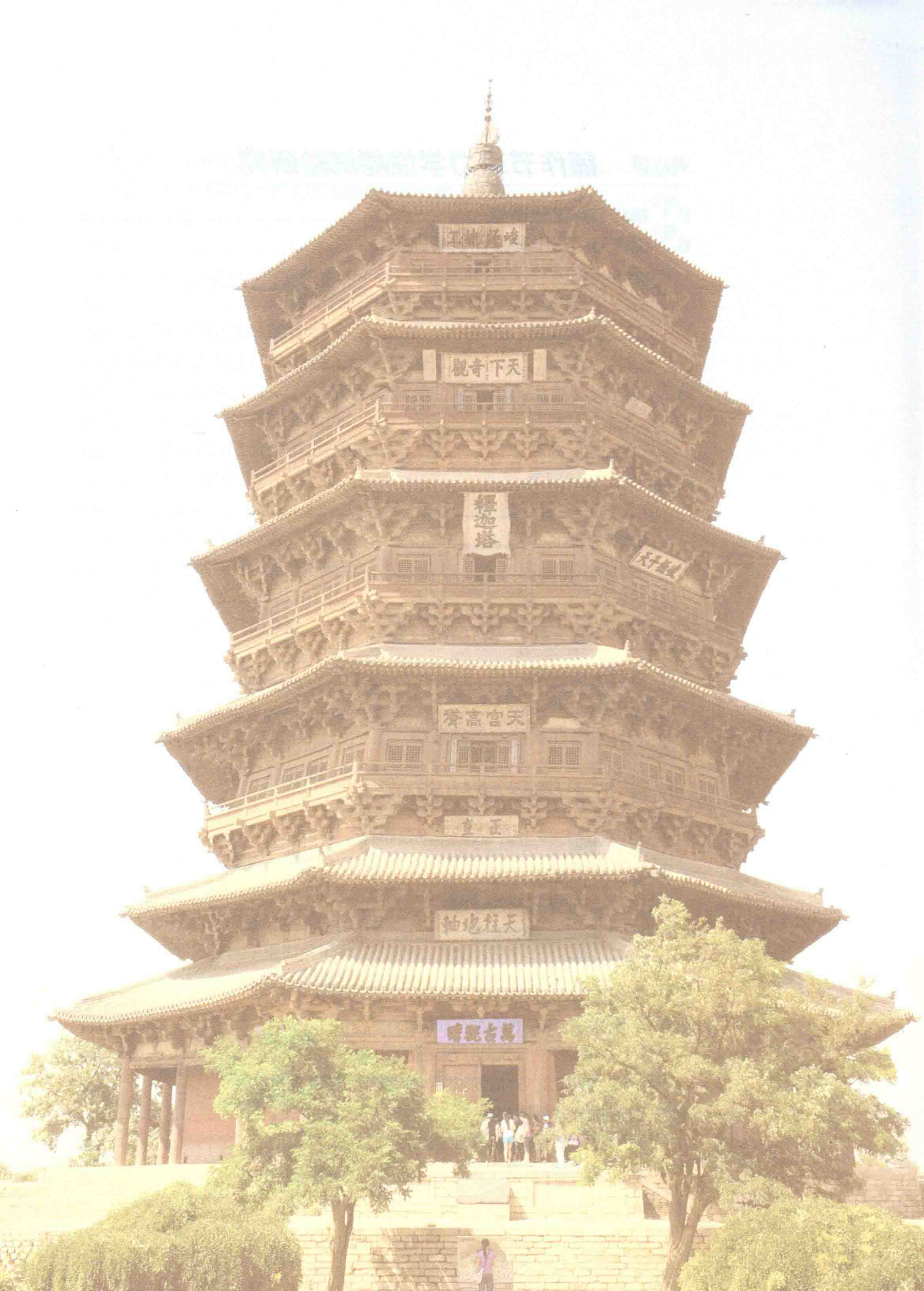
版 次: 2016年8月第1版

印 次: 2016年8月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5010-4606-5

定 价: 428.00元

本书版权独家所有, 非经授权, 不得复制翻印



天宮高聲

天下奇觀

釋迦塔

天子殿

天宮高聲

天柱地軸

天柱地軸

萬古流芳

目 录

序	001
---------	-----

引子：应县木塔保护的世纪之争	009
----------------------	-----

第一章 应县木塔概述

1.1 基本情况	018
1.2 应县沿革	020
1.3 佛宫寺沿革	021
1.3.1 佛宫寺历史	021
1.3.2 佛宫寺格局	021
1.4 应县木塔沿革	023
1.4.1 始建年代	023
1.4.2 木塔所历地震	024
1.4.3 木塔所历战争	025
1.4.4 历史上的维修	027
1.5 应县木塔近年的维修与加固	028
1.5.1 1928年至1935年维修	028
1.5.2 1970年代维修	028
1.5.3 2008年木塔屋面保养维护	032
1.6 应县木塔已有研究	033

第二章 应县木塔现状

2.1 一层	039
2.1.1 一层土壑墙内隐蔽柱	039

2.1.2 一层土壑墙	041
2.1.3 一层柱底标高	043
2.1.4 一层副阶	044
2.1.5 一层梁枋、普拍枋、阑额、铺作、平闇枋	044
2.2 二层	046
2.2.1 二层平坐层	046
2.2.2 二层明层	054
2.3 三层	064
2.3.1 三层平坐层	064
2.3.2 三层明层	069
2.3.3 二、三层柱子标高变化	073
2.4 四层、五层及屋顶现状	074
2.4.1 四层	074
2.4.2 五层	075
2.4.3 屋顶	075
2.5 底部三层木构件残损勘察评估	077
2.5.1 残损类型	078
2.5.2 构件残损程度评估	082
2.5.3 一层明层构件残损勘察	088
2.5.4 二层平坐构件残损勘察	093
2.5.5 二层明层构件残损勘察	098
2.5.6 三层平坐构件残损勘察	102
2.5.7 三层明层构件残损勘察	104
2.5.8 残损状况严重的关键受力构件	107

第三章 检测与探测

3.1 木构件材料检测	110
3.1.1 检测方法	110
3.1.2 采样与选点	111
3.1.3 检测数据分析	112
3.1.4 木构件2D成像检测	114
3.1.5 木构件材质情况小结	115
3.2 一层土壑墙地质雷达探测	117
3.2.1 地质雷达探测工作方法	117
3.2.2 现场探测	119

3.2.3 探测成果	121
3.3 碳十四测年检测	123
3.3.1 文物保护科学技术研究所测年及祁英涛先生的分析	123
3.3.2 木塔办委托北京大学考古文博学院所做测年数据及初步分析	123
3.4 木塔地基与基础检测	129
3.5 动力特性检测	133
3.5.1 监测目的与仪器设备	133
3.5.2 测点布置与测试内容	134
3.5.3 数据处理与分析结果	135
3.5.4 阶段性结论	136

第四章 监测

4.1 结构变形监测概况	140
4.2 局部结构倾斜变形监测	144
4.2.1 拉线位移计变形监测	144
4.2.2 倾斜位移计监测	164
4.2.3 局部结构倾斜变形监测的阶段性结论	186
4.3 整体结构变形监测	188
4.3.1 仪器设备及工作流程	188
4.3.2 监测点位与实测周期	189
4.3.3 监测数据处理	191
4.3.4 数据分析与评估	194
4.4 地面脉动及地震监测	205
4.4.1 监测方案	205
4.4.2 系统主要技术指标	208
4.4.3 监测结果	210
4.4.4 地面脉动与地震监测的阶段性结论	215
4.5 环境监测	216
4.5.1 监测目的	216
4.5.2 监测内容及测点布置	216
4.5.3 监测仪器及技术指标	217
4.5.4 阶段性监测的结论	219
4.6 风荷载及风效应实测与分析	219
4.6.1 现场实测方案	220
4.6.2 木塔周边风速实测及分析	227

4.6.3 木塔表面风压实测及数据处理.....	232
4.6.4 考虑结构动力效应的木塔风荷载计算	236
4.6.5 小结.....	249

第五章 应县木塔结构力学计算与变形影响研究

5.1 应县木塔结构体系的特点	252
5.2 应县木塔结构铺作（斗拱）计算模型	254
5.2.1 明层外槽铺作	254
5.2.2 平坐与明层结构层单元	255
5.2.3 整体结构计算模型线性图.....	257
5.2.4 塔顶与塔刹	258
5.3 有限元模型	261
5.3.1 塔基与底层墙体	262
5.3.2 整体结构有限元基本模型.....	263
5.3.3 材料参数	264
5.3.4 构件单元几何参数	265
5.3.5 荷载参数	266
5.4 整体结构有限元线弹性静力计算	271
5.4.1 考虑结构演变的有限元模型组	271
5.4.2 荷载工况	274
5.4.3 有限元模型计算结果的准确性检验	275
5.4.4 带斜撑模型（1933年以前）计算结果	277
5.4.5 现状结构模型（2010年）计算结果.....	282
5.4.6 斜撑（夹泥墙）对整体结构静力性能的影响	292
5.5 二层倾斜变形对应县木塔结构力学性能影响	294
5.5.1 对整体结构层间水平位移的影响	294
5.5.2 二层典型柱子受力分析	296
5.5.3 不同风向下的结构位移	301
5.6 结构动力分析	315
5.6.1 应县木塔结构与地震	315
5.6.2 地震波选取	316
5.6.4 柱子内力时程分析	324
5.6.5 小结	324

第六章 铺作节点力学性能试验研究

6.1 铺作节点试验模型.....	329
6.2 铺作节点三维有限元数值分析.....	331
6.2.1 应县木塔斗拱材性试验.....	331
6.2.2 应县木塔典型铺作节点三维有限元模型.....	331
6.2.3 计算实例.....	339
6.2.4 小节.....	356
6.3 二层明层柱头铺作力学性能试验研究.....	359
6.3.1 试验概况.....	359
6.3.2 试验方案.....	360
6.3.3 试验现象.....	367
6.3.4 试验结果与分析.....	369
6.3.5 小结.....	378
6.4 主要结论.....	379

第七章 应县木塔信息化

7.1 应县木塔测绘.....	382
7.2 历史影像资料.....	401
7.3 应县木塔现状信息采集系统.....	404

第八章 木塔维修加固研究

8.1 落架维修.....	412
8.2 整体支撑加固方案.....	413
8.2.1 钢支架基础的考虑.....	415
8.2.2 柱架构造的考虑.....	415
8.2.3 梁架.....	416
8.3 上部抬升二层落架（局部抬升部分落架）方案.....	418
8.4 严重倾斜部位抢险加固研究.....	419
8.4.1 措施一：对倾斜严重柱加设辅柱.....	422
8.4.2 措施二：外槽恢复环向斜撑——设置交叉拉索.....	425
8.5 现状抢险加固方案.....	426
8.5.1 加固方案主要内容.....	426
8.5.2 加固施工设计.....	428

序

应县木塔建造距今已近千年，千年的时光可以磨灭大多数的人类足迹，因此我们现在能够看到的千岁的古物少之又少。应县木塔是少数有幸存留下来的木结构古建筑中的杰出代表。

尽管保留了下来，不容置疑的是其保存现状和保存下去的压力仍然很大。要使这座古代的建筑遗产能较长远的保存下去，就要了解它的现状，分析它存在的问题，从而有针对性的进行保护维修。

2006年以来，中国文化遗产研究院受国家文物局及山西省、应县以及各级政府的委托，开展了应县木塔现状的各项研究，取得了阶段性的成果，并在此基础上提出了抢救加固的方案，成为新时期对木塔进行保护的前奏。

木塔是一座历史的丰碑，但也是一座木结构的建筑。既然是建筑，它就符合一般建筑的基本规律，也有着一般建筑物的共性。木塔是木质材料以特定结构形式的结合。因此我们研究应县木塔的现状，也从这两方面着手进行。

本次对木塔的现状研究，主要集中在对其安全性的研究，也就是它的安全指数。研究的方法多种多样，既可以是传统的，也可以是现代的；选用的手段既可以是历代传承的手法，也可以是现代的创新技术；既可以以传统的经验进行推断，也可以利用科学的数据进行推论；对于应县木塔这座独特的遗产来说，很难有唯一的、完全对症的研究路线和方法，不断地总结经验和成果的积累是不可或缺的过程。

应县木塔历经千年，要在短时间内，完全凭借我们自己的能力全面认识木塔是很难办到的，查阅古籍文献，历史上对木塔的记载少之又少，再加上中国历代并不重视工匠这个领域，因此具有科学技术含量的历史描述

更是几乎没有。这无形中加大了研究的难度。好在自从木塔作为文物古迹被发现后，国内外的学者给予了巨大的关注；特别是国内的诸多大专院校和科研机构以木塔作为研究对象的不在少数，除了研究它的历史和艺术价值外，对木塔的现状从结构角度进行的研究也有丰硕的成果。

20世纪初至21世纪初，木塔的研究以应县和山西省的相关机构为主，如山西省古建筑保护研究所，太原工学院（太原理工大学前身）等机构和院校，国内一些知名大学和研究所也参加了相关研究，如中国文物研究所（中国文化遗产研究院前身）、清华大学、天津大学、北京建筑工程学院（现北京建筑大学）、中国城市规划研究院、中国建筑科学研究院等学术机构。

2006年以来，应县木塔的研究以中国文化遗产研究院为主，在前人成果的基础上开始对木塔以加固和保护为目的探索，研究工作先后得到山西省古建筑保护研究所、中国建筑科学研究院、北京交通大学、西安建筑科技大学、东南大学、太原理工大学等的支持。山西省文物局也将前期研究的相关资料转交中国文化遗产研究院，这些珍贵资料都对木塔研究的延续发挥了积极的作用。

应县木塔平面八角，内、外槽，每面三间，外观为五层带副阶（一层周围廊），每层下带平坐，总高达65.84米。经过近千年的风雨、地震和

人为破坏，塔外观仍挺立如初，高大雄伟。然而在这高大身影的背后，隐藏着诸多因年代久远而蓄积的病痛。最为明显的是塔身二层、三层的结构倾斜和下部三层的构件损坏。

木塔的一层内部是一座巨大的释迦佛，四周彩绘琳琅满目，包括上部的天花藻井也是满绘。沿木梯登塔到二层，则可在西南方向发现极明显的柱子倾斜，也有地面的不均匀沉陷。更触目惊心的则是一些木构件的破坏，有的已弯曲开裂，有的已经压碎或压劈。这些显而易见的木塔安全隐患，早已引起各界的关注，但对其评估的结论，则有各种说法。有的认为已达安全极限，随时都可能导致木塔的倒塌。也有的认为目前的状态对木塔不造成致命伤害，木塔的结构安全在近期内没有风险。对于这些意见和质疑，必须通过科学的研究和可靠的数据才能加以解释。中国文化遗产研究院近期通过各方面的研究和勘察，提出了自己的看法和建议。

为了了解木塔严重倾斜部位的情况，近年对木塔的主体结构进行了一系列的勘察和测绘。有关木塔地基基础的情况，根据木塔的现状，基本的观点是地基和基础的状况和目前木塔的残损无直接关系。从过去所做的木塔地基的调查看，木塔的地基较稳定，没有明显的变形。再加上对这类重要文物古迹的地基勘探始

终不是件容易的事情。因此本次基本沿用原有地质资料，未做新的调查。

木塔木结构部分的勘察，20世纪进行过几次测绘，但基本以传统测绘为主，是手工加测尺的方法，绘制也基本为手工绘图，这些图纸现在已经成为珍贵的历史资料，也是我们进行研究的重要参考。近期采用手工和测绘设备结合的方式，对变形严重的二、三层进行了三维激光扫描，同时拍摄了各个角度和部位的高分辨率照片，对各层残损的木构件进行了登记和记录。在这些方法的基础上绘制了建筑和结构的现状图纸。通过这些图纸，可以较全面的反应木塔主体结构的建筑参数；如构件尺寸，变形与位移的数据。这些数据均输入到现已基本构建成型的《应县木塔信息系统》中，对今后的研究和保护都是极为有用的。这部分的工作主要以永昕群副研究员为主，王林安副研究员参加完成，信息系统的搭建则以颜华工程师为主要指导者。

对于木构建筑而言，木材作为承重以及装修的主要材料，其材性也是研究的关键要素，中国文化遗产研究院与中国林业科学研究院木材工业研究所合作，对木塔的主要材料情况进行了分析测试，基本了解了现在木塔上各类木质构件的性能，然而，由于木塔是极为重要的文物古迹，要想完全按照材料取样分析的要求进行采样是不可

能的，因此取样的部位、尺寸规格和代表性都不可能完全满足需要。很多样品是从已经废弃的构件获取，有的是边角料，并不能百分之百代表仍在受力状态下的木塔原材料。尽管如此，这些木料曾经是或者仍然是木塔建造材料的组成部分，因此，相当程度上仍能作为木塔材料特性的代表。木质材性的分析测试为后来的结构计算以及保护加固提供了较为可信的依据。

除了木构系统，木塔安全的另一个因素就是底层的土壑墙。墙体现状外观基本完好，但由于它将底层木构架完全包裹在内，因此它的稳定和木结构的关系就很密切。以往虽也对土壑墙做过一些调查分析，但都没有得出较为科学的结论。考虑到墙体无法按常规取样，必须采取无损检测的方法，本次尝试采用地质雷达进行探测，这种较新的技术用于文物本体的分析，尚没有成熟的指标体系可供参考，只能根据常规的分析得出定性的初步结论。在探测过程中，重新核对了墙内柱子的设置和位置。在引进无损设备的同时，也对其结果进行现场人工比对，从而为今后积累经验。

木塔的屋面属于经常性维修部分，2006年对其进行了较为仔细的测绘，特别是顶部屋盖还采用了航模进行拍照；对于瓦件则取样分析。在测绘的基础上制订了屋面的维修方案。该方案的初期的主要方法是不动苦背，仅对屋面瓦的走

位开裂部分进行勾抹，消除屋面渗水造成的屋面破坏。但揭开瓦面，发现屋面苫背严重风化、粉化，已无法直接勾抹瓦垄灰缝，只能以原有材料和工艺进行了重新制安苫背和瓦瓦。这项实验性的屋面检修工程只在二层实施。其他各层因为脚手架等问题未及进行，后来仅进行了屋面防水勾抹补漏。维持几年后未发现严重漏雨现象。

屋面的构造和做法是仍应继续探索保护和继承的问题。屋面由于仍使用传统的草泥苫背，灰陶筒板瓦，其重量占到木塔总重量的 $1/6$ ，且由于瓦屋面的离散性，屋面结构在地震作用下不利于木塔的安全。关于屋面部分的内容，由于目前的状况是维修之后的状况，因此在本书中没有作为重点来介绍。

对木塔进行了较为全面的勘查和测绘后，回过头来，主要还是要面对木塔目前存在的最主要的问题，也就是二、三层的严重倾斜和部分构件的严重残损。

这二者相比较，又是结构倾斜对木塔的威胁更大一些，因此，木塔现状问题的重中之重，就是评估二、三层局部严重倾斜对结构安全的影响。这个是为较为复杂的命题。近期的研究主要从两方面着手：

一方面是倾斜变形下的结构安全分析，另一方面就是倾斜变形的发展趋势。由于现状倾斜下

的木塔结构仍然挺立不倒，因此，这个最起码的事实就提供了一个最基本的尺子。在木塔现有的结构体系下，这样的倾斜形式和倾斜量尚不足以致使木塔产生结构的垮塌。但我们不能以此而沾沾自喜，毕竟这种倾斜导致木塔结构产生非均衡的受力，而这种不均衡的受力体系显而易见不利于木塔抵御振动、风荷及其他外力的作用。

因此，对于木塔现状安全性的评估，基于两个方面，其一是现状的倾斜等问题是否在继续，其二是要计算目前状况下的结构受力以及现状结构能够承受的最大荷载。

在这两个问题中，变形发展的趋势和规律又是最迫切的因素，从2008年起，中国文化遗产研究院在对已有数据进行探究的基础上，开展了对木塔几个大的方面的监测；包括木塔局部严重倾斜部位的相对变形监测和木塔整体变形监测。木塔的变形状况较为复杂，由于木塔的结构和材料特点以及悠久的历史，木塔的变形很难归结为某种原因或体系，木塔的变形存在于木塔各个环节，既有整体的全貌的变形，也有局部的相对变形，还有构架之间、构件之间的变形，因此是一个相对复杂的问题。变形也有是否同步的问题，有的问题可能是几百年积攒的，有的可能是近期很快发展的，要搞清楚它们之间的因果关系，需要更大量的数据积累和推演。

虽然情况较为复杂，监测的工作仍要提出一个清晰的思路，就是从局部严重倾斜的变形监测开始。监测工作主要取决于采取的手段和设定的路线是否合理，也涉及检测设备的选取，数据的记录以及对这些数据的分析利用。在实际的检测中，曾经困扰监测设备的问题是木塔的雷电风险，木塔是该处较为明显的制高点，也就成为了吸引雷电的目标，历史上木塔曾经受过雷击，因此在木塔上安装带有金属和电线的设备在当时的条件下是被禁止的。这也限制了对更适合的设备的使用。开始的监测使用的是传统的方法，也就是物理计量的方法。利用拉线位移计来计算需监测部位的变形和位移。包括了构件的倾斜、弯曲和沉降。这一段时间的监测是有一定效果的，但并不十分精确。后来解决了防雷电问题后，采用新的测斜专用设备，其精确率和可信度就得到较大幅度的提高。以这两种方法，经过不间断的监测和数据积累，可以基本看出木塔局部变形的大趋势；这对于评估它的安全性发挥了较大的作用。除局部变形监测外，也尝试进行了木塔整体的变形监测，并对局部与整体的关系进行了分析，最后得出木塔的变形仍以二、三层局部变形为主，整体的变形大部分都是这些部位变形的显现。

除变形监测，考虑到振动和风是木塔变形

的主要外因，也对其进行了较全面的监测，其中振动的监测持续时间较长，对周边环境振动以及突发地震的振动都做了监测，这些监测数据都会成为木塔结构计算有用的参数。木塔地处雁北高原，历来风力较大，特别是秋冬两季尤其集中，对照木塔的倾斜方向和该地区的常年主导风向，发现这两者有一定的吻合。当然这并不是说目前的倾斜的主要诱因是风载，木塔的第一次突发变形才是它目前现状的主要原因。

监测是木塔安全评估的手段之一，但任何监测的原始数据都有个重新认识的过程，监测数据并不能直接告诉我们想要的结论，数据的提炼、去伪存真、归纳分析是一个科学的过程，再加上正确理解设备的精度、偏差等，因此正确对待监测数据，才能在研究和决策过程中发挥应有的作用。在这一轮的监测和数据的研究中，我们按照年度的期限，以每一处监测点为基点，绘制了变形的时程曲线，可以看出变形的趋势和强度，对于最后做出现状评估的结论起到了一定的作用。

木塔的监测既有实时的和有针对性的，也有长期的，资料整理性质的。与变形监测不同，木塔的环境监测数据不一定马上会应用于木塔的现状研究或者计算，如一些气象、温湿度、常规的振动监测等，但这些数据对于长期研究木塔是会有作用的。

木塔现状评估的另一个方面是它目前的结

构受力情况，木塔是典型的早期传统木结构建筑的
代表，它的建造原理是基于中国唐辽时期对建
筑结构的认识。我们不知道古人如何得出这类建
筑的建造原理，但其屹立千年的事实，证明它有
着自己的合理性和科学性。近现代的建筑理论
基于新的结构力学和材料力学的原理，是科学
和可实证的。并以这些理论为基础建立了现代
的建筑结构计算和评估的体系。但这些原理和体
系直接用于应县木塔的研究和计算，则有相当大
的难处。现代的建筑结构计算需要至少两方面的
基础，第一是要建立符合某种结构体系的计算模
式，第二是要能提供这种结构体系进行计算的参
数，对照之于木塔，还很难找到与木塔现状结构
形式完全相同的计算模式，也很难给出计算所需
的参数。因此，多年来，相关行业的专家学者
都在尝试对木塔的结构进行计算，但目前还没有
一种大家都认可的方法。对此事的看法也大相径
庭，认为木塔可以计算的在不断的尝试，而认为
根本无法计算的专家则认为任何计算都是徒劳无
益的。作为木塔研究的一个重要的不可或缺的方
面，对木塔结构的计算是不应或者无法绕开的，
目前这方面进展缓慢，主要的原因还是没有建立
起一个完全合理的科学模型，还是在想抄近道、
躲避矛盾。如一些关于木塔的计算模型一再简
化、很多参数一再统一，最后计算的结果也是太

过简单和没有特色，最后结果的适用性大打折扣。

中国文化遗产研究院近期的一些结构研究也
未完全逃脱这条规则，但就对木塔的理解来说，
还是有一定作用的。如对于应县木塔横纹承压构
件的性能研究，对于应县木塔典型斗拱体系的受
力特点研究，对于应县木塔整体结构的有限元模
型计算和研究，对于应县木塔在其典型风场作用
下的受力特性研究等等，这些研究尽管只是得出
初步的结论，但对于我们增强对木塔结构安全的
信心还是起了很大的作用。比如对木塔主要承重
的二层柱的研究，证明它的竖向承载能力尚未完
全发挥。综合监测、试验、结构计算等多方面的
研究成果，可以推测在对严重倾斜部位进行成功
加固的前提下，目前木塔的整体形态尚无倾覆的
征兆。

木塔的结构是重要一环，构成木塔的近千年
的材料更是重要的价值载体。我们在勘察中也把
对木塔的构件残损的调查作为一项主要的工作，
木塔的残损主要集中在木塔的下部三层，主要原
因当然是下部的构件承担了较大的荷载，残损
的现象很多，包括开裂、弯曲、劈裂、折断及压
缩等，这项工作的工作量很大，且存在隐蔽部位
的盲点，或者由于叠压而不易辨认。近期目标
是对残损构件简单分类，长期目标是建立构件系
统的互联网身份识别，使木塔的每一个构件都有一

份确定的科学的档案。当然，这项工作最大的贡献，还是它为下一步的构件加固和修复提供了最完整的档案。

在以上所说的关于应县木塔研究的各项成果的基础上，我院也提出了对木塔严重倾斜部位进行加固的方案。方案的实施有待在过程中不断的调整和完善，对于加固后的效果，我们拭目以待。

应县木塔的研究是一项长期的任务，即使木塔的现状研究，也停留在我们这代人或者我们这些参与这项工作人员的认知水平上，它也会随着科技水平的提高和手段的创新而不断推陈出新。这本书的编辑，只是要告诉读者我们在对应县木塔研究过程中的所想和所做，以便为后续的研究工作提供一个引子。书中的数据也有一定的

局限性，在使用时也应有所取舍。

这本书的几位参与者都是中国文化遗产研究院近期参加这项工作的主要人员，但远远不是全部，他们在工作中肯定地吸取了前人的经验，并将集体的成果做了汇总，因此，此书应该是中国文化遗产研究院从事木塔保护的所有成员的集体成果。

此为之序。

侯卫东

2015年10月

北京

