应县木塔平面丈尺假说：从 1933 年的旧照谈起 *

A Design Hypothesis for the Floor-Plan Dimensions of Sakyamuni Pagoda, Ying County, Shanxi Province: Starting with an Old Photo Taken in 1933

李泽辉　赵寿堂　李沁园　李大卫　徐　扬　陈　彤　刘　畅 ❶
LI Zehui, ZHAO Shoutang, LI Qinyuan, LI Dawei, XU Yang, CHEN Tong, LIU Chang

摘　要：本文从中国营造学社老照片所反映的应县木塔三层平坐处构造现象出发，通过研读、统计、比较现有最为详尽的北京建筑工程学院和山西古建筑保护研究所实测数据，对应县木塔各层平面丈尺、侧脚及整体设计规律展开分析，并提出了一套不同于现有研究成果的新假说：一，营造尺长约 306 毫米；二，平面设计以各层每面面阔为计算要点，明层一至五层每面面阔非完全均匀递变，依次为 31.2 尺、30 尺、28.8 尺、27.6 尺、26 尺；三，明层五层设计上有一定“独立性”，每面面阔及开间设计均为整尺；四，各明层立柱均有侧脚，平坐除四层外均有侧脚，与平坐柱内收配合共同实现木塔逐层面阔递减设计。

关键词：应县木塔；实测数据统计；营造尺；侧脚；平面丈尺

【文 章 编 号】2096-9368（2021）02-0056-15
【中图分类号】TU-092
【文献标识码】A
【修 改 日 期】2021-04-05

【作 者 简 介】
李泽辉，清华大学建筑学院博士研究生，主要从事中国古代建筑历史与理论研究。
赵寿堂，清华大学建筑学院博士研究生，主要从事中国古代建筑历史与理论研究。
李沁园，中国文化遗产研究院博士后，博士，主要从事古建筑修缮研究。
李大卫，清华大学建筑学院博士研究生，主要从事中国古代建筑历史与理论研究。
徐扬，清华大学建筑学院博士研究生，主要从事中国古代建筑历史与理论研究。
陈彤，故宫博物院古建部高级工程师，博士，主要从事《营造法式》研究。
刘畅，清华大学建筑学院副教授，博士，主要从事中国古代建筑史和文物建筑保护研究。

* 国家社会科学基金重大项目“《营造法式》研究与注疏”（17ZDA185）
清华大学自主课题“《营造法式》与宋辽金建筑案例研究”（2017THZWYX05）

Abstract: Beginning by consulting an old photo of the third *pingzuo* (mezzanine) floor taken in 1933 by the members of the Society for the Study of Chinese Architecture (Zhongguo Yingzao Xueshe), this paper investigates how the floor plans and column-axes tilts (*cejiao*, “outward-leaning feet”) of the famous Timber (Sakyamuni) Pagoda in Ying county, Shanxi province, were designed and dimensioned. Through comparative analysis of measured data acquired by the Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture and the Shanxi Institute of Ancient Architecture Conservation, the paper puts forward the following novel hypotheses:
1) The length of the original construction ruler is about 306 mm.
2) The side lengths, from the first floor to the fifth floor of the pagoda, measure 31.2 *chi*, 30 *chi*, 28.8 *chi*, 27.6 *chi*, and 26 *chi* respectively, and these measurements should be considered the core elements of design.
3) The fifth floor was designed independently and reveals integer numbers for its side length and partitions.
4) Except for the columns of the fourth *pingzuo* floor, all the column axes are tilted (*cejiao*) to achieve the gently inward-sloping pagoda profile.

Keywords: Sakyamuni (Shijia) Pagoda or Timber Pagoda of Fogong Temple; data measurement statistics; construction ruler; “outward-leaning feet” (*cejiao*); design strategy of plan dimension

❶ 李泽辉，执笔汇总、数据分析、制图；赵寿堂、李大卫、徐扬，现场调研、数据分析，部分章节撰写；李沁园、陈彤，资料与数据汇总、部分章节撰写；刘畅，通讯作者，研究主持。

山西应县木塔（佛宫寺释迦塔）在中国建筑史上的地位已经无须赘述，其始建年代被普遍认定为辽清宁二年（1056）[1, 2]❶。经历了近千年之后，今日对于木塔原始设计的追溯，便须拂去数次重妆、多次修缮的掩蔽。诸如金明昌二年至六年（1191—1195）的增修，之后见于牌匾所记的元延祐七年（1320）的一次较大修整，明正德三年（1508）的修理，以及清代康熙六十一年（1722）和同治五年（1866）的大修。近代以来，木塔不仅经历战火的洗礼，规模较大的人为干预先有1928—1929年间进行的修补，内容为“塔顶之云罗宝盖”和“各级之檩柱补修”[3]20-24，并未涉及斗栱等主要木结构，后有1935年拆除明层泥墙与斜撑等干预，更有当代的一些加固补强措施。事实上木塔所经历的修缮改动会远远多于上文简单的梳理。那么，现有的木塔原始设计解读完备吗[3-7]？近几十年以来获得的实测数据还能够就此提出具有说服力的假说吗？

1　问题缘起

木塔复杂的形变现状对于逆向回归原始设计无疑是巨大的阻碍。甄别一些结构“不对位”现象究竟源于塔体变形还是建造者有意为之，既富有挑战，也为新的可能解读带来机会。

本文关于数据阐述之种种，均缘起自中国营造学社应县木塔研究中所摄的一张老照片，拍摄对象为木塔二层补间铺作里跳处（图1）。虽年久斑驳难辨，但画面右上方的一处细节还是引起了笔者注意：木塔二层柱头铺作上方草乳栿与下昂后尾并未对正，后尾距离草乳栿明间内侧留有一定距离，而基本与草乳栿外表面取平。换言之，草乳栿向立面中心一侧偏移了一定距离。而一般情况下，草乳栿中线应与出跳构件中线保持一致。

从这张1933年的老照片出发，检视陈明达先生《应县木塔》中所收录的相同位置的照片，可以发现同样的现象——相对下昂后尾，草乳栿向明间内侧偏移（图2，图3）。

图2　应县木塔二层外槽内侧（一）
（陈明达．应县木塔[M]．2版．北京：文物出版社，1980．）

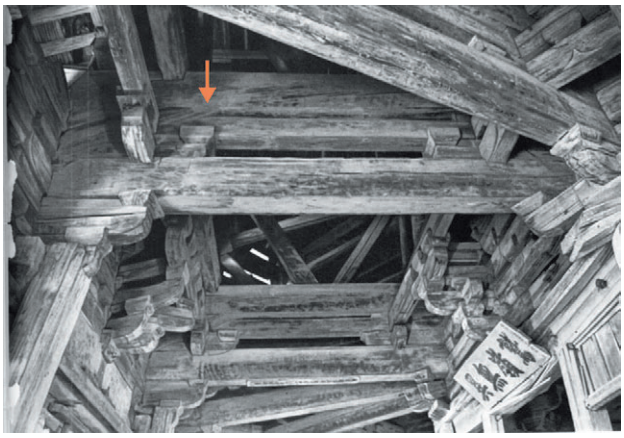

图3　应县木塔二层外槽内侧（二）
（陈明达．应县木塔[M]．2版．北京：文物出版社，1980．）

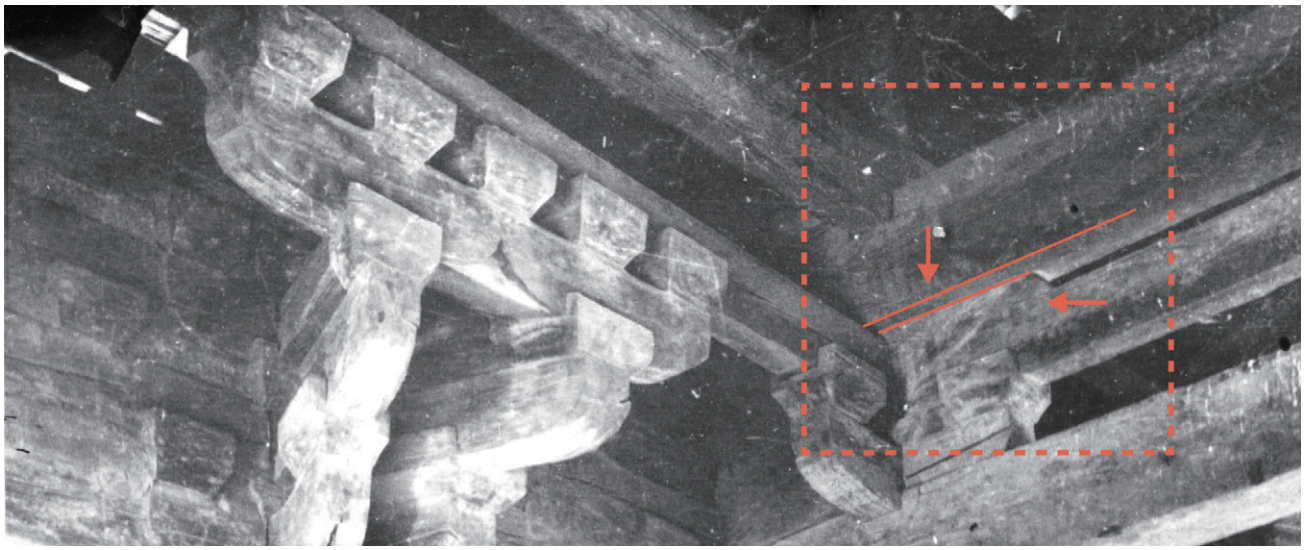

图1　应县木塔二层补间铺作内侧
（中国营造学社纪念馆提供）

❶ 2000年中国文化遗产研究院和北京大学考古文博学院合作对于木塔60处样品进行了碳十四测年。参见侯卫东《应县木塔保护研究》。

图 4　木塔二层外槽明间内侧（李大卫 摄）

图 5 木塔二层外槽次间内侧（李大卫 摄）

为了确认此现象的普遍性，笔者补充了现场工作，也借助现有测绘图纸进行比对。简言之，现场重新采集的影像资料证实了偏移的存在，且存在于木塔八面中的各面；此外，草栿之上的平坐立柱也存在偏移设计，平坐柱脚叉接在草乳栿上两侧所留的厚度并不相等，明间一侧厚于次间一侧柱身偏向明间中心方向（图 4，图 5）。

此处的偏移若是原始设计，似乎难以解释力学合理性和构造逻辑；若属受力歪闪变形所致，则难以解释构造呈现各面均向内错位的系统偏差。下文将结合数据进行分析详述。

2　校雠考察：现有实测值之构造检视

迄今为止，研究者已对应县木塔开展过数次系统性实测。针对木塔的研究最早始于 1933 年营造学社的测绘，梁思成等一行人对应县木塔开展了第一次详细测绘与调研。1936年底，梁思成先生完成《山西应县佛宫寺辽释迦木塔》[8]一文，莫宗江先生也完成了大量测绘图纸。所憾由于抗日战争的爆发，图纸和照片残损和丢失严重❶。陈明达先生在营造学社研究基础上，于 1942 年依据剩余图纸绘制了一份详图以供模型制作之用。1962 年文物出版社组织实测，完成大量测绘图并将成果收录在陈明达先生 1964 年出版的经典专著《应县木塔》之中。20 世纪 90 年代初王贵祥教授组织北京建筑工程学院进行了系统测绘，确定木塔三维空间正八边形控制系统并辅以手工测量来获取平面数据，以三角高程测量法确定木塔高程数据 [9]❷，并在测绘中充分应用了经纬仪、水准仪及测距仪等设备（以下简称“北测”）。2000 年山西省古建筑保护研究所也组织了对应县木塔的现状测绘，并借助“北测”在每层明层地面所留标准正八边形白线补充了大量手工数据（以下简称“山测”）。以上测绘数据均因木塔保护方案评审等契机在业内有不同渠道的流传，普遍为研究者所掌握。此后，中国文化遗产研究院、天津大学、清华大学等单位曾经利用三维激光扫描等设备开展过木塔数据采集。为笔者所掌握的是 2011 年清华大学对应县木塔二层外檐部分斗栱进行的手工测量和三维激光扫描数据 [10]。

在以上实测中，“北测”和“山测”反映了木塔彼时现状，是迄今为止公布的实测数据中最为完整的版本。二者数据读取精度普遍达到甚至超过 0.5 厘米，数据量和数据覆盖面大，较为完整地记录了各个部位的情况，为研究者提供了最为丰富的原始数据。

2.1　逐层外槽各面面阔数据

“北测”实测图在各明层斗栱仰视图、各层平面图中分别注明了各面柱头和柱脚平面开间尺寸；在各暗层梁架平面图和平坐斗栱仰视图中标注了平坐层的柱脚和柱头平面开间尺寸。“山测”实测图在各层平面图和各层梁架构造仰视图中分别注明了柱脚平面与柱头平面面阔尺寸；除此之外还绘制了内外槽侧立面展开图并注有尺寸。对以上图面数据进行提取与整理，均值情况如图 6 和图 7。

通过计算，“北测”与“山测”的标准差均值分别为 72.62 和 65.54；变异系数分别为 0.78% 和 0.71%。数据的有效性和可靠性，除了数据本身所反映的离散程度指标外，仍需结合构造关系进行进一步检验。

关于上述两套数据中各面面阔的变化规律有如下几点需要说明：

一，两套数据中，二、三、四、五层平坐柱头通面阔与其上明层柱脚平面通面阔基本一致，与构造关系所呈现的情况相符：明层柱脚插接在其下平坐斗栱之上（图 8）。二层平坐柱头与二层明层柱脚的差值略偏大，应为形变导致柱头相对外闪所致。

二，“北测”与“山测”一层柱脚平面均小于柱头平面，而在一般情况下柱头平面均值应小于或等于柱脚平面。考虑到一层柱身和柱脚包裹在首层泥墙中而无法精确定位，

❶ 幸存部分于 2007 年在《梁思成全集》第十卷中出版。
❷ 详细测绘方法参见刘国梁《佛宫寺释迦塔现状测绘的控制测量》。

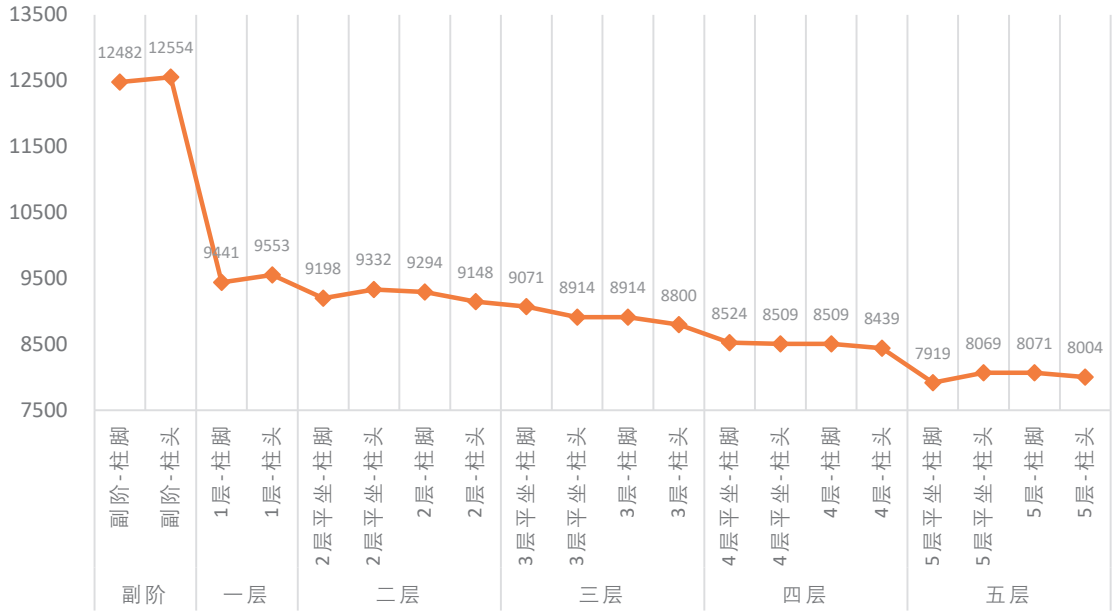

图6 “北测”各层平面面阔均值变化简图（单位：毫米）
（李泽辉 绘）

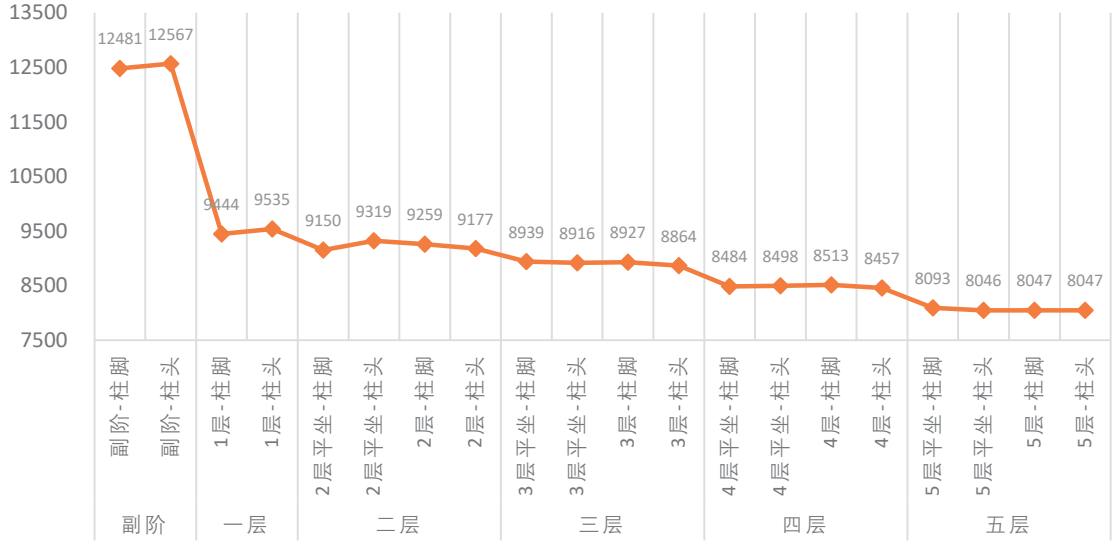

图7 “山测”各层平面面阔均值变化简图（单位：毫米）
（李泽辉 绘）

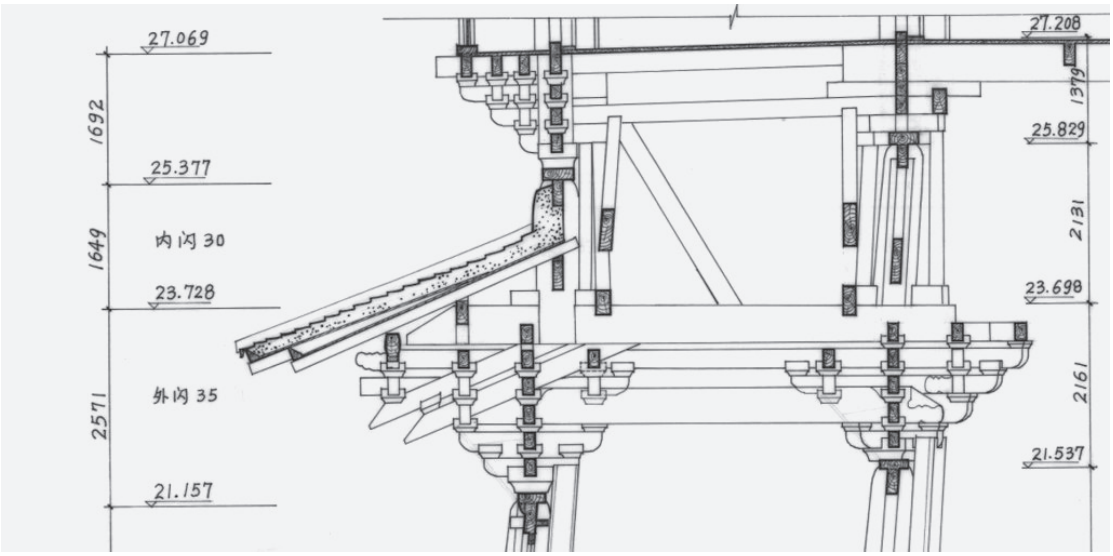

图8 平坐立柱构造关系示意
（节选自“北测”二层内外槽梁架剖面图）

此处柱脚数据或存在较大误差。

三，“北测”与“山测”在二层平坐处出现了柱脚平面明显小于柱头平面面阔的数据现象。此数据现象所对应的结构状态于整体稳定性而言并不合理。观察“北测”二层平坐处剖面图可知，二层平坐外柱确呈现柱头向塔身外倾斜的姿态。事实上，二层平坐柱承受其上塔身全部荷载，而其下首层柱包裹在墙体当中受约束较为充分，因而所受综合应力最为集中。故此处可解释为二层平坐处受持续荷载导致出现柱脚内移，柱头外闪。

四，“北测”五层平坐柱脚小于平坐柱头，“山测”无此现象。此处似为“北测”图面数据有误。

除此之外，二层柱头与三层平坐柱脚之差在两套数据中差别较大，“北测”为 77 毫米，“山测”为 238 毫米。结合图 8 需要明确的构造关系是，平坐柱脚沿其下一层明层斗栱草栿后尾向内收进，尺度细节问题将在下文详述。

2.2 逐层外槽各面开间数据

将两套数据各面开间实测数据均值整理统计如图 9 和图 10。

明间数据：“北测”与“山测”标准差均值分别为 47.6 和 42.12，变异系数均值分别为 1.19% 和 1.05%。

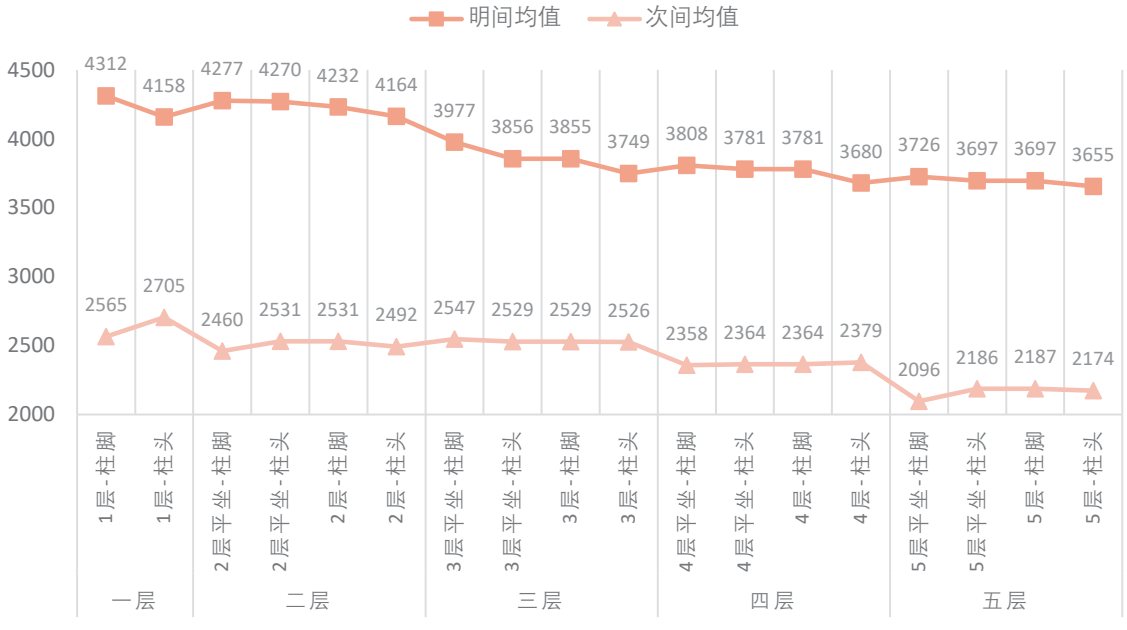

图 9 “北测”各层开间面阔均值变化简图（单位：毫米）（李泽辉 绘）

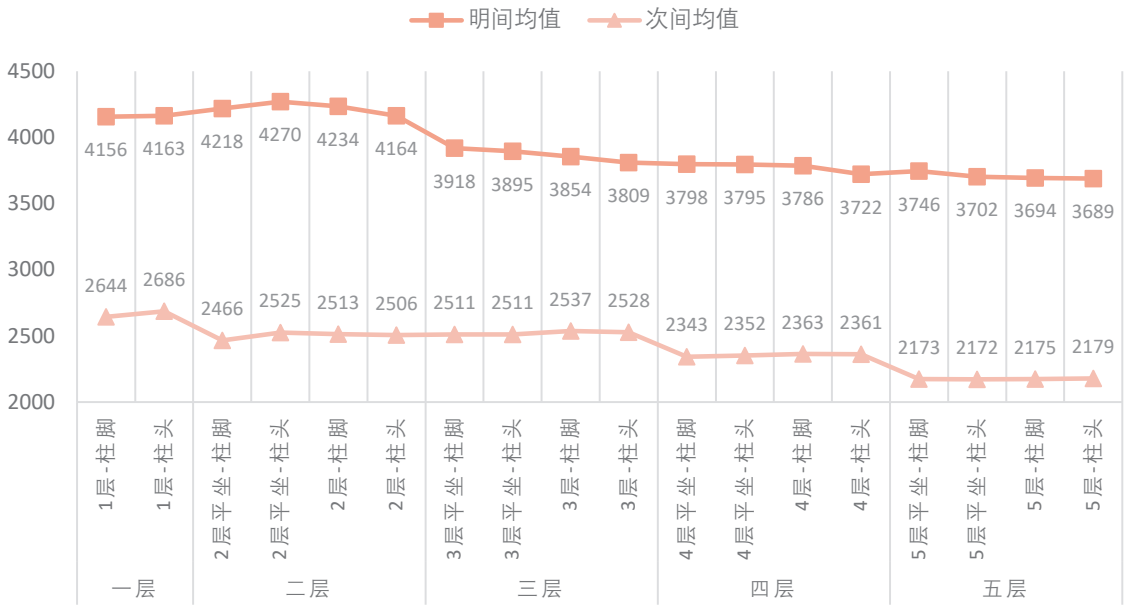

图 10 “山测”各层开间面阔均值变化简图（单位：毫米）（李泽辉 绘）

次间数据：“北测”与“山测”标准差均值分别为59.63和48.44，变异系数均值分别为2.33%和1.87%。

各面开间数据离散程度“山测”小于“北测”。

2.3 逐层内槽各面开间数据

“北测”实测图在各明层斗栱仰视图、各层平面图中分别注明了内槽柱头和柱脚开间尺寸；在各暗层梁架平面图和平坐斗栱仰视图中标注了平坐层的内槽柱脚和柱头开间尺寸。整理数据得到图11。

“山测”各层平面图对内槽开间尺寸标注并不完整，以内槽侧立面展开图所注数据进行补充整理如图12。

“北测”测值标准差均值为65.29，变异系数1.27%；“山测”测值标准差均值49.23，变异系数0.96%。同样，“山测”数据离散程度小于“北测”。

2.4 立柱侧脚

由于木塔各处形变歪闪情况不一（图13），剖面图所反映的立柱本身空间姿态无法对侧脚存在与否和侧脚多少进行准确判断；而八边形圈层中水平向联系的构造约束使得各面开间受形变影响相对较小。因此本文将同一构造层各面面阔与心间广的柱头与柱脚尺寸进行对比，估算侧脚均值。兹将各层柱脚与柱头差值均值罗列如表1和表2[1]。

各面面阔：“北测”标准差均值106，“山测”标准差均值63。

各面心间：“北测”标准差均值70，“山测”标准差均值34。

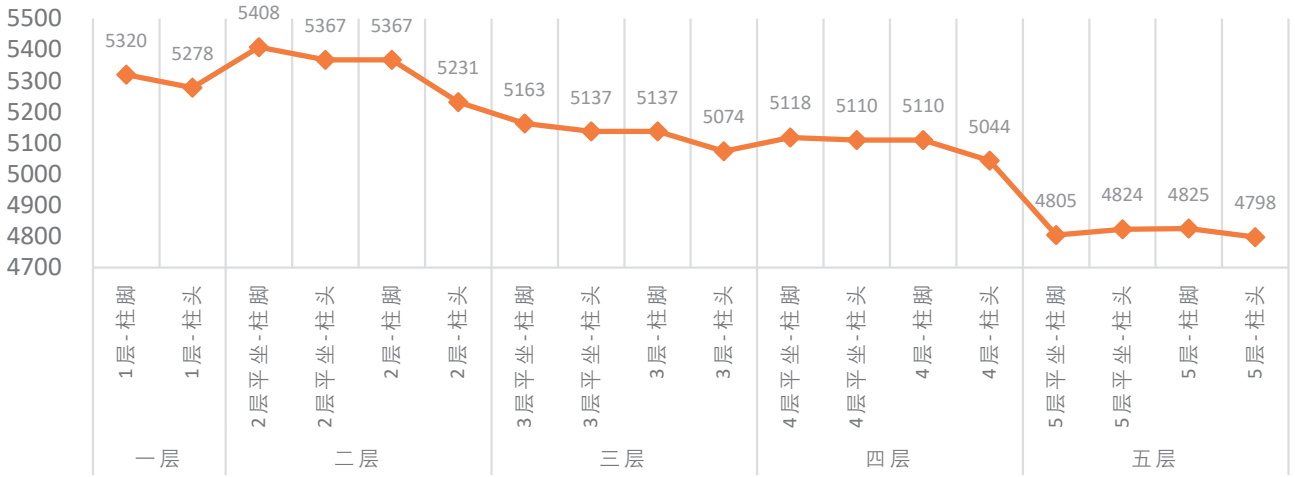

图11 “北测”各层内槽面阔均值变化简图（单位：毫米）
（李泽辉 绘）

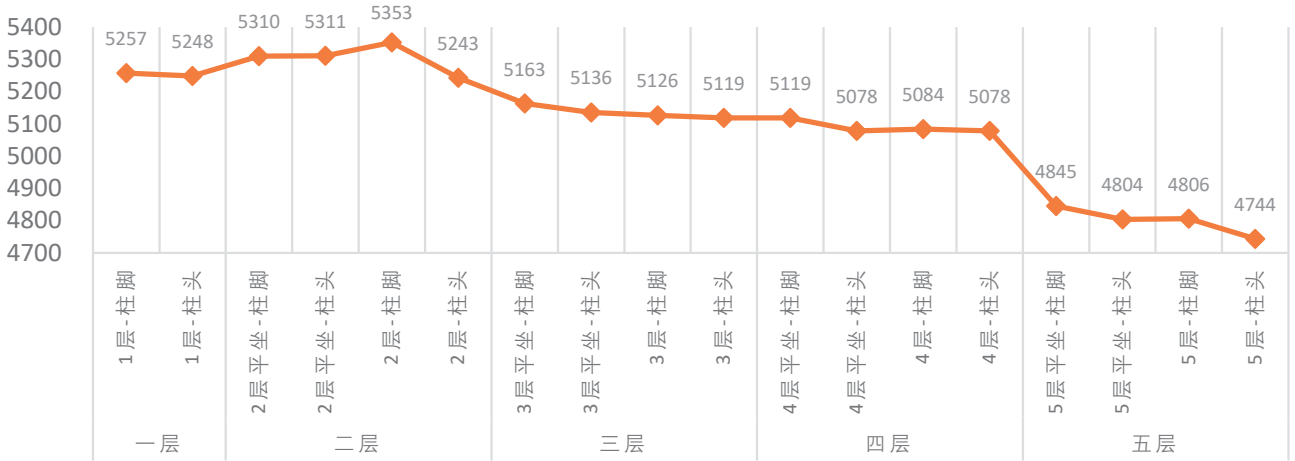

图12 “山测”各层内槽面阔均值变化简图（单位：毫米）
（李泽辉 绘）

[1] 此处表中罗列数值均为同层对应柱脚尺寸减去柱头尺寸。

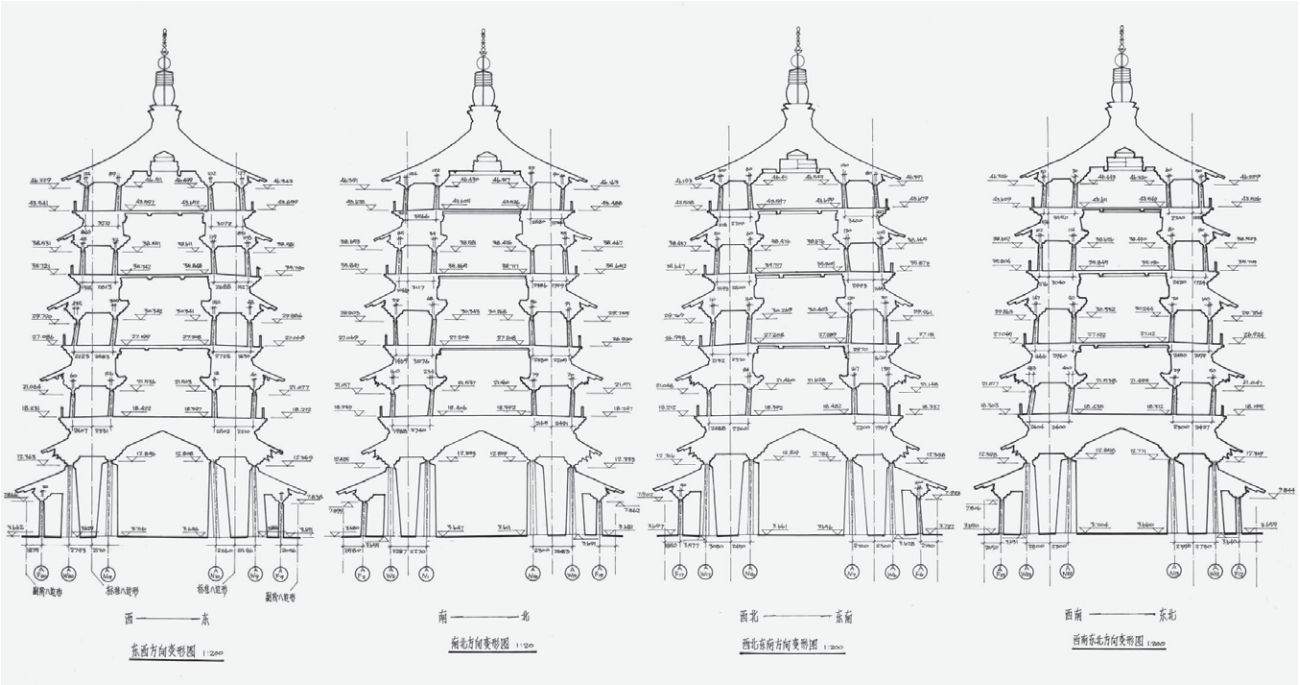

图 13　应县木塔总体变形图
（节选自“北测”实测图）

表 1　“北测”各层柱脚与柱头平面差值均值简表　（单位：毫米）

	副阶	一层	二层平坐	二层	三层平坐	三层	四层平坐	四层	五层平坐	五层	标准差均值
各层面阔	–72	–112	–134	146	156	114	15	70	–150	67	106
明间面阔	40	154	7	68	121	106	27	101	30	42	70

表 2　“山测”各层柱脚与柱头平面差值均值简表　（单位：毫米）

	副阶	一层	二层平坐	二层	三层平坐	三层	四层平坐	四层	五层平坐	五层	标准差均值
各层面阔	–86	–91	–169	83	23	63	–14	55	47	–2	63
明间面阔	36	–6	–52	69	23	45	3	63	44	5	34

2.5　数据的观察、对比与反思

本文罗列两套实测数据的目的，并非要在两组数字之间简单做出取舍。关于“北测”与“山测”两套数据在某些数值上存在的差别，一是需要充分考虑两次测量的系统误差因素，二是需要关注同一套实测内数据之间的相对关系，三则是需要对其明显的特征性差别进行讨论。

首先，两套数据的共性体现在整体变化趋势上。

一，毫无疑问，各面面阔由首层至五层呈递减趋势。从构造关系与曲线变化趋势来看（图 6），各平坐层柱头尺寸应与其上明层柱脚尺寸一致。“北测”中一层柱脚、二层平坐柱脚、五层平坐柱脚偏小，以及“山测”一层柱脚、二层平坐柱脚偏小的情况上文已有解释。

二，心间间广均值在二层柱头至三层平坐柱头间出现了较为显著的缩减，其余各处缩减较为平缓；次间间广均值在二层平坐至三层柱头之间变化不明显，而在一层柱头至二层平坐柱脚、三层柱头至四层平坐柱脚、四层柱头至五层平坐柱脚三处出现了较为明显的缩小（图 9）。

其次，这两次实测相隔时间不长，测量方法连贯。有以下几点需要说明：

一，“北测”采用测量仪器在各层确定了边长为 7.358 米的八边形控制网 [9]66-67，八边形面到面距离 17764 毫米；“山测”则是借助“北测”遗留的八边形控制网，并辅助以手工测量得到侧立面展开图尺寸，八边形面到面距离取 17765 毫米。从所掌握的数据获取方式上看，“北测”对数据间相对关系的反映较好。除显著存在问题的数据之外，本文分析将以“北测”数据为主，结合“山测”数据进行讨论。

二，两次实测均绘制了沿草乳栿方向的内外槽梁架剖面图，“山测”于图面上标注了明层柱头与其上平坐柱脚相

对于同一竖直参考线的距离，由两数据差值可计算得到平坐柱脚相对于其下明层柱头沿草乳栿方向向塔身内退进的尺寸，这是一组极为重要的数据。根据八边形的几何关系可以对平坐柱脚面阔相对于其下明层柱头面阔的缩小值进行校核。所憾“北测”图面未注明此尺寸，且因测稿遗失，相关数据已不可考。

兹将“山测”相关数据情况与梁思成手测值罗列如表 3。

表 3　各层平坐柱脚相对于明层柱头退进距离均值简表

	一层至二层平坐层（A）	二层至三层平坐层（B）	三层至四层平坐（C）	四层至五层平坐（D）
“山测”退进差值均值（毫米）	321.6	309	370.1	495.4
梁思成手测值（米）	0.3	0.32	0.4	0.47

注：梁思成手测值数据取自梁思成《山西应县佛宫寺辽释迦木塔》。

首先，表 3 中两组数据虽数值存在一定程度出入，但其所描绘的趋势基本一致。即 A≈B ＜ C ＜ D。平坐立柱柱脚处为受力较为集中的局部，或存在较大程度的形变，数据的离散程度亦较大，此处仅对其作定性探讨；“山测”描述柱脚与柱头的现状位置，而实测数据对原始设计的反映程度仍需结合是否拔榫、滑移等现象进行进一步判别。

其次，对“山测”数据由几何关系折算，面阔方向缩小值应分别约为 268 毫米、258 毫米、308 毫米、413 毫米。再来审视图 6 与图 7 中的相关数据：“北测”面阔差值分别为 355 毫米、77 毫米、276 毫米、520 毫米；“山测”为 385 毫米、238 毫米、380 毫米、364 毫米。上文所提到“北测”二层柱头面阔与三层平坐柱脚面阔之差偏小的问题在此处可以得到明确的验证。

第三，由于“北测”二、三、五层平坐柱脚对于平坐立柱侧脚与否的判断可能误导，宜综合“山测”数据一并讨论。详见下文。

最后，“北测”与“山测”中五层柱头平面面阔均值分别为 8004 毫米和 8047 毫米，差别达到 43 毫米。由于五层柱头平面面阔尺寸关系屋架设计与立柱侧脚与否，笔者经手工测量后得到均值 7974 毫米，与“北测”更为接近。

3　思维导图：从定性到估值

3.1　基本数据现象

结合上述实测数据，就核心问题归纳如下。

归纳 1：一层至四层明层柱头面阔均匀递差，五层减小值增大。

一，若以明层和平坐层柱头为“则”，从一层柱头至五层柱头面阔逐层递减，递差值依次为 221 毫米、184 毫米、234 毫米、114 毫米、291 毫米、70 毫米、370 毫米、65 毫米。

二，考虑到《营造法式》中“若楼阁柱侧脚，只以柱上为则，侧脚上更加侧脚，逐层仿此。塔同”的记载[11]173-174❶，各层柱头平面不仅决定了木塔的整体外轮廓，还涉及斗栱等更为精细的构件设计与加工，重要性和精度要求比柱脚平面尺寸更高。

进而，仅看各明层柱头平面面阔，一至五层均值分别为：9553 毫米、9148 毫米、8800 毫米、8439 毫米、8004 毫米，即相邻两层明层柱头尺寸的差值为：405 毫米、348 毫米、361 毫米、435 毫米，从一层柱头至五层柱头共缩减 1573 毫米。从数据规律上看，二层至三层递差与三层至四层递差接近，而四层至五层递差显著大于前者；考虑到二层柱头平面处变形内闪最为严重[2]54-58，测值可能受到影响，故可假定从一层至四层面阔逐层递变量相等，四层至五层递变量增大。

面阔变化规律究竟应是如何？且整理前辈学者的研究成果如下：

一为“均匀递变说”。陈明达先生《应县木塔》一文中公布的各层面阔，自一层至五层分别为 968 厘米、927 厘米、883 厘米、842 厘米、798 厘米[3]5，递变量依次为 41 厘米、44 厘米、41 厘米、44 厘米。据此得到应县木塔的外立面构图以第三层面阔为标准设计，但陈先生并未明确指出各层面阔的尺度规律。以此为基础，张十庆进一步将各层面阔复原为 33 尺、31.5 尺、30 尺、28.5 尺、27 尺[4]89-90。

二为“非均匀递变说”。傅熹年先生提出了“扩大模数”的概念，即木塔以一层柱高和中间层面阔为模数控制高度[5]，并以唐尺 0.294 米对陈明达先生的数据进行核算，认为各层面宽以三层面宽 30 尺为基准，其下两层各递增 0.15 尺，其上两层各递减 0.14 尺，即一层至五层明层面阔复原值依次为：33 尺、31.5 尺、30 尺、28.6 尺、27.2 尺❷。

归纳 2：各层明层侧脚简明，平坐柱侧脚情况复杂。

计算“北测”各层面阔柱脚与柱头的尺寸差值，二至五层各平坐层面阔差为：–134 毫米、157 毫米、15 毫米、–150 毫米。上文提到，“北测”二层平坐因形变导致柱头尺寸大于柱脚尺寸，三层平坐柱脚数值应偏大，五层平坐柱脚数据应有误。在此情况下，仅凭各层面阔均值差值暂难以对其侧脚情况做出判断。各明层面阔柱脚与柱头的尺寸差值为：–112 毫米、146 毫米、114 毫米、70 毫米、67 毫米。除一层柱脚尺寸可能有误导致柱头平面显著大于柱脚平面而无法判断外，二、三、四、五层明层均有侧脚。

再来看“山测”。各平坐层面阔柱脚与柱头的尺寸差值为：–169 毫米、23 毫米、–14 毫米、47 毫米。从数据上来看，除二层平坐因变形而导致柱头平面显著大于柱脚平面而无法判断外，三层与五层平坐可视为有侧脚、四层平坐可视为无侧脚。各明层面阔柱脚与柱头的尺寸差值为：

❶ 梁思成先生认为“以柱以上为则”应为“以柱上为则”。
❷ 参见傅熹年先生绘山西佛宫寺释迦塔立面分析图，傅熹年《中国古代城市规划、建筑群布局及建筑设计方法研究》，第 505 页。

–91 毫米、82 毫米、63 毫米、56 毫米、0 毫米。除一层柱脚尺寸可能有误导致柱头平面显著大于柱脚平面外，二、三、四层明层均有侧脚，五层明层可视为无侧脚。若考虑笔者实测五层柱头平面面阔平均值 7974 毫米，五层明层则可视为有侧脚。

综合上述数据现象简单来看，三层、五层平坐或有侧脚，四层平坐应无侧脚，二层平坐侧脚情况暂无法判别；明层二至五层应有侧脚，一层暂无法判断。

3.2 追踪匠作思路的尝试

既有研究从分析实测数据到寻求原始设计方法，大多借助对“吻合程度”的评价，即“吻合程度 =1–| 校正值 – 分析值 | / 分析值”[12]219 这一指标之于数据系列中各个取值的整体吻合情况。而木塔本身的复杂性和形变因素使得数据本身易受干扰，仅从数据的吻合程度出发去简单推定原始设计或许存在问题，不妨先从定性假设入手，设想匠人在接到“任务书”之后是如何为全塔各层设定一套侧脚的规则，并以此为线索评价数据综合吻合程度。据此得到两个假设和三个关系，为下文中的假说提供依据。

假设一：木塔明层设计侧脚 1 寸。

《营造法式》（卷五）关于侧脚有如下记述：“凡立柱并令柱首微收向内，柱脚微出向外，谓之侧脚。每屋正面（谓柱首东西相向者）随柱之长每一尺即侧脚一分；若侧面（谓柱首南北相向者）每长一尺即侧脚八厘，至角柱其柱首相向各依本法（如长短不定随此加减）”[11]173-174。

根据“北测”剖面统计的二至四层各明层立柱垂高在 2800 毫米上下，考虑到立柱侧脚，柱实长应稍大于测值。根据《营造法式》，则各明层立柱侧脚应在 30 毫米左右，猜想匠人或简明计算为 1 寸，即明层柱头平面面阔较柱脚平面小 2 寸。

假设二：各层平面递差规律简明，精确到寸。

根据设计与施工“简约化”的原则，各层平面之间理应存在一套简明的递变关系，使得当匠人在得出某一层标准的平面之后，根据既定明层、平坐侧脚之规则，高效计算得到其余各层平面。结合前文一层至四层明层柱头的逐层递变量可视为相等，四至五层存在突变的初步判断，或许为匠人在衡量全塔各层平面面阔时存在这样的想法：自首层至四层采用相同的递差，至五层时，因涉塔顶屋架设计，倘面阔数据畸零则于设计施工来说均显得繁琐，故五层平面特殊考量。事实上，不仅数据显示五层设计存在“突变”，构造上也存在“特殊”之处，下文另详。

关系一：相邻明层柱头平面面阔递变量 =（平坐柱内移量 + 平坐立柱侧脚量[1]）+ 明层立柱侧脚量。

此处所说变化量均为在面阔方向的分量。根据构造关系，平坐角柱柱脚沿草乳栿叉立在明层铺作草乳栿后尾，上层明层柱脚又与平坐柱头对位叉接（图 8）。此关系等式恒成立。

关系二：廊深与内外槽面阔差之间存在 6/5 关系。

《营造法式》（看详）关于八棱之法记述如下：“今谨按《九章算经》及约斜长等密率修立下条。诸径围斜长依下项……八棱径六十每面二十有五其斜六十有五”[11]47-48，其中六十五为外接圆直径（下文称斜径），六十为内切圆直径（下文称直径），予以简化即八边形边长、直径与斜径呈 5：12：13 的直角三角形关系。根据几何关系，同层平面内外槽八边形的直径差的 1/2 即为廊深，则有：

廊深 =（外槽面阔 – 内槽面阔）/2 × 12/5=（外槽面阔 – 内槽面阔）× 6/5

虽然木塔各层平面并非直接以八棱法制图所成，施工放线当采用精度更高的几何方法，但是在局部计算尺度的时候，此关系等式应得到匠人运用。

关系三：外槽明间面阔设计避让内槽柱头、配合内槽铺作。

以二层为例，塔身明间柱头铺作的乳栿后尾伸入内槽转角铺作，由柱头枋出头做华栱与小斗承托；草栿后尾同样伸入内槽转角铺作。也就是说，外槽明间面阔设计与内槽面阔设计之间，应该存在精妙的权衡，不仅不致内槽铺作近柱头处开榫过多损失强度，又可以使得草乳栿伸至内槽时能较为准确地与铺作进行承接。除此之外，随着内槽与外槽面阔自下而上逐渐缩小，倘若不对外槽明间面阔进行调整，一则会出现后尾与内槽铺作相犯的情况，二则外槽面阔至塔身上层会出现明次间开间差距过甚现象，使得立面效果失调。

综合以上五点，还可以进一步引申：

一，木塔大木匠人在确定木塔尺度时，八边形每面面阔应是其权衡的基准和出发点。出于“以上为则”和对塔身整体规模的考量，匠人优先确定五层平面；然后根据既定侧脚法则与相邻层递差规律推演得到一至四层外槽面阔；在内外槽面阔存在简明计算关系的情况下，内槽面阔也随之得到，相应的廊深尺寸亦随之确定。

二，内、外槽八边形每面面阔丈尺、廊深丈尺四者之间尺度关系相对简明，精确到寸，不可能全部以半尺为级数变化生成。根据图 6、图 9 所反映的数据情况，各面面阔、明间与次间面阔的递变差值呈现出高于半尺级数的复杂的数据规律。

4 假说钥匙：从三层平坐柱侧脚探析开始

4.1 构建“算术 - 几何模型”的两端

起点：三层平坐草栿与铺作不对位所暗示的“复杂”尺度设计。

上述整理之后，思绪再次回到开篇对老照片中二层柱头铺作与草乳栿不对位的思考。此处的疑问正是构建木塔算术 - 几何模型的出发点。

“北测”和“山测”中的三层平坐俯视平面图均建立在标准八边形参考系之下，测值具有很高可信度。图 14 中所绘三层平坐梁架平面，每面明间两组草乳栿呈外小内大的

[1] 本文侧脚量均指八边形塔身每面面阔方向上的侧脚分量。下同。

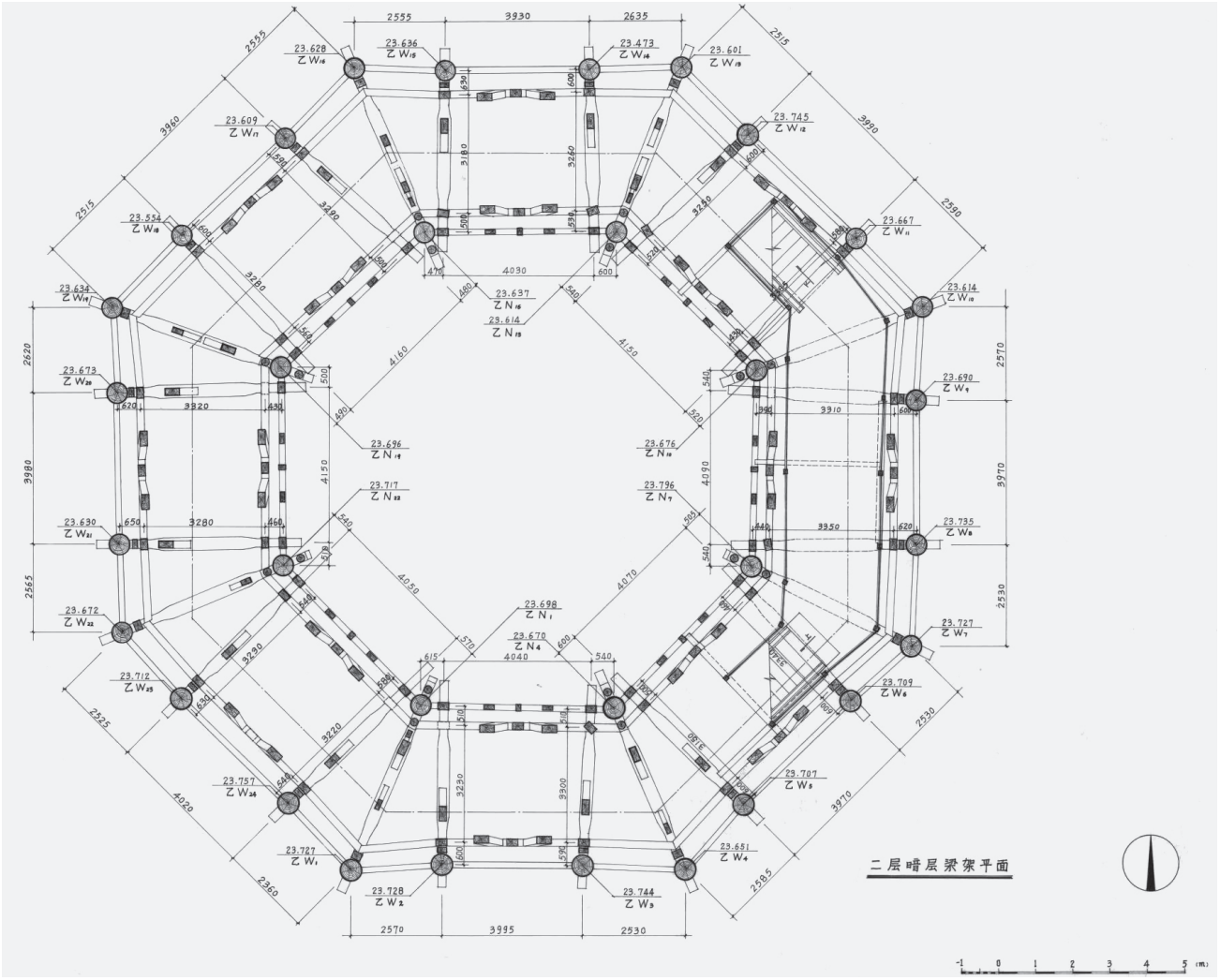

图 14 “北测”三层平坐梁架平面图（局部）
（节选自“北测”实测图）

梯形，说明三层平坐柱脚位置向明间一侧偏移的现象得到了数据的如实反映。但草乳栿的空间姿态是否果真如图所绘斜置呢？考虑到草乳栿斜置会给设计与施工带来不必要的难度，且数据描述有待验证，因此并不能排除草乳栿整体向明间一侧平移的可能性。谜底的揭开有赖于在未来研究中借助三维激光扫描等方式进行数据采集。

不管草乳栿“斜置”与否，此处匠人对明间尺寸所做的两组“微调”所能带来的启发是：在“简约”的整体外表和原则之下，木塔各层柱头与柱脚平面丈尺似乎亦存在着较为“复杂”的尺度调整；此处的调整明显带有协调二层三层之间明间、次间、通面阔、廊深、内槽面阔之间算法的枢纽特色，是验证和解释推算的最佳试金石。

终点：五层之“特殊设计”。

木塔五层或可看作寻常单层殿宇进行设计，恰是五层之于木塔尺度设计的“特殊性”所在，除柱头平面面阔测值存在“突变”外，还体现在构造的特殊变化上。木塔各层平坐外槽柱脚插接在其下一层斗栱草栿之上，并向塔身内缩进一定距离以实现收束。观察“北测”塔身剖面图可知，五层平坐外槽柱柱脚相对于四层外柱柱头向内缩进的距离显著大于其下各层；另，五层平坐内槽柱脚相对于四层内槽柱头明显向内收进，而其下各层平坐内槽柱均无此做法。梁先生的记述也印证了这点：“由平面上可以看出内槽尺寸在下四层中大致相同柱只侧脚，而位置不移动，故塔心东西之广，在第一层柱头为十三公尺，至第四层为一二·二六公尺，减少甚微。至第五层乃将内柱向内移二七公分，外柱则内移四七公分。顶层内柱的移入，大概是为避免使内廊过于狭窄。”[8]

其次，五层平面需结合屋架设计，可视为一个相对独立的建筑，复杂程度较高的同时又兼具相当的“独立性”。在面阔和开间上进行重新考量取整，不仅有利于屋架的计算与设计，也符合“以上为则”的设计逻辑。除此之外，由于屋盖层的加入，五层的明层柱高也做出了相应调整。针对“北测”东西、南北两幅剖面图提取各明层柱高数据得到表 4。可以注意到，五层柱高较之二、三、四层明显偏小约 100 毫米，其原因可能出于对立面协调及塔顶宝刹稳定性的考虑。

除此之外，五层作为木塔顶层，佛坛较之其他各层都更大，相对于本层室内空间的关系也更为饱满。不管是对于大木设计，抑或是建筑内部空间的营造，匠人对其进行相对重点和“特殊”的考量都具有一定合理性。

表 4　应县木塔各明层柱垂高均值简表　（单位：毫米）

位置	东西剖面		南北剖面		平均值
副阶	4204	4167	4219	4181	4193
一层	8701	8688	8706	9152	8812
二层	2823	2865	2858	2824	2843
三层	2704	2818	2834	2835	2798
四层	2810	2791	2796	2812	2802
五层	2688	2684	2713	2675	2690

注：数值均为自地板至普拍枋下皮之垂高。

4.2　用尺推算

1．辽代建筑的营造用尺范围

关于木塔用尺前人做了众多的探究，至于取值多少并无定论。陈明达先生以宋尺 32.9 厘米和 30.9 厘米进行了核算 [3]44-45；傅熹年先生则以 1 尺 =29.4 厘米进行权衡 [5]，张十庆先生亦沿用 [4]88。肖旻除沿用 29.4 厘米尺长外，还尝试了 30.7 厘米和 31.5 厘米的可能性 [6]56-58。

一般认为，辽代（916—1125）建筑营造尺应为“准唐尺”[4]81-82，即可参考唐代（618—907）常用尺的取值范围。迄今为止，见诸文献著录的唐尺实物资料共计 40 件，取值范围为 290～318 毫米 [13]321-323。然而，从现有研究看，唐以后用尺逐渐趋长；辽、五代及宋初一些相关案例的研究也表明用尺情况普遍在 300 毫米以上 [14-16]❶。

2．两组方程的联立

假说一：应县木塔所用营造尺长 306 毫米。

本文在 290～318 毫米的取值范围内进行广泛尝试，发现当取尺长为 306 毫米时，可以同时满足以下两个条件的成立。

一，一至四层：内外槽面阔差值之整（半）尺设计。

这里的 5 寸差值便于八边形递差深广 6/5 比例运用，对于计算木塔各层廊深具有实操意义。如表 5，一至四层明层外内槽面阔差值复原值分别为 14 尺、13 尺、12 尺、11 尺，二层数据吻合程度最低，亦达 98.47%。五层因存在相对独立的特殊设计，外内槽面阔差值复原值为 10.5 尺，吻合程度为 99.78%。

二，五层之整（半）尺设计。

这里的 5 寸差值普遍存在于单层建筑大木尺度设计中，对于计算木塔五层屋架尺度具有实操意义。如表 6 所示，以尺长 306 毫米计，五层面阔、明间广、次间广复原值分别为 26 尺、12 尺、7 尺，吻合程度均达到 98.5% 以上，若以笔者亲测的五层柱头平面面阔均值 7974 毫米计，吻合程度更高，达到 99.77%。

表 5　各层内外槽面阔差值丈尺情况简表

	外槽面阔均值（毫米）	内槽面阔均值（毫米）	差值（毫米）	差值合尺（1 尺 =306 毫米）	复原值（尺）	吻合程度
五层	8004	4798	3206	10.477	10.5	99.78%
四层	8439	5044	3395	11.095	11	99.14%
三层	8800	5074	3726	12.176	12	98.53%
二层	9148	5231	3917	12.8	13	98.47%
一层	9553	5278	4275	13.971	14	99.79%

表 6　五层面阔与开间丈尺简表

	五层明间	五层次间	五层面阔	笔者手测五层面阔
实测值均值（毫米）	3655	2174	8004	7974
合尺（1 尺 =306 毫米）	11.94	7.1	26.16	26.06
复原值（尺）	12	7	26	26
吻合程度	99.54%	98.51%	99.40%	99.77%

❶ 同时参见赵寿堂《晋城崇寿寺释迦殿大木尺度与早期营建历史探微》，未刊稿。

对于屋架尺寸，“北测”仅在五层南北与东西剖面图中提供了两组数据，“山测”未提供；且屋架长期受压歪闪变形，数据离散程度过大。在获得更详细与精确的实测数据前，本文暂不做过多讨论。

除此之外，由“北测”五层内外槽梁架横剖图可得塔刹高度实测数据：自脊槫上皮至刹座上皮共计 3045 毫米，合 10 尺，吻合程度 99.51%；自刹座上皮至刹顶共计 9490 毫米，合 31 尺，吻合程度 99.96%。

4.3 逐层开间设计

假说二：木塔各层平面每面面阔递收 1.2 尺、1.2 尺、1.2 尺、1.6 尺；二层每面三丈。

根据假说一对各层各面面阔数据进行核算得到逐层开间复原值情况如表 7，得到各层递收设计规律和实现方法如下：

一，明层面阔自一层至五层依次为：31.2 尺、30 尺、28.8 尺、27.6 尺、26 尺，递差依次为 1.2 尺、1.2 尺、1.2 尺、1.6 尺；二至五层平坐面阔依次为：30.2 尺、29 尺、27.8 尺、26.2 尺，递差依次为 1.2 尺、1.2 尺、1.6 尺。综合明层与平坐来看，相邻两明层柱头间 1.2 尺的面阔递差通过两部分来实现：明层柱头至其上平坐柱头面阔递减 1 尺，上层明层柱脚至柱头通过立柱侧脚再递减 0.2 尺。

二，实现递收方法为：除四层平坐外，二、三、五层平坐通过侧脚收束约 2 寸、2 寸、1 寸。塔身各明层自一层至五层通过侧脚依次收束 6 寸[1]、2 寸、2 寸、2 寸、2 寸；

假说三：木塔明层二至三层明间骤减 1.2 尺，其余各层明间递减 0.2 尺。

再看表 7 中各层每面外槽开间尺度，规律如下：

明层面阔：明间从一层至五层依次为 13.8 尺、13.6 尺、12.4 尺、12.2 尺、12 尺，除二层至三层间骤减 1.2 尺外，其余各层间递减 0.2 尺；次间面阔从一层至五层依次为 8.7 尺、8.2 尺、8.2 尺、7.7 尺、7 尺，在二层至三层间无递减。各层各面面阔、明间面阔复原值综合吻合程度均大于 99%；次间亦达 98.99%。

关于开间复原值需要说明的是：

一，由于一层柱脚测值不准，本文根据一层柱高约三倍于二、三、四、五层柱高的关系，侧脚值相应放大 3 倍，得到柱脚平面面阔 31.8 尺[2]；

二，关于一层、三层、四层柱头平面明间面阔中出现偏小的现象，复原值中根据开间变化规律和不小于上一层平坐柱头平面值的原则给予了相应调整，分别为 13.8 尺、12.4 尺、12.2 尺；

三，根据表 3，以 306 毫米尺长计，平坐柱脚相对于其下一层明层柱头退进值自二层至五层分别约为 1 尺、1 尺、1.2 尺、1.6 尺，折合至面阔方向变化量则约为 0.8 尺、0.8 尺、1 尺、1.3 尺，故本文据此将二至五层平坐柱脚平面面阔值复原为 30.4 尺、29.2 尺、27.8 尺、26.3 尺。事实上，关于此处柱脚平面面阔取值，仍可有两种解读：一，退进值为先。根据施工方便的原则，匠人可能在对草乳栿加工时，相对于明层柱头位置量取确定平坐柱脚位置，平坐柱脚面阔尺寸可能畸零。二，柱脚面阔值为先。若依此原则，则退进值则可能畸零。综合考虑加工便利和“以柱上为则”的想法，大木匠以前者思路进行设计，对柱头平面及各层侧脚情况“心中有数”得到相应柱脚尺寸即可，即各平坐层柱脚平面面阔存在畸零的可能。

假说四：木塔明层内槽面阔自一层至五层分别为：17.2 尺、17 尺、16.8 尺、16.6 尺、15.5 尺；二层与五层内槽面阔符合整（半）尺。

根据 306 毫米尺长与内槽面阔实测值得到表 8，各层吻合程度均大于 98.5%。相应的，一至五层各明层廊深依次为 16.8 尺、15.6 尺、14.4 尺、13.2 尺、12.6 尺。

假说五：木塔明层立柱均有侧脚，二至四层侧脚 1 寸；平坐立柱，除四层外，各层均有侧脚。

根据各层每面中外槽开间丈尺得到侧脚规律如下：

各明层立柱均有侧脚，其中二至四层立柱侧脚 1 寸，即明层面阔通过侧脚收束 2 寸，明层明间亦然；平坐除四层外，其余各层立柱均有侧脚。

关于平坐侧脚方式，此处存在进一步探讨的空间。本研究中各平坐层柱脚平面开间尺寸由梁架平面图得到，柱头平面开间尺寸由斗栱仰视图中获得。而事实上，各层斗栱栽销插接在普拍枋上，并未与柱头直接相连。且由三层平坐可知，平坐柱脚亦存在不与下层明层斗栱对正的可能。故此种数据获取方式可能掩藏着真实的侧脚情况，也使得各平座层侧脚设计存在着若干潜在解读。

观察二层、四层、五层平坐柱脚平面明间实测值，均有大于下层明层明间柱头平面的现象（图 9）。首先，这里有测量误差的可能。如此，将各平坐明间柱脚平面与柱头平面丈尺视为相等，即二、三、五层平坐平柱侧脚不调整明间开间。其次，除去误差因素，且考虑到侧脚方式一致带来的“简洁性”和更好的结构稳定性，此处仍无法排除原始实际中存在草乳栿故意错动或平坐柱脚微调而使平坐檐柱柱脚外扩的可能。如此，平坐平柱侧脚方式与明层平柱保持一致（表 7）。

表 8　木塔各明层内槽面阔简表

位置	内槽面阔均值（毫米）	合尺（1 尺 =306 毫米）	内槽面阔复原值（尺）	吻合程度
五层	4798	15.68	15.5	98.84%
四层	5044	16.48	16.6	99.30%
三层	5074	16.58	16.8	98.70%
二层	5231	17.09	17	99.44%
一层	5278	17.25	17.2	99.72%

[1] 此处仅据柱高倍数关系简单推算；若考虑到底层平面可能取整的因素此处亦或为 8 寸。
[2] 同上，若首层通过侧脚收束 8 寸，此处相应为 32 尺。

表 7　应县木塔各层开间划分丈尺复原表

位置	副阶		一层		二层				三层				四层				五层				
	副阶 - 柱脚	副阶 - 柱头	1 层 - 柱脚	1 层 - 柱头	2 层平坐 - 柱脚	2 层平坐 - 柱头	2 层 - 柱脚	2 层 - 柱头	3 层平坐 - 柱脚	3 层平坐 - 柱头	3 层 - 柱脚	3 层 - 柱头	4 层平坐 - 柱脚	4 层平坐 - 柱头	4 层 - 柱脚	4 层 - 柱头	5 层平坐 - 柱脚	5 层平坐 - 柱头	5 层 - 柱脚	5 层 - 柱头	综合吻合程度
明间均值（毫米）	4482	4443	4312	4158	4277	4270	4232	4164	3977	3856	3855	3749	3808	3781	3781	3680	3726	3697	3697	3655	
合尺（1 尺 =306 毫米）	14.66	14.53	14.11	13.6	13.99	13.97	13.84	13.62	13.01	12.61	12.61	12.26	12.46	12.37	12.37	12.04	12.19	12.09	12.09	11.96	
明间复原值（尺）	—	—	14.4	13.8	约 14	13.8	13.8	13.6	约 12.8	12.6	12.6	12.4	约 12.4	12.4	12.4	12.2	约 12.3	12.2	12.2	12	
吻合程度	—	—	—	98.56%	—	98.78%	99.68%	99.84%	98.36%	99.89%	99.92%	98.90%	99.54%	99.74%	99.74%	98.67%	—	99.13%	99.13%	99.63%	99.30%
次间均值（毫米）	4000	4055	2565	2705	2460	2531	2531	2492	2547	2529	2529	2526	2358	2364	2364	2379	2096	2186	2187	2174	
合尺（1 尺 =306 毫米）	13.07	13.25	8.38	8.84	8.04	8.27	8.27	8.14	8.32	8.26	8.26	8.25	7.71	7.73	7.73	7.77	6.85	7.14	7.15	7.1	
次间复原值（尺）	—	—	8.7	8.7	约 8.2	8.2	8.2	8.2	约 8.2	8.2	8.2	8.2	约 7.7	7.7	7.7	7.7	约 7	7	7	7	
吻合程度	—		—	98.39%	—	99.13%	99.13%	99.31%	98.49%	99.21%	99.21%	99.33%	99.92%	99.67%	99.67%	99.03%	—	97.95%	97.90%	98.51%	98.99%
面阔均值（毫米）	12482	12554	9441	9553	9198	9332	9294	9148	9071	8914	8914	8800	8524	8509	8509	8439	7919	8069	8071	8004	
合尺（1 尺 =306 毫米）	40.79	41.03	30.85	31.22	30.06	30.5	30.37	29.9	29.64	29.13	29.13	28.76	27.86	27.81	27.81	27.58	25.88	26.37	26.38	26.16	
面阔复原值（尺）	—	—	31.8	31.2	约 30.4	30.2	30.2	30	约 29.2	29	29	28.8	约 27.8	27.8	27.8	27.6	约 26.3	26.2	26.2	26	
吻合程度	—	—	—	99.94%	—	99.02%	99.43%	99.65%	98.48%	99.55%	99.55%	99.85%	99.80%	99.97%	99.97%	99.92%	—	99.35%	99.33%	99.40%	99.55%

注：1. 由于副阶开间划分未在本文假说讨论序列之内，故此处仅罗列实测平均值供参考，未做复原。

2. 一层明层柱脚实测尺寸可能存疑，本文仅作尝试性复原，未列入整体吻合程度评价。

3. 二层、五层平坐柱脚实测尺寸可能存疑，仅依假说做尝试性复原，未列入整体吻合程度评价。

4. 由方框标注红色复原值（各层平坐柱脚数值）依本文假说可能为畸零值，仅列数据近似值供参考。

5. 综合吻合程度为各吻合程度之平均值。

4.4 三层平坐问题的解释

假说五的两种解读均可满足三层平坐立柱侧脚的数据现象，但具体构造做法上有所区别：前者通过铺作上方草乳栿和平坐柱脚的两次构造偏移，将明间从 13.6 尺直接调整 1 尺至 12.6 尺，即三层平坐立柱不再调整明间；后者通过两次构造偏移将明间柱脚调整 0.8 尺至 12.8 尺，再通过三层平坐平柱侧脚调整 0.2 尺。

此时回看老照片中三层平坐柱脚处的疑问，似乎有了更为清晰的答案：不论以上两种可能孰是孰非，二层柱头平面明间面阔 13.6 尺，三层平坐柱头平面明间面阔 12.6 尺，也就是说，如果不在三层平坐柱脚处对明间面阔进行调整，明间面阔 1 尺递减量则全部需要通过三层平坐明间檐柱侧脚来实现，这对于平坐立柱来说显得过大，对整体结构的稳定性很不利。因此，匠人在此处巧妙地通过草乳栿向明间一侧偏移和平坐柱脚向明间一侧偏移，共两次构造微调，实现了 1 尺的差值，与其上明层侧脚的 2 寸调整量，共同构成了明层柱头平面面阔的递差，共 1.2 尺。两次调整使得荷载在此处并非正心传导，会给结构稳定性带来一定影响，木塔现状二层处的较大歪闪或与此有关；但匠人在此处的巧妙处理分散了带给结构的负面影响，也实现了明间面阔调整的重要目的。

从这个角度出发，梁思成先生拍摄的老照片（图 1）成了问题解释的钥匙。

5 假说之外

本文以“北测”为主，结合“山测”数据进行分析和讨论，对于应县木塔平面丈尺设计假说要点可以归纳如下（图 15）：

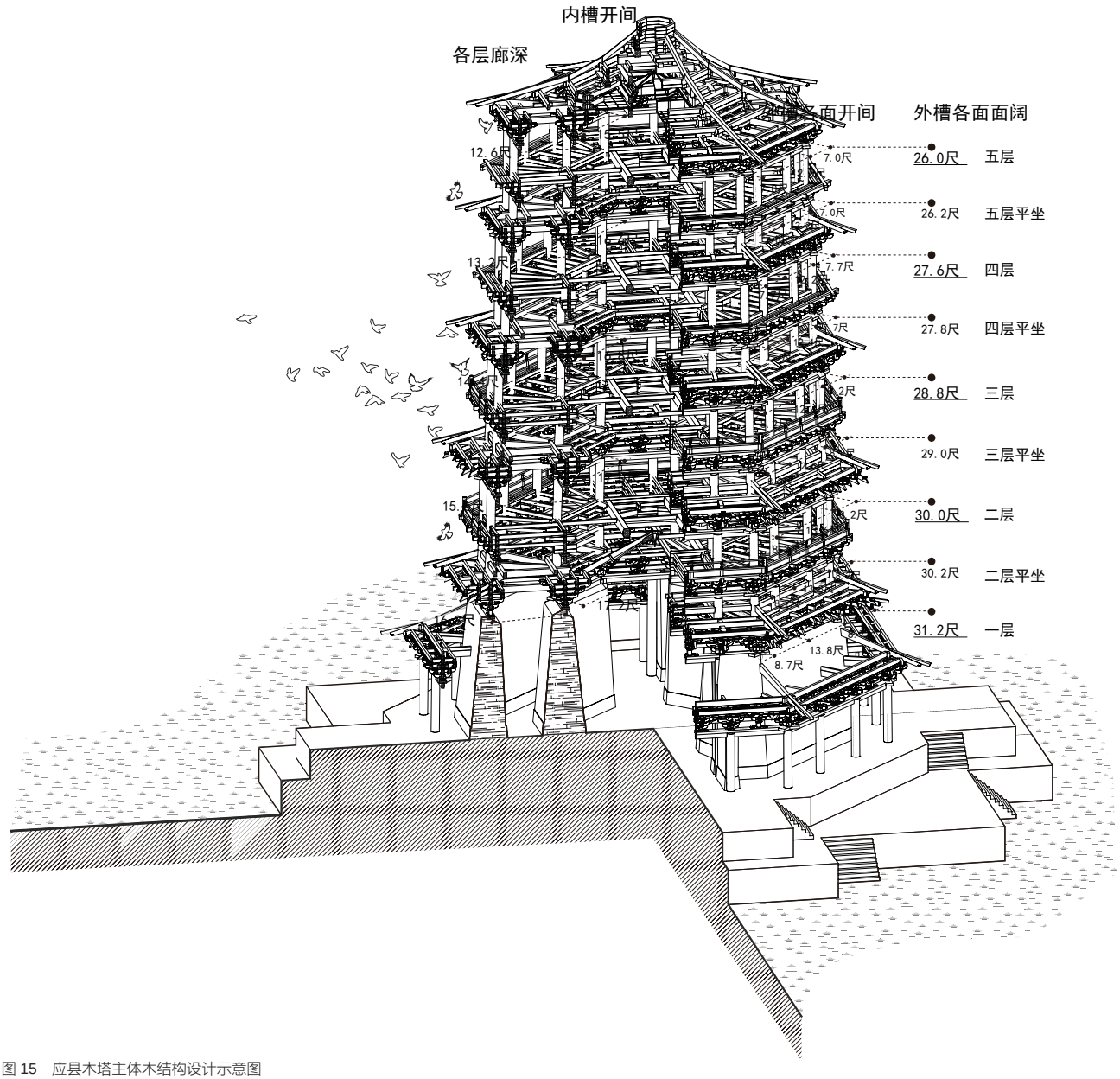

图 15 应县木塔主体木结构设计示意图
（李泽辉、王昂 绘）

应县木塔所用营造尺长约为 306 毫米；明层一至五层面阔依次为 31.2 尺、30 尺、28.8 尺、27.6 尺、26 尺，递差依次为 1.2 尺、1.2 尺、1.2 尺、1.6 尺，即各明层面阔并非完全均匀递变；应县木塔五层面阔及开间设计均为整尺，在尺度与构造设计上存在一定“独立性”；木塔各明层立柱均有侧脚；除四层平坐外，各平坐层立柱均有侧脚。

应当再次强调，以上假说是建立在“北测”与“山测”两套实测数据基础上所作的浅薄尝试。木塔历经千年风雨，变形歪闪已不能忽视，采用不同实测数据可能会将分析结果引向不同的方向；且由于其木塔结构层层叠累，研究中更需警惕数据本身对研究造成的误导。与其他建筑案例相比，对于应县木塔的数据处理显得更加复杂和困难。

首先便是对均值有效性的思考。本文以木塔各层各面面阔为数据基础，仅就柱头平面而言，每面由于额枋、普拍枋等横向构件联系拉结，理论上形变因素的影响较小，均值应能在很大程度上反映实际情况；而平面直径、屋架等数据则受形变影响较大，因而在面对不同类型的数据时应有一定的可靠度和优先级评估。从另一角度来说，我们不可能保证所有实测数据与复原值的“完美”吻合，对于应县木塔来说更甚。因此，本文在分析研究的过程中也并不完全依赖数据现象，而从匠作思路出发，部分发挥了正向推演的作用。但这种推演应当是在一套完整统一的逻辑体系之下，与实测数据互相约束。

其次需要强调的是重复测绘和数据公布的重要性。由于测绘仪器、方法、操作人员的不同，不同实测不可避免地带有“系统误差”或“偶然误差”的因素，抑或是数据的遗漏或遗失。在本研究中，“山测”与“北测”两套数据，不仅在部分数据类型和内容上互补，亦可整体相互对照，在重复的咀嚼和不断讨论之中，许多规律得以浮现，也给将来的研究者指明下一步针对性详测和深化研究的方向。

最后亟需发挥其他研究对于实测数据的辅助作用。本文开展分析所依赖之数据，大多为水平向的大木尺寸，且受到构造约束，往往具有较好的可信度。对于木塔竖直方向构图本文仍欠缺探讨，一则木塔本身沉降形变情况复杂，二则由于沉降、变形等因素，构件长期在竖直方向受压或受拉，相关的实测尺寸难以验证其有效性。针对应县木塔开展的有限元分析、材料力学等相关研究有助于进一步完善对于数据的认识。

“数据现象”所引发的，除了对数据本身合理性与自洽性的探讨，还有对所映射的结构性问题的新思考：

一，四层平坐无侧脚，对于结构稳定性来说并不利。所设斜撑是起拉结还是支撑作用，有效性如何？

二，二层柱头铺作斜昂后尾与草乳栿并非正对，匠人如何处理此处局部内部构造关系？

三，二层铺作草乳栿的空间姿态究竟如何？是否斜置？

四，三层平坐檐柱柱脚与二层柱头铺作上草乳栿并非对正叉接，匠人如何处理此处构造关系？是否如假说五存在平坐檐柱柱脚略外扩的细部处理？柱脚两侧剩余构造的强度情况如何？此处偏心受力对局部结构稳定性产生了何种影响？

以上问题的厘清，仍有赖于对应县木塔开展进一步的高精度测绘和针对性内部榫卯关系探查，不仅关系到本文假说是否可以得到进一步验证，也关系到木塔歪闪变形现状的溯源。在感慨梁先生及营造学社的研究成果持续给予后辈研究者灵感与启迪的同时，笔者也期待对应县木塔下一步研究的早日开展。

参考文献

[1] 祁英涛．应县木塔几项碳十四年代测定 [M]// 中国文物研究所．祁英涛古建论文集．北京：华夏出版社，1992：133-136.
[2] 侯卫东 . 应县木塔保护研究 [M]．北京：文物出版社，2016.
[3] 陈明达．应县木塔 [M]．2 版．北京：文物出版社，1980.
[4] 张十庆．中日古代建筑大木技术的源流与变迁 [M]．天津：天津大学出版社，2004.
[5] 傅熹年．中国古代城市规划、建筑群布局及建筑设计方法研究 [M]．北京：中国建筑工业出版社，2001.
[6] 肖旻．唐宋古建筑尺度规律研究 [M]．南京：东南大学出版社，2006.
[7] 张十庆．《营造法式》八棱模式与应县木塔的尺度设计 [M]// 贾珺．建筑史：第 25 辑 . 北京：清华大学出版社，2009：1-9.
[8] 梁思成．山西应县佛宫寺辽释迦木塔 [M]．梁思成．梁思成全集：第十卷．北京：中国建筑工业出版社，2007：6-118.
[9] 刘国梁．佛宫寺释迦塔现状测绘的控制测量 [J]．北京建筑工程学院学报，1995（1）：65-70.
[10] 徐扬．《营造法式》刊行前北方七铺作实例几何设计探析 [D]．北京：清华大学，2017
[11] 李诫．故宫博物院藏清初影宋钞本营造法式 [M]．北京：故宫出版社，2017.
[12] 刘畅．福建福州华林寺大殿大木结构实测数据解读 [M]// 王贵祥，刘畅，段智钧．中国古代木构建筑比例与尺度研究．北京：中国建筑工业出版社，2011：198-226.
[13] 卢嘉锡，丘光明，邱隆，等．中国科学技术史 度量衡卷 [M]．北京：科学出版社，2001.
[14] 刘畅，刘梦雨，王雪莹．平遥镇国寺万佛殿大木结构测量数据解读 [M]// 王贵祥，贺从容．中国建筑史论汇刊：第 5 辑．北京：中国建筑工业出版社，2012：101-148.
[15] 刘畅，刘梦雨，张淑琴．再谈义县奉国寺大雄殿大木尺度设计方法——从最新发布资料得到的启示 [J]．故宫博物院院刊，2012（2）：72-88，162.
[16] 刘畅．河北蓟县独乐寺观音阁大木尺度设计新探——《蓟县独乐寺》修缮工程公布数据的启发 [M]// 王贵祥，刘畅，段智钧．中国古代木构建筑比例与尺度研究．北京：中国建筑工业出版社，2011：227-237.
[17] 张毅捷，李寅，韩效．应县木塔建筑设计分析（一）[J]．华中建筑，2018，36（8）：98-100.
[18] 张毅捷，何洋，韩效．应县木塔建筑设计分析（二）[J]．华中建筑，2018，36（9）：98-99.
[19] 张毅捷，叶皓然，韩效．对应县木塔 1962 年实测数据的再分析 [J]．西部人居环境学刊，2018，33（4）：80-85.
[20] 张建丽．应县木塔残损状态实录与分析 [D]．太原：太原理工大学，2007.
[21] 俞正茂．应县木塔结构图解 [D]．厦门：厦门大学，2014.