

结构与建筑

——应县木塔的杰出成就

曲哲

关于结构与建筑的关系，麦克唐纳在《结构与建筑》^[1]一书中做了令人满意的归纳，他把结构与建筑的关系划为六大类：

1. 经过装饰的结构：“建筑完全由所偏爱的结构系统的形式逻辑所影响（基本是决定）”，他列举了雅典的帕提农神庙和范斯沃斯住宅等典型的例子。简单的说，这时结构因素是建筑师考虑的重点，这些结构往往比较合理，但要么建筑师非常偏爱某种结构，要么技术水平没有达到任建筑师发挥的地步，否则这种以经过装饰的结构作为建筑的形式在建筑师中没有太大的市场。
2. 结构作为装饰物：“设计过程由视觉因素而不是技术因素所驱动，因而结构性能往往并不理想。”麦克唐纳举了蓬皮杜中心的例子。蓬皮杜中心虽然夸张的暴露了结构，但它的结构并不能令人满意，很多呈现出来的所谓“结构”从技术上讲并不合理，而只是一种装饰。
3. 结构作为建筑：“建筑由结构和只有结构组成”。这往往也是由技术上的限制导致的。所以这里面的例子多是技术性很高的建筑，如大跨度，超高层之类。
4. 结构产生建筑形式
5. 结构被接受：与第4类一起，“允许结构要求强烈的影响建筑物的形式，即使结构本身不一定是裸露的。采用了结构上最合理的构件设置，并且使建筑适应这种设置。”麦克唐纳对4、5两类似乎没有做明确的区分。我认为这两类是结构与建筑之间和谐自然的关系，这样的建筑也理应成为建筑与结构的精品。可惜这样的精品并不多。麦克唐纳举出了罗马万神庙等例子。
6. 结构被忽略：在这里，建筑师总算可以尽情的发挥想象力，而不用去听结构师们的唠叨了。但其市场只在于结构技术游刃有余的领域，比如体量比较小的建筑，比如廊香教堂。

以上的归纳起码能令我满意。把结构与建筑的关系说成技术与艺术的关系，则不妨做出如下更加概括一些的归类：

第一种是技术主导。麦克唐纳所说的第1和第3类就属于这一种。设计者首先考虑的是结构问题；

第二种是艺术主导。上面第2和第6类即属此种。建筑意图可以充分的发挥。

第三种便是技术与艺术的完美结合，即上面的4、5两类。这时，建筑与结构不分彼此，相辅相承。

以上三种实在难分优劣，但就个人而言，我更钟情于第三种，这一点从上文的字里行间早已流露出很多了。

为了避免空虚的概念混战，下面结合一个我国本土出产的结构与建筑完美结合的实例——山西应县木塔，来表达我的结构与建筑观。

一、应县木塔概况

应县木塔正名“佛宫寺释迦塔”，建于辽代清宁二年（公元1056年），位于今山西省应县城内。木塔高67.31米，矗立在佛宫寺内，在应县城中鹤立鸡群。

塔平面呈八角形，第一层重檐，以上各层均为单檐，全塔共六檐，二到五层每层下都有“平坐”。平坐在塔内形成暗层，所以从结构上讲可以说全塔九层。

从狭义建筑的角度看，应县木塔外观壮丽，各个部分比例均衡，形象美好。塔的立面形象集中的反映了辽代的建筑风格，象征意义明确，功能完备。

从结构的角度看，应县木塔屹立九百余年而基本完好，期间历经地震、战乱之扰而岿然不动。这些都得益于它完备的结构体系和建材性能的充分发挥。

无论从建筑还是结构的角度，应县木塔都堪称杰作，而将二者合一，则更令人叹为观止。虽然在应县木塔这里，建筑与结构融为一体，难以决然分开，下文仍试图从两个方面分别展示应县木塔的风采。

二、应县木塔的建筑特色——缜密的数学比例

中国古建筑的重要精神就是处理建筑群空间。小到四合院，大到阿房宫，无不以院落空间为基本元素，着力刻画。说起应县木塔的建筑特色，首先要说的也应该是佛宫寺建筑群的院落空间。它很简单，主要由前大后小的两个院落构成。这个空间在建筑设计上有许多独具匠心之处。比如站在山门的里面望木塔，正好可以越过木塔顶层的挑檐看到塔顶宝刹的基座。其实在设计时，是这一视觉关系决定了塔与山门之间的最近距离。同样，站在塔的后阶上望向后面的大殿，也正好可以使视线越过大殿的挑檐看到其最高点。图1展示了这些考虑周到的关系。

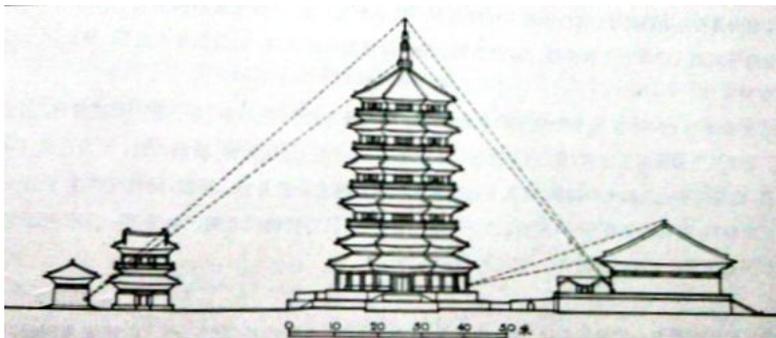


图1：塔与大殿和山门的空间关系

佛宫寺的院落布置运用周到的数学比例，制造了体量适当的空间。但是院落空间的考虑并不是本节的重点。应县木塔作为一个单体建筑，其本身更体现出缜密的数学比例。

先说平面。应县木塔即使在今日，也不能不算是宏伟的建筑。然而它的平面布置却非常简明。如图2左半侧所示，平面分为内外两槽，外檐每面三开间，内槽每面一开间。内槽安置佛像，外槽则是人流活动的地方。表面上明确简单的平面布置，却关系到实用、外形、结构布置等诸多方面。其尺寸的决定成为平面设计的重点。

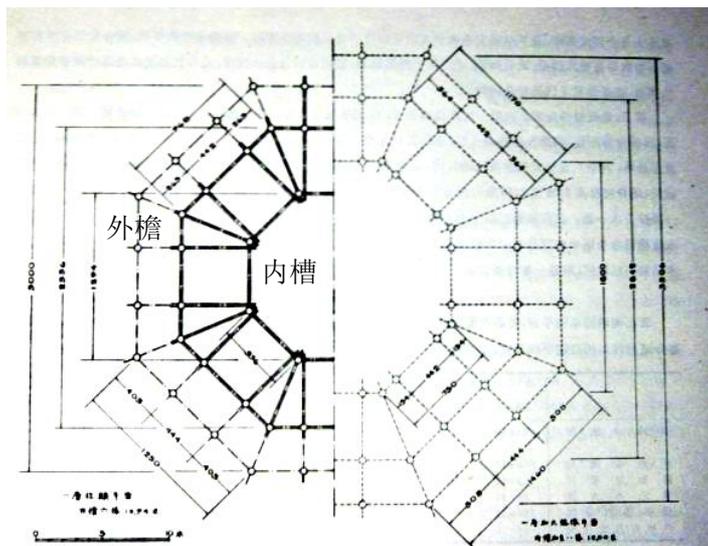


图2：应县木塔的平面布置比较

应县木塔平面布置各部分的尺寸，是在当时惯用作法的数字范围之内，根据用材等方面，

结合八边形边长与直径的关系以及较经济的用料规格而决定的。并且在预计和工程规模中达到了所能做到的最大尺度。

图2的右半侧假想加大内槽的尺寸，如果用料不变，则不得不把内槽每面做成三间，外槽也要相应的加大尺寸。一则工程量增加很多，再则内槽次间与明间的比例极不和谐，结构不如原来的紧凑。可见，设计者在进行平面设计时，除了建筑造型、功能等方面的考虑外，同时综合了用材、经济、结构等各方面的要求。

再来看立面。塔的高度是根据数学的规律设计的。其立面尺寸中存在三个基数 a 、 b 、 c 和两个变异数 b_1 、 c_1 ，且 $2a=b+c=A=8.83m$ 。全塔外观五层，阶基高度为 a ，一至四层每层的高度都正好为 A ，第五层略减为 b_1+c_1 。可见 A 为一个标准高度，这和平面的尺寸关系紧密。平面与立面尺寸的紧密联系获得了比例严密而有节奏的外形轮廓。

需要指出的是，木结构古建筑的层高远比现代混凝土住宅的层高复杂。木结构古建筑的结构高度大且构造复杂，并且往往分不清结构高度与建筑高度，所以能从应县木塔的立面尺寸中发现上述比较简明的数学比例说明在立面设计阶段设计者对木塔的立面构成有较好的把握。

前面说过 A 与平面尺寸关系密切。其实 $A=8.83m$ 正好是第三层柱头的面阔尺寸。把第三层的八个柱头相连形成一个八边形，则该八边形内接圆的周长恰好与塔高接近。另外还有一些看起来很奇妙的数学关系，这里不再列举。（图3）

除了平面与立面之外，应县木塔的平坐、檐柱、斗拱等细部设计也都存在数学比例，内部空间也在一定的数学比例范围之内，各层略有出入。

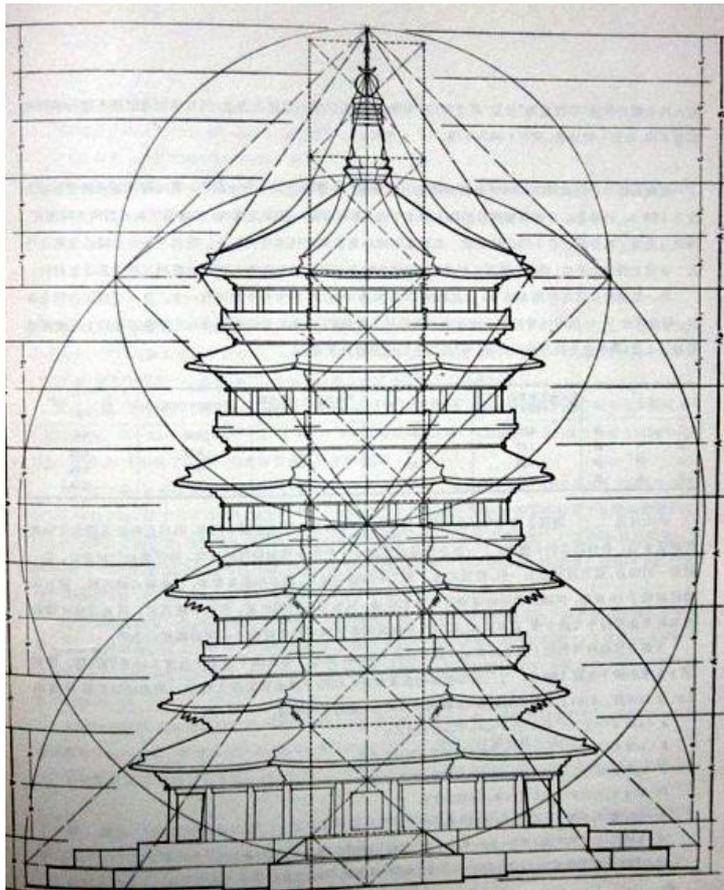


图3：应县木塔立面中的几何比例

上述种种事实说明，应县木塔的全部设计是按照数学比例确定的。这些数学比例不是简单的考虑结构也不是简单的考虑功能，更不是单纯追求视觉的和谐。可以说应县木塔的数学比例综合考虑了从建筑形象、功能到结构选材、受力的诸多方面。当然它不是由某些理论确定了，而是通过艰辛的劳动取得的。

从上面的介绍中可以看出，应县木塔的设计并没有截然分为建筑设计与结构设计两个部分。问题都是通过综合的考虑得到解决的。劳动积累的数学比例既保持了辽代的建筑风格，又获得了良好的空间与结构性能。

三、应县木塔的结构特色——水平分层的柔性体系

斗拱在我国古代建筑结构中发挥着重要的作用。应县木塔也不例外。全塔共用 54 种斗拱，斗拱在建筑立面上占据着显眼的位置（图 3）。

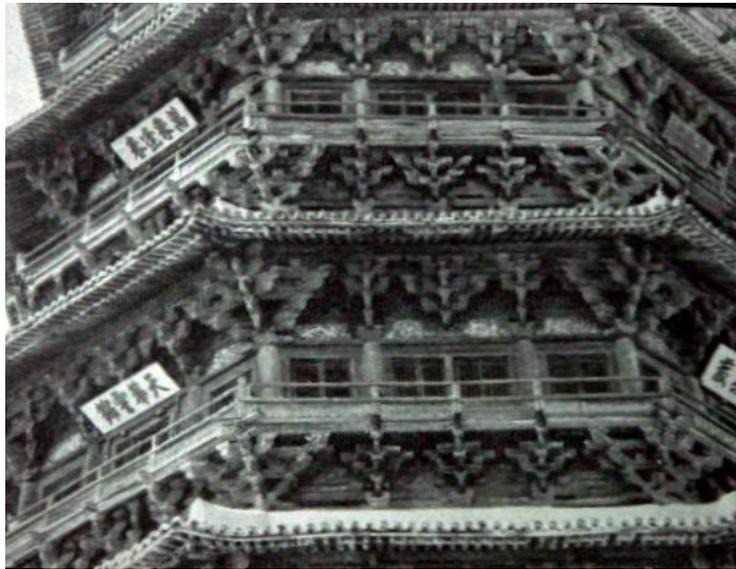


图 3：立面上满目的斗拱

斗拱构造复杂，在整体结构中，不但承担着较大的力作用，且在动力或地震力作用下，由于其本身的柔性特点，在受力变形中可吸收较大的能量，起到了减震的作用。^[3]

斗拱的柔性是我国木结构体系具有较大柔性的重要原因之一。

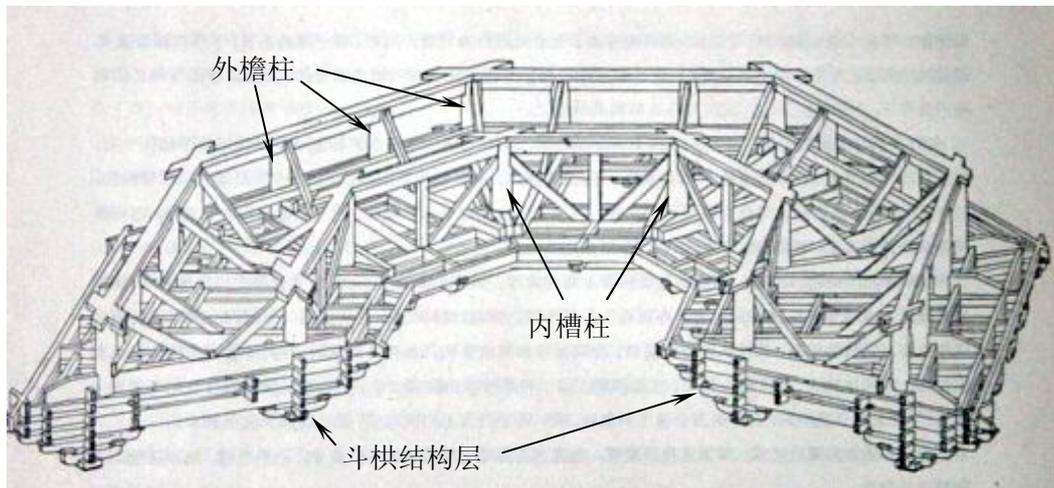


图 4：水平结构体系示意图

除去塔基和宝刹不说，应县木塔的主体结构高 51.14 米，全部用木结构。这样的高度既使在现代也属于高层建筑了。它又分为五层塔身、四层平坐和一层塔顶，共十层重叠而成。

除塔顶外，其余九层都采用相同的结构形式（图 4）。外檐柱和内槽柱均被足够多的杆件联系成两套八角形的柱圈，柱圈又有斜撑来加强其强度。斗拱与斗拱连接成强度很大的整体，形成斗拱结构层，其中央部分为空筒状，可以铺地板，也可以做藻井。注意图 4 为了观察方便，画出了下一层的斗拱结构层和上一层的柱，实际应该是斗拱结构层支撑在柱头上。

这样的结构体系的特点是：水平方向明确分层，每一层是一个整体构造物，同时又创造出本层的使用空间。结构错综细致，各方向之间相互制约，不易变形，整体刚度大。层与层之间，只是各层整体结构的重叠，不需要通顶的长柱且十分稳定。这种结构体系每一层具有足够的刚性，层与层之间的结合，以及杆件与杆件之间的结点都是柔性的，在地震时可以有效吸收能量而整体结构不致破坏。

结构形式的适用性总是与结构的尺寸紧密相关。工程规模、材料等一定的情况下，建筑设计中各部分尺寸的考虑已经在一定程度上决定了结构体系的基本性能。所以上述结构体系的有效性仍有赖于建筑设计中综合的考虑。

应县木塔已巍然屹立九百余年，是已发现的我国现存唯一的全木结构佛塔。这足以证明了其结构体系的可靠性。据史料记载，公元 1333 年至 1368 年间，也就是元顺帝在位期间，应县木塔所在地曾发生过强烈的地震，“地大震七日，塔屹然不动”。1926 年山西军阀内战，炮击此塔 200 余弹，虽造成众多局部损坏，但塔仍然屹立。其结构之可靠，令人叹服。

四、数学是结构与建筑结合的纽带

应县木塔集中体现了辽代建筑的风格，其结构之可靠又令人叹服，无论是结构还是建筑都堪称精品。而它二者兼备，为处理结构与建筑二者的关系提供了成功的范例。

如何处理好结构与建筑的关系？这个问题日益严峻的摆在建筑师与工程师之间。随着建筑教育与结构工程教育日益疏远，结构与建筑脱节的问题丝毫没有好转的迹象。现代的建筑越来越倾向于使结构完全服从于建筑艺术，设计过程中结构与建筑也明显产生了主从关系。

但结构与建筑本应是相依相存的兄弟。

建筑之为建筑，正在于它的工程性。脱离了实际工程谈建筑，则与一般的造型艺术无异。结构之为结构，正在于它的合理性。为了满足奇特的建筑造型而放弃本身的合理性，结构即告死亡。

建筑的工程性与结构的合理性，都以数学的手段得到实现。

数学其实早已涉入各种艺术。完美的人体比例、精妙的音程关系，都以数学的形式表达。建筑艺术的工程性对数学的要求更加强烈。不单纯要求通过数学获得美好的视觉比例，还要通过数学决定适合的空间体量并实现空间与空间的和谐、空间与材料的和谐。

数学对于结构工程的重要性已不必强调了。自从牛顿把数学与力学结合到一起，结构工程中就从来少不了数学的身影。随着近来结构计算的日趋复杂，数学对于结构的强大作用更加突显出来。

结构与建筑在数学这里获得和谐。

五、参考文献

- [1]安格斯·J·麦克唐纳：结构与建筑.中国水利水电出版社 知识产权出版社 北京：2003
- [2]陈明达：应县木塔. 文物出版社 北京：1980
- [3]赵均海：中国古建筑木结构斗拱的动力实验研究. 实验力学，第 14 卷第 1 期：1999