

# 中国木结构古建筑的概念设计思想

赵鸿铁<sup>1,2</sup>, 张锡成<sup>1,2</sup>, 薛建阳<sup>1,2</sup>, 隋 炎<sup>1,2</sup>, 张凤亮<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:**依据现有的工程设计及抗震理念,对木结构古建筑中所蕴含的概念设计思想进行了分析。结果表明:结构的平面布局具有规则性、对称性及均匀性,可减小因体型不规则而产生的不利扭转效应;竖向结构布置对高宽比做了限制,使结构具有良好的抗倾覆性;柱与础石的平置浮搁式连接、铺作层的设置以及节点的榫卯连接方式共同构成了一个具有多重隔震、减震结构层次的木构架结构体系;柱架系统中柱列生起、侧脚的构造作法以及柱间斜撑的设置,提高了结构的整体性、稳定性和抗震能力;抬梁式屋架系统为“替力梁架”,在相同荷载、相同跨度情况下可大大减小截面尺寸,是对结构受力及选材的综合考虑。

**关键词:**古建筑;木结构;概念设计;结构体系;构造措施

中图分类号:TU366;TU311.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2011)04-0457-07

作为中华古代文明的重要组成部分,中国古代建筑的发展经历了与西方不同的过程,在 3000 多年的历史长河中,逐渐形成了以木结构为主体的结构体系<sup>[1]</sup>。现存的木构古建筑中,大部分经历了地震、自然风化、战乱等天灾与人为因素的破坏,有的至今仍完好无损,表现了良好的结构性能<sup>[2]</sup>。现在已有不少学者通过力学分析、构件以及结构整体模型试验对古建筑木结构的抗震及力学性能进行了研究<sup>[3-7]</sup>,取得了很多成果。本文从“概念设计”的角度对木构古建筑进行整体的分析,探讨其内在的力学及结构思想。建筑工程中的“概念设计”是相对于数值设计而言,一般是指不经过数值计算,只依据整体结构体系与分体系之间的力学关系、结构的破坏机理、历史记录、震害、试验现象以及工程经验所获得的基本设计原则和设计思想,从整体的角度出发来确定结构的总体布置和细部构造措施的宏观控制。现代结构工程在应对抗震问题时,公认的一般事实是“概念设计比计算设计更重要”,它在整个工程结构设计过程中起着统领全局的作用。本文主要从木构古建筑的建筑体型、结构体系及柱架及梁架的构造措施等三个方面进行分析,探究其内在的概念设计思想。

## 1 建筑体型

概念设计最重要的成果之一就是确定结构的整体方案,而整体方案中最重要的就是建筑物体型的选择。对国内外历次大地震后建筑物震害的调查研究表明,建筑的体型对其抗震性能有直接的影响<sup>[8]</sup>。体型规则、对称和均匀的建筑具有良好的抗震性能,而体型不规则、不对称和不均匀的建筑则极易产生震害而导致结构的破坏,甚至发生倒塌。

### 1.1 平面结构布置

现存的历史文献资料及建筑实物都表明,中国古代木构建筑的平面布局绝大多数采用矩形、方形、六边形、八边形以及圆形等较为规则且具对称性的几何图形,具有规则性、对称性及均匀性等特点。

矩形房屋的长宽比皆在 2 以下,避免了建筑物过长(长宽比 $>4$ )时房屋两端受到不同地震运动的影响。

\*收稿日期:2011-03-18 修改稿日期:2011-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59878043);陕西省重点实验室建设项目(05JS17)

作者简介:赵鸿铁(1939-),男,江苏人,教授,博导,从事钢与混凝土组合结构、钢筋混凝土结构、古建筑及其抗震性能研究。

响而产生的反相位震动,避免产生不利的扭转影响;方形、六边形、八边形以及圆形等平面为多轴对称,可以抵抗来自任意方向的地震作用,具有良好的抗震性能。此外,八角形的平面比正方形平面可减少 5% 的风压,有利于增强结构的抗风性能。我国现存最古老的木塔—建于辽清宁二年(公元 1056 年)的山西应县佛宫寺释迦塔,就是平面为正八边形的一座建筑,在过去的 900 多年中,经历了多次地震,仍然屹立如初。

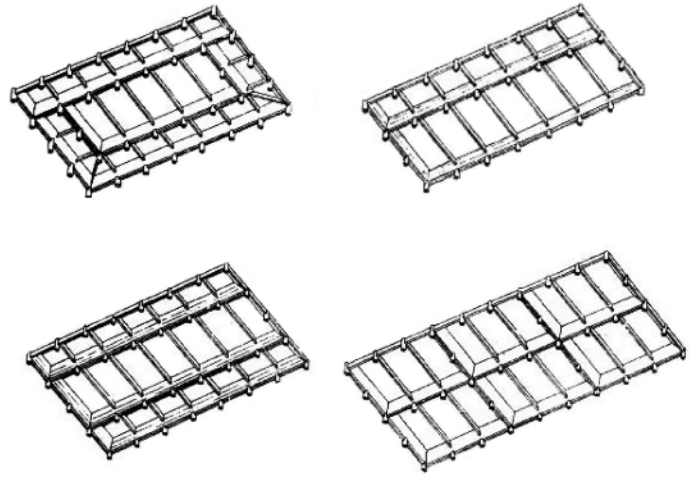


图 1 典型的宋式殿阁地盘分槽图

Fig. 1 Typical layout of columns and beams in the Song Dynasty

建筑平面抗震要求的均匀性主要指的是结构的均匀性,即主要抗侧力构件的布置要均匀,尽量使建筑物的质量中心与抗

震结构体系的刚度中心的位置接近,以减小地震作用下产生的偏心扭转的影响。木结构古建筑中的抗侧力构件主要指的是柱子,因此,柱网的布置也就决定了整个结构体系的抗侧刚度的分布。《营造法式》给出了殿堂结构的柱网布置图—“殿阁地盘分槽”图,把殿堂结构的柱网分为了四种形式:金厢斗底槽、分心斗底槽单槽和双槽,如图 1 所示。从图中可明显地看出,除单槽外,其他三种结构抗侧力构件的布置在纵横两个方向刚心与质心都重合,符合均匀对称的原则,而单槽只在纵向重合,横向刚心和质心重合或略有偏差。但总体来看,古建筑结构布置具有均匀性,有利于防止地震作用下扭转效应的产生,消除了这一最不利受力情况的影响。

## 1.2 竖向结构布置

在建筑物的竖向,影响建筑体型抗震的重要问题就是建筑物的高宽比,它是建筑物抗倾覆能力的衡量标准。根据现有的工程实践经验,框架结构的高宽比在震区宜为 3~4,非地震区宜在 5 以内。我国现存最高的木构古建筑为应县木塔,它的高度相当于现在的 23 层高层建筑,高宽比仅为 2.3。

宋代《营造法式》对柱子的高度与开间尺寸的关系作了明确规定:“柱虽高不越间之广”,这种做法实际上是对高宽比的限制,在结构整体抗倾覆方面具有重要作用。假设上部结构为刚体,竖向地面加速度为  $a_v(t)$ ,结构的总质量为  $m$ ,重力加速度为  $g$ ,地震方向的结构宽度为  $B$ ,结构质心离地面的高度为  $H$ ,础石与木柱之间的静摩擦因数为  $f_s$ 。由于柱脚平搁在高出地面的础石之上,在水平荷载作用下,础石会提供一定的静摩擦力,但当水平荷载超过二者之间的最大静摩擦力时,结构则会发生沿水平作用方向的滑移,因此柱底最大剪力不会超过础石与木柱间的最大静摩擦力,即

$$F_s \leq f_s m [a_v(t)_{\max} + g] \quad (1)$$

此时只要满足下式,结构就不会发生倾覆:

$$M_{\text{抗倾覆}} = m [a_v(t)_{\max} + g] \frac{B}{2} \geq m f_s [a_v(t)_{\max} + g] H = M_{\text{倾覆}} \quad (2)$$

化简得

$$\frac{B}{2H} \geq f_s \quad (3)$$

由于屋盖的重量占结构总重量的绝大部分,所以结构的质心位置可近似取为柱顶,则  $H$  为柱高度。结构在横向的尺寸要小于纵向长度,所以  $B$  可视为结构的总进深。古建筑中除了亭榭等小型建筑外,其他大多数建筑如殿堂、厅堂建筑的面阔和进深都大于柱高度的两倍。即使对于单开间的建筑,从《营造法式》中所规定的“柱虽高不越间之广”的条文也可以明显地看出  $\frac{B}{2H} > 0.5$ 。近些年对古建筑研究表

明<sup>[2]</sup>,柱础石与木柱间的摩擦因数  $f_s \leq 0.5$ . 因此(3)式得到满足,结构在遭遇地震作用时只会发生滑动,而不会整体倾覆,说明木构古建筑控制高宽比以及柱脚平摆浮搁的做法起到了抗倾覆作用.

## 2 结构体系

结构体系的选择对于结构整体力学性能及抗震能力的影响非常大,一个好的结构受力体系应具有承担设计荷载、抵抗意外事故的能力,特别应具有良好整体性与鲁棒性来抵抗地震作用<sup>[9]</sup>. 中国传统木构建筑所采用的结构体系类似于现代建筑常用的框架结构,是由柱和枋(阑额、由额、随梁枋、普拍枋等)通过榫卯结合技术连接而成的木构架体系,是一个具有多重隔震、减震结构层次的优秀抗震体系,具有很好的抗震能力,主要表现在柱脚与础石的平摆浮搁式连接、铺作层以及榫卯连接节点.

柱子是浮搁平置于础石之上的,连接特性类似于铰接,而现代结构中的连接方式为刚接. 结构的竖向力由柱子传递给基础,然后分散到地基之上. 如果说现代结构中柱与基础连接的刚性节点是依靠“抗”来承受水平荷载的话,那么木结构则是“抗”与“放”的结合. 在风荷载及较小的地震作用下,结构利用柱与础石之间的摩擦力来抵抗水平荷载,但当水平荷载超过础石所能提供的摩擦力的时候,柱就开始在础石表面滑动,使结构底部剪力始终保持为常数——柱与础石之间的滑动摩擦力,有效地减小了地震的影响,达到了隔震的效果.

殿堂式建筑中的铺作层是由安置在额枋或柱头之上并由梁枋纵横相连的多组斗拱组成的. 斗拱中各构件的连接为榫卯连接,斗底与拱以及栌斗与普拍枋或柱头之间为平置或加暗梢连接,由于榫卯间有间隙,达不到绝对的密实,并且暗梢的抗剪能力有限,会发生变形甚至折断,所以水平荷载作用下构件间可产生相对的摩擦滑动以及单铺作的整体转动,这种摩擦滑移以及转动变形能够耗散一定量的水平地震能量;铺作各构件在竖向层层堆叠,在竖向荷载作用下可产生压缩变形,且具有一定的弹性,如同一巨大的弹簧垫层,可以耗散竖向的地震能量. 庞大的铺作层,在柱架与屋盖之间形成了一个整体性很强的盘体,其层间摩擦滑移以及竖向弹性变形在一定程度上起到了减震隔震的作用,从而减小了上部厚重屋盖层的地震反应.

与钢筋混凝土框架结构中梁柱之间的刚性连接节点不同,木柱与枋连接的榫卯节点具有半刚性的特点,这也决定了木构古建筑所独有的结构特性:结构刚度小,自振周期长,节点可发生较大的弹塑性转动变形. 较长的自振周期可以避免与场地的卓越周期接近,防止了共振这种不利现象的发生;榫卯节点允许较大的转角变形,并具有较好的延性,使得结构通过节点的弹塑性转动耗散了一部分地震能量,达到了耗能减震的作用.

## 3 承重木构架的构造措施

古建筑的承重体系是由柱子和额枋通过榫卯连接而成的柱架系统以及由梁枋层层相叠而成的抬梁式梁架系统组成的.

### 3.1 柱架系统

柱架中的柱子不但外观形式上做了形式优美的卷杀处理,而且还有生起和侧脚等特殊做法,这些做法具有的很强结构意义.

在古建筑物的正立面上,每个开间的柱高并不相同,而是自当心间的平柱向两侧的角柱逐渐增高,这就是柱的“生起”. 《法式》对用柱之制的描述:“凡用柱之制,……至角则随间数生起角柱.”又对生起的尺寸做了具体规定:“三间生起二寸,五间生起四寸,七间生起六寸,九间生起八寸,十一间生起一尺,十三间生起一尺二寸”. 图2所示的为五间生起四寸.

角柱“生起”只在殿堂式建筑中使用,不但造就了这种形制地位最高的古建筑从心间到尽间曲面上扬的优美的弧形立面效果,而且具有深刻的力学及结构意义. 一方面,由于柱间高差的存在,使得连接两

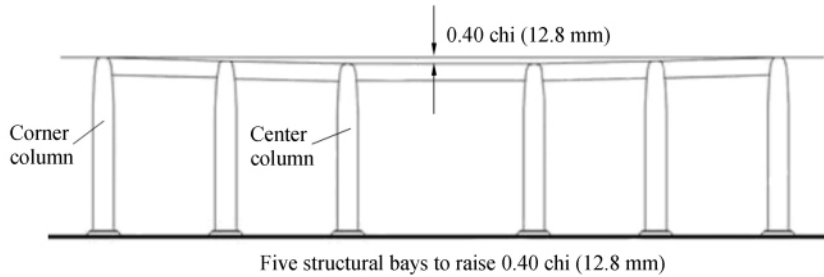


图 2 柱“生起”示意图

Fig. 2 The gradual increase of columns from the central bay to the end

柱头的阑额略微倾斜,在竖向荷载作用下会产生轴向应力,所有阑额的轴向应力是沿杆件的、方向为指向心间的推力,起到了挤紧压实榫卯节点的作用,增强了榫卯连接节点的连接刚度,提高了整个柱架的抗侧移能力.另一方面,沿进深方向,同一列柱子的高度也不相同,山面中柱的高度要低于角柱.由于木构架在横向的抗侧刚度较弱,所以在遭遇地震时会产生较大的变形,位于柱头和额枋上的铺作层也会发生变形或滑动,稍微向内倾斜的铺作层也会产生指向柱架中部的分力,抵消了一部分水平地震作用,一定程度上限制了铺作层的位移,使其不会滑出柱架之外,进而避免了屋盖的落架.

对于造柱之法,除了“生起”之外,还有“侧脚”的做法,即把建筑檐柱的柱底向外斜出,柱头就自然地向外倾斜,正面檐柱将柱底中心位置向外移出柱高的  $1/100$ ,山面檐柱柱底中心线向外移出柱高的  $0.8/100$ ,角柱则相应的向两个方向分别侧脚  $1/100$  和  $0.8/100$ .柱侧脚改变了立柱要垂直于地面传统理念,柱与柱之间不再是平行关系,而是呈一定的角度,使房屋的外轮廓略呈梯形.由水平构件连接而成的互相平行的柱子在水平荷载作用下侧移会变为平行四边形,是几何可变的.而侧脚之后柱与柱的延长线会相交于一点,形成“虚铰”,虽然没有改变柱架几何可变的特性,但是柱子倾斜所产生的水平力会压实挤密阑额与柱子的榫卯连接节点,如果说自然连接状态下榫卯节点的特性接近于铰接的话,那么压实后的节点所具有的抗弯能力会有明显的提高,构架趋于几何稳定,不再是纯粹的几何常变体系,两者之间的差别见图 3 所示.侧脚后的建筑在承受水平力时要比矩形框架更加有利,在地震作用下柱架会产生侧移变形,但是由于侧脚的存在,变形会自动恢复,柱架成为了一个在水平荷载作用下的自动复位系统.如图 4 所示,侧脚的构架在水平力作用下发生变形,一侧的柱子倾斜角度加大,另一侧的则趋向于竖直状态,因此柱架上方的屋盖系统则作平面运动.设转动角度为  $\theta$ ,屋盖的自重记为  $G$ ,则沿斜面的分力为  $F = G \sin \theta$ , $F$  使倾斜的屋盖有恢复原有状态的趋势,只要柱架的变位不会导致榫卯节点破坏,柱架就会回到没有受到水平作用力时的平衡位置, $F$  就是恢复力,方向始终指向平衡位置.

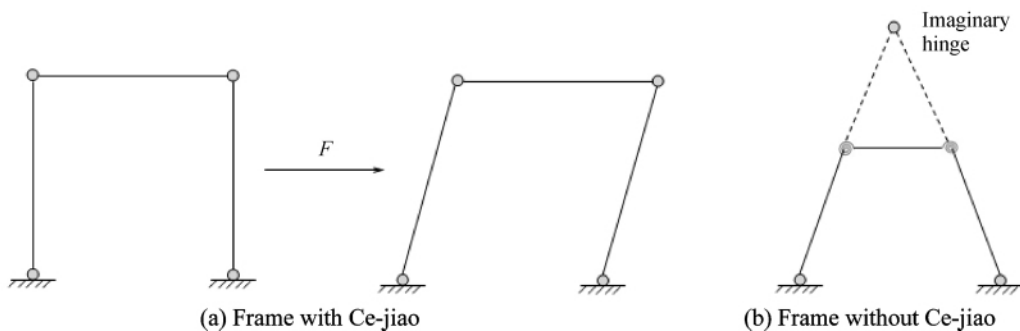


图 3 柱架有无侧脚的比较图

Fig. 3 Comparison between frame with Ce-jiao and without

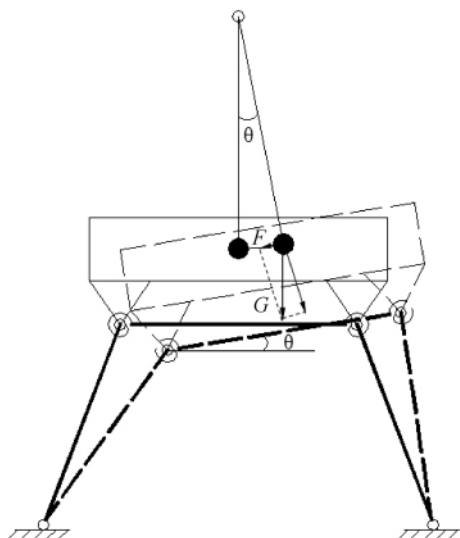


图 4 有侧脚木构架的复位机制

Fig. 4 Reposition mechanism of timber frame with Ce-jiao

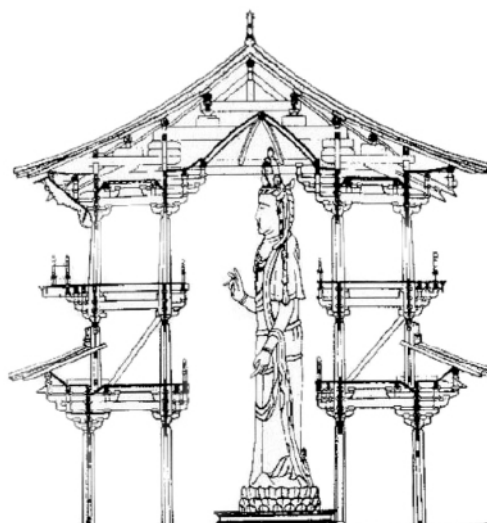


图 5 独乐寺观音阁明间结构剖面图

Fig. 5 Sectional view of Goddess of Mercy

柱之间的连接除了使用各种额枋等水平构件外,在一些建筑中还使用了另外一种构件——柱间斜撑,也可称为斜柱.我国现存建筑时间最早的高层楼阁式木结构建筑——天津蓟县的独乐寺观音阁中,就使用了斜撑.如图 5 所示.观音阁柱网为“金厢斗底槽”,外观两层,实则三层,中间有一暗阁.由于要安置很高的佛像,所以明间为六角形空井,为了避免空井结构影响高层楼阁的稳定性,在明间檐柱与中柱之间设置了斜撑,并且在暗阁内(中间层)和第三层纵向外围壁体内施加斜撑,如图 5-6 所示.斜撑的设置,可保证建筑结构的整体稳定,提高侧向刚度,并且在地震作用下能够传递纵横向水平力,是一种重要的连系杆件,在应对地震方面具有很重要的贡献.据历史资料记载,自重建以后的千余年来,观音阁经历了 28 次地震,其中清康熙十八年(1679 年)的三河、平谷发生 8 级以上强震,“蓟县城官廨民舍无一幸存,观音阁独不圯”,只是木柱略有走闪,表明了设置斜撑的结构体系的抗震性能得到了大幅度的提高.



(a) Transverse diagonal bracings



(b) Longitudinal diagonal bracings

图 6 柱间斜撑

Fig. 6 Diagonal bracings between columns

### 3.2 梁架系统

历史资料记载的最大跨度的梁枋为十椽枋,若用单梁直接承受上部屋盖重荷,则梁的截面高度要 120 份高,转换成现在的尺寸单位为 2 m 以上,如此粗大的木材很难找到.叠梁的出现,解决了这一问题,下面以八椽枋与不用叠梁的单梁的对比为例说明其中的力学意义.

如图 7 所示,设脊檩上的荷载为  $2P$ ,平檩的荷载为  $P$ ,椽水平投影长度为 150 份.蜀柱与梁枋之间的连接简化为铰接,八椽枋两端简支于柱顶的铺作之上.单梁的跨度取与八椽枋相同,椽两端投影的位置立不同高度的立柱支撑椽,荷载同叠梁式.梁跨中弯矩见表 1.

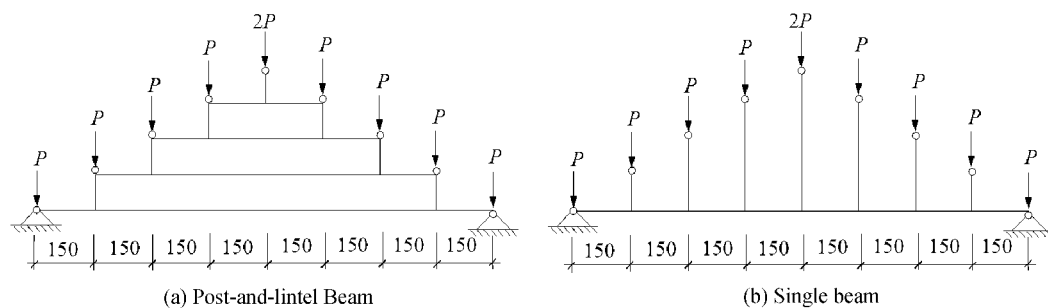


图 7 叠梁与单梁梁架受荷示意图

Fig. 7 Loads on post-and-lintel beam and single beam

表 1 梁跨中弯矩

Tab. 1 Mid-span moments of beams

Beam	$M_8$	$M_6$	$M_4$	$M_2$
Post-and-lintel beam	$600 P$	$450 P$	$300 P$	$150 P$
Single beam	$1\,500 P$			

表中,  $M_8$  为八椽枋跨中弯矩;  $M_6$  为六椽枋跨中弯矩;  $M_4$  为四椽枋跨中弯矩;  $M_2$  为平梁跨中弯矩。

由表可知, 单梁跨中弯矩为八椽枋的 2.5 倍, 若要根据内力值来选择构件截面尺寸, 显然, 单梁式要比叠梁的截面尺寸大得多。相对而言, 采用叠梁做法的构件的截面尺寸可以大大减小。叠梁中所有梁枋构件的弯矩值的总和为  $M_2 + M_4 + M_6 + M_8 = 1\,500 P$ , 正好等于单梁跨中弯矩, 即所有节省的弯矩全部被八椽枋以上的梁枋承担, 所以有“替力梁架”之称。与单梁构件相比, 叠梁中每个构件中的截面尺寸要小很多, 扩大了选材的范围; 另外, 小材比大材更便于运输和加工, 降低施工难度。从某种程度上而言, 叠梁是出于对受力及选材的考虑。

## 4 结 论

本文通过现有的工程设计理念, 对古建筑木结构概念设计思想进行了研究, 得到了以下主要结论:

(1) 在结构平面选型方面, 古建筑体型具有规则性、对称性和均匀性, 有利于抗震; 竖向选型方面, 木构古建筑较小的高宽比使得结构在遭遇地震作用时只会发生滑移, 而不会整体倾覆。

(2) 结构体系选择方面, 由于柱脚平置浮搁与础石之上、铺作层的设置以及节点的榫卯连接方式使得木构架的半刚性框架体系具有多重隔震结构层次的优秀抗震体系。

(3) 承重柱架中柱列“生起”的作法, 增强了榫卯连接节点的连接刚度, 提高了整个柱架的抗侧移能力, 并可在一定程度上限制铺作层的位移, 使其不会滑出柱架之外, 进而能避免屋盖的落架; “侧脚”的作法保证木构架趋于几何稳定, 并使柱架成为了一个在水平荷载作用下的自动复位系统; 柱间斜撑的设置, 可保证建筑结构的整体稳定, 提高侧向刚度, 并且在地震作用下能够传递纵横向水平力, 提高了结构的抗震能力; 抬梁式梁架系统可明显降低梁跨中弯矩作用, 是一种省力的做法, 是对结构受力及选材的综合考虑。

## 参考文献 References

- [1] LIANG Si-cheng. A pictorial history of Chinese architecture [M]. FAIRBANK W, ed.. Boston: MTT Press, 1984.
- [2] 张鹏程, 赵鸿铁. 中国古代建筑抗震[M]. 北京: 地震出版社, 2007.  
ZHANG Peng-cheng, ZHAO Hong-tie. Earthquake resistance in Chinese ancient buildings [M]. Beijing: Earth-

- quake Press, 2007.
- [3] 王 天. 古代大木作静力初探[M]. 北京:文物出版社,1992.  
WANG Tian. Initial Exploration on statics of ancient carpentry work[M]. Beijing: Antique Press,1992.
- [4] 赵鸿铁,张海彦,薛建阳,等. 古建筑木结构燕尾榫节点刚度分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2009, 41(4): 450-454.  
ZHAO Hong-tie, ZHANG Hai-yan, XUE Jian-yang, et al. The stiffness analysis on the characteristic of mortise-tenon joint in historical timber buildings [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.; Natural Science Edition, 2009, 41(4): 450-454.
- [5] 隋 葵. 中国古代木构耗能减震机理与动力特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.  
SUI Yan. Analysis on energy dissipation mechanism and dynamic characteristic for Chinese ancient timber buildings [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.
- [6] 薛建阳,赵鸿铁,张鹏程. 中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2004,37(6):6-11.  
XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, ZHANG Peng-cheng. Study on the seismic behaviors of Chinese ancient wooden building by shaking table test [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6):6-11.
- [7] SUI Yan, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, et al. Experimental research on the lateral stiffness of ancient wooden Dougong [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.; Natural Science Edition, 2009, 41(5): 668-671.
- [8] ARNOLD Christopher, REITHERMAN Robert. Building configuration and seismic design [M]. New York: John Wiley, Sons, Inc, 1982.
- [9] 叶列平,程光煜,陆新征,等. 论结构抗震的鲁棒性[J]. 建筑结构,2008,38(6):11-15.  
YIE Lie-ping, CHENG Guang-yu, LU Xin-zheng, et al. Introduction of robustness for seismic structures[J]. Building Structure,2008,38(6):11-15.

## Conceptual design thoughts of Chinese ancient timber buildings

ZHAO Hong-tie<sup>1, 2</sup>, ZHANG Xi-cheng<sup>1, 2</sup>, XUE Jian-yang<sup>1, 2</sup>,  
SUI Yan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Feng-liang<sup>1, 2</sup>

(1. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the existing engineering design and anti-seismic concepts, the conceptual design thoughts implied in the ancient timber buildings were analyzed. Conclusions achieved are as follows: As the planar layout of the structure is regular, symmetrical and uniform, the adverse torsional effects due to irregular layout can be avoided. Height-width ratio in the elevation is restricted to resist overturning of the whole structural body. The floating connection between posts and plinths, the Dou-gon layers (bracket sets) and the mortise-tenon joint constitute a timber-frame system with multiple vibration-isolated and shock-absorbed structural arrangement. The constructional measures such as Sheng-qi and Ce-jiao of columns, the installation of diagonal braces between columns may improve the structural integrity, stability and aseismic capacity greatly. The design of post-and-lintel beam is a method used for saving materials.

**Key words:** Chinese historic buildings; timber structure; conceptual design; structural system; constructional measures

\*Biography: ZHAO Hong-tie, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-15802992341, Email: xicheng-zhang@163.com