

# 浅谈中国古建中斗拱的力学问题

张双寅

(中科院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 简要介绍了中国古建中斗拱的历史沿革与种类, 对斗拱中的力学问题作了初步描述, 从力学原理上阐明了斗拱结构的合理性。

## 1 斗拱的历史沿革与种类

中国历史文化建筑(以下简称为中国古建)历史悠久、数量巨大、雄伟壮观, 美不胜收, 是世界文化遗产的最为辉煌的组成部分之一。当然, 从文物保护角度看, 中国古建的保护任务是艰巨的, 其中力学是大有可为的<sup>[1]</sup>。

中国古建是一支灿烂夺目的奇葩, 大型殿堂外形看上“如鸟斯革, 如翬斯飞”<sup>[2]</sup>的翘檐翘角的大屋顶和巧夺天工的斗拱是中国古建的明显特征。斗拱将外檐挑出, 大屋顶显得庄重而辉煌; 层层叠叠的斗拱如盆景, 似兰花, 美不胜收。实际上大屋顶建筑形式与斗拱结构的采用是紧密联系的。以山西五台山唐代佛光寺为例, 柱子上有四层斗拱, 层层挑出, 使大殿的屋檐外伸 4m 之远; 斗拱高度达 2m, 几乎是立柱高度的一半。图 1 示出一朵典型斗拱。

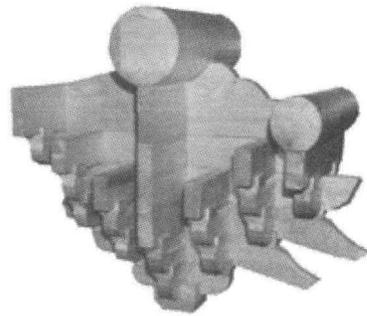


图 1 一朵典型斗拱(引自网页:《中国古代科技馆》<sup>[3]</sup>)

斗拱有两千年的发展史, 战国时代采桑猎壶上的图案, 及汉代壁画与墓阙上都可看到斗拱的早期形象。到唐、五代、宋、辽、金、元、明朝代有更大发展。图 2 展示了不同历史时代典型的斗拱。

从结构分析, 大型古建梁架式结构由四个水平层组成, 即屋顶的梁、檩、椽构成的架构层(简称屋顶层), 斗拱层, 柱架结构的空层, 以及由石材建筑的阶基层。斗拱层位于立柱(金柱)之上屋顶层之下, 将屋顶层荷载(包括梁, 檩, 椽, 琉璃瓦, 以及雪载等附加荷载)经立柱系统传递到阶基层。

斗拱因使用的部位与功能不同, 分为三类: 即“**卷头造**”, 由各种“斗”与“拱”组成; “**下昂造**”, 由斗拱和“下昂”组成; “**上昂造**”由斗拱与“上昂”组成。“上昂”和“下昂”是上翘和下垂的木板, 做装饰之用。这三类斗拱每种又分为“**重拱造**”与“**单拱造**”, 另外又分为“**偷心造**”与“**计心造**”。

建筑物柱头上的斗拱称为“**柱头铺作**”, 在两组柱头斗拱之间的一朵或两朵斗拱称为“**补间铺作**”。

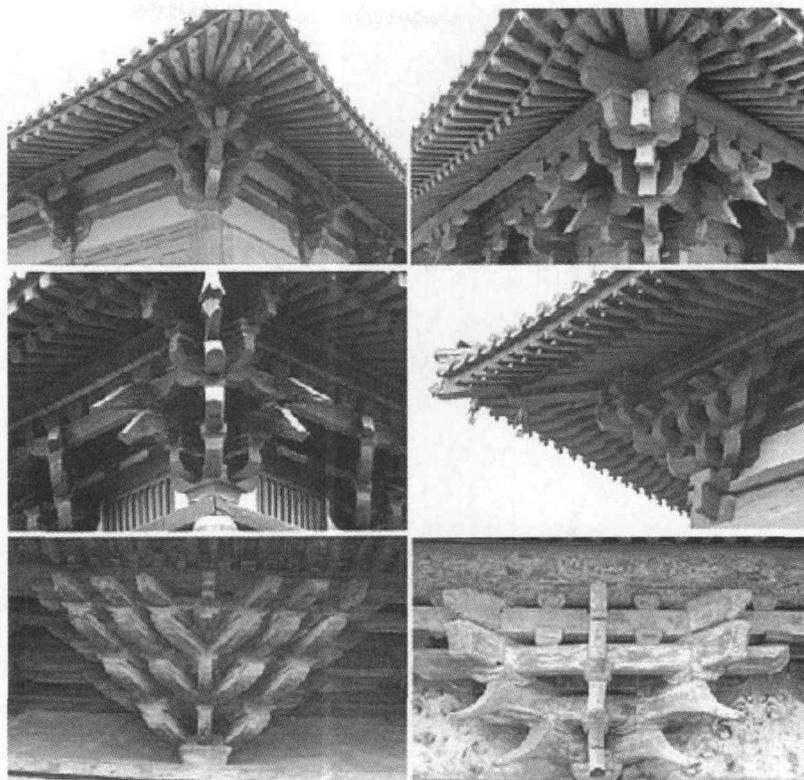


图2 几种不同时代的斗拱：唐、五代(上)，宋、辽(中)，金、元(下)(引自中国网：《大木结构》，中国互联网新闻中心<sup>[4]</sup>)

斗拱又可写为“科栱”，是由“斗”和“拱”组成；斗即置于立柱头上的上大下小的木块，外形恰似“酒斗”的斗，又如倒置的粟粮的量器“斗”；古书上斗与节、扬、栌等名称同义。“节”即竹节，竹节处直径变粗，与斗形状相似。

拱是立柱两侧的曲形小木块，因呈“弓形”而得名；但是根据文献[5]，“斗拱之拱，恰效两手对举向上，故即名之曰共，而因字形之孳乳，遂易为拱，为拱矣。”所以，拱字来源于两手共用托举重物，这个说法更加确切。“拱”在古书中又称为簷、栿。

## 2 斗拱的力学模型

### 2.1 斗的力学分析

详细分析斗拱的传力细节，十分复杂，且因制作工艺不同而不同，作为斗拱力学之浅释，本文将作必要的简化。最为简单的斗，可见示意图3，专著[4]中有注释：“斗一曰卢”。

斗位于大梁之下，金柱之上。一般而言，梁承受弯矩，截面粗大，而立柱承受轴向压载，木材有“立木撑千斤”之说，可以比梁的截面小些。大梁的荷载通过“斗”传到立柱的头部，用较细的立柱，顶起粗大的横梁，减少立柱对大梁的压应力。如图3所示，如

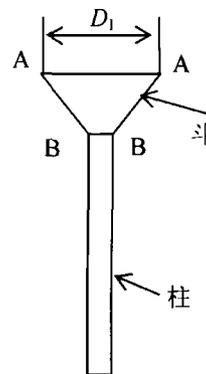


图3 最简单的斗示意图

果斗的上端面直径为  $D_1 = 2R_1$ ，其横截面积为

$$A_1 = \pi R_1^2, \quad (1)$$

其下端直径为四分之一的上端直径，即  $D_2 = 2R_2 = 2 \times \frac{R_1}{4}$ ，其面积为

$$A_2 = \pi R_2^2 = \pi \times \frac{R_1^2}{16} = \frac{A_1}{16}, \quad (2)$$

所以，经过斗的传递，立柱对梁的压应力减小到立柱所受压应力的十六分之一。

从木材性能手册<sup>[6]</sup>可知，木材的横纹抗压强度只是抗弯强度的 10% 左右。例如林科院木材所测得的润南木材的横纹压缩强度为 7.5~4.7MPa，而其抗弯强度为 80.7MPa。所以，用“斗”增大梁的抗压面积，对保护大梁不致被压坏，其作用是显而易见的。

## 2.2 斗拱的雏形

如果只用一个斗仍不足以使压应力减到足够小，则可用两个(或多个)“斗”传力，如图 4 所示。假定斗  $A$  和斗  $D_1$  与  $D_2$  形状相同，则大梁受到的压应力又将减少一半。

最初的拱是直的，类似一根小梁，如图 4 所示。为了增加斗的数量，后来发展为重叠状斗拱，最简单的如图 5 所示。为了美观起见，进一步将拱由直线形改为曲线形，如图 6 所示。传力原理基本一致，都是将立柱的力通过多层斗和拱传到大梁上，以减少对大梁的压应力。

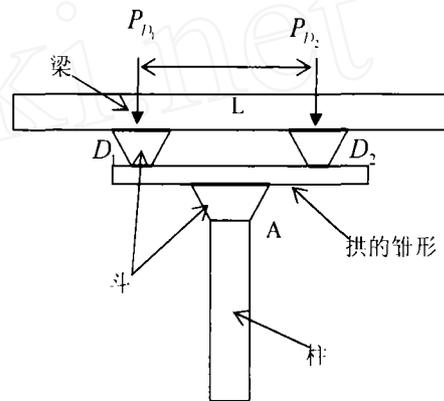


图 4 斗拱雏形示意图

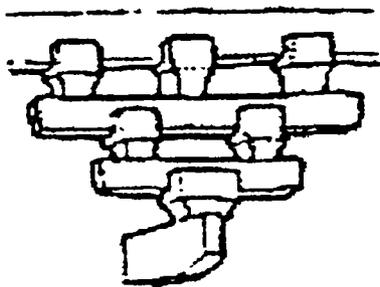


图 5 斗拱雏形的三维透视图[5]

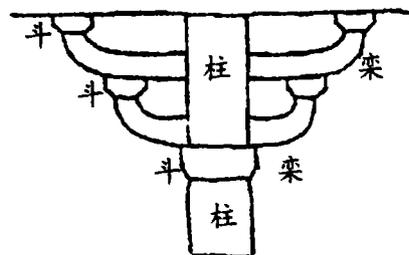


图 6 弯曲的拱(又称栿)示意图[5]

斗拱的前身有栿柱<sup>[3]</sup>，置于梁下，作用与斗拱相同。由于大梁长度过长，柱之上部加斜撑，分担屋顶加于梁上的荷载，使荷载传递更合理，图 7 是一个典型的栿柱示意图。斜柱称为“栿”，今人俗称为“牛腿”；它的承载能力大于斗拱，但是外观欠雅，所以，作为宫殿、庙宇等恢宏建筑，多不采用。

如果大梁不堪重负，在立柱和大梁接合部将产生断裂，这种断裂时有发生；作为一例，北京万寿寺万佛楼明间西侧七架梁南支座处的裂缝照片示于图 8。如果及早用栿柱加强，可避免断裂发生。

从力学上分析图 7 所示椽柱的传力机理，可以指出此乃静不定问题，A,B,C 三点的受力大小，依赖于椽(牛腿)和柱的截面面积、长度和椽的倾斜角度  $\alpha$  这三个参数。除平衡条件外，还需变形协调条件。

假设 BD,CD 两个斜椽和立柱 AD 段均为二力杆，即它们只承受压力，不传递弯矩。斜椽 CD 和 BD 截面面积与长度相同，它们的拉压刚度系数为：

$$K_{BD} = K_{CD} = \frac{EA_{BD}}{l_{BD}} = \frac{EA_{CD}}{l_{CD}}, \quad (3)$$

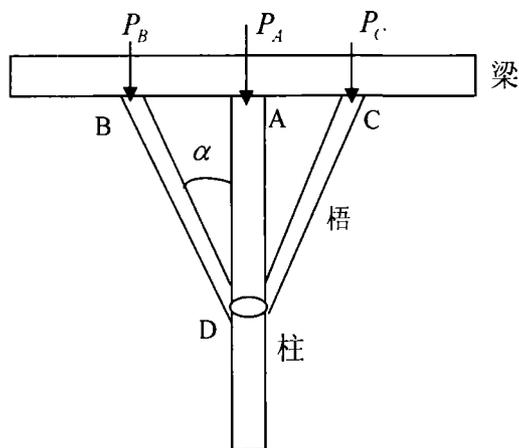


图 7 椽柱示意图



现状照片(四)

图 8 万寿寺万佛楼明间西侧七架梁南支座的裂缝(引自[1])

AD 段立柱的拉压刚度为：

$$K_{AD} = \frac{EA_{AD}}{l_{AD}}, \quad (4)$$

大梁和屋顶的总重量  $Q = P_A + P_B + P_C$ ，假定  $P_b = P_c$ ，那末，立柱 AD 段的压缩变形为：

$$\Delta_{AD} = \frac{P_A}{K_{AD}} = \frac{P_A}{EA_{AD}} \times l_{AD}, \quad (5)$$

斜椽 BD,CD 的缩短变形为：

$$\Delta_{BD} = \Delta_{CD} = \frac{P_A}{K_{BD} \cos \alpha} = \frac{P_B}{EA_{BD} \cos \alpha} \times l_{BD}, \quad (6)$$

若大梁不产生弯曲变形，则有

$$\Delta_{AD} = \Delta_{BD} \cos \alpha, \quad (7)$$

另 A 点垂直位移  $\delta_A = \Delta_A$ ，则 B, C 两点的垂直位移为：

$$\delta_c = \delta_B = \Delta_{BD} \cos \alpha = \Delta_{CD} \cos \alpha, \quad (8)$$

利用(6)~(8), 可得  $P_A$  与  $P_B, P_C$  的关系式:

$$P_A = \frac{P_B}{\cos \alpha}, \quad (9)$$

$$Q = P_B \left( 2 + \frac{1}{\cos \alpha} \right), \quad (10)$$

当椽柱演变成斗拱后, 传力形式大有不同。由承受轴向压力的斜杆变为承受弯曲载荷的小梁(拱)。将图 6 所示的“拱”简化为直梁, 得到图 9 的力学分析示意图, 屋顶分布载荷  $q$ ,  $L$  代表此斗拱系统支撑的屋顶宽度。可见, 这是一个高度静不定问题。根据简单的静力学平衡原理, 得到:

$$P_M = P_D + P_C + P_O = qL, \quad (11)$$

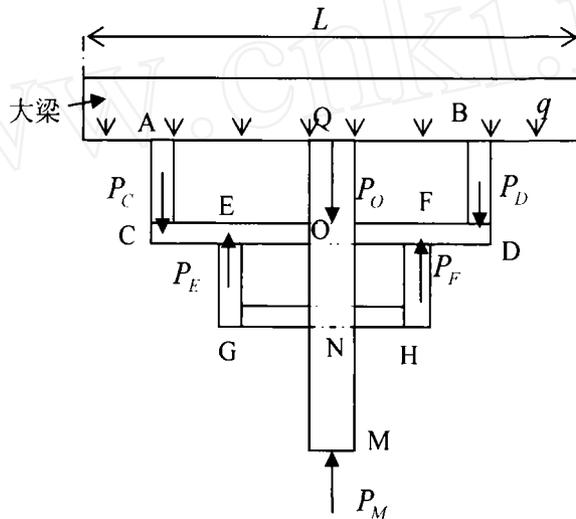


图 9 二重斗拱力学分析示意图

$P_M$  为立柱传给基础的作用力。所以, 立柱在  $Q$  点的轴向力  $P_Q (= P_O)$  等于:

$$P_Q = P_M - P_C - P_D, \quad (12)$$

可见, 斗拱系统使大梁的压应力减小。

同时, 大梁在  $Q$  点的弯矩也有很大减小。如果没有斗拱系统,

$$M_Q \approx \frac{1}{8} qL^2, \quad (13)$$

应该说明, 图 9 所示斗拱系统的两侧有屋顶相连, 所以, 一般来说,

$$M_Q < \frac{1}{8} qL^2, \quad (14)$$

当加上斗拱  $ACEOFDB$  之后,  $Q$  点的弯矩将大大减小。假定  $CO$  的长度为  $l_{CO}$ ,  $EO$  得长度是

$$l_{EO} = \frac{1}{2} l_{CO}, \quad M_Q \approx \frac{1}{8} qL^2 - P_C l_{CO}, \quad (15)$$

点  $O$  处的弯矩为:

$$M_O = P_C l_{CO} - P_E l_{EO} = l_{CO} \times \left( P_C - \frac{1}{2} P_E \right),$$

点  $N$  处的弯矩为:

$$M_N = P_E l_{EO}. \quad (16)$$

可见,斗拱的应用,大大减小了大梁所受弯矩,并且将弯矩分散成若干个小的弯矩。可以防止大梁或立柱破坏。

### 3 结束语

本文对斗拱的力学问题进行了初步而粗浅的讨论。鉴于其极大的复杂性,简化为二维问题论证,三维问题要复杂得多,但力学原理相似。

斗拱对于中国古建的重要性不仅在于它外形雄伟漂亮,还在于历史上**拱**的尺码曾作为整个建筑的**模数**。宋代《营造法式》规定将拱的截面尺寸定为一材,这个材就成为房屋宽度、深度、高度乃至梁枋粗细等一切构件尺寸的基本单位。材本身分为 8 级,级别大小代表整个建筑的等级。其重要性可见一斑。

斗拱力学的精确建模十分困难。我国古代能工巧匠,用无穷的智慧,创建了光彩夺目的斗拱艺术。似云朵,似莲花的美轮美奂的斗拱是用无胶无钉的卯榫结构组成的。力学分析上看,力学建模困难很大,首先是卯榫结构力学本构关系不清楚,榫槽与榫头之间靠紧配合传力,其力学行为依赖于木材质量、卯榫尺寸、以及工匠的手艺;所以,这样的卯榫结构即使使用强大的有限元程序也是无能为力的。

#### 参考文献

1. 张双寅. 历史文化遗产保护和力学. 力学与实践, 2006, (6): 1~8
2. 楼庆西著. 中国古建筑二十讲. 生活. 读书. 新知三联书店, 2001, 9
3. 中国科学院计算机网络信息中心. 网页: 中国古代科技馆, 中国科普博览
4. 中国互联网新闻中心网. 网页: 大木结构, CHINA.com.cn
5. 乐嘉藻著. 中国建筑史. 团结出版社, 2005, 1
6. 机械材料手册. 第二版, (3)工程材料卷. 北京: 机械工业出版社, 1996

**Abstract:** A brief introduction to the development history and categories of DOU-GONG in the ancient architectures of China is presented. A preliminary description on the mechanics problem is given. Based on mechanics principle, the design reasonability of DOU-GONG structure is analyzed.