

传统家具结构的力学性能研究

The Research on Structural Characteristics of Traditional Chinese Furniture

薛坤^{1,2} Xue Kun^{1,2}

(1.南京林业大学,江苏南京 210037; 2.山东工艺美术学院,山东济南 250014)

摘要:构件通过榫卯结构组合的空间整体性,是传统家具最具特色的研形式。本文运用力学手段对传统家具榫卯结构的半刚性连接特性、自由度和层级性进行分析,论述传统家具结构的整体性并对传统家具结构中具有代表性的构件——梁以及梁的补强结构的力学特性进行了探讨。

关键词:传统家具;榫卯结构;力学性能;梁

中图分类号:TS633 文献标识码:A 文章编号:1006-8260(2012)11-0018-02

Abstract: The mortise and tenon joint and spatial integrity are most significant characteristics of the structure of traditional furniture. By analyzing the mechanic properties of semi-rigid M&T joint and degree of freedom, the structure integrity of traditional furniture is discussed and the mechanical characteristics of the typical member of traditional furniture- the beam and the beam reinforcing structure are studied.

KeyWords: Traditional Furniture ;Mortise and Tenon Structure ;Mechanical Property ;Beam

榫卯结构的广泛应用是传统家具最突出的特点^[1],它的力学性能对结构的影响十分重要。榫卯之间的连接有一定的间隙,在节点转动的同时提供抵抗弯矩的能力,表现为介于刚性节点和铰接节点之间的非刚性连接状态。此外,木材属弹性材料,在外力作用下产生变形,外力撤除后会回到原来形状,在循环荷载达到最大值时,施以相反方向的力,有力量提升的现象^[2]。这种较大变形还不破坏的能力使构件之间能够分解荷载,形成整体受力。

1 传统家具结构的整体性

家具强度不仅决定于材料,更重要的是家具的结构形式。传统家具主要采用框架结构,即许多杆件由接点连接起来形成构架,各个杆件互相制约、协调形成一个空间整体,承受各方向可能出现的荷载。

1.1 传统家具的连接类型

构件的类型一般分为杆和索。家具构件之间大部分为杆件连接,杆件既受拉也可受压,决定杆件连接设计的因素主要是杆件之间的交角及杆件的截面形式。杆件交角由造型与结构体系决定,应避免非垂直连接;木质构件的截面形状对连接设计产生重要的影响,在交角非垂直的情况下应注意截面形式及木材纹理方向,并使连接部分过渡自然合理。

索连接在家具中的应用不常见,一个较为直观的例子是传统家具中胡床或交椅的X型构件与座面形成的张力整体结构。张力整体(Tensegrity)^[3]是tensile和integrity的缩写形式,20世纪60年代由美国建筑师富勒(R. B. Fuller)提出。如图1所示,张拉整体结构由压杆和索组成,压杆在连续的索中处于孤立状态,所有压杆都必须分开同时靠索的预应力连接起来,在结构中尽可能减少受压状态,因为受

压存在着屈曲现象,张拉整体使结构处于连续的张拉状态,结构整体不需要外部的支撑和锚固,像一个自支撑结构一样稳定。传统家具的非刚性连接以及构架相互牵制的特点,与张拉整体的思想较为类似,这类结构呈现一定的弹性,能吸收相当的能量。

1.2 传统家具结构的自由度

结构力学上的自由度指分析结构系统时,有效结构节点上的未知节点变位数。自由度大致有两种形式:移动的自由度和旋转的自由度。如图2所示,在平面中有三个自由度:面旋转,前后及左右两个移动;在立体中,有六个自由度,分别为前后、上下及左右三个移动和前后、上下及左右三面旋转。从家具节点分析的角度,将两个或两个以上的部件连接在一起有很多种方式,每一种方式又有不同的变化。要使连接能够起作用,必须限制六个运动自由度中的一个或多个。

根据自由度的空间限定,传统家具可分为二维榫卯结构和三维榫卯结构。二维榫卯是在三维空间中有一个方向的变形不受约束,位置一般在垂直于卯口的方向,这种缺陷会直接对节点的某个方向的力学性能造成影响。如燕尾榫抵抗垂直向上荷载能力较差,直榫抵抗水平拔出荷载能力较差,这种局限性造成了榫卯和刚性节点之间性能的差异^[4]。在构架发生侧向变形时,对于垂直卯口的横枨的水平力,这类榫卯缺乏抵抗能力,造成椅子结构中椅枨与腿连接部位榫头的拔出和牙头、牙子等装饰性部件的脱落。传统家具结构也会应用某个方向的自由度,克服木材因性能引起的变形,比如攒边打槽装板结构,中间镶嵌的面板在平面左右、前后自由度并未限定。(图3)形成定向支座,被承担的部分不能转动,但可以沿一个方向平行滑动,提供反力矩和一个反作用力。三维榫卯是在二维榫卯的基础上通过限制各个单独的构件在各方向的

运动,使整个构件成为一个整体。由于具体加强的部位及视觉效果的要求不同,具体方式也不同。一般来说,有四种加强的方式:第一是通过构造手段确保有效约束。传统家具结构部件之间存在着层级关系,这种层级关系体现在装配先后的差异,目的是实现榫卯结构由二维向三维的转化。例如直榫这类缺乏可靠约束的节点类型,可利用上部接合构件的重力作用限制自由度,使榫头向上;再如嵌板拼板面积较大,垂直方向上没有约束,面板背后通常开槽插入两条呈梯形的穿带,防止拼板产生垂直方向上的变形。第二是在同一截面出横、竖榫头,通过与第三构件的连接,实现多向固定,限制自由度,如抱肩榫、棕角榫、裹腿等。如图4所示,传统椅子通过座面将腿固定,形成整体,互相牵制。第三是在构件接合部位受力平面形成角度或者梯形结构,增大抗弯或抗拔强度。比如丁字形接合中的格肩榫,通过45°斜面增强了抗弯矩能力,虚肩结构又增大了胶合面积,提高了榫头的抗拔强度。第四是通过楔、档等进行补强。比如楔钉榫,用于弧形弯材的连接,先通过水平方向组合两个部件,通过榫头互相咬合,限制垂直方向运动,再用梯形的楔限制水平方向的运动。为解决榫头容易拔出的问题,在民间家具中常使用销钉、档来固定。档常用在直榫内,如图5所示,在榫头锯开豁口,然后将破头档敲入卯眼里撑开后,榫头将很难再退出,这种结构非常坚固且不可逆。

3 传统家具结构的层级性

传统家具的结构系统是不同元素的结合体,根据各种概念和方法设计的接点,限制单元构件的运动,可以看作在各种层级之间的部件的关系。这种组织系统具有层级性:结构的基本元素是部件,部件组合连接成为功能性单元,比如边框、拼板、梁柱等,单元组装成

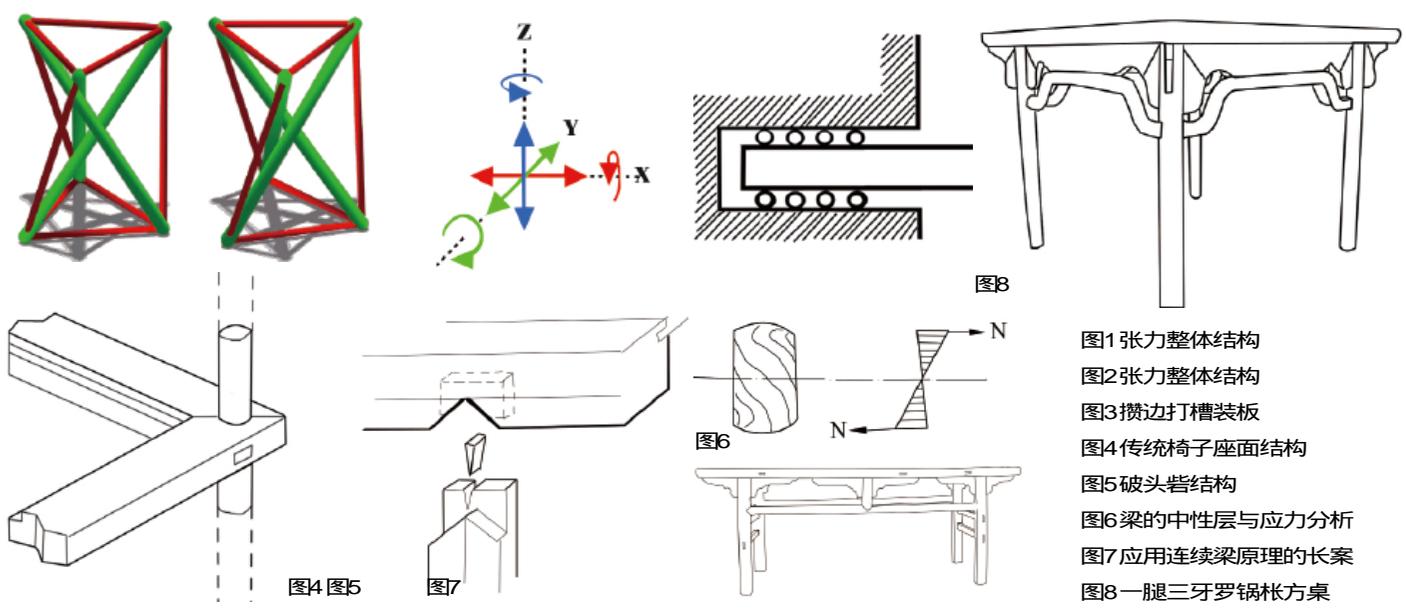


图1 张力整体结构
图2 张力整体结构
图3 攒边打槽装板
图4 传统椅子座面结构
图5 破头砦结构
图6 梁的中性层与应力分析
图7 应用连续梁原理的长案
图8 一腿三牙罗锅枱方桌

框架并通过辅助性构件(如各类牙板、枨)增强其稳定性。传统家具所有的部件通过这种方式定位、安装,通过层级结构承受各种条件下的荷载及由湿胀干缩引起的变形。

2 传统家具结构的梁柱结构体系

传统家具采用框架式结构,继承了传统木建筑的梁柱结构体系。在框架结构中梁是重要的构件,承受垂直于纵向轴力的作用,家具结构中经常采用的是固端梁和悬臂梁的结构形式^[5],比如书架上存放的书籍是在固端梁施加平均荷载,拖动桌子腿是将荷载集中在悬臂梁,横梁承担荷载后在弯曲力矩作用下容易产生弯曲变形直至断裂,因此传统家具中梁是结构设计中考虑的重点。

2.1 梁的设计

梁的设计需要考虑两种荷载。第一种荷载是弯曲应力,弯曲应力在梁的底部引起横跨木纹的裂纹,位置通常在跨度的中间三分之一处。第二种需要考虑的荷载是剪切应力。剪切应力的关键点是靠近支撑点的位置。如果荷载没有正确的施加在支撑柱上,而是落在柱子附近,可能会导致梁受剪切应力破坏。典型的两端固定的矩形截面硬木梁跨度变形的近似简化公式为: $D=w \cdot L^3 / (24 \times 10^6) \cdot b \cdot h^3$ ^[6]。其中,w为施加在跨度中间的荷载,L是梁跨度(没有支撑)部分的长度,b是梁的宽度(水平方向),h为梁的高度(垂直方向)。从公式中可以看出,D与梁垂直方向上的厚度的立方成反比,因此,粗略地说,跨度上10%的增加能够由10%的梁的垂直高度的增加所抵消。因此,为提高承载横截面的强度,最好的方法是增加垂直方向的尺寸h,而非增加总面积或宽度。

2.1.1 变截面梁

弯曲强度计算是为了保证梁的危险截面上的最大应力满足强度条件,大多情况下梁上只有一个或少数几个截面上的弯矩达到最大值,因此只有极少数截面是危险截面。当危险截面上的最大应力达到许用应力值时,其他大多数截面上的最大应力没有或者远远没有达到该值,这意味着大多数截面处的材料没

有被充分利用。为了合理的利用材料,减轻结构重量,很多构件都设计成变化的截面:弯矩大的地方截面大,弯矩小的地方截面也小一些。比如传统家具中椅或案的面板下的辅助性构件一壺门,其各点的截面高度设计基本随该点所承受的弯曲应力变化,截面下缘最终形成一条自然的曲线,在提高构件抗弯强度的同时保证了视觉效果。

此外,梁的截面在垂直方向上分为上中下三个部分,(图6)承受荷载时梁的截面上沿受压,中间为不受拉亦不受压的中性层,因此如果减少中性层的材料,并不影响梁的抗弯能力。明式家具中牙板、束腰、托腮在为一木连作,也称为“假三上”,托腮凹入意味着截面上中性轴附近的材料减少,形成工程结构中的工字型截面。

2.1.2 伸臂梁

伸臂梁是在一个固定铰支座和一个活动铰支座之上,伸出一端或两端的梁。与桌不同,传统家具中的案较为狭长,腿不与桌面平齐,而是缩进形成双伸臂梁,因此案比普通桌的跨度大,在结构上有其合理性。

2.1.3 连续梁

连续梁是有三个或三个以上支座的梁。连续梁有中间支座,所以它的变形和内力通常比单跨梁要小。案一般在2.4米以上,有些甚至达到3.6米。对于跨度较大的案,可以通过增加支撑点,形成连续梁,如图7所示。

2.2 传统家具的梁与补强结构

传统家具梁的补强结构主要体现在腿、束腰与桌面(座面)的接合关系上,总体来说传统家具梁的补强有三种结构方式,即横向枨、霸王枨和角牙。横向枨一般用在桌案的深度方向,也有四周都有枨的情况,这种结构补强效果最好。根据枨的造型又可分为直枨、罗锅枨、窗格枨、曲尺枨、霸王枨等类型,其中从桌腿延伸到桌面横档的霸王枨是造型最有力的形式。角牙是在桌面四角的小型托架,装饰性较强。角牙的开制与传统建筑中的替木相似,作用是加固桌(椅)腿、桌(椅)面及束腰的组合,增强抗水平力的能力,防止枨榫头的拔出,并能减短梁的跨度^[7]。明式家具中的夹

头枨通过接合桌脚与桌面,达到夹紧牙条及固定桌面的作用,形成连接裙板与上部面板的整体结构。这几种结构方式也可以配合使用,比如霸王枨与角牙同时使用,或霸王枨与罗锅枨、角牙同时使用,如图8所示为常见的一腿三牙罗锅枱方桌。

3 结语

从构件的截面形状到榫卯节点和构架的组成,中国传统家具的结构体现了朴素的力学原理。以往国内传统家具的研究,大多偏重于形制或构造的感性研究,忽略整体结构的力学合理性,家具的设计和制作仍然建立在经验的基础上,远未达到真正意义上的工程设计水平^[8]。随着对传统家具研究的深入,运用有限元法等数学和力学工具对传统家具结构进行定量的分析将是下一步探索的方向。

(责任编辑:北方)

参考文献:

[1]薛坤,许柏鸣.传统红木家具的传承与创新[J].家具与室内装饰,2011,10:102-103.
[2]李佳韦.中国传统建筑直榫木接头力学性能研究[D].台北:台湾大学,2006.
[3] Buckminster Fuller,Tensegrity[J],Portfolio and Art News Annual,1961,4:112-127.
[4]乐志.中国传统木构架榫卯及侧向稳定研究[D].南京:东南大学,2004.
[5]柳万千等.家具力学[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1993.
[6]Forest Products Laboratory.Wood handbook—Wood as an engineering material[M].Madison,WI:U.S.Department of Agriculture,Forest Service,Forest Products,1999.
[7]王天.古代大木作静力初探[M].北京:文物出版社,1984.
[8]陈浩森,王思维.有限元理论应用于家具结构设计初探[J].家具与室内装饰,2010,10:14-15.