

木结构

设计指南

MUJIEGOU SHEJI ZHINAN

樊承谋 安玉杰 祝恩淳 周华樟 邱立鹏 编著

中国建筑工业出版社



木结构设计指南

樊承谋 安玉杰 祝恩淳 周华樟 邱立鹏 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

木结构设计指南/樊承谋等编著. —北京: 中国建筑

工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-112-12563-0

I. ①木… II. ①樊… III. ①木结构-结构设计

IV. ①TU366. 204

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 199444 号

本书阐述了木结构的安全使用、木构件的计算, 层板胶合木、旋切板胶合木及胶合板等材料及构件的力学性能、制造和设计, 另外还介绍了轻型木结构及组合结构, 以及木楼盖的振动和抗震设计问题, 在阐述木结构计算原理的基础上, 为了读者更好地运用, 还列入了各种构件和结构的设计例题作为设计人员的示范, 本书也可作为高等院校相关专业师生研究学习的参考。

* * *

责任编辑: 刘 江 曾 威

责任设计: 张 虹

责任校对: 姜小莲 张艳侠

木结构设计指南

樊承谋 安玉杰 祝恩淳 周华樟 邱立鹏 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 288 千字

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-12563-0
(19850)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

木结构在我国曾因结构用材采伐殆尽而停用近 20 年，致使木结构学科的发展中断。直至 20 世纪 90 年代末期，人民生活水平显著提高，引进了轻型木结构住宅，从近年来对平台式轻型木结构抗震表现的调查获知，这种木结构可抵抗超过 $0.6g$ 的地震峰值加速度，远胜于老式木结构建筑。木结构材料及设计方面的研究使木结构建筑又恢复了生机并显现出良好前景，但由于木结构的特殊性，使得木结构的设计人员在设计时感到困难。编写本书的目的是为了有助于木结构的推广应用，解决设计人员在工作中遇到的问题，本书编写时注重于以下几方面：

首先是尽量涵盖各种类型的木结构，例如实木的梁、柱；层板胶合木的梁、桁架、框架；实木、层板胶合木与木基板材组合的胶合薄腹梁或薄翼缘梁以及与混凝土组合的结构。

其次是按理论与实践相结合的要求，列入九个设计例题，有利于设计人员理解和应用。

再次是参照欧洲木结构设计规范 EC 5，将高次超静定的轻型木结构的楼盖和屋盖假定为水平方向的横隔，而将剪力墙假定为竖向的横隔进行简化分析，可以更为确切地反映其实际的承载能力。

此外还讨论了木结构特有的课题，即木楼盖的振动。

希望本书能成为木结构设计人员的好助手，本书也可为高等院校相关专业师生提供参考。

目 录

第 1 章 木结构的安全和正常使用	1
1.1 木结构设计的特点	1
1.2 可靠度与极限状态设计	2
1.3 保证安全的木结构设计	3
1.4 保证正常使用的木结构设计	4
第 2 章 木构件的计算	6
2.1 综述	6
2.2 受拉	6
2.3 受压	7
2.4 局部长度横纹承压	7
2.5 梁	8
2.6 剪切和扭转	13
2.7 柱	17
第 3 章 层板胶合木的力学性能和建模	21
3.1 背景	21
3.2 层板胶合木的力学性能	22
3.3 层板胶合木的建模	25
3.4 总结	30
第 4 章 层板胶合木的制造和强度定级	32
4.1 典型的制造工艺过程	32
4.2 性能和制造要求	33
4.3 决定强度的因素	35
4.4 欧洲标准化委员会(CEN)规定的背景	35
4.5 强度等级	36
第 5 章 层板胶合梁的设计	38
5.1 概述	38
5.2 设计程序	40

5.3 弧形梁横纹抗拉的增强	43
第6章 胶合框架和拱	48
6.1 概述	48
6.2 结构体系	48
6.3 框架设计	48
6.4 拱的设计	50
第7章 层板胶合木桁架	54
7.1 概述	54
7.2 结构的计算	54
第8章 胶合薄腹梁	62
8.1 综述	62
8.2 制造要求	62
8.3 胶合薄腹梁的应用	62
8.4 制造和运输的特殊情况	63
8.5 侧向稳定性	63
8.6 截面的有效值	63
8.7 翼缘中的应力检验	64
8.8 腹板中轴向应力检验	64
8.9 腹板中的剪应力	65
8.10 挠度的计算	68
第9章 胶合薄翼缘梁	69
9.1 概述	69
9.2 结构方案	69
9.3 翼缘有效宽度	69
9.4 胶合 T 形梁	71
第10章 旋切板胶合木结构	76
10.1 概述	76
10.2 应用实例	77
10.3 材料性质	77
10.4 旋切板胶合木桁架	79
第11章 轻型木结构	86
11.1 概述	86
11.2 房屋结构	87

11.3 结构设计	97
第 12 章 木楼盖的振动	103
12.1 综述	103
12.2 结构振动的概念	104
12.3 人对振动的感知	109
12.4 动荷载	112
12.5 楼盖的动力响应	116
12.6 避免振动问题的措施	120
12.7 楼盖振动的预测	121
12.8 结论	126
第 13 章 抗震设计	127
13.1 综述	127
13.2 地震现象	128
13.3 木结构建筑的地震响应	132
13.4 过去地震中木建筑的表现	135
13.5 连接	141
13.6 结构抗震设计注意事项	148
13.7 结论	153
第 14 章 组合结构	154
14.1 概述	154
14.2 基本力学性能	157
14.3 计算方法	160
14.4 特殊梁	165
14.5 格构组合柱	166
14.6 设计	170
14.7 结论	171
附件	172
附件 1 使用环境等级	172
附件 2 系数 k_{mod} 值	172
附件 3 部分安全系数 γ_M	173
附件 4 房屋极限状态的部分安全系数	173
附件 5 准恒载作用下实木和木基材料的变形系数 k_{def} 值	174
附件 6 在使用荷载作用下销型连接件每个连接件每个剪面的滑移模量 K_{ser}	174
参考文献	176

第 1 章 木结构的安全和正常使用

1.1 木结构设计的特点

木材作为结构材料，与钢和混凝土有很大的区别，下列特性在木结构设计中特别重要：

- (1) 强度重量比高；
- (2) 显著的变异性和不均匀性；
- (3) 各向异性，亦即性能取决于木纹的方向；
- (4) 性能受含水率的影响；
- (5) 强度显著地受荷载持续时间的影响；
- (6) 变形明显地随时间增长。

基于塑性的设计模型适用于钢和钢筋混凝土，这是大部分常见的破坏模式，而木材正好相反，木构件大部分常见的破坏模式皆为脆性或半脆性，这说明在木结构体系中对荷载作用重分配的能力受到限制。然而应当注意到，采用细长的销型连接件的木构件接头通常呈现塑性性能。

木材的各向异性表示设计强度值必须按材料的不同方向定义，并且必须按受拉和受压区分。并且木材的非匀质性和木节以及其他天然的缺陷致使其强度在许多情况下不按材料的标准定义，而是按构件或截面的标准定义。结构用钢材可用少数几个参数，例如单轴屈服强度 f_y 、弹性模量 E 以及泊松比 ν 进行工程设计，而对于结构木材则至少需要 7 个强度参数和 4 个刚度参数(见表 1-1)，对于其他木基结构材料也是相同的状况。

结构木材的强度和刚度参数 表 1-1

类 型	名 称	与木纹方向的关系	符 号
强度	弯曲	平行	f_m
	拉伸	平行	f_t
	受压	平行	f_c
	纵向剪切	平行	f_v
	拉伸	垂直	$f_{t,90}$
	受压	垂直	$f_{c,90}$
	滚动剪切	垂直	$f_{v,90}$

续表

类 型	名 称	与木纹方向的关系	符 号
刚度	拉伸/受压/弯曲	平行	E
	纵向剪切	平行	G
	拉伸/受压	垂直	E_{90}
	滚动剪切	垂直	G_{90}

设计木结构的工程师应对上述有关事项加强关注，这将在下述中进一步详细描述，并对结构安全极限状态和正常使用极限状态进行讨论。

1.2 可靠度与极限状态设计

结构设计的任务是为了满足关于安全和正常使用确定的性能准则。这种性能准则通常是明确定义为极限状态，也就是精确描述完成与未完成之间的界限。用来描述极限状态的参数，比如荷载、强度和刚度参数，尺寸和几何形状缺陷。由于这些参数都是随机变量，与极限状态有关的设计结果也带有不确定性。其主要结局是为了获得能保证有关的性能准则满足置信度或可靠度确定的预期水平的设计方法。换一句话说，不能完成的风险应低到充分的程度。关于可靠度更为详尽的内容，详见参考文献 [10]《木结构基本原理》第 11 章。

木材可靠度问题特别复杂，因为材料本身具有天然的变异性。不确定性有特殊意义的元素是缺乏实际的自然界变异性的信息。

木构件之间的强度变异性远远大于钢或钢筋混凝土构件。变异系数在 20%~40% 的范围内，脆性破坏模式的数值较高。

木构件本身强度变异性亦很显著，但是仅限于个别树种木材的统计数据。在日常的工程设计中，由于木材被视为匀质材料(假定沿长度方向的强度保持不变)，构件本身的变异是指强度(根据标准的工程方法求得的)取决于构件尺寸和内力的空间分布，相应地称为尺寸和荷载形状效应。这些效应的量级对于极限状态中的木结构有明显的影响。在体系的实际工况中，颇为经常地包含体系内构件之间的相互作用，在简化的工程分析中被忽略不计，但在更为先进的模型中有所描述，并被试验所证实。这可称为结构体系效应，并切合木结构体系的实际情况。由于塑性力学理论通常未能应用于木结构，因而在简化的工程设计中不可能对木结构的体系效应进行定量分析。

工程设计采用的安全系数是基于标定单独的构件，意思是在体系中按简化的工程分析一个单独的构件被认为受力最大，并依此判定整个体系的可靠度。

考虑到体系的实际工况和体系中构件的性能皆是随机的，显而易见这种方法不可能给出可靠度的正确估计。

一种按体系层次更为深入的可靠度分析往往能展现体系性能而增进安全。这种差别最为经常,但未必总是偏于保守,可称为概率体系效应。它反映一种折减的概率,在这种情况下,将在非常弱的构件或者强度非常低的截面中出现最高的应力。图 1-1 和图 1-2 为与概率体系效应有关的两个例子。

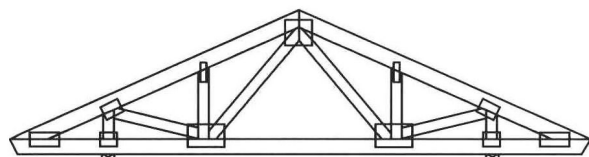


图 1-1 木构件和节点组成的屋盖木桁架代表一个体系,高应力部位通常与木材弱的截面不重合

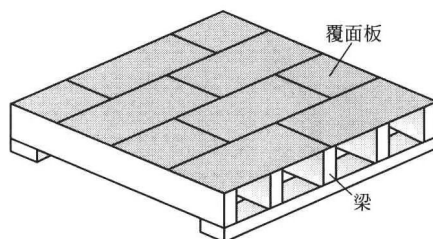


图 1-2 搁栅平行布置的楼盖,荷载可能从较弱的搁栅传递至强度和刚度较高的相邻构件

对于木材来说,其强度明显地受荷载持续作用的影响(详见参考文献《木结构基本原理》第 5 章),即强度与荷载效应之间存在统计相关,这会使评定木结构安全度复杂化。Foschi 等(1989)和 Svensson 等(1999)都曾探讨过与荷载持续有关的可靠度。荷载持续修正系数 k_{mod} 就是按照与可靠度要求一致的安全水平标定的(附件 2)。结构的性能准则可分为两类:安全和正常使用,与两种极限状态相应。关于木结构的安全和正常使用设计的关键论点将分别论述如下。

1.3 保证安全的木结构设计

木结构设计的主要难题就是可能发生许多不同的破坏模式,因此要求特别关注垂直木纹方向的低强度,在很多场合需要专门的设计方法。在采用层板胶合木和结构复合木材的大型结构中,应用了许多特殊的结构形式,例如弧形梁、框架和拱以及单坡、双坡梁和下缘拱起的梁。在这些形式的结构中,会发生垂直木纹受拉破坏的危险,应当验算。关于这些方面的设计方法可参照参考文献 [10]《木结构基本原理》第 17 章。

如上所述,木构件所具有的延性,能使木结构不比钢和钢筋混凝土逊色(见图 1-3)。

结构工程师应该意识到这一点,设计出更为先进的木结构体系是十分需要的。只要通过精心的总体设计和细部设计,就有可能获得坚固耐用的木结构体系。

结构体系中的延性可以采用专门的金属连接件来形成,如果设计正确就能得到极佳的延性(见图 1-4)。

在有地震作用的情况下,延性显得特别重要。木结构能高效地抵抗地震作用是有记载的,其最大的优点是木材重量轻,在抗震设防地区专门设计的木框架体系很有吸引力。本书第 13 章将非常全面地阐述在地震作用下木结构设计的技术发展水平。

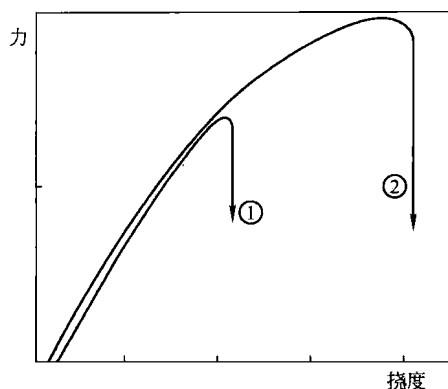


图 1-3 结构用木材弯曲时典型的荷载-变形关系，在同一试样中：①为强度低的板材，②为强度高的板材
(按照 Isaksson, 1999)

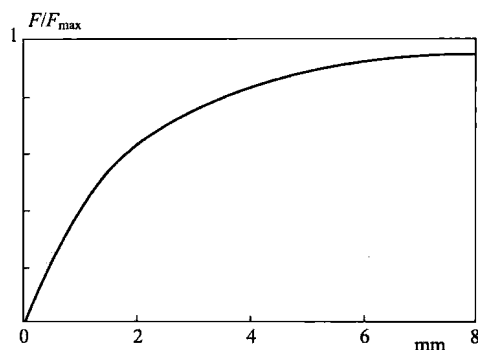


图 1-4 销型连接件接头的典型荷载-变形关系

1.4 保证正常使用的木结构设计

正常使用极限状态设计对于木结构经常是决定性的，这与强度的关系很小，而是所有类型的木制品都会因受潮而引起变形和在荷载作用下产生显著的蠕变。

楼盖和屋盖结构通常设计成用梁作为主要的承重构件。当为中等跨度时，采用实木或轻型的工字梁；跨度较大时采用层板胶合木或结构复合木材。这些结构构件的尺寸取决于梁的挠度限值。实木或木基板材制作的梁的挠度取决于短期弯曲刚度和长期荷载的蠕变。周围的气候条件对挠度甚为重要，因为刚度和蠕变二者皆取决于含水率的水平。况且材料暴露在湿度变化的环境中，蠕变将显著增长。尽管木基板材制品关于蠕变特性和湿度影响的知识不完善，但是大多数木基材料的短期刚度性质相对地众所周知。

正常使用设计的一个重要方面就是选择性能准则。结构的变形极限可以按照人们的感受、破坏的风险或失去功能等判定。对于所有这些情况，专门的变形极限定义还是带有相当程度的不确定性。

使用期间作用在结构上的荷载，在很大程度上随时间而变化，因而挠度也同样随时间而变化。这就对用来在不同情况下计算挠度而定义荷载组合提出了疑问，而且蠕变的指标通常是基于在一定时间内不变的荷载作用下的试验数据，那么荷载随时间而变化的蠕变指标的有效性就成了问题。对于这个问题最为通常的方法是按变化的荷载计算在一段时间内的蠕变挠度平均值。

楼盖振动对木结构来说是个重要的问题，特别是轻型木结构的楼盖，抵抗荷载的惯性力很小。木楼盖通常是单方向布置搁栅，而用木基板材作为覆盖面层(图 1-2)，因此理所当然地，搁栅主要受力方向的弯曲刚度高于与其垂直的方向。然而振动反应取决于两个方

向的刚度。为了改善楼盖的振动特性，通常是加设横撑或剪刀撑，用以增强横向的刚度。除了楼盖本身的性能之外，还有来自动荷载的振动反应，这可能是由人或振动设备引起的。在设计楼盖时必须将振动保持在某一限值以内。在第 12 章将详细地讨论楼盖的振动。

木材和木基板材因湿度引起的变形必须控制，以免出现对正常使用不利的问题。当将木基板材用作墙和楼盖的覆面层时，必须采取恰当的措施，容许水分迁移而不致使板材开裂。图 1-5 示出一个严重膨胀开裂的楼盖例子。在大型木结构体系中，水分引起的位移可能影响正常使用，表现为过度的沉陷和水平位移。

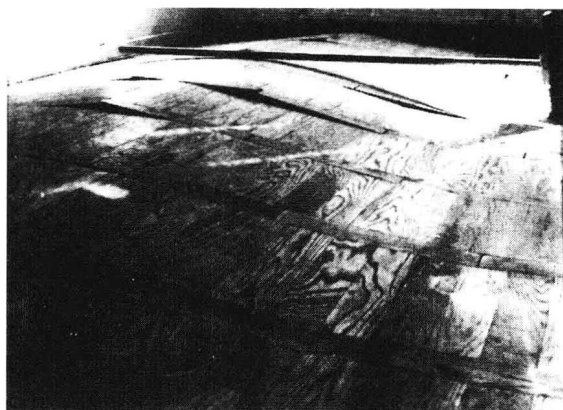


图 1-5 木楼盖由于缺乏木基板材之间的伸缩缝致使的膨胀变形

第2章 木构件的计算

2.1 综 述

当将结构尺寸的木材用于承重结构时,必须考虑天然生长的缺陷,比如木节和斜纹的影响。一个“平常”尺寸的木节对一块木板有效截面的影响与局部的纤维扰乱一起考虑。这往往导致偏心受力和局部高应力。此外,一个木节周围的纤维方向改变在单轴承载的木板中将导致垂直木纹的应力,这对于顺纹受拉承载的木材特别重要。

2.2 受 拉

不均匀性以及其对理想正交各向异性材料的偏离,这种结构木材的特征,往往称为缺陷。这些缺陷会导致顺纹受拉强度的降低颇大。北欧针叶材(云杉、冷杉)具有代表性的平均值位于 $f_{t,0}=10\sim 15\text{N/mm}^2$ 的范围内。个别试验得出 $f_{t,0}$ 的平均值随最大木节的尺寸增大而成比例地减小。然而,数据分散大且相关不好,所获得的数值取决于试验方法,因为破坏也可能是试件端头在夹持装置边缘处应力集中造成的。

在欧洲标准 EC 5 中,实木的强度标准值顺纹受拉与宽度 150mm 有关;横纹受拉与体积 $45\text{mm}\times 180\text{mm}\times 70\text{mm}=5.67\times 10^{-4}\text{m}^3$ 有关。当实木受拉构件宽度小于 150mm,其标准值应乘以提高系数 k_h ,取 $(150/h)^{0.2}$ 和 1.3 二者中较小的数值。

层板胶合木与宽度 600mm 相关,同理,当宽度小于 600mm 应乘以提高系数 k_h ,取 $(600/h)^{0.1}$ 和 1.1 二者中较小的数值。

Johansson(1976)用 276 块云杉(*picea abies*)层板截面为 $33.5\text{mm}\times 155\text{mm}$ 进行试验,以受拉强度为一方,而以密度和年轮宽度为另一方,二者之间的相关亦不好, $r=0.5\sim 0.6$ 。但是,如果将木节的数据与密度组合作为一个参数,则受拉强度可获得相当可观的相关指标($r=0.8$)。若将靠近破坏区域的弹性模量作为单独参数(简称 ESP),它与受拉强度的相关系数可达到 $r=0.86$ 。如果将参数 ESP 与木节数据组合,则可得最佳的相关($r=0.89$)。Glos(1982)从一项试验研究中也获得相似的结论。

对于单轴受拉的长板应同时既考虑尺寸效应(即长度效应),又考虑受拉强度沿长度方向的变异。

对于横纹受拉,尺寸效应特别重要,参见表 2-1。

横纹受拉强度 $f_{t,90}$ 取决于受力体积

表 2-1

体积(m^3)	2.6×10^{-2}	2.5×10^{-3}	2.8×10^{-4}	2.7×10^{-5}
$f_{t,90}$ (N/mm^2)	0.63	1.0	1.8	2.4

2.3 受 压

当顺纹受压强度受天然缺陷的影响稍微降低至 $f_{c,0}=25\sim40\text{N}/\text{mm}^2$ ，强度的降低取决于试验方法。如果试件在两块刚性端板之间受压，由于转动受到限制，一些纤维的局部破坏会引起在截面具体部分的应力重新分配。这比试件在铰接端板之间受力时会达到较高的平均应力。

天然缺陷对横纹受压强度的影响很小。

2.4 局部长度横纹承压

图 2-1 示出一底部沿全长支承的构件，上表面局部长度 l 承压。如果从荷载到承载构件端头有足够不承载的长度 a ，当承压长度越来越短时，应力-应变曲线上与其相应的应力 $\sigma_{c,90}$ 也越来越高。

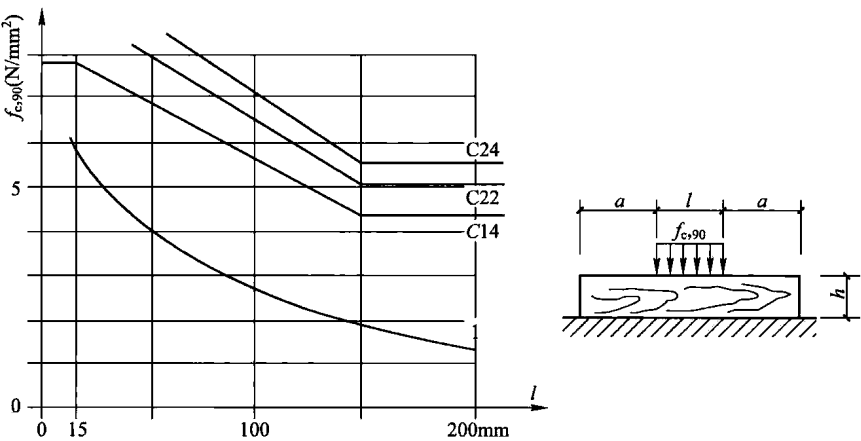


图 2-1 底部沿全长支承的构件，上表面局部长度 l 上承压的受压屈服应力 $f_{c,90}$ 与 EC 5 ($a\geq100\text{mm}$) 不同强度等级的强度值比较

欧洲标准 EC 5 将这种效应以下列公式表达，用系数 $k_{c,90}$ 确定效应的大小。

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \tag{2-1}$$

EC 5 规定：当 $l\geq150\text{mm}$ ，承压强度不提高，从图 2-1 可见，如果 $a\geq100\text{mm}$ ，系数 $k_{c,90}$ 在 $15\text{mm}\leq l\leq150\text{mm}$ 区间内，当 $l\leq15\text{mm}$ ，可达到 $k_{c,90}=1.8$ ；当边缘距离较小，也就是 $a<100\text{mm}$ ，提高将较小(见表 2-2)。

EC 5 按图 2-1 所示情况给定的公式(2-1)中的 $k_{c,90}$ 值

表 2-2

	$a < 100\text{mm}$	$a \geq 100\text{mm}$
$l \geq 150\text{mm}$	1	1
$15\text{mm} < l \leq 150\text{mm}$	$1 + a(150 - l)/17000$	$1 + (150 - l)/170$
$l < 15\text{mm}$	$1 + a/125$	1.8

2.5 梁

2.5.1 综述

梁通常为水平的结构构件，至少跨越两个支座，主要由弯曲作用传递荷载。梁的弯矩是由作用在梁弯曲平面上的荷载引起的。木纹与跨度平行的木梁标准设计程序应保证以下几项：

(1) 梁的弯曲强度、剪切强度及支座和集中荷载作用下的横纹承压强度不超过标准规定的强度设计值；

(2) 梁的挠度应满足正常使用极限状态的挠度指标；

(3) 振动不致出问题。

这里所涉及的正常的梁，既非斜坡梁或弧形梁，也不存在切口。

2.5.2 简支梁

若梁的比例尺寸和支承条件足以阻止失稳，也就是仅在加载平面下挠，这可以认为符合弹性理论，梁的弯曲应力可用下式表示

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (2-2)$$

式中 M ——作用于梁的弯矩；

I ——梁截面面积的惯性矩；

y ——至中性轴的距离；

σ ——在距离为 y 处的应力。

梁的弯曲设计强度 $f_{m,d}$ 定义如下

$$f_{m,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (2-3)$$

式中 $f_{m,k}$ ——弯曲标准强度；

γ_M ——材料性质的部分安全系数；

k_{mod} ——考虑荷载持续作用使用环境等级及材料类型等影响的修正系数。

除 k_{mod} 以外，还需考虑其他影响梁强度的因素。比如梁的尺寸对弯曲强度的影响，以及尺寸系数 k_h 。如果梁是荷载分配体系的一个部分，则弯曲强度可用荷载分配系数 k_{ls} 予以提高。

2.5.3 组合应力

梁最为普遍的应用是按最大主轴弯曲承受荷载。然而传入的外力并不在弯曲平面，而是对梁导致双轴弯曲(也就是同时对最大和最小主轴)。另外传入的轴向荷载为拉力或压力导致另一种组合应力的结果。对于双轴弯曲的梁，需满足下列两种条件：

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (2-4)$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (2-5)$$

式中 $\sigma_{m,y,d}$ ——对 y 轴的弯矩引起的弯曲应力；

$f_{m,y,d}$ ——梁对 y 轴的弯矩引起的弯曲强度；

$\sigma_{m,z,d}$ ——对 z 轴的弯矩引起的弯曲应力；

$f_{m,z,d}$ ——梁对 z 轴的弯矩引起的弯曲强度；

k_m ——构件截面中的应力重分配和材料不均匀效应的修正系数值；对于实木，层板胶合木及旋切板胶合木(LVL)：矩形截面 $k_m=0.7$ ，其他截面 $k_m=1.0$ ；对于其他木基结构板材，所有截面形式皆为 $k_m=1.0$ 。

2.5.4 梁的稳定

梁的设计主要是保证具有足够的承载能力和刚度承受沿主轴的弯矩，通常是在垂直的平面。这要求梁垂直平面的刚度比水平平面往往要高得多。图 2-2 示出一根用来承受垂直平面弯矩的细长简支梁的反应，这种现象称为侧向扭转屈曲，因为同时包含侧向挠曲和扭转。这种类型的失稳类同轴向受力柱的简单挠性屈曲，在刚度较大的垂直平面加载，而导致在刚度较小的方向侧弯破坏。

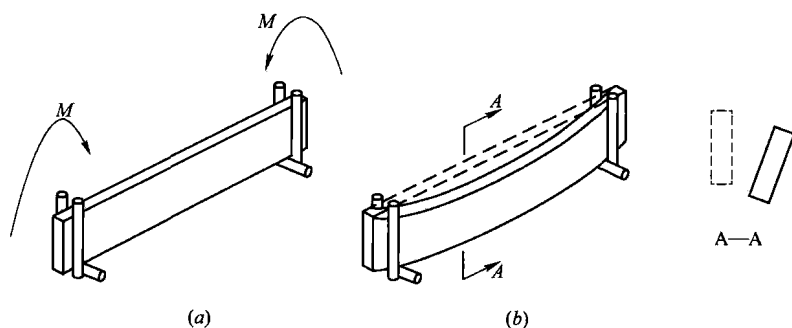


图 2-2 简支梁侧向扭转屈曲，示出在均布弯矩作用下梁中点的位移
(a)简支梁；(b)侧弯的梁

在这种失稳状况下的弯矩称为极限弯矩。梁的极限弯矩的公式已在权威的教材中给出，比如 Timoshenko 和 Gere(1961)，通常是假定梁的材料具有理想的各向同性的性质。尽管如此，Hooley 和 Madsen 展示的这一理论亦可应用于不是各向同性材料的木梁。

图 2-2 所示梁两端在 y 轴和 z 轴简支，并在 x 轴支座处约束扭转，其极限弯矩给定如下。

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \sqrt{\frac{EI_z I_{tor} G}{I - \frac{I_z}{I_y}}}$$

(2-6)

式中 I_y 、 I_z ——对相应轴的惯性矩；
 E ——材料的弹性模量；
 G ——材料的剪切模量；
 I_{tor} ——梁截面的扭转惯量；
 l_{ef} ——不受约束的长度。

对于矩形截面梁 bh ，简化后的极限弯曲应力为

$$\sigma_{crit} = E \frac{\pi b^2}{l_{ef} h} \sqrt{\frac{G}{E} \frac{1 - 0.63 \frac{b}{h}}{1 - \frac{b^2}{h^2}}}$$

(2-7)

当比值 b/h 从 0.1~0.7，公式右侧平方根相应的值为 0.94~1.05，它代表矩形木梁的实际范围，因此可偏于保守地取 0.94 代替平方根的值。

对于匀质材料 E 和 G 仅有一个值。对于木材 E 和 G 的值取决于应力与木纹之间的角度，通常 E 按平行木纹定值，而 G 保守地取为 $E/16$ ，而导致极限应力为：

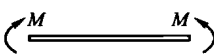
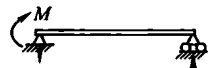
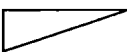
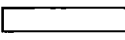
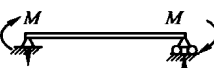
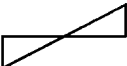
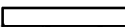
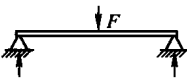
$$\sigma_{crit} = \frac{0.75 E b^2}{h l_{ef}}$$

(2-8)

类同的极限应力表达式可从多种的载荷情况、荷载的位置以及支座的条件下获得。式(2-6)给出的 M_{crit} 是基于承受平面内等弯矩条件的简支梁的极限弯矩。如果梁承受在梁质心轴水平作用的集中荷载，则可获得类似的表达式，在该式中 π 由一个常数 4.24 所取代。比值 $\pi/4.24$ 即为“等效均布弯矩系数或 m 系数”，这是一种特有形态的弯矩与基准情况(即均布弯矩)对比的百分率。表 2-3 列出一系列荷载情况下的 m 系数值。

等效均布弯矩(取自 Kirby 和 Nethercot, 1979)

表 2-3

梁与荷载	实际的弯矩	m	等效均布弯矩
		1.00	
		0.57	
		0.43	
		0.74	