

## 缓冲与隔振

## 木托盘有限元分析自动化

葛笑, 沈丹丹, 何小云, 苟进胜  
(北京林业大学, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 实现木托盘设计与自动化分析一体化。**方法** 基于 Creo 建立托盘模型库, 利用 Ansys AIM 日志和脚本记录功能, 使 Creo 软件与 Ansys AIM 无缝连接, 实现对模型结构的自动化有限元分析。随后分别对木托盘进行抗弯和角跌落试验, 并进行有限元分析与实物试验验证, 证明 Creo 与 Ansys AIM 自动化分析一体化的可靠性。**结果** 有限元分析与试验结果都满足标准中规定的性能要求, 偏差分别为 5.2% 和 6.8%, 在标准范围内, 说明仿真分析结果具有一定的参考价值。**结论** 完成了基于 Creo 平台快速、准确、易操作的木托盘设计与自动化有限元分析系统一体化, 解决了有限元分析操作难度大、效率低的问题。

**关键词:** 木托盘; 自动化分析; Creo; Ansys AIM

**中图分类号:** TB485.3; U294.27<sup>+2</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)05-0158-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.022

## Finite Element Analysis Automation of Wooden Pallets

GE Xiao, SHEN Dan-dan, HE Xiao-yun, GOU Jin-sheng

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to realize the integration of wooden pallet design and automatic analysis. A pallet model library was built based on Creo. Ansys AIM log and script recording function were used to seamlessly connect Creo software with Ansys AIM to realize automatic finite element analysis of model structure. Subsequently, the wooden pallets were subjected to bending and corner drop tests, finite element analysis and physical test verification to prove the reliability of the integration of Creo and Ansys AIM automated analysis. The results of both the finite element analysis and the test met the performance requirements specified in the standard, with deviations of 5.2% and 6.8%, respectively. Within the standard range, the simulation analysis results had certain reference value. It is concluded that the integration of the fast, accurate and easy-to-operate wooden pallet design and the automated finite element analysis system based on Creo platform is completed, solving the problems of difficult operation and low efficiency of finite element analysis.

**KEY WORDS:** wooden pallet; automatic analysis; Creo; Ansys AIM

托盘是用来集结、堆存货物以便装卸和搬运的工具<sup>[1]</sup>。托盘的利用既节省了包装材料又提高了物料机械化搬运效率, 进而节省了大量经济成本。木托盘以

天然木材为原料, 具有材料来源广、价格低、质轻、抗弯强度大、刚性好, 且可回收、可再生利用等优势, 使用量约占托盘市场的 78%, 广泛应用于军工企业、

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2017ZY32)

作者简介: 葛笑 (1994—), 女, 北京林业大学硕士生, 主攻木材科学与技术。

通信作者: 苟进胜 (1979—), 男, 博士, 北京林业大学副教授, 主要研究方向为包装废弃物资源化利用和计算机技术在包装领域的应用。

机械制造、医药卫生等行业<sup>[2]</sup>。托盘从设计到测试其性能的过程中存在周期长、耗时耗材耗力的问题。若设计不当，不能有效保护产品；若用料过度，会造成资源浪费，利用有限元分析方法可有效改善这些问题。

近年来，国内外对托盘有限元分析的研究越来越多。Waseem, Nawaz 等<sup>[3]</sup>运用 Ansys 对不同材质的托盘进行对比分析。Karaçalı<sup>[4]</sup>用有限元法研究了木托盘在载荷作用下的断裂和疲劳情况并得到应力分布结果。岳勇<sup>[5]</sup>介绍了 Ansys Workbench 定制仿真模板的开发方法，使初学者可根据中文向导轻松完成仿真分析。彭贤峰<sup>[6]</sup>等对塑料托盘进行参数化设计和三维建模，基于 Ansys Workbench 对托盘在工作过程的受力和跌落进行了有限元分析。在木托盘方面，何为宏<sup>[7]</sup>将木托盘设计与分析相结合，开发了木质托盘 CAD/CAE 系统，用户可完成常用类型木质托盘的参数化设计及托盘的力学性能分析。赵磊<sup>[8]</sup>构建了一个无缝集成于 SolidWorks 的木包装 CAD/CAE 系统，用户可对木托盘、木箱进行结构设计及有限元分析与优化。目前对于木托盘有限元分析的相关研究已经取得不错的效果，实现了部分自动化分析，但还不完全具备操作简易性以满足不具备相关有限元分析技能基础的工作人员操作。

以 Ansys Workbench 平台为基础的 Ansys AIM 是首款集成综合多物理场仿真环境，专为满足所有工程师的需求所设计。其可考虑物理现象的相互作用，并自动化处理繁杂的任务，节省工程时间和资源。前人的研究大多基于 Ansys 经典界面和 Workbench，鲜有相关文献介绍 AIM 的应用。文中在 Creo 木托盘结构模型设计条件下，将 Creo 软件与 Ansys AIM 无缝连接，实现木托盘设计与有限元自动化分析的一体化，以解决木托盘有限元分析操作难度大，效率低的问题，为木质托盘的设计与分析提供一定参考。

## 1 系统总框架

整个木托盘的设计与有限元自动化分析系统主要包括 4 个功能模块，分别为木托盘三维模型库、参数化模型库、试验模型库和工程图。其中 3 个模型库根据相关标准建立，分别为 GB/T 3716—2000《托盘术语》<sup>[1]</sup>、GB/T 2934—2007《联运通用平托盘主要尺寸及公差》<sup>[9]</sup>、GB/T 4996—2014《联运通用平托盘试验方法》<sup>[10]</sup>，进而完成木托盘的模型建立。将三维模型库的 9 类标准托盘模型和 6 个子类根据需要进行尺寸调整，即参数化设计。参数设计完成后生成所需托盘模型，进入试验模型库结构分析模块，此模块即为有限元分析部分。首先在根据相关文献<sup>[11—18]</sup>建立材料库的基础上，选择所需木材种类、试验类型并输入托盘承受的载荷，即可得到最大位移值和位移云

图。若满足标准要求，即可输出工程图，进而生产利用。实现木托盘有限元分析自动化功能的关键点在于实现 Creo 和 Ansys 软件的无缝连接，进而使木托盘有限元分析过程操作更加准确、方便和简易<sup>[19]</sup>。

## 2 有限元分析自动化的实现

有限元分析法是应用广泛、实用高效的数值分析方法。在众多有限元分析软件中，Ansys 系列软件不仅能与多数计算机辅助设计软件进行数据共享和交换，还可进行客户化定制。一套完整的结构有限元分析需要在 DesignModeler 模块中处理三维模型，在 Meshing 模块中划分网格，在 Mechanical 模块中设置加载、约束等物理条件，此过程需被记录在脚本中，才能实现脚本的参数化。Ansys AIM 日志和脚本功能可记录所有仿真步骤（包括网格划分和物理场设置等），并可以轻松定制以创建自定义仿真模型。下面介绍通过 Creo 与 Ansys 无缝连接的具体实现过程。

### 2.1 Creo 与 Ansys 软件的无缝连接

首先将在 Creo 中创建的木托盘试验模型（带有支座和加载杠的托盘模型）导入 AIM 之前需要进行预处理，即在 Creo 中定义几个选择集（NS, NameSelection），包括加载面、固定约束面和位移约束面。预处理是为了在 Mechanical 模块中设置加载和约束时实现参数化，NS 的定义需要 AIM 和 Creo 的无缝连接，下面具体介绍 Creo 和 Ansys AIM 等 2 款软件无缝连接的方法。

打开 Ansys 附带的 CAD Configuration Manager 程序，见图 1。勾选 Creo Parametric 并选择 Workbench Associative Interface，然后进入 Creo Parametric 选项卡配置 Creo 的安装目录和启动文件，最后进入 CAD Configuration 选项卡点击 Configure Selected CAD Interface 完成连接。启动 Creo Parametric 打开任意模型，便可在 ANSYS 18.0 选项卡中看到图 2 所示功能。

以托盘抗弯试验模型为例，加载杠顶面为施加压力的承载面，选中 2 个面使其呈绿色显示，见图 3。然后点击 Ansys Named Selection Manager 对话框中的 Create 按钮，将其命名为“NS\_PRESS”，其中“NS\_”是 Workbench 和 AIM 中默认识别的前缀。一侧支座底面命名为“NS\_FIX”，即固定约束面。另一侧支座底面命名为“NS\_DIS”，即位移约束面。

### 2.2 自动化分析脚本的建立

Creo 模型导入 AIM 中有 3 种方式，分别是 Choose Files, Geometry Import Source, Active CAD Attach，根据 3 种方式的不同特点，这里选择的导入方法是 Active CAD Attach，即创建一个空几何导入源对象，该对象要求从活动的 CAD 文档列表中选择导入源位

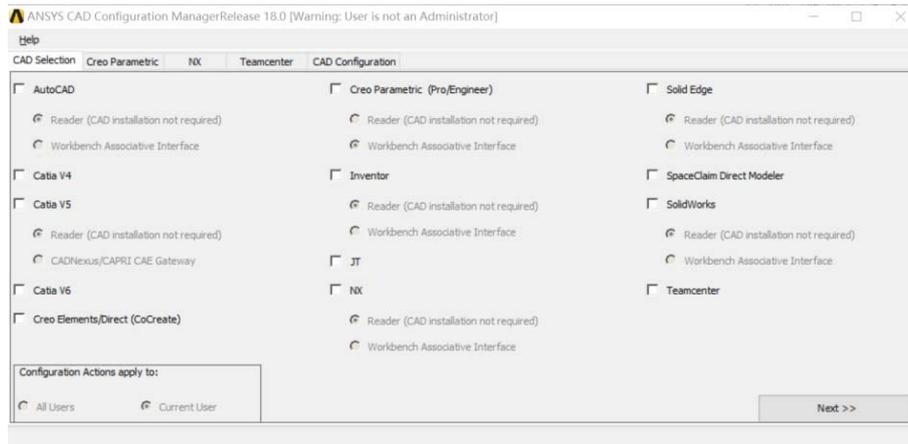


图1 CAD configuration manager 界面  
Fig.1 Interface of CAD configuration manager



图2 Ansys 功能区  
Fig.2 Ansys ribbon

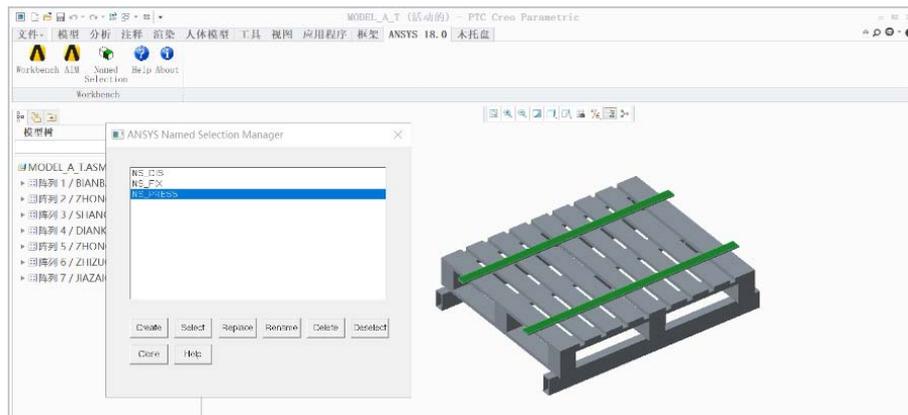


图3 选择集定义界面  
Fig.3 Definition interface of selection set

置,该方法可以将带有 NS 信息的 Creo 模型导入到 AIM 中。同时该方法要求待导入的三维模型在 Creo 中应处于活动状态。

下面展示的是部分导入 CAD 模型时,AIM 记录下的过程,把其中 FilePath 设置为可变参数,随着当前会话模型的路径改变而改变。将 Import Named Selections 的值设为“True”,可以将所创建的 NS 选择集一并导入。

```
Study.LaunchAIMFromCAD(
  PlugInName="ProEngineer[2564]",
  FilePath=r"D:\sdd\WORKBENCH\pallet_model_
library\MODEL_A_B.ASM.10")
geometryImportSource1=
study1.GetGeometryImportSource(Name="Geome
tryImportSource 1")
geometryIm-
portSource1.GeometryPreferences.ImportNamedSelecti
```

ons="True"

对于结构、热或导电模拟,AIM 采用了基于零件的网格划分方式,在划分过程中,AIM 并行地划分了整个零件或装配的组件。与 Workbench 相同,在默认情况下使用六面体对可扫描的物体进行网格划分。通过对分析精度影响因素的研究得知,在进行木托盘有限元分析时,与其他单元类型和划分方式相比,软件默认单元类型 (Solid 186) 和默认划分方式 (Sweep) 得到的结果更精确;网格细化虽能提高分析精度,但当网格数量达到一定程度时,随着网格数量的增加,分析结果的变化就会非常小,此时还会增加计算时间,因此考虑到细化网络的经济性,将网格尺寸设置为 20 mm。网格划分的部分脚本:

```
meshingComponent1=
Study. CreateTask(Type="Meshing", System=
```

```

system1, Input=importComponent1)
    meshingComponent1.Refresh()
    meshing1=meshingComponent1.GetTaskObject()
    meshing1.EngineeringIntent="StructuralOr ThermalOrElectricConduction"
    meshControlBodySizing1=
    study1. CreateEntity(Type="MeshControl
BodySizing", Association=meshing1)
    meshControlBodySizing1.Location= [physicsRe-
gion1]
    meshControlBodySizing1.ElementSize="20[mm]"
    meshingComponent1.Update(AllDependencies=
True)

```

加载杠的材料为钢材, 托盘模型材料为木材, 应分别分配。首先将前面定义的木托盘材料库文件导入 AIM, 然后选择目标材料赋予模型, 此例选择落叶松。部分代码如下:

```

dataManager1=study1.CreateDataManager(Sources=
[r"D:\ANSYS Inc\180\Addins\EngineeringData\
Samples\Wood_Materials.xml"])
material1=
study1.CreateEntity(Type="Material", Associa-
tion=physicDefinition1)
material1.ImportEngineeringData(Name=
"luoyesong", DataManager=dataManager1,
Source="Wood_Materials.xml")
materialAssignment1=
study1.CreateEntity(Type="MaterialAssignment",
Association=physicDefinition1)
materialAssignment1.Material=material1
materialAssignment1.Location=[palletModel]

```

施加压力和约束时需要用到前文中定义的选择集, 对 NS\_FIX 施加固定约束; 对 NS\_DIS 施加滑动约束, 即限制其竖直方向 (Y 方向) 的位移; 在 NS\_PRESS 上施加向下的压力。施加压力和约束的位置是通过 NS 选择集定义的, 这样可以实现位置参数

化, 即每个分析模型都有特定的选择集, 即使模型类型或尺寸发生改变, 脚本还是能找到对应的约束位置。脚本如下:

```

support1=
study1.CreateEntity(Type="Support", Associa-
tion=physicsDefinition1)
selectionSet4=study1.GetSelectionSet (Name=
"SelectionSet 2")
support1.Location='GetSelectionSet("@NS_FIX")'
support2=
study1.CreateEntity(Type="Support", Associa-
tion=physicsDefinition1)
selectionSet5=study1.GetSelectionSet (Name=
"SelectionSet 1")
support2.Location='GetSelectionSet("@NS_DIS")'
support2.SupportType="UserSpecified"
support2.FixedDOFs="TranslationY"
force1=study1.CreateEntity(Type="Force", Asso-
ciation=physicsDefinition1)
selectionSet6=study1.GetSelectionSet (Name="
SelectionSet 3")
force1.Location='GetSelectionSet("@NS_PRESS")'
force1.Vector.VectorByMagnitudeAndDirection.
Magnitude="-20000[N]"

```

至此为有限元仿真脚本的前处理内容, 可以在结果处理部分添加位移云图或其他处理方式, 然后进行计算。添加位移云图的主要代码如下:

```

contourResult1=
study1.CreateEntity(Type="ContourResult", As-
sociation=results1)
contourResult1.Variable="Displacement.mag"

```

最后定义输入和输出参数, 压力的大小被设为输入参数, 位移变化最大值被设为输出参数, 定义的参数不仅体现在 UI 界面中 (见图 4), 还展示在 CSV 格式的结果文件中, 方便用户查看与修改。脚本如下:

```

parameter2=Parameters.CreateParameter (Entity=
force1,

```



图 4 分析项目用户界面

Fig.4 User interface of analysis project

```

PropertyName="Vector. VectorByMagni-
tudeAndDirection. Magnitude",
IsOutput=False, Expression="-20000[N]", Dis-
playText="力 1 大小")
parameter1=Parameters. CreateParameter(Entity=
contourResult1,
PropertyName="Summary. Max", IsOutput=True,
IsDirectOutput=True,
DisplayText="位移大小 1 计算出的最大值")

```

以上即为木托盘抗弯试验的仿真分析自动化脚本建立的整个流程，托盘叉举试验、堆码试验和角跌落试验的仿真分析脚本与此方法相同，不再赘述。在 AIM 中点击运行脚本功能，便可自动重复运行，即可实现在 Creo 界面对所需托盘进行自动化力学性能分析。

### 3 有限元系统仿真分析与实验验证

#### 3.1 有限元系统仿真分析

将 Creo 和 Ansys 软件实现无缝衔接，使托盘设计与自动化分析一体化，避免分步分析的烦琐，经验证这 2 种分析方式的仿真分析结果一模一样，说明文中成功实现了 Creo 和 Ansys 等 2 个软件一体化的开发。随后主要验证有限元仿真分析与实验结果的偏差，以表征其可靠性。由于托盘抗弯试验、叉举试验和堆码试验的分析方式类似，都是在加载杠和支座上施加相应的载荷和约束，因此只以托盘抗弯试验和角跌落试验为例进行实验验证。以垫块类川字底托盘为模型，其纵梁尺寸不可编辑。尺寸与铺板数为可编辑的参数化设计部分，文中将尺寸设为 1100 mm×1100 mm，铺板数设为 8 根，得到的模型见图 5。



图 5 铺板均布托盘模型

Fig.5 Pallet model with uniform distribution of planks

对其进行有限元结构分析，分别进行抗弯试验和角跌落试验。首先选择托盘抗弯试验，将所需模型成功载入后，会弹出材料选择和载荷输入对话框。选择樟子松，输入承载 2100 kg，点击确定，系统自动分析后即可弹出结果展示对话框。此托盘模型的最大位移为 13.78 mm，见图 6。若是选择角跌落试验，系统则载入角跌落试验模型，在随之弹出的对话框中，加载项不可编辑，因为角跌落试验无需输入加载，运行结果见图 7。

在建立角跌落仿真分析脚本时，将跌落高度设为 0.5 m (GBT 4996—2014)，跌落冲击时间设为 0.01 s，可根据式 (1) 求得落地时的速度，然后根据式 (2) 计算出着地时刻跌落板对木托盘的冲击力。

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

$$Ft = mv \tag{2}$$

此外，托盘叉举试验和堆码试验与抗弯试验的区别仅在于加载的位置、大小和约束的位置、方式，因此无需一一验证。

托盘仿真抗弯试验应力云图结果见图 6，红色区域是受力严重区域，部位上面受到压缩应力、下面受到拉伸应力，受力强烈、易破坏。跌落试验接触角所受冲击力最大，最易损坏。

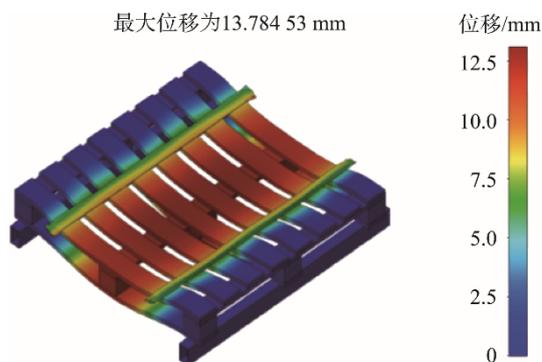


图 6 托盘抗弯试验分析结果  
Fig.6 Result of pallet bending test analysis

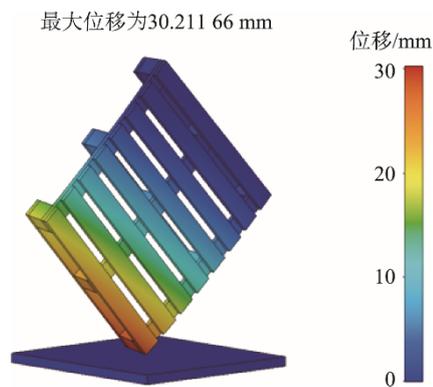


图 7 托盘角跌落试验分析结果  
Fig.7 Result of pallet angle drop test analysis

#### 3.2 实验验证

为了验证木托盘设计与分析系统仿真结果的可靠性，根据上节的尺寸参数设计，选用樟子松制作对应实物木托盘，进行抗弯和跌落实验。木托盘试件由浙江某托盘租赁公司提供，见图 8。分别进行了木托盘抗弯试验和角跌落试验。

参考 GBT 4996—2014《联运通用平托盘试验方法》进行木托盘抗弯试验和角跌落试验。抗弯试验标



图 8 木托盘试件

Fig.8 Specimen of wooden pallet

准规定,若实验负载下挠度小于 19 mm,卸载后挠度小于 6.65 mm,即为合格。角跌落试验标准规定,在同一个顶角和同一高度上需进行 3 次跌落试验,在跌落之前和跌落结束后分别测量对角线的长度。若最终对角线的变形率不超过 4%,即同一对角线的变形量不超过 58.16 mm,即为合格。

表 1 木托盘抗弯与角跌落实验值与有限元分析值的对比

Tab.1 Comparison of experimental and finite element analysis values of wooden pallet bending and angle drop experiment

测量参数	性能极限值/mm	实验值/mm	仿真值/mm	仿真值与实验值的比值/%	偏差/%
满载挠度	19	14.54	13.78	94.8	5.2
对角线 变形量	58.16	32.40	30.21	93.2	6.8

## 4 结语

在 Creo 中建立了托盘模型库的基础上,进行参数化设计,并创新性地使用 AIM 建立了有限元分析脚本,实现了 Ansys AIM 软件与 Creo 的无缝衔接,对模型结构进行有限元分析,从而实现了参数化与自动化分析一体化,验证了模型设计的可靠性。

1) Ansys AIM 可以记录木托盘结构有限元分析的所有步骤,根据需要将其修改为参数化、自动化的分析脚本,不同类型的木托盘模型可以通过同一脚本文件进行同一类型的仿真分析,实现了木托盘结构有限元分析的自动化与参数化。

2) 设计与分析功能一体化。集成 Creo 软件参数化建模功能和 Ansys AIM 软件的自动化分析功能,使木托盘的设计与分析工作可以在同一平台内快速完成。

3) 木托盘抗弯试验的仿真结果与实验结果之间的偏差为 5.2%,角跌落试验的仿真结果与实验结果之间的偏差为 6.8%,且两者都满足标准中规定的性能要求,说明本系统的仿真结果具有一定的参考价值。

### 参考文献:

[1] GB/T 3716—2000, 托盘术语[S].  
GB/T 3716—2000, Tray Term[S].

抗弯试验过程中,对托盘施加载荷 2100 kg,测得负载下挠度为 14.54 mm,卸载后挠度为 4.17 mm,且在整个实验过程中托盘试件均未破坏,满足国标中规定的性能要求。在角跌落试验中,最终测得对角线变形量为 32.4 mm,变形率为 2.23%,同时,在整个实验过程中也均未产生影响托盘性能或功能的破损,满足国标中的性能要求。与有限元分析结果相比,仿真值与实验值都小于性能极限值(见表 1),此外,抗弯试验和角跌落试验结果均表明仿真分析得到的位移值都略小于实验位移值,偏差均在 10%以内,说明本系统所得到的仿真结果具有一定的可靠性<sup>[15]</sup>。仿真值略小于实验值是由于各构件间进行了绑定接触处理,且忽略了托盘钉的钉入对周围木材强度的影响。

[2] 吴清一. 中国托盘手册[M]. 北京: 中国物资出版社, 2010: 298—312.  
WU Qing-yi. China Pallet Handbook[M]. Beijing: China Materials Publishing House, 2010: 298—312.

[3] WASEEM A, NAWAZ A, MUNIR N, et al. Comparative Analysis of Different Materials for Pallet Design Using ANSYS[J]. International Journal of Mechanical Mechatronics Engineering, 2014, 13(2): 26—32.

[4] KARAÇALI Ö. Explicit Analysis of Cyclic Fatigue Behavior of Poplar Wood Pallet by Computational Engineering-von Mises Yield, Goodman and N-S Diagram Approach[J]. Acta Physica Polonica, 2017, 131(3): 457—459.

[5] 岳勇. 基于 Ansys Workbench 的仿真模板二次开发[J]. 数字技术与应用, 2012(3): 140—141.  
YUE Yong. Secondary Development of Simulation Template Based on Ansys Workbench[J]. Digital Technology & Application, 2012(3): 140—141.

[6] 彭贤峰, 李过. 基于 ANSYS Workbench 的塑料托盘有限元分析[J]. 山东工业技术, 2015(1): 179.  
PENG Xian-feng, LI Guo. Finite Element Analysis of Plastic Pallet Based on ANSYS Workbench[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(1): 179.

[7] 何为宏. 木质托盘设计理论方法及其 CAD/CAE 系统的研发[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 46—62.  
HE Wei-hong. The Research and Development of Wooden Pallets, Design Theory & Method and Its CAD/CAE System[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 46—62.

[8] 赵磊. 基于 Solidworks 的木包装 CAD/CAE 系统开发

- [D]. 天津: 天津科技大学, 2014: 28—50.  
ZHAO Lei. The Developing of CAD/CAE System for Wood Packaging Based on Solidworks[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014: 28—50.
- [9] GBT 2934—2007, 联运通用平托盘主要尺寸及公差[S].  
GBT 2934—2007, Main Dimensions and Tolerances of General Flat Pallets for Intermodal Transport[S].
- [10] GB/T 4995—2014, 联运通用平托盘性能要求和试验选择[S].  
GB/T 4995—2014, Performance Requirements and Test Selection of Universal Flat Pallet for Intermodal Transport[S].
- [11] 龚蒙. 木材弹性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 1990: 1—10.  
GONG Meng. Research on Wood Elasticity[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 1990: 1—10.
- [12] 侯静, 陈金永, 万佳, 等. 基于有限元技术的传统木结构关键构造节点的性能研究与分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(28): 60—66.  
HOU Jing, CHEN Jin-yong, WAN Jia, et al. Research on the Performance of Key Building Node of Traditional Wooden Structures Based on Finite Element Techniques[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(28): 60—66.
- [13] 黄先宝. 基于 Ansys 的机电包装箱力学性能分析及结构优化[D]. 南京: 南京林业大学, 2013: 7—18.  
HUANG Xian-bao. Analysis of Electromechanical Box Mechanical Properties and Structure Optimize Based on Ansys[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013: 7—18.
- [14] 李雪梅. 基于有限元法木材力学性能模拟及优化设计研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 14—27.  
LI Xue-mei. Research on Mechanical Property Simulation of Timber with Finite Element Method and Optimization of Timber[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009: 14—27.
- [15] 彭国勋. 机电产品木包装系统设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2014: 165—233.  
PENG Guo-xun. Wood Packaging System Design for Electromechanical Products[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2014: 165—233.
- [16] 荣向吴. 木材的弹性与粘弹性[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008: 11—54.  
RONG Xiang-wu. Wood Elasticity and Viscoelastic [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2008: 11—54.
- [17] 王丽宇, 鹿振友, 申世杰. 白桦材 12 个弹性常数的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003(6): 64—67.  
WANG Li-yu, LU Zhen-you, SHEN Shi-jie, et al. Study on Twelve Elastic Constant Values of Betula Platyphylla Suk Wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003(6): 64—67.
- [18] 赵毅力, 刘彬, 夏炎. 西南桦人工林木材物理力学性质变化规律[J]. 广西林业科学, 2015, 44(2): 137—140.  
ZHAO Yi-li, LIU Bin, XIA Yan. Variation Trend of Physical and Mechanical Properties of Wood in Betula Alnoides Plantation[J]. Guangxi Forestry Science, 2015, 44(2): 137—140.
- [19] NWPC A. Pallet Design System[EB/OL]. (2019-02-04) [2019-03-15]. <https://trial.palletdesignsystem.com>.