印刷机滚筒的模态分析

袁清珂，杜亚男，王同乐，丁 瑶
(广东工业大学，广州 510006)

摘要： 印刷机滚筒的结构和动态性能对印刷机工作特性有很大影响，为提高印刷机的印刷质量，以纸箱印刷机滚筒为研究对象，在已有优化设计的基础上，利用 ANSYS 有限元分析软件，对优化前后的纸箱印刷机滚筒进行了模态分析，得到了印刷机滚筒的固有频率和振型，从动态特性上为静态优化结果提供了支持。

关键词： 印刷机滚筒；优化设计；模态分析
中图分类号： TS803；TH122 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2011)15-0102-04

Modal Analysis of Printing Cylinder

YUAN Qing-ke, DU Ya-nan, WANG Tong-le, DING Yao
(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The structure and dynamic performance of printing cylinder has very important influence on working characteristics of printing machine. In order to improve the quality of printing machine, modal analysis of the printing cylinder was carried out in two different cases by ANSYS on the basis of the existing optimized design. The intrinsic frequency and vibration model of printing cylinder was obtained. The purpose was to provide reliable reference for further structure analysis of the printing cylinder.

Key words: printing cylinder; optimized design; modal analysis

印刷机滚筒是印刷机械的核心部件。现代机械设备的设计不断向轻量化方向发展，在对印刷机滚筒进行轻量化设计的同时，保证其具有良好的动力学特性也十分重要。印刷机滚筒旋转所产生的振动是印刷机的主要振动源，而印刷机运转的平稳性对印刷品的质量有着极其重要的影响，尤其是在印制精美印刷品时，微小的误差都会影响印刷品的总体效果。对滚筒进行轻量化的设计以及提高动态性能具有重要的现实意义。笔者运用大型有限元分析软件 ANSYS Workbench 对轻量化前后的纸箱印刷机滚筒进行模态分析，以得到纸箱印刷机滚筒的固有频率和振型[1]。

1 模态分析的数学模型

模态分析是研究结构动力特性一种近代方法，是系统辨别方法在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率和模态振型。在承受动态载荷的结构设计中，它们是重要的参数。同时，模态分析也是其他动力学分析(如瞬态分析、谐响应分析和谱分析等)前期必须完成的环节。

印刷机滚筒被虚拟分割成有限多个相互连接的单体，并将滚筒的全部质量离散聚集于很多节点上，这些互联的质点系统的动态分析问题属于动力学多自由振动问题。计算表明，各质点间的阻尼对丝杠的频率和振型影响不大，因此，常用式(1)的无阻尼自由振动方程来求滚筒的固有频率和振型。

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\delta}(t)\}+[\boldsymbol{K}]\{\delta(t)\}=0 \tag{1}$$

式中：$[\boldsymbol{M}]$，$[\boldsymbol{K}]$为滚筒的总质量和总刚度矩阵；$\{\ddot{\delta}(t)\}$，$\{\delta(t)\}$为滚筒的加速度向量和位移向量。

由于自由振动时各结点做简谐运动，则：

收稿日期： 2011-06-13
基金项目： 广东省科技计划项目(2008B010400011)；广东省省部产学研项目(2009B090300340)；广州市科技计划项目(2008Z1-D371)
作者简介： 袁清珂(1963－)，男，青岛人，博士，广东工业大学教授，主要从事知识工程与智能设计、机电控制、多体动力学与计算机仿真、企业信息化、电子商务与网络化制造等方面的研究。

$$\delta(t)=\delta\sin(j\omega t) \tag{2}$$

式中：δ 为振型，它与时间无关；ω 为振型对应的频率。

$$\ddot{\delta}(t)=\frac{\partial^2}{\partial t^2}\delta(t)=-\omega^2\delta\sin(j\omega t) \tag{3}$$

将式(2)和(3)代入式(1)中并整理得：

$$|K-\omega^2 M|\delta=0 \tag{4}$$

当滚筒自由振动时，各结点振幅不全为 0，所以式(4)的系数行列式必等于 0，即：

$$|K-\omega^2 M|=0 \tag{5}$$

式(5)就是自由振动的频率方程，求解该式可得到 n 个根 $\omega_i^2(i=1,2,3,\cdots n)$，也即滚筒的 n 阶固有频率和振型。

2　印刷机滚筒的建模与模态分析

2.1　前期优化设计工作介绍

基于 ANSYS 有限元软件，对广州科盛隆公司研发的 KYSX-1200 2400 型纸箱印刷机滚筒进行结构分析和优化设计。KYSX-1200 2400 型纸箱印刷机滚筒结构见图 1，滚筒固定结构参数：直径 A 为 400 mm，长度 L 为 2400 mm，期极限转速为 200 r/min[2]。

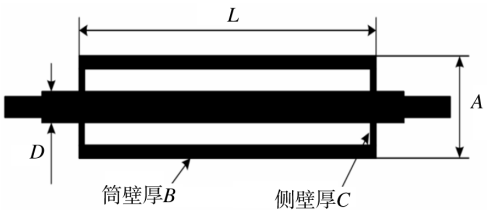

图 1　印刷机滚筒结构

Fig. 1 The structure of printing cylinder

基于对滚筒轻量化设计的需求，考虑到滚筒模型的滚筒外径和长度已经确定，而滚筒的厚度、中心轴直径、侧边的厚度这些结构尺寸没有限定，而这些结构对滚筒整体质量具有很大的影响，因此设定为设计变量。滚筒以极限转速运行时，其横向变形不得超过印刷机套印精度值。一般工况时，其最大的应力值也应小于材料的屈服强度值。因此，选取滚筒最大应力和最大弯曲为约束条件，滚筒质量最小为优化目标，选用零阶算法中的子问题法，进行 7 次迭代，得到优化结果，见表 1[3]。

表 1　印刷机滚筒可变结构参数

Tab. 1 The variable structural parameters of printing cylinder

结构参数	优化前数值	优化后数值
筒壁厚 B/mm	25	23.2
侧面壁厚 C/mm	15	28
内梁直径 D/mm	120	117
质量/kg	666.9	634.7

2.2　三维实体模型的建立

在三维建模软件 Pro/Engineer 中建立印刷机滚筒的三维模型，见图 2。

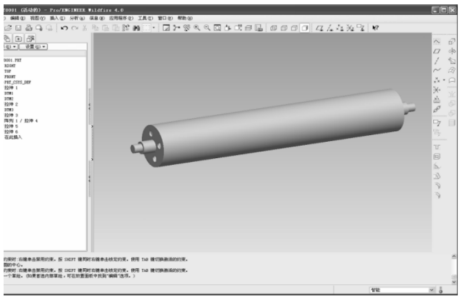

图 2　印刷机滚筒的三维模型

Fig. 2 3D virtual numerical model of the printing cylinder

2.3　分析模型的建立

2.3.1　简化分析模型

印刷机滚筒主体部分采用焊接加工而成，为了简化设计以减少计算工作量，在不影响分析的前提下将印刷机滚筒作为单一材质进行分析[4]。将模型导入到 ANSYS Workbench 中，见图 3。

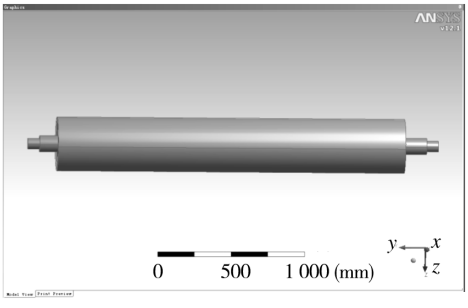

图 3　滚筒导入到 ANSYS Workbench 中的模型

Fig. 3 Analytical model of the printing cylinder in ANSYS Workbench

确定模型的单位为 mm，材料为 45 号钢，材料参数：弹性模量为 210 GP；泊松比为 0.3；密度为 7 850 kg/m^3。

2.3.2 网格划分

将模型在网格划分前沿轴向切割成 4 等份，这样采用自动网格划分方法即可以得到比较理想的网格。另外通过计算比例、控制单元的大小，对优化前后模型进行网格划分，见图 4。

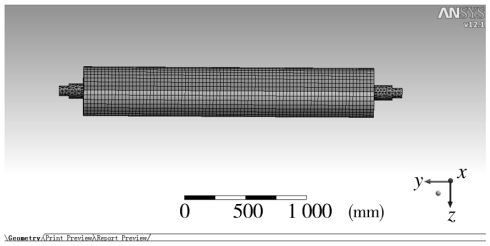

图 4 划分网格后的滚筒模型

Fig. 4 The meshed model of printing cylinder

网格划分密度过于粗糙，分析结果将与实际不符。网格划分过于细致，将花费过多的计算时间，浪费计算机资源，而且可能导致不能运行，因此，在划分网格时应合理控制网格密度，为接下来的操作打下良好的基础[5-6]。

2.3.3 添加约束

印刷机滚筒在工作过程中，受到由于轴端约束和自身重量产生的惯性力，以及作用于筒身的均布的瓦楞纸的压力，但是由于瓦楞纸质地有一定的松软性，故可以忽略其影响。印刷机滚筒两轴端受到轴承的全约束，在两轴端分别添加 Cylindrical support 类型的约束[7-8]。

2.4 分析模型的求解

1）选择分析类型为模态分析，在分析设置中可以选择要扩展的模态数，还可以设置频率范围。选择扩展 4 阶模态，频率范围无限制。单击 SOLVE 对模型进行求解。

2）印刷机滚筒优化前后的固有频率见表 2。

表 2 印刷机滚筒前 4 阶固有频率

Tab. 2 Four factorial intrinsic frequency of the printing cylinder

	优化前模型	优化后模型
第 1 阶	73.242	75.345
第 2 阶	73.271	75.368
第 3 阶	139.190	139.660
第 4 阶	149.300	156.850

3）对优化前后的印刷机滚筒进行模态分析，提取前 4 阶振型图，见图 5 和 6。

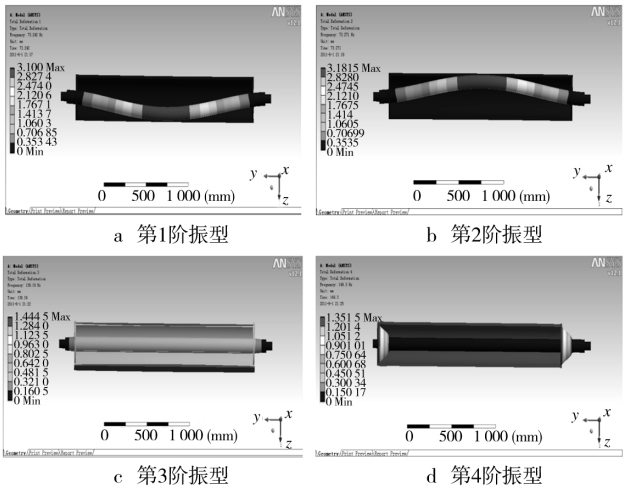

图 5 滚筒优化前的前 4 阶振型

Fig. 5 The fourth vibration model before optimization

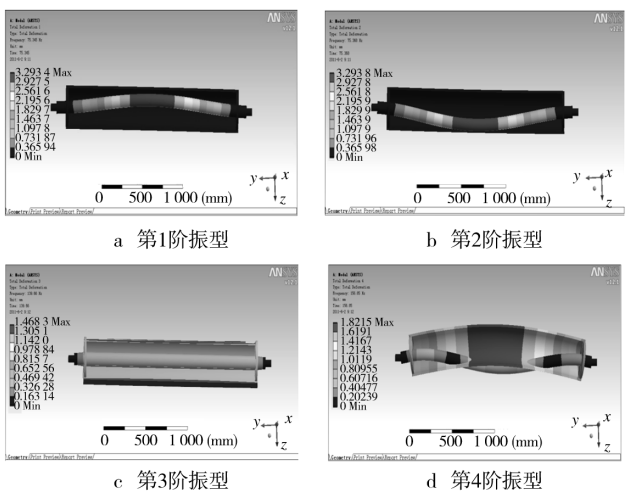

图 6 滚筒优化后的前 4 阶振型

Fig. 6 The fourth vibration model after optimization

2.5 结果分析

观察表 2 可知，在对印刷机滚筒进行质量优化后，滚筒质量减轻的同时固有频率也有一定的提高，但振型没有明显变化。从图 5－6 上可以看出，滚筒在前 2 阶固有频率下，振型主要以中间梁的弯曲变形为主，当系统频率在 139 Hz 左右时，振型为拉伸和压缩变形。由公式 $n=60f$，其中 f 是固有频率，n 是转速，可知经优化后的印刷机滚筒的一阶临界转速由 4 394.52 r/min 提高到了 4 520.7 r/min，其它各阶临界转速均有提高。研究的纸箱印刷机属于中低转速印刷机，滚筒极限转速为 200 r/min，远远低于一阶临界转速。优化设计过程中，共振影响不大。结果证明适当减小滚筒厚度和内梁直径并增加侧壁厚度的质

量优化方法是可行的。分析结果对研究高速筒类旋转体时更具有实际工程意义。

3　结论

1）使用 ANSYS 有限元分析软件解决传统的模态分析问题，作为一种新的设计手段，从动态特性上为静态优化结果提供了支持。

2）通过对已有优化设计的纸箱印刷机滚筒进行模态分析，获得了纸箱印刷机滚筒优化前后的前 4 阶振型和固有频率。振型云图显示滚筒中梁的弯曲变形，可在优化设计过程中对薄弱环节进行考虑。得知滚筒的固有频率后，获得了各阶临界转速，可以避免由于其他同频干扰或激振造成的共振，提高了滚筒的强度和运行稳定性。

3）验证了适当减小滚筒厚度和内梁直径并增加侧壁厚度的质量优化方法是可行的。

参考文献：

[1]　黄颖为，薛凤梅. 印刷机滚筒动态性能的研究[J]. 包装工程，2007，28(8)：34－39.

[2]　丁兵，姜玲莲，吕文阁，等. 基于 ANSYS 的印刷机滚筒结构优化[J]. 机电工程技术，2009(38)：28－93.

[3]　曾台英，方立英，隋立明. 印刷机工作平稳性影响因素的影响程度研究[J]. 包装工程，2011，32(5)65－68.

[4]　ZHANG Li，ZU Xiao-yuan，GONG Yan-yue. Modal Analysis of Self-repairing Composite Gear Based on ANSYS[J]. Manufacturing Process Technology，2011(189－193)：2067－2070.

[5]　张庆山，刘其洪. 基于 Workbench 的模切机印刷滚筒的模态分析及优化设计[J]. 包装工程，2011，32(3)：60－62.

[6]　李晓丽，张安宁，潘先锋. 基于 ANSYS11.0 的蜂窝纸芯静压特性研究[J]. 包装工程，2010，31(11)：46－48.

[7]　张媛，刘玉德，刘斌. 基于 FEM 的聚酯碳酸饮料包装瓶强度和结构分析[J]. 包装工程，2010，31(1)：42－44.

[8]　ZHANG Ya-wei，ZHANG Wei-min. Modal Analysis of Ball Screw Drive System by Finite Element Method[J]. Functional Manufacturing Technologies and Ceeusro II，2011(464)：285－288.

（上接第 84 页）

可得木托架的承重≤5.4 t。

4）纵木长度同钢板长度，横木长度同钢板宽度。宽度为 1 200 mm、长度为 3 000 mm、载重为 8 t 的薄钢板木托架纵木的规格为 3 000 mm×120 mm×80 mm，横木的规格为 1 200 mm×80 mm×80 mm，木托架结构为 3 根纵木、5 根横木等间距分布，其结构见图 6。

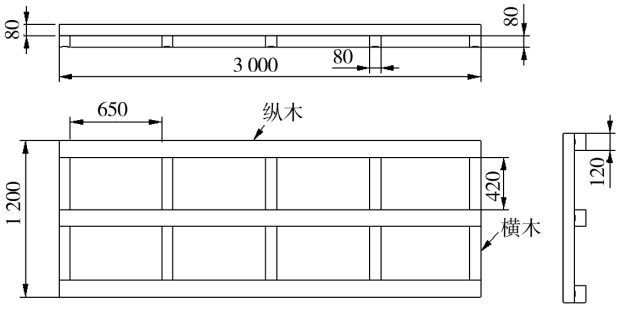

图 6　木托架结构

Fig. 6 The wooden pallet's structure chart

5　结语

对起吊工况下的三纵钢板材托架进行了受力分析，并考虑了起吊动载荷对木托架弯曲强度的影响，得出了不同横木情况下纵木的最大弯曲强度理论公式。在冷轧薄钢板材木托架结构设计时，先根据薄钢板的规格确定纵横木的长度，然后根据纵木的最大弯曲强度公式为不同载重的冷轧薄钢板包选择合适数量的横木。通过建立冷轧薄钢板载重和横木数量之间的理论关系，从一定程度上减少了木材的浪费。

参考文献：

[1]　刘宝朋，陆佳平. 钢板材木托架的受力分析和结构优化[J]. 包装工程，2010，26(11)：60－62.

[2]　何为宏，卢立新. 木质托盘铺板的受力分析与设计[J]. 包装工程，2008，29(2)：70－72.

[3]　李玲，李大纲. 竹木复合材料托盘力学性能的研究[J]. 包装工程，2005，26(3)：8－9.

[4]　刘宝朋，陆佳平. 基于 ANSYS 的木托架吊运工况的挠度分析[J]. 科学技术与工程，2010，10(21)：36－39.

[5]　杨天祥. 结构力学[M]. 北京：高等教育出版社，1983.

[6]　张景良. 木材知识[M]. 北京：中国林业出版社，1983.

[7]　彭国勋. 运输包装[M]. 北京：北京印刷工业出版社，2004.

[8]　GB 3811－2005，起重机设计规范[S].