胶印机整机有限元建模与综合分析

李文威, 陈 南, 解鹏程
(东南大学, 南京 211189)

摘要: 为了从整体上获取胶印机的性能数据,以某型单张纸四色胶印机的印刷单元为研究对象,综合运用多种有限元建模技术,建立了胶印机单色组整机有限元模型。在整体建模的基础上,对胶印机有限元模型进行了静力分析、模态分析和谐响应分析,获得了胶印机的静态、动态综合性能数据。分析结果表明,该型胶印机整体动态性能欠佳,有必要进行胶印机结构的动态优化。

关键词: 胶印机; 有限元建模; 有限元分析
中图分类号: TS803.6　**文献标识码**: A　**文章编号**: 1001-3563(2010)15-0025-05

Finite Element Modeling and Synthesis Analysis of Offset Press

LI Wen-wei, CHEN Nan, XIE Peng-cheng
(Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to obtain the overall performance data of offset press, the printing unit of a four-color sheet-fed offset press was taken as research object, and through comprehensive use of various finite element modeling techniques, the finite element model for complete appliance of a single printing unit was established. On the basis of integral modeling, synthesis analysis was performed, including static analysis, modal analysis and harmonic response analysis, and the comprehensive performance data of the offset press were acquired. The results show that the overall dynamic performance of the offset press was poor, so it is necessary to carry out dynamic optimization to the structure of this type of offset press.

Key words: offset press; finite element modeling; finite element analysis

有限单元法作为求解结构静态、动态力学特性等问题的数值解法,具有计算准确、快捷、适应性强的优点。目前,有限元法已被引入胶印机(印刷机)产品结构设计领域,这在很大程度上简化了胶印机设计流程,提高了产品设计质量。

刘琳琳[1]建立了胶印机印刷滚筒有限元模型,通过有限元分析获得了滚筒静态、动态挠曲特性。杨家华等[2]建立了包括机架和印刷滚筒在内的印刷机印刷单元有限元模型,通过有限元模态分析得到了结构的固有频率等计算结果。王潇[3]建立了胶印机整机基础件结构的有限元模型,并对其进行了有限元模态分析,根据分析结果对胶印机提出了结构改进建议。Gao 等[4]对胶印机墙板进行了有限元振动分析,为胶印机结构动态设计提供了参考。Quinn S 等[5]对印刷滚筒进行了有限元热应力分析,根据分析结果确定了印刷滚筒中小孔的应力集中系数。Li G 等[6]对四开胶印机印版滚筒进行了静力和模态有限元分析,获得了印版滚筒工作状态下的变形、前 5 阶固有频率及其振动模态,验证了印版滚筒改进设计方案的可行性。

以上研究对胶印机关键零部件进行了有限元建模和分析,其优化结果可以指导单个零部件的设计。笔者通过构建包括机架、印刷滚筒、输墨系统和润湿系统在内的胶印机单色组整机有限元模型,并在整体建模的基础上进行静态、动态分析,获得了胶印机的综合性能数据,为胶印机的结构优化提供参考。

收稿日期: 2010-05-01
基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目(BT2007072)
作者简介: 李文威(1981-), 男, 吉林人, 东南大学博士生,主要研究方向为机械结构动态分析、优化与控制。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 胶印机模型的简化和等效处理

研究对象为某型单张纸四色胶印机的一个印刷单元(色组)。由于该型胶印机不同印刷色组结构差别不大,所以选取一个印刷色组进行分析具有一定的代表性,能够反映出胶印机整机的特性。这里,选择胶印机第二色组作为有限元建模与分析的对象,其 SolidWorks 模型见图 1。胶印机零件众多且结构复

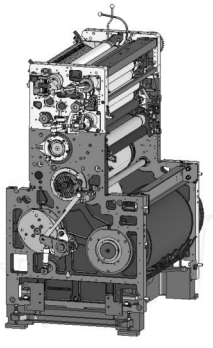


图 1 胶印机第二色组 SolidWorks 模型

Fig. 1 The SolidWorks model of the 2nd printing unit

杂,每个印刷色组的零件总数约为 5000 个,这增加了有限元网格划分的难度和计算工作量,因此需要对胶印机模型要素进行适当的简化和等效处理。

1.1 CAD 模型的简化

在 SolidWorks 中建立精确的胶印机整机装配体 CAD 模型,而后进行模型简化。需要指出的是,所谓整体建模并不是将该机的所有零件都包括在内,而是从主要的、关键的构件着手来建立分析模型。这里的整机模型包括机架、印刷滚筒、水辊、墨辊等主要结构。CAD 模型简化包括:零件数量的缩减,将具有公共表面、彼此间固定且材料相同或相近的零件,通过特征组合方式合并为一个实体,而质量较小的非重要零件,如螺栓、螺母、垫圈等则予以删除;零件特征的简化,忽略尺寸较小的圆孔、圆角、倒角和凸台等对结构整体刚度影响较小的零件特征。简化后的胶印机 CAD 模型导出为 x_t 中性文件格式,用于向有限元建模软件传递 CAD 模型。

1.2 螺栓连接的处理

螺栓连接方式在胶印机中广泛存在,例如胶印机墙板和底座、墙板和拉梁以及墙板之间均通过螺栓连接为一体。这里用多点约束(MPC)对装配体中的螺栓连接进行近似模拟。多点约束是一种重要的有限元建模技术,它是将某节点(从节点)的自由度定义为其它独立节点(主节点)自由度的函数,使从节点的自由度受主节点自由度支配。用 MPC 模拟两零件间的螺栓连接见图 2,其具体做法是:在螺栓连接的中心

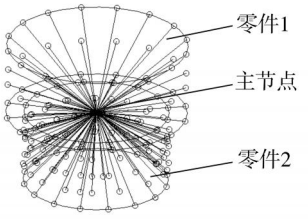


图 2 基于 MPC 模拟螺栓连接

Fig. 2 The simulation of bolt connection based on MPC

位置建立一节点作为 MPC 的主节点,同时选取两零件螺栓孔圆柱面上的节点作为从属节点,建立 RBE2 刚性 MPC 单元。

1.3 轴承的处理

胶印机的印刷滚筒、水辊和墨辊均通过轴承安装在机架或摆架上。根据轴承的承载情况对轴承进行简化处理。水辊和墨辊的支撑轴承直径较小,径向载荷不大,可以忽略轴承的质量和刚度,以 MPC 连接代替。大直径的印刷滚筒支撑轴承(圆锥滚子轴承)承载较大,其质量以集中质量代替,其刚度等效为 3 个方向上的弹簧。由圆锥滚子轴承的滚子数、滚子接触角和接触长度,按照万长森的轴承刚度计算公式[7]近似计算出轴承轴向刚度和径向刚度。对于双联和分内外圈的轴承,其等效刚度则按单个轴承刚度的串联或并联计算。单列轴承、双列轴承和有内外圈双列轴承的等效刚度计算方法见图 3。经过计算,轴承的刚度都在 109 N/m 数量级以内:

$$k_a = 14429.835 F_a^{0.1} \cdot Z^{0.9} \cdot L_e^{0.8} \cdot \sin^{1.9}\alpha \quad (1)$$

$$k_r = 3654.136 F_r^{0.1} \cdot Z^{0.9} \cdot L_e^{0.8} \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

式中:k_a 为圆锥滚子轴承轴向刚度(N·mm);k_r 为圆锥滚子轴承径向刚度(N·mm);F_a 为轴承轴向的载荷(N);F_r 为轴承径向的载荷(N);Z 为轴承滚子数量;L_e 为滚子有效接触长度(mm);α 为滚子接触角/(°)。

2 胶印机有限元模型的建立

有限元建模及分析需要在功能强大的有限元前后处理及求解软件支持下完成。选用工程中广泛应

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

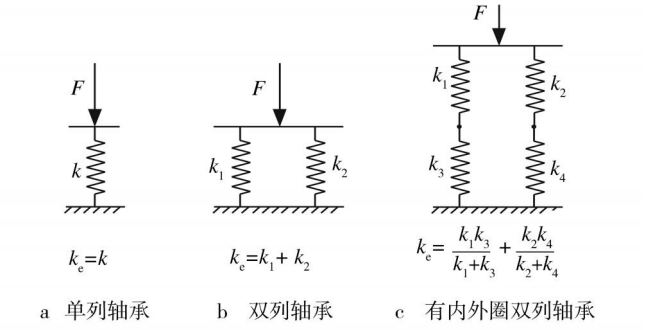


图 3　轴承等效刚度的计算

Fig. 3 The calculation of equivalent stiffness of the bearing

用的有限元前后处理软件 MSC Patran 以及有限元求解器 MSC Nastran 作为有限元前后处理与分析的平台。

在 MSC Patran 中读入 x_t 文件,导入胶印机 CAD 简化模型,然后再进行网格的划分。主要结构实体,如墙板、底座、拉梁、印刷滚筒和墨辊摆架等用实体单元划分网格。由于零件结构过于复杂,选用容易逼近复杂结构形状的四面体 Tet10 单元划分实体网格。Tet10 四面体单元节点拓扑形式见图 4,其每

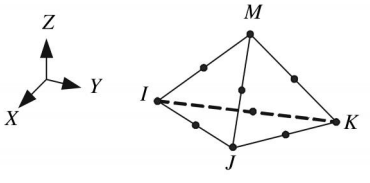


图 4　Tet10 四面体单元

Fig. 4 The nodes topology of Tet10 element

个单元有 10 个节点,分别位于四面体的 4 个顶点以及四面体 6 条边的中点处。轴承刚度以 Bush 三向弹簧单元模拟;非串动墨辊用两节点梁单元 Bar2 划分网格,并按墨辊截面形状定义梁单元截面参数;串动墨辊、质量较大的非主要结构(如凸轮、齿轮等)以集中质量单元 Mass 代替。胶印机有限元模型中,单元类型的选择情况见表 1。

表 1　有限元单元类型的选择

Tab. 1 The selection of element types for finite element

胶印机 CAD 模型	划分单元类型
主要结构实体	四面体单元(Tet10)
非主要结构实体、串墨辊	集中质量单元(Mass)
非串动墨辊	梁单元(Bar2)
大尺寸轴承	三向弹簧单元(Bush)

定义载荷和边界条件,设定单元材料属性。对整机施加 - Z 向重力载荷;对机架支撑部位——底座高低调节螺栓孔施加 6 个自由度的全约束;设置每种材料的材料属性(密度、弹性模量和泊松比),并将其赋予对应的单元。最终建成的胶印机第二色组整机有限元模型见图 5,模型自由度总数约为 124 万个。

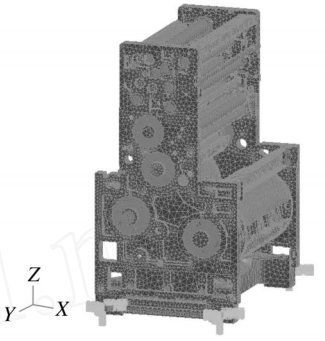


图 5　胶印机第二色组有限元模型

Fig. 5 The finite element model of the 2nd printing unit

3　胶印机有限元综合分析

在整机层次建立的胶印机有限元模型,其有限元分析结果能够较真实地反映胶印机整机的性能。利用 MSC Nastran 软件对胶印机第二色组有限元模型进行静态、动态综合分析,以全面了解其综合性能。

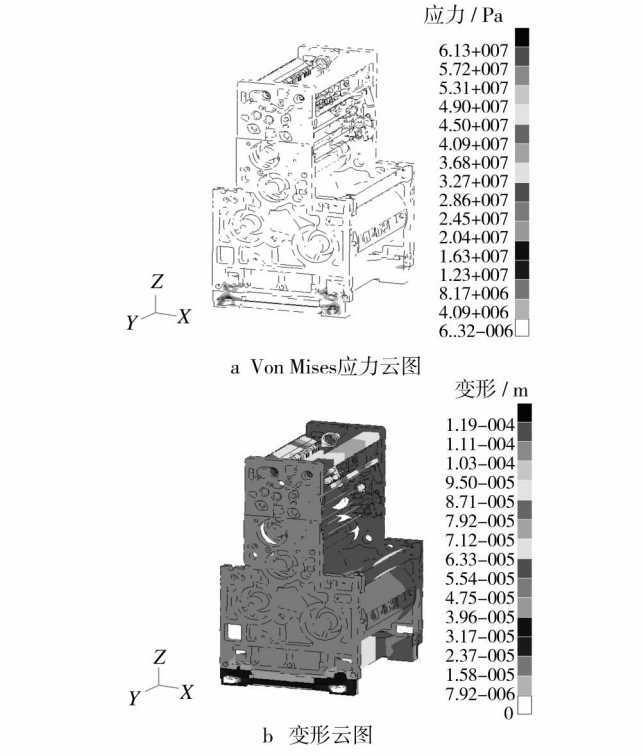
3.1　静力分析

胶印机自身质量很大,单个印刷色组的质量约为 5 t,重力载荷占胶印机运转中所受载荷的绝大部分。出于高速印刷的需要,胶印机间歇和往复运动机构的从动件系统质量均较小,胶印机运转中由从动件所产生的附加惯性载荷远小于胶印机自身的重力载荷。以该型胶印机底座承载情况为例,当胶印机以 12 000 r/h 速度运转时,所产生的附加动态载荷最大值约为胶印机重力载荷的 1 %。这里,先对胶印机整机进行重力载荷下的有限元静力分析,再将计算结果乘以设计安全系数 S,以及动态载荷和计算误差的影响。胶印机有限元静力分析结果见图 6。

3.2　模态分析

模态分析是其他类型动力学分析的基础。为了解整机的动态性能,对第二色组有限元模型进行约束状态下的有限元模态分析,用 Lanczos 算法求解整机前 10 阶固有频率及对应的模态振型。应当指出,Bush 单元的刚度取值对计算出来的模态频率大小是

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a Von Mises应力云图

b 变形云图

图 6 胶印机第二色组静力分析结果

Fig. 6 The static analysis results of the 2nd printing unit

有一定影响的。模态分析结果包括结构的模态频率及其对应的振型,胶印机的前 3 阶模态分析结果见表 2。

表 2 胶印机第二色组有限元模态分析结果

Tab. 2 The modal analysis results of the 2nd printing unit

阶次	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
模态振型			
模态频率 / Hz	25.9	26.0	44.3
振型描述	整机沿 Y 向摆振	整机沿 X 向摆振	整机绕 Z 轴扭振

3.3 谐响应分析

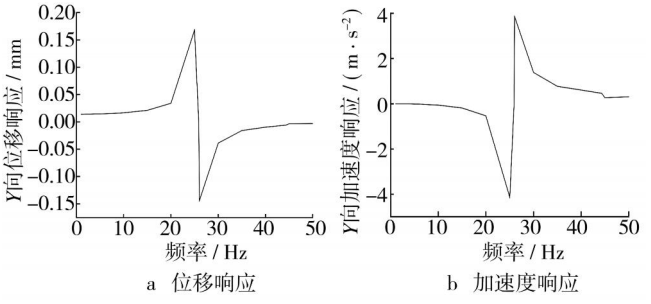
串墨机构通过串墨辊的 Y 向往复运动完成匀墨工作。串墨辊的串墨运动可表达为:

$$d = a\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right) \tag{3}$$

式中:d 为串墨辊 Y 向位移(mm);a 为串墨辊串墨行程(mm);T 为串墨周期(s);ϕ 为串墨辊初始相位(rad)。

串墨辊的 Y 向简谐串墨运动必然对胶印机施加了 Y 向简谐激振力,当胶印机整机 Y 向刚度薄弱时,在简谐激振力的激励下易造成整机的 Y 向摆振。

对整机进行谐响应分析,研究整机结构在各频率简谐载荷作用下的响应变化情况。为近似模拟串墨机构对整机施加的简谐载荷,在上下墙板连接螺栓处的 MPC 主节点上施加 Y 向幅值为 100 N 的简谐激励力。结构阻尼取为 0.03,分析的频率范围为 1～50 Hz,涵盖了胶印机主要的激振频率。为了加快求解速度,频率响应求解中运用了 MSC Nastran 的自动部件模态综合(ACMS)功能。通过谐响应分析得到的激振点处 Y 向位移响应和加速度响应随激振频率变化的关系见图 7。



a 位移响应

b 加速度响应

图 7 激振点 Y 向响应

Fig. 7 The Y direction dynamic response at exciting point

3.4 分析结果讨论

由图 6a 可知,最大应力位置在底座高低调节螺栓螺孔处,其 Von Mises 应力为 61.3 MPa。底座材料 HT300 的抗拉强度为 300 MPa,若取材料许用应力 $[\sigma]$ = 300 MPa,安全系数 S = 2.0,则 $S\sigma$ = 122.6 MPa < $[\sigma]$,说明结构强度足够,且有较大的安全裕度。由图 6b 可知,最大变形位置在墨辊中间部位,对应的变形量为 0.119 mm,而印刷滚筒和墙板等重要部位变形都很小,都在设计允许变形范围内。由于胶印机静态下应力和变形量都满足设计要求,且实际使用中,也未曾发现胶印机结构强度、刚度不足方面的问题,所以整机结构强度、刚度安全可靠。

由表 2 模态分析结果可知,胶印机整机第 1 阶固有频率较低(25.9 Hz),且对应振型为整机沿 Y 向摆振,说明整机 Y 向刚度最为薄弱。机组式胶印机的机架采用墙板拼接结构是造成整机 Y 向刚度薄弱的主要原因,需要通过增加机架下墙板抗弯刚度的方法给

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

予加强。

由图 7 谐响应分析结果可知,激振点 Y 向的位移响应与加速度响应相位相反,且当激振频率达到整机前 2 阶固有频率 25.9 Hz 和 26.0 Hz 时,响应值达到最大,这与模态分析结果相吻合。激振频率在 1～25 Hz 的中低频范围内时,激振点的 Y 向位移响应和加速度响应随激振频率的升高而增大,解释了该型胶印机随转速提高整机振动加剧的现象。

上述分析结果表明,该型胶印机的动态性能欠佳。为了进一步提高胶印机整机的动态性能,可以从 2 个方面考虑对胶印机结构进行必要的优化:一是进行胶印机间歇或往复运动机构(如开闭牙机构、串墨机构等)的动态优化,以消除振动的来源;二是进行胶印机关键结构(如整机机架等)的动态优化,以提高结构自身的抗振性能。

4　结 论

阐述了胶印机有限元整机模型的建模思路及各类模型元素的简化和等效方法,综合运用多种有限元建模技术建立了较为准确的胶印机单色组复杂结构的有限元模型,为胶印机整机的有限元综合分析奠定了基础。

对胶印机第二色组有限元模型其进行了静力分析、模态分析和谐响应分析,全面获得了胶印机的综合性能数据。分析结果显示,该型胶印机不存在整体强度、刚度不足的问题,但整机动态性能尚有待进一步提高,有必要开展此类胶印机的结构动态优化研究。

参考文献:

[1] 刘琳琳. 胶印机压印滚筒挠曲变形分析及主动补偿方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.

[2] 杨家华,管华,郭宁军. 印刷机结构振动的有限元分析[J]. 北京工业大学学报,2006,32(6):489 - 492.

[3] 王潇. BEIREN300 胶印机基础件结构的计算机仿真及优化[D]. 北京:北京工业大学,2002.

[4] GAO X L,ZHOU K D,DRESIG H. Method to Identify the Installation Stiffness of Machines and Its Application on a Printing Unit[C]//Proc of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science. Beijing: China Machine Press,2004:497 - 502.

[5] QUINN S,DULIEU-BARTON J M. Determination of Stress Concentration Factors for Holes in Cylinders Using Thermoelastic Stress Analysis[J]. Strain,2002,38 (2): 105 - 118.

[6] LI Guang,HU Yong,ZANG Xiao-ling. Design and Analysis of Offset Printing Press Plate Cylinder Using Finite Element Method[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Modeling and Simulation, ICMS2009. Manchester,UK,2009:537 - 540.

[7] 万长森. 滚动轴承的分析方法[M]. 北京:机械工业出版社,1987.

(上接第 21 页)

质捆扎带,规避了聚丙烯塑料捆扎带带来的诸多不足,并对其强度进行了相关实验。考虑实际应用中的诸多因素,对此种纸质捆扎带进行了表面施胶,并通过实验论证了其强度性能均优于原纸捆扎带,强度满足设计要求。纸带表面所施胶为植物胶,其中仅加入少许聚丙烯醇,达到了环保的要求,为下一步改进捆钞机奠定了基础。

参考文献:

[1] 丁素珍. 新型捆钞机及捆扎带的发展趋势[J]. 浙江工贸职业技术学院学报,2005(12):27 - 29.

[2] 陈予吒,高峰. 五点式全自动捆钞机的原理与实现[J]. 电子技术应用,2003(11):38 - 40.

[3] 林金表,郑子武,孙艺震,等. Just-I 型全自动大把捆捆钞机的设计[J]. 轻工机械,2002(3):49 - 53.

[4] 黄安贻,王良. KX 系列全自动捆钞机的原理与实现[J]. 轻工机械,2006(9):130 - 132.

[5] 鲁选民,王德东,白晓丽. 关于绿色包装与积极包装的探讨[J]. 河南工业大学学报,2005(6):14 - 16.

[6] 武军,李和平. 绿色包装材料的性质与分类[J]. 中国包装工业,2000(8):43 - 44.

[7] 白木,周洁. 绿色包装的主力 ——纸[J]. 湖北造纸,2002(2):22 - 23.

[8] 杨妙,曹巨江. 环保型捆扎机的纸带粘结条件试验[J]. 轻工机械,2010(2):84 - 86.

[9] 李晓星,党新安,钱德明,等. 纸质捆扎带粘结特性的研究[J]. 包装工程,2010,31(1):13 - 16.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net