

基于 pulse 系统的印刷机压印滚筒振动特性研究

李建国, 王仪明, 张磊, 杨海奎

(北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: 提高压印滚筒的工作稳定性是高速印刷机设计过程中的关键因素。借助 pulse 测试系统, 分别对压印滚筒进行模态测试和轴窜量分析, 得到了滚筒的模态参数, 并指出了滚筒在实际状况下的薄弱环节; 运用理论与实际测试相结合的方法, 阐述了在实际工作过程中压印滚筒振动过大的原因, 解决了印刷机在实际生产中的问题, 为高速印刷机的动态设计提供一定的理论指导。

关键词: 压印滚筒; 模态测试; 轴窜分析

中图分类号: TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)21-0086-05

Research of Impression Cylinder Vibration Characteristic Using Pulse System

LI Jian-guo, WANG Yi-ming, ZHANG Lei, YANG Hai-kui

(Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: Improving the working stability of impression cylinder is a critical factor in the process of high-speed press design. Modal test and axial channeling analysis was carried out on the impression cylinder with the help of the pulse test system. Modal parameters of cylinder were obtained and the weak links of the cylinder in actual condition were put forward. The causes of excessive vibration of impression cylinder were analyzed in detail by using combination of theory and practical test methods, which solved the problem of printing press in actual production and provided theoretical guidance for dynamic design of high-speed press.

Key words: impression cylinder; modal test; axis channeling analysis

压印滚筒是印刷机的核心部件, 压印滚筒振动特性的好坏直接影响了印品的质量。若压印滚筒在运转过程中振动过大, 会造成墨杠、重影、墨层深浅不均匀等一系列的问题, 因此有必要对压印滚筒的振动特性进行研究。Lee Y S^[1]等人对圆柱壳体进行模态特性的研究, 经计算得到了实验模型的频响函数, 并与有限元的分析结果相比较。Cyril M. harris^[2]等人运用理论知识阐述了实验模态分析, 介绍了如何进行频响函数的估计以及实验模态激励方式。王仪明^[3]等人对印刷滚筒轴向振动与套印精度关系作了细致的分析, 认为滚筒齿轮轴向振动对压印滚筒的轴向窜动影响最大。陈一军^[4]等人对压印滚筒的状态进行监测, 从结构功能的角度分析压印滚筒产生振动的原因, 并提出降低压印滚筒振动的方法和措施。贾民

平^[5]等人对滚动轴承振动的平稳性进行了分析, 提出了用二阶循环统计量解调来进行故障特征识别, 由此有效地识别滚动轴承冲击故障。

1 压印滚筒的模态分析

实验模态分析是确定线性时变系统模态参数(固有频率, 阻尼系数, 模态矢量以及模态比例)的过程。模态参数通常由分析方法确定, 需要进行试验模态分析的原因是要对分析方法获得的结果进行校正检验。实验模态分析是用来解释一个动力学问题(振动或声学), 这个动力学问题不能通过直觉知识、分析模型或先前经验得到明确解。

因为压印滚筒与墙板、斜齿轮等其他构件组成的

收稿日期: 2012-08-26

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助(2012BAF13B05); 北京印刷学院校级科研团队专项资助

作者简介: 李建国(1987-), 男, 山东人, 北京印刷学院硕士生, 主攻印刷机的故障诊断。

印刷部分是一个多自由的系统,因此压印滚筒模态分析是通过分析多自由度的动力学方程完成的。多自由度系统的动力学方程为:

$$m^e \ddot{x} + c^e \dot{x} + k^e x = F^e \sin \omega t \quad (1)$$

其中: $m^e = \iiint_v N^T \rho N dV$ 为单元的质量矩阵, ρ 为材料的密度; N 为形函数矩阵; $c^e = \iiint_v N^T c N dV$ 为单元的阻尼矩阵, c 为阻尼系数; $k^e = \frac{\pi GD}{32l}$ 为单位扭转刚度, D 为单位的长度。

其解为 $x(t) = Ae^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \varphi) + B \sin(\omega t - \psi)$, 其中 $\zeta = \frac{c}{c^c}$, c^c 为临界阻尼系数。

根据线性叠加理论,多自由度系统的脉冲响应函数、频率响应函数和传递函数分别定义如下。脉冲响应函数:

$$h_{pq}(t) = \sum_{r=1}^n A_{pqr} e^{\lambda_r t} + A_{pqr}^* e^{\lambda_r^* t} \quad (2)$$

频率响应函数:

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{A_{pqr}}{j\omega - \lambda_r} + \frac{A_{pqr}^*}{j\omega - \lambda_r^*} \quad (3)$$

传递函数:

$$H_{pq}(s) = \sum_{r=1}^n \frac{A_{pqr}}{s - \lambda_r} + \frac{A_{pqr}^*}{s - \lambda_r^*} \quad (4)$$

式中: s 为拉普拉斯变量; p 为测量自由度的响应; q 为测量自由度的输入; r 为模态矢量数; $A_{pqr} = Q_r \psi_{pr} \psi_{qr}$ 为留数; Q_r 为模态比例系数; ψ_{pr} 是模态系数。

实验模态分析中模型的建立及网格的划分、传感器的布置见图 1。

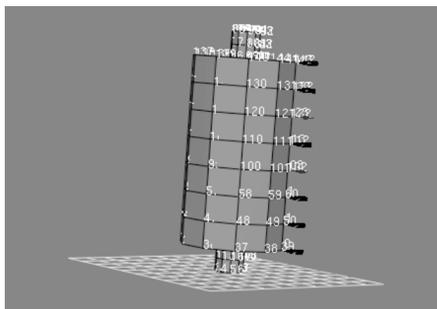


图 1 压印滚筒的模型建立及网格划分

Fig. 1 Establishment of impression cylinder model and meshing

图 1 中深色为传感器,方向为 $-X$,黑色为力锤敲击的点,方向为 $+X$ 。分析的线数为 1600,分析的带宽

为 1600 Hz,分析方式为线性平均,平均次数为 3 次。

将测试数据导入到 ME Scope 软件中,由 12 个输出、6 个输入得到的模态参数进行快速拟合分析,得出印刷滚筒的模态刚度和阻尼比分别是: 1.9×10^{10} N/m, 0.3, 得到滚筒的频响函数曲线及进行手动拟合后的图形见图 2。

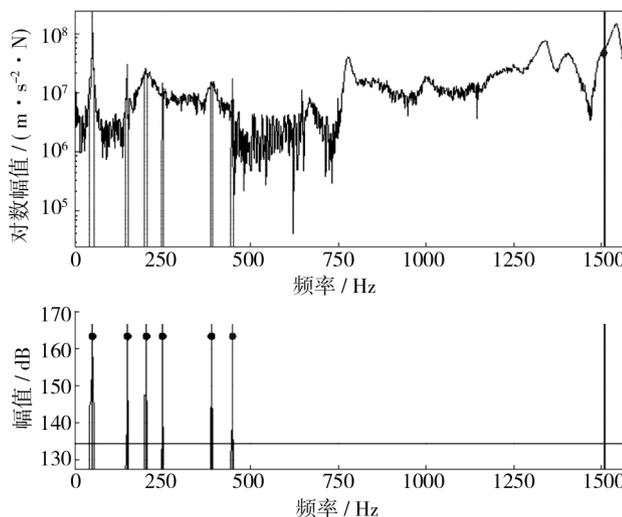


图 2 模态参数的拟合及识别

Fig. 2 Fitting and identification of modal parameters

经快速拟合得到的压印滚筒的前 4 阶模态振型见图 3。前 6 阶固有频率、阻尼比及振动特性见表 1。

表 1 压印滚筒前 6 阶固有频率、阻尼比及振动特性

Tab. 1 First six orders of natural frequencies, damping ratios and vibration of the impression cylinder

阶次	频率/Hz	阻尼比/%	振型
一	50	-3.12	一次轻微弯曲
二	150	2.12	两次轻微弯曲
三	204	-0.63	轻微总体变形
四	250	0.14	扭振
五	389	1.34	较严重的一次变形
六	450	0.62	较严重的两次变形

图 4 是转频在 2 ~ 4 Hz 时的振型。此时印刷机的速度在 7200 ~ 14 400 r/h 之间,此时压印滚筒的总体振动较低,整体有一定的变形,若有其他的谐振(比如压印滚筒传动面的齿轮发生了齿面磨损等故障)时会加剧其振动幅度,有可能对印品的质量造成影响,应注意避免。以测试的印刷机为例,最高印刷速度在 12 000 张/h,压印滚筒处的斜齿轮的齿数为 144 齿,当印刷速度在 11 250 张/h 的情况下,若斜齿轮出现

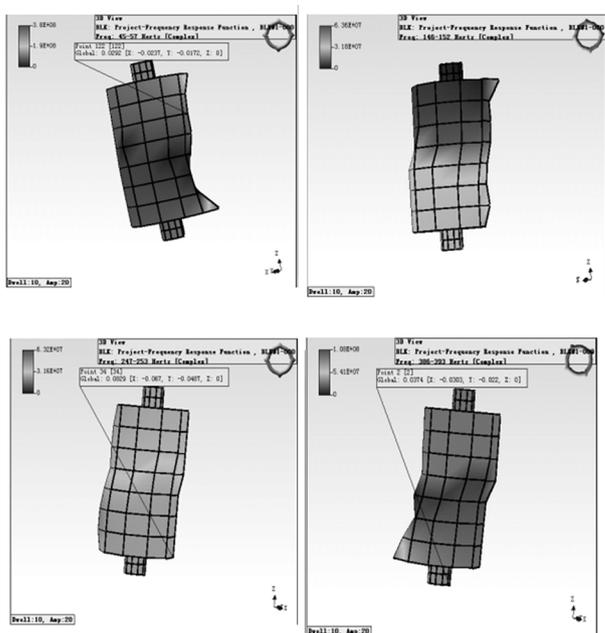


图3 压印滚筒的前4阶振型

Fig. 3 First four vibration modes of the impression cylinder

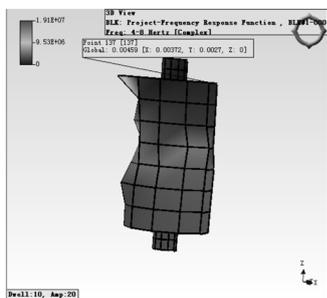


图4 低阶模态振型

Fig. 4 Low modal vibration shapes

磨损等故障,会引起 450 Hz 的谐振,导致整个压印滚筒的共振,从而严重影响印品质量。

通过实验模态分析得出压印滚筒的模态振型,模态分析的结果可以为以后进行动力学修改、灵敏度分析和响应计算等方面研究提供设计依据。印刷机在长期运行过程中,应定期测试机器的运行状态,以确定整机所出现的振动频率和谐波频率及其幅值的大小,以免使滚筒发生共振。

2 压印滚筒的轴窜的测量和分析

为了验证压印滚筒的轴窜量的大小对压印滚筒的影响,找到一台出现故障的双色印刷机,此印刷机

在速度超过 7000 张/h 出现重影问题,随着转速的提高重影越来越严重。经过调试问题仍没有解决,这有可能是压印滚筒的轴向窜动量过大导致的。因此需要对压印滚筒的轴向窜动量进行测量。

测试采用的传感器是德国米依的电涡流位移传感器,采集及处理数据平台是 PULSE 测试分析软件。被测量的载体是压印滚筒的轴头,采用电涡流位移传感器经过线缆将传感器拾取的信号传到放大器中,再经由放大器进入采集仪,最后由采集仪与计算机的网口之间的协议进行信号的传输。

将采集的数据整理得到的图谱见图 5。

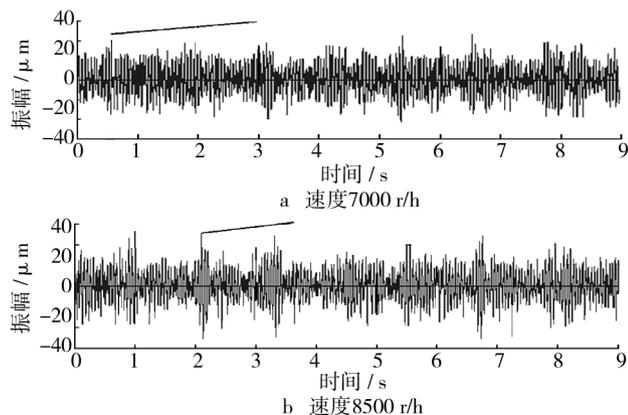


图5 不同速度下压印滚筒轴向窜动图谱

Fig. 5 Axial movement pattern of the impression under different speed

将上述测试结果进行整理见表 2。

表 2 不同转速下滚筒的轴向窜动量

Tab. 2 The axial movement of the cylinder under different speed

转速 $/(r \cdot h^{-1})$	一次测量 $/\mu m$	二次测量 $/\mu m$	三次测量 $/\mu m$
3000	16.3	16	15.8
7000	23.0	27.3	25
8500	55.3	53.2	57.0

由表 2 可知,在印刷机转速为 7000,8500 r/h 时压印滚筒的轴向窜动量过大(一般要求压印滚筒轴头窜动量在 0 ~ 30 μm)。图 5 中轴向位移出现峰值的位置是压印滚筒与传纸滚筒进行纸张交接的时候。此时两滚筒由空档滚压到压印面,对压印滚筒有一定的冲击。但导致轴向窜动量整体过大的原因还需进一步探究。

由于滚筒轴端安装的是斜齿轮,滚筒承受轴向力

作用,为了防止滚筒向两个方向窜动,在滚筒两端轴头上各装一副推力轴承,各自承受一个方向的推力作用,并对滚筒进行轴向定位,从而限制滚筒轴向窜动。如果推力轴承的游隙过大或发生故障会导致滚筒的轴向窜动过大。

为了确定压印滚筒轴向窜动过大的原因,对压印滚筒作振动分析,将加速传感器布置在压印滚筒轴承座处以收集印刷机的振动信号。采集的信号见图 6。

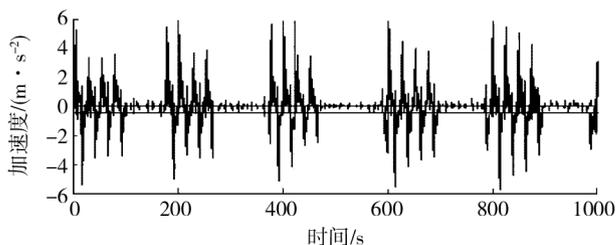


图 6 压印滚筒轴承座处加速度信号时域图

Fig. 6 Time domain charts of acceleration signal at the impression cylinder bearing

对于一个无故障的系统而言,其频谱应该是固定不变的,一旦出现故障,不仅幅值将会发生变化,而且频率成分也会发生变化。从图 6 的时域图可以看出在一个周期内存在一定的冲击,时域波形图的振动冲击可以用以下公式表示:

$$x(t) = \sum_i A_i s(it_0 + \tau_i) + n(t) \quad (5)$$

其中: t_0 为冲击之间的平均间隔; S 为固有振动; A_i 为视冲击的强弱而定的强度因子。此种时域波形图所表现的故障一般是点蚀引起的滚动轴承的故障,为了确定其通过频率,需要进行快速傅里叶变换。测试进行 20 s,得到的频谱图见图 7。

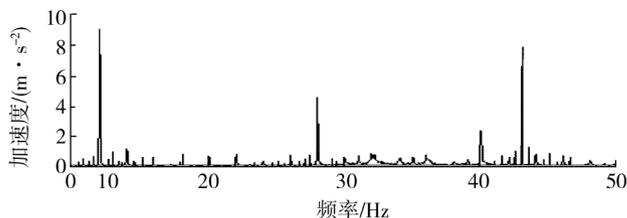


图 7 压印滚筒轴承座处加速度信号频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of acceleration signal at the impression cylinder bearing

n 个滚动体通过内圈上一点频率:

$$f_k = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D} \right) f_r \quad (6)$$

n 个滚动体通过内圈上一点的频率:

$$f_L = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D} \right) f_r \quad (7)$$

其中: f_r 为内外圈相对旋转频率, $f_r = f_i - f_o$,一般 $f_o = 0$ 。

通过查阅此胶印机的备件手册得知压印滚筒处的轴承使用的有推力轴承、滚针轴承、滚针轴承 6902、圆锥滚子轴承。分别查阅这 4 种轴承的参数,按照式(6),(7)计算轴承滚动体的通过频率。其中推力轴承的 $f_k = 39.6$ Hz, $f_L = 20.4$ Hz。图 8 中,2.5,22,41

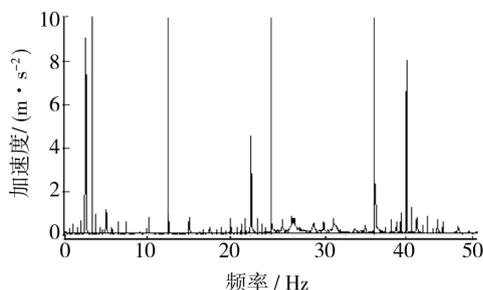


图 8 压印滚筒轴承座处加速度信号频谱图

Fig. 8 The acceleration signal spectrogram beside the impression cylinder bearing

Hz 处的幅值较高,并且周边出现了边频带。由此可以推断推力轴承发生了点蚀磨损,导致轴承运行不稳定,从而发生了印刷重影故障。

将压印滚筒的轴承拆卸后发现其轴承内外圈均出现了较严重的点蚀。因为之前换过一次轴承,而换过的轴承质量较差从而导致了轴承的损坏。更换轴承后再进行测试发现在 9000 r/h 下压印滚筒的轴向位移量为 10 μm ,再进行印刷时重影的现象也消失了,问题得到了解决。若不能发现其根本所在有可能导致轴承的瞬间卡死,最终会使轴承完全损坏,破坏预装精度,再调试时极为麻烦。导致轴窜量过大的原因很多,本章只分析其中的轴承故障,因此需要适时对压印滚筒的轴窜量进行监控,防止出现印刷事故。

3 结论

1) 通过对压印滚筒的模态测试,得出其前六阶振型。为压印滚筒的振动特性分析、振动故障诊断和预报以及结构动力特性的优化设计提供依据。

2) 运用非接触式电涡流传感器检测的方法测量了压印滚筒的轴向窜动量。找出轴向窜动量的最大值,据此找出了出现重影故障的原因。

3) 利用压电式加速度传感器采集得到压印滚筒振动的时域和频域信号并进行了分析,此种研究方法为进一步的现场测试积累了相关经验,同时对于今后印刷机的动态设计来说,也有一定的实际参考价值。

参考文献:

- [1] LEE Y S. A Study on the Irrational Characteristics of the Continuous Circular Cylindrical Shell with the Multiple Supports Using the Experimental Modal Analysis [C]. Key Engineering Materials 2006:1617-1620.
- [2] HARRIS C M, PIERSOL A G. Harris' Shock and Vibration Handbook [M]. 北京:中国石化出版社,2008.
- [3] 王仪明,李艳,袁英才,等. 印刷滚筒的轴向振动与套印精度的关系研究 [J]. 中国印刷与包装研究,2011:160-166.
WANG Yi-ming, LI Yan, YUAN Ying-cai. The Research of Printing Cylinder Axial Vibration and Overprint Precision Relationship [J]. China Printing and Packaging Study, 2011:160-166.
- [4] 陈一军,赵庆海,孔祥杰. 压印滚筒振动测试分析研究 [J]. 包装工程,2008,29(9):90-92.
CHEN Yi-jun, ZHAO Qing-hai, KONG Xiang-jie. Vibration Testing and Analysis of Impression Cylinder [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9):90-92.
- [5] 贾民平,杨建文. 滚动轴承振动的周期平稳性分析及故障诊断 [J]. 机械工程学报,2007,24(1):144-146.
JIA Min-ping, YANG Jian-wen. Vibration of Rolling Bearings Cycle Stability Analysis and Fault Diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 24(1):144-146.
- [6] Theoretical and Experimental Modal Analysis of a Cantilever Steel Beam with a Tip Mass, 2009, 233(7):1535-1541.
- [7] 黄志坚,高立新. 机械设备振动故障检测与诊断 [M]. 北京:化学工业出版社,2010.
HUANG Zhi-jian, GAO Li-xin. The Fault Detection and Diagnosis of Mechanical Equipment Vibration [M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2010.
- (上接第30页)
- [14] 杨虹,郑全成,郭红菊,等. 基于 MATLAB/SIMULINK 的非线性缓冲包装系统冲击响应特性的仿真研究 [J]. 包装工程,2008,29(3):36-38.
YANG Hong, ZHENG Quan-cheng, GUO Hong-ju, et al. Simulation Study of Shock Properties of Nonlinear Cushioning Packaging System Based on MATLAB/SIMULINK [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3):36-38.
- [15] 常江,刘壮,巩雪. 玉米秸秆缓冲包装材料动态缓冲性能的研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(1):36-37.
CHANG Jiang, LIU Zhuang, GONG Xue. Research on Dynamic Cushioning Performance of Corn Straw Cushion Packaging Material [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1):36-37.
- [16] 丁毅,杨鹏. 运用 Pro/MECHANICA 进行 EPE 缓冲衬垫的静态和动态压缩分析 [J]. 包装工程,2009,30(6):36-37.
DING Yi, YANG Peng. Analysis of Static and Dynamic Compression of EPE Cushion with Pro/MECHANICA [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6):36-37.
- [17] 鲁海宁,贾秀杰,李剑峰,等. 全降解餐盒成型模具热分析与优化 [J]. 模具工业, 2010(3):45-49.
LU Hai-ning, JIA Xiu-jie, LI Jian-feng, et al. Thermal Analysis and Optimization of Mould for Fully Biodegradable Dishware [J]. Die & Mould Industry, 2010(3):45-49.
- [18] 鲁海宁. 生物质全降解餐饮具模具结构分析及优化 [D]. 济南:山东大学,2010.
LU Hai-ning. Structural Analysis and Optimization of Biodegradable Dishware Mould [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [19] 刘刚. 生物质全降解制品生产线仿真与优化研究 [D]. 济南:山东大学, 2010.
LIU Gang. Research on Optimization Technology for Simulation Model of Biodegradable Production Line [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [20] 郭安福,李剑峰,李方义,等. 植物纤维淀粉餐盒的降解性能研究 [J]. 功能材料, 2009, 40(11):1929-1932.
GUO An-fu, LI Jian-feng, LI Fang-yi, et al. Study on the Biodegradability of Plant Fiber and Starch Dishware [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(11):1929-1932.
- [21] 郭安福,鹿海洋,李剑峰,等. 植物纤维淀粉餐盒力学性能仿真及试验验证 [J]. 农业工程学报,2010,26(7):91-95.
GUO An-fu, LU Hai-yang, LI Jian-feng, et al. Mechanical Property Simulation and Verification of Plant Fiber and Starch Dishware [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7):91-95.
- [22] 郭安福,李剑峰,李方义,等. 基于模糊层次分析法的可降解包装材料绿色度评价 [J]. 功能材料,2010,41(3):401-405.
GUO An-fu, LI Jian-feng, LI Fang-yi, et al. Assessment on Green Degree of Biodegradable Packaging Materials Based on FAHP Methodology [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(3):401-405.