

基于试验模态方法的递纸机构优化设计

吕剑¹, 许秦蓉²

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 分析单张纸胶印的递纸机构, 寻求当最高印刷速度提高时需要改进的设计环节。 **方法** 采用实验模态法对单张纸胶印机的递纸机构进行分析, 将实验模态分析技术引入递纸机构动态响应的求解过程, 并通过求解结果指导并改进设计。 **结果** 在有样机可提供测试的情况下, 用试验模态分析方法建模的精度会高于常用的单自由度集中质量法, 对系统进行测试分析能够达到更准确的结果。运用该方法将一款单张纸胶印机的最高速度由13 000张/h提高到了16 500张/h。 **结论** 试验模态方法能为胶印机的改进设计提供依据, 既是结构设计和动力学设计的有效补充, 也是校核的工具。其他关键机构如输纸头、前规和咬牙开闭机构等凸轮连杆机构也可以使用此方法进行分析研究。

关键词: 递纸机构; 单张纸胶印机; 试验模态分析法; 动态响应

中图分类号: TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0090-05

Design Optimization of Paper-feeding Mechanism Based on Experimental Modal Analysis

LYU Jian, XU Qin-rong

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The paper-feeding mechanism of sheet-fed offset press was analyzed to find the design link which should be improved to increase the maximum printing speed. The experimental modal method was applied to analyze the paper-feeding mechanism of sheet-fed offset press, and the experimental modal analysis technique was introduced into the solution of dynamic response of the paper-feeding mechanism. The solution was then used to guide and improve the design. When there was prototype for testing, the modeling accuracy of the experimental modal analysis technique was higher than the common single degree of freedom lumped mass method. Correspondingly, more accurate method could be achieved by test analysis of the system. Application of this method increased the maximum speed of one kind of sheet-fed offset press from 13 000 sheet/hour to 16 500 sheet/hour. Experimental modal analysis method could provide reference for the improvement design of offset press. It is not only an effective supplementation to structural design and dynamic design, but also a tool for checking. This method could also be applied in the analysis and study on other key mechanisms such as paper-feeding head, front lay mechanism and cam-linkage mechanisms like open-close gripper mechanism.

KEY WORDS: paper-feeding mechanism; sheet-fed offset press; experimental modal analysis; dynamic response

目前, 国际一流单张纸胶印机最高印刷速度可达18 000张/h, 而国产单张纸胶印机最高印刷速度仍普遍停留在10 000~13 000张/h。递纸机构是影响最高印刷速度的关键机构之一, 受到了专家学者的关注,

涌现了较多具有借鉴意义的成果。郑新^[1]等利用Pro/E软件对递纸机构进行了仿真分析; 张晓玲^[2]研究了高速递纸机构共轭凸轮的设计方法; 李长航^[3]、梁庆玉^[4]等人用集中质量法进行了动力学仿真研究。在此, 用

收稿日期: 2014-11-27

基金项目: 新闻出版总署数字印刷工程研究中心数字传播重点实验室基金(10-00-309-000)

作者简介: 吕剑(1974—), 女, 天津人, 工学硕士, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为印刷工程。

试验模态分析法,通过实测某款胶印机递纸机构的运行状态,研究其动态响应^[5],使其最高工作速度从13 000张/h提高到16 000~18 000张/h。

1 研究对象及思路

针对某款国产单张纸胶印机的递纸机构,该机目前最高印刷速度为13 000张/h,其递纸机构属于下摆式递纸机构,是典型的凸轮连杆组合机构,见图1。共轭凸轮是主动件,它驱动围绕摆杆轴旋转的摆杆动作,动力由凸轮从动摆杆、连杆和摆杆组成的四杆机构传递给递纸主轴,使其产生往复摆动,进而实现递纸摆脚完成向递纸滚筒输送纸张的功能。

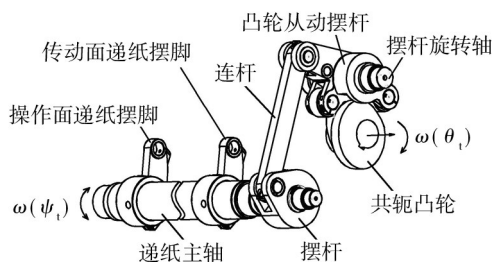


图1 胶印机递纸机构结构

Fig.1 Structure diagram of paper-feeding mechanism of offset press

要保证印刷品质量,需对递纸机构提出两方面的要求:递纸摆脚与递纸滚筒交接时速度相等,避免造成撕纸^[6];递纸摆脚在前规处取纸时速度为0,且稳定,不允许有造成套印误差超标的振动存在。

研究的具体思路和步骤:搭建递纸机构的测试装置,在胶印机上对其进行实测;整理测试数据,通过绘制幅频响应曲线进行频响分析,识别递纸机构系统参数,建立动力学模型;分析共轭凸轮升程段的稳态响应,判断递纸摆脚与递纸滚筒交接是否存在隐患;分析共轭凸轮处于休止段时递纸机构的残余振动,判断是否有不良残余振动影响;对现有机构提出改进设计意见并验证。

2 测试装置及频响分析

试验模态分析是通过实验测试输出响应及进行相关数据处理,来建立实际结构的动力学模型,并对实验数据进行模态分析的方法。试验模态分析是解决现代复杂结构动态特性设计的重要手段。在新产品设计中,进行动态特性的预估及优化设计,是试验模态分析法在工程应用中的重要方面^[7]。

2.1 搭建测试装置

测量递纸机构的动态响应实质是测量递纸主轴的实际运动规律,搭建的测试装置见图2。

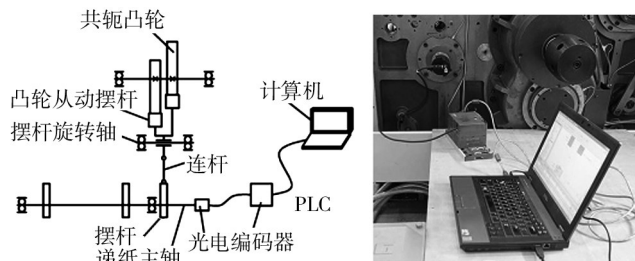


图2 测试装置

Fig.2 Testing instrument

测试装置采用日本光洋(Koyo)的增量式编码器(型号为TRD-2T1024V)采集递纸主轴的实际摆动角度。其工作原理:当编码器码盘跟随递纸主轴旋转时,则给出系列脉冲信号,由PLC(日本三菱公司生产的Q61P-A2-Q35BQ02CPU)的计数器对其进行计数,计数器中预先设置1个基数,根据正反转对此基数进行加减运算。该方法是通过时钟脉冲在规定的时间内打开选通门,在此时间间隔内对编码器所产生的脉冲计数,同时在每次计数前对计数器清零。设计数的时间间隔为 t_g ,编码器每转产生的脉冲数为 N ,在 t_g 时间间隔内测得的脉冲数为 N_1 ,则在 t_g 时间内递纸主轴的角位移 θ :

$$\theta = 360^\circ \frac{N_1}{N}$$

测试装置的几点说明如下。

1) 采样频率确定。根据文献[2—3],应用集中质量法对该递纸机构进行理论建模,并求出系统的固有频率 $\omega_e \approx 267.5 \text{ rad/s}$,则 $f_c = \frac{\omega_e}{2\pi} = 42.6 \text{ Hz}$ 。故选取采样频率 $f_s = 200 \text{ Hz} > 2f_c$,满足香农采样定律。

2) 触发方式选择。采用自由触发和信号触发相结合的方式。当开始采样时,首先判断有无脉冲到来,当没有脉冲信号时,噪声不能触发系统而无法采样;一旦有脉冲到来,系统即刻进行采样。在采完第1段样本后,自动连续开始采集第2段,如此循环,直到发出停止命令为止。

3) 递纸主轴正、反转判定。由来自光电编码器的2路正交输出脉冲 A, B 之间的相位关系确定。

2.2 确定单自由度系统参数

实测时,在印刷速度为5000~13 000张/h状态下

进行50组采样。根据试验模态分析理论^[8],对采集的数据进行整理,进行快速傅里叶变换(FFT),并拟合出一阶幅频响应曲线,见图3。需要说明的是,凸轮机构的激励就是从动件的运动规律,当从动件进入休止段后,系统处于自由振动状态之下,因此进行FFT时必须将采样结果按升程段、休止段和回程段区分开。

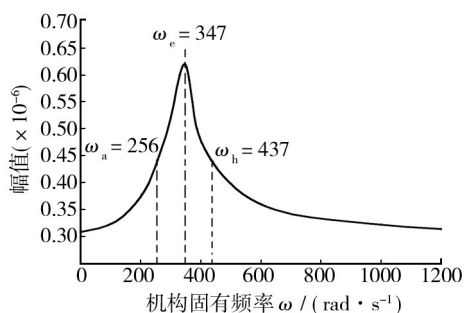


图3 递纸机构幅频响应曲线

Fig.3 Amplitude frequency response curve of the paper-feeding mechanism

根据幅频响应曲线,按照文献[7—8]的幅频响应分析方法,可以依次求得:

系统的固有频率: $\omega_e = 347 \text{ rad/s}$

系统的阻尼比:

$$\xi = \frac{\omega_h - \omega_a}{2\omega_e} = 0.26$$

系统的等效刚度:

$$k = \frac{1}{|Y(\omega)|_{\omega=0}} \approx 3.32 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$$

系统的等效质量:

$$m = \frac{k}{\omega_e^2} = 26.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

可以看出,试验模态分析的系统固有频率比集中质量法计算的系统固有频率高出29%,说明在进行单自由度^[9]简化过程中的某些理想化条件,在递纸机构高速工作状态下已经不能适用。这也说明,在高速胶印机开发过程中,应当尽量避免用单自由度无阻尼集中质量系统为目标建立动力学模型,在有条件的情况下,应尽可能采用试验建模方式^[10],以获得更接近真实系统的模型参数。

3 递纸机构动态响应分析

当递纸机构的动力学模型^[11]及其参数确定以后,即可进行递纸摆脚(即工作端)的真实运动分析。在系统工作端动力学分析中,包含系统的稳态响应和瞬

态响应^[12]。研究对象递纸机构的共轭凸轮从动件运动规律分为4个阶段:第1阶段称为推程期($0 \sim t_a$),其稳态响应对应的是递纸摆脚的运动过程,即与递纸滚筒交接时的状态;第2阶段称为近休止期($t_a \sim t_h$),该阶段属于返程需要,时间很短;第3阶段称为回程期($t_h \sim t_b$),其稳态响应对应的是递纸摆脚回到前规处准备取纸的过程;第4阶段是远休止期($t_b \sim t_s$),其瞬态响应对应的是递纸摆脚在前规处接纸时的状态。如前所述,最关心的应是第1阶段和第4阶段。其中, t_a , t_h , t_b 和 t_s 分别对应凸轮机构运动规律的推程角、近休止角、回程角和远休止角。

3.1 推程期的稳态响应

递纸机构的动力学模型在绝对坐标内的运动微分方程:

$$m\ddot{\varphi}(t) + \xi\dot{\varphi}(t) + k\varphi(t) = \xi\ddot{\theta}(t) + k\theta(t) \quad (1)$$

令工作端动态位移误差为 u ,则:

$$u = \varphi(t) - \theta(t) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得:

$$m\ddot{u} + \xi\dot{u} + ku = -m\ddot{\theta}(t) \quad (3)$$

在递纸机构中,激振函数 $\theta(t)$ 是递纸摆脚的运动规律,即凸轮连杆机构从动件的运动规律。根据式(3)用数值法求解,可计算出相应工作速度下工作端的位移和速度误差。设计印刷速度在13 000, 15 000, 18 000张/h时的稳态动态响应误差曲线见图4。其中,位移误差曲线的纵坐标是把角位移(rad)换算成线位移(mm)之后的结果。

从图4可以看出,当最高印刷速度提高时,动态误差迅速增大。图4a显示,印刷速度为18 000张/h时,最大线位移的误差达到0.064 mm,已超过套印最大误差0.05 mm的极限值。图4b显示,最大速度误差为0.95 rad/s,说明递纸摆脚不能实现与递纸滚筒等速交接的要求。由此可见,应当对该机构进行改进设计。

3.2 远休止期的残余振动响应

递纸机构自回程段结束时开始作自由振动,即机构的残余振动^[13]。此时,系统的激振函数为常数 φ ,即凸轮连杆机构的升程,故运动微分方程为:

$$m\ddot{\varphi}(t) + \xi\dot{\varphi}(t) + k\varphi(t) = \varphi \quad (4)$$

该方程的通解可以描述为:

$$\varphi(t) - \varphi = A\sin[\omega_e(t-t_h)] + B\cos[\omega_e(t-t_h)]$$

$$\dot{\varphi}(t) = \omega_e A\cos[\omega_e(t-t_h)] - \omega_e B\sin[\omega_e(t-t_h)]$$

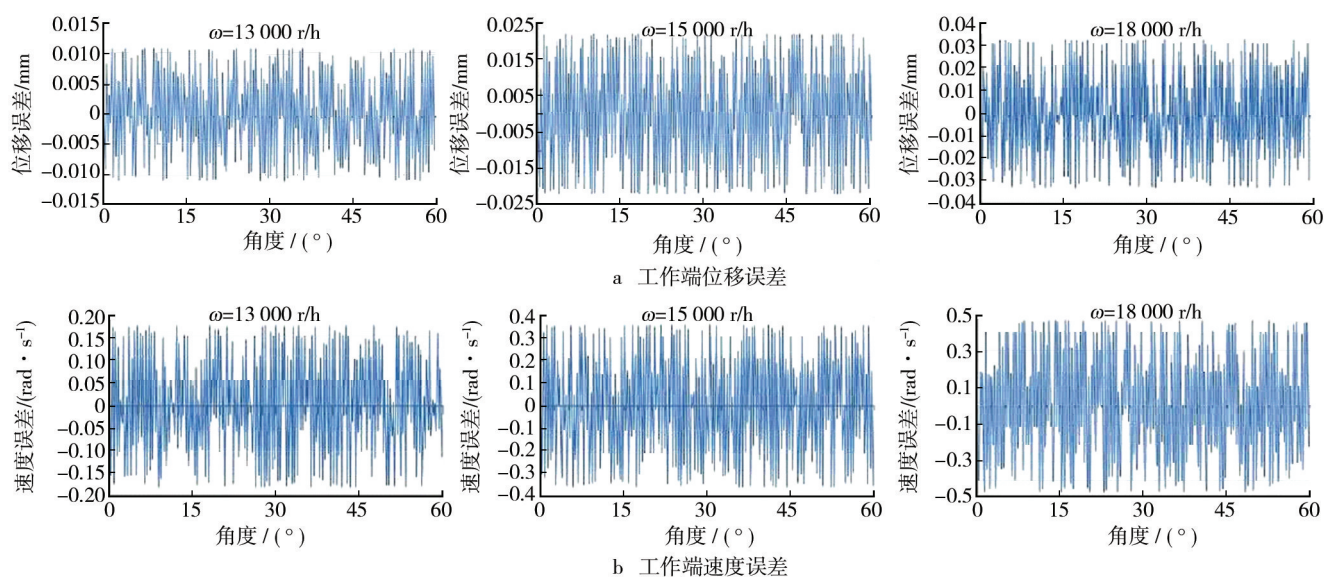


图4 推程期动态响应误差

Fig.4 Dynamic response error in push process

$$\ddot{\varphi}(t) = -\omega_e^2 A \sin[\omega_e(t-t_h)] + \omega_e^2 B \cos[\omega_e(t-t_h)] \quad (5)$$

需要指出的是,远休止期的开始是回程段的结束,因此,当 $t=t_h$ 时,待定系数 A 、 B 可以用数值方法根据回程段的求解而确定。式(5)描述的运动规律是递纸机构在远休止期的动态响应,此时递纸摆脚在前规处进行取纸。在该机构中,共轭凸轮的远休止角 $\theta_s=60^\circ$,若以18 000张/h进行印刷,则递纸摆脚在前规处取纸的时间仅为0.033 s。由此,最关注的是,递纸摆脚在取纸时的最大动态位移误差是否超出了最大套印误差 ≤ 0.03 mm的要求。工程中经常使用周期比 τ 来描述工作端运动偏差和凸轮机构运转速度、机构的固有频率等之间的关系,且定义:

$$\tau = \frac{t_h}{T_0} = \frac{\omega_e t_h}{2\pi} \quad (6)$$

式中: t_h 为系统推程运动周期, $t_h = \frac{\theta_s}{\omega}$, θ_s 为推程角,该机构中 $\theta_s=180^\circ$, ω 是机构的角速度; T_0 为系统的自由振动周期, $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_e}$ 。

将式(6)代入式(5),以 τ 为参变量,可以求解远休止期的周期比与最大位移动态误差 u 的关系,结果见图5。

从图5可以看出,当周期比 τ 为大于6的整数时,系统残余振动响应极小,甚至为零;当周期比 τ 为1.5, 2.5, 3.5, ...时,残余振动响应幅度达到最大值。当周期比 $\tau=6.5$ 时,最大位移动态误差 $u=0.023$ mm,在合格印刷品要求范围之内,但当 $\tau < 6$ 时,最大位移动态

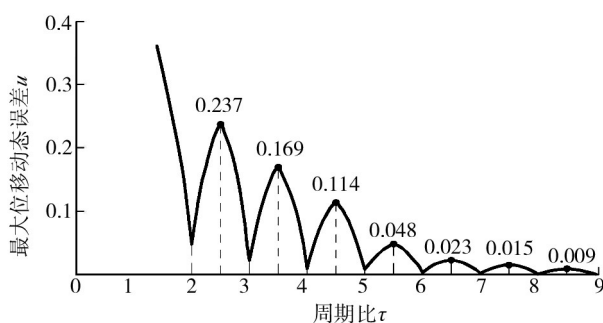


图5 周期比对最大位移动态误差的影响

Fig.5 The effect of period ratio on the maximum displacement dynamic error

误差已接近甚至超出印刷品套印误差极限值0.05 mm,故而,若最高印刷速度达到18 000张/h,且系统拥有较好的动态响应,应使 $\tau \geq 6$,即:

$$\tau = \frac{3600\omega_e}{4\pi n} \geq 6 \quad (7)$$

或:

$$\omega_e \geq \frac{24\pi n}{3600} = 376.8 \text{ rad/s}$$

根据2.2节求出的 $\omega_e=347$ rad/s,可得最高印刷速度为:

$$n_{\max}=16\,576.43$$

也就是说,若不改变目前递纸机构设计,安全的最高印刷速度可达到16 500张/h左右,但无法达到18 000张/h。若要达到18 000张/h,必须对递纸机构进行一定的修改,提高机构的固有频率。经验表明,增加零件的刚度是提高固有频率最简便有效的方法,因此,对现有递纸机构中刚度较低的2种零件进行改进

设计:一种是连杆,将其横截面改为“工”字形,减轻了质量,提高了刚度;另一种是递纸主轴,将其直径(空心轴)放大10 mm。按照新图纸重新加工零件更换旧零件装配后,再按前述的方法进行重新试验测试,求得 $\omega_e=362$ rad/s,进一步接近376.8 rad/s的目标。同时,限于其他结构(例如主传动、滚筒齿轮的振动等)的限制,最终改变了预期的最高印刷速度18 000张/h的目标为16 500张/h。

4 结语

1) 在有样机可供测试的情况下,用试验模态分析法建模的精度会高于常用的单自由度集中质量法,该方法对系统进行测试分析能够达到更准确的结果,可对已有产品进行二次开发时使用试验模态分析方法对关键机构进行研究。

2) 高速单张纸胶印机机构间的动作协调性要求高,在高速印刷情况下,机构自身的运动精度要求精确,必须对纸张交接和纸张定位的过程进行动态分析。对于纸张交接过程主要分析机构的稳态响应,而纸张定位过程主要分析机构的残余振动。

3) 工作端的动态运动偏差不仅与凸轮连杆机构的运转速度有关,而且与机构的激振周期及固有频率有关,机构的固有频率是由各构件的质量、刚度和阻尼等因素描述的。提高机构的极限工作速度应提高机构的固有频率,其最直接的做法是减小构件质量,增加构件刚度。

基于试验模态分析法的递纸机构优化设计,将一款单张纸胶印机的最高印刷速度由13 000张/h提高到16 500张/h。尽管没有实现最初预期的18 000张/h的目标,但由于在研究方法上进行了创新,为进一步研究开发该款产品奠定了基础,积累了经验,也对其他印刷机的设计改进有积极的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 郑新,官燕燕,蒲涛. 基于Pro/E软件的递纸机构仿真分析系统的开发研究[J]. 包装工程,2012,23(33):84—87.
ZHENG Xin, GUAN Yan-yan, PU Tao. Development and Research of Simulation System of Paper-feeding Mechanism Based on Pro/E Software[J]. Packaging Engineering, 2012, 23(33):84—87.
- [2] 张晓玲,沈韶华. 高速胶印机递纸机构共轭凸轮设计[C]//第6届全国凸轮机构学术年会论文集,2005:46—48.
ZHANG Xiao-ling, SHEN Shao-hua. Design of the Conjugate Cams in Paper-feeding Mechanism of Offset Press[C]// The Sixth National Symposium on cam Symposium Proceedings, 2005:46—48.
- [3] 原永亮,杨臻,王圣辉. 基于Adams翻转机构的优化设计[J]. 包装工程,2014,35(11):71—75.
YUAN Yong-liang, YANG Zhen, WANG Sheng-hui. Optimized Design for Turnover Mechanism Based on Adams[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11):71—75.
- [4] 梁庆玉. 胶印机递纸机构的参数化设计及凸轮误差研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
LIANG Qing-yu. Research on Parametric Design and cam Error in Paper-feeding Mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [5] ANGELES J. Dynamic Response of Linear Mechanical Systems—Modeling, Analysis and Simulation[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 2012.
- [6] 段纯,王勇. 高速递纸牙边界条件的优化设计与研究[J]. 包装工程,2012,33(9):90—95.
DUAN Chun, WANG Yong. Optimization Design and Research on Boundary Conditions of High-speed Transfer Grippe[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9):90—95.
- [7] 林建龙. 模态分析与实验[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
LIN Jian-long. Modal Analysis and Experiment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [8] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
FU Zhi-fang, HUA Hong-xing. The Modal Analysis Theory and Application[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [9] NIKOLA JAKI C. Dynamical Behavior of a Nonlinear Single Degree of Freedom System with Negative Viscous and Positive Frictional Damping[J]. Meccanica, 2008, 43: 365—367.
- [10] TREBUÑA F, HAGARA M. Experimental Modal Analysis Performed by High-speed Digital Image Correlation System[J]. Measurement April, 2014(16):78—85.
- [11] 赵泓燕,钱若希,李东,等. 印刷机模拟操作软件研究[J]. 包装工程,2011,32(19):103—107.
ZHAO Hong-yan, QIAN Ruo-xi, LI Dong, et al. Research on Simulated Operation Software of Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19):103—107.
- [12] 郭娟,傅燕鸣,朱磊. 基于MATLAB和UG的下摆式递纸机构的设计与运动仿真[J]. 机械传动,2014,38(3):105—108.
GUO Juan, FU Yan-ming, ZHU Lei. Design and Motion Simulation of hem-type Gripper Mechanism Based on MATLAB and UG[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(3):105—108.
- [13] 石永刚. 凸轮机构设计与应用创新[M]. 北京:机械工业出版社,2008:217—221.
SHI Yong-gang. Design and Application of Innovation and cam Mechanism[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008: 217—221.