

doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.020

基于虚拟样机的胶印机虚拟试验及串墨初始相位优化

李文威 陈南 殷国栋 解鹏程

(东南大学机械工程学院, 南京 211189)

摘要: 针对胶印机结构复杂的特点, 提出基于虚拟试验获得胶印机整机性能数据的方法. 以 SolidWorks, COSMOS/Motion 和 ADAMS 为虚拟样机建模平台, 构建了某型胶印机印刷色组的虚拟样机模型. 在 ADAMS 中对胶印机虚拟样机进行虚拟试验, 获得了胶印机整机的静力学、运动学和动力学仿真数据. 通过对虚拟试验数据的分析, 明确了该型胶印机振动的主要来源及激振力的时域、频域特征, 为胶印机的动态优化提供了参考. 为了进一步降低串墨机构给整机带来的振动, 进行了以 4 个串墨辊串墨运动初始相位为因素的试验设计, 优选出了一组最佳的串墨初始相位搭配方案, 基本上消除了串墨运动对整机的影响, 取得了较好的优化效果.

关键词: 胶印机; 虚拟样机; 虚拟试验; 串墨机构; 优化

中图分类号: TS803.6; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2011)01-0101-06

Virtual experiments and initial ink vibrating phase angle optimization of offset press based on virtual prototyping

Li Wenwei Chen Nan Yin Guodong Xie Pengcheng

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Taking the structural complexity of offset press into account, an approach of obtaining machine performance data by virtual experiments is presented. With SolidWorks, COSMOS/Motion and ADAMS as modeling platform, the virtual prototyping for individual printing unit of an offset press was constructed. The virtual experiments toward the virtual prototyping were performed in ADAMS, and the statics, kinematics and dynamics properties of the machine were obtained. Through the analysis of simulation results, the major source of the machine vibration was found out, and the characteristics of the exciting force in time and frequency domain were revealed as well, which directed following dynamic optimization of the offset press. Furthermore, in order to reduce the vibration from the ink vibrating mechanism, the design of experiments toward the initial ink vibrating phase angles of the ink vibrators was carried out, and the optimal solution was selected as the ultimate design plan. As a result, the exciting force from the ink vibrating mechanism is basically eliminated, which shows that our optimization is effective.

Key words: offset press; virtual prototyping; virtual experiments; ink vibrating mechanism; optimization

现代胶印机日益朝高速化方向发展, 其动态性能逐渐成为衡量胶印机设计质量的关键指标. 为验证胶印机设计方案是否满足动态性能要求, 需要全面了解样机的动态特性. 胶印机结构复杂, 实物样

机测试受操作空间限制, 只能取得部分位置的测试数据, 难以全面获得整机动态特性.

虚拟样机(virtual prototyping)是在计算机上建造的产品数字模型, 通过对虚拟样机进行虚拟试

收稿日期: 2010-06-25. 作者简介: 李文威(1981—), 男, 博士生; 陈南(联系人), 男, 博士, 教授, 博士生导师, nchen@seu.edu.cn.

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BT2007072).

引文格式: 李文威, 陈南, 殷国栋, 等. 基于虚拟样机的胶印机虚拟试验及串墨初始相位优化[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(1): 0101-106. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.020]

验,能够准确地预测出产品在外观、功能、性能等各方面的特征和特性,获得实物样机测试所不能或不易获取的仿真数据.对于胶印机等大型复杂机械产品来说,在设计过程中引入虚拟样机技术,能够显著降低产品开发成本、缩短研发周期、提高设计效率^[1-2].目前,有关虚拟样机技术在胶印机(印刷机)设计中应用的研究,主要集中在2个方面:①胶印机(印刷机)虚拟样机设计平台的开发^[3-4];②基于虚拟样机的胶印机(印刷机)仿真与优化^[5-8].张峻岭等^[5]基于印刷机送纸机构虚拟样机模型,分析了载纸板的位移、速度、加速度以及载纸板下座受力特性,并结合试验设计找到关键参数进行模型优化;齐元胜等^[6]对印刷机离合压机构的虚拟样机模型进行了运动学和动力学仿真,根据仿真结果给出了机构改进建议;周洪星^[7]进行了胶印机串墨机构虚拟样机仿真,得到了串墨辊运动的位移、速度和加速度曲线.杨栋等^[8]对某型胶印机递纸机构进行了运动学仿真,并据此反求了凸轮从动件运动规律.

上述研究在机构的层次上进行虚拟样机建模和仿真,其研究成果对于胶印机关键机构的设计具有指导作用.但是,将虚拟样机技术运用在胶印机整机的分析和设计中,国内还未见相关报道.本文通过构建胶印机单色组整机复杂系统的虚拟样机模型,并进行虚拟试验,获得了胶印机整机较为全面的动态性能数据,为胶印机的动态优化提供了参考;另外,针对串墨机构引起整机振动的问题,对串墨辊串墨运动初始相位进行了试验设计,找到了一组初始相位的最佳组合方案,基本上消除了串墨运动对整机的影响.

1 胶印机虚拟样机建模

1.1 四色胶印机构造

胶印机作为一种结构复杂的印刷机械,通过众多旋转及往复机构的协调运动和多种轨迹生成机构来实现预定的工艺动作,因而其零件数量多、零部件间装配关系复杂、机构运动规律复杂.某型单张纸高速四色胶印机(以下简称胶印机)的基本构造如图1所示,其机械部分由给纸部分、印刷部分和收纸部分所构成.其中,印刷部分又由4个结构基本相同的印刷单元(色组)组成,分别担负红、黄、蓝和黑4种墨色图文的印刷.胶印机4个印刷色组中,除第1色组因设有递纸机构而结构稍有不同之外,其余3个印刷色组的结构基本一致.该型胶印机实际使用中存在的主要问题是高速工况下

整机动态性能差、可靠性低,以至印刷速度超过12 000 r/h时,整机振动加剧,经常出现各种印刷缺陷,有时甚至故障停机.因此迫切需要在对该机进行全面分析的基础上,找到激振力的来源,并有针对性地进行综合优化.

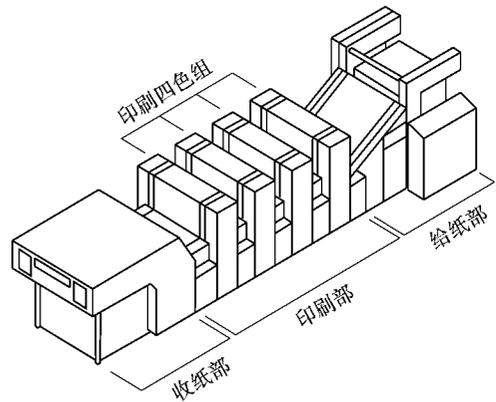


图1 某型单张纸高速四色胶印机

1.2 胶印机虚拟样机建模

基于SolidWorks, SolidWorks多刚体动力学仿真插件COSMOS/Motion和ADAMS建立胶印机第1色组递纸机构和第2色组整机的虚拟样机.胶印机虚拟样机建模包括2部分内容.

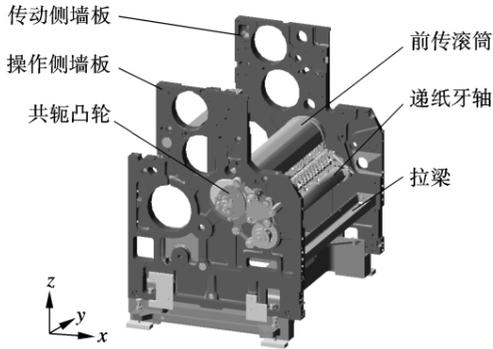
1) 建立胶印机三维CAD装配体模型

在SolidWorks中建立精确的从零件、子装配体直到全局装配体的胶印机三维CAD模型.胶印机零件众多,单个色组的零件总数约为5 000个.为降低建模和仿真难度,必须采用子装配法缩减模型规模.按照运动关系,将彼此没有相对运动的零部件组合为子装配体,再以各子装配体为基础装配成总装配体.由于总装配体中,各子装配体均被视为一个整体,实际上相当于缩减了模型规模.

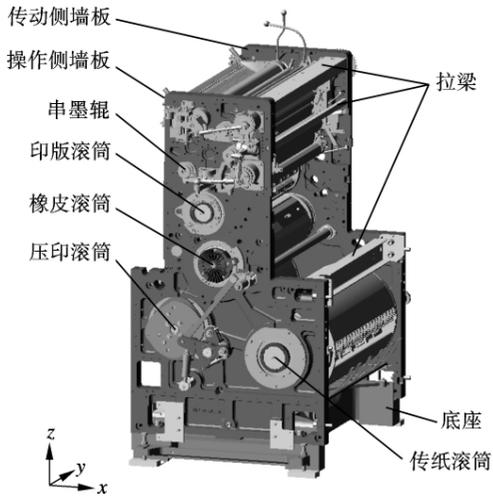
2) 建立胶印机多刚体虚拟样机模型

在胶印机三维CAD全局装配体模型的基础上,按照胶印机各部件的实际约束关系,在部件间加入适当的约束副,建立胶印机多刚体虚拟样机模型.在COSMOS/Motion环境下完成胶印机虚拟样机建模,其中,胶印机各部件之间的固定连接以及地面对机架的支撑用固定副模拟;对各印刷滚筒、水辊、非串动墨辊、转轴施加旋转副约束;对串墨辊施加圆柱副约束;凸轮与滚子之间施加曲线与曲线接触约束;依据传动比在转动副之间加入运动耦合约束定义运动驱动关系.保存构建的胶印机COSMOS/Motion虚拟样机模型为ADAMS格式,并在ADAMS/View中读入以供后续的详细分析使用.胶印机第1色组递纸机构和第2色组整机的AD-

AMS 虚拟样机模型如图 2 所示.



(a) 第 1 色组递纸机构虚拟样机(含子装配体 32 个)



(b) 第 2 色组虚拟样机(含子装配体 136 个)

图 2 胶印机的 ADAMS 虚拟样机模型

2 基于虚拟样机的虚拟试验及讨论

2.1 基于虚拟样机的虚拟试验

在 ADAMS 中,基于所构建的胶印机虚拟样机进行虚拟试验,以提取胶印机各零部件的静力学、运动学和动力学参数.设定传纸滚筒转速为 $360 (^{\circ}) / s$,启动第 1 色组递纸机构虚拟样机的仿真分析,得到递纸牙轴运动的角加速度曲线如图 3 所示.对第 2 色组虚拟样机进行静态平衡分析,得到机器静止状态

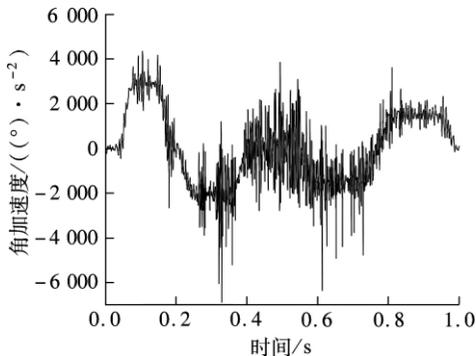
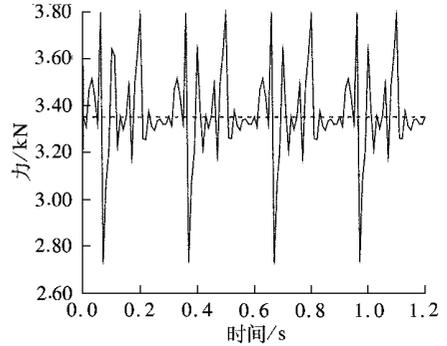
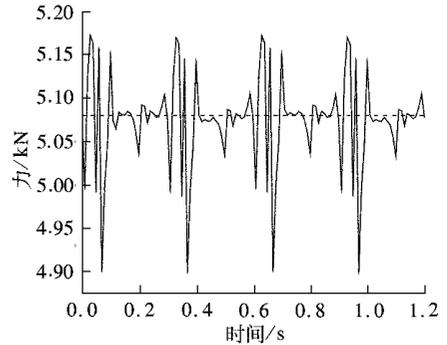


图 3 递纸牙轴角加速度仿真曲线

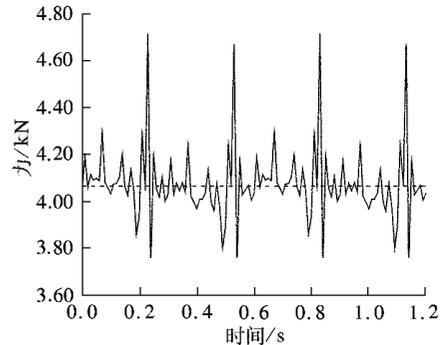
下印刷滚筒对机架的静态作用力如图 4 中虚线所示.再设定胶印机印刷速度(即图 2 中橡皮滚筒对应转速)为 $12\ 000\ r/h$,仿真时间为 $1.2\ s$,启动第 2 色组虚拟样机的动力学仿真,得到的印刷滚筒对机架的动态作用力如图 4 中实线所示.4 个串墨辊运动规律曲线如图 5 所示.



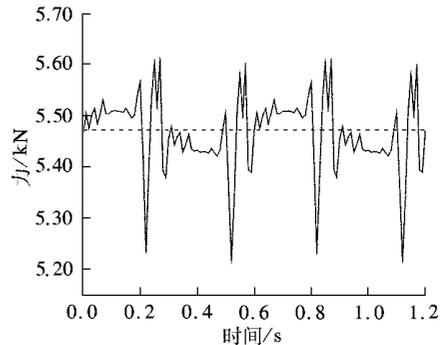
(a) 传纸滚筒对操作侧墙板作用力



(b) 传纸滚动对传动侧墙板作用力



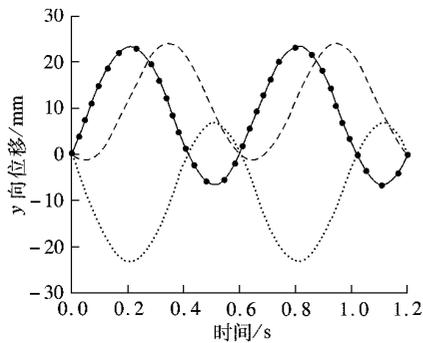
(c) 压印滚筒对操作侧墙板作用力



(d) 压印滚筒对传动侧墙板作用力

— 动态力 - - - 静态力

图 4 印刷滚筒对机架作用力的仿真曲线



..... 串墨辊 1; — 串墨辊 2; ···· 串墨辊 3; - - - 串墨辊 4

图5 串墨辊串墨位移仿真曲线

2.2 仿真结果讨论

对图3~图5的仿真结果进行分析,可以得到以下结论:

1) 激振力主要来源. 仅就该胶印机多刚体虚拟样机仿真结果来分析,该型胶印机激振力的主要来源有:①测绘所得凸轮型线曲率不连续造成的运动冲击(见图3);②间歇或往复运动机构产生的惯性力(见图4和图5).

2) 激振力时域特征. 图3表明,递纸牙轴的角加速度曲线不规则跳变幅度较大,会造成较大的运动冲击.对递纸牙轴运动规律的反求^[8]表明,其运动规律为简谐梯形加速度运动规律.图4表明,高速印刷时,由于咬纸牙的间歇性开闭,印刷滚筒对墙板施加了动态激振力,且该激振力围绕静态力上下波动的幅度较大.图5表明,串墨机构4个串墨辊作近似简谐往复运动,从而对机架施加了y向动态激振力.另外4个串墨辊之间的运动存在一定的相位差,此种设计的目的是为了在一定程度上抵消各串墨辊动态激振力对整机的影响.

3) 激振力的频域特征. 图4和图5中曲线幅值随时间的变化呈现出明显的周期性特征,主要激振频率是该胶印机转速所对应频率的1倍和0.5倍.即当胶印机转速达到12 000 r/h时,对应的激振频率为3.33和1.67 Hz.

为降低胶印机的振动,可以采取以下措施:

①对胶印机运动不平衡机构(如凸轮机构、串墨机构等)进行优化,以消除振动来源;②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;③对胶印机关键部件(如印刷滚筒等)进行振动控制^[9-10].限于篇幅,以下仅就胶印机串墨机构串墨初始相位优化问题作一探讨.

3 胶印机串墨初始相位优化

在胶印机中,串墨辊和匀墨辊在对滚的同时,串墨辊通过轴向往复相对滑动使油墨在墨辊轴向

均匀分布.这里,通过合理搭配4个串墨辊串墨运动的初始相位,以期将串墨运动对胶印机整机的影响降至最小.

3.1 串墨辊串墨运动模型

该型胶印机串墨辊的轴向串墨运动由空间RSSR机构驱动,串墨运动规律为近似简谐运动规律.为便于分析,将串墨运动规律视为正弦曲线进行研究,这样,串墨辊串墨运动的运动状态可由串墨行程、串动周期和串墨初始相位这3个参数来决定.串墨辊*i*的串墨运动可表达为

$$d_i = a_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi d_{0i}}{2a_i}\right) \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (1)$$

式中, d_i 为串墨辊*i*的轴向位移; a_i 为串墨辊*i*的1/2串墨行程; T 为串墨周期; d_{0i} 为串墨辊*i*的轴向初始位移; $\pi d_{0i}/(2a_i)$ 为串墨初始相位.

串墨辊在轴向(图2中y向)作近似简谐式往复串墨运动,对机架施加了y向低频周期性激振力 F_y .当胶印机整体结构y向刚度薄弱时,在低频激振力的激励下易诱发整机y向摆振,从而对印刷质量造成不利影响.

3.2 串墨机构仿真模型的构建

在图2(b)模型基础上,建立串墨机构仿真模型.删除图2(b)模型中多余的零部件,只保留上墙板、串墨辊和套筒.设置各串墨辊圆柱副的滑动摩擦系数 μ_d 均为0.1;按表1建立ADAMS变量;然后按式(1)为各串墨辊圆柱副加入简谐位移驱动函数.最终建成的串墨机构ADAMS仿真模型如图6所示.

表1 ADAMS变量及取值

| 变量 | 取值 |
|-------------|---------------|
| T/s | 0.60 |
| a_1/mm | 15.00 |
| a_2/mm | 15.00 |
| a_3/mm | 15.00 |
| a_4/mm | 12.66 |
| d_{01}/mm | $[-a_1, a_1]$ |
| d_{02}/mm | $[-a_2, a_2]$ |
| d_{03}/mm | $[-a_3, a_3]$ |
| d_{04}/mm | $[-a_4, a_4]$ |

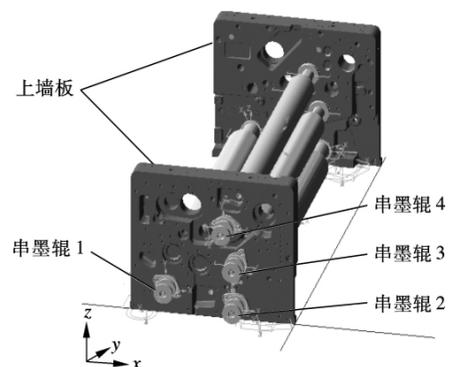


图6 串墨机构ADAMS仿真模型

3.3 基于试验设计(DOE)的串墨初始相位优化

串墨初始相位优化的数学模型为

$$\begin{aligned} & \min F_{y,RMS} \\ & \text{find } d_{0i} \quad i=1, 2, \dots, 4 \\ & \text{s. t. } -a_i \leq d_{0i} \leq a_i \quad i=1, 2, \dots, 4 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $F_{y,RMS}$ 为机架受力 F_y 在一个周期内的均方根值,即

$$F_{y,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} F_y^2(t) dt} \quad (3)$$

以 4 个串墨辊的 y 向初始位移 $d_{01}, d_{02}, d_{03}, d_{04}$ 为设计变量,以 $F_{y,RMS}$ 为响应量,进行全因子试验设计(full factorial design of experiments). 试验中,每个因素取 5 个水平值($-a_i, -a_i/2, 0, a_i/2, a_i$),则试验次数共有 625 次. 各因素所取的具体水平值如表 2 所示. 由于方案 $(d_{01}, d_{02}, d_{03}, d_{04})$ 与 $(-d_{01}, -d_{02}, -d_{03}, -d_{04})$ 等效,故实际试验次数取为 313 次.

表 2 因素水平表 mm

| 水平 | d_{01} | d_{02} | d_{03} | d_{04} |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 1 | -15.00 | -15.00 | -15.00 | -12.66 |
| 2 | -7.50 | -7.50 | -7.50 | -6.33 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 7.50 | 7.50 | 7.50 | 6.33 |
| 5 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 12.66 |

在 ADAMS 软件的试验设计与分析模块 Insight 中完成 DOE 过程. 仿真优化时,设定胶印机印刷速度为 12 000 r/h,每次试验的仿真时间定为 0.6 s,步长定为 0.01 s.

从试验设计结果来看, $F_{y,RMS}$ 的变化范围介于 1.61 ~ 200.33 N 之间. 当 4 个串墨辊同相运动时,激振力因波峰与波峰、波谷与波谷相互叠加而增强,这时 $F_{y,RMS}$ 达到最大值 200.33 N; 而相位差的组合较为合理时,激振力因波峰和波谷相互抵消而被削弱,这时的 $F_{y,RMS}$ 则很小. 从试验的 313 个方案中选取 $F_{y,RMS}$ 值较小的 3 个方案列于表 3 中.

表 3 前 3 个较优初始位移组合方案

| 序号 | d_{01}/mm | d_{02}/mm | d_{03}/mm | d_{04}/mm | $F_{y,RMS}/\text{N}$ |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 121 | -15.00 | 15.00 | 15.00 | -12.66 | 1.61 |
| 105 | -15.00 | 15.00 | -15.00 | 12.66 | 12.23 |
| 122 | -15.00 | 15.00 | 15.00 | -6.33 | 26.54 |

由于 121 号试验对应的方案最佳,因此选定此方案作为最终设计方案,并按下式:

$$\Delta_{ij} = \left(\frac{d_{0j}}{a_j} - \frac{d_{0i}}{a_i} \right) \times 90^\circ \quad i, j=1, 2, \dots, 4; i \neq j \quad (4)$$

将串墨辊 2 ~ 4 的 y 向初始位移换算为对串墨辊 1

的相位差 $\Delta_{ij} (j=2, 3, 4)$. 优化前后机架承受激振力对比如表 4 和图 7 所示. 优化前 F_y 幅值为 179.88 N, 优化后 F_y 幅值仅为 2.25 N, F_y 幅值降低幅度达 98.75%, 基本上消除了串墨运动对胶印机的影响,优化效果十分显著.

表 4 优化前后对比

| 方案 | 对串墨辊 1 相位差/(°) | | | $F_{y,RMS}/\text{N}$ | $\max(F_y)/\text{N}$ |
|-----|----------------|---------------|---------------|----------------------|------------------------|
| | Δ_{12} | Δ_{13} | Δ_{14} | | |
| 原设计 | 180 | 180 | 100 | 126.57 | 179.88 |
| 优化后 | 180 | 180 | 0 | 1.61 | 2.25 |

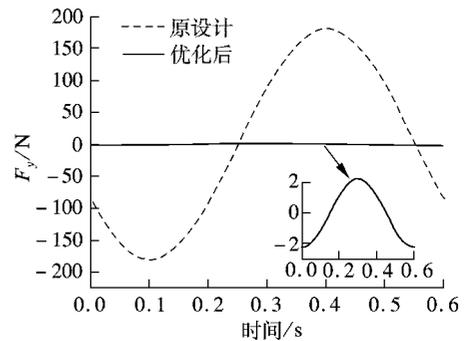


图 7 优化前后机架承受激振力对比

4 结论

1) 以 SolidWorks, COSMOS/Motion 和 ADAMS 为建模平台,构建了某型高速四色胶印机单色组复杂整机的虚拟样机模型,为胶印机整机的虚拟试验奠定了基础.

2) 胶印机虚拟样机的高速工况虚拟试验表明,测绘所得凸轮型线曲率不连续产生的冲击力、间歇和往复运动机构的周期性作用力是该型胶印机激振力的主要来源.

3) 基于虚拟样机试验设计的胶印机串墨初始相位优化思路可行,能够寻找到串墨辊初始相位的较优组合方案,可以基本消除胶印机串墨机构往复运动给整机带来的振动.

参考文献 (References)

[1] Chen Xi. Agent-based distributed conceptual design of virtual prototyping for complex products [C]//2007 International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops. Harbin, China, 2007: 378-381.

[2] Prasad A, Sasidharan P, Rajiv J. Virtual prototyping increases productivity: a case study [C]//2009 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Hsinchu, Taiwan, China, 2009: 96-101.

[3] 滕东兴, 董秉枢, 阴向阳, 等. 机构虚拟设计平台的研究与开发[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2001,

- 13(10): 886-889.
Teng Dongxing, Tong Bingshu, Yin Xiangyang, et al. Research and development of virtual design platform for mechanism planning [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, **13**(10): 886-889. (in Chinese)
- [4] 齐元胜, 王晓华, 郭俊忠. 印刷机分布式虚拟样机系统及实现策略研究[J]. *系统仿真学报* 2006, **18**(S1): 78-80.
Qi Yuansheng, Wang Xiaohua, Guo Junzhong. Study on system architecture & its realization scheme of distributed collaborative virtual prototyping for printing press [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(S1): 78-80. (in Chinese)
- [5] 张峻岭, 韩晓东. 印刷机送纸机构虚拟设计[J]. *包装工程* 2006, **27**(6): 172-174.
Zhang Junling, Han Xiaodong. Virtual design the paper transport mechanism of printer [J]. *Packaging Engineering*, 2006, **27**(6): 172-174. (in Chinese)
- [6] Qi Yuansheng, Li Haixiang, Wang Xiaohua, et al. Virtual prototyping of key parts of printing press [C]//*International Technology and Innovation Conference* 2006. Hangzhou, China, 2006: 1563-1567.
- [7] 周洪星. 单张纸胶印机输墨系统的动态性能研究[D]. 西安: 西安理工大学 2008.
- [8] 杨栋, 陈南, 李文威. 胶印机递纸机构运动规律研究与凸轮反求设计[J]. *精密制造与自动化* 2009(3): 25-27-57.
Yang Dong, Chen Nan, Li Wenwei. The research of motion law of offset gripper mechanism and cam reverse design [J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 2009(3): 25-27-57. (in Chinese)
- [9] Hermanski M, Kohn K U, Ostholt H. An adaptive spectral compensation algorithm for avoiding flexural vibration of printing cylinders [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, **187**(2): 185-193.
- [10] Yamaguchi M, Takasaki K, Hirooka H, et al. Development of dynamic absorber built-in roll for high speed and high quality sheet-fed printing press [J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 1997, **34**(1): 20-24.