

6-4-2020

Effect of Properties of Synchronous Belt on Vibration Characteristics of a Polishing Machine

Baibing Sun

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China;

Zhongyu Piao

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Effect of Properties of Synchronous Belt on Vibration Characteristics of a Polishing Machine

Abstract

Abstract: To form slurry film, hydrodynamic-suspension polishing machine needs polishing clearance extremely small, so any slight vibration will make tremendous influence on machining. The effect of different properties of synchronous belt on vibration characteristics of polishing machine was simulated by Workbench. Motion analysis shows the parameters which influence on transverse vibration of synchronous belt. *Orthogonal test was designed and simulation was made by using above parameters. The results released that the material played an important role than the belt width and tension force. According to actual situation, optimum combination was obtained.* Consequently, the stability of the machine was obviously improved. The structure optimization was realized.

Keywords

synchronous belt, hydrodynamic suspension polishing, modal analysis, orthogonal test

Recommended Citation

Sun Baibing, Piao Zhongyu. Effect of Properties of Synchronous Belt on Vibration Characteristics of a Polishing Machine[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2468-2474.

同步带属性对某型抛光机振动特性的影响

孙白冰, 朴钟宇

(浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310000)

摘要: 液动压悬浮抛光机要求抛光间隙极小以形成抛光液液膜, 抛光机微小的振动都可能会对加工造成极大影响。基于 Workbench 仿真平台, 数值模拟了同步带的不同属性对抛光机振动特性的影响。运动分析得出影响同步带横向振动的参数; 以此为因素构建正交试验, 并进行不同因素及水平下的仿真; 衡量各因素对抛光机振动特性的影响, 发现材料属性对振动特性影响最大, 带宽次之, 张紧力最小, 并结合实际情况得出最佳组合, 有效提高了抛光机的稳定性, 实现了结构的优化。

关键词: 同步带; 液动压悬浮抛光; 模态分析; 正交试验

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)10-2468-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710030

Effect of Properties of Synchronous Belt on Vibration Characteristics of a Polishing Machine

Sun Baibing, Piao Zhongyu

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: To form slurry film, hydrodynamic-suspension polishing machine needs polishing clearance extremely small, so any slight vibration will make tremendous influence on machining. The effect of different properties of synchronous belt on vibration characteristics of polishing machine was simulated by Workbench. Motion analysis shows the parameters which influence on transverse vibration of synchronous belt. *Orthogonal test* was designed and simulation was made by using above parameters. The results released that the material played an important role than the belt width and tension force. According to actual situation, optimum combination was obtained. Consequently, the stability of the machine was obviously improved. The structure optimization was realized.

Keywords: synchronous belt; hydrodynamic suspension polishing; modal analysis; orthogonal test

引言

同步带传动结构简单、运行平稳、振动噪声小、传动效率高、耗能少, 兼有一般带传动、链传动及齿轮传动的优点^[1]。随着同步带传动应用的广泛普及, 越来越多的机械设备上出现了同步带的身影,

如汽车、纺织机械、办公机械以及数控机床等。其中, 不乏有许多高精密机械设备。

某型液动压悬浮抛光机(下文简称抛光机)应用于试样表面的超精密加工, 以获得原子级超光滑表面, 其加工原理为流体动压润滑理论, 即工件与抛光盘之间为非接触的浸液环境, 要求抛光间隙极小以形成抛光液液膜。因而, 抛光机微小的振动都可能会对加工造成极大影响。同步带传动具有与链传动类似的多边形效应, 因此同步带传动存在振动, 会直接影响同步带传动的平稳性和传动精度^[2], 进而



收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2015-11-26;
基金项目: 国家自然科学基金(51375457, 51305397),
浙江省科技厅公益性项目(2014C31099), 流体动力与
机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-201411);
作者简介: 孙白冰(1991-), 男, 浙江温州, 硕士生,
研究方向为结构动力学仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2468 •

影响抛光机的加工精度。为尽可能减小抛光机振动, 以提高加工精度, 需要对同步带所引起的抛光机振动进行分析。

本文研究根据影响同步带横向振动的因素, 讨论了不同同步带属性对抛光机的振动特性的影响, 通过数值模拟和正交试验的方法, 分析得出了各个因素对抛光机固有频率的影响, 确定了最优的因素组, 为抛光机稳定性的提高和设计的优化提供依据。

1 抛光机有限元模型的建立

抛光机总体结构如图 1 所示, 上部分为抛光部件, 下部分为升降部件。升降部件通过电控升降台实现微米级定位精度; 抛光部件由电机、带传动系统、支承件和传感器等构成, 是主要的工作部件, 因此本文主要研究抛光部件的振动特性。

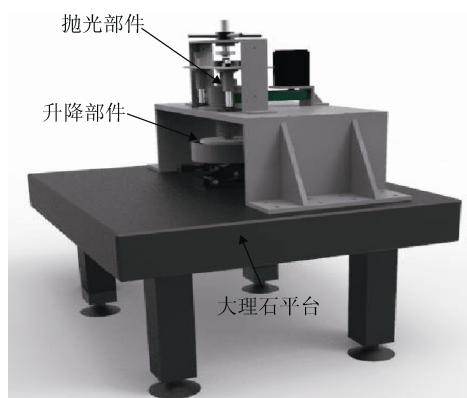


图 1 抛光机结构示意图
Fig. 1 Structure of polishing machine

本文以 Workbench 为仿真平台, 建立如图 2 所示有限元模型。为了在提高精度的同时, 减少节点和单元数, 保证计算的效率, 模型采用扫略和多区域扫略方法划分网格, 网格单元以六面体结构网格为主, 整个模型共有 340 181 个节点, 115 858 个单元。除此之外, 在建模时, 对模型进行了如下合理简化:

1. 同步带包布层的弹性模量相对于强力层、带背、带齿的弹性模量来说很小, 且包布层厚度小, 故有限元分析时忽略其影响;

2. 同步带材料为复合材料, 同时有粘性和弹性的性质, 确定其弹性模量较复杂, 在有限元分析时, 将材料近似看作线性材料, 带背聚氨酯材料, 厚度 2 mm, 强力层材料为下文分析重点, 厚度 1 mm;

3. 带与带轮的啮合不是主要研究对象, 故简化带齿结构, 接触方式采用 frictionless;

4. 根据圣维南原理, 忽略模型中影响较小的特征, 如倒角、倒圆角以及螺纹孔等。

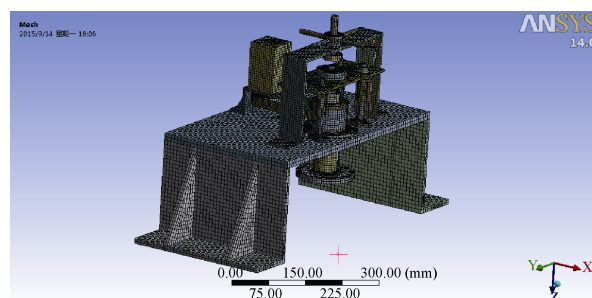


图 2 有限元模型网格图
Fig. 2 Grid of finite element model

2 同步带振动分析

同步带传动的振动主要分为横向振动和纵向振动。其中, 横向振动是指同步带沿与带的运动方向垂直的振动; 纵向振动是指同步带沿带的运动方向的振动。纵向振动的固有频率由同步带轮的大小、质量、转动惯量及同步带的弹簧刚度唯一确定, 激振力由带轮的偏心引起, 在忽略带轮加工精度及装配误差的影响时, 不考虑同步带传动的纵向振动对抛光机振动特性的影响^[3]。

2.1 同步带横向振动运动方程

同步带传动中, 带以一定的张紧力装在两带轮上, 而带又具有一定的弹性, 所以, 同步带传动的横向振动类似于弦振动。实际上同步带即有一定的张紧力, 同时由于强力层的存在, 使带又具有一定的抗弯刚度, 所以, 同步带传动的横向振动也类似于梁的振动^[4]。

在图 3(a)所示同步带传动示意图中截取一长度为 dx 的微段, 如图 3(b)所示, 对该微段进行受力分析^[5], y 方向的力平衡方程及绕微段右截面中

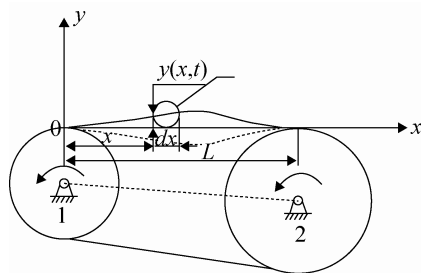
点的力矩平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & T \sin \theta(x+dx, t) - T \sin \theta(x, t) + Q \cos \theta(x, t) - \\ & \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \cos \theta(x+dx, t) = \rho dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) - M - Q dx \cos \theta(x+dx, t) = 0 \end{aligned}$$

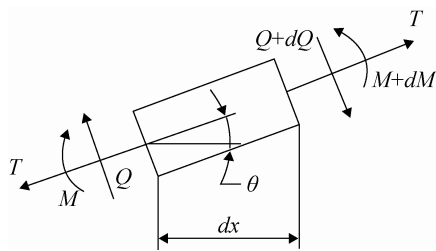
式中: T 为张紧力; ρ 为线密度; EI 为截面抗弯刚度; Q 为剪切力; M 为弯矩。

化简可得同步带横向振动运动方程:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$



(a) 同步带传动示意图



(b) 受力分析

图3 带传动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of belt drive

2.2 同步带横向振动频率

假设同步带轮没有任何偏心, 两中心简化为固定铰支座, 则同步带横向振动时, 在 $x=0$, $x=L$ 处, 位移和弯矩均为 0, 即有如下边界条件:

$$\begin{aligned} & y(0, t) = y(L, t) = 0 \\ & EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0, x=L} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

设 $y(x, t) = Y(x)\eta(t)$ 为运动方程(1)满足边界条件(2)的非零解, 代入方程(1)得:

$$EI \frac{Y^{(4)}(x)}{Y(x)} - T \frac{Y''(x)}{Y(x)} + \rho \frac{\eta''(t)}{\eta(t)} = 0 \quad (3)$$

进一步求解得:

$$Y_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi x}{L}, n = 1, 2, \dots$$

$$\eta_n(t) = B_n \cos \omega t + C_n \sin \omega t$$

根据叠加原理, 运动方程(1)的通解, 即同步带的横向振动为:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n (B_n \cos \omega t + C_n \sin \omega t) \sin \frac{n\pi x}{L}$$

式中: $\omega = \sqrt{\frac{EI \left(\frac{n\pi}{L} \right)^4}{\rho} + \frac{T \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2}{\rho}}$, 为同步带横向

振动时的 n 阶频率; A_n , B_n , C_n 为与阶数 n 有关的常数; 由 ω 的表达式可看出, 同步带横向振动的频率与同步带的张紧力、材料、质量以及中心距有关。

3 抛光机振动特性分析

模态分析主要用于确定结构和机械零部件的振动特性, 模态分析的最终目标是识别出系统的模态参数, 为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报、结构动力特性的优化设计提供依据, 也是动力学进一步分析的基础^[6]。Chiu 等^[7]对化学机械抛光模型进行了预应力下的模态分析, 研究了夹具所受不同预应力、抛光垫不同弹性模量对固有频率的影响, 与本文分析的因素和指标有一定相似处。相比较而言, 本文设计的因素及水平较多, 采用正交试验法^[8]更加合理, 而且可以通过横向比较, 得出对固有频率影响较大的因素, 从而更好修正模型。

3.1 正交试验设计及分析

根据上述的分析可知, 对同步带横向振动频率的影响因素有同步带的张紧力、材料、质量和中心距等。对抛光机而言, 其电机和抛光盘的距离, 即同步带的中心距已确定, 根据实际情况, 本文设置因素分别为张紧力、带宽以及强力层材料, 试验指标为抛光机的各阶模态, 这里主要考察对振动特性影响最大的前六阶模态。已知, 由设计功率和转速确定了同步带型号为 L 型, 根据机械设计手册^[9] GB/T 11616-1989、GB/T 11362-1989, 选择带宽、预紧力。设计 L9(3³) 正交试验计划, 如表 1 所示。

表 1 正交试验
Tab. 1 Orthogonal experiment

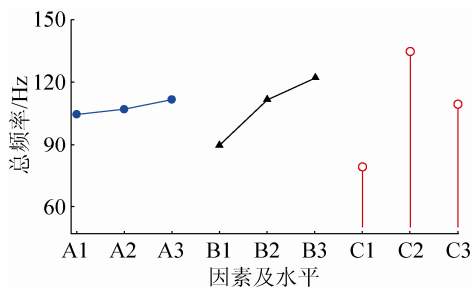
试验	因素			试验指标
	A	B	C	
	张紧力/N	带宽/mm	材料	
1	60	12.7	钢丝	各阶固有频率 /Hz
2	60	19.1	芳纶	
3	60	25.4	玻纤	
4	80	12.7	芳纶	
5	80	19.1	玻纤	
6	80	25.4	钢丝	
7	100	12.7	玻纤	
8	100	19.1	钢丝	
9	100	25.4	芳纶	

常用的同步带强力层材料为钢丝、玻璃纤维和芳纶, 其材料属性^[10]如表 2 所示。正交试验结果如图 4, 5 所示。

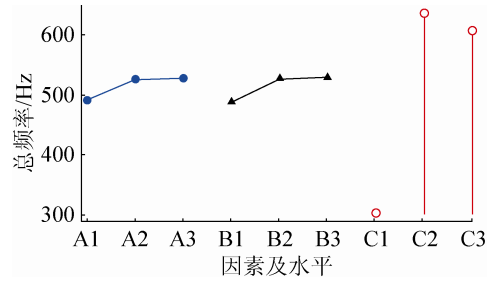
由图 4 可以看出, 除了三阶模态中, 同步带的张紧力增大对其固有频率的影响, 先提高后减小, 其余各阶模态中同步带的张紧力、带宽及材料的弹性模量的增大, 固有频率相应提高。从图中可以看出, 同步带强力层材料对各阶固有频率的影响最为显著, 张紧力的影响最细微, 带宽对二三四阶模态固有频率的影响很小, 但对一五六阶模态固有频率的影响仅稍次于材料的影响。

表 2 同步带材料及属性
Tab. 2 Material and properties of synchronous belt

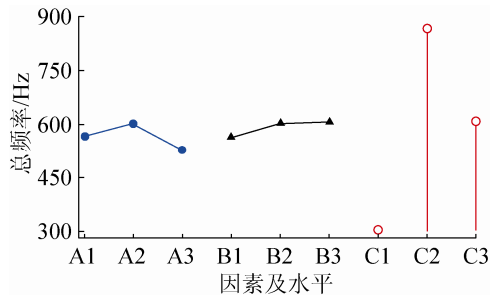
属性	强力层材料		
	钢丝	玻璃纤维	芳纶
密度 g/cm ³	7.8	2.58	1.44
弹性模量 N/mm ²	3.18×10 ³	1.04×10 ⁴	3.69×10 ⁴
泊松比	0.4	0.4	0.4



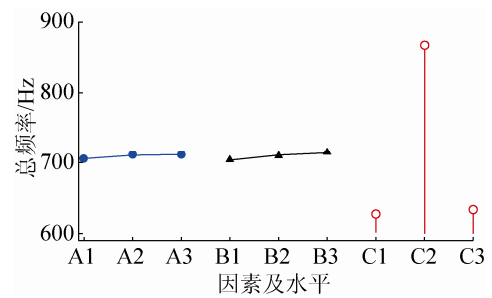
(a) 一阶



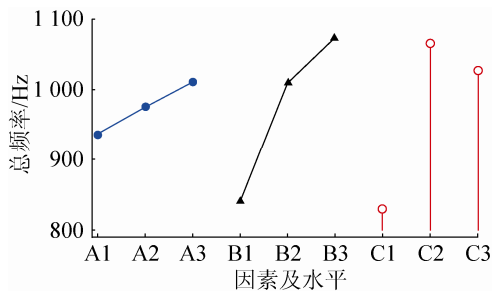
(b) 二阶



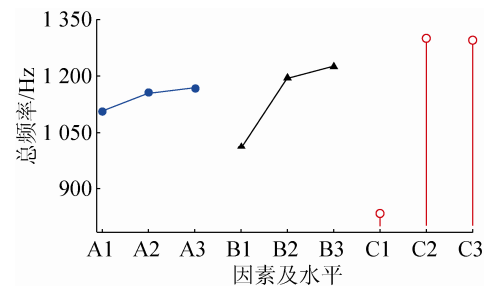
(c) 三阶



(d) 四阶



(e) 五阶



(f) 六阶

图 4 因素水平与相应总固有频率的关系图

Fig. 4 Relationship between factors and natural frequency

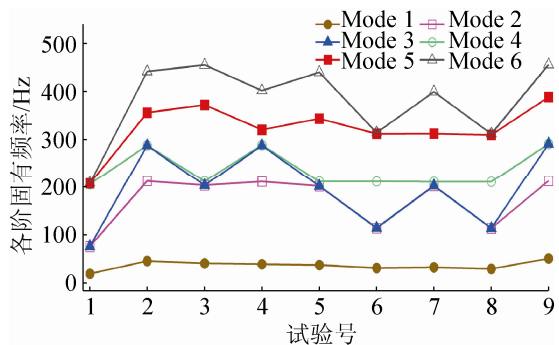


图 5 各次试验的各阶模态频率分布图
Fig. 5 Distribution of modal frequency

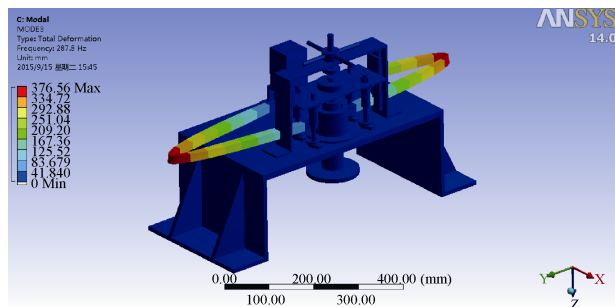


图 6 三阶模态振型图
Fig. 6 Third order modal shapes

对试验 1 而言，其各阶固有频率均为最小，而试验 1 的因素取值也是各自水平中的最小值，这符合图 4 分析的因素与固有频率的正相关关系。通过横向比较发现，1、6、8 号试验各阶模态的固有频率相对较小，其试验共同点为同步带强力层材料为钢丝，而钢丝材料的弹性模量在三种材料中最小，这也符合材料对各阶模态的影响显著，且材料与模态固有频率正相关的结论。

由上图可以看出，所有模态中，三阶模态的曲线变化最明显，其固有频率值为 75~290 Hz，同步带的不同属性对其影响最大，这主要是因为三阶模态为同步带的局部模态，模态振型表现为同步带的横向振动，如图 6 所示(张紧力 60 N, 带宽 19.1 mm, 芳纶材料)。

由上述的理论分析可知，同步带的横向振动受带的张紧力、材料和质量影响，但由图 4(c)得出此时张紧力对固有频率的影响趋势与理论分析有出入，为此我们进一步进行模态试验测试，采用最小二乘复频域法^[11-12]分析得到模态参数识别稳态图，如图 7 所示。

由于实际复杂模型及材料的简化以及非线性特性的影响，高阶模态的结果不甚理想。我们针对影响较大的前三阶模态，提取相应的模态参数，并与仿真分析结果比较如表 3 所示。

可见，仿真值与试验值在 0~300 Hz 范围内吻合度较高，说明前三阶模态仿真结果可靠，验证了有限元模型的合理性。

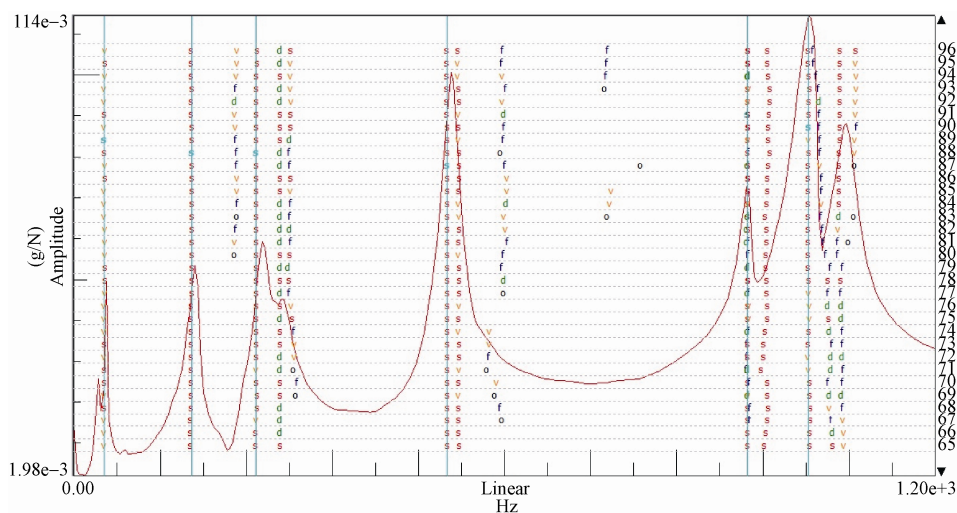


图 7 模态分析稳态图
Fig. 7 Stabilisation diagram of modal analysis

表 3 有限元与试验模态对比

模态阶数	有限元模态 频率/Hz	试验模态 频率/Hz	误差百分比 /(%)
1	45.43	42.27	7.48
2	212.07	183.54	15.54
3	287.80	254.28	13.18

3.2 系统振动分析

电机激励频率为 $f = \frac{n}{60}$, n 为转速, 单位为 r/min , 实际工作转速为 $1\ 000 \sim 2\ 000\ r/min$, 故实际电机激励频率为 $16.7 \sim 33.33\ Hz$ 。

由图 5 可以看出, 一阶固有频率与电机激励频率较为接近, 根据结构动力学的根本原理, 当激励频率与系统的固有频率相等或接近时, 系统将发生共振, 引起很大的振动响应。故本文以一阶固有频率为指标进一步分析同步带属性对抛光机振动特性的影响。正交试验结果分析如表 4 所示, 其中, 试验号为 2、3、9 号的试验, 其一阶固有频率为电机激励频率的 1.2 倍以上, 能有效避开系统的共振。但由图 5 可以看出试验 3 的二三四阶模态固有频率出现混叠, 频率相差太近, 容易激发出相邻阶模态的振型, 影响主振型的稳定性^[13], 因此不可取。

表 4 正交试验及结果

试验	因素			一阶固有 频率/Hz
	A 张紧力/N	B 带宽/mm	C 材料	
1	1(60)	1(12.7)	1(钢丝)	18.94
2	1	2(19.1)	2(芳纶)	45.43
3	1	3(25.4)	3(玻纤)	40.46
4	2(80)	1	2	38.70
5	2	2	3	37.05
6	2	3	1	31.11
7	3(100)	1	3	32.20
8	3	2	1	29.09
9	3	3	2	50.57
I	104.83	89.84	79.14	
II	106.86	111.57	134.70	I+II+III
III	111.86	122.14	109.71	=323.55
R	7.03	32.30	55.56	

由表 4 中极差值 R 可以看出材料属性对系统一阶固有频率影响最大, 为主因素, 带宽次之, 张紧力影响最小。由图 4a 及表 4 可知, 最佳组合为 $A_3B_3C_2$, 即张紧力 $100\ N$, 带宽 $25.4\ mm$, 材料为芳纶材料。但由于本文所用抛光机同步带为 210L075 聚氨酯同步带, 即带宽尺寸 $19.1\ mm$, 若要改用 $25.4\ mm$ 同步带, 相应的, 同步带轮及轴的相关尺寸都要重新设计, 即延长了设计周期, 又增加了制造成本, 故本文应用中不予采用。根据实际情况, 另外设计组合 $A_3B_2C_2$ 作为最佳组合, 此时带宽为 $19.1\ mm$, 其一阶固有频率为 $45.77\ Hz$, 虽较试验 8 的 $50.57\ Hz$ 减少约 10% , 但更换同步带的材料更方便于实际操作; 较试验 2 的 $45.43\ Hz$ 并没有明显提升, 这也说明了张紧力对系统一阶固有频率影响小。

结合上述分析可知, 对抛光机振动特性影响最大的因素为材料属性, 芳纶的强度高, 弹性模量大, 采用芳纶材料能有效提高整机的固有频率, 从而提高抛光机的稳定性; 在设计初期, 带宽的合理选择也能有效提高抛光机的抗振能力及稳定性, 在一定范围内, 抛光机的一阶固有频率随带宽的提高而增大; 张紧力保证带齿与轮齿的接触, 提高传递的功率, 但在标准范围内对抛光机的振动特性并没有太大影响。

4 结论

分析同步带振动的影响因素, 采用 Workbench 平台对不同模型下的液动压悬浮抛光机(同步带属性不同)进行模态分析, 利用正交试验法设计仿真, 得出以下结论:

1. 同步带的横向振动与同步带的张紧力、材料、质量以及中心距有关;
2. 前三阶模态的试验值与仿真值相吻合, 验证了模型的可靠性。第三阶模态的固有频率受同步带属性影响最大, 因为第三阶模态为同步带的局部模态, 模态振型表现为同步带的横向振动, 其结果与结论 1 相符;

3. 同步带各因素与各阶固有频率为正相关关系, 对固有频率影响最大的为强力层材料属性。以一阶固有频率为指标讨论抛光机的振动特性, 张紧力对一阶模态的影响很小, 提高同步带材料的弹性模量和带宽能有效提高一阶固有频率;

4. 结合实际提出最佳组合 $A_3B_2C_2$, 此时一阶固有频率为 45.77 Hz, 在避开电机激振频率的同时提高了一阶固有频率, 从而提高抛光机的抗振性能。

参考文献:

- [1] 袁志权. 灌装机同步带动力特性分析及结构优化 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (Yuan Zhiquan. Dynamic analysis and structure optimization on filling machine timing belt [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.)
- [2] 卢小锐, 高文志, 张良良, 等. 基于 Excite-Timing Drive 的正时同步带系统动力学分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 66-69. (Lu Xiaorui, Gao Wenzhi, Zhang Liangliang, et al. Dynamic analysis of a synchronous belt drive based on EXCITE-TD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(11): 66-69.)
- [3] 杨玉萍, 钱永明, 沈世德. 同步带传动纵向振动的分析 [J]. 机械传动, 2002, 26(4): 38-40. (Yang Yuping, Qian Yongming, Shen Shide. A Study on the Axial Vibrations of Transmission Timing-belt [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2002, 26(4): 38-40.)
- [4] Abrate S. Vibrations of belts and belt drives [J]. Mechanism & Machine Theory, 1992, 27(6): 645-659.
- [5] 杨玉萍, 张小美, 沈世德. 同步带传动系统横向振动的分析研究 [J]. 机械设计, 2003, 20(1): 28-30. (Yang Yuping, Zhang Xiaomei, Shen Shide. Analysis and research on the transverse vibration of synchronous belt transmission system [J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(1): 28-30.)
- [6] 凌桂龙. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012. (Ling Guilong. ANSYS Workbench 13.0 from beginner to mastery [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.)
- [7] Chiu J T, Lin Y Y. Modal analysis of multi-layer structure for chemical mechanical polishing process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1-2): 83-91.
- [8] 胡权威, 乔立红, 张洪伟. 薄壁结构件铣削参数有限元正交优势分析及优化 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 176-184. (Hu Quanwei, Qiao Lihong, Zhang Hongwei. Optimization of Thin-walled Part Milling Parameters Based on Finite Element and Orthogonal Dominance Analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 176-184.)
- [9] 成大先. 机械设计手册(第3卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. (Chen Daxian. Handbook of mechanical design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.)
- [10] 张传智. 同步带用材料的现状和发展 [J]. 特种橡胶制品, 1997, 18(1): 11-13. (Zhang Chuanzhi. Present State and Development on Materials Applied to Synchronous Belt [J]. Special Purpose Rubber Products, 1997, 18(1): 11-13.)
- [11] 许志杰, 吴运新. 最小二乘复频域法实复系数矩阵的分析 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(3): 21-25. (Xu Zhijie, Wu Yunxin. Analysis of real and complex coefficient matrices using least-square complex frequency domain method [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(3): 21-25.)
- [12] Peeters B, Auweraer H V D, Guillaume P, et al. The polyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation [J]. Shock and Vibration, 2004, 11(3-4): 395-409.
- [13] 刘宁, 苏中. 圆杯型陀螺振子特性的仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1657-1662. (Liu ning, Su zhong. Simulative analysis on vibrator's characteristics of cupped wave gyro [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1657-1662.)