

基于粒子群优化五阶段 S 曲线加减速控制算法

刘志峰¹, 张 森¹, 蔡力钢¹, 杨建武¹, 许 博¹, 徐 鹏²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 贝加莱工业自动化有限公司, 北京 100028)

摘 要: 针对同步带传动印刷机启动中的扭振问题, 建立了传动带系统的数学模型, 通过分析模型找出引起扭振的主要原因, 且搭建同步带传动试验平台对扭振现象进行研究. 采用五阶段 S 曲线加减速方法对电机启动输入信号进行规划来抑制系统扭振, 并提出运用粒子群优化算法, 解决了规划五阶段 S 曲线参数选取困难的问题. 通过仿真试验和试验平台验证可行性, 证明了优化后的五阶段 S 曲线输入信号避开了谐振频率, 在较小的牺牲同步带系统动态性能的同时大幅度抑制扭振.

关键词: 同步带传动印刷机; 五阶段 S 曲线; 粒子群算法

中图分类号: TP 273+.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)05-0641-08

doi: 10.11936/bjutxb2014060067

Five-phase S-curve Control Method Based on Particle Swarm Optimization

LIU Zhi-feng¹, ZHANG Sen¹, CAI Li-gang¹, YANG Jian-wu¹, XU Bo¹, XU Peng²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Mr Calais Industrial Automation Co., LTD, Beijing 100028, China)

Abstract: To solve the problem of the torsional vibration that the startup of synchronous belt transmission printers, a mathematical model of the belt system was established, the main cause of torsional vibration through the analysis of model was found, and the phenomenon of torsional vibration through the synchronous belt transmission test platform that has been established was studied. To suppress the system torsional vibration, five-phase S-curve acceleration and deceleration method was used to plan input signals in the motor starting, and the difficult problem of S-curve parameters selection was solved by using of particle swarm optimization algorithm. The feasibility of the algorithm were verified through the simulation test and the test platform. Results show that the optimized S-curve avoids resonance frequency of the input signal that is close to resonant frequency, and losses the dynamic performance of synchronous belt system, meanwhile suppress torsional vibration significantly.

Key words: synchronous belt transmission printers; five-phase S-curve; particle swarm optimization

随着印刷机械的发展,对设备的稳定性和套印精度有了更高的要求. 由于印刷机在传动时采用了同步带传动,同步带是由橡胶、芳纶绳等复合材料成型,低速运行时刚度较小,造成了印刷机系统在启动、变速和受到外界机械扰动时发生扭转振动^[1].

扭振对机械系统具有很大的破坏性,提高轴的疲劳损伤,降低使用寿命,影响系统安全可靠运行. 目前,解决启动中振动问题主要有3种方法:陷波滤波器法、输入整形方法和速度曲线规划算法,其中曲线规划是运动控制器最常用的算法之一.

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAF13B00)

作者简介: 刘志峰(1973—),男,教授,主要从事数字化设计与制造、制造信息化与信息管理系统方面的研究, E-mail: lzf@bjut.edu.cn

速度曲线规划主要包括梯形曲线、S曲线、指数型、三角函数、高阶多项式规划方法。由于S曲线实现简单、效率高,同时可以大幅减小机械系统振动,使其在数控系统中得到了广泛的应用。Rew等^[2]在传统S曲线的基础上提出了一种快速无振的非对称S曲线规划方法。石川等^[3]总结了8种S曲线可能出现的加减速方式。Nguyen等^[4]提出了以多项式和三角函数作为基函数的曲线规划时间中最优的方法。郭新贵等^[5]利用三角函数为基函数构建一种用于高速进给的加减速曲线。Meckl等^[6]证明了三阶或更高阶的曲线规划由于其运动快速性和较小的残余振动可以在实际工程中被应用。穆海华等^[7-8]给出了三阶、四阶点对点曲线规划的通用算法,并证明了其有效性和可靠性。综合轨迹规划平稳性和实现难度方面的考虑,本文以S曲线为研究对象。

通过对同步带系统数学模型分析,找出扭振产生的原因,同时利用粒子群优化得到五阶段S曲线的最优参数。最后,运用PMAC卡控制的同步带试验台进行试验验证,过程如下:

1) 通过模型辨识建立驱动器、电机与机械系统的传递函数。

2) 运用粒子群算法优化出五阶段S曲线加减速参数。

3) 在PMAC卡中规划五阶段S曲线,把优化的曲线参数转化成PMAC控制卡中规划曲线的加减速时间和速度参数。

对从负载端的尾部编码器采集的振动评估信号进行分析,证明了通过粒子群优化的S曲线输入信号避开了谐振频率,在较小的牺牲动态性能的同时大幅度抑制系统扭振。

1 同步带传动的数学模型

BR624 四开四色平版印刷机如图1所示。同步



图1 印刷机上的同步带
Fig.1 Belt in the printer

带传动的力学模型如图2所示。在忽略阻尼的情况下的数学模型简化为

电机

$$T_e - T_1 = J_g \ddot{\theta}_g \quad (1)$$

负载

$$\begin{cases} T_1 = K(\theta_g - \theta_l) \\ J_l \ddot{\theta}_l = K(\theta_g - \theta_l) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_e 、 T_1 分别为电机轴、主动轮输出转矩, $N \cdot m$; J_g 、 J_l 分别为主动轮、从动轮转动惯量, $kg \cdot m^2$; θ_g 、 θ_l 和 θ_r 分别为主动轮、负载转动角度和转角差, rad ; K 为扭转刚度, $N \cdot m/rad$ 。

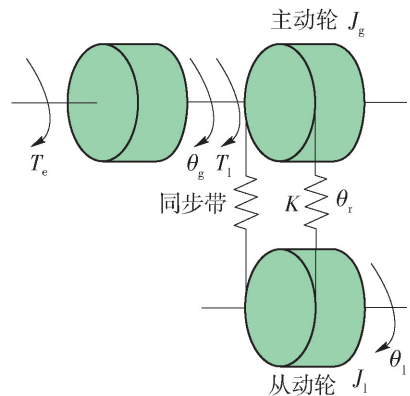


图2 同步带传动力学模型

Fig.2 Synchronous belt transmission mechanics model

系统传递函数方框如图3所示。

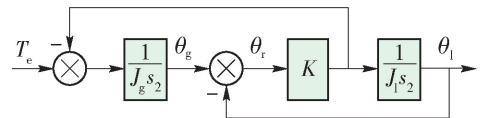


图3 同步带模型传递函数框

Fig.3 Belt model transfer function block

根据公式推导,得到电机转矩与其输出位置之间的关系为

$$\theta_g = \frac{J_l s^2 + K}{J_g s^2 (J_l s^2 + K) + K J_l s^2} T_e \quad (3)$$

电机位置与负载位置之间的关系为

$$\theta_l = \frac{K}{J_l s^2 + K} \theta_g \quad (4)$$

系统负载端的共振频率为

$$\omega_g = \sqrt{\frac{K}{J_l} \left(1 + \frac{J_l}{J_g}\right)} \quad (5)$$

由于印刷机系统中同步带适用于远距离的传动,并且其刚度较低、负载质量大,即 K/J_l 很小;同时随着近年来驱动器性能提高,为了得到更快的

响应速度,电机具有很高的转动惯量 J_g ,导致 J_1/J_g 很小,如式(5)所示,这样就导致整个机械系统中存在一个较低的共振频点 ω_g ,在启动变速过程中会激发残余振动,经历一个长时间的稳定调节过程.

目前,对低频振点抑制效果较好的有3种方法:轨迹规划方法、陷波滤波器法和脉冲整形法.其中的轨迹规划方法已经有成熟的技术,在数控系统中得到了广泛的应用,本文在此基础上对曲线参数的选取做了改进,优化出最适合系统的轨迹规划参数.

2 S曲线加减速算法

S形曲线克服了梯形曲线产生冲击的缺点,通过改变加速度起步阶段,柔化起始速度,来保证电机性能充分发挥,减小了启动冲击.一条五阶段S曲线^[9]包括:加加速、减加速、匀速、加减速和减减速.在起始和终止速度相等的情况下建立对称五阶段S曲线,且加速度在起始点、减加速末尾、加减速开始和减减速末尾为0,必须满足加加速、减加速、加减速、减减速这4个时间段相等,如图4所示.

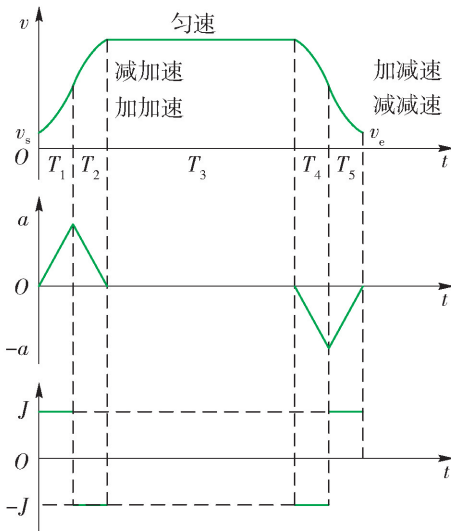


图4 五阶段S曲线
Fig. 4 Five-phase S-curve

图4中, v_s 、 v_e 分别为起始和终止速度; J 为加加速度; T_i ($i = 1, 2, \dots, 7$)为各阶段运行的时间,即 $T_1 = T_2 = T_4 = T_5 = T$. T 是由曲线的最大速度与起始速度之差,以及加加速度确定的.根据已知条件,利用加速度、速度对加加速度的积分关系,可以得到加速度 a 、速度 v 分别为

$$a(t) = \begin{cases} Jt & t \in [0, T] \\ 2Jt - Jt & t \in [T, 2T] \\ 0 & t \in [2T, 2T + T_3] \\ 2Jt - J(t - T_3) & t \in [2T + T_3, 3T + T_3] \\ -4Jt + J(t - T_3) & t \in [3T + T_3, 4T + T_3] \end{cases} \quad (6)$$

$$v(t) = \begin{cases} v_s + \frac{1}{2}Jt^2 & t \in [0, T] \\ v_s - Jt^2 + 2Jt - \frac{1}{2}Jt^2 & t \in [T, 2T] \\ v_s + Jt^2 & t \in [2T, 2T + T_3] \\ v_s - Jt^2 + 2Jt(t - T) - \frac{1}{2}J(t - T)^2 & t \in [2T + T_3, 3T + T_3] \\ v_s - 4Jt^2 + 3Jt(t - T) - \frac{1}{2}J(t - T)^2 & t \in [3T + T_3, 4T + T_3] \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可以看出,已知起始速度,如需得到匀速时速度,即曲线运行的最大速度,只要确定加加速度幅值 J 和时间 T 即可.

3 粒子群算法及五阶段S曲线优化

为了抑制印刷机启动振动,采用五阶段S曲线规划输入信号,由于过去是根据经验设置曲线参数,无法规划出合理的曲线,故提出了一种采用粒子群算法对五阶段S曲线参数进行优化的方法,从而得到最小程度激发残余振荡的S曲线.

3.1 粒子群算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法属于群智能算法的一种,其基本思想是在搜索空间内初始化一群具有位置和速度的粒子,每个粒子的位置都是一个潜在的解,将其代入一个适应度函数得到适应度值来评价粒子的优劣.每个粒子在搜索空间内飞行时,其位置变动由速度变量的方向和大小确定,而速度变量由粒子当前自身最优解 (P_i^k) 和整个粒子群当前最优解 (P_g^k) 确定.

3.1.1 算法流程及公式

假定一个由 m 个粒子构成的群体在 D 维空间中飞行寻找最优解,粒子 i 在 t 时刻的属性如下:

位置

$$x_r^k = (x_{r1}^k, x_{r2}^k, \dots, x_{rd}^k) \quad (8)$$

式中 $x_r^k \in [L_D, U_D]$, L_D 、 U_D 分别为搜索空间的上下限,适应度函数根据位置矢量得到适应度值判断粒子的优劣.

速度

$$v_r^k = (v_{r1}^k, v_{r2}^k, \dots, v_{rd}^k) \quad (9)$$

式中 $v_r^k \in [v_{\min}, v_{\max}]$, v_{\min} 、 v_{\max} 分别为最小、最大的搜索速度。

此刻,粒子的自身最优位置和整个粒子群当前最优位置分别为

$$p_r^k = (p_{r1}^k, p_{r2}^k, \dots, p_{rd}^k, \dots, p_{rd}^k) \quad (10)$$

$$p_g^k = (p_{g1}^k, p_{g2}^k, \dots, p_{gd}^k, \dots, p_{gd}^k) \quad (11)$$

式中 $d=1, 2, \dots, D$ 。

粒子在迭代优化过程中更新位置和速度,此粒子在 $i+1$ 时刻速度和位置更新公式为

$$\begin{cases} v_{rd}^{k+1} = v_{rd}^k + c_1 r_1 (p_{rd}^k - x_{rd}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{rd}^k) \\ x_{rd}^{k+1} = x_{rd}^k + v_{rd}^{k+1} \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_1 、 r_2 在 $[0, 1]$ 区间随机均匀分布,以保持粒子群多样性; c_1 、 c_2 称为学习因子,通常取值为 2。

基本粒子群算法流程如图 5 所示。

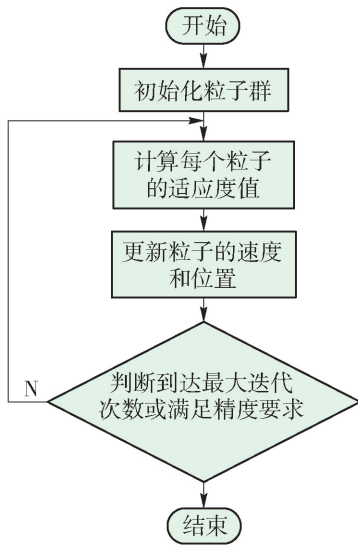


图 5 基本粒子群优化算法流程

Fig. 5 PSO algorithm process

为了调节粒子群算法的搜索能力,提高搜索效率,对速度迭代公式引入惯性因子 ω ,其他公式不变。

$$v_{rd}^{k+1} = \omega v_{rd}^k + c_1 r_1 (p_{rd}^k - x_{rd}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{rd}^k) \quad (13)$$

3.1.2 适应度函数的构建

适应度函数^[10]的构建直接影响着寻优结果,合适的适应度函数可以准确地反映出系统的性能特征,从而得到更好的优化参数。

为了使系统得到满意的控制性能,将上升时间 t_r 、超调量 M_p 、系统误差 e 、控制能量 u 以各种形式

植入适应度函数中以保证系统的快速性、稳定性、准确性,具体措施是在平方误差积分准则指标基础上补充了控制输入的绝对值,为了避免超调,采用了惩罚功能,一旦超调,超调量作为优指标项,并且为了加快响应速度,对时间项也加入了惩罚函数。若在指定仿真周期内没有达到上升时间, $f(t_r)$ 为一较大的惩罚函数值;若达到上升时间, $f(t_r)$ 取值为 t_r ,具体定义为

$$f(t_r) = \begin{cases} k & \text{false} \\ t & \text{true} \end{cases} \quad (14)$$

适应度函数可表示为

$$J = \int_0^\infty (\eta_1 |e(t)| + \eta_2 |u(t)| + \eta_3 |M_p|) dt + f(t_r) \quad (15)$$

式中: η_1 、 η_2 为权值; η_3 为惩罚因子。

3.2 粒子群算法对五阶段 S 曲线优化

利用粒子群算法对五阶段 S 曲线的参数进行优化设计,即优化式中的加加速度幅值 J 和时间 T ,其过程如图 6 所示。

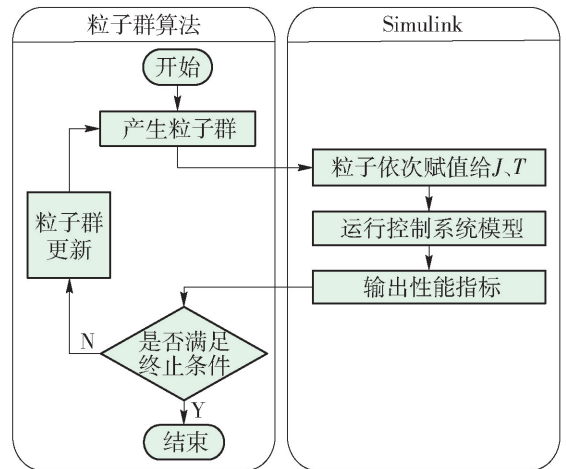


图 6 粒子群对五阶段 S 曲线优化算法流程

Fig. 6 Five-phase S-curve control method based on the PSO process

图 6 中,粒子群算法与 Simulink 模型运用粒子(即式(7)中的加加速度幅值 J 和其时间 T)和该粒子对应的适应度值(即控制系统的性能指标)交换信息。优化过程如下:将算法初始化粒子群以及迭代更新后的粒子参数依次赋值五阶段 S 曲线 J 、 T ,然后运行控制系统的 Simulink 模型,得到这组参数的性能指标,此性能指标传递到算法中作为粒子的适应度值,最后判断是否可以退出算法。其中五阶段 S 曲线的规划如图 7 所示,将 J 、 T 输入 Timer 模块,规划出加加速度的时间和幅值,通过二次积分得

到五阶段S曲线。

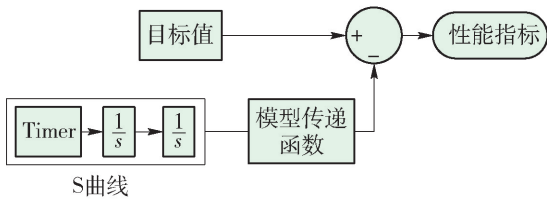


图7 Simulink下的优化模块

Fig.7 Optimization module in Simulink

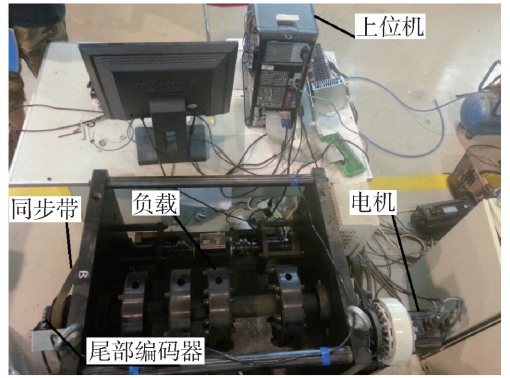


图8 同步带传动试验台

Fig.8 Belt transmission platform

粒子群对S曲线优化具体流程如下:

1) 根据速度、位置公式以及经验,设置相关参数、初始化粒子群,包括确定粒子群的数目 m ,搜索空间范围,搜索空间维数 D ,学习因子 c_1, c_2 ,惯性权重范围,随机产生所有粒子的位置和速度。

2) 粒子进入 Simulink 模块,通过适应度函数的仿真模型,输出性能指标,即适应度值,根据适应度值确定粒子当前和全局最优 P_r^k 和 P_g^k 。

3) 对每一个粒子,将其适应度值与该粒子所经历过的最优位置 P_r^k 的适应度值进行比较,选择适应度值较好的作为当前的 P_r^k 。

4) 对每一个粒子,将其适应度值与整个粒子群所经历过的最优位置 P_g^k 的适应度值进行比较,选择适应度值较好的作为当前的 P_g^k 。

5) 如果没有满足终止条件,按照粒子速度及位置更新公式,对粒子的速度及位置进行更新。

6) 若达到适应度值下限和预设的迭代次数,则退出算法,输出优化结果。

表1 元件参数

Table 1 Component parameters

序号	元件名称	参数
1	电机型号	凯奇 140NYS-M
2	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000
3	额定转矩/($N \cdot m$)	12.8
4	额定功率/kW	4
5	额定电流/A	9
6	瞬时最大电流/A	49.5
7	驱动器型号	CSD-DH-16
8	尾部编码器分辨率	22800 pluse/rad
9	控制系统	PMAC 控制卡
10	采样频率/Hz	75

4 试验平台搭建与验证

4.1 试验平台

为了模拟印刷机上的同步带传动,构建了含负载同步带传动系统,平台主要由3部分构成:控制系统、机械系统和监测装置,如图8所示,主控系统采用 PMAC 控制卡,机械系统主要由电机、同步带和质量块组成。监测装置由控制卡发出的信号和尾部编码器反馈组成,其具体参数如表1所示。

为了与实际情况一致,采用的是半闭环控制,其具体流程如图9所示。首先调节控制卡的PID参数,并在试验过程中保持不变,本文调节的参数为 $K_p = 233\ 924$, $K_i = 0$, $K_d = 4\ 500$,通过上位机编写程序下载到控制卡中,控制卡根据程序与电机端速度环反馈信号规划电压,作用在驱动器上,进而规划出电机S曲线,同时采集尾部编码器信号对S曲线进行评估。

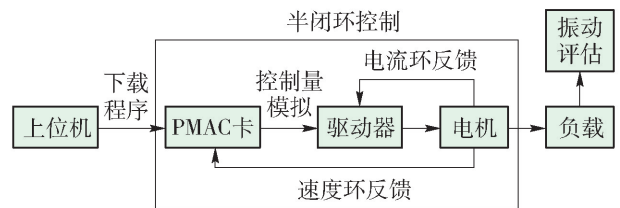


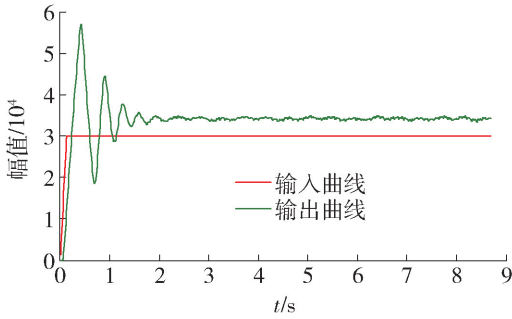
图9 控制流程

Fig.9 Control flow chart

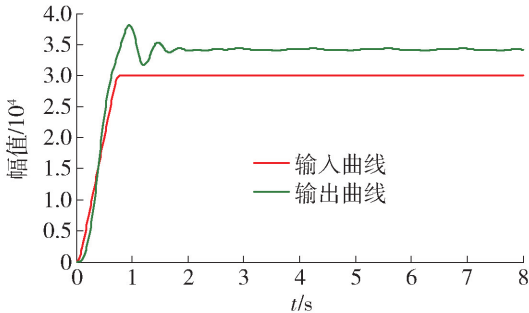
4.2 机械系统模型

采用 MATLAB 软件的系统辨识模块构建传递函数,包括驱动器、电机模块和机械系统模块。

设置 PMAC 卡加速时间 $T_a = 1\ s$,幅值为 30 000 脉冲/s 的尽量接近阶跃信号的 T 型输入曲线,采集输入曲线和尾部编码器反馈的输出曲线,如图 10(a)所示;将输入输出信号通过同一个滑动平均滤波器滤去噪音,如图 10(b)所示。



(a) T型曲线下输入输出曲线



(b) 滤波后输入输出曲线

图10 T型曲线下B滤波后的输入、输出曲线

Fig. 10 Input and output curve after filtering the original collection

然后将滤去噪音的输入输出信号导入系统辨识模块,辨识出相似度最高的曲线为93.54%,如图11所示. 辨识出的整个系统传递函数公式为

$$G(s) = \frac{114.95}{s^2 + 2.37s + 100}$$

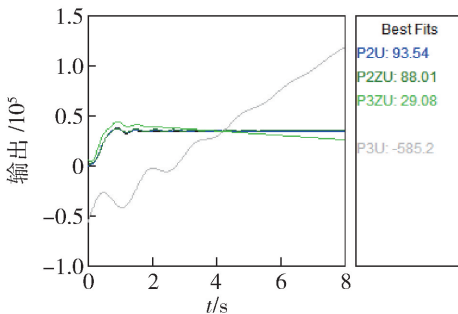


图11 辨识曲线相似度

Fig. 11 Identification curve similarity

把原始输入信号通过传递函数得到仿真的输出曲线与原始输出曲线对比,如图12所示,可以看出相似度较高.

4.3 粒子群算法对参数优化

随机设置目标值,若目标输出值为50 000脉冲/s,运用MATLAB软件编写的粒子群优化算法对S曲线的加加速度幅值 J 和时间 T 进行离线优化.

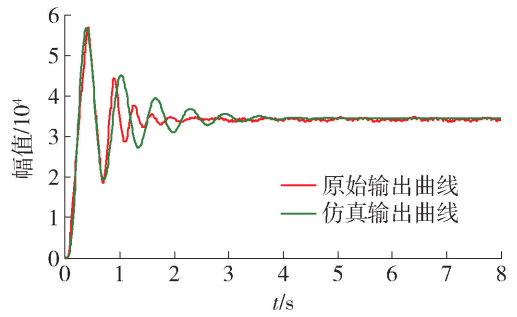


图12 仿真曲线与原始曲线对比

Fig. 12 Simulation and original curves comparison chart

设置粒子群优化算法参数:迭代次数为30,惯性因子 $\omega = 0.4$,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$,维数为2,群规模为50,最小适应度值为10,根据采集的原始信号可以看出系统在启动4 s后已趋于稳定,又因为时间 T 不能为0,故给定 T 的取值为 $(0, 2]$. 时间 T 的选取比较重要,因为 J 的取值范围过大会使粒子群早熟收敛,陷入局部极小值,然而过小的取值范围会人为地漏掉最优解,根据系统的模型来估算信号的延时时间,故给定 J 的取值范围为 $[0, 10\ 000]$.

经过粒子群优化后, $J = 38\ 564$ 脉冲/ s^3 , $T = 1.062$ s. S曲线的适应度值曲线如图13所示,可以看出适应度值在迭代优化过程中明显下降,参数达到最优解.

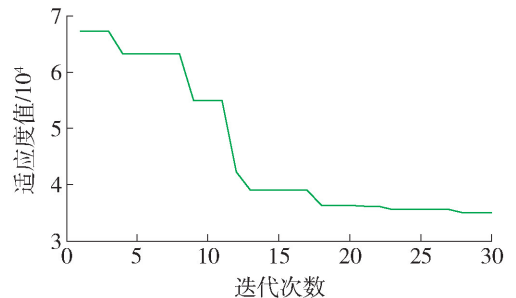


图13 适应度函数

Fig. 13 Fitness function

把优化参数代入仿真系统,得到的S曲线如图14(a)所示,S曲线在时间 $t = 2.124$ s时进入匀速运动,匀速运动幅值 $v = 43\ 490$ 脉冲/s. 通过传递函数仿真后曲线如图14(b)所示,可以看出曲线匀速运动幅值 $v = 50\ 000$ 脉冲/s,并且机械系统在启停过程中的扭振得到了很好的抑制.

4.4 试验验证

根据仿真优化,当机械系统目标输出值为50 000 脉冲/s, S曲线的输出值需要达到43 490 脉冲/s. 设置PMAC卡加速时间 $T_a = 1$ s,输出幅值为

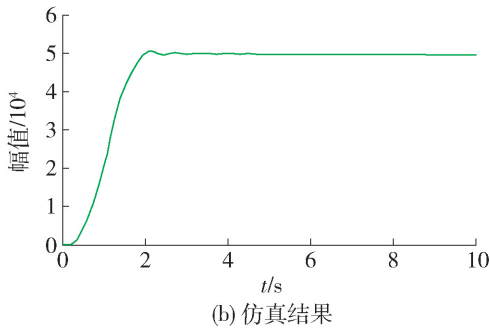
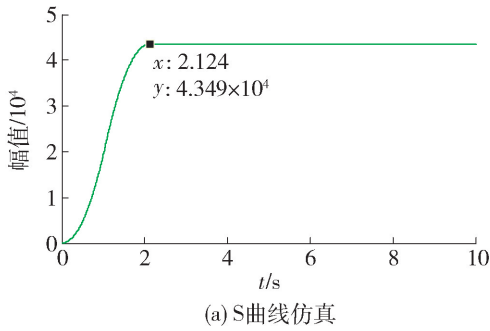


图 14 粒子群优化的 S 曲线与系统输出曲线

Fig. 14 S-curve based PSO and simulation output curve

43 490 脉冲/s 的 T 型输入曲线,采集输入曲线和尾部编码器反馈的输出曲线,如图 15(a)所示. 可以看出启动过程中振动峰值达到 83 000 脉冲/s,最大

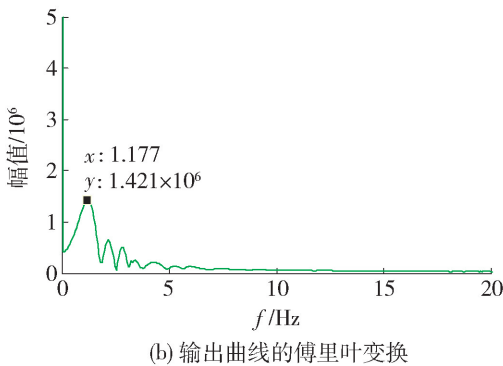
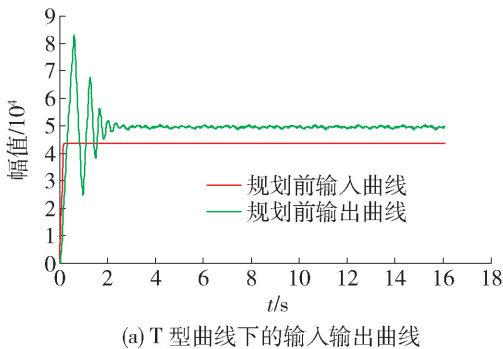


图 15 T 型输入曲线下的输入输出曲线以及输出曲线的傅里叶变换

Fig. 15 T-shaped input, output and Fourier transform of output curves

超调量为 86%,调整时间为 1.8 s.

对反馈曲线进行傅里叶变换,其曲线如图 15(b)所示,可以看出振荡产生的主要原因是因为存在一个 1.177 Hz 左右的低频振点,证明了由于存在共振点,系统振荡严重.

运用 PMAC 控制卡输入规划的 S 曲线,控制卡中设置 S 曲线的参数有 3 个:加速时间 T_a 、S 曲线加速时间 T_s 和匀速时速度 F . 根据仿真结果规划五阶段 S 曲线,设置 $T_a = 2T_s = 2T = 2.124$ s, $F = v = 43 490$ 脉冲/s. 将参数加载到控制卡中,则 PMAC 卡规划的 S 曲线与尾部编码器输出信号如图 16(a)所示,并对输出曲线进行傅里叶变换,如图 16(b)所示.

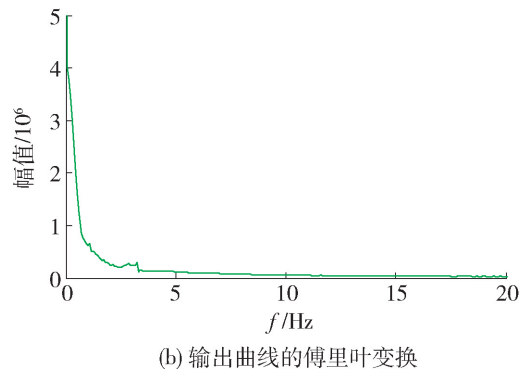
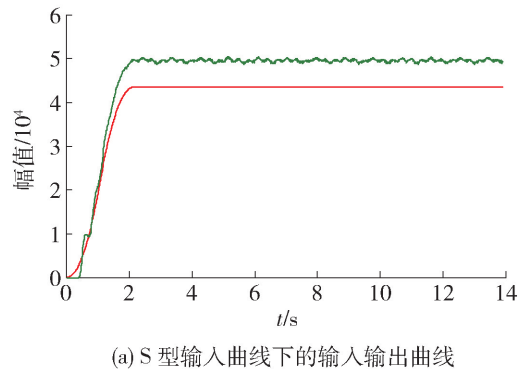


图 16 S 型输入曲线下的输入输出曲线以及输出曲线的傅里叶变换

Fig. 16 S-shaped input, output and Fourier transform of output curves

根据采集信号曲线可以看出,系统输出终值为 49 500 脉冲/s,误差小于稳态信号的 5% 认为系统稳定,系统基本没超调,振荡得到了较好的抑制,但调整时间延长到 2.2 s,信号傅里叶变换后发现规划前的低频振点消除.

5 结论

1) 分析了印刷机产生扭振的原因,其中同步带

的使用是一个重要原因.

2) 通过对同步带传动系统分析,根据建立的数学模型,找出了振荡的原因是由于同步带系统存在较低的共振频点,且输入信号中含有的激励频率与系统固有频率接近,从而引起共振现象.

3) 提出了采用五阶段 S 曲线轨迹规划方法抑制系统振荡,并采用粒子群算法自动优化曲线参数.

4) 在试验平台上证明了同步带系统存在低频共振点,并验证了优化的 S 曲线的可行性,在较小的牺牲动态性能的同时使得机械系统基本没有超调,消除了低频共振点.

参考文献:

- [1] VALENZUELA M A, BENTLEY J M, LORENZ R D. Evaluation of torsional oscillations in paper machines sections [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 493-501.
- [2] REW K H, KIM K S. Using asymmetric S-Curve profile for fast and vibrationless motion [C] // International Conference on Control, Automation and Systems. New York: IEEE Industry Applications Society, 2007: 500-504.
- [3] 石川, 赵彤, 叶佩青, 等. 数控系统 S 曲线加减速规划研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1421-1425.
SHI Chuan, ZHAO Tong, YE Pei-qing, et al. Study on S-shape curve acceleration and deceleration control on NC system [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1421-1425. (in Chinese)
- [4] NGUYEN K D, CHEN I M, NG T C. Planning algorithms for S-curve trajectories [C] // Advanced intelligent mechatronics. New York: IEEE Industry Applications Society, 2007: 1-6.
- [5] 郭新贵, 李从心. 一种新型柔性加减速算法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(2): 205-207.
GUO Xin-gui, LI Cong-xin. A new flexible acceleration and deceleration algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(2): 205-207. (in Chinese)
- [6] MECKEL P H, ARESTIDES P B, WOODS M C. Optimized S-curve motion profiles for minimum residual vibration [C] // Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia: Pennsylvania, 1998: 2627-2631.
- [7] 穆海华, 周云飞, 严思杰, 等. 超精密点对点运动 4 阶轨迹规划算法研究 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2346-1354.
MU Hai-hua, ZHOU Yun-fei, YAN Si-jie, et al. Research on fourth-order profile planning algorithm for high accuracy point-to-point motion system [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2346-1354. (in Chinese)
- [8] 穆海华, 周云飞, 严思杰, 等. 超精密点对点运动三阶轨迹规划精度控制 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 132-138.
MU Hai-hua, ZHOU Yun-fei, YAN Si-jie, et al. Precision control of third-order profile planning for high accuracy point-to-point motion system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 132-138. (in Chinese)
- [9] 李晓辉, 邬义杰, 冷洪滨. S 曲线加减速控制新方法的研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(10): 50-53.
LI Xiao-hui, WU Yi-jie, LENG Hong-bin. Research on a new S-curve acceleration and deceleration control method [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(10): 50-53. (in Chinese)
- [10] 史永丽, 侯朝桢, 苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 433-436.
SHI Yong-li, HOU Chao-zhen, SU Hai-bin. Auto-disturbance-rejection controller design based on particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 433-436. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)