DOI:10.3969/j. issn. 1001 - 4551.2020.01.020

# 高速雕刻头的零相位误差跟踪控制研究\*

贾松涛,黄廉真,孙承刚

(广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510006)

摘要:针对凹版印刷电子雕刻制版设备中关键零部件的控制问题,对工作频率为8000 Hz 的雕刻头进行了零相位误差跟踪控制研究。基于 DSP 和 FPGA,开发了伺服刷新周期为1 μs 的实时运动控制平台,建立了双质量-弹簧系统动力学模型,采用扫频方法获得了系统幅频和相频响应特性;基于子空间方法,建立了精确数学模型,并基于系统数学模型,提出了采用低通滤波器限制控制器输出的零相位误差跟踪控制;通过仿真确定了低通滤波器带宽。研究结果表明:该控制器改善了系统的阶跃响应动态特性,提升了系统响应速度,系统上升时间减少了25 μs;并抑制了谐振振动,验证了该控制算法的有效性和工程可实现性。

关键词: 凹印制版; 雕刻头; 模型辨识; 零相位误差跟踪控制

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0103-04

# Zero phase error tracking control for high speed engraving system

JIA Song-tao, HUANG Lian-zhen, SUN Cheng-gang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problems of real time control of engraving system in engraving cylinder production equipment, zero-phase error tracking control method was studied for the 8 000 Hz working frequency engraving system. A real-time motion control platform with servo update time of 1 µs was developed based on DSP and FPGA, and a dual mass-spring system dynamics model was established for modeling. The sine sweep identification method was applied to obtain the amplitude and phase frequency response model, and an accurate mathematical model was established based on the subspace method. Based on the system mathematical model, a ZPETC with a low-pass filter to limit the controller output was proposed, and the low-pass filter bandwidth was determined by simulation. The result indicates that the step response dynamics is well improved, the rise time is reduced by 25 µs, and the resonant vibrations are well suppressed, the effectiveness and engineering reliability of the proposed control algorithm are demonstrated.

Key words: gravure print roller making; engraving system; model identification; zero phase error tracking control(ZPETC)

# 0 引 言

版辊是影响印刷质量的关键因素。版辊形式上有凸版、平板和凹版,其中凹版以其优良性能占据着市场主流<sup>[1]</sup>。凹版印刷制版方法包括:刻蚀、激光雕刻和电雕等几种方法。电雕制版方法发展于上世纪 50 年代,电雕制版有以下优点:(1)重复性强;(2)网点面积和深度可变,可以印制出色彩层次丰富、轮廓清晰、立体感和质感较强的印刷品;(3)成本低廉(满足一定产量)。电

雕制版仍然是应用最广泛的制版方法,目前最先进的国外雕刻头可达到12000 Hz,加工精度可达数微米。

电雕制版的关键技术之一是控制雕刻头,其基本原理是依靠洛仑兹力驱动刀杆带动金刚石刀尖切入辊筒表面的铜层,同时采用高刚度弹簧提供刀杆回复力,并采用 磁 流 体 衰 减 残 余 振 动。对于运 动 幅 度 +/-50 μm,加工频率 12 000 Hz 的雕刻头,其最大速度 3.77 m/s,最大加速度 28 424 g。

近年来,国内外研究者对相关领域进行了探讨。

文献[2-3]分别研制了工作频率 1 200 Hz、行程 60 μm和工作频率 1 800 Hz、行程 14 μm 的雕刻头;文献[4-5]研制了凹印雕刻软件系统,并对雕刻工艺进行了分析;文献[6]提出了对雕刻头进行滞后补偿和振动抑制,但具体算法和效果未知。

本文将对工作频率为 8 000 Hz 雕刻头系统进行模型辨识,建立数学模型,并基于该模型,设计出满足加工需求的零相位误差跟踪控制器,以减小系统上升时间,抑制超调和谐振,减小收敛时间,从而使被控系统获得更高的精度。

# 1 研究对象

实验用的雕刻头采用德国 HELL 公司 HelioSprint BC<sup>+</sup>型号产品。

雕刻头实验平台如图1所示。

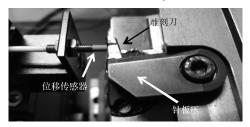


图 1 雕刻头实验平台

该雕刻头最高振动频率 9 000 Hz,最大雕刻深度 70 μm。控制系统采用固高科技公司基于 DSP 和 FP-GA 架构的总线型控制平台。系统的控制刷新周期 1 μs,电流环闭环带宽 25 000 Hz,额定电流 7 A,最大电流 20 A,电流波动小于 3 mA。位置反馈采用 Kaman 传感器,测量范围为 500 μm。

为实现高频响、足够输出力,以及高精度小位移输出,并不失一般性,雕刻头采用扭杆结构,其等效动力学模型如图 2 所示。

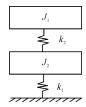


图 2 雕刻头等效动力学模型

由图 2 可见,雕刻头为典型的双质量-弹簧谐振系统。其动力学方程为:

$$\begin{cases} J_{1}\ddot{\varphi} + (k_{1} + k_{2})\varphi_{1} - k_{2}\varphi_{2} = 0 \\ J_{2}\ddot{\varphi}_{2} - k_{2}\varphi_{1} + k_{2}\varphi_{2} = 0 \end{cases}$$
 (1)

式中: $\varphi_i$ 一 第 i 段转动角度; $J_i$ 一 第 i 段转动惯量; $k_i$ 一 第 i 段转动刚度。

其中:i = 1,2。

### 2 模型辨识

为获取机电系统的模型,通常采用频域辨识的方法。在实物平台上,对开环控制的雕刻头,依次输入不同频率的正弦信号进行激励,同时采集雕刻刀附近位置的反馈信号;对所获得的时域正弦扫频数据进行离散傅立叶变换,得到信号的复数形式 x,其幅值和相角基于其实部 x<sub>R</sub> 和虚部 x<sub>I</sub> 获得,即:

$$\begin{cases} |x| = \sqrt{x_R^2 + x_I^2} \\ \arg(x) = \tan^{-1} \frac{x_I}{x_R} \end{cases}$$
 (2)

基于输入信号  $x_{v}$  和输出信号  $x_{y}$  的幅值和相角信息,可以获得系统的频率响应,即:

$$\begin{cases} A(\omega) = 20\log_{10}\left(\frac{x_{Y}}{x_{U}}\right) \\ \Phi(\omega) = \arg(x_{Y}) - \arg(x_{U}) \end{cases}$$
 (3)

合成所有频率点对应的幅值和相位信息,实验和 辨识模型对比如图 3 所示。

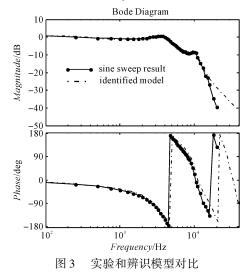


图 3 显示: 系统具有两个谐振频率, 分别为 3 500 Hz 和 10 100 Hz,符合上述双质量块 - 弹簧系统的动态特性。

基于子空间方法,本文对系统输入、输出信号进行分析<sup>[7]</sup>,计算了从控制器数字 DAC 输出到位移传感器的开环传递函数,即:

$$G = \frac{0.\ 000\ 450\ 1z^{-1}\ -0.\ 001\ 006z^{-2}\ +0.\ 000\ 102\ 4z^{-3}\ +0.\ 001\ 264z^{-4}\ -0.\ 001\ 058z^{-5}\ +0.\ 000\ 248\ 4z^{-6}}{1\ -4.\ 955z^{-1}\ +9.\ 824z^{-2}\ -9.\ 743z^{-3}\ +4.\ 834z^{-4}\ -0.\ 959\ 8z^{-5}}z^{-45}$$

### 3 零相位误差跟踪控制

零相位误差跟踪控制(ZPETC)最早由TOMIZUKA M<sup>[89]</sup>提出,用于解决离散非最小相位系统的已知轨迹的跟踪控制问题。零相位跟踪控制就是采用预见控制,利用已知的未来信息设计补偿器,使从目标输入到控制输出的相位差在全频率域内为0<sup>[10]</sup>。

开环 ZPETC 结构如图 4 所示。

$$C_{i}(z) \qquad U \qquad G(z) \qquad V$$

图 4 开环 ZPETC 结构

r - 输入指令;u - 控制信号;y - 系统输出; $C_r(z)$  - 零相位误差跟踪控制器;G(z) - 被控对象

设开环控制系统的离散域传递函数为:

$$G_{c} = \frac{z^{-d}B_{c}(z^{-1})}{A_{c}(z^{-1})}$$
 (5)

式中: d-滞后的伺服周期数。

 $B_c$  和  $A_c$  可表示为:

$$\begin{cases}
B_c(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \\
A_c(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}
\end{cases}$$
(6)

式中:m,n—对应分子和分母的阶数。

对于最小相位系统,由于可逆,其逆即为前馈控制器:

$$C_r = \frac{z^d A_c(z^{-1})}{B_c(z^{-1})} \tag{7}$$

对于非最小相位系统,为解决不稳定零点引起的 逆模不稳定,B可分解为:

$$B_c(z^{-1}) = B_c^a(z^{-1})B_c^u(z^{-1})$$
 (8)

式中: $B_c^a(z^{-1})$ —可接受的零点,由稳定零点组成的多项式; $B_c^u(z^{-1})$ —不可接受的零点,由临界稳定和不稳定零点构成的多项式。

此时,零相位误差跟踪控制器可设计为:

$$C_{r} = \frac{z^{d+s} A_{c}(z^{-1}) B_{c}^{u}(z^{-1})}{B_{c}^{u}(z^{-1}) \lceil B_{c}^{u}(1) \rceil^{2}}$$
(9)

其中:

$$B_c^u(z^{-1}) = b_{c0}^u + b_{c1}^u z^{-1} + \dots + b_{cs}^u z^{-s}$$
 (10)  
基于辨识模型设计的 ZPETC 结果为:

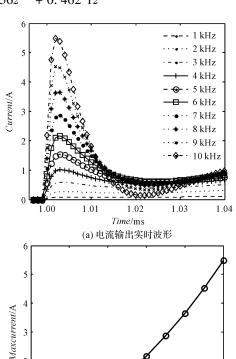
$$C_r = \frac{551.1 - 2\ 269z^{-1} + 3\ 127z^{-2} - 836.5z^{-3} - 1\ 832z^{-4} + 1\ 702z^{-5} - 442.9z^{-6}}{z^{-2} - 3.43z^{-3} + 4.324z^{-4} - 2.356z^{-5} + 0.462\ 1z^{-6}}$$
(11)

需要注意的是, ZPETC 能够实现对系统相位误差的理想补偿,补偿后的系统增益特性在中低频段近似为1。但是,为使系统在短时间内跟踪输入误差信号,需要驱动单元在短时间内输入相应信号,这对驱动单元的最大输出能力和输出带宽有较高的要求。

雕刻头的输入信号采用在稳定正弦波信号上叠加数字化图文信息后的直流信号。直流信号的大小决定所雕刻的网穴的深度。不同幅度的直流信号快速切换(即阶跃响应性能),是评估雕刻头性能的重要指标之一。理论上,为使系统完全复现输入信号,可按照零相位误差跟踪方法设计控制器,但会导致控制器的输出非常大。考虑到驱动器的最大输出能力,本文串联了一个低通滤波器。

不同滤波器对应的电流输出如图 5 所示。

图 5 中, 当补偿后的系统响应特性等同于7000 Hz低通滤波器时,输入幅值为1 A的阶跃响应信号,输出最大电流为2.9 A。考虑到输入7 A阶跃信号时,需要的最大输出电流超过了功放的上限,所以取6000 Hz作为低通滤器的截止频率。



(b) 电流输出最大值 图 5 不同滤波器对应的电流输出

Low pass filter bandwith/Hz

6 000

4 000

# 4 实验结果分析

阶跃响应的输入信号选用某雕刻图案中高频出现 的 11 μm 直流阶跃信号,阶跃控制效果如图 6 所示。

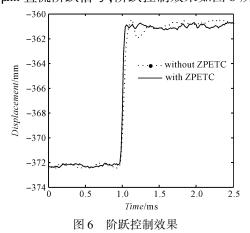


图 6 中,采用改进的 ZPETC 后,系统动态响应性能得有效改善,上升时间减少了约 25 μs;系统谐振频率导致的残余振动得到明显抑制,过冲和下冲基本消失,这也意味着工艺上的"双眼皮"现象得到了根除。虽然受建模误差、磁滞效应、非线性扰动等因素的影响,系统进入收敛误差带后会小幅波动,但其动态响应与 6 000 Hz 低通滤波器基本一致,达到了设计要求。

# 5 结束语

本研究探讨了工作频率 8 000 Hz 的凹印制版电子雕刻机中雕刻头的控制问题,通过动力学建模和正弦扫频辨识获得了频谱响应,并根据子空间方法获得了数学模型;引入低通滤波器限制了零相位误差跟踪控制器的最大输出,并通过仿真确定了低通滤波器的带宽。

阶跃实验(幅值 11 μm)结果表明:系统上升时间缩短了约 25 μs,过冲和下冲基本消失,系统能够在较短的时间内进入稳态响应,满足雕刻工艺对性能的要求。

#### 参考文献(References):

- [1] 王 强. 凹印制版技术[M]. 北京:印刷工业出版社, 2006.
- [2] 张 策. 高频响电-机械转换器的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源学院,2005.
- [3] 周 楠. 高频电-机械转换雕刻头的研制[D]. 哈尔滨:哈 尔滨工业大学机电工程学院,2017.
- [4] 刘 亮,何克晶,周照耀,等. 基于 CTP 技术的凹印制版雕刻机运动控制系统的研究与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(5):72-76.
- [5] 董望成,周照耀,刘 亮,等. 无软片凹印制版电子雕刻机 控制原理的研究[J]. 机床与液压,2013(17):44-46,52.
- [6] FANGMEYER D , WIECHERING C, LIBCKE B. Method for signal processing [P]. US: 6768561 B1,2004-07-24.
- [7] BORJAS S D M, GARCIA C. Subspace identification for industrial processes [J]. TEMA (S\u00e4o Carlos), 2011(12): 183-194.
- [8] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital controls [J]. **ASME Journal of Dynamic Systems**, **Measurement**, and **Control**, 1987(109):65-68.
- [9] HAACK B, TOMIZUKA M. The effect of adding zeroes to feedforward controllers [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of The ASME, 1991(13):6-10.
- [10] OHNISHI W, BEAUDUIN T, FUJIMOTO H. Preactuated multirate feedforward for a high-precision stage with continuous time unstable zeros[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2019,24(2):863-871.

「编辑:周昱晨]