

基于振动反馈的数字雕刻机进刀率 自动调整方法*

薛 东¹, 陈国定^{1*}, 姜陈炀²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江中控技术股份有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘要:雕刻机的加工精度和加工效率在很大程度上受进刀率参数的影响, 针对如何提高雕刻机加工精度和效率的问题, 将反馈控制技术应用到雕刻机进刀率的调整中, 开展了对雕刻机振动信号的研究, 分析了加工过程中 X 轴、Y 轴和 Z 轴 3 个方向的振动信号以及影响振动信号的因素, 以 S3C2410ARM 控制器为核心, 运用加速度传感器 A/D 采样技术和 Linux 编程语言, 建立了进刀率和 Z 轴振动信号之间的关系, 提出了一种基于振动反馈信号的自动调整进刀率方法, 结合步进电机的“S”型加减速控制, 取得了良好的控制效果。研究表明, 该进刀率自动调整方法可以提高雕刻机的加工效率, 同时保证加工精度。

关键词:数字雕刻机; 振动反馈; 进刀率; 自动调整

中图分类号: TH113.1; TH6; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1272-04

Automatic alignment method of digital engraving machine's feed rate based on vibration feedback

XUE Dong¹, CHEN Guo-ding¹, JIANG Chen-yang²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. SUPCON Group Co. Ltd., Hangzhou 310053, China)

Abstract: The processing precision and efficiency of engraving machine are greatly affected by the feed rate. Aiming at the improvement of the engraving machine's work efficiency without decreasing the accuracy, the feedback control techniques of engraving machine's feed rate adjustment were investigated. The vibration signals of axis X, axis Y and axis Z of during working process as well as the influence factors were analyzed. Based on ARM S3C2410 controller, the acceleration sensor A/D sampling technique and the Linux programming language were used, the model of feed rate and vibration signals of axis Z were established. Combined with the stepping motor's "S" type speed control, a method based on the vibration as feedback signals to automatically adjust the feed rate was presented. The results indicate that this method can improve the processing efficiency of the engraving machine, while ensuring the precision.

Key words: digital engraving machine; vibration feedback; feed rate; automatic alignment

0 引 言

振动是评定工业机器的总体强度和可靠性的一项重要指标^[1], 正在越来越多地被用来检测机器的运行

情况以及各类肉眼难以观察的故障, 在航空、铁路、汽车和船舶等工业领域有着广泛的应用^[2]。

雕刻机平台的振动伴随着整个加工过程, 振动的剧烈程度往往与雕刻机进刀率的设置和加工材料特性密切相关。能否设置适宜的进刀率在很大程度上影响

收稿日期: 2012-05-09

基金项目: 浙江省新苗人才计划资助项目(2011R403065)

作者简介: 薛 东(1989-), 男, 江苏扬州人, 主要从事电力电子技术方面的研究. E-mail: 361737300@qq.com

通信联系人: 陈国定, 男, 博士, 教授, 硕士生导师. E-mail: gdchen@zjut.edu.cn

着加工的效率和精度。同时,由于这类参数的设置对操作者的经验要求较高,阻碍了数字雕刻机在更多领域的推广使用。

由于加工过程中产生振动的来源较多,本研究在实验的基础上,分别研究磨削加工中 3 个方向的振动特征,通过对比分析找出振动的主要方向及振动主要来源,并提出相应的控制算法,通过振动反馈信号实现进刀率的自动调整,在保证精度的同时提高雕刻机加工效率。

1 基于振动反馈的闭环控制

振动信号是雕刻机工作过程中最明显也是最直接反映雕刻机运行状态的信号,能够很好地反映雕刻机进刀率与加工材料的适应程度。同样研究者也可以通过振动信号判断雕刻机当前进刀率设置是否适宜,并根据一定的闭环算法实时调整进刀率,这将解决由经验缺乏造成的进刀率参数设置难的问题。

振动传感器的选择是振动测试中首先考虑的问题。由于压电加速度传感器在很宽频率范围内具有平直性,经积分后可得到速度和位移,并且具有较大的动态范围,故实验中选取飞思卡尔 MMA7631 三轴加速度传感器对振动信号进行采集^[3]。

雕刻机以不同的进刀率对不同的材质进行加工得到的振动图形如图 1 所示,以不同进刀率(分别设定 30% 和 50%)切削同一均匀材质时的运行结果如图 1(a)、1(b)所示。进刀率越大,主轴切削量越大,因此切割阻力增强而引起平台振动加剧。

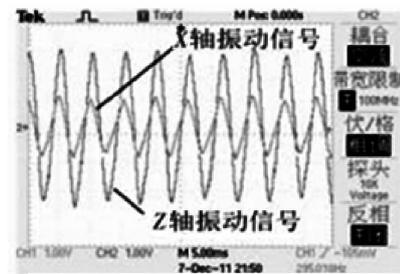
雕刻机切割密度不均匀(或含有杂质)的材质时,得到的振动波形如图 1(c)所示,与图 1(a)和图 1(b)比较可以发现其振幅很不稳定。因为当刀具切削到材料中不同密度的区域时,所受阻力也随之变化,因而造成振幅的不断改变。由此可以得出以下结论:

(1) 均匀材质中,雕刻机的振动幅度与进刀率成正相关;

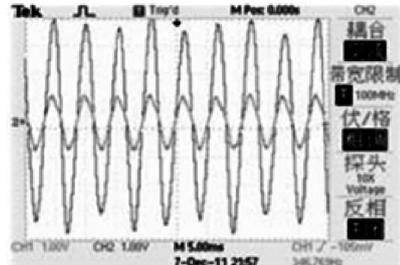
(2) 可以通过雕刻机振幅的变化情况判断材质的密度分布是否均匀;

由于雕刻密度不均匀材质的过程中振动情况非常复杂^[4],本研究所讨论的方法仅在均匀材质的条件下通过验证。

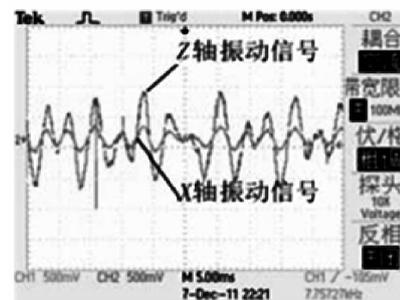
本研究在实验中发现,不论雕刻机的主轴是在 X 方向平移、还是在 Y 方向平移或者沿着斜线行进, Z 轴的振动信号总是能够真实地反映雕刻机平台的振动强度,而振动传感器 X 轴向或者 Y 轴向值只能确切反映



(a) 低进刀率下振动强度采样



(b) 高进刀率下振动强度采样



(c) 非均匀材质下振动强度采样

图 1 雕刻机工作过程中振动信号采样

沿着自身方向平移时的振动信号。

对刀头进行受力分析,如图 2 所示。其中, $\vec{F}_{X/Y}$ 为 X 轴与 Y 轴的合力。所以 X 轴和 Y 轴方向的受力不能单独反映 F 的大小,而 Z 轴的受力则可以单独反映 F 大小。为了提高效率,本研究只对 Z 轴方向的振动信号进行检测,而其反馈参数也应该自动根据刀头的斜角 θ 对应设置。

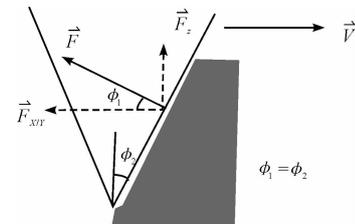


图 2 刀头的受力分析

实验中笔者采用 PID 算法实现闭环控制,振动强度 x_{out} 取该时刻前连续 10 个振动周期的波峰波谷的平均值,本研究选取适宜的振动强度作为设定值 x_{in} ,且该参数通过实验设定。

为了保证雕刻机运行的稳定性,比例系数不宜设置过大,避免出现频繁的加速、减速交替过程^[5],同时可以通过适度增大积分系数来减小振荡。步进电机的转速不能无限制增大或减小,研究者应根据电机特性设置速度上限和下限。由于该系统进刀率调节是一个相对较慢的过程,不允许系统的超调过大,本研究设置了单次进刀率增加量的上限,设置加、减速的 Δv 死区,当 Δv 在死区范围内时保持当前进刀率运行,避免频繁加、减速。

2 步进电机加减速控制

进刀率的自动调整意味着步进电机的速度要经常发生改变,而要避免在这个过程中步进电机由于加速度和速度的突变引起雕刻机的振动,需要采用有效的加减速方式,所以本研究采用了“S型”加减速控制^[6]。

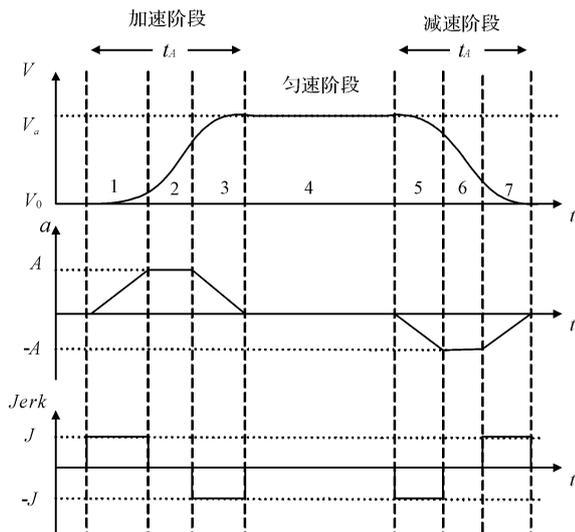


图 3 “S型”加减速的原理

“S型”加减速指的是在加速或减速的过程中,步进电机加速度的导数 $Jerk$ 大小不变,即 $Jerk = da/dt = c$,为常数^[7-8](如图3所示)。通过对 $Jerk$ 的控制,可以保证雕刻机在加速或减速的过程中受到的冲击较小。“S型”加减速在雕刻机中的实现主要分为3个阶段:变加速-恒加速-变加速。在变加速区域, $Jerk = c$ (常数);在恒加速区,加速度不变,即 $Jerk = 0$ 。

“S型”加减速控制的离散化实现如图4所示,本研究将加速(或减速)过程分为 N 段,计算每一段的步进周期,在步进信号中断中将下一周期的时间参数装入定时器寄存器。这样即实现了“S型”加减速控制离散化^[9]。

系统应保证每一次加速或减速过程完全实现,也

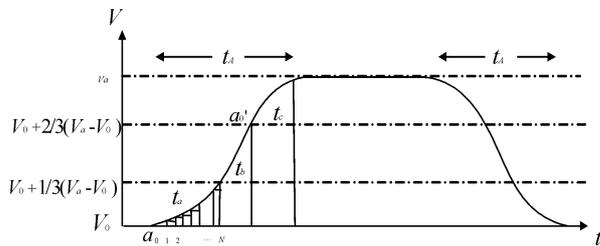


图 4 “S型”加减速控制的离散化

就是说,要直到加、减速过程完成才能将 PID 算法获得的新进刀率赋予系统,进入下一个加速或减速环节,以确保加减速过程不会被打断或更改,有利于提高系统的稳定性,同时也方便软件实现。

在一次加速过程中,速度从 V_0 提升到 V_a , $Jerk = J$ (根据雕刻机平台的机械特性设定),实现该加速过程的时间为 t ,每个离散化点间的时间长度为 T ,则有:

$$\Delta v = v_a - v_0 \tag{1}$$

$$a_N = a_{N-1} + JT \tag{2}$$

$$v_N = v_{N-1} + a_{N-1} \cdot T \tag{3}$$

$$a_0 = 0 \tag{4}$$

可得:

$$a_N = N \cdot JT \tag{5}$$

令:

$$\Delta v_d = \frac{1}{3}(v_a - v_0) = \frac{1}{3}\Delta v \tag{6}$$

则有:

$$\Delta v_d = \sum_{k=0}^{N-1} k \cdot JT^2 = \frac{[0 + (N-1)] \cdot N}{2} \cdot JT^2 \tag{7}$$

可得:

$$N \cdot (N - 1) = \frac{2\Delta v_d}{JT^2} \tag{8}$$

由于:

$$(N - 1)^2 < \frac{2\Delta v_d}{JT^2} < N^2 \tag{9}$$

所以对 $\sqrt{2\Delta v_d/JT^2}$ 向上取整,则为 N 的值^[10]。

速度从 v_0 加速到 $v_0 + \Delta v/3$ 所需时间为:

$$t_a = NT \tag{10}$$

当速度 $v_0 + \Delta v/3 \leq v \leq v_0 + 2\Delta v/3$ 时为匀加速段,当速度达到 $v \geq v_0 + 2\Delta v/3$ 时重新进入变加速段,此时 $J' = -J$ 。在匀加速段,加速度不变,即:

$$a_N = a_{N-1} \tag{11}$$

$$v_N = v_{N-1} + a_N T \tag{12}$$

该段行程的运行时间为:

$$t_b = \frac{\frac{1}{3}\Delta v}{a_N} = \frac{\frac{1}{3}\Delta v}{NJT} \quad (13)$$

$$t_c = t_a = NT \quad (14)$$

当主轴运行至拐点处的时候由于运动方向的改变,会带来额外的振动,这个振动时间很短,闭环控制来不及作出反应。所以当拐点到来的时候步进电机需要提前减速,以确保低速过拐点。因此本研究需要预测加速和减速过程的行程^[11]。

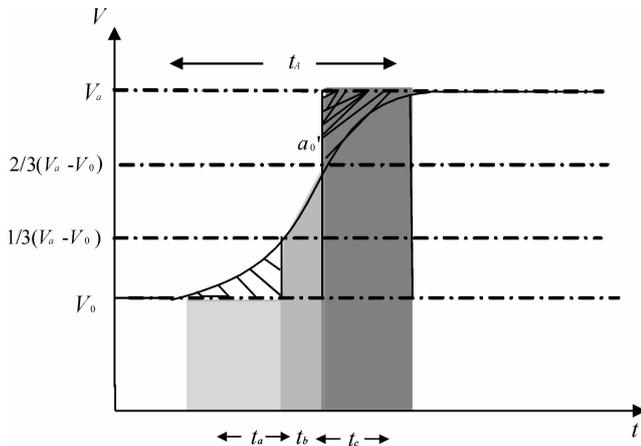


图 5 加减速行程示意图

加减速行程示意图如图 5 所示,斜线阴影部分的面积是一样的,所以要求整个加减速过程所需要的行程,只要计算灰色区域的面积即可:

$$S_1 = v_0 \cdot t_a \quad (15)$$

$$S_2 = \frac{[v_0 + \frac{1}{3}\Delta v] + [v_0 + \frac{2}{3}\Delta v]}{2} \cdot t_b = \frac{v_0 + v_a}{2} \cdot t_b \quad (16)$$

$$S_3 = v_a \cdot t_c \quad (17)$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (18)$$

通过该方法可以预先计算加速过程的行程;减速过程是加速过程的逆过程,因此同理可求减速所需的行程。

进入拐点前应提前减速 Δv_0 , 即 $v_a' > v_a - \Delta v_0$, 步进电机需要一个减速过程,该减速过程的行程为 S' , 有:

$$S' = S_1' + S_2' + S_3' \quad (19)$$

当前坐标与拐点的距离 $S_k \geq S + S'$ 时,程序执行加速或减速过程,直至运行到距离拐点 S' 的位置的时候进行拐点预减速。

当 $S_k < S + S'$ 时,如果是闭环运算加速过程,则将目标速率降低为 $v_a = v_0 + (v_a - v_0)/2$, 并重新判断、执行;如果是闭环运算的减速过程,即 $v_a < v_0$, 则直接以目标速率 $v_a' = v_a - \Delta v_0$ 实现减速。

3 结束语

本研究通过检测雕刻机的振动信号,采用经典 PID 反馈控制策略实时调节进刀率的参数,完成了加工作业。

理论研究结果表明,本研究所提的方法能够实现进刀率的自动调整,减小雕刻机操作对操作人员的经验要求,有利于提高加工效率和加工精度,若将其应用到雕刻机产品中,则可以提高产品的市场竞争力。由于时间和条件限制,笔者仅对雕刻机振动信号做了初步分析,对于振动信号能否反映或影响其他加工参数等问题,接下来还将进一步研究和完善。

参考文献 (References):

- [1] 张群岩,赵述元,李飞行. 航空发动机试飞振动实时监视技术研究[J]. 噪声与振动控制,2011,31(2):159-162.
- [2] 韩少军,张丙伟,李政天,等. 噪声与振动控制[J]. 噪声与振动控制,2010,30(4):125-128.
- [3] 周玉清,梅雪松. 基于内置传感器的大型数控机床状态监测技术[J]. 机械工程学报,2009,45(4):125-130.
- [4] 于艳美,李春梅,冯虎田. 滚珠丝杠磨削加工中的振动测试与分析[J]. 机床与液压,2011,39(3):17-21.
- [5] 付云忠,王永章,富宏亚,等. 多轴联动线性插补及其“S 加减速”规划算法[J]. 制造技术与机床,2001(9):9-11.
- [6] 唐小琦,何王勇,李勇波. 一种预判插补时间的 S 形加减速插补算法[J]. 中国机械工程,2011,22(23):2795-2801.
- [7] 黄 艳,李家霖,于 东,等. CNC 系统 S 型曲线加减速算法的设计与实现[J]. 制造技术与机床,2005(3):55-58.
- [8] 王海伟,李兴根. 基于步进电机控制的伺服钻孔机设计[J]. 轻工机械,2012,30(1):56-58.
- [9] 谢 平,王 娜,林洪彬. 信号处理原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [10] 奥本海姆,谢 弗. 离散时间信号处理[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [11] 曹文刚,常秋香. 一种具有前瞻功能的速度平滑算法[J]. 控制与检测,2005,12(9):56-59.

[编辑:张 翔]