

便携式数字影雕机系统设计 *

刘国田^{1,3}, 卫 星^{2,3*}, 周 尧³, 蔡 兵⁴

- (1. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 计算机科学与技术博士后科研流动站, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;
4. 合肥敏力激光机械有限责任公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 针对现有影雕机设备庞大, 不能现场操作, 以及雕刻精度偏低的问题, 提出了一种便携的数字式影雕机控制系统解决方案。首先给出了由导杆、丝杠、滑块、打印针头等组成的机械结构设计, 其次详细地阐述了传动机构、电机的正弦细分驱动电路。以 STC11F32XE 为核心设计了系统的单片机控制电路, 最后给出了单幅灰度图像影雕的效果实例。实验结果表明, 本系统方案具有良好的可移植性、可扩展性, 具有广泛的应用前景。

关键词: 数字影雕机; 正弦细分驱动; STC11F32XE 单片机

中图分类号: TP391.41; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1478-05

Methodological approach to digital control system for portable shadow engraving machine

LIU Guo-tian^{1,3}, WEI Xing^{2,3}, ZHOU Yao³, CAI Bing⁴

- (1. Engineering Research Center of Safety-critical Industry Measure and Control Technology of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 2. Post-doctoral Research Institute of Computer Science and Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Hefei MinLi Laser Machine Co. Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: In order to overcome the drawbacks of traditional shadow engraving machine such as enormous size and offside operation, a methodological approach to digital control system for portable shadow engraving machine was presented. Firstly, a mechanical structure was brought out which comprising slide bar, screw rod, slipper block and print needle. Secondly, the actuating mechanism and sinusoidal subdivision driving circuit for electrical motor were discussed. Thirdly, a control system adopting single chip micro computer STC11F32XE as kernel was proposed. The impressive effect of a shadow-carved grayscale image was exhibited at last. Test result shows that above-mentioned scheme has an important application prospect due to its perfect expandability and portability.

Key words: digital shadow engraving machine; sinusoidal subdivision driving; STC11F32XE single-chip computer

0 引 言

影雕是一种独特的石雕工艺技法^[1], 是用黑、白灰度等级对比表现水墨效果。颇像照片和铜板画, 乍看是影像, 细察是雕刻。作品不怕风吹雨淋, 画面纤细,

形象逼真, 永不褪色, 克服相片、图画年久日长会发黄褪色的缺点。在可供选用的影雕工艺中, 通常采用手工雕刻或激光雕刻。手工雕刻是在抛光的石板上把要雕琢的图文轮廓先描绘出来, 然后用硬质专业雕刀不断点击凿琢, 随着雕琢斑点的大小、疏密和深浅的变

收稿日期: 2011-05-30

基金项目: 广东省教育部产学研结合课题资助项目(2010B090400332)

作者简介: 刘国田(1954-), 男, 安徽合肥人, 主要从事嵌入式系统方面的研究。E-mail: lguotian@mail.hf.ah.cn

通信联系人: 卫 星, 男, 博士后。E-mail: weixing@ialab.hfut.edu.cn

化,得到最终的艺术作品。这种工艺对图像的重复再现度误差大、效率低、成本高,不能实现量产。激光雕刻是将图像信息通过计算机转换生成数字文件,用来将足够功率密度的激光束发射到被加工物体的表面,物体表面受光点在瞬间即被熔化,产生一个与激光束能量相对应的蚀刻点。

将数控技术引入到雕刻加工领域,能够充分利用计算机控制的优势,其应用前景十分广阔^[2]。计算机控制可以提高图像的重复再现度和雕刻加工效率,半色调技术和影雕加工的控制技术已经被提出^[3];利用基于DSP的MT测速方法和自适应模糊PID控制方法能够提高雕刻控制系统的精度和效率^[4];基于BMP图形像素点的八方向边缘检测算法可以实现图像字体运动轨迹的仿真及实际雕刻加工^[5]。在雕刻CAD/CAM系统中,还可以采用交互参数化图像设计CAD建立雕刻零件几何模型,经过前置处理和后置处理,生成NC加工程序,实现零件在数控设备上的雕刻加工^[6-8],数字图像处理的理论和算法研究也日趋成熟^[9]。然而在进行计算机数控加工时需要将石材搬运到加工现场并放置到专用设备上,费时费力,极不方便。尤其是不能移动的大型石材或位置固定的石材则无法采用激光雕刻。

本研究拟设计一款便携式数字化控制影雕机,兼具手工雕刻和激光雕刻的优势,是一种能够在硬质材料上“打印”图像的设备;系统采用单片机控制,数字驱动,可以进行高速、高精密度的运作,可以将便携式数字化影雕机“拎到”操作现场,放置在需要加工的石材表面进行影雕操作,适用于无法移动的特大型石材或位置固定的石材进行影雕操作。

1 机械设计

1.1 机械机构

激光雕刻机结构精密,对光路要求严格,不适合随便移动。本研究设计的数字化控制影雕机采用便携

式机械结构,精度高重量轻,可以随意带到加工现场将其放置到需要加工的石材表面进行雕刻操作。机械结构如图1所示。

图中设置了一个矩形框架,在框架内安装有平面二维可移动机构,即X向移动机构与Y向移动机构。所述的X向与Y向移动机构分别由导杆、丝杠、滑块、驱动电机组成;它们的组合功能就是将旋转运动转化成直线运动。Y向移动机构的Y向丝杠9安装在框架的左侧,Y向导杆1安装在框架的两侧,Y向丝杠端头由安装在框架上的Y向步进电机5驱动,在Y向丝杠上有Y向滑块3,Y向导杆上有副滑块6,Y向滑块和副滑块之间安装有X向滑动机构的X向丝杠11与X向导杆10,X向丝杠端头由安装在副滑块和Y向滑块上的X向步进电机13驱动,X向滑块12上安装有电磁线圈,打印针头4是导体在线圈的磁场中作Z向运动。打印针头的工作平面与机架底平面平行,机架和底框之间通过螺栓活动连接,机架与底框之间距离可微调,打印针头的垂直行程等于或略大于打印针头的针尖与机器底平面的距离。本研究将机架放置在硬质材料表面,将需要影雕的图像信息按格式要求生成数据文件,通信端口将数据文件传输到控制系统中,驱动电路把像素的灰度信息转化成对应的电压信号,用这个电压驱动打印针头的电磁线圈,根据电磁感应定律和能量转换定律,打印针头就得到与像素成对应关系的力。不同大小的力使得打印针头不断撞击在被加工工件的表面,进而在工件表面产生深浅不一、大小不等的斑点坑,这些平面上斑点的集合就是最终的影雕作品。

1.2 传动机构与驱动

1.2.1 传动机构

在设计传动机构时本研究采用滚珠丝杠,这种结构使得系统运动效率高、启动力矩减小,特别适合选用较小输出力矩的步进电机即可实现高速进给,且不会出现滑动运动那样的爬行现象,能保证实现精确的微进给定位。

1.2.2 步进电机

本研究设计的传动机构中的滚珠丝杠是由两只42BYGHW804二相混合式步进电机驱动,电机的技术参数如表1所示。

这种步进电机具有运行频率高、动态力矩大、运转平稳、定位精度和分辨率高、无积累位置误差,可采用开环运行的机制,大大减少了系统成本。

1.2.3 正弦细分驱动原理和选型

对于二相混合式步进电机的驱动控制,采用正弦细分驱动是减小转矩脉动最好的方式。细分数越高越

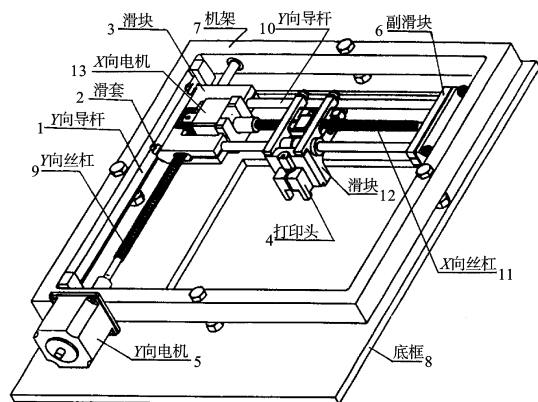
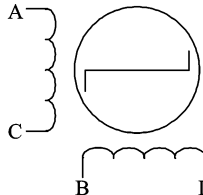


图1 系统机械机构

表 1 步进电机技术数据

通用技术参数		电器技术参数		电机接线图
步距角	1.8°±5%	相电压	3.6 V	
相数	4	相电流	1.2 A	
绝缘电阻	100 M(500 VDC)	相电感	1.8 mH	
绝缘等级	B 级	相电阻	3.0 Ω	
重量	0.34 kg	最大静转矩	4 500 g·cm	
机身长	48 mm	转动惯量	68 g·cm²	
最大温升	80 ℃	定位力矩	280 g·cm	

平稳,步进电机在这种方式下运行,电磁转矩的平滑性好。但如果细分后步进电机运行的步距角不均匀,就容易引起电机的振动和丢步,因此对步距角进行均匀化处理很重要。也就是必须实现对步进电机的恒转矩均匀细分控制,必须合理控制步进电机绕组中的电流使步进电机内部合成磁场的幅值恒定,而且每个进给脉冲所引起的合磁场的角度变化也要均匀。根据步距角及各步所对应的磁场空间矢量位置调整各阶梯的电流值,最终达到等步距角恒转矩细分的目的。只有同时改变二相混合式步进电机相电流 I_A 和 I_B 的大小,使电流合成矢量等幅均匀旋转,才能确保高分辨率细分的实现。相电流 I_A 和 I_B 的变化曲线可描述为

$$\begin{cases} I_A = I_M \sin \theta \\ I_B = I_M \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ —A、B 两相的合成磁场矢量与 A 相磁场矢量的夹角, I_M —电机绕组的额定电流, I_A —绕组 A 的相电流, I_B —绕组 B 的相电流。

上式即为二相混合式步进电机均匀细分控制函数的通用计算公式。

式(1)中参数 I_M 是可以通过电流采样电阻和参考电压设定的,可以认为是个常量,因此式(1)可以理解为参数 θ 是随着相电流 I_A 和 I_B 的变化而变化的。那么只有保证精确控制相电流 I_A 和 I_B 的大小,才能得到参数 θ 的均匀变化,这样的步进电机细分驱动电路要比一般的驱动电路复杂的多。

本研究选用的步进电机细分控制器是美国 Allegro 公司推出的一款性价比很高的脉宽调制(PWM)电流输出型的步进电机驱动芯片 A3955SLB。其主要特点为:最大驱动电流 1.5 A(与表 1 所选用的步进电机参数相比适当留有功率余量);最高 50 V 的供电电压,带有过热自动关断保护电路,欠电压锁定(UVLO)保护,输出抗浪涌的瞬间保护功能,自带 PWM 电流控制,带细分控制,内部有 3 位非线性 DAC 转换,DAC 数据 D_2 、 D_1 、 D_0 的输入与输出电流的比例关系如表 2 所示。

从表 2 中数据可以看出 3 位 DAC 的输出提供了 8 个等级的设定电流值,它们之间是正弦函数关系。

表 2 DAC 真值表

DAC 数据			输出电流百分比 I/(%)	V_{REF}/V_S
D_2	D_1	D_0		
1	1	1	100	300
1	1	0	92.4	3.25
1	0	1	83.1	3.61
1	0	0	70.7	4.24
0	1	1	55.5	5.41
0	1	0	38.2	7.85
0	0	1	19.5	15.38
0	0	0	输出清零	

A3955SLB 是双极性微细分步进电机驱动电路,一片 A3955SLB 可以驱动一相电机绕组,二相混合型步进电机需要两片,由两片 A3955SLB 工作在八细分模式下的转矩矢量星形图如图 2 所示。

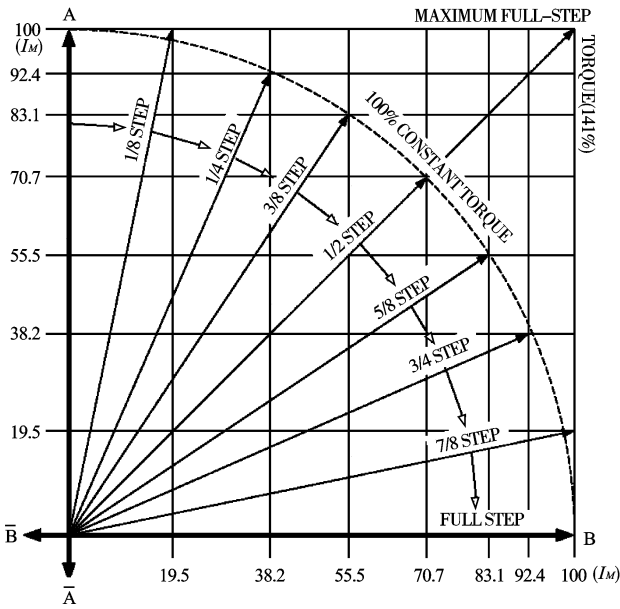


图 2 八细分二相混合式步进电机的转矩矢量图

图 2 中只给出在第 1 象限的转矩矢量合成,通常整步模式的通电顺序是每拍只有一相绕组通电,四拍构成一个循环周期,两相绕组按“ $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B} \rightarrow A$ ”的次序轮流通电,每改变一次通电顺序,转子转动一个

基本步距角 1.8° 。为使步进电机达到较小且均匀的步距角,本研究将 A3955SLB 芯片设置成八细分模式,将由 A 到 B 的 1 拍通电顺序均匀细化为 8 个节拍,即每次输入脉冲切换时,不是将绕组电流全部加入或撤除,而是只改变相应绕组中额定电流的一部分,则步进电机的合成磁势也只旋转步距角的一部分,转子的每步运行也就相应的转动步距角的一部分。电流分成 8 个台阶,则转子就同样转过 8 个较小的角度,每次转动 $1/8$ 基本步距角。

电机绕组额定电流 I_M 与外部电流采样电阻 R_S 和参考电压 V_{REF} 之间的关系:

$$I_M = V_{REF} / 3R_S \quad (2)$$

结合表 1 的步进电机技术参数设定 $I_M=1.2\text{ A}$,取 $R_S=0.33\ \Omega$,所以有 $V_{REF} \approx 1.18\text{ V}$ 。

根据图 2 显示,一个整步所对应的磁场空间矢量旋转 90° ,现将额定电流值 I_M 和这个整步旋转角细分以后的 8 个角度分别代入公式(1),如果把图 2 的另外 3 个象限矢量图补全,且设数据 PH_A 、 $D2_A$ 、 $D1_A$ 、 $D0_A$ 为 A 相数据, PH_B 、 $D2_B$ 、 $D1_B$ 、 $D0_B$ 为 B 相数据,将二相绕组所对应的数据合并成一个字节,计算出 3 位非线性 DAC 输入与相电流输出在一个循环周期内的全部数据。将得到的数据描绘出两个绕组在八细分模式下的电流相位波形图,如图 3 所示。

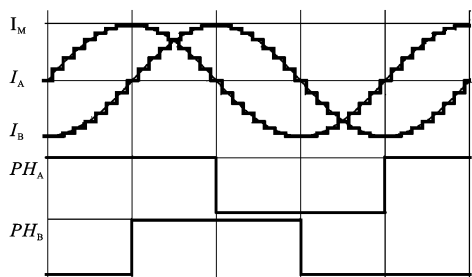


图 3 二相绕组八细分电流相位波形

显然加到电机绕组中的电流波形非常接近于正弦波。所得到的这组数据被保存在程序的数据区中,作为步进电机进给时的环形脉冲分配表。

2 控制设计

系统的控制电路示意图如图 4 所示。

2.1 中控 MCU

控制系统微处理器采用国内宏晶科技公司推出的新一代超强抗干扰、超级加密、高速、低功耗、高性能单片机 STC11F32XE。其主要性能:增强型 8051 内核,单时钟/机器周期,工作频率 35 MHz,用户应用程序空间 32 KB。内部集成 MAX810 专用复位电路和看门狗电路等;芯片在同样的工作频率下运行速度比传统 51 芯片提升了 8~12 倍。由于芯片接口资源丰富,

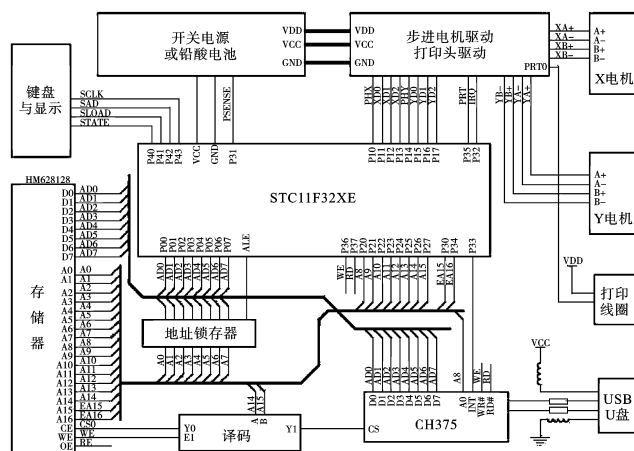


图 4 控制系统电路原理图

开发周期短,且价格低廉,在性价比方面占有明显的优势,是产品开发的首选。

2.2 人机界面

系统用极少的两个按键和 LED 状态显示来表达友好的人机对话界面,用“选择”键来切换通信端口的主机与设备方式,当 USB 端口在设备方式时,接收来自 PC 的图像数据,当 USB 端口在主机方式时,读取 U 盘上的图像文件;用“启停”键来控制系统的工作状态,操作极其简单。

2.3 外部存储器扩展

由于需要处理较大的图像数据,系统扩展了 128 KB 的数据存储器,因单片机的寻址空间有限,这里用两个 I/O 口来扩展最高位两根地址线,EA16、EA15 将数据存储器分成 4 个页面,每页可寻址 32 KB。

2.4 USB 接口

USB 接口或 U 盘接口选用国产沁恒电子有限公司推出的 CH375 芯片,其主要特点是全速 USB-HOST 主机接口,兼容 USB V2.0^[10-11];支持动态切换主机与设备方式;内置固件处理海量存储设备的专用通讯协议;自动完成标准的 USB 枚举配置过程,完全不需要本地端控制器作任何处理,简化了单片机的固件编程;支持 5 V 电源电压和 3.3 V 电源电压,支持低功耗模式;自动检测 USB 设备的连接和断开,提供设备连接和断开的事件通知;通过 U 盘文件级子程序库实现单片机读写 USB 存储设备中的文件。

2.5 驱动电路

除了前述的正弦细分驱动之外,本研究同时还设计了打印头驱动与保护电路,如图 5 所示。

打印针头是一个被安装在电磁线圈中的导体,根据灰度图像的特征,将像素属性中的灰度等级由数据量通过 DAC 转换变为模拟量,再将这个模拟量施加到图 5 的 PRT 端,经放大以后直接驱动电磁线圈,因

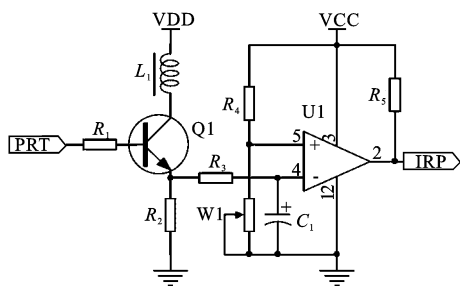


图 5 打印针头的驱动与保护

有电磁能量转换,便在线圈中产生作用于打印针头的力。由于能够向打印针头施加大小不同的力,使得打印针头在硬质材料上打印出来的图像斑点的疏密、深浅是随着力的大小变化而最终得到具有灰度等级的图像^[12]。图中的 U1 是电磁线圈的保护电路,当检测电阻 R_2 上的电流大于安全阀值时比较器翻转,IRQ 信号向 MCU 发出中断报警,系统在第一时间撤销过流信号,以防损坏器件。

3 系统效果

通过数码设备所获得的图像是含彩色信息的。如图 6(a)所示,将彩色图像通过绘图软件 PHOTOSHOP 转换后的灰度图像,用来作为图像数据输入标本。本研究设计的影雕机在石材表面的影雕实例如图 6(b)所示。



(a) 图像数据输入标本

(b) 影雕实例效果

图 6 影雕效果实例

通过比对发现影响影雕质量和艺术效果的因素很多,但如何选用石材是确定能否获得影雕质量最关键因素之一。通过用高倍放大镜观测,在影雕实例中有很多图像斑点坑的边缘不光滑甚至崩塌,这些变形的像素点直接影响图像的艺术效果,造成图像失真。实例中选用的是质量较差的普通岩石,如果选用蒙古、新疆产黑胆石或福建的青斗石等经水磨抛光 120 度以上的硬质花岗岩,在上述石材上雕刻效果最佳。

也可以在硬度不高的金属材料面板(如铜板或铝型材面板)上雕刻、或者在有机玻璃面板上雕刻,都可以获得较为理想的艺术效果。

4 结束语

本研究通过对当前影雕机设备庞大冗余、不能现场操作、雕刻精度偏低等问题的分析,以便携为目标给出了由导杆、丝杠、滑块、打印针头等组成的机械结构设计,详细阐述了传动机构、电机的正弦细分驱动电路;并且以单片机 STC11F32XE 为核心设计了嵌入式控制电路,作为机械结构的驱动、控制保护装置,最后展示了具体单幅灰度图像影雕的效果。

分析结果表明,该研究提供了一种便携式嵌入式数字影雕机的设计方案,包括机械结构、硬件电路和工艺设计等,在实际工程应用上具有一定的指导意义和推广价值。

参考文献(References):

- [1] 蔡 兵. 在硬质材料上进行影雕的方法: 中国, 2005 10037651.9[P]. 2005-01-05.
- [2] 吴慧兰, 曾为民. 计算机数控雕刻技术及其应用前景[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(1): 159-160.
- [3] 谢明红. 基于图像的影雕激光加工技术研究 [J]. 制造业自动化, 2007, 29(2): 8-10, 44.
- [4] 庞 罕, 王 霞, 王佳林. 基于模糊自适应控制的高速雕刻机改进[J]. 制造技术与机床, 2010(10): 53-55.
- [5] 赵燕伟, 朱双胜, 卢 东, 等. 基于直线插补的字体边缘识别技术[J]. 机电工程, 2009, 26(5): 52-54, 62.
- [6] 芦 敏, 韩邦华. 基于图像雕刻加工的研究与实现[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(4): 73-75.
- [7] QIU Run-sheng, GAO Yong-qiang. A Windows bitmap-based numerically controlled sculpture method and its application [J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2008, 12(1): 71-75.
- [8] 王 广, 江惠明. 基于数控铣床的图形雕刻教学实践[J]. 机械, 2010, (35)10: 46-47.
- [9] PRATT W K. *Digital Image Processing* [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2001.
- [10] 李 冲, 杨泽彬, 彭虎. 一种喷绘机控制系统的设计[J]. 机电工程, 2010, 27(8): 23-25, 35.
- [11] 孙建辉, 谢明峰, 单晓杭, 等. 基于单片机和 CPLD 的高精度多功能数据采集系统设计[J]. 轻工机械, 2010, 28(2): 61-64.
- [12] 李智杰, 崔文竹, 刘 欣, 等. 一种灰度图像打印机模型研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 209-212.

[编辑:张 翔]