

基于 PLC 的数控齿条磨齿机控制系统

孙立杰,冯清秀*,汤漾平

(华中科技大学 机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:为了提高齿条磨齿机加工精度和效率,提出了齿条磨齿机数控化方法。数控齿条磨齿机控制系统以可编程控制器为基础,完成砂轮的旋转运动、工作台的直线运动和液压缸的纵向进给运动;应用光栅尺显示砂轮的垂直进给量和反馈机床分齿运动,采用人机互动界面输入控制命令和加工数据,并实时反映机床运动情况。给出了控制系统结构框图,详细介绍了系统的硬件设计和软件设计。数控齿条磨齿机试用结果表明该控制系统运行平稳,加工精度符合要求。

关键词:数控齿条磨齿机;可编程控制器;光栅尺;触摸屏

中图分类号:TH39;TP27

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)10-0074-04

Control system of NC rack-ground machine based on PLC

SUN Li-jie, FENG Qing-xiu, TANG Yang-ping

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the processing precision and efficiency of rack-ground machine, a numerical control method was proposed. The rack-ground machine's control system was based on programmable logic controller (PLC) to finish the rotation of grinding wheel, the straight-line motion of grinder worktable and the long feed motion of oil cylinder. The grating scale was used to show the vertical feed amount of the grinding wheel and gain the teeth-separated feedback. The touch screen was applied to input control commands and work data and real-time output the machine state. The control system structure diagram was presented, the hardware and software design was further reported. The test results indicate that the control system is stable and the machining accuracy meets the requirements.

Key words: numerical control (NC) rack-ground machine; programmable logic controller (PLC); grating scale; touch screen

0 引言

目前齿条齿轮广泛应用于飞机、汽车、精密仪器仪表、冶金、矿山、船舶和发电等行业。提高齿轮精度、齿面淬硬后消除热处理变形和改善齿面粗糙度的方法仍以磨齿工艺为主。但在国内,磨齿绝大部分仍在普通机床上进行,或在磨齿机上加装运动变向机构来加工,精度效率受到了很大限制。齿条磨齿加工数控化,则机械传动链大大缩短,可简化机构,减少传动链误差。另外,排除了交换齿轮和行程挡块的调整,亦可提高加工效率。而数控齿条磨齿机的数量在国内非常少,并

且价格昂贵^[1-5]。

在这种背景下,笔者自主研制了数控齿条磨齿机。它是一种采用成形法对齿条进行磨削加工的高精密新型设备,其加工长度可达 1 500 mm,最大加工模数为 20 mm。成形法磨削靠成型砂轮磨出渐开线,砂轮的侧面由金刚石笔修成齿条齿轮的渐开线形状。由于成形法机床动作少,结构相对简单,影响误差的因素较少,所以精度比较稳定,生产效率高。

1 齿条磨齿机的控制系统结构

控制系统结构框图说明(如图 1 所示):

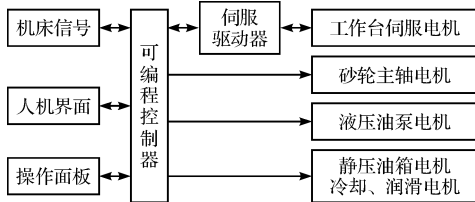


图 1 控制系统结构框图

(1) 机床信号主要是机床运行到行程开关位置时发出的信号。行程开关包括工作台前极限、后极限和原位极限,液压缸前极限和后极限。这些极限开关分别用于控制工作台和液压缸的运动行程,其中原位极限为工作台提供参考原点。

(2) 冷却电机、润滑电机和静压油箱电机属于加工辅助模块,它们各自驱动相应元件为磨齿加工提供水冷却和油润滑。

(3) 数控齿条磨齿机在进入自动加工前通过手动对刀调整砂轮进给量,确定砂轮在垂直进给方向的位置,因此磨齿过程中无砂轮垂直进给运动(Z 轴)。设备的磨削加工包括 3 个运动过程:砂轮的旋转运动(C 轴)、工作台的直线运动(X 轴)和液压缸的纵向进给运动(Y 轴)。三相交流异步电动机作为砂轮主轴电机,通过皮带传动将旋转运动传动给主轴以带动砂轮旋转。工作台的分齿精度决定了数控齿条磨齿机的加工精度,工作台由伺服电机驱动,辅以光栅尺对滚珠丝杠运动进行反馈补偿。液压油泵电机是纵向进给运动的动力元件,它驱动液压缸沿纵向导轨作往复运动,以完成齿条齿宽方向的磨削。

2 控制系统的硬件设计

2.1 PLC 设计

PLC 选型的基本原则是:在功能满足要求的前提下,选择最可靠、维护使用最方便以及性能价格比最优的机型。考虑到磨齿加工工艺比较固定,加工环境一般,控制系统是开关量控制和顺序控制,本研究选用日本 OMRON 公司的 CP1H-X40DT-D 型 PLC,它的 CPU 单元本体内置输入 24 点,输出 16 点,具有高速中断输入功能和高速计数功能等,可以实现精确的定位控制。它使用 USB 端口与上位机通信,采用梯形图配功能块的结构文本语言编程,串行通信口最多可以装 2 个(RS-232C 或 RS-422A/485 选件板可供选择),可以方便地实现与人机界面之间的链接^[6-7]。

在本研究中,现场有 11 个输入信号,11 个输出信号。具体的 I/O 输入/输出信号如表 1 所示。

表 1 I/O 输入/输出信号

输入/输出信号及其地址编号表							
输入信号				输出信号			
1SQ	工作台前极限	I1.09	KA1	伺服电机通电	Q100.00		
2SQ	工作台原位	I1.10	KA2	主轴电机	Q100.01		
3SQ	工作台后极限	I1.11	KA3	润滑电机	Q100.04		
4SQ	液压缸前极限	I1.07	KA4	静压油箱电机	Q100.05		
5SQ	液压缸后极限	I1.08	KA5	油泵电机	Q100.06		
EA1	X 轴光栅尺 A 相	I0.06	KA6	电磁阀 1YA	Q100.07		
EB1	X 轴光栅尺 B 相	I0.07	KA7	冷却电机	Q101.04		
EZ1	X 轴光栅尺 Z 相	I0.02	KA8	电磁阀 2YA	Q101.05		
EA2	Z 轴光栅尺 A 相	I0.04		伺服使能	Q101.00		
EB2	Z 轴光栅尺 B 相	I0.05		顺时针脉冲	Q100.02		
EZ2	Z 轴光栅尺 Z 相	I0.01		逆时针脉冲	Q100.03		

2.2 光栅尺设计

工作台的分齿运动是齿条磨齿的关键一环,为了实现工作台精确的定位控制,实时反馈工作台运动情况,考虑到光栅尺的应用性和价格优势,本研究选用广州信和公司生产的增量式光栅尺 KA-600,有效量程为 1 000 mm ~ 3 000 mm,准确度为 $\pm 3/\pm 5/\pm 10 \mu\text{m}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$),分辨率为 0.5/1.5。作为增量式光栅尺,它的光栅探头通过扫描栅线计数来获得相对运动的距离,在机床开机或断电后重新启动需要光栅尺慢慢移到刻有参考标记的位置以获得绝对位置。另外,它属于封闭式光栅尺,可以防止灰尘、切屑和飞溅的液体。

CP1H 型 PLC 接光栅尺高速计数时,每组有 3 个输入点:A 相、B 相和 Z 相。高速计数信号采用线性模式,软件复位,相位差输入,当 A 相超前于 B 相 90° 时为增计数,反之为减计数。超前及滞后与旋转编码器的转动方向有关。

X 轴光栅尺一方面显示工作台运动(X 向)的位移量,另一方面在工作台运动过程中向 PLC 发送实际运动位移脉冲,根据此脉冲数 PLC 程序对工作台运动位移进行补偿,保证分齿精度。Z 轴光栅尺在手动对刀时显示砂轮垂直方向(Z 向)运动的位移量。Y 轴通过液压缸的极限开关确定砂轮纵向进给运动(Y 向)行程,故无光栅尺显示或反馈液压缸运动位移。

2.3 触摸屏设计

触摸屏作为人机界面,在本设备中要求完成显示和输入任务,并能方便地与 PLC 连接通讯。基于此要求,本研究选用上海步科公司生产的 MT4300C 触摸屏,它是 5.6 寸、 320×234 像素彩色触摸屏,1 个 USB SLAVE 接口用于 PC 编写的程序下载,2 个通讯端口用于与 PLC 连接。

上位机 PC 编写的触摸屏界面程序通过 USB

SLAVE 接口下载到触摸屏中。触摸屏通过通讯端口 COM1 的 RS-232 口与 CP1H 型 PLC 采用 CP1W-CIF01 模式连接,需设置的通讯参数为:9 600,7,偶,2,以实现二者通讯。

3 控制系统的软件设计

CP1H 型 PLC 应用 CX-Programmer 编辑软件进行 PLC 程序的编写与调试,通过 RS232 通讯电缆从 PC 下载到 PLC 上。根据数控齿条磨齿机加工原理,PLC 加工控制流程图如图 2 所示。

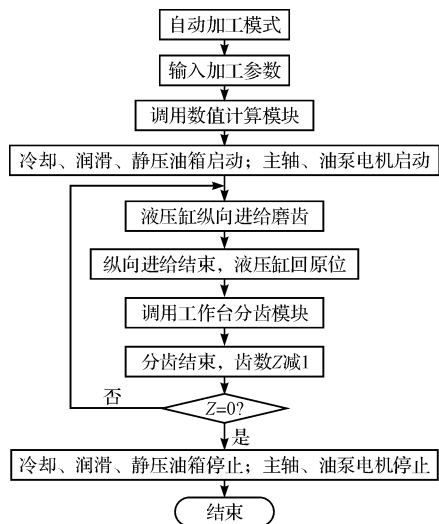


图 2 加工控制流程图

3.1 数值计算模块

通过触摸屏界面输入加工参数,即齿条的基本参数(模数和加工长度)。在实际工程应用中以毫米(mm)作为计量单位,触摸屏模数和加工长度数值格式分别设置为 3 位整数 2 位小数和 3 位整数 3 位小数形式,但 PLC 处理整数的效率和精度相比浮点数有明显的优势,故在 PLC 程序中将涉及的小数转换为整数,以微米(μm)为单位。

工作台移动位移由伺服电机输出的脉冲量决定。机械安装结束,伺服电机转动一圈的行走长度(L')固定为 5 mm。要提高机床的加工精度,除了要求良好的机械刚性和机械结构外,必须提高机械分辨率。要提高机械分辨率必须提高电机的脉冲当量,即电机一个脉冲内旋转角度对应的直线距离。设定伺服电机每转一圈需要的脉冲数(X')为 10 000,则:

$$\text{脉冲当量: } P' = \frac{L'}{X'} = \frac{5}{10\ 000} \times 10^3 = 0.5 \mu\text{m};$$

$$\text{行走齿距所需脉冲数: } X = \frac{P}{P'} = \frac{P}{0.5} = 2P.$$

3.2 液压缸纵向进给模块

程序设定液压缸后极限位置为纵向进给运动的原点位置。手动对刀调整完成后要求液压缸位于原点位置,然后进入自动加工模式。液压缸工进沿齿宽方向磨削齿条至前极限位置,延时 30 s 后,液压缸快速退回原点位置,等待分齿完毕以进行下一次纵向进给加工,直到整个齿条磨削完毕^[8]。

此模块属于顺序控制,在梯形图中使用工序步进控制指令 SNXT(009)和 STEP(008)完成。

3.3 工作台分齿模块

分齿过程中 PLC 控制伺服电机发送略大于齿距脉冲量的脉冲数并登录比较表,同时高速计数器对光栅尺的脉冲进行计数。当高速计数器的当前值等于指定的目标值(齿距脉冲量)时,进入中断任务,停止脉冲输出,为下一次分齿运动做准备。

在梯形图中,用 PLS2(887)指令实现恒定距离进给,用 CTBL(882)在 PLC 中注册并启动比较表^[9-10]。其程序图如图 3 所示。

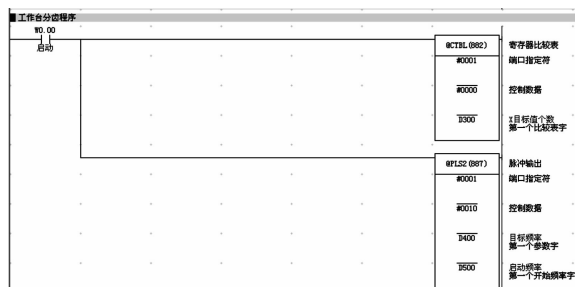


图 3 工作台分齿程序图

4 齿条磨齿机控制系统加工实例

本研究以加工模数为 5 mm,齿数为 14 的齿条为例。通过计算得知齿条齿距为 15.708 mm。由于磨齿机手动调整确定磨削进给量,并固定砂轮在垂直进给方向的位置,故磨削加工时无砂轮垂直进给的控制,该控制系统加工时主要控制工作台的分齿运动和液压缸的纵向进给运动。要求齿条分齿定位精度为 16 μm,重复定位精度为 10 μm。加工时砂轮主轴电机转速为 3 000 r/min,工作台分齿运动速度为 100 r/min,液压缸纵向进给运动速度为 150 r/min,纵向快退运动速度为 1 500 r/min。磨削余量为 0.15 mm,分 3 次磨削,每次磨削进给量为 0.05 mm。加工过程中液压缸能够平稳完成纵向进给运动并快退至原点位置,工作台分齿精度控制结果如表 2 所示。

tion for multiresolution image registration [J]. **IEEE Transactions on Image Processing**, 2000, 9(12): 2083 - 2099.

[4] XIA Ming-hui, LIU Be-de. Image registration by "Super Curves" [J]. **IEEE Transactions on Image Processing**, 2004, 13(5): 720 - 732.

[5] ZHANG Zhi-jia, HUANG Sha-bai, SHI Ze-lin. New image correlation ! matching algorithm based on edge extraction [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2003, 32(6): 635 - 638.

[6] 田金文, 杨 磊. 基于局部分形特征的快速图像匹配方法 [J]. **华中理工大学学报**, 1996, 24(2): 12 - 14.

[7] BERNEA D I, SILVERMAN H F. A class of algorithms for

fast digital image registration [J]. **IEEE Trans on Computer**, 1972(C-21): 179 - 186.

[8] 李春燕, 俞集辉, 刘 林. OLE 自动化技术在文档信息管理中的应用 [J]. **计算机应用**, 2001, 21(7): 81 - 82.

[9] STEFANO L D, MATTOCCIA S. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation [J]. **Pattern Recognition Letters**, 2005, 26: 2129 - 2134.

[10] 罗钟铨, 刘成明. 灰度图像匹配的快速算法 [J]. **计算机辅助设计与图形学学报**, 2005, 17(5): 966 - 970.

[11] 李 强, 张 钱. 一种基于图像灰度的快速匹配算法 [J]. **软件学报**, 2006, 17(2): 216 - 222.

[编辑: 李 辉]

(上接第 76 页)

表 2 工作台分齿精度测试点 (单位: mm)

目标位置	磨削 1	磨削 2	磨削 3
15.708	15.707	15.708	15.707
31.416	31.416	31.417	31.415
47.124	47.122	47.124	47.123
62.832	62.833	62.831	62.831
78.540	78.539	78.542	78.541
94.248	94.247	94.246	94.248
109.956	109.956	109.956	109.954
125.664	125.663	125.663	125.664
141.372	141.370	141.371	141.371
157.080	157.081	157.078	157.080
172.788	172.788	172.787	172.788
188.496	188.498	188.496	188.495
204.204	204.203	204.203	204.205
219.912	219.913	219.914	219.912

由于齿条每个齿磨削 3 次, 故每个定位点单向重复测量 3 次, 可计算出各点的算术平均偏差 x 。如图 4 所示, 实线为 14 个齿的算术平均偏差 x , 上面虚线为 $x + 3\sigma$ 线, 下面虚线为 $x - 3\sigma$ 线。由此可得: 单向定位精度 Au ($x + 3\sigma$ 线与 $x - 3\sigma$ 线极限值的最大差额) 为 12.583 μm , 重复定位精度 R (目标位置对应发散度的最大值) 为 9.166 μm , 符合精度要求。

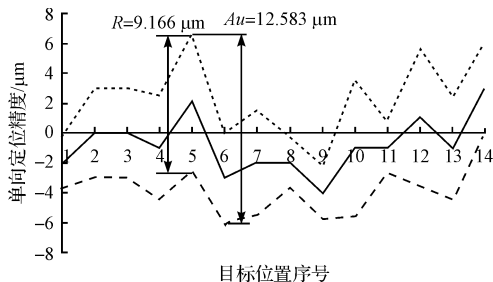


图 4 工作台分齿精度测试结果

5 结束语

本研究介绍了基于 PLC 的数控齿条磨齿机的控

制系统, 它采用 PLC 作为核心控制器, 辅以光栅尺和触摸屏实现齿条的高精度加工。PLC 使用提高了设备的自动化水平和稳定性程度, 光栅尺保证了机床加工的高精度和高可靠性, 触摸屏减少了 PLC 控制器所需的 I/O 点数, 增强了机床的可操作性。数控齿条磨齿机试运行表明控制系统运行平稳, 加工精度符合要求。

参考文献 (References):

[1] 遇立基. 磨齿工艺与磨齿机的技术发展概况 [J]. **现代制造工程**, 2008(2): 1 - 4.

[2] CHEN C F, TSAY C B. Computerized tooth profile generation and analysis of characteristics of elliptical gears with circular-arc teeth [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, 148(2): 226 - 234.

[3] YANG S C. Meshing analysis of a gear with a ring-involute gear [J]. **Journal of Mechanical Engineering Science**, 2003, 217(12): 1287 - 1299.

[4] BAIR B W. Computer aided design of elliptical gears with circular arc teeth [J]. **Mechanism & Machine Theory**, 2004, 39(2): 153 - 168.

[5] XIAO Ben-xian, XIAO Mao, CHANG Ming. The main control mode and fuzzy control strategy of CNC system for gear hobbing and grinding machine [J]. **Machine & Electronics**, 1995(4): 9 - 11.

[6] 熊轶娜, 蒋红卫, 丁 薇, 等. PLC 在 C650 卧式车床控制系统中的应用 [J]. **机电工程**, 2009, 26(4): 107 - 109.

[7] 黄 敏, 花有青. 基于 PLC 的立体车库控制系统 [J]. **机电工程**, 2009, 26(10): 105 - 108.

[8] 陈启俊, 黄卫星. 光栅尺和 PLC 在高速精密液压机上的应用 [J]. **机电工程技术**, 2006, 35(7): 53 - 54.

[9] 欧姆龙 (中国) 有限公司. OMRON CP1H 中文操作手册 [M]. 欧姆龙 (中国) 有限公司, 2005.

[10] 霍 罡, 樊晓兵. 欧姆龙 CP1H PLC 应用基础与编程实践 [M]. 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[编辑: 张 翔]