

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.02.013

GMM 驱动镗杆镗削倒锥形销孔闭环控制研究

胡昌军

(池州学院 机电工程学院, 安徽 池州 247000)

摘要:针对 GMM 智能镗杆镗削异形销孔控制难度大的问题,以现有的控制系统硬件为基础,进行了 DSP 控制系统的软件设计,包括 A/D 采集、反馈检测算法和闭环控制算法的编程实现。并在此基础上开展了控制系统整体性能的测试实验,分别采用开环逆模型补偿控制、普通 PID 控制和前馈逆补偿 PID 控制 3 种控制方法对实际加工活塞销孔的刀具轨迹进行了相应的轨迹跟踪实验。实验结果表明,对于低频加工轨迹,采用前馈逆模型补偿 PID 控制精度比开环逆模型补偿控制精度要高,达到预期的技术指标。所建立的闭环控制系统具有很好的应用效果。

关键词:嵌入式 GMM 镗杆;锥形销孔;前馈补偿;DSP 控制

中图分类号:TP273.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)02-0059-05

Research on Closed-Loop Control in Boring Inverted Cone Holes Driven by GMM

HU Changjun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Chizhou University, Chizhou, Anhui 247000, China)

Abstract: Aim at the problems of control difficulty of GMM intelligent boring bar in boring non-cylinder pin hole, and based on the existing control system hardware, the software of DSP control system was designed, including A/D gathering, feedback detection algorithm and programming to realize closed loop control algorithm. On this basis, experiments to test the overall performance of the control system was carried out, and the actual machining piston pin hole trajectory tracking experiment was performed by using open loop compensation control of inverse model, the common PID control and feedforward inverse compensation control methods of PID respectively. The results show that higher precision can be obtained by using the inverse model feedforward compensation PID control than by using the open-loop compensation inverse model control for the low frequency processing locus, and the expected technical indicators is achieved. The established closed loop control system has a very good application effect.

Key words: boring bar inlaid GMM; taper pin hole; feedforward compensation; DSP control

嵌入式 GMM 镗杆是采用超磁致伸缩材料直接嵌入镗杆而研制的一种结构简单的精密加工活塞异形销孔的微位移进给机构。当 GMM 在励磁磁场(电流)作用下产生伸缩变形,同时输出的位移/力可迫使镗杆弯曲变形,实现所需的径向微进给运动用于异形销孔精密加工^[1-5]。该系统具有精度高、结构简单、柔性大等特点,但是由于超磁致伸缩材料具有磁滞非线性的特性,控制复杂,对现有的开环控制系统和基于磁场强度

的半闭环控制系统的精度有重要影响^[6-11]。因此,本文将镗削活塞当中的锥形孔为例,采取闭环控制的方式对嵌入式 GMM 镗杆镗削倒锥形销孔的加工轨迹进行研究,以达到进一步提高加工精度的目的。

1 锥形销孔加工轨迹的数学模型

图 1 所示为含有倒锥形销孔的零件示意图。

锥形销孔的横截面为圆形,随着 z 值的增大,其横截面的直径逐渐增大(左侧锥形孔)或减小(右侧锥形

收稿日期:2015-11-05;修回日期:2015-12-30

基金项目:安徽省高等学校省级自然科学研究重点项目(KJ2015A244)

作者简介:胡昌军(1974),男,安徽枞阳人,工学硕士,副教授,主要从事智能材料精密驱动技术、机械设计及理论方面的教学和研究工作,已发表论文 20 篇。E-mail:hcjqy123@163.com

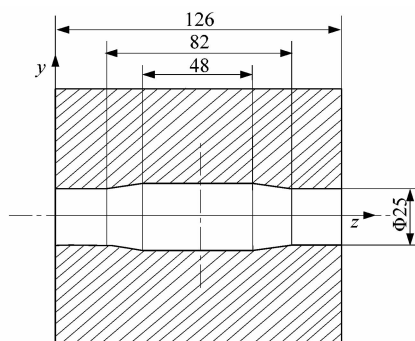


图1 含有倒锥形销孔的零件图

Figure 1 Part drawing containing taper pin hole

孔),锥形销孔指的是锥形的小端在外面,大端在里面。其加工尺寸要求是:倒锥形孔两端的直径差为40 μm ,长度为17 mm。由于倒锥形孔的各个截面形状都为圆形,与机床主轴转角 θ 无关,只有其轴向母线上点的 y 值与 z 轴坐标有关。所以智能镗杆刀具轨迹只是 z 的函数。建立如图1所示的坐标系,根据加工要求和零件尺寸可以得到其刀具轨迹的数学模型为

$$y(z) = \begin{cases} 0, z \leq 22; \\ \frac{20}{17}(z - 22), 22 < z \leq 39; \\ 20, 39 \leq z \leq 87; \\ \frac{20}{17}(87 - z), 87 < z < 104; \\ 0, z \geq 104. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y(z)$ 为镗刀的径向微位移/ μm ; z 为机床工作台的位置/mm,可以通过感应同步器计数得到,感应同步尺的分辨率为0.01 mm。

零件倒锥形销孔精密镗削加工时,设主轴转速 $n = 3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,旋转编码器分辨率为 0.36° 。工作台 z 向进给速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右,此时刀具轨迹上升段和下降段的时间约为5 s,变化频率小于1 Hz,对式(1)进行MATLAB仿真计算,则嵌入式GMM微进给机构加工倒锥形销孔的理想加工轨迹如图2所示。

2 倒锥形销孔的闭环控制系统

2.1 闭环控制系统的硬件设计

控制系统硬件是嵌入式GMM智能镗杆构件精密微位移控制的核心之一,高性能的控制器硬件能够保证系统具有良好的输出特性。由于嵌入式GMM智能构件的输入电流与输出位移存在磁滞非线性,使其控制更加复杂^[12-15],本文采用基于磁滞逆模型补偿的闭环反馈控制方法,要求控制系统具有实时性好、精度高和抗干扰性强等特点。数字信号处理器DSP是一种

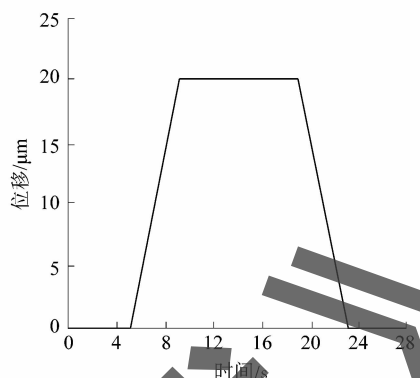


图2 嵌入式GMM镗杆加工倒锥形销孔的理想轨迹

Figure 2 Ideal trajectory of boring bar embedded

GMM in taper pin hole processing

适合数字信号处理运算的微处理器,以DSP为核心的控制系统具有快速的数据处理能力、较高的分辨率和良好的扩展能力。

本系统以DSP控制板作为控制的核心,主要完成与上位机通信,镗杆径向微位移反馈信号的数据采集,算法处理,控制输出相应电压等。选用基于TMS320F2812DSP芯片的ICETEK-F2812-A实验板作为系统的控制模块,其硬件结构如图3所示。

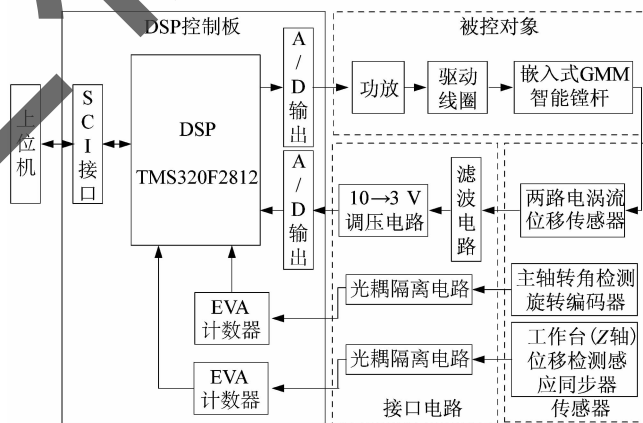


图3 闭环控制系统的硬件结构组成

Figure 3 Hardware structure composition of closed loop control system

2.2 闭环控制系统的软件设计

2.2.1 软件主程序

控制系统软件主要有3部分组成:反馈检测算法,根据两电涡流传感器信号和主轴旋转编码器信号,计算智能镗杆的径向微位移;控制算法,将位移反馈值与期望值比较,经过前馈逆补偿PID控制,计算并输出控制量;功能模块使用,如通信中断、外部中断、QEP计数、A/D采样中断、D/A输出模块等。

系统的主程序主要是完成 DSP 系统初始化,各寄存器设置,参数变量的初始化,包括中断启用设置、EV 事件管理器模块、A/D 采集模块等设置。控制系统通过 SCI 与上位机进行通信,通过 SPI 与外扩自制的 D/A 模块通信。系统的主程序流程如图 4 所示。

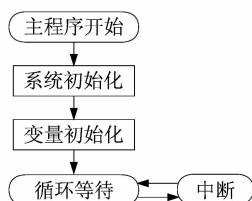


图 4 主程序流程图

Figure 4 Flow chart of main program

2.2.2 GPT2 周期中断服务子程序

活塞非圆异形销孔加工控制时,需要根据主轴转角 θ 和工作台 z 轴位置确定理论的刀具径向微位移,并对该加工点进行控制,从而要求在机床主轴旋转坐标系上对加工点进行定位。其方法是设置 GPT2 周期寄存器的计数值, DSP 中 QEP 计数电路根据编码器 A、B 相脉冲信号进行计数,并将计数值记录在 GPT2 数字寄存器 (EvaRegs.T2CNT) 中,当两者值相等时,触发 GPT2 周期中断,从而在该中断中实现该加工点的控制,出中断时,将寄存器清零,重新开始计数。通过合理设置 GPT2 周期寄存器的值,可将圆周上的加工点进行等角度等分。

GPT2 周期中断服务子程序是整个控制系统软件程序中最重要的一部分,控制系统对活塞异形销孔上每一个加工点的控制都是在该子程序中完成的。该中断服务子程序主要完成电涡流位移传感器信号的采集,反馈检测算法计算,控制算法的实现, D/A 模拟量的输出等。中断服务子程序的流程如图 5 所示。

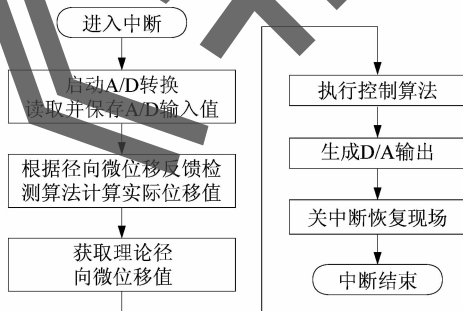


图 5 GPT2 周期中断服务子程序流程图

Figure 5 Subroutine flow chart of GPT2 cycle interrupt service

2.2.3 闭环 PID 控制算法的 DSP 实现

闭环控制算法的实现就是周期中断服务子程序的主要部分,在 DSP 中实现 PID 控制,主要包括 A/D 采样,反馈检测算法,数字 PID 控制算式, D/A 输出 4 个部分。PID 控制模块程序流程如图 6 所示。首先设置系统控制参数,下位机接受上位机的期望轨迹 $r(k)$;通过定时器控制 A/D 转换对电涡流传感器进行采样,并经滤波和径向微位移检测算法计算反馈值 $y(k)$;然后计算位移偏差 $e(k)$,位置型数字 PID 的控制公式^[16-18]为

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) - q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (2)$$

式中: $q_0 = K_p + K_i + K_d$; $q_1 = K_p + 2K_d$; $q_2 = K_d$ 。

通过式 (2) 由系统控制调节获得控制器输出 $u(k)$,经 D/A 转换输出相应控制电压。其中位移采集对于整个系统闭环控制具有重要影响。

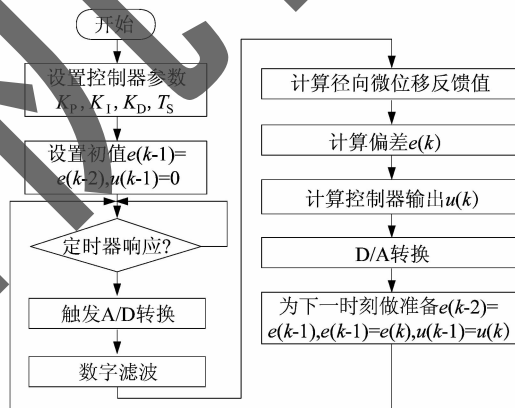


图 6 PID 控制模块程序流程图

Figure 6 Program flow chart of PID control module

控制系统实现智能镗杆的精确微位移闭环控制,采用电涡流位移传感器和光电旋转编码器作为检测元件,由 DSP 完成信号的采集和处理,最终得到镗杆径向微位移信息。电涡流位移传感器输出是模拟电压信号,主要由 DSP 实验板上 A/D 模块完成采集,但实验中发现 A/D 转换的信号毛刺较大,影响反馈计算精度,因此采用防脉冲干扰平均值数字滤波方法。其原理是:①对采集的多个数据首先进行排序;②去除最大值和最小值;③对剩下的数据求平均值。实验表明该法对减小信号毛刺具有较好的效果。

3 倒锥形销孔的闭环控制实验

倒锥形孔加工的刀具轨迹跟踪实验,实验时取主轴转速为 $3\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,为了便于操作,用 DSP 内部

时钟代替 z 轴拖板移动测量的感应同步器脉冲,通过迟滞逆模型,在上位机中离线求得其逆模型补偿数据表,将其导入到控制器中,分别进行开环逆模型补偿控制、普通 PID 控制和前馈逆补偿 PID 控制实验。图 7, 9, 11 分别是开环逆模型补偿控制、普通 PID 控制和前馈逆补偿 PID 控制对倒锥形孔加工的刀具轨迹跟踪实验结果,图 8, 10, 12 分别是相应实验的跟踪误差。

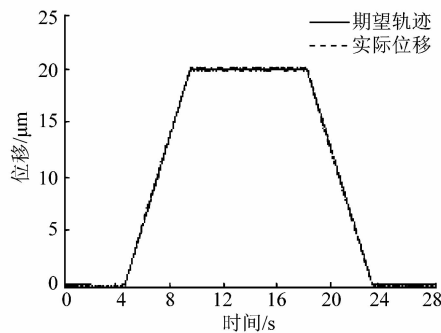


图 7 开环逆模型补偿控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪实验结果

Figure 7 Tracking experiment results of taper hole machining tool path in compensation control of open-loop inverse model

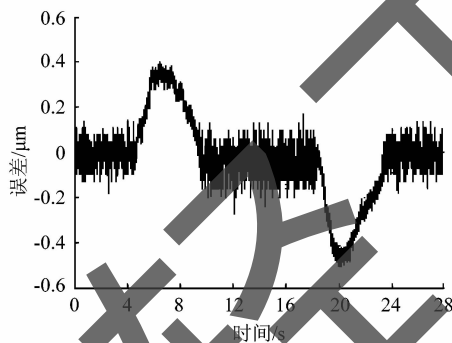


图 8 开环逆模型补偿控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪误差

Figure 8 Tracking errors of taper hole machining tool path in compensation control of open-loop inverse model

从图中可以看出,3 种控制方法的轨迹跟踪误差范围分别是: $-0.50 \sim 0.40 \mu\text{m}$, $-0.25 \sim 0.70 \mu\text{m}$, $-0.35 \sim 0.33 \mu\text{m}$ 。开环逆模型补偿控制在上升段和下降段均由于逆模型的误差控制效果较差,普通 PID 控制上升段的控制效果比下降段的控制效果要差,前馈逆补偿 PID 控制的轨迹跟踪的效果比前两者均好,达到预期的控制精度要求。

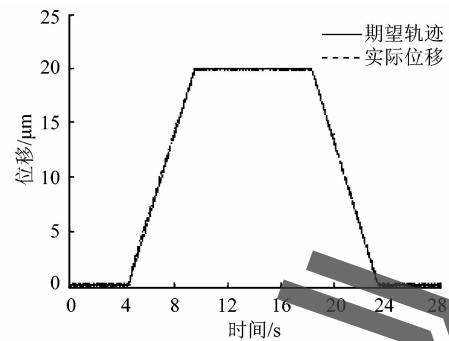


图 9 普通 PID 控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪实验结果

Figure 9 Tracking experiment results of taper hole machining tool path in control of PID

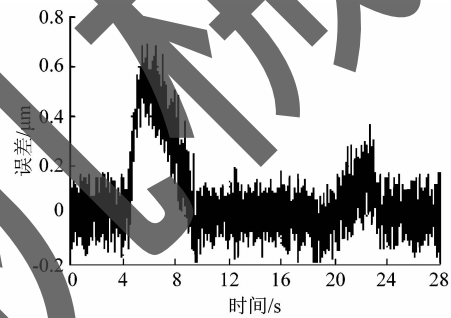


图 10 普通 PID 控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪误差

Figure 10 Tracking errors of taper hole machining tool path in control of PID

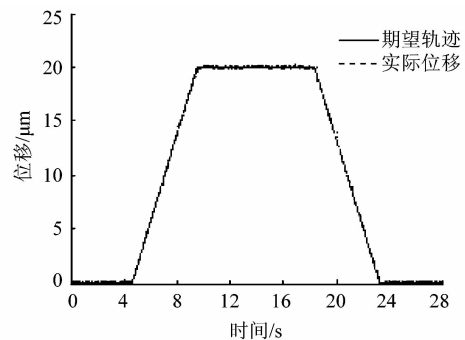


图 11 前馈逆补偿 PID 控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪实验结果

Figure 11 Tracking experiment results of taper hole machining tool path in control of feedforward inverse compensation PID

4 结论

由上述控制实验结果可见,将闭环控制系统用于嵌入式 GMM 镗杆镗削倒锥形销孔的过程具有重要的意义:

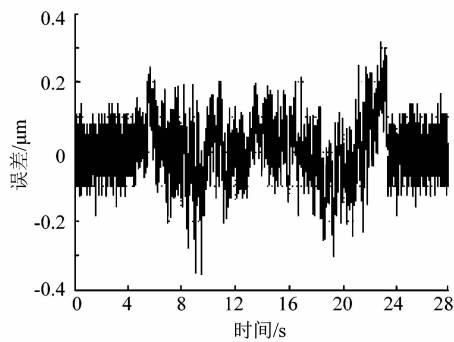


图 12 前馈逆补偿 PID 控制对倒锥形孔加工刀具轨迹的跟踪误差

Figure 12 Tracking errors of taper hole machining tool path in control of feedforward inverse compensation PID

1) 开环逆模型补偿控制的精度受所建立的迟滞逆模型的精度影响较大,模型精确度越高,控制效果越好,由于迟滞特性和系统的复杂性,难以建立真实模型,模型误差将产生残余控制误差,采用逆模型前馈补偿的闭环反馈控制可以减少这方面引起控制误差。

2) 前馈逆补偿 PID 控制的控制精度比开环逆补偿控制精度高,说明闭环控制可以减少由于所建立的迟滞模型误差而引起的残余控制误差,但当所建立的迟滞模型的精度较高时,闭环 PID 控制提升的范围有限。

3) 前馈逆补偿 PID 控制对低频轨迹(比如倒锥形孔加工刀具轨迹)的控制效果较好,系统的迟滞非线性影响在前馈逆模型补偿和 PID 控制的调节下可以较好地消除,但对高频轨迹(比如椭圆形销孔加工刀具轨迹)的控制效果较差,此时的迟滞非线性特性严重,迟滞模型建立较复杂, PID 控制对于此种情况难以调节,可以使用智能控制的方法进一步提高控制精度。

4) 前馈逆补偿 PID 控制仍存在一定的误差,可能导致误差的原因有机床振动引起的测量误差;控制系统 DSP 板自带 A/D 模块的噪声干扰较大,影响了反馈精度;同时 D/A 输出毛刺、功放电流输出纹波及驱动磁场不均匀都会对控制误差有一定的影响。

参考文献:

[1] 郭义杰,项占琴.新功能材料在活塞异形销孔制造中的应用[J].

制造技术与机床,1997,421(8):36-38.

- [2] CASTRO H F F. A method for evaluating spindle rotation errors of machine tools using a laser interferometer[J]. Measurement, 2008, 41(5): 526-537.
- [3] ZHAI Peng, ZHANG Chengrui, WANG Xinliang, et al. Novel mechanism for boring non-cylinder piston pin hole based on giant magnetostrictive materials[J]. Journal of shanghai university, 2008, 12(4): 363-367.
- [4] 郭义杰,刘楚辉.超磁致伸缩驱动器设计方法的研究[J].浙江大学学报, 2004, 38(6): 747-750.
- [5] LIU C H, JYWE W Y, LEE H W. Development of a simple test device for spindle error measurement using a position sensitive detector[J]. Measurement science and technology, 2004, 15(9): 1733-1741.
- [6] 张雷,郭义杰,刘孝斌,等.用于异形销孔精密加工 GMA 线性化迟滞建模与控制[J].光学精密工程, 2012, 20(2): 287-295.
- [7] SILVA F S. Fatigue on engine pistons: a compendium of case studies[J]. Engineering failure analysis, 2006, 13(3): 480-492.
- [8] 魏莹.为了适应发动机更高要求[J].现代零部件, 2007, 21(4): 78-79.
- [9] SUHARA T, TAKEI T, TAKIGUTI M. Characteristics of friction force on piston pin boss bearings[J]. JSAE review, 1996, 17(4): 453-454.
- [10] 项占琴, 齐津.磁致伸缩材料结构的镗杆: CN2375399Y[P]. 2000-04-26.
- [11] 郭义杰,刘楚辉.超磁致伸缩驱动器设计准则的建立[J].工程设计学报, 2004, 11(4): 187-191.
- [12] QUANDT E, WEEMANN K. Magnetostrictive thin film microflow devices[C]//Micro Systems Technologies 96, Berlin: VDE-Verlag, 1996: 451-455.
- [13] BUSHKO D A, GOLDIE J H. High performance magnetostrictive actuators[J]. IEEE AES systems magazine, 1991, 6(11): 21-25.
- [14] 赵章荣.精密超磁致伸缩微位移驱动智能构件技术研究[D].杭州:浙江大学, 2009: 212-227.
- [15] NOGUCHI S, TSUKADA T, SAKAMOTO A. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units[J]. Precision engineering, 1995, 17(4): 266-273.
- [16] GAO Wei, SATO E, KIYONO S. Roundness measurement using angle probes[J]. Process control and inspection for industry, 2000, 42(22): 408-411.
- [17] MASATO A, PATAMAPORN C, EIKI O. Direct measurement of spindle error motion with 10-picometer resolution using regular crystalline lattice and scanning tunneling microscope[J]. Precision engineering, 1996, 19(6): 64-77.