

基于 PLC 的夹紧力在线调控系统^{*}

崔宇清,姜兆亮^{*},仪 维

(山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘要:为了获得金属切削过程中的合理夹紧力,减少薄板件的铣削变形,将 PLC 技术应用到机床夹具的设计中,设计了夹紧力大小可动态调控的液压夹具系统(HFAC)。HFAC 系统包括夹紧机构、液压系统和控制机构,通过 PLC 闭环控制调节电液比例减压阀的出口压力,以使系统获得高精度夹紧力,并实现夹紧力的动态调控。实验结果表明,HFAC 系统可实时调节机床夹具的夹紧力,其夹紧力控制精度为 3% 左右,即系统具有良好的稳定性以及较高的夹紧力控制精度。

关键词:夹紧力可调的液压夹具系统;变形控制;PLC

中图分类号: TG75; TH137.9; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)07-0852-04

Adjustable clamping force control system based on PLC

CUI Yu-qing, JIANG Zhao-liang, YI Wei

(Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to solve the problems of deformation control of thin part milling with optimal clamping force, a hydraulic fixture with adjustable clamping force online(HFAC) was designed based on PLC technology. The HFAC system was composed of clamping mechanism, hydraulic system and control mechanism. The real-time closed-loop control of PLC was used to adjust the outlet pressure of the electro-hydraulic proportional pressure reducing valve, the high-precision clamping force was obtained and the automatic control function of pressure on line was realized. The test results show that, the HFAC system can real-time adjust the clamping force under the machining requirements, and the control precision of clamping force is about 3%, namely it has good stability and higher control precision of clamping force.

Key words: hydraulic fixture with adjustable clamping force online(HFAC); deformation control; PLC

0 引 言

在金属切削过程中,机床夹具用于保证工件相对于刀具的正确位姿,夹紧力过大会引起工件的加工变形,而过小则会导致加工状态不稳定。因此,适宜的夹紧力有利于提高工件的切削质量。使用有限元分析方法^[1]或高精度的激光测量技术^[2],可以得到不同装夹方案下的工件变形。虽然利用多目标优化技术可以对夹紧力进行设计^[3],并能在一定程度上进行预测^[4],但是定位机构、夹紧元件还会引起工件的装夹误差^[5-6]。因此,通过利用数控机床的工件夹紧力检测系统^[7],能够对工件夹紧力进行实时监测。

工件在切削过程中的瞬时受力状态会不断变化^[8],通过实时调整夹紧力可以有效减少工件变形。M. A. Mannan^[9]采用伺服电机作为动力源调控夹紧力,它体积较大而提供的夹紧力较小。陈光明^[10]采用高速开关阀控制夹紧力大小的方法精度不高,缺少上位计算机的组态软件控制。在夹具系统中,采用液压动力源比电机动力源体积紧凑且传动平稳,其中电液比例减压阀比伺服减压阀成本低、抗污能力强,比高速开关阀控制精度高,比比比例溢流阀^[11]更容易添加支路且各支路互不影响。

因此,为了获得精确而且实时可调的机床夹紧力,本研究采用 PLC 技术设计夹紧力在线调控系统。在 HFAC 系统中,通过控制电液比例减压阀的出口压力,

收稿日期:2013-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5117304);国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA040903)

作者简介:崔宇清(1988-),男,山东潍坊人,主要从事机械制造及其自动化技术方面的研究。E-mail: cuiyq88@yeah.net

通信联系人:姜兆亮,男,教授,硕士生导师。E-mail: Jiangzhaoliang@sdu.edu.cn

实现切削过程中的夹紧力大小动态调节,为实现工件的切削加工变形闭环控制奠定基础。

1 HFAC 系统总体设计

HFAC 系统主要包括夹紧结构、液压系统和控制系统 3 部分(系统结构图如图 1 所示)。夹紧机构以传统压紧方式为基础,和液压缸集成为一体;液压系统采用闭环控制方式,由液压泵、液压缸、电磁换向阀、电液比例减压阀等部分组成;控制系统采用计算机作上位机,西门子 S7-224XPCN PLC 作控制器,利用夹紧机构末端的压力传感器获得压力值,并用 WinCC 组态软件对夹紧力大小进行实时监控。

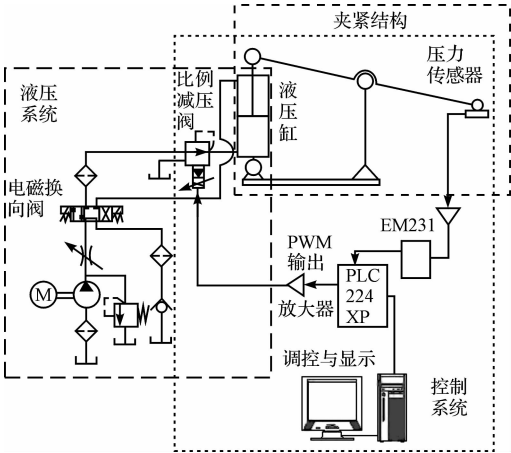


图 1 系统结构图

HFAC 系统工作流程如图 2 所示。被加工工件在夹具中定位夹紧后,初始化夹紧力后采用随时间变化的控制方式。切削开始后,夹紧机构末端的压力传感器动态检测工件的夹紧力大小并通过组态软件实时显示。当在时刻 t 夹紧力值需要调整时,系统将压力传感器信号放大后经输入模块传入 PLC,再经 PLC 中的 PID 算法进行运算,输出模拟量电压或 PWM 信号传入放大器,使输出量以脉冲的方式输出,传给电液比例减压阀并调节液压缸内部压力,通过液压缸与液压回路控制夹紧机构动作,以实现夹紧力的在线动态调控。

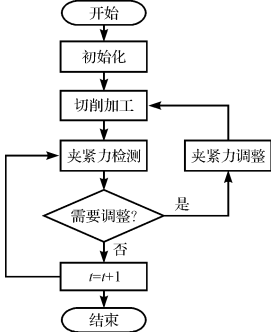


图 2 系统工作流程图

2 液压系统设计

2.1 液压缸一负载的系统固有频率

HFAC 的系统压力,即液压泵的调定压力,应满足执行元件克服最大负载和实现最大加速度的需要。由于夹具夹紧运动无外负载和较大质量执行元件,系统压力定为 6 MPa,并选用内径为 32 mm,行程为 50 mm 的液压缸。当不考虑液压缸一负载系统与基座连接刚度时,其固有频率为^[12]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

式中: f_0 —液压缸一负载质量系统的固有频率,Hz; k —油液压缩性形成的弹簧(称为液压弹簧)刚度,N/m; m —液压缸驱动的质量,kg。

液压弹簧刚度主要由“受压缩”的油液体积决定,液压缸的单侧液压弹簧刚度为:

$$k = E \frac{A^2}{V} \tag{2}$$

式中: E —液压油的弹性模量,值为 $(1 \sim 1.4) \times 10^9$ Pa; V —液压缸的单侧容积, m^3 。

所以,该系统的最低固有频率为:

$$f_{0min} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4EA_K}{mL} \left[\frac{1 + \sqrt{\alpha}}{2} \right]} = \frac{1}{2 \times 3.14} \sqrt{\frac{4 \times 10^9 \times 8.04 \times 10^{-5}}{10 \times 0.05} \times \left[\frac{1 + 0.75}{2} \right]} = 382 \text{ Hz} \tag{3}$$

式中: $\alpha = A_R/A_K = 0.75$, A_K —无杆腔面积, A_R —环形面积。

该系统的最低固有角速度为:

$$\omega_{0min} = 2\pi f_{0min} = 1200 \tag{4}$$

实践表明, $f_0 < 4$ Hz 适用于对动态特性基本没有要求的静态电液比例控制系统; $f_0 = 4$ Hz ~ 15 Hz 是电液比例控制系统固有频率的优选范围,该频率适合于多数设备的固有频率,可使电液比例控制系统获得良好的性价比; $f_0 \geq 30$ Hz 适用于对动态性能有要求的设备。因此,所设计的液压缸一负载系统的频率满足动态性能的控制要求。

2.2 电液比例减压阀

通径和油液要求是比例阀选用的两个关键因素,额定流量过大会降低执行器的控制精度。本研究选用德国的 ARGOSHYTOS 电液比例减压阀,根据压力 - 电流曲线(如图 3 所示)选择 PVRM1-063/S 三通直动式减压阀,其安装方式为螺纹插装式,控制信号为

100 Hz,最大进口压力为 5 MPa,最大流量为 20 L/min。本研究利用它配置的数字式比例放大器(型号 RT-PV-DA-0X-D1)放大 PLC 发出的脉冲信号并传入比例减压阀,将 PLC 输出的 0~10 V 的模拟量信号转化为相应占空比的 PWM 信号。

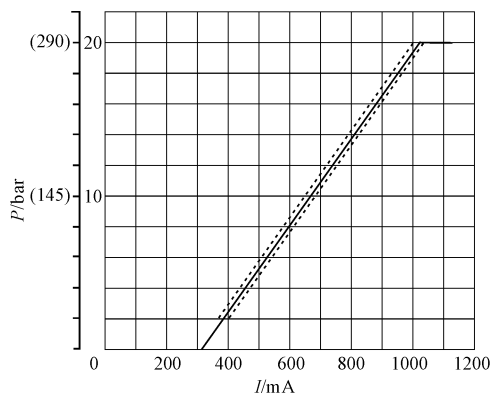


图3 压力 P 与控制信号 I 特性曲线

3 控制系统设计

HFAC 系统控制原理如图 4 所示,主要包括压力传感器、液压系统和 PLC 编程控制 3 部分。

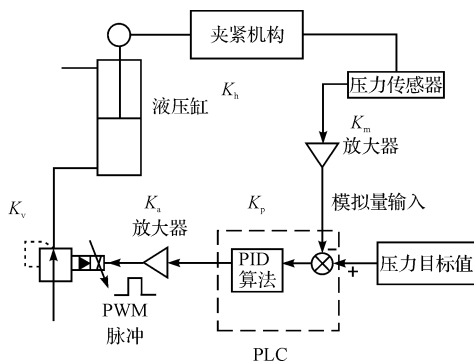


图4 控制系统原理图

3.1 传感器与输入模块

纽扣式压力传感器(NJHS-10)量程为 1 000 N,需 10 V 外部供电,输出信号为 0~20 mV,传感器信号放大器将传感器输出信号进行精密放大,将毫伏信号转换成标准电压信号输出 0~5 V 或 0~10 V 后,直接与 PLC 输入模块连接。EM231-2HAI 模拟量输入模块具有高速采集功能,16 位精度,带 1 路精密桥压输出(10 V),能够有效完成数据采集、滤波、存取、分析等功能。

3.2 控制信号类型

电液比例控制系统的控制信号包括模拟式和数字式两种类型。其中,模拟式的脉冲宽度调制(PWM)控制功率输出级为开关型结构,便于实现程序控制^[13]。

本研究利用西门子 PLC S7-224XPCN 实现对液压系统中各种电磁阀的控制。该继电器型 PLC 具有模拟量电压输出功能和 PID 调节功能。

3.3 控制系统开环增益

闭环控制系统的开环增益及组成为:

$$K_c = K_p K_a K_v K_h K_m \quad (5)$$

式中: K_c —闭环控制系统的开环增益; K_p —PID 调节器的增益; K_a —比例放大器的增益,A/V; K_v —比例减压阀的增益,MPa/A; K_h —执行元件的增益,N/MPa; K_m —压力传感器的增益,V/N。

K_c 的计算值由系统的稳定性、动态性能和控制精度校核的结果确定,其实际值由调试结果确定。初步设计时,可根据稳定性要求,按劳斯稳定判据确定的公式求得 K_{cmax} ,即:

$$K_c \leq 2\xi\omega_{0min} \quad (6)$$

在工程实践中, ξ 的取值为 0.05~0.2。一般来说,系统结构确定后, K_a 、 K_v 、 K_h 、 K_m 的值不易再变,而回路的总增益又影响到系统的稳定性和控制精度等性能指标,因此该系统通过 PLC 编程调节 PID 控制程序的比例增益 K_p 来完成 K_c 的调节。

3.4 PLC 编程

PLC 编程^[14]采用 STEP7-Micro\WIN V4.0 系统的软件编程向导,依次设置 PID 回路编号、PID 回路给定值的范围,比例增益(K_p)、采样时间(T_s)、积分时间(T_I)、微分时间(T_D)。

根据本传感器的量程范围,选择单极性,不带有 20% 偏移量。当回路输出量的类型为模拟量时,设置输出量的极性和范围;为 PWM 脉冲输出时,设置占空比周期为 0.01 s。

完成向导中的设置工作后,自动生成初始化子程序 PIDx_INIT、中断程序 PID_EXE 等。在程序中用 SM0.0 调用 PIDx_INIT,并写入模拟量输入地址、给定值百分比和输出值地址。CPU 便会根据已设置的 PID 采样时间,周期性地调用中断程序 PID_EXE,在 PID_EXE 中执行 PID 运算。

PID 控制器需要整定比例增益、积分时间、微分时间、采样周期 4 个参数,编程软件内置有“PID 调节控制面板”工具,用于 PID 参数的调试,可以同时显示给定量 SP、反馈量 PV 和调节器输出 MV 的波形。其中,利用 PID 调节控制面板实现 PID 参数自动调节功能。

3.5 WinCC 组态监控

HFAC 选用西门子公司开发的 WinCC 组态软件^[15]。在 WinCC 中建立过程归档变量 pressure 对应

PLC 测得的压力值并以 500 ms 采样周期和存储周期归档^[16];建立 setpressure 变量对应 PLC s7-200 中的设定压力的寄存器 VD206。本研究选用 WinCC Online Trend Control 控件,动态显示夹紧力随时间变化的曲线(如图 5 所示)。在规定的“变化时长”时间范围内,夹紧力在初始压力基础上,每历时一个“时间间隔”,机床夹紧力就会增加或减少一个“压力变化”值。该系统可支持两种不同的变化规律,分别从“时段 1”、“时段 2”进行设置。

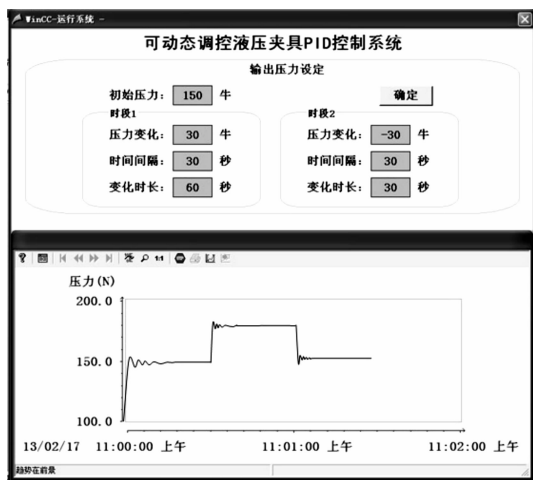


图 5 可控夹紧力夹具系统组态软件监控图

4 实 验

为验证 HFAC 系统的夹紧力控制精度,本研究进行了测试实验。实验条件如下:油温度 25°, 32 号耐磨液压油, 5 μ 高压滤油器,溢流阀调定压力为 6 MPa,电液比例减压阀流量为 5 L/min,选用 224XPCN 继电器型 PLC。设定系统目标压力从 300 N 增加到 500 N,时间间隔为 10 s,压力变化值为 50 N。实验结果表明,夹紧机构末端的实际压力精度在 3% 以内。

5 结束语

HFAC 系统选用液压作为动力源、电液比例减压阀作为调压元件、PLC 作为控制器,设计了夹紧力实时可调的液压夹具系统。通过实验可知,该系统能够在切削过程中动态调整机床夹紧力,其控制精度为 3%。该系统结构简便、成本较低、工作稳定可靠,能够满足金属切削过程中的夹紧力动态可调需求,有利于获得易变形工件的最优装夹方案,以减小工件变形。

在切削过程中影响机床夹紧力调控精度的因素较多,因此下一步工作是在 PLC 编程中增加误差补偿技术,以进一步提高控制精度。

参考文献 (References):

- [1] 俞建峰,许戈. 夹紧力作用下工件变形的有限元分析[J]. 江南大学学报:自然科学版,2009,18(1):81-84.
- [2] JIANG Zhao-liang, MENG X X. Analysis of the workpiece elastic deformation holding in fixture with high definition metrology [J]. **Advanced Materials Research**, 2010 (102-104):12-16.
- [3] 陈蔚芳,陈华,倪丽君. 基于 GA 和 FEM 的夹具布局和变夹紧力优化设计[J]. 数值计算与计算机应用,2009,30(1):1-9.
- [4] 秦国华,王细洋,吴铁军,等. 基于多重夹紧的工件-夹具间接触力的预测方法[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(7):1421-1425.
- [5] 石怀荣. 基于夹具设计中定位销长度的分析[J]. 机电工程,2005,22(7):54-56.
- [6] 刘延龙. 一种安全快速精密对中夹具的设计与研究[J]. 机械,2011,38(3):53-55.
- [7] 沈松钦. 对数控机床中工件夹紧力进行实时的监测[J]. 计算机测量技术,2011,38(8):54-55.
- [8] JIANG Z L, LIU Y M, YI W. Process based machining deformation control for end milling [J]. **Advanced Materials Research**, 2012(426):265-269.
- [9] MANNAN M A, SOLLIE J P. A force-controlled clamping element for intelligent fixturing [J]. **Annals of the CIRP**, 1997,46(1):265-268.
- [10] 陈光明,杨志兵,袁光明. 基于高速开关电磁阀与 PLC 监控的数控夹具压力控制系统研究[J]. 现代制造工程,2005(3):103-105.
- [11] 孟继梅,韩晓明. 基于闭环控制的压力控制系统研究[J]. 液压与气动,2009(9):31-33.
- [12] 许益民. 电液比例控制系统分析与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2005:204-220.
- [13] 宫文斌,刘昕晖,孙延伟. 电液比例 PWM 控制方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2003,33(3):104-106.
- [14] 廖常初. PLC 编程及应用[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2008:186-196.
- [15] 于亚利,武丽. 过程控制实验平台的设计与实现[J]. 机电工程,2010,27(8):36-38.
- [16] 李青松,吴勇,汪忠士,等. 过应用 PLC 实现大型液压实验平台网络监控[J]. 机电工程,2004,21(6):23-26.

[编辑:洪炜娜]