

云环境下基于 PLC 模拟量优化的 机床自动控制系统设计

洪天星

(龙岩学院 物理与机电工程学院, 福建 龙岩 364012)

摘要: 为解决机床控制过程中存在抖振现象和控制误差过高等问题, 在云环境下通过对 PLC 模拟量的优化, 从硬件和软件两个方面优化设计机床自动控制系统; 加设可编程逻辑控制器, 改装传感器、电机与驱动器, 调整系统电路的连接方式, 完成机床自动控制系统硬件系统的优化; 根据机床生产任务, 规划执行刀具移动轨迹, 设定机床加工强度与速度参数; 在云环境下自动采集机床模拟量与位姿, 根据当前机床运行参数与设定参数之间偏差, 利用优化 PLC 的模拟量并生成机床控制指令, 实现机床自动控制功能; 通过系统测试得出结论: 综合两种实验场景, 与传统控制系统相比, 优化设计系统在机床执行刀具位置、运行速度和执行应力三个方面的控制误差分别降低约 13.8 mm、0.26 mm/s 和 3.4 N, 同时机床抖振现象得到显著抑制。

关键词: 云环境; PLC 模拟量优化; 机床自动控制; 位置; 运行速度; 执行应力

Design of Machine Tool Automatic Control System Based on PLC Simulation Optimization in the Cloud Environment

HONG Tianxing

(School of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Longyan University, Longyan 364012, China)

Abstract: In order to solve the problems of chattering and high control errors in the process of machine tool control, a machine tool automatic control system is optimized and designed, optimizing the PLC analog quantity from hardware and software aspects in the cloud environment. The system is modified to add the programmable logic controller, refit the sensor, motor and driver, adjust the connection mode of system circuit, and complete the optimization of the machine tool automatic control hardware system. According to the machine tool production, the tool movement trajectory is planned and executed, and the machine tool processing strength and speed parameters are set. In the cloud environment, the simulation and pose parameters of the machine tool are automatically acquired, the deviation between the current machine tool operating parameters and set parameters is used to optimize the PLC simulation and generate the machine tool control instructions, and realize the automatic control function of the machine tool. The results of system test show that compared with the traditional control system, the control errors of the optimized design system in tool position, running speed and execution force are reduced by 13.8 mm, 0.26 mm/s and 3.4 N, respectively, and the chattering phenomenon of the machine tool is significantly suppressed.

Keywords: cloud environment; PLC simulation optimization; automatic control of machine tool; location; operating speed; execution force

0 引言

机床被誉为工业之母和国之重器, 在国民经济体系中发挥着重要作用, 机床可以分为车床、铣床、磨床、锻压机床、数控机床等多种类型, 从目前发展情况来看, 数控机床的使用频率更高、应用范围更广^[1]。一般来讲, 机床主要由车床主体、驱动模块、控制模块以及辅助模块等部分组成, 其中驱动模块是机床加工过程中的主要动力部件, 其作用是完成机床加工过程中主动、进给动作。机床驱动模块包括两个主要的组成部分, 即伺服驱动回路和驱动机构, 伺服驱动回路主要负责接受控制命令, 并通过程序进行控制, 从而驱动驱动机构进行动作。辅助模块主要是指

车床中为加工服务的配套部分, 控制模块主要用来发布控制指令, 保证车床内所有元件协同运行。

控制模块是机床中重要组成部分, 是电气传动与控制电路的结合体, 用于控制电机启动, 制动, 正反转, 速度调节等。目前, 应用到机床中的控制系统主要包括文献 [1] 中提出的基于数字孪生控制系统、文献 [2] 中提出的基于双 STM32+FPGA 控制系统以及文献 [3] 中提出的基于可变论域模糊控制系统, 其中文献 [1] 提出系统以数控机床主生产规划为基础, 研究数控机床主生产规划中物理制造系统、虚拟制造系统、互联系统、孪生数据、服务系统等 5 个维度的结构。在此基础上, 详细论述了虚拟建模、

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-07-14。

作者简介: 洪天星(1966-), 男, 大学本科, 高级实验师。

引用格式: 洪天星. 云环境下基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 138-144.

数据采集和实时驱动等关键技术。开发了 MPS 数字孪生智能控制系统，实现了 MPS 系统可视化监控、安全管理和决策、智能控制、MES 追溯等功能，体现了机床主生产计划整个生命周期。文献 [2] 提出系统对机床的加工方式进行了重新划分，并按客户机—服务器设计模式将机床生产与控制任务划分为两部分。根据这两个部分工作要求，从硬件和软件两个部分进行设计。文献 [3] 中提出系统在模糊控制理论与模糊控制规则的基础上，对输入数据进行降维，采用计算机语言将输入量与模糊量的论域进行划分，并用模糊语言来表达模糊规则；采用可扩展方法对模糊论域进行调节，实现机床相关控制功能。然而将上述传统控制系统应用到机床的控制工作中，存在明显抖振现象，且极易受到外界环境影响，最终影响机床控制精度。

云环境是指能够从动态虚拟化的资源池中向用户或者各种应用系统按需提供计算能力、存储能力等服务的大数据环境。PLC 也就是可编程逻辑控制器，是一种由数字计算控制的电子系统，被广泛地应用于工业领域。而对 PLC 模拟量的优化就是可编程逻辑控制器输入或输出信号优化处理技术。通过对 PLC 模拟量的优化提高机床自动控制系统控制精度，同时消除或缓解控制过程中存在的抖振现象。

1 机床自动控制系统硬件系统设计

优化设计机床自动控制系统的主要目的就是根据输入机床工作任务调用相应机床元件，为保证优化设计机床自动控制系统能够在机床对象中正常运行，选择数控类型的机床作为控制对象，在云环境下，通过 PLC 加设以及机床传感器、驱动器等设备改装优化，为机床自动控制系统控制功能的运行提供硬件支持^[2]。机床自动控制系统硬件结构，如图 1 所示。

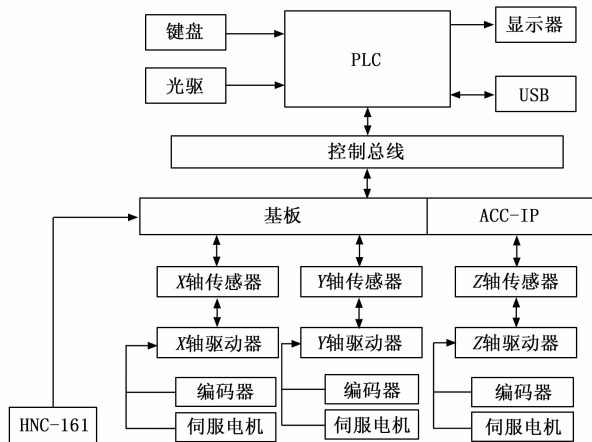


图 1 机床自动控制系统硬件结构图

从图 1 中可以看出，优化设计机床自动控制系统以 PLC 作为核心元件，能够根据输入任务和传感器反馈信息生成相应的控制指令，并驱动机床电机以及其他相关元件设备。

1.1 可编程逻辑控制器

可编程控制器，即 PLC 元件，是一种被广泛用于数控

机床加工过程控制的控制器，PLC 元件性能优良，可满足工业控制需要。可编程控制器结构设计上具有较为明显优势，无论是在软硬件方面，还是在可靠性方面，都采取了对应的技术保障措施^[3]。例如，在硬件上采用了光电隔离、屏蔽接地、高频滤波等抗干扰技术，在软件方面执行数字滤波、命令重复执行等功能。PLC 元件的基本组成结构如图 2 所示。

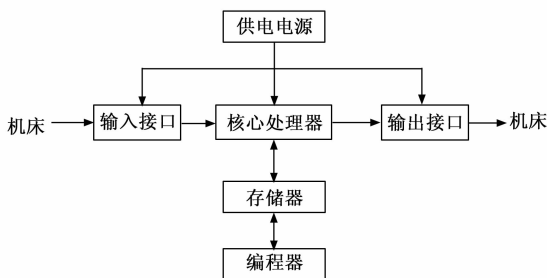


图 2 PLC 基本组成结构图

如图 2 所示，PLC 控制器由中央处理器、存储器等部分组成，通常，输入输出点数目越多，PLC 的价格就越高，如果备份的输入输出点数目过多，则会引起成本的上升。以控制对象的输入输出总点数为基础，为以后的扩展和调整做好准备，需要增加可编程控制器中的输入输出接口数量，增加量约为 20% 左右^[4]。

1.2 机床状态传感器

机床中状态传感器主要用来检测并反馈机床中各个控制目标元件运行状态，在此次优化设计系统中主要对状态传感器中的振动传感器和位移传感器进行改装优化，其中振动传感器就是检测机床中各个元件在运行状态下是否存在振动现象，而位移传感器则是用来检测数控机床中的执行元件移动位置，振动传感器的改装结构，如图 3 所示。

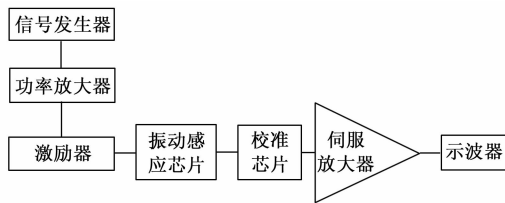


图 3 机床振动传感器改装结构图

机床振动传感器的改装方式就是在传统传感器的基础上，添加一个校准元件，保证传感器实时输出的振动感应结果反映的是机床的实际运行状态^[5]。另外机床中的位移传感器选择脉冲编码器替换传统传感器，脉冲编码器是一种可以将机械角度转换为电子脉冲的角位移传感器。利用 x 轴、 z 轴两个端部的光电脉冲编码器，实现了对角位移的检测，并对其进行了数字化测速，使其能够直接地反映出拖板刀架的直线位移，从而实现了机床中拖板刀架位移的精准检测。

1.3 电机与驱动器

在选择机床的主轴电机的时候，要以加工工艺的要求

为依据,来决定所需要的主轴电机的功率、转速以及输出特性。在进行主轴动力计算时,应满足以下几个条件:切割力;主轴的加速和减速所需的动力必须比主轴电机的最大输出动力小;当主轴频繁起动和制动时,要计算出平均动力,这个动力要比主轴电机持续的额定动力小;对于需要达到等直线切割的机床,其切割动力与等直线切割动力的总和不能超过电机的最大输出动力^[6]。因此机床中的 E-MOTION 的 Cyclone 交流伺服驱动器,其额定功率和转速分别为 400 W 和 3 000 r/min,与之相匹配的伺服驱动器型号为 SEDA-04AVS。此外,为了实现高精度的高精度定位,还需增加一台 MR-E-200A 型伺服放大器,该元件以 10 000 脉冲/转分辨率的增量位置编码器为核心。

1.4 系统电路设计

基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统中的硬件电路包括 PLC 输入输出电路、供电电源电路、复位电路等,PLC 输入输出电路在接线时,要考虑到许多细节^[7]。当曼氏芯片和 M 存在电势差时,应使用绝缘的输入模板,当电势差大于某一数值时,则应将曼氏芯片和 M 芯片连接起来。与此同时,输入和输出模块都有自己固定的电源电压,用户可以按照输入点和负载的具体情况来选择相应的模块,否则,如果不正确的话,就会将模块烧掉,导致不必要的损失。其中 PLC 的输出电路的调整结果如图 4 所示。

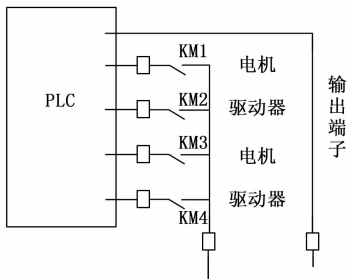


图 4 PLC 输出电路图

PLC 输出必须配合平滑电路,才能实现与占空比成线性的模拟量输出^[8]。按照机床自动控制系统的设计结果,调整系统供电连接电路,保证加设元件能够成功接入到供电电路中,实现硬件系统所有元件的统一供电。

1.5 系统抗干扰设计

采用交流电源滤波和电磁屏蔽两个步骤,实现硬件系统的抗干扰设计。系统电源的干扰主要属于高次谐波,在电源变压器的初级上串联一个 LC 低通滤波器,可以让 50 Hz 的工频信号无衰减地通过,而滤去高于 50 Hz 的高频谐波,能够对高频干扰的侵入进行有效的抑制。同时,电容中心点接地,可将噪声干扰电流分流到地面^[9]。另外,电磁屏蔽是指利用不同类型的屏蔽物对电磁波进行吸收和反射,从而阻止电磁波的进入和电磁波的传播。屏蔽体的材质为良导体或良磁导体,可采用封闭式、网状式、编织带等形式。按照上述方式实现对硬件系统干扰信号的过滤,间接地提升系统的控制精度。

2 机床自动控制系统软件功能设计

在机床自动控制系统软件功能优化设计过程中,需要综合考虑机床的组成结构和工作原理^[10]。当一个控制圆盘的预停键被按下后,所有的机器都回到原来的位置,并停止工作。在单一的机床周期内,每台机床都可以独立地进行工件的加工。在实现机床调整时,可以实现动力头进退、回转工作台旋转起落及各个动力头主轴电机开停的自动控制,同时也能够根据输入生产指令与电机元件实时运行状态,实现对机床运动参数的自动控制。

2.1 规划机床执行刀具运动轨迹

将目标生产任务输入到机床中,根据机床的生产目标确定机床执行刀具的实时位置,假设机床的生产目标位置集合为:

$$B_{\text{target}} = \{[x_{\text{target}}(0), y_{\text{target}}(0), 0], \dots, [x_{\text{target}}(n), y_{\text{target}}(n), 0]\} \quad (1)$$

式(1)中,变量 $[x_{\text{target}}(i), y_{\text{target}}(i), 0]$ 表示生产目标中第 i 个节点的位置坐标, n 为生产目标中包含的节点总数量^[11]。在此基础上,可以得出机床执行刀具的实际工作位置,其中第 i 个节点对应的刀具执行位置为:

$$\begin{cases} x_{\text{tool}}(i) = x_{\text{target}}(i) \cdot \cos\theta \\ y_{\text{tool}}(i) = y_{\text{target}}(i) \cdot \sin\theta \\ z_{\text{tool}}(i) = L_{\text{tool}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,参数 L_{tool} 为机床中安装执行刀具的长度, θ 为执行刀具的工作角度。在实际机床刀具运动轨迹规划过程中,为了防止刀具移动在工件上产生的划痕,需要对刀具的实时移动高度进行调整,即当工件不存在 z 方向钻铣任务时,机床刀具高度需满足如下条件:

$$z_{\text{tool}}(i) > L_{\text{tool}} + h_{\text{workpiece}} + \Delta d \quad (3)$$

式中, $h_{\text{workpiece}}$ 为加工工件的厚度, Δd 为刀具与工件之间间隙的门限值^[12]。按照上述方式即可得出机床执行刀具在工作时的位置计算结果,同理可以得出机床在任意工作时刻的节点位置,并得出工作状态下刀具移动轨迹的初始规划结果,即:

$$l_{\text{work}} = \frac{[x - x_{\text{tool}}(0)][y_{\text{tool}}(i) - y_{\text{tool}}(0)]}{x_{\text{tool}}(i) - x_{\text{tool}}(0)} + y_{\text{tool}}(0) \quad (4)$$

初始刀具移动轨迹规划过程中,刀具的 z 轴方向位置始终与式(2)计算结果一致。为保证机床刀具移动的平滑度,间接的提升机床加工结果的平滑度,需要对式(4)表示的初始刀具移动规划轨迹进行插补处理,在插补过程中,使用了定时插补方式,即每隔 T 秒中断一次进行一次插补,计算并输出一给定值^[13]。由于 T 较小,而且机床执行刀具的工作速度一般也不会很高,因此定时插补在机床控制中具有较高的可行性。另外,机床中执行刀具的当前位置不一定为工件施工的起始位置,因此还需要在非工作状态下,对执行刀具的移动轨迹进行规划,规划结果为:

$$l_{\text{Non-work}} = \frac{(x - x_0)[y_{\text{tool}}(0) - y_0]}{x_{\text{tool}}(0) - x_0} + y_0 \quad (5)$$

按照相同方式对非工作状态下执行刀具移动轨迹的规

划结果进行插补处理，最终将两种状态下的轨迹规划结果进行融合，完成机床执行刀具运动轨迹的规划工作，得出的轨迹规划结果记为机床刀具位置的控制目标^[14]。

2.2 设定机床加工强度与速度参数

根据机床待加工的工件的材料刚度以及施工深度目标，机床的加工强度系数，也就是刀具施加的应力值，机床加工强度的计算公式如下：

$$F_{process} = F_{reaction} \cdot h_{process} \cdot \kappa_{stiffness} \quad (6)$$

式中， $F_{reaction}$ 为机床刀具施工过程中工件向刀具产生的反向作用力， $h_{process}$ 为加工目标深度， $\kappa_{stiffness}$ 为加工工件的刚度系数。另外机床加工速度的设定结果为：

$$v_{process} = \frac{L_{work} + L_{Non-work}}{t_{process}} \quad (7)$$

其中： L_{work} 和 $L_{Non-work}$ 分别为工作状态和非工作状态下规划轨迹的长度值， $t_{process}$ 为机床的目标工作时长。根据工件任意节点位置上加工目标的差异，按照上述方式进行重复计算，即可得出机床加工过程中，工件任意位置上剪切力与工作速度参数的设定结果。

2.3 云环境下自动采集机床模拟量与位姿

在云环境下，由 PLC 组成的机床自动控制系统中存在大量模拟量，具体包括温度、电压、电流等，在采集这些模拟量时，一般采用硬件系统中的传感器或对应的变送器来完成，然后把它们转化为符合国际标准的模拟量信号，以供 PLC 采集^[15]。PLC 的模拟器将采集到的模拟器信号转化为数字信号，用于 PLC 的内部处理。在可编程逻辑控制器中，需要把这些对应的信号转化为真实的物理量，从而实现对它们的比较与操作。在云环境下自动采集机床模拟量的过程如图 5 所示。

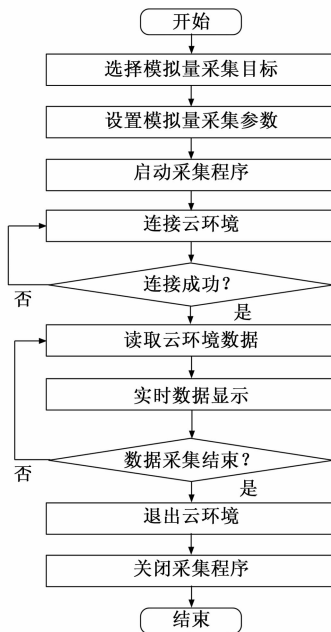


图 5 云环境下机床模拟量采集流程图

按照图 5 表示的流程可以直接得出机床的工作电压，将其标记为 U ，在此基础上可以得出机床工作电流模拟量

的采集结果为：

$$I = \frac{Q}{U \cdot t_{machine\ tool}} \quad (8)$$

式中， Q 为机床工作功率， $t_{machine\ tool}$ 为机床的工作时长。同理可以得出当前机床各执行元件的位姿采集结果，将其标记为 (x_t, y_t, z_t) 。

2.4 机床控制指令的生成

PLC 模拟量的优化过程可以分为三个阶段，即输入采样、用户程序执行和输出刷新^[16]。可编程逻辑控制器以一定的扫描速度重复执行上述三个阶段，获取机床运行模拟量。PLC 模拟量的优化原理如图 6 所示。

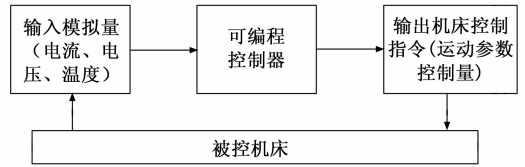


图 6 PLC 模拟量优化过程的原理图

在输入取样部分，利用 PLC 设备对机床中所有处于运行状态的元件进行扫描，并读取各个元件的工作参数，将其存储在 I/O 映像区，以此作为 PLC 的输入模拟量。由于机床处于实时运行的状态，因此需要对 PLC 的输入模拟量进行实时刷新，且在输入取样过程中，存储区内对应的单位的状态与数据是恒定的，而不随输入单位的状态与数据的变化而变化。因此当 PLC 元件输入信号为脉冲信号时，要求输入信号宽度大于一个扫描周期。在实际机床输入模拟量采集过程中，PLC 元件采用自上而下的顺序进行扫描，在扫描每一条梯形图的时候，它又始终是先扫描梯形图左边的由各触点组成的控制线路，对由触点组成的控制线路展开逻辑运算^[17]。在对用户程序进行了扫描之后，CPU 根据输入输出映射区域中对应的状态及数据，对各输出锁存电路进行更新，并通过该输出锁存电路驱动相关的外围设备。在实际机床控制指令生成过程中，将自动采集机床模拟量、位姿以及控制目标等数据输入到 PLC 元件中，并计算机床控制量，其中刀具位置控制量的计算公式如下：

$$\begin{cases} \Delta x = x_{tool}(t) - x_t \\ \Delta y = y_{tool}(t) - y_t \\ \Delta z = z_{tool}(t) - z_t \end{cases} \quad (9)$$

将 t 时刻规划的轨迹目标和当前时刻位置的采集结果代入到公式 (9) 中，即可得出机床刀具位置控制量计算结果的具体取值，根据控制量计算结果的正负情况，可以确定刀具位置的控制方向^[18]。同理可以得出速度、电流、张力控制量的计算结果，将其添加到 PLC 的输出指令中，得出机床控制指令的生成结果。

2.5 实现机床自动控制功能

通过 PLC 模拟量生成机床控制指令的驱动下，实现对机床工作电流、位置、速度、应力以及抖振的多指标控制。以机床工作电流控制为例，控制指令的传递函数为：

$$K_I = \frac{\sigma_{proportion} \kappa_{amplify}}{\tau_I + 1} \quad (10)$$

其中： $\sigma_{proportion}$ 为比例增益， $\kappa_{amplify}$ 为电流控制放大系数， τ_I 为积分时间常数。在系统硬件设备的支持下，按照式(10)将控制指令传输给机床终端，并驱动相应的控制装置，当电流调整至与目标值一致时，中断控制程序^[19]。同理能够完成对机床中刀具移动位置、速度以及应力的控制，另外在控制过程中还需要对抖振情况进行控制，当传感器检测到机床中任意元件存在抖振现象时，立即利用 PLC 模拟量生成一个抖振控制指令，该指令主要通过产生逆向脉冲实现对抖振信号的控制。重复上述流程，直至控制目标机床工作系数与设置目标一致，且无抖振现象为止。

3 系统测试

为了验证优化设计的云环境下基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统的控制功能是否达到预期效果，设计系统测试实验。此次系统测试实验的基本思路为：设置机床的初始运行参数，生成多个包含位置、速度、应力的控制任务，在优化设计系统的控制下，观察机床的实际运行参数与控制目标之间的差距，从而体现出反应系统控制功能的测试结果。另外，还需要对系统控制过程中机床的抖振情况进行测试，判断优化设计系统是否能够解决传统系统控制过程中存在的抖振问题。

3.1 选择机床控制目标

此次系统测试实验选择某机械工厂的数控组合机床作为控制目标，该机床能够完成钻孔、攻丝、铣削等生产工艺。从组成结构方面来看，由牵引推送机构，缓冲机构，成型机构，剪切机构等部分组成，在初始状态下机床中所有执行刀具均停留在初始位置，记录具体的位置坐标数据作为机床的初始值。

3.2 配置云环境

为了给优化设计的基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统提供运行环境，需体现构建云环境，云环境的配置结构如图 7 所示。

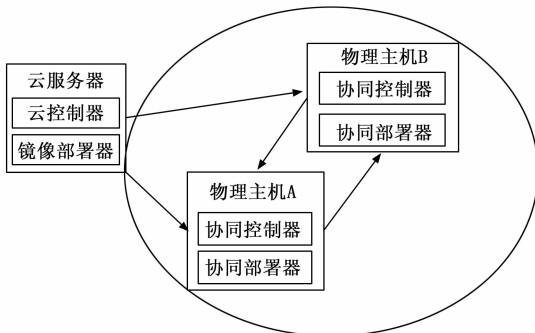


图 7 云环境拓扑结构图

配置云环境时，先通过蓝图指定云中预留资源，并确定实验环境中云的类型，通过 OpenStack Heat 连接至云端，保证物理主机能够上传并下载云端数据，实现云环境数据交互^[20]。按照上述方式将机床接入到配置云环境中，并将

机床实时运行数据直接存储在云端。

3.3 生成机床控制任务

通过设置多个机床生产任务实现机床控制任务生成，部分任务的生成情况如表 1 所示。

表 1 机床控制任务表

任务编号	位置	速度/(mm/s)	应力/N
1	(15,21,7)	6.5	25
2	(7,17,6)	2.7	35
3	(9,11,9)	4.4	41
4	(14,6,7)	5.2	20
5	(25,16,2)	1.7	16
6	(18,12,5)	1.3	37
7	(24,8,4)	2.9	28
8	(7,7,6)	3.6	10

表 1 表示的是第一个节点控制目标，按照上述方式可以得出机床生产过程中任意时刻控制目标数据，并以此作为验证优化设计系统对应控制精度的比对标准。为验证优化设计系统控制功能是否会受到外界因素的干扰，在实验环境中加设一个干扰源，得出两种实验场景，两种场景下机床控制任务相同。

3.4 硬件设备安装与调试

将云环境下基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统中的硬件设备安装在实验环境中，并与供电电路相连，实现硬件设备的安装。

在实验开始之前，需要对安装的所有的硬件设备进行调试，通过调试运行，对 PC 的使用程序进行检查并改正同时对 PC 的输入输出接线以及其它线路进行检查并改正。

3.5 描述系统测试实验过程

在将整个系统投入现场之前，先用仿真软件对所编的 PLC 梯形图程序进行调试和验证，调试此系统的仿真软件是 TRILOGI 软件。TRILOGI 软件是一款可以应用于 PLC 梯形图逻辑编辑的软件，它具有指令功能强大，仿真功能灵活，调试与运行方便，梯形图程序的输入方式十分简单等特点，是 PLC 梯形图逻辑编程与 PLC 仿真的工具。在 TRILOGI 软件的支持下，在配置的云环境下，将优化设计基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统的软件部分转换为计算机可以直接运行的程序代码，实现软件系统的开发。将选择的机床控制目标接入到控制系统中，根据生成的控制任务完成系统控制任务。机床自动控制系统的运行界面如图 8 所示。

按照上述方式可以得出任意时刻机床运行参数的控制结果。在此基础上，启动实验环境中的干扰源设备，重复上述操作可以得出有干扰条件下的控制结果。为体现出优化设计系统在控制功能方面的优势，设置传统的基于数字孪生的控制系统和基于双 STM32+FPGA 的控制系统作为实验的对比系统，按照上述方式实现对比系统的开发，并得出相应的控制结果。

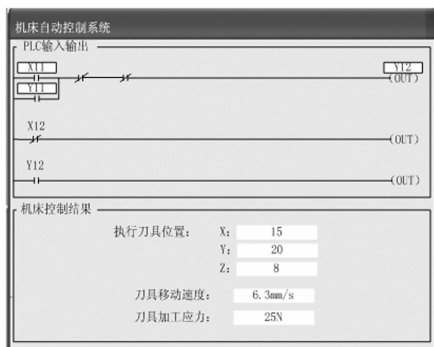


图 8 机床自动控制系统运行界面

3.6 设置系统测试指标

此次系统测试实验设置位置控制误差、速度控制误差、应力控制误差作为实验的量化测试指标，其中机床位置控制误差的数值结果为：

$$\varphi_{\text{position}} = |x_{\text{target}} - x_{\text{control}}| + |y_{\text{target}} - y_{\text{control}}| + |z_{\text{target}} - z_{\text{control}}| \quad (11)$$

其中：(x_{target}, y_{target}, z_{target}) 和 (x_{control}, y_{control}, z_{control}) 分别对应的是设置的机床控制目标位置和控制系统下的实际位置。另外速度控制误差和应力控制误差的测试结果可以表示为：

$$\begin{cases} \varphi_{\text{speed}} = |v_{\text{target}} - v_{\text{control}}| \\ \varphi_{\text{stress}} = |F_{\text{target}} - F_{\text{control}}| \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) 中，变量 v_{target} 和 v_{control} 分别为机床运行速度的控制目标值和实际控制值，F_{target} 和 F_{control} 对应的是机床施工应力的目标值和实际值。最终计算得出机床控制误差越小，说明对应系统的控制功能越优。另外，还需要对控制过程中机床的抖振情况进行测试，具体的测试指标为抖振幅值，该指标的计算公式如下：

$$A_{\text{buffer}} = f_{\text{max}}(\omega_{\text{vibrate}}) - f_{\text{min}}(\omega_{\text{vibrate}}) \quad (13)$$

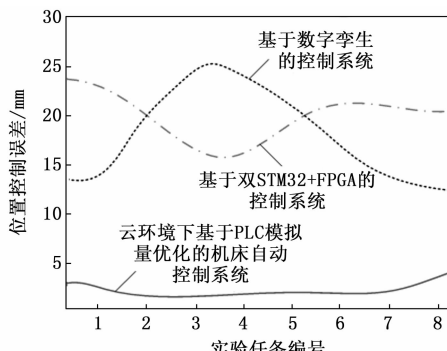
式中，f_{max}() 和 f_{min}() 分别为最大值和最小值求解函数，ω_{vibrate} 表示机床抖振信号。计算得出机床抖振幅值越小，说明系统对机床抖振控制效果越好。

3.7 系统测试结果与分析

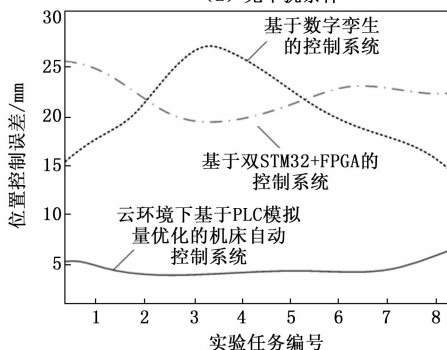
通过相关数据统计，得出 3 种控制系统作用下，机床加工工件实时位置控制功能测试结果，如图 9 所示。

从图 9 中可以直观地看出，两个对比系统在无干扰条件下的平均控制位置控制误差分别为 18.4 mm 和 16.8 mm，而优化设计系统在该条件下的位置控制误差的平均值为 4.8 mm。而在有干扰环境下，三种系统的位置控制误差均得到一定提升，分别为 22.4 mm、20.8 mm 和 6.8 mm。在无干扰条件下得出三种系统控制下速度与应力控制误差的测试结果如表 2 所示。

将表 2 中数据代入式 (12) 中，计算得出在三个系统控制下，机床速度控制误差分别为 0.46 mm/s、0.29 mm/s 和 0.14 mm/s，而机床应力控制误差分别为 4.6 N、2.6 N 和 0.6 N。同理得出有干扰条件下机床速度与应力控制误差测试结果，如表 3 所示。



(a) 无干扰条件



(b) 有干扰条件

图 9 机床自动控制系统位置控制误差测试对比曲线

表 2 无干扰条件下机床速度与应力控制误差测试数据表

任务编号	基于数字孪生的控制系统		基于双 STM32+FPGA 的控制系统		云环境下基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统	
	速度/(mm/s)	应力/N	速度/(mm/s)	应力/N	速度/(mm/s)	应力/N
1	6.1	29	6.2	28	6.3	25
2	2.2	32	2.4	33	2.5	35
3	4.7	46	4.6	44	4.2	40
4	5.6	24	5.5	22	5.2	20
5	1.1	11	1.4	13	1.5	15
6	1.0	41	1.1	39	1.3	36
7	2.2	21	2.5	24	2.7	26
8	3.1	15	3.3	12	3.5	10

表 3 有干扰条件下机床速度与应力控制误差测试数据表

任务编号	基于数字孪生的控制系统		基于双 STM32+FPGA 的控制系统		云环境下基于 PLC 模拟量优化的机床自动控制系统	
	速度/(mm/s)	应力/N	速度/(mm/s)	应力/N	速度/(mm/s)	应力/N
1	6.0	29	6.2	29	6.2	24
2	2.0	31	2.2	31	2.5	35
3	4.9	48	4.6	45	4.1	40
4	5.7	24	5.4	22	5.2	20
5	1.0	10	1.4	11	1.5	15
6	0.8	43	1.0	39	1.3	36
7	2.1	20	2.4	22	2.6	25
8	3.0	17	3.2	12	3.5	10

通过式 (12) 的计算, 得出有干扰条件下, 两种对比系统速度控制误差平均值分别为 0.6 mm/s 和 0.34 mm/s, 应力控制误差的平均值分别为 5.8 N 和 3.6 N, 而优化设计系统速度与应力控制误差平均值分别为 0.18 mm/s 和 0.9 N。由此可以证明, 在两种实验场景下, 优化设计方法机床控制误差更低, 且与无干扰条件相比, 在有干扰条件下控制误差的变化幅度更小, 即受环境的干扰程度更小。综合有、无干扰两种实验条件, 得出三个控制系统作用下, 机床控制抖振信号测试结果如图 10 所示。

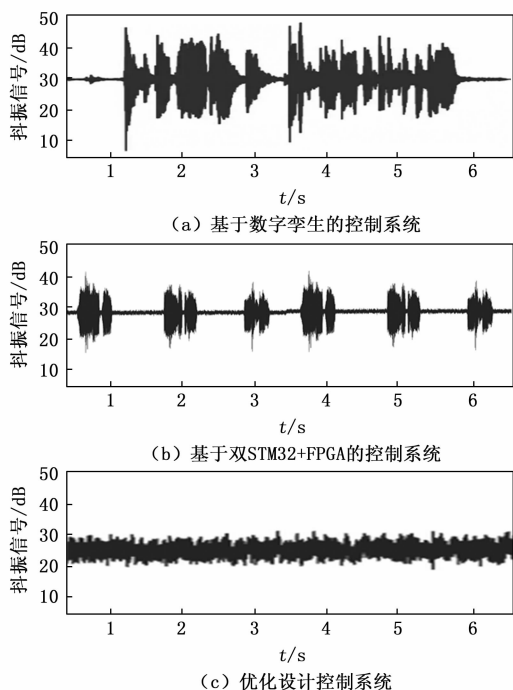


图 10 机床自动控制系统下的机床抖振信号波形图

将图 10 中数据代入式 (13) 中, 计算得出三种系统控制下机床抖振幅值分别为 42 dB、20 dB 和 9 dB。

4 结束语

机床是一种可以对指定工件进行批量加工的专用设备, 它具有较高生产效率, 而且结构较为复杂, 因此对控制系统可靠性和稳定性提出了更高要求。本文在云环境支持下, 通过对 PLC 模拟量的优化, 实现对机床自动控制系统优化设计, 从实验结果中可以看出, 优化设计控制系统能够实现机床实时运行参数精准控制, 提高机床工作精准度, 间接提高生产效率, 同时还能够环节控制过程中机床抖振现象, 提高机床工作稳定性。然而此次系统测试设置机床工作任务较少, 因此得出实验结果存在一定局限性, 需要在今后研究工作中进一步补充。

参考文献:

[1] 陈思远, 张弛, 吴晓光, 等. 基于数字孪生的 MPS 智能控制系统设计与应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (5): 67-70.

[2] 文杰棱, 韩震宇, 王咏麒, 等. 基于双 STM32+FPGA 的桌面数控车床控制系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2021 (6): 117-120.

[3] 曲乙澍, 杨旭. 基于可变论域模糊控制的高精度数控机床控制仿真 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (21): 175-180.

[4] 潘盛湖, 张小军, 吕东. 一种基于机器视觉的平面加工机床控制系统的设计 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (6): 784-792.

[5] 李磊, 张国澎. 基于 PLC 的农机零部件加工中机床电气控制系统 [J]. 农机化研究, 2022, 44 (10): 193-197.

[6] 孟博洋, 李茂月, 刘献礼, 等. 机床智能控制系统体系架构及关键技术研究进展 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (9): 147-166.

[7] 刘立业, 陈永亮, 汤伟莉, 等. 搅拌摩擦焊机床开放式控制系统及切线跟踪研究 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (16): 1948-1956.

[8] 林宝君, 郑祺峰. 发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速前瞻控制 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (7): 793-801.

[9] 魏新园, 钱牧云, 冯旭刚, 等. 基于偏最小二乘的数控机床热误差稳健建模算法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (5): 34-41.

[10] 江雪梅, 袁子航, 姜平, 等. 一种基于数字孪生的重型数控机床碰撞检测方法 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (22): 2647-2654, 2663.

[11] 马榛, 王俊勃, 刘江南, 等. 新型高速钢丝圈成型机床控制系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2022 (3): 98-102.

[12] 曲乙澍, 杨旭. 基于可变论域模糊控制的高精度数控机床控制仿真 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (21): 175-180.

[13] 高舒凯, 毕果. 适用于智能制造的数控机床全信息监控系统 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2022, 61 (6): 1090-1096.

[14] 王毅, 李波, 温鹏, 等. 数控机床高频信号高精度数据采集系统设计 [J]. 现代制造工程, 2022 (4): 134-142.

[15] 梁建智, 邱彪, 陈宇燕, 等. 基于数据驱动的数控机床自适应迭代学习控制 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (8): 50-54.

[16] 李慧敏, 邓铭, 刘璞凌, 等. 半闭环数控机床几何与热复合的定位误差建模与补偿 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (1): 123-128.

[17] 朱俊, 朱良峰. 基于 Profinet 的双主轴数控磨床控制系统的设计与实现 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (5): 129-132, 37.

[18] 范晋伟, 杨跃, 潘日, 等. 基于 OPC UA 的数控机床远程监控系统开发 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (18): 44-48, 54.

[19] 张建涛, 刘志峰, 李彦生, 等. 基于相似理论的重型数控机床—基础系统位移变形研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (7): 309-316.

[20] 李涛. 采用扩展滑模观测器的数控机床永磁同步电机鲁棒控制方法 [J]. 制造技术与机床, 2022 (5): 152-158.