

数控机床微振动监测系统设计

彭晓彬, 孟令启

广州科技职业技术大学智能工程与未来学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月25日; 发布日期: 2025年12月31日

摘要

本文针对数控机床的微振动监测系统进行设计,首先在查阅大量相关资料的基础上,提出了该设计方案,对该方案进一步论证。本方案采用工作台工作方式。根据现有条件对监控系统装置中的定位工作台部分和软件单片机电路进行设计,设计形式为三维可变向工作台。考虑把激光发射器、接收器和GPS定位仪作为一个整体安装在三向工作台上,三向工作台安装固定在数控机床上。对工作台整体进行设计,并对工作台进行动力学计算、滚珠丝杠的精度校核及滚珠丝杠预压力的设计等。该系统操作简单方便,精确监测,具有很高的应用前景。

关键词

数控机床, 微振动, 监测系统, GPS定位仪

The Micro-Numerous Control Machine Deformation Monitoring System Design

Xiaobin Peng, Lingqi Meng

School of Intelligent Engineering and the Future, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: November 12, 2025; accepted: December 25, 2025; published: December 31, 2025

Abstract

The paper designs for the micro-numerous control machine deformation monitoring system. Based on extensive literature review, the proposed design scheme is introduced and further substantiated. The scheme uses a workbench-based approach. Considering existing conditions, the positioning workbench component and software microcontroller circuit within the monitoring system are designed as a three-dimensional variable-direction workbench. The laser transmitter, receiver, and GPS locator device are integrated as a single unit mounted on the three-axis workbench, which is fixed to the

numerous control machine. The overall workbench design includes dynamic calculations, precision verification of ball screws, and design for ball screw precompression. This system offers simple operation, accurate monitoring, and significant application potential.

Keywords

Numerous Control Machine, Micro-Shock, Monitoring System, GPS Locator

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数控系统振荡问题是数控机床调试或运行中常见的故障，数控系统的振荡现象已成为数控系统的共通性问题。系统振荡时会造成机床产生振动故障，尤其在卧式带立柱的轴和旋转数控工作台轴，其系统出现振荡的频率较高。该问题已成为影响数控设备正常使用的重要因素之一[1]。机床的振荡故障通常发生在机械部分和进给伺服系统，产生振荡的原因有很多，除了机械方面存在不可消除的传动间隙、弹性变形、摩擦阻力等诸多因素外，伺服系统有关参数的影响也是重要的一方面[2]。

2. 整体设计方案及流程图

将把接收器、激光发射器以及 GPS 定位仪作为一个整体安装在三向工作台上，三向工作台固定安装在数控机床上(如图 1、图 2 所示)。

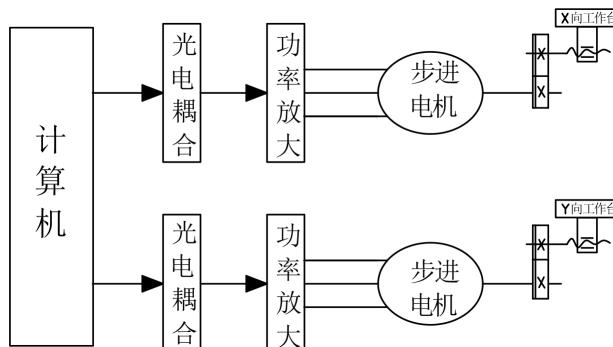
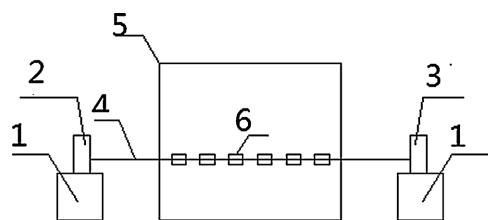


Figure 1. Flowchart showing the process on the workbench plane
图 1. 工作台平面所示流程图



注：1：GPS 定位仪工作台；2：接收器；3：激光发射器；4：激光束；5：数控机床；6：振动传感器。

Figure 2. Schematic diagram of the on-site detection system

图 2. 现场检测系统示意图

2.1. 检测原理及仪器的选择

在传统测量方法中, 大多数是分析观测方位相对几何关系, 而利用 GPS 定位的激光传感器检测, 可以大幅度地保证定位精度和检测精度[3]。数控机床就像地球上的所有物体一样, 以自身的内在频率不断振动。

2.2. GPS 定位仪

工作原理: GPS 接收机可以收到准确至纳秒级的时间信号; 用来预测几个月内卫星所处位置的星历[4]; 用来计算定位时所需卫星坐标的广播星历, 精度为几米到几十米(随着各卫星不同, 时间变化) [5]; GPS 系统信息, 比如卫星状况等。

2.3. 激光传感器型号选择

产品名称: 高响应高精度激光位移传感器[6]; 产品型号: optoNCDT2200。

测量范围: 200 mm; 线性: 0.03% (10/200 mm); 分辨率: 0.005%; 频响: 10 kHz 模拟输出: 5 V; 数字输出: RS485; 保护等级: 传感器头 IP65; 信号处理器 IP50 [7]。

2.4. X-Y 向的平面结构

由测试台当作一个滑块, 它可以在滚珠丝杠螺母带动下沿着 Y 向移动, 对 Y 向进行位移的补偿[8]。其中 Y 向工作台能够在 X 向直线导轨上滑动, 在步进电机的驱动下带动滚珠丝杠实现 X 向位移的补偿[9]。这时底座相当于滑台, 整个 X 向装置相当于滑块, 见图 3。

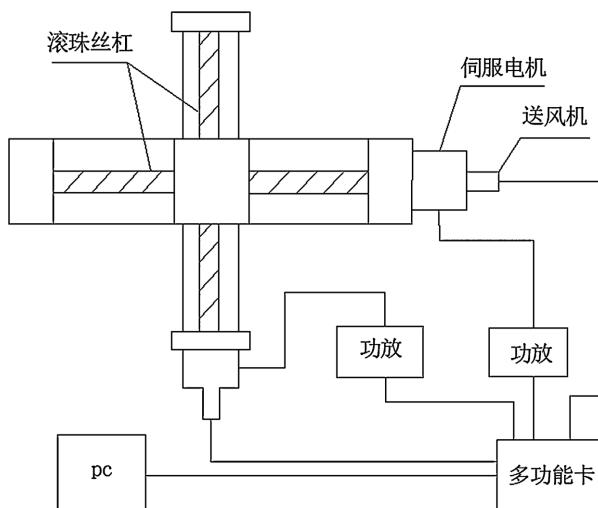


Figure 3. Planar structure of the X-Y axis workbench
图 3. X-Y 向工作台的平面结构

2.5. Z 向工作台的平面结构

由于 Z 向振动相对较小, 但是, Z 向对激光的直线度等影响却很明显, 有一定必要对工作台的 Z 向位移进行补偿[10]。见图 4。

3. 监测仪器的设计与各数值计算

1、工作原理

本系统采用双闭环控制系统, 具有转速稳定、调速精度高、抗干扰能力强等特点, 并且具备过流、

限制超速等完备的保护措施，直接调动“调速”旋钮就可变化直流电机的直流电压，从而改变电机的转速，实现控制速度的平稳[11]。

工作台主视图及左视图的局部剖视简图如图 5 所示。

工作台俯视简图如图 6 所示。

2、滚珠丝杠计算、选择

初选丝杠材质：CrWMn 钢，HRC58~60，导程： $l_0 = 5 \text{ mm}$ 。

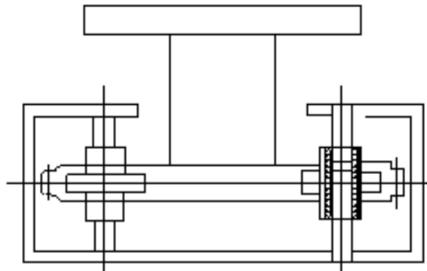


Figure 4. Plan view of the Z-axis workbench structure

图 4. Z 向工作台的平面结构图

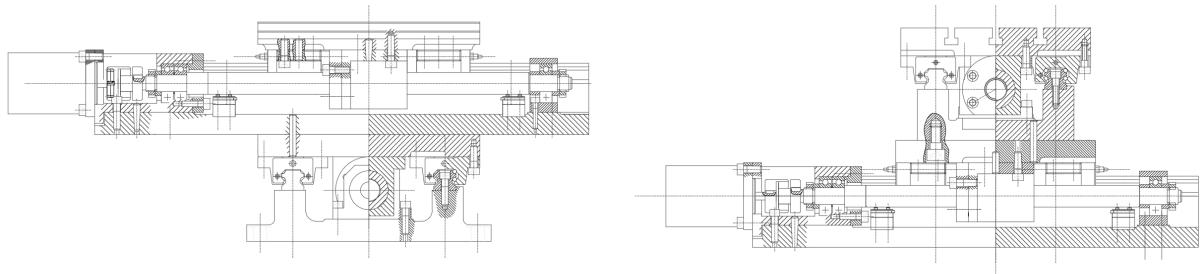


Figure 5. Simplified partial sectional views of the workbench of the main view (left side) and the left view (right side)
图 5. 工作台主视图(左侧)及左视图(右侧)的局部剖视简图

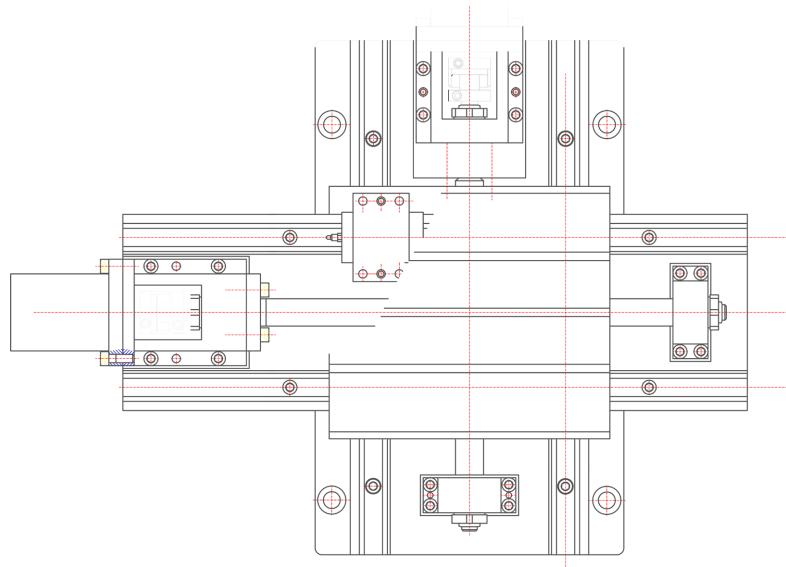


Figure 6. Simplified top view of the workbench

图 6. 工作台俯视简图

强度计算

$$\text{丝杠轴向力: } F_{\max} = KF_{x,y} + f(F_z + W_{x,y})(N) \quad (1)$$

其中: $K = 1.15$, 滚动导轨摩擦系数 $f = 0.003 \sim 0.005$; 在通常情况下: $F_x = (0.1 \sim 0.6)F_z$, $F_y = (0.15 \sim 0.7)F_z$, 可取 $F_x = 0.5F_z$, $F_y = 0.6F_z$ 计算。

取 $f = 0.004$, $F_z = 400 N$, 则:

$$\begin{aligned} F_x &= 0.5F_z = 0.5 \times 2000 = 1000 N \\ F_y &= 0.6F_z = 0.6 \times 2000 = 1200 N \\ F_{x_{\max}} &= 1.15 \times 1000 + 0.004(2000 + 67.58) = 1045.686 N \\ F_{y_{\max}} &= 1.15 \times 1200 + 0.004(2000 + 655.2) = 1252.621 N \end{aligned}$$

$$\text{寿命值: } L = \frac{60nT}{10^6}, \text{ 其中丝杠转速: } n = \frac{v_{\max}}{l_0} (\text{r/min}) \quad (2)$$

$$T = 15000 \text{ h}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{v_{\max}}{l_0} = \frac{2000}{5} = 400 \text{ r/min} \\ L &= \frac{60 \times 400 \times 15000}{10^6} = 360 \end{aligned}$$

$$\text{最大动载荷: } Q = \sqrt[3]{L} f_H f_w F \quad (3)$$

式中: f_w 为载荷系数, 中等冲击时为 1.2~1.5; f_H 为硬度系数, HRC ≥ 58 时为 1.0。

查表得中等冲击时: $f_w = 1.2, f_H = 1$, 则:

$$Q_x = \sqrt[3]{360} \times 1.2 \times 1 \times 1045.686 = 7079.58 N$$

$$Q_y = \sqrt[3]{360} \times 1.2 \times 1 \times 1252.621 = 10686.54 N$$

根据使用情况选择滚珠丝杠螺母的结构形式, 并根据最大动载荷的数值可选择滚珠丝杠的型号为: CM 系列滚珠丝杆副, 其型号为: CM2005-5。

其额定动载荷为 $14,205 N > Q_y$ 足够用。滚珠循环方式为外循环螺旋槽式, 预紧方式采用双螺母螺纹预紧形式。

3、系统硬件电路分析及设计

X-Y 工作台的微机控制系统的接口电路[12]如图 7 所示。

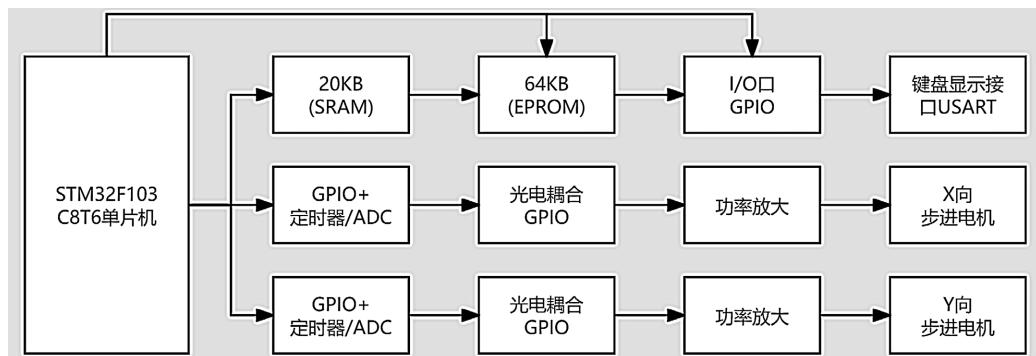


Figure 7. Schematic diagram of the control system for the three-axis workbench
图 7. 三向工作台的控制系统示意图

系统的硬件电路组成[13]如图 8 所示。

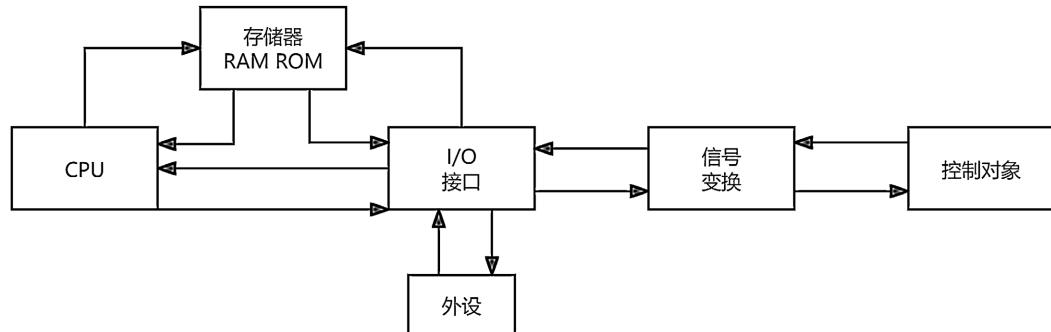


Figure 8. System hardware circuit diagram

图 8. 系统的硬件电路图

本次设计选用 STM32F103C8T6 芯片作为主控芯片。因为其主频较高, 拥有 20 KB 的 SRAM 及 64 KB 的 FLASH, 外设丰富, 可满足较为复杂的工业应用需求。

1) 功率放大器

环型分配器的输出脉冲很小, 还远不能满足步进电机的要求, 不需将它放大, 以产生足够大的功率驱动步进电机正常运转[14], 这里采用的功率放大电路如下图 9 所示。

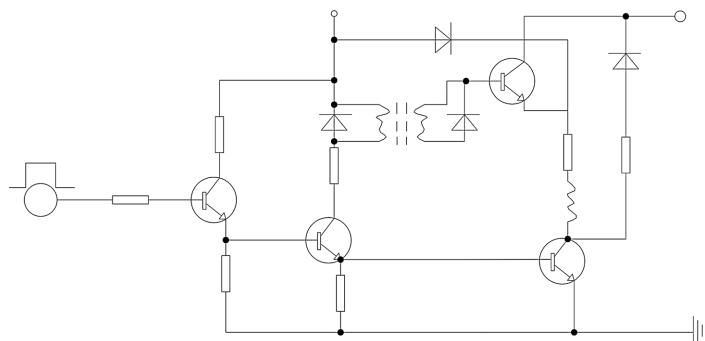


Figure 9. Power amplifier circuit diagram

图 9. 功率放大器电路图

2) STM32F103C8T6 的时钟电路

单片机的时钟可由内部方式产生, 内部方式利用芯片内部的振荡电路, 在 XTAL1、XTAL2 引脚上外接定时元件[15]。如下图 10 所示。

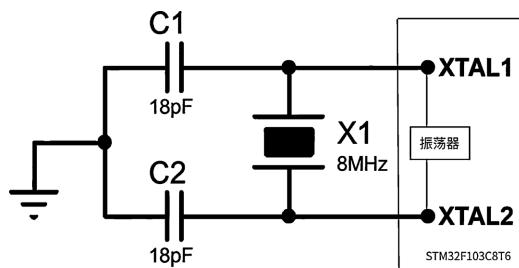


Figure 10. Clock circuit

图 10. 时钟电路

3) 振动信号的降噪处理

根据实际数据总结出机床振动的外界环境影响及自身设备非加工干扰的主要振动频率集中在 0~5 kHz 区间。外界环境如周围重型车辆的移动、相邻设备的工作, 以及电源 50 Hz 或倍频 100 Hz(电机、变压器等设备的低频磁场)。设备自身的非加工干扰如皮带、齿轮等传动系统振动, 液压的泵压力脉动、气缸的排气冲击等产生的中低频振动。

虽然有用信号与无用信号会相互掺杂, 但这种方式较为简便, 成本较低, 可以类似汽车手动变挡, 在同一电路进行不同频段的噪声消除。

$$\text{根据高通滤波截止公式: } f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

可得: 当得数为 5 kHz 时, $2\pi RC$ 的结果应为 5000。由于电阻与电容需考虑市面上的通用性, 故采用 3.2 kΩ 的电阻与 0.01 μF 的电容。

4、数据处理流程图示, 如图 11 所示。

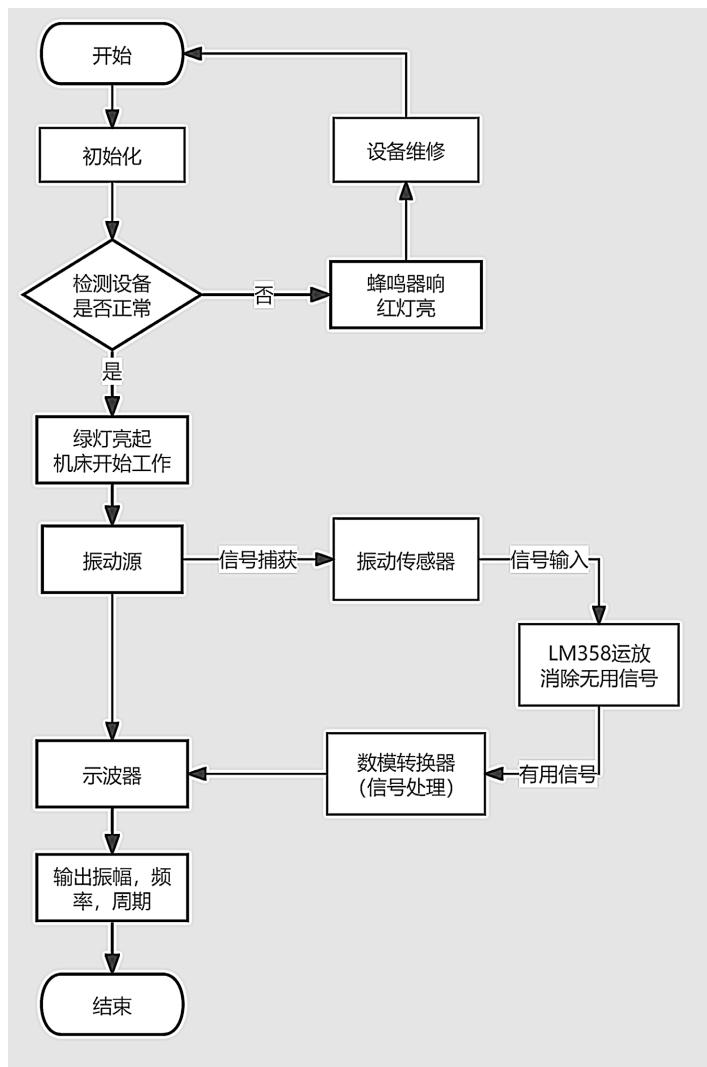


Figure 11. Data processing flowchart

图 11. 数据流程处理框图

5、电路模拟仿真原理[16]如图 12 所示。

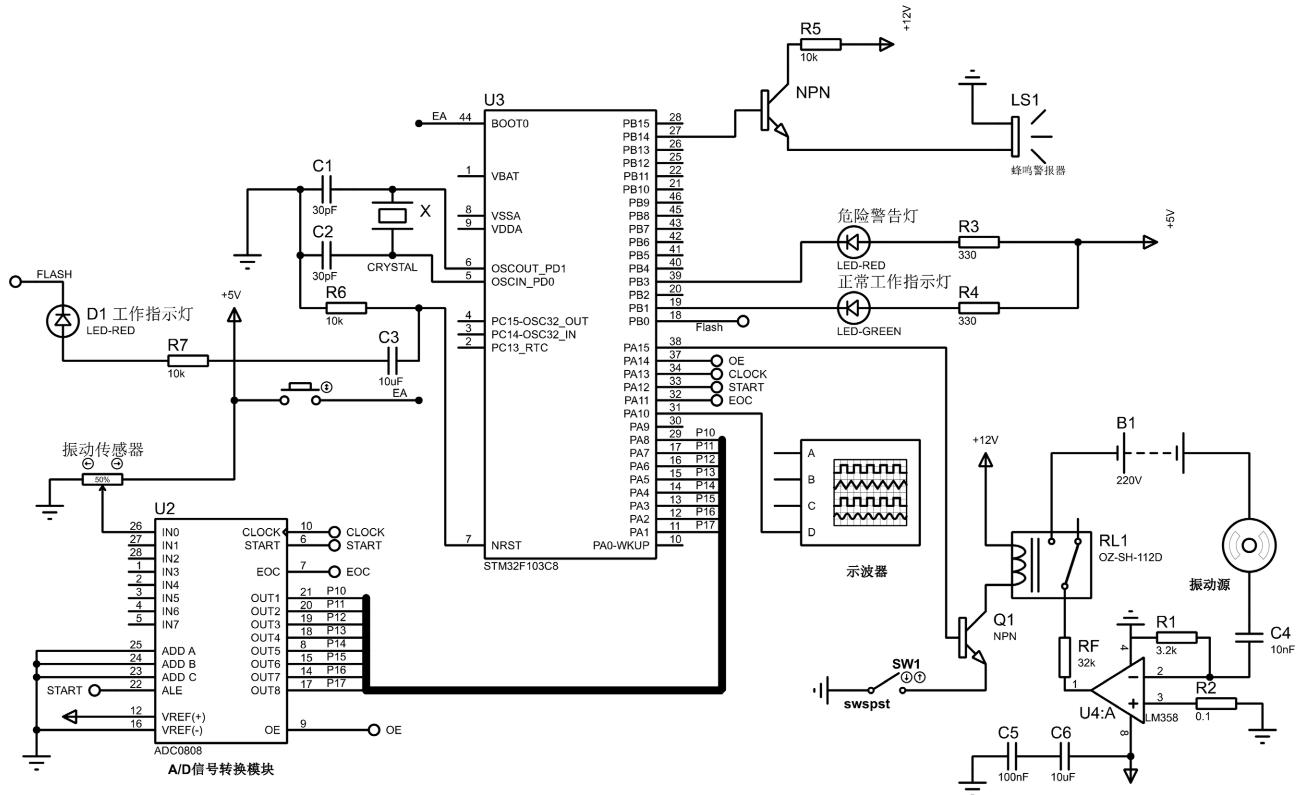


Figure 12. Proteus schematic diagram

图 12. Proteus 原理图

4. 结语

设计数控机床的监控自调整技术可以满足人们对数控机床安全性能的要求, 做到自动调零平整度, 同时也加快促进了工业制造领域的发展, 对提高数控机床的精度起到积极的作用。

- 1) 整个装置检测精度高。GPS 可以提供比微米级别甚至更高的定位精度。当处于振动监测过程中, GPS 接收机天线固定在机床上, 天线的一些诸如对中误差、整平误差、定向误差、高度误差等不会影响监测结果;
- 2) 系统操作方便, 完全实现监测的自动化。对各监测点成立无人值班的自动监测网络, 进而实现从数据采集、传输、加工、分析、报警到统计的自动化。提高工业生产的效率, 并进一步填补我国自动化领域的空白;
- 3) 结合实际生产环境, 排除了监测现场温度、电磁、湿度、压强差异的干扰。本文有机地结合了微机控制系统和机械系统, 实现自动监测及调整。

参考文献

- [1] 田海龙, 孙雨治, 杨兆军, 等. 数控机床可靠性的故障模式、影响及危害分析研究现状及发展趋势[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7): 789-798.
- [2] 刘阔, 邢家鹏, 王永青, 等. 数控机床精度保持性指标体系与综合评价方法研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(13): 282-292.

-
- [3] 刘强, 刘航, 王畅, 等. 基于导航时钟驯服技术的高低轨卫星联合定位方法[J]. 中国空间科学技术, 2025, 45(4): 12-20.
 - [4] 侯慧太, 蓝朝桢, 徐青. 基于卫星影像全局和局部深度学习特征检索的无人机绝对定位方法[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(5): 1064-1074.
 - [5] 瞿智, 王刚, 王天云, 等. 基于领导跟随一致性的卫星网络时频同步方法[J]. 宇航学报, 2025, 46(3): 589-600.
 - [6] 李姗. 数控机床几何误差的激光传感器测量方法研究[J/OL]. 机械设计与制造: 1-5.
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20250807.011>, 2025-11-11.
 - [7] 马梓凯. 激光传感器在隧道变形监测系统中的应用[J]. 建筑技术, 2025, 52(6): 124-126.
 - [8] 赵子康, 刘宏达, 郭永豪, 等. 直接转矩控制模式下滚珠丝杠进给系统跟踪性能研究[J/OL]. 机械科学与技术: 1-9.
<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250067>, 2025-11-11.
 - [9] 万鹏宇, 孔令友, 柯美志, 等. 机床的坐标轴刚性辅助增强技术研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 18-26.
 - [10] 焦东明. 高精度龙门镗铣床制造难点分析[J]. 机床与液压, 2025, 53(8): 46-51.
 - [11] 李子明, 郭开心, 姜冕. 双闭环控制的电子安全系统升压电路参数优化方法[J/OL]. 探测与控制学报: 1-8.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1316.TJ.20241219.1344.006>, 2025-11-11.
 - [12] 李谊萍, 詹华群. 电控机械式自动变速器 STM32 单片机控制方法[J/OL]. 机械设计与制造: 1-7.
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20250811.005>, 2025-11-11.
 - [13] 李莉, 熊晶. 基于 CPLD 和单片机的等精度数字频率计设计[J]. 电子技术应用, 2015, 41(10): 118-120.
 - [14] 崔朝探, 仵志达, 芦雪, 等. 高频 GaN 功率放大器 MMIC 芯片级热设计[J]. 半导体技术, 2025, 50(11): 1167-1173.
 - [15] 韦雪明, 蔡子陆, 李志怀, 等. 高速低抖动多相自校准时钟源[J/OL]. 微电子学: 1-9.
<https://link.cnki.net/urlid/50.1090.TN.20251030.1602.002>, 2025-11-11.
 - [16] 张佳明, 王文瑞, 孙浩, 等. 基于 Proteus 仿真的微机原理与应用研究性实验教学项目设计[J]. 机械设计与制造, 2024(4): 264-267.