

# 基于 PLC 的掘进机主轴承缩比试验台 控制系统设计

范书伟,高宏力,曹 奥

(西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**为了研究掘进机主轴承在载荷作用下的动力学特性,考虑到掘进机设备的复杂性,于是根据缩比模型试验理论搭建掘进机主轴承缩比试验台,并基于汇川 PLC 对试验台控制系统进行设计。试验台通过 PLC 建立 EtherCAT 总线通信网络,通过触摸屏操作界面执行操作,能对加载缸的载荷大小进行调节控制。经过测试,基于 PLC 的掘进机轴承缩比试验台控制系统稳定性好、可靠性高且人机交互友好,便于后续主轴承载作用下动力学特性研究的开展,也为相关轴承试验台的设计提供了一些思路和参考价值。

**关键词:**PLC;缩比试验台;伺服控制;触摸屏

**中图分类号:**TP273

**文章编号:**1000-0682(2025)01-0008-05

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.002

## Design of control system for the scaling experimental platform of tunnelling machine bearing based on PLC system

FAN Shuwei, GAO Hongli, CAO Ao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic characteristics of the tunnelling machine main bearing under load. Considering the complexity of tunnelling machine, a scaled-down experimental platform was constructed based on the theory of scaled model testing. The experimental platform was designed using a scaled-down model of the main bearing and controlled by PLC from Huichuan. The platform established an EtherCAT communication network, allowing for load adjustments of the loading cylinder through the touchscreen interface. Through testing, the control system of the tunnelling machine main bearing scaled-down experimental platform, based on PLC, demonstrated excellent stability, high reliability, and user-friendly human-machine interaction. It facilitates the subsequent study of the dynamic characteristics under load on the main bearing and provides valuable insights and reference for the design of related bearing testing platforms.

**Keywords:** PLC; scaling experimental platform; servo control; touch screen

## 0 引言

随着中国城市建设的快速发展,掘进机被广泛应用在隧道建设等施工领域。在施工过程中,掘进机设备的安全性和可靠性十分重要<sup>[1]</sup>。主驱动轴

承作为 TBM 主驱动系统实现连续掘进工作的关键部件,是 TBM 所必需的重要传动元件,直接决定着 TBM 的工作性能、质量、安全性和可靠性<sup>[2]</sup>。掘进机在施工过程中,其所面对的地质条件复杂多变,使得施加在主轴承上的载荷不均匀,在工作时易承受偏载作用,造成主轴承不均匀磨损,使主轴承失效<sup>[3]</sup>。为了研究掘进机主轴承载荷作用下的动力学特性,需要搭建实验台模拟工程实际环境。考虑到掘进机主轴承体积过大、维护成本高和实验开展

收稿日期:2024-06-13

第一作者:范书伟(2000—),男,汉族,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向为轴承振动信号处理。

困难,于是基于缩比准则,建立和主轴承结构相似、等比例缩小的模型作为实验的研究对象<sup>[4]</sup>。搭建掘进机主轴承缩比试验台开展实验研究。为了尽可能保证缩比试验台的工况模拟和 TBM 实际掘进时运行工况的相似性,掘进机主轴承缩比试验台的缩比准则为:

(1)试验台使用的实验轴承需要与 TBM 主轴承结构相同,同样为三排三列圆柱滚子轴承。

(2)试验台使用的实验轴承转速与 TBM 原型机主轴承转速一致,为 5 r/min。

(3)试验台使用的实验轴承驱动方式与 TBM 原型机刀盘驱动方式一致,同样为齿轮传动带动轴承工作。

(4)试验台使用的实验轴承承受载荷可变并且与 TBM 原型机承受载荷成比例。

该文基于汇川 PLC 对掘进机主轴承缩比试验台进行设计,并利用汇川 IT7100 触摸屏实现人机交互,充分利用 PLC 控制器稳定可靠,触摸屏交互方便的特点<sup>[5]</sup>。EtherCAT 总线运动控制器有成本低、控制方式灵活等优点,在有多轴和同步方面需求的行业应用越来越广泛<sup>[6-7]</sup>。试验台通过 PLC 建立 EtherCAT 总线通信网络,控制伺服电机带动电动缸进行加载,并利用传感器监测载荷变化。PLC 系统的硬件网络组态,程序编写在汇川 Inoproshop 软件中进行。触控屏是 PLC 工业控制系统中实现人机交互的一种实用型可视化画面,具有适应性强,交互方便的特点<sup>[8-9]</sup>。在试验台中可通过触摸屏调节和监测载荷变化,试验台使用汇川 IT7100 触摸屏,其界面设计在汇川 InoTouchPad 中进行。本试验台控制系统逻辑清晰、稳定性强、人机交互友好,便于主轴承载荷作用下动力学特性研究的开展,也为相关轴承试验台设计提供一些思路和参考价值。

## 1 方案设计

### 1.1 试验台结构组成

掘进机主轴承缩比试验台由加载系统、驱动系统、待测主轴承、基座等组成。驱动系统中,减速电机与小齿轮直接连接,由三台减速电机驱动小齿轮转动,小齿轮通过与主轴承外齿啮合以驱动主轴承的转动。加载系统中,由安装有位移传感器与压力传感器的伺服电动缸向加载盘施加载荷,可以通过位移传感器读取伺服电动缸的实时位置,并通过压力传感器实时监测电缸输出的负载大小。

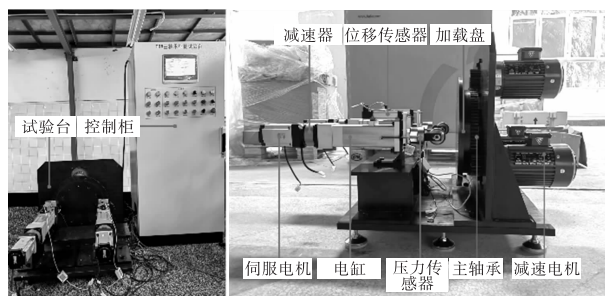


图 1 试验台结构组成

### 1.2 试验台控制系统硬件选型

#### 1.2.1 PLC 和触摸屏选型

PLC 选用汇川 AM401 - CPU1608TN, 加装 GL10 - 4AD 模拟量输入模块用来读取传感器的参数,触摸屏选用汇川 IT7100 进行人机交互。

#### 1.2.2 加载缸选型

伺服电机具有控制精度高、运转平稳、过载能力强的特点,被广泛应用在运动控制系统中<sup>[10]</sup>。伺服电机可以在位置模式和转矩模式之间进行切换,在转矩模式下,伺服电机可以作为大小可控的负载源<sup>[11]</sup>。因此在加载系统中选用伺服电机进行载荷控制,并通过电缸将伺服电机的旋转运动转化为前后运动,实现加载功能。在进行载荷试验时,需要每个加载缸可施加的最大载荷为 10 kN。综合考虑后,伺服电机选用松下 A6B 系列的 MHMF082L2V2M,伺服驱动器选择 MCDLN35BE。电机的功率为 750 W,额定转矩为 2.39 N·m。为了增大转矩,在伺服电机轴端先安装一个减速比为 10 的减速器,再安装电动缸,电动缸内部丝杆的型号为 TBI - SFU2510。经过计算,加载缸可达到的最大推力为 12.8 kN,满足设计要求。

#### 1.2.3 三相减速电机选型

三相减速电机用于驱动加载盘的旋转,需要满足大转矩低转速的要求。选用的三相异步减速电机功率为 750 W,频率 50 Hz,减速比 60,输出力矩 256.76 N·m。

#### 1.2.4 传感器选型

试验台采集的模拟量包括电动缸移动的位移量和施加在加载盘上的载荷大小。两种传感器的输出信号选择 -10 V ~ 10 V,驱动电源为 DC24 V。

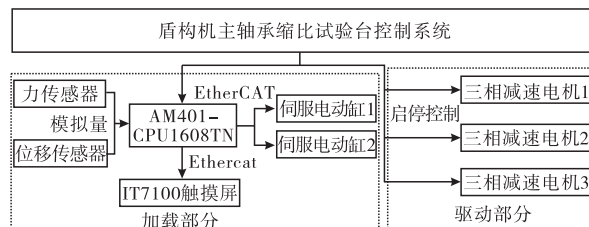
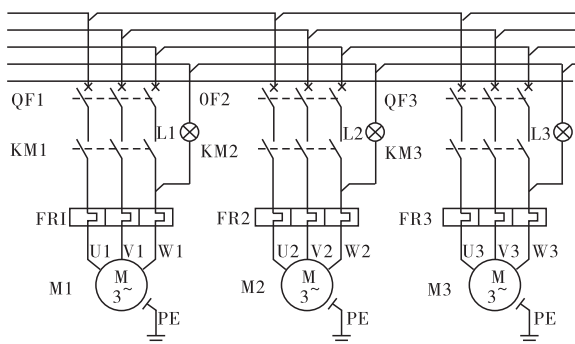


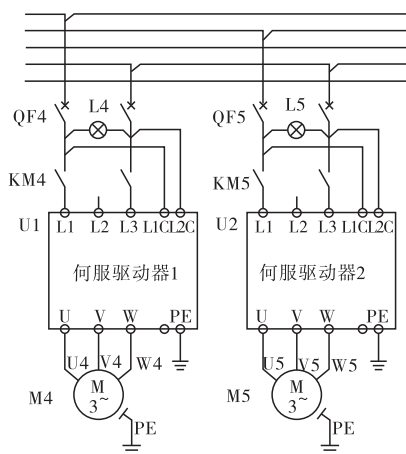
图 2 控制系统结构图

### 1.3 试验台电气图原理设计

在掘进机主轴承缩比试验台中,主电路部分主要由驱动部分和加载部分组成。驱动系统主要由上台三相减速电机组成,其中三相减速电机通过 AC380 V 供电。3 台电机可以通过控制柜上的按钮实现 3 台伺服电机的同步启停功能,每台减速电机连接 1 个指示灯用来示意电机的通断状态。驱动系统的主电路如图 2(a) 所示。加载系统主要由两台伺服电机组成,伺服电机通过 AC220 V 供电,可以通过控制柜上的按钮控制伺服电机电路的通断,每台伺服电机连接 1 个指示灯用来示意电机的通断状态。加载系统的主电路如图 2(b) 所示。



(a) 驱动系统主电路图



(b) 加载系统主电路图

图 3 试验台主电路图

在控制电路中,汇川 PLC 借助 GL10 电源模块通过 24 V 直流电源供电,触摸屏连接 24 V 直流电源进行供电。汇川 PLC 通过 EtherCAT 总线在触摸屏和伺服电机中建立通讯。

### 1.4 试验台 PLC 控制设计

PLC 是试验台控制部分的核心,利用汇川公司的 Inoproshop 软件,可以搭建 PLC 和伺服电机之间的 EtherCAT 网络组态,进行网络组态时需要导入对

应型号伺服电机的 ECT 文件,并将 PLC 设置为 EtherCAT 主站。网络组态如图 4 所示。

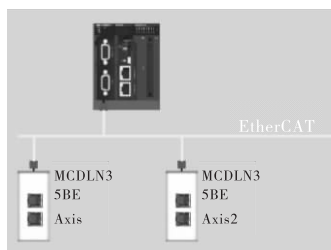


图 4 网络组态图

试验台控制系统的设计采用梯形图进行编程设计,利用循环扫描,依据事件的状态动态执行相关子程序<sup>[12]</sup>。试验台的控制程序主要包括基本控制程序、加载缸位置控制程序、加载缸载荷控制程序。

基本控制程序包括控制伺服电动缸的使能和故障复位两个功能。伺服电机通电后,需要通过 MC\_Power 让伺服电机进入使能状态,从而使加载缸能够执行位置控制或者载荷控制。当于操作不当出现故障报警时,可以通过 MC\_Reset 确认错误,消除错误信息。

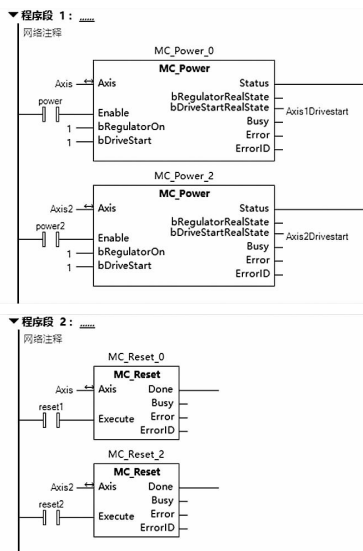


图 5 基本控制程序

加载缸位置控制程序用于调整加载缸的相对位置。当需要进行加载试验时,可以预先将加载缸向前移动至靠近加载盘的位置,便于试验的进行。当更换主轴承需要拆卸加载盘时,可以让加载缸向后移动,从而在加载盘前方留出空间便于进行装卸操作。位置控制主要包括点动控制 MC\_Jog 和相对位置控制 MC\_MoveAdditive。

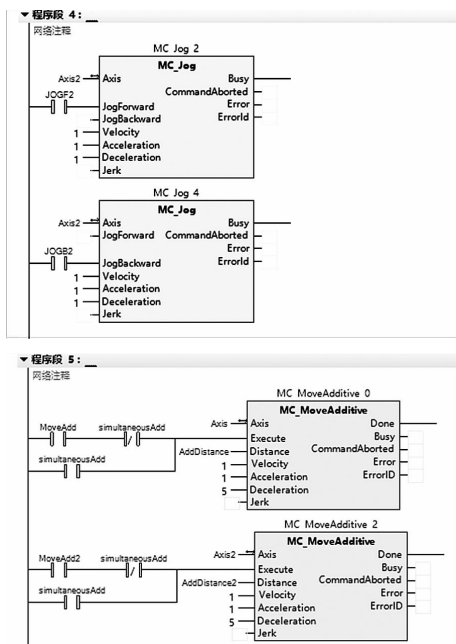


图 6 位置控制程序

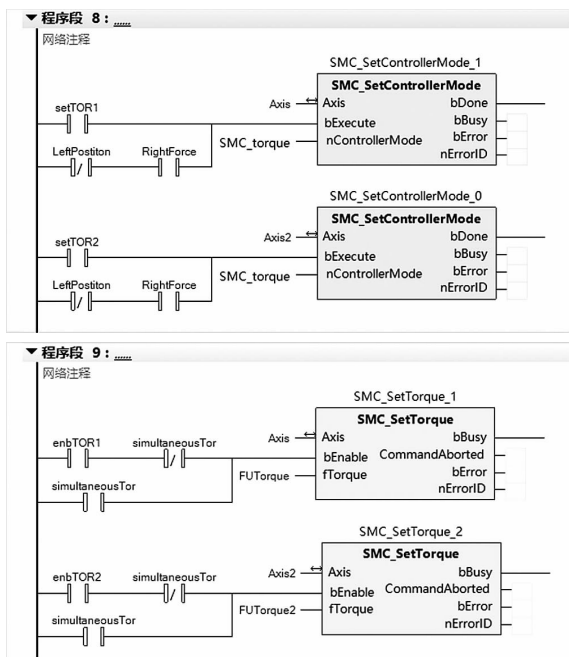


图 7 载荷控制程序

加载缸载荷控制程序是加载系统的主要部分,用于控制施加给加载盘的载荷大小。在进行加载前,需要通过 SMC\_SetControllerMode 令伺服电机进入力矩模式,再通过 SMC\_SetTorque 调整伺服电机输出力矩的大小,实现加载缸对载荷大小控制。

### 1.5 试验台触摸屏界面设计

该文选用汇川 IT7100 触摸屏,触摸屏的设计软件为汇川技术公司的 InoTouchPad。触摸屏与 PLC 在通信过程中,通过设定变量的地址,PLC 和触摸屏才能够准确地交换所需的数据。试验台控制系统主

要包含布尔值和浮点数两种变量类型,布尔值主要用于实现程序中功能块的通断和逻辑控制,浮点数主要用于承载位移、载荷等参数的输入,以及位移传感器和力传感器的读数。以加载缸 1 为例,主要布尔型变量如表 1 所示,主要浮点型变量如表 2 所示。

表 1 加载缸 1 主要布尔型变量

名称	地址	备注
Power1	Q10.0	加载缸 1 使能
JOGF1	Q10.1	加载缸 1 点动前进
JOGB1	Q10.2	加载缸 1 点动后退
Stop1	Q10.3	加载缸 1 停止
Move1	Q11.0	加载缸 1 相对移动
setTOR1	Q11.1	加载缸 1 力矩模式
enbTOR1	Q11.2	加载缸 1 进行加载
reset1	Q11.3	加载缸 1 复位
enbsinTOR1	Q12.0	加载缸 1 正弦力
Quickunload1	Q12.1	加载缸 1 快速卸载

表 2 加载缸 1 主要浮点型变量

名称	类型	地址	注释
Torque1	Double	MW110	载荷设置
force1TS	Float	MW120	实际载荷
AddDistance	Double	MW130	设置位置
Distance1TS	Float	MW140	实际位置

试验台触摸屏的主界面如图 8 所示。主界面包括基本控制程序和位置控制程序。在主界面对加载缸使能后,可以通过点动按钮或者相对运动按钮调整加载缸的位置,并能够从曲线图和数据框图中实时观察加载缸的位置变化。



图 8 试验台触摸屏主界面

试验台触摸屏的力加载界面如图 9 所示。在此界面中,可以控制加载缸进入力矩模式,输入加载力的大小后,按下加载按钮即可进行加载,并能够从曲线图和数据框图中实时观察载荷的变化。



图 9 力加载界面

试验台的波形加载界面如图 10 所示。当加载缸进入力矩模式后,可以在该界面设置正弦力波形的参数,按下正弦加载的按钮后,加载缸能够向加载盘施加正弦力,并能够从曲线图和数据框图中实时观察载荷的变化。



图 10 波形加载界面

## 2 试验台功能验证

试验台控制系统程序设计完成后,连接 PLC 并上电,将编写好的控制程序通过以太网通讯上载至 AM400PLC 和 IT7100 触摸屏,对试验台的控制系统和触摸屏的可视化功能进行验证。



图 11 试验台控制柜操作界面

### 2.1 加载缸位置控制测试

加载缸上电使能后,通过控制柜上的触摸屏按下点动按钮,加载缸进行移动,在运动距离数据框输入 20 mm,加载缸相对当前位置前进 20 mm,观察到

试验台上加载缸位置变化与曲线图中的记录的一致,说明试验台加载部分电路接线正确,程序没有错误。

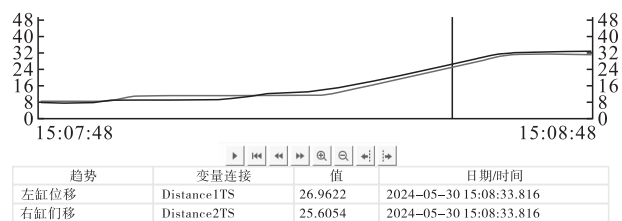


图 12 加载缸位置变化曲线图

### 2.2 试验台动态载荷测试

按下控制柜上驱动部分的同时启动按钮,三台三相减速电机同时转动,并通过齿轮啮合带动试验台中心的加载盘匀速转动。

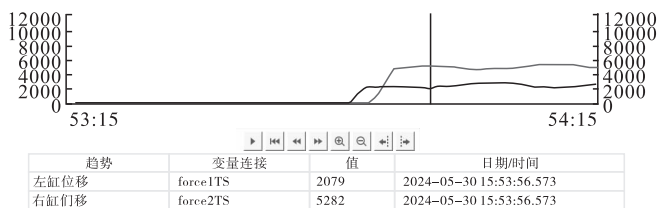


图 13 载荷变化曲线图

在触摸屏的力加载界面中将加载缸切换至力矩模式,左缸设置载荷为 2 kN,右缸设置载荷为 5 kN,按下加载按钮进行偏载试验。当加载缸与加载盘接触后,力传感器将读取的力信号传输至 PLC 中,通过曲线图能够实时读取载荷的变化。由于加载盘的表面粗糙和安装误差,读取到的力信号围绕设置的载荷在允许范围内有一定的跳动。动态载荷试验说明驱动部分和力传感器的接线正确,且力加载程序编写没有问题。

## 3 结论

该文搭建了基于 PLC 的掘进机主轴承缩比试验台,选用汇川 AM401 - CPU1608TN 作为主控制器,利用三相减速电机驱动主轴承和加载盘的匀速旋转,通过伺服电机进行带动电动缸实现加载。该试验台所有控制都可以通过触摸屏和控制柜上的实体按钮实现,可靠性高,人机交互友好,便于后续主轴承载荷作用下动力学特性研究的开展,也为相关轴承试验台的设计提供了一些思路和参考价值。

### 参考文献:

- [1] 刘宣宇,王子文,邵诚,等. 盾构机机械类故障诊断研究进展综述[J]. 控制工程,2022,29(2):238-245.

(下转第 59 页)

模块确实可以改善校准仪输出信号频谱纯度。

## 4 结论

在新型电力系统中,针对宽频测量装置的校准需求问题,研制了一种基于 FPGA 为核心器件的高精度宽频测量装置校准仪。该校准仪由三大模块组成:信号控制模块、信号放大模块和信号反馈模块。为产生高精度标准信号,展开校准仪的系统硬件和 FPGA 关键逻辑电路分析和设计,并通过信号反馈模块实现闭环反馈控制进一步提高校准仪输出准确性。该校准仪已在某宽频测量装置上进行测试,测试结果表明,在引入信号反馈模块的基础上,该校准仪能够产生高准确性的标准信号,能够模拟电网实际运行产生的复杂信号,满足对宽频测量装置的校准精度。

### 参考文献:

- [1] 韩富佳,王晓辉,乔骥,等. 基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22):8569-8591.
- [2] 晏坤,甘景福,赵昕,等. 一种新能源公共连接点系统谐波阻抗计算方法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(01):76-82.
- [3] 郭志成,郭宁,李晓青. 基于 GPRS 的微电网中蓄电池远程监测系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(03):35-38.
- [4] 樊陈,姚建国,常乃超,等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):1-8.
- [5] 王志华,郑涛,窦仁辉,等. 电力系统宽频测量技术方案与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11):218-224.
- [6] 樊陈,姚建国,常乃超,等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):1-8+57.
- [7] 林杰. 宽频测量装置测试校准方法研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
- [8] XU S, LIU H, BI T. Field PMU Test and Calibration Method - Part I: General Framework and Algorithms for PMU Calibrator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(06):1507-1518.
- [9] 朴哲锬. PMU 现场测试校准技术研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
- [10] 邵航俊. 电力系统宽频测量装置校准信号源的研制[D]. 南昌:南昌航空大学, 2021.
- [11] 舒慧. 基于 OMAPL38 的振动时效激振器电源设计[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2020.
- [12] 沈辉,薛兵,唐朝阳,等. 基于 DDS 技术的信号发生器设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20):160-164.
- [13] O Polikarovskiykh, I Gula, L Karpova. Phase accumulator simulation for advanced digital frequency synthesizers [C]. 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, 2019: 365-368.
- [14] 刘英. 汇川伺服系统在环保塑料热成型机上的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2023, 49(9):63-66.
- [15] 吴超. 基于 PLC 和人机界面的工业机器人控制技术研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
- [16] 乔社娟,高文. 基于 PLC 和触控屏的远程变频调速监控系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(02): 21-24+38.
- [17] 张米雅,姚建飞. 动态力矩测试系统中 PLC 对交流伺服电机的控制[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5): 56-58.
- [18] 王高理. 伺服电机控制技术的应用与发展[J]. 轻工科技, 2019, 35(2):64-65.
- [19] 丰颖,苗可彬. 基于差压原理的风速风向传感器设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(19):120-124.