

嵌入式实时控制三轴数控滑台实验平台的构建

蔺凤琴¹, 贾瑞哲¹, 李擎¹, 郭金¹, 李香泉², 车伟杰¹

(1.北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2.景德镇学院信息工程学院, 江西 景德镇 333000)

摘要: 嵌入式是自动化专业的必修课程, 嵌入式技术也已深入工业、国防等各个领域。数控滑台是机械制造业的重要设备, 随着机电一体化的推进, 嵌入式技术也被广泛应用于数控滑台上。传统嵌入式数控滑台的系统是对特定任务而固化的软件, 运行中无法实时进行参数优化。为进一步提升学生对嵌入式技术的掌握, 培养学生运用嵌入式技术解决实际工程问题的能力, 构建了嵌入式三轴数控滑台实验平台, 并集成了实时参数调节功能, 可对运行时参数进行实时修改, 以获取最佳运行轨迹。此外, 平台还提供了移动端App的远程连接、操作功能, 使学生开展实验更加方便快捷。

关键词: 嵌入式;三轴数控滑台;实时控制;实验平台

Construction of Embedded Real-Time Control Three-axis Computerized Numerical Control Slider Experimental Platform

Lin Fengqin¹, Jia Ruizhe¹, Li Qing^{1*}, Guo Jin¹, Li Xiangquan², Che Weijie¹

(1.School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;2. School of Information Engineering, Jingdezhen University, Jingdezhen, 333000, China)

Abstract: Embedded is a compulsory course for automation majors, and embedded technology has also penetrated into various fields such as industry and national defense. Computerized Numerical Control slider is an important equipment for mechanical manufacturing industry. With the advancement of mechatronics, embedded technology is also widely used in Computerized Numerical Control slider. The control system of the traditional embedded Computerized Numerical Control slider is solidified software for specific tasks, and it cannot optimize parameters in real time during operation. In order to further improve students' mastery of embedded technology, and cultivate their ability to use embedded technology to solve practical engineering problems, an embedded three-axis Computerized Numerical Control slider experimental platform is built, and the real-time parameter adjustment function is integrated,

which can modify the three-axis running parameters in real time to obtain the best running track. In addition, the platform also provides remote connection and operation functions of the mobile app, making it more convenient and efficient for students to carry out experiments.

Key words: embedded; three-axis Computerized Numerical Control slider; real-time control; experimental platform

嵌入式技术以应用为核心，基于计算机技术，适用于软硬件共存的设备或系统，也是自动化类专业的重要技术课程。但它易于上手，却难以精通^[1-3]，高校作为高质量社会人才的输出窗口，为紧跟时代的发展和需求，培养学生运用嵌入式技术解决实际工程问题，符合国家对创新型人才和复合型高级工程技术人才的需求。

数控滑台是数控机床中的常见设备，通过编程，链接电机、感应装置等，控制滑台模组按照软件设定程序执行运动作业、任务，大大提升了加工精度和生产效率。三轴数控滑台则构建了三维空间的工件加工，适用于工业中多数的加工场景。随着机电一体化的推进，嵌入式技术也被广泛用于数控滑台上。特别是在组合机床生产控制中，嵌入式技术通用性高、可靠性高、支持复杂指令的优点更为显著^[4-5]。为了进一步提升自动化类专业学生对嵌入式技术的了解和掌握，培养学生运用嵌入式技术解决实际工程问题的能力，实现“真练本领 练真本领”的目标，我们将三轴数控滑台作为载体，构建了集成实时控制的嵌入式三轴数控滑台实验平台。旨在让学生对实验平台的设计和运行有深入的理解和认识^[6-7]，同时基于平台开展嵌入式编程、电机运动控制、视觉伺服及图像识别等相关课题的研究。此外，平台设计与产线实际应用相结合，可实时修改参数进行在线控制，学生除了学习硬件的嵌入式编程，还可以通过软件对数控滑台进行在线监控与实时控制，实现理论学习与工程实践的紧密结合^[8-10]。

1 实验平台设计

1.1 平台教学目标

为使学生在校期间做好知识、技能的全面储备，以满足社会对嵌入式领域人才的迫切需求，该实验平台主要完成以下教学目标：

(1) 掌握 C 语言嵌入式编程

采用 C 语言完成滑台主控器 ARM 核芯片的程序，让学生了解嵌入式编程的特点，体会高级编程语言——C 语言对硬件的直接操作能力。

(2) 掌握滑台三轴电机的协同运动

通过上位机控制数控滑台三轴的步进电机及驱动套件，实现各轴独立运动、插补运动。掌握电机 S 型加速、平移和插补的原理及实现。

(3) 掌握嵌入式系统的实时控制

通过 PC 端 HMI 和移动端 App，在线监控三轴的运行参数，并实时对各轴的运动方向、是否归零、步进速度以及步进距离等进行调整，以实现最佳目标运动轨迹。

1.2 总体架构

嵌入式三轴数控滑台实验平台构建了集软硬件及数据存储于一体的三维运动滴胶平台，通过三轴的协同运动完成滴胶，形成既定图形的产品。滴胶工艺主要用于包装、商标、冰箱贴和汽车装饰等工艺品的制作。平台组成部分包括：三轴的步进电机及驱动套件，实现各轴独立运动、插补运动；控制器为 STM32F4 系列的 ARM 核芯片，采用 C 语言嵌入式编程；配备高清摄像头以及相应的图像识别功能，方便学生进行二次开发，如用于实现完善的运动物体目标识别及运动控制；上位机软件提供 PC 终端及手机终端两种模式的部署，并支持 WiFi 和蓝牙的连接；数据存储分为两大类，均部署在 PC 终端，设备参数及实验案例历史数据采用 oracle 数据库，运动中的过程数据以 txt 文本文件形式存储。总体架构如图 1 所示。

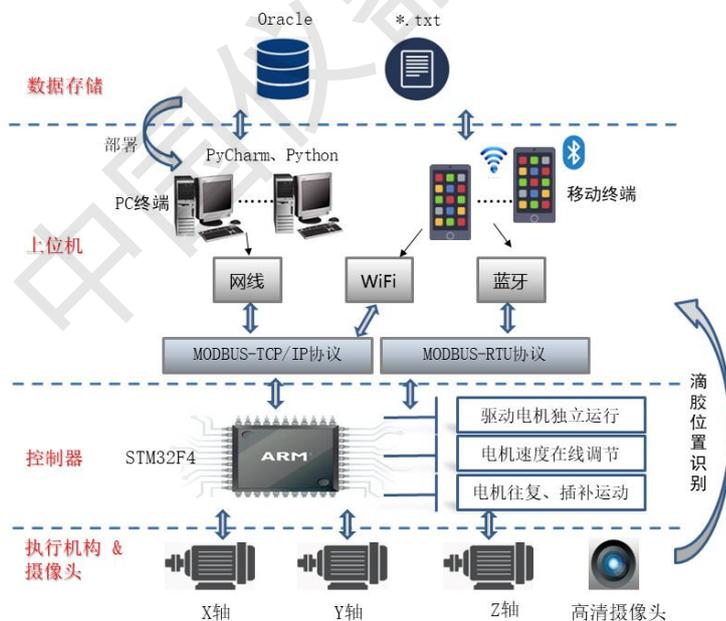
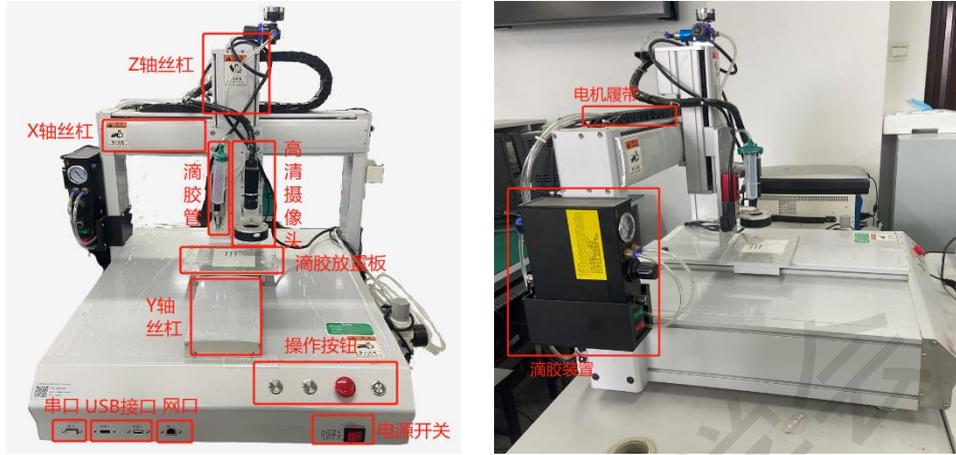


图 1 实验平台总体架构

1.3 实验平台实物

三轴数控滑台包含多种结构，三个移动轴由电机进行控制，高清摄像头与滴胶管放置在 Z 方向的移动轴上，用于捕捉视觉信息并进行滴胶。滑台具备串口、USB 等多种接口，学生可编写工程文件并通过接口控制滑台的运行过程。实验平台实物如图 2 所示。



(a)三轴数控滑台正面图

(b)三轴数控滑台侧面图

图 2 嵌入式三轴数控滑台实物

2 实验平台功能设计

2.1 三轴移动设计

三轴数控滑台的 Z 轴装有滴胶管，Y 轴可以带动待滴胶的物体移动，因此滑台工作时需要三个轴进行协同运动使得滴胶管和物体达到指定位置。为确保三轴运动的位置足够精确，电机采用次平滑型 S 型加速控制，较完全平滑型 S 型加速计算过程更加方便^[11]，过程如图 3 所示。

S 型加速的具体过程较为复杂，总共可分为以下四步：

(1) 首先将所有关于速度的单位转换为频率的单位，即 $F=S \times 200 \times \text{细分} / \text{导程} = S \times VF$ ，这里的 200 是步进电机未被细分时使得电机转动一圈所需要的脉冲数目；

(2) 将电机的加速和减速过程分为 3 份，其比例为 3:4:3，同时确认 S 型加速的加加速度频率：

$$faa = C \times VF = a / t_{0.3} \times VF$$

(1)

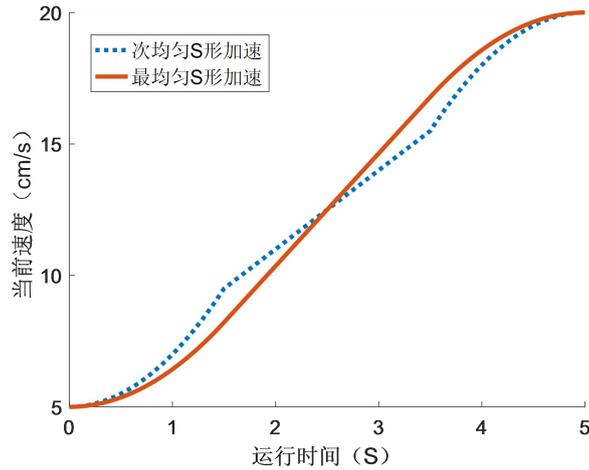


图3 S型加速示意图

式中： $t_{0.3} = 0.3 \times (S - S_{start} / a)$ ，加加速的持续时间

C ，加加速的数值

a ，加速度

S ，最高速度

S_{start} ，初始速度

(3) 将加速过程分为3部分，其中加加速部分（taa），匀加速部分（tua）和减加速部分（tra）的比例为30：60：45。同样，减速过程也分为3部分，加减速部分（tar），匀减速部分（tur）和减减速部分（trr）的比例为45：60：30；

(4) 根据速度设置每步的频率表和脉冲数目表。

2.2 三轴插补设计

在滴胶运行过程中，滴胶管需要进行一些复杂的非直线运动，如圆弧运动，三轴需依据已有参数进行插补运动。平台采用了直线插补和圆弧插补两种方式，定位精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ ，达同类产品先进水平。本文统一使用XY轴插补进行分析，YZ轴与XZ轴插补同理。

(1) 圆弧插补运动：该运动依靠步进电机逐渐走出一个带锯齿的近似圆。其工作原理借助了圆的代数方程 $X^2 + Y^2 = R$ ，由于圆弧插补从实际执行效果上表现为横向和纵向的累加算法，因此，路径内/路径外将代替圆内/圆外。

其中，三点法确认圆心和半径位置是关键，设 X 、 Y 轴当前位置为 (X_0, Y_0) ，目标点位置为 (X_e, Y_e) ，辅助点位置为 X_{Assist}, Y_{Assist} ，则圆心与半径位置计算公式如下：

$$R = \sqrt{(X_0 - core_x)^2 + (Y_0 - core_y)^2}$$

(2)

式中：

$$core_x = (g \times B - C \times f) / (e \times B - A \times f)$$

$$core_y = (A \times g - C \times e) / (A \times f - B \times e)$$

以上两式中：

$$e = 2 \times (X_e - X_0)$$

$$f = 2 \times (Y_e - Y_0)$$

$$g = X_e^2 - X_0^2 + Y_e^2 - Y_0^2$$

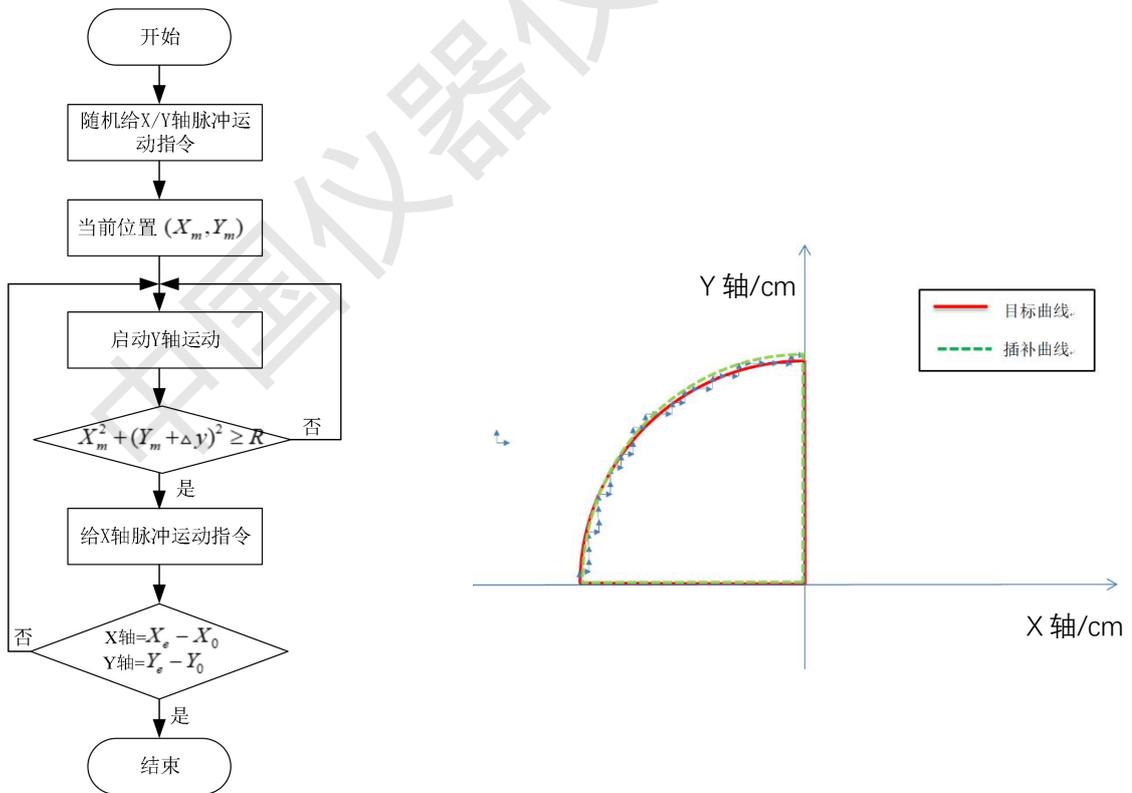
$$A = 2 \times (X_{Assist} - X_e)$$

$$B = 2 \times (Y_{Assist} - Y_e)$$

$$C = X_{Assist}^2 - X_e^2 + Y_{Assist}^2 - Y_e^2$$

$(core_x, core_y)$ 为圆心坐标， R 为半径。

1/4 圆弧的插补运动程序流程和路径如图 4 所示。



(a) 圆弧插补运动程序流程图

(b) 1/4 圆弧插补运动路径图

图 4 圆弧插补运动程序流程图和 1/4 圆弧插补路径图

(2) 直线插补运动：数控滑台依据软件下发的“目标点位 (X_e, Y_e) ”、“直线插补命令项 $(XY、YZ、XZ)$ ”和“速度”参数，进行直线插补运动。运动过程流程同圆弧插补运动。程序流程和第一象限直线插补路径如图 5 所示。

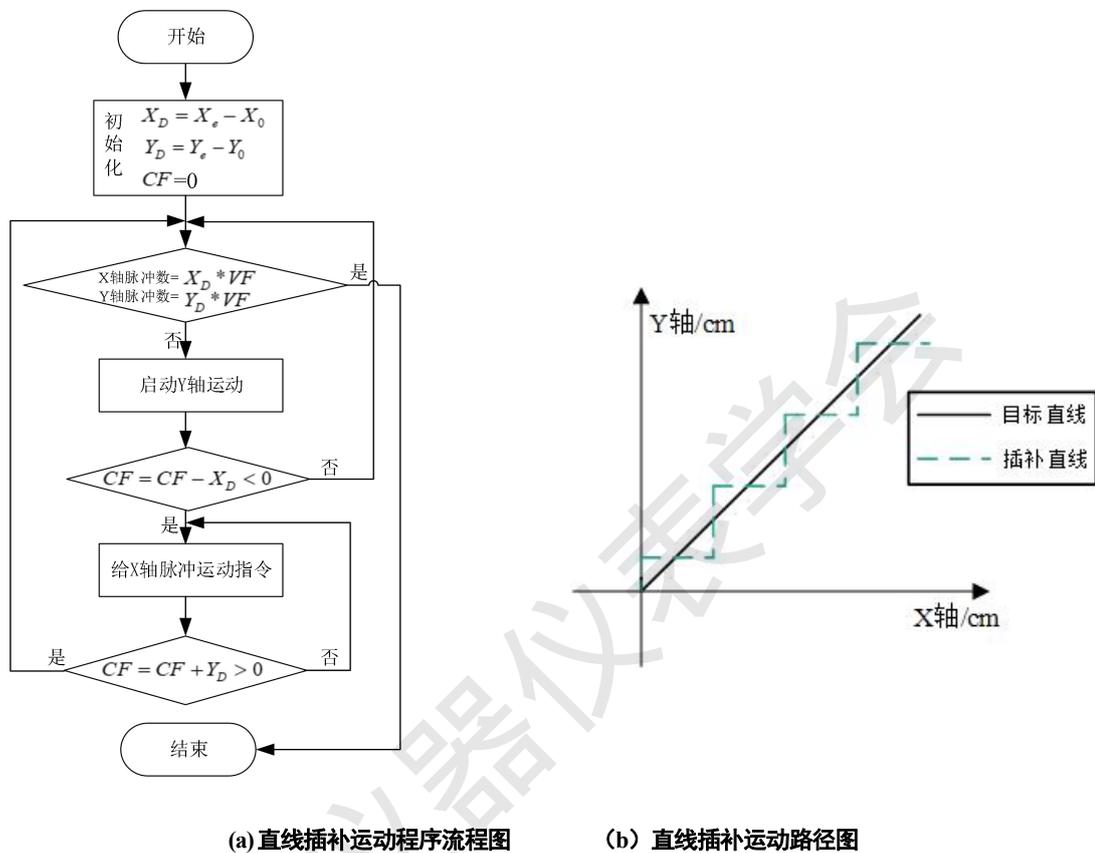


图 5 直线插补运动程序流程图和直线插补运动路径图

2.3 平台 HMI 设计

(1) PC 端 HMI 设计

采用模块式设计，主要包括控制器连接模块、参数设置模块、程序编辑模块和直线圆弧插补模块等。HMI 软件基于 Anaconda、PyCharm 平台，采用 Python 语言，PC 终端部署环境最低要求：Windows7-64bit 操作系统、Intel i5 处理器、4G 及以上内存。

(2) 移动端 App 设计

移动端 App 的设计源于智能手机应用的不断深入，也是培养社会性人才的需要。模块设计与 PC 端一致，App 选用 Android Studio 开发平台，平台配置如下：

操作系统：Windows7 64-bit 或更高；

CPU：Intel i5 处理器或更高；

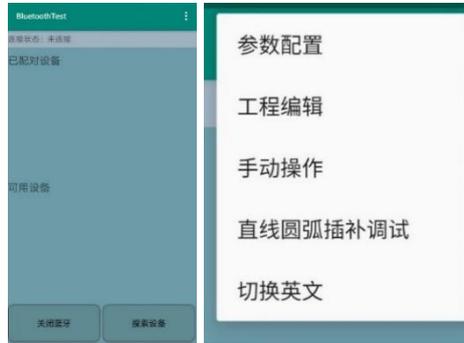
内存：8G 或更高；

硬盘：剩余空间 50GB 或更高，推荐使用固态硬盘；

其他：无线网卡、摄像头、USB、麦克风等。

移动端运行环境资源：安卓系统 5.0 以上，下载软件所需内存 10M。

App 主界面和菜单如图 6 所示。



(a)系统主界面 (b)菜单栏

图 6 系统主界面

首先获取手机的蓝牙权限，搜索本机以前配对和未配对的设备，显示在相应列表。选择目标设备进行配对后，进入菜单栏。依据实验需求，进入相应模块，其中参数设置和程序编辑模块如图 7 所示。



(a)参数设置界面 (b)程序编辑界面

图 7 移动端 App 功能界面

移动端 App 的开发和应用突破了传统实验教学平台的互动模式，激发学生的学习兴趣，开放的源代码为学生提供了二次开发和升级的基础，使学生摆脱枯燥的学习模式，基于兴

趣对相关知识点及实践进行深度探索，充分调动学生学习的自驱力^[14-15]。

3 实时控制

3.1 与下位机实时通信

目前，实际产线设备和系统间大部分采用以太网进行通信，而移动端则是基于 WiFi 和蓝牙，为使平台的实验教学具有普适性，该平台支持上述三种通信方式。其中蓝牙连接采用 MODBUS-RTU 协议，其余采用 MODBUS-TCP/IP 协议^[16]。该实验作为“嵌入式系统”、“微机原理及应用”和“C 语言程序设计”3 门课程的实验教学。

(1) MODBUS-TCP/IP 协议

在 TCP/IP 协议中，一条完整的报文由 MBAP 报文头和帧结构 PDU 两部分构成，如图 8 所示。

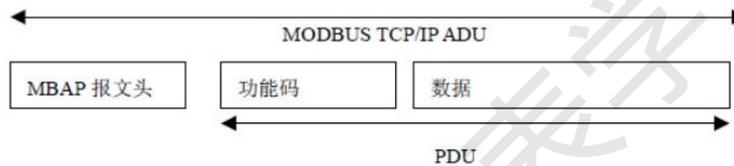


图 8 MODBUS-TCP/IP 报文结构

上位机组件发送报文时，将要发送的数据整合为帧结构 PDU，随后动态形成 MBAP 报文头，将两者拼接为一条完整的报文并通过以太网或 WIFI 发送至下位机。下位机依据报文头进行解析核对，读取帧结构中的数据并执行相应的功能，最后向上位机返回响应报文。

(2) MODBUS-RTU 协议

基于蓝牙连接的 MODBUS-RTU 报文结构如图 9 所示：



图 9 MODBUS-RTU 报文结构

RTU 的连接速度快，但安全性较低，因此需要校验码来保证传输数据的准确性。当上位机组件发送报文时，将数据信息与通过 CRC 算法得到的校验码组件为完整的报文。当下位机收到后，首先会自行计算校验码并对收到的校验码进行核对，确认无误后再执行命令。

3.2 三轴移动实时控制

三轴协同运动是滑台的基本运动，控制电机使各轴快速而准确地到达相应位置是关键。该实验作为“电机及拖动”、“电机与运动控制系统”2 门课程的实验教学，目的是让学生了解电机运动控制的原理，掌握电机 S 型加速控制过程，如图 10 所示。



(a) 参数设置

(b) 手动操作

图 10 三轴电机控制界面

3.3 三轴插补在线控制

滴胶过程中，为实现复杂非直线运动轨迹，需通过三轴插补来完成。该实验可以作为“电机及拖动”、“电机与运动控制系统”2 门课程的实验教学，使学生掌握完成“曲线运动”最常用的两种插补方式直线插补和圆弧插补。XY 轴圆弧插补参数及运动轨迹数据如图 11 所示。



(a) 直线圆弧插补参数

(b) 输出数据

图 11 三轴插补界面

4 应用效果

(1) 近两年，该平台应用于我校自动化学院自动化、测控技术与仪器 2 个专业，约 1600 多名本科生课内实验、课程设计和生产实训，应用学时数累计超过 1200；为 10 余名本科生提供毕业设计平台；为 6 名控制学科研究生在电机拖动、视觉伺服及图像识别相关

课题的研究提供平台。

(2) 为自动化生产实训、创新创业竞赛提供平台，学院在各类竞赛中也取得了一系列成果：近三年在“西门子杯”中国智能制造挑战赛“离散行业运动控制”和“流程行业自动化”两个方向取得了3项国家级、7项省部级奖励。

(3) 基于对嵌入式芯片级编程更深层次的理解和应用，毕业生进入机器人、电信及芯片制造等行业的就业率逐年上升，近两年增长约6%。

5 结论

构建了以三轴数控滑台为载体，采用C语言嵌入式编程完成主控器ARM核芯片程序，并集成实时控制功能的实验平台。平台具有以下特点：

(1) 控制对象的普适性：三轴数控滑台构建了三维运动空间工件的加工，适用于工业数控加工领域普遍的应用场景；

(2) 控制过程的实时性：集成在线控制学习系统，实时监控三轴运行时参数，并进行在线修改，实现过程的精准控制；

(3) 开发工具的先进性：基于C语言嵌入式编程、Anaconda、PyCharm、Android Studio开发平台，采用Python语言、IntelliJ IDEA的Java语言，结合Oracle数据库完成平台构建。

该平台应用于我校自动化专业的实验教学中，提升了学生在硬件、嵌入式编程方面的能力，还促进学生转变思维，从用户的角色出发，设计在线控制软件、激发其学习兴趣，以实际产线需求来促进相关课程的教学效果。提高学生毕业后角色转变的效率，满足未来社会紧缺的技能型人才的需求。

参考文献:

- [1] 刘小虎,熊义勇.基于口袋实验的嵌入式教学设计探讨[J].数字技术与应用,2020,38(05):206-208..
- [2] 薛凯琳,任钰.嵌入式系统相关情况的探究[J].华东科技,2022(02):86-88.
- [3] 张其亮,韩斌.“嵌入式系统”课程的实验教学研究[J].实验室研究与探索,2009,159(06):132-133+158.
- [4] 左大利,张伟文.基于SolidWorks的单轴数控滑台机械结构虚拟设计[J].装备制造技术,2016(08):20-22.

- [5] 何敏佳,王继武,刘高洁.应用于普通车床数控化改造的数控滑台设计[J].机床与液压,2015,43(16):182-184.
- [6] 吕东瀚,朱佰成,崔桂梅,田海.基于 CDIO 理念的嵌入式系统教学探索[J].实验室研究与探索,2019,275(01):183-185.
- [7] 崔业梅,李元熙,杨国华.嵌入式实训教学设备的研制与教学改革[J].实验室研究与探索,2017,259(09):66-69+215.
- [8] 丁金华,孙秋花,李明颖,王学俊,张凯.基于嵌入式微处理器的两自由度数控滑台的研制[J].实验技术与管理,2008(06):43-44+100.
- [9] 杨杰.数控机床在线感知与智能控制技术的应用[J].现代制造技术与装备,2018(01):174-175.
- [10] 杜国臣.加强数控技术实践教学 提高学生创新能力[J].实验室研究与探索,2003(06):22-23+32.
- [11] 齐文娟,徐青菁,孙佳,许少伦.电机学实验教学探索[J].实验室研究与探索,2019,38(12):229-232+244.
- [12] 赵世强,于东,张晓辉,耿聪.适用于五轴数控加工的平滑插补算法的研究[J].中国机械工程,2012,23(19):2337-2342.
- [13] 金湖庭,吴晓苏,汪秉权.数据采样圆弧插补算法及其应用研究[J].造船技术,2007(02):12-15.
- [14] 杜沂东,刘兆栋.大型嵌入式设备运行能耗在线控制仿真[J].计算机仿真,2018,35(03):225-228+308.
- [15] 何俊,邓成军.面向卓越工程师培养的数控综合实验改革[J].实验室研究与探索,2017,36(03):221-225.
- [16] 杨焕峥,杨国华,徐玲.基于 Modbus 协议和 ARM 的电能监控系统设计[J].实验室研究与探索,2017,36(11):72-76.