



面向智能制造的数据采集系统设计及 实验教学研究

林志伟, 栾丛丛, 王郑拓, 马超虹

(浙江大学 机械工程学院, 杭州 310000)

摘要: 针对目前高校智能制造实验实践类课程大都侧重机器人、加工中心等设备装调与使用, 而极少关注智能设备间数据流的问题, 开发了一套面向智能制造的数据采集实验平台及教学方案。该平台以目前在各高校广泛使用的 FDM 三维打印机为数据采集设备对象, 以廉价但功能完备的树莓派为数据采集卡, 以 WCF 应用为驻留程序, 融合串口通信、HTTP 网络通信等通信形式, 结合 Python、C#、SQL 等编程技术, 最终将设备实时状态数据汇入服务器数据库持久保存, 以备后续使用。该平台架构具有一定通用性, 适用于各种实际工业现场数据采集场合, 且平台本身开发难度小, 趣味性强, 尤其适合高校数据采集实验实践教学。

关键词: 数据采集; 智能制造; 三维打印; 树莓派; Python

中图分类号: TP274

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220210

Research on System Design and Experimental Teaching of Data Acquisition for Intelligent Manufacturing

LIN Zhiwei, LUAN Congcong, WANG Zhengtuo, MA Chaohong

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Nowadays, intelligent manufacturing experimental practice courses have been popularized to most of the colleges in China. However, most of these courses mainly focus on teaching of assembling and operating intelligent devices such as robots and machining centers. Less attention is paid to the problem of data flow between intelligent devices. For this reason, a data acquisition experimental platform for intelligent manufacturing and the corresponding teaching program were developed in this work. In the platform, the FDM 3D printers that have been widely used in colleges were applied as the data acquisition equipment object, the cheap but fully functional Raspberry Pi was used as the data acquisition card, and the WCF application was used as the resident program. It integrated several communication forms such as serial and HTTP. With programming techniques such as Python, C#, SQL, etc., the device real-time status data were finally imported into the server database for the subsequent use. The platform architecture has a certain versatility, which is suitable for various actual industrial field data acquisition occasions. The development of the platform itself is easy and interesting, which is especially suitable for college data acquisition experimental teaching.

Key words: data acquisition; intelligent manufacturing; 3D printing; raspberry Pi; Python

智能制造是传统制造技术与智能技术深度融合得到的服务于产品全生命周期的新兴制造方式。依托传感、测试、数控、机器人、计算机、网络、人工智能等技术, 智能制造能在制造过程中进行感知、分析、推理、决策与控制, 实现产品需求的动态响应。目前, 智能制造技术已成为世界制造业发展的趋势^[1], 而在国内, 智能制造已上升至国家战略高度, 是“中国制造 2025”的主

攻方向^[2], 也是国内高校新工科重点发展的新兴工科专业之一。如何培养智能制造技术方面的卓越工程师, 是中国工科高校当前的重要任务^[3]。

智能制造的核心架构一般涵盖设备层、感知层、执行层、决策层^[4]。其中感知层一般包含各类传感器、PLC(programmable logic controller)、工控机等, 其核心功能为数据采集, 即向下对智能车间相关设备(同时包括仓储、物流、人员、产品

收稿日期: 2022-04-09; 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 浙江省高校实验室工作研究项目(ZD202001)。

作者简介: 林志伟(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事计算机辅助制造、智能制造等方面的研究。E-mail:

zjtzhylin1986@163.com

以及环境等生产要素)的状态数据进行实时采集和必要前置处理,向上通过有线网、Wi-Fi、4G/5G等网络形式将数据发送至服务器(或云端)数据库保存,以备后续分析、推理、决策。数据采集为智能制造提供信息支撑,是智能制造系统的重要基础模块。考虑到智能车间生产设备及对应数据类型的多样性,实施数据采集的主要难点在于提供一种统一的适用于所有设备的采集方案和数据传输协议。

近年来,为了助力智能制造产业发展,培养智能制造复合型人才,各高校相继开展了智能制造实验实践教学。文献[5]针对目前高校实践教学存在的问题,构建了以“面向创新实践,服务制造产业链”为战略主题的智能制造实验室,为学生创新实践提供了规范化训练平台。文献[6]以汽车轮毂为例,搭建了包括仓储、制造、抛光、检测、分拣等生产环节的智能制造单元系统集成应用实训平台,该平台从机电装调、智能化改造到系统联调,能够完成对学生从单项能力到综合能力的训练。文献[7]构建了不同成熟度等级水平的数字化资源库和智能制造教学工厂的概念模型,实现了基于模型的智能制造技术与教学环境的有机融合,可以满足不同层次工程人才培养的需求。文献[8]结合自动化类专业实践环节的实际情况,设计并实现了基于智能制造的自动化类专业综合实践平台,为自动化类专业人才培养提供了新途径。

为解决大型综合智能制造实验平台建设成本高、设备台套数不足的问题,天津大学、西安交通大学,长春工业大学、厦门理工学院、桂林电

子科技大学、华北水利水电大学等将虚拟仿真技术和互联网技术应用到智能制造控制系统设计的实践教学中,突破了实验教学环节中设备、场地、安全性等因素的限制^[9-14]。

综上所述,目前国内关于智能制造的实验实践教学大都侧重于设备层或控制层,培养学生在流程规划、设备使用、机电装调、工艺探究等方面的综合应用能力,而对控制层及管理决策层所依赖的数据流关注较少。为此,本文拟开展面向智能制造的数据采集实验教学研究。考虑到近年来FDM三维打印在高校应用的普及性^[15-18],本文拟以三维打印机这一设备对象为例,提取打印过程中若干关键参数,如设备在线状态、打印温度、打印时间等,结合嵌入式数据采集卡,构建一种通用数据采集框架,最终将数据发送至远端数据库保存。学生通过学习该框架,可以掌握数据采集流程和方法,为将来进入智能制造实际工作岗位打下基础。

1 数据采集系统架构和选型

作为智能制造系统的重要组成部分,数据采集系统架构按数据流向从下到上一般包含设备、数据采集卡、交换机以及服务器,如图1所示。为保障数据采集过程稳定可靠,设备和数据采集卡一一对应,即一个数据采集卡只对应一台设备;服务器和数据采集卡则呈一对多对应关系,它们之间通过交换机连接。各数据采集卡采集设备得到的数据最终汇入服务器数据库保存,以备后续分析展示。

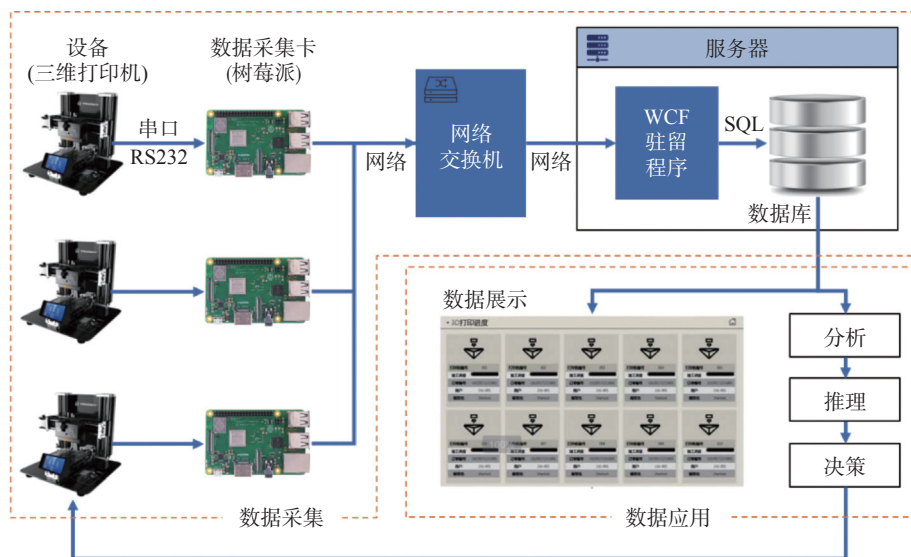


图1 数据采集框架

为方便教学,本文以目前已在各高校广泛推广使用 FDM 三维打印机为设备对象,实时采集三维打印机运行时状态数据。桌面式 FDM 三维打印机具有结构简单、操作简便、安全可靠、易于维护等特点,且软硬件开源、通信协议开放,方便用户二次开发,是用于高校机电控制类专业实验实践教学的优良设备。本文拟采集的 FDM 三维打印机运行状态数据包括:设备在线状态、打印温度、已打印 G 代码行数、已消耗打印时间等。其中打印温度又包含喷头温度和热床温度;采集已打印 G 代码行数数据,结合 G 代码总行数,可用于计算当前打印进度;采集已消耗打印时间,结合根据 G 代码文件预估的总打印时间,可估算剩余打印时间。

考虑到商用数据采集卡一般价格昂贵,专用性强,本文拟采用价格低廉且更为通用、开放的树莓派(raspberry Pi)作为数据采集卡。树莓派^[19]是一款采用 ARM 架构处理器和 Linux 操作系统的卡片式计算机,虽然外形只有身份证大小,售价也只要 200~300 元左右,却具有强大的系统功能和接口资源,包括 USB、有线网口、Wi-Fi、HDMI 等,可实现普通电脑的全部功能。树莓派支持多种语言进行应用开发,包括 C#和 Python 等语言,开发者社区资源极为丰富^[20]。与传统的嵌入式平台相比,树莓派在速度、集成度、价格和效率上有明显优势,近年来在嵌入式开发领域发展迅速。为降低学生开发难度,本文选用 Python 语言作为树莓派端的开发语言。

服务器方面,考虑到学生在课堂环境下需要应付的数据量和并发量都不大,因此无须采购专用服务器和网络设施。为方便起见,学生使用安装 Windows 操作系统的普通台式电脑或自带笔记本电脑作为服务器,并在电脑中安装数据库软件(如微软的 SQL Server),对采集到的设备状态数据进行结构化存储,以备后续使用。服务器端采用 C#作为开发语言。

2 三维打印数据采集系统实现

2.1 通信接线

三维打印数据采集系统硬件接线较为简单,以树莓派为中心分析,一方面,树莓派向下通过 USB 线与三维打印机建立串口连接。FDM 三维打印机主要由三轴进给系统、进丝系统及运动控制

卡组成,其中运动控制卡是打印机大脑,主要负责接收上位机 G 代码指令,并将其翻译成各轴进给脉冲信号。控制卡集成了 USB 转 RS232 串口芯片,对外提供 USB 接口,可与树莓派直接通过 USB 数据线建立物理连接。树莓派端安装基于 Linux 的 Raspbian 操作系统,自带串口驱动,建立串口连接后,可直接向控制卡写入 G 代码字符指令并读取返回参数,从而实现树莓派和控制卡串口通信。

另一方面,树莓派向上通过以太网与服务器建立连接。以太网连接相对灵活,网络拓扑上,可使用交换机建立多套树莓派对应一台服务器的有线连接;也可使用无线路由器对树莓派建立无线连接,对服务器建立有线或无线连接;或者使用其他更为复杂的网络拓扑结构。服务器端运行驻留程序,树莓派通过 HTTP 协议和驻留程序交互,间接访问数据库,写入打印机当前状态数据。

2.2 数据库构建

FDM 三维打印机运行的实时数据经由树莓派,最终汇入服务器上的数据库持久保存。在数据采集应用中,数据库建表一般无须考虑各表之间的复杂逻辑关系,只需根据设备本身属性和业务需求为每种设备建立一张独立的实体数据表,并在表中添加相应状态字段,保存设备在各个时刻的状态记录。因本文只涉及 FDM 三维打印机一种设备,因此只需建立一张数据表即可。通过对 FDM 三维打印机本身属性进行分析,结合具体业务需求,在数据库中建立如表 1 所示数据表 tab_Printer。

数据表 tab_Printer 共定义了 16 个字段。其中 Id 字段为该表主键,数据类型为 bigint,即 8 字节整型数据;PrinterId 字段用于表示当前记录的打印机 ID,数据类型为最长 32 个字节长度的可变字符串;CurrentState 字段用于表示打印机当前时刻状态,数据类型也为字符串,取值为 Idle、Printing 或 Pause,分别表示打印机空闲、打印中或暂停打印。字段 SerialConnect 和 Error 数据类型均为 bit,即布尔型,前者表示树莓派和打印机是否已经建立串口连接,后者表示打印机是否存在异常,如果存在异常,则用 ErrorString 字段存储对异常的简要描述。字段 GCodeName 表示打印机正在打印的 G 代码文件名,如果 CurrentState 字段值为 Idle,则该字段为空字符。字段 LayerCount 和 LayerIndex

数据类型为整型, 分别表示正在打印 G 代码的总切片层数和当前所在层序号。类似地, 字段 LineCount 和 LineIndex 分别表示 G 代码总行数 and 当前所在行序号, 对 LineIndex 和 LineCount 相除, 可精确计算当前打印完成百分比。字段 TimeNeed 为根据 G 代码文件预估的打印时间, 而 TimeUsed 则

为已消耗时间, 这两个字段单位均为秒, TimeNeed 减去 TimeUsed 可得预估剩余打印时间。字段 BedTemp 和 NozzleTemp 分别用于记录 FDM 打印机热床温度和喷头温度, 数据类型为实数型。最后一个字段 TimeStamp 为时间戳, 表示当前记录的生成时间。

表 1 FDM 三维打印机数据表 tab_Printer

序号	字段	类型	含义	可为空	备注
1	Id	bigint	记录ID, 主键	×	自增
2	PrinterId	nvarchar(32)	打印机ID	×	
3	CurrentState	nvarchar(32)	打印机状态	√	
4	SerialConnect	bit	串口是否连接	√	
5	Error	bit	是否存在错误	√	
6	ErrorString	nvarchar(256)	错误描述	√	
7	GCodeName	nvarchar(128)	当前G代码名	√	
8	LayerCount	int	总切片层数	√	
9	LayerIndex	int	当前切片层号	√	
10	LineCount	int	总代码行数	√	
11	LineIndex	int	当前代码行号	√	
12	TimeNeed	int	需要打印总时间	√	s
13	TimeUsed	int	已用打印时间	√	s
14	BedTemp	real	热窗温度	√	℃
15	NozzleTemp	real	喷头温度	√	℃
16	TimeStamp	datetime	时间戳	×	

2.3 服务器驻留程序开发

如图 2 所示, 驻留程序是服务器上连接数据采集卡和数据库的中间桥梁, 向上对数据库接口在业务层面进一步抽象和封装, 向下起到数据隔离、验证、过滤及保护等作用。驻留程序底层通常基于 TCP/IP 协议实现, 涉及套接字(socket)编程, 难度较大。为提高实验课堂效率, 本文采用较为成熟的 WCF 技术构建服务器端驻留程序。WCF(windows communication foundation)是微软推出的数据通信框架, 它整合了 web service、socket、消息队列等通信机制, 融合了 HTTP 和 FTP 等相关技术, 具有跨进程、跨语言、跨平台等优势, 是 Windows 平台上开发网络分布式应用的最佳实践方式。WCF 服务依赖宿主进程运行, 客户端通过访问节点与服务器交互。

在微软提供的 Visual Studio 集成开发环境中, WCF 项目模板通过 IService 接口类暴露接口函数。默认情况下, WCF 服务仅支持与 .NET 客户

端程序通信; 但这并非绝对, 在 IService 接口类中, 只需添加相应接口函数的 WebInvoke 属性, 如图 2 所示, 就可在外界使用任何编程语言通过 HTTP 协议访问到该接口函数, 使其满足跨语言、跨平台需求。当客户端需要跟服务器交互时, 只需使用 POST 方法, 并在 URL 中指定接口函数名和目标数据, 便能将数据提交至服务器。

```

[ServiceContract]
public interface IService
{
    [OperationContract]
    void DoWork(); // 不支持 HTTP 通信

    [OperationContract, WebInvoke(
        Method = "POST",
        UriTemplate = "Write/{sql}",
        BodyStyle = WebMessageBodyStyle.Bare)]
    string Write(string sql); // 支持 HTTP 通信
}
    
```

图 2 支持 HTTP 通信的 WCF 接口配置

在数据采集应用中，驻留程序只负责接收数据采集卡发送过来的数据并将其写入数据库。为了进一步提升驻留程序的通用性，减少其代码量，本文采用将数据库操作逻辑下放至采集卡端的方法。即在数据采集卡上根据实际业务需求编辑包含 SQL 语句(insert)和校验码的字符串，并将其 POST 至驻留程序，如图 3 所示。而在 WCF 驻留程序中，仅需开设一个接口函数，该函数首先接收采集卡发送过来的字符串，并按照规定格式将其分解为 SQL 语句和校验码，如果校验码合法，则执行对应 SQL 语句，将相应设备状态数据写入数据库。在以上字符串中设立校验码的目的是保证数据传输的安全性，阻断将恶意数据写入数据库的可能性。

原生 SQL 语句	insert into tab_Printer (PrinterId, CurrentState, SerialConnect, Error,...) values (1001, 'Idle', 0, 0,...)
校验码 + SQL 语句	87951234; insert into tab_Printer (PrinterId, CurrentState, SerialConnect, Error,...) values (1001, 'Idle', 0, 0,...)
客户端发送	HttpPost("Write\87951234; insert into tab_Printer (PrinterId, CurrentState, SerialConnect, Error,...) values (1001, 'Idle', 0, 0,...)")

图 3 校验码添加方法

采用以上方法得到的服务器驻留程序本身具备 WCF 自带的多线程特性，可以实现跨语言、跨平台应用，而且具有非常强的通用性，即便更换现场待采集设备或服务器端修改数据表字段，也无须在代码层面修改驻留程序便能直接适用。

2.4 树莓派数据采集与发送程序开发

在整个三维打印数据采集系统中，树莓派主要起到两个方面作用。一方面，树莓派是三维打印机的上位机，通过串口和打印机建立通信，并通过发送 G 代码指令控制打印机各进给轴、喷头以及输入输出协同工作，实现三维打印功能；另一方面，树莓派又是数据采集卡，向下采集打印机状态数据，向上将这些数据发送给服务器保存。以上两方面作用分别对应树莓派中的两个主流程，一是打印流程，二是数采流程。这两个流程分别在两个独立线程中运行，其中数采流程随

树莓派上电而开启，而打印流程仅在开始打印时运行。尽管独立运行，但这两个线程间存在数据交互，如对表 1 中的 LineIndex、LineCount 等数据值只能从打印流程中获取。树莓派上运行基于 Linux 的 Raspbian 操作系统，支持 Python 语言编程。Python 语言的特点是语法简单、易学易用，使用 Python 语言可降低数据采集开发难度，同时提升实验趣味性。

树莓派作为上位机的打印流程图如图 4 所示。在用户开始打印之后，流程开始运转：首先读取 G 代码文件并将每一行代码保存至指令列表中，然后进入循环并逐一将代码指令发送给三维打印机运动控制卡。本文选用的三维打印机运动控制卡(下位机)上安装 Marlin 固件，上位机和 Marlin 固件的通信特点是：上位机发送的每条指令必须以 '\n' 字符结尾，下位机在接收并执行指令之后向上位机返回包含 "ok" 的字符串。因此，对图 4 中流程，每次循环需要执行两步操作，一是通过串口向下位机发送当前代码指令，二是通过串口读取下位机返回的 "ok" 字符串，上位机只有在读取到 "ok" 字符串之后才能进入下一步循环。

结合数据采集需求，反应打印过程的数据只能从打印流程中获取，包括：当前打印的 G 代码文件名(GcodeName)、总切片层数和当前切片层(LayerCount、LayerIndex)、总代码行数和当前代码行序号(LineCount、LineIndex)以及所需打印时间和已消耗时间(TimeNeed、TimeUsed)。在打印流程执行过程中，必须采集上述数据，并将这些数据保存到全局变量中，以备数采流程使用。

树莓派作为数据采集卡的工作流程图如图 5 所示。该流程实际上为一死循环，在每一个循环中，主要完成两部分工作。首先是收集待采集数据，包括上述保存的打印过程数据，以及 CurrentState、SerialConnect、BedTemp、NozzleTemp 等其他打印机状态数据，其中 CurrentState 根据当前打印机是否正在运行及暂停赋值，SerialConnect 则根据串口是否建立连接赋值。至于 BedTemp 和 NozzleTemp，则需遵循 Marlin 固件通信原则首先向下位机发送 "M105" 指令然后读串口获取打印机热床及喷头温度。

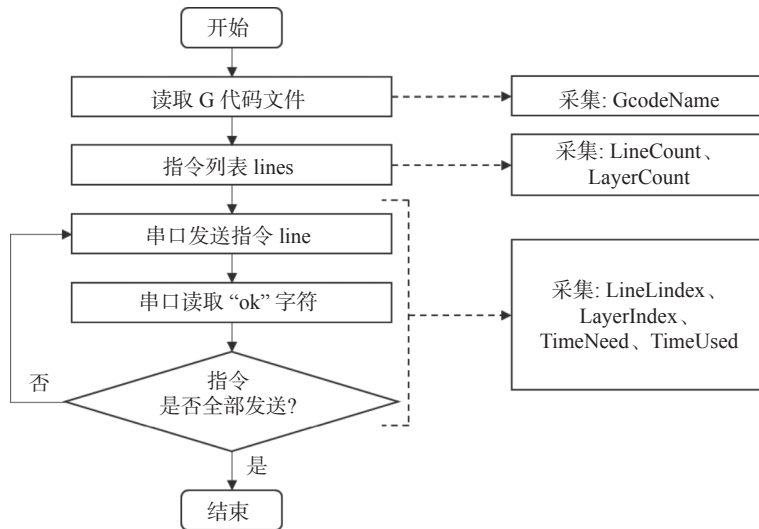


图 4 树莓派打印工作流程

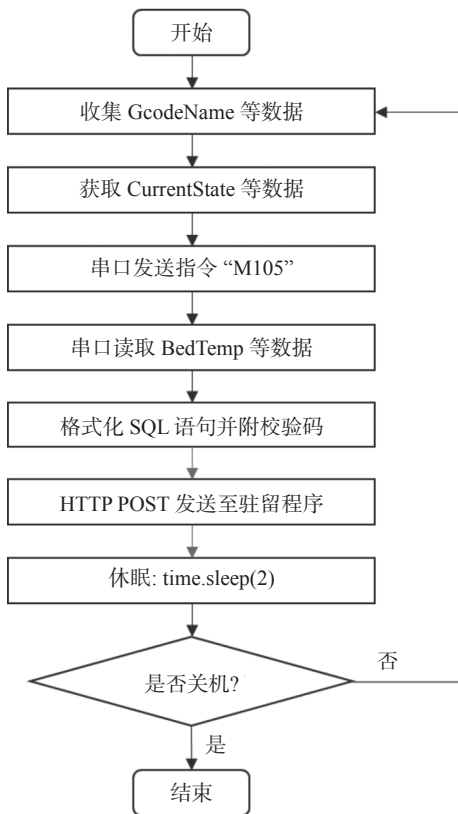


图 5 树莓派数据采集工作流程

在完成相关数据收集之后, 下一步工作是将这些数据发送给服务器驻留程序。在 2.3 节讨论的基础上, 这部分工作变得相对简单。具体发送方法是, 首先将上述数据格式化为一条“INSERT”引导的 SQL 语句, 然后附上相应校验码, 并将得到的叠加字符串通过 Python 自带的 HTTP 通信组件 POST 至驻留程序。驻留程序收到消息后, 提

取校验码及 SQL 语句, 如果校验码合法, 则对数据库执行 SQL 语句, 将相应数据写入数据库。

需要注意的是, 在针对打印流程和数采流程的实际多线程编程过程中, 考虑到某些全局变量可能被跨线程赋值和使用, 需要对这些变量添加线程锁, 防止数据异常。特别地, 因为以上两个线程都对串口进行了读写, 因此也需要对两处串口操作分别添加线程锁。

3 数据采集实验教学内容设计

数据采集实验的教学目的是让学生了解智能车间设备数据采集的基本原理、架构及技术路线, 学习网络及设备通信基本方法, 掌握 SQL、C#、Python 等编程语言基础知识及应用, 强化学生解决实际工程问题的思想和能力。

根据以上介绍的数据采集系统架构及实现方案, 结合实验教学目的, 规划如表 2 所示的数据采集实验内容及实验目标。原则上, 该实验共包含 32 课时, 其中绪论占 2 课时, 主要用于布置实验任务, 讲解系统架构及技术路线等; 数据库实验、驻留程序实验、上位机控制实验、数据采集与发送实验共占 16 课时, 这 4 个实验是数据采集主干实验; 数据采集系统联调实验占 6 课时。此外, 考虑到受众学生主要来自机械等工科专业, 对各种编程语言的掌握参差不齐, 因此在课内安排共 8 个课时讲解和本实验相关性较大的 C#和 Python 编程基础, 但这显然是不够的, 因此需要督促学生在课后做进一步学习巩固。学生通过学习、实践以上实验内容, 可掌握数据采集基本原理和方法。

表 2 面向智能制造的数据采集实验教学内容

序号	实验内容	实验目标	课时
1	绪论	任务布置, 技术路线和方式方法讲解	2
2	数据库实验	学习SQL基本语法, 掌握数据库管理软件使用, 掌握建库、建表方法	4
3	C#基础实验	学习C#基本语法, 掌握Visual Studio软件使用	4
4	WCF驻留程序实验	掌握WCF框架, 搭建服务器驻留程序, 实现HTTP通信	4
5	Python基础实验	学习Python基本语法, 掌握多线程编程	4
6	上位机控制实验	掌握Marlin固件串口通信原理, 实现上位机三维打印机控制	4
7	数据采集与发送实验	掌握数据采集基本方法, 实现数据采集与发送	4
8	数据采集系统联调实验	掌握系统联调方法, 实现系统稳定运行	6

4 结束语

随着智能制造理念不断深入人心, 智能制造类实验实践课程已逐渐在国内高校普及, 但这些课程大都侧重于产线使用或电气装调, 而对智能制造决策层所依赖的数据流关注不多。为此, 本文开展了面向智能制造的设备数据采集实验教学研究, 开发了一套以 FDM 三维打印机为设备采集对象、树莓派为数据采集卡、WCF 应用为服务器驻留程序的完整数据采集方案, 并给出了相应实验教学设计, 其特点有如下两点。

1) 通用性

该实验本身不受待采集设备、数据采集卡、数据库乃至通信协议限制, 将数据库操作逻辑下放至数据采集卡, 具备一定通用性, 同时具有较强的可复制性及推广性。

2) 趣味性

该实验融合 Python、树莓派、三维打印等几个热门元素, 以三维打印数据采集为背景, 使用简单易学的 Python 语言作为树莓派端的数据采集实现语言, 具有较强的趣味性。

参考文献

- [1] 郎彦辉. 主要发达国家智能制造战略及启示[J]. 中国发展观察, 2020(21): 61-62.
- [2] 李珂嘉, 张璐, 赵宏, 等. 新工科下智能制造人才培养及实验室建设研究[J]. 教育教学论坛, 2020(53): 385-387.
- [3] 陈国金, 姜周曙, 苏少辉, 等. 智能制造技术人才培养的实验教学体系研究[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(11): 189-192.
- [4] 李晶, 杨立娟, 陈雪峰, 等. 虚实结合的智能制 造实践教学模式构建研究[J]. 高等工程教育研究, 2020(6): 86-92.
- [5] 杨南粤, 李争名, 蔡智圣, 等. 面向创新实践的智能制造实验室的构建[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 236-240.
- [6] 许怡赦, 罗建辉, 李铭贵. 智能制造单元系统集成应用实训平台的设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 227-232.
- [7] 冯毅萍, 荣冈, 赵久强, 等. 面向工程教育的智能制造教学工厂[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(5): 167-173.
- [8] 曹锦江, 陈桂, 黄家才. 智能制造背景下自动化类专业综合实践平台的设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3): 278-282.
- [9] 白瑞峰, 韩洪洪, 于赫洋, 等. 智能制造虚拟实验系统设计及集成[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(6): 129-131.
- [10] 房朝晖, 于赫阳, 李祺, 等. 资源共享的智能制造虚拟实验教学平台建设[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(4): 118-121.
- [11] 刘海峰, 庞在祥, 王晓东, 等. 新工科背景下智能制造虚拟仿真实训教学平台建设与应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(10): 255-258.
- [12] 李全城, 吴新良. 虚实结合的智能制 造实训平台建设及教学研究[J]. 科教文汇(上旬刊), 2020(4): 88-90.
- [13] 冯翠云. “新工科+智能制造”背景下“虚拟仿真技术”的机械设计基础课程的实践探索[J]. 广西教育学院学报, 2019(6): 193-195.
- [14] 上官林建, 运红丽. 智能制造及虚拟仿真工程训练项目设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(8): 211-214.
- [15] 杨南粤, 周敏, 李争名. 基于3D打印技术的产品开发与模具设计实训教学[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(8): 243-246.
- [16] 谭跃刚, 陈章念, 张帆, 等. 3D打印创新教学实验室及其应用[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(9): 246-249.
- [17] 林志伟, 傅建中, 吴森洋, 等. 三维打印无人车间实验平台研发[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(2): 41-46.
- [18] 林志伟, 徐冠华, 吴森洋. 基于树莓派的三维打印上位机控制系统[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(6): 114-118.
- [19] WARREN G. 精通Raspberry Pi[M]. 张龙杰, 陈青华, 刘勇, 译. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [20] 王梁栋. 基于树莓派的智能家居温度远程监控系统的设计[J]. 信息通信, 2018(5): 65-66.