

基于嵌入式 Linux 与 Qt 的植保机流量 控制器设计与实现

闫 啸, 李树江, 王向东

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 为了改善植保机械药液控制效果较差, 控制方法落后的问题, 设计、开发了一种植保机的嵌入式流量控制器; 硬件基于 Cortex-A8 处理器, 搭载 10 寸的电容屏; 软件基于 Linux 操作系统, 利用 QT 开发平台, 使用 C++ 程序设计语言实现了模糊-PID 流量控制器的编写和人机界面的开发, 实现了嵌入式上位机和下位机的串口通信、参数状态显示、触摸屏虚拟键方式在线更改设置、参数等功能; 实验室测试结果表明, 在阶跃响应的激励下, 该控制器超调量为 3%, 调节时间 3.2 s, 满足了设计的需求。

关键词: 植保机械; 流量控制; 模糊-PID; 嵌入式 Linux; QT

Design and Implementation of Flow Controller of Plant Protection Machine Based on Embedded Linux and QT

Yan Xiao, Li Shujiang, Wang Xiangdong

(School of Information, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to improve the poor effect and method of control of liquid medicine of the protection machinery, in this paper, an embedded flow controller of the plant protection machine is designed and developed. The hardware is designed based on the Cortex-A8 processor and it is equipped with a 10-inch capacitive screen. The programming is based on the Linux operating system and using the QT development platform. The C++ programming language is used to development of a Fuzzy-PID controller of liquid medicine and the human-machine interface for the system of flow control of plant protection machine. The functions of the serial communication between the embedded upper computer and the lower computer, the status displaying of parameters, changing and re-setting parameters online via touch screen virtual keys are all achieved. The system test results show that the controller has a overshoot of 3% and an adjustment time of 3.2 s under the excitation of the step response. The controller can meet the design requirements.

Keywords: plant protection machine; flow control; fuzzy-PID; embedded Linux; QT

0 引言

我国地大物博, 物产丰富, 是一个农业大国。虽为农业大国, 但我国喷杆式喷雾机的自动化程度较低, 供药系统药液的压力、流量不稳定、药液喷施控制大多采用传统控制策略。由于药液压力, 车速经常发生变化, 传统的控制策略精度不够高, 响应不够快, 对变流量控制的效果较差, 造成了喷洒的不均匀, 导致了农药的过度使用, 浪费资源, 污染土壤, 破坏生态平衡, 远没有达到智能化农业

的要求。近些年, 很多学者做了相关研究。Kleber R.^[1] 等人开发了药液直接注入系统 (DIS), 对喷雾管路压力流量, 药液混合浓度和变量喷雾误差预计进行建模。经实验测试分析, 模型性能较好, 实现了变量喷雾, 但采用的控制策略较为简单。史岩^[2] 等建立了基于压力式的变量喷药系统, 对系统进行了数学建模, 推导出整个系统的传递函数, 但只是在仿真下进行测试, 没有做成实物, 采用前馈控制策略, 控制精度不高。宋乐鹏^[3] 为了改善微小流量的控制效果, 建立了机电流量控制阀的数学模型, 实验效果较好。王利霞^[4] 等基于 ARM 微处理器设计了一种变量喷药控制系统, 采用 C 语言进行系统软件的编写。在基于处方图的自动控制模式下, 喷药流量的误差范围在 5% 之内。为了研究药液喷施的雾化效果, 武同昆^[5] 等利用 ARM 微处理器控制输出不同占空比的 PWM 信号控制无刷电机。虽然先前学者做了很多工作, 但目前仍存在如下的问题: 1) 传统植保机缺乏对工况状态参数的监测。目前植保机

收稿日期: 2019-02-28; **修回日期:** 2019-03-25。

作者简介: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0700104-02)。

作者简介: 闫 啸 (1993-), 男, 辽宁营口人, 硕士研究生, 主要从事控制理论与控制工程专业方向的研究。

李树江 (1966-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事智能控制理论与应用, 嵌入式控制系统及应用等方向的研究。

王向东 (1959-), 男, 研究生导师, 教授, 主要从事复杂系统控制, 群优化理论与应用, 混沌粒子群优化方法等方向的研究。

械喷药的过程大都是采用经验判断,没有一个精确的工况数据的监测,操作者无法确定喷洒药液流量的大小,只能根据经验进行相关操作,导致农药喷洒的不均匀,造成了喷施精度和防虫害的效果不理想,进而导致了农药的过度使用,造成了资源的浪费,生态环境的污染;2)缺乏对植保机械药液流量的控制。由于目前大多数机械上针对药液流量仍采用的是传统控制策略或者根本没有采用控制,导致了当实际工况发生变化时,不能按要求进行变流量喷洒操作,远没有达到智能化程度;3)缺乏直观的操作显示台;4)虽然国外约翰迪尔等公司有成套的系统,但由于其造价较为昂贵,不利于大规模推广。因此,本文设计了一种基于嵌入式的植保机流量控制器,能够较好的改善上述的状况。

1 系统总体设计及原理

针对目前存在的问题,本文设计的植保机流量控制器能够改善上述状况。应具备以下功能:

1) 建立实时的数据采集功能。植保机工作时大量与喷施相关的系统参数需要监测,植保机在试行喷药工作时最为重要的参数是药液喷施的流量参数,它是能否实现精确喷施的核心;另一个关键的参数是管路中药液的压力,系统正常运行时由于管路中的压力与流量存在一定的比例关系,当喷嘴或管路中某些地方发生堵塞,会导致药液压力的变化进而改变药液的喷施流量;药箱里药液的剩余量,能够较为直观的了解药箱内的药液剩余量,提示农机操作人员及时补充农药;还有事车辆行驶的速度、车辆油箱,车辆的行驶速度和喷药的均匀性有一定的关系,当车速增大时,为了满足喷洒过的土地单位面积上农药量的一定,则需要加大药液流量。当车速降低时,则需要减小流量。

2) 建立友好的人机交互显示界面。将系统采集到的各种参数实时的在人机界面上实时显示,使得农机操作人员较为直观的观察机具的工作状态,以及喷施的相关参数。当根据不同工况时,操作人员可以依据界面显示的参数更为准确的进行相关操作。建立的显示界面尺寸大小应该适中,符合实际工况,操作流程应趋于简单化,迎合大多数农机驾驶员的使用习惯。

3) 建立植保机流量控制功能。设计植保机流量控制器,选取恰当的智能控制策略,根据采集到的参数,进行植保机喷药流量的实时控制。这需要选用一个运算速率快,稳定性高的嵌入式处理器。

4) 建立在线更改参数,与显示功能。在人机交互界面上,驾驶员可以根据需求通过虚拟键盘的方式在线更改系统设定的参数,如药液压力值,喷药量,控制策略相关的控制参数,药箱的容量值等。将流量控制的结果截取一部分在显示器中进行图像显示。使控制效果的展示更为直观,方便操作人员在线调整控制参数。

5) 系统具备良好的稳定性,扩展性高。由于工况较为

复杂,不同地域温度,湿度变化较大,要求选择恰当的硬件,使得系统具备良好的稳定性。要求系统能够即插即用,方便在传统农机具上进行智能化升级改造。要求系统有良好的扩展性,留有足够丰富的硬件模块和软件模块接口,方便今后做进一步的产品升级。在具备一定性能的前提下,系统的软硬件造价成本不能太高,要符合实际生产。

本文研究的是植保机械中的喷雾机,其机械的运动参数,作业状态,喷施效果的实时监测是其智能化的基础。植保机中的药液变流量控制是保证喷施效果的关键。根据上文分析系统的应具备的功能设计了系统总体结构,如图 1 所示。

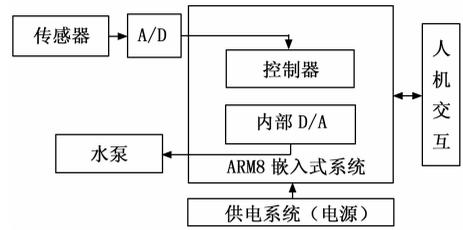


图 1 嵌入式流量控制结构

传感器部分由流量传感器,压力传感器,车辆速度传感器,液位传感器等构成,将采集到的信号由外部 ADC 转换后传输到中央控制器中,控制器将采集到的的数据进行实时处理,并将数据传输到人机交互界面上实时显示。当启用控制功能后,根据流量传感器和压力传感器测量的反馈值,控制器内部运行自行编写了模糊 PID 控制策略对药液进行智能控制,将控制信号经内部 D/A 转换成电压信号驱动执行水泵改变药液流量的大小。为了搭建更友好的人机交互功能,采用 Linux+QT 方式编制界面,进行系统监测数据显示,控制指令的发送,控制参数的在线更改,控制结果的在线显示。

2 硬件选型

目前植保机中的大都以单片机为主,该流量控制器是以模糊 PID 控制器为核心,为了实现实时监测系统参数,提高运算和控制精度,嵌入式处理器需要强大的运算能力,并且能够扩展更多的使用功能,本文使用嵌入式 ARM8 硬件平台。采用飞凌公司生产的 OK335xS-II 工业级开发板(如图 2),该平台基于 TI 公司的工业级 ARM 处理器 AM3354 设计完成,采用的是 ARM Cortex-A8 架构,运行频率 800 Hz,板载 512 MB 的 DDR3 内存,256 MB Nand-Flash。其内部集成了丰富的接口,预留了 CAN 总线, GPS, WIFI 等接口,满足当下系统的需求,也为后续系统开发扩展做了硬件保障。药液流量传感器采用 CYYZ11 型压力传感器,AD 转换芯片采用 AD7606-4 芯片。执行水泵采用的是深圳齐鑫公司的 QS370D 水泵。显示界面硬件上采用 10 寸的电容屏,处理器将处理好的数据经串口传到人机交互界面显示。

3 软件设计

3.1 开发环境的搭建

本文的嵌入式软件采用开源的 Linux 操作系统, 其可移植性和裁剪性为本设计开发提供了良好的平台。搭建友好的人机交互界面是本文的一个重要工作, 本文的应用程序软件基于 QT 平台开发。QT 具备良好的跨平台开发特性, 丰富的 API, 强大的自定义功能等优点, 是为嵌入式设备上的图形用户接口和应用开发而定制的 C++ 开发包^[6]。本系统开发是在 PC 机上进行预处理、编译、链接等工作, 然后在生成可以在目标机上运行的可执行程序^[7]。本文设计中, PC 机装有 Ubuntu 12.04 操作系统, 安装交叉编译工具 arm-linux-gcc-4.6.3, 嵌入式设备上采用 Linux 3.2+ QT creator 4.3.2 在此基础上完成 QT 应用程序的开发工作。

3.2 界面的设计

界面应用程序主要实现采集数据的显示处理。本文采用 QWidget 类创建主界面, QDialog 类创建子界面。根据需求, 人机显示主界面主要分为 3 个部分: 1) 系统参数的显示区。选取 QLineEdit 作为监测数据的显示框, 分别显示植保机的药液流量, 管路中药液的压力, 车辆的行驶速度, 选取 QProgressbar 作为植保机药箱液位和油量液位的显示; 2) 喷嘴的状态显示区。将喷嘴的工作状态进行了图像的变化显示; 3) 系统功能按钮区。选取 QPushButton 作为按钮, 触发各功能子模块。为了更高效地实时显示和数据的传输, 采用 Qt 自带的线程类 QThread 实现多线程工作, 一路线程专门作为主界面显示, 各种传感器分别使用一路线程作为传输通道。

喷嘴的状态显示区, 对喷嘴的工作状态一共有 4 种表示。绿色表示喷嘴正常工作; 红色表示堵塞, 压力过高发出提醒; 黄色表示喷嘴等待喷洒; 白色表示喷嘴关闭。界面上的喷嘴采用 QT 自带的画图 QPainter 类进行绘制, 先确定好布局, 设置画笔, 描绘图形, 设定填充颜。当接收到喷嘴状态信息时, 通过判断状态参数, 经 QT 的 update() 函数进行状态的更新。

本控制器加入了设定参数, 在线调试等功能, 所以用 C++ 编写了虚拟键程序。自行定义了一个 SoftKeyLineEdit 类, 将设置子界面和流量控制子界面里的 QLineEdit 继承自它。当触摸屏被点击时会触发 QMouseEvent 的事件, 经事件过滤器判断后自动生成一个模态的小键盘, 该键盘继承自 QDialog 类, 用户可直接在小键盘上进行数据参数的在线更改。

部分代码如下:

```
void SoftKeyLineEdit::mousePressEvent(QMouseEvent * e)
{ if(e->button() == Qt::LeftButton)//判断按下的按钮
{ numkeyboard->setText(this->text()); //传递内容
numkeyboard->exec(); //显示一个模式对话框
if(numkeyboard->valid) { this->setText(numkeyboard->
```

```
>getText()); //返回得到的字符串
}
}
}
```

系统设定的值和 P , I , D 三个初始参数通过触摸屏虚拟键方式在线更改。调用 QT 外部 Qcustomplot 库, 编写图像数据显示模块, 在嵌入式平台上完成了显示功能。流量控制模块的具体设计在下一小节中详细介绍。

3.3 流量控制策略设计

本文要控制的是植保机药液的流量, 由于管路中流量的平方和压力存在比例关系^[1], 故本文的控制可转为对药液的压力控制。药液经事先混药完成后装在液罐中, 嵌入式控制器通过控制电压驱动信号输出进而控制电机驱动水泵调节药液流量的大小。

由于, 管路中的药液流量, 管路中的压力, 农机具速度存在不确定性, 在实际工况下属于非线性系统。传统 PID 控制策略过渡依赖模型的精确性, 鲁棒性不好, 而现实中很难准确的对该过程进行精确建模^[8]。为了较高的控制精度, 本文采用的控制策略为自适应模糊 PID 控制 (图 3)。将模糊控制和传统的 PID 控制相结合, 既具有模糊控制解决非线性、不确定性和较强的鲁棒性的特点, 又具有 PID 控制精度高的特点^[9]。

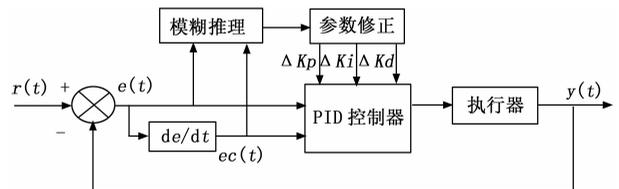


图 3 模糊 PID 系统结构

本文采用增量式自适应 PID 控制, 模糊 PID 算法核心是根据设定的模糊规则采用参数自动在线整定的方式, 增强控制器的稳定性。模糊控制器采用的两输入三输出的结构。将压力传感器采集到的药液压力值偏差和偏差的变化率作为控制的输入量, 经量化处理后, 根据设计的模糊规则表完成模糊推理后得到 PID 控制中比例, 积分, 微分 3 个系数的修正值 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 。将 PID 三个参数的修正值与原值相加完成参数的修正, 接着对被控对象进行更改参数后的增量式 PID 控制。增量式 PID 有效地减少了计算误差的复杂度, 提升了运算效率, 只需要三次的偏差就可以进行, 因此本文采用的增量式 PID。具体的算法公式为: 式中: $e(k)$ 为偏差; $u(k)$ 为模糊 PID 的输出结果; K_p , K_i , K_d 分别为模糊 PID 的比例、积分、微分的初始参数; K'_p , K'_i , K'_d 的初始参数, 其由常规方法得到。

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \Delta k_p \\ k_i = k'_i + \Delta k_i \\ k_d = k'_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ & k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 控制参数系数修正值模糊规则表

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/PB/PB	PM/PB/PM	PS/PB/PM	ZO/PB/PM	NS/PB/PM	NM/PB/NM	NB/PB/ZO
NM	PB/PM/PS	PM/PM/PS	PS/PM/PB	ZO/PM/PB	NS/PM/PM	NM/PM/NS	NB/PM/ZO
NS	PB/PS/NS	PM/PS/NS	PS/PS/NM	ZO/PS/NM	NS/PS/NB	NM/PS/NB	NB/PS/ZO
ZO	PB/ZO/ZO	PM/ZO/PS	PS/ZO/PS	ZO/ZO/NS	NS/ZO/NS	NM/ZO/NM	NB/ZO/NM
PS	PB/NS/NS	PM/NS/NS	PS/NS/ZO	ZO/NS/ZO	NS/NS/NS	NM/NS/NS	NS/NS/NM
PM	PB/NM/NM	PM/NM/NM	PS/NM/NS	ZO/NM/NS	NS/NM/ZO	NS/NM/NM	NB/NM/NM
PB	PB/NB/NB	PM/NB/NM	PS/NB/NM	ZO/NB/PM	NS/NB/PS	NM/NS/PS	NB/NB/PB

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (3)$$

查阅相关资料,并结合系统自身特点得知植保机的流量压力范围在 0.1~0.5 Mpa 之间。则将压力的偏差 e 基本论域定为 $[-0.5, 0.5]$, 误差偏差变化率 ec 基本论域为 $[-1, 1]$ 。根据相关专家经验知识, 3 个输出的论域分别为: ΔKp : $[-0.3, 0.3]$, 积分系数 ΔKi : $[-0.3, 0.3]$, 微分系数 ΔKd : $[-0.6, 0.6]$ 。偏差 e 和偏差 ec 的模糊论域设定为 $[-6, 6]$, 3 个输出量的模糊论域为 $[0, 1]$ 。将 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 设置为输入变量 e 及 ec 、输出变量 kp , ki 和 kd 的模糊子集, 见表 1。三角形隶属度函数在论域范围内分布均匀, 形式简单, 计算量小, 便于在微控制器上实现, 故将其选作系统的隶属度函数。控制结果去模糊化采用加权平均法计算输出值。

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \quad (4)$$

在上一章软件设计中预留了控制器模块接口。本文在此对流量控制器模块软件设计进行介绍。

当点击触摸屏上控制器按钮时, 自动弹出控制器在线调试子界面。子界面分为两个部分, 第一个为控制器参数设定值得显示部分, 包括控制系统的设定值, 控制器的三个 PID 参数的初始值。第二部分为控制器输出的图形表示界面。传感器采集到的输出药液压力值存入缓存区, 将结果采用曲线画图的方式更为直观地表示。控制功能具体流程为: 当前入式硬件设备通电后, 系统先进行硬件驱动和软件的初始化操作, 接着待机等待。当系统控制参数设定好后, 按下控制器运行按钮, 植保机流量控制器开始正常工作, 采用模糊 PID 控制策略对药液压力进行控制。当控制器模块按钮点击时, 进入在线调试模式, 可以通过虚拟键方式在线更改设定值, 3 个控制参数的初始值。当修改好参数后, 点击运行按钮即可更改模糊 PID 控制参数, 控制器自动对药液进行控制, 将压力传感器测得的压力信息传回处理器, 在调试界面上进行部分结果的曲线画图显示, 可以直观地看出控制器效果。当系统停止键按下时, 控制器停止工作, 电子控制单元释放控制权限。

4 实验结果与分析

本文在实验室模拟了植保机的流量控制过程。将执行水泵模型在下位机 STM32 上嵌入式实现, 嵌入式平台与下位机进行串口通信形成闭环回路, 将控制器的软件程序通过 USB 方式移植到嵌入式设备上, 设备通电初始化程序后, 点击系统运行按钮, 系统开始监测参数, 右上角自动显示日期时间, 在设定和控制器界面里可以通过触摸屏键盘方式在线更改参数。系统运行如图 4 所示。

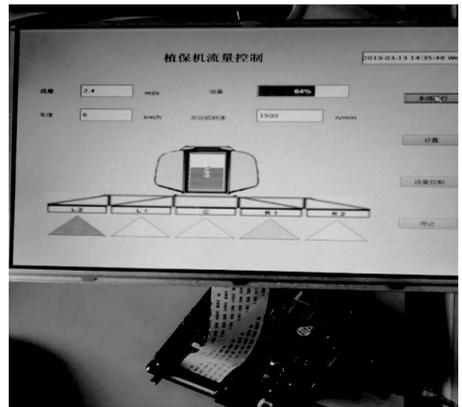


图 4 人机交互界面

为了验证本文设计的控制器效果, 通过查找相关文献得到流量控制系统的传递函数^[10]

经实验室测试得, 系统增益 $k=0.93$, 时间常数 $\tau=0.65$, $T1=0.2$, $T2=0.9$ 。

模拟植保机实际工作情况, 本实验将设定管路中的药液压力值为 2 bar, 系统的初始值为 0 bar, 设定 PID 三个初始参数 Kp , Ki 和 Kd 初始值为 5, 5, 0, 设定系统采样周期为 20 ms。根据系统储存的采样到的离散数据, 在编写的 QT 界面上重现 (图 6)。实验结果表明, 在给定的阶越响应下, 系统的调节过程较为平稳, 最大超调量为 3%, 系统经控制器调节最终趋于稳态, 稳态误差为 0, 由于系统存在时滞情况, 调节时间为 3.2 s, 达到了预期值。本文设计的植保机流量控制器效果较好, 达到系统设计的目标, 可以满足农业生产的需求。



图 5 在线更改设定参数

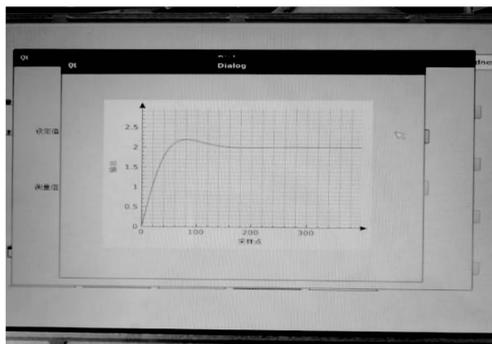


图 6 模糊 PID 的阶越响应

5 结束语

本文设计并实现了一种基于嵌入式的植保机流量控制器, 实现了对药液参数的实时监测, 采用模糊 PID 控制策略对药液进行控制, 效果较好。利用 C++ 编程语言在 QT 平台上开发出友好的人机交互界面, 满足了生产需要, 提高生产效率, 对于后续智能化农机的研制具有一定的工程应用价值。但本文仍有很多不足, 在今后的工作中, 有以下几点需要完善: 串口传输数据稳定性不高, 传输速率缓

慢, 可以利用 CAN 总线进行通信的搭建; 控制界面功能不够丰富, 可以引入 GPS, 4G 等技术, 开发比如出当下较为流行的无人驾驶技术等。朝着农业装备智能化的方向进一步发展。

慢, 可以利用 CAN 总线进行通信的搭建; 控制界面功能不够丰富, 可以引入 GPS, 4G 等技术, 开发比如出当下较为流行的无人驾驶技术等。朝着农业装备智能化的方向进一步发展。

慢, 可以利用 CAN 总线进行通信的搭建; 控制界面功能不够丰富, 可以引入 GPS, 4G 等技术, 开发比如出当下较为流行的无人驾驶技术等。朝着农业装备智能化的方向进一步发展。

参考文献:

[1] 蔡小斌, 王 红, 王宏伟. 法国通用自动测试平台 ATE 发展综述 [J]. 测控技术, 2000 (6): 1-4.
 [2] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台 [J]. 电力系统自动化, 2015 (18): 91-96.
 [3] 罗 锦, 孟 晨, 杨锁昌. 通用自动测试平台研究 [J]. 中国测

参考文献:

[1] Felizardo K R, Mercaldi H V. et al. Modeling and model validation of chemical injection sprayer system [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32 (3): 285-297.
 [2] 史 岩, 祁力钧, 傅泽田, 等. 压力式变量喷雾系统建模与仿真 [J]. 农业工程学报, 2004, 20 (5): 118-121.
 [3] 宋乐鹏, 董志明, 向李娟, 等. 变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊 PID 控制 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (11): 114-118.
 [4] 王利霞, 张书慧, 马成林, 等. 基于 ARM 的变量喷药控制系统设计 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (4): 113-118.
 [5] 武同昆, 周超英, 谢 鹏. 基于 PWM 的远程控制新型变量喷雾系统设计 [J]. 农机化研究, 2017, 39 (7): 76-82.
 [6] 陈 曦, 刘增强. 基于 Qt/Embedded 嵌入式控制界面的设计 [J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38 (9): 1131-1132, 1139.
 [7] 张远征. 基于嵌入式 Linux 与 QT 的矿用柴油车虚拟仪表盘软件设计 [J]. 煤矿机械, 2016, 37 (12): 163-165.
 [8] 史登辉, 刘明尧, 岳 慧, 等. 井下智能流量控制阀开度控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2017 (z1): 110-112, 116.
 [9] 李树江, 王志超, 王向东. 基于 ARM9 的变风量空调末端控制器设计与实现 [J]. 控制工程, 2017, 24 (8): 1595-1602.
 [10] EI Aissaoui A. A feasibility study of direct injection spraying technology for small scale farms [J]. Modeling and Design of A Process Control System, 2015.
 [1] 蔡小斌, 王 红, 王宏伟. 法国通用自动测试平台 ATE 发展综述 [J]. 测控技术, 2000 (6): 1-4.
 [2] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台 [J]. 电力系统自动化, 2015 (18): 91-96.
 [3] 罗 锦, 孟 晨, 杨锁昌. 通用自动测试平台研究 [J]. 中国测试技术, 2005, 31 (5).
 [4] 陈昌华. 二维自动检测平台控制系统的设计与实现 [D]. 南昌: 南昌航空大学.
 [5] 彭 刚, 张 强, 何亚洲, 等. 基于 COMPASS 软件的压力自动检测平台 [J]. 计量与测试技术, 2018.
 [6] 张在德, 曹乃森, 蒋晓松. ATE 通用性设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (11): 830-831.
 [7] 张传玺, 杨昭颖, 彭忠洋, 等. 基于 Android 平台的教师课堂智能助手系统 [J]. 中国教育信息化, 2014 (9): 56-59.
 [8] 周 瑜, 王天安. 变电站安全扶梯智能助手研究 [J]. 科技展望, 2015, 25 (34).
 [9] 技术宅. 微软小娜的背后智能语音人机交互 [J]. 电脑爱好者, 2015 (16): 54-55.
 [10] 朱子歌, 杜月蕾. 互动虚拟旅游信息系统设计研究 [J]. 中国高新技术企业, 2013 (9).