

# 篱架型作物高效施药技术自适应控制系统的研究与实现

林怡飞 王库\* 侯天星 李伟

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

**摘要** 针对目前我国果园施药成本高、效益低、药液流失污染严重等问题,设计并实现了一种篱架型作物高效施药技术的自适应控制系统。该系统由 DM642 视觉处理器、ARM 控制器和 F2806 信号控制器组成,采用基于嵌入式系统的图像处理技术和多传感器技术,通过视觉传感器和超声波传感器探知作物的疏密度和施药距离;由系统自动控制电机带动喷头组的移动,调整最佳喷药距离,选择最佳喷药压力。实验结果表明,该系统实时性好、控制有效、能耗小、成本低,能够稳定可靠地实现喷药过程中的监测和控制。

**关键词** 篱架型作物; 喷药; 图像处理; 自适应控制系统; 嵌入式

中图分类号 S 491

文章编号 1007-4333(2010)06-0108-07

文献标志码 A

## Implementation of a self-adaptive control system for highly-effective application of trellised crops

LIN Yi-fei, WANG Ku\*, HOU Tian-xing, LI Wei

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The orchard pesticide application technology in china still remains problematic with its high cost, low efficiency as well as high pesticide loss, which results in serious environmental pollution. The design and implement of a self-adaptive control system for highly-effective application of trellised crops provide a solution to the above problems. The system consists of a visual DM642 processor, an ARM controller and a F2806 signal controller and adopted the image-processing and multi-sensor merging technologies based on the embedded system. The distance of the pesticide application and the spraying pressure will be detected through ultrasonic sensor and visual sensor, based on which the system manipulates the control motor automatically to adjust the spray nozzles to the optimal spraying distance and choose s the best spraying pressure. To ensure the stability and the reliability of the system, we designed stable hardware components and software structure and worked out detailed communication protocols. Experiments showed that the system is characterized by excellent real-time, effective control, low consumption of power as well as low cost. It proved that the system could fulfill the monitoring and controlling tasks stably and reliably during the spraying.

**Key words** trellised crops; spraying; image-processing; a self-adaptive control system; embedment

目前,我国果园病虫害防治仍较多地使用手动踏板式喷雾器和高压喷枪,采用大容量淋洗式连续施药方法,农药利用率极低,只有 15%~20%。严重的农药流失和残留,对人类的生存和生产构成了威胁。在科技较发达国家,定向对靶喷雾和精确智能喷雾技术已成为果树植保机械的发展趋势,农药有效利用率达到 65%以上<sup>[1-4]</sup>。

发达国家对农药精确施用方法的研究起步较早,已采用了先进的农药防漂技术和电子技术。如美国加利福尼亚大学戴维斯分校研制的基于视觉的精量喷雾控制系统,能够针对非均匀分布的作物,根据其长势和密度差异控制喷雾量达到精确喷雾效果<sup>[5-7]</sup>。德国的 Lechler 公司研制了防漂喷头,利用射流原理对药液实现 2 次雾化,提高了雾滴覆盖率,

收稿日期: 2010-04-13

基金项目: 国家“863”计划项目(2008AA100904)

第一作者: 林怡飞, 硕士研究生, E-mail: matt98129@gmail.com

通讯作者: 王库, 教授, 博士生导师, 主要从事数字信号与图像处理, 智能控制与检测仪表等研究, E-mail: Wang\_ku@263.net

可降低漂失 75% 以上<sup>[8]</sup>。我国在自动化施药技术的应用上还处于起步阶段,但也取得了一定的成果。王贵恩等按照仿形喷雾原理,研制了一种基于单片机的非接触式仿形喷雾控制系统<sup>[9]</sup>。邱白品等研制了一种自动对靶变量喷雾控制装置<sup>[10]</sup>。陈勇开发了基于机器视觉和模糊控制原理的精准农药可变量控制系统<sup>[11]</sup>。何雄奎等研制成功了果园自动对靶喷雾机,该喷雾机将风送喷雾、静电喷雾、红外自动对靶技术有机集成,综合节省农药达 50%~75%<sup>[12]</sup>。综上,国外果园喷雾机装置虽然在研制上采用了先进的喷雾技术,农药利用率高,但其价格昂贵,1 台设备几十万到上百万不等。国内研制的喷雾机存在机电一体化技术集成度较低,基于嵌入式系统的图像处理和自适应控制不完善,科技成果产业化转化率较低等不足。

本研究旨在研制一种篱架型作物高效施药技术的自适应控制系统。拟通过测量篱架型作物喷雾机的施药距离和作物叶子的疏密程度等施药状态,并进行分析决策,自动控制电机组的移动,调节喷杆位置选择合适的施药距离和压力,以期实现人机交互、高效、对靶、精确施药的目的。

## 1 高效施药技术控制系统结构

本研究设计的篱架型作物高效施药技术控制系统主要由 3 部分嵌入式系统组成:DM642 视觉处理器、ARM 控制器和 F2806 信号控制器(图 1)。

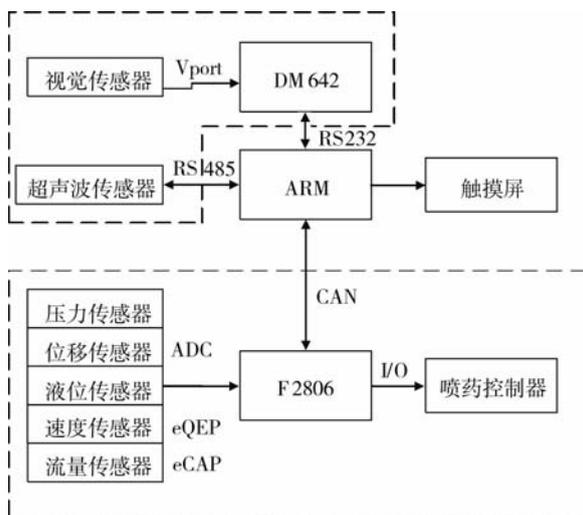


图 1 篱架型作物高效施药技术自适应控制系统结构图  
Fig. 1 Structure of the self-adaptive control system for highly effective application of the trellised crops

根据篱架型作物的特点和高效施药技术的要求,施药距离的检测和作物疏密度的提取是篱架型作物高效施药技术的基础和关键。为此,研制了使用超声波传感器的非接触式测距方式以及基于 DM642 图像处理技术的疏密度计算方法,分别通过 RS485 串口和 RS232 串口将施药距离和疏密度值传送到 ARM 控制器作为系统控制的主要参数。

F2806 信号控制器主要完成 2 个任务:1) 对每个传感器节点的信号实时采集,并通过 GET 指令把当前喷药压力、喷杆位移、拖拉机速度等信号,经 CAN 总线传送给 ARM 控制器用作分析处理并在触摸屏上显示。2) 通过 SET 指令接收 ARM 控制器发送的控制命令,ARM 控制器对传感器信号融合后,通过模糊控制算法进行分析,计算出在当前状态下喷杆需要调整的最佳喷药距离和喷头需要选择的最优喷药压力,并组合成相应的 I/O 控制指令。整个控制流程形成一个闭环操作,从而达到对施药过程实时监测调整的目的,实现真正的高效施药技术。

## 2 F2806 信号控制器硬件设计

F2806 信号控制器选用 TI 公司生产的 TMS320F2806 作为传感器信号提取和喷洒控制系统平台主芯片。该芯片采用高性能的静态 CMOS 技术,主频最高可达 100 MHz,拥有低功耗设计模式。本研究充分利用了该芯片作为 DSP 微控制器的优良特性,使用的片上外设包括:12 位 AD 转换器、捕捉单元模块(eCAP)、正交编码脉冲模块(eQEP)、CAN 模块(eCAN)和 35 个 IO 资源,芯片集成了快速的中断管理单元,中断延迟时间大幅减少,满足实时控制的需要<sup>[13]</sup>。

F2806 信号控制器输入的模拟信号有,压力传感器信号、位移传感器信号、液位传感器信号和静电喷雾电压信号,信号经过模拟放大电路和滤波电路限幅后转换成 0~3 V 的模拟信号,送给 DSP 的 A/D 口采样取值;数字信号有流速传感器和速度传感器,信号经过高速光耦 6N137 进行整波和电压变换,变成 0~3.3 V 方波信号输入数字信号捕捉接口。

F2806 信号控制器输出的信号是数字 I/O 信号,输出信号经过驱动电路后对直流电动机进行正反转控制,实现控制喷雾机喷头的启合和喷杆的移动达到自适应的调控。系统主要通过 CAN 总线完

成和 ARM 控制器的通信。F2806 信号控制器架构见图 2。

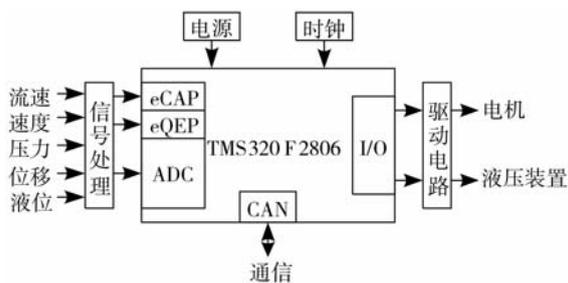


图 2 F2806 信号控制器架构

Fig. 2 System platform of F2806 signal controller

## 2.1 F2806 信号控制器传感器信号采集电路设计

压力传感器主要用于测量喷洒控制器中喷头的药液输送压力。本系统中使用的压力传感器需要 12 V 电源供电,在 0~100 bar 的压力作用下输出 4~20 mA 的电流信号。输出信号经过运算放大电路(图 3)将电流信号转换为 0~3 V 的电压信号,再进入 TMS320F2806 中 ADC 模块进行模/数转换。F2806 片内自带的模/数转换模块是 12 位的,模/数时钟可以配置为 25 MHz,根据耐奎斯特采样定理在 1 s 中内最高可以完成 12.5M 个采样点的取值。运算放大器采用 TI 公司生产的 OPA2333,它具有低输入失调电压(最大为 10  $\mu$ V)、低失调电压温

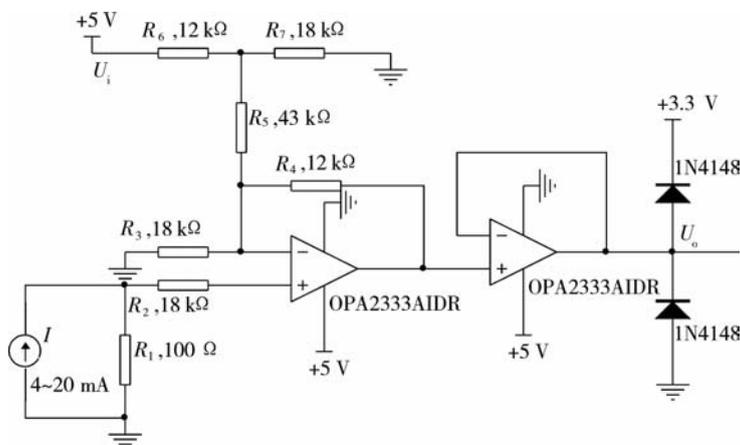


图 3 压力传感器信号放大电路

Fig. 3 Amplification circuit of pressure sensor

漂(最大为 0.05  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C)、低输入噪声电压、单电源供电及长期稳定的特点,非常方便的用于微弱信号的精确放大。

信号经过放大电路后输出电压  $U_o$  为:

$$U_o = \left( \frac{R_4 + R_3}{R_3} + \frac{R_4 R_7 R_6}{R_5 R_6 + R_6 R_7 + R_7 R_5} \right) I R_1 - \frac{U_i R_7 R_4}{R_5 R_6 + R_6 R_7 + R_7 R_5}$$

其中: $U_i$  为输入基准电压 5 V, $I$  为压力传感器的输出电流。通过选择适当的电阻值,当输入电流  $I=4$  mA 时,输出电压  $U_o=0$  V;输入电流  $I=20$  mA 时,输出电压  $U_o=3$  V。

流速传感器用于测量施药过程中药液的流速。本系统选用的流速传感器使用 12 V 电源供电,输出信号为 0~12 V 的方波,经过整波电路变成 0~

3.3 V 方波,再输入 TMS320F2806 增强的捕捉单元模块(eCAP)进行频率的计算。频率测量分为计单位时间内脉冲个数和测量相邻 2 个脉冲之间的时间间隔两种方法。经分析,前者适合测量频率较高的信号,后者适合检测频率相对较低的信号。本流速传感器工作时输出频率范围围 40~250 Hz,则选用第 2 种测量方法。eCAP 模块提供了 1 个完整的捕捉通道,拥有 1 个 32 位的时间基准计数器,在系统时钟为 100 MHz 时,其时间基准的精度为 10 ns。

拖拉机行驶速度会对施药压力和流速的选择产生影响。农业机械工作环境恶劣,粉尘、噪声、药滴等环境因素对传感器信号准确性干扰大,因此,选用双路相位差信号输出的变磁通量电磁感应式速度传感器。它具有高频率响应,无触点检测的特点,能长期稳定地在恶劣环境中工作。输入信号为两路带相位差的 12 V 方波,经过整波电路变成 3.3 V 方波,

再输入 TMS320F2806 增强的正交编码脉冲模块 (eQEP) 完成对拖拉机速度的计算。拖拉机工作行驶速度  $v(k) < 5 \text{ km/h}$ , 相邻脉冲之间的时间间隔  $\Delta T$  较长, 选用计算 2 个连续脉冲之间的时间的方法测量行驶速度, 比较双路方波差分信号的相位差计算行驶方向。所用齿轮半径  $r = 3 \text{ cm}$ , 齿数  $N = 60$ , 履带式拖拉机同轴主动轮直径  $D = 24 \text{ cm}$ , 行驶速度  $v(k)$  由式(1)计算可得:

$$v(k) = \frac{X}{t(k) - t(k-1)} = \frac{X}{\Delta T} = \frac{\pi D}{N \Delta T} \quad (1)$$

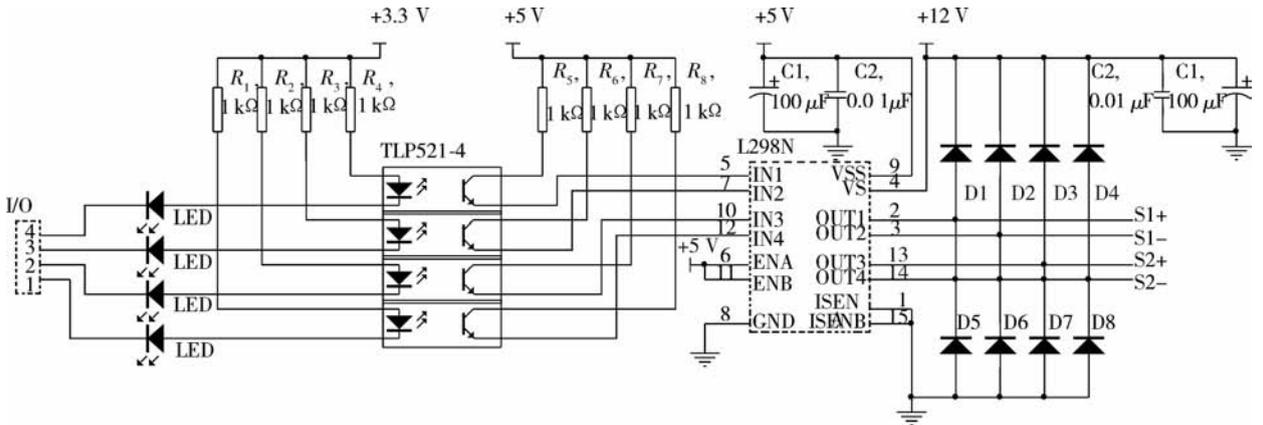


图 4 直流电机信号控制器驱动电路

Fig. 4 Control circuit of DC motor

### 2.3 F2806 信号控制器 eCAN 接口设计

在 F2806 信号控制器中, 使用 CAN 总线接口和 ARM 控制器完成通信过程。TMS320F2806 内部集成了 1 个增强型的 CAN 总线通信接口, 该接口与 CAN2.0b 标准接口完全兼容, 最高支持 1 Mb/s 的总线通信速率。CAN 总线控制器的逻辑电平平均采用 LVTTTL, 因此系统采用 TI 公司生产的 SN65HVD230 与之相适应。为了提高信息显示和系统控制的实时性, 选择总线收发器模式在高速模式, 并通过高速光耦 6N137 把控制单元和 CAN 通信部分在电气上隔离开。

## 3 自适应控制系统软件设计

### 3.1 植物叶面稀疏度图像处理算法

图像处理在 DM642 视觉处理器上完成。软件采用 RF5 架构, 以嵌入式操作系统 DSP/BIOS 为基础, 完成线程调度、存储管理和通道封装等任务。在本系统中通过 DSP/BIOS 创建了 3 个子线程, 分别

式中:  $X$  为主轴齿轮上相邻 2 个齿之间的距离。

### 2.2 F2806 信号控制器驱动电路设计

在 F2806 信号控制器中, 需要对喷洒控制系统中 12 V 直流电动机正反转控制, 从而调控喷药压力、喷头启合和喷杆移动。直流电动机额定电流为 300 mA, 因此选用 SGS 公司生产的 L298N 直流电机控制芯片, 它内部包含 4 通道逻辑驱动电路, 驱动电压最高可达 50 V, 驱动电流最高可达 2 A。通过 TMS320F2806 上 2 对 4 个 I/O 口驱动 2 个直流电动机的正反转。控制电路见图 4。

是 2 路视频采集线程和 1 路图像处理线程, 线程间通过 SCOM 模块机制完成通信和调度<sup>[14]</sup>。

植物叶面疏密度算法的主要功能是提取图像中叶片所占的面积比, 即采用颜色差异法把作物叶子从背景图像中分割出来, 通过统计作物叶子在图像中所占的比重计算出作物的疏密程度, 从而选择不同的喷药控制压力。考虑到 DM642 定点 DSP 的处理能力和图像处理算法实时性的要求, 经比较采用超绿法 (2G-R-B) 和二值化图像的方法<sup>[15]</sup>, 能够较好较快地把叶子从背景图像中提取出来完成分割计算。在嵌入式系统 DM642 中视频流是以 BT. 656 格式进行采集的, 采集的每一帧图像都是以 YCbCr 的格式存放, 其中亮度信息 Y 和色差信号  $C_b$ 、 $C_r$  的比例为 4 : 2 : 2。为此, 需要对数据进行 YCbCr 到 RGB 的格式变换<sup>[16]</sup>。YCbCr 彩色模型与 RGB 彩色模型间的转变关系如下:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_b - 128 \\ C_r - 128 \end{bmatrix}$$

通过矩阵变换可得:

$$2G - R - B = -2.460\ 28(C_b - 128) - 2.830\ 28(C_r - 128) \quad (2)$$

生成的图像色彩信息和图像的亮度信息 Y 无关,很好地避免了光线明暗变化对图像算法的影响。

DM642 是一款 32 位定点 DSP,图像处理中为了能够快速实现算法,将计算过程中的浮点运算转换为定点运算,可以提高代码的运行效率<sup>[17]</sup>。式(2)变换后为:

$$2G - R - B = -(1\ 260(C_b - 128) + 1\ 449(C_r - 128) \gg 9)$$

彩色图像经过 2G-R-B 算法生成的灰度图像,可以在提取图像绿色信息的同时还能较好地去除光线和背景干扰,对图像进行二值化分割和形态学闭运算处理之后,计算图像所提取像素之和得到作物疏密度。植物叶面疏密度图像处理算法流程和图 5 和图 6。

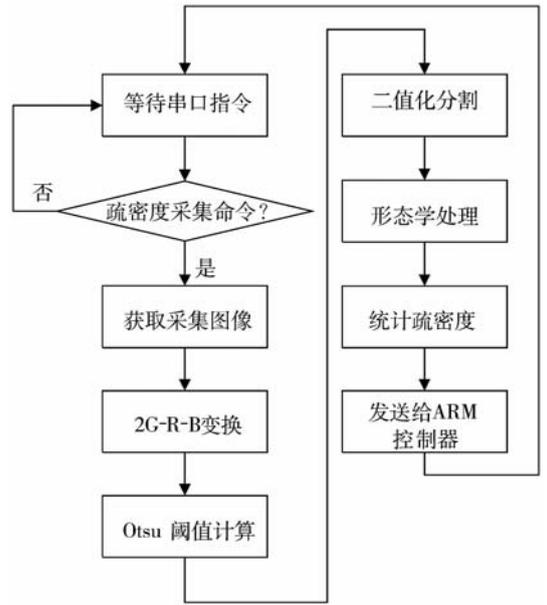


图 5 植物叶面疏密度图像处理算法流程

Fig. 5 Flow chart of plants leaf density through image processing algorithm

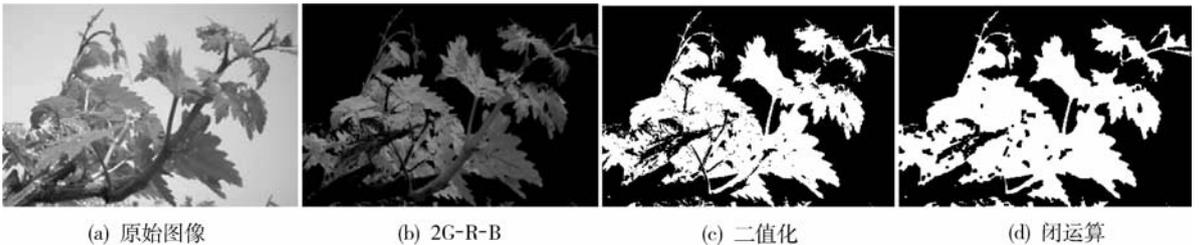


图 6 植物叶面疏密度图像处理效果

Fig. 6 Results of plants leaf density through image processing

### 3.2 CAN 通信协议设计

F2806 信号控制器和 ARM 控制器通过 CAN 总线完成通信。CAN2.0 标准规定每个数据包有 8 个字节用于传输用户数据字段,考虑到传输数据内容和实际应用的灵活性,将 8 个字节进行如下设计。

D7:命令字节。设计为 4 种命令格式分别为 GET、rGET、SET、rSET。GET 命令表示需要从 F2806 系统获得某个传感器参数;rGET 表示对 GET 命令结果的回复,即返回传感器参数值;SET 表示设置 F2806 的某个参数;rSET 表示对 SET 命令结果的回复,即表示设置命令是否成功。

D6:设备代号。系统对具体传感器设备或者驱动器进行 GET 或 SET 操作的编号。在 GET 命令中 00 H 表示获取压力传感器信号,01 H 表示获取

位移传感器信号;在 SET 命令中 00 H 表示驱动液压装置。

D5:数据类型。00 H 代表数据为字符,01 H 代表数据为 8 位有符号整数,02 H 代表数据为 8 位无符号整数,03 H 代表数据为 32 位有符号整数,04 H 代表数据为 32 位无符号整数,05 H 代表数据为 32 位的浮点数。

D4:备用。

D3~D0:数据。在 rGET 中表示 GET 需要的指定传感器参数值,SET 中表示需要设置的设备参数值,rSET 中表示设置成功与否。

### 3.3 通信过程

系统采用主动呼叫被动应答的通信方式,由 ARM 作为主动控制器向其他平台发送指令,其他

平台对指令进行解析完成响应。在 F2806 信号控制器中,根据设定的 CAN 协议,完成对需要的各个传感器模块信号进行采集或者驱动控制电路。同时为了减小芯片的功耗,各个传感器模块在没有采集命令的时候处于休眠状态(图 7)。

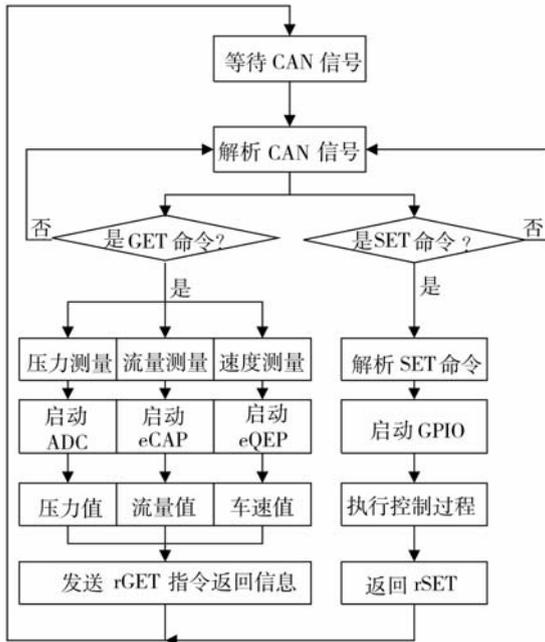


图 7 F2806 信号控制器流程

Fig. 7 Flow chart of F2806 signal controller

CAN 模块使用前需要初始化:唤醒 CAN 模块时钟并配置成工作状态,设置芯片引脚 CANTX 和 CANRX 作为 CAN 的通信引脚。在标准工作模式下,只有通过对主设备控制寄存器 CCR 位置 1,才能向配置寄存器发送配置请求。系统接收到配置请求后,自动置位状态寄存器 CCE,打开配置通道允许用户对 CAN 进行配置。对 CAN 设备寄存器进行写操作完成 CAN 总线通信参数的设定。CAN 通信波特率的设定通过对定时寄存器 CANBTC 写操作完成,波特率值由式(3)计算得出:

$$\text{波特率} = \frac{\text{CAN 模块时钟频率值}}{\text{波特率预设值} \times \text{位时间因子}} \quad (3)$$

系统完成对 CAN 总线波特率设定后,将切换到正常的通信模式。在使用 CAN 总线之前还需完成对发送和接收邮箱的配置,包括邮箱编号、属性、地址等参数。1 条 CAN 消息中包含 2 个 32 位的消息寄存器,也就是说,1 条 CAN 指令可以交换 8 个字节

的数据信息,通过对数据寄存器 CANMDL 和 CANMDH 进行数据读写,完成消息的接收和发送(图 8)。

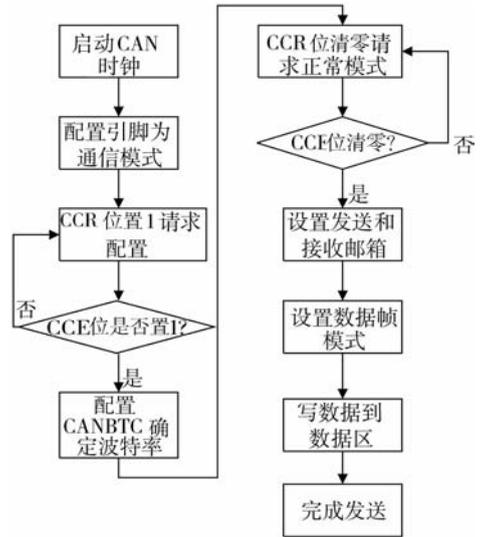


图 8 F2806 CAN 发送操作流程

Fig. 8 Flow chart of F2806 CAN send

因此,系统在工作过程中,ARM 控制器先获得目标作物疏密度和施药距离作为最主要的施药状态信息,并根据这些信息生成相应的传感器信号采集指令,通过 CAN 总线发送给 F2806 传感器平台,命令其按照指令的格式对指定编号传感器当前状态进行检测,并使用 rGET 指令将所得信号返回给 ARM 控制器。当 ARM 控制器获得了所有的施药状态信息(作物疏密度,喷药距离、压力等)和拖拉机工作信息(车速、喷杆张开距离等)后,生成两条 CAN-SET 指令发送给 F2806 信号控制器完成对 I/O 口的输出操作,输出 I/O 驱动控制电路完成电机组带动喷头组地调节移动,实现喷药距离和施药压力的最优选择。

### 4 结束语

1) 针对项目需求,设计了基于 TMS320DM642+TMS320F2806+S3C2410 的 3 核嵌入式系统硬件平台,并完成了整个硬件的调试。

2) 根据系统硬件平台的特点,设计了作物疏密度检测算法和多传感器采集算法,同时各系统平台间设计了稳定可靠的通信协议。

3) 将基于嵌入式机器视觉的图像处理技术和多传感器技术相结合引入到农业工程中是一个大胆的

尝试。系统采用静电喷雾、风送喷雾和药液循环回收等技术和自动控制技术有机结合,开发了基于嵌入式的主机触摸式控制平台,试验结果表明:嵌入式系统平台功耗低,稳定性好,各个平台分工协作,不但能保证信息处理的实时性,还能满足总体设计的要求,非常适合解决农业工程中遇到的实际问题。

### 参 考 文 献

- [1] 祁力钧,傅泽田,史岩. 化学农药使用技术与粮食安全[J]. 农业工程学报,2002,18(6):203-206
- [2] 郑易生,王世汶,陈韶君,等. 中国环境与发展评论(第1卷)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2001:345-350
- [3] 傅泽田,祁力钧,王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报,2007,38(1):189-192
- [4] 周舟,傅泽田,王秀,等. 直接注入式喷药机延时性测试系统的研究[J]. 中国农业大学学报,2009,14(6):91-96
- [5] 王万章,洪添胜,李捷,等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报,2004,20(6):98-101
- [6] 林惠强,刘财兴,洪天胜,等. 基于 GA 的果树仿形喷雾神经网络混合模型研究[J]. 农业工程学报,2007,23(10):167-171
- [7] Tian Lei, Reid J R, Hummel J W. Development of precision sprayer for site-specific weed management [J]. Transaction of ASAE,1999,42(4):893-900
- [8] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报,2004,20(1):13-15
- [9] 王贵恩,洪添胜,李捷,等. 果树施药仿形喷雾的位置控制系统[J]. 农业工程学报,2004,20(3):81-84
- [10] 邱白晶,李佐鹏,吴昊,等. 变量喷雾装置响应特性的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):148-152
- [11] 陈勇,郑加强. 精确施药可变量喷雾控制系统的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(5):69-71
- [12] 何雄奎,严苛荣,储金宇,等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):78-80
- [13] 苏奎峰,吕强,邓志东,等. TMS320x28xxx 原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2009:3-6
- [14] 候茗耀,王库,党帅. 黄瓜采摘机器人嵌入式系统的设计与实现[J]. 农机化研究,2009,31(8):57-60
- [15] 李正明,王森,孙俊. 图像分割在成熟茄子目标识别中的应用[J]. 农业机械学报,2009,40:105-108
- [16] 陈兵旗,孙明. 实用数字图像处理分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,清华大学出版社,2008:156-158
- [17] 田黎育,何佩琨,朱梦宇. TMS320C6000 系列 DSP 编程工具与指南[M]. 北京:清华大学出版社,2007