

基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验

谢 斌, 张 超, 毛恩荣, 陈燕呢

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 由于传统的内燃机拖拉机污染严重, 噪音大, 不适合工作在温室大棚等空间封闭狭窄的场合, 开发小型电动拖拉机的需求变得日益迫切。设计了一种小型电动拖拉机用的永磁直流无刷电动机控制器, 该控制器以 myRIO 为控制核心, 智能化程度高, 满足电动拖拉机运输、作业时多种动力工况要求。控制器外围电路包括 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 金属-氧化物半导体场效应晶体管) 功率放大、栅极驱动、电流保护、低电压保护和温度保护等电路。运用 LabVIEW/FPGA 图形化编程环境, 编写了 ARM 实时处理器控制流程和 FPGA (field-programmable gate array, 现场可编程门阵列) I/O 驱动程序, 软件由启动、驱动、欠压保护、过流保护、过热保护等子 VI 程序组成。通过样机试验表明, 电动拖拉机工作正常, 空载时启动电流为 120 A, 带载时启动电流为 164 A, 驱动时序符合直流无刷电动机要求。该设计方案解决了驱动控制器开发困难的问题, 为电动拖拉机智能化发展提供了参考。

关键词: 农业机械; 拖拉机; 控制系统; 驱动控制器; 驱动电路; 保护电路

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.009

中图分类号: S219.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0055-08

谢 斌, 张 超, 毛恩荣, 陈燕呢. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 55—62. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.009 http://www.tcsae.org

Xie Bin, Zhang Chao, Mao Enrong, Chen Yanni. Motor controller design and indoor experiment for electric tractor based on myRIO[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 55—62. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.009 http://www.tcsae.org

0 引 言

与传统的内燃机拖拉机相比, 近期发展起来的设施园艺电动拖拉机更加适合作业在空间封闭狭窄的温室大棚, 小型拖拉机既能进行旋耕、犁地和短途运输, 又能与多种机具配套使用, 完成多样的园艺工作^[1-2], 如加拿大 Electric Tractor 公司的 Electric Ox 系列电动拖拉机除实现割草功能外可直接挂接铧式犁、扫雪机等^[3]; 日本井关农机株式会社推出的适合园艺作业电动拖拉机最大功率约 9.5 kW, 可进行旋耕和除草作业^[4]。电动拖拉机的能量使用与传统车辆不同, 要求驱动系统更加精确、效率更高^[5-7], 故研究电动拖拉机驱动控制器有重要意义^[8-10]。

随着拖拉机智能化水平的不断提高, 对电控单元的开发提出了更严苛的要求。传统的控制器以微处理器为核心, 其开发周期大, 代码移植性困难, 开放性不够, 很难提高控制的精准性^[11-14]。目前国际已经形成了较为规范的控制器开发模式, 其中快速原型的开发技术被广泛采用, 如德国 dSPACE 公司开发的实时仿真系统^[15]; 德国 ETAS 公司提供了功能分析、系统建模、快速原型、目标代码生成以及 ECU 测试一整套工具; 美国 MotoTron 公司生产的 MotoHawk 快速开发平台^[16]; 美国 NI 公司生产的 CompactRIO 和 myRIO 可重新配置的嵌入式测控系统^[17]。myRIO 具有运行实时操作系统的完全可编程双核

ARM Cortex-A9 处理器以及可自定义的 FPGA (field-programmable gate array, 现场可编程门阵列), 不仅能达到高控制精度的要求, 而且方便扩展和升级。

本文以 myRIO 为控制核心, 设计电动拖拉机驱动外围硬件电路, 在 ARM 实时处理器上编写主流程框图, 在 FPGA 终端上部署时序驱动程序, 以期电动拖拉机智能化控制提供参考。

1 总体方案

1.1 电动拖拉机总体机械结构

课题组所设计的拖拉机为纯电动拖拉机, 采用后轮驱动, 其总体结构如图 1 所示。所设计的电动拖拉机主要用于设施园艺作业, 要求总体尺寸小、结构紧凑、轴距较小、转弯半径小、轮距范围合理等。

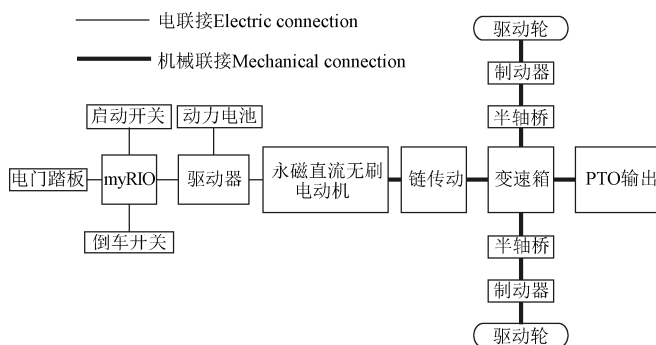


图 1 电动拖拉机总体结构框图

Fig.1 Overall structure of electric tractor

收稿日期: 2015-07-01 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2014BAD08B04)

作者简介: 谢 斌, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业装备 (拖拉机) 智能化研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: xiebincau@126.com

1.2 驱动控制系统

电动机控制器以 myRIO 为控制核心, 它具有 10 个模拟输入通道, 6 个模拟输出通道, 40 路可配置的数字 I/O 通道, 配合 LabVIEW 实现对 myRIO 的图形化编程和各种工具包可快速实现工业控制, 信号处理与分析等功能^[18]。图 2 为电动机驱动控制系统图。

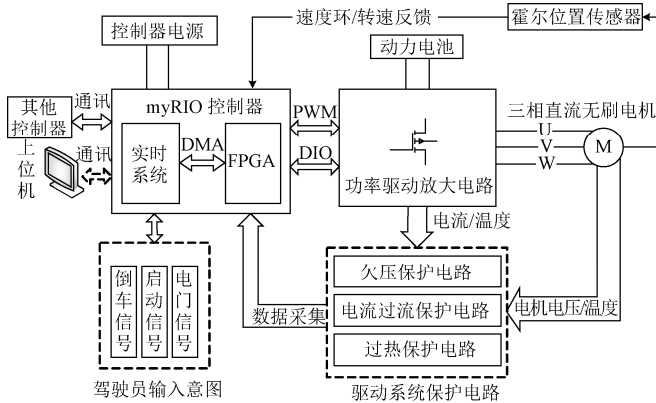


图 2 电动机驱动控制系统图

Fig.2 Scheme of motor drive control system

驱动控制器的工作原理是通过接收电动机转子霍尔位置传感器的信号, 准确地识别电动机转子位置, 结合相应的控制算法从而实现对电动机的启停控制、正反转

控制和转速调节。另外, 结合系统保护电路对整个驱动控制系统进行保护。

同时, myRIO 具有无线功能, 可在上位机上对电动机和控制器进行动态监控, 解决了传统的控制器无法对控制系统进行实时监控和故障检测的技术问题^[20]。

2 控制系统外围硬件设计

设计驱动控制器硬件时, 采用功能模块化设计, 主要包括功率驱动电路、系统保护电路和电源转换电路。

2.1 功率驱动电路

功率驱动电路是利用功率放大器件的放大作用将信号放大^[21-23], 以输出足够的功率为目的, 驱动电动机工作。功率驱动电路主要由功率放大器件、栅极驱动管和自举元器件等组成。

为了足够承受电动机的启动和堵转电流, 采用 3 片驱动集成电路芯片驱动 3 个桥臂, 其中驱动芯片采用美国 IR 公司生产的高压浮动驱动集成模块 IR2110。一个桥臂分为上、下桥臂, 每一相的上、下桥臂均由 6 个 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 金属-氧化物半导体场效应晶体管) 并联驱动, 不仅能承受足够大的启动和堵转电流, 还能有效地降低开关功耗, 增大散热面积。单元功率驱动电路原理图如图 3 所示。

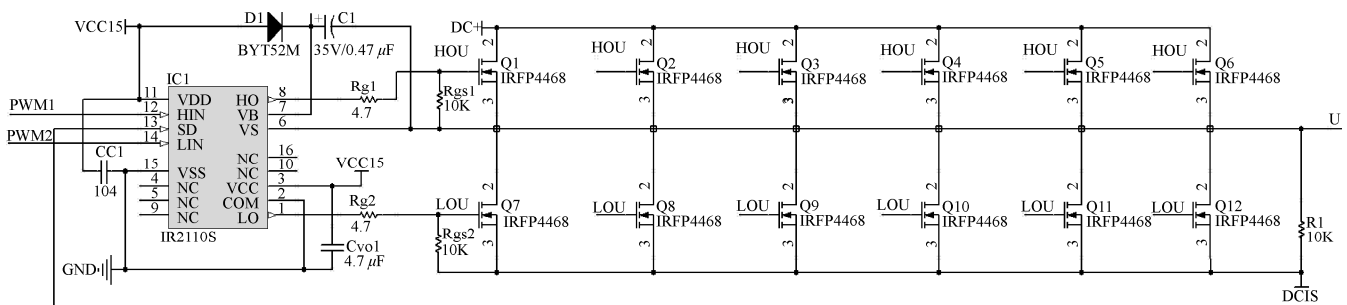


图 3 单元功率驱动电路原理图

Fig.3 Scheme of unit power driver circuit

2.1.1 功率放大器件选取

对于直流无刷电动机, 常用的功率放大器件有双极型晶体管、MOSFET 和 IGBT。根据直流无刷电动机的各项参数以及功率放大器件的控制难度, 选用 MOSFET 作为驱动电路的功率放大器件。

电动拖拉机选取的电动机是常州永沛机电技术有限公司生产的 YP112 型直流永磁无刷电动机, 其额定工作电压为 72 V, 额定功率为 7.5 kW, 额定电流为 115 A, 额定转速为 1 500 r/min。电动机在最大功率工作点的电流为 237.714 A, 在最大转矩工作点的电流为 235.779 A。综合考虑, 选择美国 IR 公司生产的型号为 IRFP4468 的 MOSFET, 其额定漏源极电压值 $V_{DS}=100$ V, 额定漏极电流 $I_D=290$ A, 漏源极通态电阻 R_{DS-ON} 典型值为 2.0 mΩ, 最大值为 2.6 mΩ, 导通损耗较小, 各项参数均符合的实际需求。

2.1.2 栅极驱动电路

由于 myRIO 的 I/O 资源不具备驱动栅极所需的电压和电流容量, 因此, 在控制器的输出端与栅极输入端之间需要加入电平转换电路, 使控制信号在 MOSFET 导通瞬间具有 5~15 V 的输出电压, 同时具有大电流驱动能力^[24-25]。本文采用成本较低的举式悬浮电压驱动方法。其中自举元器件的选择和设计是关键, 如图 3 所示, 自举元器件包含自举电容 C1 和自举二极管 D1。

当 V_s 被低端器件拉到地电位时, 15 V 的 V_{CC} 电源通过自举二极管 D1 给自举电容 C1 充电, 从而相当于给 V_{bs} (驱动电路 V_b 和 V_s 管脚之间的电压差) 提供电源。由此可见, 自举电容 C1 两端电压是电源 V_{CC} 提供的, 其最小自举电容值可根据以下公式来计算:

$$C_{\min} = \frac{2[2Q_g + I_{qbs(\max)} / f + Q_{ls} + I_{chs(peak)} / f]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{\min}}$$

式中: C_{\min} 为自举电容 C1 的最小自举电容值; Q_g 为高端 MOSFET 栅极电荷, nC, 对于 IRFP4568, 其典型值为 151 nC, 最大值为 227 nC; Q_{ls} 为每个周期内电平转换电路中的电荷要求, C, IR2110 的高端电源偏移电压可达 500 V, 故大小为 5 nC; $I_{qbs(max)}$ 为高端驱动电路静态电流, μA 。对于 IR2110 大小为 230 μA ; $I_{cbs(leak)}$ 为自举电容漏电流, A; f 为 MOSFET 工作频率, Hz; V_{CC} 为 IR2110 供电电压, 15 V; V_f 为自举二极管正向压降, V。选用 BYT52M 时为 1.3 V; V_{LS} 为低端 MOSFET 或者高端负载压降, V; V_{\min} 为 V_b 和 V_s 之间的最小压差, V。

取 $V_f + V_{LS} + V_{\min} = 1.2$ V, 且取 $Q_g = 151$ nC, $f = 400$ kHz (实际工作频率约为 100 kHz), 最终可计算得 $C_{\min} = 0.045$ μF , 用此最小值乘以系数 10 即为较合适的自举电容值。自举电容耐压值一般取值大于驱动芯片供电电压的两倍, IR2110 供电电压为 15 V, 所以综合考虑电容和电压值, 自举电容选用 35 V/0.47 μF 的钽电容。

在高端 MOSFET 导通时, 自举二极管必须能够承受线路中的高压: 1) $V_{PRM} >$ 高端母线电压 = 72 V; 2) $I_F > Q_g f = 151$ nC \times 100 kHz = 15.1 mA; 3) $T_{rr} \leq 500$ ns。

选取二极管型号为美国 VISHAY 生产的 BYT52M, 其最大反向峰值电压 $V_{PRM} = 1000$ V, 额定电流值为 $I_F = 1$ A, 最大反向恢复时间 $T_{rr} = 200$ ns, 各项参数均符合条件。

为了得到可靠的栅极波形并且减少电磁干扰, 应在 MOSFET 的栅极和驱动 IC 的输出之间串联的一个栅极电阻。所选的 MOSFET 抵抗闩锁的能力较强^[26], 为了降低发热和开关损耗, 取栅极电阻阻值为 4.7 Ω 。

2.2 系统保护电路

控制器保护电路包含电动机的过流保护电路、过压与限压保护电路和过热保护电路。

2.2.1 欠压保护电路设计

图 4a 为欠压保护电路。如图 4a 所示, 方案中欠压保护电路选用 Texas Instruments 公司生产的 TLC2272C 为主要器件。运算放大器的输入端用 R11 和 R12 电阻对动力电池电压进行分压, R12 电阻的分压值输入 TLC2272C, TLC2272C 再将输出电压反馈至控制器的 A/D 采样通道。R12 与 C4 构成低通滤波器, 用来滤除高频干扰。另外, TLC2272C 的供电电压为 $V_{DD+} = 5$ V, 且输入端电压最大值不能超过 $V_{DD+} - 1.5 = 3.5$ V, 在 R12 两端并联 3.3 V 稳压管 ZD1, 防止输入端电压过高^[27]。

2.2.2 过流保护电路设计

过流保护电路原理如图 4b 所示, 主要由 TLC2272C 和 ACS758 组成。由于 TLC2272C 是单芯片的双运算放大器, 可提供两组输入和输出, 可同时输入电源的电压信号和电流信号, 通过运放集成电路将较小的采样电流进行放大, 放大后的电流检测更方便, 且不容易被其他信号干扰, 检测结果存在的误差小。在电流的输入端和输出端引入滤波电容, 对电流信号进一步滤波^[28]。

霍尔电流传感器选用美国 Allegro MicroSystems 公司生产的 ACS758, 其内部导体阻值只有 100 $\mu\Omega$, 达到超低功率损耗。

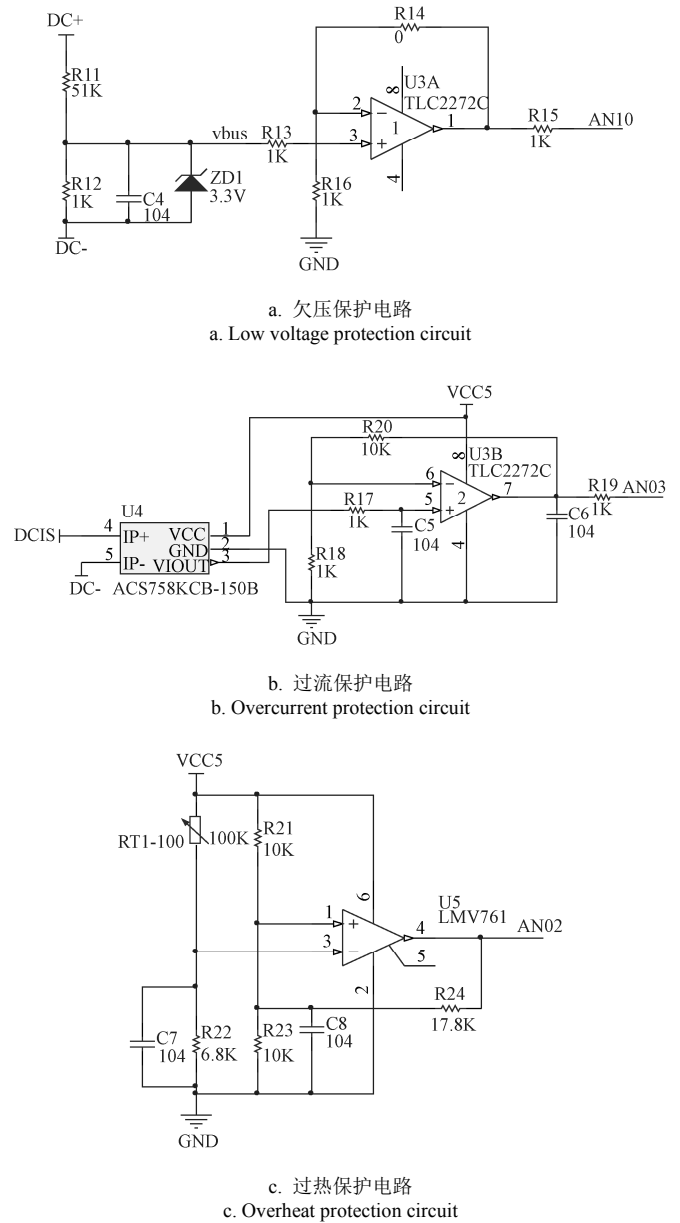


图 4 系统保护电路
Fig.4 System protection circuit

2.2.3 过热保护电路设计

在长时间工作在负载的情况下, 无论是电动机本身还是功率驱动器件, 都会产生大量的热, 为了防止温度过高烧坏电动机或电路必须设计温度保护电路。如图 4c 所示, 温度保护电路主要部件是负温度系数热敏电阻和比较器, 负温度系数热敏电阻选用日本 Murata 公司生产的 NTC 0603, 比较器选用美国 National Semiconductor 公司生产的 LMV761。

2.3 电源供给电路

电源供给方案如图 5 所示, 驱动控制器所需要的电源电压分为 3 路, 第 1 路是加在 MOSFET 漏-源极, 由 72 V 动力电池组供电。第 2 路是功率驱动芯片 IR2110 所需要的 15 V 电压。第 3 路是驱动控制器以及其他元件所需要的 12 V 电压。

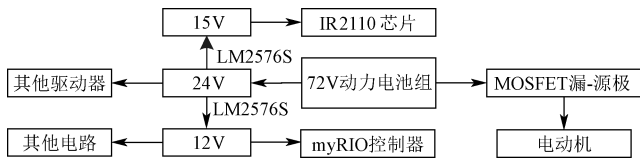


图 5 电源供给方案图
Fig.5 Scheme of power supply

3 控制软件设计

软件设计分为基于 FPGA 内核的 I/O 时序编程和基于

ARM 内核的控制流程两部分。LabVIEW 可清晰地显示并行机制和数据流，编程环境适用于电动机控制系统软件设计。整个软件分为三部分，如图 6 所示，主程序运行在实时处理器中，程序框图从左至右执行以下 3 个帧平铺式顺序结构，第 1 帧是控制系统初始化，使用此帧来初始化 FPGA bit 文件。第 2 帧是识别驾驶员意图，采集电流、电压、温度，完成故障监测，与主控制器和上位机通讯等任务，整个过程在 While 循环重复，直到点击停止代码或发生错误。第 3 帧是执行清除的用户界面元素和变量，并在应用程序退出之前重置硬件。

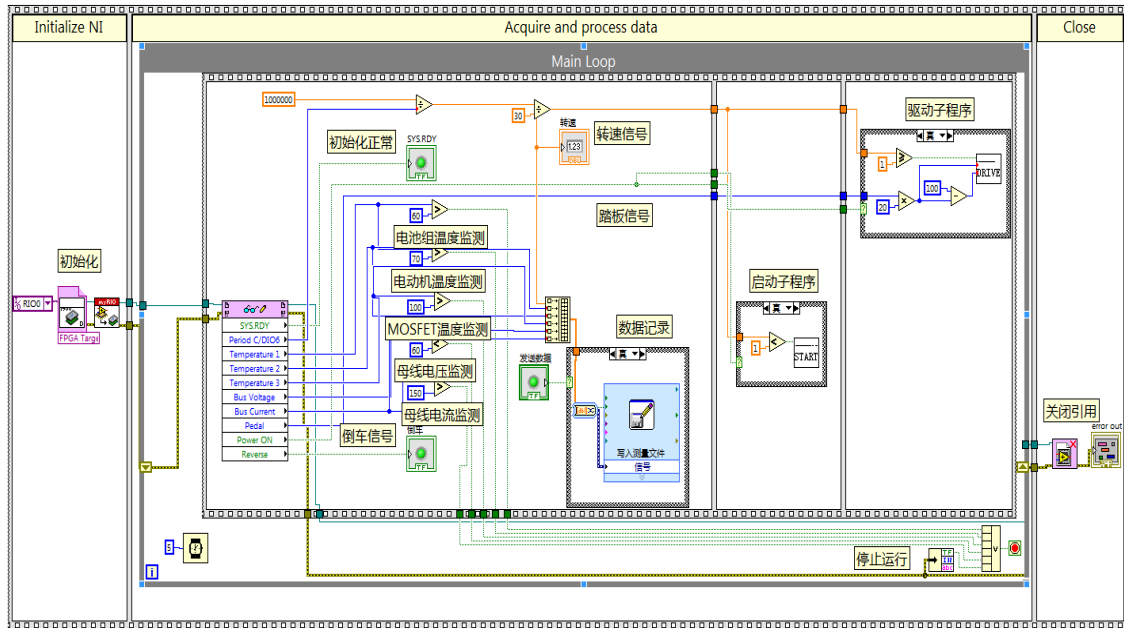


图 6 myRIO 主程序
Fig.6 Main program of myRIO

3.1 FPGA Bit 文件编程

开发完特定的 NI FPGA 装置专属的 VI 后，FPGA VI 经过 Vivado 编译器，生成一个 Bitfile，下载至 FPGA 时就会对芯片进行预定义配置，在实时系统端直接调用已经编译完整的 Bitfile，根据 VI 指定的方式开始运行。如果 FPGA 经过修改，就必须重新编译，然后覆盖之前储存在硬件中的 Bitfile，因此 FPGA 能依据特殊的应用需求，载入不同的硬件特性。

myRIO 的 FPGA 搭建在可重配置 I/O 架构上，配备了强大的浮点处理器、可重配置 FPGA 和模块化 I/O，应用时，控制循环不必与其他任务共享硬件资源，而控制循环可利用 FPGA 时钟实现精确定时，FPGA 时钟抖动在 40 MHz FPGA 时钟速率情况下仅为 2.5×10^{-10} s，可提供硬件定时的速度和稳定性^[29]，进行快速的决策以及并行任务的同时执行，主要负责电动机时序驱动。

3.2 基于 ARM 的控制流程框图

ARM 实时处理器主要负责控制算法和故障监控的实现。这样不仅能够降低实时处理器负荷，而且有效地将控制和驱动这 2 种执行速率不同的算法隔离来，提高控制器的精准性和可靠性。控制流程如图 7 所示。

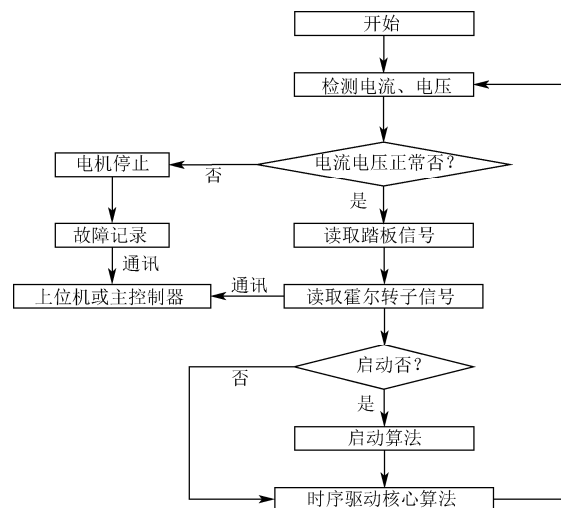


图 7 基于 ARM 的控制流程框图
Fig.7 Control diagram based on ARM

3.3 启动程序框图

在拖拉机工作过程中，带载启动是一种常见的工况，因此在设计电动拖拉机用电动机控制器时，需要特别考

考虑电动机的启动性能。

启动程序如图 8 所示，在电动机静止时，通过霍尔位置传感器得到转子磁极的初始位置，假设检测到霍尔传感器的位置信息为 001，之后位置信息依次是 101、100、110、010、011、001，按照驱动时序控制功率管顺序导通，当第 3 次检测到位置信息为 101 前，期间忽略驾驶员

员脚踏板的输入信号，经过多次试验，在脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号的占空比设置为 60% 的情况下，在保证电动机在获得较好的启动转矩的同时，也避免了过大的启动电流^[30]。检测到电动机正常运转后，检测驾驶员脚踏板的输入信号，映射到 PWM 信号的占空比。

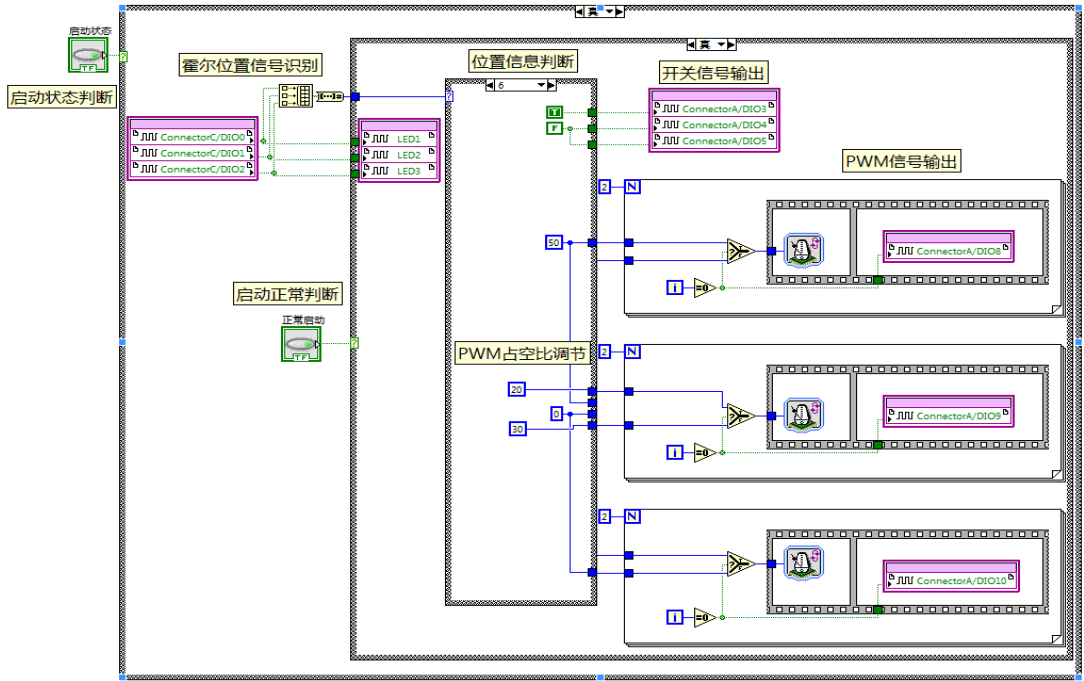


图 8 启动程序
Fig.8 Starting program

3.4 I/O 时序驱动程序

对于永磁直流无刷电动机逆变电路来说，PWM 控制又分两种控制方式：单桥臂控制和双桥臂控制。双桥臂控制方式的 PWM 信号可同时控制上下 2 个桥臂的开关，这种方式控制灵敏度高，对快速性要求高的控制系统较为适用，同时也产生更高的开关损耗。对于电流和发热较高的电路，采用双桥臂 PWM 控制方式。

驱动程序运行在 FPGA 中，PWM1、PWM2 和 PWM3 输出的 PWM 信号输出给 3 个 IR2110 功率驱动芯片的上桥臂，DO1、DO2 和 DO3 输出的数字信号给 3 个下桥臂。

DI1、DI2 和 DI3 读取霍尔转子位置信号，按对应表输出三相 PWM 信号和三相数字信号，控制功率管顺序导通，采集转速信号等任务。电动机正转时，霍尔信号和导通相对应关系如表 1 所示。

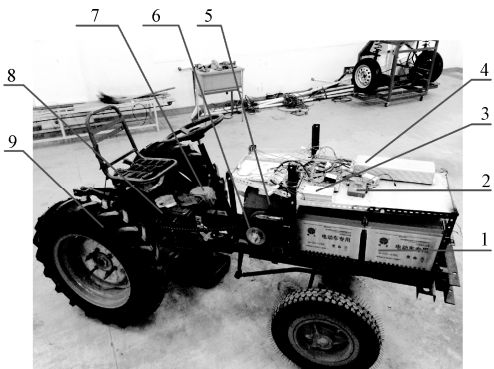
表 1 电动机霍尔信号和导通相对应表

霍尔位置信号	桥臂导通值	导通相
Hall position signal	Arm conduction values	Conduction phase
101	100100	U→V
100	100001	U→W
110	001001	V→W
010	011000	V→U
011	010010	W→U
001	000110	W→V

注：U、V、W 分别是永磁直流无刷电动机的绕组 U、V、W 相。
Note: U, V, W mean U, V, W phase of permanent magnet brushless DC motor windings.

4 室内试验

电动拖拉机试验样机如图 9 所示，以电动拖拉机样机为试验平台，验证电动机控制系统对电动拖拉机的控制效果。电动拖拉机主要参数如表 2 所示。



1.动力电池 2.myRIO 控制器 3.直流/直流转换器 4.功率驱动器 5.电动机、减速箱 6.链条 7.PTO 输出轴 8.变速箱 9.驱动轮
1.Power battery 2.myRIO controller 3.DC/DC convertor 4.Power drivers 5.Motor, reduction box 6.Chain 7.PTO output shaft 8.Gearbox 9.Driving wheel

图 9 电动拖拉机样机
Fig.9 Electric tractor prototype

4.1 三相电压特性试验

样机空载时，踏板输入 3 V 恒压信号。进入稳定工作状态后，驱动控制器内部的 MOSFET 按照一定的时序

进行开/关状态切换, 电动机的输入端 U、V、W 三相电压也会相应地变化。

对于方波控制的直流无刷电动机, 调速形式采用 PWM 占空比信号, 因此电动机理论相电压变化曲线为方波波形。

表 2 电动拖拉机主要参数

Table 2 Main parameters of electric tractor

参数 Parameter	数值 Values
额定功率 Rated power/kW	7.5
轮胎规格 Tyre type	前轮 4.00~12, 后轮 7.50~16
前轮轮距 Front wheel tread/mm	970
后轮轮距 Rear wheel tread/mm	980
轴距 Axle base/mm	1 475
外形尺寸 Overall dimensions/mm	2 650×1 200×1 280
最小使用质量 Minimum use quality/kg	1 120
总减速比 Total reduction gear ratio	42.6:1

如图 10 所示, 相电压的相位与波形变化与理论方波变化相近, 在换相瞬间, 某一相电压总是有一个反向变化趋势。这是由于反电动势的影响。 t_1 时刻是 VW 相到 UW 相的换相时刻, 在这个换相过程中, V 相电流突然减小, 但不会立刻消失, 会续流一段时间, 直到自身能量耗尽, 这是由于绕组线圈自身具有电感, 这个电感在续流期间会产生电动势, 而且电动势方向与电流变化方向相反, 并且叠加在三相绕组中点之上, 在 $t_1 \sim t_2$ 区间, 当 V 相电压降低时会出现一个反向尖峰。

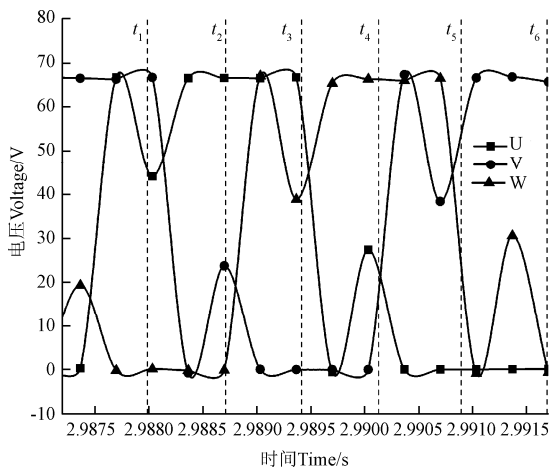


图 10 U、V、W 三相电压波形
Fig.10 Velocity curve of three-phase

4.2 电流特性试验

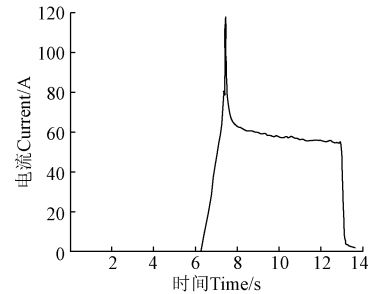
4.2.1 空载时电流特性试验

对于绕组采用 Y 联接的永磁直流无刷电动机, 母线电流有效值与相电流有效值相等, 因此母线电流能够反应相电流的变化趋势。

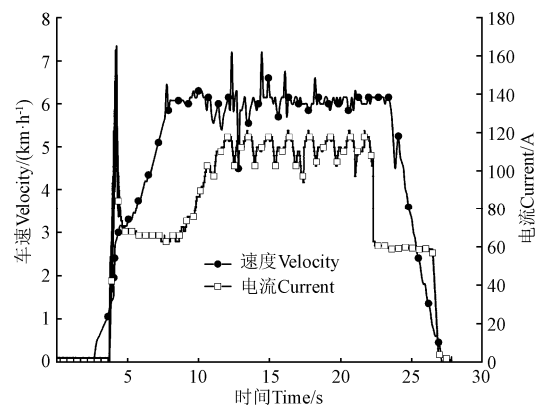
试验样机空载时, 母线电流曲线如图 11a 所示。在 6.2 s 时启动电动机, 并保持踏板输入端输入 3 V 恒压信号。试验样机所用电动机的额定电流为 115 A, 通过启动算法进行限流处理, 启动过程最大电流为 120 A 左右, 有限地降低了启动电流。电压由 0 逐渐升高到额定电压,

启动的全过程都不存在冲击转矩, 在电动机整个运行过程中, 震动小, 噪音小, 说明驱动程序有较好的效果。

直流无刷电动机理论空载电流通常为额定电流的 10%~55%, 电动机稳定运转电流为 60 A 左右, 占额定电流的 52%, 符合直流无刷电动机启动特性。



a. 空载下母线电流曲线
a. Curve of Bus current on no load condition



b. 行驶速度和母线电流曲线
b. Curve of velocity current

图 11 电流特性曲线

Fig.11 Curve of bus current characteristic

4.2.2 带载时电流特性试验

拖拉机机组在田间作业时, 由于地面起伏, 土壤性质不均匀, 地表植被状态不均匀, 拖拉机行走装置工作的不均匀性以及耕作的工艺状态和机组行驶速度的变化等一系列原因, 机组的阻力将出现不稳定的特征。在试验环境下, 采用设置障碍物产生激励的方式来模拟负荷特性。在试验路面放置有一系列大小不一的障碍物, 距离随机变化。

拖拉机作业速度以 5~10 km/h 快速旱地耕耘作业最具代表性。在此工况下, 测试电动拖拉机驱动系统在受到外界激励干扰时电动机的动态性能。电动拖拉机行驶速度和驱动器的母线电流如图 11b 所示, 启动过程中, 最大电流为 164 A, 7 s 之前电流的变化趋势和空载时电流趋势相同。9 s 之后, 电流逐渐变大, 这是因为电动拖拉机受到外界负载干扰。

5 结 论

1) 提出了基于 myRIO 为控制核心和外围电路相结合的电动拖拉机直流无刷电动机控制器设计方案。

2) 提出了在 ARM 实时处理器编写控制流程和在

FPGA 上编写 I/O 驱动程序的多线程软件设计思路, 使用 FPGA 作为协处理器, 降低了 ARM 实时处理器负荷, 提高了控制器的精准性和可靠性, 缩短了开发周期。

3) 样机试验表明, 电动机工作正常, 空载时启动电流为 120 A, 带载时启动电流为 164 A, 驱动时序符合永磁直流无刷电动机要求。

4) myRIO 控制器具有 CAN 总线及其他通讯功能, 并且协议可编程, 实现电动拖拉机智能化控制的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 王晓梅, 刘红艳, 周亚荣. 设施农业机械化现状与发展对策[J]. 农业与技术, 2009, 29(6): 9—10.
- [2] 陈开权. 中国设施农业机械装备的现状与发展前景[J]. 农业与技术, 2014, 34(12): 252—252.
- [3] 赵刻水, 杨为民. 农业拖拉机技术发展观察[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 42—48.
Zhao Yanshui, Yang Weimin. Technological development of agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 42—48. (in Chinese with English abstract)
- [4] 新华社. 日本开发小型电动拖拉机[J]. 种业导报, 2012, (7): 39.
- [5] 管春松, 胡松, 陈永生, 等. 温室用小型电动拖拉机研[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 67—69.
- [6] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 43—52.
Guo Shirong, Sun Jin, Shu Sheng, et al. General situation, charactics and trend of protected horticulture in foreigners[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(5): 43—52. (in Chinese with English abstract)
- [7] 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机的排放特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 42—48.
Fu Mingliang, Ding Yan, Yin Hang, et al. Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 42—48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张铁民, 闫国琦, 温利利, 等. 我国电力农业机械发展现状与趋势[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 23—240.
Zhang Tiemin, Yan Guoqi, Wen Lili, et al. Current situation and development of electric agricultural machinery in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 236—239. (in Chinese with English abstract)
- [9] 高辉松, 朱思洪, 吕宝占. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(6): 4—7.
Gao Huisong, Zhu Sihong, Lü Baozhan. Development of electric tractor and key techniques[J]. Tractor and Farm Transporter, 2007, 34(6): 4—7. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王元杰, 刘永成, 杨福增, 等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23—28.
Wang Yuanjie, Liu Yongcheng, Yang Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 23—29. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周托. 无位置传感器无刷直流电机控制系统的设计与研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [12] 倪飞. 基于 FPGA 的无刷直流电机控制系统实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Ni Fei. The Control System Implementation of Brushless DC Motor Base on FPGA[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wu Qingpin, Tian Wenchao. Design of permanent magnet brushless DC motor control system based on dsPIC30F4012[R]. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering, 2012(29): 4223—4227.
- [14] Ueka Y, Yamashita J, Sato K, et al. Study on the development of the electric tractor: specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(4): 160—164.
- [15] Bharathi G, Reddy P. Design and development of an intelligent dynamic path finding/survillence automated guided vehicle using ni myrio[J]. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015, 4(5): 86—89.
- [16] Hussain K M, Zepherin R A R, Kumar M S, et al. Control and Interfacing of motors with NI-LabVIEW using NI-MYRIO[J]. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2015, 1(8): 146—150.
- [17] 马培蓓, 吴进华, 纪军, 等. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 667—670.
Ma Peibei, Wu Jinhua, Ji Jun, Xu Xinlin, et al. Software environment and application of dSPACE real-time simulation platform[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 667—670. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张虎, 王存磊, 张建龙, 等. 基于 MotoTron 平台的汽油发动机控制器开发[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 845—849.
Zhang Hu, Wang Cunlei, Zhang Jianlong, et al. Development of a gasoline engine controller based on MotoTron[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(6): 845—849. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zahran M, Atia Y, Alhsseen A. Wired and wireless remote control of PV system[J]. Wseas Transactions on Systems and Control, 2010, 5(2): 656—666.
- [20] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于无刷直流电机的风力机转矩模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 111—115.
Guo Tianyong, Zhao Gengshen, Zhao Yao, et al. Torque simulation of wind turbine based on brushless DC motor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 111—116. (in Chinese with English abstract)
- [21] 夏长亮, 张茂华, 王迎发. 永磁无刷直流电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 104—109.
Xia Changliang, Zhang Maohua, Wang Yingfa. The direct torque control for permanent magnet brushless DC motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 104—109. (in Chinese with English abstract)
- [22] 汤平华, 杜坤梅, 李铁才. 用于方波无刷电动机驱动的新型三相逆变器[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 155—159.
Tang Pinghua, Du Kunmei, Li Tiecai. New three-phase inverter for BLDCM drive[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(2): 155—159. (in Chinese with English abstract)

- [23] Sathyan A, Milivojevic N, Lee Y J, et al. An FPGA-based novel digital PWM control scheme for BLDC motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3040—3049.
- [24] Shao Jianwen. Direct back EMF detection method for sensorless brushless DC(BLDC) motor drives[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [25] Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives[M]. CRC press, 2012: 374—423.
- [26] Kuekes P J, Stewart D R, Williams R S. The crossbar latch: Logic value storage, restoration, and inversion in crossbar circuits[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(3): 1—5.
- [27] Chokhawala R S, Catt J, Kiraly L. A discussion on IGBT short-circuit behavior and fault protection schemes[J]. Industry Applications, 1995, 31(2): 256—263.
- [28] Blaabjerg F, Pedersen J K. An optimum drive and clamp circuit design with controlled switching for a snubberless PWM-VSI-IGBT inverter leg[C]//Power Electronics Specialists Conference. PESC '92 Record, 23rd Annual IEEE 1992: 289—297.
- [29] Castro R P D, Oliveira H S, Soares J R, et al. A new FPGA based control system for electrical propulsion with electronic differential[J]. Power Electronics and Applications, 2007, 5(2): 1—10.
- [30] Lee K W, Kim D K, Kim B T, et al. A novel starting method of the surface permanent-magnet BLDC motors without position sensor for reciprocating compressor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(1): 85—91.

Motor controller design and indoor experiment for electric tractor based on myRIO

Xie Bin, Zhang Chao, Mao Enrong, Chen Yanni

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is well known that off-road vehicles contribute a huge amount of pollution to air, and studies have shown that renewable electric vehicles (EVs) decrease petroleum consumption and consequently reduce criteria emissions under nearly all circumstances. Diesel tractors exhaust CO, NO_x PM₁₀ and pollutants that are harmful to human body. As a consequence, diesel tractors are not allowed to work in some limited and closed environments such as greenhouse. It is imperative that a kind of small electric tractor with less noise, zero emission and more comfort should be developed with the least delay. A brushless direct current (BLDC) motor drive is characterized by higher efficiency and lower maintenance. Therefore, it is necessary to have a low-cost but effective BLDC motor controller. This research develops a new low-cost method for the design of BLDC motor controller and designs a BLDC motor controller for a small electric tractor. The BLDC motor controller includes cybernetics core and controller peripheral circuits, and modular design idea is proposed. The advanced intelligent controller uses the myRIO as a cybernetics core, and the myRIO uses the latest Zynq technology from Xilinx, which features an FPGA integrated with a processor running a real-time OS that can meet the requirements of intelligent control for electric tractor. The myRIO is coupled with an onboard accelerometer, programmable LEDs (light emitting diodes) and analog and digital I/O, and USB port helps modular design ideas come to life. The controller peripheral circuits include power amplifier MOSFET gate drive, current protection, low voltage protection and temperature protection, which meet the tractor's transportation and working demands under different power conditions. Programs are developed in real-time processor ARM and I/O driver software in FPGA to the control flow in graphical programming environment. Main control and protection algorithms run in real-time OS; at the same time the driving timing sequence algorithms run in FPGA, and the algorithms with 2 different execution rates are isolating. In this way, it not only reduces the real-time processor's load, but also improves the accuracy and reliability of the controller. The software includes starter, driving, low-voltage protection, overcurrent protection, thermal protection and other sub-VI programs. The electric tractor prototype tests show that BLDC motor controller works properly with maximum starting current 120 A under zero load condition and 164 A under loaded condition with overcurrent detection. Under starting condition, after performing several experiments, when duty cycle of the PWM signal is set as 60% and the frequency is set as 10 kHz in initial stage, the better motor starting torque can be obtained, and amplitude of starting current is also limited. The sequence of motor drive voltages meets the requirement of the BLDC motor excellently with the help of hall position sensors. It is concluded that the modular design idea of developing a BLDC motor controller that combines cybernetics core and controller peripheral circuits is practicable. In the whole testing process, the disadvantage of the impact force does not exist, and less vibration and lower noise make the tractor driver more comfortable when it is working. The design proposal combining myRIO as control core and peripheral circuit solves the difficult problems of developing drive controller, it promotes the development of the intelligent electric tractor.

Key words: agriculture machinery; tractors; control systems; BLDCM controller; drive circuit; protective circuit