

基于 ARM 的数字电源控制器设计

Design of Digital Power Controller based on ARM

杨成 贺明智

(北京交通大学, 北京海淀 100044)

[摘要] 随着数字控制理论的日益成熟及发展, 基于微处理器的全数字控制系统因其高可靠性、高灵活性、易维护性等特点, 逐渐应用于开关电源控制系统。相比 TI 公司的 DSP 系列, ST 公司基于 ARM 的 STM32 具有封装小、成本低、性能强等特点, 被广泛应用于嵌入式系统。根据数字电源控制原理, 本文设计了基于 STM32F334 芯片的数字电源控制器, 在满足控制性能的同时, 相对 DSP 控制器降低了数字电源控制系统的成本。配合 STM32CubeMx 配置软件和 HAL 库, 基于 STM32 的数字电源控制系统能有效减小开发周期, 增强可移植性。

[关键词] STM32; 数字电源控制器

[中图分类号] TP273

[文献标识码] A

引言

数字信号处理器 DSP 因其快速的计算速度, 丰富的外设被广泛应用于数字电源控制系统。工业数字电源为保证运行可靠性, 大多采用 PID 控制算法。由于该算法运算量较小, 若采用基于 DSP 的数字控制系统, 存在性能过剩, 成本较高, 移植复杂等不足。STM32F334 系列是 ST 公司专为数字电源推出的基于 ARM Cortex-M4 的混合信号处理器, 内部集成数字信号处理器及浮点运算单元, 工作频率为 72MHz。STM32F334R8T6 是 F334 系列存储容量最大, GPIO 口最多的一款芯片, 具有 64KB Flash, 16KB RAM, 51 个 GPIO, 7 个 16 位定时器, 1 个 32 位定时器, 21 个 12 位 ADC 通道, 3 个 12 位 DAC, 一组 SPI, 一组 I2C, 一组 CAN 及 3 组 USART 等。本文设计了基于该芯片的数字电源控制器, 在满足大部分工业数字电源控制系

统需求的同时, 降低了成本, 增强了程序移植性。

1 原理与设计

数字电源一般由功率电路和数字控制器组成。为确保产品稳定性, 工业电源一般采用电压电流双闭环控制算法计算 PWM 信号占空比, 通过开关信号控制电源启动停止、模式切换等, 模拟信号设定输出值, 利用 RS485 进行远程通信。因此数字电源控制系统应具有至少 3 路 ADC, 2 路 PWM 信号输出及一路 USART, 分别用于电压电流信号及输出设定信号采集, PWM 信号输出及远程通信。除此之外, 还应根据需求配置若干外部中断用于接收保护信号和控制输入信号。以原边半桥电路副边全波整流的 DC-DC 电源为例, 其系统框图见图 1。

1.1 电压采集电路设计

在采集输出电压时, 为提高安全性, 选择带有

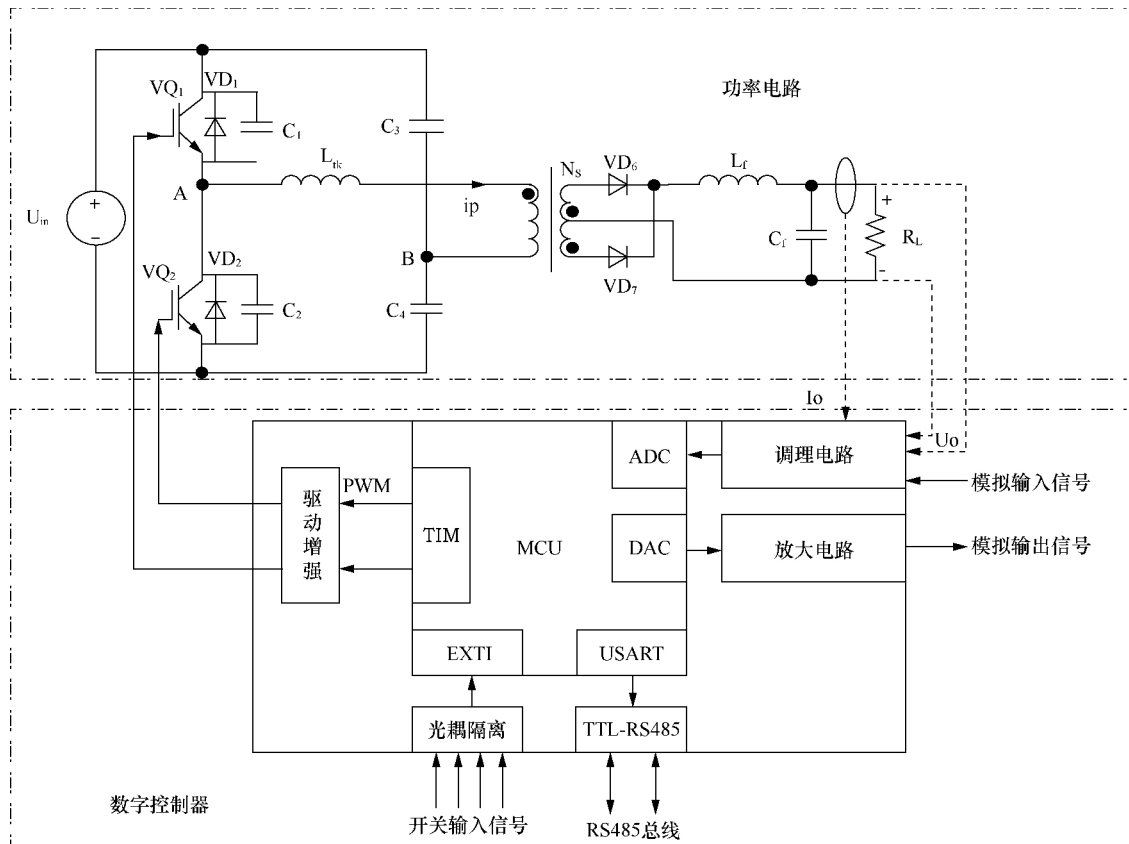


图 1 数字电源系统框图

电气隔离的霍尔电压传感器 CHV-25。由于此传感器输出为 0~25mA 电流信号，而 STM32F334R8T6 的 ADC 引脚识别的信号为 0~3.3V 电压信号，因此选择 120Ω 采样电阻将电流信号转为 MCU 能识别的电压信号，输出电压采集电路见图 2。

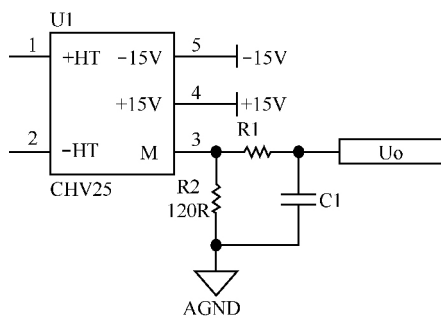


图 2 输出电压采集电路

1.2 PWM 电平转换电路

由于 STM32F334R8T6 输出的 PWM 是高电平为 3.3V 的 TTL 信号，抗干扰能力和驱动能力较弱。因此，本文利用 74HC245 电平转换芯片提高了 PWM 信号电压等级，增强了 PWM 信号的

抗干扰和驱动能力。同时，在 74HC245 输入端接下拉电阻，增强信号稳定性。电平转换电路见图 3。

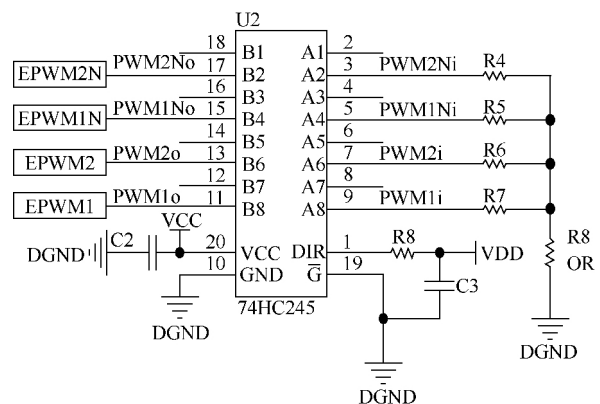


图 3 PWM 电平转换电路

1.3 TTL 转 RS485 电路

RS485 的抗干扰能力强，成本较低，因此被广泛应用于工业通信。本文通过 MAX485 电平转换模块将 MCU 串口输出的 TTL 信号转化为 RS485 信号，增强通信信号的抗干扰能力，满足工业通信要求。TTL 转 RS485 电路见图 4。

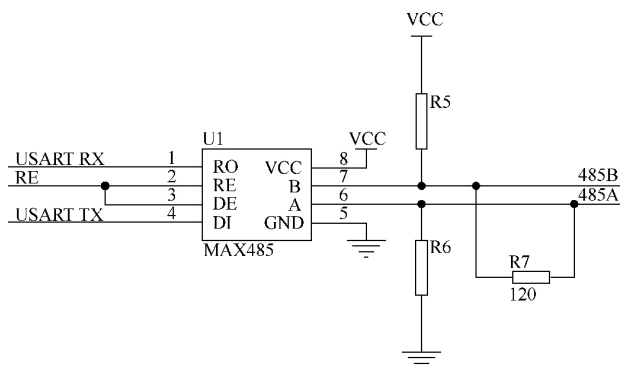


图 4 TTL 转 RS485 电路

1.4 外部数字中断电路

在实际应用中，通常需要配置若干外部中断接口，用来获取用户的操作指令或保护信号。本文采用了 TLP181 光电耦合模块对输入的数字信号进行电平转换及信号隔离，保证内部信号电平符合 MCU 要求。光耦隔离电路见图 5。

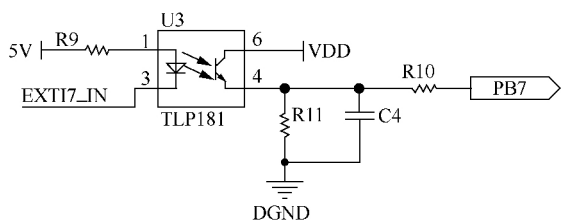


图 5 光耦隔离电路

1.5 DAC 输出放大电路

STM32F334R8T6 内部 DAC 模块输出电压范围为 0~3.3V，而工业中常用的模拟控制信号为 0~10V。因此，需在 DAC 输出引脚外接电压放大电路，扩大电压范围，满足工业需求。电压放大电路见图 6。

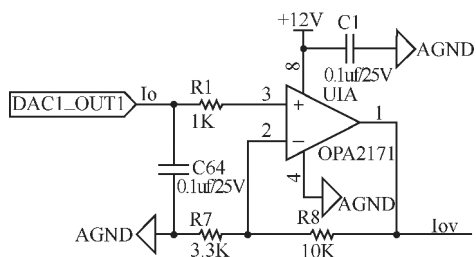


图 6 电压放大电路

2 实验

2.1 电压采集电路测试

STM32F334R8T6 的 ADC 为 12 位，当工作于

单端模式时，采样电压范围为 0~3.3V，采样转换值范围为 0~4095。理论采样转换值 D_i 与采样电压 U 有如下关系：

$$U = \frac{3.3 \times D_i}{4095} \quad (1)$$

图 2 所示电压采样调理电路中引脚 1 和引脚 2 的隔离输入电压 U_{in} ，电容 C_1 两端电压 U ，理论采样转换值 D_i 及实际采样转换值 D_a 之间的变化关系见表 1。

表 1 ADC 采样转换表

U_{in}/V	U/V	D_i	D_a
0	0	0	0
3	0.391	485.3	484
6	0.781	968.4	967
9	1.17	1 452.2	1 450
12	1.56	1 936.3	1 934
15	1.95	2 420.4	2 418
18	2.34	2 904.4	2 903
21	3.73	3 388.5	3 388
24	3.12	3 872.6	3 873

由上表可知，STM32F334R8T6 的片内 ADC 线性度较好，采样电压最大误差为：

$$\Delta E_{\max} = \frac{2.4}{4095} \times 3.3 \approx 0.0002 \quad (2)$$

因此，电压调理及采样电路设计正确，软件配置合理，满足设计需求。

2.2 PWM 电平转换电路测试

实验测试了占空比分别为 50%、30% 及 10% 时，STM32 的 GPIO 引脚输出及经 74HC245 电平转换后的 PWM 信号，见图 7~图 12。测试结果表明硬件设计及软件配置正确。

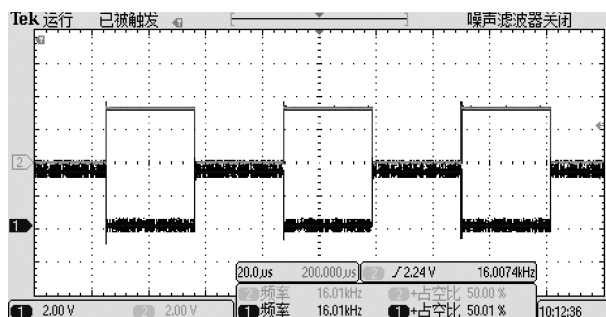


图 7 占空比 50% GPIO 引脚信号

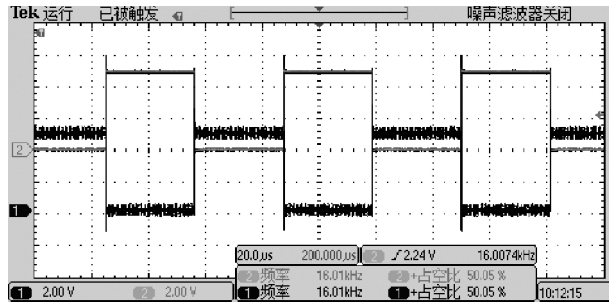


图 8 占空比 50% 74HC245 引脚信号

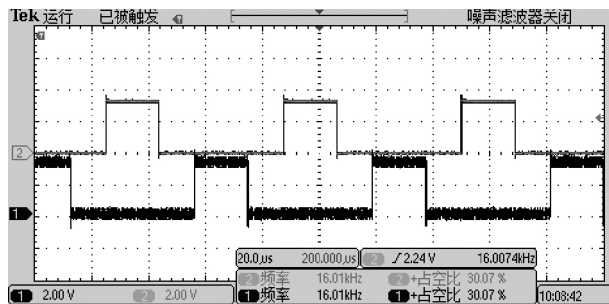


图 9 占空比 30% GPIO 引脚信号

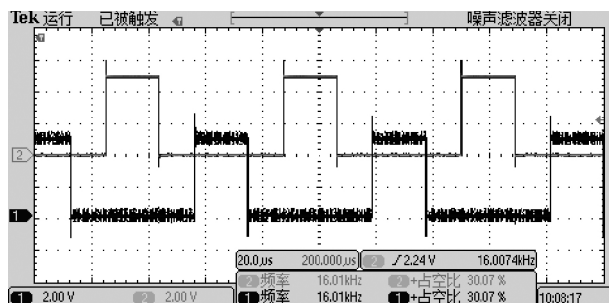


图 10 占空比 30% 74HC245 引脚信号

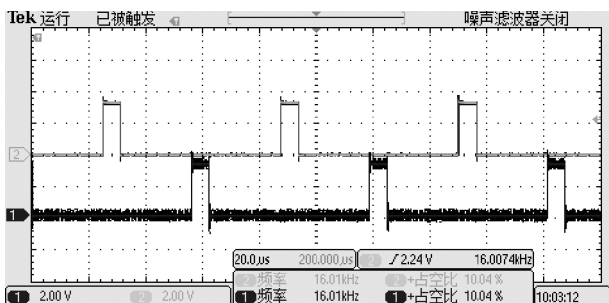


图 11 占空比 10% GPIO 引脚信号

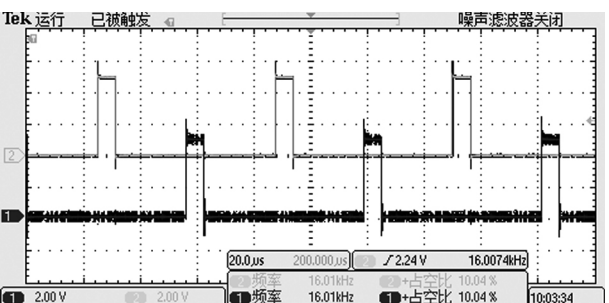


图 12 占空比 10% 74HC245 引脚信号

2.3 TTL 转 RS485 通信测试

工业通信中, 较为常用的协议为 Modbus 协

议。而 Modbus 协议中读保持寄存器 (03 码) 和写保持寄存器 (06 码) 的使用频率最高。本文通过 Modbus Poll 上位机软件读取起始地址为 1 的 4 个连续数据, 上位机发送数据与接收数据包见图 13。

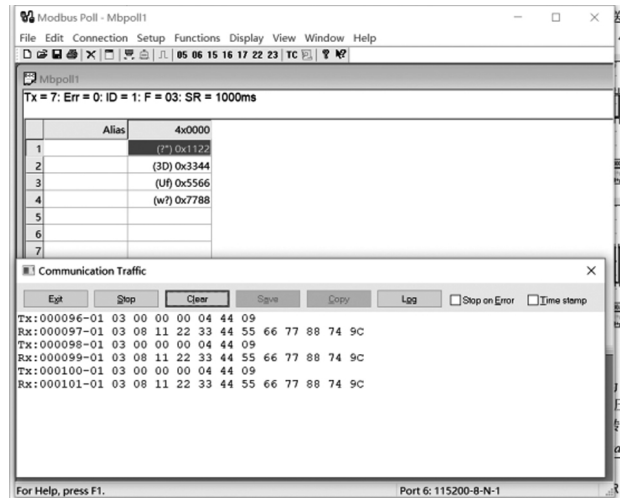


图 13 Modbus 数据包

通过对比 RS485 总线数据流 (见图 14)、MCU 串口收发数据流 (见图 15) 和 Modbus 数据包可知硬件设计合理, Modbus 程序正确。

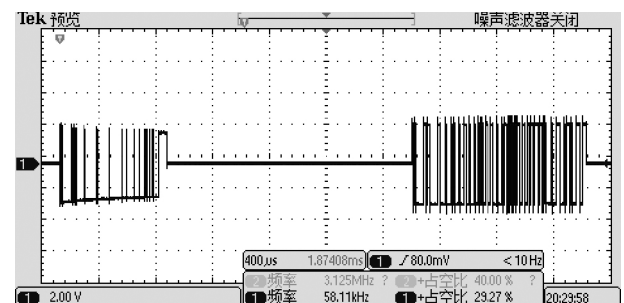


图 14 RS485 总线数据流

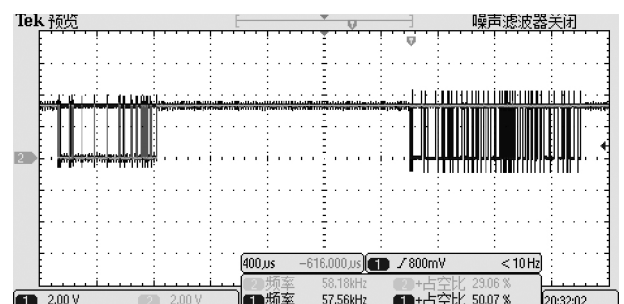


图 15 MCU 串口收发数据流

2.4 外部中断测试

程序中将 GPIOC10 配置为外部中断模式, 在中断服务程序入口设置断点, 通过观察程序运行位置指示器和外部中断模块相关寄存器值判断外部中断电路及程序是否配置正确。

当外部中断发生时，程序成功进入中断服务程序并停止于断点处，见图 16。观察 EXTI 模块的 Pending Register(悬挂寄存器)，可知中断 10 的悬挂寄存器成功置位，见图 17。

```

350 /* USER CODE END USART1_IRQn 1 */
351 }
352
353 /**
354  * @brief This function handles EXTI line[15:10] interrupts.
355  */
356 void EXTI15_10_IRQHandler(void)
357 {
358     /* USER CODE BEGIN EXTI15_10_IRQn 0 */
359
360     /* USER CODE END EXTI15_10_IRQn 0 */
361     HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_10);
362     HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_11);
363     HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_12);
364     HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_13);
365     /* USER CODE BEGIN EXTI15_10_IRQn 1 */
366
367     /* USER CODE END EXTI15_10_IRQn 1 */
368 }
369
370 /**
371  * @brief This function handles TIM6 global and DAC1 underrun error interrupts.
372  */
373 void TIM6_DAC1_IRQHandler(void)
374 {

```

图 16 中断服务程序

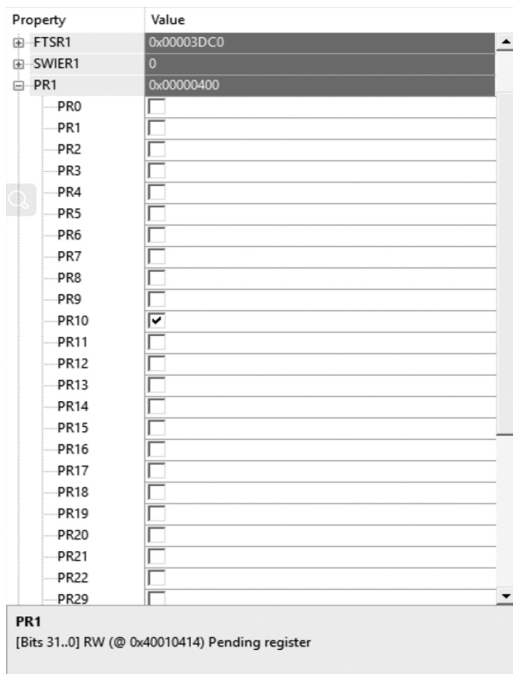


图 17 EXTI 模块悬挂寄存器

由此可知，外部中断电路硬件设计合理，软件配置正确。

2.5 DAC 及放大电路测试

由于 STM32F334R8T6 的 DAC 分辨率为 12 位，参考电压为 3.3V，因此 DAC 输出电压 U_{DAC} 与配置输出保持寄存器参数 $Data_{dac}$ 转换公式为：

$$U_{DAC} = \frac{3.3 \times Data_{dac}}{4096} \quad (3)$$

通过更改图 5 中 R13 与 R14 电阻的阻值可改变该电路的放大倍数，该电路输出电压 u_o 与输入电压 u_i 关系如下：

$$u_o = \frac{u_i(R_{13} + R_{14})}{R_{13}} \quad (4)$$

实验时，选择 R_{13} 为 3.3K， R_{14} 为 10K。计算可得放大倍数约等于 4.03。输出保持寄存器参数，DAC 输出电压及放大电路输出电压测试结果如表 2。

表 2 DAC 及放大电路测试结果表

$Data_{dac}$	U_{DAC}/V	u_o/V
0	0	0
620	0.5	2.026
1241	1.0	4.048
1862	1.5	6.06
2482	2	8.08
3103	2.5	10.10
3723	3	12.0
4095	3.3	12.0

从表 2 可以看出，此 MCU 输出 DAC 模块电压线性度较高，基本满足工业电源需求。由于放大电路中的参考电压为 12V，所以此放大电路的最大输出电压也是 12V。由此可见，电压放大电路设计合理，软件配置正确。

3 结论

STM32 因其价格亲民、外设丰富、库文件齐全、配置移植方便等优势，广泛应用于嵌入式系统。本文设计的基于 STM32F334R8T6 的控制器成功实现了 AD 采样、DA 输出、外部 IO 中断、RS485 通信及 PWM 信号驱动，基本满足数字电源对控制器的硬件需求。以较低成本实现基于 DSP 的数字电源控制器的基本功能，为企业降低控制器成本提供了一种可能。

参考文献：

- [1] 李建仁. 开关电源数字控制技术进展 [J]. 微电子学, 2016,46(04):562-566+580.
- [2] 张南山. 基于 DSP 的大功率数字电源产品化研究[J]. 电源技术应用, 2008(02):65-70+75.
- [3] 俞宏洋, 秦怀宇. 基于 STM32F334 的数字 BUCK 电源设计[J]. 电子世界, 2018(07):188-189.
- [4] 梁士福. 大功率移相全桥 DC/DC 模块电源的数字控制研究[D]. 华南理工大学, 2015.