

基于 dsPIC 的 4~20 mA 两线制恒流源的设计

吕振彬, 袁企乡, 徐 玮, 徐 昕

(上海航天计算机技术研究所, 上海 201109)

摘要: 我国新一代运载火箭动力测发控系统等效器中, 需采用数十路 4~20 mA 电流源模拟配气台压力变送器信号, 对设备输出精度、集成度、可靠性等指标提出较高要求; 文章提出一种基于 dsPIC 数字信号控制器控制 18 路 PWM 输出、低通滤波实现 D/A 转换, 最终实现了两线制 4~20 mA 电流输出的方法, 并对该设计的理论基础及软硬件实现进行分析; 该方案具备技术先进、输出精度高、可靠性好、高度集成化、外围电路少、软件控制简捷等优点, 由于具有上述优点, 在技术上已经处于国内领先状态, 现在经过在我国新一代运载火箭长征六号动力测发控系统等效器中得到了成功应用。

关键词: PWM; 低通滤波; 恒流源 4~20mA

Design of Two-wire 4~20 mA Constant-current Source Based on dsPIC

Lü Zhenbin, Yuan Qixiang, Xu Wei, Xu Xin

(Shanghai institute of aerospace computer technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In the equivalent device of dynamic test and launch control system of new generation launch vehicle, tens of 4 to 20 mA current sources are used to simulate air pressure transmitter of distributing device. This proposes higher requirements to output precision, integration degree, reliability and so on. This paper proposes a method which uses dsPIC digital signal controller to control PWM output and low-pass filter to achieve D/A converter, finally two-wire 4 to 20mA current output is realized. In this paper, the design theoretical foundation as well as hardware and software realization are analyzed. This scheme has advantages of advanced technology, high output accuracy, reliability, high integration, less peripheral circuits, simple software control, ect. It has been successfully applied in equivalent device of CZ-6 new generation launch vehicle dynamic test and launch control system.

Keywords: PWM; low-pass filter; constant-current source; 4~20 mA

0 引言

信号长线传输时, 如果传输的是电压信号, 则传输线会受到噪声的干扰, 传输线的电阻也会产生电压降, 影响信号的传输。为了避免上述情况, 通常用电流来传输信号。4~20 mA 电流环在数据传输过程中有抗干扰能力强, 数据传输准确的特点, 在工业领域有广泛的应用。

1 系统架构

某型运载火箭动力系统等效器需要模拟 64 路压力变送器信号, 信号为 4~20 mA 电流信号, 要求每路信号独立, 并可通过控制计算机进行调节, 系统架构如图 1 所示。计算机内使用 MOXA CP132I 板卡, 该板卡提供两路独立的全双工 RS422 通路。计算机通过 RS422 与 dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器通信, 数字信号控制器可输出 18 路独立的可控的 PWM 波形, PWM 经过光电隔离后, 进行低通滤波, 滤除高频分量, 留下直流分量, 通过滤波后的直流分量对 XTR115 的输出 4~20 mA 电流进行调节。

dsPIC33FJ64GS610 是 microchip 公司设计的 16 位的数字信号控制器, 它集成了数字信号控制器的控制功能及数字信号处理的计算能力和数据吞吐能力, 能够在工业级温度范围能工作。集成了振荡器、低电压检测、看门狗, 外围电路比较简单。

dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器最多可支持 18 路 PWM 信号的输出。每路信号都可以独立由软件对信号周期和占空比调整。PWM 占空比设置寄存器为双缓冲设计, 使 PWM 输出过程中更新占空比时不会产生毛刺。对于占空比设置, 具有可由用户访问的占空比寄存器和保存当前正使用的 PWM 周期内的实际比较值的占空比寄存器, 可在当前 PWM 输出周期内设置下一个 PWM 波形的占空比。

XTR115 属于二线制电流变送器, 专为工业控制领域 4~20 mA 电流环设计的芯片, 电流放大增益系数为 100, 由环路电源供电, 范围为 7.5 V~36 V, 同时具有 5 V 和 2.5 V 参考电压的输出。工作温度范围是 -40~+85℃。

2 硬件原理分析

根据傅里叶变换原理, 信号经过傅里叶变换可分为直流分量和交流分量, 为保留信号中 4~20 mA 的直流分量, 需选择合适的滤波器, 将交流分量滤除, 留下直流分量。DSP 调节 PWM 信号占空比, 从而控制直流分量大小, 并实现 D/A 转换。D/A 转换后的电压值作为 XTR115 的控制信号, 实现 4~20 mA 电流的可控输出。

2.1 低通滤波

每一个 PWM 信号 (周期为 T , $\omega_n = 2\pi/T$, 占空比为 τ), 用傅里叶级数表示为:

$$f_{PWM}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos n\omega_n t + b_n \cdot \sin n\omega_n t] \quad (1)$$

其中: 直流分量

$$U_d = \frac{a_0}{2} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f_{PWM}(t) dt = A \cdot \frac{\tau}{T} \quad (2)$$

收稿日期: 2015-10-23; 修回日期: 2015-11-05。

作者简介: 吕振彬(1985-), 男, 山东聊城人, 工学硕士, 主要从事运载火箭测发控技术方向的研究。

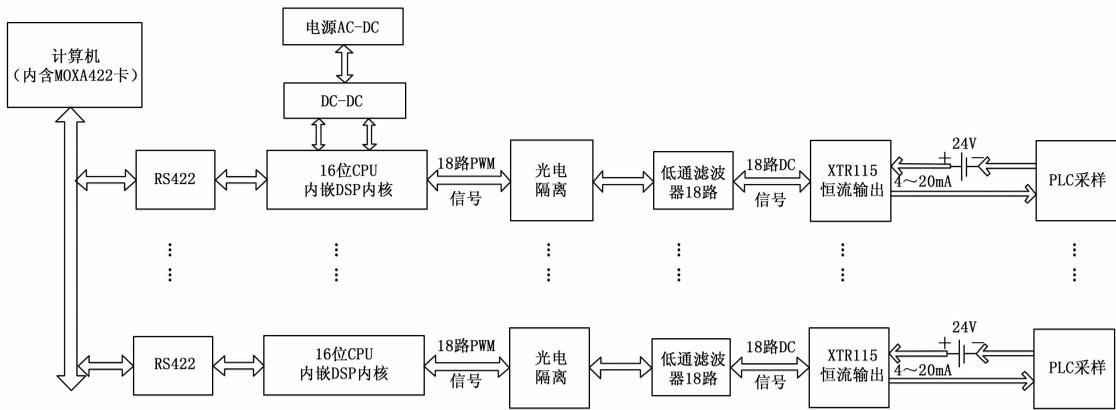


图 1 4~20 mA 电流源系统架构

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f_{PWM}(t) \cos m\omega_n t dt = 2A \cdot \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin m\omega_n \frac{\tau}{2}}{m\omega_n \frac{\tau}{2}} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f_{PWM}(t) \sin m\omega_n t dt = 0 \quad (4)$$

$$f_{PWM}(t) = A \cdot \frac{\tau}{T} + 2A \frac{\tau}{T} \left[\frac{\sin \omega_n \frac{\tau}{2}}{\omega_n \frac{\tau}{2}} \cdot \cos \omega_n t + \frac{\sin 2\omega_n \frac{\tau}{2}}{2\omega_n \frac{\tau}{2}} \cdot \cos 2\omega_n t + \dots \right] \quad (5)$$

通过采用低通滤波器将所有交流分量滤除, 频率为 ω_n , $2\omega_n$ 等, 只剩下直流分量, 再通过调节 PWM 信号的占空比, 改变电压 U_d 的大小, 从而将数字信号转换成了 4~20 mA 的模拟信号。

2.2 PWM 转 A/D 精度分析

PWM 信号与 PWM 频率通过低通滤波器后, 在直流信号上产生纹波叠加, 从而决定了 D/A 转换的精度。频率 f_n 越高, 越容易使直流分量与交流分量分开。当 dsPIC33FJ64GS610 倍频后供 PWM 计数的时钟频率为 120 MHz 时, 即产生 30 kHz 的 PWM 信号; 每产生一个周期的 PWM 信号, 则计数 4000 个时钟单位。因此, 所得直流分量的最小输出为 1 个时钟单位产生的 PWM 信号为 0.825 mV ($3.3 \text{ V} \times 1/4000$), 而 12 位的 D/A 转换器的最小输出 0.81 mV ($3.3 \text{ V}/4096$)。当把 PWM 信号的频率从 30 kHz 降到 5 kHz 时, 直流分量的最小输出则降低为 0.11 mV ($3.3/24000$), 接近于 15 位的分辨率。因此在理论上, PWM 信号的频率越低, 所得的直流分量就越小, D/A 转换分辨率越高。但需要注意的是, 当 PWM 信号基频减小时, 相应的谐波分量频率也会降低, 因此有更多的谐波通过相同带宽的低通滤波器, 造成输出直流分量的纹波加大, 又会使 D/A 转换的分辨率降低。由此可见, 要获得较高的分辨率, 单纯降低 PWM 信号的频率并不能实现。

综上所述, PWM 输出 D/A 转换的误差, 由 PWM 信号的频率决定的最小输出电压, 以及通过低通滤波器的高频分量所产生的纹波这两个方面决定。要获得最佳的 D/A 分辨率, 在选取 PWM 信号的频率时不能太小, 要综合考虑选取一个最合

适的值。

表 1 PWM 频率与分辨率对应关系

PWM 频率/kHz	5	10	30	50	100
最大分辨率/位	14.9	13.8	12	11.6	10.5

PWM 输出首先通过光电隔离电路, 然后经过阻容滤波, 再输出模拟信号。本设计选择巴特沃兹型滤波器, 该滤波器具有平坦的通带幅频特性, 并且过渡带和截止带衰减很快, 其传递函数为:

$$A(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{A_{VF} \cdot \omega_n^2}{S^2 + \frac{\omega_n}{Q} S + \omega_n^2} \quad (6)$$

$\omega_n = \frac{1}{RC}$ 为特征角频率; $Q = \frac{1}{(3 - A_{VF})}$ 为等效品质因数。

在 $Q=0.707$ 时, $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$ 的情况下, $20 \lg |A(j\omega)/A_{VF}| =$

-3 dB ; $\frac{\omega}{\omega_n} = 10$ 的情况下, $20 \lg |A(j\omega)/A_{VF}| = -40 \text{ dB}$, 也

就是当 PWM 的频率为 10 kHz, 若其截止频率为 1 kHz, 即纹波的幅值约为直流分量的 $\frac{1}{100}$, 再通过第 2 个巴特沃兹型低通

滤波器后, 纹波幅值只有直流分量的 $\frac{1}{10000}$, 精度可以达到

13 位左右, 因此截止频率设置为 1 kHz 较为合理。

3 软件设计

软件设计以模块化设计为基础, 分为控制计算机程序、dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器程序两个组成部分, 二者之间协同工作。dsPIC33FJ64GS610 接收到信号后, 对接收到的数据进行 CRC 校验, 校验合格则反馈正确帧给控制计算机, 否则反馈错误帧。

控制计算机与 dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器通过全双工 RS422 通信协议, 波特率 9.6 kbps。如无特殊说明, 数据在传输时, 高位在前, 低位在后。信息帧格式如表 2 所示。dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器接收到 RS422 数据后, 进行 CRC 校验, 如果校验正确则反馈值 0xffff 给控制计算机, 否则反馈 0x0000, 反馈帧格式如表 3 所示。如果控制计算机发出数据后 1 s 内未收到反馈帧, 重新发送数据, 连续发送 3 次未收到反馈, 认为数据丢失, 则控制计算机报警。

表 2 信息帧格式

字节序号	含义	内容	备注
1~2	帧头	0x5501	
3~67	有效电流调节数据		32 路,每路 16bit
68~69	CRC 校验	对 1~71 字节数据计算 CRC 校验和	与控制计算机校验方式相同
70~71	帧尾	0x66BB	

表 3 反馈帧格式

字节序号	含义	内容	备注
1~2	帧头	0x5502	
3~4	反馈值	0x0000 或者 0xffff	校验正确反馈 0xffff 校验错误反馈 0x0000
5~6	CRC 校验	对 1~71 字节数据计算 CRC 校验和	与控制计算机校验方式相同
7~8	帧尾	0x66BB	

4 结束语

针对某型运载火箭动力系统等效器压力变送器信号的需求,

给出一种可与控制计算机通讯的基于 dsPIC33FJ64GS610 数字信号控制器和 XTR115 的两线制 4~20 mA 电流环数据传输电路。首先讨论了该模型的系统架构,详细阐述了 PWM 信号的产生、低通滤波、D/A 精度的方法,针对 XTR115 芯片,分析了其性能特点与工作原理,给出了典型应用电路的详细设计过程。该方案成本低,简单易行,在测试、测量领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 咎 勇, 罗永红, 王沛莹. XTR115 电流环电路原理及应用 [J]. 电子设计工程, 2011 (8): 190-192.

[2] 杨旭辉. 一种在 DSP 上实现多路 D/A 输出的方法 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2009 (5): 71-73.

[3] 张华栋, 孙丽丽. 用 TMS320LF2407 和 XTR115 设计电流环回路 [J]. 电子产品世界, 2005 (11): 90-92.

[4] 刘 艳, 汪 毅, 贾雯杰, 等. 一种常见精密恒流源的改进与应用 [J]. 电测与仪表, 2011, (4): 93-96.

[5] 徐 猛, 李 智. 恒流源在高精度数字多用表中的设计与实现 [J]. 电测与仪表, 2009, 05: 72-75.

[6] 薛 易. 一种精密程控恒流源设计 [J]. 自动化仪表, 2009, (4): 63-65.

(上接第 309 页)

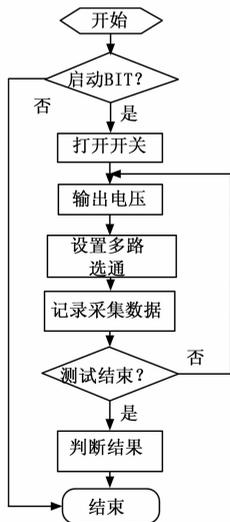


图 4 测试软件流程图

件。选用的满足系统性能要求的 DSP 和 FPGA 芯片, 选用 D/A 转换器型号为 DA7547, A/D 转换器型号为 AD7892。(接口模块中还有其他接口资源) 根据前文的设计思想完成电路设计、逻辑开发、软件开发、生产调试工作, 最终实现了采集系统。系统测试用例及对应的测试结果如表 2 所示。

通过表 2 可知, 通过最大值、最小值、中间值 3 个典型值的测试, 可以达到较全面测试模拟量采集电路的目的。

5 结束语

故障注入是一种验证技术, 一种使目标系统产生故障的手段。通过故障注入技术提高目标系统的测试覆盖率。文中将故障注入方法运用到模拟量采集电路设计中, 设计了测试电路,

表 2 测试结果

序号	激励		采集		备注
	数据	电压/V	数据	电压/V	
1	0xFF	+10	0x7FF	+10	直流电压最大值测试
2	0x800	0	0x000	0	直流电压中间值测试
3	0x000	-10	0x800	-10	直流电压最小值测试
4	0xFF	+7	0x5A9	+7	交流电压最大值测试
5	0xC91	+4	0x332	+4	交流电压中间值测试
6	0x800	0	0x000	0	交流电压最小值测试

实现了模拟量采集电路的 BIT 功能, 从而提高模块、整机的测试性。故障注入技术在模拟量采集电路设计中的使用, 为将故障注入技术在机载计算机系统设计中广泛使用提供了实践依据。以达到提高整板或整机的故障检测率, 提高系统的测试性、可靠性的目标。

参考文献:

[1] 魏 婷, 朱耀国. 飞行控制计算机模拟接口 BIT 电路设计及仿真 [J]. 航空计算技术, 2014 (11): 103-105, 109.

[2] Stott D T, Ries G, Hsueh M c, Iyer R K. Dependability Analysis of a High-Speed Network Using Software-Implemented Fault Injection and Simulated Fault Injection [J]. Information Systems Frontiers, 1998 (1): 78-82.

[3] 尹 青, 蔡伯根, 上官伟, 等. 故障注入方法在列车运行控制仿真系统中的应用 [J]. 铁道通信信号, 2013 (1): 66-70.

[4] 魏 婷, 夏德天. 基于 LVDT /RVDT 的交流模拟量解调方法研究 [J]. 航空计算技术, 2013 (1): 116-119.

[5] 路 遥. 模拟故障注入方法与工具的研究现状 [A]. 第十一届计算机工程与工艺全国学术年会 [C]. 2007.

[6] 高凤岐, 等. 基于半实物仿真的电路板故障注入系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (2): 275-278.