

# 基于 DSP 的数字电子负载控制器设计

王子剑, 孔 峰

(广西工学院 电子信息与控制系, 广西 柳州 545006)

**摘 要:**为改善传统的电子负载的可靠性和适应性差的问题,设计了一种基于 DSP 的高速数字控制器。该控制器利用数字 PID 控制的优点,以定点 32 位 DSPTMS320LF2812 为控制环的数字电子负载,具有根据设定值快速调整负载电压和电流的特点,较好地满足了测试系统快速性和稳定性的要求,不仅精度有了一定的提高,而且提高了电子负载控制系统的稳态和动态特性。试验结果表明,采用 DSP 作为控制器的数字电子负载,更适合于对控制性能要求较高的电源测试场合,具有广阔的应用前景。

**关键词:**TMSLF3202812;数字 PID 控制器;电子负载;D/A

**中图分类号:**TP311;TP202

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2010)02-0241-04

## Design of Digital E-Load Controller Based on DSP

WANG Zi-jian, KONG Feng

(Dept. of Electronic Information and Control Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** To improve poor reliability and adaptability of the traditional electronic load, design a DSP-based high-speed digital controller. Using the advantages of digital PID control, the digital electronic load based on 32-bit fixed-point DSP TMS320LF2812, has the characteristics of rapid adjustment in accordance with the load voltage and current according to settings. Better meet the test system speed and stability of the requirements, not only have some improvement in accuracy, but also improve the system steady-state and dynamic characteristics. Test results show that the use of DSP as a controller of the digital electronic load, in the occasions with higher demand of control capability, which has a potential value for application.

**Key words:** TMSLF3202812; digital PID controller; E-Load; D/A

## 0 引言

电源在研发生产过程中或产品出厂前都需要进行负载试验以检验电源的电气性能和输出能力,负载的好坏直接影响试验的效率和精度。传统的负载常用滑线变阻器或变阻箱,稳定性差、调节困难。而实际上负载的形式较为复杂,常为一些动态负载,如负载消耗的功率是时间的函数,或者负载工作在恒定电流、恒定电阻、负载为瞬时短路负载等,传统负载不但不能模拟这些复杂的负载形式,更不能完成自动测试。电子负载可以模拟真实环境中的负载(用电器),其原理是控制内功率 MOSFET 或晶体管的导通量(量占空比大小),靠功率管的耗散功率消耗电能,它能够准确检测出负载电压,精确调整负载电流,同时可以实现模拟负载短路,模拟负载是感性阻性和容性,调整负载电流

上升/下降时间。现有电子负载的大都是模拟控制环节,调节和控制的适应性和可靠性差,难以适应不同电源的具体情况。采用数字信号处理器的电子负载,可以对负载电流上升下降率采取数字化实时程序控制,自动地调节负载电流,满足各种不同的电源特性要求。文中基于 TI 公司 TMS320LF2812 和外接 D/A 转换芯片,实现数字 PID 控制器,采用的 PID 控制算法是增量式 PID 控制算法<sup>[1]</sup>。

## 1 解决思路

TMS320LF2812 具有较高的运行速度和数据处理能力,能保证系统对多路模拟信号的实时采集和处理,提高系统的整体性能和集成度。在 DSP 内部设置参考输入量,通过 DSP 的片上 12 位 A/D 转换器采样,把控制对象的实际输出量采集到 DSP 中,经过 DSP 的数字运算处理后,通过外部的 D/A 转换芯片(DAC7617)进行数/模转换,得到实际的模拟控制量去控制被控对象,使之按照系统的设置运行工作。文中是一个数字电子负载 PID 控制器,现假设它是一个对负载电流进

收稿日期:2009-05-14;修回日期:2009-08-29

基金项目:广西研究生教育创新计划资助项目(2008105940814M03)

作者简介:王子剑(1980-),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为电子负载研究;孔 峰,教授,研究方向为神经网络。

行 PID 控制的系统。图 1 是 PID 控制器原理框图。

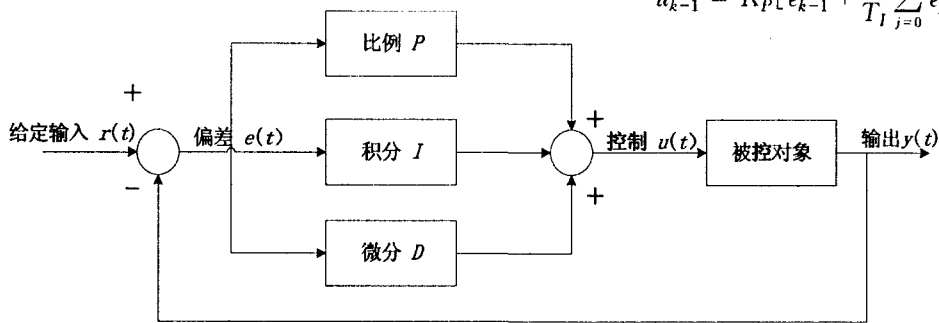


图 1 传统的 PID 控制器的原理框图

图 1 中  $r(t)$  是电流设定值,  $y(t)$  是电子负载的实际测量值,  $e(t)$  是输入控制器的偏差信号,  $u(t)$  是控制器输出的控制量, 则 PID 控制算式 如式(1) 所示:

$$U(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] + u_0 \quad (1)$$

其中:  $K_p$  是比例系数,  $T_I$  是积分时间常数,  $T_D$  是微分时间常数。

上式是模拟形式的 PID 控制算式, 现在采用 TMSLF2812 实现数字 PID 控制, DSP 控制是一种采样控制, 它只能根据采样使得偏差计算控制量, 而不能像模拟控制那样连续地输出控制量, 进行连续控制, 上式中的积分和微分项不能直接使用, 必须进行离散化处理。离散化处理的方法为: 以  $T$  作为采样周期,  $K$  作为采样序号, 则离散采样时间  $kT$  对应连续时间  $t$ , 用求和的形式代替积分, 用增量的形式代替微分<sup>[2]</sup>, 可作如式(2) 所示变化。

$$\left. \begin{aligned} t \approx kT \\ \int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e_j \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中  $k = (0, 1, 2, 3, \dots)$ , 为表示方便将  $e(kT)$  简化为  $e_k$ ,  $e[(k-1)T]$  简化为  $e_{k-1}$ 。将上式代入(1) 式中就可得离散的 PID 表达式:

$$u_k = K_p[e_k + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_D}{T}(e_k - e_{k-1})] + u_0 \quad (3)$$

如果采样周期取的足够小, 则以上的近似计算可获足够的精确结果, 离散控制过程与连续控制过程十分接近。为增加控制系统的可靠性, 采用增量式 PID 控制算式, 即让 TMSLF2812 只输出控制量的增量  $\Delta u(k)$ 。式(3) 是第  $k$  次 PID 控制器的输出量, 那么第  $k-1$  次 PID 控制器的输出如式(4) 所示:

$$u_{k-1} = K_p[e_{k-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T}(e_{k-1} - e_{k-2})] + u_0 \quad (4)$$

(3) 式和(4) 式相减得方程(5) 就是本控制程序中用到的增量式 PID 控制算式:

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = K_p[1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}]e_k -$$

$$K_p(1 + \frac{2T_D}{T})e_{k-1} + K_p \frac{T_D}{T}e_{k-2} = Ae_k + Be_{k-1} + Ce_{k-2} \quad (5)$$

$$\text{其中: } A = K_p[1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}], B = -K_p(1 + \frac{2T_D}{T}), C = K_p \frac{T_D}{T}$$

由式(5) 可以看出, 如果计算机控制系统采用恒定的采样周期  $T$ , 一旦确定了  $A, B, C$ , 只要前后三次测量的偏差, 就可求出控制量。增量式 PID 控制与位置式 PID 控制相比仅是算法上有所改变, 它只是改变输出增量, 减少了 DSP 误操作时对控制系统的影响, 而且不会产生积分失控。该实例基于 TMSLF2812 的 PID 控制器的实现框图如图 2 所示。

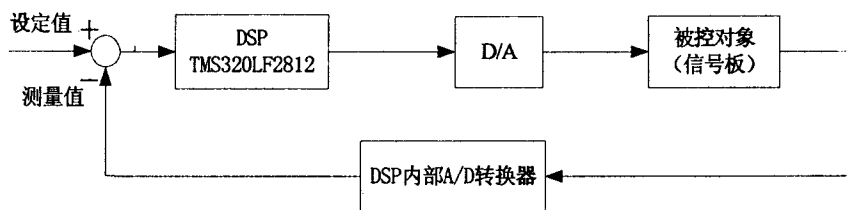


图 2 基于 TMSLF2812 的 PID 控制器的实现框图

从图 2 可以看出电子负载的设定值由 DSP 给出, 经过 DSP 计算出控制量, 对它进行 D/A 转换, 产生模拟控制量, 从而实现对被控信号板的电流和电压的控制, 而信号板的实际电流电压值通过 A/D 转换器送入 DSP, 使整个系统构成一个闭环系统。

## 2 程序设计

### 2.1 数字 PID 控制器的 DSP 电路设计

基于 TMSLF2812 的电子负载数字 PID 控制器的 DSP 实现电路原理框图如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

图 3 中, DA 采用 TI 公司的 DAC7617 数模芯片, 它可以实现同时转换四路模拟信号输出, 并有 12 位的精度, 转换时间为 10 微秒。TMSLF2812 片上自带的 A/D 转换器的输入电压限制在 0~3300mV, 信号板的实际输出电流, 通过一个采样电阻  $R$  送到电压跟随器

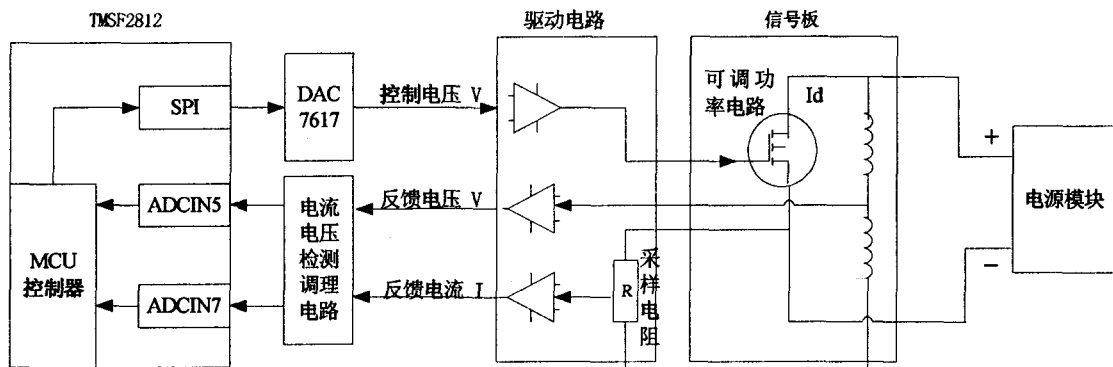


图3 电子负载实现数字PID控制器的电路原理框图

里经过放大后,以 $0\sim 3\text{V}$ 电压的形式输出到DSP的ADIN7口。电压信号经驱动电路被成比例的控制,在 $0\sim 3\text{V}$ 之间,输入到DSP的ADCIN5口。TMSLF3202812一共有16路复用的片上A/D转换器,该实例只采用第5,7通道的A/D转换,由DSP计算出控制量,数据通过串行接口SPI发送给D/A转换器<sup>[4]</sup>,转换出来的电压进入驱动放大电路输出相应的控制信号,控制驱动放大电路内部相应的模拟开关动作,进而改变输出到信号板上MOSFET管栅极的电压值,达到改变漏源电流 $I_d$ 的大小。在外接电源电压 $V$ 一定的情况下, $I_d$ 的变化可以看做等效电阻(MOSFET)的阻值的变化。

## 2.2 程序设计与说明

通用DSP的源代码开发都可以采用两个方法:一种是直接利用其提供的汇编指令编写源代码,然后经汇编器和链接器进行汇编链接后生成目标可执行代码;另一种方法是利用标准C/C++语言编写源代码,然后经C/C++编译器、汇编器和链接器进行编译链接,最后生成目标可执行代码。这两种代码开发方法都使得开发人员不得不花费大量的时间在代码的编写上面,增大产品开发难度,延长产品开发周期,从而影响开发效率。MATLAB里Embedd Target for Ti C2000 DSP提供了DSP代码开发的平台<sup>[5]</sup>,Math Works公司和TI公司联合开发的工具包——MATLAB Link for CCS Development Tools,已经能把MATLAB和TI的DSP集成开发环境CCS(Code Composer Stadiu)及目标DSP连接起来。利用此工具可以像操作MATLAB变量一样来操作TI DSP的存储器或寄存器,即整个目标DSP对于MATLAB像透明的一样,开发人员在MATLAB环境下,就可以完成对CCS的操作。MATLAB Link for CCS Development Tools可以支持CCS能够识别的任何目标板,包括TI公司DSK, EVM板和用户自己开发的目标DSP板。如果把MATLAB Link for CCS Development Tools与Math-Works公司和TI公司联合开发的另外一工具包——

Embedded Target for the TI TMS320C2000 DSP Platform配合使用,则可以直接由MATLAB的Simulink模型生成DSP的可执行代码,即在集成的、统一的MATLAB环境下可完成DSP开发的整个过程<sup>[6]</sup>。将电子负载的模型和Simulink里面的模块合理的组合,通过实时工作站和Ti的开发工具将Simulink模型转变为实时的C代码,下载到电子负载系统的DSP板上,见图4所示。

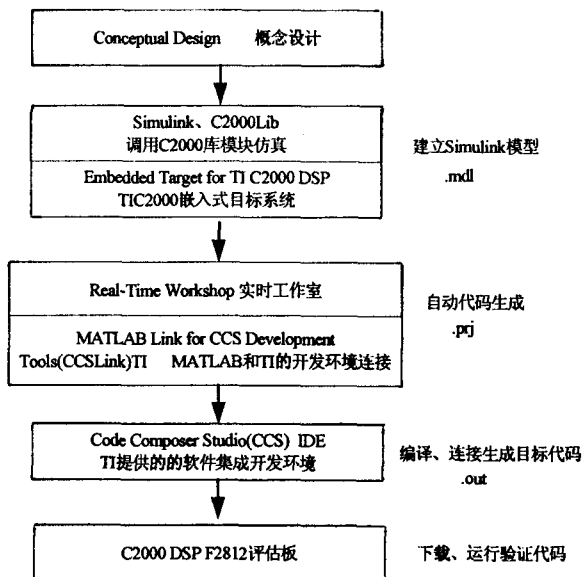


图4 DSP代码自动生成开发流程图

该实例的程序基于图2和图3的平台实现数字PID控制器,程序的文件名是\*.asm。另外系统配置命令文件(\*.CMD)实现对程序存储空间和数据存储空间的分配,从该配置文件中可以看出该实例的存储器资源和配置方法。一个实际的DSP控制系统,实时性是一个重要的指标。该程序为了保证数字PID控制的实时性和准确性,在A/D采样的中断响应子程序中就调用PID控制算法程序,立即计算出控制输出量并送到被控对象,根据TMSLF2812的性能、机器时钟周期和中断的延时,可以计算出系统从采样到当前实际输入值到输出控制量大约需要4微秒,这对于80纳

秒一次的采样来说是足够的,完全满足实时性的要求。在中断子程序中实时调用 PID 控制算法的程序如下:

ADCINT ISR; 高优先级模式的 ADC 中断子程序

CLRC SXM; 抑制符号位扩展

LDP #4; 指向用户变量区

LAR AR2, # RESULT0; 把当前 A/D 转换的结果存储到 AR2 中

MAR \*, AR2; 把 AR2 设置为当前辅助寄存器

LACC \*, 12; 由于 DSP 内嵌的 A/D 转换器是 12 位的, 所以左移 10 位加载到 ACC 高位

SACH ADRESULT; 变量 ADRESULT 存储当前 A/D 转换的结果

CALL PID Control; 调用数字 PID 控制子程序, 保证实时控制

CLRC INTM; 开总中断, 因为一进中断就自动关闭总中断

RET; 中断返回

### 3 试验结果

数字电子负载的功能除了完成作为负载的功能以外, 还要实现测量的任务, 从测量功能上看, 要测量 3 个参数: 输出的直流电压、直流电流和输出的纹波电压, 这是 3 个性质完全不同的电信号。电子负载工作模式选用恒压模式, 连接市售输出为 5V/0.48A 直流电源, 设定为 0.51A, 0.32A, 0.15A 吸取导入电流, 测试电子负载的电流实时调节性能, 由图 4 测试结果可知: 调整负载电流时输出电压很稳定, 负载电流精度控制在 4mA 左右, 电流调节过程中电源输出电压的变化很小, 保持在 5V 左右, 切换电流档位时出现的电压峰值为 5.26V, 仍在允许的范围内。采用数字电子负载对负载电流进行数字化的实时控制调节, 可以根据电源供应器的特性, 自动地调节和控制负载电流大小及其上升/下降率, 以适应种类繁多的电源供应器, 不会

引起电源供应器的输出电压和输出电流的震荡冲击<sup>[7,8]</sup>。

### 4 结束语

目前国内广泛使用的直流电子负载负载仪对负载电流的调节和控制采用硬件模拟电路的方法, 调节和控制的适应性和实时性差, 仅仅具有静态负载的测试功能, 不能适应不同的电源供应器的具体情况。经试验测试, 利用 TMS320F2812 作为控制器的电子负载, 从硬件上保证了 PID 控制策略的实时性, 特别是适应了负载的动态瞬变, 实现了在两个不同负载准位之间的动态切换, 具有了动态负载的测试功能, 可以满足一些较高要求和特殊测试的场合。

### 参考文献:

- [1] Zhang Wanfeng. DSP implementation of predictive control strategy for power factor correction[J]. APEC, 2004(2): 67 - 73.
- [2] 刘 琛, 梁昔明. 一种结合数值优化的 PID 制器韵设计与仿真[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(4): 24 - 26.
- [3] 史增树, 张建红. TMS320F2812 在全数字开关电源中的应用[J]. 现代电子技术, 2006(13): 97 - 99.
- [4] Texas Instruments. TMS320X281X Serial Peripheral Interface (SPI) Reference Guide[M]. Texas, USA: TI, 2006.
- [5] 张 琴. 嵌入式目标模块在 DSP 系统开发中的应用[J]. 华中科技大学学报, 2005(2): 96 - 98.
- [6] 严 杰, 王 莉, 王志强. 基于 Matlab 的功率 MOSFET 建模[J]. 电力电子技术, 2005(3): 23 - 26.
- [7] User's Guide Agilent Technologies DC Electronic Loads Models N33045A[M]. USA: Agilent, 2005.
- [8] 洪贞启. N3305A 电子负载与电源检定[J]. 电子测试, 2008(4): 74 - 76.

(上接第 240 页)

### 5 结束语

整个百万节点油藏模型系统建立在对数据详细分析处理的基础上, 硬件资源消耗少, 视觉方面显示快。不但有效地提高了虚拟场景实时渲染速度, 而且通过边缘渲染的方法提高了视觉效果。

### 参考文献:

- [1] 岳大力. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J]. 中国石油大学学报, 2008, 4(2): 21 - 27.
- [2] Gao Pengdong. Large data processing based on simplification and subdivision[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Fourth International Conference on Virtual Reality and Its Applications in Industry. [s.

l.]: [s. n.], 2004: 35 - 41.

- [3] 姜英姿. 大规模数据的计算机处理技术[J]. 徐州工程学院学报, 2005, 10(5): 13 - 15.
- [4] 王书海. 基于 SQL Server 应用系统的大数据量实时处理技术[J]. 实验室研究与探索, 2008(3): 16 - 18.
- [5] 吴 磊. GIS 大数据量编辑处理中快速捕捉的优化策略[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 4(2): 315 - 318.
- [6] 程 燕. 图像超分辨率重建关键技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 39 - 40.
- [7] 陈学工. 模拟退火遗传算法的轮廓线拼接研究[J]. 计算机仿真, 2009(2): 208 - 211.
- [8] Sheldon M. Ross 统计模拟[M]. 第 4 版. 北京: 人民邮电出版社, 2007.