

基于 STM32 的自适应智能精密电源的设计

郭鹏, 曲波

(苏州大学, 江苏 苏州 215021)

摘要: 介绍了一种可以产生两路独立 0~10 V 电压的程控电源及其保护系统的设计方法, 采用 ST 公司 32 bit 处理器 STM32F103VET6 作为控制芯片, 用来接收上位机的电压输出命令, 通过不断对输出采样得到多组数据, 先后利用最小二乘法曲线拟合及二分法进行自适应调整, 以达到稳定输出的目的。本方案还采用软件保护和硬件保护双保险的设计, 确保电源及用电器的安全。此外, 还具有电流实时监控, 设定电流阈值等功能。在负载测试、短路测试以及变载输出测试中均可稳定工作。

关键词: 自适应; 最小二乘法; 二分法; 过流保护

中图分类号: TN86

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)09-0081-04

Design of an adaptive intelligent precision power based on STM32

Guo Peng, Qu Bo

(Suzhou University, Suzhou 215021, China)

Abstract: This article introduces a scheme to generate two independent 0~10 V programmable power supply and protection system, using ST 32 bit processor STM32F103VET6 as the control chip to receive the control voltage output command, through continuous output sampling for multiple sets of data. In order to achieve the purpose of stable output, use curve fitting algorithm and the dichotomy successively for adaptive adjustment. This scheme also uses the software protection and hardware protection double insurance design, to ensure that the power supply and the safety of the electric appliances. In addition, the system has the current real-time monitoring function and the ability to set current threshold. In the load test, short circuit test and variable load output test, it can stably work.

Key words: adaptive; least square method; dichotomy; over-current protection

智能电源可以通过计算机控制输出不同的精准电压, 并且具有完整的保护电路。其典型的应用领域是在自动在线测试 (ICT) 仪器中, 根据不同的需求变换参数, 只需将要发送的命令写入流程中即可, 免除人工操作, 提高生产效率, 降低成本并且操作也相对灵活。目前这种小型程控电源多被国外仪器厂垄断, 价格也比较昂贵。本文提出了由 STM32F103RBT6 控制输出电压, 然后根据实际情况配以相应算法进行自适应调整的一种方案。STM32 作为一款当前比较流行的微处理器芯片, 外设比较丰富, 市场价格比较低, 但是工作频率也相对较低, 因此, 本系统采用两种不同的算法依次对输出进行自适应调整, 大大减少了处理器的运算量, 从而提高了自适应调整的速度。

1 系统整体结构

本设计可由 PC 机或者 PLC 远程控制, 它们通过

USB 接口通信, USB 接口由串口通过 FT232RL 转换得来, 其作用除了与上位机通信, 还可以作为程序调试接口。本系统有两路独立输出, 充分利用了 STM32 的外设, 图 1 所示为其中一个通道的硬件结构图。

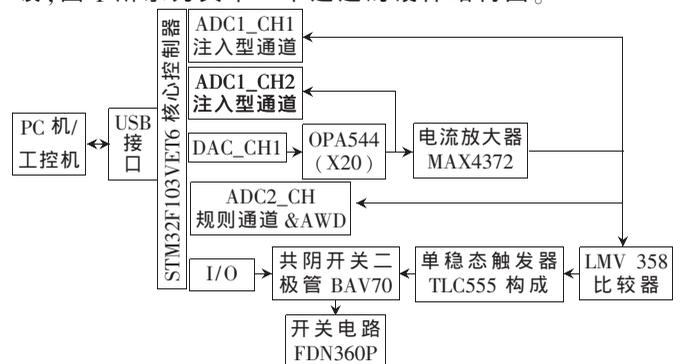


图 1 系统硬件结构图

系统中唯一的外部输入电压为 12 V, 设计中用到的所有其他电压值均由其转换得来。

2 电压的输出及反馈系统

总体的思路为片内 D/A 输出一个电压, 通过放大电路后得到所需电压值, 并且由 A/D 对输出参数采样, 在此使用 A/D 的注入型通道(Injected channel), 因为这个采样过程不是连续循环扫描模式, 而是配合定时器, 以一定的频率采样, 在定时器中断函数中运行算法并自适应调整的工作过程。系统中, STM32 的供电由 NCP1117 提供, 放大及反馈电路如图 2 所示。

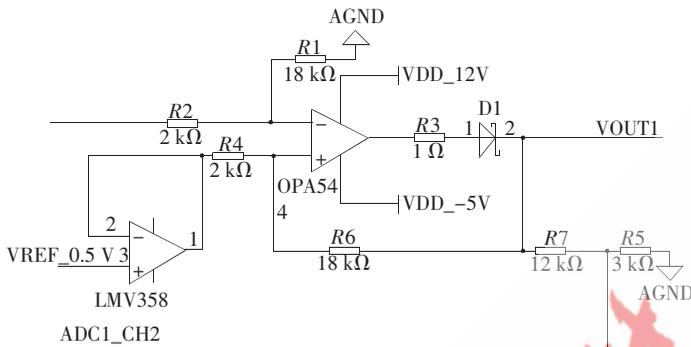


图 2 放大及反馈电路

A/D 以及 D/A 的参考电压为 2.5 V, 由稳压芯片 ISL60002 产生, 其输出精度可达 1 mV, 符合精度要求。由于 STM32 芯片自身的原因, 其 D/A 的最小输出电压为 200 mV, 所以直接放大无法做到 0~10 V 的要求, 因此在放大器反相端增加一个补偿电路, 其补偿值选用 0.5 V, 根据虚短和虚断原理可得等式:

$$\frac{V_{\text{ref}} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_{\text{out}_1} - V_{\text{ref}_{0V5}}}{R_4 + R_5} \cdot R_4 + V_{\text{ref}_{0V5}} \quad (1)$$

将 R_1, R_2, R_3, R_4 值代入上式, 得 $V_{\text{out}_1} = 9V_{\text{dsc}} - 4.5 \text{ V}$, 即当 V_{dsc} 输出为 0.5 V 时, 电源输出电压为 0 V, 从而避开了 D/A 最小输出 200 mV 的限制。输出电压 V_{out_1} 由两个精密电阻分压后作为反馈送回到 STM32 的 A/D 通道, 作为电压自适应调整的硬件环境。由于所用放大器 OPA544 为非轨至轨型放大器, 要得到 0 V 的电压, 必须在其 V-端放置一个负电压, 此设计中选用 -5 V, 由集成开关电源芯片 LM2611 产生, 产生电路如图 3 所示。

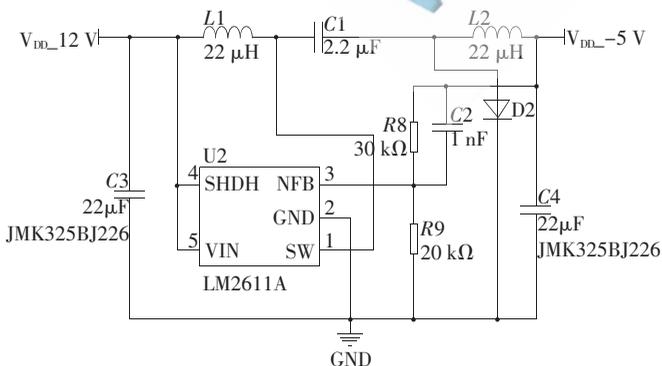


图 3 -5 V 电压产生电路

调整过程中, 首先考虑放大器本身及外围电阻的误差所导致的输出误差; 其次, 由于电源稳定输出的过程中, 负载的变化也会导致输出电压的微小变化, 这时也要快速对输出进行微调以确保在负载变化的情况下也可以稳定输出, 整个调整的过程可以称作自适应的过程。由于所用处理器 STM32F103VET6 最高的处理速度只有 72 MHz, 因此在选择调整算法的时候必须考虑到运算量问题, 如果连续采用运算量较大的算法调整, 必定会影响整个系统的工作效率。本系统采用两种不同的算法, 既会较快地对输出进行调整, 又不会产生太大的运算量。

首先采用的方法是最小二乘法数据拟合算法调整。

最小二乘法数据拟合是曲线拟合的一种, 使用比较简单, 比较适用于在非 DSP 处理芯片中使用, 其主体思想为: 根据 N 个样点拟合一条小于 $(N-1)$ 次的曲线, 并使这条曲线与所有样点的距离平方和最小^[4]。

在此设计中, 使用这个算法做输出前调整。由于开始时实际输出和期望输出的差值会比较大, 如果直接较大幅度及较高频率的跳变有可能会造成尖峰和震荡, 这样从时间和精度上都会为自适应调整过程造成一定的不良影响。所以采用数据曲线拟合的方法, 调整之前, 在目标电压周围采集若干个数据点, 通过这若干个数据点拟合一条曲线, 然后沿曲线向目标电压移动, 次数根据调整幅度确定, 当误差小于 10 mV 的时候停止移动, 并打开保护开关开始向用电器输出电压, 同时启用另一种算法来持续自适应调整, 具体分析步骤如下。

根据已知点数 n 确定一个多项式模型:

$$y = f(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad (m < n - 1) \quad (2)$$

$y = f(x)$ 为关于 x 的 m 次多项式, 将 n 组数据 (x_i, y_i) 代入上式中, 就可得到一个具有 $m+1$ 个未知数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ 的矛盾方程组:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \dots + a_m x_1^m = y_1 \\ a_0 + a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_m x_2^m = y_2 \\ \vdots \\ a_0 + a_1 x_n + a_2 x_n^2 + \dots + a_m x_n^m = y_n \end{cases} \quad (3)$$

如取 $\alpha = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_m)^T, \beta = (y_0, y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, 系数矩阵为:

$$A_{n \times m} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

则矛盾方程组可记为 $A\alpha = \beta$, 其对应的正规方程组为 $A^T A \alpha = A^T \beta$, 又因为 β 为非零向量, 所以方程组的解唯一, 即为最优近似解。此解使得曲线和所有点距离的平方和函数 $Q = \sum_{i=1}^{N-1} \left[\sum_{j=0}^m (a_j x_i - y_i) \right]^2$ 可以取得极小值, 从

而求得的最小二乘法拟合多项式为：

$$A^T A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^m & x_2^m & \cdots & x_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

处理器只需计算正规方程组的系数 n , $\sum_{i=1}^n x_i$, $\sum_{i=1}^n x_i^2$, $\sum_{i=1}^n x_i^3$, \cdots , $\sum_{i=1}^n x_i^m$, \cdots , $\sum_{i=1}^n x_i^{2m}$ 和常数项的各个元素 $\sum_{i=1}^n y_i$, $\sum_{i=1}^n yx_i$, $\sum_{i=1}^n yx_i^2$, \cdots , $\sum_{i=1}^n yx_i^m$ 即可, 这样可以大大节省运算量, 扬长避短, 在没有矩阵处理函数库的 STM32 处理器上发挥其定点运算的能力, 将计算所得的数据代入正规方程组即得一个 $m+1$ 元一次方程组, 未知数即为将要拟合曲线的系数 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_m$, 再经过若干次的乘加基本运算将其求出即可。

倘若将此调整过程看作一个系统, 系统的输入即为上位机要求的电源输出值, 而实际的输出值则为系统的输出。本设计中, 采取 5 个样点来拟合一条二次曲线, 样点的选取根据上位机指令以及实际的硬件参数而定, 选在要求输出值的附近。调整系统的工作流程如图 4 所示。



图 4 调整系统工作流程

(1) 调整前, 若调整系统输入为 V_0 时的实际输出值为 $V_0 + \Delta V$ (通过 A/D 采样得到), 误差为 ΔV , 则输入为 $V_0 - \Delta V$ 时, 输出更接近于理想值。

(2) 为使理想输入值靠近于曲线段中间位置, 选取的 5 个样点的横坐标分别为 $V_0 - 3\Delta V, V_0 - 2\Delta V, V_0 - \Delta V, V_0, V_0 + \Delta V$, 它们的纵坐标分别为与之对应的 A/D 采样值。

(3) 根据上述方法进行数据拟合得到曲线 $y=f(x)$, 再根据要求输出的电压 V_0 , 求出对应的 $x_0=f^{-1}(V_0)$, x_0 即为需要 D/A 输出参数。

为了验证这种方法的可行性, 进行了如下实验：

预设要求电源输出为 6 V, 即调整系统的输入为 6 V, 实验得出, 通过 A/D 采样得调整系统输出为 6.357 V, 误差为 0.357 V, 根据上述方法取 5 个样点, 实验测得这 5 个样点为表 1 所示。

表 1 实验采样样点

i	1	2	3	4	5
x_i	4.929	5.286	5.643	6.000	6.357
y_i	5.302	5.667	6.021	6.375	6.730

通过上述最小二乘法数据拟合原理, STM32 处理器计算出来的拟合曲线为：

$$y=f(x)=-0.01121x^2+1.125x+0.03141 \quad (6)$$

按照要求, 当 $y=6$ 时, 方程的有效解为 $x=5.620$, 此时变换 D/A 输出参数, 将 5.620 V 作为调整系统的输入, 通过 A/D 采样测得实际的输出为 5.996 V, 此时的误差仅为 4 mV, 故证明, 这个调整算法是可行的, 并且在速度和准确度方面都能够得到较好的效果。

上述实验及使用中的多次实践证明, 经过最小二乘法数据拟合方法调整过的输出电压是接近要求值的, 这时打开保护开关, 开始向用电器供电, 然而由于电源从空载到带载转变时, 其输出会产生细微变动, 所以在打开保护开关之前, 启用另外一种算法(二分法), 对输出进行持续的自适应调整, 即不断地根据采样值细微改变输出, 并贯穿于整个工作过程。

这两种算法中, 最小二乘法相对复杂, 运算量较大, 但是调整次数较少, 用在输出之前的幅度较大的自适应调整, 有效避免了电压振荡; 相反, 二分法的运算量相对较少, 适用于在整个工作过程中的自适应调整, 调整频率为 100 Hz, 即每 10 ms 进行一次, 较高的调整频率有效抑制了纹波。

3 过流保护

过流保护是电源设计中非常重要的部分, 当输出过载或者短路的时候, 承担着保护电源本身及用电器的作用。本设计中的过流保护部分采用了软件保护和硬件保护双保险的设计。保护电路如图 5 所示。

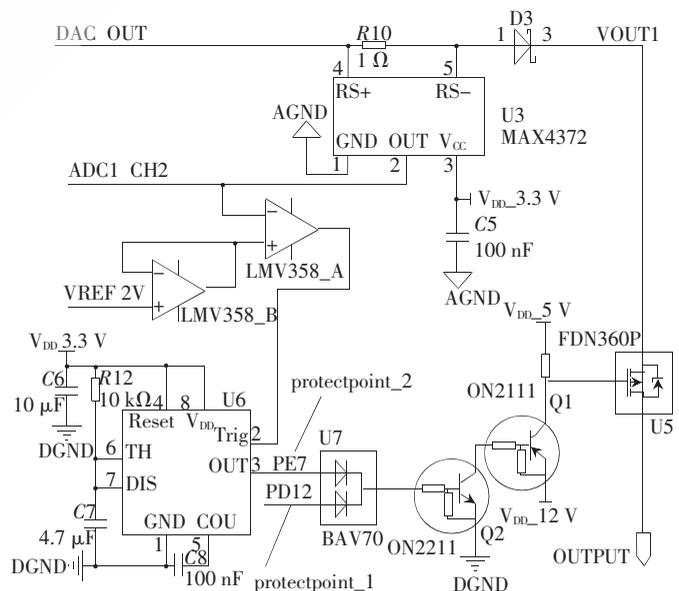


图 5 过流保护电路

通断开关采用 FDN360P, 为单通道 P 型 MOSFET, 其反应时间短及多次导通截止不易损坏的特点, 使其成为此处的最佳选择。软件保护和硬件保护是平行、独立工作的, 任何一个起作用都会使 FDN360P 截止, 停止供电。

(1) protectpoint_1 为软件保护端, MAX4372 为电流放大器^[2], 在此为 10 倍放大 R_{10} 两端的电压, 通过不断扫描 A/D 采样值的方法软件监控电流大小, 采用 A/D 的规则通道 (Regular channel) 以及连续转换模式 (Continuous conversion mode), 这样在电流过大的情况下, 处理器端可以及时检测到。同时启用 A/D 模拟看门狗 (AWD) 功能, 如果采样值大于预设阈值, 则启动软件保护, 即 PD12 置高, FDN360P 截止, 停止输出。

(2) protectpoint_2 为硬件保护端, LMV358 用作电压比较器, TLC555 构成一个单稳态触发器^[3], 当 MAX4372 的输出端电压大于 2 V 时, 即电流超过 1 A, 则比较器输出低电平, 触发单稳态, TLC555 输出为高电平, FDN360P 截止, 停止供电。同时, 电容 C_7 不断充电, 当 V_0 升高到 $2V_{CC}/3$ 时, 输出为低电平, FDN360P 导通, 电源正常供电, 此时如果电流依然过大, 则再次触发保护, 这样就形成了一个不断尝试导通的过程, 直到负载正常为止。此种保护为硬件保护, 反应时间快, 单稳态触发器及 FDN360P 动作时间之和大约 40 ns, 可以有效保护电源本身及用电器的安全。

本系统包含了电压的预设、采样、校准、自适应调整、输出以及保护的软件和硬件的设计, 避免了硬件自

身及外界环境的不良影响。成功将数据拟合及二分法移植到本系统中, 两种算法的巧妙配合大大减少了乘法运算次数, 使其在主频不是很高的小型嵌入式产品上得到实现, 同时调整速度也比使用单一算法调整快。电路设计中, 数字地和模拟地是隔离开的, 很大程度上降低了高频数字信号对电源输出精度的影响。保护电路方面, 软硬件双层保护大大提升了系统的稳定性。系统与远程控制端的接口采用通用的 USB 接口, 使其兼容性更强、应用范围更广。

参考文献

- [1] 张旭, 元学广, 李世光, 等. 基于 STM32 电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 90-93.
- [2] 杨红红, 张琛等. 电流传感放大器 MAX471/MAX472 的原理及应用[J]. 电子技术应用, 2000(2): 64-65, 68.
- [3] 谭琦耀. 基于 555 电路的单稳态触摸开关设计[J]. 煤炭技术, 2012(6).
- [4] 陆毅, 翟丽芳. 基于最小二乘法拟合的热电偶温势特性的虚拟设计[J]. 系统仿真技术, 2010(1): 49-52.
- [5] RM0008 Reference manual. ST Semiconductors. Doc ID 13902 Rev 9.

(收稿日期: 2013-02-06)

作者简介:

郭鹏, 男, 1988 年生, 硕士, 主要研究方向: 智能信号处理。

曲波, 女, 1963 年生, 副教授, 主要研究方向: 智能信号处理。