

一种用于集成电路的片上微调方法

李永红, 兰家隆, 黄顺康, 张允超

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】给出了一种用于电源集成电路的简单实用的片上微调方法。直接运用数学工具抽象出微调的数学模型, 最终仅用电阻与熔丝网络实现了片上微调功能。在集成电路中采用该微调方法使得电路简单, 节省芯片面积, 并缩短量产过程中的测量时间。

关键词 片上微调; 熔丝; 数学模型; 电源集成电路

中图分类号 TN432 TN495 文献标识码 A

A Simple Trimming Method Used in Power IC

LI Yong-hong, LAN Jia-long, HANG Shun-kang, ZHANG Yun-chao

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A very simple trimming method used in power integrated circuit is introduced. Mathematic model is given to describe this kind of trimming problem. The trimming function is achieved by using resistor and fuse network only, which makes circuit simple, saves space in chip and test time in manufacture..

Key words trimming; fuse; mathematic model; power IC

有些模拟集成电路(例如电压基准源、精密稳压器等)对某些参数要求较高的精度, 它们常常需要做片上微调或修正(Trimming)。微调方法有多种, 如采用金属薄膜电阻的激光修正工艺^[1], 该方法工艺成本比较高; 另外也可采用齐纳二极管或者熔丝来做微调^[2]。带加权值的多个微调电路单元级联起来构成的多位(Multi-bit)微调电路通常需要额外的控制电路或记忆单元。本文提出一种用于电源集成电路的新型微调方法, 它不需要增加额外的控制电路或记忆单元而是通过数学计算的方法直接确定最后的电路微调方案。

1 电源芯片中的片上微调问题

典型的DC-DC集成电路中与片上微调有关的部分电路结构, 如图1所示。输出电压 V_{out} 经过电阻 R_b 与 R_a 采样后得到一个反馈电压 V_f , 反馈电压 V_f 与电压基准源进行比较。控制环路最终使得 $V_{out} = kV_{ref}$, 其中 k 为电阻 R_b 与 R_a 的比值, V_{ref} 为基准电压。

电压基准源的输出电压 V_{ref} 由于某种原因假设与期望值有 $\pm 15\%$ 的随机偏差, 但是要求输出电压 V_{out} 能够达到 $\pm 1\%$ 的精度。要实现输出电压的精度要求需要借助于微调电路, 采用调节 k 来满足输出电压的精度要求。在集成电路的设计中 k 实际上只能取一些离散的值 $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ (n 是正整数)。

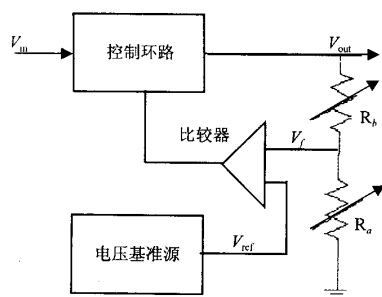


图1 电源芯片微调结构示意图

收稿日期: 2004-03-10

作者简介: 李永红(1979-), 男, 硕士生, 主要从事模拟集成电路设计方面的研究。

2 数学模型及求解

2.1 模型的建立

从实际工程问题可抽象出一个具有普遍意义的数学模型。用数学模型来描述这一问题: 已知: $y=kx$, 设 x 与 y 的目标值(中心值)分别为 x_0 、 y_0 , 1) x 的波动范围为 $\pm a\%$, 即 $x \in A$, $A = \{x \mid x_0(1-a\%) \leq x \leq x_0(1+a\%)\}$; 2) y 的波动范围为 $\pm b\%$, 即 $y \in B$, $B = \{y \mid y_0(1-b\%) \leq y \leq y_0(1+b\%)\}$; 3) a , b 为常数, $0 < b < a < 100$ 。求: 确定所需离散 k 值的最少个数 n , 并求 k 值以使得等式 $y = kx$ 成立。如果记 $k_0 = y_0/x_0$ 则上述模型可进一步转化为: 已知 $y' = kx'$ (现在模型中的 k 等价于原来模型中的 k/k_0 , $x' = x/x_0$, $y' = y/y_0$), 1) $x' \in [1-a\%, 1+a\%]$; 2) $y' \in [1-b\%, 1+b\%]$; 3) a , b 为常数, $0 < b < a < 100$ 。求离散 k 值的最少个数 n 并确定 k 值。

2.2 模型的求解

为了电路的易于实现, 以等差数列的形式选取 n 个 k 值, 记为 $k_1 < k_2 < \dots < k_n$ 。

首先确定 k 的边界。基本思想是: x' 以1为中心上下波动, 当 $x' > 1$ (其最大值为 $1+a\%$)时 k 就取一个小于1的值来补偿 x' 相对于1的偏离程度; 当 $x' < 1$ (其最小值为 $1-a\%$), k 则取一个大于1的值来补偿 x' 相对于1的偏离程度。基于此思想得出下面的边界方程:

$$k_1(1+a\%) - 1 = b\%, \quad 1 - k_n(1-a\%) = b\% \quad (1)$$

因为 $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ 是按等差数列选取的, 所以 k_i 可以用下面的公式表示:

$$k_i = k_1 + (i-1) \cdot \Delta k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中 $\Delta k = (k_n - k_1)/(n-1)$ 。对每一个 k_i , 可确定一个区间 $[x_{i1}, x_{i2}]$ 。 x' 在此区间内波动时, 采用 $k=k_i$ 可满足 $kx' \in [1-b\%, 1+b\%]$ 。即 k_i 可补偿 x' 在此区间内的波动并使其对应的 y' 的波动范围在 $\pm b\%$ 以内。用方程表示为:

$$k_i x_{i1} - 1 = b\%, \quad 1 - k_i x_{i2} = b\% \quad (3)$$

解出 x_{i1}, x_{i2} 得:

$$x_{i1} = (1+b\%)/k_i, \quad x_{i2} = (1-b\%)/k_i \quad (4)$$

利用式(4)对应于 k_1, k_2, \dots, k_n , 共确定了 n 个区间: $[x_{11}, x_{12}] [x_{21}, x_{22}] \dots [x_{n1}, x_{n2}]$ 。观察方程(1)可以发现: $x_{11} = 1+a\%$, $x_{n2} = 1-a\%$ 。于是可以把上述 n 个区间视为对区间 $[1-a\%, 1+a\%]$ 的一种分割。假如这 n 个区间中每两个相邻的区间之间没有空隙, 即如果能够同时满足不等式组:

$$x_{i2} \leq x_{(i+1)1}, \quad x_{i1} \leq x_{(i+1)2}, \quad \dots, \quad x_{i2} \leq x_{(i+1)1}, \quad \dots, \quad x_{(n-1)2} \leq x_{n1} \quad (5)$$

则所选取的 n 个 k_i 的值能够满足模型中对于 x' 与 y' 的约束条件。利用上面的不等式组可以得到 n 的边界。式(4)联合不等式 $x_{i2} \leq x_{(i+1)1}$ 得到:

$$(1-b\%)/k_i \leq (1+b\%)/k_{(i+1)} \quad (6)$$

联合式(1)、(2)求得:

$$k_i = [(1+b\%)/(1+a\%)] + (i-1)\{[(1-b\%)/(1-a\%)] - [(1+b\%)/(1+a\%)]\}/(n-1) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)整理得:

$$n \geq \{[(k_n - k_1)(1+b\%)]/2k_1b\% + 1 + i(k_1 - k_n)/k_1\} \quad (8)$$

观察计算 $(k_1 - k_n)/k_1 = 2(b\% - a\%)/((1+b\%)(1-a\%))$, 因为 $0 < b < a < 100$, 所以 $(k_1 - k_n)/k_1 < 0$ 。因为 $(k_1 - k_n)/k_1$ 总小于0, 故在式(8)中当 i 取其最小值1时不等式右边得到最大值, 同时 n 得到最小值为:

$$n_0 = \left\lceil \frac{(a\% - b\%)(1 - b\%)}{b\%(1 - a\%)(1 + b\%)} + 1 \right\rceil + 1 \quad (9)$$

式中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示按小取整数。得到模型的完全解: k 的最少个数 n_0 由式(9)给出, k 的值由式(7)给出。在实际电路中一般以bit为单位来做微调。如取4 bits, 则有 $2^4=16$ 种组合。假如给出了bits的位数 N 和模型中 a 的值, 反过来也可以根据这两个条件来确定 b 的最小值。即如果给出模型中 x 的精度和用来微调的bits的位数 N , 则可以确定 y 所能达到的最高精度(即 b 的最小值)。

在对式(8)的分析中发现 n 的最小值实际上是在 $i=1$ 的条件下获得的。即在不等式组(5)中如果第一个不等式成立则其余的不等式也必然成立, 这是因为式(8)是基于 $x_{i2} \leq x_{(i+1)1}$ 得来的。所以可以由不等式组(5)中的第一个不等式 $x_{12} \leq x_{21}$ 来确定 b 。用等式 $x_{12} = x_{21}$ 来计算 b 的边界值。联立式(4)、(7), 等式 $x_{12} = x_{21}$ 转化为:

$$c_2 x^2 + c_1 x + c_0 = 0 \quad (10)$$

式中 $c_2 = 2 - 2/[(1-a\%)(n-1)]$, $c_1 = 2 + 2(1+a\%)/[(1-a\%)(n-1)]$, $c_0 = -2a\%/[(1-a\%)(n-1)]$, $x = b\%$ 。其中 $n=2^N$, N 为用来做微调的bits位数。解出方程(10)的两个根其中必然有一个为正根, 一个为负根(舍弃), 这个正根即为 $b\%$ 的边界值, 也就是采用 N 个bits做微调以后模型中 y 所能达到的最高精度。如取 $N=5$, $a\%=15\%$, 由式(10)解得两个根 $x_1=0.00543$, $x_2=-1.09024$ 。则 x_1 即为 b 的边界值, $b\% = 0.543\%$ 。

3 微调电路的实现

通过对数学模型的分析发现, 只需在模型 $y=kx$ 中取 $k_0=y_0/x_0=V_{OUT}/V_{REF}$, $a\%=15\%$, $b\%=1\%$, 其中 V_{OUT} 是输出电压的期望值, V_{REF} 是在设计集成电路的过程中对基准源电压的期望值。利用式(9)计算得到 $n_0=18$, 由于 $2^4 < 18 < 2^5$, 所以在电路中需要采用5个bits作微调(即 k 的个数 n 取32)。用图2所示电路来实现DC-DC的片上微调。图中 R_x 、 $2R_x$ 、 $4R_x$ 、 $8R_x$ 、 $16R_x$ 是用来实现微调功能的电阻, 与它们相并联的是熔丝(Fuse)。这样利用5个熔丝得到32种组合, 可以用下式来表示:

$$V_{out} = \frac{R_b + R_a + nR_x}{R_a} V_{ref} \quad n=0,1,\dots,31 \quad (11)$$

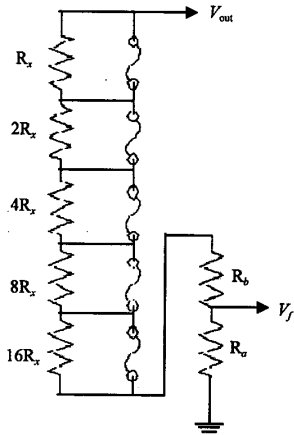


图2 微调电路

式中 $(R_b+R_a+nR_x)/R_a$ 对应于模型 $y=kx$ 中的 k 。根据电路要求选定 R_a 的阻值后, 利用式(7), 则 R_b 、 R_x 的值也就随之确定了。在没有对熔丝做熔断前, 所有芯片的输出电压与基准电压的关系都满足: $V_{out} = (R_b + R_a) V_{ref} / R_a$, 测量此时的 V_{out} 记为 V_{α} 。 V_{ref} 对应于模型 $y=kx$ 中的 x , $x' = V_{ref}/V_{REF}$ 。 $V_{\alpha} = x' V_{REF} (R_a + R_b) / R_a$ 。根据求出的32个 k_i 的值, 由式(4)将 x' 划分为32个区间, 相应地 V_{α} 也被划分为这32个区间。实际测量出的 V_{α} 必然落入这32个区间中的一个, 找出这个区间对应的 k_i , 也就确定了需要对哪几个熔丝做熔断。可以看出只需对输出电压测量一次即可以确定熔断方案。

4 误差分析

在前面的分析中一直将模型中的 k 当作理想值来处理。从微调电路的实现可以看出, k 是电阻与电阻之间的比值。实际工艺中这个比值存在一定的误差并且会影响输出电压的精度。在做了片上微调后,

$$V_{out} = [(R_b + R_a + nR_x) / R_a] V_{ref} = [(R_b + R_a + nR_x) / R_a] [R_a / (R_b + R_a)] V_{\alpha} = [1 + nR_x / (R_b + R_a)] V_{\alpha} \quad (12)$$

记 $\lambda = R_x / (R_b + R_a)$, 将式(12)对 λ 求微分后整理得到 $\Delta V_{out} / V_{out} = (\Delta \lambda / \lambda) [n\lambda / (1 + n\lambda)]$, 可见 $n\lambda$ 越小则由电阻比值 λ 带来的误差也越小。片上微调方法对于基准源的温度误差是不能够补偿的, 输出电压所能够达到的精度最终将受限制于电阻之间的匹配误差和基准源的温度系数。

5 结论

本文提出的片上微调方法仅利用电阻与熔丝网络, 不需要增加额外的控制电路或记忆单元, 而是通过数学计算的方法来实现电源集成电路的多位片上微调, 使电路的实现以及芯片的测量步骤非常简单, 模型具有一定的代表性。

参考文献

- [1] 朱正涌. 半导体集成电路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [2] Nelson, Carl T. Multiple trim structure[P]. US Patent, Int. CL: H01L 027/02, 4412241, 1983-10-25