

# ZJ03 高速高精度锁定电压比较器的设计\* \*\*

毛培法 江来喜

(浙江工学院,杭州)

**摘要** 本文介绍一种新型的取样锁定电压比较器 ZJ03 的设计。一般的电压比较器由多级直接耦合放大器组成,其精度(灵敏度)主要取决于总电压增益,响应速度取决于总带宽,精度与响应速度是矛盾的,难以实现高速和高精度。ZJ03 在体制上有重要的改进,它含有一级受控的正反馈放大器,使精度主要取决于输入失调电压,与总带宽几乎没有关系,可实现高速和高精度。在 ZJ03 的设计中,采用了容差扩展、中心设计和电平自适应技术,提高了产品性能的一致性和成品率。

**关键词** 电压比较器;取样锁定电压比较器;容差扩展;电平自适应

## 1. 引言

电压比较器是各种电子仪器、通信设备、雷达、计算机和各种数字信号处理装置中不可缺少的关键部件。自从 Widlar<sup>[1]</sup> 研制出第一代集成电压比较器  $\mu A710$  和  $\mu A711$  以来,现在已有近百种电压比较器型号。随着科学技术的发展,用户对电压比较器的要求不断提高,主要是:(1) 进一步提高灵敏度(精度);(2) 进一步提高响应速度或缩短延迟时间;(3) 进一步扩大功能。针对上述要求,我们设计并研制出高速电压比较器 XD521 和 FBC01 (ZJ01)<sup>[2]</sup>,它们已被广泛应用。这两种电压比较器的延迟时间均达到 10ns 量级,但灵敏度只为 5—10mV,仍不能满足高速高精度的要求。本文介绍的 ZJ03 高速高精度电压比较器,采用了受控的正反馈取样锁定电路,其灵敏度只取决于输入失调电压,因此可使比较器的灵敏度提高一至两个数量级,同时实现高速高精度。此外,ZJ03 电压比较器还具有信息存贮和互补输出等多种功能,适用面很广。在 ZJ03 的线路设计中,我们采用了容差扩展和中心设计技术<sup>[3,4]</sup>,在同样的电路规模、材料和工艺条件下,ZJ03的成品率比 FC82( $\mu A711$ )高两倍,取得了明显的经济效益。

## 2. 线路设计

ZJ03 取样锁定电压比较器由四部分组成,如图 1 所示。输入级是一级差分放大器,要

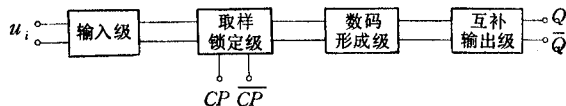


图 1 取样锁定电压比较器组成图

\* 1989年4月25日收到,1989年10月23日修改定稿。

\*\* 国家自然科学基金资助项目。

求其输入阻抗高、失调电压和失调电流小、响应速度快、温度稳定性好。取样之前的信号经输入级放大后,加到取样锁定级。取样锁定级的输出加到数码形成级,形成与 TTL 兼容的数码输出。末级为互补输出级,它提供有一定功率的互补输出数字信号。

取样锁定电压比较器的核心部分是取样锁定级,其电路形式如图 2 所示。 $T_1$  与  $T_2$  构成差分对,射极接到  $T_6$ ;  $T_3$  与  $T_4$  构成差分对,射极接到  $T_5$ ;  $T_5$  与  $T_6$  也构成差分对,射极接到恒流源  $I$ 。时钟信号  $CP$  和  $\overline{CP}$  用来控制取样锁定级的状态转换。当  $CP$  为 0,  $\overline{CP}$  为 1 时,差分对  $T_1, T_2$  工作,经输入级放大后的信号加到  $T_1, T_2$  差分放大器输入端,放大后在集电极电阻  $R_c$  上形成电压。当  $CP$  从 0 变成 1,  $\overline{CP}$  从 1 变成 0 时,差分对  $T_3, T_4$  工作,  $T_1, T_2$  截止,由于  $T_3$  集电极与  $T_4$  基极连接,  $T_4$  集电极与  $T_3$  基极连接,形成了正反馈作用。因正反馈作用,差分对  $T_1, T_2$  集电极很微小的差模信号就可使差分对  $T_3, T_4$  进入正反馈触发状态,实现取样锁定功能。当  $CP$  从 1 变成 0,  $\overline{CP}$  从 0 变成 1 时,差分对  $T_1, T_2$  又恢复工作,其余以此重复。

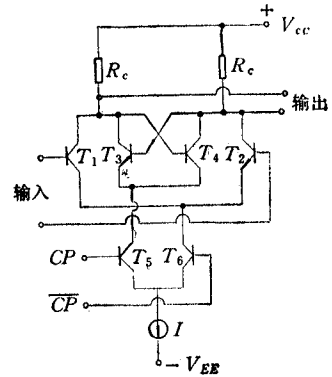


图 2 取样锁定级电路图

在线路设计中,我们采用了容差扩展、中心设计和电平自适应等技术,以降低线路对工艺的要求,提高产品的成品率和参数的一致性。

一个电路通常有一组(如  $n$  个)应用参数,我们用  $n$  维向量  $R^n$  表示,

$$R^n = [R_1, R_2, \dots, R_n]^T, \quad (1)$$

系统的元件参数用  $m$  维向量  $E^m$  表示,

$$E^m = [E_1, E_2, \dots, E_m]^T \quad (2)$$

应用参数是元件参数的函数。当应用参数  $R^n$  限定在一个规定范围  $R_r^n$  时,对应的元件参数也有一个相应的范围  $E_r^m$ 。通常称  $E_r^m$  为元件参数的误差容限,简称容限。扩大容限可降低电路对工艺的要求,或在一定的工艺条件下提高合格率。然而,由于应用参数和元件参数的维数都很多,且关系较复杂,直接求解相当困难。我们从实用的角度筛选关键的应用参数,并在允许的近似条件下,建立应用参数的微变量  $r$  与元件参数微变量  $e$  的线性关系,即

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1m} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)式中,  $K_{ij}$  大表示应用参数随元件参数变化大,  $K_{ij} < 0$ , 表示该项有相消作用。容差扩展的基本思想是扩大  $K_{ij}$  小的系数的数量,充分利用  $K_{ij} < 0$  的相消作用。欲达此目的,需从线路结构、元件参数、工作状态等多方面考虑。显然,(3)式还可用于确定容差,实现中心设计。

为扩大输出低电平的噪声容限,可采用降低输出低电平值的方法,但这使输出截止延迟时间  $t_{pHL}$  增长。本项目采用电平自适应技术来扩大噪声容限,其基本原理是适当设计

末级差放的参数,使前一级从电源  $V_{CC}$  输入的噪声与末级集电极从电源  $V_{CC}$  引入的噪声相消。另外,还采用了必要的温补措施,以稳定容限域及其中心。

由于采用以上措施, ZJ03 比较器有以下突出的优点: (1) 对工艺要求降低,合格率提高。研制结果表明,在常规工艺下,方块电阻偏离设计值  $\pm 30\%$ ,全部参数仍符合原定的规范,且芯片合格率达 90% 左右。(2) 参数一致性好,同批产品的传输延迟时间方均根误差小于 1ns。(3) 参数稳定性好。

### 3. 版图和工艺设计

ZJ03 比较器采用常规工艺,其有关的参数和版图设计如下:

(1) 器件参数选择 (a) 晶体管的特征频率  $f_T$ : 考虑到当前的工艺水平和比较器的高速特点,取  $f_T \geq 500\text{MHz}$ 。在构成  $f_T$  的四个时间常数中,当  $f_T < 1000\text{MHz}$  时主要是基区渡越时间,集电极延迟时间和发射结延迟时间。因此,在满足发射结反向击穿电压  $BV_{cbo} = 7\text{V}$  的前提下,使基区宽度尽量窄,结面积尽可能小。(b) 晶体管共射电流放大倍数  $\beta$ : 为减小输入电流,增大总电压放大倍数,在管芯设计和工艺上采取措施,使  $\beta \geq 150$ 。(c) 外延层电阻率和厚度  $w_c$ : 考虑到击穿、 $f_T$  和外延层缺陷等因素,取外延层电阻率  $\rho_c = 1.0-1.5\Omega \cdot \text{cm}$ ,厚度  $w_c$  为  $10\mu\text{m}$  左右。

(2) 版图设计 版图设计要正确反映线路的要求,并尽量发挥集成技术的优点,以提高电路的性能。另外,版图尺寸要考虑到工艺水平和合格率。考虑到电压比较器的输入失调电压和输入失调电流要尽可能小,输入级和控制级的发射区都采用圆形结构。在总体布局方面,考虑到热量的均匀分布和对称性。版图的尺寸以  $5\mu\text{m}$  精度为基础。

(3) 工艺参数要求 (a) 衬底材料: 衬底材料采用  $p$  型硅半导体,电阻率  $\rho = 8-13\Omega \cdot \text{cm}$ 。(b) 隐埋层: 氧化层厚度  $\delta_1 \geq 1\mu\text{m}$ ; 扩散方块电阻  $R_{\square} \leq 20\Omega/\square$ ; 击穿电压  $BV_{bc} \geq 100\text{V}$  (在  $100\mu\text{A}$  下)。(c) 外延: 电阻率  $\rho_c = 1.0-1.5\Omega \cdot \text{cm}$ ; 厚度  $w_c = 8-10\mu\text{m}$ ; 层错密度  $\leq 10^3/\text{cm}^2$ 。(d) 隔离: 氧化层厚度  $\delta_2 = 7000-8000\text{\AA}$ ; 扩散预沉积方块电阻  $R_{\square} \leq 10\Omega \cdot \text{cm}$ ; 击穿电压  $BV_{cs} \geq 80\text{V}$  (在  $100\mu\text{A}$  下)。(e) 基区: 氧化层厚度  $\delta_3 = 6000-7000\text{\AA}$ ; 基区扩散方块电阻  $R_{\square} = 180-200\Omega/\square$ ; 扩散深度  $x_j = 2.0-2.5\mu\text{m}$ ; 击穿电压  $BV_{bc} \geq 60\text{V}$  (在  $100\mu\text{A}$  下)。(f) 发射区:  $BV_{cbo} = 7.0-7.2\text{V}$  (在  $100\mu\text{A}$  下);  $BV_{cso} \geq 20\text{V}$  (在  $100\mu\text{A}$  下);  $\beta \geq 150$ 。

由于采取了上述措施,ZJ03 比较器的技术参数达到了较理想的结果。表 1—3 分别表示其输入失调电压  $V_{IO}$ 、输入失调电流  $I_{IO}$  和输入偏置电流  $I_{IB}$  的统计分布,供统计的样品是同批的 520 只 ZJ03 比较器。

表 1 输入失调电压  $V_{IO}$  分布

$V_{IO}$ 的数值	比较器数量	百分比(%)	说 明
小于 1.0mV	314	60.4	其它技术指标均合格
1.0—2.0mV	151	29.1	
2.0—5.0mV	46	8.8	
高于 5.0mV	9	1.7	

表 2 输入失调电流  $I_{I0}$  分布

$I_{I0}$ 的数值	比较器数量	百分比(%)	说 明
小于 $0.6\mu\text{A}$	187	73.1	其它技术指标均合格
$0.6-1.0\mu\text{A}$	49	19.1	
$1.0-1.5\mu\text{A}$	19	7.4	
大于 $1.5\mu\text{A}$	1	0.4	

表 3 输入偏置电流  $I_{IB}$  分布

$I_{IB}$ 的数值	比较器数量	百分比(%)	说 明
小于 $3\mu\text{A}$	171	66.8	其它技术指标均合格
$3-4\mu\text{A}$	72	28.1	
$4-5\mu\text{A}$	13	5.1	
大于 $5\mu\text{A}$	0	0	

从上面 3 个表的统计数据可看出, 本产品不仅合格率高, 而且参数一致性好。例如, 失调电压  $V_{I0}$  小于  $1\text{mV}$  者占 60% 以上, 失调电流  $I_{I0}$  小于  $0.6\mu\text{A}$  者占 73.1%。

与一般电压比较器相比, ZJ03 电压比较器最本质的特点是其灵敏度只与输入失调电压有关。理论上讲, 当输入失调电压为零伏时, 只要有微小的差模信号输入即可使第二级处于不平衡状态, 这时若加入时钟信号 ( $CP$  从低电平升到高电平,  $\overline{CP}$  从高电平降到低电平), 第二级便进入取样锁定状态。然而, 由于输入失调电压不为零伏, 故输入信号需补偿掉输入失调电压才有可能推动第二级。因此, 取样锁定电压比较器的灵敏度电压  $V_s$  近似等于其输入失调电压。严格地讲, 其灵敏度电压可由下式计算出来。

$$V_s = (V_{I01} + V_{I02}/A_{v1}) \quad (4)$$

(4) 式中,  $V_{I01}$  为第一级输入失调电压,  $A_{v1}$  为第一级电压放大倍数,  $V_{I02}$  为第二级输入失调电压。通常  $V_{I01} \approx V_{I02}$ ,  $A_{v1} \gg 1$ , 故有近似式

$$V_s \approx V_{I01} \quad (5)$$

取样锁定电压比较器的这一特点十分重要, 它突破了电压比较器灵敏度受电压放大倍数的限制。经精心设计, 输入失调电压  $V_{I0}$  可做到  $0.1\text{mV}$  以下, 这就使取样锁定电压比较器灵敏度比普通比较器高近两个数量级。另外, 取样端和互补输出端的引入使其扩大

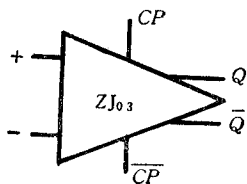


图 3 ZJ03 比较器的框图

了功能,增加了应用的灵活性。图3是ZJ03比较器的框图。由于这种电压比较器具有高速、高精度和多功能的特点,其用途比普通比较器更广泛。

### 参 考 文 献

- [1] R. I. Widlar, *Electronic Design*, **13**(1965)5, 20—27.
- [2] 毛培法,电子科学技术,1981年,第1期,第17—18页.
- [3] K.J. Antreich, R.K. Koblitz A New Approach to Design Centering Based on a Multiparameter Yield Prediction Formula, Proc. IEEE, IOCAS, (1980), pp.886—889.
- [4] 于晓勇,朱辉,电子科学学刊, **8**(1986)3,169—179.

## THE DESIGN OF THE HIGH SPEED AND HIGH PRECISION LATCHING VOLTAGE COMPARATOR ZJ03

Mao Peifa Jiang Laixi

(Zhejiang Institute of Technology, Hangzhou)

**Abstract** The design of a new type of sampling latching voltage comparator ZJ03 is described. The common voltage comparators consist of multistage DC amplifier. It is difficult to realize high speed and high precision. The voltage comparator ZJ03 contains a controlled positive feedback amplifier. Therefore, it is capable of realizing high speed and high precision. For improving the performance and yield, the tolerance extension, design centering and potential adapting are used for the design of the valtage comparator ZJ03.

**Key words** Voltage comparator; Sampling latching voltage comparator; Tolerance extension, Design centering; Potential adapting