

固体集成电路开关时间测试

北京电子管厂仪表研制小组编

机械工业出版社

本文是北京电子管厂仪器研制小组的工人同志们集体编写的。全文共分四章，首先论述了固体集成电路开关时间的基本概念，接着对常用的测试方法——示波器比较法和频率计法作了概要叙述。文章的重点是谈他们自己试制成功的平均传输时延数字显示分数仪。该仪器克服了上述方法的测速慢，精度低的缺点，测试结果可直接进行数字显示和自动分类。为了便于有关单位设计参考，作者详细地介绍了仪器的电路结构，并列出了所用电子元件的型号和规格。

本文除供有关设计人员参考外，还可供从事固体集成电路生产，检验的工人和技术人员阅读。

固体集成电路开关时间测试

北京电子管厂仪表研制小组编

(只限国内发行)

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/32·印张2 ·字数35千字
1971年7月北京第一版·1971年7月北京第一次印刷

*

统一书号: 15033·(内)434·定价 0.20 元

前 言

波澜壮阔的无产阶级文化大革命，以极其雄伟的力量推动着我国社会主义建设事业的蓬勃发展。在毛主席“**工人阶级必须领导一切**”的伟大号召下，我国工人阶级高举毛泽东思想伟大红旗，昂首阔步登上了上层建筑斗、批、改的政治舞台，狠批了叛徒、内奸、工贼刘少奇的“洋奴哲学”、“爬行主义”、“专家路线”等反革命修正主义路线。满怀为伟大领袖毛主席争光，为伟大的社会主义祖国争光的豪情壮志，在大搞技术革新，技术革命的群众运动中，创造出丰硕成果。

集成电路自六十年代出现以来，已成为电子设备小型化和提高工作可靠性的重要技术途径。近年来，它在国防工业，工业生产自动化、科学研究及医疗器械等方面都得到广泛地应用。尤其在电子计算技术方面，更显现出它的优越性。

目前，有关单位都在进行集成电路的大批量生产，但测试开关时间多半采用示波器比较法和频率计法。这两种方法，前者测速慢，操作麻烦，精度差；后者虽测速和精度有所提高，但仍不能直接读出平均传输时延的数值，也不能自动分类。显然，这与目前的生产状况是不相应的。为了解决这个矛盾，我们遵循毛主席“**必须打破常规，尽量采用先进技术**”和“**人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进**”的伟大教导，在吸取兄弟单位先进经验的基础上，初步试制成功了一种集成电路平均传

输时延 t_{pd} 数字显示分类仪。它不但能够直读平均传输时延的具体数字，还能够按固体集成电路的要求进行分类显示。同时，其测试速度和精度与示波器比较法和频率计法相比都有很大提高。

本文除对开关时间的概念和常用的示波器比较法、频率计法做了较全面的论述外，重点介绍了平均传输时延 t_{pd} 数字显示分类仪的工作原理及其电路结构，并列出了仪器的技术性能和所用元件的规格型号，以便兄弟单位参考。

由于我们活学活用毛主席著作不够，技术水平不高，实践经验又不多，本文一定会存在不少缺点，热忱希望读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 开关时间	1
1.2.1 晶体管的开关特性	2
1.2.2 晶体管的瞬态响应	3
1.2.3 开关定义及速度	6
1.2.4 平均传输时延 t_{pd}	7
1.3 平均传输延时时间的测试	8
1.3.1 示波器比较法	9
1.3.2 频率计法	12
1.4 固体集成电路 t_{pd} 数字显示分类仪的特点	16
第二章 t_{pd} 数字显示分类仪	18
2.1 工作原理	18
2.2 仪器原理方块图简介	21
第三章 电路介绍	31
3.1 环形振荡器小盒	31
3.2 分频器插板	32
3.3 单脉冲取样电路	36
3.4 时标振荡器及扣除电路	39
3.5 计数器	40
3.6 分类电路	44
3.7 字码显示电路	47
3.8 电源	49
3.9 总电路原理图	50
第四章 主要技术性能	53
附录 1 元件一览表	53

第一章 概 述

1.1 引 言

目前,对晶体管及固体集成电路的开关时间的测量,不外乎示波器比较法和频率计法两种。示波器比较法通常用的最多。但是,这种测量方法速度慢,操作麻烦,不适用大量的流水生产的需要。而频率计法则克服了上述的缺陷,具有精度高,速度快等优点,然而此种方法不能直接读出平均传输时延 t_{pd} 的数值,必须经过换算方能求出,仍不能令人满意。固体集成电路的交流考核参数 t_{pd} 的数字显示分类仪,则在频率计法的基础上,经过变换,不但可以直接读出平均传输时延,还可以同时进行分类。固体集成电路 t_{pd} 数字显示分类仪解决了时间直读的问题,也给固体集成电路流水性生产提供了方便条件。固体集成电路 t_{pd} 数字显示分类仪,利用时间——频率变换的特点,它的数字输出,可以直接用打印机记录下来,也可以送入计算机进行数据处理,或者其他设备配合组成自动生产线的一部分。

1.2 开 关 时 间

开关时间是描述晶体管或晶体管组成的电路在大讯号工作时的重要参数。

开关是指电路具有在“断”时呈现高电阻,“通”时呈现低电阻的性质,晶体管的这种作用,称为晶体管的开关运用。

1.2.1 晶体管的开关特性

图 1-1 表示晶体管发射极接地时的集电极电压—电流特性曲线，其可分成三个区域。

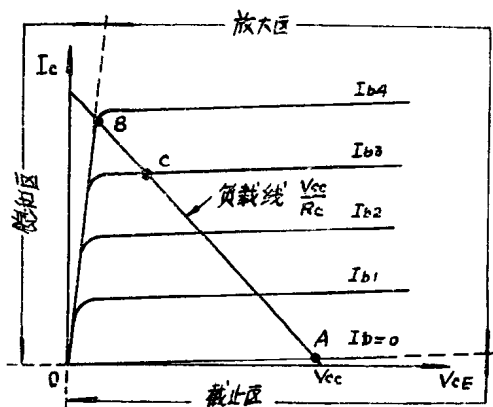


图1-1 晶体管的 V_{CE} - I_c 特性。

截止区：对应于图 1-1 基极电流 $I_b=0$ 的下面部分，此时发射极、集电极均处于反向工作状态。

饱和区：对应于图 1-1 的 OB 线的左面部分。这时发射极、集电极均处于正向工作状态。

放大区：介乎上述两区域之间，此时发射极处于正向，集电极处于反向。在这个区域内，晶体管输入输出电流 (I_b 、 I_c) 具有线性关系。

晶体管工作在截止区时称关态，工作在饱和区称开态。现在如果把图 1-2 的开关 K 倒向 a 边，晶体管的基极、发射极之间加上一反向偏压，这时 $I_b=0$ ，集电极电流 $I_c=I_{co}$ ，所以集电极上只有集电极、发射极间的泄漏电流 I_{co} 流过。在负载电

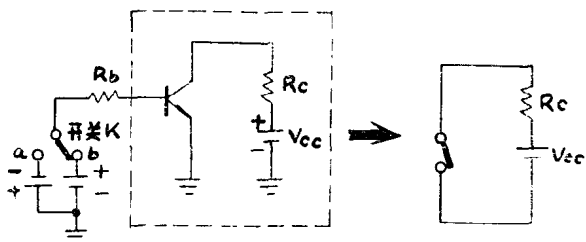


图1-2 晶体管开关电路。

阻 R_c 上的压降很小，集电极电压接近电源电压，晶体管呈现高阻抗 ($10^7 \Omega$ 以上)，好似打开的开关。

当把开关 K 倒向 b 边，基极、发射极间就加上正向偏压，基极上有注入电流 I_b 。若 $I_b > \frac{I_c}{\beta}$ ，则集电极电流与 I_b 的大小无关，近似由外电路 V_{cc} 和 R_c 决定，即

$$I_c \approx \frac{V_{cc}}{R_c}$$

这时晶体管完全处于导通状态，集电极上压降很小 ($0.1V$)。晶体管处于低阻抗 ($\sim \Omega$)，则好像是接通的开关。由于两种情况的管子的阻抗比约为 10^6 数量级，所以晶体管的开关特性是很好的，而且晶体管开关没有机械磨损，单位时间内开关次数可达 $10^7/S$ ，故机械开关和它是无法比拟的。

1.2.2 晶体管的瞬态响应

在图 1-3 中的共发射极电路的输入端加一理想方波，当基极电压发生突变时，基极电流也有突变。但是，集电极电流不能突变，须经过一定的时延 t_{d1} 方能达到饱和电流 I_{cs} 。时延 t_{d1} 的产生是由于发射极注入的电子到基极去，而集电

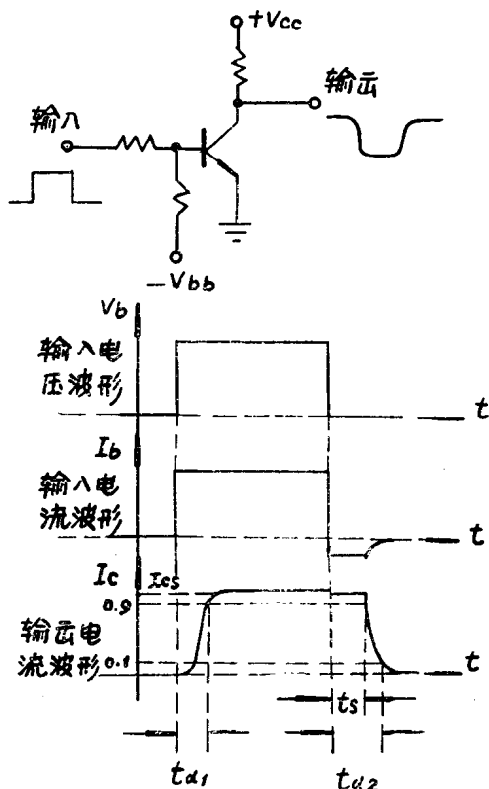


图1-3 晶体管的脉冲响应。

极、基极间的压降主要发生在这个 PN 结本身两边很小的区域中，基极区域中的绝大部分的电位梯度很小，没有加速场存在。电子穿过基极是以扩散形式运动到集电极，而穿过整个基极区的路程又各异，所以发射极注入的电子欲全部到达集电极是需要一定时间的，这就导致了输出和输入间的时延。（不计输入电容的影响）。

如果晶体管工作在导通状态，基极电压突然消失时，集

电极电流却不能马上消失，也要经过一定的时间方能按指数下降至零，这个时间我们称其为存贮时间 t_s 。晶体管工作在饱和区时，集电极处于正向，于是它和发射极具有同样的性能，向基极区注入电子，此时集电极电流不再受基极电流的控制，在基极区产生了电子过剩（称其为存贮效应）。在集电极和基极形成的 PN 结的边界处，电子浓度 $\ll 0$ （见图1-4所示）。这时如果迅速去掉输入电流，使晶体管截止，但因存贮在基极区内的电子并不能马上消失，一部分电子向集电极扩散运动，形成外电路电流，另一部分在基极通过复合以至消失，这段时延便是我们所说的存贮时间 t_s 。

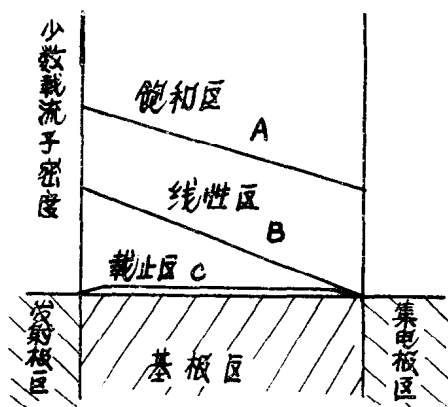


图1-4 基极内少数载流子密度。

现在来比较一下晶体管截止、线性、饱和各区中基极内少数载流子的密度。如图1-4所示，在截止区内，集电结（集电极和基极间的 PN 结）和发射结（发射极和基极间的 PN 结）均加的是反向偏压，基极区内的少数载流子密度是非常小的，如图1-4中C线所示。

而线性区（放大区），发射结是加正向偏压，集电结加反

向偏压，故载流子密度靠发射极一侧高，靠集电极一侧几乎为零，如图1-4中B线所示。

在饱和区内，发射结和集电结都是正向偏压，所以基极区内的少数载流子密度都非常大，如图1-4中C线所示。

1.2.3 开关定义及速度

从图1-5就可以来定义晶体管在开关运用时的四个开关参数：

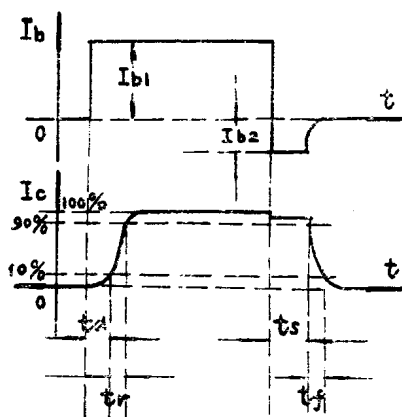


图1-5 开关时间波形图。

t_d (延时时间)：

从输入电压波形上升10%点到集电极输出电流波形上升10%点之间的时间。

t_r (上升时间)：

集电极输出的电流波形从10%点上升到90%点间的时间。

t_s (存贮时间)：

输入电压波形的下降沿90%点到输出电流下降

沿90%点之间的时间。

t_f (下降时间)：集电极输出电流波形下降沿90%点到下降沿10%点间的时间。

$$t_{on} = t_d + t_r$$

$$t_{off} = t_s + t_f$$

t_{on} ：延时时间 (t_d) 与上升时间 (t_r) 之和，统称为开启时间。

t_{off} : 存贮时间 (t_s) 与上升时间 (t_f) 之和, 统称为截止时间。

在晶体管脉冲电路的输入端加上一矩形脉冲电压, 输出端就得到某一延时时间的形波。图 1-5 中 t_d 、 t_r 、 t_s 、 t_f 统称为开关时间。

其中 t_r 和 t_f 主要是由于 α 截止频率引起的; t_s 是由少数载流子存贮效应引起的; 显然, 要想得到高的开关速度, 必须设法减小 t_s 。

晶体管在发射极接地时的开关时间由下式给出

$$t_{on} = \frac{1}{(1 - \alpha_N) \omega_N} \ln \frac{\beta_N \cdot I_{b1}}{\beta I_{b1} - 0.9 I_c}$$

$$t_s = \frac{\omega_N + \omega_1}{\omega_N \cdot \omega_1 (1 - \alpha_N \cdot \alpha_1)} \ln \frac{(I_{b1} - I_{b2}) \beta_N}{I_c - \beta_N I_{a2}}$$

$$t_f = \frac{1}{(1 - \alpha_N) \omega_N} \ln \frac{I_c - \beta_N I_{b2}}{0.1 I_c - \beta_N I_{b2}}$$

公式中的 ω_N 和 ω_1 是分别代表 α_N 和 α_1 的截止角频率。 I_{b1} 和 I_{b2} 分别为正向基极电流和反向基极电流。 β_N 代表发射极接地时电流放大系数。

由上式可知 t_{on} 、 t_s 、 t_f 和正向电流 I_{b1} 、反向电流 I_{b2} 有很大关系的。

要缩短上升时间 t_{on} 最好增加 I_{b1} ; 要缩短存贮时间 t_s 就需减小 I_{b1} 并增大 I_{b2} ; 要减少下降时间 t_f 最好增加 I_{b2} 。综合起来考虑, 为了减少全部开关时间, 同时把 I_{b1} 和 I_{b2} 选大一些则是有利的。

1.2.4 平均传输延时 t_{pd}

t_{pd} : 为通导延时时间 t_{d1} 和存贮延时时间 t_{d2} 的平均值。

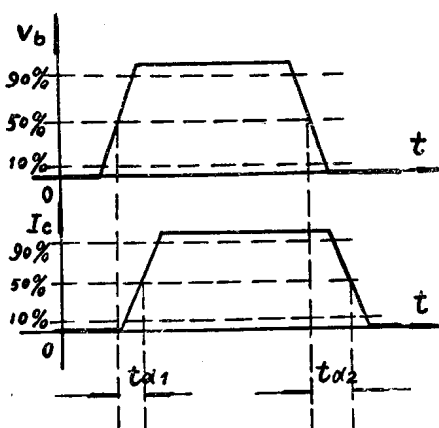


图1-6 输入输出波形图。

$$t_{pd} = \frac{t_{d1} + t_{d2}}{2} = \frac{t_d + \frac{1}{2}t_r + t_s + \frac{1}{2}t_f}{2}$$

$$\text{其中: } t_{d1} = t_d + \frac{1}{2}t_r, \quad t_{d2} = t_s + \frac{1}{2}t_f。$$

t_{d1} : 以输入电压波形上升沿的50%点起到输出电流波形上升沿的50%点止的时间为通导延时时间。

t_{d2} : 以输入电压波形下降沿的50%点起到输出电流波形下降沿的50%点止的时间称为存贮延时时间。

1.3 平均传输延时时间的测试

上面我们已把晶体管的开关时间的概念建立起来了，现在就讨论固体集成电路的交流参数的测试问题。

所谓固体集成电路就是在一块晶片上制出多个有源元件（二极管、三极管）和无源元件（电阻、电容等），并把它

们连接而构成的特定电路。随着电子计算机广泛的应用和发展, 固体集成电路需要量日益巨增, 尤其是数字固体集成电路, 它是处理诸如“1”、“0”等的数字量, 故电路元件特性的容许偏差较大, 易于实现集成电路化, 所以数字固体集成电路是现在半导体集成电路的最大应用领域。

数字电路的基本型式是“与”“或”“非”构成的逻辑门电路和由触器构成的存贮电路, 将二者组合, 原则上就可构成所有类型的数字电路。目前广泛应用的是“与非”及“或非”电路的门电路型式, 利用“与非”及“或非”门电路的组合, 可以获得“与”“或”“非”各种逻辑功能, 从而简化了电路。下面所要谈的就是这种门电路的交流特性测量方法。

量方法。

交流特性中最重要的是门电路的平均传输时延 t_{pd} , 常用此作为比较各种电路开关速度的标准。目前测量 t_{pd} 不外乎示波器法和频率计法两种。

1.3.1 示波器比较法

图 1-7 所示是使用普通的脉冲发生器的测量电路。脉冲发生器的输出脉冲加至被测电路的输入端, 被测电路的负载是用相同的门电路

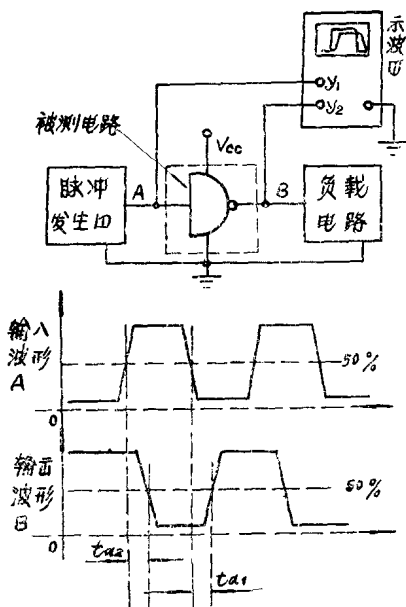


图 1-7 t_{pd} 测试波形图。

接成,其负载门的个数取决于被测电路的负载能力。将被测电路的输入端波形及输出端的波形分别接至双迹示波器的 Y_1 、 Y_2 两个端子,则在示波器的荧光屏上显示出输入及输出两个波形相对的时延。按照平均传输延时时间的定义可求出:

$$t_{pd} = \frac{t_{d1} + t_{d2}}{2}$$

测量开关特性时,必须考虑以下几个参数:输出端数、接线引起的附加电容 C_0 、电源电压和环境温度。另外,还须规定输入脉冲的上升和下降时间、重复频率、脉冲宽度、电平等。

来自脉冲发生器的信号,直接加至被测电路的输入端,对了解电路实际使用状态下的时延来说是不合适的,因为在电子计算机及其他自动控制设备中,都是用门电路的组合来完成不同的逻辑功能的,为了真实地反映实际应用情况下的平均传输时延 t_{pd} ,大多采用接入缓冲级的方法。见图 1-8 所示。

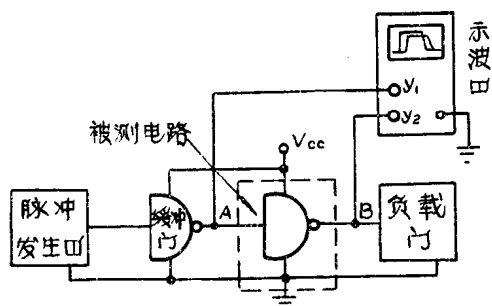


图1-8 带缓冲门的测试电路。

对于门电路测量开关参数,也可用双门法测量平均传输时延,见图 1-9 所示。 A 点和 C 点的波形相似接近平行,两

点间的传输时延是两个门的总和。每个门的平均传输时延为 A 、 C 两点间时延的一半。尤其是双门电路，用此方法，可以一次测出 t_{pd} 。

$$t_{pd} = \frac{t_{d1} + t_{d2}}{4}$$

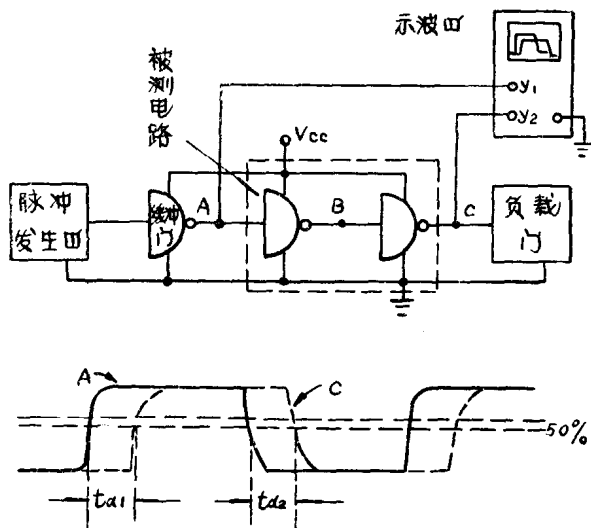


图1-9 双门法测量电路。

上面介绍了门电路开关特性的示波器测量方法。下面将介绍触发器电路的开关特性的测量。触发电路有不同的电路型式，触发方式也各有区别。此处仅就常用的 JK 主从触发器加以叙述。

在数字电路中，逻辑门电路是作为不包含时间顺序的组电路使用的，而触发电路能存贮任意的时间和信息，故在构成包含时间关系的顺序电路时必不可少。 JK 触发器是在 RS 触发器基础上产生的。与 RS 触发器电路不同点是当两个

输入都为“1”时，其输出是一定的，因此应用范围较广。由于 JK 触发器电路易于构成其他各种逻辑功能，目前已经成为标准集成单元电路生产。

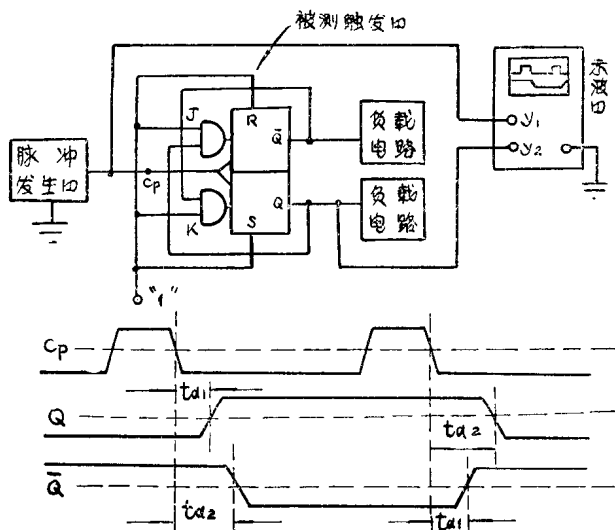


图1-10 JK 触发器测量及波形图。

测试 JK 触发器的电路如图1-10所示。 JK 触发器的 R 、 S 、 J 、 K 四个端头连接在一起，接至高电平“1”。脉冲发生器输出的脉冲接到 C_p ，被测触发器的输入端 (C_p) 及输出端 (Q 或 $\bar{Q}$) 分别接至双迹示波器的 y_1 、 y_2 ，示波器荧光屏则显示出相对时延的脉冲波形。 t_{pd} 可按下式求出：

$$t_{pd} = \frac{t_{d1} + t_{d2}}{2}$$

1.3.2 频率计法

奇数个反转逻辑门电路（“与非”或“或非”门电路）组