

高等学校轻工专业试用教材

# 电子计时仪器原理

天津大学、哈尔滨工业大学 编

上 册

轻工业出版社

4.01

### 内 容 提 要

本书分上、下两册,在本册(上册)中介绍了四个时代的电子手表,重点是第三代和第四代电子手表。对它们的各组成部分,如:石英晶体、晶体振荡器、CMOS 集成电路、步进电机、显示器件(液晶及发光二极管)、电池等,作了比较详细的介绍和分析。

本书为高等院校计时仪器专业师生使用的教材,亦可供有关专业的工厂和研究所的技术人员和技术工人参考。

### 高等学校轻工专业试用教材

#### 电子计时仪器原理(上册)

天津大学、哈尔滨工业大学 编

\*

轻工业出版社出版

(北京阜成路3号)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

\*

787×1092 毫米 1/16 印张: 17<sup>4</sup>/<sub>16</sub> 字数: 379 千字

1981年10月 第一版第一次印刷

印数: 1—5,000 定价: 1.80元

统一书号: 15042·1597<sup>2.00</sup>

## 前 言

本教材根据天津大学和哈尔滨工业大学计时仪器专业共同拟定的编写大纲编著,经轻工业部计时仪器专业教材编审委员会审稿,由何永江同志主编,参加编写的人员有王宗培、王春林、姚婉、黄恒林、何永江等。

电子技术尤其是微电子学的迅速发展为计时仪器开辟了崭新的领域。石英电子手表十余年来发展速度很快,它具有精度高、走时稳定、结构简单、功能多等优点,受到人们的极大重视,同时它还在日新异地不断向前发展,本书就是为了适应这一形势的需要而编写的。

本书作为高等学校计时仪器专业的教材,共分上、下两册,上册介绍了电子手表发展过程中四个时代的典型结构与原理,重点分析了第三代、第四代电子手表的各个主要组成部分。下册介绍石英钟、原子钟、频率及短时段测量仪器和时间控制仪器。

本书是计时仪器专业首次编著出版电子计时仪器方面的教材,资料甚少,时间很仓促及编著者的水平有限,实践经验较少,难免有不少缺点和错误,欢迎广大读者批评指正,以便不断完善。

在编著过程中,曾得到山东大学、南京工学院、西安交通大学、天津硅酸盐研究所、天津第十四半导体器件厂,西安钟表研究所等兄弟单位的支持和帮助,在此表示感谢。

# 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                     | 1   |
| 第一节 时间及其计量单位 .....               | 1   |
| 第二节 电子计时仪器的分类 .....              | 2   |
| 第三节 电子计时仪器的发展简史 .....            | 3   |
| 第四节 石英电子表的组成 .....               | 7   |
| 第二章 摆轮游丝式及金属音叉电子手表 .....         | 16  |
| 第一节 摆轮游丝式电子手表 .....              | 16  |
| 第二节 金属音叉电子手表 .....               | 21  |
| 第三章 石英晶体的结构、物理性质及其加工工艺 .....     | 29  |
| 第一节 石英晶体的结构 .....                | 29  |
| 第二节 石英晶体的介电性质、弹性性质与压电性质 .....    | 34  |
| 第三节 石英晶体的切型及振动模式 .....           | 46  |
| 第四节 人造石英晶体的培育及石英晶体谐振器的加工工艺 ..... | 53  |
| 第四章 石英谐振器的电气特性 .....             | 70  |
| 第一节 石英谐振器的等效电路 .....             | 70  |
| 第二节 石英谐振器的品质因素(Q 值) .....        | 72  |
| 第三节 石英谐振器的阻抗频率特性 .....           | 76  |
| 第四节 石英谐振器与负载电容的联结 .....          | 84  |
| 第五节 石英谐振器参数的测量 .....             | 86  |
| 第五章 晶体振荡器 .....                  | 89  |
| 第一节 概述 .....                     | 89  |
| 第二节 CMOS 晶体振荡器的偏置电路 .....        | 92  |
| 第三节 CMOS 晶体振荡器的等效电路 .....        | 94  |
| 第四节 CMOS 晶体振荡器的振荡条件及振荡频率 .....   | 96  |
| 第五节 晶体振荡器的功耗 .....               | 101 |
| 第六节 晶体的激励电平和晶体振荡器的最小起振电压 .....   | 108 |
| 第七节 晶体的频率温度系数及振荡频率的温度补偿 .....    | 110 |
| 第八节 其它环境条件对振荡频率的影响 .....         | 114 |
| 第九节 晶体振荡器的频率稳定度和老化 .....         | 115 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| 第十节 集成注入逻辑 I <sup>2</sup> L 晶体振荡器 ..... | 120        |
| <b>第六章 CMOS 集成电路 .....</b>              | <b>122</b> |
| 第一节 MOS 晶体管 .....                       | 122        |
| 第二节 CMOS 反相器和传输门 .....                  | 123        |
| 第三节 CMOS 门电路和触发器 .....                  | 140        |
| 第四节 CMOS 计数器、译码器和分频器 .....              | 148        |
| <b>第七章 步进电动机 .....</b>                  | <b>162</b> |
| 第一节 概述 .....                            | 162        |
| 第二节 机电能量转换原理 .....                      | 168        |
| 第三节 磁路及磁导计算 .....                       | 178        |
| 第四节 单相永磁步进电动机 .....                     | 191        |
| <b>第八章 显示器件及能源 .....</b>                | <b>201</b> |
| 第一节 液晶显示器件 .....                        | 201        |
| 第二节 发光二极管显示器件 .....                     | 214        |
| 第三节 电池 .....                            | 218        |
| 第四节 太阳能电池 .....                         | 221        |
| <b>第九章 石英电子手表 .....</b>                 | <b>225</b> |
| 第一节 指针式石英电子手表 .....                     | 225        |
| 第二节 数字式发光二极管石英电子手表 .....                | 234        |
| 第三节 数字式液晶石英电子手表 .....                   | 246        |

# 第一章 绪 论

## 第一节 时间及其计量单位

时间是一个基本量,是物质存在的基本形式之一,是可以被测量的。但是追溯历史,人们对它的理解是在唯心主义和唯物主义两种思想不断地斗争中逐渐明确的,唯心主义否认时间的客观真实性,散播一种反科学的观念:认为时间是人类意识的产物。唯物主义认为,时间这个概念反映着客观存在着的、真实的时间,它和空间一样是客观物质存在的形式之一,任何一种物质的变化、运动或发展过程都永远是在时间和空间内发生的。恩格斯曾指出:“因为一切存在的基本形式是空间和时间,时间以外的存在 and 空间以外的存在,同样是非常荒诞的事情。”

时间的特点是在进行中的不复返性,即向一个方向流逝,过去、现在和将来它总是无止境地 toward 一个方向延伸。

要测量时间,必须选取测量时间的基本单位,对时间度量单位的基本要求,如同对其它度量单位的基本要求一样,度量单位随时间的变化应尽可能的小,并便于使用。

人们很早就发现,地球自转的角速度非常稳定,因此地球自转一定角度的时间很自然地用来作时间单位,这些单位就是早期就开始使用的恒星日、真太阳日和平太阳日。这里对它们作简单介绍。

地球自转一周的时间叫恒星日,把一个恒星日分成 24 等分得到恒星时,一个恒星时分成 60 等分得到恒星分,一恒星分等于 60 恒星秒。这种恒星时单位用在测地学的大地观测和航海天文工作中。

地球不仅自转,而且围绕太阳公转,地球自转 366.24220 圈才能公转一圈,地球公转一圈的时间叫回归年,因此有:

$$1 \text{ 回归年} = 366.24220 \text{ 恒星日}$$

太阳视运动连续两次通过上中天的时间间隔叫真太阳日,真太阳日也就是观察者在一定点和一定方位上连续两次看到太阳的时间间隔。

地球公转一圈,虽然自转 366.24220 圈,但公转和自转的方向相同,地球公转一圈只能看到 365.24220 次太阳,所以有:

$$1 \text{ 回归年} = 365.24220 \text{ 个连续真太阳日}$$

由此可见,一真太阳日大于一个恒星日。

地球轨道是椭圆的,而且沿轨道运行的速度又不等,因此真太阳日的大小随地球在轨道上的不同位置而变化,最长和最短的真太阳日相差 51 秒。真太阳日的这种变化,以其作计量单位不够理想,为此将一个回归年均分成 365.24220 等分,每等分的时间叫平太阳日,由此则有:

$$1 \text{ 平太阳日} = \frac{1}{365.24220} \text{ 回归年}$$

$$1 \text{ 平太阳日} = \frac{366.24220}{365.24220} \text{ 恒星日}$$

或者写成:

$$1 \text{ 平太阳日} = 1.002738 \text{ 恒星日}$$

平太阳日是真太阳日的平均值,是民用时间单位,简称为“日”,把日分成 24 等分得到“时”,把时分成 60 继而再分 60 分,分别得到“分”和“秒”。

为了避免地球运动快慢而造成的不均匀性,进一步提高时间计量的准确度,出现了历书时。1952 年国际天文协会第八届大会提出了历书时系统,当时规定 1900 年 1 月 0 日 12 时的回归年长度的  $\frac{1}{31556925.9747}$  作为 1 秒的长度,即称历书秒,上式分母的来源是 1900 年的回归年的天数  $\times 24 \text{ 小时} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒}$ ,历书秒的 86400 倍等于历书日。这样,历书时系统就建立起来了,并从 1960 年开始历书时正式使用。

由于近代科学技术迅速发展,在频率标准方面有了很快的进展,先后研制出精度和稳定度很高的各种形式的分子钟、原子钟,其中铯原子钟的长期稳定度极好。

1967 年国际度量衡委员会决定,从 1972 年 1 月 1 日 0 时开始,标准时间用国际原子钟得到,并以铯 ( $\text{Cs}^{133}$ ) 原子在两个规定能级间跃迁时所辐射或吸收的电磁波振荡 9192631770 次所经历的时段作为原子秒长。

至此,时间计量进入了一个崭新阶段。

## 第二节 电子计时仪器的分类

计时仪器种类很多,按其结构分有:机械计时仪器,机电计时仪器和电子计时仪器。下面我们看电子计时仪器的分类。

任何测量都是比较的,电子计时也不例外,它是用标准运动去比较被测对象。能够准确掌握其运动规律的运动可作为标准运动,这种运动很多,有周期性的振荡,也有非周期性过程的运动,因此,可按测时的基本工作原理分类。

### 一、按测时的基本工作原理分类

(一) 利用周期过程计量时间的电子计时仪器 例如用 RC 振荡器, LC 振荡器、晶体振荡器和原子振荡器作成的电子计时仪器,其中精度较高的有石英电子手表、石英钟和精度更高的原子钟等。

(二) 利用非周期过程计量时间的电子计时仪器 它是利用知道随时间有规律的某些变化过程,例如用电容器的充、放电过程作成的计时仪器。这类仪器通常是用来测量短小时段的。

### 二、按用途分类

(一) 指示时刻的电子计时仪器 如石英电子手表、石英钟、原子钟等都属于这一类,其作用是指示统一时间的。

(二) 测量时段的电子计时仪器 如电子秒表、电子延时器等。

(三) 控制时段的电子计时仪器 如各种电子时间继电器、定时器和电子数字程序控制等。它们能按预先排定的时间程序发出信号来控制各种执行机构的工作,广泛应用在自动

化设备中。

### 第三节 电子计时仪器的发展简史

人类对时间的测量从“日出而作，日入而息”的所谓太阳钟到机械钟表的出现经过了漫长的道路，自从人们开始有了机械测时的初步概念以后，机械钟表已有几百年的历史，到目前为止，无论在设计和工艺上都已相当成熟，但从它的测时精度和使用条件等在早期远远满足不了生产和科学技术等日益发展的需要。

P. U. J 居里于 1880 年发现了晶体的压电效应之后，W. 卡迪于 1921 年成功地将石英晶体用于电子管振荡器中。三十年代初期制成了石英钟，以后经过不断地完善，具有较高频率稳定度的晶体振荡器用于时钟和作为各个领域的频率标准，也作为天文台时间工作站的频标，代替了过去使用的绍特钟。

由于近代科学技术的不断发展，对频率标准提出更高的要求，当 1953 年出现了世界上第 1 台用量子控制的氨分子钟以后，立即形成原子钟大发展的局面，各类原子钟纷纷问世。六十年代初期，由于铷原子钟(6.8 吉赫  $R^{87}$ )体积小、重量轻、价格低、可靠性高，用它作为工作钟，连续工作，定期用铯钟校准。自从铯束管工艺改进后，体积大大缩小，而精度高十倍以上，尤其是它的长期稳定性好，明显的优于铷钟，所以在频标中使用十分广泛，如前所述，原子秒就是以它的跃迁频率来定义的。

1960 年研制成功第一台氢脉泽。它的工作原理是：氢原子由氢分子射频放电产生，而后进入态选择器，以束的形式注入真空室，进入内壁涂有四氟化碳的石英泡中，石英泡置于微波腔内，使其产生自激振荡，微波输出经频率合成和相位比较，把一晶体振荡器锁定到氢的跃迁频率上。它的频率为 1420405751 赫，氢脉泽的  $Q$  值在传统的频标中是最高的，其典型值约为  $2 \times 10^9$ ，频率稳定度在  $10^2$  秒到  $10^5$  秒内约达  $10^{-14}$ 。它是极为稳定的频标。但是它的体积很大，成本高，所以产量低，主要用于稳定度和精度要求很高的场合。另外，它的甚长期稳定度次于实验室条件下的铯频标。氢脉泽的准确度主要受到多普勒效应、磁场及磁场的均匀性、腔体和自旋交换牵引效应以及壁移等因素的影响，因此，氢钟今后一方面是提高精度，另一方面是小型化。

除此而外，其它频标，如超导腔振荡器、激光器件，原子束装置中的镁和钙的谐振等研究，都取得了一定的成果。

目前常用的原子钟主要有三种：

1. 铷气室频标
2. 铯束管原子频标
3. 氢脉泽原子频标

对频标的选择，主要决定实际需要的稳定度性能、周围环境条件、频标的利用率、尺寸、重量、价格等方面。

由于时间指示、频率和短时段的精确测量，一方面需要高稳定度的频标，另一方面则需要各种测量技术作保证，在频标的发展过程中，相应地出现了近代科学技术需要的各种时间测量方法和测量技术，这些将在本书下册加以讨论。



现在让我们回过头来看电子手表的情况。电子手表的发展经历了四个时代。第一代是摆轮游丝电子手表,由于六十年代初期晶体管技术的出现及微型电化学能源的发展,使原来传统的机械手表有了某些改观,即用汞电池或氧化银电池代替机械储能器件——发条及重锤式的自动上条机构。用晶体管作开关元件,通过电磁转换,周期地给摆轮游丝振荡系统补充能量,以维持其振荡,振荡频率一般为 2.5~5 赫,其它传动及指示机构仍为机械零件组成。诚然,经过这些变化之后,在走时性能和使用条件上都有所改善。但是因为振荡系统未作本质上的改变,所以它的精度和稳定度大体上仍停留在机械手表的水平上。

第二代电子手表是金属音叉电子手表。顾名思义,它是用金属(镍铬钛合金)音叉作为振荡元件,代替了摆轮游丝振荡系统,能源仍用前述的化学电池,也是以晶体管作开关,以电磁转换形式补充振荡系统的能量。它的振荡频率可取 300~720 赫,由于这种振荡器比摆轮游丝系统的频率稳定度高,所以把日差缩小到 2 秒。但是音叉手表中推动轮系的计数装置(棘轮棘爪)尺寸小、频率高,其加工、装配、寿命、维修都存在较大的问题。在电子表发展的这一过程中,人们始终没有忘记具有高稳定度的晶体振荡器,很多人都设想把它用在手表中,以期在精度和稳定度方面有一个大的突破。然而任何一个技术上的突破都不是孤立的,它受到各个领域的有关技术的制约,因此,虽然石英晶体的出现提出了这种前景的可能,并且它与电子技术的结合解决了不少工业甚至国防上很多高精度小型化的问题,但是在晶体管甚至在集成电路的初期阶段的技术水平,在小小的手表面前还暂时显得软弱,存在大量分频电路及功耗等不易克服的问题。因为对手表这样一个微型尺寸的特殊情况有一个极限的要求,尽管这些要求条件现在看来已相当宽裕和不成问题。

这些条件是:

1. 手表整体所允许的最大体积不能超过 5 厘米<sup>3</sup>,根据手表内各种器件的配置比例,电路所允许的空间最大不能超过 1 厘米<sup>3</sup>,而作为能源的电池尺寸需在  $\phi 1$  厘米  $\times$  0.5 厘米左右。
2. 电池一般采用汞电池或氧化银电池,前者电压为 1.35 伏,后者为 1.55 伏,它的最大容量只能有 160 毫安时左右。
3. 手表整机功耗约为 24 微瓦(现在一般都能作到几个微瓦),一节电池应使用一年,这样分频电路所允许的功耗约为 6~7 微瓦。
4. 工作温度范围为  $-10^{\circ}\sim +60^{\circ}\text{C}$ ,在此温度范围内,手表带在腕上应保持完好,从北极到赤道基本上都能使用。
5. 价格低廉。

由于上述的技术要求,直到具有功耗小、集成度高、低电压下工作、有一定频率响应的互补-金属-氧化物半导体集成电路(CMOS IC)研制成功,于六十年代末期第三代电子手表——指针式石英电手表进入了实用化,这是个历史性的创举,成功地将高稳定度晶体振荡器作为手表计时的频标。初始阶段的频率采用 8192 赫、16384 赫,后来绝大部分都用 32768 赫,振荡器的信号输出经过分频,而后驱动电机,完成机电转换后,带动轮系指针指示时间,同时采用了机械形式的周历、日历等附加装置。因此可以说,第三代电子表是几百年机械手表史形成的精密机械与现代微电子学结合的产物。

如果说在第三代电子表中还能看到手表的机械结构的话,那么第四代电子表——数字显示的石英电手表在所使用的器件、机心结构、甚至在表的外观上都与传统的机械表截然不

同,它完全脱离了宏观上可视的机械运动结构,成为一个崭新的固体手表。第三代表中的机械部分完全用电路的再分频、控制电路、译码驱动电路以及显示器件代替,使用 CMOS 大规模集成电路(LSI)。

1970 年世界上研制出第一块数字显示电子手表,1972 年在国际市场上出现了发光二极管和液晶显示的第四代电手表。

从上面的简短叙述,可看出石英电子表的优越性,它比机械表有如下的优点:

1. 衡量一个计时仪器的优劣,首先要看它的走时精度及稳定性。石英电子表中由于采用了频率稳定度高的晶体振荡器,其精度从原来机械表日差几十秒(高级机械表日差几秒)提高到石英电子表月差十几秒到月差几秒,而且已经出现了年差几秒的高精度石英电子表。图 1-3-1 给出了手表中使用的三种振荡器的频率及走时精度的范围。

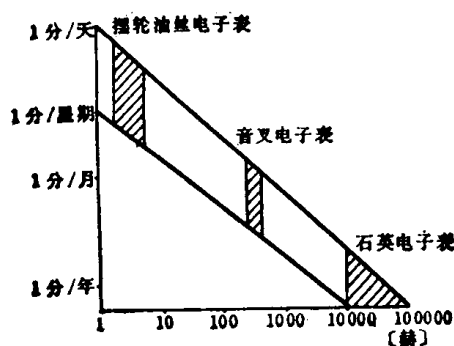


图 1-3-1 谐振频率和计时精度之间的关系

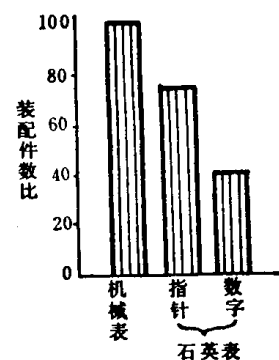


图 1-3-2 机械表与石英表的件数比

2. 由于摆轮游丝振荡系统和擒纵机构等被晶体振荡器及集成电路代替,就不需要机械表那样复杂而麻烦的调整技术。四代表则不需要清洗加油。

3. 由于擒纵调速器、动力及齿轮系统用晶体、电池、电机及 IC 代替,装配件数减少了,尤其是四代表,其装配工时仅为机械表的  $1/2 \sim 1/3$ 。这三种表的零件数目的比较见图 1-3-2。

4. 同样的原因,石英电子表特别是四代表易于实现装配的自动化,从产品大量生产的初期就可以稳定地在自动装配线上进行工作。

5. 三代表是以步进电机每秒跳动一次而走时,没有像发条那样的动力源,其转动力矩既小又好,可以降低轮系的强度及磨损。

6. 机械表的附加装置如自动、日历、周历都会增加大量的机械零件,而石英电子表,主要是四代表易于实现多功能,只在基片上附加一定的逻辑电路即可达到这个目的,现在的四代表可有时、分、秒、年、月、日、周历、上、下午,测时、闹时、附加计算器以及其它更多的功能。

由于石英电子表的这些优越性,决定了它发展的生命力,虽然它的历史仅有十年左右,然而它的发展速度之快令人吃惊。表 1-1 表示了石英电子表的产量及增长情况。

从表中看出,1973 年到 1977 年世界石英电子表的产量增长了 107 倍,占手表总产量的比例增长了 84 倍,平均每年增长 4 倍,据估计 1980 年世界手表总产量约为 3 亿只,石英电子手表约占三分之一,即约达 1 亿只左右。

表 1-1

| 年 份  | 世界石英电子表产量 | 占总产表比例 |
|------|-----------|--------|
| 1973 | 50 万      | 0.25%  |
| 1974 | 270 万     | 1%     |
| 1975 | 700 万     | 3%     |
| 1976 | 2584 万    | 11%    |
| 1977 | 5350 万    | 21%    |

随着石英电子表产量的增长，它的成本及售价也大幅度地下降。最初上市的石英电子表售价是普通中级表的十几倍。这一时期，曾有人对石英电子表的前途担忧，但是经过几年的发展，由于工艺性能、生产率不断提高，现在具有八功能的四代表已降到中级机械表的价格或更低一些的水平上。

从电子表的发展过程看，它是与集成电路密切相关的，但在这同时，石英电子表中的晶体、电机、显示器件及电池都有了显著地进展。

电子计时仪器广泛地应用于国民经济及国防各个领域，在一个现代化的社会中，若没有电子计时仪器，那将是很难想像的事。

在生活、民用交通、物理量的计量、天文观测、大地测量、导弹与卫星跟踪、远程导航、雷达、通讯等等都需要有不同精度和稳定度的频率与时间标准及其相应的电子计时装置和仪器。

无需说明，在日常生活、民用交通中需要一个比较准确的统一时间。

在科学研究中，为了了解一些现象的本质和探讨在技术上利用它们的可能性，常常有必要确定这些现象所经历的时间。例如在核物理反应过程中则需要极短时段的测量。

在计量领域中，长度单位米和原子频率标准日趋密切。高精度的频率是由铯原子秒长来测定。如前所述，1972年1月以后，根据国际协议，以铯原子秒作为时间单位，并把它用于时间服务工作，若要求日差1毫微秒，则要求频标大约相当于 $1 \times 10^{-14}$ 的频率稳定度。

目前一个很重要的科学上的用途是甚长基线干涉仪。它要求有 $10^{-14}$ 的频率稳定度，用这种方法能够很精确地测量地面上的距离和在地球上的位置，实际应用其位置的测量精度几乎达到几个厘米，因此使得监视和正确测量地球物理现象成为可能。

导航在历史上对钟的发展曾起到极其重要的作用，而钟和频标的发展反过来又促进了导航技术水平的提高。在近代海上、陆地、空中以及新近在宇宙中更精确的导航设备都需要精度和稳定度高的钟和频标，因为一个未知位置的确定需要一个时间标准，对定位来讲，位置的确定具有1米的准确度，要求时间的准确度为3毫微秒。导弹、舰船、飞机和宇宙飞船的导航所需钟的质量，依赖于导航准确度和这些钟的重调能力和合乎需要的程度，若要求高的定位准确度，就需要一个极优良的长期稳定度甚佳的频率标准。

雷达搜寻目标，除了已知电磁波的速度而外，也需备有一质量高的频标，以作为时间标准，来测量从雷达到目标电磁波往返所经过的时间，测得到目标的距离。

通讯中习惯使用标准频率来确定频带在电磁频谱中的位置。电视网通常使用原子频率标准作为保证彩色副载波信号有适当的相位稳定度。

在近代化工业生产中，日趋走向自动化，在自动化生产中，常常需用计时仪器来保证生

产设备协调而连续地工作。

总之,计时仪器在日常生活、生产活动、科学研究、国防建设等等各个领域应用广泛,因此,如何提高电子计时仪器的质量和更有效地在实际中应用将具有重要意义。

## 第四节 石英电子表的组成

三代表及四代表的组成框图分别见图 1-4-1 及 1-4-2。

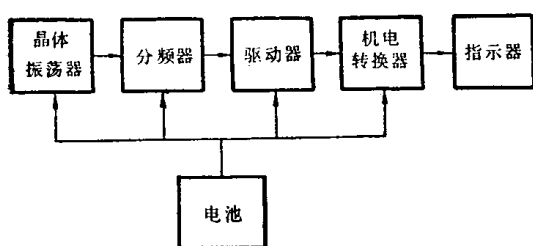


图 1-4-1 指针式石英电子表框图

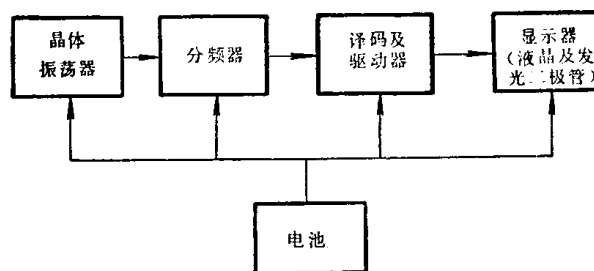


图 1-4-2 数字式石英电子表框图

石英电子表是属于利用周期振荡过程的测时仪器,测量的时间为:

$$\text{时间} = \text{振荡周期} \times \text{振荡次数}$$

晶体振荡器的功能是输出一频率稳定度高的频标信号,作为计时的基准。把它的输出信号经过整形变成脉冲电路所需要的方波,将这个频率较高的时钟脉冲进行大量的分频以降低其频率,再进行变换以满足机电转换器(一般为电机)要求的信号,经驱动器以电磁作用驱动电机转动,电机的转子带动具有一定传动比的齿轮系统及指针机构最后显示时间。

四代表则用电路代替了电机以后的全部机械结构,因此,需要继续分频以得到秒、分、时等电信号,经译码器,驱动器推动显示器(一般为液晶显示器件及发光二极管显示器件),如果是液晶显示,则需用升压电路(因液晶显示器件需要 3~6 伏的电压)。由于电路本身及使用上的要求以及附加较多的功能,都需备有控制电路。

### 一、晶体及其振荡器

对晶体振荡器的要求是:

1. 频率稳定性高;
2. 频率温度系数小;
3. 频率老化特性好;
4. 耐冲击、振动;
5. 功耗低;
6. 尺寸小;
7. 成本低。

如图 1-4-3 所示,晶体振荡器是以 CMOS 反相器作放大器,以晶体作谐振器件,与电容  $C_g$  和  $C_d$  组成皮耳斯振荡器。

其中  $C_g$  和  $C_d$  是为实现振荡不可缺少的元件,同时  $C_g$  还兼作频率(或走时日差)微调; $C_d$  可兼作频率温度补偿。

电子表晶体振荡器标准频率的选择根据下列因素确定。一般晶体的频率越高,则走时

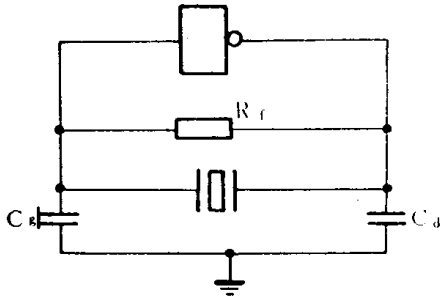


图 1-4-3 晶体振荡器

精度及其稳定度越高,从这个角度上看,希望晶体的频率高,但是频率越高,电路的功耗越大(如分频电路的功耗与频率成正比关系),同时频率高需要增加较多的分频级数,对电路的速度也要求高,再有,从晶体振荡器的频率到秒信号的分频,一般采用每级分频系数为 2 的分频电路,这样,标称频率通常取  $2^n$ ,  $n$  是电路在这一区间上的分频级数。综合以上各种因素,适合现阶段技术条件大批量生产的最佳标称频率是  $2^{15} = 32768$  赫。

在初期阶段,石英电子表的晶体是采用  $X + 5^\circ$  弯曲振动模式二次频率温度特性的长方棒状晶体。这种晶体的缺点是体积大,重量重,耐冲击、振动性能差。目前应用较多的是  $X + 5^\circ$  弯曲振动的音叉形晶体,它比棒状晶体的体积、重量都小,晶体尺寸由原来棒状的  $15 \times 3.5 \times 2.5$  毫米<sup>3</sup> 缩小到  $\phi 3$  毫米  $\times 8$  毫米。而且它的抗冲击、振动性能很好,已形成代替棒状晶体的趋势。

最近又出现了外形尺寸为  $\phi 2$  毫米  $\times 6$  毫米的超小型石英谐振器,其振子的厚度仅为 0.1 毫米,采用光刻腐蚀及等离子技术制作。

这种音叉形石英谐振器的外形有平板形和圆筒形两种,应按照产品要求的尺寸(厚度、外形)来选择最佳形状,平板形对薄形手表机心有利。

随着对走时精度提出更高的要求以及集成电路在速度、功耗和集成度方面的进展,现在已经开始出现 2359296 赫、4194304 赫的高频石英电子表,这种表的晶体采用厚度切变振动模式的三次频率温度系数的  $AT$  切型的圆片晶体,它除了加工较复杂外,频率稳定度、频率温度系数、老化性能及抗震等性能都比较好。但是目前这种表的数量极少。

## 二、集成电路

对它的要求是:

1. 功耗低;
2. 集成度高;
3. 速度高;
4. 低电压下工作;
5. 抗干扰性强;
6. 工艺简单、成本低。

互补-金属-氧化物-半导体集成电路(CMOS IC)基本上能满足这些要求。

我们知道,在分立元件的晶体管线路设计中,利用  $npn$  和  $pnp$  管组成互补线路时,带来很多优点,但在双极型晶体管的单片集成电路中曾经由于一些相抵触的制造因素没能发挥出互补电路的优点。但是却能在单片衬底上集成相容的  $p$  沟道和  $n$  沟道增强型场效应管,而利用互补特性,这就是在六十年代末付诸实现的 CMOS IC。

CMOS 反相器是由  $p$  沟道管和  $n$  沟道管组成,反相器结构、线路及其输入输出电压特性等分别见图 1-4-4。

CMOS 反相器就逻辑关系也是输入为“0”(  $p$  管导通  $n$  管截止) 输出为“1”; 输入为

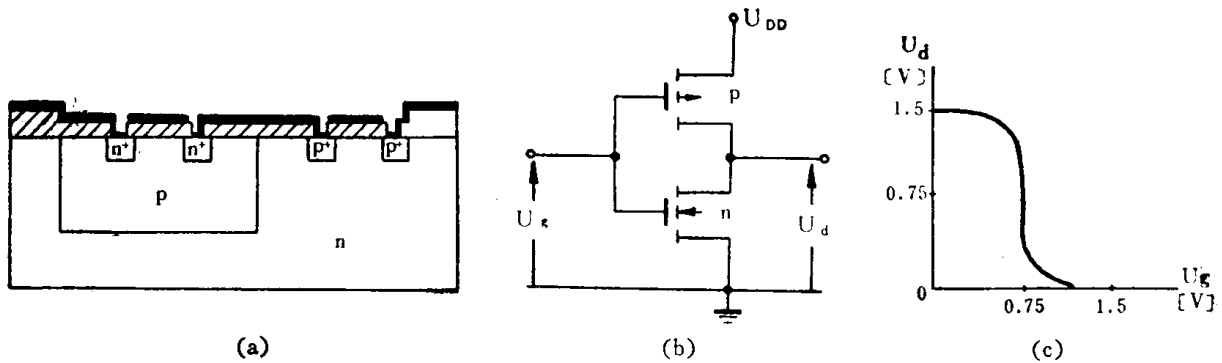


图 1-4-4 CMOS 反相器

(a) CMOS 断面图 (b) CMOS 反相器电路 (c) CMOS 反相器电压转移特性

“1”，(n管导通 p 管截止)输出为“0”。但它与双极性的内部工作特性有所不同，它的工作是依赖于 p 型沟道中的空穴和 n 型沟道中的电子的作用，并用绝缘栅氧化层将金属控制栅和半导体沟道隔开，是属于电压控制器件，输入阻抗极高，约为  $10^{11}$  欧。反相器在静态又总是一管截止一管导通，截止管的阻抗极高，可高达几千兆欧，若取 1500 兆欧，在电源电压为 1.5V 的情况下，其泄漏电流仅为 1 纳安，静态功耗等于电源电压与泄漏电流之积，这时仅为 1.5 毫微瓦，可见它的静态功耗极低。反相器的动态功耗仅消耗在两个管子的状态转换的极小时间内和对负载电容的充放电上，这部分功耗近似为  $CU_{DD}^2 f$ ，所以反相器的总功耗为：

$$P = P_0 + CU_{DD}^2 f$$

式中  $P_0$ ——静态功耗；

$C$ ——本级输出电容和下级的输入电容的总和；

$U_{DD}$ ——电源电压；

$f$ ——工作频率。

CMOS 传输门如图 1-4-5 所示，它是由 p 沟道管和 n 沟道管并联而成，完美的传输门应是断开时电阻为无穷大，闭合时电阻为 0，CMOS 传输门是接近于这种理想开关的传输门。

目前所有 CMOS 集成电路基本上都是由反相器和传输门这两种基本电路组成，用反相器构成全部“与非”门和“或非”门，而用反相器和传输门的结合构成比较复杂的各种电路，诸如各种触发器、计数器、移位寄存器、运算器和存储器等。

归纳起来，CMOS IC 的功耗很低，单个门、触发器的静态功耗为毫微瓦数量级；动态功耗，在速度相同的情况下，比双极型 TTL 低 1000 倍以上，所以在高集成度情况下也不存在热学设计方面的困难；抗干扰性能高，为电源电压的 45%；速度高，可达毫微秒级（低电压下稍差）；对电源电压要求不高，不需特殊的稳压、滤波措施，因而使用电池（一般电池的内阻较稳压电源内阻大）也能正常工作，且只需一种电源；也解决了最初在低电源电压（因而也是低阈值电压）下工作及严格控制阈值电压方面存在的问题，因此 CMOS IC 最适用于电子手表。

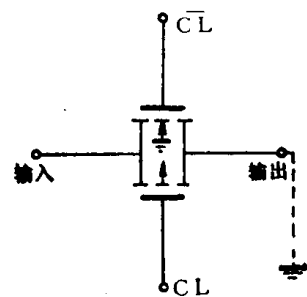


图 1-4-5 CMOS 传输门

若提高石英电子表的振荡频率,如到 4.2 兆赫,则 CMOS IC 有功耗及速度上的困难,为克服这一缺点采用 SOS(硅蓝宝石)工艺,但因使用蓝宝石作衬底,成本很高,目前用的还很少。

另一种手表中可能利用的高频 IC 是集成注入逻辑(I<sup>2</sup>L),它是利用双极性工艺的基础。但是双极性结构是三维器件,需要很大的面积进行隔离,实现 LSI 有困难,因为管芯的元件多,功耗大,为解决功耗需考虑散热方面的设计,但需增加成本,若靠增大电阻限流,又导致面积的增大,同时还会增加寄生电容而影响速度。

在这种情况下,于 1972 年国际固体电路会议上提出了新型的 IC 设计工艺,即 I<sup>2</sup>L 电路。它的反相器结构见图 1-4-6。

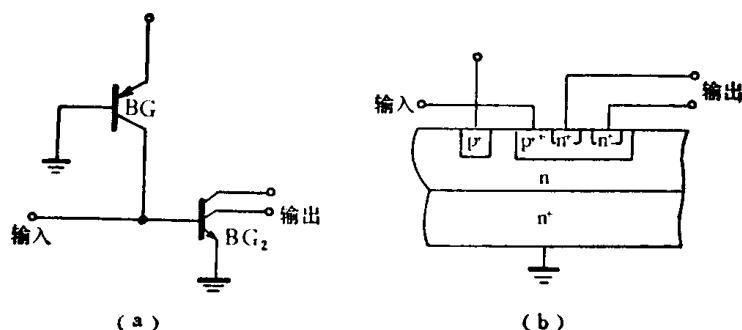


图 1-4-6 I<sup>2</sup>L 反相器

I<sup>2</sup>L 反相器是由横向 *pnp* 管(作为电流源)和把从前多发射极晶体管反过来工作的 *npn* 管巧妙地安排为互补晶体管构成的门电路。当输入为“1”时,*pnp* 管作为电流源,其集电极电流  $\alpha_1 I_1$  注入  $BG_2$ (*npn* 管)的基极,当  $BG_2$  接上下一级反相器时  $BG_2$  导通,输出为“0”。当输入为“0”时,小于  $BG_2$  管的开启电压, $BG_2$  截止,输出为“1”。

从 I<sup>2</sup>L 的结构上看,它不需要任何电阻,为共发射极结构,不需要双极型中那样的不可缺少的元件隔离,*pnp* 管的集电极和 *npn* 管基极公用,连线简单,所以它的集成度高。又能利用以前双极型的工艺基础,它的成本低。

目前都采用门的延迟时间和门功耗的乘积来表示门电路的性能,TTL 门电路的传输延迟时间  $t = 10$  纳秒,功耗  $P = 10$  毫瓦时,其积为 100 PJ,而 I<sup>2</sup>L 则为 1 PJ,理论上还可以更小。在电子手表的分频电路中,可以利用延迟时间与功耗乘积等于常数的关系,各级分频器的工作频率正比于电流的递减是可能的。各输出电流由选择各横向 *pnp* 管集电极长度来决定,改变构成分频器的 I<sup>2</sup>L 电路的图形设计,可以提供要求的分频电流。

由于 I<sup>2</sup>L 工艺可以利用原 TTL 的基础工艺,所以可以在同一管芯上与 TTL 相容,这样,容易实现与其它形式的电路耦合。

门逻辑电压幅度低于 0.5~0.7 伏。

因此,I<sup>2</sup>L 具有高速、低功耗、高集成度,可与 TTL 相容、可低电压工作,成本便宜等一系列优点。I<sup>2</sup>L 的结构经过了不少的改进,除了普通的 I<sup>2</sup>L 外,有双外延 I<sup>2</sup>L、*p*<sup>+</sup> 型注入极 I<sup>2</sup>L 及纵向注入逻辑(VIL)。

1975 年 I<sup>2</sup>L 电路开始用于石英电子表中,目前使用数量不多,它的实际制品的功耗目前还大于 CMOS,若大量生产和普遍采用,尚须不断改善性能。

### 三、机电转换机构

大致可分为两种类型,一种是共振型转换机构(亦称共振马达),它是在机构的线圈中通以频率较高的电信号(约 170~256 赫),使振子振动,推动棘轮完成由电能到机械能的转换,这种机构的优点是效率高,可达 60~80%,但缺点是加工调整不便,抗冲击、抗振动性能差,目前已很少使用。另一种是步进电机,指针式石英表目前都采用这种转换机构,它的类型较多,图 1-4-7 是它的典型机构。

步进电机由转子、定子及线圈三部分组成,转子由高性能的永久磁钢做成,在径向对称地充有  $N$ 、 $S$  两个极(也有采用六个磁极的),定子是由高导磁性能的坡莫合金做成,定子上绕有  $\phi 0.015\sim 0.03$  毫米高强度漆包线线圈,工作时每秒通过一次脉冲电流,宽度为 7.8125 毫秒(也有用 15.625 毫秒)的脉冲电流,方向是正负交替的,此电流使定子交替磁化成  $N$ 、 $S$  极,利用定子与转子磁极的相互作用,转子每秒跳动一次,步进角度两极为  $180^\circ$ ,六极为  $60^\circ$ ,进而推动轮系带动指针指示时间。

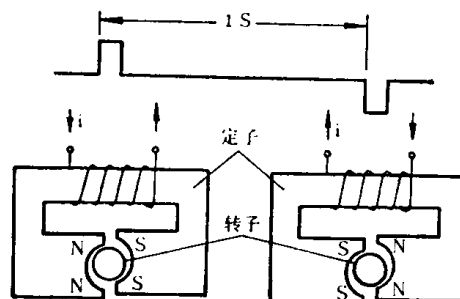


图 1-4-7 步进电机

一般对电机的要求是:

1. 效率高,电路以小功耗驱动,能输出较大的力矩;
2. 小型化;
3. 加工及装配简便;
4. 成本低。

步进电机的转子最初使用铂钴合金,它的缺点是原材料成本高,比重大,转动惯量大。为克服这些缺点,从 1974 年起开始采用钐钴合金,电机的极数由铂钴合金的六极改成钐钴合金的两极,表 1-2 是某厂家采用两种材料电机产品性能的比较表,从表中看出,钐钴合金的优越性大。

表 1-2

|         | 产 品 1   | 产 品 2   |
|---------|---------|---------|
| 转 子 材 料 | 铂 钴 合 金 | 钐 钴 合 金 |
| 极 数     | 6       | 2       |
| 比 重     | 18.5    | 6.2     |
| 材料成本比   | 4       | 1       |
| 电 机 效 率 | 20%     | 35%     |

为了使转子自行起动和向一个方向转动,定子与转子之间的气隙是不均匀的,采用偏心结构如图 1-4-7 所示。这个偏心量很小,装配调整非常不方便。后来就出现了双凹坑式定子,定子圆弧中心与转子中心重合,在定子的两极对称地各开一凹坑,来形成不均匀气隙,另外,最近出现了整体定子,即左右定子合而为一,连结部分的截面应尽量小,但同时还要有一定的机械强度。在磁通微小时,磁通很容易通过这部分,当磁通大时,在这部分内达到



磁饱和状态,这样便与两体式定子相同,利用内圆部分漏磁通工作,使转子转动。同样这种定子也左右凹坑。还有在定子的一个极上开凹坑,定子又是整体的,即单凹坑整体式定子的电机。

此外,就整个电机而言,还分整体式和散装式。

#### 四、显示器件

目前四代表采用发光二极管显示(LED)和液晶显示(LCD)两种。前者优点是:使用寿命长、成本低,是属于主动发光,因此黑夜也可读数。它的最大缺点是耗电太大,所以不能经常显示,看表时按显示按钮,读数,平时不显示,这给使用上带来不便。同时还有在直射阳光下显示不清等缺点。液晶显示的优点是功耗很低。液晶器件生产是依靠光刻技术,因此可以方便的制成任意尺寸和几何形状的器件,手表液晶显示,每字约 $2\times 3$ 毫米(扁平状),大型挂钟,每字约 $200\times 300$ 毫米,液晶显示不怕强光,反射式器件在强烈阳光下显示效果很满意。正因为它是被动发光,只当周围环境有光线存在时才能读数,所以在夜间需开亮表中的小灯泡,借此读数。它的另一缺点是寿命问题,目前经过不断努力,由模拟试验测算寿命可达5~7年。除此而外,它的视角较小,响应速度较慢,低温性能稍差,但是这些因素对手表显示影响不太严重,由于它的功耗甚微等原因,在这些显示器件中,目前液晶显示占优势地位。

液晶是一类有机化合物,它的物理形态介乎液体与晶体之间,既具有液体在宏观上的流动性,又具有晶体在微观结构上的各向异性,这就决定了它的某些特殊性质。如果它能满足某些物理条件,那么其结构组成分子则有一定的取向特性,在电子表中,是采用电场对液晶的作用,即电光效应而显示的。

液晶类化合物在历史上发现极早,但直到1963年对它的电光效应才进行了深入的研究,七十年代初出现了液晶显示器件,而后其发展极为迅速。

液晶大多数是芳香族有机化合物,一般具有如下特点:

1. 分子呈棒状或片状。
2. 分子中至少有一个大的偶极基团,使分子具有一定的永久偶极矩及诱导偶极矩。

根据液晶态的分子不同的排列结构,可将液晶分成三种类型:

1. 近晶型 液晶分子成层状排列,在每层上分子的长轴彼此平行而且垂直于层面,一般来说,它具有较高的表面张力和粘度。

2. 向列型 液晶分子的长轴互相平行,但不形成分层结构,所以其分子运动的自由度较近晶型大。

3. 胆甾型 液晶分子分层排列,每层内分子排列方向相同,且每层之间分子长轴大致倾向平行,但层间排列方向约成 $15^\circ$ 夹角,所以各层之间分子排列方向逐渐扭转,扭转 $360^\circ$ 后与起始层的分子取向相同。相同排列层间的距离称螺距,螺距受外界机械力和温度的影响。

以上三种类型中,向列型用得最多。

向列型液晶根据其化学结构的不同,还可分很多种,它们的特性各有所不同,通常为了满足使用上各方面的要求,利用它们的各自特性做成混合液晶材料。

数字显示器是利用动态散射效应和扭曲效应。电子手表中用向列型扭曲效应的液晶。

对液晶显示的要求是: