

雷 达 技 术 小 丛 书

频 率 自 动 测 量

[苏联] И. В. 鮑格达諾夫著



國防工業出版社

內 容 簡 介

本书討論了利用电子計数頻率計測量頻率的最新方法，电子計数頻率計的特点是精密度高，能在短時間內进行大量測量，并能得到用数字表示的測量結果。除了介紹电子計数頻率計概況外，书中还敘述了各基本环节的綫路与測量誤差的估計。

本书可供从事于使用无綫电技术設備的工程技术人員参考。

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

〔苏联〕Н. В. Богданов

ВОЕНИЗДАТ 1962

頻 率 自 动 測 量

李 圣 岳 譯

蔡 元 龙 校

国防工业出版社 出版

北京市書刊出版業營業登記證出字第074号

新华书店北京发行所发行、各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印張 2 11/16 56 千字

1965年4月第一版 1965年4月第一次印刷 印数：0,001—3,500册

統一書号：15034·1112 定价：（科四）0.30 元

頻 率 自 动 測 量

〔苏联〕И. В. 鮑格达諾夫著

李圣岳译 蔡元龙校



國防工業出版社

1966

目 录

引言	3
第一章 电子计数频率计的概况	4
第二章 电子脉冲计数器	12
1. 脉冲计数器的型式和作用原理	12
2. 触发器在脉冲计数器中的应用	14
3. 二进制和十进制	18
4. 二进制脉冲计数器	19
5. 计数十单元	22
6. 计数结果的指示方法	29
7. 利用某些特殊型号电子管的脉冲计数器	37
第三章 电子计数频率计的部件	45
1. 形成器	45
2. 时标发生器	48
3. 自动机	53
第四章 扩展频率量程的方法	69
第五章 电子计数频率计的精确度和测量误差	76
参考文献	85

引 言

現代技術進步的特點是在所有生產部門中廣泛地運用自動機械，把工作人員的作用縮減到只須監督自動機械正常地工作，故能提高勞動生產率和提高完成生產操作的質量。

在無線電測量技術中，自動化的目的在於縮短測量和處理測量結果的時間。

近十年來，在無線電測量技術中，日益廣泛地採用電子計數或者稱為數字指示測量儀器。這些儀器除了能把測量結果用數字形式送出外，它的特點是工作自動化，就是說，在送入被測信號以後，測量所需的全部運算都是在沒有操作人員參與的情況下實現的，並且當被測參數有顯著變化時，也能在長時間內進行測量。

許多數字指示測量儀器的作用原理，都是把被測量與儀器本身所產生的十分精確的標準時段進行比較。

在測量過程中，被測信號的分割（定量化）是按時間和電平來進行的，就是說，測量是在某些不連續的時刻內進行的，而被測量值只能用有限數來表示，它們的末位數字彼此相差不會小於一。

被測量按時間和電平的定量化，能夠保證對於可見的指示有最方便的——數字的——形式，並且能夠利用所得到的信息使運算自動化。這種形式在記錄指示用的打字儀或打孔裝置和處理測量結果的電子計算機中得到應用。

計數式無線電測量儀器的其他优点是：精確度高、動作快、能長期地和連續地研究交變的電量，免除了操作人員的主觀錯誤且維護簡單。

目前已經掌握并得到極其廣泛應用的數字指示式無線電測量儀器有：頻率計，直流和交流伏特計，電阻、電容和電感的測量儀等。

數字讀數的自動化無線電測量儀器的應用，大大地減輕和加快了各種無線電設備的調整和試驗，並且能夠提高對它們工作的監督效率。

本書是討論測量電振盪頻率的自動儀器——電子計數頻率計。儘管該儀器已經用于無線電測量的實踐，但在有關的文獻中只有一些零星的報導。本書試圖使各種文獻資料中記錄的關於電子計數頻率計的材料系統化和綜合化，並且簡要地指出它們的改進方向。

第一章 電子計數頻率計的概況

信號頻率是無線電設備的主要參數之一。因此，在製造、調整和使用這些設備時，頻率的測量永遠是不可缺少的。無線電接收機、無線電發射機以及各種發生器的標度和校正；整機與各級的調整；無線電信號源頻率穩定性問題的研究和它們工作的監督——這些遠不是全部的任务，可是這些任务的完成如果沒有頻率測量則是不可思議的。

現代接收機和發射機都是具有高精確度的、具有規定頻率的設備。因此，第一個要求就是要保證高的精確度。在一般情況下測量頻率的儀器都必須滿足這個要求。第二個要求是實現快速測量頻率的可能性，這一點的重要性不僅在於縮

短測量所需的時間，還在于實現頻率瞬時值和頻率短時變化的測量。

測量頻率的儀器還應該具有高的靈敏度，能在尽可能寬的頻段內工作，而且測量過程又十分簡單。

測量電振盪的儀器有許多種，用得最廣泛的是直讀式、諧振式和外差式頻率計。

上列類型的頻率計中，沒有一種能完全滿足前面所提出的要求。通常為了達到高精度度，就需要用較長的測量時間和進行複雜的測量。另一方面，假如一種頻率計使用簡單，並且測量過程只需很短時間，那麼在許多實際情況下，其所達到的精度度往往是很低劣的。這個矛盾隨着新型的頻率計——電子計數頻率計——的應用而被消除了。

電子計數頻率計是一種用來測量電振盪頻率并具有數字讀數的無線電測量儀器。

電子計數頻率計的優點是：頻率測量的精度度高、速度快、工作自動化和維護簡單、測量結果用數字送出、被测頻段寬、能自動記錄測量結果等。

電子計數頻率計的頻率測量過程是以自動計算單位時間內脈沖數為基礎的，此脈沖數正比于被测頻率。

大家知道，振盪頻率決定于單位時間內周期數：

$$f = \frac{n}{t}, \quad (1)$$

式中 f ——信號頻率 (赫)；

n ——周期數；

t ——時間 (秒)，在這一時間內進行周期數的計數。

如果測量是在一秒钟內進行，即 $t = 1$ 秒，則

$$f = n. \quad (2)$$

所以，被测频率（赫）的数值等于所计算的周期数。

图 1 所示为电子计数频率计的方框图。

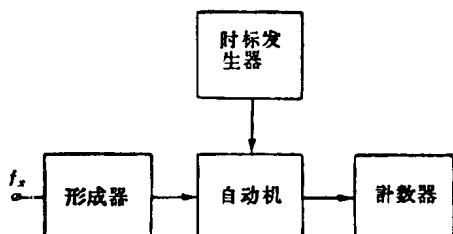


图 1 电子计数频率计的方框图

频率为 f_x 的被测信号送入形成器，该形成器将被测频率的电压变成脉冲，脉冲的形状、宽度和幅度与信号的形状和幅度无关；并且被测信号的每一周期相当于形成器输出一个脉冲。

从形成器输出的脉冲经自动机送入计数器。但只有在严格控制的时间内脉冲才能送入计数器，这一时间称作测量时间。精确度极高的测量时间由时标发生器规定，它控制着自动机。在测量时间内，计数器对送入的脉冲进行计数。假如测量时间为一秒，则根据公式（2）计数器所计出的脉冲数就相当于被测频率的数值（赫）。

自动机保证在测量时间内周期重复地、自动地向计数器送入脉冲，并且在记录计数结果所必需的时间（称作指示时间）内将计数器输入端闭锁。此外，自动机为计数器工作作好准备，即在每一测量周期之前使它处于起始（零位）状态。

典型的电子计数频率计作用图和表示其工作情形的电压

波形图如图 2 所示。

需要测量的振荡频率电压（波形图 a ）经过放大器加到

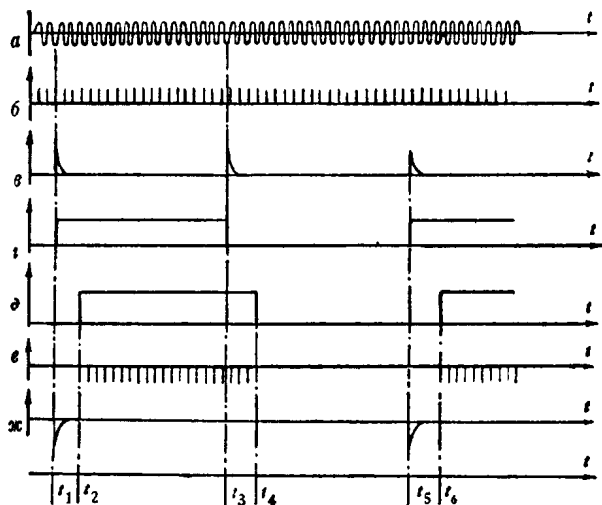
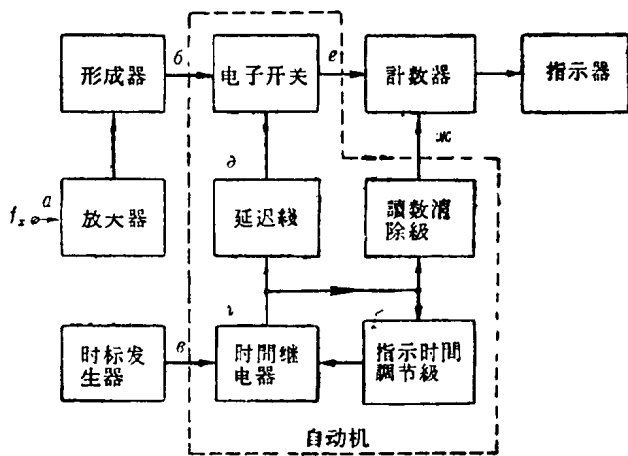


图 2 电子计数频率计作用图及其各点电压波形图

形成器的輸入端，产生与被測信号频率相同的脉冲 θ 。这些脉冲（以后称作計数脉冲）再送入常閉的电子开关。

时标发生器輸出計时脉冲 θ ，此脉冲每經過一个等于測量時間的間隔（例如每經過一秒）后出現一次。第一个計时脉冲在 t_1 瞬間使時間继电器动作，使其輸出端的电压 U 突然升高，時間继电器輸出的正跳变电压經延迟綫在 t_2 瞬間加到电子开关上（电压 θ ），使电子开关开启。計数脉冲 θ 开始进入計数器，計数器就把計数的結果記錄在指示器上。

第二个計时脉冲在 t_3 瞬間使時間继电器恢复到起始状态。这时，時間继电器的輸出电压突然下降。在 t_4 瞬間电子开关被關閉。計数脉冲进入計数器的通道被切断。

在測量周期结束后，指示器的讀数一直保持到計数器的置零装置将其消除为止。

讀数消除脉冲 α 由相应的級产生，当从時間继电器輸出的正跳变电压加到該級时，它就产生讀数消除脉冲。

由于時間继电器輸出脉冲的延迟，讀数消除脉冲将在电子开关开启之前送入計数器，这样計数器就在測量周期开始之前作好准备。

在指示時間 $t_4 \sim t_5$ 內，电子开关關閉，計数器的指示器記下前一次測量的結果。在 t_5 瞬間进行讀数消除。在 t_6 瞬間电子开关开启，計数器重新开始計出送入的計数脉冲数。測量进程不断地重复。

在大多数电子計数频率計中，所規定的可能的測量時間不仅有 1 秒，而且有 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 和 10 秒。若測量時間为 10 秒，則指示器上得到的讀数将不再是 1 赫（因为这是測量時間等于 1 秒时所得的值），而是 10^{-1} 赫；若測量時

間選擇為 0.1 秒，則儀器給出的測量結果為 10 赫；在測量時間為 0.01 秒時，則為 100 赫，依此類推。

這樣，增加測量時間便使送出的測量結果逐級遞減，或與此相反。確定出這種或那種測量時間，操作人員根據每一具體測量所追求的目的，有最廣泛的可能來得到最佳的效果。

在上述情況下，測量時間等於指示時間（不考慮時間繼電器的脈沖時延，它一般為數微秒）。如果選擇測量時間小於 1 秒，那麼這時就不能保證可以從指示器上讀出測量結果，所以大多數電子計數頻率計所規定的測量時間都可以在零點幾秒到 10~15 秒內連續調節。這樣，操作人員就可以任意確定記錄測量結果所需的時間。

操作人員所確定的指示時間是借指示時間調節級來保證的。這個級的作用如下：時間繼電器在 t_1 瞬間回復到起始狀態後，其輸入端被閉鎖，計時脈沖就不可能再使它變為與起始狀態相反的狀態。時間繼電器輸入端的閉鎖發生在所選擇的指示時間持續期內。經這一時間後，時間繼電器輸入端停止閉鎖，繼電器又被下一個計時脈沖所開啟。

按上述綫路工作的電子計數頻率計所能測量的頻率範圍，被脈沖計數器的分辨能力所限制。所謂分辨能力就是指相鄰兩個計數脈沖間的最小時間間隔，此時在每個脈沖單獨作用下還能使計數器準確地動作。

目前，用普通電子管制成的脈沖計數器，其分辨能力約為 0.1 微秒，這相當於 10 兆赫頻率；而用某些特殊型號電子管（如有二次發射的電子管）制成的脈沖計數器，就有可能用來測量數值為幾十兆赫的頻率。

通常，在電子計數頻率計中，採用了工作在 1~10 兆赫

範圍內的脈沖計數器，同時採用使量程提高到几百、几千甚至几万兆赫的輔助裝置。

電子計數頻率計的測量相對誤差不大，在一定條件下甚至比高精度度的外差式頻率計的相對誤差還要小，外差式頻率計的相對誤差一般為 5×10^{-5} 。

目前生產了各種型號的電子計數頻率計，圖3所示即為其中之一種。

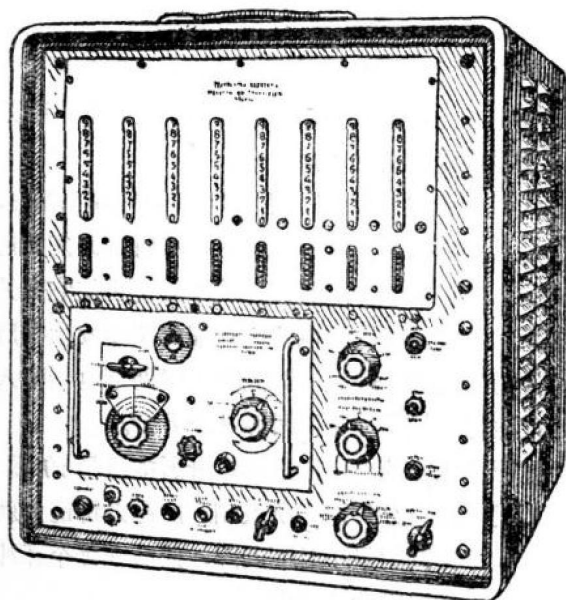


圖3 電子計數頻率計外形圖

電子計數頻率計的主要用途就是測量電振蕩的頻率。此外，利用它還能解決一系列其它問題：測量周期的持續時間；測量時間間隔的寬度和頻率與周期的比值；計算電脈沖的數目。在與專門的附件配合下，電子計數頻率計還能用來測量

非电量——轉速、角加速度、靜压力等。許多电子計数頻率計还帶有能够自动記錄測量結果的附件。

利用电子計数頻率計測量任一物理量的过程都是自动进行的。每台頻率計都有調节机构和各种轉換开关，用来选择工作种类（測量頻率、脉冲計数等）以及規定所要求的状态（建立必要的測量時間与指示時間等）。在測量过程中，只要使仪器处于一定的工作种类和状态之后，就不要求操作人員再作任何調节。

电子計数頻率計是一种包含大量电子管的相当复杂的設備，因此它的尺寸頗大，需要較大的功率，因而也散发出大量热量。电子計数頻率計发热后会使零件的参数改变，結果破坏了仪器的正常工作。

这样，在制造电子計数頻率計时，要合理地用半导体管来代替电子管。

不久以前，把晶体管用到电子計数頻率計中还是比较困难，因为其中装有轉換速度很高的电子继电器（首先是在脉冲計数器中）。最近已有质量很好的面結型晶体管，利用这种晶体管就能够制成特性十分稳定的快速綫路。所以，随着半导体技术的发展必将导致在电子計数頻率計中大量地采用晶体管。采用半导体管的电子計数頻率計，其最大优点是尺寸小和很經濟，此外，半导体管比电子管的寿命长得多，这就大大提高了設備工作的可靠性。

第二章 电子脉冲计数器

1 脉冲计数器的型式和作用原理

计数单元是脉冲计数器的基础。

计数单元的作用原理在于：使加到该单元输入端的脉冲重复频率除以某一严格确定的数字（该数字叫作计数系数）。当脉冲加到计数单元的输入端时，每一脉冲都引起线路原来状态的突然改变。每当数目等于单元计数系数的一组脉冲送入后，单元就自动地恢复到起始状态，并送出一个输出脉冲。单元带有指示器，用这种或那种方法来记录单元在计数脉冲通过时所处的状态。

电子计数频率计中计数器的计数单元是以电子继电器或特殊计数管为基础组成的。

具有电子继电器的计数单元有各种类型，它有两个稳定状态——开断（0）和接通（1）。在每一输入脉冲作用下，线路由一种状态转换到另一种状态。当由状态1转换到状态0时，就送出输出脉冲。所以，这种单元的计数系数 $k=2$ ，由于这一原因它也就叫作二进制计数单元。

除二进制计数单元外，还采用某些特殊电子管和离子器件作为脉冲计数器的组成元件，例如十进计数管、磁旋管等。通常这些器件具有计数系数 $k=10$ 。

脉冲计数器由若干个按一定方式联接的计数单元组成。根据计数单元联接方式，电子计数频率计的计数器可分为环状和串联两种。

由 m 个二进制计数单元组成的环状计数器的方框图如图

4 a 所示。

計数脉冲同时加到所有单元，这些单元相互間的连接应使每个輸入脉冲只能把其中一个开断（0）单元（該开断单元接在处于接通状态的計数单元之后）轉換为状态 1。可以利用第 m 个单元由状态 1 轉換到状态 0 时所得到的脉冲作为进位脉冲。

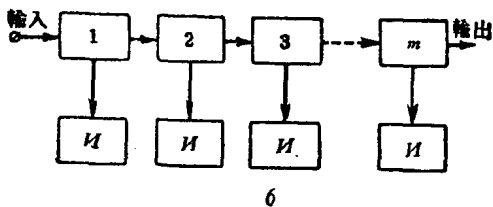
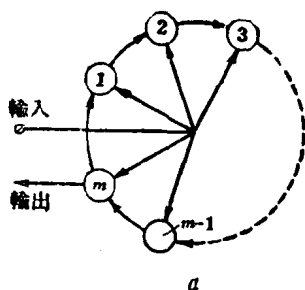


图 4 脉冲計数器方框图

a—环状脉冲計数器；b—串联脉冲計数器。

串联計数器由串联的計数单元組成，如图 4b 所示。計数器接有 m 个計数单元，每个单元各自接有指示器 H 。任一单元的計数系数都等于 k 。

当計数脉冲列送入計数器时，第一单元在每輸入 k 个脉冲后就产生一个輸出脉冲；而第二单元在每送入 $(k \times k)$ 个脉冲后产生一个輸出脉冲；依此类推。所以这一系統总的計

数系数为

$$K = \underbrace{k \times k \times \dots \times k}_{m \text{ 次}} = k^m.$$

計数器所能儲存的最大脉冲数称为計数器的容量。显然，串联作用的計数器的容量等于它的总計数系数。送入 K 个脉冲就完全充滿了計数器的容量，并使計数器回复到起始状态（0 状态）。送入 $(K+1)$ 脉冲时，計数又重新开始。

如果在計数器輸入端送入 N 列脉冲（在 $N \leq K$ 条件下），那末为了計出它們的脉冲数，必須在最后单元的讀数上再加上累积在前面所有单元中的脉冲数，即有

$$N = N_m k^{m-1} + \dots + N_i k^{i-1} + \dots + N_2 k + N_1,$$

式中 N_i ——第 i 个单元指示器的讀数。

电子計数頻率計的計数器常常按串联作用的綫路組成，因为与环状計数器相比，它只需要較少的計数单元就能滿足規定的計数系数。

2 触发器在脉冲計数器中的应用

在电子計数頻率計的脉冲計数器中，常常用对称触发器作为最基本的二进制計数单元。

計数脉冲列送入触发器时，触发器在每一个脉冲作用下改变其状态，并保持在最末一个脉冲作用完成后所呈現的状态。因此，把多个触发器串联时，就能够保証計出加到系統輸入端的脉冲数目，同时还能示出計数結果。

对触发器工作有重大影响的是安装时的寄生电容、所用电子管的极間电容和跨导。

触发器由一种状态翻轉到另一种状态不是瞬时發生的，

而要在有限的时间內完成，这个时间就称为翻轉时间。在这一时间內，一个电子管的栅偏压由零变到負值（相当于靜止状态），而另一个电子管的栅偏压則由負值变到零。

翻轉时间决定于寄生电容重新充电时的过渡过程的持續时间。为了触发器能正常工作，必須使由于触发脉冲作用所引起的过渡过程在下一个脉冲到达之前已經完全結束。显然，为了扩大頻率計的量程，应该竭力降低計数触发器的翻轉时间，亦即力图提高其快速作用。

触发器的翻轉时间随着电子管质量因数的提高而减小，因此，在快速計数单元中采用高质量因数的电子管（如指形管系列的五极管和三极管：6Ж5П, 6Ж9П, 6Ж10П, 6Н3П等）。

为了降低寄生电容对触发器的旁路作用，采用低阻值的阳极負載电阻。有时，为了加快寄生电容的再充电过程，选用阳极电流較大的电子管（例如 6Н6П 等）。而为了增大高频范围内的再充电电流，在电子管的阳极电路中还接入补偿电感。

图 5 所示为一种快速触发器的綫路。触发器采用高跨导五极管。为了减小寄生电容的再充电时间，在电子管阳极电路中接入限幅二极管 $A_3 \sim A_6$ ，使阳极电压的上限为 90 伏，下限为 70 伏。因此，这就好像从脉冲上切下一部分，这个部分的边沿很陡，幅值为 $\Delta U = 90 - 70 = 20$ 伏。被偏压 -2 伏所閉鎖的二极管 A_7 和 A_8 使閉鎖管的負栅压受到限制，这也就减小了过渡过程的持續时间。

触发器的触发方式对其快速作用有很大影响。

在計数电路中，触发器是对称触发的。当計数脉冲的重