

自 動 頻 率 微 調

苏联 M. P. 卡普蘭諾夫 B. A. 列文著

戈 正 銘 譯

人 民 郵 電 出 版 社

М. Р. КАПЛАНОВ и В. А. ЛЕВИН
АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОДСТРОЙКА
ЧАСТОТЫ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1953

內 容 提 要

本書對於無線電工程設備中所應用的各種自動頻率微調系統作了描述和分類。

書中所列舉的計算公式，可供設計帶有自動頻率微調的設備時應用。

本書可供無線電專業人員和工科大学高年級學生閱讀。

自 動 頻 率 微 調

著 者:	苏联 М. Р. 卡普蘭諾夫
	В. А. 列 文
譯 者:	戈 正 銘
出版者:	人 民 郵 電 出 版 社
	北京東四區6條胡同十三號
印刷者:	北 京 市 印 刷 二 廠
發行者:	新 華 書 店

書號無57 1956年4月北京第一版第一次印刷 1—2,500册
850×1168 1/32 112頁 印張7 字數158,000字 定價(10)1.20元

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八號★

目 錄

前言

緒論	1
----	---

第 一 章

自動頻率微調系統的特性	8
-------------	---

1. 分類	8
-------	---

2. 頻率自動微調电路中的基本關係	9
-------------------	---

第 二 章

頻率自動微調电路的動特性曲綫	21
----------------	----

第 三 章

鑑頻器	32
-----	----

1. 諧振式鑑頻器	33
-----------	----

1) 平衡鑑頻器	33
----------	----

2) 具有失諧諧振槽路的鑑頻器	45
-----------------	----

3) 晶体鑑頻器	48
----------	----

2. 非週期鑑頻器	55
-----------	----

1) 帶有移相电路的非週期鑑頻器	55
------------------	----

2) 帶有高通和低通濾波器的非週期鑑頻器	66
----------------------	----

3) 橋式非週期鑑頻器	74
-------------	----

3. 零拍鑑頻器	80
----------	----

1) 作用原理	80
---------	----

2) 移相电路的电路和元件的選擇	84
------------------	----

3) 零拍鑑頻器的电路	87
4. 選擇鑑頻器电路的一般根据	99
第 四 章	
頻率自動微調系統的穩定性	108
第 五 章	
控制元件	137
1. 基本要求和分類	137
2. 电子式控制元件	141
3. 机械式控制元件	166
第 六 章	
相位自動頻率微調	181
第 七 章	
公分波振盪器的自動頻率微調	190
第 八 章	
自動頻率微調的电路	203
参考文献	213
附錄	214

緒 論

在絕大多數現代無線電設備中，例如在無線電定位、無線電通訊等設備中，最重要的任務之一，就是要得到一定頻率的電振盪。

頻率能否準確地保持在所給額定值上，是用無線電設備工作頻率的穩定度來表示的。

某設備的工作頻率的振盪，應理解為該設備中起主要作用的電振盪，例如，在接收機中，即為本机振盪器的振盪，在發射機中即為發射到周圍空間去的振盪。如果在所有以下各級中，穩定度在原則上是不能再發生變化的話，則可以認為工作頻率是已經形成了。

現代無線電設備中用來形成工作頻率的各種電路，很難嚴格地分成某些具有顯著特徵的種類。

但是在任何電路中都可以看到三種熟悉的頻率穩定方法：

- a) 參數穩定法，
- б) 藉助於機械振盪系統的穩定法，
- в) 採用自動微調的穩定法。

參數穩定法的特點是：

- 1) 在決定頻率的振盪槽路中採用品質優良的零件。
- 2) 應用補償的方法以減小溫度對振盪槽路參數的影響。
- 3) 選擇振盪器的電路，使得電子管工作狀態和以後各級對所發生頻率的影響最小。

利用機械振盪系統的穩定法基於採用自然頻率穩定度高和衰減率小的物體。除了這些性質之外，作穩定用的物體還應具有能將電

振盪能量轉变为机械能和將机械振盪能量轉为电能的特性。

具有上述性質的首先是具有正的和反的压电效应的晶体，例如石英，电气石等。

裝有音叉，磁致伸縮桿等的設備亦可用作將机械能轉变为电磁能的变换器。

为了保証必要的頻率穩定度，晶体的应用是有重要意义的。晶体的自然頻率穩定度高，衰減率小，而且从結構（尺寸和重量小）和製造的觀點來看，也是所有已知机械振盪系統中最可取的。

自動頻率微調系統是以各种技術領域中廣泛採用的自動調整原理为基础的。

这个原理在於：將被調整的參數与標準參數相比較。当參數和它的額定值之間有偏差時，調整系統就自動地減小这个偏差。在我們所研究的場合中，被調整的參數就是工作頻率，而標準參數就是某一具有高穩定度的振盪器的頻率。

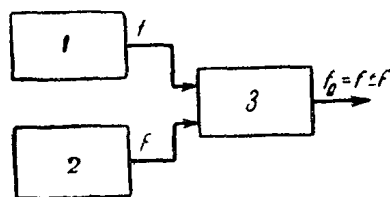


圖 1 插入激勵器的方塊圖

在这个場合中，調整系統是由頻率檢波器（通常叫作鑑頻器）和控制元件所構成。後者作用於振盪器振盪槽路中的某一參數，使工作頻率發生变化而趨近於額定值。

所举的这三个方法可以單獨地应用，也可以任意組合起來应用。

可以援引大家所熟悉的激勵器的插入电路來作为这种組合穩定方法的一个例子。這類电路構成的原理，是節特連克教授（苏联）首先提出的，看了圖 1 以後，很容易理解这一原理。

有着高度穩定頻率 f 的晶体振盪器 1 的振盪和頻率為 F 的均勻波段振盪器 2——有時稱為插入振盪器 (Интерполяционный Генератор)——的振盪都加到混頻器 3 上，在混頻器的屏路中接入一個不同調諧的諧振槽路，它可以從組合頻率 $f \pm F$ 中選出一個頻率來。改變頻率 F 及諧振槽路的調諧，就可以在一個波段內得到任意數值的工作頻率。

具有參數穩定的插入振盪器的穩定度，通常比晶体振盪器的穩定度要差。但是頻率 f 對 F 的比值越大，工作頻率 $f \pm F$ 的合成穩定度就越高，因為在這情況下，插入振盪器頻率 F 的偏移對經過穩定的工作頻率 $f \pm F$ 的影響將會相對地減小。

採用符號：

f_0 —工作頻率的額定值；

Δf_0 —工作頻率移離額定值的偏移；

Δf —晶体振盪器頻率移離額定值的偏移；

$\frac{\Delta f_0}{f_0}$ —工作頻率的相對不穩定度；

$\frac{\Delta f}{f}$ —晶体振盪器頻率的相對不穩定度；

$\frac{\Delta F}{F}$ —插入振盪器頻率的相對不穩定度；

$n = \frac{f}{F}$ —插入數。

大家知道⁽¹⁾

(1) 參看 Н. С. 別斯恰斯特諾夫和 В. Н. 索蘇諾夫“無線電發射設備” ВЭТАС 出版社，1941年版。

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{n}{n \pm 1} \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{n \pm 1} \frac{\Delta F}{F} \quad (1)$$

如果 $\frac{\Delta f}{f} \ll \frac{\Delta F}{F}$ 並且 $n \gg 1$, 則从(1)可知:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{1}{n} \frac{\Delta F}{F} \quad (1')$$

从式(1')看出, 工作頻率的穩定度是插入振盪器頻率穩定度的 n 倍。

應該指出, 插入电路的应用很廣泛(特別是在測量設備中), 在這些电路中, 工作頻率是由兩個或更多個晶体振盪器產生的振盪混合而得出的。

插入电路的缺點在於輸出端上除了有有用的工作頻率电压外, 還有其他有害的組合頻率电压。当利用这种电路來作發射机的主控振盪器時, 這些組合頻率的振盪就向周圍的空間發射。当利用这种电路來作接收机的本机振盪器時, 組合頻率的振盪就引起幻象接收通路的出現。

应用足够數量的濾波电路可以使有害的組合頻率电平得到部分的降低。顯然, 这就使設備的構造複雜化了。

利用自動微調方法的电路沒有上述的缺點。在這種情況下根据上述电路中的一个來裝置標準頻率振盪器, 但它所發生的頻率不是用來向周圍空間發射, 或者用來改变接收訊号的頻率, 而是用來作為一個標準, 根据这个標準, 可以自動地校正被穩定振盪器的頻率。

自動頻率微調理論是自動調整一般性理論的一種特殊应用。自動調整的一般理論是傑出的俄罗斯學者, 彼得堡技術学院的教授伊

凡·阿列克謝也維奇·魏什涅格拉茨基所創的。И. А. 魏什涅格拉茨基教授在 1877 年所發表的經典性著作“論直接作用的調整器”中，敘述了蒸汽机的直接調整的基本原理。他同時研究出解決有關自動調整過程的穩定性問題的工程上的方法。И. А. 魏什涅格拉茨基研究了機器的慣性，調整器的質量和摩擦等重要因素對調整過程的影響。對於自動調整系統有着首要意義的穩定性理論則是由卓越的俄羅斯學者亞歷山大·米哈依洛維奇·李雅普諾夫院士所創立的。

1892 年，А. М. 李雅普諾夫在他的博士學位論文“關於運動的穩定性的一般問題”中給運動的穩定性下了一個確切的定義，從而解決了一系列自動調整理論的問題。

А. М. 李雅普諾夫所作出並證明的經典性的定理同樣可以用來解決自動頻率微調系統穩定性的問題。

И. А. 魏什涅格拉茨基和 А. М. 李雅普諾夫的經典性著作在蘇聯學者的著作中得到了應有的承繼。

А. А. 安德羅諾夫院士，蘇聯科學院通訊院士 И. Н. 伏茲涅先斯基，調整理論中的頻率調整方法的奠基者 А. В. 米哈依洛夫和其他許多學者的著作對自動調整的一般性理論作出了巨大的貢獻。

研究自動頻率微調系統中所發生的動態過程時，完全是以自動調整理論的方法為基礎。在分析自動頻率微調系統時廣泛採用的一些概念，如自動微調係數，捕捉和抑制頻帶（Полоса схватывания и удержания），穩定度等，都是自動調整理論中更一般性概念的一些局部表現。

在本書中沒有講述自動調整的基本理論，而是尽可能地根據無線電工程的基本定律和方法來進行敘述。要對內容作更深刻的了解，最好是研究有關自動調整的豐富文獻。

在創立自動頻率微調電路的原理和計算方法這方面，蘇聯學者也是佔先的。И. И. 齊斯恰可夫〔參考文獻 1 和 2〕在 1938 年和 1940 年所發表的論文中敘述了他所創立的平衡鑑頻器和具有失諧諧振槽路的鑑頻器的工作理論。在這些著作中，И. И. 齊斯恰可夫描述了頻率調整的動態過程，並且以解析方式確定了動特性曲線。

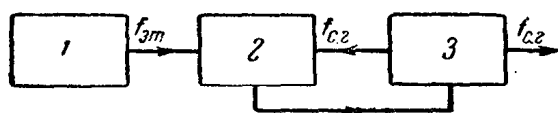


圖 2 自動頻率微調系統的方塊圖

在 1940 年，В. И. 西福羅夫和 Г. В. 吉特紹夫〔參考文獻 10〕發表了對自動頻率微調系統的穩定性問題進行基本研究的結果。И. И. 齊斯恰可夫的著作〔參考文獻 17〕就這同一問題考慮了延遲效應。

Я. З. 崔普金〔參考文獻 11〕創立了考慮了延遲效應的自動頻率微調系統穩定度的工程計算方法。

在調頻無線電設備中，應用自動頻率微調系統的一系列的理論研究是由 И. С. 高諾羅夫斯基所進行的〔參考文獻 3〕。И. С. 高諾羅夫斯基所得到的一些關係奠定了現代計算方法的基礎。

М. Г. 馬爾高林〔參考文獻 7〕創立了零拍鑑頻器的電路，並研究了它的理論。

利用自動微調的頻率穩定方法的方塊圖示於圖 2。設備 2 根據標準頻率振盪器 1 的頻率而對被穩定振盪器 3 的頻率進行自動調整。設備 2 叫作自動頻率微調系統，或簡稱作自動微調系統。

在這個電路中，被穩定振盪器的振盪是用來發射到周圍空間中，或用來與接收訊號混合。這樣，可能在標準頻率振盪器輸出端出現的組合頻率，不再進入無線電設備的系統中去，因此，在激勵器

的輸出端永遠只有一個工作頻率。

自動頻率微調也廣泛地應用於所謂帶有自動調諧的接收機中。在這種情況下，所收無線電台的訊號頻率就用作為標準頻率。接收機本机振盪器的頻率自動地變化着，使得訊號頻率和本機振盪器頻率間的差永遠等於額定的中頻。這類設備可以大大簡化把接收機調諧到所需電台的手續，並保證即使在發射機頻率不穩定的情況下，也能進行穩定的接收。

由於有了上述的一些優點，所以在現代無線電設備中，都廣泛採用着自動頻率微調的方法。

在設計帶有自動頻率微調的設備時，若應用已調振盪的頻率作為標準頻率，或者被穩定振盪器的振盪在與頻率標準比較之前即已被調制，那麼考慮所採用的調制類型是十分重要的。

為了解釋這個情況，我們假設：由於自動微調的作用，被穩定振盪器的頻率 $f_{c.2}$ 根據標準頻率 f_{sm} 而得到了某種程度的校正。如果由於某些因素的作用而使頻率 $f_{c.2}$ 的數值發生了變化，則在經過自動微調的作用之後，它又會根據標準頻率而得到校正。因此可以說，頻率 $f_{c.2}$ 的穩定度將接近於頻率 f_{sm} 的穩定度。

在被穩定的振盪或標準振盪是調頻振盪的情況下，它們的頻率變化是有用的，這時，若自動微調電路選擇不當，就可能發生去調制作用。為了避免這種現象，自動微調電路只應該對中心頻率，亦即在沒有調制電壓時的振盪頻率起作用。能夠滿足上述要求的，有各種不同的電路。它們能使自動微調系統不對有用的頻率變化起作用，但卻能保證對中心頻率的變化進行校正。以後將分析在調幅以及調頻情況下利用自動微調來穩定頻率的各種具體電路。

第一章

自動頻率微調系統的特性

1. 分類

前面已經指出，自動頻率微調過程就是相應元件對被穩定振盪器頻率的自動控制作用。假如已設法使得自動微調在一切調制方式時都只對振盪的中心頻率的變化發生作用，那末在分析時就可以不去考慮調制類型。

這樣，被穩定振盪器所產生的和諧振盪的方程可以寫成下列形式：

$$a(t) = A_m \sin(\omega_{c,0}t + \theta_0),$$

這裏 $a(t)$ —電壓或電流的瞬時值；

A_m —振盪幅度；

$\omega_{c,0}$ —被穩定振盪器的角頻率；

θ_0 —振盪的起始相位。

假如由於不穩定因素的作用，被穩定振盪器頻率 $\omega_{c,0}$ 有了增量 $\pm \Delta\omega$ 。這時振盪方程可以寫成下列形式：

$$\begin{aligned} a(t) &= A_m \sin[(\omega_{c,0} \pm \Delta\omega)t + \theta_0] \\ &= A_m \sin(\omega_{c,0}t \pm \Delta\omega t + \theta_0). \end{aligned} \quad (2)$$

從方程(2)可以得出結論：頻率 $\omega_{c,0}$ 的變化引起振盪相位的變化，相位變化的數值在任一瞬間由 $\pm \Delta\omega t = \pm \Delta\theta$ 所決定。

一般說來，當頻率是依照某種複雜規律而變化時，在任何瞬間 t 表明頻率變化與相位變化之間的關係的方程可以寫成下列形狀：

$$\Delta\theta = \int_0^t \Delta\omega dt. \quad (3)$$

这样，就可能有兩種自動微調电路的方案。二者的差別在於：当頻率 ω_{c1} 变化時，一种电路是对頻移 $\Delta\omega$ 起作用，另一种电路則是对依照方程(3)与 $\Delta\omega$ 等效的相位偏移 $\Delta\theta$ 起作用。根据這點，最好把所有的自動微調电路分成兩個主要類別：

- 1) 頻率自動微調，
- 2) 相位自動微調。

顯然，就我們所感兴趣的結果來說，兩種电路的作用是一样的，这就是被穩定振盪器的頻率变化应能根据標準頻率而得到校正。換句話說，自動微調系統既可以對頻率的變化起作用，也可以對相位的變化起作用；這時我們所一直感兴趣的是能使被穩定振盪器頻率發生變化的回授作用，即自動微調作用。

本書主要是對頻率自動微調系統加以敘述和分析。

相位自動微調的特點將在第七章中敘述。

在文献中已廣泛採用 АПЧ 這一縮寫來代表整個的自動頻率微調系統 (Система Автоматической Подстройки Частоты) 除此以外，本書還採用了 ЧАП 和 ФАП 兩個縮寫符號來分別表示頻率和相位自動微調 (Частотная и Фазовая Автоподстройки)。

2. 頻率自動微調电路中的基本關係

前面已指出，自動微調系統的任务在於当不穩定因素作用於被穩定振盪器的時候，去校正這個振盪器的頻率。

在研究自動調整系統時，把承受自動頻率微調系統所生作用的振盪器叫作調整對象。調整對象並不直接包括在自動微調系統中。在我們所感興趣的場合中，被穩定振盪器就是調整對象。在以後的敘述中，所有表示這個振盪器工作的符號都帶有標註 G, I' 。

ЧАП 系統本身是由兩個主要元件所構成：

1. 鑑頻器：指示出標準頻率和被穩定振盪器頻率間的偏差，並產生與這個偏差相應的輸出控制電壓。
2. 控制元件：直接改變被穩定振盪器的頻率，並使它趨近於標準頻率。

按照標準頻率振盪器對被穩定振盪器頻率進行自動微調的系統的總方塊圖示於圖 3。

ЧАП 系統是方向性作用的系統：被穩定振盪器頻率的控制是沿着相應的通路按箭頭所指的方向進行的。在分析 ЧАП 的工作時，可以忽略後面的元件對前面的元件的影響。

應該強調指出，在帶有自動微調的設備中，工作頻率的額定值可以和標準頻率的數值不同。

下面將會講到，在某些 ЧАП 電路中，標準頻率的數值必須選得和工作頻率的額定值相差某一個嚴格固定的數值。在這種電路中，即使沒有任何不穩定因素，額定頻率和標準頻率之間的差別也總是存在的。

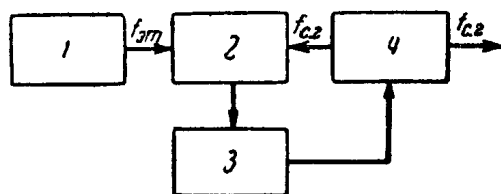


圖 3 頻率自動微調系統的方塊圖

- 1—標準頻率振盪器； 2—鑑頻器；
3—控制元件； 4—被穩定振盪器。

這樣，對於任何一個 ЧАП 系統都可寫出下面的關係：

$$f_0 = f_{sm} \pm f_d, \quad (4)$$

這裏 f_0 —被穩定振盪器工作頻率的額定值;

f_{am} —標準頻率;

$f_0 - f_{am}$ 與 f_{am} 間的頻率間隔。

在鑑頻器的輸入端裝置着一個設備，這個設備的功用在於鑑別出工作頻率與標準頻率間的差頻。通常用作為這種比較設備的是混頻器， f_{ca} 與 f_{am} 間的差頻電壓就由這個混頻器加到鑑頻器的後一級上。

如果這個差頻等於 f_{∂} ，那末根據關係式(4)，ЧАП系統不應起作用，因為此時被穩定振盪器頻率就是等於 f_0 。

假設被穩定振盪器振盪槽路的參數在不穩定因素的作用下發生了變化，使得工作頻率對它的額定值而言變化了 Δf_n (在沒有自動微調的情況下)。這樣就會使差頻也發生同樣數值的變化。這時，差頻將等於 $f_{\partial} \pm \Delta f_n$ 。對應於沒有自動微調時的 Δf 值，通常叫作起始失諧或起始頻移。

在以後的敘述中，現在講的這個被穩定振盪器頻率對額定值的偏移值用 Δf 來表示。相應的角頻率偏移則用 $\Delta \omega$ 來表示。

鑑頻器受到差頻電壓的作用，就在輸出端產生一個控制電壓。當 $\Delta f = 0$ ，亦即被穩定振盪器頻率等於 f_0 時，這個電壓應該等於零。這時 ЧАП系統不工作。當頻率移離 f_0 時，在鑑頻器輸出端就應該產生一個電壓，它的大小則決定於失諧 Δf 的大小。

以後將會看到，鑑頻器必須具有這樣的特性，即當失諧的符號變化時，電壓的極性也要變化；也就是說，當 $f_0 > f_{ca}$ ($\Delta f < 0$) 時，極性是一種符號，而當 $f_0 < f_{ca}$ ($\Delta f > 0$) 時，極性則應是另一種符號。

控制元件在鑑頻器輸出端電壓的作用之下，就能使被穩定振盪器頻率發生變化，其方向與起始失諧方向相反。因此，頻率 f_{ca} 的

數值就趨近於額定值，也就是說，它們之間的差別的絕對值將小於 Δf_n 。當失諧的符號發生變化，鑑頻器輸出電壓相應改變其極性時，控制元件对被穩定振盪器頻率的作用也永遠應該使起始失諧減小。

鑑頻器和控制元件的工作特徵可用它們的靜特性曲線來表示。

鑑頻器輸出端所得到的控制電壓 U_y 對頻移值的關係曲線叫作鑑頻器的靜特性曲線，而即：

$$U_y = \eta(\Delta f).$$

被穩定振盪器頻率的變化對加到控制元件上的電壓的關係叫作控制元件的靜特性曲線，亦即：

$$\Delta f = \varphi(U_y).$$

上述這兩根特性曲線的頻率軸的原點是相當於被穩定振盪器額定頻率值的一點。

因此：

$$\Delta f = f_{c.t} - f_0.$$

這些特性曲線之所以稱為靜態曲線，是因為它們是 ЧАП 的元件在電路斷開時的曲線。在閉合的 ЧАП 電路中，由實驗來得出這些特性曲線是不可能的，因為在鑑頻器輸出電壓的影響下，控制元件將使被穩定振盪器的頻率發生變化，所以不可能使 Δf 和 U_y 的數值固定不變。

鑑頻器靜特性曲線的兩種可能的類型表示在圖 4 中（曲線 1 及 2），而控制元件特性曲線則表示在圖 5 中。

圖 4 中兩根曲線的根本差別在於：曲線 1 的導數的符號是不變的，可是曲線 2 的導數符號是要變化的。以後在考察不同類型的鑑頻器時，要把它們的靜特性曲線與圖 4 的曲線 1 和 2 相比較。那時不是從幾何上完全相似的觀點，而只是根據導數符號變化的特徵來

進行比較。

在以後的敘述中，為簡便計，把靜特性曲線簡稱為特性曲線。

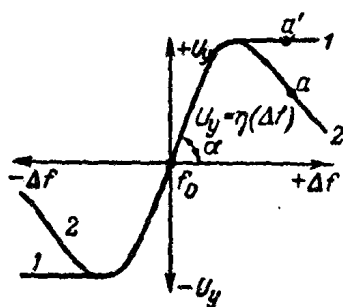


圖 4 鑑頻器靜特性曲線

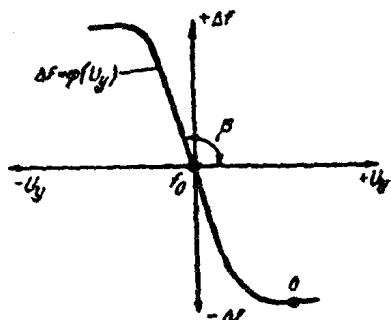


圖 5 控制元件靜特性曲線

研究鑑頻器的工作時，我們將利用 $\frac{U_y}{\Delta f}$ 這個量，這裏 U_y 和 Δf 是曲線 $U_y = \eta(\Delta f)$ 上要決定此一比值的那一點的坐標。與此相似，在考察控制元件時，我們將利用 $\frac{\Delta f}{U_y}$ 這個量，這裏 Δf 和 U_y 是曲線 $\Delta f = \varphi(U_y)$ 上一點的坐標。

特性曲線通過坐標原點的部分叫作起始部分，這一部分可以近似地用直線來表示。對這一部分特性曲線來講，因為上述的兩個比值與導數 $\frac{dU_y}{d(\Delta f)}$ 及 $\frac{d(\Delta f)}{dU_y}$ 的值相吻合所以這比值就是特性曲線的斜率。

$S_y = \frac{dU_y}{d(\Delta f)}$ 這個量叫作鑑頻器特性曲線的斜率， $S_f = \frac{d(\Delta f)}{dU_y}$ 叫作控制元件特性曲線的斜率。

特性曲線的有些部分不能近似地用通過坐標原點的直線來表示。對於位於這些部分的點，例如圖 4 的 a 及 a' 點，圖 5 的 δ 點，縱坐標對橫坐標的比值是特性曲線的平均斜率。鑑頻器與控制元件