

世 界 名 著

反饋放大器與振盪器

ROBERT E. SENTZ 著
ROBERT A. BARTROWINK

朱 耀 衣 譯

國家科學委員會補助

國立編譯館出版
世界書局印行

世界名著

反饋放大器與振盪器

ROBERT E. SENTZ 著
ROBERT A. BARTKOWIAK 著
朱 耀 衣 譯

國家科學委員會補助

222458

國立編譯館出版
世界書局印行

序

本書為電子工藝學叢書（ELECTRONIC TECHNOLOGY SERIES）中之一冊，其對象為工藝學院，工業專科學校，及專門學校之學生。亦可用作為晉升在職技術人員而設之工業訓練計劃課本和單獨自修計劃課本。

本書之主要目的是討論作為反饋放大器之有源裝置之應用。負反饋與正反饋（如用於振盪器者）均將論到，同時也包含二端點負電阻裝置。我們雖然採用整體的（電晶體和真空管）方法，但著重的是電晶體電路，而附帶的真空管部份，只是使討論更臻完善而已。我們覺得此一方法最能反映目前電子技術之趨勢，而對讀者也最有益。

我們所假定事先應有之知識如下：(1)直流與交流電路之課程（包含網絡之一般定理）；(2)對於基本電子裝置（電晶體和真空管）用於單級和多級的電壓和功率放大器的瞭解；(3)級際耦合之方法，及其對增益和頻帶寬度之效應；(4)代數學與三角學之演算知識。

本書講述之順序如下：

1. 反饋之基本種類：本章列論應用於理想放大器及附有有限輸入和負荷電阻放大器的基本反饋原理。
2. 單級反饋放大器：本章就使用並聯和串聯反饋之單級電晶放大器加以分析。本章亦討論到反饋作用在單級真空管放大器中之應用，並且介紹運算放大器之基本原理。
3. 穩度，相移，及頻率響應：本章材料包含了裝置和電路之參數對於反饋電壓之相移的效應，用以討論穩度之倪奎氏準則（Nyquist Criterion），以及反饋原理應用於多級電路

之情形。波德圖 (Bode Plots) 則被用來輔助本章之分析。全章主要重點仍在電晶體電路。

4. 簡單振盪電路和四端LC振盪器：本章包括巴克豪生 (Barkhausen) 準則之分析，及振盪之一般迴路電流之解法。同時，也包含了典型的 LC 振盪器電路之應用。
5. 晶體振盪器：本章討論晶體之特性，及其用來穩定振盪頻率時在電路上之應用。
6. 負電阻振盪器：本章討論負電阻之觀念，及其應用於隧道二極體電路之情形。
7. RC 相移振盪器：本章討論用以產生正反饋之串級相移網絡，以及頻率選擇「零網絡」電路 (維恩 (Wien) 電橋)。
8. UHF 和微波振盪器：本章討論克服真空管在300到3000百萬赫 (MHz) 範圍內所受限制的技術。

在電晶體電路之分析中，我們廣用高頻混合 (Hybrid) 等效電路 (混合- π 型) 以及一般混合等效電路。在某種情形下為便於產生某種電路關係，我們用到了 T 型等值電路。本書舉出許多已解之例題以說明實際問題之解法。每章之終了，均有實用之問題及習題，作為練習。在附錄中包含有精選之電晶體數據，以便解題時參考。

為了使有最大之伸縮性起見，本書之若干章節在課程時間有限時可以刪除。

目 錄

第一章 反饋的基本種類

1-1	理想放大器之反饋原理	1
1-2	實際放大器的負電壓反饋	5
1-3	實際放大器的負電流反饋	11
1-4	負橋式反饋	15
1-5	分析反饋電路的方法	15
	問答題與計算題	16

第二章 單級反饋放大器

2-1	等效電路	21
2-2	利用串聯反饋的電晶體放大器	36
2-3	利用分路反饋的電晶體放大器	46
2-4	真空管反饋放大器	53
2-5	運算放大器	59
	問答題與計算題	63

第三章 穩度，相移，及頻率響應

3-1	穩定與不穩定	69
3-2	穩度的條件	73
3-3	相移與衰減間的關係	78
3-4	多級電晶體反饋放大器	86
3-5	多級真空管反饋放大器	100
3-6	反饋對頻率響應的效應	104
3-7	反饋對相移的效應	108

問答題與計算題	109
第四章 簡單振盪電路及四端LC振盪器	
4-1 振盪的條件	118
4-2 LC 振盪電路	119
4-3 調集極及調屏振盪器	123
4-4 一般化 LC 振盪器分析	127
4-5 哈特萊振盪器 (Hartley Oscillator) 的分析	130
4-6 柯耳匹茲振盪器 (Colpitts Oscillator)	135
4-7 克拉普—葛理耶振盪器(Clapp-Gouriet Oscillator)	138
4-8 調諧輸入，調諧輸出振盪器	140
4-9 頻率穩度	141
4-10 推挽式振盪器	142
4-11 電子耦合振盪器	142
問答題與計算題	143

第五章 晶體振盪器

5-1 石英晶體及其特性	147
5-2 一些普通晶體割截的特性	153
5-3 用於並聯諧振電路中的晶體	154
5-4 用於串聯諧振電路中的晶體	156
5-5 使用晶體穩定的橋式電路	157
問答題	158

第六章 負電阻振盪器

6-1 負電阻簡介	161
6-2 負電阻特性的種類	163
6-3 隧道二極體 (Tunnel Diode)	166
6-4 隧道二極體振盪器	170

6-5	真空管負電阻振盪器	172
	問答題與計算題	172

第七章 RC相移振盪器

7-1	RC 相移網絡	175
7-2	電晶體 RC 振盪器	178
7-3	真空管相移振盪器	182
7-4	維恩橋式振盪器	184
7-5	其他「零網絡」電路	188
	問答題與計算題	189

第八章 UHF及微波振盪器

8-1	電晶體及真空管之高頻限制	191
8-2	蝶式諧振器	196
8-3	諧振線振盪器	198
8-4	回復調速管振盪器	201
8-5	磁控管振盪器	204
8-6	行波管	211
8-7	逆波振盪器	213
	問答題	214
附錄	電晶體特性	217
	奇數題的解答	217

索引

第一章 反饋之基本種類

由一電網絡之輸出端將能量轉移到網絡的輸入端，這叫做反饋 (Feedback)。所以反饋放大器可以定義為一個放大器，其輸入信號一部份係由此放大器之輸出端而來，而另一部份係由外在的信號電源而來。當反饋信號係用來減小有效輸入時，此反饋叫做負反饋 (Negative Feedback)，或倒反饋 (Inverse Feedback)，或退化反饋 (Degenerative Feedback)。當反饋信號係用來增加有效輸入信號時，此反饋即稱為正反饋 (Positive Feedback)，或直接反饋 (Direct Feedback)，或再生反饋 (Regenerative Feedback)。

當負反饋或正反饋被用於放大器時，則其增益，增益穩度、失真、頻率響應、及輸入和輸出阻抗均發生改變。負反饋的優點為：減小頻率和相位失真，改進放大器之穩度，以及擴張放大器之頻帶寬度以超出無反饋時之界限。另一方面，負反饋的缺點就是增益的減小。正反饋之效應恰好相反，其優點為增益增加，特別在某一個頻率時。

在放大器中負反饋較常用，而在本章將加以討論。正反饋主要是用於振盪器中，這將在以後討論。本章所討論者僅限於中頻 (Midfrequency) 或中間頻帶 (Midband) 的區域，在這區域內，我們所討論的放大器將有一最大增益以及零相移。

1-1 理想放大器之反饋原理^{1,3,4}

反饋放大器可分為兩個主要部份：放大器本身以及反饋網絡。圖 1-1 所示為一附有反饋之理想電壓放大器的方塊圖。將電路在 b 點開斷，並將 a 點接地，則此放大器即可與反饋網絡隔離。在這些隔離條

2 反饋放大器與振盪器

件下，放大器的作用就如一個具有增益 A_v 的正常放大器一樣；此增益 $A_v \equiv e_o/e_i$ ，叫做開環電壓增益 (Open-loop Voltage Gain)。由於這個電壓放大器是一個理想放大器，所以輸入阻抗等於無窮大而輸出阻抗等於零。這使得在反饋網絡加上之後，不致對放大器產生負荷的影響。

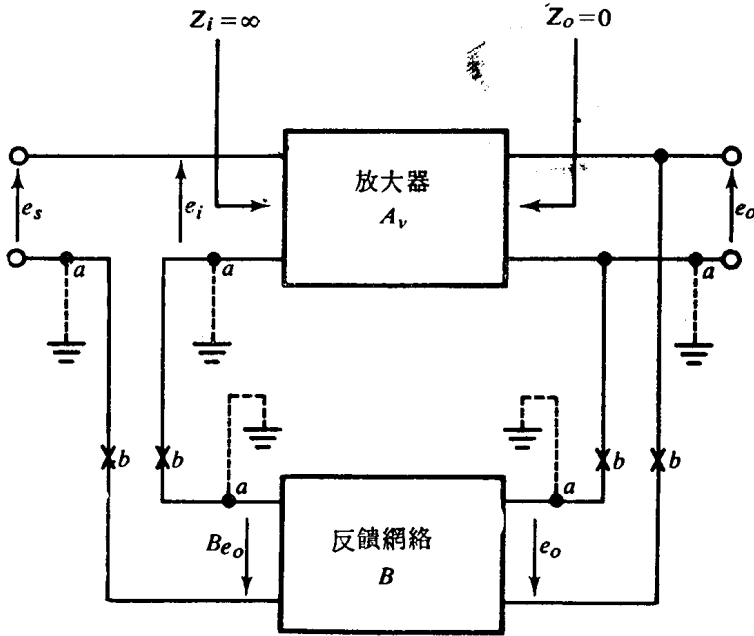


圖 1-1 附有反饋之理想電壓放大器。

如果將圖 1-1 中的點 b 重新接上，並將點 a 之接地除去，則輸出電壓的一部份 B 即反饋到輸入，而與輸入之信號電壓串聯。即 $B \equiv e_f/e_o$ ，式中之 e_f 即為反饋電壓。

雖然符號 β 常被用來做為反饋的記號，但是，這個符號也被用來表示電晶體的共射極「前向電流增益」(Forward-current Gain)。為了避免任何可能的混雜，我們用 β 來表示電晶體的共射極前向電流增益 (h_{fe})，而用 B 來表示反饋網絡的部份增益。

當反饋加於圖 1-1 之放大器時，其有效輸入電壓即等於信號電壓 e_s 與輸出電壓的 B 部份之和。如是，

$$e_i = e_s + Be_o \quad (1-1)$$

由於基本放大器之放大倍數為 A_v ，因此，

$$e_o = A_v e_i \quad (1-2)$$

若以 $(e_s + Be_o)$ 代替 1-2 式之 e_i ，則

$$e_o = A_v (e_s + Be_o) \quad (1-3)$$

由 1-3 式解輸出電壓 e_o 與輸入電壓 e_s 之比，得

$$A_{vf} = \frac{e_o}{e_s} = \frac{A_v}{1 - A_v B} \quad (1-4)$$

A_{vf} 就叫做閉環增益 (Closed-loop Gain)，或附有反饋之總增益。

由 1-4 式，顯而易見，閉環增益即為開環增益乘上一個因數，即 $(1 - A_v B)$ 之倒數。此式中的 $A_v B$ 常被稱為反饋因子 (Feedback Factor) 或返回比率 (Return Ratio) 或環增益 (Loop Gain)，因為輸入信號通過環繞整個反饋放大器的封閉路線時，此信號即先乘 A_v 再乘 B 。

〔然而，有一點應該注意的是，有些書上把 $(1 - A_v B)$ 定為反饋因子〕。在頻率領域中，放大器的增益 A_v 可能是複數，而 B 也可能是複數，所以積 $A_v B$ 之可能為複數該是意料中的事。

假如反饋因子為正且小於 1 (即 $0 < A_v B < 1$)，則總增益 A_{vf} 將大於 A_v ；因為 1-4 式中之分母將小於 1。因為反饋電壓 Be_o 與 e_s 的相位相同，因而增加了有效輸入電壓 e_i ，此一條件即造成正反饋。

假如反饋因子為負，則總增益 A_{vf} 將小於 A_v ；因為 1-4 式中之分母將大於 1。此時，因反饋電壓與 e_s 相差 180° 的相角，而減低了有效輸入電壓 e_i ，此一條件即造成負反饋。圖 1-2 即表示 $|A_{vf}|/|A_v|$ 與 $A_v B$ 之間的關係之圖形。

圖 1-2 中所示的巴克豪生和振盪區域將在第四章中加以討論。

4 反饋放大器與振盪器

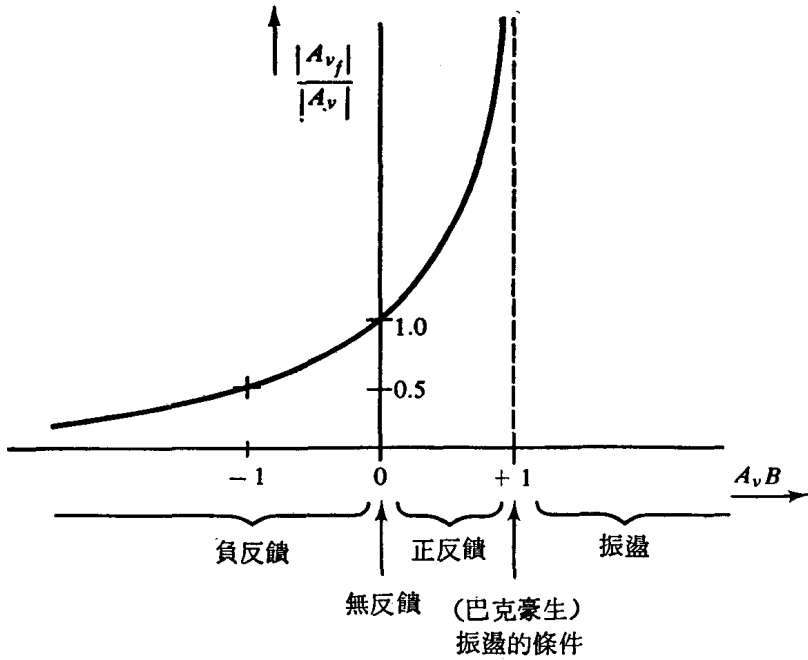


圖 1-2 $|A_{vf}/A_v|$ 與 $A_v B$ 之關係及有關之反饋條件。

例 1-1 設圖 1-1 中之放大器有一開路增益為 100。如果輸出電壓之 10% 被反饋到輸入，而與輸入相差 180° 的相角，則 BA_v 等於 (-0.1×100) 。利用 1-4 式，則閉環增益即為

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 - A_v B} = \frac{100}{1 + 10} = \frac{100}{11} = 9.1$$

在 1-1 例中的反饋是負的，因反饋信號之相位與輸入信號之相位相反：所以總電壓增益即減小。以後，我們將證明，以同樣的方法可以減小失真並且增加頻帶寬度。

並非所有放大器都具有電壓放大；有些放大器主要是供給電流放大的。圖 1-3(a) 為一附有反饋之理想電流放大器。若反饋路線在 a 點被開斷，則此放大器即有一開環電流增益 (Open-loop Current

Gain) A_i 。若將反饋路線接通，則輸出電流即分配到負荷和反饋網

絡，而以下諸式即表示輸入和輸出的電流：

$$i_i = i_s + Bi_o \quad (1-5)$$

$$i_o = \alpha i_o + i_L \quad (1-6)$$

$$i_o = A_i i_i \quad (1-7)$$

其中 i_s = 輸入信號電流

i_i = 放大器輸入電流

i_L = 負荷電流

αi_o = 輸出電流流至反饋網絡之部份

Bi_o = 輸出電流從反饋網絡流至輸入的部份。

就一理想放大器而言，輸入阻抗 Z_i 為零，而輸出阻抗 Z_o 為無窮大。因此，任何反饋網絡均不致受電源阻抗所影響；因它與理想放大器之輸入阻抗相並聯。同樣地，對負荷而言，假若反饋網絡之阻抗極高，則放大器之開環電流增益 A_i 也不致受反饋網絡所影響。一般而言，這種反饋網絡被認為是一個很高的反饋電阻 R_f ，如圖 1-3(b) 之接法，則反饋網絡看來就像一個電流源 (Current Source)。因此，就此類反饋網絡而言， $\alpha i_o = Bi_o \ll i_L$ 且 $\alpha = B \ll 1$ 。這些關係隨後即可用來解答並化簡 1-5 至 1-7 各式，而具有反饋之電流增益即可求得為

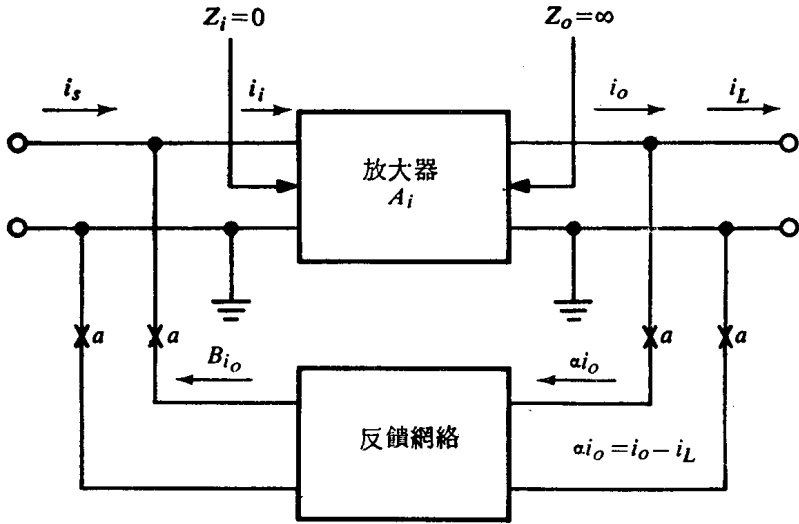
$$A_{if} = \frac{A_i}{1 - A_i B} \quad (1-8)$$

此方程式之用法，和說明 1-4 式的例題的用法一樣。

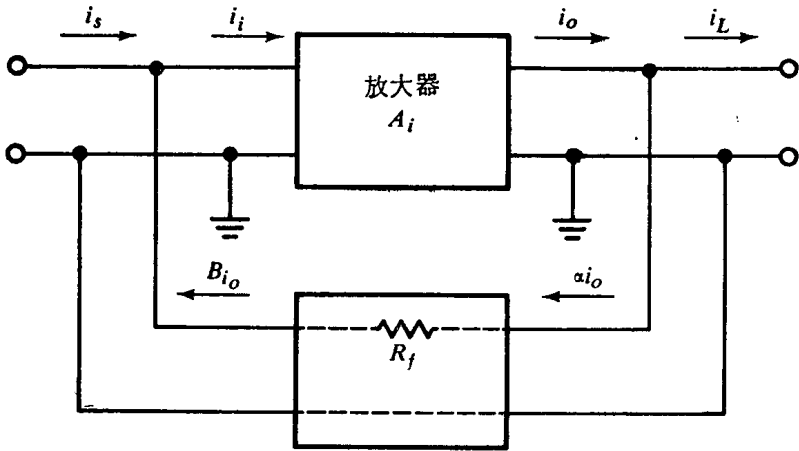
1-2 實際放大器的負電壓反饋^{1,5,6}

應用到放大器輸入端的反饋信號，依放大器類型的不同，可為電壓性的或為電流性的。同時，此反饋信號可能與輸出電流或輸出電壓的變化成比例，或者同時與兩者都成比例。如果反饋信號是由可以

6 反饋放大器與振盪器



(a)



(b)

圖 1-3 (a)附有反饋之理想電流放大器，及(b)典型的真實化。

感測輸出電壓變化之反饋網絡而來，則此反饋稱為電壓反饋(Voltage Feedback)。如果反饋信號是由可以感測輸出電流變化之反饋網絡而來，則此反饋稱為電流反饋(Current Feedback)。如果將電壓反饋與電流反饋合併，則此種反饋稱為橋式反饋(Bridge Feedback)。

本節之討論將著重在用於實際放大器的電壓反饋。實際放大器和理想放大器不同之處在於：實際放大器之輸出及輸入阻抗有一定的值，而不是無窮大或零。在中間頻帶時這些輸入及輸出阻抗之性質為電阻性的，而以 R_i 及 R_o 表之。

圖1-4所示為一電壓放大器之等效電路，其信號電壓為 e_s 。若電路在 a 點開斷，且在 b 點通地，則接上負荷電阻 R_L 後的電壓增益，即等於開路增益乘以 R_L 上之電壓在分壓器中所佔的比率：

$$A_v = \frac{K_v R_L}{R_L + R_o} \quad (1-9)$$

其中 K_v = 開路電壓增益

A_v = 接上 R_L 之後在輸出端的電壓增益

這種等效電路是真空管放大器的典型，其中之輸入電阻極高，而輸出阻抗則較低，其值等於動態屏極電阻 r_p 。現在，若將反饋網絡接上，並將 b 點的接地移開，則 R_1 與 R_2 即構成了一個分壓器，而輸出電壓的一部份 B 即反饋至輸入；亦即

$$B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-10)$$

如果 $(R_1 + R_2) \gg R_L$ ，則式1-9中之 A_v 值就不會因反饋網絡的加入而有所改變。另一個必須滿足的條件就是，輸入電阻 R_i 必須極大於 R_2 。如果滿足了這兩個條件，式1-4就可用來分析具有反饋的增益了。

這種負電壓反饋對於輸入和輸出電阻的效應在於增加輸入電阻

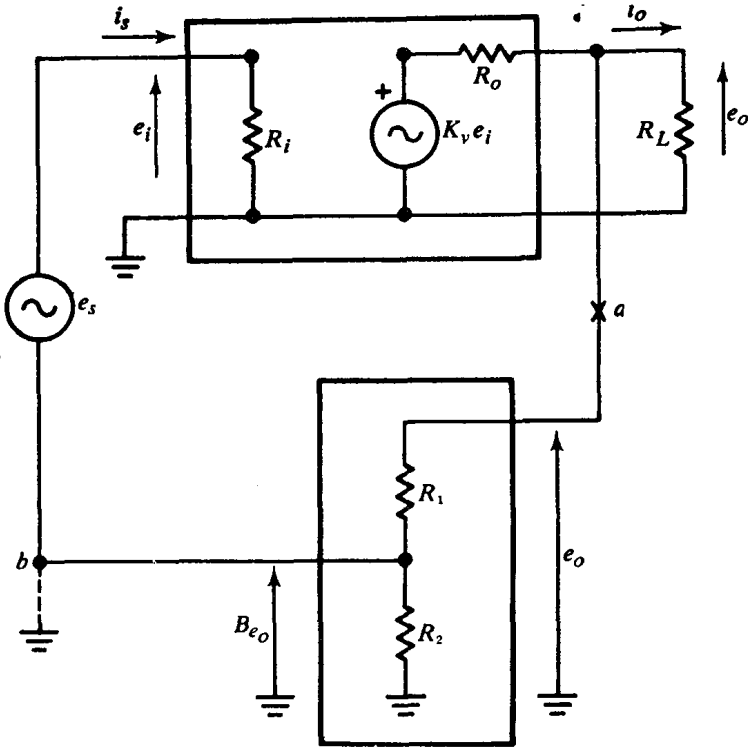


圖 1-4 利用電壓反饋之電壓放大器。

及減小輸出電阻。若不附反饋作用，輸入電阻即為 R_i ；若附有反饋作用，則輸入電阻即為

$$R_{if} = \frac{e_s}{i_s} \quad (1-11)$$

其中 i_s 為附有反饋時的信號電流值，而為

$$i_s = \frac{B e_o + e_s}{R_i} \quad (1-12)$$

但是

$$e_o = A_v e_i = A_v i_s R_i \quad (1-13)$$

其中 A_v 為式 1-9 中所表者。

將式 1-13 代入式 1-12，得

$$i_s = \frac{BA_v i_s R_i + e_s}{R_i} \quad (1-14)$$

若就 R_{if} 以解式 1-14, 其結果為

$$R_{if} = R_i(1 - A_v B) \quad (1-15)$$

由此可看出, 輸入電阻 (或者, 在一般情形下為阻抗) 的增加與增益的減少成正比。

具有反饋的有效輸出電阻, 可由同法求得之為

$$R_{of} = \frac{R_o}{(1 - A_v B)} \quad (1-16)$$

這樣, 輸出阻抗的減小即與增益的減小成正比。

有一點要注意的是: 輸入和輸出阻抗的變化與所用的反饋類別無關, 而與反饋信號加到輸入的方式有關。這一點我們將在分析電流放大器被加上負電壓反饋的時候指出。

圖 1-5 示一應用電壓反饋的電流放大器。這種放大器是共射極電

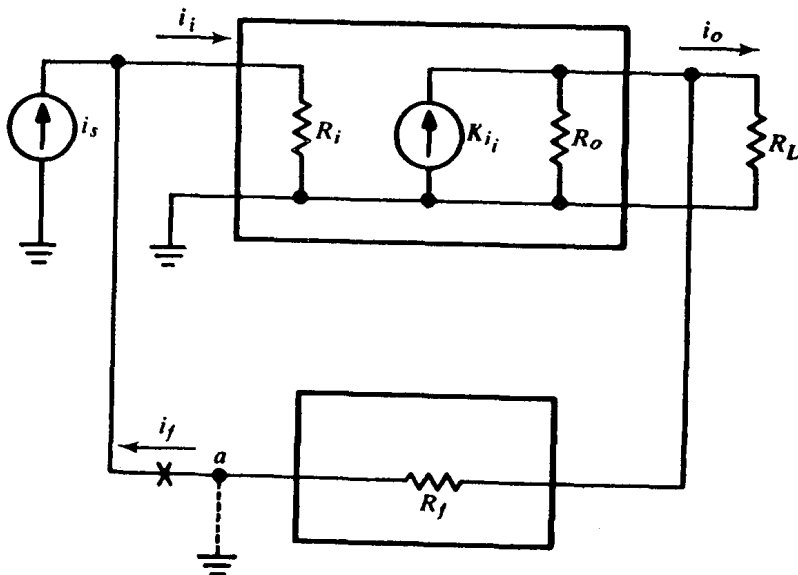


圖 1-5 利用電壓反饋之電流放大器

晶體放大器的代表，其輸出阻抗一般都很高（約在 $100K\Omega$ 之數）而其輸入阻抗則較低（約在數 $K\Omega$ 之數）。

電阻 R_f 「抽樣」檢查產生在負荷 R_L 上的輸出電壓而供給電壓反饋。然而，我們應該注意到，實際上反饋到輸入的信號卻是經過 R_f 的電流。為了使反饋像是由一固定電流電源所供應，反饋電阻器 R_f 之值必須很高。同時也需要一個很高的 R_f 值以防實際電流增益的降低。如果將反饋路線在 a 點斷開並使之通地，則電流增益即可由 R_L 及 R_f 上的電流分配求得，即

$$A_i = K_i \left(\frac{R_f}{R_L + R_f} \right) \quad (1-17)$$

1-17式僅在當 $R_o \gg R_L$ 及 $R_o \gg R_f$ 時才能用。若將反饋電路重新接上，則1-17式中之 A_i 即可用於1-8式中，而 B 則為

$$B = \frac{R_L}{R_L + R_f} \quad (1-18)$$

由於 R_f 為輸入與輸出電路之間的一個分路，我們可以利用與真空管的米勒效應 (Miller Effect) 相似的分析，而將 R_f 納入輸入電路中。此淨效應即為，以一個比 R_f 小的電阻將輸入分路出一個近似電路之電壓增益的值。因此，就這種放大器及反饋情況而言，附有反饋之輸入阻抗即低於不附反饋之輸入阻抗。以同樣的分析，可證明附有反饋的輸出阻抗要低於不附反饋者。如是，若應用電壓反饋於電流放大器，則其輸入及輸出阻抗均將被減小。

負反饋的另兩個優點是：諧波失真的減小，以及由放大器引起的交流聲或雜音的減小。顯然，如果輸入信號中有某種失真，則此失真將與基本輸入信號一起被減小而為原來的 $[1/(1-AB)]$ 倍。然而，放大器本身可能在輸入以外的地方產生失真，而我們所關心的正是這一種失真。雖然我們的分析並不限於電壓放大器，但我們還是假設放大