

感測器電路設計手冊

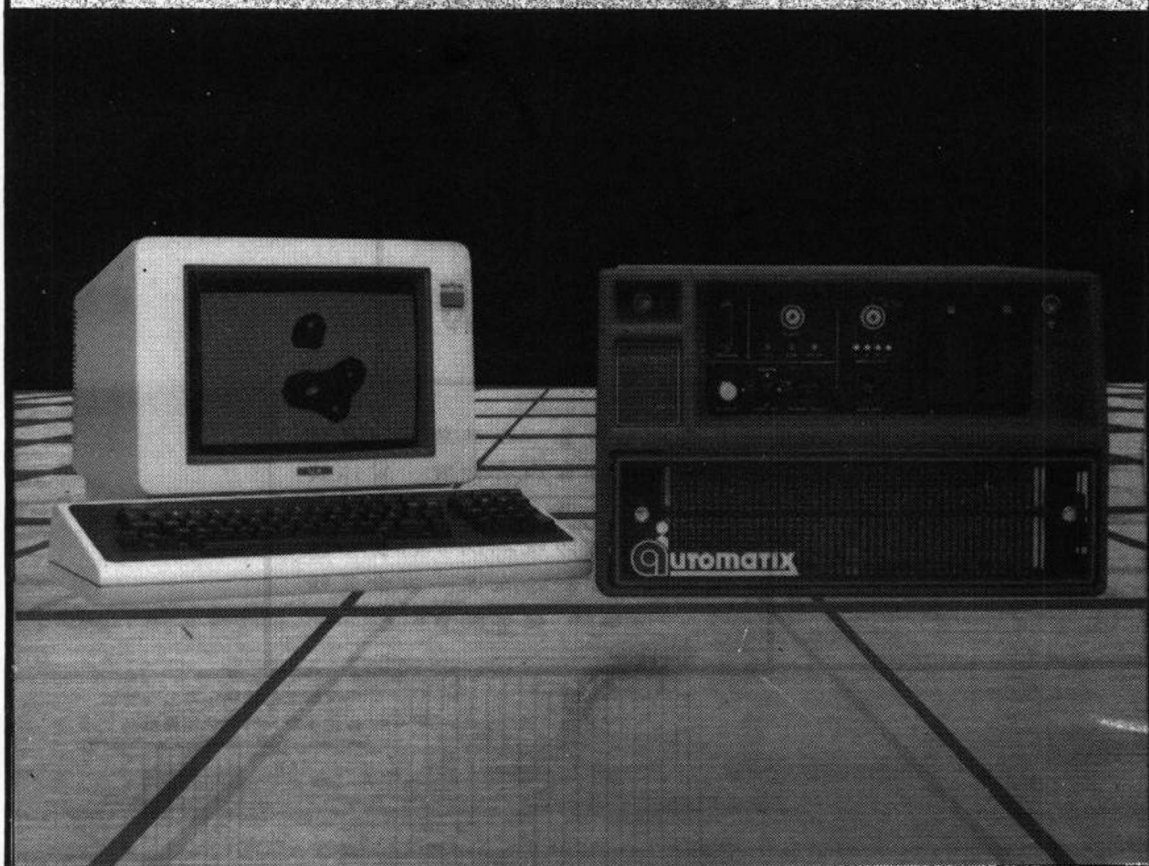
鄭振東 編譯



全華科技圖書股份有限公司 印行

感測器電路設計手冊

鄭振東 編譯



全華科技圖書股份有限公司 印行



全華圖書

法律顧問：陳培豪律師

感測器電路設計手冊

鄭振東 編譯

出版者 全華科技圖書股份有限公司

地址 / 台北市麗江路76巷20-2號2樓

電話 / 5071300 (總機)

郵政帳號 / 0100836-1號

發行人 陳 本 源

印刷者 宏懋打字印刷股份有限公司

電話 / 5084250 • 5084307

門市部 全友書局(黎明文化大樓七樓)

地址 / 台北市重慶南路一段49號7樓

電話 / 3612532 • 3612534

定 價 新臺幣 280 元

二版 / 78年1月

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

版權所有 翻印必究

圖書編號 0121310

我們的宗旨：

推展科技新知
帶動工業升級

為學校教科書
推陳出新

感謝您選購全華圖書
希望本書能滿足您求知的慾望

「圖書之可貴，在其量也在其質」，量指圖書內容充實，質指資料新穎夠水準，我們本著這個原則，竭心盡力地為國家科學中文化努力，貢獻給您這一本全是精華的“全華圖書”

為保護您的眼睛，本公司特別
採用不反光的米色印書紙//

序 言

近來，由於半導體技術的日新月異，不斷發展，不僅對偵測技術的革新有著極大的貢獻，而且也促使能將分歧錯綜的複雜資訊，同時歸納在複合式的同一感測器上，及 MOSFET 閘極上，附有特殊膜層的新型生物感測器 (bio-sensor) 等，一一相繼提前問世。加之，與能即時執行線化及溫度補償等訊號處理的微處理機配合，更開創了使用容易、可靠性高的偵測技術坦途，而各行各業的技術人員身邊的作業系統，普遍應用感測器的機會，則與日俱增。相反的，技術人員面臨感測器的實際應用時，因對感測器基本知識的欠缺，常無法配合需要，利用感測器發揮符合目標的性能，而陷入枯索思腸、無所適從的境地；面臨此類窘況時，若有感測器實用電路，供作參考，不啻為技術人員的一大福音。編譯此萬用「感測器電路設計手冊」一書的主旨，即係以綱張條舉、圖例註釋及扼要說明方式，研擬出能提供從事感測器電路設計技術人員的正確指針與訣竅。

本手冊撰述時，均係依據以下五項為基礎：

1. 須有具體的電子路圖。
2. 須使用易於獲得的感測器。
3. 界面係利用通用的 IC。
4. 須能執行線化等的訊號處理。
5. 須為實用電路。

此外，撰述時皆以物理現象→感測器→電訊號→訊號處理機等脈絡相承的連貫性處理程序為理念，次第剖析，以利讀者參閱。

本書中之偵檢技術的分類，係以偵檢對象為主體。因此，各個不同項目中，均蒐集有種類甚多的感測器應用實例，具有能從不同層面執行觀察、比較、靈活運用的特點。由於感測器的知識領域涵蓋內容極為廣濶，因此，從事感測器電路設計人員，著手設計之前，若能就本手冊蠡覽一通，確信必能對如何發揮感測器的功能，有所助益。本書兼可作為各種不同領域中之電路集使用，故冠以萬用之名。處於資訊時代的今天，因本手冊的付梓，如能對當前國內科技的提昇，稍有助益，筆者亦感與有榮焉。

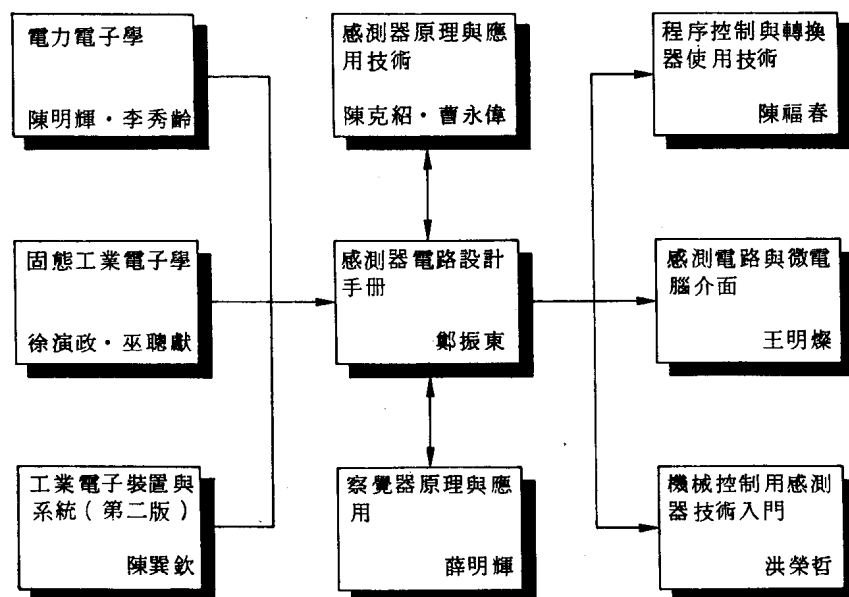
編譯者識

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

技術人員面臨感測器的實際應用時，因對感測器基本知識的欠缺，常無法配合需要，利用感測器發揮符合目標的性能，因此，本手冊在撰述時，均係根據以下五項為基礎：(1)須有具體的電子電路圖，(2)須使用易於獲得的感測器，(3)介面係利用通用的 IC，(4)須能執行線性化的訊號處理，(5)須為實用電路，相信如此撰述的手冊，定能提供感測器電路設計人員極佳的參考資料。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。



目 錄

感測器電路設計技術

第 1 章 感測器電路S/N比的提高技術	3
1.1 雜訊的種類	3
1.2 電晶體之雜訊	5
1.3 感測器及其雜訊	9
1.4 訊號處理	13
1.5 外入雜訊的清除	15
第 2 章 利用個人電腦執行量測資料處理所需之A/D 轉換電路的基本知識與實務	19
2.1 選用A/D轉換電路時應行探討的目的	19
2.2 A/D轉換電路的結構	20
2.3 A/D轉換方式	22
2.4 A/D轉換精度	26
2.5 個人電腦與介面	29
2.6 個人電腦用A/D轉換電路的實例	31

感測器電路實例集(依偵測對象區分)

第 1 章 光	39
1.1 利用MOS影像感測器所構成的感測電路	39
1.2 照度計的內部電路	41
1.3 利用SPD所構成的測光電路	44
1.4 反射光強度測試電路(之一)	46
1.5 反射光強度測試電路(之二)	48

1.6	CCD影像感測器電路	50
1.7	利用熱電偵測器所構成的電路	52
1.8	發光二極體的亮燈電路	54
1.9	輸出轉換器內裝型紅外光偵檢電路	56
1.10	傅立葉轉換型紅外光度計光偵檢電路	59
1.11	紫外光感測器電路	61
1.12	螢光玻璃輻射劑量計的螢光測試系統電路	64
第2章 顏 色		67
2.1	彩色感測器的訊號處理電路	67
2.2	彩色識別感測器電路	69
2.3	利用彩色感測器所構成的電路	72
2.4	利用非晶質彩色感測器所構成的電路	77
第3章 光的傳輸		80
3.1	遙控電路	80
3.2	光纖及光無引線兩用的紅外光遙控電路	82
3.3	光纖電路	84
第4章 溫 度		87
4.1	熱敏電阻之溫度——電壓轉換電路	87
4.2	利用熱敏電阻構成的電路	89
4.3	白金測溫電阻器電路	92
4.4	溫度偵檢電路	94
4.5	利用IC溫度感測器所構成的溫度控制系統電路	97
4.6	LED發光輸出的溫度補償電路	99
4.7	與三種熱電耦對應之電子式冷接點補償器電路	100
4.8	利用紅外光感測器製作的溫度偵檢電路	101
4.9	晶體感測器及其應用電路	103
4.10	紅外光溫度計控制電路	106
第5章 濕度及水分		111
5.1	應用HPR感測器之偵檢電路	111
5.2	應用溫度感測器之濕度偵檢電路	112
5.3	低濕度領域的偵檢電路	113
5.4	應用絕對濕度感測器所構成的電路	115

5.5	利用絕對濕度感測器與熱敏溫度感測器所構成的電路	118
5.6	由結露感測器構成的電路(之一)	120
5.7	由結露感測器構成的電路(之二)	122
第6章	氣 體	125
6.1	利用氣體感測器構成的自動換氣風扇電路	125
6.2	排氣濃度量測電路	126
6.3	紅外光分析儀中的高爐氣體偵檢電路	128
6.4	熱線式導熱度氣體感測器的應用電路	130
6.5	熱敏電阻式應用電路	132
6.6	熱線式半導體感測器之應用電路	133
6.7	瓦斯感測器的應用電路	135
6.8	熱導感測器所構成的瓦斯濃度計電路	138
6.9	瓦斯洩漏偵檢電路	141
6.10	毒性氣體感測器的應用電路	143
6.11	手提式缺氧監視器電路	145
6.12	醫療用氧氣計的電路	146
第7章	音 響	148
7.1	前置放大器電路	148
7.2	錄音位準顯示電路	151
7.3	利用AE感測器所構成的電路	153
第8章	電 量	156
8.1	振盪停止的偵檢電路	156
8.2	電流偵檢感測器電路	158
8.3	電阻值辨別電路	160
8.4	數位限制器電路	163
8.5	利用電容式感測器所構成的電路	165
第9章	位 置	167
9.1	利用新力分規式磁阻元件(SDME)所構成的磁帶端頭偵檢器	167
9.2	記錄位置的光束偵檢電路	168
9.3	連續轉動之感光帶的錯離偵檢電路	170
9.4	孔穴中央點的測試及運算電路	172

9.5	微小光點之位置偵檢電路	173
9.6	PSD電路	176
9.7	扭曲檢查與校準裝置的電路	178
9.8	利用CCD與雷射構成的位移計電路	180
9.9	位移角偵檢用積分電路	181
9.10	光編碼器電路	184
9.11	電位計型位移感測器電路	186
9.12	測距儀的訊號處理電路	188
第10章	形 狀	192
10.1	通用的自動饋給裝置中之零件偵檢電路	192
10.2	利用光纖感測器構成的形狀偵檢電路	193
10.3	利用半導體磁性感測器構成的識別感測器電路	195
10.4	工業電視攝影機的數位化電路	197
10.5	利用圖像感測器構成的紗徑不勻之偵檢電路	199
10.6	超音波探傷感測器電路	203
10.7	利用渦電流法所構成的薄膜厚度測試電路	207
10.8	應用接觸感測器的尺寸量測電路	209
10.9	利用空間濾波器及邊緣感測器所構成的電路	211
10.10	超音波硬度計的線化電路	213
10.11	由超音波感測器構成的電路	215
第11章	物體有無	218
11.1	利用光二極體所構成的光電感測器電路	218
11.2	光纖感測器的輸出光／脈衝轉換電路	220
11.3	利用紅外光感測器所構成的電路	223
11.4	近接感測器中的訊號處理電路	224
11.5	人體偵檢用遠紅外光感測器的結構與電路	225
11.6	利用電洞元件構成的物體偵檢電路	227
11.7	超音波振盪器電路	230
第12章	轉動及角度	234
12.1	由旋轉編碼器所構成的旋轉方向偵檢電路	234
12.2	編碼器所構成的電路	235
12.3	光軸編碼器電路	236
12.4	旋轉編碼器DC伺服系統中的應用電路	238

12.5 利用反射型光感測器所構成的旋轉電路	241
12.6 瓦斯變化率感測器的應用電路	243
12.7 利用磁性電阻元件所構成的位移感測器電路	246
12.8 由OPIC化光斷續器所構成的感測器電路	248
12.9 三相相位旋轉偵檢電路	250
12.10 光學編碼器的電路	253
第13章 加速度及振盪	254
13.1 利用壓電型加速度感測器所構成的電路	254
13.2 伺服加速度計的應用電路	255
13.3 線性加速度計電路	257
13.4 加速度計的電路	259
13.5 振盪感測器的電路	260
13.6 壓電型加速度感測器構成之電路	262
13.7 流沙偵檢電路	264
13.8 振盪測試器電路	267
第14章 力與壓力	269
14.1 金屬電阻應變計所構成的電路	269
14.2 簡易壓力計電路	273
14.3 壓力轉換器訊號之雙線式傳輸電路	275
14.4 利用半導體感測器構成的電路	277
14.5 利用加壓導電橡膠所構成的開關電路	279
14.6 壓力轉換器內的感測器電路	281
14.7 利用應變計所構成的壓力偵檢電路	283
14.8 振動式壓力感測器之振盪電路	285
14.9 由6軸力感測器構成的電路	288
14.10 電子式差壓傳感器電路	291
14.11 壓力轉換器內的感測器電路	292
14.12 利用圖像感測器構成的拉力偵檢電路	294
第15章 流 量	297
15.1 超音波位準儀(流量線性輸出)用近似切線電路	297
15.2 超音波的流量測試電路	299
15.3 電磁流量計的電路	301
15.4 熱線式呼吸流量計的電路	303

15.5 熱式質量流動控制器電路	305
15.6 伺服式容積型流量計之電路	308
第16章 液 體	310
16.1 超音波位準計接收電路	310
16.2 浸沒式液面計電路	312
16.3 超音波位準儀之構造與電路	314
16.4 懸浮物濃度計 (MLSS 計) 電路	317
16.5 油分濃度偵檢電路	319
16.6 由光感測器構成的離心沉降式粒度分佈測試電路	322
第17章 其 他	325
17.1 利用磁性方位感測器所構成的電路	325
17.2 橋式激磁電源電壓	327
17.3 電離箱偵檢器及其電路	328
17.4 利用 DC 前置放大器所構成的應變計用放大電路	330

感測器電路設計技術

2 第一篇 感測器電路設計技術

第1章

感測器電路S/N比的提高技術

感測器 (sensor) 所產生之訊號 (signal) 與雜訊 (noise) 兩者之比, 即稱為該感測器的 S/N 比。感測器之 S/N 比, 依據感測器元件本身特性, 及感測器配置方法之不同而有差異。且由於感測器電路之製作方法不良, 常使雜訊增多, 致 S/N 比益形劣化。本文除涉獵感測器電路雜訊種類與性質外, 尚就低雜訊放大器 (amplifier) 之製作方法與訊號處理, 及如何消除雜訊等的技巧, 分別予以介紹。所闡述的內容, 不僅參照有關的專門論述, 為避免敘述過分冗長, 儘量利用公式圖表說明。與雜訊有關之公式, 尚無定論, 仍處於研究狀態的種類甚多, 尤其 $1/f$ 的雜訊均屬於非線性問題與巨變理論 (catastrophe theory), 皆屬令人興趣索然的研究課題。然而, 低雜訊電路之製作技術, 即使忽視其中的若干公式仍不難瞭解。製作低雜訊電路時, 由於感測器電路 S/N 比的提高; 及其結構系統分解功能等技術進步, 均可達到提高精準度的目的。

1.1 雜訊的種類

就雜訊的產生結構上探討, 感測器與放大元件 (amplified element) 所產生之主要雜訊計有三種, 分別為: 熱雜訊 (thermal noise)、散粒雜訊 (shot noise) 以

及過剩雜訊 (excess noise 亦可稱之為 $1/f$ 雜訊)。

1. 熱雜訊

熱雜訊係導體內之電荷, 從事熱運動時所產生。其大小可以以下的倪奎士 (Nyquist) 公式表示之, 公式誘導方式中, 除倪奎士 (Nyquist) 方法外, 尚有甚為著名、以非可逆過程之統計學為基礎的久保方法 (Kubo), 其一般解釋則有各種不同層面。

$$Et^2 = 4kTR\Delta f \dots\dots\dots (1)$$

式內, Et = 雜訊電壓之 rms 值 [V]

K = 波爾茲曼常數 (Boltzmann)
($1.3 \times 10^{-23} \text{ w} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$)

T = 絕對溫度 [K]

R = 雜訊發生源之電阻值 [Ω]

Δf = 測試系統內之雜訊頻帶範圍 [Hz]

例如: 若電阻值 $R = 1 \text{ K}\Omega$, 雜訊頻帶範圍 $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ 時, 則在溫度 $T = 300 \text{ K}$ (室溫) 下, 雜訊電壓 E_t 約為 4 nV 。須牢記係以此值做為標準, 以便於爾後的計算。例如: 當 $\Delta f = 100 \text{ Hz}$, 則 Et 之值即增加十倍。

由公式(1)尚可瞭解, 熱雜訊不受頻率影響, 具有一定的功率頻譜 (power spectrum), 因此, 又名為白色雜訊 (white

noise)。但實際的白色光，其光能的大小並非依據波長而定，而振動的功率頻譜，則依波長而有變化，故嚴格說來，兩者並不相同。

無論半導體元件或電阻器內的雜訊，均不受製作方法影響，只要電阻值一定，即會產生大小相同的雜訊。當然，有如電流的導通一般；一旦施加有磁場時，只要公式(1)左邊之值不變，其值亦不變（若有磁阻效應，雜訊亦會隨之增減）。

2. 散粒雜訊

電流係藉擁有單位電荷之電荷載體（carrier）而導通，因此，當電荷載體到達電極時，即有一定的電流導通，且其電流的導通並非連續不斷。就定流量連續導通狀態之電流觀察，當電荷到達時，即可觀測出有電流搖擺之雜訊產生。此項雜訊即稱之為散粒雜訊（shot noise），其值之大小可以下式表示：

$$I_{sh}^2 = 2q I_{DC} \Delta f \quad (2)$$

式內， I_{sh}^2 = 散粒雜訊電流之 rms 值 [A]
 $q = 1.59 \times 10^{-19}$ [C]：單位電荷
 I_{DC} = 直流電流 [A]

感測器電路中，若電晶體或 FET (Field Effect Transistor；場效電晶體) 的輸入上，連接阻抗 (impedance) 較高的感測器，即有此類雜訊問題產生。

3. 過剩雜訊

電阻體上有電流導通時，即有產生過剩雜訊 (excess noise) 的可能。因此，此項雜訊又稱為電流雜訊 (current noise)，且因此項雜訊的功率頻譜，係與頻率成反比，故又可以 $1/f$ 雜訊表示。此外，就其與熱雜訊之白色雜訊對應狀態而言，又可稱為紅色雜訊 (pink noise)，而電阻體內如有陷

波 (trap) 或晶格 (lattice) 缺陷等情況時，實驗證明，會有較大的雜訊產生。因過剩雜訊電壓之大小，與所附加之電壓成正比，故又可用下式表示：

$$E_f^2 \propto (I_{DC} R)^2 \frac{\Delta f}{f} \quad (3)$$

電阻器及二極體兩者之大小，可利用雜訊指數 (NI) 表示。日本 NBS (National Bureau of Standard；國家標準局) 即以一十數群 (decade；雜訊頻率之上下限十倍不同的範圍) 之雜訊，做為電阻器雜訊的指數標準，此雜訊指數 (noise index) 可以下式表示：

$$NI = 20 \log \left(\frac{\bar{E}_f}{V_{DC}} \right) \quad (4)$$

式內， $\bar{E}_f$ = 一具有十數群頻帶範圍的過剩雜訊 [μV]

$V_{DC} = I_{DC} \cdot R$ (附加直流電壓) [V]

圖 1 所示係熱雜訊與過剩雜訊，兩者之頻率特性的比較。

公式(4)所表示的雜訊指數，尚受電阻值之影響，若為碳膜電阻時，則約介於 -25~0dB 之間，若為金屬薄膜電阻時，則約介於 -40~10dB 之間，若係繞組電阻器，有時小至無

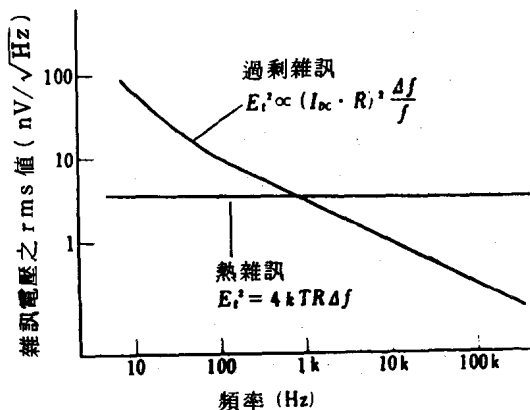


圖 1 熱雜訊與過剩雜訊之頻率特性比較

法觀測的程度。又雜訊指數為已知時，則其 $1/f$ 雜訊電壓的頻譜密度 $E_f/\sqrt{\Delta f}$ ，可以下列公式執行換算

$$\bar{E}_f^2 = \int_{f_1}^{10^N} \frac{\gamma(I_{DC}R)^2}{f} df \quad \gamma: \text{比例常數}$$

$$= \gamma(I_{DC}R)^2 \cdot \ln(10)$$

因此，將 E_f 之值代入公式(4)，可得下式：

$$\gamma = \bar{E}_f^2 / \{ (I_{DC}R)^2 \cdot \ln 10 \} = 10^{0.1 \cdot NI} / \ln 10$$

亦即，

$$E_f^2 = \frac{(I_{DC}R)^2 \cdot 10^{0.1 \cdot NI}}{2.303 f} \Delta f \quad (\mu V^2/Hz)$$

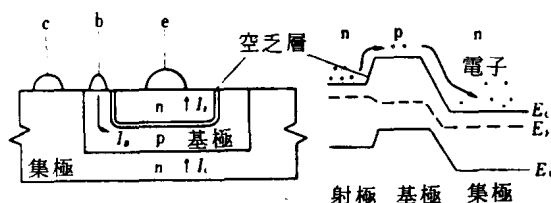
若 $I_{DC}R = 1V$ ， $NI = -20dB$ ， $f = 1kHz$ ，則頻譜密度 $E_f/\sqrt{\Delta f} = 2.08 nV/\sqrt{Hz}$ 。

1.2 電晶體之雜訊

1. 雙極電晶體 (Bi-Polar Tr)

雙極電晶體電流的導通狀態，係如圖2所示。故其射極 (emitter) 接地之 π 型小訊號等效電路 (equivalent circuit)，如圖3所示。

圖中如有雜訊發生時，主要的雜訊即係基極 (base) 擴散電阻 $r_{bb'}$ 的熱雜訊。基極



(a) 電晶體的斷層及其電流 (b) 電晶體的能帶

圖2 電晶體之內部電流

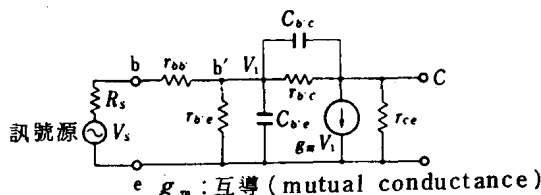


圖3 電晶體之混合 π 型小訊號等效電路

電流 I_b 與集極 (collector) 電流 I_c 的搖擺，即成為散粒雜訊。而在基極與射極間之空乏層 (depletion layer)，基極電流及電位的搖擺即會產生過剩雜訊。圖3中 $r_{bb'}$ 之值極大，且回授電容 C_{bc} 可忽視不計。實際上，此種情況當於電晶體在低頻狀態運作時始可成立，雜訊發生之等效電路則如圖4所示。因此，在裝有訊號源電阻 (感測器之電阻值) R_s 之狀態下，其射極接地電晶體之等效輸入雜訊，可利用全部雜訊除以其增益 (gain)，即可求出。

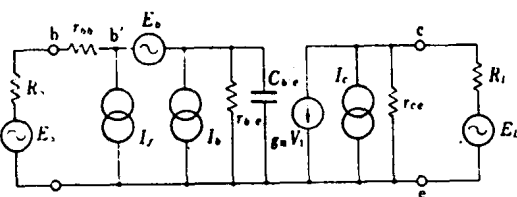
圖4之輸出，c-e 之間短路時，則輸出雜訊電流即為

$$I_{no}^2 = I_c^2 + (g_m V_i)^2$$

$$= I_c^2 + g_m^2 \left\{ \frac{(E_b^2 + E_s^2) Z_{be}^2}{(r_{be} + R_s + Z_{be})^2} + \frac{(I_b^2 + I_f^2) Z_{be}^2 (r_{be} + R_s)^2}{(r_{be} + R_s + Z_{be})^2} \right\} \quad (5)$$

另一方面，就訊號而言，若圖3之輸入側短路時，則與輸入訊號 V_s 對應之輸出短路電流，可以下式表示

$$I_o = g_m V_i = \frac{g_m Z_{be} V_s}{r_{be} + R_s + Z_{be}} \quad (6)$$



- R_s : 訊號源電阻
- E_s : 訊號源雜訊
- R_L : 負載電阻
- E_L : 負載雜訊
- I_f : 過剩 $1/f$ 雜訊
- I_b : 基極電流的散粒雜訊
- I_c : 集極電流的散粒雜訊
- E_b : 基極電阻的熱雜訊

圖4 電晶體混合 π 型雜訊等效電路