

科技用書

**ADVANCED TECHNOLOGY
IN SENSORS**

感測器應用技術

自動化系統工程之尖端科技

賴耿陽 編著

復漢出版社印行

**ADVANCED TECHNOLOGY
IN SENSORS**

感測器應用技術

自動化系統工程之尖端科技

賴耿陽 編著

復漢出版社印行

版權所有
翻印必究

B 平裝二四〇元

中華民國八十一年六月出版

感測器應用技術

編著者：賴

耿

出版者：復

漢

出

版

社陽

地址：台南市德光街六五一號
郵政劃撥〇〇三一五九一三號

發行人：沈

岳

林

印刷者：國

發

印

刷

廠

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

感測器 (sensor) 是把有關對象狀態的測定量變換為信號的系統之頭道要素。亦即在自動化系統的最前線，取代人或以高於人的能力檢知對象信息，變換為適合該系統的信號（大都為電氣信號），輸入系統。亦即，感測器未充分發揮機能的話，後續的信息處理、傳達、記錄、顯示、對象的控制等裝置也無法發揮機能。感測器有瓶頸般的重要性。

感測器種類很多，動作原理、構造型態也千差萬別。應用、研究開發時，須瞭解物性、材料基礎乃至社會需求，有待開拓的領域甚廣。

1970 年代中期以後，推展感測器件的行列積體化、複合積體化，研究開發機敏感測器、智慧型感測器。這些感測器不只有信息檢知機能，也有數據處理機能、異常值或例外值的除外機能、自動校正機能、自動補償機能、記憶機能、處理手法可變機能等，使感測器傾向系統化。以半導體晶方為中心實現各種形式。例如組合微細加工的微小致動器等，可使感測器世界更多彩多姿。

本書介紹發展中的感測器技術現狀及動向，介紹很多具體例，引用不少圖表和文獻資料，必有助於讀者瞭解感測器技術的基本概念、重要性、未來性、有趣性等。

1992 年 3 月

編者

目 次

第1章 感測器基礎論	1
1.1 感測器的性質.....	1
1.1.1 感測器的功用.....	1
1.1.2 信息與信號.....	2
1.1.3 感測器與感測系統.....	3
1.1.4 信息的1次抽出.....	4
1.2 感測器的分類.....	5
1.2.1 依物理定律利用法分類.....	5
1.2.2 依變換原理分類.....	8
1.2.3 依能量利用形態的分類.....	12
1.2.4 依與對象的關係分類.....	13
1.2.5 依輸出信號分類.....	14
1.3 變換上利用的現象.....	18
1.3.1 現象的分類.....	18
1.4 感測系統的構成法.....	27
1.4.1 信息的有效利用.....	27
1.4.2 環境變動的影響除去法.....	28
1.4.3 多元次信息的取得.....	33
1.4.4 智慧化.....	34

1.5 感測器的性能	35
1.5.1 基本性能	35
1.5.2 感度	35
1.5.3 感測器的可靠性	38
1.5.4 響應特性	40

第2章 力學、熱學量感測器..... 41

2.1 幾何學量感測器	41
2.1.1 前言	41
2.1.2 位移感測器	42
2.1.3 角位移感測器	45
2.1.4 應變感測器	47
2.1.5 速度感測器	49
2.2 力學量感測器	50
2.2.1 力感測器	50
2.2.2 扭矩感測器	56
2.3 流體量感測器	57
2.3.1 流量、流速感測器	58
2.3.2 壓力、差壓感測器	62
2.3.3 密度感測器、粘度感測器	67
2.4 熱學量感測器	67
2.4.1 前言	68
2.4.2 溫度感測器	68
2.4.3 熱量感測器	77
2.4.4 濕度感測器	79

第3章 電磁學、光學量感測器..... 80

3.1 電磁學量感測器	80
-------------------	----

3.1.1	電磁學量的極限感測	80
3.1.2	SQUID 磁束計與人體磁性測定	81
3.1.3	光纖電磁學量感測器	84
3.1.4	光學磁學量感測量的應用	86
3.2	光學量感測器	89
3.2.1	2 次元光學量感測器	89
3.2.2	固體攝像裝置	89
3.2.3	高密度固體攝像器件	93
3.2.4	極微弱光攝像器件	94
3.2.5	超高速現象的畫像化	97
3.3	放射線感測器	98
3.3.1	放射線源與其性質	98
3.3.2	放射線感測器	102

第 4 章 化學量感測器 111

4.1	前言	111
4.2	化學感測器的種類與用途	111
4.3	化學感測器的構成與動作樣式	115
4.3.1	直接變換方式與其原理	115
4.3.2	間接變換方式與其原理	116
4.4	氣體感測器	117
4.4.1	直接變換方式的氣體感測器	117
4.4.2	能量變換型間接變換方式的氣體感測器	121
4.4.3	能量調變型間接變換方式的氣體感測器	122
4.5	溶液系感測器	131
4.5.1	離子電極	132
4.5.2	ISFET	133
4.6	人體系感測器	135

4.6.1	直接變換的人體感測器	136
4.6.2	間接變換型人體感測器	137

第5章 新材料與器件..... 140

5.1	陶瓷感測器	140
5.1.1	用爲感測器材料的陶瓷	140
5.1.2	感測器用構造材料的陶瓷	140
5.1.3	利用機能性陶瓷的感測器	143
5.2	半導體感測器	149
5.2.1	結晶半導體物性的利用	149
5.2.2	器件特性的利用	151
5.2.3	物性設計技術的應用	153
5.2.4	非結晶半導體的利用	155
5.2.5	微細加工技術的應用	157
5.3	有機材料與感測器	158
5.3.1	前言	159
5.3.2	光感測器	161
5.3.3	力學量感測器	164
5.3.4	氣體感測器	167
5.3.5	結語	169
5.4	光纖感測器	169
5.4.1	光纖的特色與感測器應用	169
5.4.2	用光纖爲傳送路的構成	170
5.4.3	用光纖本身爲感測器的構成	172
5.4.4	分佈型、準分佈型光纖感測器	177
5.4.5	光纖廻轉儀	179
5.5	人體感測器	182
5.5.1	前言	182

5.5.2	酵素FET感測器	183
5.5.3	薄膜電極人體感測器	185
5.5.4	結語與今後的展望	188
5.6	微細加工器件	189
5.6.1	矽微細加工器件的特色	189
5.6.2	矽的微細加工法	190
5.6.3	矽微細加工技術在感測器的應用	192
第6章	新型感測器系統	198
6.1	感測器的智能化	198
6.1.1	感測器智能化的途徑	198
6.2	尖端應用分野的感測器系統	214
6.2.1	感測器系統的現狀	214
6.2.2	製程測定的感測器	214
6.2.3	機器人的感測器	218
6.2.4	民生—家庭用機器	223
6.2.5	醫用感測器系統	229
6.2.6	汽車的感測器	236

第 1 章 感測器基礎論

1-1 感測器的性質

1-1-1 感測器的功用

除了狹義的測定之外，感測器（sensor，傳感器）也廣用於其他用途，不過，都是代替人類的感覺器官，更擴張其機能，感知有關外界的訊息而傳達。就如同人不能單靠感覺器官生存一樣，感測器單體也常無濟於事。

最近大樓等的入口採用自動門，有人靠近某種程度時會自動開門，這是由於門的上部或下部設有感知人接近的感測器，藉來自它的信號使開閉門的致動器（actuator）作動。此時，就門自動開閉系統外，人屬於「外界」。想進門的人親自旋轉手把開門的行動改用感測器由系統代行。

如此，感測器常成為為某目的而構築的系統之一構成要素，此系統為達成目的所需的 1 次資料是由感測器引進，感測器成為系統的要角。反過來說，感測器須有符合使用目的的機能與性能。圖 1.1 為測定系統的構造與感測器在其中的地位。

JIS 把感測器定義為「把有關對象狀態的測定量變換為信號的系統的最初要素」，此定義也默認感測器是納入系統中使用。

此外，各種大樓滅火設備或防盜設備等日常生活也到處活用

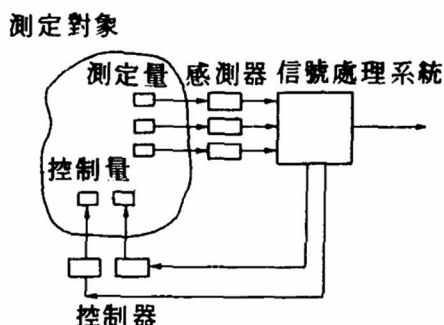


圖 1.1 測定系統與感測器

感測器，却屬於無名英雄的角色。電子零件的輸入出都是電氣信號，感測器的輸入却是電氣以外物理量（有時連輸出也不是電氣量）。感測器的輸入包羅萬象，將之當成電氣信號取入即是感測器技術，所以，物理量的變換為感測器的基本機能。

轉換器（transducer）是最近不常用而類似感測器的名詞，JIS把轉換器定義為「對應於測定量，形成容易處理之輸出信號的變換器」。其與感測器的差異在未明確限定為系統的第一關要素。感測器也可可是元件單體，轉換器的構成須能提供容易處理的輸出信號。在此意義下，感測系統也可說是轉換器。不過名詞會隨時代變遷，實際上，轉換器在某些分野為感測器的同義語，在別的分野却是致動器的同義語。

1-1-2 信息與信號

利用感測器獲得的是有關外界的信息，亦即經由感測器的窗口取入表現外界特色的參數——各種物理量的有無、大小、其時間性變化、空間擴展性。

一般將對象向量 z 當成空間 X 和時間 t 的函數求得，以獲必要的信息。在此不可混淆量與信息，量為物理概念，信息則是所關心物理量的表現或命題，心理概念甚於物理。

但是，感測器通常是取入有關非電氣量的信息，變換為電氣量而傳送。此時，有關測量量 z 的信息須保存於變換的量。

例如有一命題為「 $t = 0$ 時 $z = z_0$ ， $t = t'$ 時 $z = z_1$ 」，設 $x = z/z_0$ ，則可改寫成 $t = 0$ 時 $x = 1$ ， $t = t'$ 時 $x = x'$ （ $= z_1/z_0$ ），與有關變換的物理量種類無關，不過， z_0 的信息須持續保存，校正成為不可或缺的作業。設被變換的量為 z' ，則有關 z 的上述信息表現法在 z' 也須等值，為此，感測器所致物理量的變換須是線形，但這未必都成立。此時，變換會使信息失真，須在感測器的某處補償而線形化，在最終輸出與輸入之間保持1對1的對應關係。感測器內的信號有滯後，所以與時間有關的信息未必能保存。

感測器可視為依序變換的一系列變換鏈所構成。如圖1.2所示，測量量 z 藉變換元件依 A 、 B 、 C ……之序變換為別的物理量。使感測器作動，使有關測量量的信息依序變換為物理量，在此鏈上傳播。不過，在信息傳達的觀點，不知所載送物理量為何種類。通常把傳送信息的媒體稱為信號。

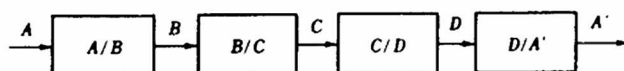


圖 1.2 當成變換鏈的感測系統，最終要素表示校正

吾人欲得的是有關對象的信息，為達成其目的而使感測器作動，信息經依序變換的物理量，當成信號傳送。

1-1-3 感測器與感測系統

感測器的基本機能為測定量的檢測與變換。為此，以各種方法利用物理定律。但是，在一般變換的物理量（的大小），載送當前信息的部份極小，換言之，對應於此信息的物理量變化極小

。須設法只取出此小變化份，否則無法有效傳達必要的信息。為此，組合多個感測器元件，或採用適切的信號處理法，獲得可高效率傳達信息的輸出。如此構成的系統稱為感測系統。感測系統為較簡單的構成時，也常單稱感測器，反之，稱為感測器者也有不少為上述的系統構成。

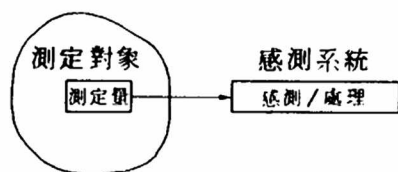
在此種系統中，參與測定量之檢測、變換的要素稱為感測器元件，有別於感測器，但不會混淆時，常單稱感測器。

1-1-4 信息的1次抽出

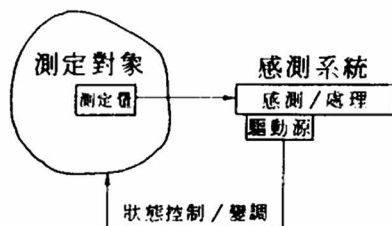
感測的目的在抽出有關對象的信息，為此，須設法與對象交涉。方法大別有二，第1是直接承受對象本身放出的信息，稱為被動（passive）感測。典型例是以適當感測器檢測對象放出的電磁波、熱輻射、磁場等（圖1.3(a)）。另一方面，對對象施加能量，檢知其所致之狀態變化者稱為主動（

active）感測，此時如圖1.3(b)所示，有驅動源控制施加於對象的能量，此驅動源也對感測要素供給能量。

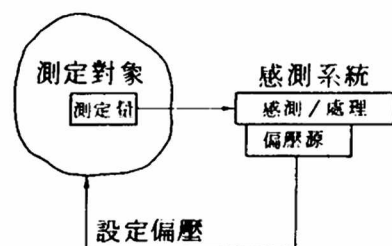
圖(c)是在對象原態不可能測定時，以機械、電氣、磁性方式



(a) 被動感測



(b) 主動感測



(c) 偏壓感測

圖 1.3 測定對象與感測系統的關係

對之施加 bias，測定其狀態，也是一種主動感測，有施加 bias 的 bias 源。

被動感測可不擾亂對象狀態而感測，可得正確信息。不過，來自對象的信號級值低時，會與感測器的雜信級值糾纏，不能有效——亦即 SN 比大的檢測，有必要進行高度信號處理。

另一方面，若用主動感測，對象狀態顯然受干擾，但可自由選擇可檢測的信號級值，因而，要設法盡量減小對對象的擾亂，使所得信息不失真。

對面前的問題採用何方法取決於得失的妥協。

1-2 感測器的分類

1-2-1 依物理定律利用法分類

感測器的種類很多，對同一物理量也可用各種感測器。因為測定技術本就個別技術的色彩很濃，當然要用適合個別目的感測器。

另一方面，為達成特定目的，欲調查宜用何種感測器時，依某種基準分類各種感測器會較方便。

感測器在感測系統的最前線，可從對象取得 1 次信息，但取得的信息須經精煉後傳給利用者。考慮信息處理的方便性，有關對象的信息最好變換為電氣信號，但是，感測器未必須輸出電氣信號。目前有的使用條件仍利用空氣壓信號，將來可能只以光進行信號處理。無論如何，都用異於測定量的物理量為信號，為此，須使感測器有物理量的變換機能。

物理量是利用物理法則變換。物理法則可表成方程式，從對象物理量所含的物理法則中選出適當者即可，亦即，找出包含現所着眼之物理量（測定量與輸出量）者，求測定量與輸出量的關係式。輸出量常選電壓、電流、頻率等，但未必有直接表現測定

量與輸出量的物理法則，即使有，也常不實用。

一般的對策是(1)找出表現測定量與輸出量以外適當物理量之關係的物理法則，(2)找出表現測定量以外物理量與輸出量之關係的物理法則，以適當方法建立前者與測定量的關係。所謂「適當」是很曖昧的說法，原因在物理量、方法的選定尚未確立一般性數學手法，不過，這也是感測技術吸引人的地方。

例如有關感測元件的特性量有電感、電容、電阻等電氣參數，它們不能直接成為輸出量，須組合電路，不過，若能將測定量變換為這些參數，即易得輸出量，為適當的物理量。例如，平行平板電極的電容反比於電極間隔，利用此性質可將位移變換為電容。壓力感測器大都不將壓力直接變換為電氣量，用彈性元件一旦變換為位移後，用位移的感測器變換為電氣量。這是由於很少有物理法則能將壓力直接變換為電氣量。此時，位移為適當的物理量。圖 1.2 以一般形圖示此事情。量依序變換為 A ， B ， C ， D ，最後的方塊不是稱為變換要素的硬體，表示使輸出信號與測定量對應的校正，無此就不成為感測器。

Hall 效應是金屬或半導體中的電流因外部磁場所致的 Lorentz 力而彎曲前進路線，在垂直於電流的方向發生起電力。設 Hall 起電力電場強度為 E_H 、電流密度為 I_x 、磁束密度為 B_z ，則

$$E_H = R_H I_x B_z \quad (1.1)$$

R_H 為 Hall 常數，依存於物質。

Hall 效應可用為磁場的感測器，廣用為位移或位置感測器，式 (1.1) 看似與位移無關，所以，用適當的方法建立與位移的關係，亦即，用 2 個永久磁鐵等，在空間調變外部磁場，設如此形成的磁束密度 $B_z(x)$ ，式 (1.1) 成為

$$\Delta E_H = R_H I_x \frac{\partial B_z(x)}{\partial x} \Delta x$$

ΔE_H 為位移 Δx 的函數。

電容感測器利用物理法則直接表現測量量與變換量的關係，可說是物理法則的直接利用法。但在 Hall 感測器，表現 Hall 效應的式子中不直接表示測量量，所以，以測量量調變參與此效應的量，求得測量量與變換量的關係，此種變換法稱為調變變換。在 RC 振盪器裝入電容感測器，即可將測量量變換為頻率，這是以測量量調變振盪器的振盪頻率，這也是調變變換。

Michelson 型光波干涉計設 2 光路間的光路差為 x ，則干涉條紋強度 I 可表成

$$I = I_0 (1 + V \cos x)$$

其中 $V (= (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}))$ 為可視度。

若以光路差為測量量，則干涉條紋的強度會被測量量調變，但此時是空間、周期性調變，可用為數位調變。

空間性調變變換例另有空間濾波器，如圖 1.4 所示，把間距 d 的透明不透明透過率分佈的狹縫列置於物鏡的像面，透過它的光束藉聚光透鏡集光於探測器的受光面上。點光源在 X 方向以速

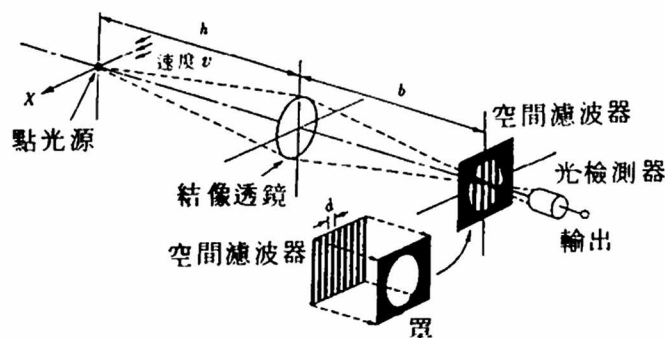


圖 1.4 利用空間濾波器的速度感測法

度 v 移動的話，探測器的輸出出現頻率 $f = bv/dh$ 的脈衝列， h ， b 分別為物鏡與物體面、像面的距離。 $M = b/h$ 為光學系的倍率，用它表成

$$f = \frac{M}{d} v$$

可見藉空間濾波器可將速度變換為頻率。

若用周期性構造，不只光學上，也能以靜電、磁性式構成空間濾器。

用於檢測微小磁場的 flux gate 型磁力計動作原理是利用強磁性體的磁場與磁束密度的飽和特性。亦即，以交流激磁到磁性體的飽和附近，對之施加直流磁場，把探測線圈發生的高諧波電壓當成信號取出，屬於利用元件非線形性的調變變換法。

表 1.1 各種調變變換法

元件 / 系統	特 性 量	調變形式
霍爾元件	磁束密度	空間調變
光波干涉計	光路差	相位調變（空間 / 時間）
空間濾波器	透過率	速度調變
波紋閥	繞射次數	空間相位調變
flux gate	$B-H$ 特性	非線形調變

把物理法則用於變換大別分為直接利用法、調變變換法，最應用而簡便的是直接利用法，通常構成變換鏈。調變變換法的構成較複雜，但可靠性較高（表 1.1）。

1-2-2 依變換原理分類

感測器活用物理法則變換測定量，感測器技術的物理法則可分為下述 4 種類。