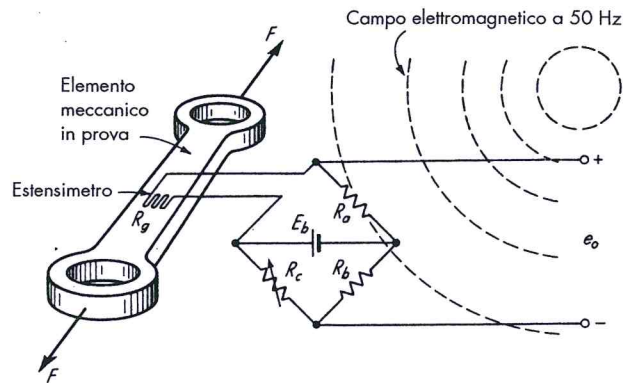


FIGURA 2.11
Ingresso interferente
per il circuito con
estensimetri.



* Il simbolo \triangleq significa
"uguale per definizione".

ove*:

$$\Delta R_g \triangleq \text{variazione del valore di resistenza, } \Omega \quad (2.2)$$

$$GF \triangleq \text{gage factor (fattore di taratura dell'estensimetro) adimensionale} \quad (2.3)$$

$$R_g \triangleq \text{resistenza dell'estensimetro, in assenza di deformazione } \Omega \quad (2.4)$$

$$\epsilon \triangleq \text{deformazione cm/cm} \quad (2.5)$$

La variazione di resistenza è proporzionale alla deformazione. Quindi, nell'ipotesi sia possibile misurare la resistenza, è pure possibile derivare la deformazione. La resistenza viene misurata per mezzo del circuito a ponte di Wheatstone illustrato. Quando non è applicato alcun carico F , il ponte viene bilanciato (e_o regolata a zero), operando su R_c . L'applicazione del carico provoca una deformazione, una ΔR_g , quindi uno squilibrio del ponte, generando una tensione di uscita e_o che è proporzionale a ϵ e che può essere misurata per mezzo di un tester (multimetro) o di un oscilloscopio. La tensione e_o è data da:

$$e_o = -(GF)R_g\epsilon E_b \frac{R_a}{(R_g + R_a)^2} \quad (2.6)$$

Qui l'ingresso desiderato è chiaramente la deformazione ϵ , che produce un'uscita proporzionale e_o . Un ingresso interferente che spesso causa problemi in un simile apparato è il disturbo a 50 Hz del campo elettromagnetico generato dalle linee di alimentazione presenti nelle vicinanze da motori elettrici ecc. Questo campo induce tensioni nel circuito estensimetrico, causando la nascita di una tensione e_o anche quando la deformazione è zero. Un altro ingresso interferente è la temperatura. Se questa varia provoca una variazione nel valore di resistenza dell'estensimetro che produrrà una tensione in uscita anche in assenza di deformazione. La temperatura è anche all'origine di un altro effetto interferente, dal momento che causa una espansione differenziale tra l'estensimetro e il pezzo dando luogo a una deformazione ϵ e a una tensione e_o , anche quando non è applicato alcun carico. La temperatura si comporta anche da effetto modificante poiché il fattore di taratura dell'estensimetro è sensibile alla temperatura. Anche la tensione fornita dal generatore a batteria E_b è un altro ingresso modificante. Entrambi sono effetti modificanti poiché tendono a variare il fattore di proporzionalità tra l'ingresso desiderato ϵ e l'uscita e_o , oppure tra un ingresso interferente (temperatura dell'estensimetro) e l'uscita e_o .

Metodi di correzione degli effetti interferenti e modificanti

Nella progettazione e/o utilizzo degli strumenti di misura, è disponibile una quantità di metodi per annullare o ridurre gli effetti di ingressi spuri. Descriveremo brevemente alcuni tra i più utilizzati.

Il metodo dell'insensibilità intrinseca propone l'ovvia e ragionevole filosofia di progetto che gli elementi di uno strumento dovrebbero essere intrinsecamente sensibili ai soli ingressi desiderati. Mentre solitamente questo non è del tutto possibile, la semplicità di que-

sto approccio incoraggia a considerare la sua applicazione ovunque sia fattibile. Nei termini della configurazione generale di Figura 2.9 questo approccio richiede che in qualche modo F_I e/o $F_{M,D}$ siano rese quasi uguali a zero, ove possibile. Dunque, anche qualora i_I e/o i_M fossero presenti, non potrebbero avere effetti sull'uscita. Come esempio dell'applicazione di questo concetto agli estensimetri di Figura 2.11, potremmo ipotizzare di trovare qualche materiale per gli estensimetri che abbia un coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura decisamente basso, mantenendo nel contempo la sensibilità alla deformazione. Se un tale materiale venisse trovato, il problema della temperatura come ingresso interferente sarebbe almeno parzialmente risolto. In maniera simile, in apparati meccanici che devono mantenere dimensioni accurate al variare della temperatura ambientale, l'utilizzo di un materiale con un coefficiente di dilatazione al variare della temperatura molto basso² può essere di aiuto. Due materiali con tali caratteristiche sono l'Invar, una lega di metalli e lo Zerodur, un materiale vetro/ceramico. Se la rigidezza (come in una molla) deve essere insensibile alla temperatura, si può prendere in considerazione la lega Ni-Span C.

Il metodo dell'elevato guadagno di feedback è esemplificato nel sistema illustrato in Figura 2.12b. Supponiamo che si desideri misurare la tensione e_i , applicandola a un motore la cui coppia abbia effetto su una molla, causando uno spostamento x_o , che può essere misurato su una scala graduata tarata. Attraverso un'opportuna progettazione, lo spostamento x_o può essere reso proporzionale alla tensione e_i , in accordo con la

$$x_o = (K_{M_o} K_{S_P}) e_i \quad (2.7)$$

ove K_{M_o} e K_{S_P} sono opportune costanti. Questo insieme, mostrato in Figura 2.12a, è chiamato sistema in anello aperto (open-loop). Se esistono ingressi modificanti i_{M1} e i_{M2} , essi provocano cambiamenti in K_{M_o} e K_{S_P} , che portano a errori nella relazione tra e_i e x_o . Questi errori sono in diretta proporzione ai cambiamenti in K_{M_o} e K_{S_P} . Supponiamo invece di costruire un sistema come in Figura 2.12b. Qui l'uscita x_o viene misurata da un dispositivo di re-

ϵ_2
ZERODUR;
ESSEMPO
ENCODER
LINSARS

² D.G. Chetwynd, "Selection of Structural Materials for Precision Devices", *Precision Eng.*, vol. 9,1, pp 3-6, gennaio 1987.

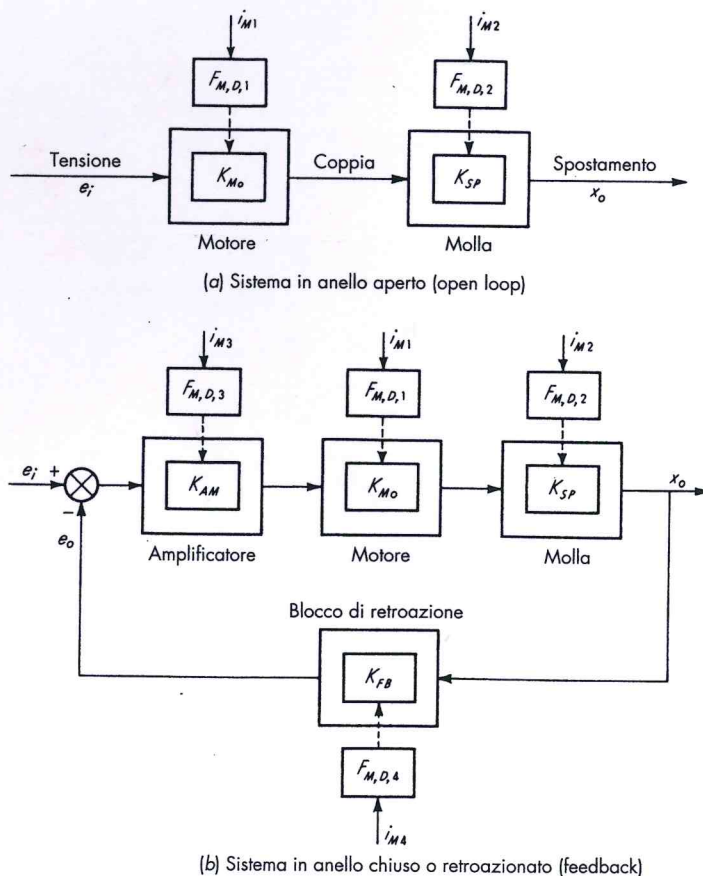


FIGURA 2.12
Uso della retroazione per ridurre l'effetto di ingressi "spuri".

troazione (feedback), che fornisce una tensione e_o proporzionale a x_o . Questa tensione viene sottratta dalla tensione di ingresso e_i e la differenza viene applicata a un amplificatore che pilota il motore e da qui alla molla che produce x_o . Possiamo scrivere:

$$(e_i - e_o)K_{AM}K_{M_o}K_{SP} = (e_i - K_{FB}x_o)K_{AM}K_{M_o}K_{SP} = x_o \quad (2.8)$$

$$e_i K_{AM}K_{M_o}K_{SP} = (1 + K_{AM}K_{M_o}K_{SP}K_{FB})x_o \quad (2.9)$$

$$x_o = \frac{K_{AM}K_{M_o}K_{SP}}{1 + K_{AM}K_{M_o}K_{SP}K_{FB}} e_i \quad (2.10)$$

Supponiamo ora di impostare, per K_{AM} , un valore assai elevato (sistema a elevato guadagno o "high gain"), in modo tale che $K_{AM}K_{M_o}K_{SP}K_{FB} \gg 1$. In tal caso:

$$x_o \approx \frac{1}{K_{FB}} e_i \quad (2.11)$$

Il significato dell'equazione 2.11 è che l'effetto della variazione dei valori di K_{M_o} , K_{SP} e K_{AM} (come risultato del prodotto dagli ingressi modificanti i_{M1} , i_{M2} e i_{M3}) sulla relazione che lega l'ingresso e_i all'uscita x_o è stato reso trascurabile. Richiediamo ora soltanto che K_{FB} rimanga costante (senza influenza da parte di i_{M4}) in modo da mantenere costante la taratura che correla ingresso e uscita, come mostrato dall'equazione (2.11).

Ci si potrebbe interrogare se si è realmente guadagnato qualcosa in uno schema così elaborato, dal momento che la richiesta di stabilità è stata semplicemente trasferita dai parametri K_{M_o} e K_{SP} a K_{FB} . Nella pratica, tuttavia, questo metodo conduce spesso a sostanziali miglioramenti in merito all'accuratezza. Una ragione consiste nel fatto che, dal momento che l'amplificatore fornisce la gran parte della potenza richiesta, il dispositivo di retroazione può essere disegnato con una scarsa capacità di gestire elevate potenze. In generale questo porta a migliori accuratezza e linearità nelle caratteristiche del dispositivo di retroazione. In aggiunta, il segnale di ingresso e_i necessita di un contenuto in potenza pressoché trascurabile; così il sistema di retroazione estrae meno energia dall'oggetto della misura rispetto al corrispondente sistema in anello aperto (open loop).

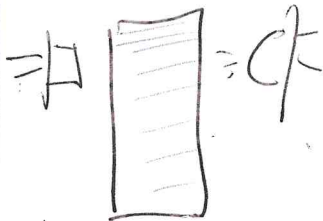
Questo, ovviamente, significa una minore distorsione della grandezza misurata dovuta alla presenza dello strumento di misura. Per concludere, se la catena in anello aperto è costituita da un certo numero (forse anche molti) dispositivi, ciascuno suscettibile ai propri ingressi spuri, allora tutti questi effetti negativi possono essere negati dall'impiego di un dispositivo di retroazione con elevata amplificazione, stabile e accurato.

Prima di passare ad altri metodi dobbiamo ricordare che l'applicazione del principio di retroazione non è privo dei suoi problemi tipici. Il principale è l'instabilità dinamica, in cui un'amplificazione eccessivamente elevata porta a oscillazioni distruttive. Lo studio del disegno dei sistemi di feedback costituisce da solo un intero campo di studio, e sono disponibili numerosi testi focalizzati su questa materia³.

Il metodo delle correzioni calcolate sull'uscita richiede che si misurino o si stimino le ampiezze degli ingressi interferenti e/o modificanti e che nel contempo si conoscano quantitativamente quanto essi condizionino l'uscita. Grazie a queste informazioni è possibile calcolare le correzioni che possono essere sommate o sottratte all'uscita in modo da lasciare (idealmente) solo la quota-parte associata all'ingresso desiderato.

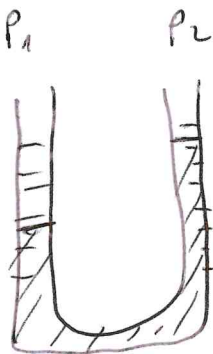
Così, nel manometro di Figura 2.10, gli effetti della temperatura sia sulla lunghezza della scala tarata sia sulla densità del mercurio possono essere accuratamente calcolate, una volta che la temperatura sia nota. L'accelerazione gravitazionale locale è pure nota, per una data altitudine e latitudine, dunque anche questo effetto può essere corretto col calcolo. Poiché molti sistemi di misura oggi possono permettersi di includere al loro interno un microcomputer, per svolgere varie funzioni, se aggiungiamo anche i sensori per gli ingressi spuri, il microcomputer può implementare il metodo delle correzioni calcolate sull'uscita in modo automatico, costituendo un cosiddetto smart sensor (o sensore intelligente).

Il metodo del filtraggio del segnale è basato sulla possibilità di introdurre certi elementi ("filtri") all'interno dello strumento, che in qualche maniera bloccano i segnali spuri, in modo tale che i loro effetti sull'uscita risultino rimossi o ridotti. Il filtro può essere applicato



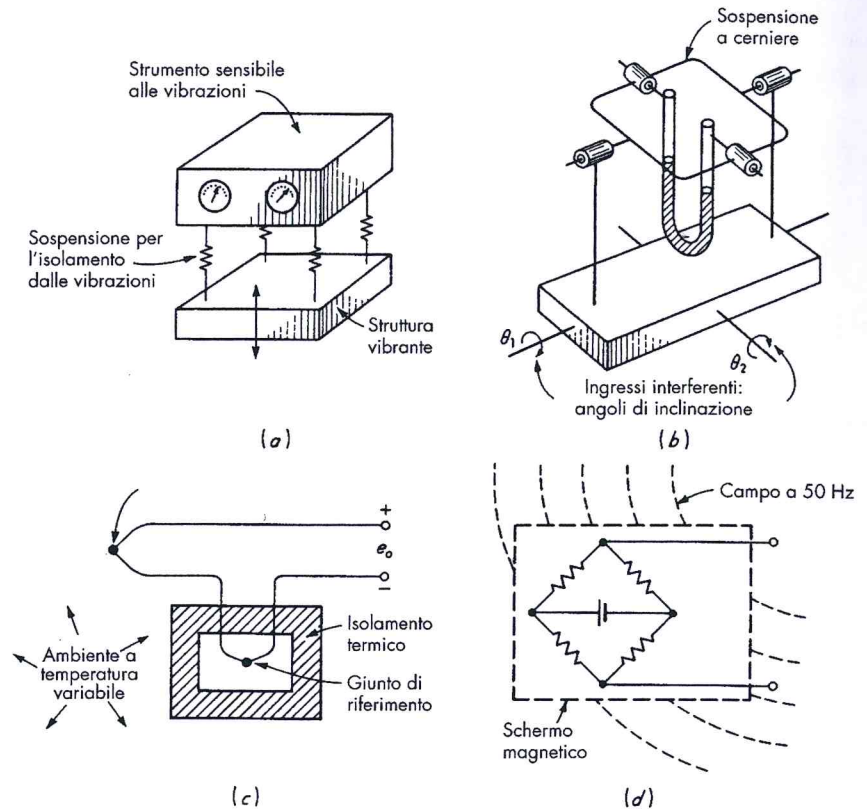
7810000
00AE10W
VARIABILI

³E. O. Doebelin, "Control System Principles and Design", Wiley, New York, 1985.



↑ scala
T
g. msc
AP = ρ · g · Δh

FIGURA 2.14
Esempi di filtri.



che lasci passare i segnali desiderati, ma blocchi quasi completamente l'interferenza a 50 Hz.

La Figura 2.14f mostra ancora il trasduttore di pressione di Figura 2.2, modificato dall'inserzione di una restrizione tra la sorgente della pressione e la camera del pistone. Un tale dispositivo è utile, per esempio, qualora si desideri misurare la sola componente media di pressione in un grande serbatoio di aria alimentato da un compressore alternativo. Le pulsazioni della pressione dell'aria possono essere mitigate dall'effetto di filtraggio pneumatico del restringimento del flusso e dell'associato volume. La variazione dell'ampiezza del rapporto uscita su ingresso $|p_o/p_i|$, in funzione della frequenza, è simile a quella del filtro elettrico di tipo RC di Figura 2.14e. Le pressioni in ingresso statiche o lentamente variabili sono accuratamente misurate, mentre le variazioni più rapide sono decisamente attenuate. La strozzatura nel flusso può essere prodotta da una valvola ad ago che permette una semplice regolazione dell'effetto filtrante.

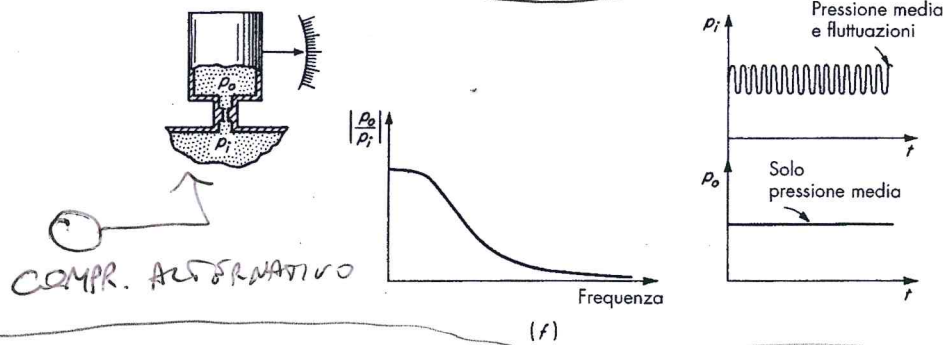
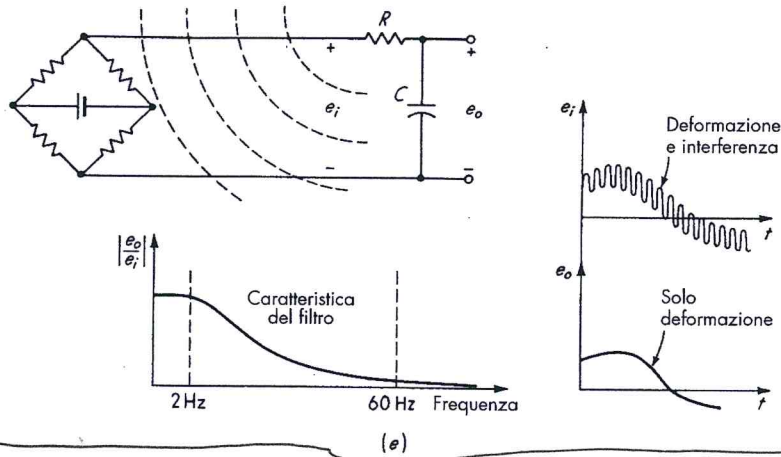
Un termometro a radiazione, a regolazione pulsante ("chopped"), viene mostrato in forma semplificata in Figura 2.14g. Questo dispositivo è sensibile alla temperatura T_s di un corpo, raccogliendo l'energia emessa per irraggiamento. L'energia emessa viene focalizzata su un sensore ("detector") e provoca un aumento di temperatura T_d dell'elemento sensibile, che a sua volta varia la tensione in uscita, e_i . La difficoltà nell'impiego di questi dispositivi consiste nel fatto che anche la temperatura ambiente, oltre alla T_s , condiziona T_d . Questo effetto è importante, dal momento che l'energia radiante che viene misurata provoca piccole variazioni in T_d ; così anche piccole variazioni della temperatura ambientale possono totalmente mascherare l'ingresso desiderato. Una soluzione ingegnosa a questo problema consiste nell'interporre un'otturatore ("shutter") rotante tra la sorgente radiante e l'elemento sensibile, in modo tale che l'ingresso desiderato venga "tagliato" ("chopped"), ovvero modulato, a una frequenza nota. Questa frequenza viene scelta ben più alta delle frequenze alle quali può avvenire la deriva del segnale di origine ambientale. Il segnale in uscita e_i , dato dal sensore, è quindi una sovrapposizione delle fluttuazioni ambientali lente e della forma d'onda ad alta frequenza, la cui ampiezza varia in proporzione alle variazioni di T_s . Poiché le componenti desiderate e interferenti risultano così ampiamente separate in frequenza, esse

PRESSIONE

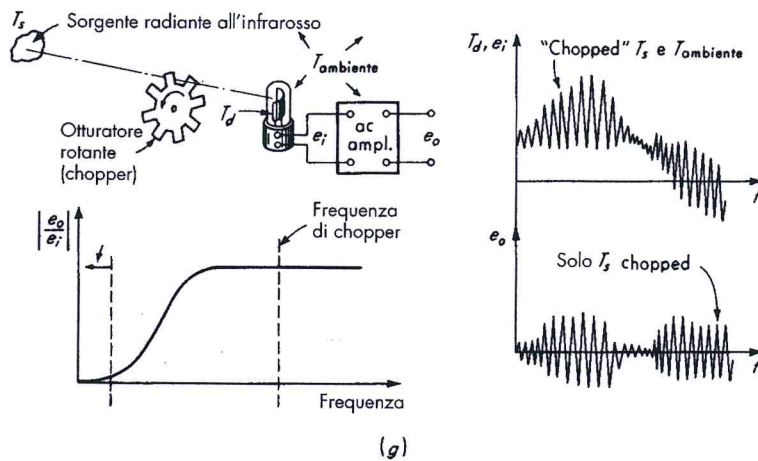
TEMPERATURA
A
RADIAZIONE

FIGURA 2.14
Esempi di filtri.
(Continua)

SEGNALI
SEPARATI IN
FREQUENZA
DA AUTORE



COMP. ALTERNATIVO



possono essere filtrate selettivamente. In questo caso desideriamo un filtro che elimini segnali costanti e lentamente variabili, ma in grado di riprodurre fedelmente le variazioni veloci. Una tale caratteristica è tipica di un comune amplificatore ac, e, dal momento che l'amplificazione è comunque necessaria in un siffatto strumento, l'utilizzo di un amplificatore ac, come mostrato, risolve insieme i problemi.

Nel riassumere il metodo del filtraggio del segnale si può dire che, in generale, è solitamente possibile progettare filtri di tipo meccanico, elettrico, termico, pneumatico ecc., che separino i segnali in funzione del loro contenuto in frequenza, secondo una logica specifica. La Figura 2.15 riassume le forme più comuni e utili di questi dispositivi.

Il metodo degli ingressi in opposizione consiste nell'introduzione intenzionale, nello strumento, di ingressi interferenti e/o modificanti che tendano a cancellare gli effetti dannosi degli inevitabili ingressi spuri. La Figura 2.16 mostra schematicamente questo concetto, nel caso degli ingressi interferenti. L'estensione al caso degli ingressi modificanti dovrebbe essere ovvia. L'ingresso, introdotto intenzionalmente, viene predisposto in modo tale che i segnali o_{I1} e o_{I2}

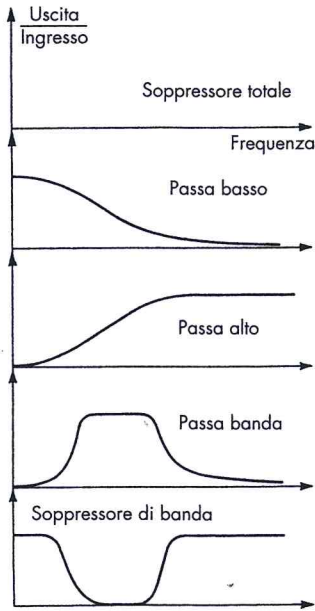


FIGURA 2.15
Filtri base.

TUBO
PREFOS

siano essenzialmente uguali, ma agiscono in senso opposto; in tal modo il contributo netto $o_{I1} - o_{I2}$ per l'uscita risulta all'incirca nullo. Il metodo potrebbe essere considerato come una variazione del metodo della correzione calcolata dell'uscita. Tuttavia il "calcolo" e l'applicazione della correzione vengono realizzati automaticamente, grazie alla struttura del sistema, piuttosto che al calcolo numerico effettuato da un operatore umano. Quindi i due metodi risultano simili: tuttavia la loro distinzione è degna di nota, poiché aiuta a organizzare le idee, nell'invenzione di nuove possibili applicazioni di queste strategie generali di correzione.

Alcuni esempi del metodo degli ingressi in opposizione sono illustrati in Figura 2.17. Un millivoltmetro, mostrato in Figura 2.17a, è in realtà un dispositivo sensibile al passaggio di corrente. Tuttavia, finché la resistenza totale del circuito rimane costante, la sua scala può essere tarata in valori di tensione, poiché esiste un legame di proporzionalità tra tensione e corrente. In questo caso un ingresso modificante è la temperatura ambiente, dal momento che provoca una variazione della resistenza dell'avvolgimento R_{avvol} , quindi alterando il fattore di proporzionalità tra la corrente e la tensione. Per correggere questo errore, viene introdotta nel circuito una resistenza di compensazione R_{comp} , e il suo materiale viene scelto con attenzione, in modo da avere un coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura opposto a quello di R_{avvol} . Così, quando la temperatura varia, la resistenza totale del circuito risulta insensibile a questa variazione e la taratura dello strumento rimane accurata.

La Figura 2.17b mostra il disegno di una sonda per misurare la pressione statica in una vena fluida il cui progetto è dovuto a L. Prandtl. Quando il fluido investe la superficie della sonda, la velocità del fluido deve crescere, dal momento che il cammino delle linee di flusso è più lungo di quello che si avrebbe in vena indisturbata. Questo incremento di velocità provoca una caduta nel valore della pressione statica, cosicché una presa di pressione sulla superficie della sonda produce una lettura non corretta. L'errore di sottostima della pressione varia in funzione della distanza d_1 della presa dall'estremità di prua della sonda. Prandtl riconobbe che il supporto della sonda presenta un punto di ristagno (in realtà una linea) lungo la parte frontale e che la sovrappressione a esso associata viene sentita anche a monte, con un effetto decrescente al crescere della distanza d_2 . Grazie a una scelta opportuna delle distanze d_1 e d_2 (con test sperimentali) questi due effetti possono essere resi tali da elidersi esattamente, fornendo il valore corretto della pressione statica in corrispondenza della presa di pressione.

Un dispositivo per la misura della portata massica di gas è mostrato in Figura 2.17c. La portata massica di un gas attraverso un orifizio può essere ricavata dalla misura di caduta di pressione attraverso l'orifizio, per esempio utilizzando un manometro differenziale a U. Sfortunatamente la portata massica dipende anche dalla densità del gas, che varia in dipendenza sia della pressione sia della temperatura. Dunque il dispositivo per la misura della caduta di pressione solitamente non può essere tarato per fornire direttamente la portata in massa, dal momento che le variazioni sia della temperatura sia della pressione del gas por-

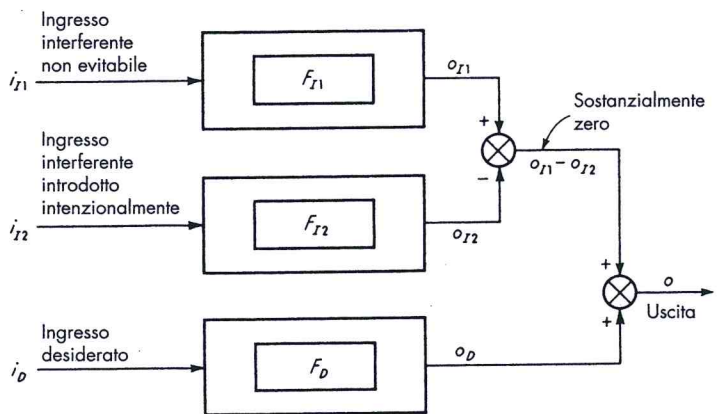
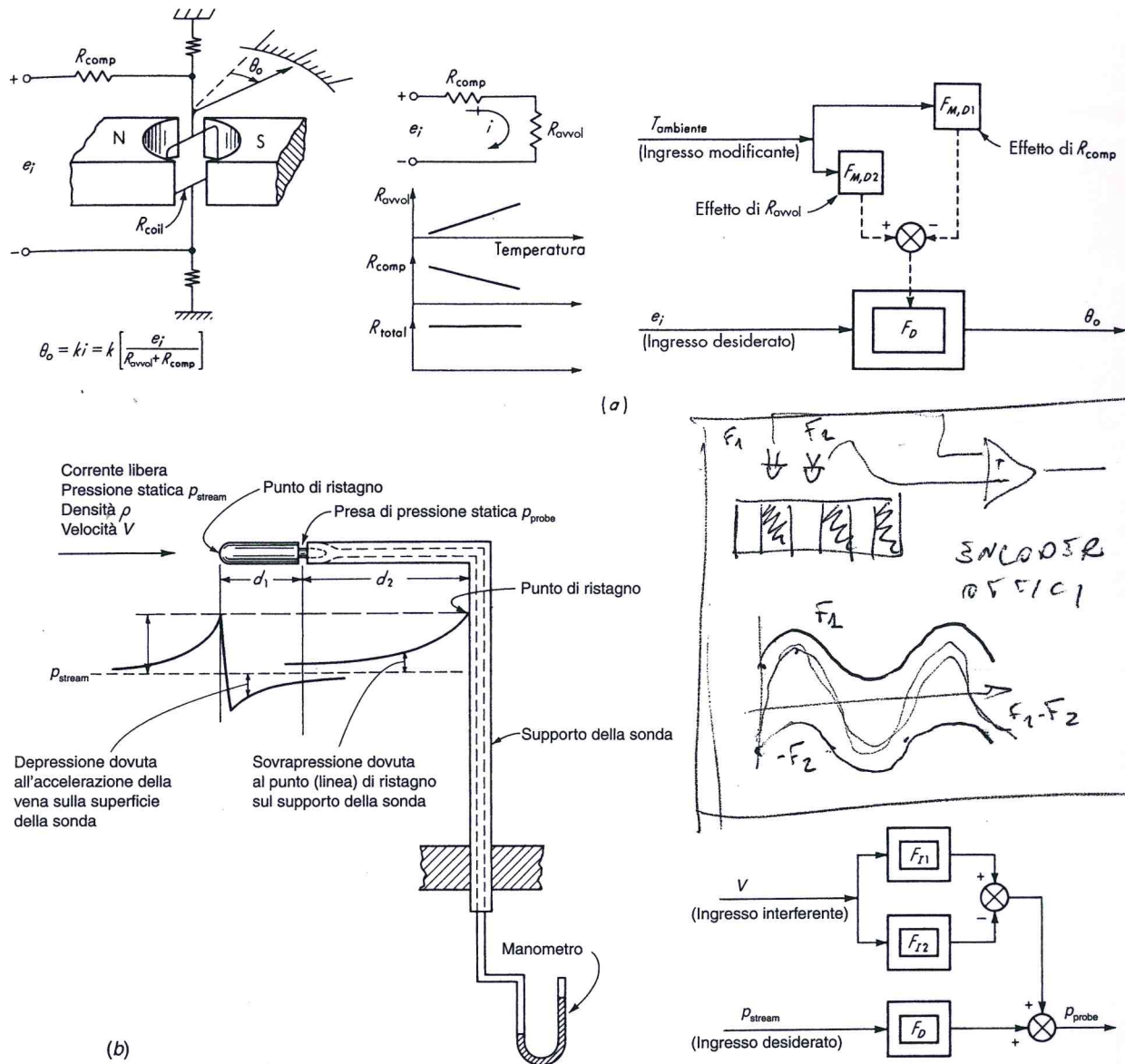


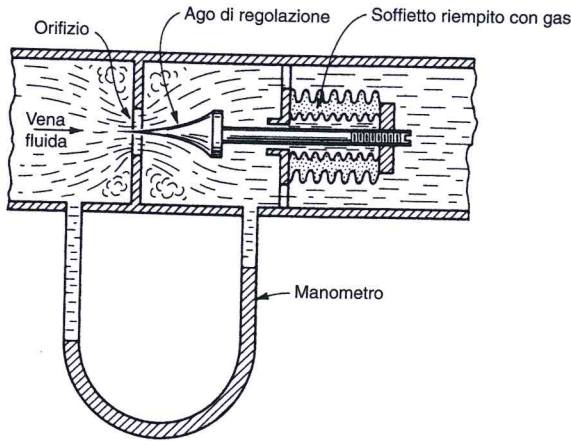
FIGURA 2.16
Metodo degli ingressi
in opposizione.



tano a differenti valori della portata massica a parità di caduta di pressione a cavallo dell'orifizio. Lo strumento di Figura 2.17c supera questo problema in maniera ingegnosa. La portata attraverso l'orifizio dipende anche dall'area di efflusso. Quindi se questa area potesse essere modificata in modo opportuno, questa variazione potrebbe compensare le variazioni di pressione e temperatura. In tal modo a una determinata caduta di pressione corrisponde *sempre* la medesima portata in massa. Questo viene realizzato unendo uno speciale ago di regolazione opportunamente progettato ("metering pin") a un soffiato riempito di gas, come mostrato nella citata Figura 2.17c. Quando la temperatura diminuisce (causando un incremento di densità e di conseguenza della portata in massa), il gas all'interno del soffiato si contrae, trascinando con sé l'ago di regolazione che entra nell'orifizio, riducendo la sezione di efflusso. Questo ristabilisce il corretto valore della portata massica. In modo del tutto simile, se la pressione del gas dovesse aumentare, provocando un aumento di densità e di portata in massa, il soffiato riempito di gas risulterebbe ulteriormente compresso, l'area di efflusso ridotta e la portata in massa corretta. La forma appropriata dell'ago di regolazione è frutto di un'analisi dettagliata del sistema.

Un esempio finale del metodo degli ingressi in opposizione è il giroscopio di Figura 2.17d. Tali dispositivi sono largamente impiegati in veicoli aerospaziali, per la generazione di segnali di stabilizzazione nel sistema di controllo. L'azione del dispositivo consiste nel

FIGURA 2.17
Esempio del metodo degli ingressi in opposizione.



(c)

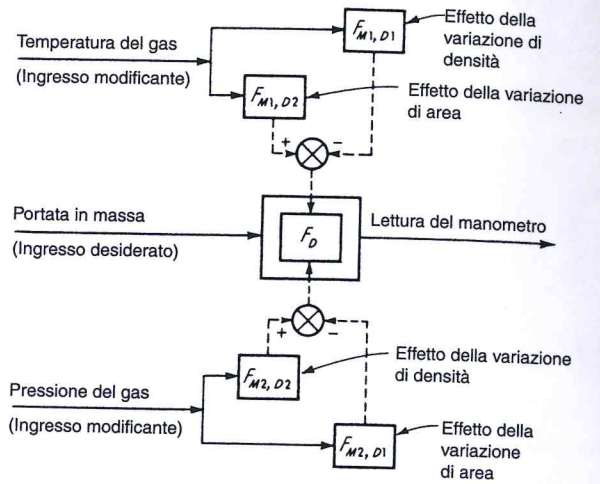
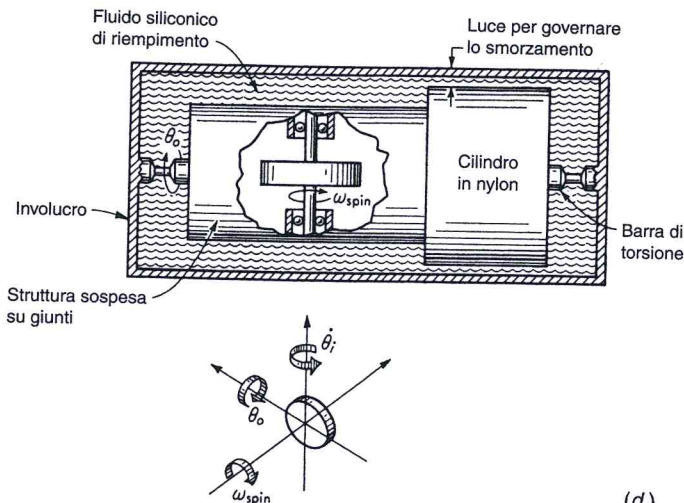


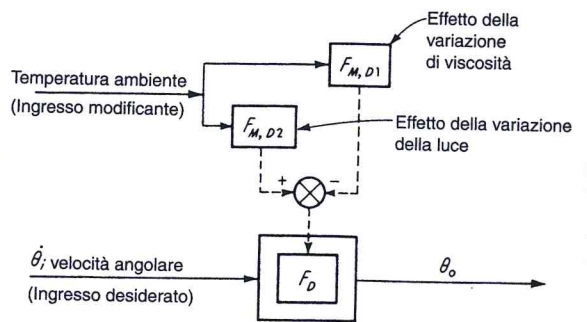
FIGURA 2.17
Esempio del metodo degli ingressi in opposizione.
(Continua)

FIGURA 2.17
Esempio del metodo degli ingressi in opposizione.
(Conclusione)

fatto che una rotazione del veicolo alla velocità angolare θ_i provoca uno spostamento proporzionale θ_o dell'elemento sospeso con doppio giunto ("gimbal") rispetto all'involucro. Questa rotazione θ_o viene misurata per mezzo di un captatore di spostamento (non mostrato in Figura 2.17d). In definitiva risulta disponibile un segnale proporzionale alla velocità angolare del veicolo, e questo è utile per stabilizzarlo. Quando il veicolo è sottoposto a rapidi cambiamenti nel movimento, il valore dell'angolo θ_o tende a oscillare, fornendo un segnale di velocità angolare errata. Per controllare queste oscillazioni, la rotazione del corpo flangiato θ_o viene smorzata dalle azioni tangenziali esercitate da un fluido silconico viscoso, in un volume contenuto, con luce assai stretta e con conseguenti effetti smorzanti. L'effetto smorzante varia con la viscosità del fluido e lo spessore della luce libera. Benché la viscosità del silicone sia all'incirca costante, varia comunque con la temperatura ambiente, provocando un cambiamento indesiderato nelle caratteristiche smorzanti. Per compensare questo fatto, si utilizza, all'interno del giroscopio, un cilindro di nylon. Quando la temperatura cresce, la viscosità diminuisce, provocando una diminuzione dello smorzamento. Allo stesso tempo, tuttavia, il cilindro di nylon si espande, restringendo la luce libera che serve allo smorzamento, ripristinandone il valore corretto. Grazie a una scelta opportuna dei materiali e della geometria, i due effetti possono essere resi prossimi alla mutua cancellazione, all'interno del campo di temperature previste per l'utilizzo dell'equipaggiamento.



(d)



2.6 Conclusioni

In questo capitolo abbiamo sviluppato utili generalizzazioni riguardanti gli elementi funzionali e le configurazioni ingresso-uscita di strumenti e sistemi di misura.

Nell'analisi di un determinato strumento o nella progettazione di uno nuovo, il punto di partenza è la separazione della modalità operativa generale nei suoi elementi funzionali. A questo livello è necessario avere almeno un'idea grossolana di che *cosa* bisogna fare, ma non bisogna preoccuparsi di *come* arrivarci. Una volta che i concetti riguardanti le funzioni generali sono stati chiariti, i dettagli dell'operazione possono essere presi in considerazione con beneficio. I concetti di trasduttori attivi e passivi, di modalità operative analogiche o digitali, o ancora di metodi per deflessione oppure azzeramento offrono un approccio sistematico sia per l'analisi sia per la progettazione.

Per concludere, la compensazione degli ingressi spuri e una valutazione di dettaglio riguardo le prestazioni degli strumenti sono facilitate dall'applicazione di schemi a blocchi del tipo ingresso-uscita. Questi diagrammi delle configurazioni mostrano chiaramente quali analisi fisiche debbono essere condotte per valutare le prestazioni riguardanti la misura accurata degli ingressi desiderati e la cancellazione degli ingressi spuri. La valutazione della qualità relativa di differenti strumenti (oppure lo stesso strumento con differenti valori numerici attribuiti ai parametri) richiede la definizione di criteri di prestazione grazie ai quali sia possibile confrontare la competitività di diversi progetti. Questa è la materia del Capitolo 3.

PROBLEMI

- 2.1** Preparare schemi a blocchi, come quelli di Figura 2.1, che mostrino gli elementi funzionali degli strumenti di seguito indicati:
 Figura 2.7,
 Figura 2.8,
 Figura 2.10a,
 Figura 2.11; considerare F come ingresso e e_o come uscita,
 Figura 2.14g; considerare T_s come ingresso e e_o come uscita,
 Figura 2.17b; considerare V come ingresso e il Δh del manometro come uscita,
 Figura 2.17d; considerare θ_i come ingresso e θ_o come uscita.
- 2.2** Identificare i trasduttori attivi, se presenti, negli strumenti di: Figura 2.8, Figura 2.10a, Figura 2.11, Figura 2.17b, Figure 2.17c.
- 2.3** Si consideri un uomo che guida un'automobile lungo una strada: vede la possibilità di sorpassare e decide di accelerare.
 Se le onde luminose che entrano nei suoi occhi sono considerate l'ingresso e l'escursione del pedale dell'acceleratore è l'uscita, l'uomo agisce come un trasduttore attivo o passivo?
 Se l'escursione del pedale dell'acceleratore è considerato come ingresso e la velocità dell'automobile è l'uscita, il motore dell'autovettura è un trasduttore attivo o passivo?
- 2.4** Dare un esempio di metodo per azzeramento nelle misure di forza.
- 2.5** Dare un esempio di metodo per azzeramento nelle misure di tensione.
- 2.6** Fare uno schizzo e spiegare due possibili modifiche del sistema di Figura 2.4 che permetta la misura pari a 1/10 della rivoluzione.
- 2.7** Identificare gli ingressi desiderati, interferenti e modificanti per i sistemi di: Figura 2.2, Figura 2.3, Figura 2.4, Figura 2.5.
- 2.8** Perché l'angolo di inclinazione nella Figura 2.10c è un ingresso modificante?
- 2.9** Si supponga, nell'Equazione (2.7), che $K_{M_o} = K_{S_P} = e_i = 1.0$. Ora si lasci muovere K_{M_o} del 10% per arrivare a 1.1. Quale è la variazione in x_o ? Nell'Equazione (2.10) si ponga $K_{M_o} = K_{S_P} = K_{F_B} = e_i = 1.0$ e $K_{A_M} = 100$. Si consenta una variazione di K_{M_o} del 10% fino al valore di 1.1. Quale è la variazione di x_o ? Valutare l'effetto di simili cambiamenti nei valori di K_{A_M} , K_{S_P} e K_{F_B} .
- 2.10** La frequenza propria di oscillazione di un bilanciere in un orologio da polso dipende dal momento di inerzia della ruota e dalla costante elastica (torsionale) della molla di richiamo a spirale (hairspring). Un aumento di temperatura comporta una riduzione della costante della molla, che riduce la frequenza di oscillazione. Proporre un sistema per compensare questo effetto. Un materiale della molla a spirale insensibile alla temperatura non è una soluzione accettata.

manometer is mounted on some vehicle that is accelerating. A simple analysis shows that there will be an output x even though the differential pressure might be zero. Thus if you are trying to measure pressures under such circumstances, an error will be engendered because of the interfering acceleration input. Similarly, in Fig. 2.10c, if the manometer is not properly aligned with the gravity vector, it may give an output signal x even though no pressure difference exists. Thus the tilt angle θ is an interfering input. (It is also a modifying input.)

Modifying inputs for the manometer include ambient temperature and gravitational force. Ambient temperature manifests its influence in a number of ways. First, the calibrated scale changes length with temperature; thus the proportionality factor relating $p_1 - p_2$ to x is modified whenever temperature varies from its basic calibration value. Also, the density of mercury varies with temperature, which again leads to a change in the proportionality factor. A change in gravitational force resulting from changes in location of the manometer, such as moving it to another country or putting it aboard a spaceship, leads to a similar modification in the scale factor. Note that the effects of both the desired and the interfering inputs may be altered by the modifying inputs.

As another example, consider the electric-resistance strain-gage setup shown in Fig. 2.11. The gage consists of a fine-wire grid of resistance R_g firmly cemented to the specimen whose unit strain ϵ at a certain point is to be measured. When strained, the gage's resistance changes according to the relation

$$\Delta R_g = (GF)R_g \epsilon \quad (2.1)$$

where $\Delta R_g \triangleq$ change in gage resistance, Ω *

$GF \triangleq$ gage factor, dimensionless (2.2)

$R_g \triangleq$ gage resistance when unstrained, Ω (2.4)

$\epsilon \triangleq$ unit strain, cm/cm (2.5)

The resistance change is proportional to the strain. Thus if we could measure the resistance, we could compute the strain. The resistance is measured by using the Wheatstone-bridge arrangement shown. When no load F is present, the bridge is balanced (e_o set to zero) by adjusting R_c . Application of load causes a strain, a ΔR_g , and thus unbalances the bridge, causing an output voltage e_o which is proportional to ϵ and can be measured on a meter or an oscilloscope. The voltage e_o is given by

$$e_o = - (GF)R_g \epsilon E_b \frac{R_g}{(R_g + R_d)^2} \quad (2.6)$$

The desired input here is clearly the strain ϵ which causes a proportional output voltage e_o . One interfering input which often causes trouble in such apparatus is the 60-Hz field caused by nearby power lines, electric motors, etc.

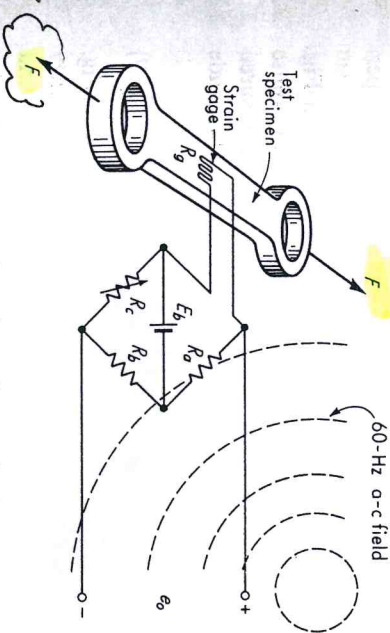


Figure 2.11 Interfering input for strain-gage circuit.

This field induces voltages in the strain-gage circuit, causing output voltages e_o even when the strain is zero. Another interfering input is the gage temperature. If this varies, it causes a change in gage resistance that will cause a voltage output even if there is no strain. Temperature has another interfering effect since it causes a differential expansion of the gage and the specimen, which gives rise to a strain ϵ and a voltage e_o even though no force F has been applied. Temperature also acts as a modifying input since the gage factor is sensitive to temperature. The battery voltage E_b is another modifying input. Both these are modifying inputs since they tend to change the proportionality factor between the desired input ϵ and the output e_o or between an interfering input (gage temperature) and output e_o .

Methods of Correction for Interfering and Modifying Inputs

In the design and/or use of measuring instruments, a number of methods for nullifying or reducing the effects of spurious inputs are available. We briefly describe some of the most widely used.

I1 The method of inherent insensitivity proposes the obviously sound design philosophy that the elements of the instrument should inherently be sensitive to only the desired inputs. While usually this is not entirely possible, the simplicity of this approach encourages one to consider its application wherever feasible. In terms of the general configuration of Fig. 2.9, this approach requires that somehow F_i and/or F_m be made as nearly equal to zero as possible. Thus, even though I_i and/or I_m may exist, they cannot affect the output. As an example of the application of this concept to the strain gage of Fig. 2.11, we might try to find some gage material that exhibits an extremely low temperature coefficient of resistance while retaining its sensitivity to strain. If such a material can be found,

face of ambient-temperature changes, the use of a material¹ of very small temperature coefficient of expansion (such as the alloy Invar) may be helpful.

The method of high-gain feedback is exemplified by the system shown in Fig. 2.12b. Suppose we wish to measure a voltage e_i by applying it to a motor whose torque is applied to a spring, causing a displacement x_o , which may be measured on a calibrated scale. By proper design, the displacement x_o might be made proportional to the voltage e_i according to

$$x_o = (K_{M_o} K_{SP}) e_i \quad (2.7)$$

where K_{M_o} and K_{SP} are appropriate constants. This arrangement, shown in Fig. 2.12a, is called an open-loop system. If modifying inputs i_{M1} and i_{M2} exist, they cause changes in K_{M_o} and K_{SP} that lead to errors in the relation between e_i and

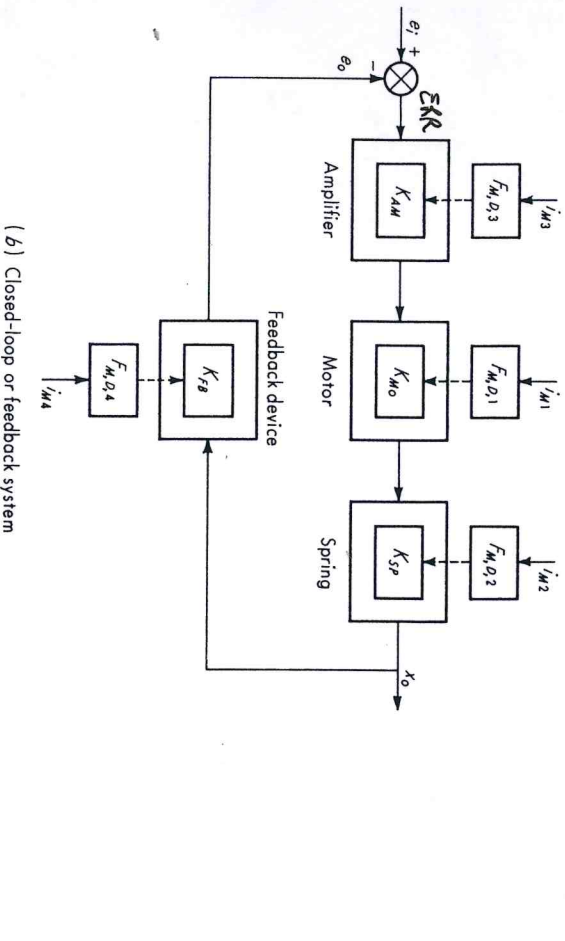
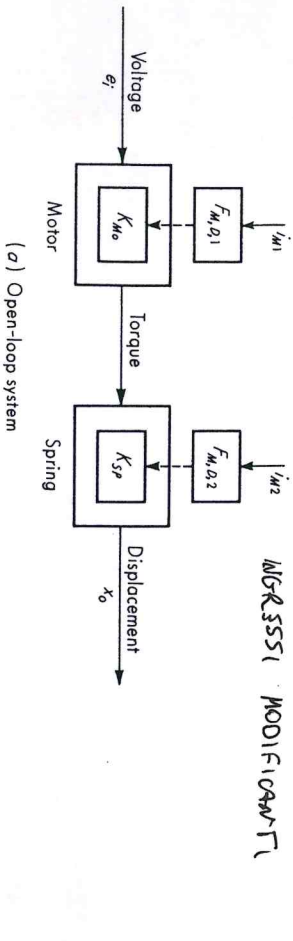


Figure 2.12 Use of feedback to reduce effect of spurious inputs.

i_{M1}, i_{M2}
 These errors are in direct proportion to the changes in K_{M_o} and K_{SP} . Suppose, instead, we construct a system as in Fig. 2.12b. Here the output x_o is measured by the feedback device, which produces a voltage e_o proportional to x_o . This voltage is subtracted from the input voltage e_i , and the difference is applied to an amplifier which drives the motor and thereby the spring to produce x_o . We may write

$$(e_i - e_o) K_{AM} K_{M_o} K_{SP} = (e_i - K_{FB} x_o) K_{AM} K_{M_o} K_{SP} = x_o \quad (2.8)$$

$$e_i K_{AM} K_{M_o} K_{SP} = (1 + K_{AM} K_{M_o} K_{SP} K_{FB}) x_o \quad (2.9)$$

$$x_o = \frac{K_{AM} K_{M_o} K_{SP}}{1 + K_{AM} K_{M_o} K_{SP} K_{FB}} e_i \quad (2.10)$$

Suppose, now, that we design K_{AM} to be very large (a "high-gain" system), so that $K_{AM} K_{M_o} K_{SP} K_{FB} \gg 1$. Then

$$x_o \approx \frac{1}{K_{FB}} e_i \quad (2.11)$$

The significance of Eq. (2.11) is that the effect of variations in K_{M_o} , K_{SP} , and K_{AM} (as a result of modifying inputs i_{M1} , i_{M2} , and i_{M3}) on the relation between input e_i and output x_o has been made negligible. We now require only that K_{FB} stay constant (unaffected by i_{M4}) in order to maintain constant input-output calibration as shown by Eq. (2.11).

You may question whether much really has been gained by this somewhat elaborate scheme, since we merely transferred the requirements for stability from K_{M_o} and K_{SP} to K_{FB} . In practice, however, this method often leads to great improvements in accuracy. One reason is that, since the amplifier supplies most of the power needed, the feedback device can be designed with low power-handling capacity. In general, this leads to greater accuracy and linearity in the feedback-device characteristics. Also, the input signal e_i need carry only negligible power; thus the feedback system extracts less energy from the measured medium than the corresponding open-loop system. This, of course, results in less distortion of the measured quantity because of the presence of the measuring instrument. Finally, if the open-loop chain consists of several (perhaps many) devices, each susceptible to its own spurious inputs, then all these bad effects can be negated by the use of high amplification and a stable, accurate feedback device.

Before we pass on to other methods, we should mention that application of the feedback principle is not without its own peculiar problems. The main one is dynamic instability, wherein excessively high amplification leads to destructive oscillations. The study of the design of feedback systems is a whole field in itself, and many texts treating this subject are available.¹

3 The method of calculated output corrections requires one to measure or estimate the magnitudes of the interfering and/or modifying inputs and to know quantitatively how they affect the output. With this information, it is possible to calculate corrections which may be added to or subtracted from the indicated

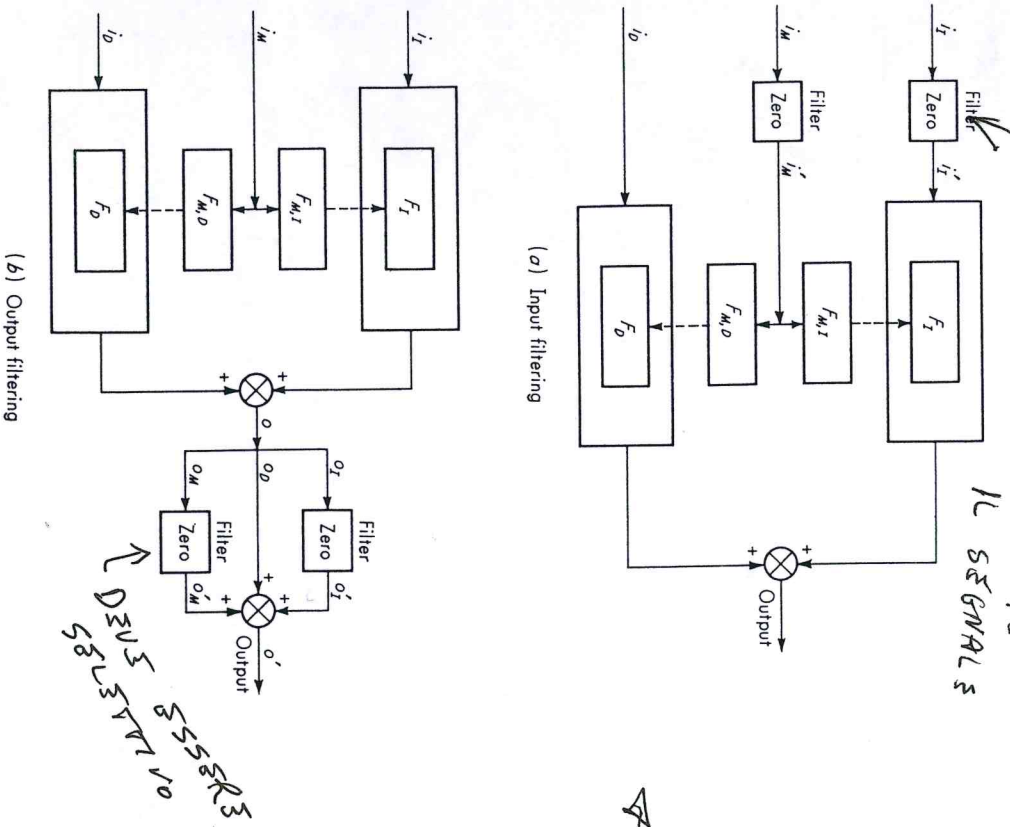


Figure 2.13 General principle of filtering.

output so as to leave (ideally) only that component associated with the desired input. Thus, in the manometer of Fig. 2.10, the effects of temperature on both the calibrated scale's length and the density of mercury may be quite accurately computed if the temperature is known. The local gravitational acceleration is also known for a given elevation and latitude, so that this effect may be corrected by calculation. Since many measurement systems today can afford to include a microcomputer to carry out various functions, if we also provide sensors for the spurious inputs, the microcomputer can implement the method of calculated

4

FILTERING

elements ("filters") into the instrument which in some fashion block the spurious signals, so that their effects on the output are removed or reduced. The filter may be applied to any suitable signal in the instrument, be it input, output, or intermediate signal. The concept of signal filtering is shown schematically in Fig. 2.13 for the cases of input and output filtering. The application to intermediate signals should be obvious. In Fig. 2.13a the inputs i_i and i_M are caused to pass through filters whose input-output relation is (ideally) zero. Thus i'_i and i'_M are zero even if i_i and i_M are not zero. The concept of output filtering is illustrated in Fig. 2.13b. Here the output o , though really one signal, is thought of as a superposition of o_I (output due to interfering input), o_D (output due to desired input), and o_M (output due to modifying input). If it is possible to construct filters that selectively block o_I and o_M but allow o_D to pass through, this may be symbolized as in Fig. 2.13b and results in o' consisting entirely of o_D .

The filters necessary in the application of this method may take several forms: they are best illustrated by examples. If put directly in the path of a spurious input, a filter can be designed (ideally) to block completely the passage of the signal. If, however, it is inserted at a point where the signal contains both desired and spurious components, the filter must be designed to be selective. That is, it must pass the desired components essentially unaltered while effectively suppressing all others.

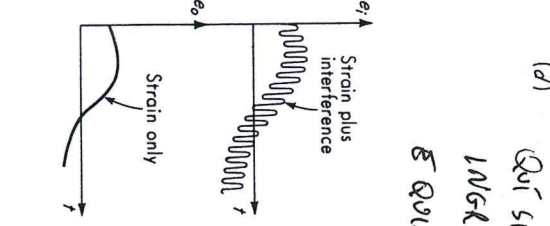
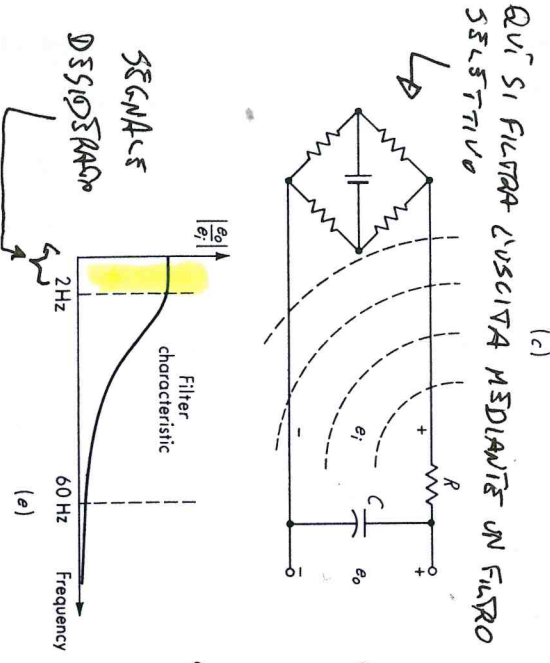
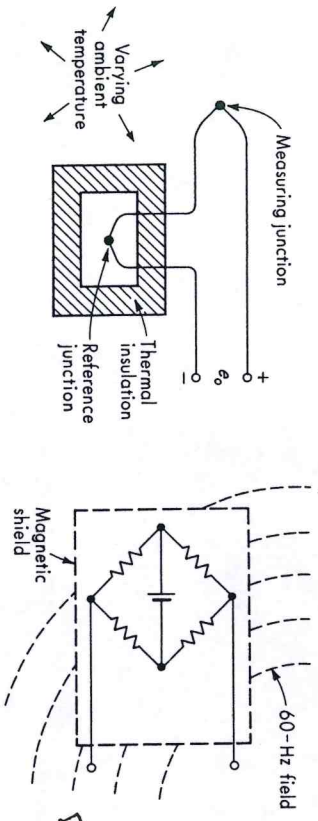
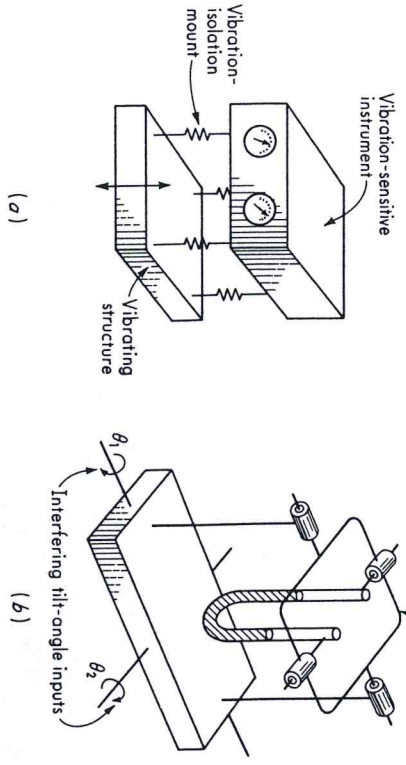
Often it is necessary to attach delicate instruments to structures that vibrate. Electromechanical devices for navigation and control of aircraft or missiles are outstanding examples. Figure 2.14a shows how the interfering vibration input may be filtered out by use of suitable spring mounts. The mass-spring system is actually a mechanical filter which passes on to the instrument only a negligible fraction of the motion of the vibrating structure.

The interfering tilt-angle input to the manometer of Fig. 2.10c may be effectively filtered out by means of the gimbal-mounting scheme of Fig. 2.14b. If the gimbal bearings are essentially frictionless, the rotations θ_1 and θ_2 cannot be communicated to the manometer; thus it always hangs vertical.

In Fig. 2.14c the thermocouple reference junction is shielded from ambient-temperature fluctuations by means of thermal insulation. Such an arrangement acts as a filter for temperature or heat-flow inputs.

The strain-gage circuit of Fig. 2.14d is shielded from the interfering 60-Hz field by enclosing it in a metal box of some sort. This solution corresponds to filtering the interfering input. Another possible solution, which corresponds to selective filtering of the output, is shown in Fig. 2.14e. For this approach to be effective, it is essential that the frequencies in the desired signal occupy a frequency range considerably separated from those in the undesired component of the signal. In the present example, suppose the strains to be measured are mainly steady and never vary more rapidly than 2 Hz. Then it is possible to insert a simple RC filter, as shown, that will pass the desired signals but almost completely block the 60-Hz interference.

Figure 2.14f shows the procedure recommended for the insulation of a



QUI SI FILTRA USCIUTA MEDIANTE UN FILTRO SELETTIVO

QUI SI FILTRA UN INGROSSO INTERFERENZE

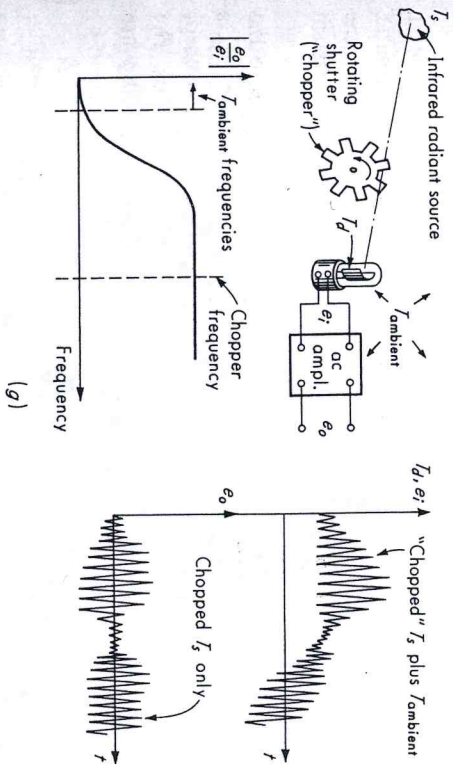
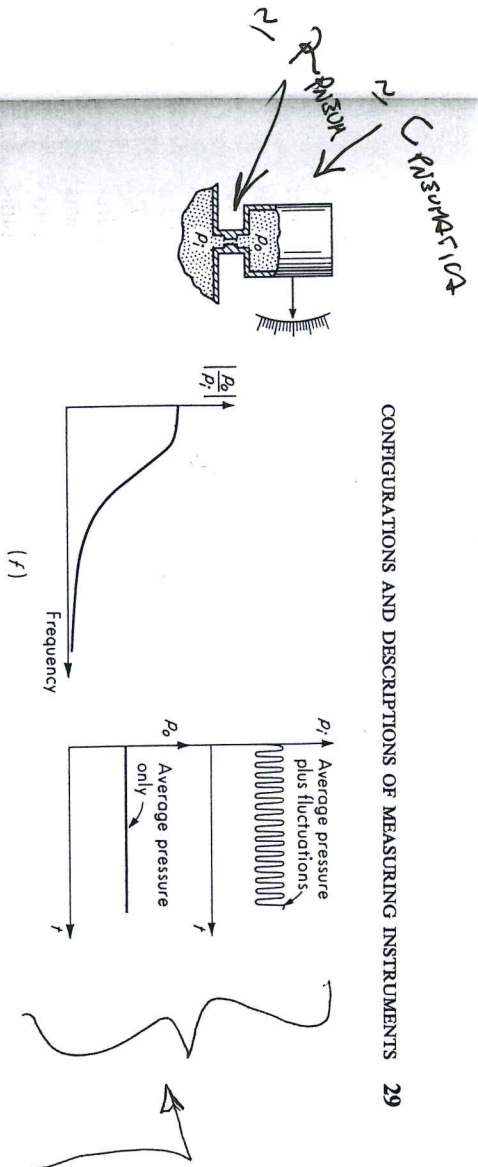


Figure 2.14 (Continued)

arrangement is useful, for example, if you wish to measure only the average pressure in a large air tank that is being supplied by a reciprocating compressor. The pulsations in the air pressure may be smoothed by the pneumatic filtering effect of the flow restriction and associated volume. The variation of the output-input amplitude ratio $|P_o/P_i|$ with frequency is similar to that for the electrical RC filter of Fig. 2.14e. Thus steady or slowly varying input pressures are accurately measured while rapid variations are strongly attenuated. The flow restriction may be in the form of a needle valve, which allows easy adjustment of the filtering effect.

A "chopped" radiometer is shown in simplified form in Fig. 2.14g. This device senses the temperature T_s of some body in terms of the infrared radiant energy emitted. The emitted energy is focused on a detector of some sort and causes the temperature T_d of the detector, and thus its output voltage e_i , to vary.

very small changes in T_d ; thus small ambient drifts can completely mask the desired input. An ingenious solution to this problem interposes a rotating shutter between the radiant source and the detector, so that the desired input is "chopped," or modulated, at a known frequency. This frequency is chosen to be much higher than the frequencies at which ambient drifts may occur. The output signal e_i of the detector thus is a superposition of slow ambient fluctuations and a high-frequency wave whose amplitude varies in proportion to variations in T_s . Since the desired and interfering components are thus widely separated in frequency, they may be selectively filtered. In this case, we desire a filter that rejects constant and slowly varying signals, but faithfully reproduces rapid variations. Such a characteristic is typical of an ordinary ac amplifier, and since amplification is necessary in such instruments in any case, the use of an ac amplifier as shown solves two problems at once.

In summing up the method of signal filtering, it may be said that, in general, it is usually possible to design filters of mechanical, electrical, thermal, pneumatic, etc., nature which separate signals according to their frequency content in some specific manner. Figure 2.15 summarizes the most common useful forms of such devices.

The method of opposing inputs consists of intentionally introducing into the instrument interfering and/or modifying inputs that tend to cancel the bad effects of the unavoidable spurious inputs. Figure 2.16 shows schematically the concept for interfering inputs. The extension to modifying inputs should be obvious. The intentionally introduced input is designed so that the signals o_{r1} and o_{r2} are

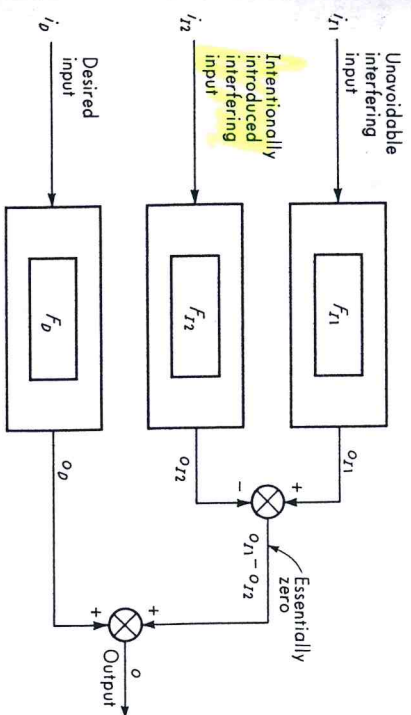
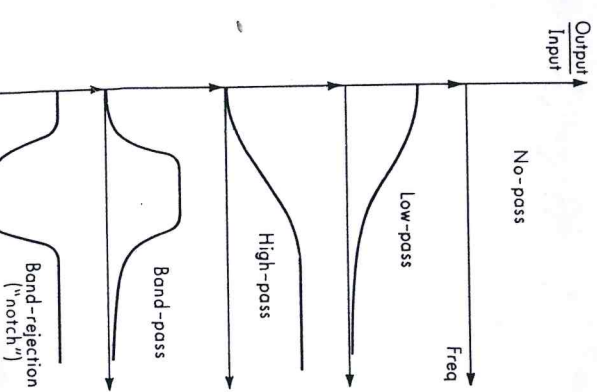


Figure 2.16 Method of opposing inputs.

essentially equal, but act in opposite sense; thus the net contribution $o_{r1} - o_{r2}$ to the output is essentially zero. This method actually might be considered as a variation on the method of calculated output corrections. However, the "calculation" and application of the correction are achieved automatically owing to the structure of the system, rather than by numerical calculation by a human operator. Thus the two methods are similar; however, the distinction between them is a worthwhile one since it helps to organize your thinking in inventing new applications of these generalized correction concepts.

Some examples of the method of opposing inputs are shown in Fig. 2.17. A millivoltmeter, shown in Fig. 2.17a, is basically a current-sensitive device. However, as long as the total circuit resistance is constant, its scale can be calibrated in voltage, since voltage and current are proportional. A modifying input here is the ambient temperature, since it causes the coil resistance R_{coil} to change, thereby altering the proportionality factor between current and voltage. To correct for this error, the compensating resistance R_{comp} is introduced into the circuit, and its material is carefully chosen to have a temperature coefficient of resistance opposite to that of R_{coil} . Thus when the temperature changes, the total resistance of the circuit is unaffected and the calibration of the meter remains accurate.

Figure 2.17b shows a static-pressure-probe design due to L. Prandtl. As the fluid flows over the surface of the probe, the velocity of the fluid must increase since these streamlines are longer than those in the undisturbed flow. This velocity increase causes a drop in static pressure, so that a tap in the surface of the probe gives an incorrect reading. This underpressure error varies with the distance d_1 of the tap from the probe tip. Prandtl recognized that the probe support will have a stagnation point (line) along its front edge and that this overpressure will be felt upstream, the effect decreasing as the distance d_2 increases. R_v is the pressure difference d_1 and d_2 . (The experimental fact) that

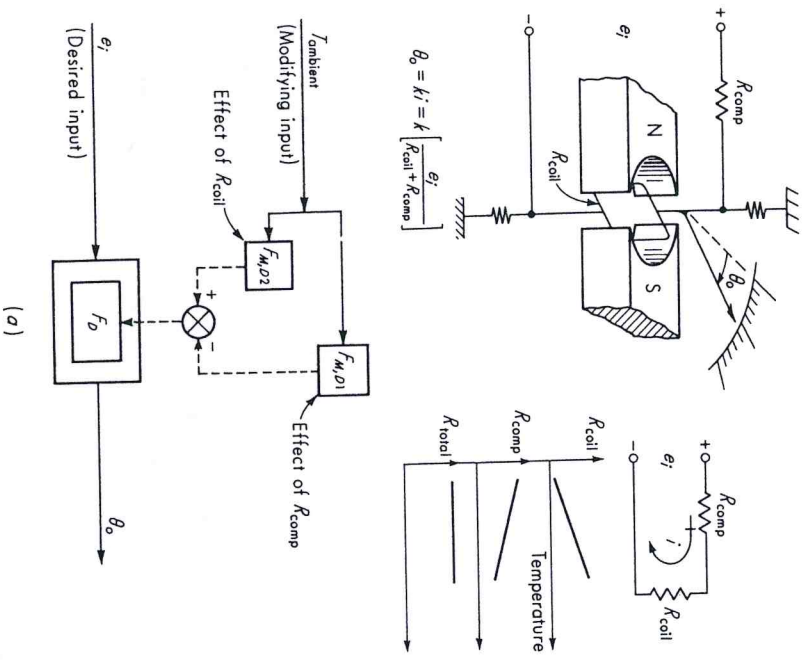


Figure 2.17 Examples of method of opposing inputs.

two effects can be made exactly to cancel, giving a true static-pressure value at the tap.

A device for the measurement of the mass flow rate of gases is shown in Fig. 2.17c. The mass flow rate of gas through an orifice may be found by measuring the pressure drop across the orifice, perhaps by means of a U-tube manometer. Unfortunately, the mass flow rate also depends on the density of the gas, which varies with pressure and temperature. Thus the pressure-drop measuring device usually cannot be calibrated to give the mass flow rate, since variations in gas temperature and pressure yield different mass flow rates for the same orifice pressure drop. The instrument of Fig. 2.17c overcomes this problem in an ingenious fashion. The flow rate through the orifice also depends on its flow area. Thus if the flow area could be varied in just the right way, this variation could compensate for pressure and temperature changes so that a given orifice pressure

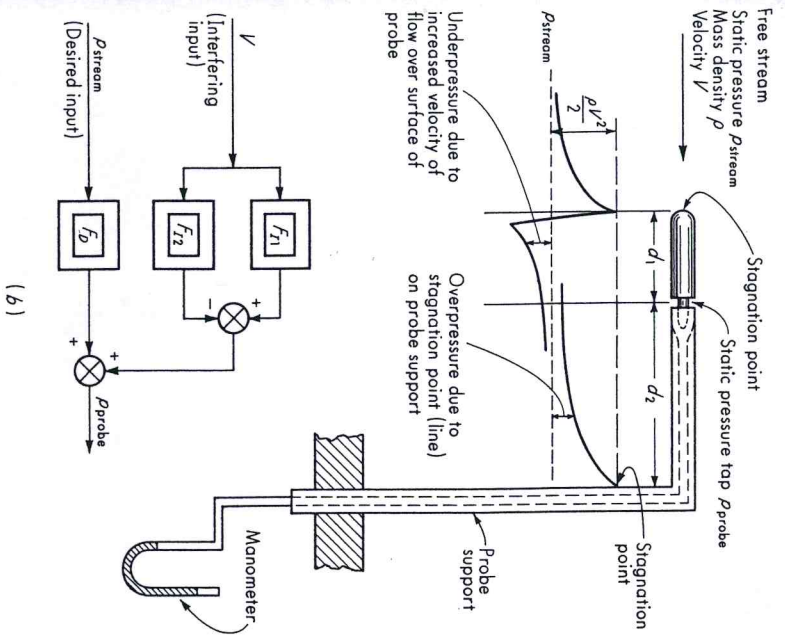


Figure 2.17 (Continued)

When the temperature drops (causing an increase in density and therefore in mass flow rate), the gas in the bellows contracts, which moves the metering pin into the orifice and thereby reduces the flow area. This returns the mass flow rate to its proper value. Similarly, should the pressure of the flowing gas increase, causing an increase in density and mass flow rate, the gas-filled bellows would be compressed again, reducing the flow area and correcting the mass flow rate. The proper shape for the metering pin is revealed by a detailed analysis of the system.

A final example of the method of opposing inputs is the rate gyroscope of Fig. 2.17d. Such devices are widely used in aerospace vehicles for the generation of stabilization signals in the control system. The action of the device is that a vehicle rotation at angular velocity $\dot{\theta}_i$ causes a proportional displacement θ_o of the gimbal relative to the case. This rotation θ_o is measured by some motion pickup (not shown in Fig. 2.17d). Thus a signal proportional to vehicle angular velocity is available, and this is useful in stabilizing the vehicle. When the vehicle undergoes rapid motion changes, however, the angle θ_o tends to oscillate, giving

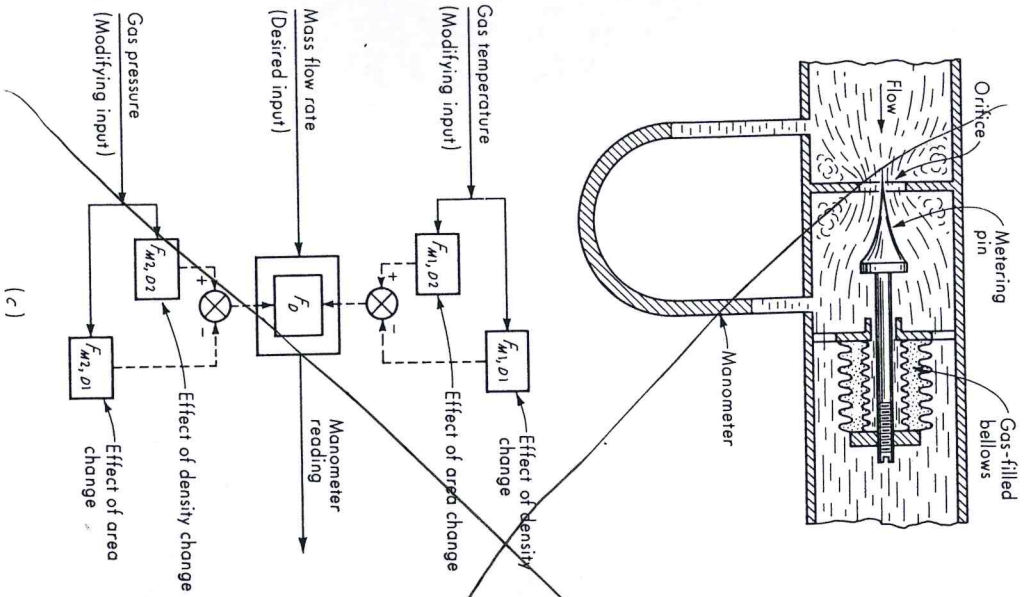


Figure 2.17 (Continued)

narrow damping gap. The damping effect varies with the viscosity of the fluid and the thickness of the damping gap. Although the viscosity of the silicone fluid is fairly constant, it does vary with ambient temperature, causing an undesirable change in damping characteristics. To compensate for this, a nylon cylinder is used in the gyro of Fig. 2.17d. When the temperature increases, viscosity drops, causing a loss of damping. Simultaneously, however, the nylon cylinder expands, narrowing the damping gap and thus restoring the damping to its proper value.

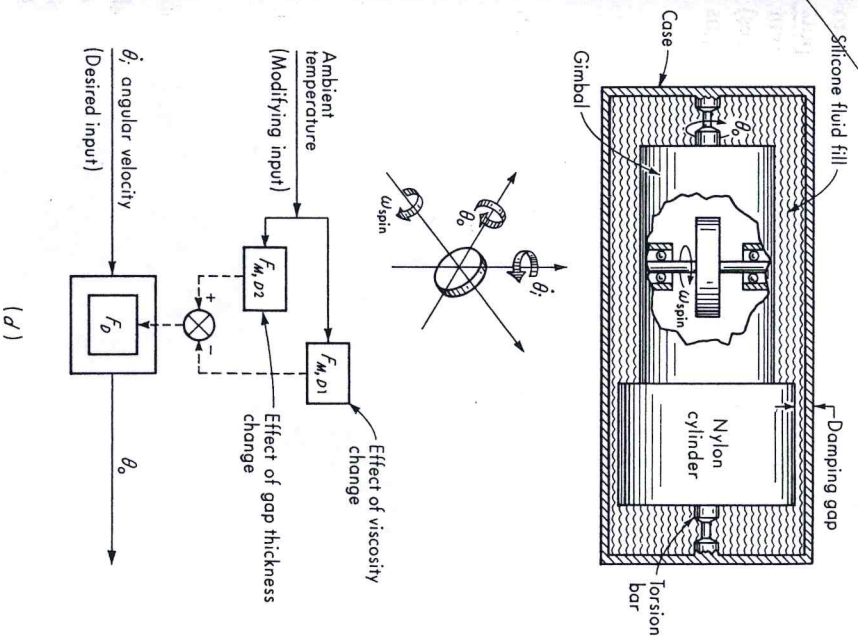


Figure 2.17 (Continued)

2.6 CONCLUSION

In this chapter we developed useful generalizations with regard to the functional elements and the input-output configurations of measuring instruments and systems. In the analysis of a given instrument or in the design of a new one, the starting point is the separation of the overall operation into its functional elements. Here you must take a broad view of *what* must be done, but not be concerned with *how* it is actually accomplished. Once the general functional concepts have been clarified, the details of operation may be considered fruitfully. The ideas of active and passive transducers, analog and digital modes of operation, and null versus deflection methods give a systematic approach for either analysis or design.

Finally, commencing an analysis of measuring instruments and systems...