

Giacomo Torzo

CAPIRE E SPERIMENTARE

GLI AMPLIFICATORI

OPERAZIONALI

Un approccio sperimentale all'elettronica analogica
con una introduzione ai circuiti integrati digitali
e ai trasduttori di grandezze fisiche

L'autore

Giacomo Torzo è Dirigente di Ricerca nel Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Svolge la sua attività di ricerca sperimentale in Scienza dei materiali come associato dell'Istituto Nazionale per la Fisica della Materia (INFM). Fa parte del Consiglio Direttivo nella *Associazione per l'Insegnamento della Fisica* (AIF), e nella *Associazione per la Didattica con le Tecnologie* (ADT), della redazione della rivista *La fisica nella scuola* e della rivista *Ipotesi*. Docente di Laboratorio di Fisica presso l'Università di Padova per il Corso di Laurea in Scienze dei Materiali.

L'opera

Usare gli amplificatori operazionali è molto più facile che usare i transistor. Partendo da questo assunto, l'autore propone un percorso di apprendimento dell'elettronica fondato sostanzialmente sugli amplificatori operazionali nel quale il lettore viene guidato, attraverso lo studio dettagliato di esempi semplici ma di uso generale, ad impadronirsi di un potente metodo di analisi, che consente una rapida comprensione di circuiti anche molto complessi. Questo libro, accanto all'interpretazione teorica di svariate applicazioni dei circuiti integrati analogici e digitali, offre una guida pratica alla progettazione e alla sperimentazione in laboratorio.

Presentazione

I tradizionali libri di testo di elettronica sono spesso dei volumi grossi e impegnativi, zeppi di dettagli tecnici e appesantiti da una lunga introduzione sul transistor (che alla fine lascia poche tracce nello studente), con trattazione matematica presentata talvolta come corpo a sè con ambizione di completezza ma scarsa attenzione all'utilizzo richiesto dal particolare contesto. Raramente si trova in questi testi una logica sequenza che possa essere fruttuosamente percorsa dall'insegnante nel breve tempo di solito imposto ad un corso di elettronica.

Altre volte gli autori eccedono in verso opposto: si tratta allora di modesti manuali, scritti in fretta, spesso parafrasando o semplicemente copiando le note applicative fornite dai produttori di circuiti integrati.

L'insegnamento dell'elettronica, in particolare nella riformanda Scuola Secondaria Superiore, dovrà giovare invece di libri di testo agili e didatticamente efficaci, ma sempre rigorosi nell'impostazione, che pur limitando i contenuti al piccolo ambito concesso dai programmi ministeriali, possano tuttavia fornire al docente una guida per giungere al momento della sperimentazione in laboratorio con proposte significative e che sappiano suscitare l'interesse degli allievi.

Prefiggendosi tale obiettivo, questo libro è stato organizzato in modo da condurre il lettore (supposto a livello zero in elettronica) fino al livello di conoscenza necessario e sufficiente a progettare e costruire qualche circuito funzionante, non eccessivamente complesso e tuttavia non banale, che possa suggerire anche collegamenti interdisciplinari.

E tutto questo percorrendo la via più breve, quella che è consentita oggi dai circuiti integrati (principalmente gli amplificatori operazionali, per la loro semplicità concettuale).

Citando alcuni brani dalla prefazione dell'autore: "...il primo contatto (con l'elettronica) risulta spesso piuttosto traumatico. Esistono infatti numerosi libri di testo che offrono modelli sofisticati e potenti per l'analisi di dispositivi e circuiti, ma che richiedono al lettore uno sforzo notevole prima che egli si possa impadronire degli elementi indispensabili a produrre un risultato apprezzabile. In altre parole, il rapporto costi/benefici diventa favorevole solo quando si sia investito nello studio molto tempo e fatica...L'impostazione qui scelta è di proporre esempi di costruzione di circuiti, dapprima elementari, e via via più complessi, che dovrebbero guidare il momento essenziale della sperimentazione in laboratorio. "

L'autore ha evitato al lettore il traumatico impatto con la tradizionale difficile e lunga introduzione su diodo e transistor: "...se è vero che ogni dispositivo integrato contiene transistori, non è altrettanto vero che sia necessario conoscerne il funzionamento per capire come funziona il dispositivo in oggetto...e quasi sempre è molto più facile imparare ad usare l'integrato piuttosto che il transistor..." e ha quindi rovesciato l'impostazione tradizionale, "...partendo direttamente dalla analisi dei dispositivi, e fornendo solo in appendice una trattazione molto semplificata del transistor".

Pur essendo un testo orientato all'insegnamento nei primi livelli universitari e negli Istituti Tecnici Industriali, esso si presta ad essere utilizzato in un ambito molto più vasto (anche al di fuori del circuito scolastico) in quanto può essere letto con profitto, senza sostanziali prerequisiti, da chiunque decida di avvicinarsi al complesso mondo dell'elettronica. "... Si è cercato di ridurre al massimo la preparazione di base necessaria, così da farne un testo adattabile a diverse esigenze. Lo scopo è insomma di mettere in grado chiunque di capire, senza troppe difficoltà, la maggior parte dei circuiti costituiti da operazionali e da porte logiche, ed anche di cimentarsi nella vera e propria progettazione."

A CHI SI INDIRIZZA

Principalmente alle quinte classi dei corsi ad indirizzo informatico ed elettronico degli Istituti Tecnici Industriali e Professionali.

IDEA FORZA

Le moderne industrie di elettronica utilizzano sempre più frequentemente circuiti integrati, dispositivi capaci di svolgere funzioni assai complesse, e che tuttavia possono essere studiati a partire da blocchi funzionali elementari, quali sono gli Amplificatori Operazionali. Un corso fondato sullo studio degli Operazionali è quindi oggi il più adatto a fornire una preparazione elettronica di base. I programmi scolastici basati sostanzialmente sullo studio dei componenti attivi discreti sono ormai obsoleti: il salto di qualità compiuto negli anni settanta passando dallo studio delle valvole termoioniche a quello dei transistor, va ripetuto oggi passando dai transistor agli operazionali. I benefici conseguenti possono essere molteplici: da un lato si mantiene il contatto con un mondo in rapidissima evoluzione, dall'altro si guadagna in semplicità nell'analisi dei circuiti e nelle esperienze di laboratorio.

STRUTTURA DELL'OPERA

Il volume è strutturato sostanzialmente come guida alla analisi di circuiti reali, ed alla loro sperimentazione in laboratorio. Ad una introduzione, in cui viene discusso l'Operazionale come blocco funzionale, seguono singoli capitoli dedicati a circuiti raggruppati per funzione. Si studiano vari tipi di amplificatori, derivatori, integratori, filtri attivi, generatori di tensione e di corrente, circuiti non-lineari, comparatori, impulsatori e oscillatori. Un capitolo è dedicato ad una applicazione specifica, il lock-in, per dare un esempio di come si possa con facilità costruire con pochi integrati uno strumento che di solito è invece considerato un dispositivo piuttosto sofisticato. La comprensione dell'uso degli operazionali fuori zona lineare costituisce una buona base di partenza per lo studio della moderna elettronica digitale. A questa è dedicato un capitolo in cui sono raccolti i pochi elementi necessari e sufficienti alla comprensione della maggior parte dei circuiti digitali, ed un altro è dedicato ai trasduttori e alle varie tecniche di interfacciamento dei più importati tipi di sensori. Una breve discussione è dedicata agli amplificatori con doppia reazione, argomento, che pur essendo molto importante, non è mai trattato nei testi introduttivi, se non in modo astratto ed estremamente semplificato, per la difficoltà di proporre un quadro sistematico senza usare matematica troppo complessa.

Una guida alla sperimentazione è fornita nell'ultimo capitolo, ove sono suggeriti caso per caso valori appropriati per i componenti ed alcune metodologie di misura. La scelta di raccogliere gli esercizi in un capitolo a parte consente di mantenere nel testo una trattazione molto generale dei circuiti, senza distrarre il lettore con particolari inessenziali.

Una prima appendice tratta sinteticamente diodo, transistor BJT, FET, MOSFET, SCR, TRIAC, fornendo uno schema pratico per la comprensione anche dei circuiti che adottano componenti discreti. Gli elementi di calcolo necessari, frequentemente utilizzati nel testo, sono raccolti in una seconda appendice per renderne più facile la consultazione senza appesantire la lettura. Nelle ultime due appendici, da utilizzare essenzialmente al momento della scelta dei componenti passivi ed attivi, sono raccolti dati ed informazioni importanti che di solito si trovano sparsi qua e là in molti testi, e che per questo sono spesso difficili da reperire.

Indice

Prefazione	IX
Come usare questo libro	1
1. Cenni introduttivi	
1.1. Segnali di tensione e corrente	3
1.2. Resistenze, condensatori, induttanze, generatori	3
1.3. Linearità, sovrapposizione, principi di Kirchhoff	5
2. L'amplificatore operazionale	
2.1. Considerazioni generali e definizioni	7
3. L'operazionale come elemento di circuito	
3.1. Amplificatore invertente	12
3.2. Amplificatore non invertente	13
3.3. Inseguitore	14
3.4. L'amplificatore differenziale	14
3.5. Sommatore invertente	15
3.6. Sommatore non invertente	15
3.7. Effetto delle correnti di polarizzazione e dello sbilanciamento	16
3.8. Retroazione. Effetto dell'amplificazione finita	17
3.9. Impedenze di ingresso e di uscita per gli operazionali reali ad anello chiuso	17
4. Alcuni esempi di amplificatori	
4.1. Differenziale con guadagno variabile	21
4.2. Differenziale con regolazione lineare di guadagno	21
4.3. Differenziale con guadagno variabile ed elevata Z_{in}	23
4.4. Differenziale con tre operazionali	24
4.5. Amplificatore a guadagno variabile linearmente da $-K$ a $+K$	24
5. Filtri attivi	
5.1. Integratore	27
5.2. Derivatore	28
5.3. I filtri a reazione multipla	29
5.4. I filtri VCVS	34
5.5. I filtri a variabile di stato	37
5.6. Un semplice filtro arresta-banda	39

5.7.	Il convertitore di impedenza	39
5.8.	Giratore	41
5.9.	Moltiplicatore di capacità	42
5.10.	I filtri attivi integrati	43
6. Generatori di tensione di riferimento		
6.1.	Regolatori con zener nel ramo di retroazione	46
6.2.	Regolatore di tensione duale	47
7. Convertitori tensione corrente		
7.1.	Carico fluttuante	48
7.2.	Carico e comando riferiti a massa con alimentazione fluttuante	48
7.3.	Carico verso massa con comando fluttuante	49
7.4.	Carico, segnale di comando e alimentazione riferiti a massa	50
7.5.	Carico, segnale e alimentazione riferiti a massa, con due AO	50
7.6.	Generatore di corrente con comando potenziometrico	51
8. Circuiti non lineari		
8.1.	Raddrizzatore ideale a mezz'onda	53
8.2.	Raddrizzatore ideale a onda intera	54
8.3.	Rivelatore di tensione di picco	57
8.4.	Amplificatore logaritmico ed esponenziale	58
9. Circuiti a scatto		
9.1.	Il comparatore	62
9.2.	Comparatore con isteresi	63
9.3.	Il multivibratore astabile bipolare	64
9.4.	Multivibratore astabile unipolare	66
10. Auto-oscillazione		
10.1.	Considerazioni generali	67
10.2.	Oscillatore sinusoidale a ponte di Wien	68
10.3.	Sfasatore	69
10.4.	Oscillatore con doppio sfasatore	70
10.5.	Sfasatore a $\pi/2$	71
10.6.	Oscillatore a doppio integratore	71
10.7.	Oscillatore a sfasamento	72
10.8.	Generatore di onda quadra e triangolare	72

10.9.	Un secondo generatore di onda quadra e triangolare	74
10.10.	Generatore di onde quadre e triangolari in quadratura	74
10.11.	Convertitore tensione/frequenza	75
10.11.	Convertitore frequenza/tensione	76
11. Rivelatori a sensibilità di fase o lock-in		
11.1.	Principio di funzionamento	79
11.2.	Agganciamento ad onda quadra	80
12. Cenni di elettronica digitale		
12.1.	Circuiti logici	85
12.2.	Circuiti bistabili	90
12.3.	Flip-flop sincronizzati	91
12.4.	Circuiti monostabili	94
12.5.	Circuiti astabili	96
12.6.	Monostabile con linea di ritardo	98
12.7.	Generatori di ritardo	98
13. Alcuni circuiti integrati particolari		
13.1.	Il timer	100
13.2.	I generatori di tensione di riferimento integrati	106
13.3.	Gli interruttori analogici	108
14. Trasduttori e tecniche di interfacciamento		
14.1.	Sensori di temperatura	110
14.2.	Sensori di forza	117
14.3.	Sensori di luce	120
15. Alcune considerazioni sull'operazionale con doppia reazione		125
16. Guida agli esperimenti		
16.1.	Qualche suggerimento preliminare	128
16.2.	Esercizi e prove pratiche	131
Appendice A		
A.1.	Il diodo	146
A.2.	Il diodo Zener	149
A.3.	Il transistor : alcune definizioni	150
A.4.	Configurazione ad emettitore comune	154
A.5.	Configurazione a collettore comune	155

A.6.	Transistor a effetto di campo	156
A.7.	SCR e TRIAC	158
Appendice B		
B.1.	Numeri complessi	160
B.2.	Tensioni e correnti sinusoidali in rappresentazione complessa	161
B.3.	Impedenza complessa	162
B.4.	Funzione di trasferimento	161
B.5.	Diagramma di Bode	162
B.6.	Trasformata di Laplace	163
Appendice C		
C.1.	Resistenze	168
C.2.	Potenzimetri e reostati	169
C.3.	Condensatori	169
C.4.	Induttanze	172
C.5.	Diodi	172
C.6.	Contattiera per circuiti integrati	173
Appendice D		
D.1.	Elenco dei principali produttori di operazionali	175
D.2.	Piedinature e caratteristiche di alcuni Amplificatori Operazionali	176
D.3.	Comparatori	182
D.4.	Elenco delle principali porte logiche TTL e CMOS	182
Bibliografia		183
Indice analitico		187

© 1991 Decibel editrice, Padova

Decibel editrice di Giorgio Vilella
via del Santo 30, 35123 Padova
telefono (049) 8756956

Distribuzione esclusiva

Zanichelli editore, via Irnerio 34, 40126 Bologna
telefono (051) 293111, telex 521587 Zaned I,
fax (051) 249782, 293224

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i paesi. L'Editore potrà concedere l'autorizzazione a pagamento a riprodurre una porzione non superiore ad un decimo del presente volume.

Richieste in tal senso vanno indirizzate a Zanichelli editore, Ufficio Tutela Proprietà Letteraria, via Irnerio 34, 40126 Bologna
fax (051) 249782

Prima edizione

novembre 1991