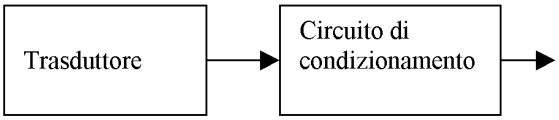
Circuiti di condizionamento sensori per l'acquisizione di grandezze analogiche

Sommario argomenti trattati

Circuiti di condizionamento sensori per l'acquisizione di grandezze analogiche 1
Introduzione: i trasduttori. 1
Sensori con uscita in tensione 2
Schematizzazione: 2
Condizionamento 2
Amplificazione 2
Offset 2
Problemi: 2
Sensori con uscita in corrente 2
Schematizzazione: 2
Condizionamento 2
Amplificazione 2
Offset 2
Problemi: 2
Sensori resistivi (lineari) 2
Schematizzazione: 2
Condizionamento 2
Amplificazione 3
Offset: 3
Problemi: 3
Appendice: l'amplificatore differenziale a due op-amp 3
Analisi circuito 3
Criteri di progetto 4
Regolazione del guadagno 4
Alimentazione singola 5
Generatori di tensione di riferimento o Voltage reference 5
Valori di resistenza di una PT100 6

Introduzione: i trasduttori.

Con il termine **trasduttore o sensore**[1] si intende un dispositivo che trasforma un segnale espresso in una grandezza fisica (temperatura, velocità, posizione…) in un segnale espresso in un'altra grandezza fisica (per esempio di tipo elettrico).
In questi appunti ci occuperemo di sensori che trasformano una generica grandezze fisica in un segnale elettrico.
I sensori sono una parte molto importante dei sistemi automatici in generale e dei sistemi computerizzati in particolare, infatti grazie ai sensori il sistema automatico può ricevere informazioni sull'ambiente che lo circonda ed intervenire su questo.
Normalmente a valle del trasduttore si deve inserire un **circuito di condizionamento**, il cui scopo è quello di agire sul segnale elettrico fornito dal trasduttore in modo da conferirgli caratteristiche adeguate alle esigenze dei circuiti successivi (ADC, …).



In queste note non tratteremo la struttura interna ed il principio di funzionamento dei trasduttori, ma ci occuperemo di come rappresentare il comportamento del sensore dal punto di vista elettrico e di come progettare i circuiti di condizionamento.

[1] Alcuni fanno distinzione fra trasduttore e sensore, ma si tratta delle solite fantasie malate di sprovveduti che non hanno mai messo in pratica niente.

Sensori con uscita in tensione

Schematizzazione:

Il sensore viene rappresentato con un generatore reale di tensione, se non sono note informazioni per quanto riguarda la Rs il generatore si può supporre ideale.

Condizionamento

Mediante amplificatore di tensione invertente o non invertente.

Amplificazione

Determinare il guadagno dell'amplificatore A= ΔVo/ΔVs (negativo = invertente), per segnali molto piccoli (termocoppie) utilizzare amplificatori per strumentazione.

Offset

Eliminare prima di amplificare, soprattutto se l'offset ha valori elevati e se l'amplificazione richiesta è notevole (es. Vos dell'ordine del Volt, A > 10), è possibile una semplice verifica dell'assenza di problemi controllando che Vos * A < Vomax(OP-AMP), con A guadagno da dove si genera l'offset a dove si elimina.
Utilizzare un amplificatore differenziale per amplificare ed eliminare l'offset, applicando il segnale proveniente dal sensore su un ingresso (quello non invertente se è necessario un amplificatore non invertente) e la tensione di offset da eliminare sull'altro.
N.B. se il segnale utile ha uno spettro in frequenza che non si estende fino alla continua (es. suoni, rumori ambientali, etc.), utilizzare un accoppiamento capacitivo che elimina la continua e quindi anche il problema dell'offset.

Problemi:

garantire il massimo trasferimento di tensione Ri >>Rs., se il caso utilizzare in ingresso un inseguitore di tensione o uno stadio non invertente.

Sensori con uscita in corrente

Schematizzazione:

Il sensore viene rappresentato con un generatore reale di corrente, se non sono note informazioni per quanto riguarda la Rs il generatore si può supporre ideale;

Condizionamento

Convertire la corrente in tensione mediante un convertitore I/V di tipo:
a resistenza R per correnti elevate (I s > 10 mA);
con op-amp per piccole correnti (Is < 10 mA);

Amplificazione

Determinare la transresistenza del convertitore Gf:= ΔVo/ΔIs:

Offset

eliminare iniettando una corrente in ingresso nel caso di op-amp;
eliminare dopo la conversione nel caso di R.

Problemi:

garantire il massimo trasferimento di corrente ossia Ri << Rs.

Sensori resistivi (lineari)

Schematizzazione:

Il sensore viene rappresentato con un resistore variabile.

Condizionamento

Se ΔRs/Rs > 1 % alimentare a corrente costante per ottenere una tensione in uscita (si ottengono offset elevati), la corrente, se non vi sono particolari indicazioni, non deve essere molto elevata (mA o anche meno).

Se ΔRs/Rs < 1 % utilizzare un ponte di Wheatstone (si ottengono offset molto piccoli, dell'ordine del mV).

Amplificazione

Determina ΔVs = ΔRs * Iref
Determinare il guadagno dell'amplificatore A= ΔVo/ΔVs (negativo = invertente)

Offset:

Eliminare prima di amplificare, soprattutto se l'offset ha valori elevati e se l'amplificazione richiesta è notevole (es. Vos dell'ordine del Volt, A > 10), è possibile una semplice verifica dell'assenza di problemi controllando che Vos * A < Vomax(OP-AMP), con A guadagno da dove si genera l'offset a dove si elimina.
Utilizzare un amplificatore differenziale o, se possibile, un amplificatore per strumentazione.
Per il ponte di Wheatstone utilizzare l'amplificatore di strumentazione o un differenziale.

Problemi:

garantire il massimo trasferimento di tensione Ri >>Rs., se il caso utilizzare in ingresso un inseguitore di tensione o uno stadio non invertente.

Appendice: l'amplificatore differenziale a due op-amp

Analisi circuito

In figura è rappresentato un amplificatore differenziale a due op-amp, che garantisce elevata impedenza d'ingresso e possibilità di regolare il guadagno tramite la resistenza R.

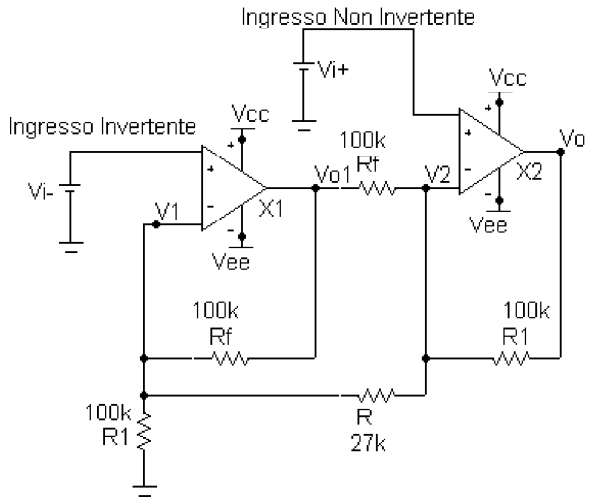


Fig. 1 Amplificatore differenziale a due op-amp

Ricaviamo l'espressione del guadagno sopra riportata nell'ipotesi di op-amp ideali e quindi validità del principio del corto circuito virtuale.
Applicando il principio del cortocircuito virtuale all'op-amp X1 si ha:

Eq. 1 $V_{i-} = V_1$

determiniamo la V_1 applicando il teorema di Millman:

Eq. 2 $$V_1 = \frac{\frac{V_{o1}}{R_f} + \frac{V_2}{R}}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}}$$

Applicando il principio del cortocircuito virtuale all'op-amp X2 si ha:

Eq. 3 $V_{i+} = V_2$

determiniamo la V_2 applicando il teorema di Millman:

Eq. 4 $$V_2 = \frac{\frac{V_o}{R_1} + \frac{V_{o1}}{R_f} + \frac{V_1}{R}}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}}$$ sostituendo a V_1 e V_2 quanto riportato nelle **Eq. 1** e **Eq. 3** si ha:

Eq. 5 $$V_{i+} = \frac{\frac{V_o}{R_1} + \frac{V_{o1}}{R_f} + \frac{V_{i-}}{R}}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}}$$ quest'ultima relazione lega solo le tensioni d'ingresso e di uscita, a patto di esplicitare dall'**Eq. 2** quanto vale V_{o1}:

$$V_1\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)=\frac{V_{o1}}{R_f}+\frac{V_2}{R} \Rightarrow \frac{V_{o1}}{R_f}=V_1\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-\frac{V_2}{R} \Rightarrow \frac{V_{o1}}{R_f}=V_{i-}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-\frac{V_{i+}}{R}$$

$$V_{i+}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)=\frac{V_o}{R_1}+V_{i-}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-\frac{V_{i+}}{R}+\frac{V_{i-}}{R}$$ portiamo i termini con le tensioni d'ingresso al primo membro e quelli con la V_o al secondo e si ha:

$$V_{i+}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-V_{i-}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)+\frac{V_{i+}}{R}-\frac{V_{i-}}{R}=\frac{V_o}{R_1}$$ raccolgo insieme tutti i termini con V_{i+} e V_{i-}

$$V_{i+}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}\right)-V_{i-}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}\right)=\frac{V_o}{R_1}$$ sommo i termini 1/R

$$V_{i+}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{2}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-V_{i-}\left(\frac{1}{R_f}+\frac{2}{R}+\frac{1}{R_1}\right)=\frac{V_o}{R_1}$$ raccolgo (V_{i+} - V_{i-})

$$\left(V_{i+}-V_{i-}\right)\left(\frac{1}{R_f}+\frac{2}{R}+\frac{1}{R_1}\right)=\frac{V_o}{R_1}$$ ricavo infine la V_o

$$V_o=\left(V_{i+}-V_{i-}\right)R_1\left(\frac{1}{R_f}+\frac{2}{R}+\frac{1}{R_1}\right)\Rightarrow V_o=\left(V_{i+}-V_{i-}\right)\left(\frac{R_1}{R_f}+\frac{2R_1}{R}+\frac{R_1}{R_1}\right)\Rightarrow$$

Eq. 6 $V_o=\left(V_{i+}-V_{i-}\right)\left(\frac{R_1}{R_f}+\frac{2R_1}{R}+1\right)$ si ottiene così la relazione desiderata, dove il guadagno differenziale è:

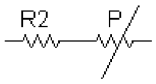
Eq. 7 $A_v=\left(\frac{R_1}{R_f}+\frac{2R_1}{R}+1\right)$

Criteri di progetto

Si sceglie R_1=R_f pari ad un valore facilmente reperibile e tanto più elevato quanto più elevato è il guadagno desiderato A_{vf} (per esempio 100kΩ o più), si determina R secondo la seguente relazione:

Eq. 8 $R=\frac{2R_1}{\left(Av-\frac{R_1}{R_f}-1\right)}$

Regolazione del guadagno



Nel caso si voglia una regolazione del guadagno R deve essere sostituita da una coppia resistenza-trimmer (vedi figura), in tal caso non conviene stabilire i valori di R_1e R_f ma scegliere il valore del trimmer P (per esempio 10-20kΩ) e determinare R_1 e R_2 sfruttando le seguenti relazioni:

Eq. 9 $R_2=\frac{P}{\frac{\left(A_{v\max}-\frac{R_1}{R_f}-1\right)}{\left(A_{v\min}-\frac{R_1}{R_f}-1\right)}-1}$

Eq. 10 $R_1 = \frac{1}{2}(R_2 + P)\left(A_{v\min} - \frac{R_1}{R_f} - 1\right)$

Esempio: A_{vmin}=10; A_{vmax}=15; fisso P=10kΩ si ricava R_2=16kΩ e R_1=R_f=64kΩ

Alimentazione singola

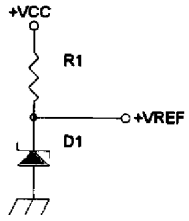
Se si vuole utilizzare un'alimentazione singola è necessario verificare che la tensione di uscita di entrambi gli op-amp non risulti negativa per ogni valore delle tensioni d'ingresso, ossia:

$$\begin{cases} V_{cc} > V_o = (V_{i+} - V_{i-})\left(\frac{R_1}{R_f} + \frac{2R_1}{R} + 1\right) > 0 \\ V_{cc} > V_{o1} = V_{i-}\left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R}\right) - V_{i+}\frac{R_f}{R} > 0 \end{cases}$$

qualunque siano V_{i+} e V_{i-}, in pratica basta effettuare la verifica per i valore estremi delle due tensioni d'ingresso.

È fortemente consigliato utilizzare una coppia di op-amp rail to rail, che garantiscono la massima escursione della tensione di uscita.

Generatori di tensione di riferimento o Voltage reference



Generatore di Vref > 0

Si tratta di circuiti integrati che forniscono in uscita una tensione continua, molto stabile sia nel tempo che nei confronti della temperatura. Il valore della tensione erogata può essere noto anche con grande precisione e può essere spesso registrata aggiungendo un opportuno circuito.

Agli effetti dell'utilizzo pratico si possono trattare come se fossero dei normali diodi zener, da polarizzare con una certa corrente Iz.

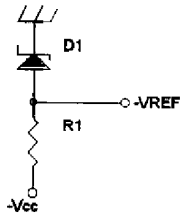
Valori tipici della Iz per gran parte di questi integrati vanno da 1 a 10 mA.

Nel dimensionamento del circuito si procede come segue:

1. scelta della Vcc > V_{REF} (almeno 3-5 V)
2. calcolo della R_1 di limitazione con la relazione:

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_{REF}}{I_z + I_{REF}}$$

con I_{REF} corrente assorbita dal carico del generatore di tensione di riferimento.



Generatore di Vref < 0

Riportiamo ora una selezione dei principali voltage reference utilizzati in pratica.

Vref	IC	Costo (1997)
1.22	ICL8069	5.430
2.5	LM336-2.5	1.660
5.0	LM336-5.0	1.680
5.0	REF02	8.870
6.90	LM329	2.180
10.0	REF01	7.590
10.0	LH0070-H	22.100
10.0	LM169H	66.700
10.24	LH0071-H	36.100

Valori di resistenza di una PT100

Nella tabella che segue sono riportati i valori, alla varie temperature, della resistenza del sensore di temperatura resistivo PT100, nell'intervallo -200 °C, + 850 °C, a passi di 10 °C. Si noti che nell'ultima colonna è riportato il valore del coefficiente di temperatura per l'intervallo di temperature individuato dalla riga in questione.
Esempio: a -50°C la R vale 80.31 Ω ed il coefficiente di temperatura 0.40 Ω/°C.

-200	18,49											
-100	60,25	56,19	52,11	48,00	43,87	39,71	35,53	31,32	27,08	22,80	18,49	0,42
0	100,00	96,09	92,16	88,22	84,27	80,31	76,33	72,33	68,33	64,30	60,25	0,40
°C	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**	**Ω/°C**
0	100,00	103,90	107,79	111,67	115,54	119,40	123,24	127,07	130,89	134,70	138,50	0,385
100	138,50	142,29	146,06	149,82	153,58	157,31	161,04	164,76	168,46	172,16	175,84	0,373
200	175,84	179,51	183,17	186,82	190,45	194,07	197,69	201,29	204,88	208,45	212,02	0,361
300	212,02	215,57	219,12	222,65	226,17	229,67	233,17	236,65	240,13	243,59	247,04	0,350
400	247,04	250,48	253,90	257,32	260,72	264,11	267,49	270,86	274,22	277,56	280,90	0,338
500	280,90	284,22	287,53	290,83	294,11	297,39	300,65	303,91	307,15	310,38	313,59	0,327
600	313,59	316,80	319,99	323,18	326,35	329,51	332,661	335,79	338,92	342,03	345,13	0,315
700	345,13	348,22	351,30	354,37	357,42	360,47	363,501	366,523	369,53	372,52	375,51	0,304
800	375,51	378,48	381,45	384,40	387,34	390,26	-					0,295

Tab. 1 - Valori resistivi standard del sensore di temperatura resistivo PT100