

LES CAPTEURS

1. Généralités

Un capteur est un dispositif capable de traduire une grandeur physique difficilement mesurable en une grandeur qui peut être mesurée facilement, cette deuxième grandeur doit être une image fidèle de la première. De plus en plus le capteur produit une grandeur électrique analogique ou numérique.



2. Principes de traduction

Le capteur effectue sa traduction soit en utilisant directement la grandeur physique soit en mettant à profit ses effets.

Exemples :

Un courant électrique produit un champ magnétique lorsqu'il traverse une bobine ou une élévation de température lorsqu'il traverse une résistance. Certains ampèremètres utilisent le premier effet et d'autres le second.

La mesure d'une force peut se faire par l'intermédiaire de la déformation qu'elle produit sur une pièce métallique de forme adaptée. La déformation est traduite en une tension par des jauges de déformation et un dispositif électronique.

3. Les caractéristiques essentielles d'un bon capteur

Le capteur doit fournir une tension qui est une image la plus proche possible de la grandeur mesurée. La qualité d'un capteur est évaluée par trois critères :

- la justesse
- la fidélité
- la sensibilité

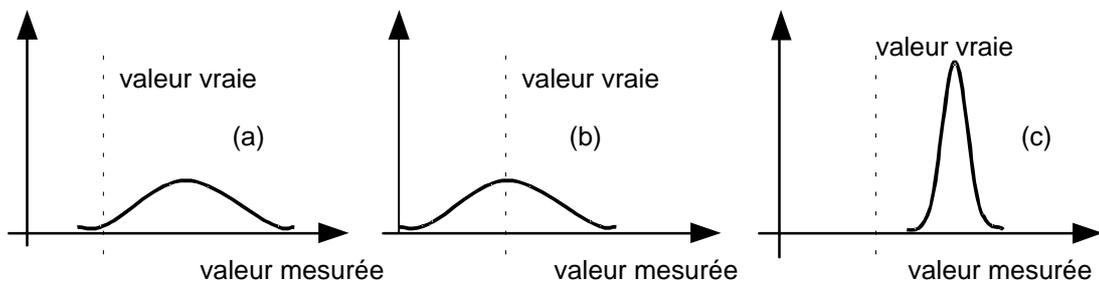
3.1. La précision

La précision qualifie l'aptitude de l'appareillage de mesure à donner des résultats qui, individuellement, sont proches de la valeur vraie : un appareil précis est donc à la fois fidèle et juste.

Un appareil fidèle est peu sensible aux perturbations extérieures accidentelles. Lorsqu'il mesure une même valeur, il fournit des résultats très proches.

La justesse est la qualité d'un appareil de mesure qui influe peu sur le circuit dont il fait partie.

Les graphiques suivants permettent de se rendre compte de l'influence des deux paramètres sur la qualité des mesures.



la figure (b) montre un appareil qui donne un grand nombre de valeurs réparties également autour de la valeur vraie, l'appareil est juste.

Toutes les valeurs fournies par l'appareil (c) sont proches les unes des autres, l'appareil est fidèle.

Questions :

Comment peut-on qualifier l'appareil (a) ?

Donnez la représentation d'un appareil précis.

3.2. La sensibilité d'un capteur

Soit une variation, Δm , de la grandeur à mesurer. Le signal issu du capteur sera Δs avec $\Delta s = S \cdot \Delta m$. S est la sensibilité du capteur.

La sensibilité d'un capteur doit rester constante, c'est un des problèmes importants dans la conception et l'utilisation d'un capteur.

La sensibilité doit dépendre aussi peu que possible

- de la valeur de m (linéarité)
- de sa fréquence (bande passante)
- du temps (vieillesse)
- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure.

3.3. La relation entrée sortie du capteur

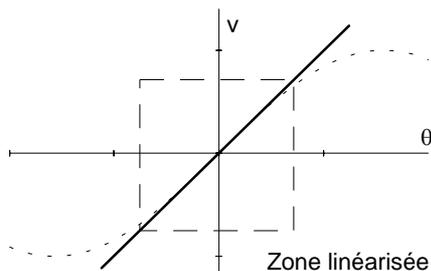
La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc... est désignée par le terme **mesurande** et représentée par m .

Lorsque le capteur est soumis à l'action du mesurande il donne une image électrique désignée par s .

Pour des raisons de facilité d'exploitation, on souhaite que la relation liant s à m soit **linéaire**.

Les capteurs présentent rarement une relation naturellement linéaire.

Cependant, celle-ci peut être linéarisée dans la zone de fonctionnement.



Exemple : une sonde à effet Hall possède la relation entrée-sortie suivante :

$$v = K.I.B.\sin \theta$$

Autour de 0 on peut considérer la relation comme linéaire.

3.4. La résolution

La résolution est la plus petite variation du mesurande capable de produire deux valeurs de sortie différentes. C'est un paramètre important.

4. La transmission des grandeurs électriques issues des capteurs

4.1. Transmission par tension

Le capteur transmet directement, sur deux fils, la tension qu'il produit. Il faut donc une paire de fils pour chaque capteur. La transmission par tension est sensible aux parasites surtout lorsque la distance entre le capteur et le centre de traitement est grande, dans une usine par exemple.

4.2. Transmission par courant

On réduit la sensibilité aux parasites en transmettant l'information sous forme d'un courant. Il existe deux types de transmissions par courant, la transmission 0 - 10 mA et 4 - 20 mA.

Le standard 4 - 20 mA était très utilisé en raison de ses avantages. À la valeur 0 de la grandeur à mesurer, on fait correspondre un courant de 4 mA alors que 20 mA correspond à la pleine échelle. Le fait que le courant ne soit jamais nul permet de s'assurer que la ligne de transmission est en état de fonctionnement.

4.3. Transmission numérique

Les capteurs décrits précédemment nécessitent l'installation d'une paire de fils par capteur, ce qui peut conduire à une consommation importante de matière première chère (cuivre) et des frais d'installation conséquents¹. On évite ces inconvénients en transmettant les informations de tous les capteurs sur une seule ligne trifilaire. Il faut que les capteurs soient capables transformer les tensions en des informations numériques. Ceci est possible grâce à l'informatique.

La ligne trifilaire forme un bus série², les informations doivent être conformées pour accéder à ce bus. On connaît le bus I²C dans le domaine de la domotique et le bus CAN dans les domaines de l'automobile ou de l'industrie.

5. Les capteurs de température

5.1. La sonde est une résistance métallique

Dans une plage de température qui s'étend d'environ -200°C jusqu'au voisinage de 650°C, la résistance d'un fil de platine très pur permet de définir sa température à moins de 0,1°C près, à partir de la formule de CALENDAR-VANDASEN

$$\frac{R_T}{R_0} = 1 + A.T + BT^2 + C(T - 100)T^3$$

T est la température exprimée en °C

Un constructeur indique, pour une température supérieure à 0°C, les valeurs suivantes des coefficients A, B, C

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \quad B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \quad C = 0$$

La mesure de la température se réduit à la mesure d'une résistance.

5.2. La sonde est un semi-conducteur

La propriété primordiale de ce type de résistance est une sensibilité thermique supérieure, de l'ordre de 10 fois, à celle des résistances métalliques ; en outre leur coefficient de température est négatif (CTN) et dépend fortement de T. Ce qui fait que la caractéristique résistance en fonction de température n'est pas linéaire.

$$R_T = R_0 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

B est donné par le constructeur T en K

Là, encore, la mesure de température se résume à une mesure de résistance.

¹ Au sens propre : qui découle logiquement de, c'est à dire, ici, que cela coûte cher.

² Voir les feuilles spécialisées sur les bus série.

La plage de température va de -200 à 800°C

Il existe également des sondes à semi-conducteur dont le coefficient de température est positif (CTP)

5.3. Thermocouple

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2 . Le thermocouple délivre une f.e.m. E qui dépend d'une part de la nature des conducteurs A et B et d'autre part des températures T_1 et T_2 . En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ; celle de l'autre est portée à la température à mesurer.

La mesure de température se réduit à une mesure de tension. L'ordre de grandeur des tensions est le millivolt. Le principe conduit à la réalisation de plusieurs types de sondes selon la nature des métaux en présence. On trouve les types R, S, B, J, T, E, K

Les plages de température vont de -200 à 1800°C

Il faut faire attention aux connexions entre le thermocouple et l'appareil de mesure, les conducteurs de liaison font partie de la chaîne des thermocouples.

5.4. Thermométrie par diode ou transistor

Les constructeurs proposent des capteurs de température qui ressemblent à des transistors, ils utilisent une propriété importante des diodes et des transistors : la tension à leurs bornes, lorsqu'ils sont traversés par un courant constant, dépend de la température. D'ordinaire ce phénomène est gênant, ici on en tire parti.

Le capteur de température intégré est très facile à mettre en œuvre, il s'agit de mesurer une tension image de la température.

La température maximale que peuvent mesurer ces sondes est d'environ 100°C .

6. Mesure des positions et des déplacements

6.1. Capteurs résistifs

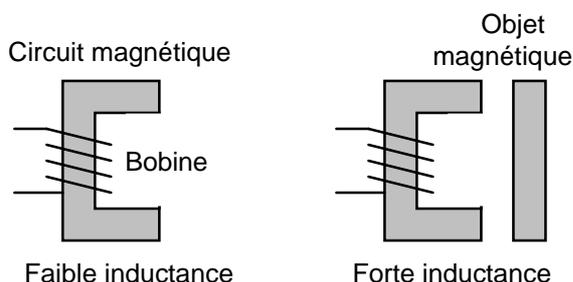
Le capteur est assimilable à un potentiomètre qui peut être rectiligne ou rotatif selon les besoins, il fournit une tension, image de la position. Il existe des potentiomètres rotatifs sans butée ce qui permet de connaître la position, modulo 2π , d'un mobile en rotation.

Attention la relation n'est vraie que si le capteur ne débite aucun courant. C'est un principe général applicable à tous les capteurs qui fournissent une tension. Rappelez-vous le modèle de Thévenin.

6.2. Capteurs inductifs

Ils sont principalement utilisés comme détecteurs de présence c'est à dire qu'ils fonctionnent en tout ou rien. Ils sont limités à la détection des objets ferromagnétiques.

Ils utilisent les propriétés des bobines et des circuits magnétiques.



Le capteur est constitué d'un circuit magnétique portant une bobine. Lorsque le capteur est seul, la bobine présente une faible inductance, alors qu'en présence d'un objet ferromagnétique, l'inductance augmente.

La variation de courant ou de tension ainsi engendrée permet de détecter la présence d'une pièce. L'alimentation à fréquence élevée augmente la sensibilité du capteur.

La variation d'inductance permet la réalisation de capteurs de déplacement, on peut connaître la distance entre l'objet et le capteur.

Autre forme fondée sur le même principe, le capteur à noyau plongeur. La bobine est tubulaire et renferme un noyau cylindrique ferromagnétique lié à la pièce en mouvement.

La position des mobiles sur une machine outil à commande numérique peut être donnée par des capteurs dérivés des capteurs inductifs, ce sont les règles INDUCTOSYN.

6.3. Capteurs capacitifs

La capacité d'un condensateur plan est donnée par la célèbre formule :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} \text{ où } \epsilon_0 \text{ et } \epsilon_r \text{ sont les permittivités absolues et relatives des milieux isolants.}$$

S est l'aire de la surface des électrodes qui se font face, d étant la distance qui les sépare.

La réalisation d'un capteur capacitif peut être simple, la difficulté étant alors de disposer d'un appareillage de mesure suffisamment sensible.

Pour exploiter la différence de capacité on peut imaginer un diviseur potentiométrique constitué du capteur capacitif et d'un résistor le tout étant alimenté par une tension sinusoïdale.

6.4. Capteurs optiques

On parle de capteur optique car il met en œuvre une diode électroluminescente et un phototransistor qui se font face. Lorsque le faisceau issu de la diode éclaire le transistor, celui-ci fournit un certain niveau logique. Lorsque le faisceau est interrompu, le niveau change. Chaque interruption du faisceau produit donc une impulsion.

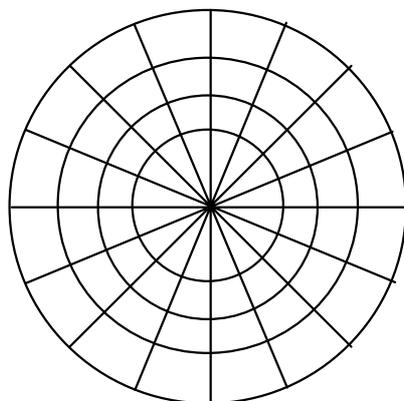
Fixons un disque portant N encoches sur un arbre tournant. Plaçons ce disque dans le faisceau décrit ci-dessus. Chaque impulsion nous indique la rotation de 1/N de tour de l'arbre.

On peut connaître, de cette manière la position angulaire de l'arbre ou la fréquence de rotation.

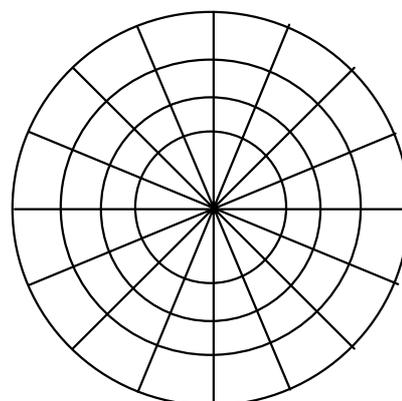
Nous venons de réaliser un **codeur incrémental** c'est à dire que la position angulaire n'est pas connue directement. On ne connaît que la différence entre la position initiale et la position actuelle. À chaque mise sous tension, il faut procéder à la mise en position initiale et à sa mémorisation pour connaître la position réelle.

Le codeur incrémental est de réalisation simple. L'information position est formée dans le calculateur qui est en aval du capteur.

Pour pallier cet inconvénient, il faut que l'information soit formée dans le capteur lui-même. Nous devons réaliser un **codeur absolu**. Pour réaliser ce type de capteur il faut modifier le disque de la manière suivante :



Code binaire pur



Code Gray

7. Les jauges de déformation dites jauges de contrainte

7.1. Présentation

Une contrainte est une densité de force située au cœur d'un matériau soumis à des efforts. La contrainte n'est donc pas mesurable directement. Par contre, on peut mesurer les déformations de la pièce, produites par les efforts. Par calcul on remonte jusqu'à la contrainte en en endroit précis.

Il est important de connaître la répartition des contraintes le long d'une pièce soumise à un effort. En effet, en fonction de la forme de la pièce, certaines contraintes sont si fortes qu'elles amènent à la rupture.

Le problème à résoudre consiste donc mesurer des déformations de très faible amplitude en des endroits relativement précis. Les principales déformations à mesurer sont les élongations, les compressions, les torsions.

La mesure de la torsion peut se ramener à une mesure d'élongation.

La jauge de contrainte primitive était constituée par un fil résistant dont on connaît le matériau, la longueur et la section. La jauge actuelle est de type à semi-conducteur ce qui facilite sa fabrication et son utilisation. Elle est collée sur la pièce à étudier afin que ses déformations reflètent les déformations de la pièce.

7.2. Le principe de fonctionnement

Lorsqu'un fil est soumis à une élongation, sa longueur augmente et sa section diminue, ces deux phénomènes concourent à une augmentation de la résistance du fil. On peut s'en convaincre en se rappelant la célèbre formule :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

l'augmentation relative de la résistance est liée à l'augmentation relative de la longueur par :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Le coefficient **k** est appelé facteur de jauge, c'est une caractéristique de la jauge utilisée.

La mesure de la résistance se fait grâce à un pont de Wheatstone spécialisé appelé pont d'extensométrie.

7.3. La force de l'imagination

Problème : surveiller les déformations d'un pont, ces déformations sont de l'ordre du centimètre.

Solution : une corde de guitare électrique (ou presque)

. Vous savez que l'accord d'une corde vibrante se fait en modifiant sa tension. Le son produit peut être récupéré par un micro et amplifié pour donner de délicieuses harmonies.

Le capteur réel est constitué d'une corde vibrante excitée par un électroaimant, on surveille, par un dispositif électronique particulier, la hauteur du son produit.

8. Les interfaces de sortie classiques

Selon leur principe de fonctionnement, les capteurs peuvent se comporter comme

- des générateurs de tension
- des résistances,
- des générateurs de courant
- des générateurs de niveaux logiques (ce sont les capteurs tout ou rien)

Certains capteurs tout ou rien nécessitent une alimentation, ils sont dits "capteurs trois fils". On peut les imaginer de la manière ci-dessous.

