Surveillance de larges plages de températures à l'aide de thermocouples et de circuits de traitement du signal

par Robin Yang, ingénieur d'application senior, département MSLD

La mesure précise de la température sur une large plage revêt un intérêt croissant pour plusieurs types d'applications, telles que la gestion thermique industrielle et la surveillance des risques environnementaux. Pour obtenir des calculs très précis sur la totalité de la plage de températures, le capteur et le circuit de traitement du signal doivent être méticuleusement adaptés et ajustés. Ce document présente ci-après une analyse des principaux facteurs ayant l'impact le plus significatif sur la précision de la mesure de température, ainsi que les solutions techniques pour garantir qu'un composant de surveillance de la température à base de thermocouple est à la fois précis et présente un bon rapport coût/efficacité.

Comparaison des composants de mesure de la température

Afin de convertir la température en un signal électrique qui peut être quantifié et analysé par un système de surveillance, quatre types de capteurs de températures sont fréquemment utilisés : les thermocouples, les thermistances, les sondes RTD *(Resistive Thermal Detector)* et les circuits intégrés (CI) de capteur de température. Bien qu'aucune de ces solutions ne soit la panacée et ne possède des caractéristiques satisfaisantes sous tous points de vue, que ce soit sur le plan de la plage de mesure, de la précision, de la linéarité ou des coûts, il existe tout de même des scénarios de compromis qui peuvent être trouvés en évaluant les exigences de chaque application spécifique. Le thermocouple est le composant de mesure le plus couramment utilisé, grâce à sa capacité à mesurer une large plage de températures (de -200 °C à +2500 °C) et à sa grande résistance en environnement sévère. En comparaison, les thermistances offrent une bonne résolution sur une plage de températures relativement limitée. Les capteurs à base de CI offrent une meilleure précision et la meilleure linéarité, au détriment de la plage de températures, qui est plus réduite. Par conséquent, cet article s'intéressera surtout aux composants de détection de la température à base de thermocouple.

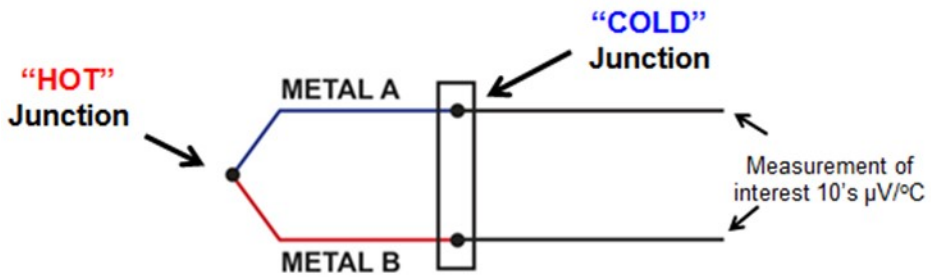


Figure 1 1: Structure typique d'un thermocouple

Comme on peut le voir sur la figure 1, le thermocouple se compose de deux conducteurs métalliques de nature différente connectés entre eux à une extrémité (communément appelée « jonction chaude »), en contact avec l'objet mesuré. À cause de l'effet Seebeck, une force électromotrice (F.e.m., typiquement de l'ordre du µV) est générée entre les deux connecteurs métalliques à la jonction froide, selon le gradient de température entre les deux jonctions. Les

différents types de thermocouples (E, J, K etc.) sont classés en fonction de la combinaison des métaux/alliages utilisés, avec différents coefficients Seebeck, et affichent des propriétés de linéarité et de sensibilité différentes en fonction des variations de température.

Avantages et inconvénients du thermocouple

Les capteurs de température à base de CI et les thermistances sont efficaces pour mesurer des températures inférieures à 150 °C. Les sondes RTD sont principalement utilisées pour mesurer des températures inférieures à 500 °C. Par conséquent, le thermocouple devient la seule solution viable pour mesurer les températures élevées, supérieures à 500 °C. Certains types de thermocouples peuvent supporter des conditions très extrêmes, avec des températures atteignant les 2500 °C. La structure simple de la jonction métallique permet un contact direct avec l'objet mesuré, ce qui se révèle particulièrement idéal pour les environnements sévères. En outre, le thermocouple est un composant passif qui ne requiert aucune excitation de courant ou de tension, ce qui évite de générer de la chaleur qui pourrait interférer avec la détection de la température. Enfin, le thermocouple est également une solution qui s'avère financièrement intéressante pour de nombreuses applications.

Cependant, il existe quelques contraintes techniques qui concernent le thermocouple. En premier lieu, le coefficient Seebeck n'est jamais constant sur la totalité de la plage de températures, quel que soit le type de composant à base de thermocouple utilisé. En conséquence, la tension de sortie d'un thermocouple n'est pas une fonction parfaitement linéaire reflétant la température. C'est pourquoi un algorithme de correction de la précision est nécessaire pour réduire la non linéarité de la conversion entre la température et la f.e.m.

La deuxième contrainte d'un thermocouple réside dans sa sensibilité. Entre les différents types de thermocouple, le coefficient Seebeck varie de 8 µV/°C à 60 µV/°C. En supposant que le gradient de température entre les jonctions chaude et froide est de 500 °C, la f.e.m. devrait être de l'ordre de 4 mV-30 mV. Par conséquent, un amplificateur faible bruit à faible dérive devient la clé pour amplifier le signal f.e.m. vers l'étage de sortie du convertisseur analogique-numérique (convertisseur A/N) sans distorsion significative. Il est tout aussi important d'utiliser un amplificateur différentiel pour éliminer l'impact du bruit de mode commun induit par les longs câbles reliant le thermocouple distant. Un amplificateur inapproprié avec des caractéristiques de bruit gênantes peut facilement modifier la précision d'un thermocouple.

Problèmes techniques et solutions

La température mesurée par un thermocouple est déduite de la f.e.m. qui reflète le gradient de température entre les jonctions chaude et froide du thermocouple. Pour calculer la température à la jonction chaude, il faut partir de la mesure précise de la température de la jonction froide. La compensation de soudure froide (CSF) désigne le calcul de la température de la jonction chaude, qui s'obtient en additionnant la température de la jonction froide avec la différence de température déduite de la f.e.m. C'est pourquoi un capteur de température

ambiante ultra précis doit être intégré dans le circuit de traitement du signal du thermocouple. Concernant l'agencement de la carte, le capteur de température ambiante doit être placé le plus près possible de la jonction froide du thermocouple afin de minimiser les erreurs de gradient de température.

Comme dit précédemment, l'un des défauts apparents du thermocouple réside dans ses propriétés non linéaires. Afin de réduire l'impact de cette non linéarité sur la conversion de la f.e.m. en température, il est conseillé d'intégrer l'algorithme de correction au système de convertisseur A/N. Pour différents types de thermocouples, comme le coefficient Seebeck n'est pas constant sur la plage de températures, on utilise plusieurs méthodes pour corriger la relation non linéaire entre la force f.e.m. et la température.

L'une des solutions possibles consiste à utiliser une table de correspondance dans la mémoire pour trouver la température allant avec à la tension f.e.m. correspondante, et ainsi réduire la température entre les points adjacents par interpolation linéaire. Chaque paire de conversion est obtenue à partir des résultats de tests et mesures empiriques, pour chaque type de thermocouple. La correspondance exacte nécessite que les points adjacents dans la table de correspondance soient les plus proches possibles, ce qui implique un grand nombre de données et donc une mémoire plus grande.

Une autre méthode consiste à compenser la non linéarité de la conversion de la f.e.m. en température en utilisant la méthode de modélisation. Une équation polynomiale de haut niveau peut être établie pour chaque type de thermocouple, en faisant correspondre mathématiquement chaque donnée existante de tension f.e.m. mesurée avec chaque point de température. L'équation polynomiale peut ensuite être utilisée comme fonction de transfert pour déduire la différence de température correspondante à partir de la tension f.e.m. La procédure de correction a ensuite lieu à l'aide d'un microprocesseur ou d'un microcontrôleur. L'exemple ci-dessous utilise les coefficients de correction issus de la base de données de thermocouples ITS-90 de l'Institut national américain des normes et de la technologie (NIST), pour s'assurer de la meilleure précision de conversion pour tous les types de thermocouples.

Dans de nombreuses applications industrielles, plusieurs types différents de thermocouples sont utilisés tour à tour. Par conséquent, le circuit de traitement est censé gérer ces trois types de thermocouple avec la même précision. Faute de quoi, la conception de l'interface de traitement du signal sera d'autant plus complexe.

Pour concevoir un circuit de traitement du signal de thermocouple à la fois précis, flexible et au bon rapport coût/efficacité, il faut une grande expertise et cela peut s'avérer très long. Pour simplifier la conception, réduire l'effort de conception et diminuer les délais de mise sur le marché, les concepteurs peuvent choisir d'utiliser un circuit intégré (CI) de traitement de thermocouple, dont il existe dorénavant de nombreux modèles sur le marché. Prenons comme exemple d'étude le MCP9600 de Microchip Technology.

Caractéristiques du MCP9600

Le MCP9600 de Microchip est une solution tout-en-un de conversion de f.e.m. en température à base de thermocouple.

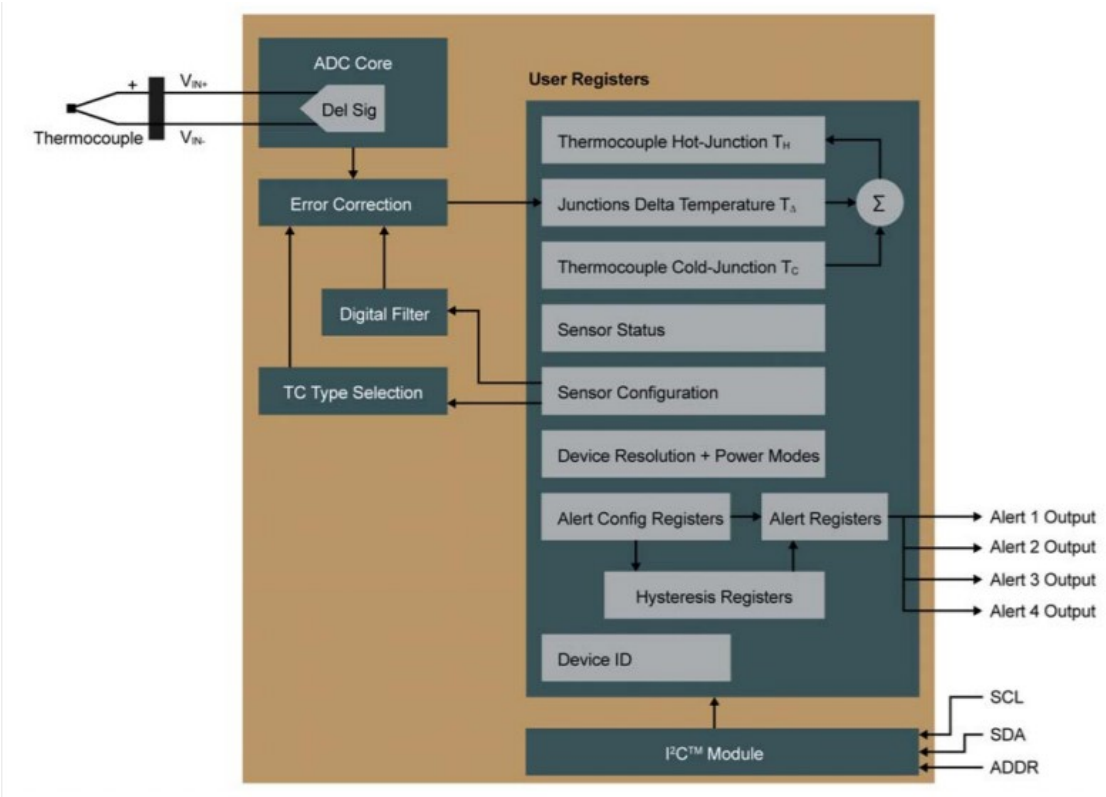


Figure 2: Schéma électronique du MCP9600

Le schéma électronique du thermocouple MCP9600 de Microchip est visible à la figure 2. On peut voir sur cette illustration que le MCP9600 constitue une solution monolithique hautement intégrée, fournissant directement les données de sortie numérique converties via une interface I^2C. Elle intègre un convertisseur A/N sigma-delta 18 bits qui permet des réglages différents pour équilibrer la résolution et le temps de conversion. Selon le type de thermocouple utilisé et la résolution nécessaire, le convertisseur A/N peut être configuré avec une résolution de 12, 14, 16 ou 18 bits. En contrepartie, une résolution plus faible permettra une conversion plus rapide et inversement. La résolution de température est réglable par l'utilisateur entre 0,0625 °C/LSB ou 0,25 °C/LSB (*Least Significant Bit*, soit « bit de poids faible »).

Comme dit précédemment, un amplificateur faible bruit est nécessaire pour adapter les tensions f.e.m. à l'étage d'entrée du convertisseur A/N. Le MCP9600 utilise un étage d'entrée avec amplificateur à capacités commutées pour obtenir un signal d'entrée ayant une résolution maximale de 2 µV/LSB avec un convertisseur A/N réglé à 18 bits. Il est également doté de coefficients de correction intégrés spécifiques pour huit types de thermocouples (K, J, T, N, E, B, S et R) pour s'assurer de la précision de la jonction chaude à ±1,5 °C maximum sur l'ensemble de la plage de mesure.

Pour les applications fonctionnant sur batterie ou à faible consommation énergétique, le MCP9600 intègre deux modes de fonctionnement faible consommation : le mode hors tension et le mode rafale. Tous deux permettent de rechercher le meilleur compromis entre les facteurs incluant la surveillance de la température, la consommation énergétique et le contrôle de l'auto-échauffement. Le MCP9600 est également doté de registres accessibles par l'utilisateur qui permettent à ce dernier de sélectionner le type de thermocouple, le mode de fonctionnement, jusqu'à quatre limites d'alerte et les réglages du convertisseur A/N. Ainsi, le MCP9600 bénéficie d'une flexibilité maximale pour s'adapter à tous les types de composants à thermocouple les plus courants, pour différentes applications de mesure de température.

Conclusion

Les thermocouples sont devenus un choix évident pour la mesure de température sur une plage de températures étendue. Afin de maximiser les performances de mesure d'un thermocouple dans différentes circonstances, un certain nombre d'algorithmes doivent être mis en œuvre dans le circuit de traitement du signal. Les algorithmes affectent la linéarité, l'amplification faible bruit et la compensation de soudure froide (CSF). Les composants à thermocouple intégré sont conçus pour simplifier la prise en compte de ces exigences pour les concepteurs. Le MCP9600 de Microchip intègre les composants ci-dessus mentionnés dans une puce monolithique intégrant un amplificateur à capacités commutées, un convertisseur A/N 18 bits et une unité de traitement des données pour offrir une solution à la fois précise et au bon rapport/coût efficacité adaptée à la surveillance de larges plages de températures.