

Le variazioni della temperatura ambientale alterano le caratteristiche meccaniche ed elettriche di tutta la strumentazione. I metalli si espandono e si contraggono e le proprietà elettriche come la resistenza e la capacità aumentano e diminuiscono. Questi effetti modificano l'uscita dello strumento e riducono l'accuratezza della variabile misurata (pressione, flusso, inclinazione, deformazione, ecc.). Questa nota tecnica descrive la fonte della dipendenza dalla temperatura in un tipo di strumentazione, i tiltmetri elettrolitici Jewell Instruments, e spiega come rimuovere questo effetto per massimizzare l'accuratezza. I principi qui presentati si applicano anche a molti altri tipi di strumenti.

Proprio come la strumentazione mostra un comportamento dipendente dalla temperatura, lo stesso vale per le strutture naturali e ingegnerizzate, tra cui pendii, argini e costruzioni in cemento e acciaio.

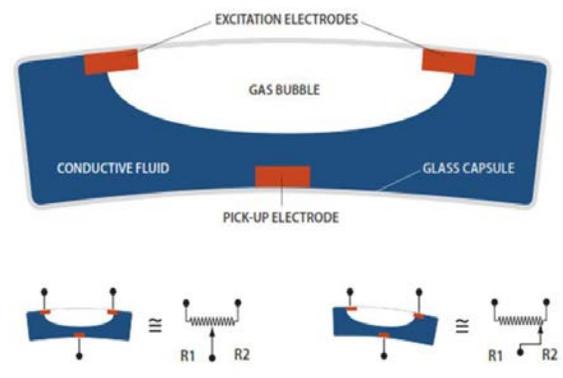
L'espansione e la contrazione termica in risposta alle fluttuazioni della temperatura giornaliera e stagionali generano movimenti reali che vengono rilevati dai tiltmetri e da altri sensori.

L'entità di questo effetto e i modi per differenziarlo dal comportamento puramente strumentale sono discussi in questo articolo.

FONTI DI COEFFICIENTI DI TEMPERATURA

I sensori nei misuratori di inclinazione Jewell Instruments Geotech/Tech sono noti come sensori di inclinazione elettrolitici, un tipo di livella elettronica composta da una custodia in vetro e contenente un liquido conduttivo (elettrolita), una bolla d'aria ed elettrodi di platino. Quando il sensore si inclina, l'area bagnata di ciascun elettrodo di eccitazione aumenta o diminuisce, a seconda della direzione dell'inclinazione. Questa modifica provoca un aumento o una diminuzione della resistenza elettrica tra l'elettrodo di prelievo centrale e ciascun elettrodo di eccitazione. Sono queste variazioni di resistenza che vengono rilevate dall'elettronica del misuratore di inclinazione, che le converte in misurazioni precise dell'entità e della direzione dell'inclinazione.

Le fluttuazioni di temperatura causano l'espansione e la contrazione termica del liquido del sensore, restringendo o gonfiando la bolla d'aria e modificando la quantità di liquido a contatto con ciascun elettrodo di eccitazione. Questo processo altera il fattore di scala (guadagno) del sensore e può spostare il suo punto zero. Il risultato sono piccole modifiche all'uscita del sensore in assenza di qualsiasi movimento di inclinazione reale. Gli esperimenti hanno dimostrato che l'espansione e la contrazione volumetrica del liquido sono la principale fonte di coefficienti di temperatura nei tiltmetri elettrolitici Jewell Instruments.



Questo effetto è molto maggiore delle variazioni dimensionali della custodia in vetro del sensore, che ha un coefficiente di espansione termica 100 volte inferiore a quello del liquido.

La termoelasticità dell'alloggiamento del tiltmetro e delle connessioni meccaniche tra alloggiamento e sensore è un'altra fonte di spostamento dello zero del tiltmetro. Per ridurre al minimo questo effetto, vengono utilizzati alloggiamenti rigidi e le connessioni tra il sensore e l'involucro sono ridotte al minimo possibile. In molti progetti inseriamo il sensore di inclinazione direttamente nella base dell'alloggiamento, eliminando completamente le connessioni meccaniche e trasformando il sensore e la base in un elemento unificato.

Gli effetti della temperatura descritti sopra vengono parzialmente rimossi (compensati) dal circuito elettronico del tiltmetro. L'inclinazione apparente (errore residuo) rimanente dopo tale compensazione è altamente ripetibile ed è descritta da due coefficienti di temperatura lineari, il coefficiente di temperatura del fattore di scala, KS, e il coefficiente di temperatura dello spostamento dello zero, KZ. Questi coefficienti includono contributi da tutte le fonti, inclusa l'elettronica del tiltmetro.

C'è un ulteriore effetto della temperatura sui sensori di inclinazione elettrolitici. La conduttività dell'elettrolita cambia più di cinque volte nel tipico intervallo operativo di un inclinometro (in genere da -40°C a +70°C). Misurando l'uscita del sensore in modo raziometrico (prendendo l'uscita come percentuale dell'ingresso), gli inclinometri elettrolitici Jewell Instruments eliminano completamente questo effetto.

Tuttavia, nei progetti che incorporano il sensore come parte di un ponte di Wheatstone, la variazione della conduttività dell'elettrolita può essere una delle principali fonti di errore di misurazione.

DEFINIZIONI DEI COEFFICIENTI DI TEMPERATURA

Il fattore di scala è la costante di proporzionalità tra l'angolo di inclinazione e l'uscita del clinometro. Viene determinato in fabbrica calibrando il clinometro, ruotandolo attraverso un intervallo di angoli noti e registrando la tensione di uscita a ogni angolo. La pendenza della retta di miglior adattamento attraverso i dati di calibrazione è il fattore di scala Scal riportato sul certificato di calibrazione del clinometro. In realtà, la pendenza è leggermente diversa a ogni temperatura.

$$K_s = \frac{(S - S_{cal}) / S_{cal}}{T - T_{cal}}$$

La variazione di pendenza per unità di variazione di temperatura è il coefficiente di temperatura del fattore di scala, dove Scal è il fattore di scala alla temperatura di calibrazione Tcal e S è il fattore di scala a una diversa temperatura T.

La variazione di temperatura può anche spostare lo zero della linea di calibrazione in assenza di qualsiasi inclinazione reale della struttura a cui è collegato il clinometro. Nel grafico, la tensione di offset zero è VT che porta a un angolo di inclinazione apparente di $q = ScalVT$ alla temperatura T.

Lo spostamento zero è quindi $q - q_{cal}$ o $ScalVT - q_{cal}$. Lo spostamento zero per unità di variazione di temperatura è definito come coefficiente di temperatura dello spostamento zero, Kz.

Equazione 2:

$$K_z = \frac{(\theta - \theta_{cal}) / S_{cal}}{T - T_{cal}} = \frac{S_{cal} V_T - \theta_{cal}}{T - T_{cal}}$$

I coefficienti KS e KZ sono determinati in laboratorio eseguendo calibrazioni a due o più temperature e includono contributi da tutte le fonti. I loro valori sono specifici per ciascuna delle diverse classi di inclinometri realizzati da Jewell Instruments e sono disponibili su richiesta. Per gli inclinometri con la designazione "alto guadagno", quelli più tipicamente utilizzati nell'ingegneria geotecnica, KS a +0,0004/°C e KZ a 1,5µradianti/°C (= 0,2 secondi d'arco/°C). I valori del coefficiente di temperatura dovrebbero diminuire in futuro con l'avanzare dei progetti di sensori ed elettronica.

EQUAZIONI PER LA COMPENSAZIONE DELLA TEMPERATURA

Equazione 3:

$$\theta = S_{cal} V$$

Per le misurazioni dell'inclinometro non compensato, l'angolo di inclinazione q è semplicemente $q = S_{cal} V$ dove V è la tensione misurata e S_{cal} è il fattore di scala misurato alla temperatura di calibrazione T_{cal} . Per le misurazioni a tutte le temperature, S_{cal} , il fattore di scala viene prima regolato utilizzando il coefficiente di temperatura KS prima di calcolare q .

Equazione 4:

Equazione 5:

Lo zero offset viene quindi rimosso utilizzando il coefficiente di temperatura K_z e il vero angolo di inclinazione compensato q_{comp} viene calcolato utilizzando l'equazione 5. Dove:

$$S = S_{cal} [1 + K_s (T - T_{cal})] \quad \theta_{comp} = S \times V - K_z (T - T_{cal})$$

Inserendo l'equazione 4 nell'equazione 5 ed espandendo i risultati nell'equazione 6.

θ_{comp}	true angular position (tilt)
T	the temperature at which your measurement was made
T_{cal}	calibration temperature reported on the tiltmeter calibration certificate
S	scale factor at temperature T
S_{cal}	scale factor reported on the tiltmeter calibration certificate
V	the measured output voltage at temperature T

Equazione 6:

$$\begin{aligned}\theta_{comp} &= S_{cal} \cdot \left[1 + K_s(T - T_{cal}) \right] \cdot V - K_z(T - T_{cal}) \\ &= S_{cal} \cdot V + S_{cal} \cdot V \cdot K_s(T - T_{cal}) - K_z(T - T_{cal})\end{aligned}$$

Riconoscendo che $S_{cal}V$ è l'angolo non compensato q , possiamo riscrivere l'equazione 6 come

Equazione 7:

$$\theta_{comp} = \theta + \theta \cdot K_s(T - T_{cal}) - K_z(T - T_{cal})$$

L'equazione 7 mostra intuitivamente che la compensazione della misurazione angolare consiste nella misurazione angolare non compensata, un termine di compensazione della pendenza che ridimensiona la misurazione angolare non compensata e un termine di offset zero che dipende solo dalla temperatura.

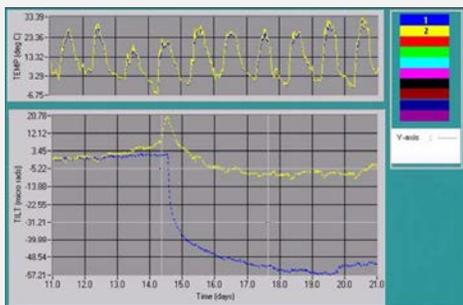
Infine, questa procedura di compensazione della temperatura è un'opzione per tutti i tiltmetri digitali elettrolitici Jewell Instruments. Può anche essere incorporata in fogli di calcolo e altri programmi scritti dall'utente.

Esempio 1: Compensazione di temperatura

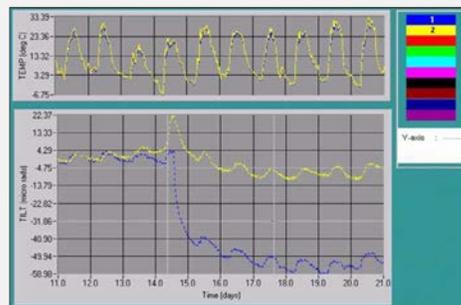
I grafici sottostanti mostrano 10 giorni di dati per due inclinometri ad alto guadagno con una risoluzione di 1 micro radiante (l'inclinometro 1 è blu e l'inclinometro 2 è giallo).

I grafici superiori in ogni figura tracciano le oscillazioni giornaliere della temperatura sulla superficie del terreno in °C misurate dai sensori di temperatura all'interno di ogni inclinometro. I grafici inferiori mostrano l'inclinazione della superficie del terreno in micro radianti durante lo stesso periodo.

Il grande cambiamento di inclinazione nel quarto giorno è stato causato dal cedimento del terreno causato da un test di pompaggio nelle vicinanze.



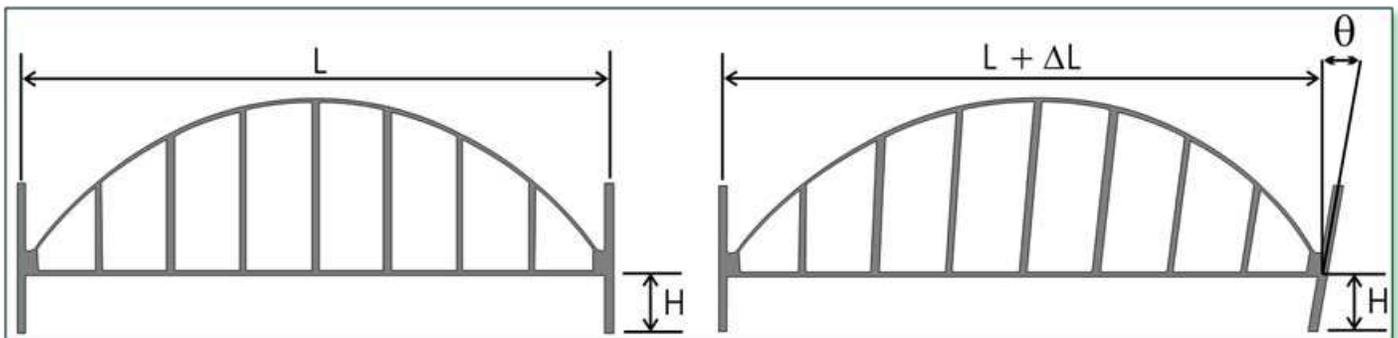
Daily oscillations that directly correlate with temperature



Temperature compensated results

TERMOELASTICITA' NELL'INGEGNERIA GEOTERMICA

La termoelasticità è l'espansione e la contrazione elastica dei materiali in risposta alle variazioni di temperatura. Le strutture del terreno, dell'acciaio e del calcestruzzo hanno ciascuna il proprio coefficiente di temperatura, il coefficiente di espansione termica μ , che è espresso in unità di deformazione (micro pollici per pollice o micron per metro) per unità di variazione di temperatura. La termoelasticità è una delle principali fonti di movimento strutturale e i tiltmetri di precisione misurano facilmente questo comportamento. La deformazione termoelastica produce in genere inclinazioni che superano le variazioni di uscita indotte dalla temperatura dei tiltmetri correttamente progettati. Il seguente esempio illustra l'effetto di grandi movimenti termoelastici.



I tiltmetri sono comunemente installati su pilastri e colonne di ponti per rilevare i primi segni di cedimenti e di erosione del letto del fiume. Il ponte in alto a sinistra mostra un ponte con una campata. Supponiamo che la campata sia fissa a un'estremità ma possa espandersi lateralmente all'altra. Ora, se i cuscinetti a strisciamento sono bloccati all'estremità mobile, l'espansione termica della campata di una quantità ΔL determinerà un'inclinazione del pilastro destro di $q = \sin^{-1}(\Delta L/H)$. Se la variazione di temperatura è di 10°C , μ è $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ e la lunghezza della campata L è di 30 metri, allora: $\Delta L = (10^{\circ}\text{C})(10^{-5}/^{\circ}\text{C})(30.000 \text{ mm}) = 3 \text{ mm}$.

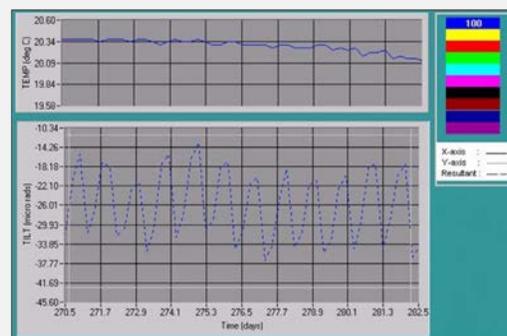
Per un pilastro alto 3 metri, l'inclinazione sarà: $q = 1000$ micro radianti = 206 secondi d'arco.

Il confronto di questo movimento di 1000 microradianti con l'errore indotto dalla temperatura non corretto di un inclinometro elettrolitico Jewell Instruments. I nostri inclinometri "ad alto guadagno", solitamente utilizzati nel monitoraggio geotecnico e strutturale, hanno coefficienti di temperatura di KS a $0,0004/^{\circ}\text{C}$ e KZ a $1,5$ microradianti/ $^{\circ}\text{C}$. Una variazione di temperatura di 10°C , quindi, produce uno spostamento zero di 15 micro radianti, l'1,5% del movimento effettivo del pilastro. L'errore indotto dal coefficiente KS è proporzionale all'angolo di rotazione del clinometro e alla variazione di temperatura ed è ancora più piccolo. Se il clinometro fosse livellato (annullato) durante l'installazione, il suo angolo dopo la rotazione della colonna sarebbe di 1000 micro radianti e l'errore KS sarebbe $0,0004/^{\circ}\text{C}$ a 10°C (1000 micro radianti) = 4 micro radianti.

In questo esempio il clinometro misura l'inclinazione termoelastica del pilastro con una precisione superiore al 2% senza compensazione della temperatura. La compensazione delle letture per la variazione di temperatura produce risultati migliori. Sebbene questo sia un esempio ipotetico, è tipico di progetti reali sul campo che coinvolgono i clinometri elettrolitici Jewell Instruments. La maggior parte della correlazione tra inclinazione e temperatura deriva dalla deformazione termoelastica. Se i dati sono ancora correlati alla variazione di temperatura, stai osservando un movimento strutturale o del terreno reale.

Esempio 2: Termoelasticità

Il grafico a destra presenta un esempio reale di deformazione termoelastica di una diga in calcestruzzo ad arco sottile. Il clinometro elettrolitico Jewell Instruments ad alto guadagno è installato in una galleria all'interno della diga, dove le temperature non cambiano ciclicamente ogni giorno a causa dell'effetto isolante del calcestruzzo spesso. Il grafico mostra le temperature della galleria e l'inclinazione grezza (non compensata) a monte-valle della diga durante un periodo di due settimane all'inizio di ottobre 1993. Sebbene le temperature non varino, l'angolo di inclinazione reale fluttua di 15 micro radianti al giorno a causa del riscaldamento e raffreddamento giornalieri della parete a valle della diga a pochi metri di distanza.



Thermoelastic dam tilt caused by heating and cooling of the downstream face.

Come ridurre al minimo gli errori di misurazione indotti dalla temperatura senza compensazione della temperatura

Esistono diversi modi per ridurre al minimo gli errori di misurazione indotti dalla temperatura che non comportano alcuna elaborazione dei dati. In molti casi, questi metodi eliminano la necessità delle procedure di compensazione della temperatura descritte sopra.

1. **Ridurre le temperature estreme.** Quando possibile, gli strumenti dovrebbero essere installati sottoterra o in luoghi ombreggiati dove le temperature estreme sono ridotte al minimo. Se le temperature non variano, non possono avere alcun effetto sulle misurazioni. Se i tuoi strumenti devono essere installati in luoghi esposti alla luce solare diretta, installa una cappa che li mantenga ombreggiati mantenendo una buona ventilazione.
2. **Scegli colori chiari.** A parità di altre specifiche, gli strumenti di colore chiaro rimangono più freddi e sono preferibili a quelli di colore scuro.
3. **Stabilisci i tuoi requisiti di precisione.** Prima di selezionare i clinometri per il tuo progetto, decidi la precisione richiesta e stima l'intervallo di temperatura a cui saranno sottoposti gli strumenti. Quindi ottieni i coefficienti di temperatura per i clinometri in esame dai loro produttori.

Utilizza l'intervallo di temperatura e i coefficienti per calcolare potenziali errori, seguendo la procedura nella sezione precedente. Se questi errori sono inferiori ai requisiti di accuratezza, non è necessaria alcuna compensazione della temperatura.

- 4. Utilizzare un design del clinometro meccanicamente stabile.** Scegliere un design del clinometro che riduca al minimo la deformazione termoelastica dello strumento stesso. Gli alloggiamenti compatti e rigidi sono più stabili e meno inclini a piegarsi o vibrare rispetto ai design a trave allungata con estremità fisse. Inoltre, meno collegamenti meccanici ci sono tra il sensore interno e l'involucro esterno, meglio è.
- 5. Utilizzare un metodo di montaggio meccanicamente stabile.** Utilizzare un metodo di montaggio che massimizzi la stabilità termoelastica. Il montaggio a tre punti è il migliore perché è il più rigido e impedisce la flessione e la torsione che possono verificarsi con i montaggi a 2 punti. I perni di montaggio (in genere barre filettate) che fissano il clinometro alla struttura devono essere il più corti possibile, della stessa lunghezza e dello stesso materiale. In casi speciali, termicamente stabili, ma più costosi, possono essere utilizzati perni invar.

CONCLUSIONI

- Tutti gli strumenti presentano un certo grado di comportamento dipendente alla temperatura. L'espansione e la contrazione termica del liquido del sensore sono la principale fonte di dipendenza dalla temperatura nei tiltmetri elettrolitici Jewell Instruments.
- L'effetto della variazione di temperatura sull'uscita del tiltmetro è prevedibile e ripetibile. È quantificato da due costanti, il coefficiente di temperatura del fattore di scala, KS, e il coefficiente di temperatura dello spostamento dello zero, KZ. Queste costanti consentono all'utente di prevedere l'entità dei potenziali errori indotti dalla temperatura e di correggere (compensare) tali errori durante l'analisi dei dati.
- I grandi movimenti termoelastici delle strutture di ingegneria civile sono facilmente rilevabili dai tiltmetri e talvolta vengono scambiati per errori di misurazione.
- Prima di iniziare un progetto di strumentazione, l'utente deve innanzitutto stabilire la precisione di misurazione richiesta, quindi stimare l'errore di misurazione nell'intervallo di temperatura previsto utilizzando i coefficienti di temperatura dello strumento. Se l'errore è inferiore ai requisiti di precisione, non è necessaria alcuna compensazione della temperatura.
- Semplici precauzioni come l'installazione dei tiltmetri all'ombra o sottoterra possono ridurre o eliminare gli effetti della temperatura.
- La compensazione della temperatura delle letture del clinometro elettrolitico Jewell Instruments viene eseguita utilizzando l'equazione 6 o l'equazione 5 se l'angolo non compensato è già stato calcolato utilizzando l'equazione 3. La compensazione è disponibile come opzione su tutti i clinometri digitali elettrolitici Jewell Instruments e può anche essere integrata in fogli di calcolo e programmi definiti dall'utente.

Angle Conversion Factors

1° = 60 arc minutes
60 arc minutes = 3600 arc sec
3600 arc sec = 17453 μradians
17453 μradians = 0.01745 radians
1 arc second = 4.85 μradians
1 μradian = 1 μinch/inch
1 μinch/inch = 1 micron/meter
1 micron/meter = 1 mm/km

TN103

© Jewell Instruments 2021

Jewell
Instruments

ISO9001
CERTIFIED