

## Artículo técnico

# Precisión de los encóderes angulares

Los encóderes se encuentran prácticamente en casi todo...

Muchos sistemas de automatización dependen de un movimiento rotativo de precisión. Formatos rotativos “computer-to-plate” (CTP), máquinas de preimpresión, ejes A, B y C de una máquina herramienta, máquinas de montaje superficial, medición de formas, manipulación e inspección de pastillas o goniómetros, todos ellos emplean algún tipo de encóder\* bien sea rotativo o angular.

Las distintas aplicaciones demandan diferentes combinaciones de características y rendimiento para optimizar su función – algunas requieren precisión, otras repetibilidad, alta resolución o errores cíclicos reducidos para el control del bucle de velocidad. Generalmente, se selecciona el encóder que ofrece un equilibrio entre sus especificaciones y la función a la que va destinado; y hay una increíble variedad para elegir. Sin embargo, sólo unos pocos cumplen todos los requisitos.

El control del movimiento de precisión no puede depender solo de la exactitud. La respuesta dinámica del sistema es igualmente importante. También lo es medir la posición con exactitud, pero el sistema no sirve para nada si no tiene la capacidad de posicionarse con exactitud. Los motores rotativos de transmisión directa (o motores de par) desarrollan un par elevado y activan el servocontrol de precisión para ángulos muy pequeños. Su respuesta dinámica es excelente porque la carga se acopla directamente a la transmisión, eliminando la necesidad de elementos de transmisión que introducirían holgura, histéresis, errores en los dientes de los engranajes o estiramiento de las correas. Los motores de par, sin bastidor y de gran diámetro interno no pueden acoplarse fácilmente al eje de un encóder. Los encóderes de anillo proporcionan una solución adecuada. Además, al igual que la carga, el encóder de anillo también se acopla rígidamente a la transmisión, eliminando cualquier ‘holgura’ no deseada en el sistema. En cualquier sistema de medición o control, es preferible que el encóder esté tan cerca de la transmisión

como sea posible. Esto ayuda a minimizar posibles resonancias que puedan influir en el rendimiento del servo, especialmente cuando aumente el ancho de banda.

Sea cual sea la aplicación, la retroalimentación directa y fiable de la posición es la clave...

El encóder rotativo es la solución más adecuada, que proporciona una retroalimentación de la posición con precisión. Al igual que en la selección de un motor, elegir el encóder rotativo correcto depende del establecimiento realista de los requisitos de especificación, del conocimiento de los factores que afectan a la exactitud del encóder y de un buen conocimiento de cómo pueden superarse los déficit en rendimiento. Este artículo esboza los factores fundamentales que afectan al rendimiento del encóder rotativo para ayudar a los diseñadores a elegir el sistema de encóder ‘correcto’.

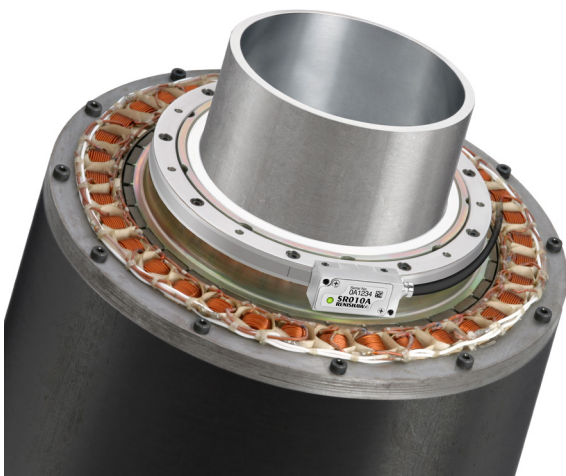
Cuando se selecciona un encóder rotativo o angular, no es aconsejable optar por el de mayor exactitud, sin considerar la tasa de transferencia de datos, el tamaño del sistema, la complejidad y el coste. Hay disponibles encóderes con exactitud y resolución de decenas de nanómetros. Análogamente, los encóderes angulares pueden proporcionar un rendimiento por debajo del arcosegundo. A veces es conveniente recordar lo que significa exactamente un arcosegundo:

Un arcosegundo...

- Equivale a 1 micra en un radio de 206,25 mm.
- 30 m en la superficie de la Tierra.
- La resolución proporciona una velocidad de datos de 1,3 MHz a 1 rev/seg.

A la hora de determinar la exactitud necesaria, es conveniente separar la precisión, la resolución y la repetibilidad:

- Para aplicaciones que requieran una elevada repetibilidad, (por ejemplo, un posicionador) la exactitud del ángulo de cada estación es secundaria en relación con la capacidad del sistema para detenerse siempre en la misma señal del



Aplicación para motores rotativos de transmisión directa

\*Los encóderes angulares tienen normalmente 10.000 o más pulsos, con una exactitud superior a  $\pm 5$  arcosegundos. Estrictamente, el término encóder rotativo se refiere a encóderes que se encuentran por debajo de este criterio, pero se emplea a menudo como término genérico para describir todos los encóderes que giran

encóder después de un tiempo.

- Para un movimiento continuo y suave, la resolución y precisión seleccionadas no deben permitir 'fluctuaciones' del ancho de banda del servocontrol.
- Para un dispositivo de movimiento lento, como un telescopio astronómico, la medición angular precisa es más importante que la tasa máxima de transferencia de datos.
- Para el montaje de una cámara en un helicóptero, que requiera un posicionamiento manual preciso, la resolución es más importante que la repetibilidad o la exactitud absoluta; aunque esto último llegue a ser más importante si el mismo sensor proporciona los datos del objetivo para un sistema de armamento.
- En sistemas de alta velocidad, pueden surgir conflictos entre la velocidad y el intercambio de datos sobre la precisión del posicionamiento. Los sistemas de paso mayor (menos recuentos de línea) admiten una mayor tasa de transferencia de datos. Los sistemas de paso más fino (más recuentos de línea), sin embargo, proporcionan unos errores de interpolación menores.

Una vez que se han entendido los requisitos de precisión, la selección del encóder apropiado resulta mucho más fácil. A pesar de las afirmaciones de algunos fabricantes, la precisión en la medición rotativa raramente es una característica 'plug & play'. Entender el error total es la clave para optimizar el rendimiento.

## Determinación del error total

Imagine un alumno en el colegio midiendo el ángulo entre dos líneas a lápiz sobre un papel con un transportador de ángulos de plástico. Este coloca el transportador directamente sobre el papel, con la línea de base del transportador directamente sobre una de las líneas dibujadas y ajusta la posición hasta que el origen coincida con el punto donde se juntan las dos líneas. A continuación, lee el ángulo entre las líneas de la regla graduada, interpolando si es necesario para obtener la resolución que necesita. Las primeras veces, esta lectura puede ser distinta a la del profesor, que tiene que insistir en la importancia de centrar y alinear el transportador exactamente sobre las dos líneas. El efecto de estos errores de alineación es mayor que cualquier irregularidad de la regla angular grabada en el plástico.

El alumno ha aprendido tres requisitos previos de la medición angular:

1. Alinear el centro de la regla giratoria lo más cerca posible del vértice del ángulo que va a medir.
2. Colocar la regla de medición lo más cerca posible del elemento que se va a medir.
3. Reducir al mínimo el movimiento (angular) entre la regla de medición y el elemento que se va a medir.

Hay otros tres que quizá no ha tenido en cuenta:



Motor DDR, Shinko Electric

4. La distancia circunferencial entre las graduaciones debe ser uniforme en todo el círculo.

5. La distancia radial entre el centro de la regla radial y el borde de la regla donde se toma la medición debe ser igual para todas las posiciones circunferenciales.

6. Debe realizar la medición mirando la línea perpendicularmente a través del transportador para reducir al mínimo el error de paralaje.

Estos requisitos previos son los mismos para un transportador de ángulos de plástico sobre un papel o un encóder rotativo en una máquina. En la Figura 1, el componente en cuestión cuyo movimiento angular quiere medirse / controlarse rota sobre un eje montado sobre dos rodamientos. A este eje se acopla un encóder angular con un rodamiento incorporado, que se lee mediante una cabeza lectora montada sobre una estructura no rotatoria. Según los requisitos previos anteriores: para que la salida del sistema de encóder refleje el movimiento rotativo real del componente, debe ocurrir lo siguiente:

1. Cada parte del sistema debe rotar en sus rodamientos sin desplazamiento radial (es decir, sin que haya movimiento lateral) de sus ejes de rotación.
2. El sistema de eje que conecta el componente en cuestión al encóder debe ser rígido para impedir la torsión.
3. El acoplamiento debe diseñarse de tal manera que el movimiento del encóder que rota en su rodamiento sea el mismo que el del componente en cuestión rotando sobre su propio sistema de rodamiento; es decir, se necesita una junta precisa de velocidad constante.
4. La distancia entre las líneas alrededor del borde de la regla del encóder deben ser uniformes, y la cabeza lectora debe interpolar entre ellas linealmente.
5. La regla del encóder debe ser totalmente circular con el eje de rotación, y éste debe pasar perpendicularmente por su centro.
6. La cabeza lectora debe leer la regla sin cometer error de paralaje u otro error geométrico, y debe estar rígidamente

montada a un marco de referencia que no rote.

Si no se cumple alguno de los puntos citados más arriba, habrá discrepancias entre la posición angular del componente en cuestión y lo que indica el sistema de encóder. Investigando las posibles fuentes de error, pueden determinarse sus contribuciones individuales y el error total del sistema.

## Efecto de deslizamiento de rodamientos

El término 'Deslizamiento de rodamientos' se emplea para describir una serie de atributos del sistema que dan lugar a una excentricidad radial (o traslación lateral) de los componentes o del eje de rotación, la mayor parte de los cuales pueden atribuirse a deficiencias en el sistema de rodamientos. Esto incluye holgura y otros armónicos mayores (como, por ejemplo, los debidos a las imperfecciones en las bolas, rodillos o pistas) pero no una excentricidad que hubiera sido previamente concebida.

El diseño y el ajuste del sistema de rodamientos influye en la magnitud de la excentricidad radial de un husillo que gira sobre rodamientos de bolas o aguja, que, normalmente, es superior a  $\pm 1 \mu\text{m}$ .

Puesto que el sistema de encóder puede leer la posición circunferencial de su regla rotativa hasta al menos una décima parte de su valor, se observa que los errores provocados por el deslizamiento de rodamientos pueden ocultar los provocados por el resto de un sistema bien diseñado. La contribución a los errores del deslizamiento de rodamientos se representa por:

**Error de medición angular (arcosegundo) = deslizamiento de rodamientos ( $\mu\text{m}$ ) x 412,5/D**

donde D es el diámetro de la regla del encóder en mm.

La relación entre excentricidad radial, repetibilidad y posición angular depende de

- Las dimensiones relativas de las pistas de rodadura internas y externas de los rodamientos
- El número y el diámetro de las bolas o las agujas que tiene y
- El desgaste y el ajuste del sistema de rodamientos.

A pesar de mostrar los componentes cíclicos en todos los intentos y finalidades, la relación debe considerarse aleatoria, ya que cualquier mapa de errores utilizado para compensar debe asignar varias revoluciones del husillo.

En sistemas de alta precisión, es preferible emplear cojinetes de aire bien diseñados, ya que la excentricidad radial puede reducirse a niveles por debajo de la micra con la selección correcta de la rigidez radial de los rodamientos. Cuando se emplean cojinetes de aire, debe tenerse en cuenta el efecto de las fuerzas de desequilibrio. A baja velocidad, el husillo gira sobre su línea central geométrica, pero a alta velocidad,

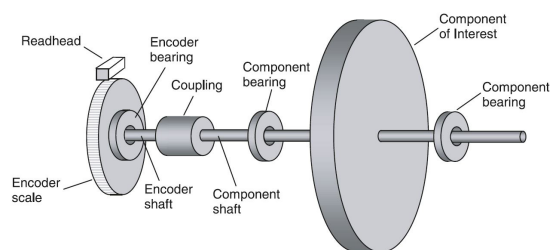


Figura 1. Sistema de máquina genérico

cuando el efecto de la fuerza centrífuga de desequilibrio supera la rigidez radial del rodamiento y su montaje, el husillo gira sobre su masa central. Aunque esta transición se produce generalmente a altas velocidades, podría introducir discrepancias de varias micras entre las líneas centrales estáticas y dinámicas. No obstante, la excentricidad radial es totalmente previsible a un ciclo por revolución del husillo.

Siempre que se empleen rodamientos, tenga en cuenta lo siguiente:

- En el sistema representado en la Figura 1, únicamente contribuyen al deslizamiento los rodamientos en los que se apoya el encóder. Sin embargo, las posibles ventajas de este método pueden verse limitadas por errores adicionales introducidos por el acoplamiento.
- Aunque existen métodos para eliminar el efecto del deslizamiento de rodamientos (principalmente, el uso de 2 o más cabezas lectoras en la misma regla de encóder), debe considerarse la finalidad de la medición angular.
  - ▶ Si la medición se realiza para determinar la posición angular de un punto alejado del eje de rotación (por ejemplo, un telescopio astronómico), un efecto de deslizamiento significativo compensado de esta forma no afecta a la precisión de los resultados obtenidos.
  - ▶ Sin embargo, si la información de posición se necesita para localizar un punto determinado en el componente rotativo mediante coordenadas polares (por ejemplo, una máquina de inspección de obleas), salvo que se utilicen tres cabezas lectoras o más en el mismo anillo de encóder, cualquier deslizamiento de los rodamientos de apoyo del componente utilizado podría alterar la precisión de posicionamiento.

Si no es posible evitar grandes deslizamientos de rodamientos, debe considerarse la selección de un paso de regla apropiado. Como norma general, si la señal incremental es el promedio de dos o más cabezas lectoras con la marca de referencia derivada de una, el paso de regla debe superar el deslizamiento de rodamientos por un factor de 3 a 4 - si es menor, los problemas de repetibilidad con la marca de referencia pueden ser considerables, salvo que se apliquen técnicas de compensación, como la tecnología propoZ™ de Renishaw.

## Efecto de errores de acoplamiento

La Figura 1 muestra un sistema que incluye un encóder

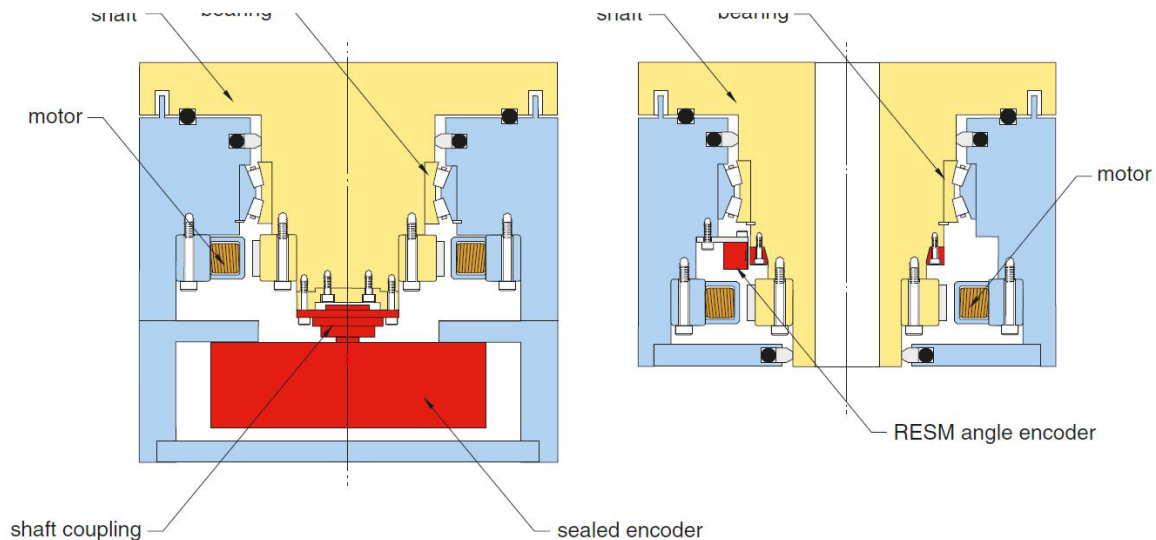


Figura 2. Encóder sellado frente a encóder de anillo abierto

angular con sus propios rodamientos acoplados al componente en cuestión. Este acoplamiento puede ser beneficioso, porque la exactitud de la medida sólo se ve afectada por el deslizamiento del rodamiento del encóder. Sin embargo, este 'beneficio' debe ser considerado con cautela porque el deslizamiento de los rodamientos principales afecta a la exactitud del posicionamiento si el sistema está diseñado para devolver las coordenadas polares de un punto del componente en cuestión en lugar de la rotación angular de un objeto distante.

El propio diseño del acoplamiento puede tener un impacto considerable en la precisión del sistema. En este artículo no se documentan completamente todas las posibles deficiencias de los distintos diseños de acoplamiento, no obstante, los problemas son:

### Holgura

Cualquier holgura (p.ej., una placa gastada de un acoplamiento tipo Oldhams) introduce diferencias en la posición angular notificada con la dirección de rotación y genera el mayor impacto en la repetibilidad del sistema.

### Rigidez torsional

El acoplamiento no es quizá tan rígido como los ejes que conecta, por consiguiente, puede sufrir los efectos de la vibración, resonancia y enroscado o torsión del vástago que, si se utiliza en un bucle de información, podría alterar significativamente el rendimiento transitorio, el tiempo de reglaje, la ganancia de bucle cerrado permitida y el ancho de banda.

### Error angular

La mayoría de los acoplamientos pueden, en determinadas circunstancias, introducir un error angular entre el eje motor y el accionado (p.ej., un acoplamiento Oldhams genera un error de 4 por revolución si los 2 ejes no son paralelos).

En sistemas de alta precisión, el encóder angular debe estar montado con rigidez en el mismo eje que el componente analizado y girar sobre los mismos rodamientos.

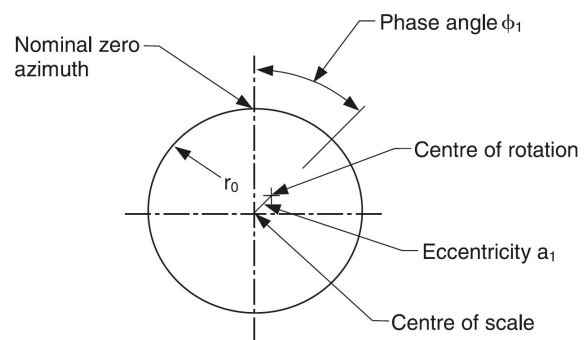


Figura 3. Excentricidad

### Efecto de la torsión del eje

Del mismo modo que en el acoplamiento tratado anteriormente, la falta de rigidez torsional en los ejes entre el componente en cuestión y la regla del encóder angular provocará errores dinámicos que disminuirá el rendimiento del sistema. Para minimizar este efecto, se recomienda montar un encóder sin contacto tan cerca como sea posible o 'sobre' el componente en cuestión (véase la figura 2).

### Efecto de la excentricidad de la regla y distorsión

Mientras que puede construirse una regla precisa con una combinación de marcas de graduación no uniformes y radios variables, si quiere realizarse una medición angular precisa, debe construirse una regla lineal uniforme a una distancia constante del eje de rotación. Las variaciones en el radio, provocadas por la excentricidad de una regla rotatoria perfectamente redonda, pueden producir errores que varíen en cada vuelta. Esto se combina con otros errores que varían dos o más veces en cada vuelta, lo que da como resultado una distorsión de la regla.

Considere una regla redonda perfecta de radio  $r_0$ . En vez de



montarla para que gire sobre su línea central nominal, podría montarse para que gire sobre otro punto a una distancia  $a_1$  del nominal a un ángulo de fase  $\Phi_1$  (véase la Figura 3). En un ángulo de acimut arbitrario,  $\theta_1$ , la distancia desde el centro de rotación de la superficie de la regla,  $R_{\theta}$ , se obtienen mediante:

$$R_{\theta} = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1)$$

Por consiguiente, el radio real varía sinusoidalmente una vez por revolución con una amplitud igual a la excentricidad.

Para añadir los efectos de distorsión de la regla, la forma completa del anillo puede considerarse como la suma total de una serie de ondas sinusoidales de distinta frecuencia  $n$ , fase  $\Phi_n$  y amplitud  $a_n$ , de forma que el radio de la regla en el ángulo de acimut  $\theta$  se obtiene mediante:

$$R_{\theta} = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1) - a_2 \cos(2\theta - \Phi_2) - a_3 \cos(3\theta - \Phi_3) - \dots - a_n \cos(n\theta - \Phi_n)$$

Puede establecerse que el error circunferencial máximo  $E_n$  inducido por una distorsión variable sinusoidalmente de amplitud  $a_n$  (promedio entre picos), con  $n$  ciclos por revolución se obtiene mediante

$$\pm E_n = a_n/n$$

Como verificación de seguridad, una excentricidad (p.ej.,  $n = 1$ ) de  $1 \mu\text{m}$  induce un error sinusoidal lineal de  $\pm 1 \mu\text{m}$  en la circunferencia.

A partir de estos datos, se deduce que las distorsiones de la regla más altas, que serán de amplitud cada vez más corta, tendrán un efecto progresivamente menor en la precisión de la regla. También muestra que los errores armónicos más bajos tendrán un impacto significativo, con la excentricidad a la par del efecto del deslizamiento de rodamientos.

La naturaleza relativamente flexible de los encóderes de anillo de Renishaw aumenta la sospecha de que la metrología se ve afectada por la excentricidad y la distorsión, especialmente los efectos de la potencial 'lobulización' inducida por las distintas tuercas de sujeción y el montaje en cono. En una instalación estándar de un anillo de 200 mm sujeto con

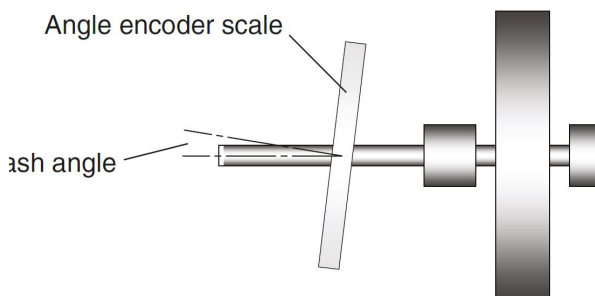


Figura 4. 'Vaivén'

12 tuercas apretadas con el par correcto, no se generan errores apreciables, y la 'interferencia' de errores a 12 ciclos por revolución es de aproximadamente  $\pm 0,05 \mu\text{m}$ . En una instalación típica, la excentricidad es responsable del 60%

o más del error (debido a la instalación) con los errores armónicos más bajos (principalmente, del 2° al 4°) tomando una proporción progresivamente menor.

Por suerte, los errores inducidos por excentricidad y distorsión responden a técnicas de compensación, siendo la más habitual el uso de varias cabezas lectoras. El uso de dos cabezas lectoras elimina los errores de excentricidad y otros errores armónicos variados. En algunas instalaciones se han empleado cuatro cabezas lectoras con buenos resultados, pero, un número mayor reduciría progresivamente la amortización de la inversión; una selección cuidadosa de la sección transversal del anillo es un método más eficiente de limitar los errores armónicos de distorsión más altos.

El montaje en cono patentado de los encóderes de anillo convierte eficazmente un anillo potencialmente excéntrico y distorsionado en uno con un grado de vaivén reducido, cuyo impacto en la precisión es considerablemente menor. El montaje en cono convierte  $1 \mu\text{m}$  de excentricidad en un anillo de 200 mm en un anillo concéntrico con  $0,002^\circ$  de vaivén. Así, se aumenta la precisión que se obtiene sin usar varias cabezas.

## Efecto del vaivén de la regla

El movimiento de vaivén se refiere al caso en que la regla del encóder angular está montada concéntricamente con el componente en cuestión, pero tiene el eje geométrico inclinado hacia el eje de rotación (véase la Figura 4). Visto desde el lateral, esto es, radialmente, podría tener el efecto de comunicar en cada vuelta un movimiento sinusoidal axial a la periferia de la regla del encóder angular.

El vaivén imparte dos mecanismos de error distintos, ninguno de los cuales es evidente. Tomemos, por ejemplo, una regla de encóder angular (con graduación axial) de 200 mm de diámetro montada con un vaivén de  $0,1^\circ$ . Durante la instalación, la concentricidad de la regla se ha ajustado aplicando una galga de comparación (DTI) sobre la superficie de la regla. Durante una revolución, la regla no solo se mueve axialmente  $\pm 0,175 \text{ mm}$  respecto a la cabeza lectora, sino también, cambia el ángulo de ladeo de las graduaciones de la hasta  $\pm 0,1^\circ$  a cada lado del valor nominal. Si la cabeza lectora se ha colocado en la misma parte de la regla que la galga DTI, entonces el error generado será secundario. Sin embargo, si la cabeza lectora se desplaza axialmente 1 mm desde ese punto, la combinación de movimiento axial, el cambio de ladeo y la posición de la cabeza lectora inducirán un error de aproximadamente  $\pm 1,74 \mu\text{m}$  en la circunferencia ( $\pm 3,6$  arcosegundos) con una variación por revolución.

El segundo mecanismo es el siguiente: Una moneda redonda vista de frente aparenta ser circular. Si la moneda se inclina a la vista, tendrá una apariencia elíptica. El impacto del vaivén en una regla rotatoria es similar, y tiene el efecto de impartir el error dos veces por revolución, cuya magnitud es inversamente proporcional al coseno del ángulo de vaivén. Este es un efecto secundario, que en el ejemplo anterior generaría errores del orden de  $\pm 0,16$  arcosegundos, por lo

que puede ignorarse en la mayoría de aplicaciones.

## Efecto de los errores provocados por la cabeza lectora

Hasta ahora, nos hemos centrado en la regla del encóder y los mecanismos que provocan errores, pero la regla es solo una parte del sistema del encóder; la cabeza lectora también contribuye al error total. Los errores más importantes producidos por la cabeza lectora son los siguientes:

### Error subdivisional

Un encóder rotativo con 3600 pulsos tendrá una graduación cada  $0,1^\circ$  o 360 arcossegundos. Si fuera necesaria una resolución más fina, que será lo más probable, la cabeza lectora se tendría que interpolar. Cualquier error de linealidad en la interpolación daría como resultado un error cíclico, también conocido como error de subdivisión (SDE).

Usando una cabeza lectora de Renishaw como ejemplo, la regla y el índice grabado producen franjas de interferencia óptica que se desplazan lateralmente sobre el fotodetector de la cabeza lectora con el movimiento de la regla. Estas franjas son sinusoidales en intensidad y se descodifican en la cabeza lectora en 2 tensiones sinusoidales de  $90^\circ$  desfasadas entre ellas. Si se confrontan los gráficos de las dos tensiones en un osciloscopio, se genera una figura Lissajous circular, que gira una vez por cada paso de la regla de movimiento. Si la figura Lissajous es perfectamente circular y está centrada en el origen, gira a una velocidad uniforme real con el movimiento de la regla, por lo que la interpolación tiene una discriminación uniforme angular, entonces, la interpolación de la cabeza lectora será perfecta; si no, se produce un error SDE.

La alineación, el ajuste y la limpieza de la regla afectan al SDE, por tanto, es muy importante la limpieza periódica y la alineación minuciosa de la cabeza lectora. No obstante, en mayor medida, los niveles de SDE dependen del diseño óptico de la cabeza lectora. En sistemas TONiC de  $20\ \mu\text{m}$  de paso de Renishaw, el SDE es generalmente  $\pm 30\ \text{nm}$  ( $\pm 0,06$  arcossegundos en un anillo de 200 mm). Debido a su alta frecuencia, la calibración tiene un impacto mínimo en la eliminación de los efectos del SDE, pero el promedio en distancias cortas puede ser eficaz en determinadas aplicaciones.

### Paralaje

Si la distancia entre la regla y la cabeza lectora cambia (debido a la excentricidad del anillo, cambios de temperatura, etc.), se producirán errores, a menos que la cabeza lectora esté correctamente alineada con respecto a la línea central de la regla rotatoria. Si se ajusta la cabeza lectora, los cambios en la altura durante el desplazamiento producirán errores proporcionales al seno del ángulo de ajuste.

### Estabilidad y montaje

Parece obvio, pero el montaje rígido y seguro de la cabeza lectora y la marca de referencia son fundamentales para

realizar una medición angular precisa y repetitiva. El sistema debe diseñarse de tal manera que la cabeza lectora no se mueva con respecto al eje de la regla de rotación, debido a los cambios de posición, carga, temperatura, vibración, etc. Si el sistema genera inesperadamente errores irrepetibles, se recomienda comprobar las tuercas que sujetan la cabeza lectora y que no se hayan aflojado otros soportes y montajes con el paso del tiempo.

### Efecto de la exactitud de la graduación de la regla

Considere un proceso de fabricación de un encóder angular con las graduaciones marcadas directamente en el sustrato, en vez de unas marcadas en una regla lineal que,

Tipo de error	Error típico en un anillo de $\varnothing 200$	
	$\mu\text{m}$	arcosegundos
Error de graduación	0,5	1
Error del sistema	0,53	1,1
Error instalado típico (1 cabeza lectora)	2,5	5,2
Error instalado típico (2 cabezas lectoras)	1,0	2,1

posteriormente, se fijan en la circunferencia de un disco o un anillo. El fabricante puede fijar la regla a un husillo que va girando hasta la posición de cada graduación. Cuando se completa el proceso de graduación, pero antes de que se retire del husillo, la precisión de la regla medida (la discrepancia entre la posición deseada de la graduación y la posición real) se denomina 'Error de graduación'. Al repetir esta medición, pero usando esta vez una cabeza lectora ajustada correctamente, el error incluiría, además del error de graduación, componentes debidas a la cabeza lectora (SDE significativo). Este error se denomina "Error del sistema".

Si el encóder angular se extrajera y se volviera a montar sobre el mismo o diferente husillo, y se comprobara de nuevo la precisión con una cabeza lectora, el error registrado sería diferente. La diferencia correspondería al error provocado por el cambio en la excentricidad y ovalización de la regla del encóder angular, entre su instalación inicial para la graduación y su reinstalación para la utilización. El error total medido en este caso se denomina 'Error instalado' y es la definición del error que más fielmente refleja el rendimiento conseguido por el usuario.

### Resumen:

**Error de graduación** = Error en el espaciado de las graduaciones durante la fabricación.

**Error del sistema** = Error de graduación + SDE

**Error instalado** = Error del sistema + Efectos de las diferencias en la instalación.

Se recomienda examinar las proporciones relativas de estos errores; los resultados obtenidos en el análisis de una

cantidad considerable de anillos de 200 mm de diámetro de Renishaw se enumeran en la Tabla 1, donde 1  $\mu\text{m}$  corresponde a 2,06 arcosegundos en este diámetro.

#### Tabla 1:

El nivel de errores de graduación y del sistema está en las manos del fabricante del encóder, pero la responsabilidad del error instalado de  $\pm 2 \mu\text{m}$  es del fabricante y del cliente. Aunque el cliente pudiese montar el encóder perfectamente concéntrico y circular, seguiría existiendo una diferencia entre los errores instalados y del sistema, salvo que, el cliente montase el anillo exactamente en la misma posición que el fabricante empleó para guardarlo.

Las causas del Error de graduación dependen del método de fabricación:

1. En encóderes angulares fabricados mediante escritura o grabación de líneas axiales individuales alrededor del borde del disco o el anillo, el error de graduación se debe a los errores de proceso de división.
2. En encóderes de cristal radiales fabricados mediante técnicas de máscara y grabación, el error de graduación se debe a los errores de precisión de la máscara y otros generados durante su colocación para el grabado.
3. En un sistema de encóder angular que sujeta la regla lineal alrededor de la circunferencia de un eje preparado; el error de graduación se debe a la precisión de fabricación de la regla lineal, a los cambios de grosor de la regla lineal y el radio del eje preparado, y a las diferencias de tensión de la regla lineal al fijarla en el eje.

Este último efecto es uno de los pocos que pueden variar después de la preparación, ya que los cambios de temperatura, sumados a las diferencias de los coeficientes de expansión térmica entre la regla y el eje, podrían hacer que la regla se deslice respecto a la superficie del eje. El exceso de adhesivo empleado para sujetar la regla podría agravar este efecto.

Considerando el encóder de anillo de Renishaw y otros en los que no varía con el tiempo, el error de graduación es previsible entre una revolución y otra y, para el usuario, es imperceptible en cuanto a efectos de precisión de instalación; por consiguiente, puede reducirse mediante las mismas técnicas.

Una manifestación menos evidente de los errores de graduación se produce cuando las graduaciones axiales de borde de un encóder angular están ladeadas o alineadas incorrectamente con la rotación de su eje. Esto no tiene ningún efecto durante el propio movimiento rotativo, pero cualquier movimiento axial de la regla del encóder relativo a la cabeza lectora (debido a flotación de los rodamientos) generará una indicación incorrecta de la rotación de la regla. Este mecanismo es similar al 3º mecanismo de vaivén descrito más arriba. El efecto de una cabeza lectora inclinada (p.ej., paralaje) utilizado con la regla radial es similar.

## Técnicas de compensación de errores

Una vez determinado el efecto de todas las fuentes de error del prototipo, pueden compararse la exactitud necesaria para conseguir que se cumplan las especificaciones del dispositivo y el rendimiento que podría esperarse del sistema de encóder rotativo sin compensar. En la medida que lo primero exceda lo segundo, debe optarse entre elegir un sistema de encóder diferente con especificaciones mejores, si puede encontrarse alguno que cumpla con las dimensiones necesarias, el plazo de entrega y el presupuesto, y las técnicas de compensación de errores aplicables para satisfacer las deficiencias encontradas. Las dos técnicas de compensación más potentes hacen uso de múltiples cabezas lectoras y mapas de error.

**Múltiples cabezas lectoras** Este tema se trata en detalle en las secciones correspondientes de errores más arriba. Colocando dos cabezas lectoras diametralmente opuestas se eliminan los efectos de excentricidad, y los armónicos impares más altos del error repetitivo. Esto también elimina los efectos del deslizamiento de rodamientos de la medición angular, pero normalmente es necesario emplear cuatro cabezas lectoras para combatir el deslizamiento de rodamientos para obtener un posicionamiento angular más preciso. Incrementar el número de cabezas lectoras reducirá el futuro error repetitivo, pero normalmente se considera que las ventajas que pueden obtenerse se ven sobrepasadas por la complejidad y el coste que supone colocar más de 4 cabezas. Lo bueno de esta técnica es que no es necesario realizar una calibración para que sea eficaz; una gran ventaja en lo referente al tiempo y diseño del sistema de prueba. Esta técnica no supone ninguna novedad; los mejores instrumentos de exploración mecánica utilizaron hasta 7 puntos de medición sobre un arco para determinar los ángulos respecto a precisiones del segundo sub-arco.

**Mapas de error** Si el sistema de control está así configurado, puede emplearse un mapa de error, bien con o en lugar de múltiples cabezas lectoras, para reducir los errores repetitivos. Para que esta técnica sea eficaz, el fabricante del equipo original debe calibrar el sistema del encóder rotativo empleando un interferómetro, u otra referencia reconocida, después del montaje final del dispositivo. No se puede confiar en ningún certificado de calibración proporcionado por el fabricante del encóder, porque se ignorarían los errores introducidos durante el proceso de instalación, haciendo que el mapa de error carezca de utilidad. Merece la pena optimizar el número de puntos del mapa de error. Para un ciclo de error variable sinusoidalmente, tomar siete puntos por ciclo eliminan aproximadamente el 90 % del error a esa frecuencia. Un mapa de error de cien puntos compensa, por tanto, la mayoría de los errores en los primeros catorce armónicos, pero debe tenerse en cuenta que puede incrementar potencialmente los errores provocados por los armónicos más altos restantes. Es evidente que esta técnica no tiene influencia sobre los efectos del deslizamiento de rodamientos, la torsión del eje u otras fuentes de error dependientes del tiempo.

## Resumen

En este artículo se han examinado brevemente algunos de los cambios que deben hacerse para determinar una especificación realista de un sistema de encóder angular. Se han observado también algunos de los factores más significativos que pueden limitar la exactitud alcanzable, detallando una serie de técnicas para reducir cualquier deficiencia. Para obtener más información sobre esta materia, consulte el documento ISO230-7 DIS Axes of rotation.

Para obtener más información sobre productos, visite [www.renishaw.es/encoder](http://www.renishaw.es/encoder)