



Capítulo 12

Análisis de cojinetes de deslizamiento

Temas:

- F0** ¿Qué son los cojinetes de deslizamiento?
- F0** Sensores de no contacto - corrientes de Eddy
 - o Transductores, señales y convenciones
- F0** Keyphasors
- F0** Eliminación de ruido
- F0** Órbitas directas versus filtradas
- F0** Diagramas de órbita y diagramas de línea central
- F0** Diagnóstico de fallas

Reconocimiento: muchas imágenes han venido de "Rotor Dynamic Measurement Techniques", Product Note: Agilent 35670A-1de John Jensen y "What Are Shaft Orbits Anyway?" de Mark A. Jordan, Sr. Ingeniero de Vibración de Equipos Rotativos, Industrial Machinery Diagnostics, LLC. Ciertos gráficos de Bob Eisenmann, Sr.

Diagnóstico de fallas en máquinas con cojinetes de deslizamiento

En este capítulo aprenderemos acerca de cómo monitorear los cojinetes de deslizamiento; también conocidos como “cojinetes de película de fluido”, “cojinetes lisos”, “cojinetes de metal blanco”, “cojinetes de babbitt”, y posiblemente por otros nombres. Los cojinetes de deslizamiento se utilizan en una amplia variedad de maquinaria rotativa, como turbinas, generadores y compresores. Estas máquinas son típicamente críticas para el funcionamiento de la planta; por lo tanto, la detección de condiciones tales como roces, inestabilidades, desbalance y desalineación son muy importantes.

Mientras que las máquinas como motores, bombas y compresores más pequeños también pueden tener cojinetes de deslizamiento, en esta sección nos estamos centrando en máquinas que tienen sensores de no contacto instalados (también conocidos como sensores de proximidad).



Figura 12-1

Los acelerómetros se pueden instalar en estos cojinetes por una de dos razones:

- FO Con el fin de monitorear la vibración en máquinas más pequeñas con cojinetes de deslizamiento cuando el costo de instalación de los sensores de desplazamiento puede no ser justificable. En este caso, muchas de las reglas típicas del análisis de vibraciones se pueden utilizar para detectar desbalances, desalineaciones y otras condiciones de falla. La película de fluido entre el eje y el cojinete atenúa la vibración, por lo que el uso de un acelerómetro no es tan eficaz. Sólo las sondas de desplazamiento pueden ver el interior del cojinete e informar sobre la posición del eje en relación con el espacio libre disponible, y mostrar la órbita y la precesión del eje.



Figura 12-2 Sondas/sensores de proximidad

Ejemplo Los acelerómetros pueden instalarse en los cojinetes de deslizamiento en adición a los sensores de desplazamiento. La sonda de desplazamiento mide el movimiento entre la carcasa del cojinete y el eje, sin embargo, en determinadas situaciones, la carcasa del cojinete puede estar moviéndose en relación con el suelo. La adición de un acelerómetro proporcionará una indicación de cómo se mueve la carcasa y, por lo tanto, cómo se mueve el eje en relación con el suelo.

Los cojinetes de deslizamiento se han utilizado durante muchos años; de hecho, son el primer tipo de cojinete utilizado para facilitar la rotación del eje con fricción reducida.

El diseño básico consiste en un cilindro de metal, recubierto con un forro Babbitt de metal suave que encierra el eje, con una película de lubricante para reducir la fricción. Uno de los mayores desafíos ha sido apoyar la rotación a una variedad de velocidades sin que la película de aceite se vuelva inestable. Si existe la condición de “torbellino/remolino/batido de aceite”, los niveles de vibración pueden llegar a ser muy altos y pueden producirse daños. Si existe la condición de “látigo de aceite”, todo el sistema se volverá inestable muy rápidamente, lo que podría resultar en un fallo catastrófico.

A lo largo de los años, los cojinetes han evolucionado en el diseño para hacer frente a la estabilidad de la película de fluido. Algunos ejemplos de diseños de cojinetes son: cojinete de deslizamiento plano, de ranura axial 2 a 4, elíptico (agujero de limón), lóbulos 3 o 4, de presión estanco y cojinetes de almohadillas. Está fuera del alcance de este curso seguir discutiendo estos diseños.

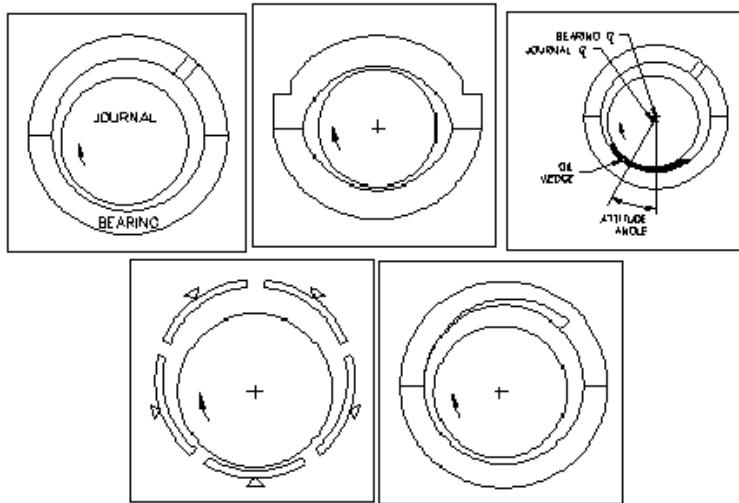


Figura 12-3 Varios diseños de cojinetes de deslizamiento

Cojinetes esféricos lisos

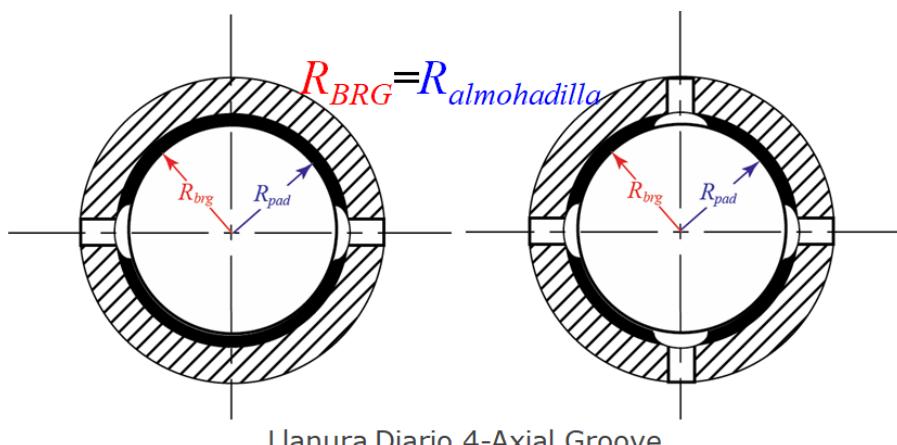


Figura 12-4 Cojinetes esféricos lisos

Los cojinetes esféricos lisos son de forma redonda.

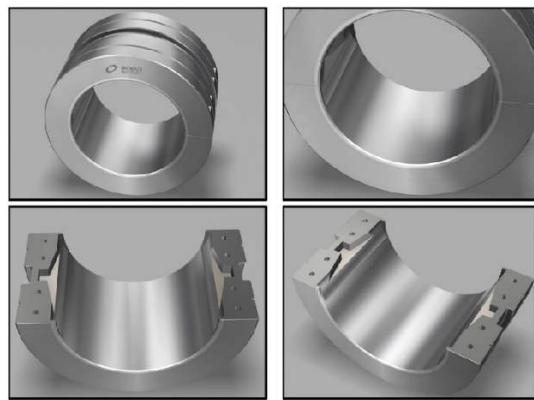


Figura 12-5 Cojinetes esféricos lisos

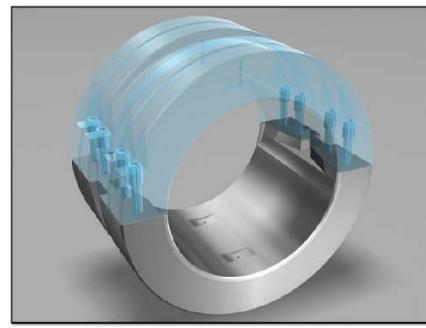


Figura 12-6 Cojinetes esféricos lisos con entradas de aceite

Observe las entradas de aceite en la parte inferior del cojinete liso en la figura anterior.

Cojinetes elípticos y de tres lóbulos

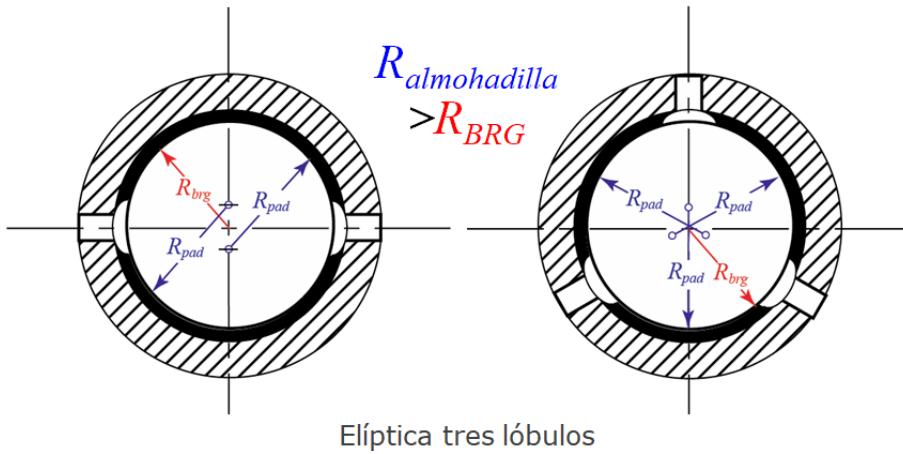


Figura 12-7 Cojinete elíptico y de tres lóbulos

Cojinetes elípticos y de tres lóbulos: Como se señaló anteriormente, los diversos diseños están dirigidos a mejorar la estabilidad.

Cojinetes de presión estanco

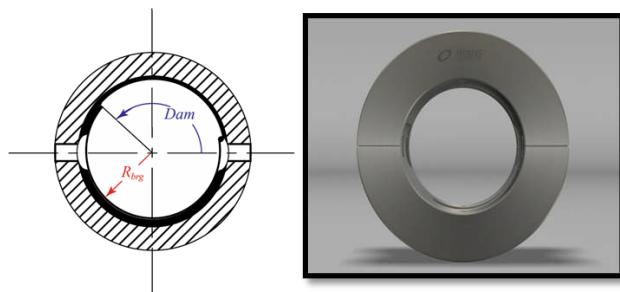


Figura 12-8 Cojinete de presión estanco

Cojinetes de almohadillas/zapatillas basculantes

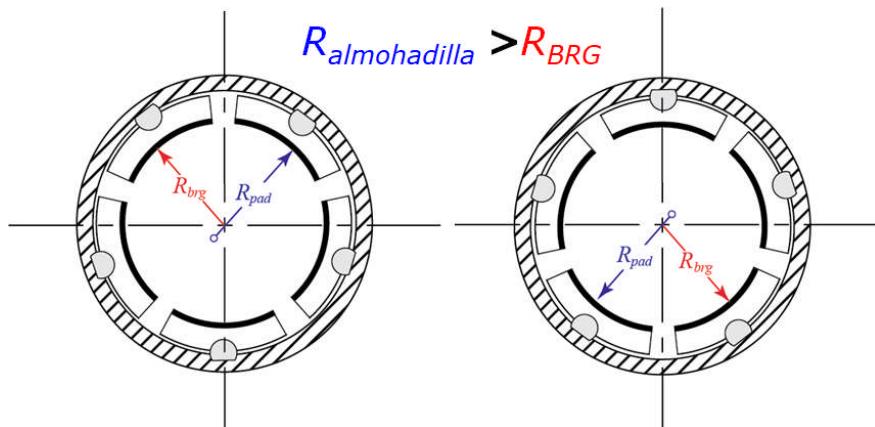


Figura 12-9 5 Cojinetes de almohadillas

Los cojinetes de almohadillas tienen zapatillas/almohadillas que se inclinan para cambiar el perfil de presión de la cuña de aceite con el fin de ayudar a mantener la estabilidad a medida que cambian las condiciones. Se pueden configurar como de “carga en la almohadilla” (arriba a la izquierda) o “carga entre almohadillas” (arriba a la derecha).

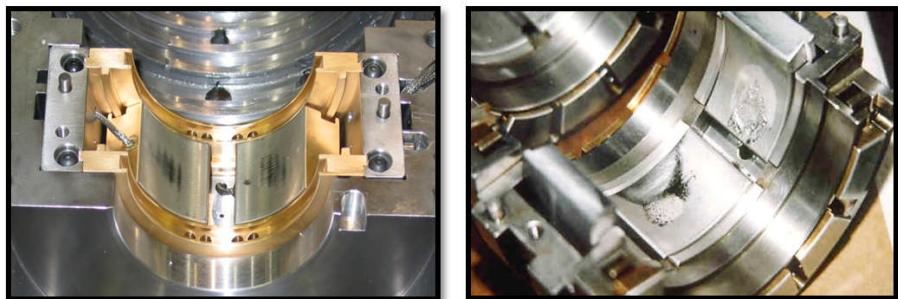


Figura 12-10 Cojinetes de almohadillas en configuraciones LBP y LOP

Cojinetes de empuje

Es posible que haya notado que los cojinetes de deslizamiento que hemos visto hasta ahora permiten que el eje se mueva en la dirección axial. También se utilizan cojinetes de empuje:

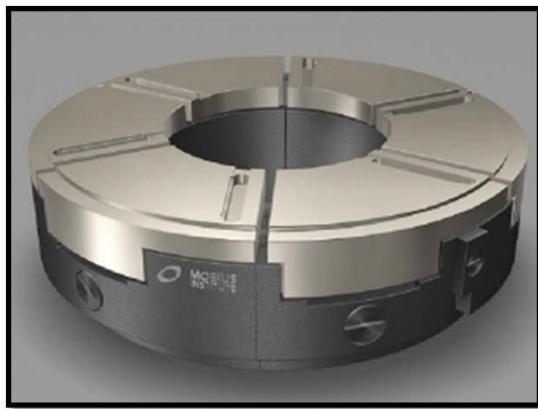


Figura 12-11 Cojinete de empuje axial

Sensores de proximidad - corrientes de eddy

Los sensores de corrientes de eddy (o de proximidad) se utilizan para medir el desplazamiento (distancia) entre la punta de la sonda y el eje. El sensor se instala permanentemente en la carcasa del cojinete; por lo tanto, el desplazamiento medido es una indicación del movimiento del eje dentro del cojinete.

Los sensores de proximidad utilizan un oscilador externo de alta frecuencia para inducir corrientes de eddy en la superficie del eje. Como su nombre indica, la sonda no se pone en contacto con el eje. El campo del electroimán induce corrientes en la superficie del eje que a su vez generan un campo electromagnético que es detectado por el sensor. La señal es más fuerte cuando el eje está más cerca de la punta del sensor. Cuando se opera en el rango lineal del transductor, la intensidad de la señal es directamente proporcional a la distancia entre el eje y la punta de la sonda.



Figura 12-12

Aquí hay un producto de muestra, que muestra la unidad de acondicionamiento de señal (oscilador y demodulador) y la sonda.



Figura 12-13

Señales disponibles en sensores de desplazamiento

La señal de la sonda está “demodulada”; las variaciones en la amplitud de frecuencias altas de la sonda (utilizada para inducir las corrientes de remolino) se convierten en señales de frecuencia más baja que nos informan sobre el movimiento dinámico del eje (el componente A.C.) y la distancia media entre la punta de la sonda y el eje (el componente D.C.).

La señal A.C. proporciona información valiosa sobre el movimiento dinámico del eje; es decir, cómo está vibrando. Podemos usar esta señal como cualquier otra señal A.C.; podemos mostrarlo como una forma de onda de tiempo, y podemos realizar un FFT para mostrar un espectro. Como pronto aprenderemos, podemos usar dos sondas, montadas a 90° una de la otra, para construir una órbita que muestre cómo se mueve el eje central a medida que gira.

La señal D.C. es una medida de la posición media del eje dentro del cojinete. Por ejemplo, mientras que la señal A.C. puede decirnos que el eje está girando con un movimiento circular, la señal D.C. nos dice dónde gira el eje; en la parte superior del cojinete, en la parte inferior, a la izquierda o a la derecha. Podemos aprender mucho sobre el estado de la máquina (y cualquier condición de falla) a través de la posición del eje dentro del cojinete y la trayectoria de movimiento del eje. Como aprenderemos, podemos hacer esto con la gráfica de línea central y la gráfica de órbita.

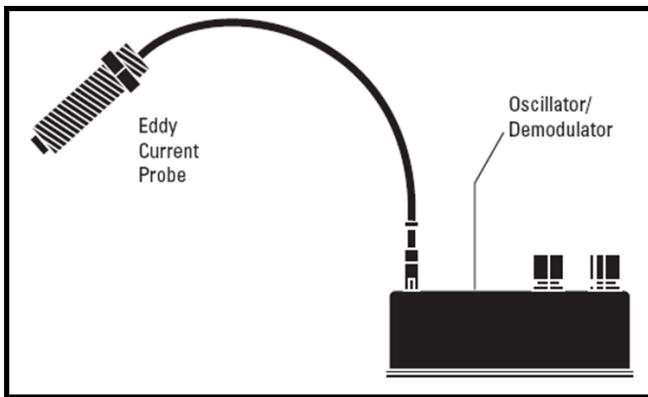


Figura 12-14

Sensibilidad del sensor (sonda) de desplazamiento

La sonda de desplazamiento tendrá una “sensibilidad” documentada que nos indicará la salida de tensión medida para un desplazamiento determinado. Por ejemplo, la sensibilidad puede ser de 200 mV/mil (o 7.87 V/mm), lo que significa que si el eje se moviera 1 mil (una milésima de pulgada) veríamos un cambio en el voltaje de 200 mV (o 0.2 voltios). Si el eje se moviera 5 mil pk-pk, mediremos 1 Volt pk-pk

El transductor tendrá un “rango lineal” documentado. Dentro de ese rango de desplazamiento, la salida de tensión será directamente proporcional al desplazamiento, por ejemplo, si se duplicara el desplazamiento, la tensión se duplicaría.

A continuación se muestra una curva de calibración de muestra para una sonda de proximidad:

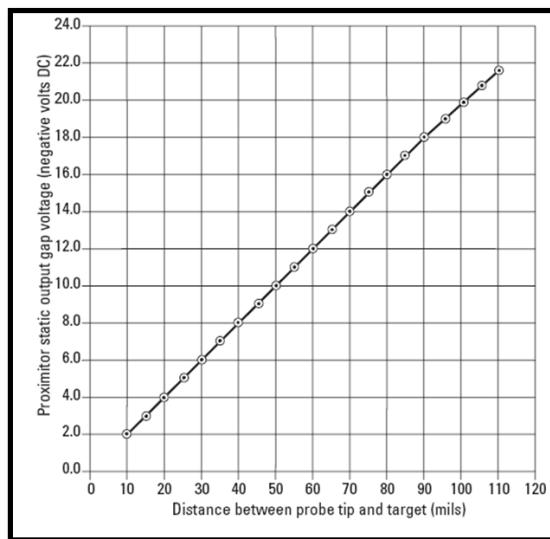


Figura 12-15

El transductor de desplazamiento debe instalarse de modo que su “punto de ajuste” esté en el centro del rango lineal del transductor. Si esto no se hiciera, el eje puede moverse fuera del rango lineal del transductor y el voltaje medido no proporcionaría una medición precisa del desplazamiento.

Por lo general, se instalan dos sondas de desplazamiento en el cojinete. Es importante que ambos transductores tengan la misma sensibilidad.

Polaridad del sensor de desplazamiento

Es importante tener en cuenta que la polaridad del transductor de desplazamiento es tal que si la distancia entre la punta del sensor y el eje disminuye, la tensión aumenta. Esto se debe a que la fuerza del campo electromagnético será más fuerte, y por lo tanto las corrientes de eddy serán más fuertes.

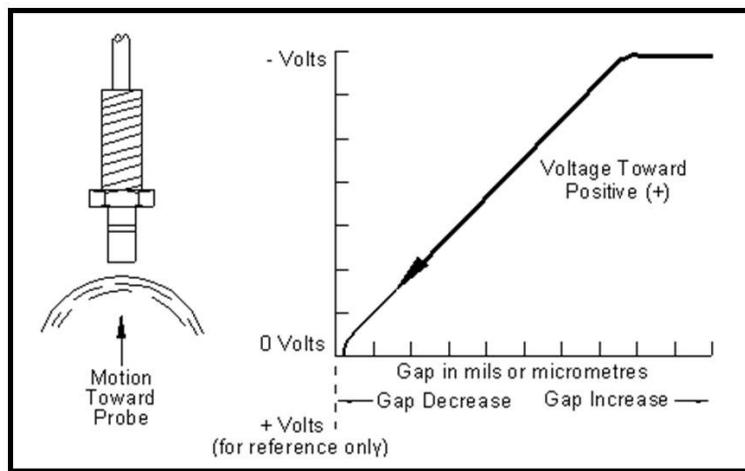


Figura 12-16

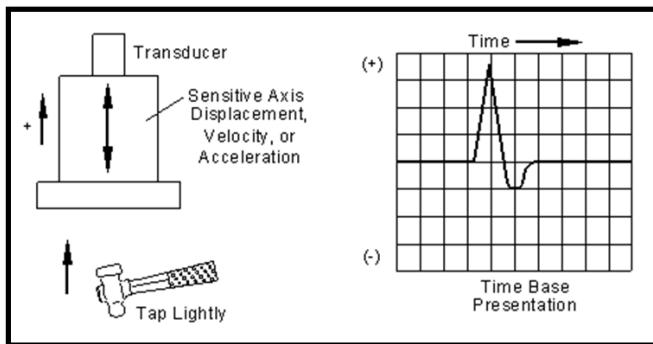


Figura 12-17

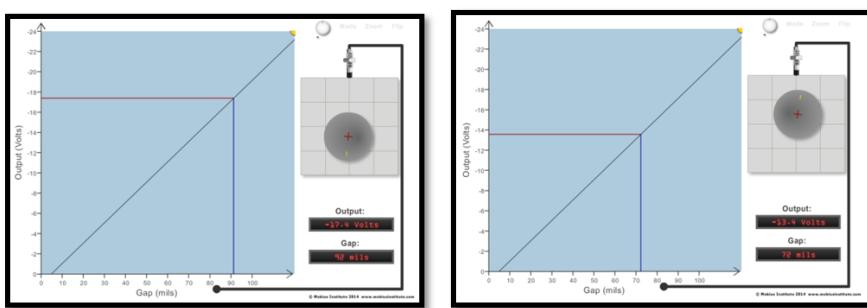


Figura 12-18 El voltaje incrementa a como el eje se acerca al sensor

En las figuras anteriores de nuestro simulador, el eje gráfico vertical está en voltios negativos. Por lo tanto, entre más alto en el eje vertical, más bajo el voltaje (un número negativo)

mayor). La imagen de la izquierda muestra el eje más lejos de la sonda que en la imagen de la derecha. El voltaje es más bajo (más arriba en el eje Y) en la imagen de la izquierda.

Convenciones de sensores de desplazamiento

Con el fin de generar fácilmente la visualización de la órbita, y determinar la posición del eje en dos dimensiones, es necesario montar las sondas (sensores) de desplazamiento ortogonalmente, es decir, 90° de separación.

Idealmente uno se montaría verticalmente y el otro horizontalmente; sin embargo, esto no siempre es posible. La construcción del cojinete puede requerir que las sondas se monten 45° a la derecha y a la izquierda de la parte superior del cojinete, o cualquier otra posición para ese caso.

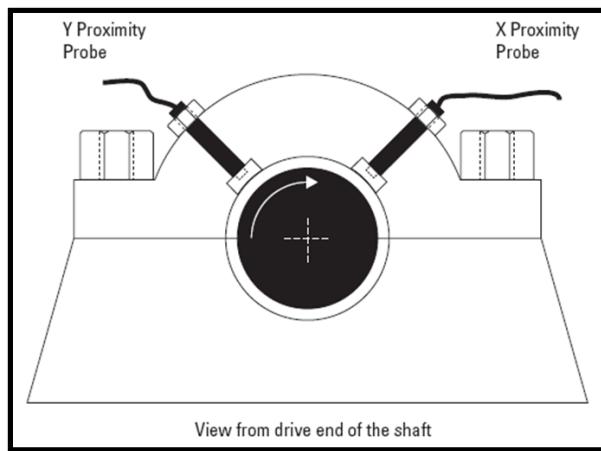


Figura 12-19

Una sonda se llama la sonda “Y”, y la otra sonda se llama la sonda “X”. Es necesario utilizar una convención para determinar cuál es la sonda “X” y “Y”. ¡La identificación errónea del sensor es una causa común de diagnóstico erróneo!

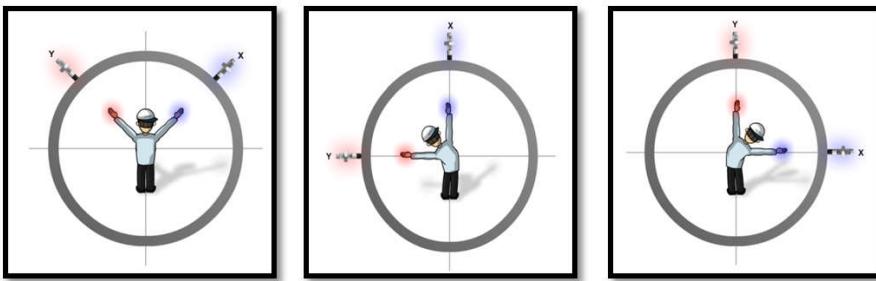


Figura 12-20 X-Y Convención de sensores

Siempre mire desde el conductor hacia el conducido. Coloque la cabeza entre las sondas, como en la figura anterior, y su mano izquierda apuntará a la sonda “Y” y su mano derecha apuntará a la sonda “X”.

Es posible que quien haya instalado las sondas en su máquina haya utilizado una convención diferente o simplemente etiquetó las sondas como él o ella deseaba. Si tiene alguna duda sobre la calidad de los datos no es una mala idea verificar la instalación. Al instalar sondas también es muy importante tomar fotografías y documentar claramente la instalación.

La siguiente ilustración muestra las sondas “X” y “Y” para una gama de posibles posiciones de instalación. Estas sondas deben estar numeradas. Tenga en cuenta que la convención se basa en observaciones del conductor (por ejemplo, la turbina).

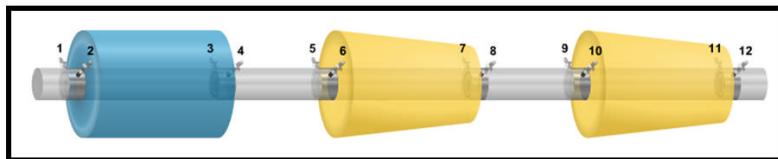


Figura 12-21

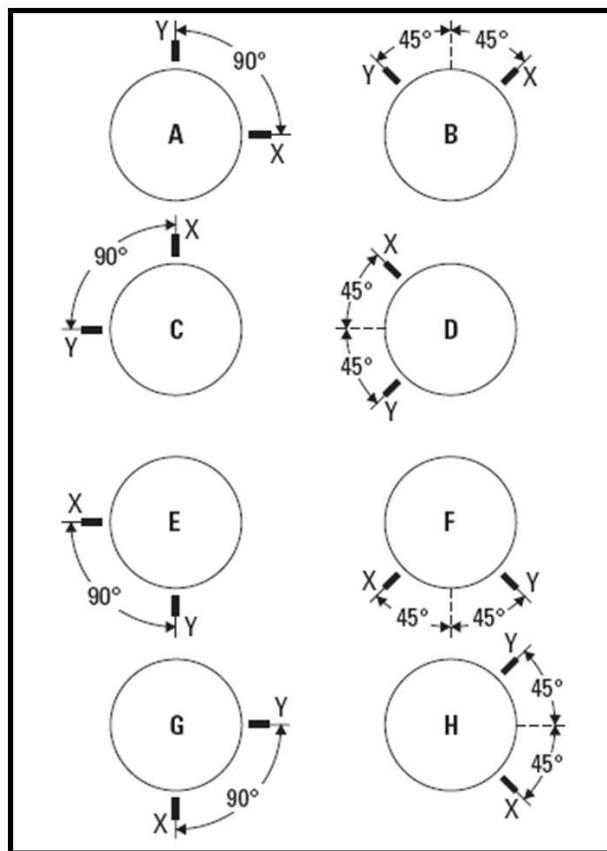


Figura 12-22

* Figuras cortesía de Machinery Malfunction Diagnosis and Correction, Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries, Robert Eisenmann Sr. P.e. & Robert Eisenmann Jr. PIR Prentice Hall, Nov. 97, capítulo 6 y de “Reglas estandarizadas para la medición de maquinaria rotativa”, Bently Nevada

Keyphasor: referencia una vez por revolución

Para realizar el análisis de órbita (y balanceo), es necesario tener una referencia de sincronización una vez por revolución. Necesitamos esta referencia para que la electrónica de medición (y visualización) pueda determinar cuándo el eje ha completado una revolución completa, y para que podamos determinar cómo se mueve el eje en relación con la referencia. Por esta razón, las pantallas de órbita normalmente indicarán la posición de la referencia de temporización a través de un “punto” brillante en la forma de la órbita, como se describe con mayor detalle más adelante en este capítulo.

La señal de una vez por revolución se obtiene por una de dos maneras. Podemos utilizar cinta reflectante (o algún otro tipo de superficie reflectante o en contraste) y un tacómetro óptico

láser o fotoeléctrico. Si bien este método es común al monitorear el “balanceo de las máquinas de planta”, es menos común en esta aplicación.

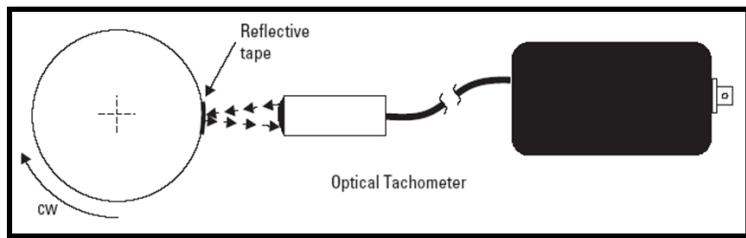


Figura 12-23

Más comúnmente podemos utilizar una tercera sonda de desplazamiento que está en línea con la cuña del eje. La compañía De Bently Nevada lo llama “Keyphasor™”.

Si la cuña sobresale, entonces mediremos un voltaje creciente una vez por revolución.

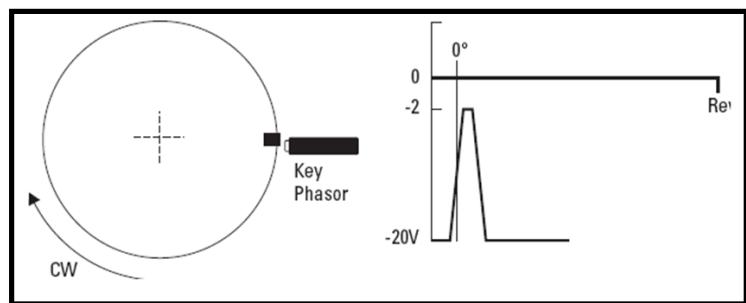


Figura 12-24

Si la cuña está empotrada, entonces mediremos una caída de tensión una vez por revolución.

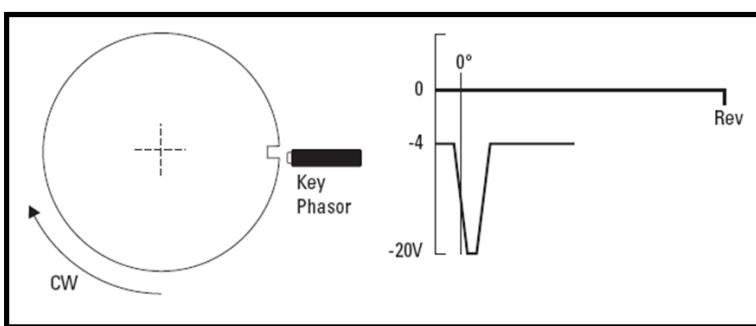


Figura 12-25

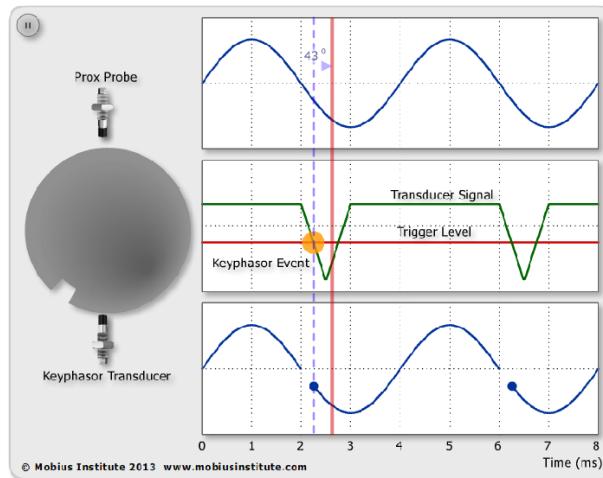


Figura 12-26 Punto de Keyphasor en la forma de onda

Análisis de vibración de máquinas con cojinetes de deslizamiento

Es cierto que un acelerómetro montado en la carcasa del cojinete proporcionará una señal útil que se puede utilizar para determinar si la vibración ha cambiado sustancialmente. Y es cierto que la señal de aceleración se puede integrar dos veces para obtener desplazamiento; sin embargo, debe entenderse que las lecturas de desplazamiento no serían las mismas que las lecturas de la sonda de desplazamiento. El acelerómetro mide la vibración en la carcasa del cojinete. La carcasa del cojinete vibrará como resultado de las fuerzas dentro del cojinete, sin embargo, debido al efecto amortiguador de la película de fluido, la vibración se atenuará y la respuesta de baja frecuencia será limitada.



Figura 12-27 Utilizando un acelerómetro

La medición de aceleración se puede utilizar para ayudar en la evaluación de las condiciones cuando las sondas de desplazamiento no están instaladas. Y cuando se instalan sondas de desplazamiento, la medición de aceleración todavía puede proporcionar datos útiles sobre cómo se mueve la carcasa en relación con el suelo.

También es posible combinar las mediciones tomadas de la carcasa del cojinete con los datos que recopila la sonda de proximidad para calcular cómo se mueve el eje en el espacio. Esto se denomina lectura de vibración absoluta. A veces se logra utilizando una sonda de velocidad en la carcasa montada en línea con las sondas de proximidad. La sonda de velocidad mide cómo se mueve el soporte del cojinete, la sonda de proximidad mide cómo se mueve el rotor en el cojinete y la combinación de los dos muestra cómo se mueve el rotor en el espacio.

Sin duda, aunque son caros de instalar, las sondas de desplazamiento son por mucho el transductor más útil para esta aplicación. Como ya se ha indicado, las sondas de desplazamiento proporcionan información sobre la posición del eje dentro del cojinete; cómo se mueve el eje durante cada rotación y la posición física (promedio) del centro del eje.

Comprendiendo las lecturas de desplazamiento

Primero debemos ser muy claros sobre la información proporcionada por las sondas de desplazamiento. Visualizar el movimiento del eje dentro del cojinete puede ser confuso. Las sondas de desplazamiento proporcionan una medida del desplazamiento entre la punta de cada sonda y el borde del eje. Estamos midiendo un espacio muy pequeño. Hay una manera más fácil de visualizar lo que estamos tratando de medir.

Puntos clave

- Los estudiantes deben ser conscientes de que existen diferentes diseños de cojinetes para atacar problemas de estabilidad, vibración y amortiguación, etc.
 - No es necesario conocer los diferentes tipos de cojinetes
 - Tenga en cuenta los cojinetes de empuje
- Los estudiantes deben entender la aplicación y el funcionamiento de las sondas de proximidad
 - Calibración y sensibilidad
 - A.C. y D.C. Componentes
 - Instalación (sondas ortogonales), Keyphasor, etc.
 - Uso como Keyphasor
- Los estudiantes deben estar al tanto de las convenciones de nomenclatura y numeración de las sondas
- Los estudiantes deben ser conscientes de la diferencia entre las mediciones de sensores de proximidad y las mediciones de vibración en la carcasa.
 - Vibración absoluta del eje

Trazados de órbita, o figuras de Lissajous

Las gráficas de órbita (también denominadas “figuras de Lissajous”) proporcionan una indicación del movimiento dinámico del centro del eje. Podemos aprender mucho sobre el funcionamiento de la máquina (y el estado del eje) con la forma de la órbita, los cambios en la órbita de un momento a otro y de los cambios en la órbita durante un período de tiempo más largo.

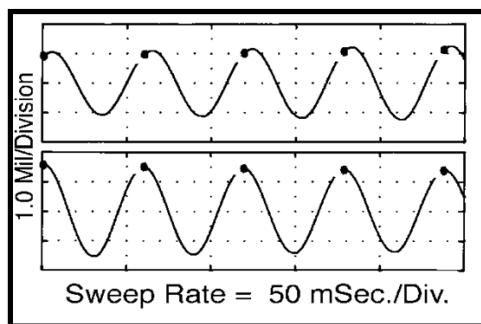


Figura 12-28 Forma de onda de cada sensor con punto del Keyphasor

En resumen, el gráfico de órbita se genera trazando la señal A.C. de desplazamiento en “Y” contra la “X”, y la posición de la referencia del eje (por ejemplo, la cuña) está representada por un punto brillante.

Por ejemplo, si las señales A.C. en “X” y “Y” son iguales en amplitud, la órbita sería de forma circular (porque el eje se mueve una cantidad igual en las direcciones horizontal y vertical a medida que gira).

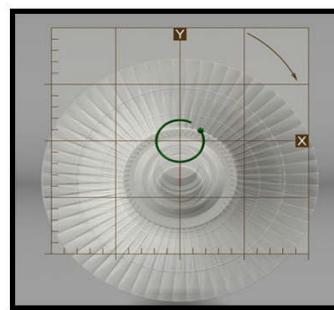


Figura 12-29 Órbita circular

Eso plantea un punto muy importante. Si la sonda “Y” está montada en la parte superior del cojinete (12:00 en punto), y la sonda “X” está montada en el costado del cojinete (3:00 en punto), entonces la señal “Y” representa el movimiento vertical y la sonda “X” representa el

movimiento horizontal. Sin embargo, si las sondas están montadas en diferentes posiciones, el sistema de monitoreo (o software) debe ajustar las lecturas para proporcionar una verdadera posición de movimiento vertical y horizontal; que es necesario para relacionar la forma de la órbita con las fuerzas físicas (por ejemplo, precarga).

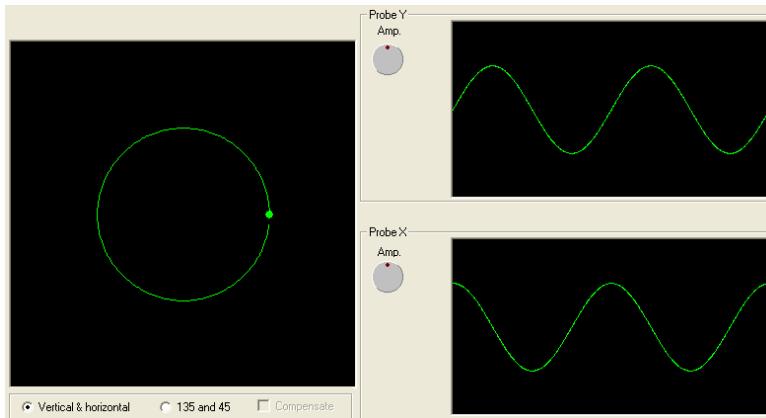


Figura 12-30

Uso de osciloscopios

Las gráficas de órbita se generaban originalmente utilizando osciloscopios. La sonda “Y” estaba conectada al canal “Y” del osciloscopio (o canal ‘1’), y la sonda “X” estaba conectada al canal “X” del osciloscopio (o canal ‘2’). El osciloscopio se puso entonces en modo órbita “Figura de Lissajous” donde el canal “X” se graficó contra el canal “Y”, y el resultado fue la pantalla de la órbita.

Si está disponible, la señal del tacómetro estaba conectada al canal “Z”, a menudo llamado “entrada de intensidad”. El pulso de voltaje una vez por revolución haría que la intensidad (brillo) de la pantalla aumentara, lo que resultaría en un punto brillante en la órbita (figura de Lissajous).

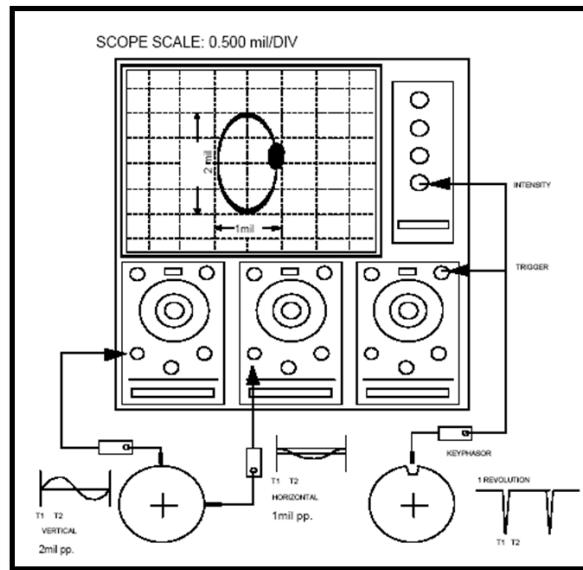


Figura 12-31

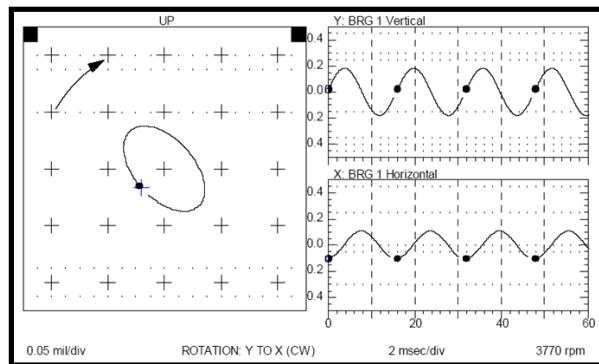


Figura 12-32

Sistemas de monitoreo

El uso generalizado de diagramas de órbita (y parcelas de línea central) fue pionero por la compañía Bently Nevada (ahora propiedad de General Electric). Bently Nevada llevó a cabo una gran cantidad de investigaciones sobre la interpretación de las formas de órbita y la forma de las gráficas de línea central. Bently Nevada también investigó la dinámica de los ejes flexibles de las turbinas. El curso de Categoría IV está diseñado para proporcionar un enfoque mucho mayor en la dinámica del rotor, órbitas, diagramas de línea central y más.

Varios fabricantes ahora proporcionan productos comerciales que capturan datos de sondas de desplazamiento y proporcionan el software necesario para estudiar las gráficas de órbita y los diagramas de línea central. El enfoque principal de estos sistemas es la protección de la máquina; monitorear las lecturas de desplazamiento para que la máquina pueda apagarse (o “dispararse”) si se superan los límites predefinidos.

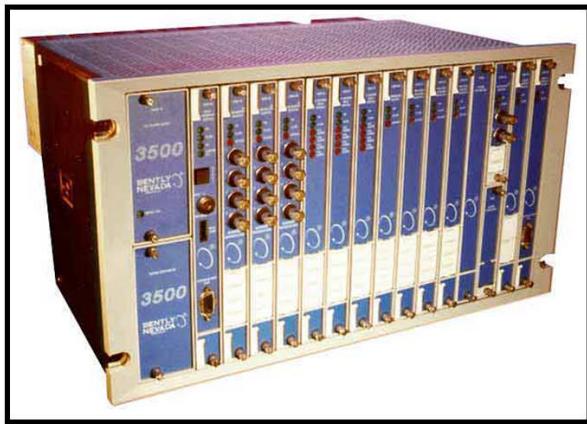


Figura 12.33

Señales directas y filtradas

La señal de vibración contiene toda la vibración (cambios dinámicos en el desplazamiento) detectados por las sondas de desplazamiento. Al igual que con la vibración medida a partir de acelerómetros, puede contener vibración de una gama de frecuencias; vibración relacionada con la velocidad de giro (IX), vibración de órdenes de velocidad de giro (2X, 3X, etc.), vibración no síncrona y ruido.

Al estudiar la vibración de las sondas de desplazamiento podemos aprender mucho sobre la máquina centrándonos en la vibración IX, y podemos aprender de las órdenes/múltiplos de velocidad de giro. Por esta razón, la mayoría de los sistemas proporcionarán dos fuentes de vibración; directa y filtrada.

La vibración directa es la vibración bruta de las sondas de desplazamiento. Contiene toda la información de vibración. En algunas aplicaciones, estos datos tendrán detalles que pueden complicar el proceso de análisis.

La vibración filtrada se toma de la salida de un filtro de seguimiento. El filtro de seguimiento monitoreará el tacómetro una vez por revolución y aplicará un filtro de paso banda para que solo quede la vibración en IX. El sistema de filtrado también puede ser capaz de extraer vibración 2X y 3X – los sistemas varían y usted debe comprobar la capacidad de su sistema.

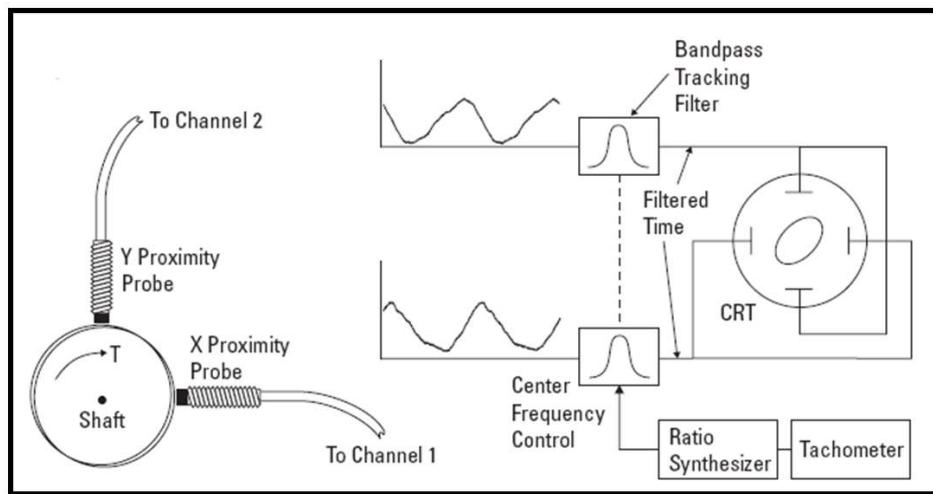


Figura 12-34

Las siguientes pantallas de órbita se crearon a partir del mismo par de sondas de desplazamiento. El primer conjunto de datos son los datos directos sin filtrar. El segundo conjunto de datos se filtra 1X vibración.

La forma de la órbita es similar en ambos casos, pero la órbita filtrada es mucho más limpia. La órbita se muestra como una sola rotación del eje. (La órbita puede ser en realidad un promedio de los datos de múltiples rotaciones del eje, o en realidad puede tener varias órbitas superpuestas, o puede ser una pantalla en vivo que muestra una órbita a la vez).

La visualización de la órbita activa también es muy importante. Como pronto sabremos, la posición de la referencia de tacómetro (el punto Keyphasor) puede moverse con el tiempo.

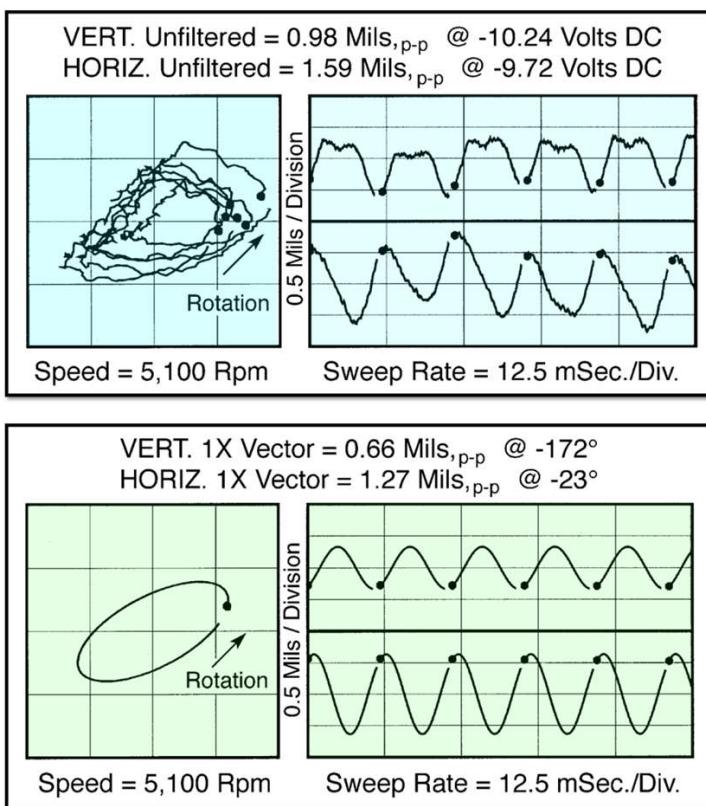


Figura 12-35

Compensación de imperfecciones

Anteriormente describimos cómo funcionan las sondas de desplazamiento; induciendo corrientes de eddy en la superficie del eje y luego leyendo la radiación electromagnética para medir la distancia entre la punta de la sonda y el eje. La intensidad de la señal está muy influenciada por el desplazamiento, sin embargo, la señal también se ve afectada por arañazos en la superficie del eje, y por puntos planos o cualquier otra imperfección.

Por lo tanto, la señal de la sonda de desplazamiento contendrá variaciones de tensión relacionadas con estas imperfecciones. Se supone que la pantalla de órbita representa el movimiento del centro del eje, por lo que necesitamos eliminar el “ruido” generado por desperfectos.

El ruido se elimina registrando primero la vibración mientras el eje se gira muy lentamente; a una velocidad en la que no puede haber fuerzas dinámicas ni movimiento debido al desbalance, desalineación, etc. Usando la señal del tacómetro como referencia, registramos la posición de las imperfecciones en una rotación del eje. Cuando el eje gira a velocidades más altas, la

vibración que registramos es una combinación de los datos de imperfecciones y los datos dinámicos (es decir, los datos que representan el movimiento del centro del eje). Si restamos los datos de fallas registrados (o datos de balanceo lento) de los datos de mayor velocidad, lo que queda es un registro del movimiento del eje (dentro de las limitaciones del proceso descrito).

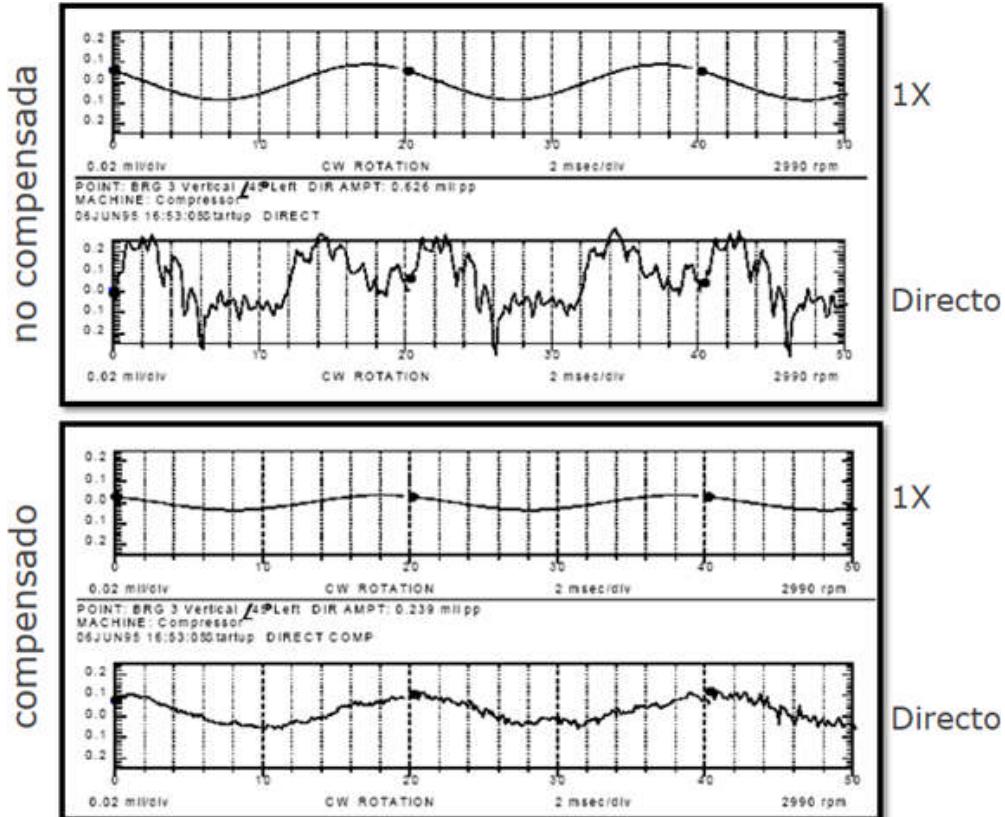


Figura 12-36

Uso de recopiladores o analizadores de datos portátiles para realizar análisis de órbita

Aunque hay sistemas de protección y sistemas de diagnóstico disponibles en el mercado que han sido diseñados para abordar específicamente las funciones descritas hasta ahora, también es posible realizar análisis de órbita con la mayoría de la recopilación de datos portátiles de dos canales (o analizadores). Ahora investigaremos cómo se pueden utilizar estos sistemas para realizar análisis de órbita.

Hay que decir que podemos crear órbitas a partir de datos de acelerómetros, así como de sondas de desplazamiento. A menudo nos interesa saber cómo un punto de una estructura se

está moviendo físicamente. Por ejemplo, sabemos que si comparamos los datos verticales con los horizontales, esperamos un movimiento circular si la máquina está desbalanceada. Podemos comprobar una diferencia de fase de 90 grados, o podemos usar una pantalla de órbita y buscar una gráfica circular.

Los analizadores normalmente le darán la opción de usar datos directos o datos filtrados. El analizador utilizaría una entrada de tacómetro para extraer la vibración 1X. Alternativamente, podemos usar un F_{max} bajo para filtrar los datos de mayor frecuencia y bajar la resolución (por ejemplo, 100 líneas de resolución) con el fin de aumentar la velocidad de la medición.

Determinar el F_{max}

Para entender la relación entre F_{max} , la resolución y el número de revoluciones del eje, necesitamos revisar la fórmula que se proporciona a continuación:

$$T = T_s \times N = \frac{N}{F_s} = \frac{N}{2.56 \times F_{max}} = \frac{LOR}{F_{max}}$$

La variable 'T' representa el intervalo de tiempo; la cantidad de tiempo necesario para recopilar el registro de tiempo, que a su vez se utiliza para generar el espectro. Como puede ver, si el F_{max} es más alto, el intervalo de tiempo 'T' será más corto, y viceversa. También puede ver que si el ajuste de líneas de resolución (LOR) es mayor, el intervalo de tiempo 'T' será más largo y viceversa.

Estamos interesados en el intervalo de tiempo porque eso nos dice cuántas veces el eje girará durante la prueba. Si sólo tenemos una rotación del eje la pantalla será muy clara. Las rotaciones adicionales proporcionarán una indicación de la consistencia de la trayectoria (orbita) de rotación. El tiempo para una rotación del eje es 60/RPM (o 1/[velocidad en Hz]). Por ejemplo, si la velocidad de la máquina era de 1785 CPM (aproximadamente 30 Hz), el tiempo para una rotación es de 1/30 o 0.033 segundos.

Una forma de calcular el ajuste ideal es comenzar con una medición de baja resolución; 100 líneas de resolución. Esto garantiza la medición más rápida posible: no necesitamos una resolución más alta.

Para una rotación del eje, por lo tanto, el F_{max} es igual a:

$$\frac{LOR}{T} = \frac{100}{\left[\frac{1}{Speed_{HZ}} \right]} = Speed_{HZ} \times 100$$

Para rotaciones adicionales del eje, la ecuación se convierte en:

$$F_{max} = \frac{Speed_{HZ}}{[\#revolutions]}$$

Ejemplo: Velocidad = 25 Hz y LOR a 100

$$F_{\max} = 2500 \text{ Hz para una revolución}$$

$$25 \times \frac{100}{1} = 2500 \text{ Hz}$$

$$F_{\max} = 250 \text{ Hz para 10 revoluciones}$$

$$25 \times \frac{100}{10} = 250 \text{ Hz}$$

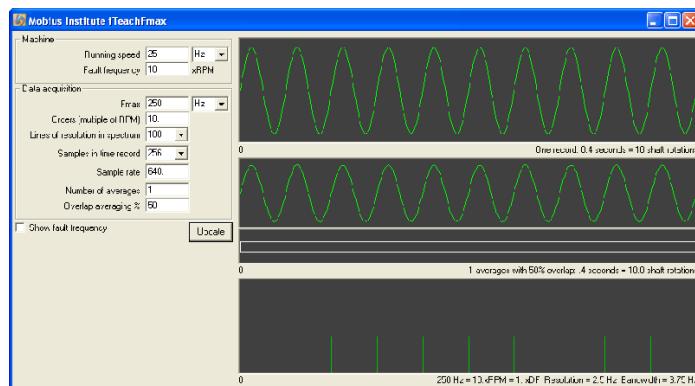


Figura 12-37

Si desea filtrar la vibración por encima de 1X (suponiendo que su colector/analizador no proporciona una opción filtrada), puede ajustar el F_{\max} ligeramente por encima de la velocidad de la máquina. Si la velocidad de la máquina es de 30 Hz, la F_{\max} podría ser de 40 Hz (tendrá que comprobar las opciones del analizador). Si utiliza 100 líneas de resolución, puede calcular el número de revoluciones de la siguiente manera:

$$\#revolutions = Speed_{Hz} \times \frac{100}{F_{\max}}$$

Como se puede ver, si F_{\max} es sólo ligeramente más alto que la frecuencia de giro, el número de revoluciones estará cerca de las líneas de resolución (LOR) - un número alto. Esto puede no proporcionar una visualización de órbita muy clara.

Uso del promedio síncrono de tiempo (TSA)

Si su recopilador/analizador de datos ofrece la opción de promedio sincrónico de tiempo, debe utilizarse para proporcionar el filtrado que deseamos. Filtrará toda vibración que no sea sincrónica con la velocidad de funcionamiento de la máquina. Si el F_{\max} se establece en alto, la órbita incluirá el 1X, 2X, 3X y otras órdenes. Si el F_{\max} se establece por encima de 1X y por debajo de 2X, el resultado será una pantalla de órbita limpia.

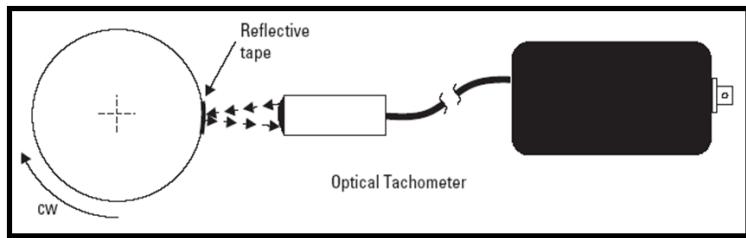


Figura 12-38

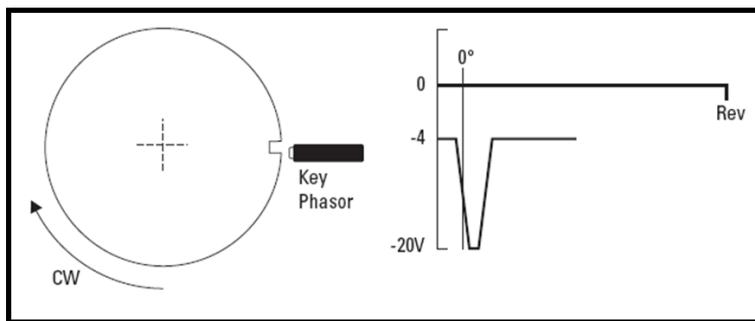


Figura 12-39

Análisis de la línea central del eje mediante el voltaje D.C.

Primero, imagine un punto en el centro del eje. En reposo (es decir, la máquina detenida), el eje hará contacto con la parte inferior del cojinete – esta es la posición más baja posible para el eje, y por lo tanto es el punto más bajo que el centro del eje puede ir. Si tuviéramos que medir la tensión de las dos sondas de desplazamiento, podemos utilizar esta lectura como punto de referencia para la parte inferior del cojinete.

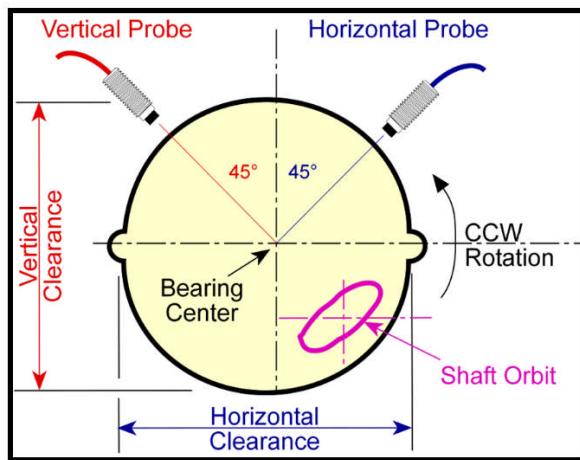


Figura 12-40 Diagrama de línea de centro

Si ahora pudiéramos rodar el eje alrededor de las dimensiones internas del cojinete para que siempre hiciera contacto con el cojinete, y leyéramos continuamente la tensión de D.C., podríamos dibujar un círculo (asumir un perfil de cojinete circular) que representa los límites de movimiento para el eje. A pesar de que nuestras lecturas están entre la punta de la sonda y la superficie del eje, podemos extrapolar al centro del eje. Ahora tenemos un diagrama circular que muestra los límites de movimiento del centro del eje.

Por supuesto, no podemos realizar esa prueba en la realidad, sin embargo, conociendo las holguras del cojinete aún podemos crear el mismo gráfico. Este círculo es el mismo círculo que normalmente se muestra en los diagramas de línea de centro. Por lo tanto, con las lecturas del componente D.C. podemos determinar dónde, en relación con los límites del cojinete, se encuentra el eje. Podemos saber cómo se ha movido mientras aumentaba la velocidad, y cuando agregamos la información de la órbita, podemos determinar si el eje está rozando el interior del cojinete (o amenazando con hacerlo).

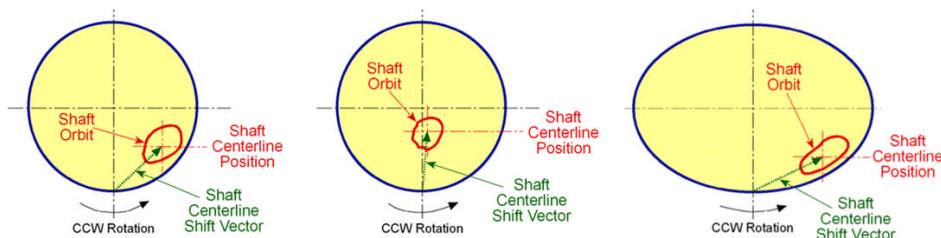


Figura 12-41 Diagrama de línea de centro para varios tipos de cojinetes

Por lo tanto, las gráficas de línea constructiva representan el movimiento del centro del eje (el centro medio, ignorando el movimiento dinámico), y el trazado de órbita muestra el movimiento dinámico del centro del eje.

Realizando la prueba de la línea central

Cuando la máquina está en reposo o se está volteando lentamente (menos de 100 rpm), se toma la lectura de referencia para representar la parte inferior del cojinete. A medida que aumenta la velocidad de la máquina, las lecturas posteriores se toman de las dos sondas y del tacómetro (Keyphasor) con el fin de determinar la velocidad. La posición cambiante de la línea central del eje se traza y las RPM se anotan en el trazado.

En circunstancias normales, con rotación en sentido de las manecillas del reloj, el eje debe levantarse y moverse hacia la izquierda.

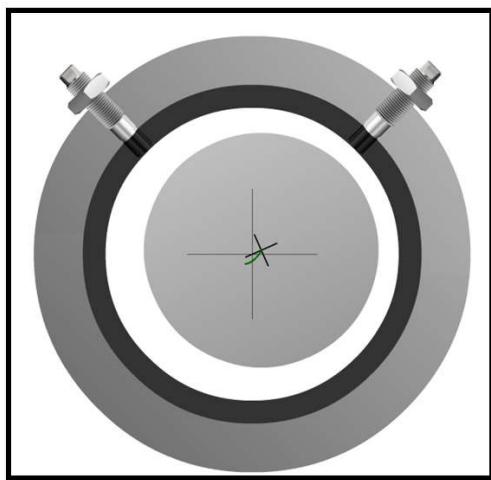


Figura 12-42 ¿Dónde está el eje en el cojinete?

Relación de excentricidad ‘ ϵ ’

La posición del eje se puede representar mediante un número llamado “relación de excentricidad del eje”. Es una relación que indica dónde se encuentra el eje en relación con el centro del cojinete. Un valor de '0' indica que el centro del eje se encuentra en el centro del cojinete. Un valor de '1' indica que el centro del eje está en uno de los límites extremos del cojinete, es decir, está tocando la superficie del cojinete.

Una tendencia de disminución de la relación de excentricidad ($\epsilon \rightarrow 0$) indica un problema potencial de estabilidad. Por el contrario, una relación de excentricidad creciente ($\epsilon \rightarrow 1$) sugiere que el rotor se está acercando a las restricciones de la pared del cojinete.

Los diagramas de línea central se utilizan para monitorear la posición del centro del eje a medida que la máquina se acelera, mientras se opera a su velocidad, y mientras se desacelera hasta que se detiene. Podemos aprender mucho sobre la máquina observando el camino tomado durante el arranque.

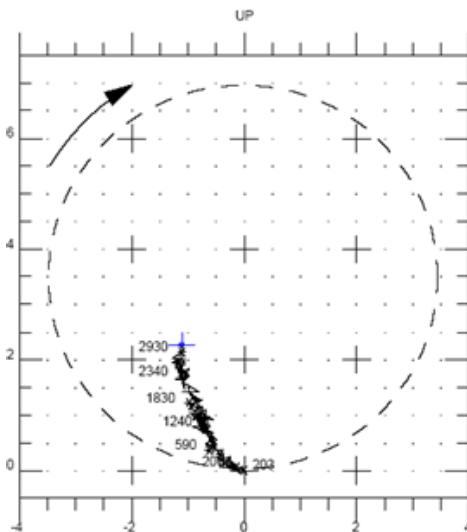


Figura 12-43

Puntos clave

- Los estudiantes deben entender la gráfica de órbita y el punto keyphasor en detalle
 - Punto y entrehierro muestran la dirección de la precesión
 - Se utiliza el componente A.C. de los sensores
- Los estudiantes deben entender la diferencia entre las órbitas directas y filtradas.
- Los estudiantes deben entender la compensación por defectos
- Los estudiantes deben entender la gráfica de línea central del eje en detalle
 - Se utiliza el componente D.C. de los sensores
 - Muestra la posición media del eje en el cojinete
 - Comprender la relación de excentricidad
 - La posición saludable del eje dependerá del diseño del cojinete
 - Dirección de rotación del rotor

Diagnóstico de fallas con órbitas y análisis de línea central

La siguiente es una guía general para el análisis de órbita:

- Las gráficas de órbita suelen mostrar múltiples revoluciones del eje (por ejemplo, 8 revoluciones).
- Cada punto Keyphasor indica una revolución.
- Una órbita normal debe ser ligeramente elíptica con un punto Keyphasor y un nivel de vibración bajo.
- Las órbitas distorsionadas o retorcidas generalmente se deben a rozamientos o runout.
- Múltiples puntos Keyphasor indican una vibración subsincrónica.

Diagnóstico de precargas con análisis de órbita

Usando una combinación de trazados de línea central (para ver cómo se mueve el eje durante el arranque y cuando gira a velocidad de operación), y la forma de la órbita, podemos evaluar si existe precarga.

Ejemplo uno: Una órbita de una máquina “en buen estado”

A continuación se muestra un ejemplo de una visualización de órbita y una gráfica de línea central de una máquina operando correctamente. Tenga en cuenta las siguientes características:

- 1 La línea central se ha movido hacia arriba y hacia la izquierda (está girando en el sentido de las agujas del reloj).
- 2 La relación de excentricidad es de aproximadamente 0.5, lo que significa que el eje gira alrededor de un punto que está a medio camino entre el centro del cojinete y la pared del cojinete.
- 3 La órbita tiene forma elíptica.
- 4 La órbita directa es una forma similar a la órbita filtrada, lo que indica que la vibración está dominada por una vibración 1X.

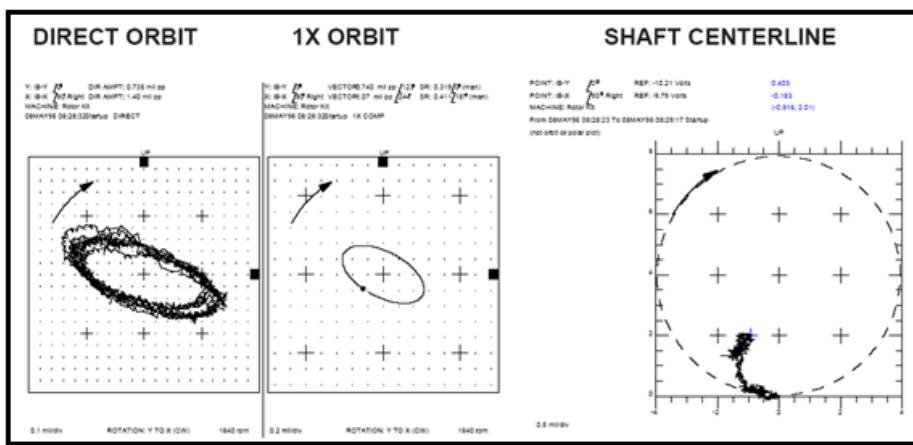


Figura 12-44

La órbita es más ancha que alta, lo que significa que las fuerzas de restricción son más altas en el plano vertical (gravedad) que horizontal – hay más movimiento en el plano horizontal.

Ejemplo dos: Una órbita de la máquina con precarga

Este conjunto de datos indica que existe un problema. El centro del eje se ha movido más hacia arriba dentro del cojinete – ahora está en el cuadrante superior izquierdo. La relación de excentricidad es mayor. Estos datos indican que puede existir una precarga. La forma de órbita (en los cojinetes internos) es común cuando existe desalineación entre dos componentes

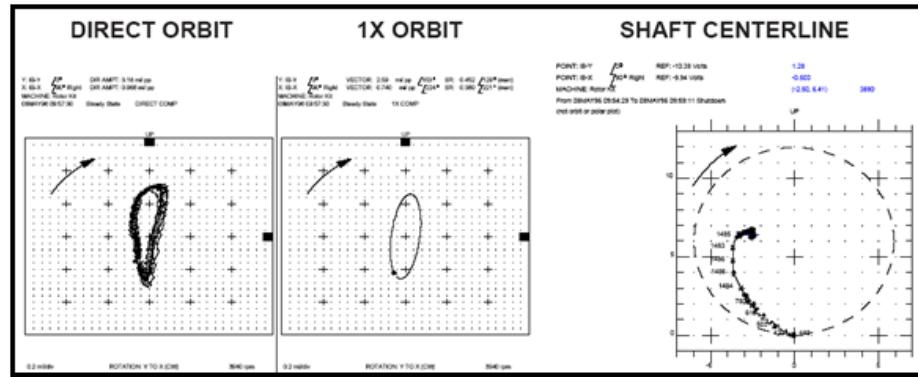


Figura 12-45

Ejemplo tres: Una órbita de una máquina con una gran precarga

Estos datos son representativos de la gran precarga. Se puede ver que el eje está cerca de la pared del cojinete. La relación de excentricidad es ahora de aproximadamente 0.95.

Podemos ver en la órbita filtrada 1X que hay un movimiento significativamente mayor en la dirección vertical en comparación con la dirección horizontal.

La forma de órbita directa es muy diferente a la órbita filtrada, lo que indica que ahora tenemos otras fuentes de vibración. De hecho, debido a la desalineación ahora tenemos una vibración 2X más alta.

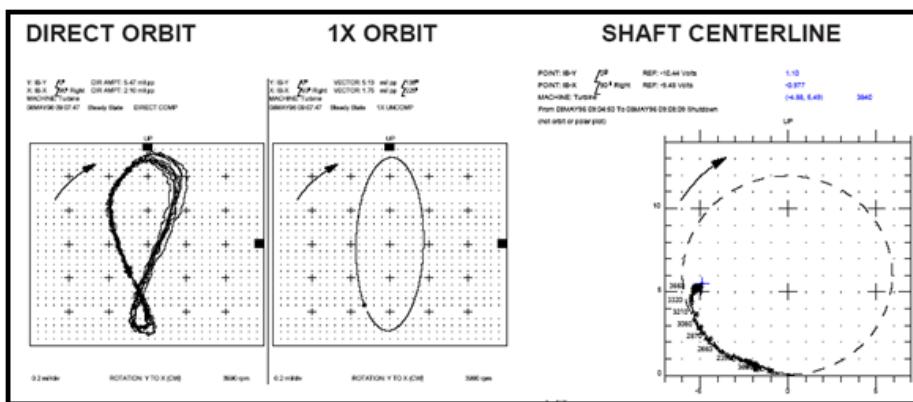


Figura 12-46

Basándonos en la forma de la órbita podemos visualizar el eje moviéndose en la misma dirección que la dirección de rotación durante parte del tiempo, y contra la dirección en parte del tiempo. Esto se llama precesión inversa y se explicará con mayor detalle en breve.

Resumen de precargas

Las precargas radiales pueden ser causadas por la gravedad, las fuerzas del fluido, cargas anormales del cojinete (especialmente los tipos ajustables internamente), los sellos, la desalineación y los efectos de la tensión de la tubería en la propia máquina.

Los diagramas de línea central que muestran una alta excentricidad son un buen indicador de precargas altas. Las órbitas 1X altamente elípticas y las órbitas directas “figura 8” también son indicadores muy buenos de que existe una alta precarga.

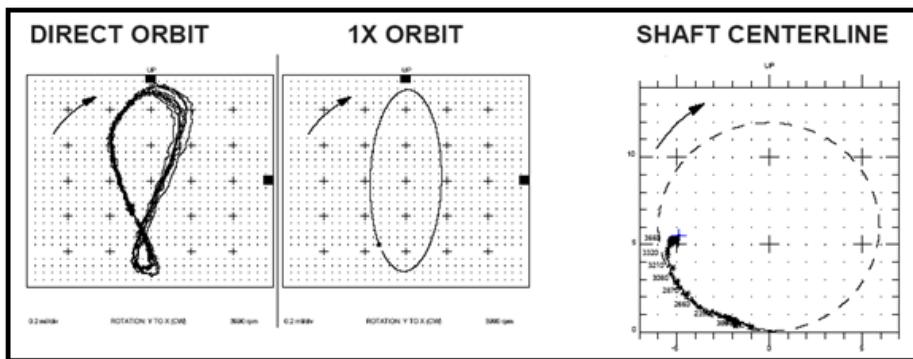


Figura 12-47

Dirección de la órbita y precesión de vibración

La dirección de la órbita debe ser la misma que la dirección de la rotación del eje. Puede determinar la dirección de la órbita a través del orden “blanco-punto” – el “punto” se refiere al punto brillante del keyphasor – el punto es el principio del ciclo – el área en blanco (o el pequeño espacio en la órbita) precede al punto. En estos dos ejemplos, para la rotación en sentido contrario a las agujas del reloj y en el sentido de las agujas del reloj, puede ver que la órbita está girando en la misma dirección que el eje.

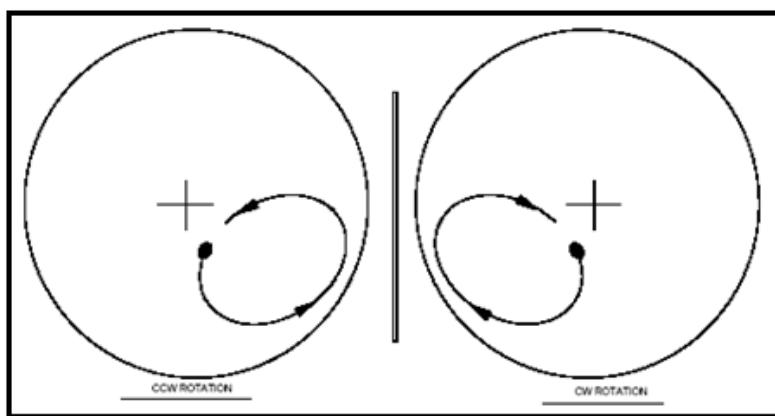


Figura 12-48

Diagnóstico de condiciones de falla con órbitas

La órbita indica la trayectoria giratoria del centro del eje, y el eje se mueve de acuerdo con las fuerzas aplicadas a él, y de acuerdo con la dinámica del eje. La dinámica del eje es una función de la masa, rigidez y amortiguación. Claramente, la masa es mayor en la dirección vertical y la rigidez del sistema no es igual en las direcciones vertical y horizontal. Por lo tanto, es perfectamente normal que la órbita tenga una forma elíptica.

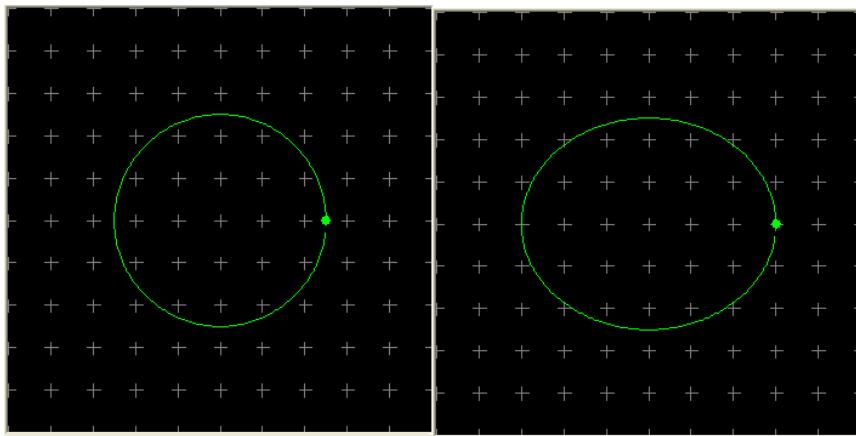


Figura 12-49

Diagnóstico del desbalance

Si la máquina está desbalanceada, el nivel de vibración aumentará (es decir, el tamaño de la órbita aumentará), sin embargo conservará la forma elíptica. La relación entre la anchura y la altura será tanto como 4:1 (11 sería un círculo).

La vibración está dominada por el componente 1X por lo que las órbitas directas y filtradas serán similares en forma.

El punto no debe moverse en una pantalla en vivo.

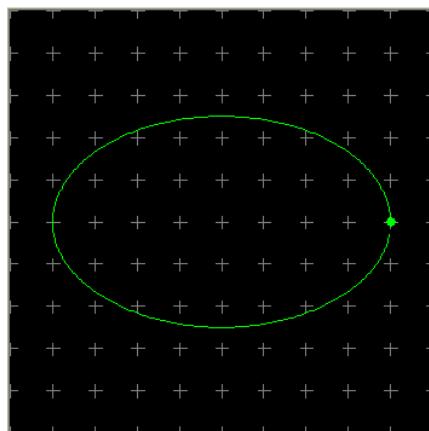


Figura 12-50

Diagnóstico de la desalineación

Si existe desalineación, la forma de la órbita será más plana. La relación será mayor que la descrita para el desbalance; es decir, mayor que 5:1

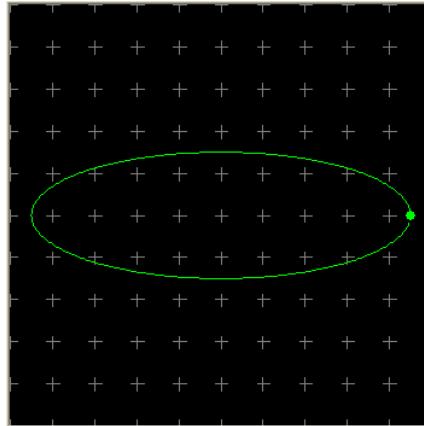


Figura 12-51

El ángulo de la elipse indicará la dirección de la fuerza principal. En el ejemplo siguiente, la fuerza en el eje viene de la parte superior izquierda.

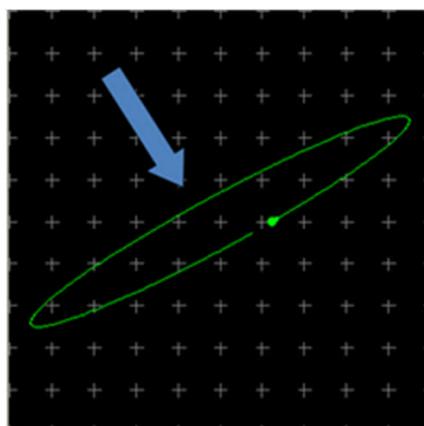


Figura 12-52

Estudiando lazos y contando puntos en la órbita

Si hay dos puntos en la pantalla de órbita filtrada debe haber vibración subsincrónica. En este caso, es importante observar una visualización de órbita en vivo para observar si la posición de los puntos en la órbita cambia.

- F0 0.5X – dos puntos fijos en la pantalla en vivo
 - o Posiblemente rozamiento
- F0 <0.5X – los puntos se mueven en contra de la dirección de rotación
 - o Batido de aceite (inestabilidad del aceite)
- F0 >0.5X – los puntos se mueven en la misma dirección
 - o Resonancia estructural o del rotor

La gráfica de órbita directa tendrá lazos internos, cuando la precesión está en la dirección de la rotación del eje (precesión hacia adelante), o lazos exteriores, cuando la precesión está en contra de la rotación del eje (precesión negativa).

Inestabilidades inducidas por el fluido: Batido de aceite y lárgito de aceite

El batido de aceite y el lárgito de aceite son condiciones destructivas. Podemos utilizar el análisis de órbita y el análisis de espectro para detectar la condición, y podemos estudiar la posición del eje para determinar si estas condiciones pueden ser inducidas.

Batido de aceite

El batido de aceite es un mal funcionamiento autoexitado del fluido que normalmente ocurre en los cojinetes de deslizamiento planos. Puede ocurrir por varias razones, entre ellas:

- F0 Desalineación – cojinete sin carga (relación de excentricidad aprox. 0)
- F0 Holgura excesiva
- F0 Ligeramente cargada, amortiguación baja

El batido de aceite genera una fuente característica de vibración en el rango de aproximadamente 0.38X a 0.48X. Debido a que es inferior a 0.5X vamos a presenciar dos puntos en la órbita en vivo. Los puntos se moverán en la dirección opuesta a la rotación del eje. La precesión de vibración será positiva (en la misma dirección que la rotación del eje), por lo tanto habrá un lazo interno en la órbita directa. El movimiento del eje es circular, por lo que la forma de la órbita será circular.

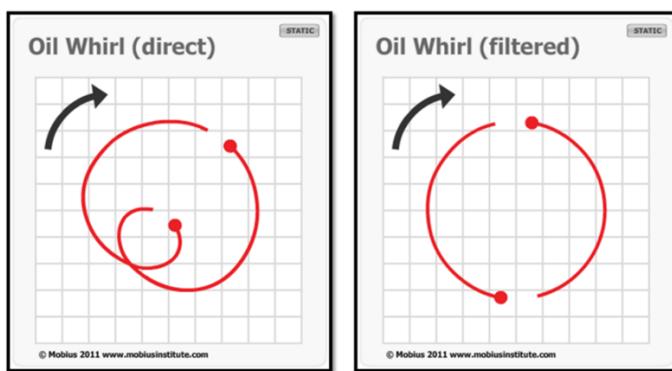


Figura 12-53

Análisis del espectro del batido de aceite

Si la vibración se muestra como un espectro, habrá un pico en el rango de aproximadamente 0.38X a 0.48X. La altura de ese pico puede llegar a ser bastante alta.

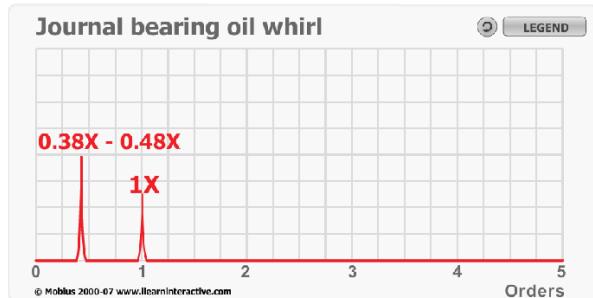


Figura 12-54

Látigo de aceite (líquido)

El látigo de aceite (líquido) es una condición muy destructiva. Esta condición puede ocurrir cuando la velocidad de la máquina es más del doble de la velocidad crítica (o la primera resonancia de balance del rotor); por lo tanto, la velocidad crítica está cerca de la frecuencia de batido de aceite. El batido de aceite excita la resonancia y surge una condición violenta. Los niveles de vibración son muy altos y la máquina debe ser detenida o de lo contrario puede ocurrir una falla catastrófica.

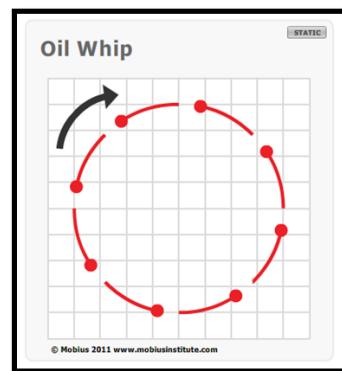


Figura 12-55 Látigo de aceite

La órbita filtrada tendrá varios puntos. Una pantalla en vivo puede indicar que los puntos no se están moviendo, lo que significa que la vibración es la mitad de la velocidad de funcionamiento. La condición no tiene que ocurrir en 0.5x sin embargo por lo que los puntos podrían moverse.

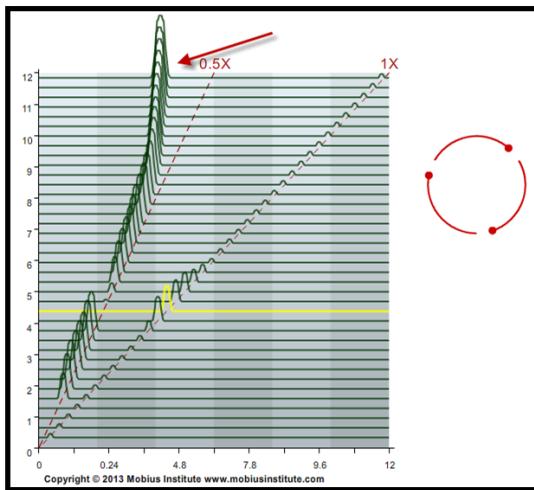


Figura 12-56 Látigo de aceite durante el arranque

En la imagen de arriba de nuestro simulador, se puede ver una gráfica de cascada generada a medida que la máquina arranca. Lo que sucede con el látigo de aceite es que la primera frecuencia natural del eje se excita durante el funcionamiento en este caso y la vibración se “bloquea” a esta resonancia, incluso mientras la máquina continúa acelerándose. En la imagen se puede ver la resonancia en una frecuencia inferior a $0.5X$ como se indica en la flecha roja. Incluso cuando la velocidad de la máquina aumenta, esta frecuencia permanece en el mismo lugar.

Tenga en cuenta que en el momento en que esta resonancia se excita, el pico $1X$ es más de dos veces la frecuencia resonante. El látigo de aceite está siendo excitado por una inestabilidad en el cojinete o torbellino de aceite, que sucede a menos de $0.5X$.

Rozamiento del eje

Utilizando el análisis de espectro, las órbitas y los diagramas de línea central podemos determinar si el eje roza contra el cojinete (o si cualquier otra pieza giratoria roza sobre una pieza estacionaria).

Detección de roces de eje con análisis de espectro

Cuando un eje comienza a rozar en la pared del cojinete o contra un sello, esperaríamos ver una serie de cambios en la vibración:

- 1 La forma de onda será “distorsionada”.
2. El espectro tendrá un gran número de armónicos $1X$.
3. Puede haber picos de suborden y armónicos (por ejemplo. $1/2X$, $1/4X$, etc.).
4. El piso de ruido puede levantarse.

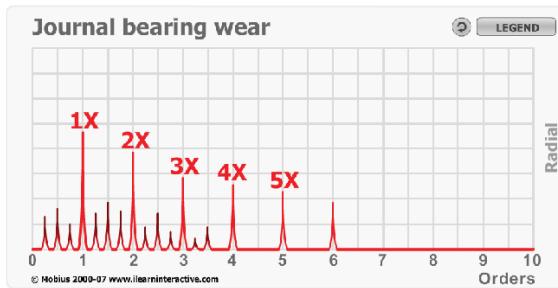


Figura 12-57

Detección de roces de eje con análisis de órbita

La órbita también proporcionará una indicación si se está produciendo un roce del eje. La gráfica de la línea central también debe proporcionar una indicación clara si el eje está rozando la pared del cojinete – el centro promedio estará cerca del borde del círculo que se utiliza para indicar el entrehielro máximo.

La órbita filtrada puede cambiar ligeramente la forma si es sólo un ligero roce. La trayectoria de la órbita cambiará porque el eje no puede girar en su trayectoria elíptica normal. Puede tomar una forma de “lágrima”. Puede tener un borde plano en la forma elíptica/circular. La órbita también puede ser aplanaada debido a la precarga u otra fuerza que está causando que el eje roce.

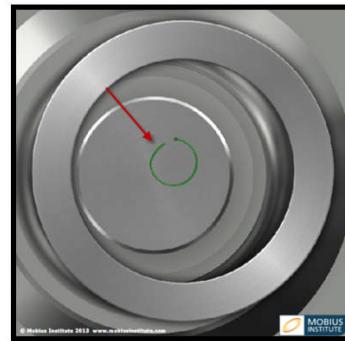


Figura 12-58 Órbita aplanaada cuando ocurre rozamiento

Si el roce empeora veremos la vibración de suborden, por ejemplo. $1/2X$ y/o $1/4X$. La órbita filtrada tendrá varios puntos estacionarios (si $1/2X$) o de lo contrario puntos giratorios. La órbita directa tendrá varios lazos: los bucles aparecerán dentro de la órbita principal si hay precesión hacia adelante, o fuera de la órbita principal para la precesión inversa. El número de lazos se relaciona con el orden fraccionario – 2 lazos para vibración $1/2X$, 3 lazos para vibración $1/3X$, etc.



Figura 12-59 – Precesión positiva (1/3X)

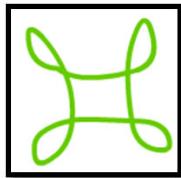


Figura 12-60 – Precesión inversa (1/4X)

Resumen

La combinación de análisis de órbita y análisis de línea central proporciona una gran cantidad de información sobre el estado de funcionamiento de las máquinas con cojinetes con película de aceite. Las órbitas en vivo, las órbitas directas y las órbitas filtradas proporcionan información muy útil.

Puntos clave

- F0** **R1** Los estudiantes deben entender la diferencia básica en las gráficas de órbita para desbalanceo, desalineación, soltura, rozamiento y batido de aceite
- F0** **R1** Los estudiantes deben entender por qué usaría una gráfica de línea de centro en lugar de una gráfica de órbita
- F0** **R1** Los estudiantes deben entender lo que el batido de aceite y el látigo de aceite son
- F0** **R1** Los estudiantes deben entender cómo reconocer la vibración subsincrónica en la órbita.