



Capítulo 15

Análisis de cajas de engranajes

Temas:

- █ Frecuencias forzadas
- █ Análisis de forma de onda de tiempo en engranajes
- █ Detección de desgaste en dientes
- █ Dientes cargados
- █ Juego de engranajes (backlash)
- █ Engranajes excéntricos
- █ Engranajes desalineados
- █ Ejemplo de engranajes desalineados
- █ Diente agrietado o roto
- █ Frecuencia de repetición de diente

Cajas de engranajes

Las cajas de engranajes suelen ser una de las piezas más críticas de la maquinaria rotativa de su planta. También son uno de los tipos de equipos más desafiantes para monitorear. Muchos analistas toman un enfoque simple; si los niveles de vibración aumentan en el espectro, entonces dicen que la caja de engranajes necesita ser reparada.

Se puede aprender mucho con el análisis de forma de onda de tiempo, junto con algunos conocimientos sobre los patrones de vibración. En esta sección discutiremos cómo puede probar correctamente las cajas de engranajes y diagnosticar una amplia gama de fallas.



Figura 15-1Rueda con dientes dañados

Hay una serie de razones por las que una caja de engranajes puede fallar, y por lo tanto una serie de condiciones de falla que debemos ser capaces de detectar. Aquí está una lista parcial:

- ☒ Desgaste de dientes
- ☒ Dientes cargados
- ☒ Excentricidad del engranaje
- ☒ Juego (backlash)
- ☒ Desalineación entre engranajes
- ☒ Dientes rotos o agrietados
- ☒ Y otros

Un estudio reciente mostró que el 60% de las fallas podrían atribuirse a una lubricación inadecuada y otros problemas prácticos.

Comprendiendo las cajas de engranajes

Antes de empezar en la sección de diagnóstico, necesitamos estar familiarizados con los términos asociados con las cajas de engranajes.

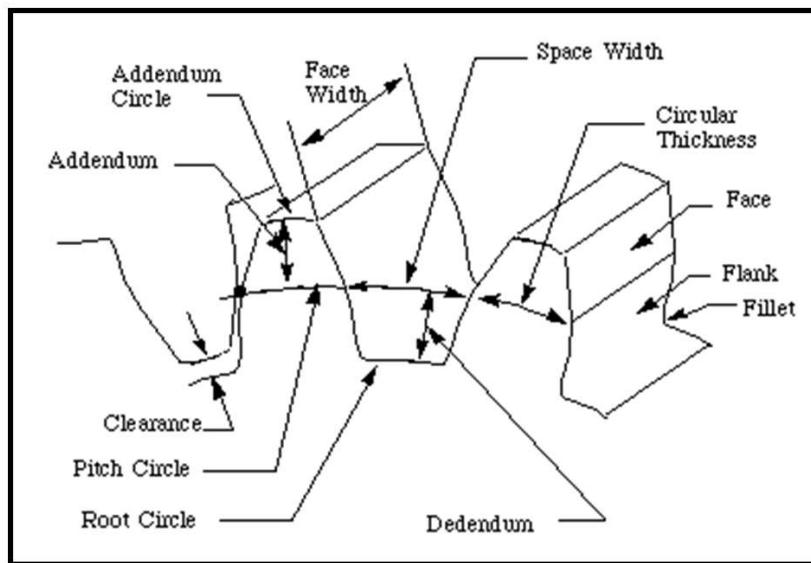


Figura 15-2 Rueda dentada

Superficie de paso (Pitch surface): La superficie del cilindro giratorio imaginario (cono, etc.) que se puede considerar que el engranaje dentado reemplaza.

Círculo de paso (Pitch circle): Una sección derecha de la superficie de paso.

Círculo de cabeza (Addendum circle): Un círculo que limita los extremos de los dientes, en la sección superior.

Círculo de raíz (o Dedendum): El círculo que une los espacios entre los dientes.

Cabeza (Addendum): La distancia radial entre el círculo de paso y el círculo de cabeza.

Raíz (Dedendum): La distancia radial entre el círculo de paso y el círculo de raíz.

Espaciamiento: La diferencia entre el dedendum de un engranaje y el adendum del engranaje de acoplamiento.

Cara de un diente: Esa parte de la superficie del diente que se encuentra fuera de la superficie de paso.

Flanco de un diente: La parte de la superficie del diente que se encuentra dentro de la superficie de paso.

Espesor circular (también llamado **espesor del diente**): El grosor del diente medido en el círculo de paso. Es la longitud de un arco y no la longitud de una línea recta.

Espacio entre dientes: La distancia entre los dientes adyacentes medida en el círculo de paso.

Juego (Backlash): La diferencia entre el grosor del círculo de un engranaje y el espacio del diente del engranaje de acoplamiento.

Paso circular p: El ancho de un diente y un espacio, medido en el círculo de paso.

Paso diametral P: El número de dientes de un engranaje por pulgada de su diámetro de paso. Un engranaje dentado debe tener un número entero de dientes. El paso circular, por lo tanto, es igual a la circunferencia de paso dividida por el número de dientes. El paso diametral es, por definición, el número de dientes divididos por el diámetro de paso.

Engrane correcto

Un diente de un piñón toca un diente de una rueda en el punto de contacto rojo (el nudo) que se mueve hacia arriba en la línea de acción y a lo largo de las caras de los dientes a medida que avanza la rotación. Dado que el contacto no puede ocurrir fuera de los dientes, tiene lugar a lo largo de la línea de acción sólo entre los puntos indicados por los puntos negros en la línea de acción y dentro de ambos círculos de cabeza (addendum). La línea entre los puntos negros se llama el **camino de contacto**.

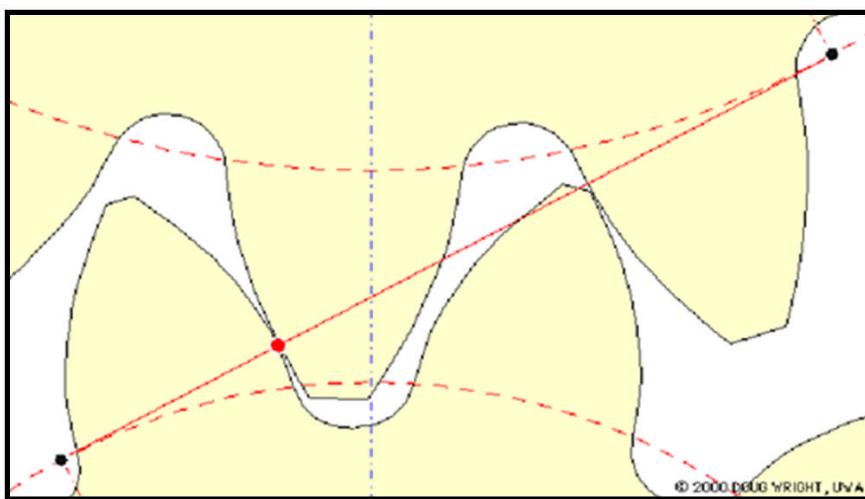


Figura 15-3 Engrane perfecto

Cuando los dientes se están engranando correctamente, un diente estará en engranando en todo momento, con un segundo diente entrando en engrane antes de que el primer diente salga de engrane. Está escrito que en algunos diseños, hasta tres dientes pueden estar en

contacto en cualquier momento; uno que sale de engrane, uno en engrane, y el tercero saliendo de engrane.

Si los engranajes están correctamente alineados, y los engranajes no están excéntricos, y los ejes no se doblan, y los rodamientos no están sueltos, cada engrane será igual. El patrón de vibración indicará un patrón consistente en cada ciclo de rotación.

Pero si estas condiciones existieran, los patrones de vibración tendrían que cambiar. Si los engranajes se acercan más y luego se alejan con cada rotación, la vibración se elevaría y bajaría con cada ciclo.

Se espera que la superficie de los dientes sea lisa y esté bien lubricada. El contacto debe ser suave y consistente.

Pero si hay desgaste, picaduras, abolladuras o grietas, la vibración no será consistente. El contacto puede ser áspero e inconsistente. Puede haber sólo un punto en la rotación cuando el diente agrietado o roto entra en engrane – puede ser sólo ese momento cuando la vibración cambia. De hecho, como descubriremos, puede haber una situación en la que la vibración cambia sólo cuando un diente en un engranaje entra en contacto con un diente único en el otro engranaje.

Pueden existir una serie de condiciones inusuales que exploraremos en este módulo.

Diseño de engranajes

Hay una serie de diferentes tipos de engranajes. Cada uno tiene un propósito específico. Para el analista de vibración es útil saber qué tipo de engranaje hay en la caja de engranajes porque las fuerzas generadas son diferentes. Por ejemplo, los engranajes de espuela generan una fuerza radial, mientras que los engranajes helicoidales generan una fuerza axial.

Engranajes de espuela

Los engranajes de espuela conectan ejes paralelos, tienen dientes con forma envolvente o involuta, que son paralelos al eje y pueden tener dientes internos o externos. No causan ningún empuje externo entre los engranajes. Son baratos de fabricar. Proporcionan un rendimiento más bajo pero satisfactorio. Se utilizan cuando los ejes giran en el mismo plano.



Figura 15-4 Engranaje de espuela

Las principales características de los engranajes de espuela son dedendum, addendum, flanco y raíz (chaflán). El cilindro de raíz se forma desde la raíz de los dientes y se extiende hasta la punta llamada círculo de cabeza. El flanco o la cara entra en contacto con el engranaje entrante, la característica más útil de los engranes de espuela. El socavado en la región de la raíz es cinéticamente irrelevante.

Características

La velocidad y el cambio de la fuerza depende de la relación de engranajes, la relación de número de dientes en los engranajes que van a hacer interface entre sí. Un engranaje entre los dos está en el eje de entrada, el eje del motor y el otro engranaje del par está en el eje de salida, el eje de la rueda.

Tienen una relación de contacto más alta que los hace suaves y silenciosos en funcionamiento. Están disponibles para un funcionamiento resistente a la corrosión. Se encuentran entre el tipo de engranaje más rentable. También se utilizan para crear grandes engranajes reductores.

Engranajes helicoidales

Los engranajes helicoidales conectan ruedas paralelas, pero los dientes envolventes cortan en un ángulo al eje de rotación. Dos engranajes helicoidales deben tener el mismo ángulo de hélice pero en dirección opuesta. Corren más suave y más silenciosamente. Tienen mayor capacidad de carga, son más caros de fabricar y crean empuje axial.



Figura 15-5 Engranajes helicoidales

Los engranajes helicoidales se pueden utilizar para engranar dos ejes que no son paralelos y también se pueden utilizar en engranajes cruzados que conecta dos ejes perpendiculares. Tienen dientes más largos y fuertes. Pueden llevar carga pesada debido al mayor contacto de la superficie con los dientes, sin embargo, esto hace que sean menos eficientes. El engranaje es más silencioso con menos vibración.

Configuración del engranaje

Se pueden fabricar en configuraciones de derecha e izquierda con un ángulo de hélice para transmitir movimiento y potencia entre ejes no intersecantes que son paralelos o a 90 grados entre sí. Para el eje a 90 grados, se utilizan los mismos ángulos de hélice y el área de contacto del diente del engranaje es muy pequeña. Si el ángulo de los dientes del engranaje es correcto, se pueden montar en el eje perpendicular ajustando el ángulo de rotación 90 grados. La inclinación de los dientes genera una fuerza axial. A medida que aumenta el ángulo de inclinación, la fuerza axial también aumenta. Los rodamientos de empuje pueden contrarrestar estas fuerzas.

Aplicaciones

Estos son altamente utilizados en la transmisión porque son más silenciosos incluso a mayor velocidad y son duraderos. Las otras posibles aplicaciones de engranajes helicoidales son en la industria textil, sopladores, alimentadores, industria de caucho y plástico, mezcladores de arena, industria azucarera, molinos de laminación, industria alimentaria, ascensores, transportadores, cortadoras, maquinaria de trabajo de arcilla, compresores, cuchillos de caña y en la industria petrolera.

Desventajas

Una desventaja de los engranajes helicoidales es el empuje resultante a lo largo del eje del engranaje, que debe ser acomodado por los rodamientos de empuje adecuados. Esto puede ser superado por el uso de engranajes helicoidales dobles por tener dientes con una forma 'v'.

Engranajes biselados helicoidales

El engranaje biselado helicoidal es un engranaje dentado de diseño angular. El lado de entrada está provisto de una brida de motor o un eje de entrada libre y el lado de salida está provisto de un extremo de eje libre o un eje hueco. Los engranajes biselados helicoidales están equipados con bridas de varios tamaños. Herramientas reciprocatas los cortan.

Las ventajas de los engranajes biselados helicoidales son la alta eficiencia y la baja tasa de reducción. El uso de engranajes biselados helicoidales ahorra energía y costos. Los engranajes biselados helicoidales están fabricados con una aleación de acero endurecido. Al material del engranaje se le da una estructura extremadamente fuerte y homogénea.

Pueden reemplazar engranajes de tornillo sin fin en una variedad de aplicaciones, particularmente en maquinaria modular. También se utilizan como unidad de almacenamiento y recuperación. Se utilizan comúnmente en diferenciales modernos.

Engranajes helicoidales dobles o de espiga

Los engranajes helicoidales dobles o de espiga conducen la potencia y movimiento entre ejes paralelos, no intersecante. Los engranajes helicoidales dobles tienen una ranura en el medio, los engranajes de espiga no. Los dos ángulos de hélice se unen en el centro de la cara del engranaje para formar una 'V'. En estos engranajes las fuerzas de empuje axiales se cancelan entre sí. Es difícil cortar este tipo de engranaje, pero se hace más fácil mediante el mecanizado de una ranura en la cara en el punto del ápice de la 'V' creando una rotura en el centro de los dientes del engranaje de espiga para crear un engranaje helicoidal doble.

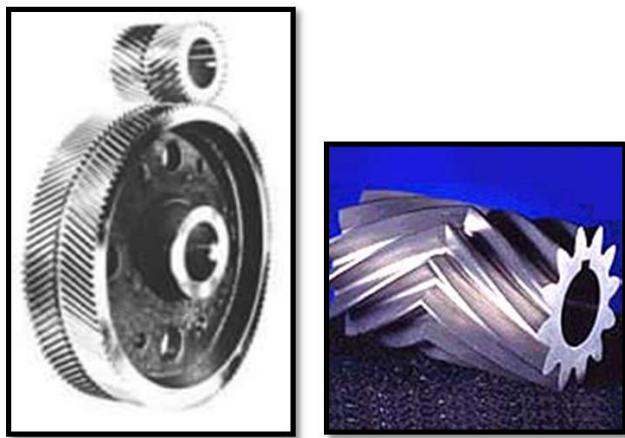


Figura 15-6 Engrane helicoidal doble (izquierda) y espiga (derecha)

Estos engranajes equilibran las fuerzas y la fricción tanto en los engranajes como en todos los rodamientos. Los engranajes de espiga también permiten el uso de ejes de mayor diámetro para el mismo desplazamiento volumétrico y mayor capacidad de presión diferencial.

La aplicación más común es en la transmisión de potencia. Utilizan dientes curvos para una transmisión de potencia eficiente y de alta capacidad. Debido a que transmiten la potencia sin problemas, sin pulsaciones, a menudo se utilizan para la extrusión y la polimerización. Los engranajes de espiga se utilizan principalmente en maquinaria pesada.

Engranajes biselados

Los engranajes biselados conectan ejes intersectantes y vienen en varios tipos. La superficie de paso de los engranajes biselados es un cono. Son útiles cuando es necesario cambiar la dirección de la rotación de un eje. El uso de engranajes de diferentes números de dientes puede cambiar la velocidad de rotación. Por lo general, se montan en ejes que están a 90 grados entre sí, pero se pueden diseñar para trabajar en otros ángulos también. Estos engranajes permiten un ajuste menor durante el montaje y permiten cierto desplazamiento debido a la desviación bajo cargas de operación sin concentrar la carga en el extremo del diente. Para un rendimiento confiable, los engranajes deben fijarse al eje con un pasador cónico. Los conjuntos de engranajes biselados consisten en dos engranajes de diferente diámetro de paso que producen relaciones superiores a 1:1

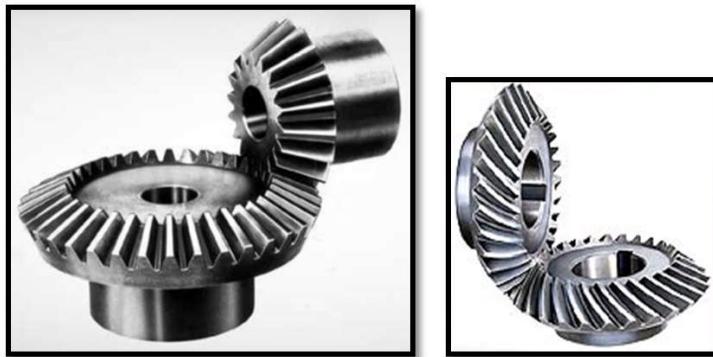


Figura 15-7 Engranes biselados

Tipos

Los dientes de los engranajes biselados pueden ser rectos, espirales o biselados. En engranajes biselados rectos, los dientes no tienen ángulos de hélice. Tienen engranajes de igual tamaño con un ángulo de eje de 90 grados o un ángulo de eje distinto de 90 grados. También se puede crear un ángulo de bisel recto con un engranaje plano, con un ángulo de paso de 90 grados. Los dientes rectos tienden a producir impactos, los dientes curvos resuelven este problema.

Los engranajes biselados espirales tienen ángulos espirales. El contacto entre los dientes comienza en un extremo del engranaje y luego se extiende por todo el diente. En ambos tipos de engranajes biselados, los ejes deben ser perpendiculares entre sí y deben estar en el mismo plano. Los engranajes biselados espirales ofrecen mejoras de rendimiento con respecto a los otros tipos.

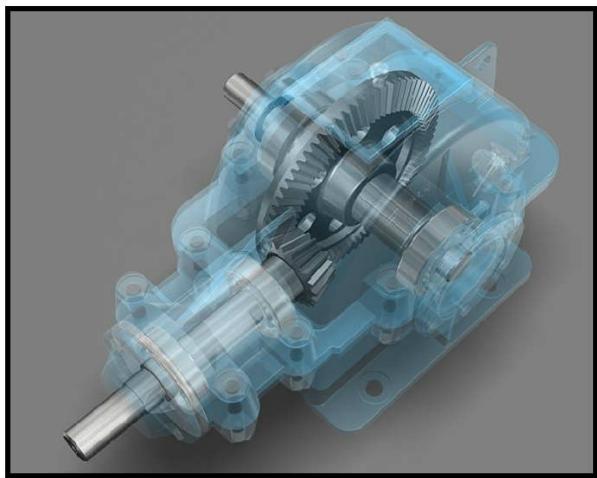


Figura 15-8

Los engranajes biselados hipoide o de bisel pueden engancharse con los ejes en diferentes planos. Estos se utilizan a menudo en los diferenciales de automóviles. El engranaje del anillo del diferencial y el engranaje piñón de entrada son hipoide. Esto permite que el piñón de entrada se monte más bajo que el eje del engranaje del anillo. Los engranajes hipoide son más fuertes, funcionan más silenciosamente y se pueden utilizar para mayores proporciones de reducción. También tienen acción deslizante a lo largo de los dientes, lo que potencialmente reduce la eficiencia.

Aplicaciones

Un buen ejemplo de engranajes biselados se ve como el mecanismo principal para un taladro de mano. A medida que el mango del taladro se gira en dirección vertical, los engranajes biselados cambian la rotación del mandril a una rotación horizontal. Los engranajes biselados en un taladro manual tienen la ventaja añadida de aumentar la velocidad de rotación del mandril y esto hace posible perforar una gama de materiales.

Los engranajes biselados encuentran su aplicación en locomotoras, aplicaciones marinas, automóviles, imprentas, torres de refrigeración, centrales eléctricas, plantas de acero, defensa y también en máquinas de inspección de vías férreas. Son componentes importantes en todo el sistema de transmisión de helicópteros.

Los engranajes biselados espirales son componentes importantes en todos los sistemas de transmisión de helicópteros actuales. Estos componentes son necesarios para funcionar a altas velocidades, cargas altas y para un número extremadamente grande de ciclos de carga. En esta aplicación, los engranajes biselados espirales se utilizan para redirigir el eje desde el motor de turbina de gas horizontal al rotor vertical.

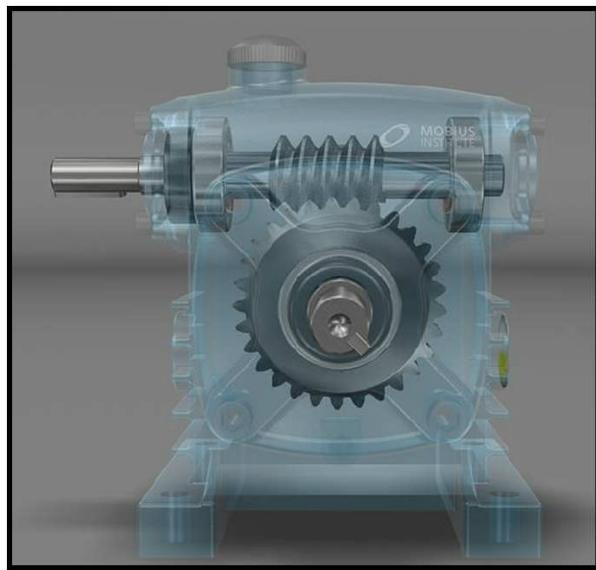
Engranajes de tornillo sin fin (gusano)

Un engranaje de tornillo es un plano inclinado envuelto alrededor de un eje central. Es un engranaje con uno o más dientes en forma de roscas atornilladas.



Figura 15-9 Engranaje de tornillo sin fin (o gusano)

Los engranajes de tornillo están hechos de dos partes: el piñón y el engranaje de tornillo. El piñón tiene un pequeño número de dientes y se envuelven alrededor del cilindro de paso. El engranaje de tornillo tiene caras cóncavas para ajustarse a la curvatura del gusano con el fin de proporcionar línea de contacto en lugar de punto de contacto. Se cortan de forma helicoidal para un mejor acoplamiento. Los engranajes de gusano pueden proporcionar una alta velocidad angular entre los ejes no intersecantes en ángulo recto. Son capaces de transmitir cargas dentales altas, la única desventaja es las altas velocidades deslizantes a través de los dientes. Proporcionan la máxima relación de potencia.



15-10 Engranaje de tornillo

Funciones

La eficiencia del engranaje de tornillo depende del ángulo de acción, la velocidad de deslizamiento y el lubricante, la calidad de la superficie y las condiciones de instalación. Ofrecen una forma de engranaje más suave y silenciosa. Proporcionan una reducción de velocidad de alta relación en espacios mínimos.

Los engranajes de gusano se utilizan cuando se requieren reducciones de engranajes grandes. El tornillo tiene una propiedad única de girar fácilmente el engranaje. El engranaje no puede girar el tornillo porque el ángulo en el tornillo es superficial y cuando el engranaje intenta girarlo, la fricción entre los dos mantiene el tornillo en su lugar.

Los engranajes de gusano funcionan en condiciones difíciles, presentando demandas de lubricación únicas. Los tipos de aceites más utilizados para lubricar estos engranajes son aceites minerales compuestos, aceites de engranajes minerales EP y sintéticos.

Operación de engranajes de tornillo sin fin

Los engranajes de tornillo siempre se utilizan como engranaje de entrada. Para el funcionamiento del engranaje de tornillo, el par se aplica al extremo de entrada del eje del tornillo mediante una rueda dentada accionada o un motor eléctrico. El tornillo y el eje del tornillo están soportados por rodamientos de rodillos antifricción. Debido a la alta fricción los engranajes de tornillo son muy inefficientes. Hay mucha fricción entre un engranaje de tornillo y el engranaje conducido por el tornillo. Cuando se utiliza en aplicaciones de alto par, la fricción causa el desgaste en los dientes del engranaje y la erosión de la superficie de restricción.

Tipos

Hay tres tipos de engranajes de tornillo:

1. **Sin garganta**- un engranaje helicoidal con un tornillo recto. El contacto con los dientes es un único punto de movimiento en el tornillo.
2. **Una garganta**- tiene dientes helicoidales cóncavos envolventes alrededor del gusano. Esto conduce al contacto de línea.
3. **Doble garganta**- llamado cono o reloj de arena. Tiene dientes cóncavos tanto en el tornillo como en la rueda helicoidal.

Aplicaciones

Los engranajes de gusano se utilizan ampliamente en maquinaria de envasado, manipulación de materiales, máquinas herramienta, indexación y procesamiento de alimentos. Se utilizan ampliamente en sistemas transportadores. También se utilizan en el diferencial torsen, utilizado en algunos coches y camiones de alto rendimiento. Sirven como reductores de velocidad en muchas industrias diferentes.

Cremallera y piñón

Un engranaje de cremallera es una barra dentada que se engrana con un piñón. Las cremalleras son engranajes de radio de paso infinito. Se utilizan para traducir el movimiento rotatorio al movimiento lineal o viceversa. Se engranan con piñones del mismo paso.

Las cremalleras están hechas de diversos materiales. Los materiales comúnmente utilizados para cremalleras son acero inoxidable, latón y plástico.

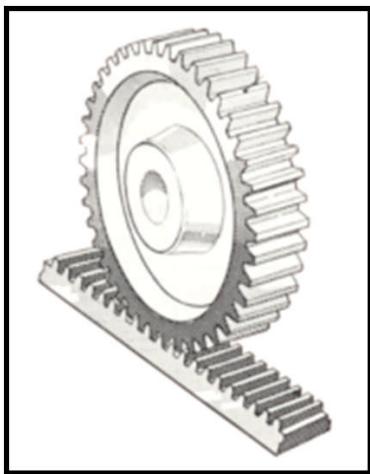


Figura 15-11 Engranaje de piñón y cremallera

Son ampliamente utilizados en automóviles. El volante de un coche gira el engranaje que engancha la cremallera. La cremallera se desliza a la derecha o a la izquierda, cuando el engranaje gira, dependiendo de la forma en que giramos la rueda. Los limpiaparabrisas de los automóviles funcionan con una cremallera y un mecanismo de piñón. También se utilizan en algunas balanzas para girar la aguja que muestra el peso.

El piñón es una rueda dentada pequeña con dientes encajados en una rueda de engranajes más grande. El movimiento rotacional se convierte en movimiento lineal cuando el piñón gira y mueve la cremallera. Un piñón con un número más pequeño de dientes produce más par. El piñón está unido al eje del motor con pegamento. El piñón gira alrededor de un centro fijo, lo que hace que la cremallera se mueva en la línea recta. Si la cremallera se mueve y el piñón gira, el centro del piñón también se moverá.

Engranajes planetarios

Los engranajes planetarios implican dos o más engranajes montados en o dentro de un engranaje más grande. Se utilizan para hacer posible una gran relación de engranajes. También se utilizan cuando se desea girar la entrada en la misma dirección que la salida. El engranaje en el centro del engranaje más grande, llamado el sol, engancha dos o tres engranajes más pequeños colocados en el mismo engranaje grande. Estos pequeños engranajes se llaman planetas y están comprometidos con el interior del engranaje grande llamado anillo. Los engranajes planetarios giran en un centro móvil y el sol gira en un centro fijo.

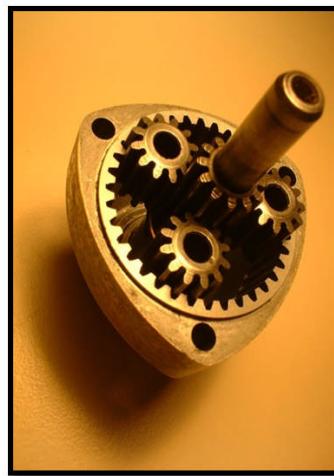


Figura 15-12 Engranajes planetarios

Mecanismo de engranajes

En un engranaje planetario, la parte que recibe movimiento desde fuera del mecanismo se llama el conductor; la parte del que se toma el movimiento fuera del mecanismo se llama el seguidor; la parte que lleva uno o más pasadores de rodamientos sobre los cuales giran los engranajes de planetas se llama el brazo del tren o porta planetas. Uno de los tres componentes o conjuntos de engranajes no gira, lo que resulta en tres configuraciones de engranajes planetarios. Se pueden producir diferentes relaciones de transmisión dependiendo de qué engranaje se utiliza como entrada, cuál como salida y cuál se mantiene inmóvil.

Aplicaciones

Una transmisión automática en un automóvil utiliza engranajes planetarios para crear diferentes relaciones de transmisión utilizando embragues y bandas de freno para mantener diferentes partes del engranaje estacionarias.

Los engranajes planetarios también se utilizan ampliamente en turbinas eólicas.

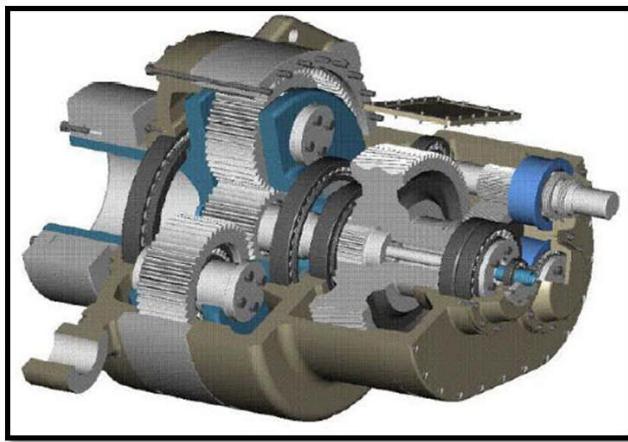


Figura 15-13 Engranajes planetarios de turbinas de viento

Cálculo de frecuencias forzadas

En esta sección cubriremos las siguientes frecuencias forzadas en engranajes: velocidad de entrada, velocidad de salida, frecuencia de engrane: GMF, frecuencia de fase de montaje de engranajes, frecuencia de repetición de diente y frecuencia “fantasma”.

Hay tres frecuencias clave que necesitamos calcular al mirar los engranajes: la velocidad de entrada, la frecuencia de engrane, que es el número de dientes multiplicado por la velocidad del eje, y la velocidad de salida.

$$\text{Gear mesh} = \text{Number of teeth} \times \text{Shaft speed}$$

$$\text{Output speed} = \text{Input speed} \times \frac{\text{Input teeth}}{\text{Output teeth}}$$

Si tiene más de una etapa, simplemente utilice las mismas fórmulas para calcular las frecuencias de engrane intermedios y las velocidades de ejes intermedios.

Frecuencias forzadas en tornillos sin fin

Los engranajes de tornillo a menudo son confusos porque a veces está la pregunta de cuántos dientes hay en la unidad de tornillo de entrada. En el caso de un engranaje de tornillo, no es el número de dientes lo que preocupa (a menudo un tornillo sólo tiene un diente) pero sí el número de pasos en el engranaje de tornillo.



Figura 15-14 Engranaje de tornillo

Los pasos se refieren al número de dientes que se engranan con el engranaje accionado durante una revolución del tornillo. Esto se puede identificar fácilmente si se conoce la velocidad del engranaje de salida, el número de dientes en el engranaje de salida y la velocidad del eje de entrada. En este ejemplo, un engranaje de transmisión de salida con 24 dientes girando a 10 Hz es accionado por un engranaje de gusano girando a 29.5 Hz. El número de pasos (#F) en el engranaje de entrada se puede determinar de la siguiente manera:

$$GM = T_o \times S_o = F_{in} \times S_{in}$$

$$F_{in} = \frac{T_o \times S_o}{S_{in}}$$

Si conoce la velocidad de entrada [S_{in}], la velocidad de salida [S_o] y el número de dientes en el eje de salida [T_o] (es decir, el número de dientes en la rueda) entonces puede calcular el número de pasos [F_{in}].

Ejemplo:

Velocidad de entrada [S_{in}]: 20 Hz

Dientes en la rueda [T_o]: 30

Velocidad de salida [S_o]: 5 Hz

$$GM = T_o \times S_o = F_{in} \times S_{in}$$

$$F_{in} = (T_o \times S_o) / S_{in}$$

$$\text{Por lo tanto: } F_{in} = 30 \times 5 / 20 = 7.5$$

Tiene 7.5 pasos (7.5 dientes que se engranan con el engranaje accionado durante una revolución del gusano).

Desgaste del equipo y factores comunes

Los problemas de fase de montaje de engranajes son una falla inducida por el patrón de desgaste del engranaje que resulta en la generación de subarmónicos fraccionarios de GMF. Los problemas en la fase de montaje de engranajes pueden originarse por problemas de fabricación en los engranajes, daños a los engranajes por contaminación, o por reorientar los dientes del engranaje durante la revisión.

Una pieza adicional de información que podemos obtener del recuento de dientes es el tipo de desgaste que experimentarán los engranajes. Podemos “factorizar” el número de dientes en cada engranaje y determinar el número de factores comunes. Si dos engranajes tenían números primos de dientes, por ejemplo 31 dientes y 19 dientes, entonces cada diente en cada engranaje debe entrar en contacto con cada otro diente antes de que entre en contacto con el mismo diente de nuevo. Esto asegura un desgaste relativamente uniforme en todos los dientes.

Números primos: 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19...

Si el número de dientes no es un número primo, entonces el patrón de desgaste puede ser menos que ideal. Primero debemos determinar los factores que componen el recuento de dientes de cada engranaje, y luego encontrar los factores comunes entre cada engranaje.

Por ejemplo, si un engranaje tiene 33 dientes, los factores (a veces llamados “factores primos”) son 1, 3 y 11 ($1 \times 3 \times 11 = 33$). El factor más grande es 11. Si el otro engranaje tiene 21 dientes, sus factores son 1, 3 y 7 ($1 \times 3 \times 7 = 21$). El factor más grande es 7.

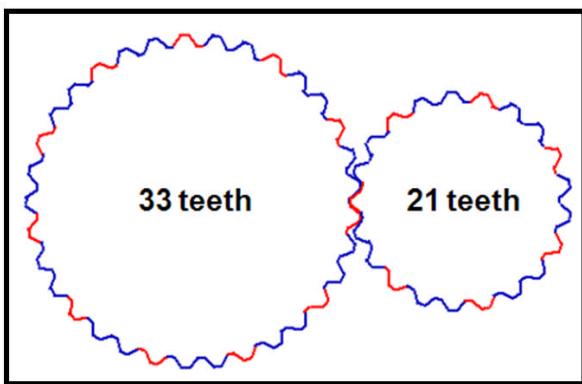


Figura 15-15 Ejemplo de factores comunes

Los factores de 1 y 3 son comunes a ambos engranajes, por lo que son nuestros “factores comunes”. Cuando el factor común no es uno, los dientes se desgastan de manera desigual. Un factor común de tres hará que un diente en un engranaje se tope con cada tercer diente en el

otro engranaje. Veremos esto en el espectro a una frecuencia de engrane dividida por el factor común.

Sin embargo, si hay más de un factor común, debemos multiplicarlos juntos. Por ejemplo, si un engranaje tiene 30 dientes, los factores (a veces llamados “factores primos”) son 1, 2, 3 y 5 ($1 \times 2 \times 3 \times 5 = 30$). El factor más grande es 5. Si el otro engranaje tiene 18 dientes, sus factores son 1, 2 y 3 ($1 \times 2 \times 3 = 6$). El factor más grande es 3. En nuestro ejemplo, el producto de estos factores comunes es 6 ($1 \times 2 \times 3 = 6$). Observe que cada sexto diente entra en contacto.

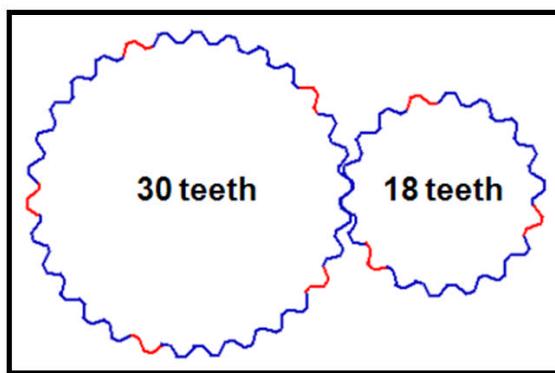


Figura 15-16 Ejemplo de factores comunes

La frecuencia generada en este ejemplo es la frecuencia de engrane dividida por el producto de los factores comunes, 6 en este ejemplo. Se llama la “frecuencia de fase de montaje del engranaje”. Otra forma de verlo es que la frecuencia es cinco veces la velocidad del engranaje de conducción (5 es el factor más alto), y 3 veces la velocidad del conducido (3 es el factor más alto en ese engranaje).

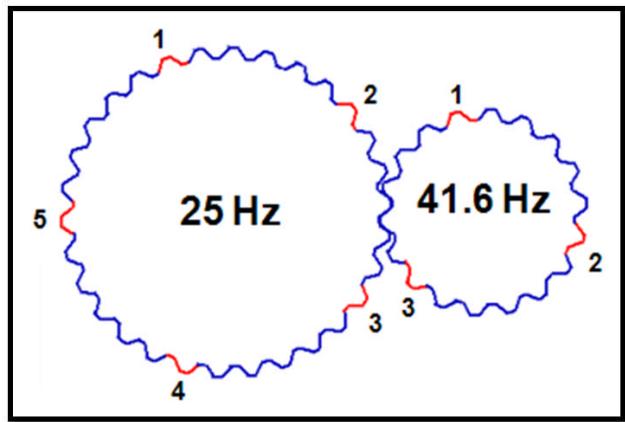
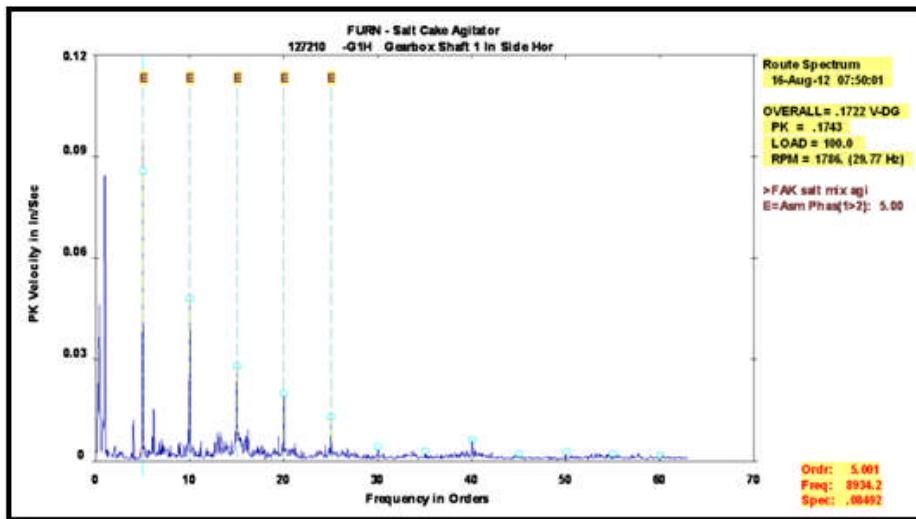
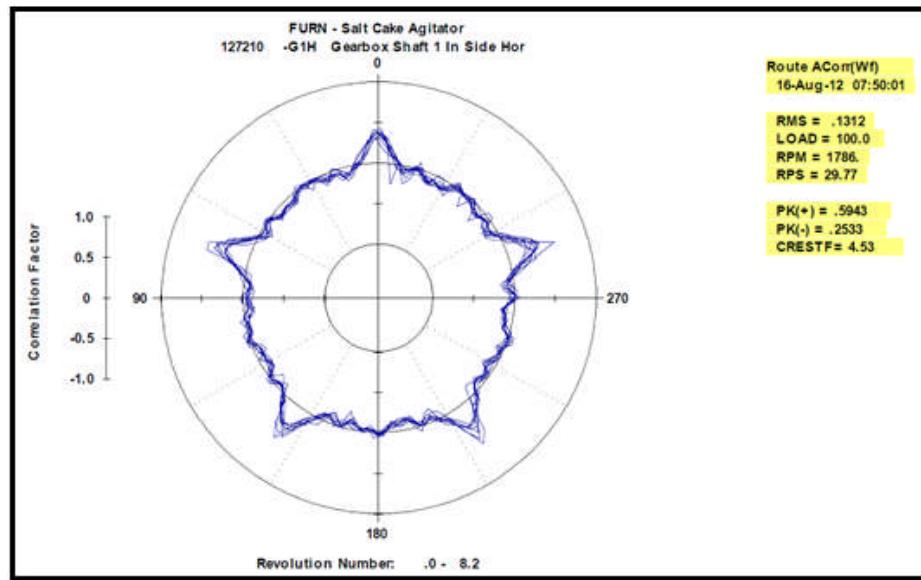


Figura 15-17 Ejemplo de factores comunes

El engranaje más grande es el engranaje de entrada en el eje 1x. Otra forma de visualizar el GAPP es considerar los 5 dientes dañados en el engranaje grande creando su propia frecuencia forzada, como un ventilador con 5 aspas. Los gráficos siguientes muestran una serie armónica en 5x en un espectro y luego los mismos datos en una gráfica circular. Estos son los patrones que uno vería para este patrón de desgaste.

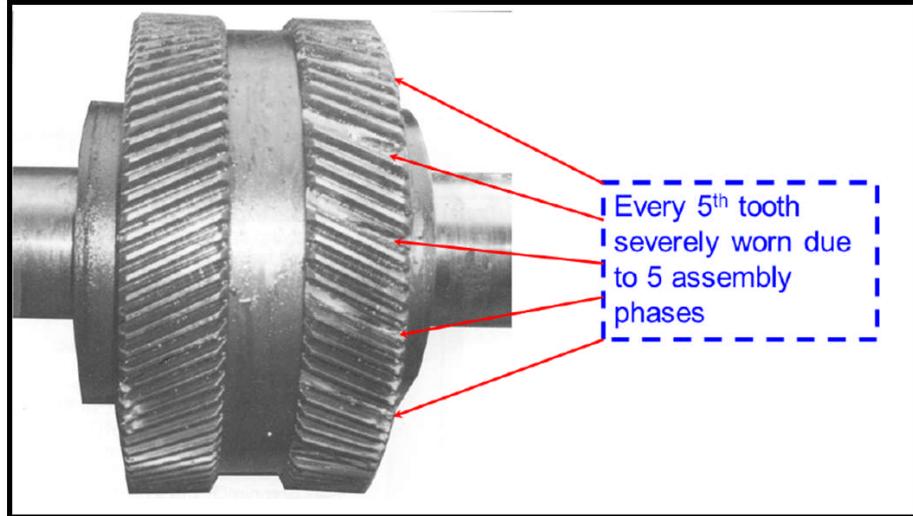


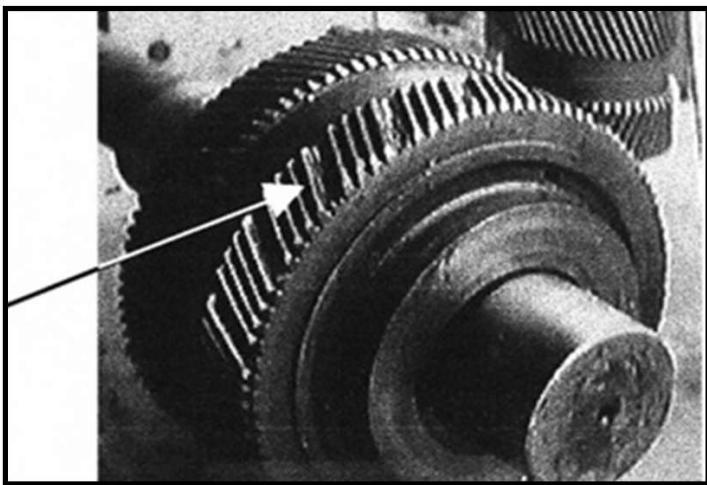
15-18 GAPP de 5x



15-19 GAPF desplegado en diagrama circular

Las imágenes siguientes muestran los patrones de desgaste asociados con la frecuencia de fase de montaje del engranaje. Cada quinto diente está dañado por lo tanto el producto de los factores primos comunes, (N_a) es 5.

15-20 El producto de los factores comunes primos (N_a) es 5



15-21 Hay daño cada 5 dientes

Frecuencia de repetición de diente

El factor no común identifica el número de dientes igualmente defectuosos en el engranaje y el número de revoluciones que el otro engranaje debe hacer antes de que engranen los mismos dientes de nuevo. La frecuencia de este evento se llama la frecuencia de repetición de diente. Podemos calcular la frecuencia de repetición de diente de varias maneras.

$$HIF = GMF \times N_a / (T_{in} \times T_{out})$$

N_a = producto de factores comunes

HIF = Velocidad de entrada / CF interior

HIF = Velocidad de salida / CF exterior

La llamada “frecuencia de repetición de diente” es la velocidad a la que un diente en un engranaje calza con un diente en particular en el otro engranaje. Si la relación de engranajes es un entero como 1, 2 o 3, la frecuencia de repetición de diente será las RPM del engranaje más grande, y los mismos dientes estarán en contacto una vez por revolución. Esto causará un desgaste desigual en los engranajes - un pequeño defecto en un diente se pondrá en contacto repetidamente con los mismos dientes en el otro engranaje causando desgaste localizado en esos dientes.

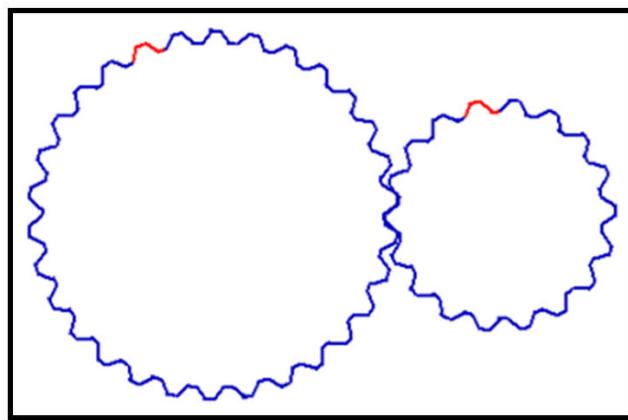
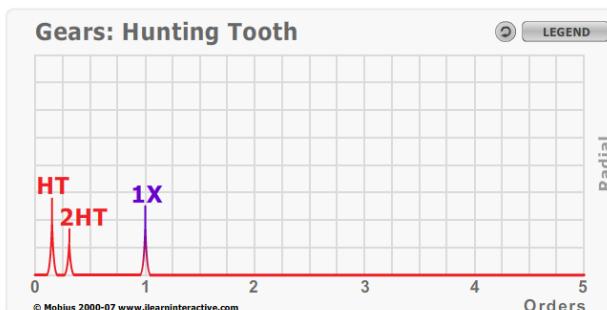


Figura 15-22 Engranaje con un solo diente marcado

Por esta razón, las cajas de engranajes no se hacen con estas relaciones simples a menos que sea absolutamente necesario. Idealmente, la frecuencia de repetición de diente debe ser lo más baja posible para distribuir uniformemente el desgaste alrededor de ambos engranajes. Esto significa que el número de dientes en cada engranaje debe ser un número primo.



15-23 Frecuencia de repetición de diente

En la práctica, la frecuencia de repetición de diente se utiliza para detectar fallas tanto en el engranaje como en el piñón que pueden haber ocurrido durante la fabricación o como resultado de un mal manejo. Por lo general es una frecuencia baja, y se puede escuchar un sonido “gruñendo” de la caja de engranajes.

Frecuencia fantasma

A veces, el espectro de vibración de una caja de engranajes contendrá componentes que no pueden estar relacionados con ninguna geometría conocida de la caja de engranajes. Estas se llaman “frecuencias fantasma”, y son causadas por irregularidades mecanizadas en los engranajes en el proceso de fabricación. Los componentes fantasma son independientes de la carga y tienden a desaparecer a medida que se desgastan los engranajes.

Puntos clave

- EI** Los estudiantes deben estar familiarizados con los tipos comunes de engranajes y diseño básico de engranajes.
- EI** Los estudiantes deben entender y ser capaces de calcular las frecuencias forzadas comunes en los engranajes
 - o Frecuencia de engrane (GMF) y velocidades de eje para una caja de engranajes de hasta dos etapas, bandas laterales
 - o Frecuencia de fase de montaje del engranaje, frecuencia de repetición de diente, frecuencia “fantasma”
- EI** Se proporcionarán fórmulas
- EI** Los estudiantes deben estar familiarizados con los diagramas circulares

Análisis de vibración

Normalmente habrá picos a las velocidades del eje y la frecuencia de engrane; sin embargo, serán de bajo nivel. Puede haber un pico a $2X$ la frecuencia de engrane, y puede haber bandas laterales de velocidad del eje alrededor de la frecuencia de engrane.

Algunas fallas también aparecen en $3X$ la frecuencia de engrane. Por lo tanto, es necesario ajustar el F_{max} lo suficientemente alto como para ver $3x$ frecuencia de engrane y bandas laterales.

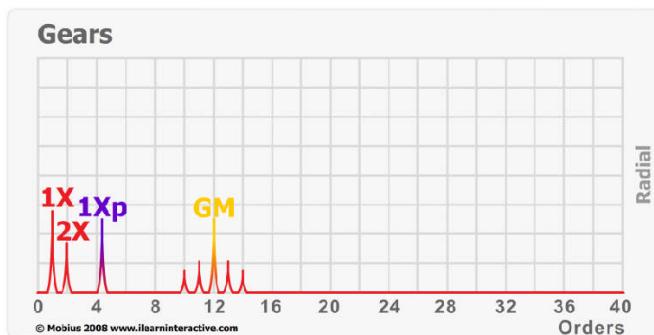


Figura 15-24 – Engranajes generan poco a la velocidad de giro y frecuencia de engrane

Estas frecuencias serán más prominentes en la dirección radial para engranajes de espuela, y en la dirección axial para engranajes helicoidales.

La mayoría de las fallas se detectan mediante el estudio de la frecuencia de engrane y $2x$ y $3x$ frecuencias de engrane junto con sus bandas laterales. La siguiente es una lista parcial de fallas que se pueden detectar a través de este estudio.

- EI** Desgaste de dientes
- EI** Dientes cargados

- Excentricidad del engranaje
- Juego (backlash)
- Desalineación entre engranajes
- Dientes rotos o agrietados

Formas de onda y análisis de engranajes

La forma de onda es una herramienta muy poderosa cuando se intenta diagnosticar fallas de engranajes.

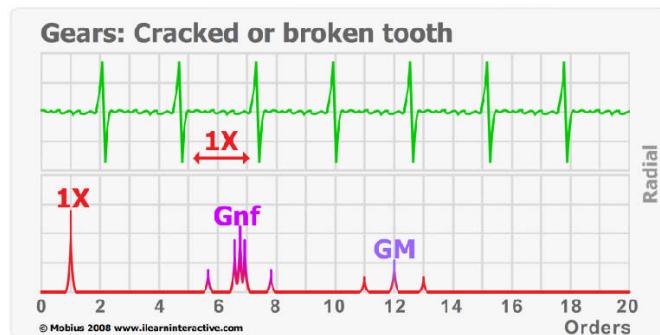


Figura 15-25 – Un diente dañado se mostrará en la forma de onda como pulsos a la frecuencia del eje.

Con el engrane de cada diente hay un pulso en la forma de onda. Los dientes típicamente se pueden contar en la forma de onda de tiempo. Dependiendo de la naturaleza de la falla, uno de los impactos por ciclo puede estar a una amplitud mayor; o menor (si es que no hay). Ver Figura 15-26

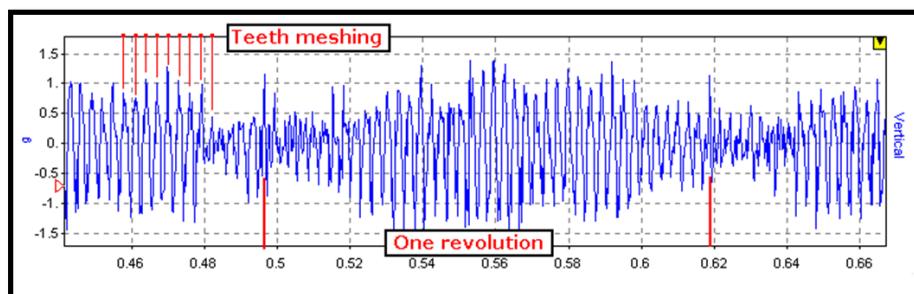


Figura 15-26 – Cada impacto se relaciona con dos dientes engranando.

La forma de onda de tiempo en la Figura 15-26 muestra impactos cada vez que los dientes engranan. La variación en la amplitud se debe a que las ruedas están desalineadas, causando variación en la carga y por consiguiente variación en la amplitud. Los pulsos se relacionan con los contactos entre dos dientes. Esta forma de onda muestra un ciclo que se relaciona a un giro completo del eje.

La forma de onda de tiempo será en gran parte sinusoidal con modulación limitada. En las cajas de engranajes sanas no debe haber transitorios distintos.

Una regla general es recolectar 6-10 rotaciones de cada eje con una resolución adecuada para ver las bandas laterales y los detalles.

Promedio sincrónico de tiempo

El promedio sincrónico de tiempo (TSA) se utiliza comúnmente cuando se intenta diagnosticar fallas de engranaje. TSA promediará todas las fuentes de vibración que no son sincrónas con el pulso tach, que se toma del eje del engranaje de interés.

Esto significa que se eliminan otras fuentes de vibración, desde los rodamientos, el motor, las resonancias, etc., dejando una forma de onda de tiempo limpia. La TSA consume mucho tiempo (se requiere un gran número de promedios) y lleva mucho tiempo configurarse en primer lugar. Sin embargo, vale la pena todo el esfuerzo por los resultados obtenidos.

Desgaste de dientes

Cuando los dientes comienzan a desgastarse, pasarán dos cosas. La primera es que las bandas laterales en la frecuencia de engrane aumentarán su magnitud. Las bandas laterales corresponderán a la velocidad del engranaje con el desgaste. Las bandas laterales se desarrollarán como resultado de la modulación de amplitud o frecuencia.

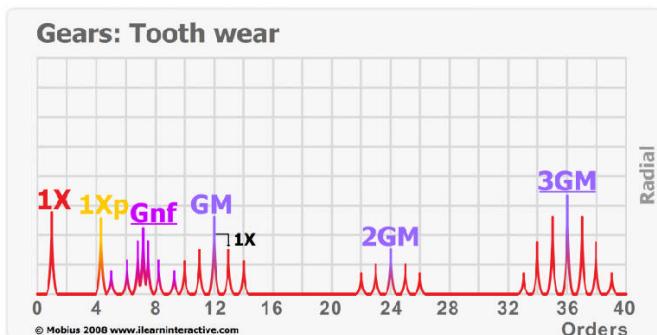


Figura 15-27 – Desgaste de diente

La segunda cosa que ocurre es que la frecuencia natural del engranaje (Gnf) se excita debido al impacto de los engranes. Este pico también exhibirá bandas laterales, y como una frecuencia natural, es probable que tenga una base más amplia.

Para entender el patrón de frecuencia natural del engranaje con bandas laterales, imagine que un diente en uno de los engranajes está dañado. Cada vez que el diente dañado impacta el otro engranaje hace que ese engranaje suene como una campana en su frecuencia natural. Ese timbre da como resultado un “golpe” en el espectro a esa frecuencia natural.

Ahora considere que el engranaje está sonando como una campana en su frecuencia natural y cada vez que el diente dañado lo golpea, suena más fuerte, luego más suave, luego más fuerte cuando se golpea de nuevo. En otras palabras, la amplitud del timbre sube y baja o está siendo “modulada” en amplitud. Esto dará lugar a bandas laterales alrededor de la frecuencia natural del engranaje (G_{nf}). Si el diente dañado está en el engranaje de entrada y golpea una vez por revoluciones del engranaje de entrada, entonces esta es la frecuencia de modulación y las bandas laterales se espaciarán en 1X. Si el diente dañado se encuentra en el engranaje de salida, las bandas laterales se espaciarán a la velocidad del eje de salida.

El patrón G_{nf} que acabamos de describir puede aparecer en cualquier momento que haya un impacto repetitivo en el engranaje o en cualquier modo de falla donde esto está ocurriendo.

El pico a 3X la frecuencia de engrane aumentará en amplitud y aparecerán varias bandas laterales.



Figura 15-28 Dientes muy desgastados

Dientes cargados

La amplitud de la frecuencia de engrane depende de la alineación de los ejes que llevan los engranajes, y la carga en el engranaje. Cuanto mayor sea la carga, mayor será la amplitud. Un pico alto en la frecuencia de engrane no indica necesariamente un problema. La carga excesiva puede provocar desgaste y daños en el futuro.

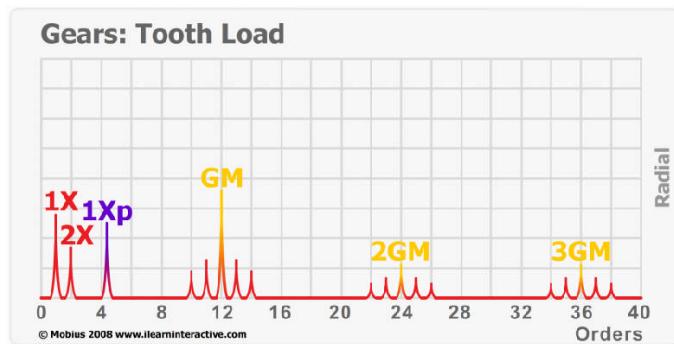


Figura 15-29 – Cargas en los dientes producen GMF altos.



Figura 15-30 Engranajes bajo carga

Engranajes excéntricos

Los engranajes excéntricos y con ejes doblados hacen que la carga varíe una vez por revolución (modulación de amplitud) produciendo bandas laterales espaciadas a la velocidad del eje (del engranaje infractor) alrededor de la frecuencia de engrane. Sin embargo, a menudo sólo verá una sola banda lateral, en lugar de una familia entera.

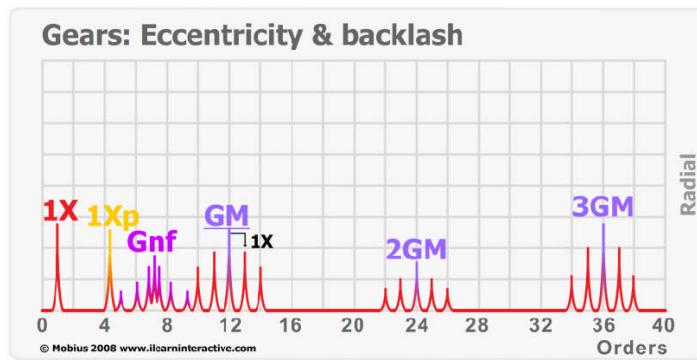


Figura 15-31- Excentricidad y juego de engranajes

Las frecuencias 1x GMF y 3x GMF serán dominantes debido a la vibración “no lineal”. Esto se produce cuando los dientes se deslizan dentro y fuera del contacto.



Figura 15-32 Engranajes excéntricos

Juego de engranajes (backlash)

El juego entre engranajes también genera bandas laterales de velocidad del eje alrededor de la frecuencia de engrane. El pico de engrane y el pico de frecuencia natural del engranaje a menudo disminuirán con el aumento de la carga cuando exista este problema.

Engranajes desalineados

Los engranajes desalineados también generan frecuencias de engrane de alta amplitud con bandas laterales, sin embargo, es común tener armónicos de frecuencia de engrane, con niveles más altos a dos y tres veces la frecuencia de engrane.

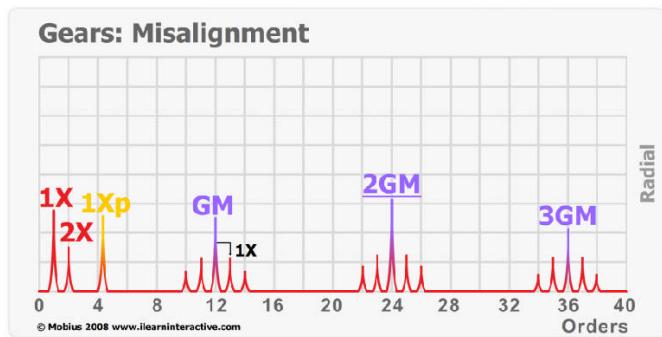


Figura 15-33 – Desalineación de engranajes



Figura 15-34 Engranajes desalineados

El desgaste en el engranaje es desigual o sesgado debido al contacto angular entre los dientes. Esto produce bandas laterales alrededor de 1x, 2x, y 3x la frecuencia de engrane, puede ser a 2x RPM en lugar de 1x RPM. Las bandas laterales pueden ser menores por debajo de 2x la frecuencia de engrane en comparación con las bandas laterales por encima de 2x la frecuencia de engrane.

Los datos espectrales muestran las bandas laterales cuando se acercan alrededor de la frecuencia de engrane.

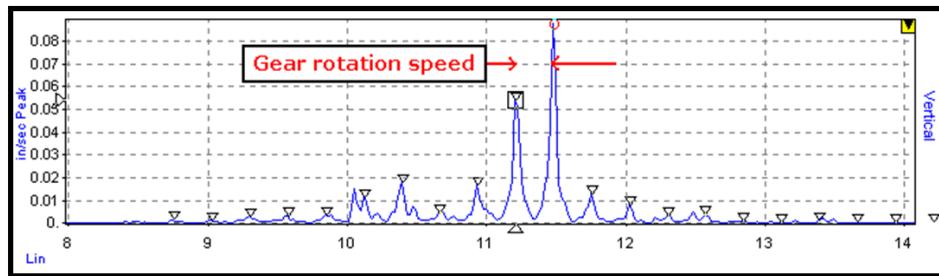


Figura 15-35 – Bandas laterales a la velocidad del eje son evidentes cuando se hace un acercamiento a la frecuencia de engrane.

Los armónicos de la frecuencia de engrane indican la presencia de bandas laterales especialmente alrededor de $2x$ la frecuencia de engrane. El pico a $2x$ la frecuencia de engrane es también el más alto en amplitud.

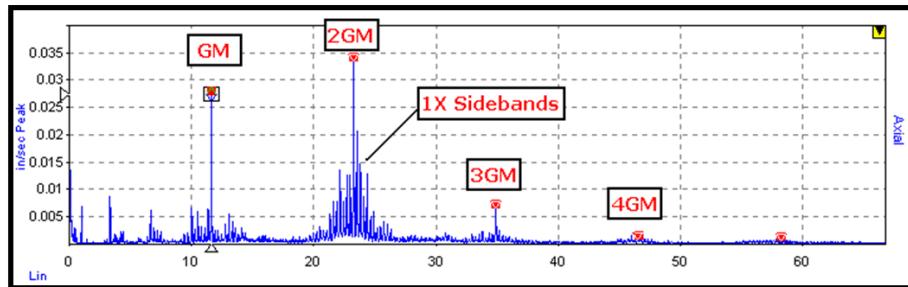


Figura 15-36 - $2x$ Frecuencia de engrane es la más alta y con más bandas laterales.

Las bandas laterales serían más claras si los datos no estuvieran integrados y serían aún mejores en una escala logarítmica. Estos datos en realidad provenían de la dirección axial.

El análisis de forma de onda de tiempo proporciona una indicación muy clara de la modulación que se produce.

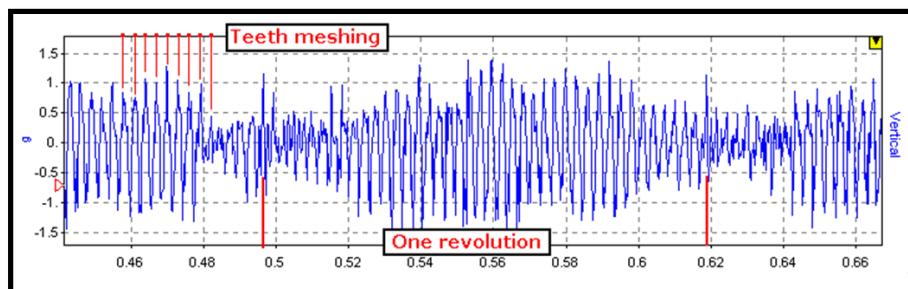


Figura 15-37 Forma de onda de engranajes desalineados

Engranajes con radios

Los engranajes con radios pueden no ser perfectamente redondos; puede haber puntos altos en el punto de cada radio. A medida que ese punto entra en engrane, la vibración se elevará momentáneamente. Si hay seis radios, por ejemplo, habrá seis pulsaciones por rotación.



Figura 15-38 Engranajes con radios

Diente agrietado o roto

Un diente agrietado o roto generará un pico de alta amplitud a la velocidad de giro de ese engranaje. Y hará que la frecuencia natural del engranaje se excite. Habrá bandas laterales de velocidad de giro de ese engranaje alrededor de la frecuencia de engrane.



Figura 15-39 Engranajes con diente roto

Sin embargo, la mejor manera de ver un diente agrietado o roto es en la forma de onda. Si hubiera 12 dientes, uno de los 12 pulsos en la forma de onda será muy diferente de los otros. La diferencia de tiempo entre estos pulsos será igual al período de la velocidad de giro del engranaje porque el diente entra en contacto una vez por revolución.

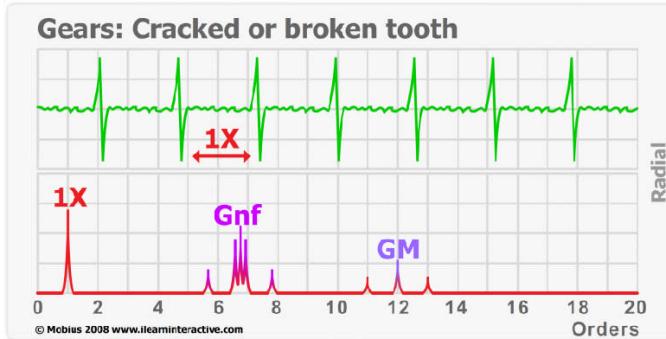


Figura 15-40 – El diente roto se muestra mejor en la forma de onda de tiempo como un pulso a la velocidad del eje.

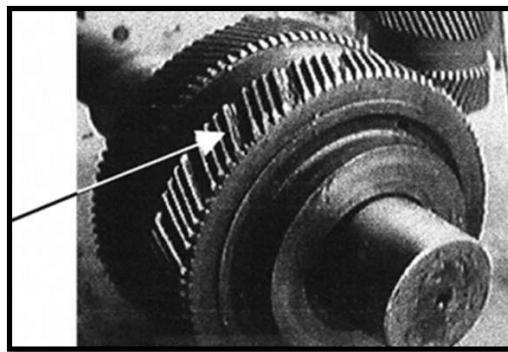


Figura 15-41 Engranaje con dientes quebrados

La importancia de las formas de onda del tiempo

El análisis de forma de onda de tiempo es la clave del éxito con las cajas de engranajes. Las formas de onda de tiempo le muestran lo que está sucediendo con cada engranaje. Si los dientes no engranan uniformemente, lo verá. Si los dientes están desgastados; lo verá. Si los dientes están dañados; sin duda lo verá.

Aquí hay un ejemplo de engranajes con picaduras en los dientes. El espectro no deja muy claro cuál podría ser el problema, pero la forma de onda revela claramente los problemas. No hay un pico más de 0.006 in/seg.



Figura 15-42 Engranajes con dientes dañados

El espaciado de los impactos en la forma de onda corresponde a las RPM del engranaje con desalineamiento. En este caso observe los niveles bajos de g que no activarían una alarma.

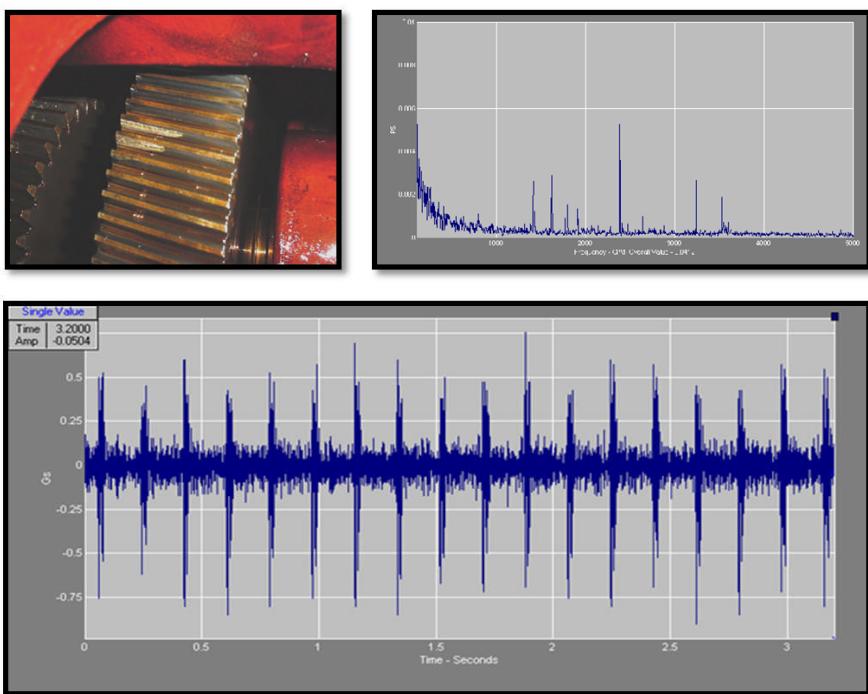


Figura 15-43 Los impactos están espaciados a las RPM del engranaje con picaduras. No se dispararon alarmas

Análisis de partículas de desgaste

El análisis de partículas de desgaste a menudo proporciona una advertencia de daños en el engranaje mucho antes de que lo haga el análisis de vibración.

Tenga en cuenta que el análisis de partículas de desgaste suele estar separado del análisis rutinario de aceite, que no contiene partículas de desgaste anormales. El desgaste de corte, el desgaste abrasivo y el desgaste deslizante producen partículas que son más grandes que las capacidades de la espectroscopía.

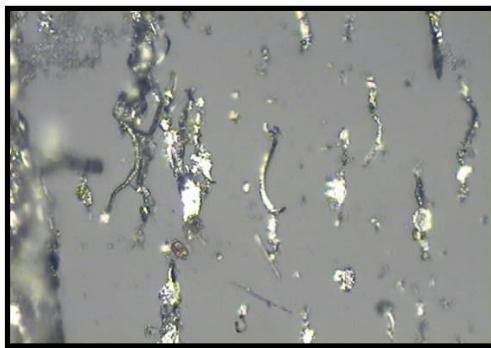


Figura 15-44 El análisis de partículas de desgaste por lo general revela daños en los engranes antes que las vibraciones.

Puntos clave

- Los estudiantes deben entender el patrón asociado con la frecuencia natural del engranaje (Gnf) en fallas que implican impacto.
- Los estudiantes deben ser capaces de identificar la frecuencia de engrane y las bandas laterales de la velocidad del eje en un espectro
- Los estudiantes deben ser capaces de configurar una prueba para analizar un cierto número de revoluciones de eje en la forma de onda de tiempo con suficiente detalle para ver cada engranaje
 - Los estudiantes deben ser capaces de analizar formas de onda de tiempo de las cajas de engranajes para identificar dientes rotos, modulación, etc.
- Los estudiantes deben estar al tanto de los engranajes con los radios
- Los estudiantes deben entender el valor de usar el promedio sincrónico de tiempo al analizar las cajas de engranajes
- Los estudiantes deben ser conscientes de que el análisis de partículas de desgaste (ferrografía) a menudo puede proporcionar mejor información y detección más temprana del desgaste en una caja de engranajes.

Cajas de engranajes planetarias (epicíclicas)

Como se mencionó anteriormente, las cajas de engranes planetarias se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo turbinas eólicas. Gracias a su complicado diseño, puede ser muy difícil determinar las frecuencias forzadas, y puede ser difícil tomar medidas que colecten la vibración de los engranajes y rodamientos internos.

En muchos sistemas de engranajes epicíclicos, uno de estos tres componentes básicos se mantiene estacionario; uno de los dos componentes restantes es una entrada, proporcionando energía al sistema, mientras que el último componente es una salida, recibiendo energía del sistema. La relación entre la rotación de entrada y la rotación de salida depende del número de dientes en cada engranaje y de qué componente se mantiene inmóvil.

Hay tres configuraciones:

- Planetario: Anillo estacionario
- Estrella: Portador estacionario
- Solar: Sol estacionario

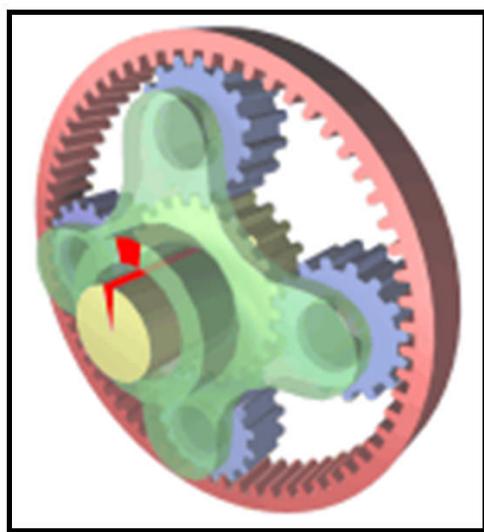


Figura 15-45 Engranaje planetario

La siguiente ecuación debe ser verdadera o de lo contrario los engranajes no pueden encajar físicamente entre sí.

$$N_{sun} + 2N_{planet} = N_{ring}$$

La ecuación que relaciona las velocidades y los dientes de engranaje son los siguientes:

$$\frac{N_{in}}{N_{out}} = \frac{S_{out} - S_{car}}{S_{in} - S_{car}}$$

Donde 'S' es la **velocidad** en el eje de entrada, de salida o portador, y 'N' es el número de dientes en la entrada y salida.

Portador estacionario

Una situación es cuando el portador planetario se mantiene inmóvil, y el equipo solar se **utiliza** como entrada. En este caso, los engranajes planetarios simplemente giran alrededor de sus propios ejes a una velocidad determinada por el número de dientes en cada engranaje. Si el equipo solar tiene S dientes, y cada engranaje planeta tiene P dientes, entonces la relación es igual a -S/P. Por ejemplo, si el equipo solar tiene 24 dientes, y cada planeta tiene 16 dientes, entonces la relación es -24/16, o -3/2; esto significa que una vuelta en sentido de las manecillas de reloj del engranaje solar produce 15 vueltas de los planetas en sentido opuesto a las manecillas del reloj.

Esta rotación de los engranajes del planeta puede a su vez conducir el anular, en una proporción correspondiente. Si el anillo tiene dientes A, entonces el anillo girará P/A vueltas para cada giro de los planetas. Por ejemplo, si el anillo tiene 64 dientes, y los planetas 16, un giro en el sentido de las agujas del reloj de un planeta da como resultado 16/64, o 1/4 de giro en el sentido de las agujas del reloj del anillo.

Por lo tanto:

- Una vuelta del engranaje solar resulta en -S/P vueltas de los planetas
- Un giro de un engranaje del planeta resulta en P/A vueltas del anillo

Por lo tanto, con el portador planetario estacionario, una vuelta del engranaje solar resulta en -S/A giros del anular.

Portador giratorio

El anillo también puede mantenerse fijo, con la entrada proporcionada al portador planetario del engranaje; rotación de salida se produce a partir del engranaje solar. Esta configuración producirá un aumento en la relación de engranajes, igual a 1+A/S

Si el anillo se mantiene inmóvil y el engranaje solar se utiliza como entrada, el portador del planeta será la salida. La relación de engranajes en este caso será 1/(1+A/S). Esta es la relación de engranajes más baja alcanzable con un tren de engranajes epicíclico.

La conclusión es que hay que tener en cuenta cada engrane como si fuera un engrane normal, sin embargo, cuando los planetas están involucrados hay que tener en cuenta su movimiento. Si el portador está girando, ya sea como entrada o salida, entonces el cálculo de frecuencia se ajusta para ese movimiento. Puede tomar la fórmula anterior y cancelar inmediatamente una

porción porque el portador, el anillo o el sol estarán estacionarios. Usted necesitará saber la velocidad de entrada o velocidad de salida, y luego resolver para la velocidad de la salida o entrada. Y una vez que conozca cada velocidad puede calcular las frecuencias de engrane.

La fórmula general es:

$$\left(2 + \frac{N_s}{N_p}\right)S_r + \frac{N_s}{N_p}S_s + 2\left(\frac{N_s}{N_p} + 1\right)S_c = 0$$

Al igual que con cualquier caja de engranajes, si conoce el número de dientes y la velocidad de rotación puede calcular la frecuencia de engrane. Las cajas de engranajes planetarias deben diseñarse de tal forma que el número de dientes en el anillo sea igual al número de dientes en el sol más el doble del número de dientes en el planeta. Por lo tanto, la frecuencia de engrane calculada cuando se considera el engrane entre el planeta y el sol debe ser la misma que la de engrane entre el planeta y el anillo. A continuación, podemos calcular la frecuencia de espacio de banda lateral en función de la velocidad de rotación (cuando corresponda) del planeta, el sol y el anillo.

Cuando veamos un espectro de una caja de engranajes planetaria, buscaremos la frecuencia de engrane tradicional y las bandas laterales, y veremos el doble de la frecuencia de engrane y tres veces la frecuencia de engrane. También veremos una frecuencia que es igual al número de planetas multiplicado por la frecuencia de engrane. Así que si hubiera cuatro planetas, multiplicaremos el engrane por 4.

La fórmula general para las frecuencias de engrane es la siguiente:

$$GM = N_s (S_c - S_s) = N_p (S_p - S_c) = N_r (S_r - S_c)$$

Dónde:

- 'S' denota Velocidad
- 'N' denota número de dientes
- 's' denota sol
- 'p' denota planetas
- 'r' denota anillo

Diferentes configuraciones

Nos hemos centrado en una configuración de caja de engranajes común. Hay otras configuraciones, y los trenes de cajas de engranes planetarias son posibles. Por lo tanto, es importante obtener información sobre la configuración y asegurarse de que siga las mismas reglas.

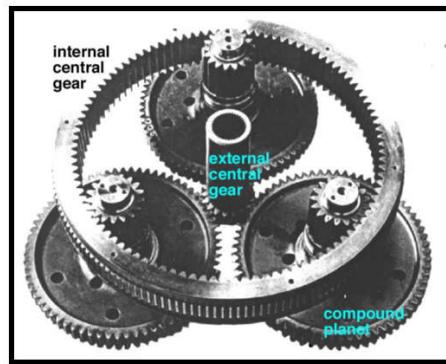


Figura 15-46 Caja de engranajes con configuración diferente

Puntos clave

- Los estudiantes deben ser conscientes de las cajas de engranajes planetarias (epicíclicas) y generalmente deben entender cómo funcionan y dónde se utilizan.
 - Tenga en cuenta las tres configuraciones comunes de estos engranajes
 - Conocer los nombres de los componentes (sol, planeta, portador, anillo)
- Si se requieren cálculos de frecuencias forzadas, se proporcionarán fórmulas.

Monitoreo de cajas de engranajes

Una discusión sobre el análisis de la caja de engranajes está incompleta sin una discusión de técnicas de medición correctas. Tenemos que asegurarnos de localizar el sensor en un lugar apropiado; debemos montarlo para que las altas frecuencias se puedan medir; y debemos configurar el F_{max} correctamente para cubrir las frecuencias de interés. También es necesario recolectar formas de onda de tiempo además de espectros, y utilizar técnicas de demodulación o envolvente. Y por último, debido al número de engranajes y rodamientos, puede ser necesario realizar un promedio síncrono de tiempo.

Es esencial que la ubicación del transductor se seleccione cuidadosamente. Está intentando medir la vibración que resulta de los engranajes dentro de la caja de engranes. La vibración debe viajar a lo largo del eje del engranaje, a través de los rodamientos, y a través de cualquier junta, etc. Una caja de engranajes compleja puede tener una serie de engranajes y es posible que deba tomar medidas de una serie de ubicaciones.



Figura 15-47 Carcasa de engranajes

Si usted es consciente de dónde se encuentran los elementos estructurales internos (como las correas), entonces usted puede colocar el sensor donde el elemento se encuentra con la carcasa. Debe haber una buena trayectoria de transmisión mecánica.

Las cubiertas y paredes pueden resonar, y por lo tanto NO son buenas ubicaciones para el sensor.

Las cajas de cambios suelen ser lo suficientemente importantes como para que usted tome medidas en cada ubicación y eje posible. Sin embargo, además de intentar encontrar la ubicación más cercana a los rodamientos y los elementos estructurales sólidos, también debe considerar la dirección de las fuerzas primarias.

Un engranaje de espuela tenderá a generar fuerzas radiales; por lo que el sensor se colocaría en un eje que está en ángulo recto al.



Figura 15-48 Engranajes de espuela y helicoidales

Sin embargo, un engranaje helicoidal (o espiga o cualquier otro engranaje con un ángulo de bisel) generará empuje axial; por lo que el sensor debe montarse para medir axialmente.

También debe considerar cómo está montando el acelerómetro en la caja. Si usted está esperando para detectar altas frecuencias, entonces un montaje de mano no será aceptable, y

un imán de dos polos puede no ser aceptable. Tenga mucho cuidado con sus mediciones y obtendrá los mejores resultados.



Figura 15-49 Opciones de montaje de acelerómetros

La medición que tomamos debe proporcionar cobertura de todas las frecuencias de interés. Ya sea que la caja de engranajes genere altas frecuencias o frecuencias bajas (cajas reductoras), es esencial que el F_{max} esté configurado para cubrir tres veces la frecuencia de engrane más alta.

Debido a que estamos buscando bandas laterales del conductor y las rpm del conductor, la resolución elegida debe permitirle resolver entre estos picos.

Podemos determinar la resolución dividiendo el rango de frecuencia (F_{max}) por el número de líneas de resolución – y luego multiplicando por 1.5 porque estamos usando una ventana de Hanning. Por ejemplo, si tenemos un F_{max} de 2200 Hz y 800 líneas, cada línea estará separada por $(2200/800)$ a 2.75 Hz, pero cada pico único requerirá 4.125 Hz. Para ver una brecha entre el pico (es decir, para resolverlos), necesitamos que los picos estén aproximadamente un 50% más separados, por lo que los picos pueden ser un mínimo de 6 Hz de diferencia.

Vale la pena teniendo en cuenta los requisitos de resolución, o de lo contrario los picos de banda lateral se fusionarán y se desenfocarán en uno solo.

El análisis de forma de onda de tiempo es una herramienta de diagnóstico esencial. También es útil si usted tiene una manera de escuchar las formas de onda colectadas.

La forma de onda de tiempo muestra la vibración instantánea que resulta de cada engrane. Si hay variación en la forma en que cada diente engrana, debido a la excentricidad, desalineación, dientes dañados, o por cualquier otra razón, verá estas variaciones en los datos de forma de onda de tiempo. Los eventos que no se producen en cada ciclo serán “descartados” de la forma de onda del tiempo. El promedio de espectro eliminará cualquier patrón que lo haya convertido en el espectro. El análisis de bandas laterales es útil, sin embargo hay información en la forma de onda de tiempo que se pierde en la transformación FFT.

Por lo tanto, la forma de onda de tiempo debe tener la resolución suficientemente alta para poder ver estos datos y de duración suficiente para detectar todos los eventos.