



Capítulo 9

Análisis Modal

Temas:

- ¿Qué es el análisis modal?
- Colección de medidas
- Creación de animaciones de forma de modo
- Análisis modal y análisis de elementos finitos

Introducción al análisis modal

El análisis modal es un método de prueba que proporciona datos que proporcionan pruebas de la existencia y frecuencia de resonancias, y una estimación de las formas de amortiguación y modo. Podemos utilizar estos datos para entender cómo vibra una estructura podemos utilizar esta información para diseñar los cambios necesarios para minimizar la vibración en condiciones normales de funcionamiento.

El análisis modal se utiliza en una amplia gama de industrias.

- Se utiliza para probar discos duros para asegurarse de que la cabeza de la unidad se puede mover rápidamente a la ubicación requerida del disco sin vibración que generaría errores de lectura/escritura de datos.
- El análisis modal se utiliza para probar automóviles para minimizar el ruido a como el conductor opera el coche a través de una gama de velocidades (puede recordar que los coches solían vibrar mucho más de lo que lo hacen hoy en día).
- El análisis modal se utiliza en objetos de precisión, como el telescopio espacial Hubble, para garantizar que haya una vibración mínima; proporcionando así las imágenes más claras.

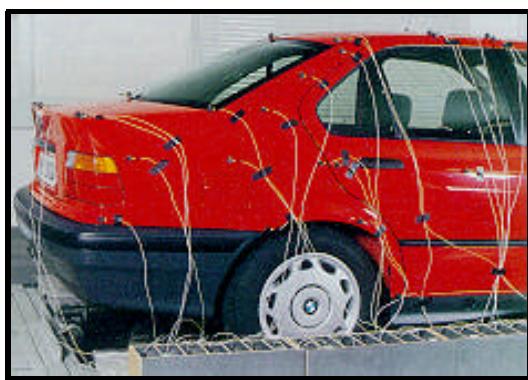


Figura 9-1

En aplicaciones industriales, el análisis modal se utiliza normalmente para comprender las formas de modo de una estructura de manera que los niveles de vibración se minimicen a través de las velocidades de funcionamiento de la maquinaria montada; que a su vez ofrece una gran confiabilidad (reducción de fallos estructurales o aumento del desgaste del rodamiento debido a vibraciones excesivas).

El análisis modal no es lo mismo que el análisis de forma de desviación operativa (ODS). ODS simplemente anima cómo vibra una estructura. Esto nos ayuda a visualizar la vibración ya sea para tener una mejor idea de lo que está sucediendo o para reportarla a otros. Si una estructura no está en resonancia cuando se realiza ODS, entonces no nos dirá nada sobre la resonancia. ODS se realiza en una estructura o máquina mientras vibra mientras que en el análisis modal, se introduce una fuerza conocida en la estructura y se mide la respuesta.

Estos resultados se generaron a partir de datos de prueba modal. Usando software sofisticado, los datos de prueba colectados de numerosos puntos se pueden utilizar para mostrar las formas de modo animado en cada una de las frecuencias naturales.

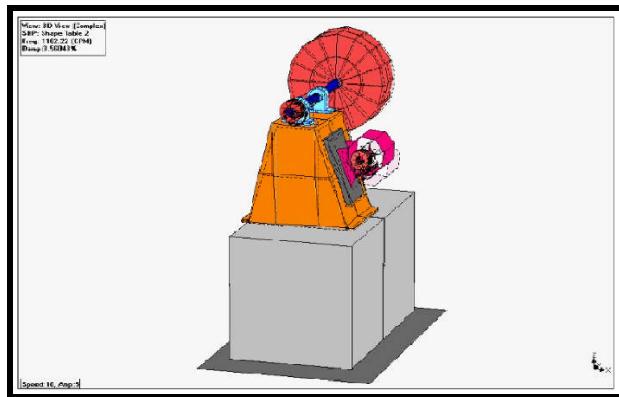


Figura 9-2

Tenga en cuenta que ODS se puede utilizar para generar una animación de la vibración de la máquina basada en la amplitud de vibración y la información de fase. Las animaciones generadas a partir de datos ODS no prueban la existencia de resonancias.

Estos son algunos datos clave sobre el análisis modal experimental:

- El análisis modal se realiza en una estructura cuando no está funcionando.
- El análisis modal revela la información que demuestra dónde se ubicarán las frecuencias resonantes y cómo se moverá/deformará la estructura cuando se excite.
- El análisis modal se puede utilizar como base para calcular las modificaciones estructurales necesarias para alterar la estructura
 - Cambie la masa, rigidez o amortiguación para mover las resonancias a una frecuencia que no se excitará por las frecuencias forzadas de nuestra máquina.

Hay una serie de pasos necesarios para realizar la prueba de análisis modal:

1. Determinar la geometría/puntos de prueba
 - a. Introduzca el plano en el software modal
2. Tome datos en cada ubicación de prueba
 - a. Ingréselos al software de análisis
3. Analizar los resultados
 - a. Encuentre las frecuencias resonantes
 - b. Ajuste de curva a la función de respuesta de frecuencia para extraer la amortiguación
 - c. Animar la estructura
4. Realice las modificaciones necesarias
 - a. Modifique la estructura para que las resonancias no se exciten

Definición de la geometría de la estructura sometida a prueba

Para organizar el proceso de prueba y realizar la animación, debe crear un modelo de la estructura que se está probando. Debe haber, como mínimo, un punto en el modelo para cada punto de la estructura que va a probar. Para crear un modelo que se asemeje más a la estructura, es necesario definir un gran número de puntos.

La buena noticia es que en realidad no es necesario colectar una medida en todos y cada uno de los puntos definidos. Es posible definir puntos que se mueven igual que otros puntos de la estructura. Esto permite un modelo de mejor aspecto (y animación) sin necesidad de tantos puntos de prueba.

Es importante no utilizar muy pocas ubicaciones de prueba. Debe tener cuidado de no hacer suposiciones sobre la ubicación de los nodos y las formas de modo que puede descubrir.

Por ejemplo, si definiera un pequeño número de puntos a lo largo de una viga no sería capaz de identificar correctamente el tercer modo de flexión (o superior), puede inducir lo contrario a pensar que existe un primer o segundo modo de flexión.

La mayoría de los programas de análisis modal hacen que sea relativamente fácil definir la estructura, y proporcionar componentes de modelo predefinidos (ya sea formas como rectángulos, cilindros, varillas, etc. o motores reales, bombas, etc.) que le permiten montar rápidamente los modelos.

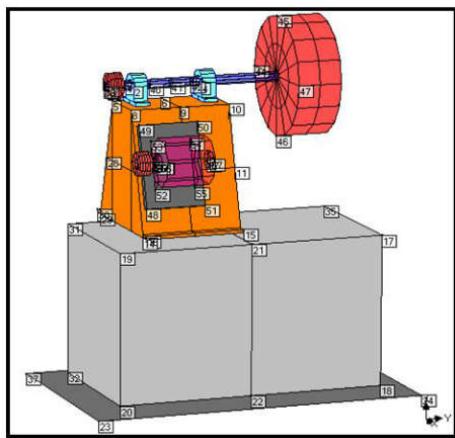


Figura 9-3

Pruebas modales

Las pruebas modales implican la inyección de una fuerza conocida y la medición de la respuesta. Una serie de métodos se utilizan para excitar la estructura, sin embargo, el campo de confiabilidad de la maquinaria casi siempre utilizará “pruebas de impacto” - utilizamos un

martillo “modalmente ajustado” (equipado con una celda de carga) para excitar la estructura. Medimos la fuerza utilizada para golpear la estructura con la celda de carga, y medimos la respuesta con un acelerómetro. Normalmente repetiríamos estas pruebas en los tres ejes para que tengamos una imagen completa de los modos. En breve discutiremos este procedimiento con mayor detalle.

La máquina no debe estar funcionando en el momento de la prueba porque suponemos que la vibración medida se genera como resultado de la fuerza de entrada, o “excitación”. Cualquier vibración o ruido externo comprometerá los resultados de la prueba. Las pruebas de coherencia y correlación se utilizan para identificar la presencia de ruido/vibración externa (así como la identificación de posibles no linealidades en la estructura, y la eficacia de la fuerza de excitación).

Función de respuesta de frecuencia (FRF)

Para conocer las características resonantes de la estructura, calculamos la función de respuesta de frecuencia (FRF), también conocida como la función de transferencia. El FRF es la relación de la respuesta medida a la fuerza de entrada.

Si pudiéramos inyectar una fuerza y medir una respuesta que fuera exactamente la misma que la fuerza de excitación, entonces el FRF sería una línea plana. Sin embargo sabemos que a ciertas frecuencias encontraremos que los niveles de vibración se amplifican. También sabemos que la amplificación alcanzará el pico a ciertas frecuencias (la frecuencia natural) y se reducirá a frecuencias altas y más bajas – la tasa de reducción depende de la amortiguación y de la proximidad a los modos. Recuerde, estamos probando estructuras de varios grados de libertad (MDOF) por lo que habrá más de un modo.

También observaremos que en otras frecuencias la respuesta de salida será muy baja en comparación con la fuerza de entrada. Estas frecuencias representan las frecuencias naturales. Por ejemplo, supongamos que probamos una viga y encontramos que la frecuencia del segundo modo de flexión es de 30 Hz. Ahora supongamos que estamos midiendo la respuesta en el centro de la barra, justo en el punto nodal para el segundo modo de flexión. El valor en el FRF a 30 Hz sería MUY bajo.

La siguiente ilustración muestra tres FRS tomados en la dirección X, Y y Z, junto con una estructura simple que se está animando.

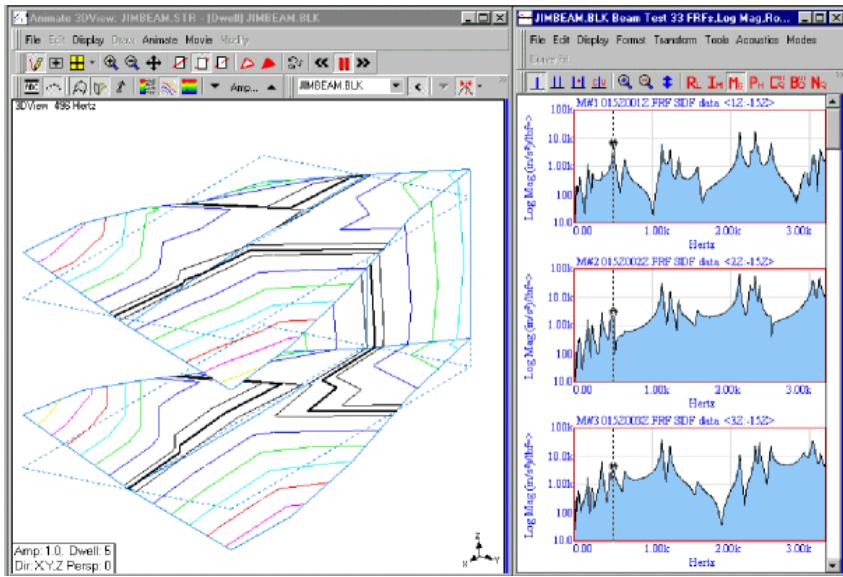


Figura 9-4

Cabe señalar que debido a que tenemos una respuesta en todas las frecuencias, podemos animar la estructura en cualquier frecuencia. Ciertamente podemos identificar las frecuencias naturales y ver cada forma de modo. Comprender la forma del modo es el primer paso para entender cómo se puede alterar la estructura para alejar uno (o más) modos ofensivos de la fuente de vibración que se está amplificando (normalmente la velocidad de funcionamiento de la máquina).

Fuentes de excitación en pruebas modales

Comúnmente hay dos métodos utilizados para proporcionar la excitación: podemos injectar un “pulso” de energía (que incluye energía en frecuencias en nuestra área de interés), o podemos usar un “agitador” para injectar energía en la estructura.

Como se mencionó anteriormente, normalmente usamos el primer método a través de un martillo ajustado modalmente. Esto se discutirá en profundidad en breve.



Figura 9-5

Uso de agitadores en pruebas modales

Para generar el FRF necesitamos comparar la vibración de respuesta de salida con la vibración de excitación de entrada, en cada frecuencia de interés. Los agitadores se pueden utilizar para injectar energía de vibración en una estructura. Un agitador se puede considerar como un altavoz de audio grande con un accesorio que permite injectar el sonido en la estructura. La fuerza de excitación se genera tocando sonidos en el agitador.

1. El sonido puede ser ruido aleatorio (o ruido rosa) – vibración en todas las frecuencias (o en un rango específico de frecuencias)
2. O vibración a una sola frecuencia que se barre a través del rango deseado de frecuencias de excitación

Se podría decir mucho más acerca de los agitadores, sin embargo, rara vez se utilizan en la aplicación de “salud de la maquinaria”, por lo que no se discutirán más.

Pruebas de impacto para pruebas modales

La forma más común de excitación es el martillo de impacto. Cuando una estructura es golpeada con un objeto sólido (como un martillo o bloque de madera), se inyecta un impulso de energía en la estructura. Como aprenderemos, la energía cubre un rango limitado de frecuencias. Es nuestro trabajo elegir el martillo más adecuado para nuestra aplicación.

Los martillos están disponibles y están diseñados específicamente para esta tarea. Se ajustan modalmente para generar la entrada deseada, y se instrumentan con una celda de carga para que se pueda medir la fuerza de excitación. La fuerza de entrada se mide en unidades de voltios por kilogramo de fuerza (voltios/kgf) o voltios por libra de fuerza (voltios/lbf).

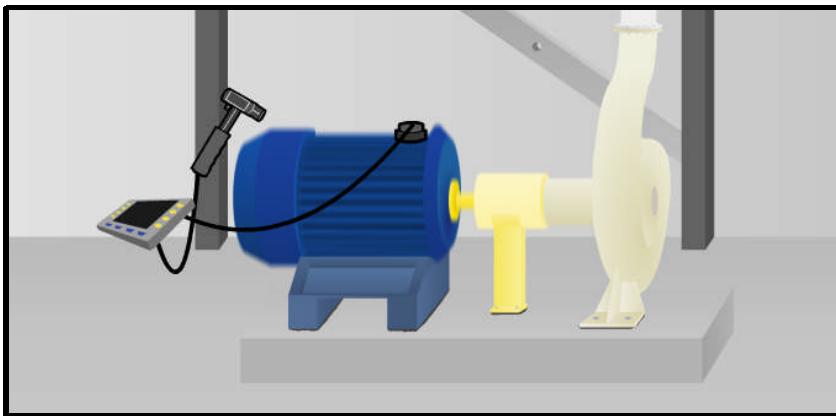


Figura 9-6

Un acelerómetro se utiliza para registrar la respuesta de la estructura a la fuerza de excitación – en unidades de “g” (o mm/s²).

La importancia de seleccionar la punta de martillo correcta

El tamaño y peso del martillo, y la rigidez de la punta en el martillo, afecta en gran medida a los resultados obtenidos en la prueba modal.

Tenemos que considerar el tamaño de la estructura que estamos tratando de excitar. Si se trata de una estructura grande y masiva, como las paredes o los suelos de un edificio, entonces debemos usar un martillo muy pesado. Como se muestra en la siguiente ilustración, los martillos ajustados modalmente están disponibles del tamaño de un martillo de trineo. Un martillo ligero simplemente no generará una fuerza suficientemente grande. Es probable que una estructura grande tenga modos con una frecuencia baja. Usaremos una punta suave en el martillo. La punta suave asegura que la energía de entrada se concentre en el rango de frecuencia más bajo.

Si la estructura no es tan masiva, como las estructuras de soporte para las máquinas, entonces se puede utilizar un martillo más ligero, y la punta puede ser más rígida. Una vez más, es más fácil impartir una fuerza suficiente en la estructura, y una punta ligeramente más rígida asegurará que las frecuencias más altas se excitan - las frecuencias naturales son probables que sean más altas en frecuencia.

Y finalmente, si estuviéramos probando el rotor de un ventilador de tamaño medio, o aspas de un ventilador, entonces usaríamos un martillo más pequeño (de lo contrario podríamos dañar el aspa del ventilador que se está probando), y usaríamos una punta rígida ya que las frecuencias naturales serán más altas en frecuencia.

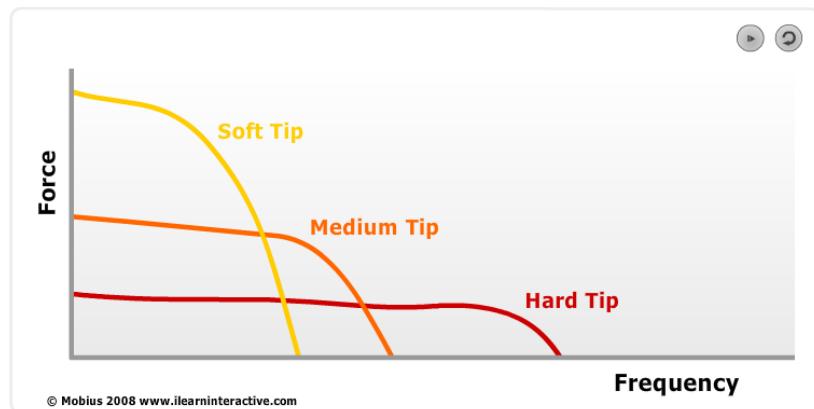


Figura 9-7

A continuación se muestra un ejemplo de la excitación y la respuesta de entrada. Puede ver el disparador previo utilizado en la entrada. También puede ver cómo ha respondido la estructura. Como aprenderemos pronto, la frecuencia y la amortiguación se pueden determinar a partir de la frecuencia y la tasa de descomposición de la respuesta.

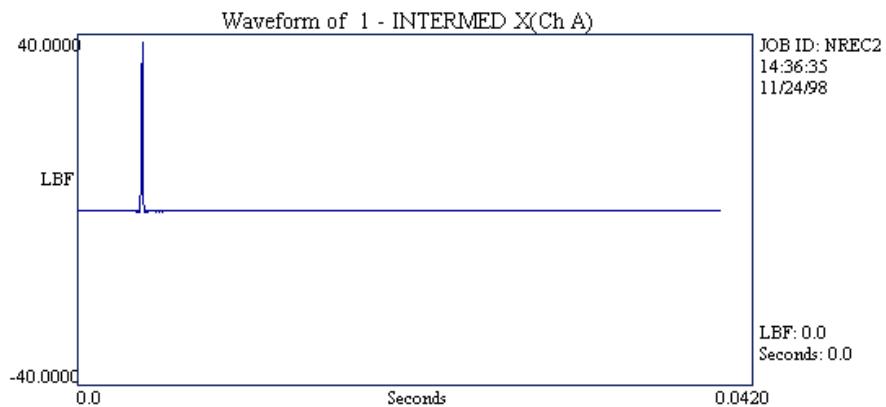


Figura 9-8

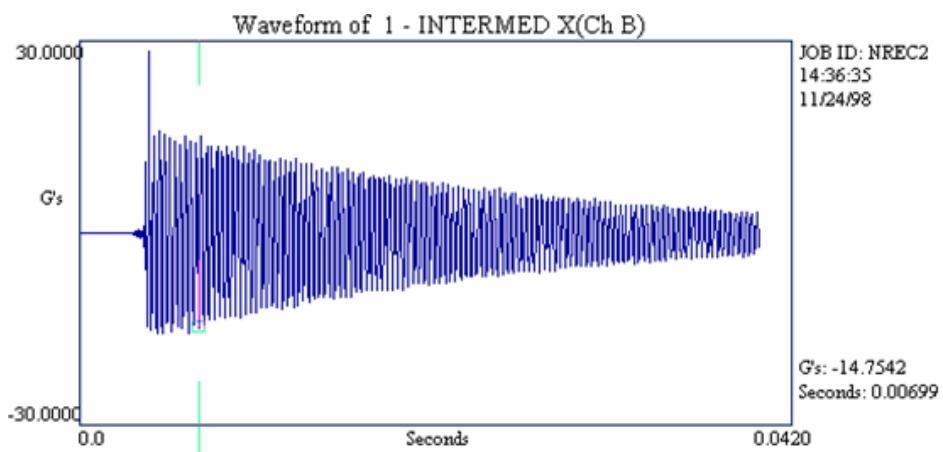


Figura 9-9

La secuencia de pruebas modales

Estamos tratando de determinar cómo se comporta toda la estructura. Por lo tanto, necesitamos calcular el FRF entre cada punto de la estructura (en 3 ejes) y una referencia. Esto se puede lograr típicamente de dos maneras:

- 1 Seleccionamos un único lugar donde golpearemos la estructura, y movemos el acelerómetro a cada punto de la estructura. Los datos se capturan simultáneamente. Por ejemplo, golpearemos la estructura en la posición “1” y leeremos la respuesta en la posición “1” en los ejes X, Y y Z (repitiendo la prueba para cada eje). Y luego el acelerómetro se mueve a la posición 2 (X, luego Y, luego, Z) mientras que siempre impactamos la estructura en la posición “1”.
- 2 Alternativamente, siempre podemos medir la respuesta en una sola ubicación mientras golpeamos la estructura en cada ubicación y dirección de medición. Puede ser difícil utilizar este método en aplicaciones industriales porque es difícil afectar a la estructura en cada ubicación y eje.

La recopilación de los datos es de vital importancia. El analizador debe registrar la vibración de excitación y la respuesta en su totalidad. Por lo tanto, el impacto debe estar totalmente contenido dentro del registro de tiempo de un canal y la respuesta debe estar totalmente contenida en el registro de tiempo del segundo canal.

Configuración del analizador

El analizador debe estar configurado para capturar los datos como se describió anteriormente. La activación se utiliza para que el analizador espere hasta que golpee la estructura. Usamos pre-disparador para que el impacto no comience al principio del registro de tiempo.

Desactivamos la función de la ventana, ya que no habrá fugas (suponiendo que el impacto se capture por completo dentro de la ventana de tiempo).

El mayor desafío reside en el canal de respuesta. Dependiendo de la amortiguación, la estructura puede continuar vibrando (o “sonando”) después de que el analizador complete la adquisición de datos. El resultado será una fuga y resultados muy pobres. Tenemos dos opciones disponibles para nosotros:

1. Podemos cambiar la configuración de nuestra colección para que la ventana de tiempo sea más larga. Podemos hacerlo bajando el F_{max} o aumentando la resolución.
2. Podemos usar la ventana “exponencial”. La ventana exponencial está diseñada para amortiguar eficazmente la señal de respuesta – el objetivo es agregar suficiente amortiguación para que la señal decaiga a cero dentro del registro de tiempo. A continuación, se compensa el cálculo FRF para esta fuente adicional de amortiguación.

Como se indicó anteriormente, el FRF se deriva dividiendo la respuesta de salida en voltios/g (por ejemplo, 100 mV/g) por la excitación de entrada en voltios/kgf o voltios/lbf (o voltios/N). Por lo tanto, las unidades del FRF son g/kgf o g/lbf (o g/N).

La medición del punto de conducción

Con el fin de calibrar el sistema, y para permitirnos calcular cómo puede responder la estructura después de que se realizan cambios estructurales (por ejemplo, rigidez adicional añadida entre dos puntos), necesitamos una “medida del punto de conducción”.

La medición del punto de conducción es la prueba en la que la respuesta se mide en la misma ubicación que la excitación de entrada. Por ejemplo, si siempre impactamos la estructura en la posición “1”, la medición del punto de conducción es la prueba única realizada cuando el acelerómetro de respuesta se encuentra en la posición “1”.

La Figura 9-10 muestra un punto de medición en el conductor, esto se requiere para el análisis modal.

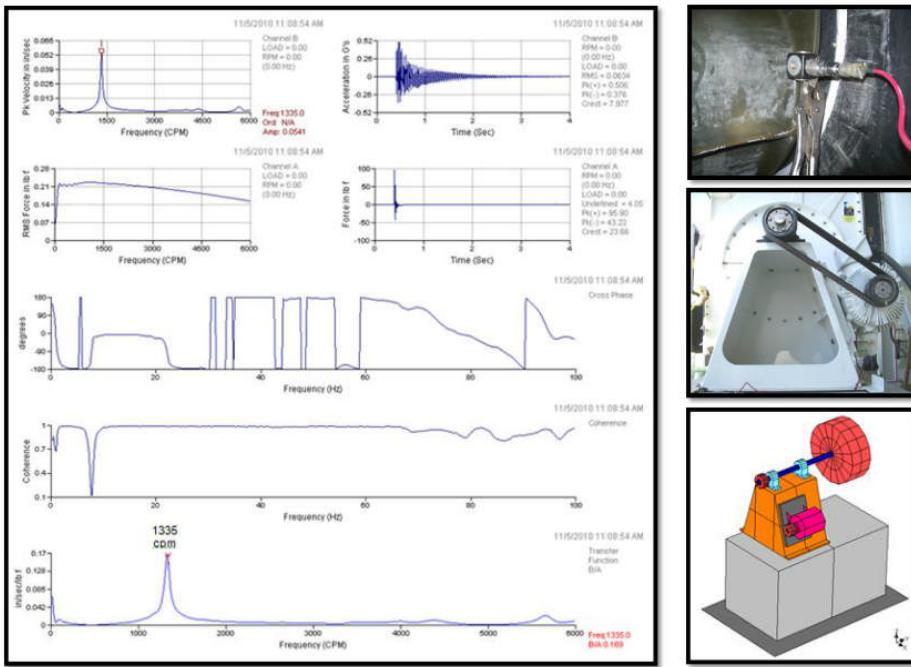


Figura 9-10

Lareglade la reciprocidad

Hay una regla que se supone que es verdadera al realizar pruebas modales – la regla de “reciprocidad”. Si impactamos en una estructura en la posición “1” y medimos la respuesta en la posición “2”, el FRF calculado será el mismo es que impactamos la estructura en la posición “2” y medimos la respuesta en la posición “1”.

Por esta razón:

1. Podemos impactar la estructura en una sola ubicación y medir los resultados en cada una de las otras ubicaciones (excitación fija) y obtener los mismos resultados que si impactamos la estructura en cada una de las ubicaciones de prueba y siempre medimos la respuesta en una ubicación (respuesta fija).
2. No es necesario realizar la medición del punto de conducción en cada ubicación de prueba.

Visualización de datos de prueba modales

La función FRF es compleja - tiene magnitud y fase. El FRF se puede mostrar en una variedad de formatos como MAGNITUD, REAL e IMAGINARIA. Tres tipos de pantalla típicos son:

- Diagrama de Bodé
- Nyquist
- Co-quad

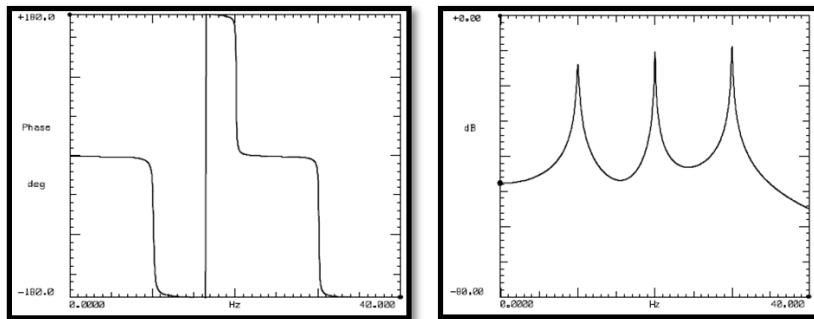


Figura 9-11 Diagrama de Bodé

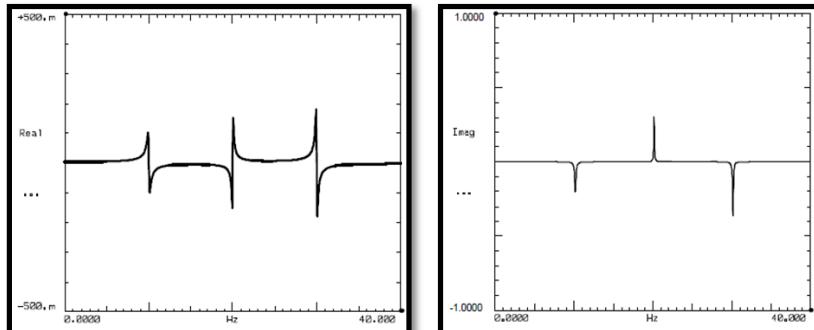


Figura 9-12 Diagrama Co-quad

Diagrama de Bodé

El diagrama más común es el de Bodé. En este podemos ver la magnitud contra la frecuencia y fase contra la frecuencia. Buscamos cambios de fase de 180° en el diagrama de fase, y picos correspondientes en los datos de amplitud. Si los modos están “acoplados muy cerca”, por ejemplo, sus frecuencias están poco espaciadas, puede ser difícil estimar de forma precisa la frecuencia de amortiguación. Hay técnicas disponibles para asistir en esta situación.

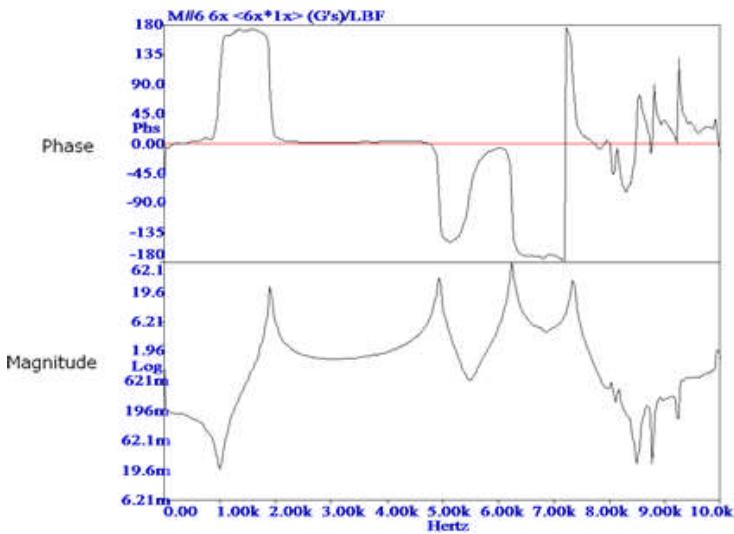


Figura 9-13

Diagrama de Nyquist

La gráfica Nyquist grafica los datos reales frente a los imaginarios con frecuencia cambiante. Debido al cambio de fase de 180 grados que se ha observado a través de una resonancia, los círculos se trazarán donde existen frecuencias naturales.

En este ejemplo no teníamos datos de alta resolución por lo que los círculos no son muy suaves, pero con mejores datos veremos claramente los círculos (y como veremos, esta forma se puede utilizar en una técnica de ajuste de curva “circle-fit” para estimar la amortiguación).

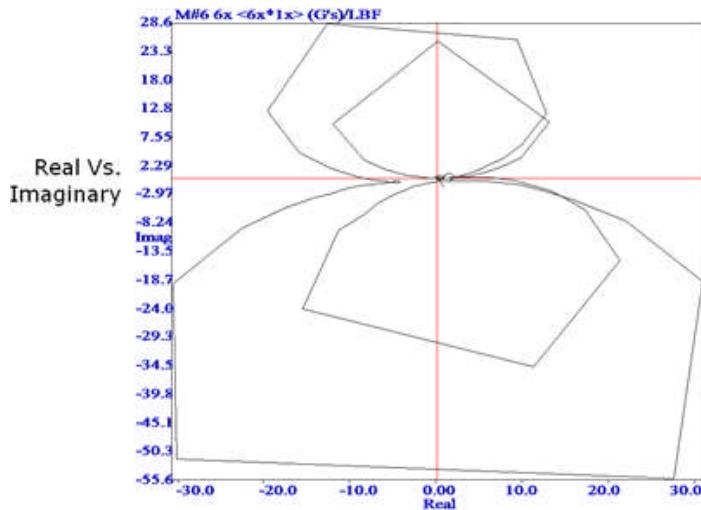
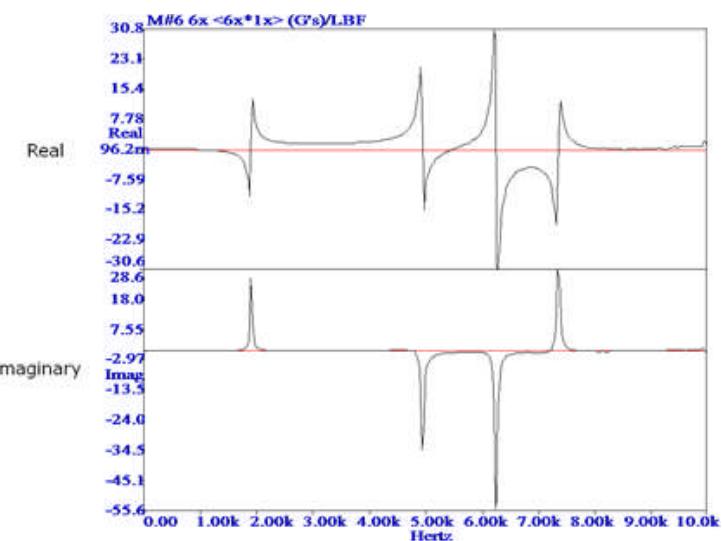


Diagrama co-quad

La gráfica co-quad muestra los datos en formato real e imaginario. Entre otras cosas, podemos obtener una estimación precisa de la frecuencia natural: el cruce cero en los datos reales y los picos de los datos imaginarios.



Datos de prueba modal de ajuste de curva

El software de análisis modal se utiliza en última instancia para identificar las frecuencias naturales y para animar la estructura para que pueda entender mejor las formas de modo. Por definición, la fase debe cambiar 180 grados para validar la presencia de una resonancia. Por lo tanto, podemos utilizar los datos de magnitud y fase para identificar las resonancias y estimar la amortiguación. Utilizamos técnicas de ajuste de curva para obtener la estimación más precisa de la frecuencia natural y para evaluar la pendiente de la curva – es la pendiente que indica cuán fuertemente amortiguado es cada modo. Hay disponibles varias técnicas de ajuste de curvas. Pueden utilizar la forma circular de la gráfica Nyquist, o el gradiente de la pendiente en la parcela de Bodé, y hay otras técnicas. En el análisis modal este es un paso muy importante, pero está fuera del alcance de este curso de Categoría III.

Animación de las formas de modo

El software de análisis modal tomará la información natural de frecuencia, magnitud y fase de cada punto probado y generará una visualización animada de la estructura definida. Puede mostrar una animación de cada forma de modo. Puede utilizar esta información visualmente para evaluar cómo se podría modificar la estructura para alejar las frecuencias naturales de las frecuencias de funcionamiento de la máquina (que están excitando las resonancias), o puede utilizar software sofisticado disponible en algunos de los paquetes para calcular las nuevas frecuencias naturales cuando se realizan modificaciones. Esto se llama comúnmente “modificación dinámica estructural” o SDM.

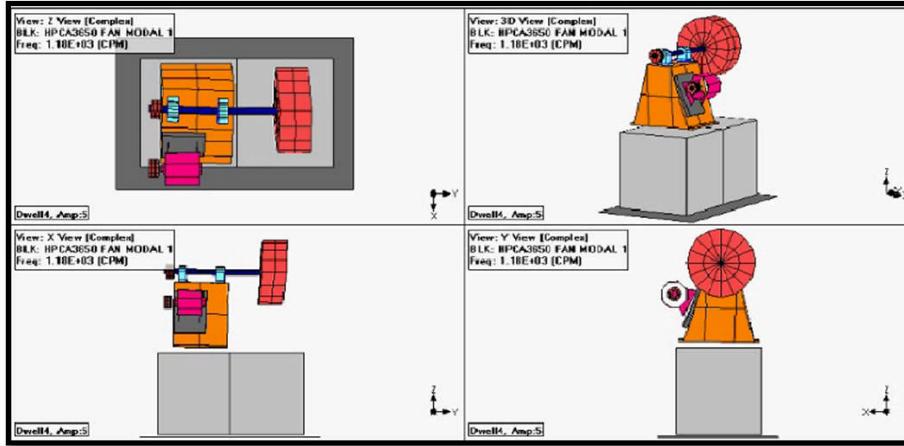


Figura 9-16

Consejos de medición modal FRF

Estos son algunos consejos de prueba adicionales:

- Las pruebas modales FRF requieren que todas las entradas y respuestas se midan simultáneamente.
- Las pruebas de impacto de FRF no se pueden medir en máquinas operando donde existen formas de energía generadas internamente.
- Las pruebas modales FRF requieren martillos de fuerza calibrados y sensores de respuesta para estimaciones precisas de las propiedades del sistema.
- Haga un boceto de prueba antes de comenzar la prueba.
- Pruebe los impactos exploratorios al comienzo de la prueba. Encuentre un punto de conducción donde todos los modos se puedan ver desde todas las ubicaciones de medición.
- Mida siempre el punto de conducción.
- Utilice el tamaño de martillo y la dureza de la punta adecuados.
- Utilice 4-6 promedios para las pruebas de impacto.
- Compruebe si hay buena coherencia (> 80%).

Los beneficios del análisis modal

Aunque las animaciones que se muestran en el software de análisis modal pueden tener el mismo aspecto que las animaciones que se ven en el software ODS, los datos utilizados son muy diferentes, y la información obtenida es muy diferente. Las pruebas modales demuestran la existencia de frecuencias naturales y pueden estimar las características de amortiguación.

Además, el análisis modal puede ayudarle a estimar cómo afectarán varias modificaciones estructurales a estas formas de modo. Esto puede ahorrarle una gran cantidad de tiempo y dinero en comparación con las técnicas experimentales utilizadas con las pruebas ODS, es decir, estimar visualmente los mejores lugares para realizar cambios de diseño, hacerlos y volver a probar para ver si los cambios fueron exitosos.

Análisis de elementos finitos (FEA)

El análisis modal se basa en datos experimentales – debemos tener la estructura para realizar la prueba. Es posible generar la misma información sobre una estructura mientras se está diseñando.

FEA es un método puramente numérico de estimación de las frecuencias naturales, amortiguación y formas de modo. Los paquetes FEA modernos son muy potentes. Además de los datos de forma de modo, FEA se puede utilizar para modelar los esfuerzos que existirán en una estructura (para determinar si será capaz de realizar la función necesaria sin fallar). Se puede utilizar para modelar la transferencia de calor; se puede utilizar para simular modos de falla (colisiones y más); y se puede utilizar para modelar la dinámica de fluidos. FEA permite al

diseñador estar seguro de que una estructura será adecuada para su propósito antes de que se construya el primer prototipo. A continuación, se puede utilizar el análisis modal para probar el objeto, comparar los datos de prueba con el modelo FEA y refinar el modelo en consecuencia. Con esta revisión en su lugar, se pueden hacer más modificaciones en el diseño.

El análisis de elementos finitos se realiza utilizando “elementos finitos”, bloques de construcción que modelan el material utilizado en el objeto y las uniones utilizadas en la construcción. El modelo comprende las propiedades del material, las propiedades mecánicas (cómo se movieron las uniones/enlaces) y las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, amortiguación y formas de modo).

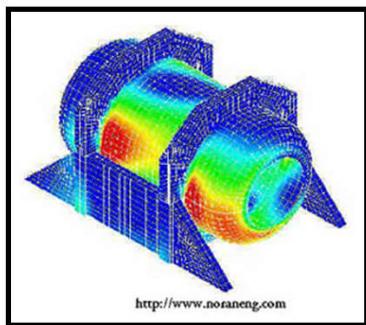


Figura 9-17

La Figura 9-18 es una ilustración de un modelo FEA de un automóvil SAAB. Se realizó una simulación para determinar el daño (al auto y a los pasajeros) cuando el auto colisiona con una pared.

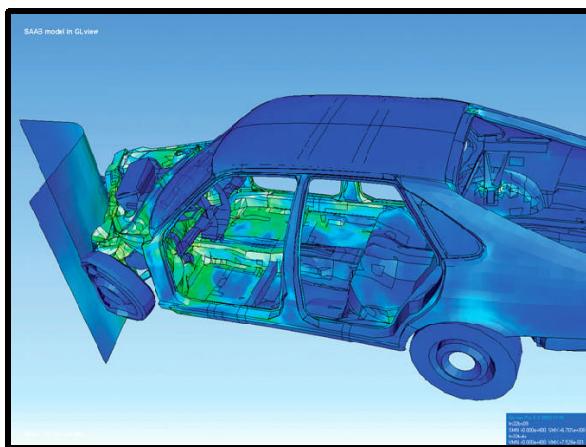


Figura 9-18

Por supuesto, se requiere una considerable potencia informática para crear una simulación tan complicada.

En la Figura 9-19 podemos ver el modelo de un ventilador con la simulación de falla de un aspa. Se realizó una prueba y el resultado se comparó con la simulación, y estuvo muy cerca. Claro, es mucho más barato simular fallas, y experimentar con cambios de diseños para lograr el mejor diseño.

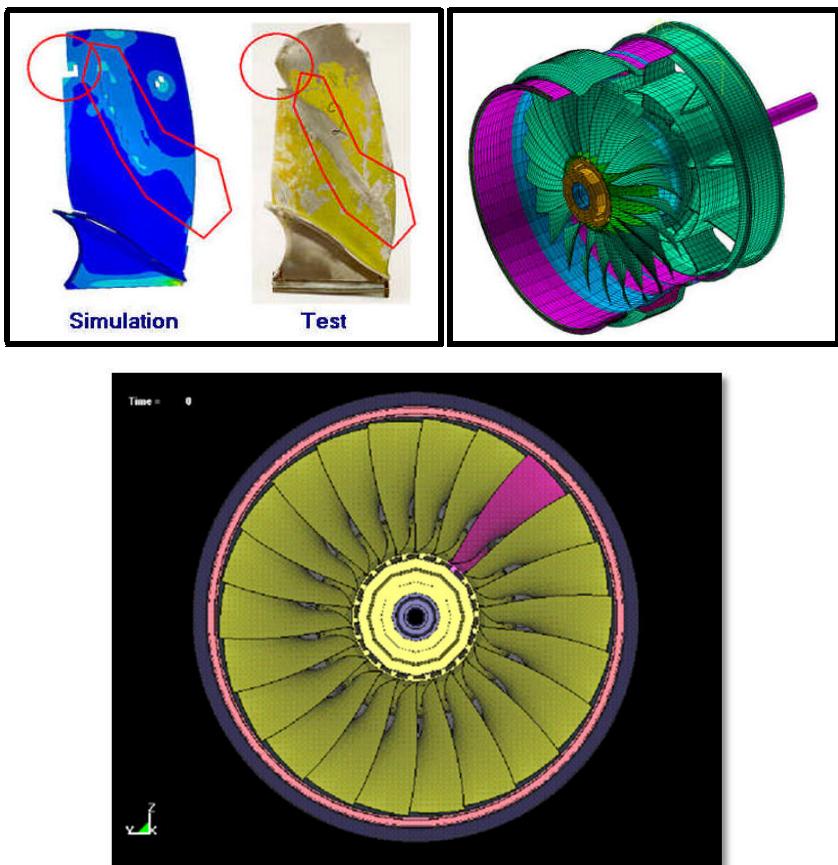


Figura 9-19

Combinación del análisis modal con el análisis de elementos finitos

Como se mencionó anteriormente, el análisis modal se realiza a menudo en el prototipo con el fin de probar la precisión del modelo de elemento finito. Se pueden realizar cambios en el modelo hasta que coincida con los resultados experimentales. Una vez que el modelo es

refinado, se pueden realizar simulaciones adicionales, y se pueden realizar mejoras adicionales en el diseño.

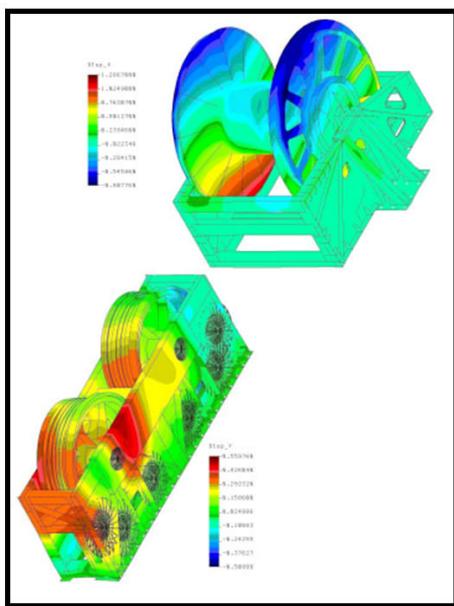


Figura 9-20

Puntos clave

- ☒ Los estudiantes deben entender las diferencias entre ODS y el análisis modal y cuándo utilizar cada uno.
- ☒ Los estudiantes deben entender la metodología de prueba de análisis modal usando un agitador o martillo calibrado
 - Esto incluye la configuración del recopilador de datos
 - Esto incluye comprender los datos que se recopilan
 - Selección de puntas de martillo
- ☒ Los estudiantes deben entender las mediciones FRF y coherencia
- ☒ Los estudiantes deben entender la medición del punto de conducción
- ☒ Los estudiantes deben entender el principio de reciprocidad en términos de martillo móvil o sensor móvil
- ☒ Tenga en cuenta la orientación del sensor y las referencias de fase.
- ☒ Los estudiantes deben entender cómo se utiliza el análisis modal junto con FEA